

戦略的創造研究推進事業 CREST

研究領域「情報社会を支える新しい高性能情報処理技術」

研究課題「全シリコン量子コンピュータの実現」

研究終了報告書

研究期間 平成 13 年 12 月～平成 19 年 3 月

研究代表者：伊 藤 公 平

(慶應義塾大学理工学部・助教授)

1 研究実施の概要

半導体産業のスタンダードであるシリコンを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。要素技術は、素子作製、初期化、演算、読み出しに分別され、これまでに素子作製技術、演算に関して当初の予定以上の大きな進展が得られ、初期化と読み出しに関する基礎研究も順調に進行した。以下に本研究の構想に至った経緯と目的、成果の概要をまとめる。

構想に至った経緯と本研究の目的

量子コンピュータは現代のコンピュータの一部の不可能を可能にするコンピュータである。量子ビットが基本要素として構成され、その量子ビットを初期化（例えば基底状態に設定）し、入力・演算を行い、結果を読み出すことが必要となる。データベース検索と素因数分解量子アルゴリズムが有名であるが、今後は量子系（すなわちすべての系）のシミュレーションにも量子計算が威力を発揮すると期待される。この夢を机上の空論に終わらせないためには、物理的に多数の量子ビットを作製し、それらを用いて初期化・演算・読み出しを実現する必要がある。

しかし、量子コンピュータの基本構成要素である量子ビットの実現は現時点では非常に困難である。その最大の理由は、量子ビットでは計算中には量子情報を失わないように外界との相互作用を最小限に抑える必要がある一方、演算や最終的な読み出し（観測）においては外界との相互作用をできるだけ強めたいという相反する要求が課されている点にある。1個単位の電子、核スピン、イオン準位、光子といった量子間の相互作用を、必要なときは誘起するが、それ以外の時は完全に遮断することが要求される。よって、時と場合に応じて相互作用が必要または不必要になるという「量子ビットのジレンマ」を解決（または最適化）するための基礎研究が重要である。さらに、現代のコンピュータの不可能を可能にするためには、目的とする量子アルゴリズムの実行に必要な数の量子ビットから構成される量子コンピュータを作製し、エラーコレクションやフォールトトレラントを含めて十分な量子演算ステップを実現する必要がある。よって、量子物理学のみならず、計算機科学の理解に基づく研究実施が不可欠となる。

このような背景において、本研究では以下の目標を設定し、最終項目 5)を除くすべての項目に対する大きな成果を得た。

- 1) シリコン量子コンピュータ構想の立案：電子産業を支えるシリコン半導体を用いた現実的な量子コンピュータの構成を理論的に確立する。
- 2) 計算機科学的考察：当該シリコン量子コンピュータ中の量子ビットの量子情報保持時間と演算処理速度（クロックスピード）を実験により求め、その情報に基づきシリコン量子コンピュータの計算機科学的な位置づけと開発意義を明らかにする。
- 3) 素子作製技術の開発：当該量子コンピュータの構成が実験室において作製可能であることを示す。
- 4) 要素技術の開発：当該量子コンピュータの初期化・演算・読み出し技術を開発する。
- 5) 量子演算の実行：小規模ながらシリコン量子コンピュータの動作をデモンストレーションする。

成果の概要

1) シリコン量子コンピュータ構想の立案

本研究が取り組むシリコン量子コンピュータ構想は、研究代表者の伊藤と分担者の山本の共同提案「全シリコン量子コンピュータ (All-Silicon Quantum Computer)」[Phys. Rev. Lett. **89**, 017901 (2002)]に基づく。本研究では、その提案を精査しながら改良を加え、現在では図 1 に示す構造までの進展を得た。[Solid State Comm. **133**, 747 (2005)] ここでは核スピンを持

たない ^{28}Si 安定同位体基板上に核スピンを有する ^{29}Si 安定同位体を一列に並べる。この列をなす ^{29}Si 安定同位体の 1 個 1 個にビット情報 (0 または 1) を格納して情報処理を行う。具体的には、 ^{29}Si 安定同位体は核スピン $1/2$ を有するため、2 準位系であり、核スピン上向きを 0、下向きを 1 として情報を格納する。核スピンは量子であり、その振る舞いは古典力学ではなく量子力学に従う。よって、この素子は量子コンピュータである。この素子を量子コンピュータとして動作させるためには、1) 始めにすべての核スピンを 0 状態にセット (初期化) し、2) 量子演算 (1 量子ゲート演算と 2 量子ゲート演算) を実行し、3) 終りに個々の核スピンの向きが上か下かを測定する必要がある。これらの条件を満たすために、パーマロイ磁石 (NiFe) とリン不純物がそれぞれ列の両端に置かれている。図 1 に示す素子全体に 7 テスラの強磁場を印加すると、パーマロイの端では飽和磁場の約 2 テスラが加わり 9 テスラの磁場が発生する。よって、 ^{29}Si 量子ビット列の一端 (パーマロイ側) は 9 テスラ、その反対の端は 7 テスラの磁場となり、結果として ^{29}Si 量子ビット列に沿った大きな磁場勾配が実現する。これにより、個々の ^{29}Si 量子ビットが異なる磁場、すなわち、異なる核磁気共鳴周波数を有することになり、周波数選択による任意の量子ビットの任意の量子演算が可能になる。現提案が 2002 年の提案と比較して改良された点は、アンサンブル (統計的集団) 演算を理想的な単一量子演算に拡張したことと、その場合に困難とされる初期化と読み出しをリン不純物を用いて実現するアイデアを具体化したことである。

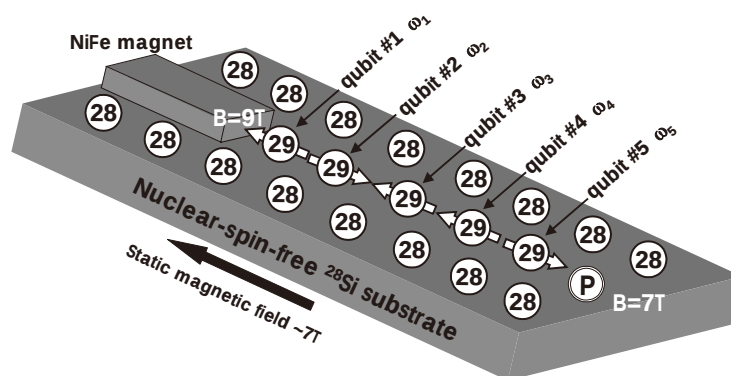


図 1 全シリコン量子コンピュータの全容

2) 計算機科学的考察

本項目では、初めに、バルクシリコン結晶中にランダムに存在する ^{29}Si 核スピンを量子ビットとして、それらの位相緩和時間測定を行った。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で決定し [Jpn. J. Appl. Phys. **42** LL1350 (2003)], 核スピンの位相緩和時間を短くする主要因が核スピン同士の双極子相互作用であることを明らかにし [Phys. Rev. B, **68**, 054105 (2003)], それら相互作用をなくす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。[Phys. Rev. B **71**, 014401 (2005)] 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。ここでの 25 秒は実験的限界ではなく、さらに伸ばせると予想される。すなわち、現時点における固体量子コンピュータ分野において、 ^{29}Si 核スピン量子ビットが多く演算回数を要する量子アルゴリズムの実行に最適な量子ビットであることを示した。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、例えば 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[Phys. Rev. A **71**, 052320 (2005)], 他の提案である超伝導はクロックスピードは速いが, 位相緩和時間がアルゴリズム完了に対しては短すぎる．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明らかにされた．[Physica E 印刷中] さらに解析の結果, 超伝導は CPU, シリコン量子コンピュータはメモリといった適材適所の役割分担を負わせることが最適であることが示された．ここで, 量子メモリも, やはり量子コンピュータであることに注意が必要である．なぜなら, 格納された量子情報を永遠に保持するためには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からである．その計算には膨大な演算回数が必要であり, 現状では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本項目の成果である．

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．[Phys. Rev. B, **70**, 033204 (2004)]

3) 素子作製技術の開発

素子作製には 2 つの側面がある．ひとつは ^{29}Si 核スピン量子ビットを, 核スピンをもたない ^{28}Si ウエハー中に配置するナノテクノロジーである．具体的には図 1 に示すとおり, ^{28}Si ウエハー上に ^{29}Si 核スピンを一行に並べる必要がある．もう一方は, 量子ビット核スピンの個別にアクセスするためのマイクロマグネットの設計と開発である． ^{29}Si 核スピン量子ビットの位置制御にむけては, 世界にさきがけて 3 種類のすべてのシリコン安定同位体 (^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si) のバルク単結晶の成長に成功し[Jpn. J. Appl. Phys. **42**, 6248 (2003)], 続いて, ^{28}Si ウエハー中に ^{29}Si 核スピン原子面を埋め込んだ周期構造の作製と評価に成功[Appl. Phys. Lett. **83**, 2318 (2003)], そして最終的に, 大きな目標であった Si 原子鎖の作製に成功した．[特許出願済, Appl. Phys. Lett. **87**, 031903 (2005), Phys. Rev. Lett. **95**, 106101 (2005)] また, 原子鎖のみならず, 図 1 の構造を正確に作製するための様々なシリコン加工技術とそれに伴う原子移動(拡散)などを調べた．[論文多数] さらにマイクロマグネットの作製技術の開発し[Nanotechnology, **16**, 990 (2005)], 狙い通りの磁場勾配が得られることも実験により評価することに成功した．

4) 要素技術の開発

初期化は核スピン量子ビットにとって最も困難な課題である． ^{29}Si 量子ビットの位相緩和時間が長いのは外部との相互作用が弱いためであり, よって, 外部から強制的にひとつの方向に揃えるという操作が難しい．特に核スピンの磁気モーメントは極めて小さいために, 外部から 10 テスラもの強磁場を印加したとしても, 核スピン量子ビットは一方に揃わない．そこで本項目で取り組んだのが, 比較的容易に一方に揃うであろう電子スピンを介して核スピンの方向を揃えることである．しかし, シリコンが間接遷移型半導体ということで, 光を利用した初期化が容易には検知できない問題に直面した．そこで, 半導体中の電子スピンを揃えることから核スピンが揃える物理的な手法が可能であるか? を原理的に調べることを目的として, 直接遷移型の半導体(GaAs 系)を用いて光により誘起された電子スピンと核スピンの相互作用を調べた．そして, 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, 核スピンの方向を揃えられることが明らかにした．[Phys. Rev. B, **68**, 241303 (2003), Phys. Rev. Lett. **94**, 097601 (2005), Phys. Rev. Lett. **96**, 067602 (2006)] この結果を受け, シリコンにおける光による初期化技術を開発する実験系を構築し, 間接遷移バンドギャップに相当する光を照射した場合では, 0.25%の核スピン偏極率を得られることを核磁気共鳴により観測することに成功した．[Phys. Rev. B **71**, 235206 (2005).] 初期化という観点からは 0.25%は小さすぎるが, 核スピン物性という観点からみると, 0.25%は室温における熱平衡状態と比較して 1000 倍以上もスピンの揃った状態である．よって, ここまでの成果を 1 万

倍、10 万倍にすることができれば量子演算を目的とした初期化技術が完成する。そのように偏極率を上げるために、光と電子スピン共鳴に相当するマイクロ波の照射を同時に行う手法を開発し、特に条件が良い場合には 1% 近くの偏極率を得ることに成功している。[Physica Status Solidi c, **3**, 4376 (2006)] 今後の研究で核スピン偏極率が 10% 以上にできれば、全シリコン量子コンピュータへの応用が現実的になる。

演算技術は核磁気共鳴装置を用いてラジオ波電磁波を照射することによることで確立した。[Phys. Rev. B, **68**, 054105 (2003)]

読み出しにおいても初期化と同じ問題に直面した。核スピンは外部との相互作用が非常に弱いので、核スピン情報を外部のプローブと相互作用させて読み出すという一般的な計測は非常に困難である。そこで、核磁気共鳴を用いて多数の核スピンを同時に読み出す集団平均測定を開発し、現在では 10^{16} 個と非常に少ない数の核スピンの検出に成功している。また、図 1 に示すとおり、Si 原子鎖の終端部にリン不純物を 1 個配置し、そこに束縛された電子スピンを用いて核スピンを読み出す方向性を見出すことに成功した。ここではリンに束縛された励起子の発光を検知する方法と[Phys. Rev. B **69**, 125306 (2004)], リンに束縛された電子スピンの共鳴を検知する方法[Phys. Rev. B, **70**, 033204 (2004)]の可能性を実験により示すことに成功した。さらに、光と磁場のみを用いて同位体シリコン中のリン核スピンの読み出しに成功し、光電流を用いてもリン電子スピンの読み出せることを実験により示した。[Phys. Rev. Lett., **97**, 227401 (2006)] 2002 年に全シリコン量子計算構想を提案した当時は、核磁気共鳴プローブ顕微鏡による読み出しを目指したが、その後、図 1 に示す構成にデバイス構造自体が改良され、結果としてリンを用いた読み出しが相応しいと結論づけた。

5) 量子演算の実行

小規模ながらシリコン量子コンピュータの動作をデモンストレーションすることを最終目標として、パルス電子-核磁気共鳴装置の設置を行った。研究期間内での実際のデモンストレーションには至らなかったが、その実現に向けたスピン物性の解明を行った。

以上の成果は、世界的に評価が高い欧文学術誌における原著論文 54 編として発表され、それらの発表は国際会議における招待講演 22 件につながった。また、量子物理研究としてスタートしながら 2006 年には The 33rd Annual International Symposium on Computer Architecture で口頭発表として採択されるなどの計算機科学分野における新展開にも成功した。本研究の成果により研究代表者・伊藤が 2006 年日本 IBM 科学賞を受賞し、分担者の大野が 2004 年サー・マーチン・ウッド賞と第 1 回日本学術振興会賞 (2005 年)、分担者の山本が 2005 年応用物理学会論文賞と 2005 年紫綬褒章を受賞・受章した。

2 研究構想及び実施体制

(1) 研究構想

研究提案時のメンバーは、伊藤・山本・大野の 3 名であったが、その後、全体構想を達成するために松本・佐々木・江刺・王が順に分担者として参加する展開をみせた。開始時に提案を行った研究遂行計画は図 2 のフローチャートの下地部分であり、その上書きを随時行うことで、当初の予定に改良を重ねてきた。研究項目は以下の 6 つに内訳され、

- 1) 全シリコン量子コンピュータ理想素子の動作原理と性能限界の予測 (担当: 伊藤, 山本)
- 2) コンセプトの実証 (伊藤, 佐々木, 山本)
- 3) 素子設計・微細加工 (伊藤, 松本, 江刺, 王)
- 4) 初期化技術 (大野, 伊藤)
- 5) 演算技術 (山本)
- 6) 同位体ナノテクノロジー (伊藤)

当初の予定した MRFM (磁気共鳴プローブ検出) は、リン不純物による検出に置き換える

研究計画

理想素子の動作理論
(伊藤、山本)

コンセプトの実証
(伊藤、佐々木、山本)

MRFM・マイクロマシンニング
(松本、江刺、王)

マグネット設計・作製
(松本、江刺、王)

初期化技術
(大野、伊藤)

演算技術
(山本)

同位体ナノテクノロジー
(伊藤)

```

graph TD
    subgraph Year14 [14年度]
        T1[理想素子の動作理論]
        T2[コンセプトの実証]
        T3[MRFM・マイクロマシンニング]
        T4[マグネット設計・作製]
        T5[初期化技術]
        T6[演算技術]
        T7[同位体ナノテクノロジー]
    end

    subgraph Year15 [15年度]
        T1_1[拡張性・演算速度の定量的解析]
        T2_1[NMR測定]
        T3_1[マイクロマシンニング技術の確立]
        T4_1[SiGe系への応用]
        T5_1[光NMR装置設置]
        T6_1[RF多重パルス発生装置開発とロジックの開発]
        T7_1[STM付MBE装置の設置]
    end

    subgraph Year16 [16年度]
        T1_2[全シリコン量子コンピュータの位置づけ]
        T2_2[NMR測定]
        T3_2[カンテレーバ試作]
        T4_2[光初期化技術の確立]
        T5_2[光初期化技術の確立]
        T6_2[RF多重パルス発生装置開発とロジックの開発]
        T7_2[Si表面物性の解明]
    end

    subgraph Year17 [17年度]
        T1_3[他量子ビットとのメディア変換にむけて]
        T2_3[小規模量子計算の実現]
        T3_3[エンタングルメント・小規模量子演算 in Silicon]
        T4_3[Si同位体鎖の作製]
    end

    subgraph Year18 [17・18年度]
        T1_4[他量子ビットとのメディア変換にむけて]
    end

    T1 --> T1_1
    T2 --> T2_1
    T3 --> T3_1
    T4 --> T4_1
    T5 --> T5_1
    T6 --> T6_1
    T7 --> T7_1

    T1_1 --> T1_2
    T2_1 --> T2_2
    T3_1 --> T3_2
    T4_1 --> T4_2
    T5_1 --> T5_2
    T6_1 --> T6_2
    T7_1 --> T7_2

    T1_2 --> T1_3
    T2_2 --> T2_3
    T3_2 --> T3_3
    T4_2 --> T3_3
    T5_2 --> T3_3
    T6_2 --> T3_3
    T7_2 --> T4_3

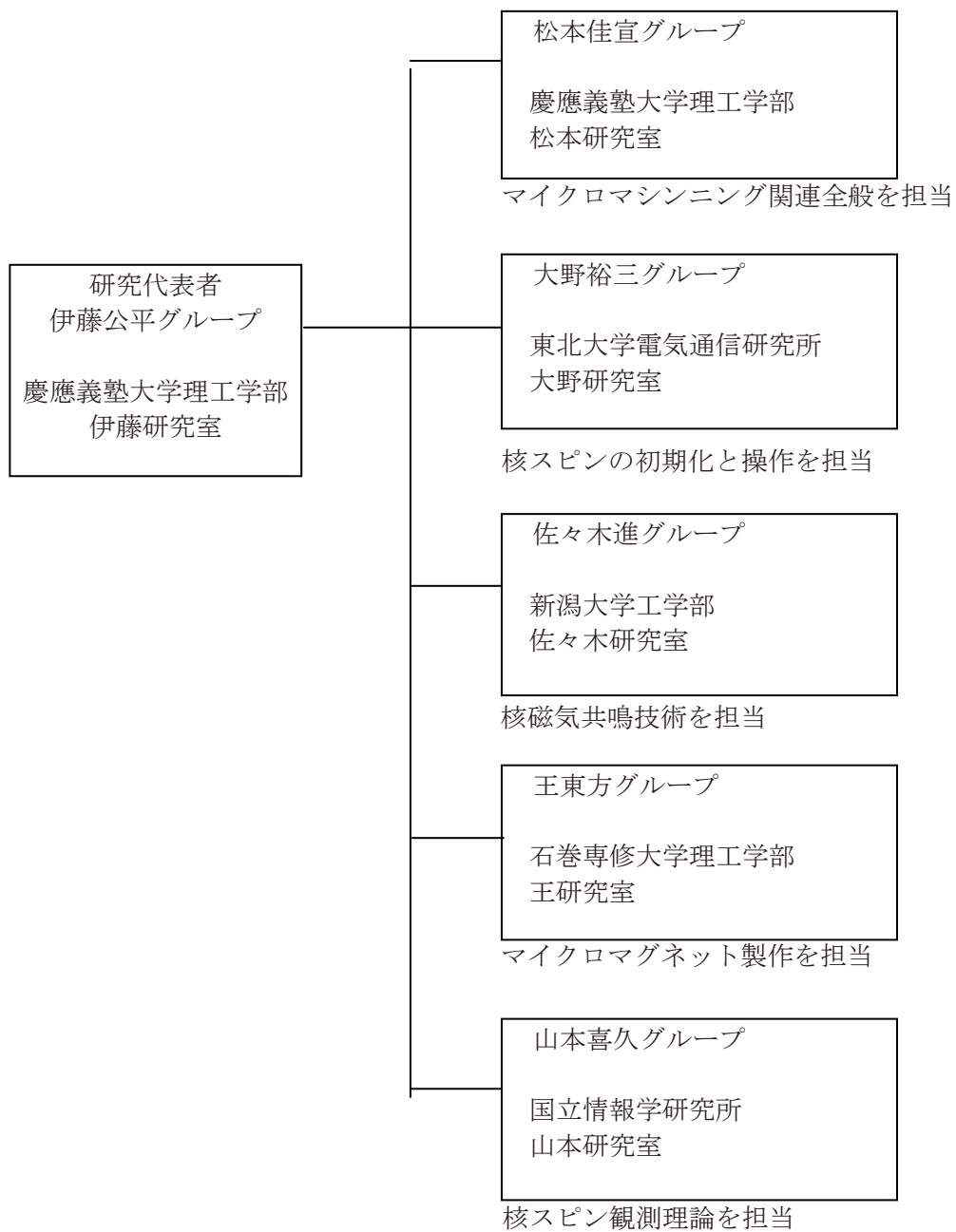
    T3_3 --> T1_4
    T3_3 --> T4_3
  
```

研究計画の概要:

- 14年度:** 理想素子の動作理論 (伊藤、山本)、コンセプトの実証 (伊藤、佐々木、山本)、MRFM・マイクロマシンニング (松本、江刺、王)、マグネット設計・作製 (松本、江刺、王)、初期化技術 (大野、伊藤)、演算技術 (山本)、同位体ナノテクノロジー (伊藤)。
- 15年度:** 拡張性・演算速度の定量的解析 (14年度)、NMR測定 (15年度)、マイクロマシンニング技術の確立 (15年度)、~~SiGe系への応用~~ (15年度)、光NMR装置設置 (14年度)、RF多重パルス発生装置開発とロジックの開発 (14・15・16年度)、STM付MBE装置の設置 (14年度)。
- 16年度:** 全シリコン量子コンピュータの位置づけ (16年度)、~~NMR測定~~ (16年度)、~~カンテレーバ試作~~ (16年度)、光初期化技術の確立 (16年度)、~~光初期化技術の確立~~ (16年度)、RF多重パルス発生装置開発とロジックの開発 (14・15・16年度)、Si表面物性の解明 (15・16年度)。
- 17年度:** 他量子ビットとのメディア変換にむけて (17・18年度)、~~小規模量子計算の実現~~ (17年度)、**エンタングルメント・小規模量子演算 in Silicon** (17年度)、Si同位体鎖の作製 (17年度)。
- 17・18年度:** 他量子ビットとのメディア変換にむけて (17・18年度)。

– 7 –

(2)実施体制



3 研究実施内容及び成果

3. 1 全体のとりまとめ (慶應義塾大学 伊藤公平グループ)

(1)研究実施内容及び成果

本研究の成果として発表した 54 編の欧文学術論文誌の 49 編で共著者であることから明らかな通り、本グループは研究代表者として、当該プロジェクトの全体を計画して、ほぼすべての研究推進に関わってきた。よって、2～5 ページに示した全体の実施内容とその成果が本伊藤公平グループの実施内容と成果である。シリコン量子コンピュータが現実的であり、量子情報分野全体においては量子メモリーとしての位置づけが適していることを理論・実験の両面から示したことが極めて重要である。よって、一般的には、超伝導・半導体量子ドット・イオントラップ・光子といった異なる量子計算方法の間での競争が着目されるが、実際には適材適所で中央演算ユニット・メモリー・量子通信を行えるようにする協調性が重要であることを計算機科学的に初めて示した。量子物理と計算機科学を融合させた点において世界から評価された。

(2)研究成果の今後期待される効果

量子情報分野への貢献は上記のとおりであるが、シリコンは電子産業の米であり、そのシリコンの集積化の極限として個々のシリコン原子にビット情報を蓄えて計算を行う内容が今後の産業界にも少なからずインパクトをあたえる。特に本研究が実現した個々の Si 原子の位置操作は究極のシリコンナノテクノロジーであり、それらのスピンの初期化・演算・読み出しも究極の制御・計測技術と言える。さらに個々の原子ではなく、数個の原子に情報を蓄えて、古典と量子の間で新しいコンピュータを構築できないかとの問い合わせが欧米の複数の企業から届いている。また、同位体テクノロジーを用いれば、高効率単一光子源がシリコンでも実現できるという期待があり、シリコンを用いた量子通信の可能性が見出すことへの期待も高い。よって、本研究成果は量子情報とシリコンエレクトロニクスの両方の発展に貢献することが期待されている。

3. 2 核スピン初期化と操作 (東北大学 大野裕三グループ)

(1)研究実施内容及び成果

核スピンを量子ビットとする量子コンピュータにおいては、ビットの初期化、すなわち高い核スピン分極状態を形成することが不可欠である。円偏光のレーザーポンプ光を照射するなどしてスピンの一方向に偏った電子を生成し素子に注入できれば、その情報が超微細相互作用を介して核スピンにも移行され、核スピンの揃うことが期待される。本研究の最終目標はシリコンに対して、光学的手法により熱平衡状態よりきわめて高い核スピン分極状態を実現することであり、実際に光を利用してシリコン中の電子スピンの偏極を生成することに成功した。しかし、間接遷移型半導体のシリコンでは光により電子スピン歳差運動を検知することが困難であるため、電子スピンと核スピンの相互作用を光により直接検知をすることが難しい。そこで、半導体中の電子スピンの揃えることから核スピンの揃う物理的な手法が可能であるか？を原理的に調べることを目的として、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た。この結果、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、核スピンの方向を揃えられることが明らかになった上、ゲート電界を変化させることにより電子スピン濃度を操作し緩和時間の測定を行ったうえ、核スピン集団の量子操作によるラビ振動観測と位相緩和時間測定に成功した。これらの直接遷移型半導体で得られた成果は、

間接遷移型半導体のシリコンにおいても電子スピンを介した核スピン操作が可能であることを示したという点で大変価値があり、世界的にも評価が高い成果である。

(2)研究成果の今後期待される効果

本項目の成果をうけて、研究代表者の伊藤公平グループが電子磁気共鳴を用いてシリコン中の電子スピン操作を行い、結果として核スピン分極の大幅な増大を得ることに成功した。また、電子スピンを介した核スピンの操作は、電子スピンと核スピンのエンタングルメント操作に相当するため、今後は、電子スピンの情報を核スピンに移動をし、また、その逆も行うなどの量子メディア変換という量子情報分野の発展の鍵となる重要技術への展開を見せている。

3. 3 核磁気共鳴技術（新潟大学 佐々木進グループ）

(1)研究実施内容及び成果

シリコン量子コンピュータにおける演算は、適切な周波数を有する電磁波を適性時間照射することによる核スピン操作によって実行する。その核スピン操作を行い、最終結果を読み出すために必用なのが核磁気共鳴(NMR)技術である。本CRESTプロジェクト開始当初は、集団平均（アンサンブル）用いた量子計算を計画したため、本項目では可能な限り少数の核スピンを検知する技術の開発を行った。当時の見積もりでは、観測対象となるシリコンの核スピンの個数が、通常のNMRで対象とする個数 10^{20-22} より数桁も少ない 10^{18} 以下となり、実際のそのような少数の核スピンを検出する測定系の構築に成功した。また、シリコン量子計算の性能指標となる ^{29}Si 核スピンの位相緩和時間精密測定に成功し、約 20ms と 200ms の二種類の位相緩和過程があることを見出した。この測定を基にして、伊藤グループと山本グループが共同で、位相緩和時間を 25 秒にまで延長することに成功し、結果としてシリコン量子コンピュータを開発する意義が見出された。さらに、松本・王グループが担当するマイクロマグネットの磁場勾配評価をNMRを用いて行うことに成功した。ここではマイクロマグネットの近傍ナノメートル領域に位置する非常に薄いアルミニウム膜の共鳴がマイクロマグネットによる磁場勾配で変化することを見出したが、元来は ^{29}Si 核スピン検出を目的として開発をした少数核スピン検知技術が、少数アルミニウム核スピン検出というマイクロマグネット実験でも不可欠の技術として役に立った。

(2)研究成果の今後期待される効果

研究代表者の伊藤公平グループは佐々木グループの装置向上を見習って核磁気共鳴装置の設置を行い、核スピン初期化を核磁気共鳴により確認した。また、マイクロマグネットの磁場勾配を測定するために用いた周波数を固定して磁場を掃引する手法は、核磁気共鳴では通常は用いられないことから、量子コンピュータという特殊な応用においては既成概念から脱却した発想が大切なことを示した。さらに核磁気共鳴は物理・化学・医療の広範囲で多用される評価技術であり、本項目の成果がマイクロマグネットを組み合わせたナノ領域スピン分布画像化につながることを期待される。

3. 4 マイクロマシンニング関連全般（慶應義塾大学 松本佳宣グループ）

(1)研究実施内容及び成果

全シリコン量子コンピュータを実現するためには、シリコン原子の核スピンの状態を個別に操作して読み出す事が必要となる。この際に、ある一つの量子スピンのみを選択するための手法として、大きな磁束勾配により各核スピンの核磁気共鳴周波数を変化させることを提案した。その実現にむけて、強磁場中にマイクロサイズの強磁性体材料を設置して、磁性材料の発生する磁束を外部磁界に重ね合わせる事

で磁束勾配を大きくする方法に着目した。磁束勾配を大きくするためには、磁性体の寸法を小さくする必要があるため、本研究では有限要素法を用いた磁気シミュレーションにより微小磁性体の形状を設計し、さらに微細加工技術を用いてミクロンサイズの微小磁性体を製作して評価する事を行った。マイクロマグネットの設計は松本グループが行い、製作は王グループが担当し、最終的な評価は松本グループと佐々木グループが共同で行った。マイクロマグネットの評価は、SQUID 式磁化特性測定装置と核磁気共鳴装置(NMR)を用い、微小磁性体の磁化特性と生成される磁束勾配による核磁気共鳴周波数の変化を測定した。その結果、マイクロマグネットが設計どおりの磁場勾配を発生していることを見出すことに成功した。磁場勾配の検証では、NMR の感度が ^{29}Si より高い Al を用いたことが成功の秘訣であった。

(2)研究成果の今後期待される効果

磁場勾配を用いた核磁気共鳴画像化が最も威力を発揮しているのが医療分野で盛んに用いられている MRI である。MRI の人体の輪切り映像は核磁気共鳴によって検出された水素核スピンの分布をしめすが、そこで位置分解能を決定するのが磁場勾配の大きさである。本項目で開発されたマイクロマグネットは、わずか $1\mu\text{m}$ の領域に 1 テスラ以上の磁場勾配を実現する技術で、今後はナノメーター領域における分子中の核スピン分布の検出などに応用できる可能性が高く、そのような応用も含むマイクロマグネット特許を本 CREST から申請した。現時点では 100 個以下の少数の核スピンを検出する技術がないが、そのような検出を可能とする技術が開発された折には、本項目で開発したマイクロマグネットが核スピン分布可視化に利用されるであろう。その他、量子コンピューティング開発を含めたあらゆる物理・化学・医療研究において、マイクロマグネットが実現する強磁場勾配が利用されることが期待される。

3. 5 マイクロマグネット製作（石巻専修大学 王東方グループ）

(1)研究実施内容及び成果

前項 3.4 で紹介したマイクロマグネットの製作を行った。飽和磁場が大きいマイクロマグネットの材料としてディスプレイウム(Dy)とパーマロイ(NiFe)を検討した結果、理論的には磁場勾配は大きいですが、作製中の酸化によって安定した磁場が得られない Dy を候補からはずし、NiFe のみに絞ったマイクロマグネット製作法の確立を行った。目標とするマイクロマグネットは高さ $1\mu\text{m}$ 、幅 $1\mu\text{m}$ 、奥行 $100\mu\text{m}$ 程度の直方体であるが、このように高さが $1\mu\text{m}$ もある NiFe をマスクを通した蒸着とリフトオフによって製作することは困難である。そこで、先に $1\mu\text{m}$ 厚のパーマロイ膜を Si 基板上に作製し、その後からリアクティブイオンエッチングにより微小マイクロマグネットを製作する技術の開発に取り組み成功した。

(2)研究成果の今後期待される効果

パーマロイは最も広く利用されている磁性材料であり、そのマイクロ化は様々な工学分野で求められている技術である。今回開発に成功したマイクロスケールでのパーマロイのエッチング技術は、これまでの精度を大幅に更新したものであり、さらに、その磁気特性を実験により直接確認をした点が新しい。すなわち、本項目で開発したエッチング技術はパーマロイ本来の磁気特性を壊すことなくマイクロ化できることを示した。今後はこのエッチング技術により多くのマグネットが作製されると期待される。

3. 6 核スピン観測理論（国立情報学研究所 山本喜久グループ）

(1)研究実施内容及び成果

核スピンをを用いた量子コンピュータを実現するためには、単一核スピンの初期

化・操作・検出が物理的に可能であるかを見極める必要がある。特に核スピンの磁気モーメントは、電子スピンの千分の一と極めて小さく（磁石として非常に弱い）、そのような核スピンを単一レベルで操作して読み出すことは不可能だと考えられてきた。その困難を克服するために、本項目では、まずは核スピン集団の精密な操作方法を開発し、多数核スピン間の磁気双極子相互作用のキャンセリングを実験により示すことに成功した。結果として、位相緩和時間 25 秒という、固体中の世界最高記録を得ることに成功した。次に光を用いた核スピンの初期化（一方向に揃える）に挑戦し、実際に熱平衡状態より 1000 倍にも達する偏極を得ることに成功した。これらの実験から得られた知見を利用して、いかにして単一核スピンの検出が可能かを理論的に示すことに成功した。以上の成果は、核スピンを用いるシリコン量子コンピュータの実現に向けたアキレス腱に相当する部分であり、山本グループと伊藤グループの共同研究として進められた。

(2)研究成果の今後期待される効果

当然のこととして、核スピン研究は原子物理学分野の中核として今に至っている。しかし、我々が日常用いる物質の性質は、ほとんどが電子によって決定されており、核スピンの存在を議論する必要はほとんどなかった。その固体物理学の分野に、核スピンという新しいコンセプトを新風として吹き込んだ成果の一つが本研究である。今後は固体中の核スピンに関する研究が盛んになり、結果として、社会生活の向上にも寄与する固体中の核スピン応用が見出されることが期待される。

4 研究参加者

①伊藤グループ（全体のとりまとめ）

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
伊藤 公平	慶大理工	助教授	グループリーダー	平成 13 年 12 月～ 平成 19 年 3 月
関口 武治	慶大理工	CREST 研究員	Si 表面工学	平成 14 年 5 月～ 平成 19 年 3 月
藤本 明良	慶大理工	研究補助 員	実験補助	平成 14 年 4 月～ 平成 18 年 5 月
押川 浩之	慶大理工	研究補助 員	実験補助	平成 18 年 5 月～ 平成 19 年 3 月
相澤 志乃	慶大理工	研究補助 員	事務処理	平成 13 年 12 月～ 平成 19 年 3 月
阿部 英介	慶大理工	大学院生	NMR 設置	平成 14 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
清水 康雄	慶大理工	大学院生	核スピン制御	平成 16 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
鶴見 大輔	慶大理工	大学院生	光学評価	平成 16 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
吉田 俊治	慶大理工	大学院生	Ge 量子ドット作製	平成 16 年 4 月～ 平成 18 年 3 月

高橋 敦士	慶大理工	大学院生	磁性体作製	平成 16 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
Van Meter, Rod	慶大理工	大学院生	情報科学的考察	平成 16 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
相良 暁彦	慶大理工	大学院生	初期化	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
宮本 聡	慶大理工	大学院生	核スピンドバイス評価	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
毛利 友隆	慶大理工	大学院生	核スピンドバイス作製	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
Moutanabbir,O	慶大理工	訪問研究 員	Ge 量子スピン操作	平成 17 年 4 月～ 平成 18 年 11 月
志連 陽平	慶大理工	大学院生	Si 表面工学	平成 18 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
林 宏	慶大理工	大学院生	初期化	平成 18 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
森下 弘樹	慶大理工	大学院生	初期化	平成 18 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
乙部 恵美	慶大理工	大学院生	核スピンドバイス作製	平成 18 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
郡司まり香	慶大理工		同位体材料	平成 18 年 4 月～ 平成 18 年 7 月
井上 博之	慶大理工		磁性体作製	平成 18 年 4 月～ 平成 18 年 7 月
加藤 治郎	慶大理工	大学院生	量子ビット光評価	平成 14 年 4 月～ 平成 15 年 3 月
小島 威裕	慶大理工	大学院生	量子ビット作製	平成 14 年 4 月～ 平成 15 年 3 月
高橋 智紀	慶大理工	大学院生	半導体プロセス一般	平成 14 年 4 月～ 平成 15 年 3 月
山田 利通	慶大理工	大学院生	量子ビット光評価	平成 14 年 4 月～ 平成 15 年 3 月
大屋 武	慶大理工	大学院生	量子ビット光評価	平成 14 年 4 月～ 平成 16 年 3 月
根橋 竜介	慶大理工	大学院生	量子ビット作製	平成 14 年 4 月～ 平成 16 年 3 月
松木 雄介	慶大理工	大学院生	量子ビット作製	平成 14 年 4 月～ 平成 16 年 3 月
深津 茂人	慶大理工	大学院生	Si 蒸発源の評価	平成 14 年 4 月～ 平成 17 年 3 月
上村 真史	慶大理工	大学院生	初期化	平成 14 年 4 月～ 平成 17 年 3 月

②松本グループ（マイクロマシンニング関連全般）

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
松本 佳宣	慶大理工	助教授	グループリーダー	平成 14 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
花井 計	慶大理工	大学院生	微細加工	平成 15 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
森 涼太郎	慶大理工	大学院生	微細加工	平成 16 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
磯貝 直樹	慶大理工	大学院生	磁性体作製	平成 18 年 4 月～ 平成 18 年 7 月

③江刺グループ（マイクロマグネットの製作）

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
江刺 正喜	東北大	教授	マグネット作製	平成 15 年 4 月～ 平成 16 年 3 月
王 東方	東北大	CREST 研究員	製膜・微細加工	平成 15 年 4 月～ 平成 16 年 3 月

④大野グループ（核スピン初期化と操作）

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
大野 裕三	東北大通研	助教授	グループリーダー	平成 14 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
大谷 啓太	東北大通研	大学院生	赤外分光	平成 15 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
好田 誠	東北大通研	大学院生	スピン注入	平成 14 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
松坂 俊一郎	東北大通研	大学院生	時間分解ファラデー回 転測定	平成 16 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
近藤 祐佑	東北大通研	大学院生	半導体核スピンコヒー レンス	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
森田 健	東北大通研	大学院生	光 NMR 測定	平成 14 年 4 月～ 平成 16 年 3 月
胡 承勇	東北大通研	CREST 研究員	光 NMR 測定	平成 14 年 8 月～ 平成 16 年 3 月
佐々木 正直	東北大通研	大学院生	スピン輸送	平成 15 年 4 月～ 平成 16 年 3 月
眞田治樹	東北大通研	大学院生	半導体量子構造全光 NMR	平成 14 年 4 月～ 平成 17 年 3 月

⑤佐々木グループ（核磁気共鳴技術）

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
佐々木 進	新潟大工	助教授	グループリーダー	平成 14 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
渡辺 信嗣	新潟大自	大学院生	高感度 NMR 全般	平成 15 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
渡辺 信嗣	新潟大工	CREST 研究員	高感度 NMR 全般	平成 18 年 4 月～ 平成 18 年 9 月
坂下 忠	新潟大自	大学院生	高感度 NMR 測定	平成 16 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
長井 智	新潟大自	大学院生	スピン注入 NMR	平成 16 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
原田 純仁	新潟大自	大学院生	磁場勾配 NMR 測定	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
三宅 浩子	新潟大自	事務員	事務処理	平成 17 年 5 月～ 平成 18 年 3 月
金子 雅一	新潟大自	大学院生	スピン注入 NMR	平成 18 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
佐藤 真哉	新潟大自	大学院生	スピン注入 NMR	平成 18 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
佐藤 智久	新潟大自	大学院生	NMR 測定	平成 14 年 4 月～ 平成 15 年 3 月
高橋 昌幸	新潟大自	大学院生	NMR 測定	平成 14 年 4 月～ 平成 15 年 3 月
土屋 能明	新潟大自	大学院生	NMR 測定	平成 14 年 4 月～ 平成 15 年 3 月
山崎 悟	新潟大自	大学院生	NMR 測定	平成 14 年 4 月～ 平成 16 年 3 月
星野 友孝	新潟大自	大学院生	高感度 NMR 測定	平成 15 年 4 月～ 平成 17 年 3 月
小野 俊彦	新潟大自	大学院生	スピン注入 NMR	平成 15 年 4 月～ 平成 17 年 3 月

⑥王グループ（マイクロマグネットの製作）

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
王 東方	石専大理工	助教授	グループリーダー	平成 16 年 4 月～ 平成 19 年 3 月

⑦山本グループ（核スピン観測理論）

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
山本 喜久	国立情報研	教授	核スピン観測理論	平成 14 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
宇都宮 聖子	国立情報研	大学院生	核スピン観測理論	平成 16 年 4 月～ 平成 19 年 3 月

5 招聘した研究者等

氏 名（所属、役職）	招聘の目的	滞在先	滞在期間
Ladd, Thaddeus（スタンフォード大学、リサーチアシスタント）	共同研究	慶應義塾大学	7 日
Leonid Vlasenko（ロシア科学アカデミー・研究者）	共同研究	慶應義塾大学理工学部	30 日
Leonid Vlasenko（ロシア科学アカデミー・研究者）	共同研究	慶應義塾大学理工学部	68 日
Marina Vlasenko（ロシア科学アカデミー・研究者）	共同研究	慶應義塾大学理工学部	68 日

6 成果発表等

(1)原著論文発表（国内誌 0 件、国際誌 54 件）

1. T. Sekiguchi, S. Yoshida, Y. Shiren, K. M. Itoh, J. Mysliveček, and B. Voigtländer, “One-Dimensional Ordering of Ge Nanoclusters along Atomically Straight Steps of Si(111),” Appl. Phys. Lett. **90**, 013108 (2006).
2. T. Sekiguchi, S. Yoshida, Y. Shiren, and K. M. Itoh, “Self-assembly of Periodic Nanoclusters of Si and Ge along Single Steps of a Vicinal Si(111),” 印刷中
3. H. Hayashi, W. Ko, T. Itahashi, A. Sagara, K. M. Itoh, L. S. Vlasenko, and M. P. Vlasenko, “Dynamic Nuclear Polarization of ^{29}Si Nuclei in the Isotope Enriched N-type Silicon,” Phys. Status Solidi C, **3**, 4388-4391 (2006).
4. L. S. Vlasenko, M. P. Vlasenko, D. S. Poloskin, R. Laiho, H. Hayashi, T. Itahashi, A. Sagara, and K. M. Itoh, “Electron Paramagnetic Resonance and Dynamic Nuclear Polarization via the Pphotoexcited Triplet States of Radiation Defects in Natural and ^{29}Si Isotope Enriched Silicon,” Phys. Status Solidi C, **3**, 4376-4379 (2006).
5. A. Yang, M. Steger, D. Karaickaj, M. L. W. Thewalt, M. Cardona, K. M. Itoh, H. Riemann, N. V. Abrosimov, M. F. Churbanov, A. V. Gusev, A. D. Bulanov, A. K. Kaliteevskii, O. N. Godisov, P. Becker, H.-J. Pohl, J. W. Ager III, and E. E. Haller, “Optical Detection and Ionization of Donors in Specific Electronic and Nuclear Spin States,” Phys. Rev. Lett. **97**, 227401 (2006).
6. M. Kohda, Y. Ohno, F. Matsukura, and H. Ohno, “Effect of N^+ -GaAs Thickness and Doping Density on Spin Injection of GaMnAs/ n^+ -GaAs Esaki Tunnel Junction,” Physica E, 印刷中.
7. H. Sanada, Y. Kondo, S. Matuzaka, K. Morita, Y. Ohno, and H. Ohno, “Optical Pump-Probe

- Measurements of Local Nuclear Spin Coherence in Semiconductor Quantum Wells*,” Phys. Rev. Lett. **96**, 067602 (2006).
8. K. K. Kohil, G. Davies, N. Q. Vinh, D. West, S. K. Estreicher, T. Gregorkiewicz, I. Izetdin, and K. M. Itoh, “*Isotope Dependence of the Lifetime of the 1136 cm^{-1} Vibration of Oxygen in Silicon*,” Phys. Rev. Lett. **96**, 225503 (2006).
 9. E. Abe, J. Isoya, and K. M. Itoh, “*Pulsed EPR Study of Spin Coherence Time of P Donors in Isotopically Controlled Si*,” Physica B **376-377**, 28-31 (2006).
 10. A. Yang, H. J. Lian, and M. L. W. Thewalt, M. Uemura, A. Sagara, K. M. Itoh, E. E. Haller, and S. A. Lyon, “*Isotopic Mass Dependence of the Lattice Parameter in Silicon Determined by Measurement of Strain-induced Splitting of Impurity Bound Exciton Transitions*,” Physica B **376-377**, 54-56 (2006).
 11. D. Tsurumi, K. M. Itoh and H. Yamada-Kaneta, “*Host Isotope Effect on the Localized Vibrational Modes of Oxygen Dimers in Isotopically Enriched Silicon*,” Physica B **376-377**, 959-962 (2006).
 12. R. Van Meter, K. M. Itoh, and T. D. Ladd, “*Architecture-Dependent Execution Time of Shor’s Algorithm*,” quant-ph/0507023 and Physica E, 印刷中.
 13. K. Morita, H. Sanada, S. Matsuzaka, C. Y. Hu, Y. Ohno, and H. Ohno, “*Strong Anisotropic Spin Dynamics in Narrow N-InGaAs/AlGaAs (110) Quantum Wells*,” Appl. Phys. Lett. **87**, 171905 (2005).
 14. M. Uematsu, H. Kageshima, S. Fukatsu, K. M. Itoh, K. Shiraishi, M. Otani, and A. Oshiyama, “*Enhanced Si and B Diffusion in Semiconductor-grade SiO_2 and the Effect of Strain on Diffusion*,” Thin Solid Films **508**, 270-275 (2005).
 15. 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).
 16. 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*,” Phys. Rev. B **72**, 121203 (R) (2005).
 17. H. Sanada, S. Matsuzaka, K. Morita, C. Y. Hu, Y. Ohno, and H. Ohno, “*Gate Control of Dynamic Nuclear Polarization in GaAs quantum Wells*,” Phys. Rev. Lett. **94**, 097601 (2005).
 18. T. Ohya, K. M. Itoh, R. N. Pereira, and B. B. Nielsen, “*Host Isotope Effect on the Local Vibration Modes of VH_2 and VOH_2 Defects in Isotopically Enriched ^{28}Si , ^{29}Si and ^{30}Si Single Crystals*,” Jpn. J. Appl. Phys. **44**, Part 1, 7309-7313 (2005).
 19. Y. Shimizu and K. M. Itoh, “*Growth and Characterization of Short-Period Silicon Isotope Superlattices*,” Thin Solid Films **508**, 160-162 (2005).
 20. T. Sekiguchi, S. Yoshida, and K. M. Itoh, “*Si Atom Wire Growth for Quantum Information Processing*,” Thin Solid Films **508**, 231-234 (2005).
 21. 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).
 22. 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).
 23. 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).
 24. A. S. Verhulst, I. G. Rau, Y. Yamamoto, and K. M. Itoh, “*Optical Pumping of ^{29}Si Nuclear Spins in Bulk Silicon at High Magnetic Field and Liquid Helium Temperature*,” Phys. Rev. B **71**, 235206 (2005).
 25. 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 $\text{CO}/\text{NH}_3/\text{Xe}$ Plasma Chemistry for an All-Silicon Quantum Computer*,” Nanotechnology, **16**, 990-994 (2005).
 26. R. Van Meter and K. M. Itoh, “*Fast Quantum Modular Exponentiation*,” Phys. Rev. A **71**, 052320 (2005).

27. 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).
28. G. Davies, S. Hayama, S. 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).
29. K. M. Itoh, "An All-Silicon Linear Chain NMR Quantum Computer," *Solid State Comm.* **133**, 747 (2005).
30. 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).
31. M. Uematsu, H. Kageshima, Y. Takahashi, S. Fukatsu, K. M. Itoh, and K. Shiraishi, "Simulation of Correlated Diffusion of Si and B in Thermally Grown SiO_2 ," *J. Appl. Phys.* **96**, 5513-5519 (2004).
32. S. Fukatsu, K. M. Itoh, M. Uematsu, H. Kageshima, Y. Takahashi, and K. Shiraishi, "The Effect of the Si/ SiO_2 Interface on Silicon and Boron Diffusion in Thermally Grown SiO_2 ," *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, 7837-7842 (2004).
33. M. Uematsu, H. Kageshima, Y. Takahashi, S. Fukatsu, K. M. Itoh, and K. Shiraishi, "Correlated Diffusion of Silicon and Boron in Thermally Grown SiO_2 ," *Appl. Phys. Lett.* **85**, 221-223 (2004).
34. S. Hayama, G. Davies, and K. M. Itoh, "Photoluminescence Studies of Implantation Damage Centers in ^{30}Si ," *J. Appl. Phys.* **96**, 1754-1756 (2004).
35. E. Abe, K. M. Itoh, J. Isoya, and S. Yamasaki, "Electron Spin Phase Relaxation of Phosphorus Donors in Nuclear Spin Enriched Silicon," *Phys. Rev. B*, **70**, 033204 (2004).
36. S. Hayama, G. Davies, J. Tan, J. Coutinho, R. Jones, and K. M. Itoh, "Lattice Isotope Effects on Optical Transitions in Silicon," *Phys. Rev. B*, **70**, 035202 (2004).
37. M. Uematsu, A. Fujiwara, H. Kageshima, Y. Takahashi, S. Fukatsu, K. M. Itoh, K. Shiraishi, and U. Gösele, "Modeling of Si Self-Diffusion in SiO_2 Taking into Account the Effect of the Si/ SiO_2 Interface and Evidence of Time-Dependent Diffusion," *Appl. Phys. Lett.* **84**, 876-878 (2004).
38. A. Hirai and K. M. Itoh, "Site Selective Growth of Ge Quantum Dots on AFM Patterned Si Substrates," *Physica E*, **23**, 248-252 (2004).
39. 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 SiO_2 ," *Jpn. J. Appl. Phys. Pt.2*, **42**, L1492-L1494 (2003).
40. 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).
41. A. V. Inyushkin, A. N. Taldenkov, V. I. Ozhogin, K. M. Itoh, and E. E. Haller, "Isotope Effect on the Phonon-Drag Component of the Thermoelectric Power of Germanium," *Phys. Rev. B* **68**, 153203 (2003).
42. I. G. Kuleev, I. I. Kuleev, A. N. Taldenkov, A. V. Inyushkin, V. I. Ozhogin, K. M. Itoh, and E. E. Haller, "Normal Processes of Phonon-Phonon Scattering and the Drag Thermopower in Germanium Crystals with Isotopic Disorder," *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, **96**, 1078-1088 (2003).
43. S. Fukatsu, T. Takahashi, K. M. Itoh, M. Uematsu, A. Fujiwara, H. Kageshima, Y. Takahashi, K. Shiraishi, and U. Gösele, "Effect of the Si/ SiO_2 Interface on Self-Diffusion of Si in Semiconductor-Grade SiO_2 ," *Appl. Phys. Lett.* **83**, 3897-3899 (2003).
44. R. N. Pereira, T. Ohya, K. M. Itoh, and B. Bech Nielsen, "Local Vibrational Modes of Bond-Centered H in ^{28}Si , ^{29}Si , and ^{30}Si Crystals," *Physica B*, **340-342**, 697-700 (2003).
45. K. Tanigaki, T. Shimizu, K. M. Itoh, J. Teraoka, Y. Moritomo, and S. Yamanaka, "Mechanism of superconductivity in the polyhedral-network compound $\text{Ba}_8\text{Si}_{46}$," *Nature Materials*, **2**, 653-655 (2003).
46. T. Kojima, R. Nebashi, 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).
47. 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).
48. 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, **68**, 054105 (2003).
 49. S. Watanabe and S. Sasaki, " ^{29}Si Nuclear-Spin Decoherence Process Directly Observed by Multiple Spin-Echoes for Pure and Carrier-Less Silicon," Jpn. J. Appl. Phys. **42** LL1350-1352 (2003).
 50. 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).
 51. E. Abe, K. M. Itoh, T. D. Ladd, J. R. Goldman, F. Yamaguchi, and Y. Yamamoto, "Solid-State Silicon NMR Quantum Computer," J. Superconductivity, **16**, 175-178 (2003).
 52. 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. **93**, 3674-3676 (2003).
 53. J. Kato and K. M. Itoh, "Far-Infrared Spectroscopy of Coulomb Gap in Compensated Semiconductors," J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. **72**, 215-216 (2003).
 54. T. D. Ladd, J. R. Goldman, F. Yamaguchi, Y. Yamamoto, E. Abe, and K. M. Itoh, "All-Silicon Quantum Computer," Phys. Rev. Lett. **89**, 017901 (2002).

(2)その他の著作物

著書

1. 伊藤公平「量子コンピュータとスピントロニクス」、スピントロニクス猪俣浩一郎編・(株)CMC 出版発行、第 22 章 2004 年
2. 伊藤公平「赤外線イメージ炉を用いたシリコン単結晶の成長」、赤外線加熱工学ハンドブック・アグネ技術センター、270～275 頁 (2003)
3. 伊藤公平「全シリコン量子コンピュータ」、数理科学「量子情報科学とその展開 量子コンピュータ・暗号・情報通信」、平成 15 年 4 月 10 日(株)サイエンス社発行、121～128 頁。

解説論文

1. 伊藤公平,「スピンを使った量子計算」, 日本学術振興会学術月報, Vol. 58, No. 4, 291-295 (2005).
2. 伊藤公平,「 $^{28}\text{Si}_n/^{30}\text{Si}_n$ 同位体超格子の成長と評価」, 日本結晶成長学会誌, Vol.31, No.1, 38-42 (2004).
3. 伊藤公平,「量子演算につながるコヒーレンス」, 応用物理, **73**, No. 6, 782-786(2004).
4. 佐々木進, 伊藤公平,「シリコン結晶中の核スピン量子コヒーレンス」, 固体物理, Vol. 38, No. 11, 801-815 (2003).
5. 伊藤公平,「シリコン量子コンピュータ」 固体物理, Vol. 38, No. 4, 269-278 (2003).
6. 伊藤公平,「量子コンピュータ開発のためのナノテクノロジー」, 生産研究, Vol. 55, No. 4, 351-357 (2003).
7. 伊藤公平,「シリコン半導体からみた量子コンピューター」, 機能材料, Vol. 23, No. 12, 8-13 (2003).

その他

1. 伊藤公平「凝縮系の物理 量子ビットから固体量子コンピューターへの道のり」, パリティ, 2005 年 1 月号, Vol.20, No.1, pp. 21～23
2. 伊藤公平「未来の高速計算機、量子コンピューターをシリコンで実現へ」, 日経先端技術, No.41, 18-21 (2003).

(3)学会発表（国際学会発表及び主要な国内学会発表）

- ① 招待講演（国内会議 24 件、国際会議 22 件）
- ② 口頭発表（国内会議 20 件、国際会議 17 件）
- ③ ポスター発表（国内会議 2 件、国際会議 11 件）

国際学会基調講演

1. K. M. Itoh, "Silicon Quantum Computer," 27th International Conference on Physics of Semiconductors, Flagstaff, Arizona, USA, July 26-August 30, 2004.

国際学会招待講演

1. K. M. Itoh, "Nanospintronics - New Discovery and Application," Nanoelectronics Days 2006, October 11-13, 2006, Aachen, Germany.
2. K. M. Itoh, "Nanodomain Phase Transitions," The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), Emerging Research Logic Devices Workshop, September 21, 2006, Montreux, Switzerland.
3. M. L. W. Thewalt, A. Yang, M. Steger, D. Karaiskaj, M. Cardona, H. Riemann, N. V. Abrasimov, A. V. Gusev, A. D. Bulanov, A. K. Kaliteevskii, O. N. Godisov, P. Becker, H.-J. Pohl, E. E. Haller, J. W. Ager III, and K. M. Itoh, "Photoluminescence and Photocurrent Detection of an Impurity Nuclear Spin: ^{31}P in Highly Enriched ^{28}Si ," The 4th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors, August 15-18, 2006, Sendai, Japan.
4. T. Sekiguchi, S. Yoshida, K. M. Itoh, J. Myslivěček, and B. Voigtländer, "Self-Assembly of Periodic Nano-Dots of Silicon and Germanium on a Vicinal Silicon (111) Surface," The 28th International Conference on Physics of Semiconductors, July 24-28, 2006, Vienna, Austria.
5. K. M. Itoh, "Silicon Quantum Information Processing," The XI International Conference on Quantum Optics (ICQO2006), May 26-31, 2006, Minsk, Belarus.
6. K. M. Itoh, "Recent Progress Towards Silicon-Based Quantum Computing," The International Workshop on Solid State Based Quantum Information Processing (QIP2006), May 24-26, 2006, Herrsching, Germany.
7. K. M. Itoh, "Spintronics - New Discovery and Application," The Second International Nanotechnology Conference on Communications and Cooperation (INC2), May 15-18, 2006, Washington DC, USA.
8. K. M. Itoh, "Silicon Quantum Computers," Japan-America Frontiers of Engineering Symposium, November 3-5, 2005, San Jose, USA.
9. T. Sekiguchi, S. Yoshida, and K. M. Itoh, "Self-Assembly of Parallel Atomic Wires and Periodic Nano-Dots of Silicon and Germanium on a Vicinal Silicon (111) Surface," MRS Fall Meeting, Nov. 27- Dec. 2, 2005, Boston, USA.
10. K. M. Itoh, "Control of Nuclear Spins," Lecturer at The 3rd International Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (Spintech III), August 1-5, 2005, Hyogo, Japan.
11. K. M. Itoh, "Silicon Nuclear-Spin Quantum Computer," 2005 Silicon Nanoelectronics Workshop, June 12-13, 2005, Kyoto, Japan.
12. S. Hosoi, K. Nakajima, M. Suzuki, K. Kimura, Y. Shimizu, S. Fukatsu, K. M. Itoh, M. Uematsu, H. Kageshima, and K. Shiraishi, "Oxidation of Si(001) Studied by High-Resolution RBS in Combination with Stable Isotope Tracing," The 17th International Conference on Ion-Surface Interactions (ISI-2005), Zvenigorod, August, 2005.
13. M. Uematsu, H. Kageshima, S. Fukatsu, K. M. Itoh, and K. Shiraishi, "Enhanced Si and B Diffusion in Semiconductor-Grade SiO₂ and the Effect of Strain on Diffusion," The Fourth International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures (ICSI-4), Hyogo, May, 2005.
14. K. M. Itoh, "Silicon Isotope Nanostructures," The 4th International Conference on Superlattices, Nanostructures, and Nanodevices, July 19-23, 2004, Cancun, Mexico.

15. K. M. Itoh and Y. Yamamoto, "All-Silicon Solid-state Quantum Computer," Solid State Quantum Information Processing Conference, Amsterdam, The Netherlands, December 15-18, 2003.
16. K. M. Itoh, "Phonon and Spin Engineering in Silicon," The Forum on the Science and Technology of Silicon Materials 2003, Shonan, Japan, November 25-27, 2003.
17. K. M. Itoh, "Silicon Quantum Computer," International Conference on Quantum Information, Kyoto, Japan, November 5-7, 2003.
18. K. M. Itoh, "The Actual and Projected Availability of Highly Purified Nuclear-Spin-Free Epi-grade Si & Ge, and of Highly Purified Si²⁹," Workshop on Quantum Information in Group IV Semiconductors, Oxnard, CA, USA, March 28-29, 2003.
19. K. M. Itoh, "Metal Insulator Transition in Doped Semiconductors," Workshop on Glassy Transition, Aspen Institute of Physics, Aspen, USA, July 27-August 11, 2003.
20. K. M. Itoh, "Materials Science Education at Keio University: Adopting U. S. Instruction Practices in Japan," Materials Research Society Fall Meeting, December 2-6, 2002, Boston, USA.
21. K. M. Itoh "Semiconductor Spintronics," discussion leader, Gordon Research Conference on Point and Line Defects in Semiconductors, Colby-Sawyer College, New Hampshire, USA, July 7-12, 2002.

国外大学・研究機関講演

1. K. M. Itoh, "Silicon-Based Quantum Computing," Seminar, National Institute for Nanotechnology, November 9, 2006, Edmonton, Canada.
2. K. M. Itoh, "Silicon-Based Quantum Computing," Physics and Chemistry Colloquium, University of British Columbia, November 8, 2006, Vancouver, Canada.
3. K. M. Itoh, "Silicon Quantum Computer," Ecole Centrale Lyon, February 16, 2006, Lyon, France.
4. K. M. Itoh, "Silicon Spintronics," Seminar, IBM Almaden Research Center, November 2, 2005, San Jose, USA.
5. K. M. Itoh, "Silicon Isotope Engineering for Classical and Quantum Computers," Materials Engineering Seminar, Stanford University, November 1, 2005, Stanford, USA.
6. K. M. Itoh, "Making of Japanese Sword (Katana)," Boise State University, March 17, 2004, Boise, USA.
7. K. M. Itoh, "Si Self-Diffusion in SiO₂," Seminar, University of California, Berkeley, March 19, 2004, USA.
8. K. M. Itoh, "Isotope Engineering of Semiconductors," Korea Atomic Energy Research Institute, September 21, 2004, Taejeon, Korea.
9. K. M. Itoh, "Silicon Quantum Computer," Physics Colloquium, Seoul National University, September 22, 2004, Seoul, Korea.
10. K. M. Itoh, "Silicon Quantum Computer," Physics Colloquium, Sogang University, September 23, 2004, Seoul, Korea.
11. K. M. Itoh, "Silicon Quantum Computer," Colloquium, Korea Institute of Advanced Study, September 24, 2004, Seoul, Korea.
12. K. M. Itoh, "Silicon Quantum Computer," Colloquium, Massachusetts Institute of Technology, December 2, 2004, USA.
13. K. M. Itoh, "Silicon NMR Quantum Computing," Seminar, Harvard University, December 3, 2004, USA.
14. K. M. Itoh, "Mott-Anderson Transition," National High Magnet Field Laboratory, June 17, 2004, Florida State University, Tallahassee, USA.

国際学会一般発表

1. J. T. Robinson, O. Moutanabbir, F. Ratto, S. Heun, M. Tonezzer, A. Locatelli, O. T. Menten, L. Aballe, A. Liddl, K. M. Itoh, O.D. Dubon, "X-ray Spectromicroscopy Mapping of Metal-Induced Ordering of Semiconductor Nanostructures," The 10th ISSP International Symposium on Nanoscience at Surfaces, October 9-13, 2006, Kashiwa, Chiba, Japan. ポスター発表

2. O. Moutanabbir, S. Miyamoto, K. M. Itoh, "Subtleties in the Epitaxial Growth of Ge/Si Nanostructures Revealed by Raman Scattering in Combination with Stable Isotopes Tracing," 2nd International Workshop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics, October 2-3, 2006, Sendai, Japan. ポスター発表
3. T. Sekiguchi, S. Yoshida, Y. Shiren, and K. Itoh, "Self-Arranged Nanostructures of Si and Ge Along a Well-Defined Atomic Steps on a Vicinal Si(111)," The 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, September 3-8, 2006, Waseda, Japan. 口頭発表
4. Y. Shimizu, and K. Itoh, "MBE Growth and Raman Characterization of Silicon Isotope Superlattices," The 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, September 3-8, 2006, Waseda, Japan. 口頭発表
5. O. Moutanabbir, S. Miyamoto, A. Fujimoto, and K. Itoh, "Isotopically Controlled Self-Assembled Ge/Si Nanostructures," The 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, September 3-8, 2006, Waseda, Japan. 口頭発表
6. L.S. Vlasenko, M.P. Vlasenko, D.S. Poloskin, R. Laiho, H. Hayashi, A. Sagara, and K. M. Itoh, "Electron paramagnetic resonance and dynamic nuclear polarization via the photoexcited triplet states of radiation defects in natural and ²⁹Si isotopically enriched silicon," The 4th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors, August 15-18, 2006, Sendai, Japan. ポスター発表
7. H. Hayashi, W. Ko, H. Morishita, N. Isogai, A. Sagara, K. M. Itoh, and L. S. Vlasenko, "Dynamic nuclear polarization of ²⁹Si nuclei in isotopically enriched n-type silicon," The 4th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors, August 15-18, 2006, Sendai, Japan. ポスター発表
8. Y. Shimizu and K. M. Itoh, "Self-diffusion of Si at low temperatures ($T < 855$ C) revealed by annealing and Raman spectroscopy of Si isotope superlattices," The 28th International Conference on Physics of Semiconductors, July 24-28, 2006, Vienna, Austria. 口頭発表
9. R. Van Meter, W. J. Munro, K. Nemoto, and K. M. Itoh, "Distributed Arithmetic on a Quantum Multicomputer," The 33rd Annual International Symposium on Computer Architecture, June 17-21, 2006, Boston, USA. 口頭発表
10. A. Yang, H. J. Lian, and M. L. W. Thewalt, M. Uemura, A. Sagara, K. M. Itoh, E. E. Haller, and S. A. Lyon, "Isotopic mass dependence of the lattice parameter in silicon determined by measurement of strain-induced splitting of impurity bound exciton transitions," The 23rd Intl. Conf. on Defects in Semiconductors, July 24-29, 2005, Awaji Island, Hyogo, Japan. 口頭発表
11. Y. Shimizu and K. M. Itoh, "Low temperature self-diffusion of silicon determined by Raman scattering of Si isotope superlattices," The 23rd Intl. Conf. on Defects in Semiconductors, July 24-29, 2005, Awaji Island, Hyogo, Japan. ポスター発表
12. M. Tsuchiya, M. Uematsu and K. M. Itoh, "Effect of silicon nitride capping layers on phosphorus diffusion in thermally formed SiO₂," The 23rd Intl. Conf. on Defects in Semiconductors, July 24-29, 2005, Awaji Island, Hyogo, Japan. ポスター発表
13. D. Tsurumi, K. M. Itoh and H. Yamada-Kaneta, "Host isotope effect on the localized vibrational modes of oxygen dimers in isotopically enriched silicon," The 23rd Intl. Conf. on Defects in Semiconductors, July 24-29, 2005, Awaji Island, Hyogo, Japan. ポスター発表
14. K. M. Itoh, S. Yoshida, and T. Sekiguchi, "Si Atomic Wire Growth for Quantum Information Processing," The Fourth International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures (ICSI-4), May, 2005, Hyogo, Japan. 口頭発表
15. Y. Shimizu and K. M. Itoh, "Growth and Characterization of Short-Period Silicon Isotope Superlattices," The Fourth International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures (ICSI-4), May, 2005, Hyogo, Japan. 口頭発表
16. S. Yoshida, T. Sekiguchi, and K. M. Itoh, "Preparation of the Atomically Straight Step-edge Si (111) Substrates as Templates for Nanostructure Formation," The Materials Research Society Fall Meeting, November 29 - December 3, 2004, Boston, MA, USA. ポスター発表
17. T. Sekiguchi, S. Yoshida, and K. M. Itoh, "Fabrication of a Regular Array of Atomic Silicon Wires on Silicon," The Materials Research Society Fall Meeting, November 29 - December 3,

- 2004, Boston, MA, USA. ポスター発表
18. A. Takahashi, Dong F. Wang, Y. Matsumoto, K. M. Itoh, "Development of NiFe Micro Magnet Stripes for Solid-state NMR Quantum Computing", Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems, December 12-15, 2004, Sydney, Australia. 口頭発表
 19. Dong F. Wang, T. Ono, A. Takahashi, Y. Matsumoto, K.M. Itoh, Y. Yamamoto and, M. Esashi, "Micromachining of a Permalloy Mesa Structure for All-silicon Quantum Computer," Proc. the 18th Euro. Conf. on Solid-State Transducers (Euroensors XVIII) , September, 2004, Roma, Italy. 口頭発表
 20. E. Abe, K. M. Itoh, and J. Isoya, "Electron Spin Coherence of Phosphorus Donors in Isotopically Purified ^{29}Si Single Crystals," The 3rd International Conference on Physics and Application of Spin Related Phenomena in Semiconductors, July 21-23, 2004, Santa Barbara, CA, USA. 口頭発表
 21. M. Uematsu, H. Kageshima, Y. Takahashi, S. Fukatsu, K. M. Itoh, and K. Shiraishi, "Enhancement of Si Self-Diffusion by the Existence of B in SiO_2 " 2004 International Workshop on DIELECTRIC THIN FILMS FOR FUTURE ULSI DEVICES-SCIENCE AND TECHNOLOGY, National Museum of Emerging Science and Innovation, May 26-28, 2004, Tokyo, Japan. 口頭発表
 22. S. Fukatsu, T. Takahashi, K. M. Itoh, M. Uematsu, A. Fujiwara, H. Kageshima, Y. Takahashi, and K. Shiraishi, "The Effect of the Si/ SiO_2 Interface on Boron Diffusion in SiO_2 ," 2004 International Workshop on DIELECTRIC THIN FILMS FOR FUTURE ULSI DEVICES-SCIENCE AND TECHNOLOGY, National Museum of Emerging Science and Innovation, May 26-28, 2004, Tokyo, Japan. 口頭発表
 23. R. N. Pereira, T. Ohya, K. M. Itoh, and B. Bech Nielsen, "Local Vibrational Modes of Bond-centered H in ^{28}Si , ^{29}Si , and ^{30}Si crystals," The 22nd International Conference on Defects in Semiconductors, July 28-August 1, 2003, Arhus, Denmark. ポスター発表
 24. K. M. Itoh, T. Kojima, and Y. Shiraki, "Growth and Characterization of $^{28}\text{Si}_n/^{30}\text{Si}_n$ Isotope Superlattices," The 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, July 14-18, 2003, Nara, Japan. 口頭発表
 25. K. M. Itoh, "All-Silicon Quantum Computer," Gordon Research Conference on Quantum Information Science, March 23-38, 2003, Ventura, CA, USA. ポスター発表
 26. T. Kojima, J. Kato, K. M. Itoh, and Y. Shiraki, "MBE Growth of Si Isotope Superlattices," The 3rd International Conference on SiGe(C) Epitaxy and Heterostructures, March 9-12, 2003, Santa Fe, NM, USA. 口頭発表
 27. S. Fukatsu, K. M. Itoh, Y. Shiraki, and K. Nakagawa, "Characterization of MBE Silicon Layers Grown with a Focused Electron Beam Gun and a High Temperature Effusion Cell," The 3rd International Conference on SiGe(C) Epitaxy and Heterostructures, March 9-12, 2003, Santa Fe, NM, USA. 口頭発表
 28. T. Sekiguchi, Y. Matsumoto, and K. M. Itoh, "Materials Engineering Towards Realization of an All Silicon Quantum Computer," Materials Research Society Fall Meeting, December 2-6, 2002, Boston, USA. 口頭発表

国内学会招待講演

1. K. M. Itoh, "Condensed Matter Research Towards Silicon Quantum Computing," CREST/IRS Workshop on the Quantum Information and Computation, Tokyo Institute of Technology, August 8-9, 2006. (招待講演)
2. 伊藤公平「ナノシリコンの将来像」J S T 研究開発戦略センター ナノ・電子情報材料小検討会, 東京, 2006 年 8 月 5 日 (招待講演)
3. 伊藤公平「核スピンシリコン量子コンピュータ」, 東工大イノベーション研究推進体量子情報処理デバイス研究会, 東京工業大学, 2005 年 5 月 30 日 (招待講演)
4. 伊藤公平「ナノ Si テクノロジー」, IEEE EDS Japan Chapter・電気学会共催「来るべきナノ CMOS 時代に向けての挑戦とその課題シンポジウム」, 早稲田大学, 2005 年 4 月 27 日・28 日 (招待講演)

5. 伊藤公平「シリコン量子コンピュータ」, 佐々木シンポジウム, 東京大学, 2004 年 12 月 22・23 日 (招待講演)
6. 伊藤公平「シリコン量子コンピュータ」, 量子情報処理シンポジウム, 一橋記念講堂, 2004 年 12 月 20・21 日 (招待講演)
7. 伊藤公平「シリコン量子コンピュータ」, 第 42 回茅コンファレンス「量子情報処理の物理と技術」2004 年 8 月 23-15 日, 宮城蔵王ロイヤルホテル (招待講演)
8. 植松真司, 影島博之, 高橋庸夫, 深津茂人, 伊藤公平, 白石賢二, 「Si 酸化膜中における B 拡散と Si 自己拡散の相関」, 応用物理学会 Si テクノロジー研究会 (電子情報通信学会共催), 2004 年 6 月 (招待講演)
9. 伊藤公平「核スピンのコヒーレンス時間」, 日本物理学会第 59 回年次大会, 平成 16 年 3 月 27-30 日, 九州大学 (シンポジウム講演)
10. 伊藤公平「シリコン量子コンピューター」, 日本応用磁気学会第 134 回研究会「スピントロニクス」の現状と将来, 平成 15 年 1 月 29-30 日 (招待講演)
11. 伊藤公平「半導体中の不純物や欠陥を用いた量子コンピューティング」, 第 4 回・シリコン材料の科学と技術フォーラム「原子・分子操作を用いた欠陥・ナノ構造の制御」, 平成 15 年 9 月 23-25 日 (招待講演)
12. 伊藤公平「将来のシリコンウェーハ Si28 の可能性-高熱伝導度, 高移動度シリコン同位体ウェーハの最新動向-」, 第 12 回半導体プロセスシンポジウム「65nm ノードに向けた半導体プロセス技術の最新開発状況」, 平成 15 年 9 月 18 日 (招待講演)
13. 佐々木進, 伊藤公平「シリコン核スピン量子操作」, 東大セミナー「固体中の量子コヒーレンスと量子計算への展開」, 平成 15 年 9 月 10 日 (招待講演)
14. 伊藤公平「全シリコン量子コンピュータ」, 国際高等研・学振・調査委員会「物質科学とシステムデザイン」, 平成 15 年 6 月 20-21 日 (招待講演)
15. 伊藤公平「量子コンピュータ開発のためのナノテクノロジー」, 第 16 回生研学術講演会ナノテクノロジーの進展とエレクトロニクスへの展開, 2003 年 4 月 10 日, 東京大学生産技術研究所 (招待講演)
16. 伊藤公平「ナノテクノロジーにもとづく量子コンピュータ開発」, JAPAN NANO2003 (第一回ナノテクノロジー総合シンポジウム), 2003 年 2 月 3 日~4 日, 東京ファッショントウン (招待講演)
17. 伊藤公平「半導体中の電子はどのように遍歴化するか?: モット・アンダーソン転移の臨界指数」, 佐々木シンポジウム, 2002 年 11 月 29~30 日, 東京大学物性研究所 (招待講演)
18. 伊藤公平「半導体表面・界面同位体工学」第 22 回表面科学講演大会, 2002 年 11 月 26~28 日, 早稲田大学 (招待講演)
19. 伊藤公平「量子コンピュータの実現に向けた課題」, 久保記念シンポジウム, 2002 年 9 月 28 日, 東京理科大学 (招待講演)
20. 伊藤公平, 阿部英介「半導体核スピン量子コンピューティング」, 第 21 回電子材料シンポジウム(EMS-21), 2002 年 6 月 19~21 日, 伊豆長岡 (招待講演)
21. 伊藤公平「核スピン量子ビット」, 電子情報通信学会電子デバイス量子情報技術研究会「量子情報処理--その実現にむけて」, 2002 年 3 月 15 日, 東京・機械振興会館 (招待講演)
22. 阿部英介, 伊藤公平, T. Ladd, J. Goldman, 山口文子, 山本喜久「全シリコン量子コンピューティング」, 応用電子物性分科会研究例会「スピントロニクスの最前線」, 2001 年 10 月 17 日, 機械振興会館 (招待講演)
23. 伊藤公平「半導体核スピン量子コンピューティング」, 応用物理学会応用電子物性分科会研究例会, 平成 13 年 10 月, 東京 (招待講演)
24. 伊藤公平「半導体核スピン量子ビット」, 日本物理学会 2001 年秋季大会, 徳島文理大学 (招待講演)

国内学会一般講演

1. 清水康雄, 伊藤公平, 奥井登志子, 白木靖寛, 高野明雄「イオン注入によるシリコン原子のミキシングの定量評価」, 秋季第 67 回応用物理学会学術講演会, 2006 年 8 月 29 日-9 月 1 日, 立命館大学
2. 吉田俊治, 関口武治, 伊藤公平「Si(111)ステップ構造を利用した Ge ナノ構造制御」, 春季第 53 回応用物理学関係連合講演会, 2006 年 3 月 22 日-26 日, 武蔵工業大学
3. 清水康雄, 伊藤公平, 奥井登志子, 白木靖寛, 高野明雄「シリコン同位体超格子を用いた砒素注入時のミキシングの SIMS による評価」, 春季第 53 回応用物理学関係連合講演会, 2006 年 3 月 22 日-26 日, 武蔵工業大学
4. 植松真司, 郡司まり香, 土谷大, 伊藤公平「Si 熱酸化中の界面近傍における酸素ミキシングの促進」, 春季第 53 回応用物理学関係連合講演会, 2006 年 3 月 22 日-26 日, 武蔵工業大学
5. 細井重孝, 中嶋 薫, 鈴木基史, 木村健二, 清水康雄, 深津茂人, 伊藤公平, 植松真司, 影島博之, 白石賢二「Si の同位体を用いた熱酸化に伴う酸化膜中への Si 放出の観測」, 春季第 52 回応用物理学関係連合講演会, 2005 年 3 月
6. 星野友孝, 渡辺信嗣, 小野俊彦, 佐々木進, 阿部英介, 伊藤公平「多重パルス列による Si の NMR 測定」, 日本物理学会秋の分科会, 2004 年 9 月 13 日, 青森大学
7. 深津茂人, 伊藤公平, 植松真司, 影島博之, 高橋庸夫, 白石賢二「半導体ヘテロ構造を用いた SiO₂ 中の Si 自己拡散の Si/SiO₂ 界面距離依存性の評価」, 秋季第 65 回応用物理学学術講演会, 2004 年 9 月
8. 植松真司, 影島博之, 深津茂人, 伊藤公平, 高橋庸夫, 白石賢二「Si 酸化膜中の Si 自己拡散に対する SiN キャップ堆積法の影響」, 秋季第 65 回応用物理学学術講演会, 2004 年 9 月
9. 関口武治, 吉田俊治, 伊藤公平「Si(111)微斜面の[112]ステップ構造」, 2004 年(平成 16 年)春季 第 51 回応用物理学関係連合講演会, 平成 16 年 3 月 28-31 日, 東京工科大学
10. 吉田俊治, 関口武治, 伊藤公平「Si(111)表面ステップにおける研磨方位と電流方向依存性」, 2004 年(平成 16 年)春季 第 51 回応用物理学関係連合講演会, 平成 16 年 3 月 28-31 日, 東京工科大学
11. 平井朝子, 伊藤公平「AFM 陽極酸化による Ge 量子ドットの配置および形状選択成長」, 2004 年(平成 16 年)春季 第 51 回応用物理学関係連合講演会, 平成 16 年 3 月 28-31 日, 東京工科大学
12. 高橋敦士, 王東方, 松本佳宣, 伊藤公平「全シリコン量子コンピュータ用 NiFe メサ構造の微細加工」, 2004 年(平成 16 年)春季 第 51 回応用物理学関係連合講演会, 平成 16 年 3 月 28-31 日, 東京工科大学
13. 植松真司, 影島博之, 高橋庸夫, 深津茂人, 伊藤公平, 白石賢二「B ドープ酸化膜中の Si 自己拡散」, 2004 年(平成 16 年)春季 第 51 回応用物理学関係連合講演会, 平成 16 年 3 月 28-31 日, 東京工科大学
14. 植松真司, 影島博之, 高橋庸夫, 深津茂人, 伊藤公平, 白石賢二, U. Gosele「酸化膜中における B 拡散の酸化膜/Si 界面からの距離依存性」, 2004 年(平成 16 年)春季 第 51 回応用物理学関係連合講演会, 平成 16 年 3 月 28-31 日, 東京工科大学
15. 深津茂人, 伊藤公平, 植松真司, 影島博之, 高橋庸夫, 白石賢二「酸化膜中における B 拡散の酸化膜/Si 界面からの距離依存性」, 2004 年(平成 16 年)春季 第 51 回応用物理学関係連合講演会, 平成 16 年 3 月 28-31 日, 東京工科大学
16. 阿部英介, 磯谷順一, 伊藤公平「同位体 ²⁹Si 中の P に束縛された電子スピンの緩和時間の測定」, 日本物理学会第 59 回年次大会, 平成 16 年 3 月 27-30 日, 九州大学
17. 伊藤公平「全シリコン量子コンピュータ」, 新機能素子研究開発協会量子コンピュータサロン, 平成 15 年 4 月 11 日
18. 小島威裕, 伊藤公平, 白木靖寛「シリコン同位体超格子の MBE 成長とフォノンの評価」,

第 50 回応用物理学関係連合講演会，平成 15 年 3 月 27～30 日，神奈川大学

19. 阿部英介，伊藤公平，T. Ladd, J. Goldman, 山口文子，山本喜久「全シリコン量子コンピューティング」，第 5 回量子情報技術研究会，2001 年 11 月 12 日-13 日，NTT 厚木研究開発センター
20. E. Abe, K. M. Itoh, T. D. Ladd, J. R. Goldman, F. Yamaguchi and Y. Yamamoto, "An All Silicon Quantum Computer," The 7th Symposium on the Physics and Application of Spin-Related Phenomena in Semiconductors, December 17-18, 2001, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Japan.
21. J. Kato, K. M. Itoh and H. Kaneta, "Lacal Vibrational Mode in Isotopically Enriched ^{29}Si ," The Forum on Science and Technology of Silicon Materials 2001, Nov. 26-28, Shonan Village Center. ポスター発表
22. T. Takahashi, S. Fukatsu, K. M. Itoh, S. Uematsu, A. Fujiwara, H. Kageshima, Y. Takahashi and K. Shiraishi, "Self-Diffusion of Si in SiO_2 under Equilibrium Condition," The Forum on Science and Technology of Silicon Materials 2001, Nov. 26-28, Shonan Village Center. ポスター発表

(4)特許出願

①国内出願 (2 件)

1. 発明の名称：シリコン基板の加工方法
発明者：伊藤公平，関口武治，吉田俊治
出願人：科学技術振興機構，学校法人慶應義塾
出願日：平成 16 年 2 月 2 日
出願番号：特願 2004-022816
2. 発明の名称：微小磁性体を用いた核磁気共鳴イメージング装置
発明者：松本佳宣
出願人：科学技術振興機構，学校法人慶應義塾
出願日：平成 14 年 12 月 26 日
出願番号：特願 2002-376097

②海外出願 (0 件)

(5)受賞等

①受賞

- 伊藤公平
- ・ 2006 年 日本 IBM 科学賞 受賞
- 山本喜久
- ・ 2005 年 応用物理学会論文賞「解説論文賞」 受賞
 - ・ 2005 年 紫綬褒章 受章
- 大野裕三
- ・ 2004 年 サー・マーチン・ウッド賞 受賞
 - ・ 2005 年 第 1 回日本学術振興会賞 受賞

②新聞報道

- ・ 2006 年 7 月 13 日，日刊工業新聞・科学技術欄，「芽をはぐくむ研究室 同位体の核スピン利用」
- ・ 2006 年 7 月 12 日，日刊工業新聞，「シリコン量子計算機 読み出しにめど」
- ・ 2005 年 8 月 9 日，朝日新聞・科学欄「シリコン原子で一直線に成功」
- ・ 2003 年 9 月 30 日，日経産業新聞「シリコン同位体 交互に積み重ね 超高速素子

に道筋」

- ・ 2003 年 9 月 24 日, 日経産業新聞「シリコン化合物の超伝導 温度差で仕組み解明」
- ・ 2003 年 9 月 15 日, 日経産業新聞「シリコン系超伝導体 同位体で機構を解明」
- ・ 2001 年 10 月 8 日, 日本経済新聞「スパコンで 1000 億年の処理, わずか数分量子計算機開発 日米産学で始動」

③その他

- ・ 伊藤公平, 「シリコン酸化膜中の拡散機構を解明 極微細な素子設計に新指針を提供」, 日経ナノビジネス, 2006 年 4 月 24 日号, No.36, pp.25
- ・ 伊藤公平, 「画期的技術革新に繋がる量子コンピュータの開発」, 週刊文春 BUSINESS「40 代・日本のキーマン 300 人」, 臨時増刊 4 月 5 日号, pp.43

(6) その他特記事項

本研究において量子コンピュータ用に開発した原子レベルシリコン同位体積層技術がシリコン IC プロセスシミュレータの性能向上に向けたデータ取得に最適な構造であることが, 産業界からのアドバイスで明らかになった. その応用に向けて株式会社半導体先端テクノロジーズと共同で科学技術振興機構・産学共同シーズイノベーション化事業育成ステージに課題名「半導体ナノ CMOS シミュレータの開発」応募した結果, 平成 18 年～21 年度の期間で採択された.

7 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2005 年 3 月 22-24 日	量子コンピュータスク ール	慶應義塾大 学理工学部 キャンパス	80 名	量子コンピュータ構築に 必要なソフトとハードの 研究の両面を徹底的に勉 強した

8 結び

量子コンピュータは過去 10 年間における物理分野で最も注目度が高い研究テーマの一つであり, 世界中の超一線級の研究者が挙って参画してきた研究領域である. それだけに極めて速いテンポで世界中の研究が進み競争も激しい分野である. 特に複数の量子ビット演算を目的とした研究が注目され, 超伝導・半導体量子ビット・イオン捕獲を用いた 2 つの量子ビット演算のデモンストレーションが現在の最先端である. これらの成果は, 単一量子ビットのラビ振動観測に代表される, 初期化, 演算, 読み出し技術の一つ一つを開発したうえでの成果であり, 数年前は不可能と断言されたほど難度の高い成果であった.

このような状況において, 本研究では半導体産業のコメであるシリコンを用いて量子コンピュータを開発するという提案を行い, その実現にむけた取り組みを平成 13 年度より開始した. 特に核スピンを用いる部分がユニークであり, 数少ない我が国発の世界に認められたアイデアとして現在でも注目を集めている. 核スピンは量子情報を保持する時間(緩和時間)が極めて長い反面, デバイス作製や単一量子ビット検出が困難であることが当初から予想された. そのため, 一つずつ量子ビットを増やしていくという他の研究とは異なり, シリコン核スピンの緩和時間が長く計算機科学的にも量子コンピュータとして有用であることを実験に基づき示し, その上で一気に大量の量子ビットを有するデバイスを作製するナノテクノロジー技術を開発し, それらの初期化と読み出し方法を考え出して実験室

で試すという独特のアプローチを採用した。その結果として、当初の目的として掲げた、シリコン量子コンピュータ性能の予測と計算機科学的な位置づけ、デバイス作製技術の開発、演算技術の確立に成功した。さらに核スピンに対して最も困難とされる初期化と読み出し技術を、既成概念を完全に覆す光を用いる方法で実現するなど、多大なる成果をあげた。

以上の成果は、既に記したとおり、世界的に評価が高い欧文学術誌における原著論文 54 編として発表され、それらの論文は国際会議における招待講演 22 件につながった。また、量子物理研究としてスタートしながら 2006 年には The 33rd Annual International Symposium on Computer Architecture で口頭発表として採択されるなどの計算機科学分野における新展開にも成功した。本研究の成果により研究代表者・伊藤が 2006 年日本 IBM 科学賞を受賞し、分担者の大野が 2004 年サー・マーチン・ウッド賞と第 1 回日本学術振興会賞（2005 年）、分担者の山本が 2005 年応用物理学会論文賞と 2005 年紫綬褒章を受賞・受章した。

そして、本 CREST プロジェクトを成功に導いたのが、田中英彦領域代表を筆頭とした領域アドバイザーによる半年ごとのヒヤリングであることを強調したい。量子コンピュータという学際領域研究における大敵が、研究者自身が専門とする研究分野の既成概念に固執することである。本領域アドバイザーの専門は計算機科学からシリコンデバイスまで様々で、半年ごとに各研究代表者の発表に聞き入り、常に厳しく、間違いを恐れずにアドバイスを重ねてきた。その意見を我々研究者が真摯に受け止め、正しいことは取り入れて研究計画を修正し、間違ったアドバイスには正確に反論をする真剣勝負が重ねられ、その舞台こそが我々研究者にとっての宝であった。研究計画のみならず、研究分担者までステージごとに入れ替えることができたのも領域アドバイザーとの定期的なヒヤリングの成果である。

研究代表者としてのプロジェクト運営は、領域事務所の存在のお陰で極めてスムーズであった。我々の CREST が領域事務所を有する最後であり、今では各大学への完全委託となることから研究費の使い方が窮屈になっていることが非常に残念である。また、我々の最終年度に突然と SORST がなくなったのも残念であった。

本研究の成果は、本 CREST 研究分担者の山本喜久を代表とする科学研究費補助金・特別推進研究（平成 18 年～22 年）によって量子情報分野への更なる展開に発展することになった。そこに伊藤公平が分担者として参加し、シリコン核スピン量子コンピュータとシリコン量子通信を目的とする新展開を試みる。