Plan de trabajo

Control coherente y efectos de decoherencia en sistemas de qubits de estado sólido

Fundamentación

La reducción del tamaño de los dispositivos electrónicos ha resaltado la importancia del estudio de efectos cuánticos en dichos sistemas, tales como la coherencia y la interferencia. El control de dichos efectos es importante tanto para proporcionar un mejor entendimiento de las leyes microscópicas fundamentales como para dar nuevas funcionalidades a estos dispositivos. Es, por lo tanto, de gran interés poder manipular los parámetros del sistema para sintonizar sus propiedades en favor de diseños ventajosos de futuras aplicaciones electrónicas. Durante los últimos años, se ha dedicado un gran esfuerzo a la manipulación coherente de diversas propiedades de varios sistemas de baja dimensionalidad a escala nanométrica. Por ejemplo, se han formulado diversas propuestas para la manipulación de las corrientes de cargas o espines a través de moléculas, o el control de las cargas o las poblaciones electrónicas en estados de puntos cuánticos, mediante campos ópticos, eléctricos y magnéticos. En sistemas de puntos cuánticos, las propiedades de interés son aquellas relacionadas con el control de los estados electrónicos y de espín a través de ellas, mediante pulsos de láser, potenciales eléctricos o campos magnéticos externos.

En particular, un sistema de gran interés han sido los puntos cuánticos dobles, cuya factibilidad de control ha sido estudiada tanto teórica [1-4] como experimentalmente [5-10], con el objeto de diseñar esquemas útiles para el procesamiento cuántico de información basado en dispositivos de estado sólido [11]. En este contexto, los métodos de *control óptimo*, tienen un particular interés debido a su característica de producir pulsos que maximizan la población de los estados electrónicos de interés (estados *target*) [4, 7, 9, 12, 13].
Desde la propuesta original de Loss y DiVincenzo [14], diversas variantes han sido introducidas para codificar qubits: la localización de un único electrón en dos QDs (qubit de carga), estados singulete y triplete de un par de QDs simplemente ocupados (qubit singulete-triplete), estados del subespacio doblete de un sistema de tres QDs simplemente ocupados (*exchange-only* qubit).
El qubit de Loss-DiVincenzo permite control de los qubits de espín electrónico a través de la interacción de intercambio que actúa sobre pares de qubits. Sin embargo, el control de arreglos de qubits idénticos mediante resonancia de espín electrónica presenta dificultades experimentales debido a la precisión requerida para aplicar pulsos magnéticos a QDs individuales.
El qubit de carga presenta elevada sensibilidad a las fluctuaciones de campo eléctrico, perdiendo coherencia de fase en nanosegundos, aunque se ha demostrado experimentalmente velocidades de operación del picosegundo [15].

El qubit singulete-triplete presenta menor sensibilidad a las fluctuaciones de campo magnético de los espines nucleares circundantes, aunque las compuertas de doble qubits presentan desventajas experimentales por su limitado tiempo de coherencia.
El qubit de tres espines en tres QDs presenta interesantes ventajas: el qubit está codificado en estados dobletes de la misma componente de espín S_Z y presenta baja sensibilidad a efectos de decoherencia. Diferentes geometrías presentan características propias; recientemente se han estudiado configuraciones lineales [16, 17, 18] y, en menor medida, triangulares [19, 20]. En este último trabajo, se ha analizado la generación y dinámica de los qubits en la configuración triangular para el caso de transiciones de Landau-Zener (LZ), es decir, bajo la acción de un pulso eléctrico que depende linealmente con el tiempo. Otras excitaciones restan por ser exploradas para este mismo sistema bajo diferentes condiciones de simetría, dada la rica variedad de posibilidades esperables en el espectro de esta configuración de QDs. Particularmente sería de interés caracterizar la eficiencia de pulsos eléctricos diseñados mediante teoría de control óptimo, cuya aplicación a qubits de carga resulta en pulsos rápidos de gran fidelidad, según hemos demostrado en un trabajo reciente [21].

Objetivo general

Estudiar, mediante métodos teóricos y computacionales, la dinámica de los estados electrónicos en nanoestructuras semiconductoras, particularmente en sistemas de puntos cuánticos, mediante la aplicación de campos eléctricos y magnéticos dependientes del tiempo.

Objetivos particulares

1. *Aplicar y comparar distintas metodología de cálculo de estructura electrónica de sistemas de puntos cuánticos*: métodos *all*-electron de primeros principios, desarrollos en funciones de base, interacción de configuraciones, hamiltonianos efectivos, y su implementación en códigos propios en uso en el grupo de trabajo.
2. *Caracterizar la influencia de la configuración espacial de los sistemas de puntos cuánticos (QDs) sobre los estados del espacio lógico que codifica el qubit*. Se explorarán diferentes modelos de topologías de arreglos de QDs y sus parámetros, tales como configuraciones lineales, laterales, anulares, en condiciones simétricas y asimétricas de acoplamientos y tensiones de confinamiento lateral.
3. *Estudiar la eficiencia del control dinámico de los estados cuánticos lógicos bajo diferentes pulsos eléctricos o magnéticos de control coherente*. La medida de *fidelidad* permite caracterizar la eficiencia de un pulso de forzado para alcanzar el estado blanco. Se aplicarán, entre otros, pulsos basados en la teoría de control óptimo y pulsos periódicos.
4. *Cuantificar las pérdidas de eficiencia por transiciones fuera del espacio lógico (leakage) y por interacción con el ambiente (decoherencia)* e introducir correcciones a los modelos y algoritmos de control coherente previamente propuestos, que contribuyan a compensar tales pérdidas.

5. *Diseñar métodos de control coherente en sistemas de dos o más qubits acoplados*, cuantificar su eficiencia y velocidad de operación para diferentes regímenes de sus configuraciones y parámetros de control.
6. *Desarrollar y aplicar modelos de decoherencia para estudiar la dinámica de qubits debido a la interacción con el entorno.*

Tareas o actividades a realizar para el logro de los objetivos particulares

1. Cálculo de estructura electrónica de sistemas de dobles y triples QDs con modelos de potenciales de confinamiento.
2. Implementación de modelos basados en Hamiltonianos efectivos y comparación con métodos all-electron correlacionados.
3. Exploración y optimización de regímenes de parámetros de los modelos y condiciones de simetría de los QDs.
4. Estudiar distintas configuraciones espaciales de los estados de diferentes sistemas de QDs: topologías lineal, lateral, anular.
5. Caracterizar el efecto de condiciones simétricas y asimétricas de acoplamientos y tensiones de confinamiento lateral.
6. Estudiar la eficiencia de la dinámica de los estados cuánticos lógicos bajo diferentes pulsos eléctricos o magnéticos de control coherente, en particular, pulsos basados en la teoría de control óptimo y pulsos periódicos.
7. Cuantificar las pérdidas de eficiencia por *leakage* y decoherencia
8. Desarrollar modelos teóricos para incluir efectos de decoherencia en los modelos y algoritmos de control coherente previamente propuestos.
9. Diseñar métodos de control coherente en sistemas de dos o más qubits acoplados, cuantificar su eficiencia y velocidad de operación para diferentes regímenes de sus configuraciones y parámetros de control.

Recursos asignados al plan

Los principales recursos requeridos para el desarrollo del presente plan son computacionales. Los mismos están cubiertos mediante el cluster de nodos dual core Opteron de la Unidad Ejecutora (12 nodos con un total de 176 Gb RAM y 6 Tb HD).

Referencias

[1] J. R. Petta, A. C. Johnson, C. M. Marcus, M. P. Hanson, and A. C. Gossard, Phys. Rev. Lett. **93**, 186802 (2004).
[2] J. R. Petta, A. C. Johnson, J. M. Taylor, E. A. Laird, A. Yacoby, M. D. Lukin, C. M. Marcus, M. P. Hanson, and A. C. Gossard, Science **309**, 2180 (2005).
[3] J. Gorman, D. G. Hasko, and D. A. Williams, Phys. Rev. Lett. **95**, 090502 (2005).
[4] M. Kataoka, M. R. Astley, A. L. Thorn, D. K. L. Oi, C. H. W. Barnes, C. J. B. Ford, D. Anderson, G. A. C. Jones, I. Farrer, D. A. Ritchie, and M. Pepper, Phys. Rev. Lett. **102**, 156801 (2009).
[5] M. Førre, J. P. Hansen, V. Popsueva, and A. Dubois, Phys. Rev. B **74**, 165304 (2006).
[6] S. G. Kosionis, A. F. Terzis, and E. Paspalakis, Phys. Rev. B **75**, 193305 (2007).
[7] E. Räsänen, A. Castro, J. Werschnik, A. Rubio, and E. K. U. Gross, Phys. Rev. B **77**, 085324 (2008).

[8] L. Sælen, R. Nepstad, I. Degani, and J. P. Hansen, Phys. Rev. Lett. **100**, 046805 (2008).
[9] R. Nepstad, L. Sælen, I. Degani, and J. P. Hansen, J. Phys.: Condens. Matter **21**, 215501 (2009).
[10] A. Fountoulakis, A. F. Terzis, and E. Paspalakis, J. Appl. Phys. **106**, 074305 (2009).
[11] D. Loss and D. P. DiVincenzo, Phys. Rev. A **57**, 120 (1998).
[12] V. Popsueva, M. Førre, J. P. Hansen, and L. Kocbach, J. Phys.: Condens. Matter **19**, 196204 (2007).
[13] J. Särkkä and A. Harju, Phys. Rev. B **80**, 045323 (2009).
[14] D. Loss D, D. P. DiVincenzo, Phys. Rev. A **57**, 120 (1998).
[15] G. Cao, H.-O. Li, T. Tu, L. Wang, C. Zhou, M. Xiao, G.-C. Guo, H.-W. Jiang and G.-P. Guo, Nat. Commun. **4**, 1401 (2013).
[16] J. Fei, J.-T. Hung, T. S. Koh, Y.-P. Shim, S. N. Coppersmith, X. Hu, M. Friesen, Phys. Rev. B **91**, 205434 (2015).
[17] A. Pal, E. I. Rashba, B. I. Halperin, Phys. Rev. X **4**, 011012 (2014).
[18] M. Busl, R. Sánchez, G. Platero, Phys. Rev. B **81**, 121306(R) (2010).
[19] J. Łuczak and B. R. Bułka, Phys. Rev. B **90**, 165427 (2014).
[20] J. Łuczak and B. R. Bułka, Quantum Inf. Process. **16**, 1 (2017)].
[21] D. S. Acosta Coden, R. H. Romero, A. Ferrón and S. S. Gomez, Phys. E **86**, 36 (2017).