



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_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 秋保 貴史

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。スピントロニクスデバイスの代表例の一つであるスピントランジスタは、不揮発性、超低消費電力、論理機能を再構成できることを特徴とし、盛んに研究が行われている。スピントランジスタは電界効果トランジスタのソースおよびドレインを強磁性体で置き換えた構造を有し、ソースから半導体チャネルに注入された電子スピンをゲート電圧により制御する。これまで Fe や CoFe 電極をスピン源として半導体チャネルへのスピン注入がいくつかの研究機関から報告されているが、用いられている強磁性体のスピン偏極率が 50% 程度であることから、そのスピン注入効率は小さく、デバイス応用上不十分であった。北海道大学の Liu らはスピン偏極率が 100% となるハーフメタル強磁性体の Co 基ホイスラー合金の一つである Co_2MnSi をスピン源とし、MgO トンネルバリアと組み合わせた強磁性トンネル接合デバイスにおいて、巨大なトンネル磁気抵抗比を実証している。このアプローチは、半導体スピン注入の高効率化の観点からも興味深いが、本研究の開始当初、Co 基ホイスラー合金の半導体スピン注入源としての有用性は明らかになっていなかった。

スピン注入効率の向上に加え、スピン機能デバイス実現に向けての重要な課題は、半導体チャネル中のスピン輸送特性を明らかにすることである。特に、注入された電子スピんに作用するスピン軌道相互作用や、半導体中の電子スピンと核スピン間の相互作用（超微細相互作用）の解明が重要となる。両者はともに電子スピンの半導体におけるスピン緩和機構の要因であるが、逆にうまく利用できれば、前者は電場によるスピン制御に、後者は、半導体中の核スピン制御にそれぞれ応用することができる。スピン軌道相互作用の強い系としては InAs 等の狭ギャップ半導体や格子定数の異なる異種半導体接合による歪半導体などが知られているが、これらの材料・構造に対するスピン注入の研究はほとんど報告されておらず、注入された電子スピンに対するスピン軌道相互作用の影響に関する理解は不十分である。

一方、GaAs においては、電子スピンと核スピンの間に働く超微細相互作用が比較的強く、電子スピンの様々な特性に大きく影響を及ぼすことが知られている。また、超微細相互作用を利用し、電子スピンを通じて核スピンを高効率に偏極させたり、検出したりすることも可能であり、これを利用した核スピン量子ビットの創出に向けた研究も盛んに行われている。これまでの先行研究では、電子スピンの生成と検出を光学的に行う手法や、量子ホール系を利用して電気的に行う方法がそれぞれ提案され、核磁気共鳴 (NMR) と組み合わせることで核スピンの基本的な量子操作に成功している。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。一方半導体スピン注入を用いて高効率に電子スピンを注入出来れば、核スピンを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。

以上の背景より本研究の目的は、スピントランジスタや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中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や目的を述べるとともに、スピントランジスタ、および、核スピンを用いた量子情報デバイスのコンセプト、そして、スピン軌道相互作用、動的核スピン偏極の重要性について述べる。

第 2 章では、強磁性体/半導体ヘテロ接合を用いた半導体へのスピン注入の電氣的検出に関する実験方法について述べる。

第 3 章では GaAs チャンネルへの高効率スピン注入について述べる。ここでは、スピン源としてハーフメタル強磁性体である Co_2MnSi を用いたデバイスと、トンネルバリアに MgO を用いたスピン注入デバイスについて、それらのスピン注入特性を実験的に明らかにした。その結果、両素子に対し、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実証した。とくに Co_2MnSi を用いた素子では、室温においてこれまでにない高いスピン注入効率を得られ、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 チャンネルにおけるスピン輸送特性について述べる。半導体チャンネルにおいてスピン軌道相互作用の影響が強くなれば、スピン緩和時間は短くなることが予測される。 Hanle 効果を用いて、歪 InGaAs チャンネルにおけるスピン緩和時間を評価し、その結果、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た。歪の大きさ、スピンの運動方向、スピン方向の関係から、スピン緩和の主な原因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 原子核の核スピンを効率的に偏極させ、さらに、偏極した核スピンの外部磁場に対する過渡応答特性を明らかにした。これらの結果から、スピン注入デバイスにおける核スピン状態の初期化法を確立した。次に、偏極した核スピンに対する、高周波磁場印加による NMR を電子スピンの Hanle 信号の変化から観測し、さらに、高周波磁場の印加時間を制御することで、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、結論を述べる。

以上を要約すると、本論文は、ハーフメタル強磁性体の 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、 GaAs や InGaAs チャンネルにおけるスピン輸送特性を明らかにしたものであり、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である。