

## 学位論文題名

P型GaAsにおける電子スピン偏極の動的挙動に  
関する基礎研究

## 学位論文内容の要旨

磁性材料のミクロな制御が現在、大いに求められており、また、磁気記録における記録密度は、年とともに増加の一途をたどっている。それにともない、より高い分解能を持つ表面磁性評価手段が求められている。スピン偏極STM(SP-STM)は現在開発途上であり、原子分解能を持つ表面磁性観察装置として期待されている。p型GaAsは、円偏光照射により伝導帯にスピン偏極電子を励起できることから、有望なSP-STM探針材料であると考えられる。探針材料としての特性の向上をはかる上で、スピン緩和、再結合消滅など動的挙動のメカニズムを知り、これを制御することが重要である。

本研究は、これら動的挙動の効果およびその制御の可能性を検討し、SP-STM探針設計の指針を得ることを目的としている。

本論文は、全八章から構成されている。

第一章では、本研究の背景として、磁気記録の発展および表面磁性評価法について概説し、SP-STMに関する現在までの研究状況について述べた。さらに、円偏光励起p型GaAsの探針としての特徴と課題について述べ、SP-STM開発における本研究の果たす役割を明らかにするとともに、本研究の目的および構成について記した。

第二章では、III-V族化合物半導体における伝導帯電子のスピン緩和機構の理論を解説した。スピン緩和はスピン偏極状態を左右する最も重要な現象である。また、バルクp型GaAsのスピン緩和挙動について、主としてLampelらの研究成果に基づきまとめた。本研究で扱う高ドーピングレベルのp型GaAsでは、電子-正孔間の交換散乱によるBAP機構が、支配的なスピン緩和機構であると考えられる。

第三章では、本研究で用いた実験手法について説明した。本研究では試料の作製にMBE法を用いた。伝導帯電子のスピン偏極の評価、および試料の電子構造の観察には偏光フォトルミネッセンス分光法を用いた。また、スピン緩和時間の測定には、時間分解フォトルミネッセンス分光法を用いた。これらの原理と具体的方法を述べた。

第四章では、電子スピン偏極の動的挙動が、p型GaAsのSP-STM探針材料としての特性にどのような効果をおよぼし得るかについて伝導帯電子のレート方程式に基づいて予測し、問題点を整理した。また、偏光ルミネッセンス分光の実験結果から、バルクp型GaAsにおける動的挙動の効果を推定し、その制御の可能性について論じた。動的挙動の効果としては、減偏極効果と偏極分布の効果が挙げられる。両者ともスピン緩和時間、および再結合時間によって決定され、ドーピングレベルや温度に依存する。動的挙動、特にスピン緩和の制御によって、SP-STM探針としての特性の向上が見込まれることを述べた。

第五章では、p型デルタドーピングAlGaAs/GaAs/AlGaAsダブルヘテロ構造の電子スピン緩和時間測定の結果を示した。均一にドーピングを行ったダブルヘテロ構造の同実験結果との比較から、スピン緩和時間がアクセプターの分布に依存することを明らかにした。さらに、デルタドーピングダブルヘテロ構造のスピン緩和時間が、バルクに比べて強いアクセプター濃度依存性を示すことから、ルミネッセンススペクトルの測定結果と併せて、同構造におけるスピン緩和時間の長寿命化が、電子-正孔間の波動関数の重なり減少によるものであることを実験的に検証した。

第六章では、電子分布の計算からスピン緩和時間の制御の可能性について論じた。p型デルタドーピングAlGaAs/GaAs/AlGaAsダブルヘテロ構造における電子スピン緩和時間の井戸幅依存性を示す。これは井戸幅に依存した電子-正孔間の波動関数の重なりの変化を反映していると考えられる。デルタドーピングによるポテンシャルスパイクを含む量子井戸を仮定し、シュレディンガー方程

式を解くことによって電子分布を求め、井戸幅、ドーピングスパイクの最適化によるスピン緩和時間の制御の可能性を示した。

第七章では、実際にトンネル過程における動的挙動の効果を検証し得る実験系として、磁性体/p型GaAs偏光エレクトロルミネッセンス測定について初期実験の結果と併せて論じた。

第八章では、本研究の結果を総括した。p型GaAsのSP-STM探針としての特性は、動的挙動、特にスピン緩和時間に依存する。デルタドーピングによる電子、正孔の空間分布の制御は、スピン緩和時間の長寿命化をはかる有望な技術であり、この点を考慮して構造の最適化をはかることにより、高性能な探針の作製が可能であることを示した。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 高 橋 平七郎  
副 査 教 授 武 笠 幸 一  
副 査 教 授 大 貫 惣 明  
副 査 教 授 毛 利 哲 夫

学 位 論 文 題 名

## P型GaAsにおける電子スピン偏極の動的挙動に 関する基礎研究

磁気材料の応用、とくに磁気記録における高密度化には、材料表面の高分解能での磁性評価およびマイクロ制御が不可欠である。スピン偏極走差トンネル顕微鏡 (SP-STM) は原子分解能を持つ表面磁性観察装置として開発が期待されている。このSP-STMの探針材料として、p型GaAsが最も有望でありその実現には、スピン緩和、再結合消滅など動的挙動のメカニズムの解明が必要である。

本論文では、探針材料の動的挙動およびその制御の可能性を検討し、SP-STM探針設計への指針を明らかにしている。

まず、III-V族化合物半導体における伝導帯電子のスピン緩和機構の理論を検討し、スピン偏極状態を支配する最も重要な因子はスピン緩和であり、バルクp型GaAsのスピン緩和挙動は電子-正孔間の交換散乱に律則されることを指摘した。さらに、電子スピン偏極の動的挙動がp型GaAsのSP-STM探針材料の特性におよぼす効果を伝導帯電子のレート方程式から予測した。また偏光ルミネッセンス分光による電子構造の解析から、バルクp型GaAsにおける動的挙動として、減偏極効果と偏極分布の効果があり、ともにスピン緩和時間および再結合時間によって支配され、さらに、ドーピングレベルや温度に依存することを明らかにした。SP-STM探針の特性の向上はとくにスピン緩和の制御によって可能となることを見出した。

次に、MBE法により作製したp型 $\delta$ -ドーパAlGaAs/GaAs/AlGaAsダブルヘテロ構造について、時間分解フォトルミネッセンス分光法により電子スピン緩和時間を測定し、また、偏光ルミネッセンス分光により均一にドーピングしたダブルヘテロ構造を解析することによって、スピン緩和時間がアクセプターの分布に依存することを明らかにした。さらに、 $\delta$ -ドーパダブルヘテロ構造のスピン緩和時間はバルクに比較してアクセプター濃度に強く依存性することを確認し、スピン緩和時間の長寿命化は電子-正孔間の波動関数の重なり減少によるものであることを実験的に明らかにしている。

さらに、電子分布の計算からスピン緩和時間の制御の可能性として、p型 $\delta$ -ドーパAlGaAs/GaAs/AlGaAsダブルヘテロ構造における電子スピン緩和時間の井戸幅依存性について、 $\delta$ -ドーピングによるポテンシャルスパイクを含む量子井戸を仮定して、シュレディンガー方程式を用いて電子分布を検討した結果、井戸幅とドーピングスパイクの最適化によってスピン緩和時間の制御が可能と

なることを明らかにした。

最後に、以上の結果から、 $\delta$ -ドーピングは電子・正孔の空間分布を制御し、スピン緩和時間の長寿命化を図ることが可能で、その最適化により高性能なSP-STM用の探針作製が可能であることを示した。

これを要するに、著者は、原子分解能のスピン偏極走査顕微鏡用化合物半導体の探針に関して、有益な多くの新知見を得ており、材料物性ならびに電子材料物性の分野に貢献するところ大なるものがある。

よって、本論文は、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。