

研究課題別評価書

1. 研究課題名

新しい核磁気共鳴を用いた核スピンの量子状態制御

2. 氏名

遊佐 剛

3. 研究のねらい

分析技術として広く用いられている核磁気共鳴(NMR)は、原子核の持つ核スピンという量子力学的な性質をうまく制御、検出することで発展してきた。従来広く用いられているNMR法は、マクロな数の核スピンを検出するには非常に優れた手法であるが、少数(10^8 個程度)の核スピンを検出するのは困難である。そこで本研究では、従来のNMRとは異なる新たなNMR手法を用いて、ナノ領域の少数核スピンを操り、電子や光と融合させることで、核スピンを用いた新たな計測技術の確立と量子機能デバイスの実現に向けた研究を目指した。

4. 研究成果

NMR法が分析、計測技術として広く応用できる理由の一つとして、核スピンは電子など他の量子系に比べて、外界との相互作用が少なく、量子力学的な状態を保持出来る時間(コヒーレンス時間)が、圧倒的に長いため、外界の擾乱にかき消されることなく、物質内部の核スピンの情報を高分解能に外部に取り出すことが出来ることが挙げられる。通常のNMRは、パルスNMR、多次元NMRなど非常に高度な発展を遂げているが、物質内部から得られる核スピンの情報(核磁気誘導信号)が微弱で、感度が低いという欠点があり、溶液中の分子構造などは特殊な場合は別にして、マイクロなスケールの物質の検出には適していなかった。また、固体を測定対象とする場合、固体試料を機械的に高速で回転させるマジックアングルスピンニング(MAS)という手法を用いなければ、固体のNMRそのものの検出も容易ではない。静磁場を印可する方向を z 軸としたとき、通常のNMRは、静磁場と直交する xy 面内の磁化(M_{xy})を核磁気誘導という方法で検出しているが、本研究では、固体に存在する電子と核スピンの結合によって、静磁場と平行の磁化成分(M_z)を検出するNMR法について注目し、半導体ナノ構造中に存在し、通常のNMRでは検出出来ない程度の少数核スピンの量子状態の制御および検出に向けた研究を行った。

本研究では、核スピンの z 方向の磁化を観測する手法として、抵抗検出、光学検出という二つの手法を用いたので、それぞれについて説明する。

(1) 抵抗検出 NMR による核磁気イメージングに関する研究

図1のような GaAs/AlGaAs 半導体で構成されるデバイスに、さらに局所領域の核磁気イメージングを行うための磁場ゲートを配置させた試料の顕微鏡写真を図2に示す。金色に見える部分が金属性のゲートである。上下左右2対の磁

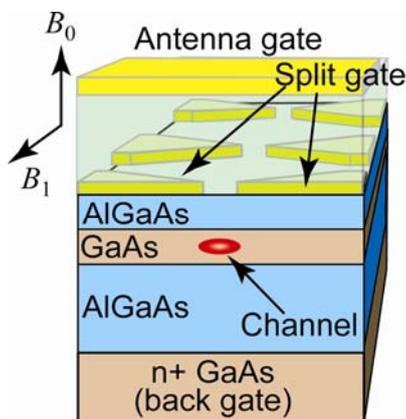


図1. ポイントコンタクトを3つ並べたNMRデバイスの構造図。

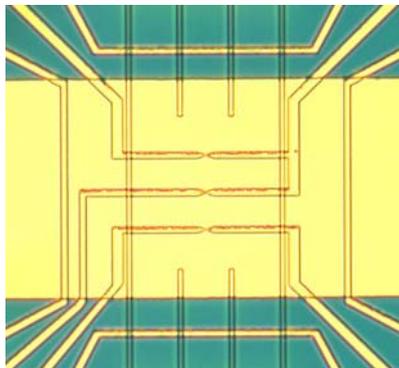


図2. ポイントコンタクトを3つ直列に並べたNMRデバイスの顕微鏡写真。

場ゲート(電極の幅は $1\mu\text{m}$ 程度)により、磁場勾配、及びオフセット磁場をパルス的に印可させ、広い領域を覆うアンテナゲートにより、RF 電磁場を印可することができる構造となっている。なお緑色に見える部分は絶縁層である。

このデバイスに対して、位相の 90 度ずつ異なる 4 種のパルスが 6 つ連続した RF パルス列および電流パルス列を印可することによって、ある特定の領域のみの核磁気共鳴を行うことができ、電流を掃引すると、イメージングすることができる。この場合、観測出来る領域の大きさは磁場ゲートに印可される電流値によって決定される。また、これら一連のパルス操作は核スピンのコヒーレント時間内に終了させなければならない。RF パルスの位相の精度やパルスのスイッチングとタイミングの精度によって、分解能が大きく左右されるため、RF パルスのタイミングと立ち上がり時間についての検討を行い、パルスの切り替え時間は約 80ns 程度で、およそパルス全体の 1% 以下の精度となっていることを確認した。

磁場ゲートに電流 I_B を印可し、NMRの共鳴スペクトルがどのように変化するか測定するために、実際のデバイスを低温強磁場下 ($T < 0.1\text{ K}$, $B_0 = 6.3\text{ T}$) に置き、核スピンと電子スピンの結合が顕著に現れる分数量子ホール状態(ランダウレベル占有率 $\nu = 2/3$) において、電気伝導測定を行った。なお測定は連続発振(CW)のRF電磁波を外巻きコイルに導入し、 I_B もCWの条件下で半導体を構成している ^{75}As の核スピンに共鳴するように、RF周波数を設定して測定した。また 4 つある磁場ゲートの内の中の一つ(下磁場ゲート)に I_B を流している。図 3 は、横軸がRF電磁波の周波数、縦軸はデバイスの電気抵抗を示しており、 $45.78 \sim 45.79\text{ MHz}$ 近傍で、共鳴が観測された。図 5 に示すように、 I_B を印可することで共鳴ピークがブロードになっていくことが確認された。このデータを元に、共鳴スペクトルの半値幅をプロットしたものが図 4 である。 I_B の電流量にほぼ比例して半値幅が増大していく様子が分かる。また、 $I_B = 0$ の時に比べて、 I_B を印可したとき、共鳴の半値幅がどの程度変化するか、幅の広がりの変化量(周波数)を、 ^{75}As の磁気回転比 γ で換算した値(磁場)を右 y 軸に表示した。現在のところ核スピン偏極の空間的な制御が十分でなく、場所が特定出来ないため、詳細については不明であるが、この測定では、磁場ゲートに $I_B = 80\ \mu\text{A}$ を印可したときに、共鳴スペクトルの広がりはおおよそ 1 mT 程度の磁場が印可されたことに相当していると推測される。

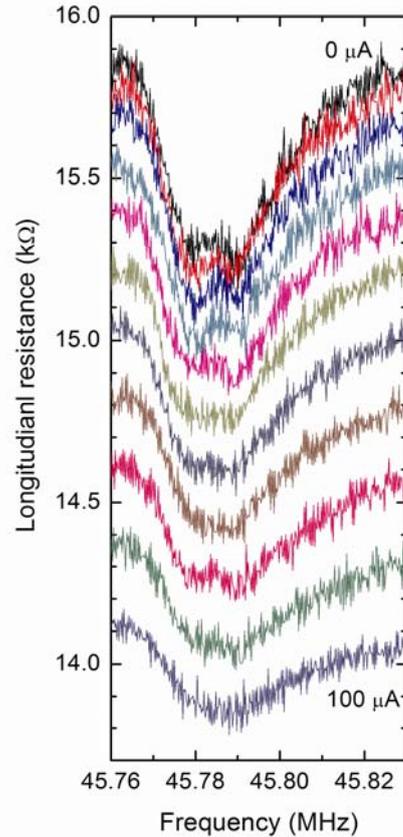


図 3. 磁場ゲートに電流 $I_B = 0$ から $100\ \mu\text{A}$ まで $10\ \mu\text{A}$ 刻みで変化させ、印可したRF電磁波の周波数を掃引した際に得られる縦抵抗の変化。

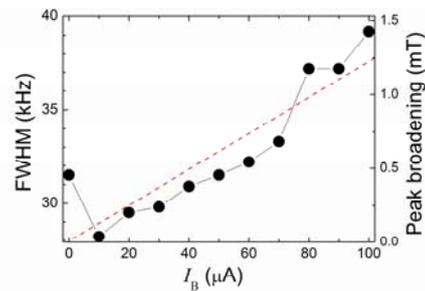


図 4. 磁場ゲート印可電流 I_B に対する共鳴ピークの半値幅の変化。

(2) 光検出 NMR に関する研究

先に述べたように、抵抗検出以外にも、核磁化の z 成分を検出する手法として光検出 NMR の手法がある。半導体からのフォトルミネッセンス(PL)のピークエネルギーが核磁化によって変化することを利用した NMR 法や、パルスレーザーを使った NMR の手法などが研究されている。本研究では抵抗測定と光検出を組み合わせた同時測定を行うとともに、量子ホール状態の電子物性についての研究も行った。光検出 NMR で用いた測定試料は、抵抗検出 NMR で用いた試料と同じ半導体ウエハであるが、簡単のため、スプリットゲートなどのナノ加工する前の状態のものを用いた。

光検出 NMR に用いた光学測定装置の構成図を図 5 に示す。希釈冷凍機に励起光導入と集光用に別々の光ファイバーを導入し、試料近傍に波長板などの偏光器を設置した。試料からの発光は集光用ファイバーから高分解能分光器に導入され、冷却 CCD により、偏光依存の PL スペクトルが測定できる。なお、励起用レーザーは波長可変で、励起光の偏光も制御可能なシステムを構築した。

図 6 に典型的な PL と抵抗の同時測定を図を示す。(a) が試料からの PL スペクトルで、明るい色の部分が発光を示している。測定温度は 60 mK、励起光強度は 0.5 mW 程度、波長は 760 nm、試料に印可した電流は 100 nA である。磁場を印可していくと、低磁場側で高次のランダウレベルのスペクトルが磁場に比例して高エネルギー側にシフトしていき、さらに磁場を増加させると、徐々に高次の側からランダウレベルからの発光が消えて行く様子が明瞭に観測できた。さらに磁場を増加させ、ランダウレベル占有率(ν)が 2 以下になると、基底準位である最低ランダウ準位からの発光が急激に強くなる。また、 $\nu=1$ と $\nu=2/3$ とと思われる $B_0=5$ T 近傍では発光強度が弱くなっていることが分かる。また図(b)に示すように、励起光照射時でも、抵抗測定が可能で、縦抵抗に弱磁場での SdH 振動と、量子ホール効果が確認できる。なお、整数の量子ホール状態でも縦抵抗が完全に 0 にならないのは、励起光照射によって光励起されたキャリアによる伝導(photoconductivity)が存在するからであると考えられる。

5. 自己評価

核スピンの縦磁化を検出する手法を進展させ、ナノ領域の核スピンの量子状態を電氣的、あるいは光学的に制御検出する技術の確立が本研究の目標であった。研究期間では論文と特許出願数件が成果として得られた。測定装置立ち上げなどに時間がかかったこともあり、研究成果は目標に対して十分であったとは言えない点もあるが、目標達成にかなり近いところまで到達した点は評価できる。また、本研究の目標達成に至る段階で、多くのノウハウや知見が蓄積できたことは今後の本研究の発展あるいは応用を考える上で重要な成果であると考えられる。

6. 研究総括の見解

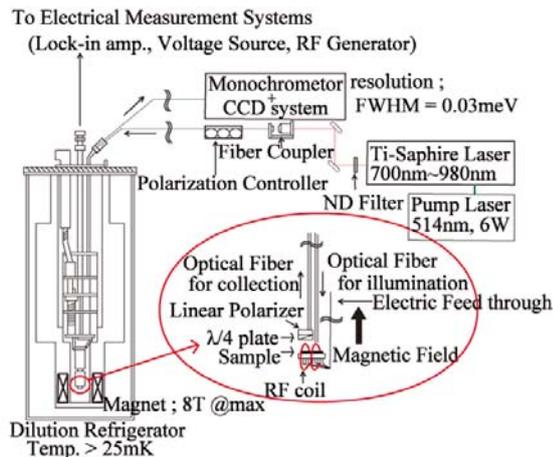


図 5. 光学測定装置の構成図

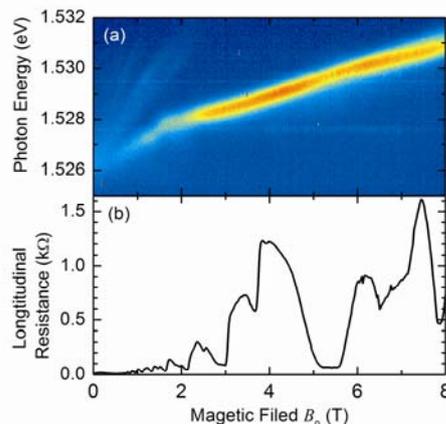


図 6. (a) PL スペクトルおよび(b)ホール測定による縦抵抗の磁場依存性。

核スピンの縦磁化を検出し、ナノ領域の核スピンの量子状態を光学的に制御する技術の確立に向けて、橋頭堡を築いたと思います。その研究の拠点をさががけ研究により立ち上げたことは、日本におけるこの分野の将来にとって重要であると思います。後継者も育ちつつあるようです。

7. 主な論文等

【A さががけの個人研究者が主導で得られた成果】

①論文

1. 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", Jpn. J. Appl. Phys. 47 3115 (2008).
2. T. Ota, G. Yusa, N. Kumada, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Decoherence of nuclear spins due to dipole-dipole interactions probed by resistively detected nuclear magnetic resonance", Appl. Phys. Lett. 91 193101 (2007).
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", Appl. Phys. Lett. 90 102118 (2007).
4. K. Muraki, G. Yusa, Y. Hirayama, "Nuclear spin manipulation in semiconductor nanostructures", Proceedings of the International Society for Optical Engineering 6800 H-1-8 (2007).

②特許出願

研究期間累積件数: 3 件

1. 発明者: 遊佐 剛

発明の名称: 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

出願人: 独立行政法人科学技術振興機構

出願日: 2006年11月30日(特願 2006-324443)

2. 発明者: 遊佐 剛

発明の名称: 核磁気共鳴撮像システム、及び撮像方法

出願人: 独立行政法人科学技術振興機構

出願日: 2007年5月31日(特願 2007-145488)

3. 発明者: Go Yusa

発明の名称: 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

出願人: Japan Science and Technology Agency

出願日: 2007年11月30日(PCT/JP2007/073138)

③受賞

なし

④著書、解説

1. 遊佐剛「量子ホール系と核スピン」パリティ 2008年1月

⑤学会発表

1. 早川純一郎、川村昂、L. H. Rossander, 桑野信、小野満恒二、宮下宣、藤澤利正、遊佐剛、「 $n=2/3$ 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
2. 川村昂、早川純一郎、小野満恒二、宮下宣、藤澤利正、遊佐剛、「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
3. T. Ota, N. Kumada, G. Yusa, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Nuclear quadrupolar interaction in a GaAs quantum well probed by resistively-detected NMR",

International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions (NNCI2007).

4. 太田剛、熊田倫雄、村木康二、遊佐剛、宮下宣、平山祥郎、「GaAs 核スピン高偏極デバイスにおける核四重極相互作用」、日本物理学会 2006 年秋季大会, 25pXL-4.
5. T. Ota, G. Yusa, N. Kumada, K. Muraki, S. Miyashita and Y. Hirayama, "Study of nuclear quadrupolar interaction using a novel all-electrical GaAs NMR device", International Symposium on Compound Semiconductors 2006.

⑥招待講演

1. G. Yusa, "Resistively detected NMR in semiconductor nanostructures", Indian Institute of Science Centenary Symposium on Future Directions in NMR 2008, Bangalore, India (Oct. 2008).
2. G. Yusa, K. Muraki, Y. Hirayama, "Controlled multiple quantum coherences of nuclear spins in a nanoscale device", International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems and Modulated Semiconductor Structures, Genova, Italy (July 2007).
3. G. Yusa, "Resistively detected NMR in a nanoscale device and direct detection of multiple quantum coherences", Gordon Research Conference Magnetic Resonance, New England, U.S.A. (June 2007).
4. G. Yusa, "Coherent manipulation of nuclear spins in a monolithic semiconductor device", Gordon Research Conference Quantum Information Science, Lucca, Italy (April 2007).
5. G. Yusa, K. Muraki, K. Takashina, K. Hashimoto, and Y. Hirayama, "Nuclear spin control by a point contact", 28th International Conference on the Physics of Semiconductors, Vienna, Austria. (July 2006).

【B その他の主な成果】

①論文

1. 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", Phys. Rev. B 75 115334 (2007).

②特許出願

なし

③受賞

なし

④著書

なし

⑤学会発表

なし

⑥招待講演

なし