

博士論文（要約）

Band structure, spin dependent transport, and device applications
of III-V ferromagnetic semiconductor GaMnAs

(III-V 族強磁性半導体 GaMnAs のバンド構造、
スピン依存伝導、およびデバイス応用)

平成 28 年 12 月 1 日提出

指導教員 田中 雅明 教授

東京大学大学院工学系研究科

電気系工学専攻

37-147060 寺田 博

半導体エレクトロニクスに磁性や電子のスピン自由度を取り入れることで、全く新しい機能を有したデバイスの実現を目指した、半導体スピントロニクスが注目を集めている。強磁性半導体は、半導体に磁性不純物を添加することで強磁性にしたものであり、半導体スピントロニクスを実現するための材料として期待されている。特に、GaAs に Mn を数% 添加した GaMnAs は、半導体的な性質と強磁性を併せ持ち、また、その相互作用が観測されている材料であり、磁性半導体材料のプロトタイプとして盛んに研究がなされてきた。

本研究では、GaMnAs の最近の電子構造の理解を踏まえ、GaMnAs のスピン依存のバンド構造に由来する磁気光学特性やスピン依存伝導特性の測定、及び解釈を行い、GaMnAs の物性を明らかにした。さらに、GaMnAs を強磁性層に用いた縦型スピントランジスタを作製し、その動作実証を行うとともに、電界による磁性の制御を観測することに成功した。

Chapter 1 では、スピントロニクスと強磁性半導体 GaMnAs に関する研究の背景と研究目的を述べている。その中で、III-V 族強磁性半導体 GaMnAs のバンド構造に関する研究の経緯とこれまでの議論について述べ、本論文の研究対象としての位置づけと研究目的を示している。

Chapter 2 では、GaMnAs の磁気円二色性(magnetic circular dichroism, MCD)スペクトル測定、及び、解析を行った。MCD スペクトルを測定することで、GaMnAs のスピン依存の電子状態を観測することが出来ると期待されてきたが、一方で、MCD スペクトルの解釈は測定グループや測定手法毎に互いに異なるという問題があった。本研究では、様々な試料構造において反射 MCD スペクトル測定を行い、MCD スペクトル形状が試料構造に強く依存することを示した(Fig. 1(a)-(c))。さらに、光学的な干渉の効果を考慮することで、材料に固有な性質で、MCD を表すことができる誘電率テンソルの非対角成分の値の導出に成功した(Fig. 1(g)-(i))。導出した誘電率テンソルから計算される MCD スペクトルの形状は、実験結果をよく再現できている(Fig. 1(d)-(f))。さらに、MCD スペクトル測定の結果を解釈するために、光学的な干渉の効果を除いた「真の」反射 MCD スペクトルを導出した。真の反射 MCD スペクトルにおいて、GaMnAs の吸収端の値が GaAs と同じことが示され、GaMnAs のフェルミ準位が禁制帯中に存在し、MCD スペクトル測定の結果は、最近の GaMnAs の電子構造の理解と矛盾しないことが示された。さらに、真の透過 MCD スペクトルにおいて、2 eV 付近にピークが存在することを示した。これは、従来観測されていた 2 eV におけるピークが GaMnAs の MCD に本質的な性質であることを示しており、先行研究で提案されているように、不純物帯と軽い正孔のバンドとの混成が起源であると考えられる。

Chapter 3 では、GaMnAs を強磁性電極に有するトンネル接合において、スピン依存伝導特性の測定、及び、解析を行った。GaMnAs を 1 層、または、2 層有するトンネル接合を作製し、磁気抵抗効果のバイアス電圧依存性、及び磁場印加方向依存性の詳細な観測を行った。GaMnAs 層を 1 層有するトンネル接合において、トンネル異方性磁気抵抗(TAMR)効果に由来する磁気抵抗特性を観測した。さらに、TAMR の異方性がバイアス電圧によって顕著に変化することを観測した。Fig. 2(a)に本研究で作製した、GaMnAs 層を 2 層有する磁気トンネル接合素子の模式図を示す。作製した試料において、試料面内方向に磁場を印加し、磁気抵抗の磁場方向依存性を様々なバイアス電圧 V において行った。Fig. 2(b)-(d)に $V = -100$ mV, $V = -5$ mV, 及び $V = 140$ mV における磁気抵抗の磁場方向依存性のカラープロットを示す。Fig. 2(c)に示すように、 $V = -5$ mV では、トンネル磁気抵抗効果により、2 層の GaMnAs 層の磁気異方性に対応する $[-110]$ 方向への 2 回対称の異方性を持った磁気抵抗が観測されている。一方で、バイアス電圧の大きさを大きくすることで、高磁場において、トンネル磁気抵抗効果に加え、TAMR に由来する明瞭な $\langle 100 \rangle$ 方向への 4 回対称の異方性を持つ磁気抵抗が観測された。これらの結果は、GaMnAs の不純物帯、及び、価電子帯の状態密度の磁場依存性、また、磁場印加方向依存性を考慮することでよく説明できる。GaMnAs を 2 層有するトンネル接合で観測された TAMR 特性は GaMnAs を 1 層有するトンネル接合で観測された TAMR 特性と異なっており、これは、GaMnAs と GaAs の価電子帯構造の違いに由来すると考えられる。

Chapter 4 では、GaMnAs を強磁性層に用いたスピン MOSFET を作製し、動作実証を行うとともに、電界効果による非常に大きな磁性の変調を観測した。スピン MOSFET は、従来の MOSFET 構造とよく似た構造を持ち、ソース、ドレイン電極に強磁性電極を有したデバイスである。Fig. 3 に本研究で作製した、縦型スピン MOSFET の模式図を示す。本デバイスは、GaMnAs を有するダイオード、ゲート電極、及びイオン液体によって構成されており、イオン液体を通してダイオード側壁にゲート電界を印加する。Fig. 4 に様々なゲート電圧を印加した時のドレイン電流特性を示す。ゲート電圧の印加によって、最大約 20% のドレイン電流の変調が観測された。また、磁気抵抗による最大約 5% のドレイン電流の制御が観測され、スピン MOSFET としての動作が実現された。さらに、GaMnAs 電極の側面のみならずゲート電界を印加することで、GaMnAs 電極全体の磁気異方性を変調することに成功した。Fig. 5(a)-(e) に様々なゲート電圧を印加した時の磁気抵抗の磁場方向依存性を示す。ゲート電圧の印加による、磁気抵抗の変化を理解するために、各磁性層の磁気異方性を仮定して、磁気抵抗の振る舞いを再現した。その結果、2 層の GaMnAs 層について、磁性層全体の磁気異方性が変化することを仮定することで、各実験結果を再現することが出来た(Fig. 5(f)-(j))。この時、GaMnAs 電極の磁化容易軸が最大で 16 度回転していることを仮定することで実験結果が良く説明できた。これらの結果は、ゲート電界の影響が及ぶ領域をはるかに超えた領域で磁性の変調が起こる異常な振る舞いが起こっていることを示している。

Chapter 5 では、本論文で得られた結果のまとめと今後の展望を述べている。

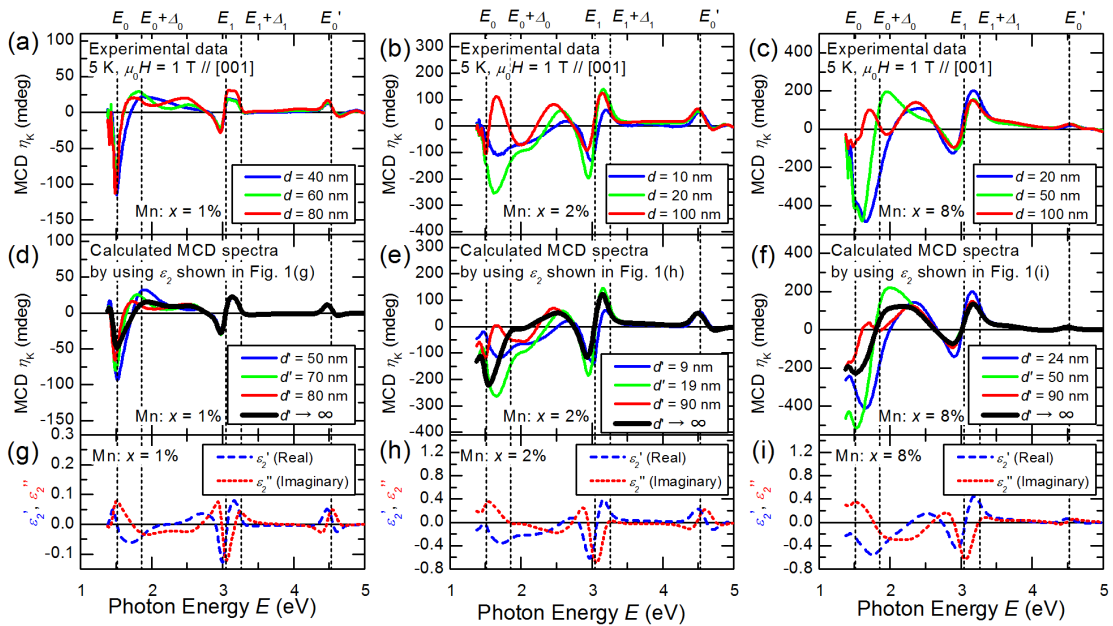


Fig. 1 (a)-(c) GaMnAs 薄膜の反射 MCD スペクトル。(d)-(f) GaMnAs 薄膜の反射 MCD スペクトルの計算結果。(g)-(i) GaMnAs の誘電率テンソルの非対角成分。(a, d, g: Mn 1%. b, e, h: Mn 2%. c, f, i: Mn 8%)。

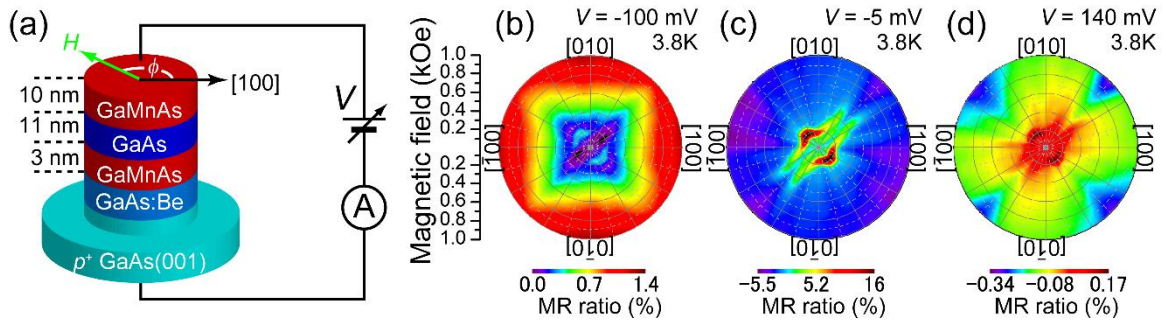


Fig. 2(a) GaMnAs を強磁性層に用いた磁気トンネル接合素子の模式図。(b) (c) (d) 様々な方向に磁場を印加した時の、磁気抵抗の等高線カラープロット。 $V = -100$ mV (b), -5 mV (c), 140 mV (d)。

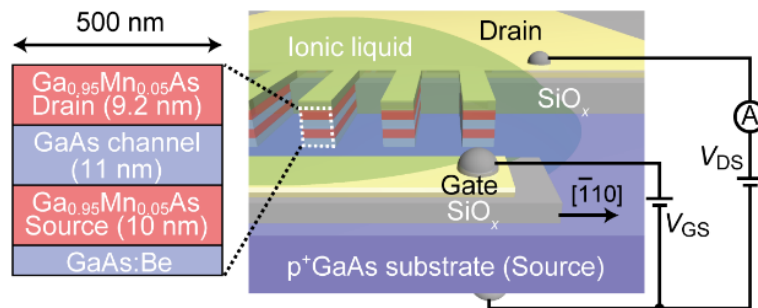


Fig. 3 本研究で作製した縦型スピン MOSFET の模式図。

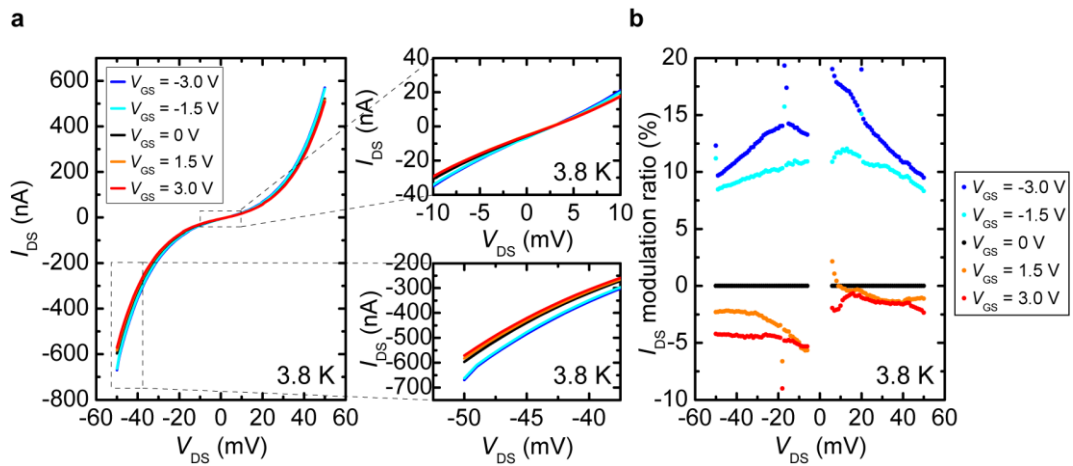


Fig. 4 様々なゲート電圧を印加した時のドレイン電圧-ドレイン電流特性。

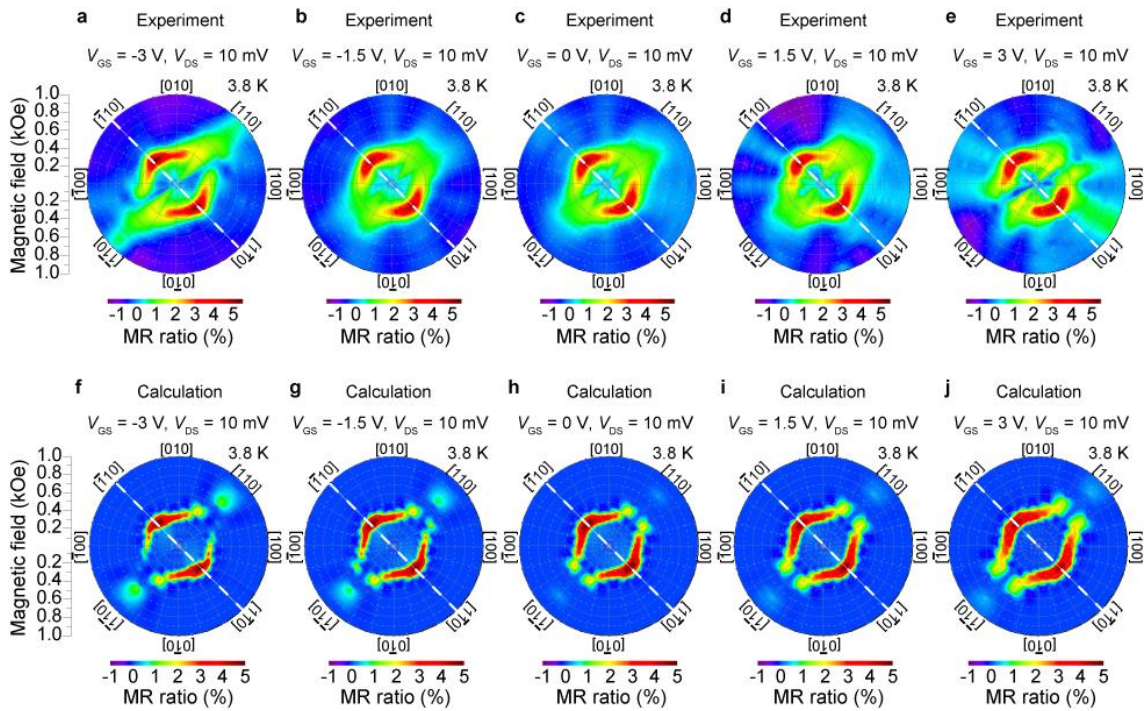


Fig. 5(a)-(e) 様々なゲート電圧を印加した時の磁気抵抗の異方性の等高線カラープロット。(f)-(j) 2層のGaMnAs層の磁気異方性を仮定して導出した、各ゲート電圧における磁気抵抗の異方性の等高線カラープロット。