

あきばのりみつ

氏名 秋葉 教 充
 授与学位 博士(工学)
 学位授与年月日 平成12年3月23日
 学位授与の根拠法規 学位規則第4条第1項
 研究科、専攻の名称 東北大学大学院工学研究科(博士課程)電子工学専攻
 学位論文題目 強磁性半導体(Ga,Mn)As ヘテロ構造に関する研究
 指導教官 東北大学教授 大野 英男
 論文審査委員 主査 東北大学教授 大野 英男 東北大学教授 横尾 邦義
 東北大学教授 高橋 研

論文内容要旨

1. 序論

強磁性半導体(Ga,Mn)As は半導体と磁性体の両方の特徴を併せ持つ新しい材料である。GaAs/AlAs 等の半導体とも整合性が良く、良質な界面を持つヘテロ構造を作製できることから、従来の半導体デバイスと融合した新たなデバイス作製も期待される。そこで本研究では(Ga,Mn)As を用いた様々なヘテロ構造を作製して、(Ga,Mn)As の基礎物性を理解することとその応用の可能性を探ることを目的として研究を行う。

2. 強磁性半導体(Ga,Mn)As

(Ga,Mn)As は非平衡結晶成長法である低温分子線エピタキシ(MBE)法を用いることで結晶成長できる。低温で強磁性を示し Mn 組成最大 7%まで得られる。現在得られている最高の強磁性転移温度 T_c は 110K である。強磁性の起源は正孔を媒介とした磁性スピン間の相互作用によると考えられている。バッファ層から受ける歪みに誘起される磁気異方性が現れ、圧縮歪み、引張歪みでそれぞれ面内、面直に磁化容易軸を持つ。また良好なヘテロ界面を持つ(Ga,Mn)As/GaAs 超格子構造が作製でき、強磁性半導体と非磁性半導体を組み合わせた様々な半導体ヘテロ構造が作製可能である。物質の基礎特性を理解するためにバンド構造を知ることは重要である。(Ga,Mn)As では自発磁化によるスピン分裂、下地のバッファ層による歪みが価電子帯構造に影響を与える。そこで $k \cdot p$ 摂動法より導かれる Luttinger-Kohn 行列にスピン分裂と歪みの寄与を付加した計算を行

い、さらに分子場近似を考慮して T_c を求め実験結果と比較検討する。図 1 に(Ga,Mn)As の価電子帯構造を示す。Luttinger parameter, Δ_{SO} は GaAs と同じと仮定し、磁化軸を [001]方向、 $|N_0\beta| = 1.0$ eV, $x_{Mn} = 0.05$, $\langle S \rangle = 5/2$ とした。SO の影響があるために放物線状ではないことと波数方向により異方性があることが分かる。自発磁化の影響で Γ 点($k = 0$)で分裂しており $k \neq 0$ では 6つのバンドが混成し複雑な構造を示している。バンド構造からスピン状態密度 $\rho(E_F)$ を求め、分子場近似を考慮することで T_c を計算した。 $x_{Mn} = 0.053$ の試料では $|N_0\beta| = 1.2$ eV, $A_F = 1.2$ とした際に実験から得られた $T_c = 110$ K を再現することができ、また歪みによる磁気異方性も説明することができた。

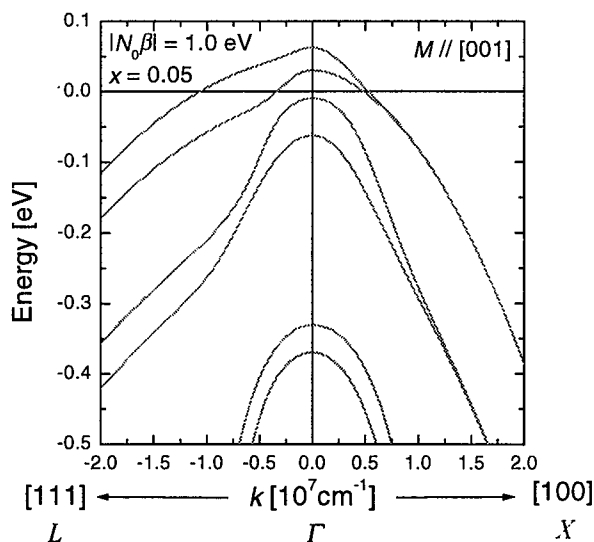


図 1 (Ga,Mn)As 価電子帯構造

3. (Ga,Mn)As 共鳴トンネル構造

本章では強磁性半導体(Ga,Mn)Asが半導体ヘテロ構造を容易に作製できることを利用して、(Ga,Mn)As エミッタを持つ共鳴トンネル構造(RTD)を作製し(Ga,Mn)As バンド構造の知見を得ることを目的として研究を行う。具体的には RTD をエネルギー・フィルタとして用い、電流-電圧(I - V)特性における共鳴ピーク分裂を観測する。実現できればスピン偏極したキャリアを選択して半導体中に注入できる可能性が示される。また(Ga,Mn)As のバンド構造を考慮に入れた I - V 特性を計算し実験結果との比較検討を行う。

試料構造は 5nm-AlAs/5nm-GaAs/5nm-AlAs 二重障壁構造で、片側のエミッタを $x_{\text{Mn}}=3.5\%$ の(Ga,Mn)As、もう一方を参照のため非磁性 p-GaAs とした。RTD の dI/dV - V 特性の温度依存性を示す(図2)。p-GaAs 側(負バイアス)及び(Ga,Mn)As 側(正バイアス)からホールを注入した場合に、量子井戸内に形成される6つのエネルギー準位(HH1, LH1, HH2, HH3, LH2, HH4)に対応した6つの共鳴ピークが観測された。ここで(Ga,Mn)As 側の HH2 ピークに注目すると高温では1つであったピークが60~80K 付近から2つに分かれていく様子が観測された。温度が下がると飽和する傾向で強磁性体の飽和磁化の温度依存性と似た傾向を示した。ピークが分裂し始めるのは60~80K で Mn 組成 3.5% の(Ga,Mn)As の $T_c \sim 70\text{K}$ と一致する。この結果は(Ga,Mn)As の価電子帯スピン分裂を観測したことを強く示唆しており、輸送測定により強磁性体のバンドスピン分裂を観測したのは本実験が初めてである。しかし明確に分裂が観測されたのは HH2 という特定のピークのみで、井戸層及びスペーサ層を変えた試料でも同様であった。要因として自発磁化により縮退が解けた複雑な(Ga,Mn)As バンド構造の影響が考えられる。そこで k - p 摂動法を用いて(Ga,Mn)As-RTD の I - V 特性を計算し実験結果との比較検討を行う。(Ga,Mn)As のバンドごとに存在する $\text{HH}\uparrow$, $\text{HH}\downarrow$, $\text{LH}\uparrow$, $\text{LH}\downarrow$ 成分の混成度、透過率、群速度を計算し、それらを掛け合わせて積分することで共鳴トンネル電流が得られる。図3は磁化が面内方向[100]にある場合の dI/dV - V 特性の $|N_0\beta|$ 依存性である。 $|N_0\beta|$ を大きくするに従い HH2 ピークが明確に分裂していく様子が見られた。その他のピークでは分裂が見られていないことから実験結果を再現する結果が得られた。

4. (Ga,Mn)As 三層構造

(Ga,Mn)As の応用の可能性を探るために巨大磁気抵抗効果(GMR)デバイスに注目した。金属の強磁性/非磁性多層構造では層間交換結合の振動現象やスピン依存散乱に基づく GMR が観測され、それを応用した磁気ヘッドが製品化に至り注目を浴びている。交換結合の起源はキャリアを媒介とした相互作用である RKKY 相

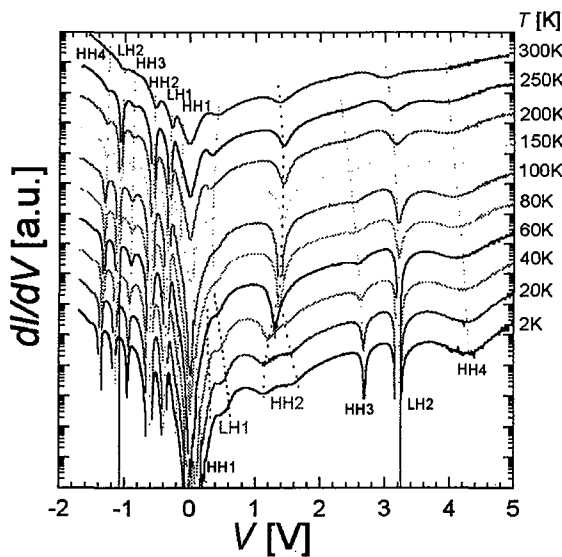


図2 (Ga,Mn)As-RTD の dI/dV - V 特性

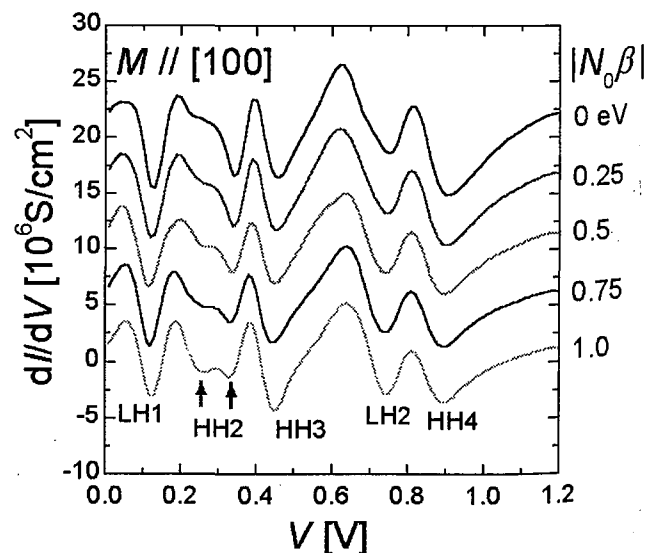


図3 (Ga,Mn)As-RTD の dI/dV - V 特性の計算結果

相互作用によると考えられている。そこで本章ではすべて半導体からなる強磁性(Ga,Mn)As/非磁性(Al,Ga)As/強磁性(Ga,Mn)As 三層構造を作製し、層間交換結合とスピン依存散乱に基づく磁気抵抗効果の観測を目的として研究を行う。この構造の利点は他の半導体デバイスとの融合できる可能性があることと、キャリア濃度を制御して層間結合を制御できる可能性があることである。試料構造は保磁力の異なる二種類の(Ga,Mn)Asを用いて磁化の反平行を実現できるようにした(Ga,Mn)As/(Al,Ga)As/(Ga,Mn)As 三層構造で、(Al,Ga)Asの組成や厚さを変化させたものを用意した。図4は $x_{Al}=0.16, 0.29$ の磁化特性である。 $x_{Al}=0.29$ の試料において0.01T付近に明確なステップが現れ、参照試料の単層構造 $x_{Mn}=2\%, x_{Mn}=4\%$ の磁化曲線の足し合わせと似た形を示した。一方 $x_{Al}=0.16$ の試料ではステップが見られず単層構造 $x_{Mn}=4\%$ と同様な特性を示した。この結果はキャリアを媒介とした強磁性交換結合が存在していることを示唆している。Al組成が大きいとポテンシャル障壁が高くなるためキャリア数が減少する。そのためキャリアを媒介とした交換結合が弱くなり二層が独立に振舞うような特性を示したと考えられる。次に磁気輸送測定で容易軸方向の磁化の振舞いと磁気抵抗を同時に観測するために、(In,Ga)Asバッファを用い(Ga,Mn)Asに引張歪みを加え磁化容易軸を面直方向に向けた試料を用意した。図5は $x_{Al}=0.14$ の試料の30Kでの磁気輸送特性である。 R_{Hall} にステップが現れている領域で R_{sheet} が高くなる現象が観測された。二つの(Ga,Mn)As層の磁化が反平行状態にあるステップ領域でMRが大きくなっている。これはスピン依存散乱に起因するMR効果であり、すべて半導体からなる系で初めて観測されたものである。また大きなAl組成依存性があり x_{Al} を大きくするに従いMR比が小さくなる傾向となった。障壁が高くなると障壁を越えて伝導するキャリアが少なくなり、スピン依存散乱に寄与する電流が小さくなるためと考えられる。

5. 結論

強磁性半導体(Ga,Mn)Asヘテロ構造を作製し基礎特性を明らかにすることと応用の可能性を探ることを目的として研究を行った。第二章では低温成長MBEにより強磁性半導体(Ga,Mn)Asを成長し低温で強磁性体となることを示した。(Ga,Mn)Asバンド構造の計算により T_c 及び磁気異方性を再現した。第三章では共鳴トンネル構造を用いて(Ga,Mn)As価電子帯スピン分裂を観測することに成功した。電流-電圧特性を計算してバンド分裂が観測できることを示した。第四章では(Ga,Mn)As/(Al,Ga)As/(Ga,Mn)As三層構造を作製し交換結合と磁気抵抗効果を観測することに成功し、非磁性層の障壁高さにより制御できることを示した。

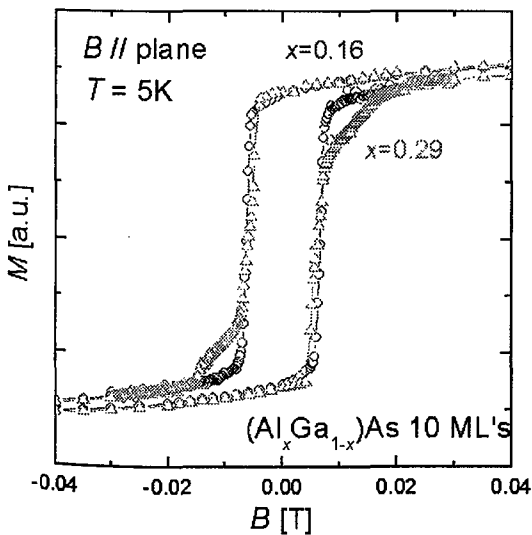


図4 三層構造の磁化特性

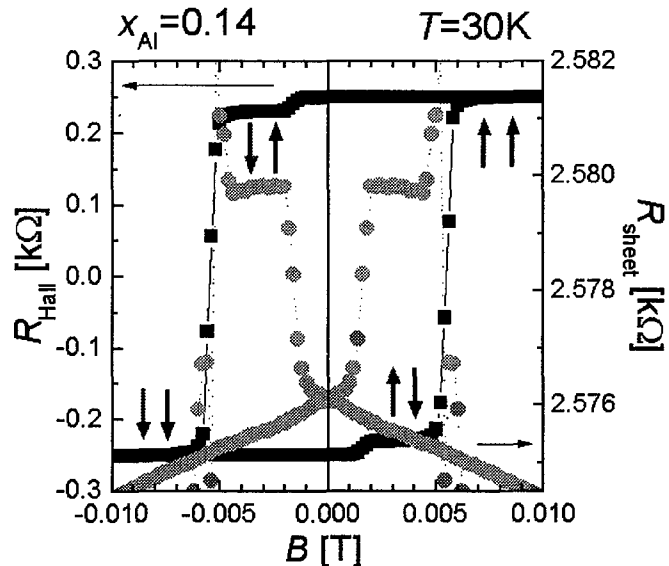


図5 スピン依存散乱による磁気抵抗効果

審査結果の要旨

電子の電荷のみならずスピンを用いて新しい機能を半導体で実現することが近年注目されてきている。強磁性半導体(Ga,Mn)As は、半導体レーザや高周波トランジスタに用いられている AlAs/GaAs 系ヘテロ構造に格子整合しかつ低温で強磁性を示すことから、非磁性半導体ヘテロ構造に新しくスピン自由度を取り入れることができる。著者は、(Ga,Mn)As の強磁性の起源について理論的考察を加えた後、強磁性半導体を用いた共鳴トンネル構造および強磁性/非磁性/強磁性三層構造を初めて作製し、その電気・磁気的特性を明らかにした。本論文はこれらの研究成果についてまとめたもので、全編 5 章よりなる。

第 1 章は、序論である。

第 2 章では、(Ga,Mn)As 薄膜の結晶成長とその磁性、価電子帯のバンド構造の計算とそれに基づくキャリア誘起強磁性の理論について述べている。まず、(Ga,Mn)As 薄膜結晶を分子線エピタキシ法により作成し、その強磁性転移温度が Mn 濃度の増加と共に増加した後減少に転じることを明らかにしている。その後、価電子帯のバンド構造を $k\cdot p$ 摂動法により計算し、それに基づいて強磁性転移温度を理論的に導出した。この理論は転移温度を良く再現すると同時に、室温を超える強磁性転移温度を実現するための指針を与える有用なものである。

第 3 章では、(Ga,Mn)As をエミッタとした共鳴トンネル構造の作製・測定と解析について述べている。初めに、共鳴トンネル構造の作製について述べた後、電流電圧特性における共鳴ピークが(Ga,Mn)As の強磁性転移温度以下で自発的に分裂することを明らかにした。さらに $k\cdot p$ 摂動法を用いて共鳴トンネル構造の電流電圧特性を計算し、共鳴ピークの自発分裂が(Ga,Mn)As の価電子帯の分裂に由来することを明らかにした。併せて、いくつかの共鳴ピークで分裂が見られない理由が共鳴準位の分散が平坦であることに起因することも明らかにした。これは共鳴トンネル構造を用いてエネルギーの揃ったスピン偏極電子流を非磁性半導体中に注入できる可能性を示したものであり、高く評価できる重要な知見である。

第 4 章では、(Ga,Mn)As/(Al,Ga)As/(Ga,Mn)As 三層構造の特性について述べている。始めに、非磁性半導体を介して(Ga,Mn)As 間に強磁性的交換結合が生じることを実験的に明らかにすると共に、理論的考察によりその結合エネルギーが妥当であることを明らかにしている。次に三層構造の電気伝導を調べ、金属系における巨大磁気抵抗効果の基礎過程である強磁性層の磁化が反平行になると抵抗が増大するスピン依存散乱を見出している。これらの現象はいずれも半導体系では初めて観測されたものであり、重要な成果である。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は、強磁性半導体(Ga,Mn)As 薄膜とそのヘテロ構造を用いて、初めて強磁性半導体を用いた共鳴トンネル構造および三層構造を実現し、これらの特性を明らかにしたものであり、半導体電子工学及び磁気物性工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。