

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 全シリコン量子コンピュータの実現

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

研究代表者

伊藤 公平 (慶應義塾大学理工学部 助教授)

主たる共同研究者

松本 佳宣 (慶應義塾大学理工学部 助教授 (平成14年4月～))

大野 裕三 (東北大学電気通信研究所 助教授 (平成14年4月～))

佐々木 進 (新潟大学工学部 助教授 (平成14年4月～))

江刺 正喜 (東北大学大学院工学研究科 教授 (平成15年4月～平成16年3月))

王 東方 (石巻専修大学理工学部 助教授 (平成15年4月～))

山本 喜久 (国立情報学研究所 教授 (平成14年4月～))

3. 研究内容及び成果:

シリコン中の電子スピンと核スピンを量子ビットとして用いた実用的な量子コンピュータの構成を考案し、量子情報分野におけるその位置づけを計算機科学および基礎スピン物性の立場から明らかにし、その実現にむけた要素技術の開発を進めた。具体的には、核スピンを持たない<sup>28</sup>Si安定同位体基板上に、核スピンを有する<sup>29</sup>Si安定同位体を一列に並べるナノテクノロジーを開発した。この列をなす<sup>29</sup>Si安定同位体の1個1個の核スピんにビット情報(0 または 1)を格納した量子コンピュータを提案し、その情報処理の意義を計算機科学的に明らかにした。

量子ビットとして役に立つためには、量子情報を失うことなく保持できる位相緩和時間内に、できるだけ多くの量子演算を実行し、結果を読み取る必要がある。特に、演算に要する時間に対して位相緩和時間が短い場合は、その量子ビットを用いて量子コンピュータを構築しても意味がない。そこで本研究は、シリコン結晶中の<sup>29</sup>Si核スピン量子ビットの位相緩和時間測定から着手した。その結果、室温における位相緩和時間は20ミリ秒であることを核磁気共鳴法を用いて明らかにし、さらに核スピンの位相緩和時間を短くする主要因の核スピン同士の双極子相互作用を切るためのラジオ波パルス照射手法の開発に成功した。その結果として、位相緩和時間が25秒と固体中の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。この位相緩和時間内では量子エラーコレクションなどの重要なアルゴリズムが十分に実行できることが期待される。また、核スピンの初期化と読み出しにはシリコン中の電子スピンの利用が重要であることを見出した。特に、シリコン中の電子スピンの量子情報保持時間が同位体濃縮によって飛躍的に延びることを示し、結果として8Kでは1ミリ秒以上の位相緩和時間を実験により得ることに成功した。

次に、この素子を量子コンピュータとして動作させるために必要な、1)初期化:始めにすべての核スピンを0状態にセット、2)量子計算:1量子ゲート演算と2量子ゲート演算の実行、3)読み出し:演算終了後に個々の核スピン量子ビットの向きが上か下かを測定、に関する詳細なる基礎研究を展開し、電子スピンを用いた核スピン量子ビット初期化や、励起子を介した核スピン量子ビット読み出しなど、極めて独創的なアイデアを実験により検証し、ナノ領域特有の様々なスピン物性の解明に成功した。

初期化では、まずは直接遷移型の半導体(GaAs系)を用いて光によって誘起された電子スピンと核スピンの相互作用を調べる予備実験を行った。その結果から一方に偏った電子スピンを半導体中に注入することから、核スピンの方向をそろえられることを明らかにした。次にシリコンに対して、直接遷移バンドギャップに相当する高

いエネルギーの光を照射し、さらにマイクロ波を照射することから偏極した電子スピンを注入することに成功した。これによりシリコンに対しても、電子スピンを介して核スピンの方向を揃えられることを明らかにした。

演算は独自に開発をしたマイクロマグネットによって生じる磁場勾配によって、各量子ビットを共鳴周波数の差異で差別化し、選択的な量子演算の実行が可能であることを示した。

核スピン量子ビットの読み出しに向けては、バルク試料による予備実験ではあるが、不純物に束縛された励起子の崩壊に伴う発光または光電流によって読み出すことに成功した。

以上要するに、シリコン量子コンピュータの新しい構成を提案し、その実現に向けた量子物性の解明、ナノテクノロジーの開発、計算機科学的な考察を展開し、このような融合分野における大きな進展を得た。

#### サブグループの分担と成果

慶大・伊藤公平(全体のとりまとめ)、東北大・大野裕三(光を用いた電子スピンおよび核スピンの初期化)、東北大・江刺正喜(マイクロマグネット製作技術の開発)、慶大・松本佳宣(マイクロマグネット設計・解析)、石巻専修大・王東方(マイクロマグネット製作技術の開発)、新潟大・佐々木進(核スピン量子ビットの初期化・演算・読み出し技術の開発)、国立情報研・山本喜久(量子情報理論、核スピン量子ビット読み出し手法の理論的考察)

### 4. 事後評価結果

#### 4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

国際的な外部発表は 54 件、また、外国からの招待講演 22 件、国内招待講演 24 件と数多い発表がある。これらは、Physical Review、International Conference on Quantum Optics 等トップレベルのジャーナルでの発表や招待講演であって、学術的に高い成果が得られている。また、多くの被引用回数がある。

知的所有権に関しては、国内出願が 2 件ある。基礎研究であり、近々の製品化には余り直結しない分野なので妥当であろう。

量子ビットの直接操作や、全体を統合しての量子コンピュータの実現には未だかなり距離感がある。しかしながら、この研究は、固体量子ゲートを実現する有力な手段になる可能性があると期待されており、個別적으로는、室温で 25 秒という量子状態の維持技術は、他所での時間に比して数桁大きい。更に、原子を 1 列に並べる製作技術と演算技術を確立した。電子スピンを通して核スピン操作可能性を示し、核スピンの初期化と読み出しに関しては実現の見通しを付けた。これらはいずれもこの分野に於ける重要な成果である。

#### 4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

量子コンピュータの実現はなされていないが、当該分野で成果自体は高く評価されている。International Technology Roadmap for Semiconductors 委員会に招かれ、知見を披露し、その結果は全世界に影響を与えており、科学的なインパクトは高い。研究の進捗に伴う妥当な変化はあったが、その他は概ね当初の計画の通りであり、最終的な固体量子計算の要素技術を数多く開発している。今後はそれぞれ技術の詰めと、全体としてのインテグレーションである。全固体という世界的に例の無いシステムを目指しており、その基本技術を実現し、従来にない、興味深い要素技術を生み出している。この技術は、Si 内部の微細な原子レベルでの動きを調べる技術としても期待されており、今後の重要なナノテクノロジーの一つとなる可能性があるなど、5年間の基礎研究としてのインパクトは大きい。

今後、完全な量子コンピュータを実現するには、現在の構造をリファインして、原子列単位の分離配置、量子状態の読み出し、それを用いたスピンを揃える初期化、演算などを組み込むことが必要である。それには原理的な手法のみならず、デバイスレベルでの環境制御、体系的な設計手法、エンジニアリング的な統合技術が必

要であり、マンパワー、研究費、時間が必要である。本研究によって、問題点が整理され、方向性や解決すべき課題が明らかになった。これからも引き続き努力を続け、当初目標に向けて研究を進めることが重要であろう。

#### 4-3. その他の特記事項(受賞歴など)

研究の進め方に試行錯誤があったが、代表者のリーダーシップが発露され、期間半ばより研究の焦点が定まり、有機的に連携して研究が進められた。量子ビットの設計、実装、計測というそれぞれ専門性を備えたサブグループが、協力し合って全体の成果を出した。成果の和ではなく、要素成果の積になっている所が協力体制の有効性を示している。すなわち、それぞれの特技を有するメンバが有機的、機動的に連携している。CRESTが必要であることのエビデンスとしても最も良い例になる。また、IBM科学賞受賞など、成果は顕著である。

また、世界の研究者間で最先端の成果を見せあいながら研究を進めたことは、互いに成果を進める大きな力となっている。このやりかたは、とても参考になる。

シリコン核スピンが、個体量子ゲート実現のための有力手段であるとの認識が広まったのには、本研究が遂行されたことの功績が大きい。関係研究者の努力によって、本研究をさらに発展させることを期待したい。