

「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シリコン原子鎖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終了した。平成15年度にはシリコン中の $^{29}\text{Si}$ 同位体核スピン量子ビットの位相緩和時間を25秒にまで延長できる量子操作法を開発したが、平成16年度はクロックスピードなどにも注目をした計算機学的な考察を行い、シリコン量子コンピュータの量子情報分野における位置づけを明らかにした。

### 2. 研究実施内容

#### 素子作製技術

素子作製には2つの側面がある。ひとつは $^{29}\text{Si}$ 核スピン量子ビットを、核スピンをもたない $^{28}\text{Si}$ 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、 $^{28}\text{Si}$ ウエハー上に $^{29}\text{Si}$ 核スピンを一列に並べる必要がある。もう一方は、量子ビット核スピンに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。図1に示すNiFe磁石が $^{29}\text{Si}$ 原子線に沿って大きな磁場勾配を印加し、そのことによりすべての $^{29}\text{Si}$ 量子ビットが異なる核磁気共鳴周波数をもつことになる。よって、周波数を選択することで、個々の量子ビットの操作を選択的に行えることになる。

$^{29}\text{Si}$ 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（ $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{Si}$ ）の単結晶の成長に成功し、続いて、 $^{28}\text{Si}$ ウエハー中に $^{29}\text{Si}$ 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し、最終的に大きな目標であったSi原子線の作製に成功した。図2に作製されたシリコン原子線を示す。また、原子線のみならず、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。

マイクロマグネットは設計から開始した。特に有限要素法を用いた電磁場解析を行い、最適な形状を設計した。実際のマイクロマグネット作製は、松本チームのメンバーが東北

大へ出向き、王チームと共同で開発した。

#### <sup>29</sup>Si核スピン量子ビットを利用する必要性・利点・目的

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、いくら、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決定し、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、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。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、<sup>29</sup>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、<sup>29</sup>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本プロジェクトの成果である。

## 全シリコン量子コンピュータ

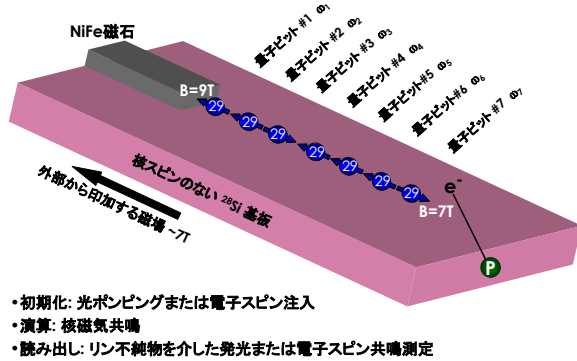


図1 全シリコン量子コンピュータの概要

## 量子コンピュータのためのシリコン原子線

- 磁石ではないシリコンで原子レベルの階段を作製(下図, 灰色の部分)
- 磁石であるシリコン原子を降らせ一列の原子線作製(下図, 白色の球)
- その様子を実際にトンネル顕微鏡で観察したのがその下の図

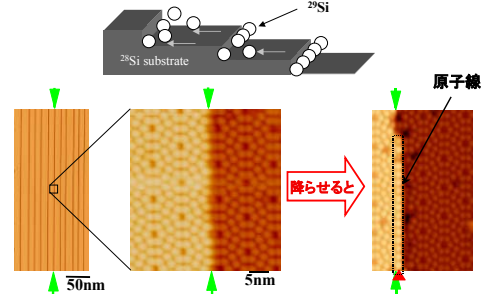


図2 量子コンピュータ用シリコン原子線

### 3. 研究実施体制

#### 伊藤グループ

- ① 研究分担グループ長: 伊藤公平 (慶應義塾大学理工学部・助教授)
- ② 研究項目:
  - ・ 全体のとりのまとめ
  - ・ 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
  - ・ 計算機科学的考察

#### 松本グループ

- ① 研究分担グループ長: 松本佳宣 (慶應義塾理工学部・助教授)
- ② 研究項目:
  - ・ 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

#### 大野グループ

- ① 研究分担グループ長: 大野裕三 (東北大学電気通信研究所・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

#### 佐々木グループ

① 研究分担グループ長：佐々木進（新潟大学工学部・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

#### 山本グループ

① 研究分担グループ長：山本喜久（国立情報学研究所・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) 論文発表

- 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).
- S. Fukatsu, K. M. Itoh, M. Uematsu, H. Kageshima, Y. Takahashi, and K. Shiraishi, "The Effect of the Si/SiO<sub>2</sub> Interface on Silicon and Boron Diffusion in Thermally Grown SiO<sub>2</sub>," Jpn. J. Appl. Phys. **43**, 7837-7842 (2004).
- 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).
- 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<sub>2</sub>," J. Appl. Phys. **96**, 5513-5519 (2004).
- M. Uematsu, H. Kageshima, Y. Takahashi, S. Fukatsu, K. M. Itoh, and K. Shiraishi, "Correlated Diffusion of Silicon and Boron in Thermally Grown SiO<sub>2</sub>," Appl. Phys. Lett. **85**, 221-223 (2004).
- S. Hayama, G. Davies, and K. M. Itoh, "Photoluminescence studies of implantation damage centers in  $^{30}\text{Si}$ ," J. Appl. Phys. **96**, 1754 (2004).

- 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).
- 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).
- A. Hirai and K. M. Itoh, “*Site Selective Growth of Ge Quantum Dots on AFM Patterned Si Substrates,*” Physica E **23**, 248 (2004).
- M. Uematsu, A. Fujiwara, H. Kageshima, Y. Takahashi, S. Fukatsu, K. M. Itoh, K. Shiraishi, and U. Gosele, “*Modeling of Si self-diffusion in SiO<sub>2</sub> :Effect of the Si/SiO<sub>2</sub> interface including time-dependent diffusivity,*” Appl. Phys. Lett. **84**, No. 6, 876-878 (2004).
- K. M. Itoh, M. Watanabe, Y. Ootuka, E. E. Haller, and T. Ohtsuki, “*Complete Scaling Analysis of the Metal-Insulator Transition in Ge:Ga: Effects of Doping-Compensation and Magnetic Field,*” J. Phys. Soc. Jpn., **73**, 173-183 (2004).
- H. Sanada, S. Matsuzaka, K. Morita, C. Y. Hu, Y. Ohno, and H. Ohno, “*Gate Control of Dynamic Nuclear Polarization in GaAs Quantum Wells,*” Physical Review Letters **94**, 097601 (2005).

(2) 特許出願

H16年度特許出願件数：0件（CREST研究期間累積件数：2件）