



# HOKKAIDO UNIVERSITY

|                     |                                                                                                                                                                                            |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title               | Systematic investigations of transient response of nuclear spins in GaAs under the presence of polarized electron spins [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review] |
| Author(s)           | Eldesouky, Mahmoud Rasly Khoudary                                                                                                                                                          |
| Degree Grantor      | 北海道大学                                                                                                                                                                                      |
| Degree Name         | 博士(工学)                                                                                                                                                                                     |
| Dissertation Number | 甲第13300号                                                                                                                                                                                   |
| Issue Date          | 2018-09-25                                                                                                                                                                                 |
| Doc URL             | <a href="https://hdl.handle.net/2115/71880">https://hdl.handle.net/2115/71880</a>                                                                                                          |
| Rights(URL)         | <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/</a>                                                                        |
| Type                | doctoral thesis                                                                                                                                                                            |
| File Information    | Mahmoud_Rasly_Khoudary_Eldesouky_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 Mahmoud Rasly Khoudary Eldesouky

審査担当者 主 査 教 授 高橋 庸夫

副 査 教 授 末岡 和久

副 査 教 授 本久 順一

## 学位論文題名

Systematic investigations of transient response of nuclear spins in GaAs under the presence of  
polarized electron spins

( 電子スピン偏極状態下における GaAs 中核スピンの過渡応答特性 )

本論文は, 電子スピン偏極状態下における GaAs 中の核スピン状態の, 磁場変化に対する過渡応答特性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気的に行う方法がそれぞれ提案されており, これまでに Rabi 振動やスピンエコーなどの核スピンに対するコヒーレント制御が実証されている.

しかしながら, 核スピン系は電子スピン系や格子系と様々な時間スケールで相互作用を及ぼすため, 系のパラメータがそれらの時間スケールよりも早く変化すると核スピンの応答は複雑になる. 特に, 外部磁場の変化に対する核スピン状態の定量的な評価はこれまで準静的過程でなされてはいるものの, その過渡応答に関しては定性的な理解しか得られていない. 核スピンの状態を正確に制御するためには, 磁場変化に対する核スピンの過渡応答特性をより深く明らかにし, さらに実験結果を定量的に予測, 解析できるモデルを確立する必要がある.

以上の背景より本研究の目的は, 電子スピン偏極状態下における GaAs 中の核スピン状態の, 磁場変化に対する過渡応答特性を実験およびシミュレーションにより明らかにすることである. そのため, 強磁性電極である  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  から GaAs チャネルへのスピン注入により生成された電子スピンを用い, GaAs の核スピンを偏極させると共に, 偏極した核スピンの外部磁場に対する過渡応答特性を, 核スピンと相互作用をする電子スピンの応答を電気的に検出することにより評価している. さらに, 核

スピンの過渡応答特性を、核スピンと電子スピンの相互作用を特徴付ける時間 ( $T_{1e}$ ), および、核スピンと格子系の相互作用を特徴付ける時間 ( $T_1$ ) の 2 つの因子により解析するモデルを構築し、それを基に、得られた実験結果を定量的に評価している。

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解、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、本研究で用いたスピン注入素子の作製方法と評価方法、シミュレーション方法について述べられている。

第 4 章では電子スピンとの相互作用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、スピン源としてハーフメタル強磁性体の  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  を用いたスピン注入素子においてスピンプルブ効果と Hanle 効果を観測し、GaAs への明瞭なスピン注入が実証された。次に、注入された電子スピンにより GaAs 中の核スピンが偏極されることが、Hanle 信号の変化から実証された。すなわち、核スピンが偏極することで電子スピンの働く有効磁場 (核磁場) の大きさが変化し、その結果、電子スピンの歳差運動を起源とする Hanle 信号が変化することが示された。また、この Hanle 信号の変化の具合から逆に核磁場の大きさが評価できることが示され、本手法を用いて、核スピンの外部磁場に対する過渡応答特性が実験的に明らかにされている。さらに、核スピンの外部磁場に対する応答特性に対し、 $T_{1e}$  と  $T_1$  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定量的な解析がなされ、DNP に要する時間スケールが明らかにされている。さらに、DNP の物理をより深く理解するために、核スピン温度の概念が導入され、DNP による核スピン偏極の増大や反転分布の現象を、核スピン温度の低下や負温度として扱い、過渡応答特性が議論されている。

第 5 章では、NMR が核スピンの過渡応答特性に及ぼす影響について述べられている。一定周波数の RF 磁場印加下において、GaAs 中に存在する 3 種類の核種  $^{69}\text{Ga}$ ,  $^{71}\text{As}$ ,  $^{75}\text{As}$  に由来する核磁場がそれぞれの共鳴磁場において NMR により消失することが、Hanle 信号の変化から実証された。さらに、NMR による核磁場の消失が核スピンの過渡応答特性に及ぼす影響がシミュレーションにより明らかにされた。また、核スピン温度の概念を用いて、NMR 効果を核スピン温度の増加として扱い、過渡応答特性が議論されている。

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、半導体スピン注入により生成された電子スピン偏極状態下において、GaAs 中の核スピン状態の、磁場変化に対する過渡応答特性を実験およびシミュレーションにより明らかにした。このことにより、核スピンの状態を正確に制御、予測することが可能となり、核スピンの NMR による量子操作を実現するための重要な基盤技術を創出した。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。