

## 学位論文題名

Electrical spin injection from ferromagnetic metal  
into semiconductors

(強磁性金属から半導体中へのスピン注入に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

近年、デバイスの微細化が一層進むにつれて、電荷を制御する従来型のデバイスの限界も指摘されている。そういった中で、次世代、次々世代デバイスの候補として電子スピンを積極的に利用したデバイス、例えば、スピントランジスタや高速光スイッチングデバイスなどが提案されており、「スピントロニクス」と呼ばれる新しい分野の研究が盛んに行われるようになってきている。スピndeviceは、スピンという量子効果を利用するため、従来のデバイスとは全く異なった機能が実現できる可能性を秘めており、より微細・高速なデバイスを実現できる可能性がある。また、量子ドットや単電子トランジスタ等との複合化により、固体素子中での量子コンピューティングデバイスやスピンメモリへの応用も考えられ、応用上も非常に興味深い。

電子スピンを積極的に利用するスピndeviceの一例として、電界効果型スピントランジスタ(Spin-FET)と呼ばれるデバイスが提案されている。このデバイスでは、強磁性体ソース電極から半導体チャネル中へスピン偏極電子を注入する。注入された電子は、スピン軌道相互作用によりそのスピンの向きを回転させながら半導体チャネル中を流れる。強磁性体ドレイン電極へ流れ込む際の電子スピンの向きと電極の磁化方向の相対的な角度によって抵抗が変化するため、スピンの回転角度をゲート電圧により制御し、電流の大きさを制御できる。デバイスの動作原理は磁気メモリ(MRAM)への応用が期待されているトンネル磁気抵抗(TMR)デバイスと非常によく似ているが、Spin-FETは三端子の能動デバイスである点が決定的に異なる。半導体チャネル部分にはInAs、InGaAs等のスピン軌道相互作用の大きい材料が有望視されている。

本研究は、Fe(100)/InAs(100)ヘテロ構造におけるスピン偏極電子の注入に関する研究成果まとめたものである。Spin-FETなどのスピン注入型のデバイスを実現するためには、半導体中にスピン偏極電子を注入することが重要になる。強磁性体をスピン偏極電子源として用いる方法は、今のところ、室温条件下で、外部磁場印加や光照射なしに半導体中にスピン偏極電子を生成しうる唯一の方法である。しかしながら、現在まで強磁性体/半導体接合におけるスピン注入は、GaAs系の材料を用いた構造でいくつか報告されているだけである。将来的なデバイス応用を考えるとオーミック抵抗、スピン軌道相互作用、移動度といった観点からみてInAs系の材料の方が有望であるといえる。本研究では、まずInAs(100)基板上に、bcc-Feのエピタキシャル薄膜パターンを形成し、その結晶性、磁気特性、注入特性といった基礎物性について検討した。その後、偏光エレクトロルミネッセンス測定の手法を用いて、FeからInAsへのスピン注入の研究を行い、Feのmajority-spinが主にInAs中に注入されていることを明らかにした。

第一章では、本研究の背景を述べた。近年の微細化技術の急速な進展により、半導体デバイス、磁気デバイスの両分野においてスピン物性への関心が高まり、「スピントロニクス」と呼ばれる新分野が

発展したその経緯についてまとめ、スピントロニクス、特に半導体をベースにしたスピントロニクス分野の研究状況について概説し、強磁性体/半導体接合におけるスピン注入という本研究の位置付けを明らかにした。

第二章では、理論的な提案がなされている Spin-FET の動作原理について述べた。同デバイスの主たる動作原理であるスピン起動相互作用について述べ、InAs 系におけるスピン軌道相互作用の大きさを測定した結果について述べる。また、ゲート電極によるスピン起動相互作用の変調を実証した実験結果についても述べ、Spin-FET を実現する上で残された課題を明らかにした。

第三章では、これまでに報告されているスピン注入の理論と実験結果について述べる。スピン注入に関する理論は様々な観点から理論的な提案がなされており、いまだに議論は収束していない状態である。本章ではそれぞれの理論の相違点についてまとめた。実験報告に関しては、その特徴と問題点についてまとめ、本研究との相違を明らかにした。

第四章では、Fe/InAs 接合の作製とその特性評価についてまとめた。Fe と InAs の格子不整合は約 5.4% と大きく一般にエピタキシャル成長は難しいが、適切な条件下では室温の成長においてもエピタキシャル成長が可能であることを確かめた。高温成長(175℃)の場合には、歪みの緩和が十分に起こり、成長の初期段階から良好なエピタキシャル成長が実現されているが、界面に非磁性層が形成されている可能性もあるため、本研究では低温成長を選択した。作製した Fe/InAs 接合の磁気特性および電気特性について評価を行った。InAs は表面におけるフェルミ準位が伝導帯の底よりも 50~100meV 上側にピンニングされるため、金属とオーミック接触を形成することが期待される。本研究では実際に成膜温度に関わらず良好なオーミック接触が実現でき、デバイス応用に有利であることを確かめた。

第五章では、強磁性体電極から半導体チャネル中への電子注入の際の電子スピン状態について調べるために、磁場中での偏光エレクトロルミネッセンスを行った結果についてまとめた。Fe 電極から p-InAs の伝導帯に注入した電子の再結合発光の円偏光度を測定することで、注入された電子のスピン偏極度を評価することが可能となる。InAs のバンド間遷移による発光の波長は約 3 $\mu\text{m}$  であるため、光検出器には InSb 検出器を使用した。2K における円偏光度の磁場依存性から、最大約 12% の偏光度を得た。InAs は電子の g 因子が約 -15 と非常に大きいく、円偏光度の磁場依存性にはゼーマン分離による効果が同時に現れるが、非磁性電極サンプルの測定結果との対比により、Fe からのスピン注入による偏光を特定した。偏光度の極性から Fe の majority-spin が主に InAs 中に注入されていることを明らかにした。また、測定された偏光度はこれまでの報告に比べて大きく、強磁性体/半導体界面にトンネリング障壁が存在しなければ効率の良いスピン注入は不可能であるという説を覆す結果である。

第六章では、全体を総括し、将来への展望を記した。InAs 系の材料を用いた強磁性体/半導体接合におけるスピン注入を実証したことで、スピン軌道相互作用を用いたスピndeviceの実現に向けた準備が整ったと言える。今後、Spin-FET の実現や、自己形成 InAs 量子ドット等との複合化による量子コンピューティングの qubit の実現といった応用が期待される。

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	武笠幸一
副査	教授	山本真史
副査	教授	岡田亜紀良
副査	教授	陽完治
副査	助教授	末岡和久

学位論文題名

## Electrical spin injection from ferromagnetic metal into semiconductors

(強磁性金属から半導体中へのスピン注入に関する研究)

近年、デバイスの微細化が一層進むにつれて、電荷を制御する従来型のデバイスの限界も指摘されている。その中で、次世代、次々世代デバイスの候補として電子スピンを積極的に利用したデバイスが提案されており、「スピントロニクス」と呼ばれる新しい分野の研究が盛んに行われるようになってきている。スピンドバイスは、スピンという量子効果を利用するため、従来のデバイスとは全く異なった機能が実現できる可能性を秘めており、より微細・高速なデバイスを実現できる可能性がある。

電子スピンを積極的に利用するスピンドバイスの一つとして、電界効果型スピントランジスタ(Spin-FET)が提案されている。このデバイスでは、強磁性体ソース電極から半導体チャネル中へスピン偏極電子を注入する。注入された電子は、スピン軌道相互作用によりそのスピンの向きを回転させながら半導体チャネル中を流れる。半導体チャネル部分にはInAs、InGaAs等のスピン軌道相互作用の大きい材料が有望視されている。

本研究は、Fe(100)/InAs(100)ヘテロ構造におけるスピン偏極電子の注入に関しその研究成果をまとめたものである。Spin-FETなどのスピン注入型のデバイスを実現するためには、半導体中にスピン偏極電子を注入することが重要になる。強磁性体をスピン偏極電子源として用いる方法は、今のところ、室温条件下で、外部磁場印加や光照射なしに半導体中にスピン偏極電子を生成しうる唯一の方法である。しかしながら、現在まで強磁性体/半導体接合におけるスピン注入は、GaAs系の材料を用いた構造でいくつか報告されているだけである。将来的なデバイス応用を考えるとオーミック抵抗、スピン軌道相互作用、移動度といった観点からみてInAs系の材料が有望であるといえる。本研究では、まずInAs(100)基板の上に、bcc-Feのエピタキシャル薄膜パターンを形成し、その結晶性、磁気特性、注入特性といった基礎物性について検討した。その後、偏光エレクトロルミネッセンス測定の手法を用いて、FeからInAsへのスピン注入の研究を行い、Feのmajority-spinが主にInAs中に注入されていることを明らかにした。

第一章では、本研究の背景を述べた。スピントロニクス、特に半導体をベースにしたスピント

ロニクス分野の研究状況について概説し、強磁性体/半導体接合におけるスピン注入という本研究の位置付けを明らかにした。

第二章では、理論的な提案がなされているSpin-FETの動作原理について述べた。同デバイスの主たる動作原理であるスピン起動相互作用について述べ、InAs系におけるスピン軌道相互作用の大きさを測定した結果について述べる。

第三章では、これまでに報告されているスピン注入の理論と実験結果について述べた。

第四章では、Fe/InAs接合の作製とその特性評価について述べた。InAsは表面におけるフェルミ準位が伝導帯の底よりも50~100meV上側にピンニングされ、成膜温度に関わらず良好なオーミック接触が実現でき、デバイス応用に有利であることが確かめられた。

第五章では、強磁性体電極から半導体チャネル中への電子注入の際の電子スピン状態について調べるために、磁場中での偏光エレクトロルミネッセンスを行った結果について記した。2Kにおける円偏光度の磁場依存性から、最大約12%の偏光度を得た。InAsは電子のg因子が約-15と非常に大きく、円偏光度の磁場依存性にはゼーマン分離による効果が同時に現れるが、Feからのスピン注入による偏光を特定出来た。偏光度の極性からFeのmajority-spinが主にInAs中に注入されていることを明らかにした。また、測定された偏光度はこれまでの報告に比べて大きく、強磁性体/半導体界面にトンネリング障壁が存在しなければ効率の良いスピン注入は不可能であるという説を覆す結果である。

第六章では、全体を総括し、将来への展望を記した。

本論文はInAs系の材料を用いた強磁性体/半導体接合におけるスピン注入を実証し、スピン軌道相互作用を用いたスピンデバイスの実現の可能性を示したもので、有用な多くの知見を得ており、スピントロニクスならびに電子デバイス工学の分野に貢献するところ大なものがある。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。