

「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

(慶應義塾大学理工学部 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）、読出し方法の開発が重要である。デバイス作製に関しては、核スピン制御に必要な半導体同位体超格子の作製と評価に成功し、平行して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進めた。量子操作では、シリコン中の ^{29}Si 同位体核スピン量子ビットの位相緩和時間が25秒にまで延長できることを実験により示した。このことは ^{29}Si 同位体核スピン量子ビットにおいて1量子ビット演算が 10^6 回、2量子ビット演算が 10^4 回実行できることを意味し、 ^{29}Si 同位体核スピンが量子ビットの候補として非常に有望であることが示された。読出しに関しては固体NMR法を用いて 10^{18} 個の核スピンをワンショットで検知する技術を確立した。今後は初期化方法と量子演算法の確立を進め、最終的にはシリコンを用いて量子演算をデモンストレーションすることを目標とする。

2. 研究実施内容

量子コンピュータは現在のコンピュータの不可能を可能にし得るコンピュータとして期待されている。現時点で役に立ちそうな量子計算用のアルゴリズムは、グローバーのデータベース検索とショアの素因数分解の2つ程度しかないが、それだけでも、現在のコンピュータでは不可能な問題が解けるという事実が重要である。長期的には量子力学によって支配されるすべての系のシミュレーションに量子計算が威力を発揮すると期待され、数10年を要するかもしれないが、この夢を机上の空論に終らせないための量子コンピュータ開発が活発化している。量子コンピュータと名乗る以上、単一量子（光子、電子スピン、核スピン、磁束など）か、そのアンサンブルを用いて量子コヒーレンスを保ちながら計算を進めることが必要となる。このような観点から、半導体を扱う研究者の間で電子および核スピンに対する注目が高まっている。半導体、特にGaAs系などの直接遷移型の材料では、励起光の偏光、量子ドットにおけるスピン選択則、量子ホール効果における特定のエッジチャンネルなどを用いて、ある一方向に偏った（偏極した）電子スピンを特定の空間に注入することができる。このようにして生成されたスピン偏極電子を量子操作し、最終的に

読み出すことによって量子コンピュータが実現する。また、偏極した電子が半導体を構成する元素の核スピンと相互作用し、結果として電子スピンを通した核スピン制御も可能になる。核スピンのコヒーレンスは、光学的カー回転や電気伝導に顕著に現れる。本研究はシリコン中の核スピンと電子スピンのコヒーレンスを制御して量子コンピュータを実現することを目的としている。

核および電子スピンのコヒーレンス制御となると、最終的には結晶中の核スピンの配置も自由自在に操れることが望ましい。それを実現するのが半導体同位体工学である。例えば、

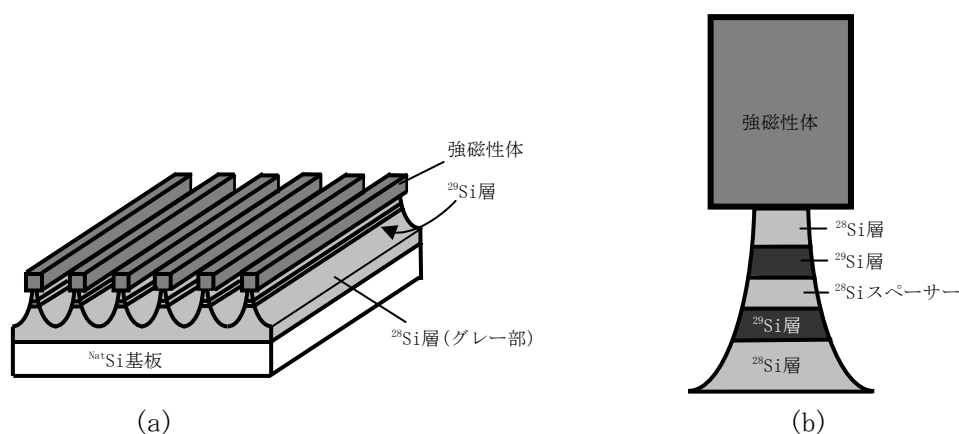


Fig. 1 2量子ビットシリコン量子コンピュータの概観

シリコン元素は、 ^{28}Si (92.2%), ^{29}Si (4.7%), ^{30}Si (3.1%) の3種類の安定同位体から構成され、その自然存在比は括弧内の割合で常に一定である。このうち ^{29}Si のみが核スピン $I=1/2$ を有し、 ^{28}Si と ^{30}Si は核スピンを持たない($I=0$)。すなわち、シリコン結晶中において ^{29}Si の位置が自由自在に制御できれば、任意の核スピン配置が得られる。核スピン同士の双極子相互作用は、結晶構造の対称性や格子定数（または核スピン間の距離）によって変化するので、核スピンコヒーレンスを調べるという観点からは核スピンの配置制御が重要である。我々はシリコン同位体を原子層単位で積み上げ評価する技術を確立しており、 ^{28}Si 結晶中に周期的に埋め込まれた ^{29}Si 核スピン層間の核スピン拡散とコヒーレンスに関する基礎実験も進めている。シリコン単結晶は、比類なき結晶性（欠陥濃度の低さ）と高純度（不純物濃度の低さ）を誇るため、わずかな量の核スピンを上手に導入することから、理想的な核スピンコヒーレンス実験が行えるのである。ちなみに、III-V族に代表される化合物半導体を構成するほとんどの同位体が核スピンをもっていて、核スピンを持たない同位体が存在しない。よって、化合物半導体で核スピンありとなしの箇所を制御することは極めて困難である。これは、電子スピンを利用する場合の欠点ともなりえる。III-V族半導体では核スピンの海の中を電子スピンの注入されることになるが、核スピンは電子スピンのデコヒーレンスの原因となる。よって、半導体同位体工学を通じて核スピンを排除できる点においてもシリコンは非常に魅力的である。

平成15年度は核スピン制御に必要な半導体同位体超格子の作製と評価に成功し、平行して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進めた。核スピン量子ビットでは、シリコン中の ^{29}Si 同位体核スピンの位相緩和時間が25秒にまで延長できることを実験により示した。このことは ^{29}Si 同位体核スピン量子ビットにおいて1量子ビット演算が 10^6 回、2量子ビット演算が 10^4 回実行できることを意味し、 ^{29}Si 同位体核スピンの候補として非常に有望であることが示された。また、シリコン中で電子スピンの量子ビットを実現するために、Si基板上にGe量子ドットの位置と大きさを制御する試みも開始した。Ge量子ドットをSiキャップ層で覆えば、Ge量子ドット直上のシリコン部分に集中する歪により電子が局在できると考える。Si中の局在電子スピンの核スピンとの相互作用に関する研究も開始した。短期的には、伝統的な核磁気共鳴 (NMR) 技術を工夫し発展させることから、電子スピンに頼らずに、直接、核スピンのコヒーレンス制御を行うことがポイントで、その目的にシリコン単結晶が適していることを示した。また、Fig. 1に示す核スピンメサ構造の作製プロセスに関する実験も開始した。

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名 (所属、役職)

伊藤グループ：伊藤公平 (慶應義塾大学理工学部・助教授)

松本グループ：松本佳宣 (慶應義塾理工学部・専任講師)

江刺グループ：江刺正喜 (東北大学工学研究科機械電子工学専攻・教授)

大野グループ：大野裕三 (東北大学電気通信研究所・助教授)

佐々木グループ：佐々木進 (新潟大学工学部・助教授)

山本グループ：山本喜久 (スタンフォード大学・教授)

② 項目

代表者・伊藤グループ：慶應義塾大学理工学部 伊藤公平 (助教授)

- ・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
- ・核スピンコヒーレンス (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

共同研究者・松本グループ：慶應義塾大学理工学部 松本佳宣 (専任講師)

- ・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

共同研究者・江刺グループ：東北大学工学研究科機械電子工学専攻 江刺正喜 (教授)

- ・マイクロマグネットとカンチレバーの製作

共同研究者・大野グループ：東北大学電気通信研究所 大野裕三（助教授）

- ・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

共同研究者・佐々木グループ：新潟大学工学部 佐々木進（助教授）

- ・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

共同研究者・山本グループ：スタンフォード大学工学部 山本喜久（教授）

- ・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

- M. Uematsu, A. Fujiwara, H. Kageshima, Y. Takahashi, S. Fukatsu, K. M. Itoh, K. Shiraishi, and U. Gosele, “*Modeling of Si self-diffusion in SiO₂: Effect of the Si/SiO₂ interface including time-dependent diffusivity,*” Appl. Phys. Lett. **84**, 876–878 (2004).
- T. Graf, T. Ishikawa, K. M. Itoh, E. E. Haller, M. Stutzmann, and M. S. Brandt, “*Hyperfine Interactions at Dangling Bonds in Amorphous Germanium,*” Phys. Rev. B **68**, 205208 (2003).
- S. Fukatsu, T. Takahashi, K. M. Itoh, M. Uematsu, A. Fujiwara, H. Kageshima, Y. Takahashi, and K. Shiraishi, “*The Effect of Partial Pressure of Oxygen on Self-Diffusion on Si in SiO₂,*” Jpn. J. Appl. Phys. **42**, 1492–1494 (2003).
- S. Fukatsu, T. Takahashi, K. M. Itoh, M. Uematsu, A. Fujiwara, H. Kageshima, Y. Takahashi, and K. Shiraishi, “*Effect of the Si/SiO₂ Interface on Self-diffusion of Si in Semiconductor-grade SiO₂,*” Appl. Phys. Lett. **83**, 3897–3899 (2003).
- R. N. Pereira, T. Ohya, K. M. Itoh, and B. Bech Nielsen, “*Local Vibrational Modes of Bond-centered H in ²⁸Si, ²⁹Si, and ³⁰Si crystals,*” Physica E **340–342**, 697–700 (2003).
- K. Tanigaki, T. Shimizu, K. M. Itoh, J. Teraoka, Y. Moritomo, and S. Yamanaka, “*Mechanism of superconductivity in the polyhedral-network compound Ba₈Si₄₆,*” Nature Materials, **2**, 653–655 (2003).

- T. Kojima, K. M. Itoh, and Y. Shiraki, “*Growth and Characterization of $^{28}\text{Si}_n/^{30}\text{Si}_n$ Isotope Superlattices,*” Appl. Phys. Lett. **83**, 2318–2320 (2003).
- K. M. Itoh, J. Kato, F. Uemura, A.K. Kaliteyevskii, O.N. Godisov, G. G. Devyatych, A.D. Bulanov, A. V. Gusev, I.D. Kovalev, P. G. Sennikov, H.-J. Pohl, N.V. Abrosimov, and H. Riemann, “*High Purity Isotopically Enriched ^{29}Si and ^{30}Si Single Crystals: Isotope Separation, Purification, and Growth,*” Jpn. J. Appl. Phys. Pt. 1, **42**, 6248–6251(2003).
- A. S. Verhulst, D. Maryenko, Y. Yamamoto, and K. M. Itoh, “*Double and Single Peaks in Nuclear Magnetic Resonance Spectra of Natural and ^{29}Si Enriched Single Crystal Silicon,*” Phys. Rev. B, Vol. 68, 054105 (1–6) (2003).
- J. Kato, K. M. Itoh, H. Yamada-Kaneta, H.-J. Pohl, “*Host Isotope Effect on the Localized Vibrational Modes of Oxygen in Isotopically Enriched ^{28}Si , ^{29}Si and ^{30}Si Single Crystals,*” Phys. Rev. B **68**, 035205 (2003).
- K. M. Itoh “*Silicon Quantum Computers,*” Solid State Physics, **38**, 269–278 (2003), review article in Japanese.
- E. Abe, K. M. Itoh, T. D. Ladd, J. R. Goldman, F. Yamaguchi, and Y. Yamamoto, “*Solid-State silicon NMR quantum computer,*” Journal of Superconductivity **16**(1), 175–178(2003).
- T. Takahashi, S. Fukatsu, K. M. Itoh, M. Uematsu, A. Fujiwara, H. Kageshima, Y. Takahashi, and K. Shiraishi, “*Self-Diffusion of Si in Thermally Grown SiO_2 under Equilibrium Conditions,*” J. Appl. Phys. Vol. **93**, 3674–3676 (2003).
- K. Morita, H. Sanada, S. Matsuzaka, C. Y. Hu, Y. Ohno, and H. Ohno, “*Electron Spin Dynamics in InGaAs Quantum Wells,*” Physica E, **21**, 1007–1011 (2004).
- H. Sanada, S. Matsuzaka, K. Morita, C. Y. Hu, Y. Ohno and H. Ohno, “*Hysteretic dynamic nuclear polarization in GaAs/AlxGal-xAs(110) quantum wells,*” Phy. Rev. B, **68**, 241303 15 (2003).
- S. Watanabe and S. Sasaki, “ *^{29}Si Nuclear-Spin Decoherence Process Directly Observed by Multiple Spin-Echoes for Pure and Carrier-Less Silicon,*” Jap. J. Appl. Phys. (2003).

(2) 特許出願

H1 5 年度特許出願件数 : 1 件 (CREST 研究期間累積件数 : 2 件)