

科学研究費補助金（特別推進研究）公表用資料
〔研究進捗評価用〕

平成 18 年度採択分

平成 21 年 4 月 28 日現在

研究課題名（和文） コヒーレント状態と固体量子ビットに基づく
量子情報処理の研究

研究課題名（英文） Qubus Quantum Computer

研究代表者

山本 喜久 (YAMAMOTO YOSHIHISA)

国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・教授



研究の概要： 半導体スピン量子ビットもしくは超伝導磁束量子ビットを微小共振器に閉じ込め、これをコヒーレント状態にある光もしくはマイクロ波パルスを用いて初期化し、制御、測定することにより、スケーラブルな量子情報処理システムを構築する概念を確立する。その候補として、次の2つの方式を取り上げる。第1の方法では、コヒーレント状態にある光パルスで量子ビットを制御することにより、ユニタリゲートモデルもしくは一方向（クラスター状態）量子計算モデルの実現を目指す。第2の方法では、コヒーレント状態にある光パルスで励起子ポラリトンを励起し、そのボーズ・アインシュタイン凝縮（BEC）特性を利用して、人工的に作り込まれた多体ハミルトニアン基底状態を見つけて出す量子アニールマシンの実現を目指す。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：量子コンピュータ、超高速情報処理、微小共振器、光物性、超伝導材料・素子

1. 研究開始当初の背景

スケーラブルな量子コンピュータ開発のネックは、量子ビットの誤り訂正とスワッピングに、量子コンピュータのほとんどのリソースが使われている、という非効率さにあった。この根本的な問題を解決するためには、誤り耐性が自然に備わっていて、しかも現実的なデバイスに基づく量子コンピュータモデルを発見することが必要であった。

2. 研究の目的

大規模な量子コンピュータを実現するための基盤技術として、有力視されている量子ビットを含む共振器量子電磁気学（以下 cavity QED と略す）システムをコヒーレント状態にある電磁波（photon bus と略す）で制御する手法を、半導体素子と超伝導素子によって実現するための基礎技術を確立することを目指す。本研究では、この photon bus 量子コンピュータの中でも将来の集積化・大規模化に有利な固体素子に的を絞って研究を行なうことを提案する。

3. 研究の方法

量子計算モデルの研究では、1) qubus 量子コンピュータ、2) BEC 量子アニールマシン、の2つを取り上げる。前者は、ユニタリゲート

モデルもしくは一方向量子計算モデルをターゲットとする。後者は、アナログ量子シミュレータをターゲットとする。ハードウェアの研究では、1) 半導体スピン (InAs 量子ドット、 $^{19}\text{F}:\text{ZnSe}$ 、 $^{31}\text{P}:\text{Si}$) cavity QED システム、2) 超伝導磁束量子ビット cavity QED システム、を取り上げる。

4. これまでの成果

(1) コヒーレント状態にある光パルスによる誘導ラマン散乱過程を用いて、GaAs 半導体中の単一の電子スピンを制御するスキームを提案し、実証した。数ピコ秒の光パルスによる誘導ラマン散乱により、回転角 13π までのコヒーレントラビ振動を観測すると共に、ラムゼー干渉計を実現した [Nature 456, 218 (2008)]。コヒーレント状態にある数ピコ秒の光パルスを用いて、1次元格子構造を作り込んだ GaAs プレーナ共振器中の励起子ポラリトンを励起し、これがボーズ・アインシュタイン凝縮の原理によって、30 ピコ秒という高速で基底状態（0 位相 S 波超流動状態）に冷却することを確認した [Nature 450, 529 (2007)]。

(2) qubus 量子コンピュータの理論モデルを多方面から解析し、qubus 量子コンピュータがもつ高い自由度を生かして、光子損失の

[4. これまでの成果 (続き)]

程度に対して効率を最適化するなど、目的に応じて調整可能な新しい量子デバイスの設計に成功した。性能評価の結果で量子通信への有用性などが明らかになり、qubus型の量子デバイスの可能性が大幅に拡張することができた。また、これらの量子デバイスの物理的モデルを構築し解析することで、qubus型の量子デバイスの実現可能性をより精密に解析した。

(3) 核スピンを有する ^{29}Si 安定同位体が徹底的に除去された 99.992%の ^{28}Si 同位体単結晶を作製し、その結晶中に添加されたリン不純物に束縛された電子スピンのコヒーレンスが温度 6Kにおいて 0.3 秒以上にも上ることを実測することに成功した。また、最終目標であるリン電子スピンと核スピンのエンタングルメント実験に向けて重要となる電子スピンと核スピンの間で量子状態をコヒーレントに転送することに成功し、 ^{31}P 核スピンのコヒーレンスがやはり 6Kにおいて 3 秒にも上ることを実測することに成功した。

(4) 磁束量子ビットのコヒーレンス時間改善のために、スイッチング測定系における高周波ノイズを徹底的に除去し、エネルギー緩和過程の抑制に成功した。これによって、縮退点近傍でのエネルギー緩和時間 (T_1)、位相緩和時間 (T_2) 共に数マイクロ秒 (約 30 倍) に達し、量子ビットのコヒーレンス時間は飛躍的に改善した。縮退点における高周波側波帯 2 光子遷移と自由発展を組み合わせた高いゲートフィデリティが期待される qubus CNOT パルススキームを開発した。透過型伝送線路共振器を用いた JBA 測定法の開発では、凡そ 150ns で量子状態の識別が可能となる高速低侵襲測定を実証した。

5. 今後の計画

(1) CPMG あるいはそれに類似したリフォーカス光パルス列による InAs 量子ドット中の電子スピンの T_2 時間の改善。2つの InAs 量子ドット、あるいは $^{19}\text{F}:\text{ZnSe}$ からの識別できない単一光子の発生と、これを検出することによる電子スピンエンタングルメントの形成。コヒーレント状態にある光パルスを用いた 2 ビット演算回路の簡略化。

(2) 量子情報処理を行うのに必要な相互作用と、それを用いたゲートの構築・解析を行い、物理系の性質がより有効となるように量子情報処理系を構築し、その効率を解析する。

(3) シリコン中のリン電子スピンと核スピン量子ビットにおいて 2 量子ビット演算の実行を目指す。

(4) 十分長い光子寿命 ($Q \sim 10^5$) を有する超伝導マイクロ波共振回路と磁束量子ビット回路が共存し得る試料作製条件を見い出し、

精度の高い超伝導量子ビット cavity QED 実験系の実現を目指す。同時に、共振回路中のマイクロ波光子を媒介とした 2 量子ビットゲートの実証実験を行なう。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)
1. K. Semba, J. Johansson, K. Kakuyanagi, H. Nakano, S. Saito, H. Tanaka and H. Takayanagi “Quantum State Control, Entanglement, and Readout of the Josephson Persistent-Current Qubit,” Quantum Information Processing: Volume 8, Issue 2 (2009), Page 199-215, Special Issue: Quantum Computing with Superconducting Qubits, Ed. by A. Korotkov, Springer-Verlag.
 2. D. Press, T.D. Ladd, B. Zhang, and **Y. Yamamoto** “Complete quantum control of a single quantum dot spin using ultrafast optical pulses,” Nature 456, 218-221 (2008).
 3. W. J. Munro, R. Van Meter, S. G. R. Louis, and Kae Nemoto, “High-bandwidth hybrid quantum repeater,” Phys. Rev. Lett., 101, 040502 (2008).
 4. S. Miyamoto, K. Nishiguchi, Y. Ono, K. M. Itoh, and A. Fujiwara, “Escape Dynamics of a Few Electrons in a Single-Electron Ratchet using Silicon Nanowire Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor,” Appl. Phys. Lett. 93, 222103 (2008).
 5. C. W. Lai, N. Y. Kim, S. Utsunomiya, G. Roumpos, H. Deng, M. D. Fraser, T. Byrnes, P. Recher, N. Kumada, T. Fujisawa, and **Y. Yamamoto**, “Coherent zero-state and π -state in an exciton-polariton condensate array” Nature 450, 529-532 (2007).
 6. 根本香絵, HP Labs Innovation Research Program – Award ID 2008-1019 (2008)
 7. 伊藤公平 第 5 回 (平成 20 年度) 日本学術振興会賞 (JSPS PRIZE) 受賞

ホームページ等

<http://www.stanford.edu/group/yamamotogroup/>
<http://www.qis.ex.nii.ac.jp/>
http://www.appi.keio.ac.jp/Itoh_group
http://www.brl.ntt.co.jp/J/group_007/group_007.html