

機関番号：11301

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2010

課題番号：19048007

研究課題名（和文）半導体量子構造における核スピンの光制御・検出

研究課題名（英文）Optical Control and Detection of Nuclear Spin Dynamics in Semiconductor Quantum Structures

研究代表者

大野 裕三 (OHNO YUZU)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：00282012

研究成果の概要（和文）：

GaAs/AlGaAs 量子井戸構造中の核スピンコヒーレンスの光検出を実証した。円偏光短パルスレーザー光により電子スピンを励起し、超微細相互作用を介して核スピンを分極すると同時に、核磁場の変化によって生じる電子スピン歳差運動の位相変化を時間分解ファラデー回転測定法により検出し、核磁気共鳴（NMR）スペクトルを得る。スピン 3/2 の ^{75}As を対象に量子ゲート操作に用いられる多重 NMR パルス列を印加し、NMR スペクトルの光検出を行って多準位核スピン系の位相制御を検証した。

研究成果の概要（英文）：

We demonstrate manipulation of nuclear spin coherence in a GaAs/AlGaAs quantum well by optically-detected nuclear magnetic resonance (NMR). Phase shift of the Larmor precession of photoexcited electron spins is detected to read out the hyperfine-coupled nuclear spin polarization. Multi pulse NMR sequences are generated to control the population and examine the phase coherence in quadrupolar-split spin-3/2 ^{75}As nuclei.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,700,000	0	8,700,000
2008年度	10,600,000	0	10,600,000
2009年度	14,500,000	0	14,500,000
2010年度	9,700,000	0	9,700,000
総計	43,500,000	0	43,500,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学、構造・機能材料

キーワード：スピン流、半導体スピントロニクス、核磁気共鳴、顕微分光、スピンホール効果

1. 研究開始当初の背景

半導体中の核のスピンは電子スピんと超微細相互作用を介して結合し、かつ長い位相緩和時間を有しているため、物理的興味のみ

ならずこれを量子ビットとする量子コンピュータなど、固体量子デバイスへの応用の観点からも注目を集めている。核スピンを量子ビットとして用いるためには、究極的に単一

の核スピンの位相を含む量子状態の情報を、電子スピンを介するなどして外場と結合させ、これを操作・検出する技術が必要となる。しかしながら、従来の磁気共鳴検出の手法では不可能である。

半導体中の電子や核のスピンの利用する量子情報デバイスを視野に入れたプロジェクト研究がいくつか実施されているが、本申請者の所属する研究室（東北大学電気通信研究所）は、時間分解光学測定法を発展させた独自の手法を採用し、半導体量子構造における核スピンのコヒーレンスを光により検出できることを実証した（H. Sanada et al., Phys. Rev. Lett. 2006）。この成果をさらに発展させ、半導体量子ナノ構造において「スピン流」を利用した光⇄核スピン変換を確立できれば、スケーラブルな固体量子情報デバイスの基盤技術を確認することが可能になると判断し、本研究課題の申請に至った。

2. 研究の目的

本研究では、半導体量子構造における光⇄スピン流変換を基礎とし、核スピンの量子位相の制御・検出を光学的手法により実証することを目的とする。より具体的には、

(1)光による核スピン制御・検出が可能となる半導体量子ナノ構造デバイスの設計と作製、
(2)核スピンの量子コヒーレンスを制御し、スピン流を介した光と核スピン間の相互作用の制御及びその結果もたらされる光・電子・核スピン物性を調べ、量子スピントロニクスデバイス基盤技術を確認することである。

3. 研究の方法

初年度は、(1)ゲート電圧等により電子状態を0次元に閉じ込め可能で、核スピンとスピン流との相互作用の強さを変調可能な半導体量子ナノ構造を設計・作製する。また、(2)微小領域での核スピンドायナミクスを光学的に制御・検出するための、顕微光学測定システムを構築し、スピン流のダイナミクスと動的核スピン分極の局所制御・検出を行う。同時に、(3)半導体中の核スピンを量子ビットとする固体量子演算の実証に向けて、磁気共鳴を応用したパルス制御による1~2量子ビットのスピン操作についてアルゴリズムの検討を行う。

次年度以降は、平成19年度の研究成果をもとに、(1)半導体量子構造において高い核スピン分極状態（初期状態）を実現するため、磁性/非磁性半導体ヘテロ構造の形成と動的核スピン分極の最適化を行う。また(2)半導体量子構造における電子・核スピンコヒーレンスのダイナミクスを調べ、スピン流の位相コヒーレンスの実時間・実空間観測を行う。さらに、(3)核磁気共鳴および電子ス

ピン共鳴を利用して、核スピンとスピン流との間の相互作用を局所的に制御することにより、長い移送緩和時間を有する核スピン状態を実現するとともに、基本量子ゲートを実現する高周波・マイクロ波パルスシーケンスを構築し量子演算の実証実験を行う。これらにより、磁気共鳴技術を応用したスピンコヒーレンス制御によるビット操作の光制御・検出を実証する。

4. 研究成果

本研究では、主に以下のような成果を得た。

(1)高空間分解能時間分解顕微分光システムによるスピンホール効果の定量的測定
スピンホール効果と光注入によって生成されるそれぞれのスピン蓄積量を比較・解析することによってスピンホール導電率 σ^{SH} を実験的に決定し、n型GaAsにおける外因性スピンホール効果の電子濃度 n 依存性について調べた結果、 σ^{SH} は n に対して増加し、電界(5~20 mV/ μ m)に対して一定であることを明らかにした。また、理論モデルと比較して σ^{SH} の計算結果が実験結果を定量的に良く説明できることを示した。

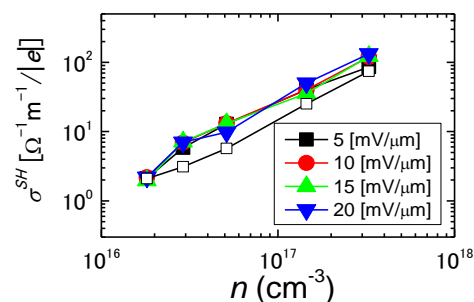


図1 キャリア濃度とスピンホール伝導率の電界依存性（実験値）と理論値（中抜き）

(2) n型(110)GaAs/AlGaAs 単一量子井戸をチャンネル層とする電界効果トランジスタ構造において、核スピンのエネルギー緩和時間と位相緩和時間の電子密度依存性を時間分解カー回転測定による光検出NMR測定より調べ、前者は10倍以上、後者も2倍近く電子密度変調により制御可能であることを実証した。

(3) n型GaAs(110)量子井戸構造について、超微細相互作用と四重極相互作用の大きさを変化させたときの核スピン緩和時間を光検出核磁気共鳴により測定し、それらの影響を定量的に評価した。磁場印加方向を変化させて核磁気共鳴スペクトルを測定・解析することにより、四重極相互作用がコヒーレンスを乱す原因になることを示すと同時に、内部電場勾配を見積もった。さらに外部から機械的に加

えた歪によって四重極相互作用を増大させると不均一広がりが増大することが示された。

(4) GaAs/AlGaAs 量子井戸構造中の核スピンのコヒーレンスの光検出を実証した。円偏光短パルス光により電子スピンを励起し、超微細相互作用を介して核スピンを分極すると同時に、核磁場の変化によって生じる電子スピン歳差運動の位相変化を時間分解ファラデー

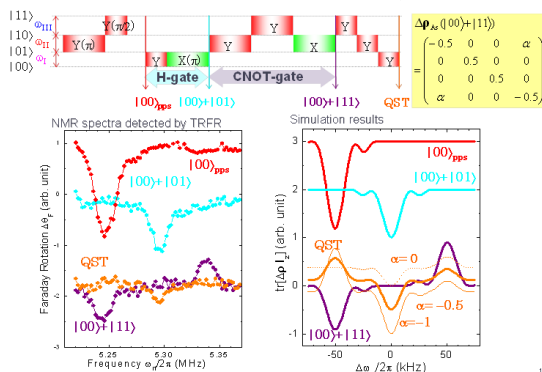


図2 量子ゲート操作による⁷⁵As核スピン状態の制御と光検出NMRスペクトル

一回転測定法で検出することにより核磁気共鳴 (NMR) スペクトルを得た。スピン 3/2 の⁷⁵As を対象に量子ゲート操作に用いられる多重 NMR パルス列を印加し、NMR スペクトルの光検出を行って多準位核スピン系の位相制御を検証した。

(5)局所的な核スピン操作に有望な核電気共鳴を実証した。核四重極相互作用は歪に加え、電界によって制御できることが知られている。本研究では、まず電界によって核磁気共鳴スペクトルの共鳴周波数を線幅以上に変化させられることを実証した。さらに、振動電界によるコヒーレントな核スピン操作を試み、パルス電界によるラビ振動が観測され、はじめて電界による核スピンのコヒーレント操作を実証した。この手法は、振動磁場を用いず、電界のみでスピン操作することが可能であり、局所的な核スピン操作に応用できることから、将来の量子スピントロニクスデバイスへの応用が期待される。

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 12 件)

- ① M. Ono, H. Kobayashi, S. Matsuzaka, Y. Ohno, and H. Ohno, “Gate voltage dependence of nuclear spin relaxation in an impurity-doped semiconductor quantum well,” *Applied Physics Letters* **96** (2010) 071907. (査読有)

- ② S. Matsuzaka, Y. Ohno, and H. Ohno, “Electron density dependence of the spin Hall effect in GaAs probed by scanning Kerr rotation microscopy,” *Physical Review B* **80** (2009) 241305. (査読有)
- ③ Y. Kondo, M. Ono, S. Matsuzaka, K. Morita, H. Sanada, Y. Ohno, and H. Ohno, “Multipulse Operation and Optical Detection of Nuclear Spin Coherence in a GaAs/AlGaAs Quantum Well,” *Physical Review Letters* **101** (2008) 207601. (査読有)

[学会発表] (計 52 件)

- ① J. Ishihara, M. Ono, G. Sato, S. Matsuzaka, Y. Ohno and H. Ohno, “Magnetic Field Dependence of Quadrupole Splitting and Nuclear Spin Coherence in a (110) GaAs/AlGaAs Quantum Well,” 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials, September 22-24, 2010, The University of Tokyo, Tokyo, Japan.
- ② Y. Ohno, Y. Kondo, M. Ono, S. Matsuzaka, H. Sanada, K. Morita, and H. Ohno. “Multi pulse operation and optical detection of nuclear spin coherence in a quantum well (INVITED),” The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18), Kobe, Japan, July 19 - 24, 2009.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

http://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~ono/tokutei/public_html/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大野 裕三 (OHNO YUZO)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：00282012

(2) 研究分担者

松倉 文礼 (MATSUKURA FUMIHIRO)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：50261574

大谷 啓太 (OHTANI KEITA)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：40333893

佐藤 茂雄 (SATO SHIGEO)
東北大学・電気通信研究所・准教授
研究者番号：10282013