

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 助教授)

「全シリコン量子コンピュータの実現」

1. 研究実施概要

大規模量子コンピュータの実現は計算・通信技術に革命をもたらし、今日における多くの不可能が可能となる。また、量子力学の根幹を検証する夢の舞台という基礎的な観点から、多くの科学者の夢である。

本研究チームは、シリコンのみから構成される、現実的な量子コンピューティング素子の形態・動作原理を提案し、その要素技術の確立を目指す。核スピンを持たない²⁸Si同位体ウェハー中に、²⁹Si核スピンを周期的に配置する本提案は、電極の作製や無理な不純物添加を全く必要とせず、既存のシリコン・ナノテクノロジー技術と高い整合性を有する。現在のシリコンLSI(古典的コンピュータ)との融合が可能であり、非常に高い展開性を有する。²⁹Si核スピンに基づく量子ビットは、量子計算の大規模化に向けて重要となるスピン位相緩和時間が極めて長く、300量子ビット以上の拡張性を理論的に確認した。量子ビットの初期化は、「光のみ」を用いたNMRと外部からの偏極電子スピン注入を通して実行する。量子演算には、すでに7量子ビットまでの成功をおさめたRFパルス照射に基づくNMR量子コンピューティングのアルゴリズムをフルに活用する。スピン情報の読み出しにはシリコン超微細カンチレバーを利用した磁気共鳴プローブ法、または、光プローブを用いる。個別要素技術を確立し、いかに融合できるかが成功の鍵をにぎる。5年計画における前期3年間では要素技術を確立し、後期2年間で量子演算の実現を目標とする。

2. 研究実施内容

全シリコン量子コンピュータでは、核スピンを有する²⁹Siを核スピンを有さない²⁸Siウェハー上に一列に並べ、それらに強力な磁場勾配を加え、さらに核磁気共鳴(NMR)法を利用した核スピン量子操作を行うことから量子演算を実施する。計算結果(量子情報)の読み出しは核磁気共鳴に基づく磁気間力の変化をカンチレバーで測定することから実現する。

全シリコン量子コンピュータを実現するための要素は、基礎的核スピン物理の解明(緩和時間測定)、デバイス作製技術、初期化技術、量子演算技術、読み出し技術の5項目に大別できる。本CRESTチームでは代表者の伊藤公平(慶大)が全体の取りまとめと、

デバイス作製全般、緩和時間測定、初期化の一部、量子演算の一部を担当し、分担者の松本佳宣（慶大）がマグネットを中心とした微小構造の設計と微細加工、大野裕三（東北大）が初期化と量子操作と読み取り、佐々木進（新潟大）が量子操作と読み取り、山本喜久（スタンフォード大）が緩和時間測定に関する研究を続けている。以下には、要素技術5項目に関する研究・開発状況を順を追って述べる。

基礎的核スピン物理の解明（新潟大、慶應大、スタンフォード大）

核スピンを利用した量子操作が実現されても、核スピンの情報が短時間で失われる（位相が緩和してしまう）ようでは量子計算機として十分に機能しない。そこで、 ^{29}Si 核スピンの緩和時間を様々な条件で測定し、全シリコン量子コンピュータ構想の実用性を見積もる基礎データを収集している。特に天然の同位体組成をもつSi中の ^{29}Si 核スピンの緩和時間を新潟大・佐々木進が中心となって測定している。その結果、室温においても縦緩和時間(T1)は最大で1000時間、位相緩和時間(T2)も最低でも数100ミリ秒であることを見出している。同様の成果はスタンフォード山本喜久によっても見出され、事業団の成果としてプレス発表された。T2が室温でも数100ミリ秒（1秒弱）であることは、全シリコンが量子計算に適した舞台となることを示す。演算のために照射するRFパルスは幅が10マイクロ秒程度、パルスとパルスの間隔は1ミリ秒程度となる模様である。従って、量子力学的な位相のコヒーレンスが保たれている間に、数100程度のパルスが照射できることになる。さらに正確な位相緩和時間の測定には数ヶ月の長時間を要するため、佐々木進が慶應を何度も訪れNMR装置を手直しすることにより、新潟大と慶應の2ヶ所で緩和時間測定が実施できるよう設定した。非常に長いT1という状況でも、効率良くT2を測定できるパルス列として、CPMG法の適用を提唱し、その準備を開始している。来年度には緩和時間を核スピン濃度の関数として定量的に提示し、その結果に基づき、全シリコン量子計算機の動作特性を予測する。

デバイス作製

1. 半導体同位体工学（慶応大）

分子線エピタキシー（MBE）成長における正確な成長速度の確保を目指したSi専用蒸着源（K-cell）の開発を行い、さらに $^{28}\text{Si}/^{30}\text{Si}$ 同位体超格子を作製した。2 nmずつ異なる同位体を積層した場合でも2次イオン質量分析法（SIMS）により ^{28}Si と ^{30}Si が交互に堆積されている様子が明瞭に得られた。このように数nmの位置分解能をSIMSで得るための工夫にも相当な時間を費やした。また、トンネル顕微鏡（STM）付きMBE装置が8月末に納入され、順調な稼動を開始した。これを用いてSi同位体細線の作製のための表面物理を明らかにする。さらに、全シリコン構想からは逸脱するが、Siウエハー上でGe量子ドットの位置と大きさを自由自在に制御する手法に関しても予備実験を始めた。量子ドットの位置と大きさが制御できれば、ドット中に閉じ込められた電子スピンを量子ビットとして用いることが可能となる。

2. マグネットデザイン (慶応大)

巨大かつ均一な磁場勾配を発生させるためのマイクロマグネットのデザインと電磁気学的シミュレーションを慶大・松本佳宜が中心に行った。シリコン表面に堆積可能で、飽和磁場が大きく、微細加工に適した材料としてパーマロイ (NiFe) に着目し、2ミクロン厚のNiFe膜作製をNTT-AT社に特注した。NTT-ATはNTT基礎研究所の外部委託サービスであるため、実際の膜作製は、松本と伊藤がNTT-ATを訪れ、細かく打ち合わせを行ったうえの共同研究に近い形で実現した。結果として、磁気特性も良好なNiFe膜が慶應に納品された。次のステップは、NiFe膜の微細加工化であるが、松本自ら作製するマスクの位置決めを行うためのマスクアライナーを今年度購入し、反応型イオンエッチング (RIE) による微細加工の前段階を効率的に準備できる環境を整えた。RIEは東北大・江刺研究室を松本が訪問して実行する。

初期化 (慶應と東北大)

東北大・大野裕三は、Si核スピン初期化、およびSi中のキャリアや核のスピン状態の検出を光学的に行うため、モードロックTi:Al₂O₃レーザーと光パラメトリック増幅器を組み合わせた紫外～赤外パルスレーザーシステムの構築、光のみで行う全光核スピン共鳴 (NMR) 手法の検出部の改良、および、時間分解フォトルミネッセンス測定系の整備を進めてきた。順に説明すると、レーザーシステムについては、現有のモードロックTi:Al₂O₃レーザーに光パラメトリック増幅器と第2高調波発生装置を組み合わせることにより、紫外～赤外で高エネルギーの光パルスを発生できるように整備した。これにより、Siについては間接遷移～直接遷移の広いエネルギー領域でキャリアを励起できる。全光NMRの検出部については、比較的測定が容易な GaAs/AlGaAs量子井戸構造のNMRを東北大で観測した結果、Siに対しては更に検出感度を高める必要性が示唆された。ここでは核スピンの初期化に対してキャリアと核スピンの間の相互作用の大きさが重要であることを見出し、その特性は半導体のバンド構造やミクロな試料構造に強く依存する。特にSiは間接遷移半導体であるため、直接遷移化合物半導体量子構造で進められてきた全光NMRの実験よりも、検出感度を大幅に向上させる必要がある。このため、現在安定でかつ高感度な光検出器の製作を進めている。時間分解フォトルミネッセンス系については、上述のレーザーシステムと組み合わせて実現した。磁場中での円偏光励起・時間分解フォトルミネッセンス測定を行い、Si中のキャリアスピンと核スピンのダイナミクスを調べていく。

慶應大・伊藤公平は、不純物に束縛された励起子 (エキシトン) を用いた電子スピンおよび核スピンの冷却 (初期化) の可能性を模索するために、高分解能フォトルミネッセンス系を構築し、実際にSiおよびGeに含まれる不純物に束縛された励起子の発光の検知に成功した。今後は励起子発光の選択則を解明することから電子スピンと偏光との関係を明らかにし、結果として、特定の偏光による励起によって特定の電子スピンの注入を実現し、核スピンの冷却にもつながる条件を探求する。また、東北大の全光NMRにおける核スピン初期化効率の向上を目指して、慶應ではSi/SiGeヘテロ構造など、これまでに報告されて

いないSiベースの量子構造の作製も開始する。

演算（新潟大、東北大、慶應、スタンフォード）

演算にあたる部分は、これまでの長い核磁気共鳴研究の歴史によりかなり洗練されている。技術的には量子ビット数の増加に伴い、何種類ものRFパルスと同時に照射することが現実的か否かという問題があり、スタンフォード大・山本喜久が精力的に取り組んでいる。ただし、これは将来的な懸念であり、短期的には、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が重要となる。それらに新潟大、慶應大が取り組み、さらに東北大では全光NMRを量子演算に利用する方法を模索する。新潟大や慶應が有するNMR装置の磁石は恒常的に励磁されており、磁場を切ることができない。すなわち、これらの磁石に松本が作製したマイクロマグネットを導入することができない。（入れようとする強磁場に吸い込まれて磁場中心に固定できない）よって、慶應では0～9テスラの間で任意に磁場が制御できる超伝導磁石を今年度購入し、基本な位相緩和時間の評価から、マイクロマグネットの評価といった実験に利用していく。

読み取り（新潟大と東北大）

前述のとおり、当初の予定に示されたカンチレバーを用いる手法は、先行研究機関による開発動向をしばらく見守ることが賢明であろう。一方、少数の核スピンの起因する磁気共鳴信号の強度を増強する方法として、古くから光励起が知られている。物質にもよるが、LEDや写真のストロボでさえ効果を発揮する場合がある。半導体ではバンド構造を反映して円偏光のレーザーを照射するのも一般的であるため、新潟大・佐々木進はLEDを利用する単純な方法からスタートして、最終的には偏光の有効利用によりNMR信号の飛躍的増大を目指す。反対に、東北大・大野裕三は古典的なコイル検出を利用する方法を全光NMR装置に適用し、その有効性を評価する。Siの場合にはT1とT2が非常に長いことから、光照射の効果が試料全体に拡散していくことが予想され、結果として光増幅の手法が効果的であることが期待される。

3. 研究実施体制

伊藤公平グループ

① 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）

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・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. 研究成果の発表

（1）論文（原著論文）発表

- 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* Vol.16(1), 175-178(2003)
- A. V. Kolobov, K. Morita, K. M. Itoh, and E. E. Haller, "A Raman Scattering Study of Self-Assembled Pure Isotope Ge/Si(100) Quantum Dots," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 81, No. 20, 3855-3857(2002)
- 松本佳宣、「量子ビットアクセスのための微小磁性体設計」平成14年度 電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, MC4-5, pp. 610-613, (2002.9)
- 土屋能明、佐々木進、佐藤智久、高橋昌幸、「高純度シリコンの核スピン緩和」平成14年度電気学会基礎・材料・共通部門大会講演論文集、V-05 p.198 (2002)
- 佐々木進、「核スピン量子計算：基礎及びその現状と展望」平成14年度 電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, MC4-4, pp. 608-609, (2002.9)
- 好田 誠、大野 裕三、篁 耕司、松倉 文礼、大野 英男、「Electrical electron spin injection with a $p^+-(\text{Ga}, \text{Mn})\text{As}/n^+-\text{GaAs}$ Tunnel junction」、*Journal of*

Superconductivity (2003.2)

- H. Sanada, I. Arata, Y. Ohno, K. Ohtani, Z. Chen, K. Kayanuma, Y. Oka, F. Matsukura, and H. Ohno, “Drift transport of spin polarized electrons in GaAs,” Journal of Superconductivity (2003.1)

(2) 特許出願

1 件