



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Detection of nuclear spin coherence in GaAs through spin-echo measurements using electrical spin injection [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	林, 志超
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13517号
Issue Date	2019-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74204
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Zhichao_Lin_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 林 志超

審査担当者 主 査 教 授 村山 明宏

副 査 教 授 末岡 和久

副 査 教 授 富田 章久

学位論文題名

Detection of nuclear spin coherence in GaAs through spin-echo measurements using electrical spin injection

(電氣的スピン注入を用いたスピネコー測定による GaAs 中の核スピニコヒーレンスの検出)

本論文は, スピン注入を用いた電氣的手法に基づくスピネコー測定の実証とそれを用いた GaAs 中の核スピニコヒーレンスの検出に関する研究成果をまとめたものである.

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 中の微細領域における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, 量子ホール状態や半導体スピン注入を利用して電氣的に行う方法がそれぞれ提案されており, これまでに核スピン量子準位間の振動 (Rabi 振動) などの核スピンに対するコヒーレント制御が行われている.

量子力学的な重ね合わせ状態を維持できる時間スケールは, 核スピンの横緩和時間 T_2 によって決まるが, Rabi 振動の減衰率から決定される緩和時間には印加する静磁場の不均一性に起因する要因が含まれ, 正確な T_2 の評価は困難である. そのため, 通常の NMR 測定では磁場の不均一性を取り除くことができるスピネコー法が用いられている. しかしながら, 上記の DNP を用いた半導体微細構造中の核スピン制御の先行研究においては, 一部の光學的手法においてスピネコー測定がなされているものの, 電氣的手法では実現されていない. 光學的手法では素子の微細化・集積化が困難であることから, 電氣的手法によるスピネコー信号の実現が望ましい. 以上の背景より本研究の目的は, 電氣的スピン注入・検出法を用いた新たなスピネコー測定法を開発し, GaAs 中の核スピンの T_2 を明らかにすることである.

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半導体スピン注入と検出の基本原理、DNP や核磁場、NMR に関する物理について述べられている。

第 3 章では、強磁性体から n 型 GaAs バルクチャネルおよび AlGaAs/GaAs 二次元電子ガス (2DEG) チャネルへのスピン注入の実験結果について述べられている。申請者は、高いスピン偏極率を有する Co_2MnSi を強磁性電極とすることで両素子ともに室温でのスピン注入を実証した。また、バルクチャネルにおいて注入された電子スピンの低温におけるスピン緩和時間がおおよそ 20 ns と比較的長くなることを実証し、さらにそのことにより DNP が生じることを示した。

第 4 章では GaAs に注入された電子スピンにより偏極した核スピンの、外部磁場に対する応答特性について述べられている。まず、核スピン温度の概念を導入し、DNP による核スピン偏極の増大や反転分布の現象が、核スピン温度の低下や負温度として扱えること、一方、NMR による核磁場の消失が核スピン温度の増加として扱うことができることを示した。次に、核スピンと電子スピンの相互作用を特徴付ける時間を考慮したレート方程式をベースとしたシミュレーションにより、DNP に要する時間スケールや核スピンの磁場に対する過渡応答特性を定量的に解析した。

第 5 章では、スピンエコー測定法を用いた核スピンコヒーレンスの検出について述べられている。まず、DNP と NMR を組み合わせ、 ^{69}Ga の核スピンに対する Rabi 振動を観測し、さらに Rabi 振動の周期からスピンエコー測定に必要な $\pi/2$ パルスと π パルスの時間幅を決定した。次に、求めた $\pi/2$ パルスと π パルスを用いて、スピンエコー測定を行い、 ^{69}Ga 核スピンの T_2 を明らかにするとともに、Rabi 振動の減衰率から算出した T_2^* との相違について議論した。

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、 Co_2MnSi 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、コヒーレンス時間を明らかにし、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。