

研究種目：若手研究 (A)  
研究期間：平成 19 年度～平成 20 年度  
課題番号：19681009  
研究課題名 (和文) 固体における集団スピンのエンタングル状態の実現と集団量子計算の提案  
研究課題名 (英文) Quantum entanglement of ensemble spins and ensemble quantum computation in solids  
研究代表者  
遊佐 剛 (Yusa Go)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：40393813

## 研究成果の概要：

固体中の集団スピンの集団性を利用した新しい計算手法の提案とその物理現象の解明について研究を進めた。特にそのために必要な半導体の試料構造を作成し、基礎的物性を電気伝導と光学手法を用いて評価し、最適化を図った。特に電子スピンと核スピンに注目し、半導体量子構造中のスピン制御を行った。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19 年度	14,800,000	4,440,000	19,240,000
20 年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
年度			
年度			
年度			
総計	19,700,000	5,910,000	25,610,000

## 研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ構造科学

キーワード：量子情報、ナノ構造

## 1. 研究開始当初の背景

量子力学的重ね合わせ状態(コヒーレント状態)と超並列性を利用した量子計算に関する研究は、イオン、液体NMR、超伝導、半導体など、さまざまな舞台で研究されている。量子計算の最小基本単位は、1量子ビットであるが、ほとんどすべての系において、単一量子(たとえば単一イオン、単一スピン、単一フォトンなど)のコヒーレント状態を、1量子ビットとした研究が行われている。しかし、集積化に有利と考えられる固体素子の分野では、単一電子スピンや、単一フォトン、単一核スピン等をコヒーレントに制御検出す

ること自体が技術的に難しいため、2つの1量子ビットを量子力学的に相互作用(エンタングル)させ、2量子ビットとすることは、いずれの系でも実現されていないのが現状であった。

## 2. 研究の目的

これまでほんどの系で単一量子の制御を目指して研究が行われてきた背景には、従来、単一量子のコヒーレント状態でなければ厳密な意味での量子計算が出来ないのではないかと考えられていたためである。しかし、

原子分光の分野で、単一原子スピンのコヒーレント状態を1量子ビットとするのではなく、 $10^8$ - $10^{12}$ 個程度のマクロな数の原子集団のスピンを1量子ビットとする試みが、2001年の Duan, Lukin, Cirac, Zoller (DLCZ) や Julsgaard らの提案により急速に発展してきた。特に本年 2006 年には、冷却原子集団一つを閉じこめた真空チャンバーを二つ並べ、原子系のスピンの光の偏光とを相互作用させることで、2つの原子集団同士をエンタングルさせるという実験的報告や、集団原子と光の量子テレポーテーションの実験的報告がなされた。本研究では、このような単一量子ではなく集団量子の特性を生かした新たなアーキテクチャを持った固体量子計算を提案し、実現を目指すことを目的とした。

### 3. 研究の方法

まず実際のデバイスと測定装置を作製し、超微細相互作用によって、「集団スピンと電子スピン」、あるいは、「集団スピンと光の偏光」をエンタングルさせることを目標として研究をすすめた。具体的に測定用試料の作成では、半導体ウェハをフォトリソグラフィ、電子ビーム描画装置などを使って、ナノ構造に加工し、半導体核スピンを電流によって偏極できる試料の作製を行った。実際に作製したデバイスの顕微鏡像の一例を図1に示す。

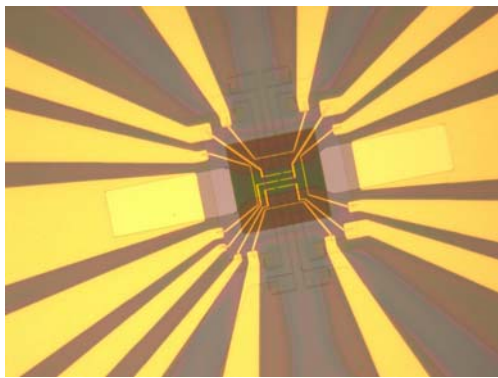


図1 フォトリソグラフィ、電子ビームリソグラフィ、エッチング、金属蒸着などの半導体プロセスを用いて実際に作製したデバイスの顕微鏡写真明るく見える領域が金属ゲートである。

測定装置の立ち上げとしては、波長可変のレーザを導入し、半導体からの発光を観測することによって、量子構造と試料の品質の評価を行った。最終的には、極低温(20 ミリケルビン)、強磁場環境(10 テスラ)に、マルチ

モード、シングルモードなど各種光ファイバーを数本導入し、極低温環境を壊すことなく、レーザーからの光を導入し、50 ミリケルビン程度の極低温での光学測定と電気測定を平行して行う実験設備を構築した。さらに、電子スピンあるいは原子核スピンのゼーマン分離した状態を検出するため、光の偏光を観測するための偏光素子を極低温中に配置し、偏光フォトルミネッセンスなどの測定が可能となる実験系を構築した。さらに時間分解測定、ポンププローブ測定を行うためのピコ秒、フェムト秒レーザー装置と遅延光学ラインを組み、ポンププローブ測定が可能となった。また、核スピンをコヒーレントに制御するための RF 電磁波をパルス的に照射するための電気回路系と、ナノ構造のスピンの状態を空間的に読み出すための傾斜磁場を作るためのパルス電流系も立ち上げ、数ナノ秒のスイッチング時間で RF 電磁波及び電流をナノ構造上で駆動することが可能となった。

このようなデバイスおよび測定装置を用いて、極低温、強磁場環境での電気伝導測定、偏光光学測定、核磁気共鳴測定を行った。

### 4. 研究成果

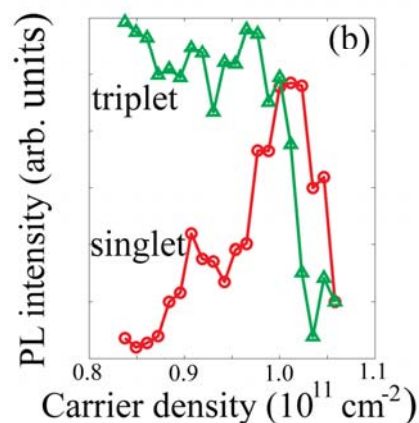
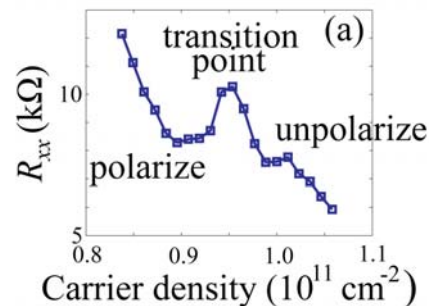


図2 デバイスの電気抵抗  $R_{xx}$  と、フォトルミネッセンスの強度の、二次元電子密度依存性。電子スピンの振る舞いに違いが現れる。

まず、基礎的物性を解明するため、電子スピンと核スピンに注目し、電気伝導と光学手法を用いて半導体量子構造中のスピン制御を行った。特に量子ホール状態 $\nu=2/3$ の量子状態の光検出を行い、電子スピン偏極に対応した発光スペクトルの変化を観測することができた。その一例を図2に示す。この結果により、集団としての核スピンの状態を電子スピンの偏光情報として取り出すことが可能となることを期待できる。

一方、パルスRF電磁波とパルス傾斜磁場を効果的に印可することにより、局所的な集団スピン情報を取得する手法を確立も進めた。まず、電気抵抗の変化によって、核磁気共鳴を測定し、GaAs半導体を構成するAsの共鳴を検出した結果の一例を図3に示す。As原子核スピンは $I=3/2$ であるため、原子核の周りの電荷分布によって、四重極エネルギーの違いが出てくるため、図3のようないくつかのエネルギーに分離して現れる。

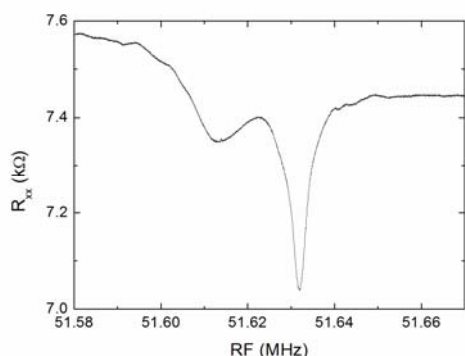


図3 RF電磁波の周波数を掃引した時に表せるデバイスの電気抵抗の変化。四重極エネルギーによりいくつかの分離した共鳴信号が得られる。

このような抵抗検出の核磁気共鳴を使って、局所領域の核スピン情報を検出するための基礎実験を行った。図4に局所核スピン検出に必須な磁場勾配を作るための磁場ゲートの電子顕微鏡写真を示す。これらのゲート電極にパルス電流を流すことにより、パルスの磁場を印可することができる。実際に電流を印可して、核磁気共鳴測定を行い、共鳴ピークの幅を印可電流でプロットした結果を図5に示す。この結果では電流を印可すると、核磁気共鳴のピークがほぼ直線的にブロードになって行くことが分かる。このときAsの磁気回転比から計算される磁場の不均一幅は約1.5ミリテスラになることが分かる。ただし、電流を印可したことにより、デバイスの実効的な温度が上昇した結果に起因す

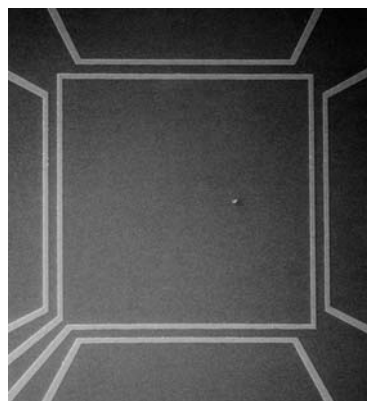


図4 磁場勾配生成用の磁場ゲート電極の電子顕微鏡像。明るく見える領域が金属電極になっており、中央の領域にパルスの磁場勾配を生成することができる。電子線ビーム描画装置等を利用して作製した。

ることも原因として排除できず追加の測定、および検証が必要であると考えられる。

以上のように、ナノ領域で集団スピン、特に核スピン集団を制御するためのデバイス構造を作製し、その基礎物性について研究を進めた。多量子ビット化を目指した研究には至らなかったが、今後の研究を進めて行く上で重要な、光学測定、パルス電気測定技術の確立、さらに半導体ナノ構造の基礎物性の解明に関して多くの知見が得られた。

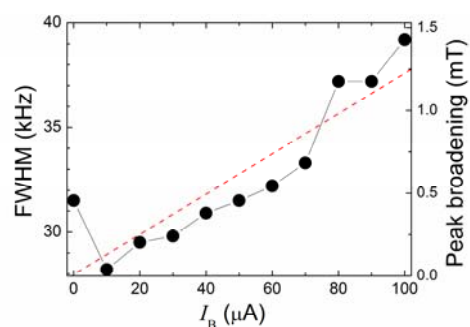


図5 磁場ゲートに印可した電流に対して、核磁気共鳴ピークの半値幅をプロットしたもの。右縦軸は半値幅広がりから換算される磁場の不均一幅。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 6 件)

- ① H. Hirayama, G. Yusa, K. Hashimoto, N. Kumada, T. Ota, K. Muraki, Electron-spin/nuclear-spin interactions and NMR in semiconductors, SEMICONDUCTOR SCIENCE AND TECHNOLOGY, 24, 023001 2009 査読有
- ② T. Ota, N. Kumada, G. Yusa, S. Miyashita, T. Fujisawa, Y. Hirayama, Coherence time of nuclear spins in GaAs quantum well probed by submicron-scale all-electrical nuclear magnetic resonance device, JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 47, 3115-3117 2008 査読有
- ③ T. Ota, G. Yusa, N. Kumada, S. Miyashita, and Y. Hirayama, Nuclear spin population and its control toward initialization using an all-electrical submicron scale nuclear magnetic resonance device, Applied Physics Letters, 90, 102118-102118-3 2007 査読有
- ④ F. Boxberg, J. Tulkki, G. Yusa, and H. Sakaki, Cooling of radiative quantum-dot excitons by terahertz radiation: A spin-resolved Monte Carlo carrier dynamics model, Physical Review B, 75 115334-115334-9 2007 査読有
- ⑤ T. Ota, G. Yusa, N. Kumada, S. Miyashita, T. Fujisawa and Y. Hirayama, Decoherence of nuclear spins due to dipole-dipole interactions probed by resistively detected nuclear magnetic resonance, Applied Physics Letters, 91 193101-193101-3 2007 査読有
- ⑥ T. Ota, G. Yusa, N. Kumada, S. Miyashita, T. Fujisawa, Y. Hirayama, Initialization and logic gate operations of nuclear spin qubits using a submicron scale resistively-detected NMR device, physica status solidi (c) 5, 306 - 309 2007 査読有

〔学会発表〕 (計 11 件)

- ① 早川純一朗他 光照射下における二次元電子系の伝導および発光特性の研究 日本物理学会 2008 年秋季大会, 20pYK-9. 2009 年 3 月 28 日 立教大学 東京
- ② J. Hayakawa et al. Optical Measurement

of  $\nu=2/3$  Fractional Quantum Hall System  
The 1st GCOE International Symposium "Weaving Science Web beyond Particle-Matter Hierarchy" 2009 年 3 月 5 日 東北大学 仙台

③ G. Yusa, Resistively detected NMR in semiconductor nanostructures IISc(Indian Institute of Science) Centenary Symposium on Future Directions in NMR 2008 年 10 月 21 日 バンガロール インド

④ G. Yusa, K. Muraki, Y. Hirayama, J. Hayakawa, T. Kawamura Electrically Controlled Quantum Coherences of Nuclear Spins in GaAs Point Contacts CNSI-RIEC Workshop 2008 年 10 月 7 日 カリフォルニア大学 サンタバーバラ

⑤ 川村昂他 量子ホール状態を用いた局所的 NMR 日本物理学会 2008 年秋季大会, 23aQG-1. 2008 年 9 月 23 日 岩手大学 盛岡

⑥ 早川純一朗他  $\nu=2/3$  分数量子ホール状態における核スピン偏極の光検出 日本物理学会 2008 年秋季大会, 20pYK-9. 2008 年 9 月 20 日 岩手大学 盛岡

⑦ 岡林潤、遊佐剛、大島弘敬、秋永広幸 磁性スピンエレクトロニクス of アカデミックロードマップ第 55 回応用物理学関係連合講演会 2008 年 3 月 28 日 千葉

⑧ G. Yusa, K. Muraki, Y. Hirayama Electrically controlled quantum coherences of nuclear spins in GaAs point contacts The 34th International Symposium on Compound Semiconductors 2007 年 10 月 15 日 京都

⑨ G. Yusa, K. Muraki, Y. Hirayama, Controlled multiple quantum coherences of nuclear spins in a nanoscale device 17th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems 2007 年 7 月 17 日 Genova, Italy

⑩ Go Yusa Resistively detected NMR in a nanoscale device and direct detection of multiple quantum coherences Gordon Conference on Magnetic Resonance 2007 年 6 月 20 日 New England, U.S.A.

⑪ G. Yusa, Coherent manipulation of nuclear spins in a monolithic

semiconductor device, Gordon Research  
Conference Quantum Information Science,  
2007年4月17日 Lucca, Italy

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

①名称: 核磁気共鳴撮像素子、及びそれを用  
いた撮像システム、撮像方法  
発明者: 遊佐剛  
番号: PCT/JP2007/073138  
出願年月日: 平成19年11月30日  
国内外の別: 国外

②名称: 核磁気共鳴撮像システム及び撮像  
方法  
発明者: 遊佐剛  
番号: 特願2007-145488  
出願年月日: 平成19年5月31日  
国内外の別: 国内

[その他]

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

遊佐 剛 (Yusa Go)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 40393813

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし