

「情報社会を支える新しい高性能情報処理技術」
平成 13 年度採択研究代表者

伊藤 公平

(慶応義塾大学理工学部 助教授)

「全シリコン量子コンピュータの実現」

1. 研究実施の概要

シリコンを用いた量子コンピュータの構築を目指している。要素技術として、デバイス作製、初期化、量子操作（コヒーレンス制御方法と演算）、読み出し方法の開発が重要である。平成 16 年度までにデバイス作製技術（核スピン制御に必要なシリコン原子鎖の作製と量子ビットの選択的アクセスに必要な強磁性体ストライプ）の開発を終了し、量子操作技術も完成した。そこで平成 17 年度には初期化技術と読み出し技術に着目し、特に ^{29}Si 核スピン量子ビットの初期化と読み出しに向けては、故意に添加されたリン不純物に束縛された電子のスピンを利用することが有用であることを実験により示した。今後はリン不純物を ^{29}Si 量子ビットの最近接に位置づける原子配置技術と、それらを利用した初期化と読み出しを実験により示すことが目標である。

2. 研究実施内容

研究目的

全シリコン量子コンピュータを開発するために必要な 5 つの要素である、1) 計算機科学的考察、2) デバイス作製技術、3) 初期化技術、4) 量子演算技術、5) 読み出し技術のすべてを確立したうえで統合することから半導体シリコンに基づく量子コンピュータを開発する。以下に 5 つの項目それぞれに対する進捗状況を示す。

計算機科学

本チームが着目する ^{29}Si 量子ビットでは、位相緩和時間が 25 秒と量子システムとして測定された世界最長のコヒーレンスを得ることに成功した。25 秒という極めて長い位相緩和時間中には、最も難しいとされる 2 量子ビット演算でさえ 1 万回以上実行可能であることを理論的に示した。我々の見積もりでは 25 秒は実験的限界ではなく、さらに伸ばせると考えている。すなわち、 ^{29}Si 核スピン量子ビットは多くの演算回数を要する量子アルゴリズムの実行に適していることがわかった。一方、 ^{29}Si 核スピン量子ビットでは 1 回の演算に要する時間が比較的長い（端的にはクロックスピードが 10kHz 程度と低い）

こともわかった。これは GHz で動作する超伝導量子ビットより数桁遅く、結果として演算処理速度において不利なことが予想される。そこでショアの素因数分解アルゴリズムを例として計算機科学的な考察を行った結果、超伝導はクロックスピードは速いが、位相緩和時間が短すぎる。そして、全シリコン量子コンピュータはクロックスピードはやや遅いが、位相緩和時間が十分に長いことがあきらかになった。さらなる解析の結論は、超伝導は CPU、シリコン量子コンピュータはメモリーといった適材適所の役割分担を負わせることの必要性である。超伝導量子ビットがすばやく計算している途中、時間切れで情報を失わないうちにメモリーであるシリコン量子ビットに量子情報を移動するのである。メモリーといっても、量子コンピュータにおけるメモリーも、やはり量子コンピュータである必要がある。シリコン量子メモリーは、格納された量子情報を永遠に保持するために、エラー訂正という量子計算をひたすら続ける必要がある。その計算には膨大な演算回数が必要なため、シリコン量子コンピュータでしか対応できない。このような側面をスピン物性と計算機科学の両側面から解析できたことが 16 年度までの成果であったが、17 年度には、エラー訂正などのアルゴリズムを含めた全シリコン量子コンピュータの性能予測を理論的に実施し、本提案が現実的であることを計算機科学的に示した。

デバイス作製

分子線エピタキシー (MBE) 装置を用いて、平成 16 年度までに開発した核スピン量子ビットを一行に並べる技術をさらに進めて、実際の量子計算機として応用するために必要なナノ ^{29}Si 量子ビット構造の作製に成功した。

初期化

同位体純度の高い ^{28}Si 高純度単結晶中において、 ^{31}P 核スピンの初期化を束縛エキシトンおよび光電気伝導によって達成する新しい手法の開発に成功した。また、Si 中のキャリアスピンと核スピンのダイナミクスに関しても量子制御にむけて有益な物理的な知見を得ることに成功した。

演算

核スピンのスピンメモリー時間を伸ばすための量子操作が重要であり、16 年度までにメモリー時間を 25 秒まで伸ばすことに成功した。17 年度は、量子演算用のパルスとスピンメモリー増加のためのパルスを併用することの現実性を評価した。ここでは、パルス列を効率的に照射するためのコンピュータプログラミングといった工学的課題に取り組んだ。

読み取り（慶應大，新潟大，国立情報研）

同位体純度の高い ^{28}Si 高純度単結晶中において， ^{31}P 核スピンの読み出しを束縛エキシトンおよび光電気伝導によって実現する新しい手法の開発に成功した．現在はアンサンブル測定であるため，これを単一核スピン読み出しにつなげる方法を検討している．

3. 研究実施体制

「伊藤公平」グループ

①研究分担グループ長：伊藤 公平（慶大理工、助教授）

②研究項目：

- ・全体のとりまとめ
- ・同位体入手・MBE 成長用基板作製または入手・同位体超格子と細線の作製
- ・核スピニコヒーレンス（位相緩和時間）測定
- ・RF パルス照射による核スピン量子操作

「松本佳宣」グループ

①研究分担グループ長：松本 佳宣（慶大理工、助教授）

②研究項目：

- ・マイクロマシンニング関連全般
- ・カンチレバーの設計・作製
- ・カンチレバー動作のシミュレーション

「大野裕三」グループ

①研究分担グループ長：大野 裕三（東北大電通研、助教授）

②研究項目：

- ・全光 NMR 法を利用した初期化法の確立
- ・全光 NMR 法を利用した核スピン量子操作法の確立
- ・偏極電子スピン注入による核スピンの初期化

「佐々木 進」グループ

①研究分担グループ長：佐々木 進（新潟大学、助教授）

②研究項目：

- ・標準型 NMR 法を利用したシリコン核スピン緩和時間測定
- ・標準型 NMR 法を利用した初期化法の確立
- ・標準型 NMR 法を利用した核スピン量子操作法の確立

「王 東方」グループ

①研究分担グループ長：王 東方（石巻専修大学、助教授）

②研究項目：

- ・ マイクロマグネットとカンチレバーの製作

「山本 喜久」グループ

①研究分担グループ長：山本 喜久（国立情報研、教授）

②研究項目：

- ・ 量子計算理論全般
- ・ 量子演算アルゴリズムの考案
- ・ RF パルス照射による核スピン量子操作

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

（1） 論文（原著論文）発表

伊藤公平

- R. N. Pereira, B. B. Nielsen, J. Coutinho, V. J. B. Torres, R. Jones, T. Ohya, K. M. Itoh, and P. R. Briddon, “Anharmonicity and Lattice Coupling of Bond-Centered Hydrogen and Interstitial Oxygen Defects in Monoisotopic Silicon Crystals,” Phys. Rev. B **72**, 115212 (2005).
- T. Ohya, K. M. Itoh, R. N. Pereira, and B. B. Nielsen, “Host Isotope Effect on the Local Vibration Modes of VH₂ and VOH₂ Defects in Isotopically Enriched ²⁸Si, ²⁹Si and ³⁰Si Single Crystals,” Jpn. J. Appl. Phys. **44**, No.10 (2005).
- T. Sekiguchi, S. Yoshida, and K. M. Itoh, “Self-assembly of Parallel Atomic Wires and Periodic Clusters of Silicon on a Vicinal Si(111) Surface,” Phys. Rev. Lett. **95**, 106101 (2005).
- S. Yoshida, T. Sekiguchi, and K. M. Itoh, “Atomically Straight Steps on Vicinal Si(111) Surfaces Prepared by Step-parallel Current in the Kink-up Direction,” Appl. Phys. Lett. **87**, 031903 (2005).
- A. S. Verhulst, I. G. Rau, Y. Yamamoto, and K. M. Itoh, “Optical Pumping of ²⁹Si Nuclear Spins in Bulk Silicon at High Magnetic Field and Liquid Helium Temperature,” Phys. Rev. B **71**, 235206 (2005).
- G. Davies, S. Hayama, S. Hao, J. Coutinho, S. K. Estreicher, M. Sanati, and K. M. Itoh, “Lattice Isotope Effects on the Widths of Optical Transitions in Silicon,” J. Phys.: Condens. Matter **17**, S2211-2217 (2005).
- D. F. Wang, A. Takahashi, Y. Matsumoto, K. M. Itoh, Y. Yamamoto, T. Ono, and M. Esashi, “Magnetic Mesa Structures Fabricated by Reactive Ion Etching with CO/NH₃/Xe Plasma

- Chemistry for an All-Silicon Quantum Computer*," Nanotechnology, **16**, 990-994 (2005).
- R. Van Meter, and K. M. Itoh, "*Fast quantum modular exponentiation*," Phys. Rev. A **71**, 052320 (2005).
 - E. Abe, J. Isoya, and K. M. Itoh, "*Electron Spin Coherence of Phosphorus Donors in Isotopically Purified ^{29}Si* ," Journal of Superconductivity **18**, 157 (2005).
 - Gordon Davies, S. Hayama, Shiqiang Hao, B. Bech Nielsen, J. Coutinho, M. Sanati, S. K. Estreicher, and K. M. Itoh, "*Host isotope effects on midinfrared optical transitions in silicon*," Phys. Rev. B **71**, 115212 (2005).
 - K. M. Itoh, "*An All-Silicon Linear Chain NMR Quantum Computer*," Solid State Commun. **133**, 747-752 (2005).
 - T. D. Ladd, D. Maryenko, Y. Yamamoto, E. Abe, and K. M. Itoh, "*Coherence Time of Decoupled Nuclear Spins in Silicon*," Phys. Rev. B **71**, 014401 (2005).

大野裕三

- C. Y. Hu, K. Morita, H. Sanada, S. Matsuzaka, Y. Ohno, and H. Ohno, "*Spin Precession of Holes in Wurtzite GaN Studied Using Time-resolved Kerr Rotation Technique*", Physical Review B **72**, 121203 (2005).
- K. Morita, H. Sanada, S. Mastuzaka, C. Y. Hu, Y. Ohno, and H. Ohno, "*Strong Anisotropic Spin Dynamics in Narrow n-InGaAs/AlGaAs (110) Quantum Wells*", Applied Physics Letters **87**, 171905 (2005).
- H. Sanada, Y. Kondo, S. Matsuzaka, K. Morita, C. Y. Hu, Y. Ohno, and H. Ohno, "*Optical Pump-Probe Measurements of Local Nuclear Spin Coherence in Semiconductor Quantum wells*", Physical Review Letters **96**, 067602 (2006).

山本喜久

- Y. Yamamoto, C. Santori, G. Solomon, J. Vuckovic, D. Fattal, E. Waks, and E. Diamanti, "*Single photons for quantum information systems*", Progress in Informatics **1**, 5-37 (April 2005)
- A. Verhulst, Y. Yamamoto, and K. Ito, "*Optical Pumping of ^{29}Si Nuclear Spins in Bulk Silicon at High Magnetic Field and Liquid Helium Temperature*", Phys. Rev. B, **71**, 235206 (June 2005)
- C. Santori, Y. Yamamoto, S. Gotzinger, S. Kako, K. Hoshino, and Y. Arakawa, "*Photon Correlation Studies of Single GaN Quantum Dots*", Applied Physics Letters **87**, 051916 (July 2005)
- D. Englund, D. Fattal, E. Waks, G. Solomon, B. Zhang, T. Nakaoka, Y. Arakawa, Y. Yamamoto, and J. Vukovic, "*Controlling the Spontaneous Emission Rate of Single Quantum*

Dots in a Two-Dimensional Photonic Crystal", Phys. Rev. Lett. 95, 013904 (July 2005)

- Y. Yamamoto, "*Single photons and entangled photon-pairs from a quantum dot*", Optronics 9, 134-144 (September 2005) (Japanese Journal)
- K.C. Fu, C. Santori, C. Stanley, M.C. Holland, Y. Yamamoto, "*Coherent Population Trapping of Electron Spins in a High-Purity n-Type GaAs Semiconductor*", Phys. Rev. Lett 95, 187405 (October 2005)

(2) 特許出願

H17 年度出願件数： 0 件 (CREST 研究期間累積件数： 2 件)