

研究種目：特別推進研究

研究期間：2006 ～ 2010

課題番号：18001002

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

研究者番号：60370102

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. 研究計画の概要

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、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パルスで共振器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出す量子計算モデルの実現を目指す。

### 2. 研究の進捗状況

(1) 光パルスによる誘導ラマン散乱過程を用いて、半導体中の単一電子スピンを制御するスキームを提案し、実証した。ピコ秒光パルスにより、回転角  $13\pi$  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)]。ピコ秒光パルスを用いて、1次元格子構造を作り込んだプレーナ共振器中の共振器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、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 量子情報処理の考えに基づき、目的に応じた様々な基本素子を構築して Qubus 量子情報処理の効率を評価、従来の方

法と比較して効率的なシステムが構成可能であることを示した。また、Qubus 型素子による大規模量子情報処理のアーキテクチャーを具体的に構成することに成功し、Qubus 型素子のもつ将来性を理論的に示した。

(3) 核スピンを有する  $^{29}\text{Si}$  安定同位体が徹底的に除去された 99.992%の  $^{28}\text{Si}$  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、リン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、 $^{31}\text{P}$  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除去し、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)に達した。透過型伝送線路共振器を用いた JBA 測定法で、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。

### 3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している

(理由)

実験技術は確実に進歩し、新しい知見は得られているが、目指した地点（スケーラブルな量子コンピュータの実現手段の発見）へ到達するためには、より画期的なアイデアの出現が待たれる。可能性のありそうな道を手探りで探しているのが現状であり、当分間、このようなブラウン運動が続くものと思われる。

#### 4. 今後の研究の推進方策

(1) リフォーカス光パルス列により InAs 量子ドット中の電子スピンの  $T_2$  時間を改善する。2つの量子ドット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を実現する。光パルスを用いた2ビット演算回路を簡略化する。

(2) これまでの解析を量子ネットワークへ拡張し、Qubus 型素子を用いた量子ネットワークを具体的に構築し、量子情報処理プロトコル、量子制御、基本素子を再検討する。最新の実験的な進展を加味し、実験グループとも協力しながら Qubus 型素子の新しい実現化の可能性を探求する。

(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条件を見出し、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。

#### 5. 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 53 件)

- 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. 査読有
- 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). 査読有
- 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). 査読有
- 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). 査読有

- 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  $\pi$ -state in an exciton-polariton condensate array” Nature 450, 529-532 (2007). 査読有

[学会発表] (計 103 件)

- ① Y. Yamamoto, “Ultrafast Optical Control of Semiconductor Spin Qubits,” Nobel Symposium 2009, Gothenburg, Sweden (May 26, 2009).
- ② K. Semba, “Quantum control of the flux qubit coupled to microwave photon system,” Int. Conference on Solid state quantum information, Scuola Normale Superiore di Pisa, Italy, (Dec. 3-6, 2008).
- ③ Kae Nemoto, “A high bandwidth hybrid quantum repeater,” TQC 2008, Tokyo (Jan. 30 - Feb. 1, 2008).
- ④ K. M. Itoh, “Silicon Nanoelectronics,” The International Electronic Device Meeting (IEDM), Washington DC, USA (Dec. 10-12, 2007).

[産業財産権]

○出願状況 (計 4 件)

名称: 測定装置

発明者: 角柳孝輔、仙場浩一

権利者: 日本電信電話株式会社

種類: 特許

番号: 特願 2009-121380

出願年月日: 2009年5月19日

国内外の別: 国内

名称: 量子計算装置および量子もつれ制御方法

発明者: 角柳孝輔、中ノ勇人、仙場浩一、  
上田 正仁

権利者: 日本電信電話株式会社

種類: 特許

番号: 番号: 特開 2008-047678

出願年月日: 2006年8月15日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ

<http://www.stanford.edu/group/yamamotogroup/>

<http://www.qis.ex.nii.ac.jp/>

[http://www.appi.keio.ac.jp/Itoh\\_group](http://www.appi.keio.ac.jp/Itoh_group)

[http://www.brl.ntt.co.jp/J/group\\_007/group\\_007.html](http://www.brl.ntt.co.jp/J/group_007/group_007.html)

