

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 24 年 6 月 22 日現在

機関番号：62615

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

研究成果の概要（和文）：コヒーレント状態の光パルスと固体量子ビットに基づく誤り耐性量子コンピュータのアーキテクチャーと要素技術の開発を行なった。アーキテクチャーにおいては、物理層から応用層に至る5層の階層構造を提案し、素因数分解と量子化学計算という2つのアルゴリズムを実行するためのリソース（量子ビット数 $10^8 \sim 10^9$ 、計算時間 1～10 日）を明らかにした。要素技術においては、光パルス制御半導体スピン、トンネルエネルギー可変型超伝導磁束量子の制御技術、デコヒーレンス特性の解明を進めた。

研究成果の概要（英文）：Architectures and system constituent technologies for fault-tolerant quantum computers based on coherent optical pulses and solid state qubits are studied. We proposed the layered architecture with topological surface codes and showed the total number of physical qubits of $10^8 \sim 10^9$ and computational time of 1-10 days are needed to perform meaningful computations. We also developed the coherent optical pulse controlled spin qubit and variable tunnel energy Josephson junction flux qubit technologies.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	98,800,000	29,640,000	128,440,000
2007年度	115,300,000	34,590,000	149,890,000
2008年度	84,000,000	25,200,000	109,200,000
2009年度	82,800,000	24,840,000	107,640,000
2010年度	71,800,000	21,540,000	93,340,000
総計	452,700,000	135,810,000	588,510,000

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、電子スピン、磁気共鳴、Cavity & circuit QED

1. 研究開始当初の背景

スケ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確立することを目指した。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した。

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) コヒーレント・コンピュータ、の2つを取り上げた。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した。後者は、レーザーネットワークによる NP 完全問題の効率的な計算をターゲットとした。ハードウェアの研究では、1) 半導体スピン(InAs 量子ドット)cavity QED システム、2) 超伝導磁束量子ビット cavity QED システム、を取り上げた。

4. 研究成果

半導体素子グループ I (国立情報学研究所・山本) では、光パルス制御量子ドットスピンを物理層とする誤り耐性量子コンピュータを5層の階層構造からなるアーキテクチャーとして提案し、その性能評価を行なった。その結果、素因数分解と量子化学計算という2つのアルゴリズムを実行するための量子ビット数は $10^8 \sim 10^9$ 、計算時間は1~10日となることが判明した。また、ピコ秒光パルスで制御可能な量子ドットスピン技術確立した。これらの成果は、Nature (2008)、Nature Photonics (2010)、Nature Physic (2012)、Nature (投稿中)などに掲載された。

半導体素子グループ II (慶應義塾大学・伊藤) では、シリコン中のリン電子スピニコヒーレンス時間0.6秒、核スピニコヒーレンス時間2秒以上を平成21年度に達成した為、平成22年度はこのコヒーレンスを制限している要因の詳細なる解析を行った。またこの系を用いてリン電子スピンと核スピンを用いた量子計算に成功し、2量子ビットのエンタングルメントに成功した。これらの成果はNature (2011)に掲載された。

超伝導磁束量子グループ (NTT物性研・仙場) では、トンネルエネルギー可変型超伝導磁束量子ビットの作製に成功した。この改良型の量子ビットを用いて、ダイヤモンドのNVカラーセンターの電子スピン集団と超伝導磁束量子ビット間に強結合状態を準備し、エネルギー量子1個を交換する真空ラビ振動の観測に成功した。電子スピン集団の基底状態と1励起

ディック状態を用いて、量子ビットの重ね合わせ量子状態を数十ナノ秒保存可能なことを世界に先駆けて実証した。この成果はNature (2011)に掲載された。

理論グループ(国立情報学研究所・根本)では、量子情報処理ネットワークの構築方法と誤り訂正について理論的に検討した。固体物理系を中心としたデバイスを量子情報処理システムの中核として、個々のデバイスを量子バスで結ぶシステムを考案した。このモデル上で、量子情報処理システムと量子通信とを統合した量子情報ネットワークを具体的に提案することで、量子情報ネットワークの実現可能性を示した。

5. 主な発表論文等

(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 153 件)

- ① W. Akhtar, V. Filidou, T. Sekiguchi, E. Kawakami, T. Itahashi, L. Vlasenko, J. J. L. Morton, and K. M. Itoh, “Coherent storage of photoexcited triplet states using ^{29}Si nuclear spins in silicon,” Phys. Rev. Lett. 108, 097601 (2012) 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.097601
- ② A. M. Tyryshkin, S. Tojo, J. J. L. Morton, H. Riemann, N. V. Abrosimov, P. Becker, H.-J. Pohl, T. Schenkel, M. L. W. Thewalt, K. M. Itoh, and S. A. Lyon, “Electron spin coherence exceeding seconds in high purity silicon,” Nature Materials 11, 143-147 (2012) 査読有
DOI: 10.1038/nmat3182
- ③ X. Zhu, S. Saito, A. Kemp, K. Kakuyanagi, S. Karimoto, H. Nakano, W. J. Munro, Y. Tokura, M. S. Everitt, K. Nemoto, M. Kasu, N. Mizuochi, and K. Semba, “Coherent coupling of a superconducting flux qubit to an electron spin ensemble in diamond,” Nature 478, 221-224 (2011) 査読有
DOI: 10.1038/nature10462
- ④ A. Kemp, S. Saito, W. J. Munro, K. Nemoto, and K. Semba, “Superconducting qubit as a quantum transformer routing entanglement between a microscopic quantum memory and a macroscopic resonator,” Phys. Rev. B 84, 104505 (2011) 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.84.104505
- ⑤ N. Y. Kim, K. Kusudo, C. Wu, N. Masumoto, A. Löffler, S. Höfling, N. Kumada, L.

- Worschech, A. Forchel, and Y. Yamamoto, “Dynamical d-wave condensation of exciton-polaritons in a two-dimensional square-lattice potential,” *Nature Physics* 7, 681-686 (2011) 査読有
DOI: 10.1038/nphys2012
- ⑥ S. Simmons, R. M. Brown, H. Riemann, N. V. Abrosimov, P. Becker, H.-J. Pohl, M. L. W. Thewalt, K. M. Itoh, and J. J. L. Morton, “Entanglement in a solid-state spin ensemble,” *Nature* 470, 69-72 (2011) 査読有
DOI: 10.1038/nature09696
- ⑦ H. Wu, R. E. George, J. H. Wesenberg, K. Mølmer, D. I. Schuster, R. J. Schoelkopf, K. M. Itoh, A. Ardavan, J. J. L. Morton, and G. A. D. Briggs, “Storage of multiple coherent microwave excitations in an electron spin ensemble,” *Phys. Rev. Lett.* 105, 140503 (2010) 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.140503
- ⑧ E. Abe, A. M. Tyryshkin, S. Tojo, J. J. L. Morton, W. M. Witzel, A. Fujimoto, J. W. Ager, E. E. Haller, J. Isoya, S. A. Lyon, M. L. W. Thewalt, and K. M. Itoh, “Electron spin coherence of phosphorus donors in silicon: Effect of environmental nuclei,” *Phys. Rev. B* 82, 121201(R) (2010) 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.82.121201
- ⑨ W. J. Munro, K. A. Harrison, A. M. Stephens, S. J. Devitt, and K. Nemoto, “From quantum multiplexing to high-performance quantum networking,” *Nature Photonics* 4, 792-796 (2010) 査読有
DOI: 10.1038/nphoton.2010.213
- ⑩ D. Press, K. De Greve, P. L. McMahon, T. D. Ladd, B. Friess, C. Schneider, M. Kamp, S. Höfling, A. Forchel, and Y. Yamamoto, “Ultrafast optical spin echo in a single quantum dot,” *Nature Photonics* 4, 367-370 (2010) 査読有
DOI: 10.1038/nphoton.2010.83
- ⑪ S. J. Devitt, A. G. Fowler, A. M. Stephens, A. D. Greentree, L. C. L. Hollenberg, W. J. Munro, and K. Nemoto, “Architectural design for a topological cluster state quantum computer,” *New J. Phys.* 11, 083032 (2009) 査読有
DOI: 10.1088/1367-2630/11/8/083032
- ⑫ L. Jiang, J. M. Taylor, K. Nemoto, W. J. Munro, R. V. Meter, and M. D. Lukin, “Quantum repeater with encoding,” *Phys. Rev. A* 79, 032325 (2009) 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevA.79.032325
- ⑬ 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*, 199-215 (2009) 査読有
DOI: 10.1007/s11128-009-0098-9
Special Issue: Quantum Computing with Superconducting Qubits, Ed. By A. Korotkov, Springer-Verlag
- ⑭ 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
DOI: 10.1038/nature07530
- ⑮ S. Utsunomiya, L. Tian, G. Roumpos, C. W. Lai, N. Kumada, T. Fujisawa, M. Kuwata-Gonokami, A. Löffler, S. Höfling, A. Forchel, and Y. Yamamoto, “Observation of Bogoliubov excitations in exciton-polariton condensates,” *Nature Physics* 4, 700-705 (2008) 査読有
DOI: 10.1038/nphys1034
- ⑯ W. J. Munro, R. Van Meter, S. G. R. Louis, and K. Nemoto, “High-bandwidth hybrid quantum repeater,” *Phys. Rev. Lett.* 101, 040502 (2008) 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.101.040502
- ⑰ 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) 査読有
DOI: 10.1038/nature06334
- ⑱ J. Johansson, S. Saito, T. Meno, H. Nakano, M. Ueda, K. Semba, and H. Takayanagi, “Vacuum Rabi oscillations in a macroscopic superconducting qubit LC oscillator system,” *Phys. Rev. Lett.* 96, 127006 (2006) 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.127006

[学会発表] (計 361 件)

- ① X. Zhu, “Coupling an ensemble to a superconducting qubit,” 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26) (Aug. 11, 2011) Beijing, China

② K. Semba, "Vacuum Rabi oscillations observed in a flux qubit LC-oscillator system," American Physical Society Match meeting (March 5, 2007) Denver, USA

[産業財産権]

○出願状況 (計 4 件)

名称：量子状態制御方法
発明者：角柳孝輔、ケンプ アレクサンダー、
仙場浩一
権利者：日本電信電話株式会社
種類：特許
番号：2010-205245
出願年月日：平成 22 年 9 月 14 日
国内外の別：国内

名称：超伝導磁束量子ビット回路
発明者：ズー・シャオボ、齊藤志郎、ケンプ・
アレクサンダー、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 2010-151720
出願年月日：平成 22 年 7 月 2 日
国内外の別：国内

名称：多量子ビット量子演算装置
発明者：角柳孝輔、ケンプ アレクサンダー、
齊藤志郎、仙場浩一
権利者：日本電信電話株式会社
種類：特許
番号：2010-062311
出願年月日：平成 22 年 3 月 18 日
国内外の別：国内

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：平成 21 年 5 月 19 日
国内外の別：国内

○取得状況 (計 2 件)

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：4913501
取得年月日：平成 24 年 1 月 27 日
国内外の別：国内

名称：素子状態読み出し装置、方法、および
透過型ジョセフソン共振回路
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：4733085
取得年月日：平成 23 年 4 月 28 日
国内外の別：国内

[その他]

ホームページ

<http://www.qis-tokyo.jp/index.html>
http://www.appi.keio.ac.jp/Itoh_group/
http://www.brl.ntt.co.jp/J/group_007/group_007.html
<http://www.qis.ex.nii.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 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：6 0 3 7 0 1 0 2

(2) 研究分担者

伊藤 公平 (ITO KOHEI)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究番号：3 0 2 7 6 4 1 4

仙場 浩一 (SEMBA KOUICHI)
NTT 物性科学基礎研究所・量子電子物性研
究部・超伝導量子物理研究グループ・グル
ープリーダー
研究番号：5 0 3 9 3 7 7 3

根本 香絵 (NEMOTO KAE)
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：8 0 3 7 0 1 0 4

(3) 研究協力者

Timothy P. Spiller
Professor, University of Leeds

Gerard Milburn
Professor of Department of Physics
University of Queensland

William J. Munro
NTT 物性科学基礎研究所・量子光物性研究
部・リサーチスペシャリスト