



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Coherent control of nuclear spins in GaAs using spin injection techniques from a half-metallic spin source [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	秋保, 貴史
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11751号
Issue Date	2015-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/58789
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Takafumi_Akiho_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 秋保 貴史

審査担当者 主 査 准教授 植村 哲也
副 査 特任教授 山本 眞史
副 査 教授 高橋 庸夫

学位論文題名

Coherent control of nuclear spins in GaAs using spin injection techniques from a half-metallic spin source

(ハーフメタル強磁性体からのスピン注入を用いた GaAs における核スピンのコヒーレント制御)

近年、電子の電荷に加えてスピンの自由度を活用し、従来にない機能と性能を有するデバイスの創出を目指すスピントロニクスの研究が注目されている。半導体中の核スピンは量子力学的な重ね合わせ状態を比較的長く維持することができ、量子計算機の量子ビットとして有望である。核スピン量子ビットの操作と検出には核磁気共鳴 (Nuclear Magnetic Resonance: NMR) が有用であるが、通常の化学分析で広く用いられている NMR 法では試料に一樣に強い外部磁場を印加して核スピンを偏極させるため、微小な領域の核スピンのみを選択的に制御することは困難である。さらに、核スピンの磁気モーメントが小さいため、NMR の信号強度は弱くなる。このため、高い空間分解能を有し、かつ、高感度な NMR 技術の開発は、大規模な固体量子計算機を実現するための基盤技術として極めて重要であり、現在盛んに研究がなされている。そのような中、NMR 信号の強度を劇的に増大させる手法として、電子スピンと核スピン間に働く超微細相互作用により、局所的に核スピンを偏極させる動的核スピン偏極 (DNP: Dynamic Nuclear Polarization) が注目されている。DNP を用いた半導体 GaAs 中の核スピン制御の先行研究としては、電子スピンの生成と検出を光学的に行う方法や、量子ホール状態を利用して電気的に行う方法がそれぞれ提案されている。しかしながら、光学的手法では素子の微細化・集積化が困難であり、一方、量子ホール系では偏極した電子スピンの生成に強磁場・極低温の環境が必要であり、いずれもデバイス応用に適さない。

一方で、従来の半導体デバイスに電子スピンの自由度を付加した新たなスピン機能デバイスの創出に向け、強磁性体からスピン偏極した電子を半導体に注入する研究が盛んに行われている。これまで、Fe や CoFe 電極をスピン源とし、GaAs や Si など様々な半導体チャネルへのスピン注入が実証されている。この半導体スピン注入を用いて生成された電子スピンを利用して DNP や核スピン状態の検出ができれば、核スピンを用いたスケーラブルな革新的量子情報デバイスの創出が期待される。しかしながら、本研究開始当初は、スピン源として使われていた強磁性体のスピン偏極率が高々 50% 程度と小さいため、高効率な核スピン偏極の生成や NMR により操作された核スピン状態の検出が困難であった。

以上の背景より本研究の目的は、スピン注入を用いた新たな核スピン量子情報デバイスの実現に向け、(1) 高効率な半導体スピン注入を実証すること、(2) 注入された電子スピンの半導体における輸送特性を解明すること、ならびに、(3) 半導体スピン注入を利用した新たな核スピン制御法を確立することである。

本論文は全 6 章で構成されている。各章の内容は以下のとおりである。第 1 章では本研究の背景と目的が述べられている。第 2 章では、強磁性体/半導体ヘテロ接合を用いた、電子スピンや核スピン状態の電氣的検出に関する原理とその実験方法について述べられている。第 3 章では GaAs チャネルへの高効率スピン注入について述べられている。スピン源としてハーフメタル強磁性体である Co_2MnSi を用いることで、従来報告されている CoFe をスピン源にした素子と比べ、一桁以上高いスピン注入効率を達成し、ハーフメタル Co 基ホイスラー合金のスピン注入源としての有用性を実証した。第 4 章では、歪 InGaAs チャネルにおけるスピン輸送特性について述べられている。Hanle 効果を用いて、歪 InGaAs チャネルにおけるスピン緩和時間が GaAs と比べ顕著に短くなることを見出し、その起源が歪誘起のスピン軌道相互作用であることを全電氣的手法で明らかにした。第 5 章では、固体量子ビット実現のための核スピン制御に関して述べられている。 Co_2MnSi を用いたスピン注入デバイスにおいて、強磁場を用いずに、注入された電子スピンにより Ga や As の核スピンを効率的に偏極し、偏極した核スピンの外部磁場に対する過渡応答特性を明らかにした。さらに、偏極した核スピン状態の NMR による変化を電子スピンの Hanle 信号の変化から検出し、核スピン量子準位間のコヒーレント振動 (Rabi 振動) を観測した。これらは半導体スピン注入を利用した核スピン量子操作の初めての実証であり、核スピンを用いた全電氣的固体量子ビットの実現につながる重要な成果である。第 6 章では本論文を総括し、主要な結論が述べられている。

これを要するに、著者は、ハーフメタル強磁性体をスピン源とした GaAs への高効率なスピン注入の実証と、これを基にした核スピンの量子操作、ならびに、GaAs や InGaAs チャネルにおけるスピン輸送特性を明らかにし、次世代のスピンを活用したスピントランジスタや量子情報デバイスの実現につながる重要な成果を創出した。これは電子デバイス工学の進展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。