

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 spins in semiconductor quantum structures

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

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物性・結晶工学

キーワード：スピン流，半導体スピントロニクス，量子コンピュータ，核磁気共鳴，顕微分光，スピンホール効果

1. 研究計画の概要

本研究課題「半導体量子構造における核スピンの光制御・検出」では、本申請者らが実証したコヒーレント核スピンダイナミクスの光検出 (H. Sanada et al., Phys. Rev. Lett. 2006) の成果を基礎に、III-V族化合物半導体 GaAs をベースとする極微細半導体量子ナノ構造を作製し、スピン流を介した光と核スピン間の相互作用を最適化し、そのスピンの量子力学的状態に強く依存する光応答特性を実現してそのスピン状態の検出と制御を行うことを目標とし、(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、長い位相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ニ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。

2. 研究の進捗状況

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立することである。

(2)については、平成21年度までに、核スピンのエネルギーおよび位相緩和時間と電子数、電子状態間の関係を調べ、電子が局在化することにより核スピンの位相緩和が強められる結果を得、成果の一部はすでに国際会議において発表し、論文として公表されている (Appl. Phys. Lett.他)。また、核スピン $3/2$ を有する GaAs 中の核スピン As, Ga を量子ビットとする固体量子演算の実証に向けて、位相制御された高周波パルス磁場印加によるスピン制御の光学検出を実証した。平成21年度までに本成果についてまとめた論文が学術誌 (Phys. Rev. Lett.) に掲載された。以上のように、(2)に関してはほぼ計画通りに研究が進捗し、成果を上げている。

一方、(1)については、ゲート電極付き縦型量子ドット構造を作製しその伝導特性について解析を行い、その成果は学会で発表し論文誌に掲載された (Appl. Phys. Lett 他)。また、面内閉じ込め構造を有する量子ポイントコンタクトにおけるスピン輸送を観測するための試料作製および測定システムの構築がほぼ完了し、現在データ取得・解析中である。

3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。

2. で述べたように、研究目的の(2)については当初の目標をすでに達成しつつある。今後さらにこれを発展させるため半導体量子構造における核スピンコヒーレンス時間の伸長技術の確立と物理の解明を推進する。

(1)についても、高空間分解顕微 Kerr 回転測定システムが整備され、半導体中のスピホール効果の定量的測定・解析などの成果を上げている。半導体量子ナノ構造の作製もほぼ完了している。現在、半導体量子ナノ構造におけるスピン流・核スピンの制御に関する実験に着手しており、概ね計画通り進捗している状況である。

4. 今後の研究の推進方策

最終年度である平成 22 年度は、

(1)ゲート電圧や歪により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。

(2)顕微光学測定システムを利用した磁場中時間・空間分解カー回転測定により、電子や核スピンのスピン流のダイナミクスを空間分解局所分光法により制御・検出を行う。

(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、長い位相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。

これらを並行して推進することにより、半導体量子構造におけるスピン流を介した核スピンの光制御・検出技術を発展させ、ゲート電界や歪による核スピンコヒーレンス時間の伸張と、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検出を実証する。

5. 代表的な研究成果

(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 11 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," Appl. Phys. Lett. 96, 071907(1)-(3) (2010). (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," Phys. Rev. B 80, 241305 (1)-(4) (2009) (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," Phys. Rev. Lett. 101, 207601 (1)-(4) (2008). (査読有)

[学会発表] (計 42 件)

1. Y. Ohno, Y. Kondo, M. Ono, S. Matsuzaka, H. Sanada, K. Morita, and H. Ohno, "Multipulse operation and optical detection of nuclear spin coherence in a quantum well (招待講演)," The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18), Kobe, Japan, July 19-24, 2009.
2. M. Ono, Y. Kondo, S. Matsuzaka, Y. Ohno and H. Ohno, "Phase control on nuclear spins in GaAs quantum well", 29th The International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS), Rio de Janeiro, Brazil, July 27-August 1, 2008.

[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

<http://ssc1.kuicr.kyoto-u.ac.jp/~tokutei/>