

学位論文題名

GaAs/AlGaAs 系における電子スピン緩和時間の 制御に関する研究

学位論文内容の要旨

磁気記録密度の増加に伴い、表面磁化状態の評価法についても高分解能化の必要性が高まってきている。また最近、スピン偏極電子の性質を利用したスピントランジスタのアイデアも提案されている。このような背景から、物質の磁性の起源である電子のスピンについて注目され始めているが、スピン状態をデバイス動作に応用する際に必要とされる電子スピンに関わる基礎的物性については、まだ解明されていない点が多い。固体内におけるスピン偏極電子の振る舞いについては様々な計測手法を応用して研究が進められているところである。

本研究は、光励起によりスピン偏極した電子の励起が可能で量子構造の作製が容易な III-V 族化合物半導体材料、特に GaAs 系材料に着目し、GaAs 井戸幅の異なるいくつかの p 型 δ ドープ GaAs/AlGaAs ダブルヘテロ構造試料を作成し、その低温フォトルミネッセンスの時間変化から、電子スピン緩和時間の長寿命化に関してまとめたものである。この材料はスピン偏極走査型トンネル顕微鏡のスピンプローブに応用できる材料候補の一つである。スピン偏極した電子のトンネル効果を利用して表面磁化状態を測定するスピン偏極走査型トンネル顕微鏡 (SP-STM) では、原子分解能での磁性測定を実現するために、試料表面および探針表面における電子のスピン偏極状態について基礎物性を明らかにしておくことが重要であると考えられている。

第 1 章では、本研究の背景としてスピndeバイスに関する研究の現状についてまとめ、スピン偏極トンネル現象を応用した SP-STM の研究状況についてもまとめた。また GaAs のような半導体の特性とそれらの背景との深い関連性について述べ、本研究の位置付けについて記した。

第 2 章では、半導体中の電子スピン緩和現象について総括的に述べた。スピン緩和はスピン偏極状態を左右するもっとも重要な現象である。スピン緩和現象は温度や不純物濃度などによりその支配的な機構が異なるが、その原因は光や熱などによる格子振動による散乱や、有効磁場変化などの磁気的な原因も考えられている。半導体中の電子スピンの緩和については過去にもさまざまな研究がなされているが、本研究では電子とホールの交換相互作用によって引き起こされ、比較的低温、高ドーピングレベルで支配的となる BAP メカニズムに着目した。

第 3 章では、本研究において使用した試料の構造とその役割について論じ、試料作成の手順とその際の留意点についてまとめた。本研究では、p 型 δ ドープ層を含む GaAs/AlGaAs ダブルヘテロ構造に着目し、GaAs 井戸幅の異なるいくつかの試料について実験を行った。この構造は Wagner 等や Richard 等によって長いスピン緩和時間を有すると報告されているものであり、p 型 δ ドープ層にホールが、GaAs 井戸層

に電子がそれぞれ閉じ込められることで、電子とホールの波動関数の重なりを減少させることができるため、第2章において述べられたBAPメカニズムによって、長いスピン緩和時間を有することが報告されている。薄膜試料の作成には不純物が少なく、界面の平坦性が得られやすいことから分子線エピタキシャル法(MBE法)を用いることとした。

第4章では、作成試料のフォトルミネッセンス測定の方法と手順を示した。本研究では、ピコ秒からナノ秒という速い時間単位で緩和するスピン緩和現象を解析するため、励起光には可変長超短パルスレーザーを用いた。また検出系には分光器とストリークカメラを用い、発光スペクトルの時間変化の測定を行うことにより、励起キャリアの緩和過程におけるエネルギー変化の観測を行えるようにした。これらの測定時には、発光の右円偏光成分及び左円偏光成分をそれぞれ測定することによって、対応するアップスピン電子及びダウンスピン電子の挙動の情報が得られるようにした。

第5章では、フォトルミネッセンススペクトルデータの解析結果をまとめ、考察した。フォトルミネッセンススペクトル中には、そのスペクトルの時間変化の違いから、GaAsの束縛励起子再結合、ドナーアクセプタ対再結合、GaAs井戸からの $e_0 \rightarrow lh_1$ 再結合、 $e_0 \rightarrow hh_1$ 再結合と同定される発光が観測された。特に、右円偏光成分と左円偏光成分の差分スペクトルでは、励起、再結合時のスピン選択則を反映して現れるライトホールの負成分とヘビーホールの正成分が特定された。また、GaAs井戸幅の異なるいくつかの試料における発光スペクトルでは、GaAs井戸からの $e_0 \rightarrow lh_1$ 再結合、 $e_0 \rightarrow hh_1$ 再結合発光準位を特定した結果、計算による見積もりとよく一致した。

第6章では、フォトルミネッセンスの時間変化から、再結合時間及びスピン緩和時間の評価を行った。発光の右円偏光成分 I^+ と左円偏光成分 I^- の和の時間変化から励起キャリアの再結合時間を算出し、スピン偏極度 $(I^+ - I^-) / (I^+ + I^-)$ の時間変化からスピン緩和時間を評価した。その結果、スピン緩和時間は試料のGaAs井戸幅に依存し、井戸幅90nmにおいて最大値 20 ± 7 nsecを有することを明らかにした。このことは試料の構造変化による波動関数の変化によりスピン緩和時間が制御可能であることを示したものである。また、より長いスピン緩和時間を実現させるために電子とホールの波動関数の重なりを減少させるような急峻な δ ドープ構造を作成するためには、拡散の少ない材料を用いるなどのアプローチも有効であることが予想される。同時に、この実験から見積もられる定常光励起時におけるスピン偏極度の距離依存性においてその半値幅が $10 \mu\text{m}$ という長い値となり、たとえばSP-STM探針材料への応用を考えた際、p型 δ ドープGaAs/AlGaAsダブルヘテロ構造試料は探針化することでスピン偏極状態の検出可能な探針とすることができ、スピン緩和時間が長い特徴を生かした探針構造や励起方式を考案できるものと期待される。

第7章では、全体の総括を行い、将来への展望を記した。本研究では、p型 δ ドープGaAs/AlGaAsダブルヘテロ構造試料における低温フォトルミネッセンスの時間変化からスピン緩和時間の評価を行い、GaAs井戸幅90nmにおいて最大値 20 ± 7 nsecを有することを明らかにした。このことは試料の構造によりスピン緩和時間が制御可能であることを示したものである。本研究において扱われた電子スピンの緩和現象を理解することは、スピントランジスタの実用化やSP-STMの開発など、エレクトロニクスへの応用に幅広く利用出来るものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 武 笠 幸 一
副 査 教 授 池 田 正 幸
副 査 教 授 岡 田 亜 紀 良
副 査 助 教 授 末 岡 和 久

学 位 論 文 題 名

GaAs/AlGaAs 系における電子スピン緩和時間の 制御に関する研究

磁気記録密度の増加に伴い、高分解能化を有する表面磁化状態の評価法の必要性が高まっている。また、スピン状態のデバイスへの応用が提案されているが、その際必要とされる電子スピンに関わる基礎的物性については、まだ解明されていない点が多い。

本研究は、光励起によりスピン偏極した電子の励起が可能でかつ量子構造の作製が容易なIII-V族化合物半導体、特にGaAs系材料に着目し、GaAs井戸幅の異なるいくつかのp型 δ ドープGaAs/AlGaAsダブルヘテロ構造を作成し、その低温でのフォトルミネッセンスの時間変化から電子スピン緩和時間を求め、長寿命化に関する検討を行ったものである。この材料はスピン偏極走査型トンネル顕微鏡のスピンプローブとして使用できる材料の候補の一つである。スピン偏極電子のトンネル効果を利用して表面磁化状態を測定するスピン偏極走査型トンネル顕微鏡 (SP-STM) において、原子分解能での表面磁性を測定するためには、探針先端表面における電子のスピン偏極状態についての基礎物性を明確にしておくことが重要であると考えらる。

研究成果を要約すると、

- (1) p型 δ ドープ層を含むGaAs/AlGaAsダブルヘテロ構造においてGaAs井戸幅の異なるいくつかの試料についてフォトルミネッセンススペクトルを測定し、GaAsの束縛励起子再結合、ドナー-アクセプタ対再結合、GaAs井戸からの $e_0 \rightarrow 1h_1$ 再結合、 $e_0 \rightarrow hh_1$ 再結合と同定される発光が観測された。特に、右円偏光成分と左円偏光成分の差分スペクトルでは、励起、再結合時のスピン選択則を反映して現れるライトホールを負成分とヘビーホールの正成分が特定された。
- (2) フォトルミネッセンスの時間変化から、再結合時間およびスピン緩和時間の評価を行った。スピン緩和時間は試料のGaAs井戸幅に依存し、井戸幅90nmにおいて最大値 20 ± 7 nsecを有することを明らかにした。このことは試料の構造変化によ

る波動関数の変化によりスピン緩和時間が制御可能であることを示したものである。スピン偏極度の距離依存性においてその半値幅が $10\mu\text{m}$ という長い値となり、p型 δ ドープGaAs/AlGaAsダブルヘテロ構造はスピン偏極状態の検出可能なSP-STM用探針とすることが期待出来る。

本研究では、p型 δ ドープGaAs/AlGaAsダブルヘテロ構造における低温フォトルミネッセンスの時間変化からスピン緩和時間の評価を行い、構造によりスピン緩和時間が制御可能であることを示したもので、有益な多くの知見を得ており、スピンの科学・評価ならびに磁気工学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。