

研 究 報 告 書

「スピン偏極の外的制御とチューナブルスピン源の創製」

研究期間：平成19年10月～平成23年3月

研究者：谷山 智康

1. 研究のねらい

電子の電荷制御に基づく半導体エレクトロニクスがコンシューマ向け電子機器の創出に革命的進歩をもたらしたことは、物理学の基本法則とそれを活用した学術研究が人類の生活環境の改善に直接的な貢献をした良い例となっている。一方、電子は電荷に加えスピン自由度を持つことが広く知られており、電子スピンを制御することで、従来の電荷制御に基づく技術では実現しえない高機能、多機能エレクトロニクスへの更なる展開が期待されている。この電子のスピン制御に基づくエレクトロニクス（スピントロニクス）デバイスを創出するためには、電子のスピン自由度を一方向に揃えた電子群を半導体等の非磁性体に注入（スピン注入）し、そのスピンの配向方向を制御する技術の開発が必須となる。これは半導体エレクトロニクスにおける電荷制御に基づく電界効果トランジスタに類似したスピン制御デバイスの創出に繋がる基本要素技術であり、特にスピン注入技術はスピントロニクスの根幹をなす最も重要な技術と考えられる（図 1-1）。以上のような観点から、本研究では、電子のスピンの配向の程度を外的に制御して非磁性体に注入することができるスピン注入源の開発を目指し、その基本原理の検証と物理的メカニズムの解明を狙っている。

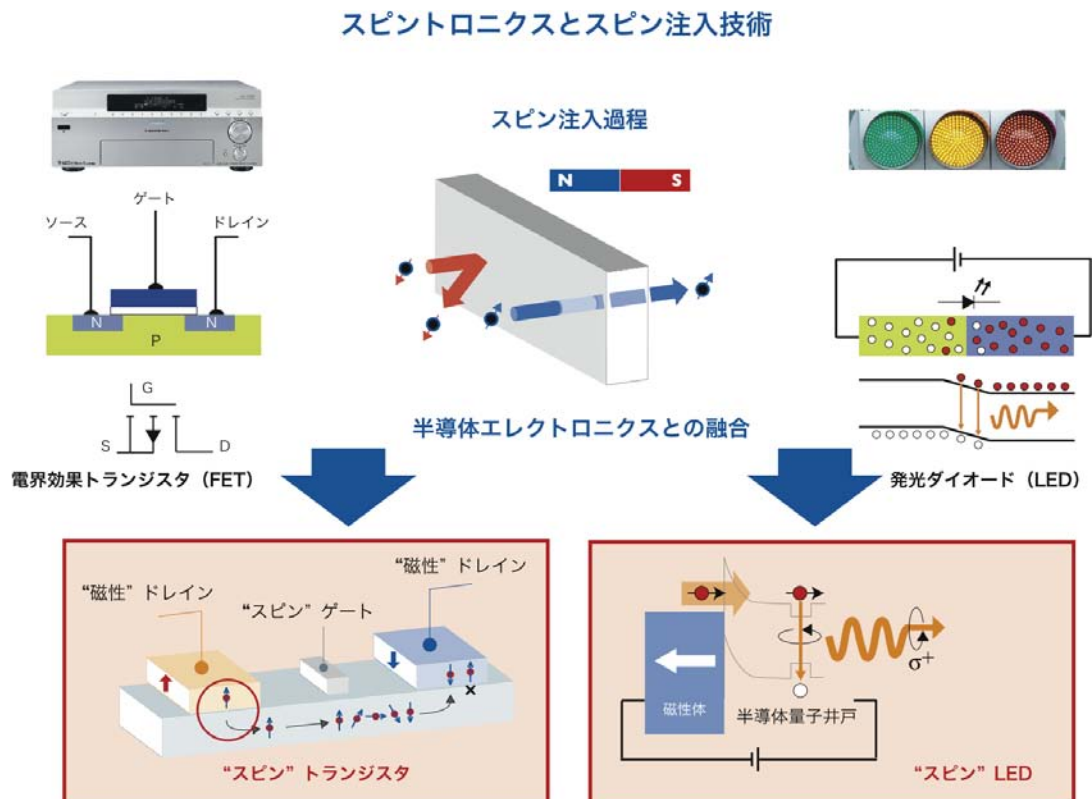


図 1-1 スピントロニクスにおけるスピン注入技術とその応用。半導体エレクトロニクス技術にナノ磁性（スピン）を融合化することで、従来の CMOS テクノロジーを凌駕する新しい機能性デバイスの構築が期待されている。

2. 研究成果

本研究では、電子のスピンの配向を外的に制御することが可能なスピン注入源の開発に向けて、その根幹をなす重要な物理的機構として以下の3機構について実験的に検討した。その具体的研究成果を以下に記す。

(1) 反強磁性-強磁性相転移型 FeRh 合金細線におけるスピン注入誘起磁気相転移

原子組成 1:1 を持つ FeRh 合金は、CsCl 構造を形成し室温で反強磁性基底状態を示す。また、400K 付近で約 0.3% の格子の増大と 40% 程度の電気抵抗の減少を伴い、強磁性状態に磁気相転移する(図 2-1、2-2)。このような磁気的性質はごく限られた物質群においてのみ見られる特異な物性として非常に興味深い。本研究では、この磁気相転移を利用することで、スピン配向の程度が異なる電子群を創出するためのスピン源を提案している。一般に、反強磁性状態では、隣り合う原子の磁気モーメントは反対向きに配列しており、その結果、物質中を流れる伝導電子の持つスピンの配向はランダムとなる。一方、強磁性状態では、全ての原子磁気モーメントは同一方向に配向するため、物質中を流れる伝導電子のスピンの配向はある程度揃えられている。このことは、強磁性状態、反強磁性状態等の物質の磁気秩序を制御することができれば、スピン配向の程度が異なる電子を持つスピン源の創出が可能であることを意味する。本研究では、図 2-1(c)に示すようにスピン配向した電子群を反強磁性-強磁性磁気相転移を示す上記 FeRh 合金に注入することで磁気相転移を誘起できるかどうかについて実験的に検証した。これが可能となれば、外的にスピン配向を制御することが可能なスピン注入源を創出するための基礎的知見が得られる本技術基盤の確立に繋がると考えられる。以下に本研究での具体的な研究成果の詳細を記す。

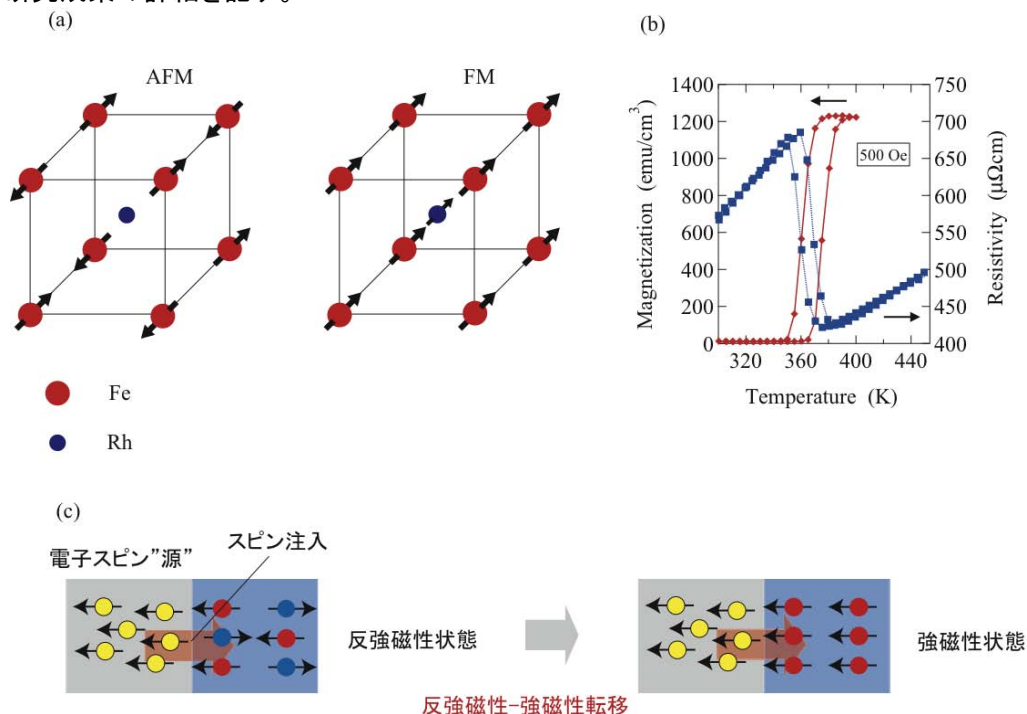


図 2-1 (a) FeRh 規則合金の CsCl 型結晶構造と磁気構造。左図、右図がそれぞれ反強磁性状態 (AFM)、強磁性状態 (FM) を示す。(b) FeRh 合金の電気抵抗および磁化の温度依存性。約 370K 付近に急激な磁化の上昇を伴う反強磁性-強磁性相転移が観測される。それに伴い電気抵抗が 40% 程度減少する。(c) FeRh 合金におけるスピン注入誘起磁気相転移の概念図。スピン偏極電子を反強磁性状態に注入することで、強磁性状態への磁気相転移を誘起させることができる様子を表している。

FeRh薄膜をマグネトロンスパッタリング法によりエピタキシャル成長し、電子線リソグラフィおよびアルゴンイオンエッチングを用いて $60\text{ }\mu\text{m}$ 程度の線幅を持つ細線形状に微細加工した。FeRh細線にスピン配向した電子群を注入するために、さらに作製したFeRh細線に強磁性コバルト細線を接合し、最終的な測定用試料とした。図 2-2(a)に示すように、測定用試料には線幅 $1\text{ }\mu\text{m}$ の多数のコバルト細線が $1\text{ }\mu\text{m}$ 間隔で配置されている。コバルトとFeRhとでは電気抵抗率が 2 桁程度異なるために、FeRh細線に沿って電流を流すと、コバルトを接合した部分では図 2-2(b)に示すように多くの電子はコバルト細線を流れる。その結果、本測定用試料では、それぞれのコバルト細線の両端部直下において、強磁性コバルトからFeRhへスピン配向した電子が注入される。また、本研究では、FeRhの電気抵抗が磁気相転移に伴い大きく変化することから(図 2-2(b))、FeRh細線の電気抵抗変化を計測することで磁気相転移を観測する手法を採用した。図 2-2(c)に上記測定試料の電流-電圧特性を示す。強磁性コバルト細線からFeRh細線にスピン配向した電子を注入すると、電流密度約 $1.5 \times 10^7\text{ A/cm}^2$ 付近で反強磁性-強磁性磁気相転移を示す明瞭な屈曲(電気抵抗の減少)が観測される(図 2-2(c))。この電気抵抗の減少はFeRh細線に電子群を注入することにより発現したFeRh細線におけるスピン注入誘起反強磁性-強磁性相転移に起因する推察される。一方で、物質に電流を流すと物質にはジュール熱が生じ、物質の温度が上昇する。そのため、上記の反強磁性-強磁性相転移はスピン配向した電子を注入した結果であるか、もしくはジュール熱に伴う温度上昇による結果であるかを判断することができない。そこで、強磁性コバルト細線の代わりに非磁性の銅細線を用いて同様にFeRh細線に電流を注入する参照実験を行った。銅は非磁性体であるため、注入される電子群はスピン無配向の状態であるため、相転移が生じる電流密度を両方で比較することで、スピン配向した電子による効果を判別することができる。実際、図 2-2(d)に示す測定結果に見られるように、銅細線を用いた場合に磁気相転移を誘起するためには、コバルト細線を用いた場合と比較して 13%程度大きな電流密度が必要であることが明らかとなり、スピン配向した電子が反強磁性-強磁性磁気相転移を誘起する上で重要な役割を果たしていることが実証された。

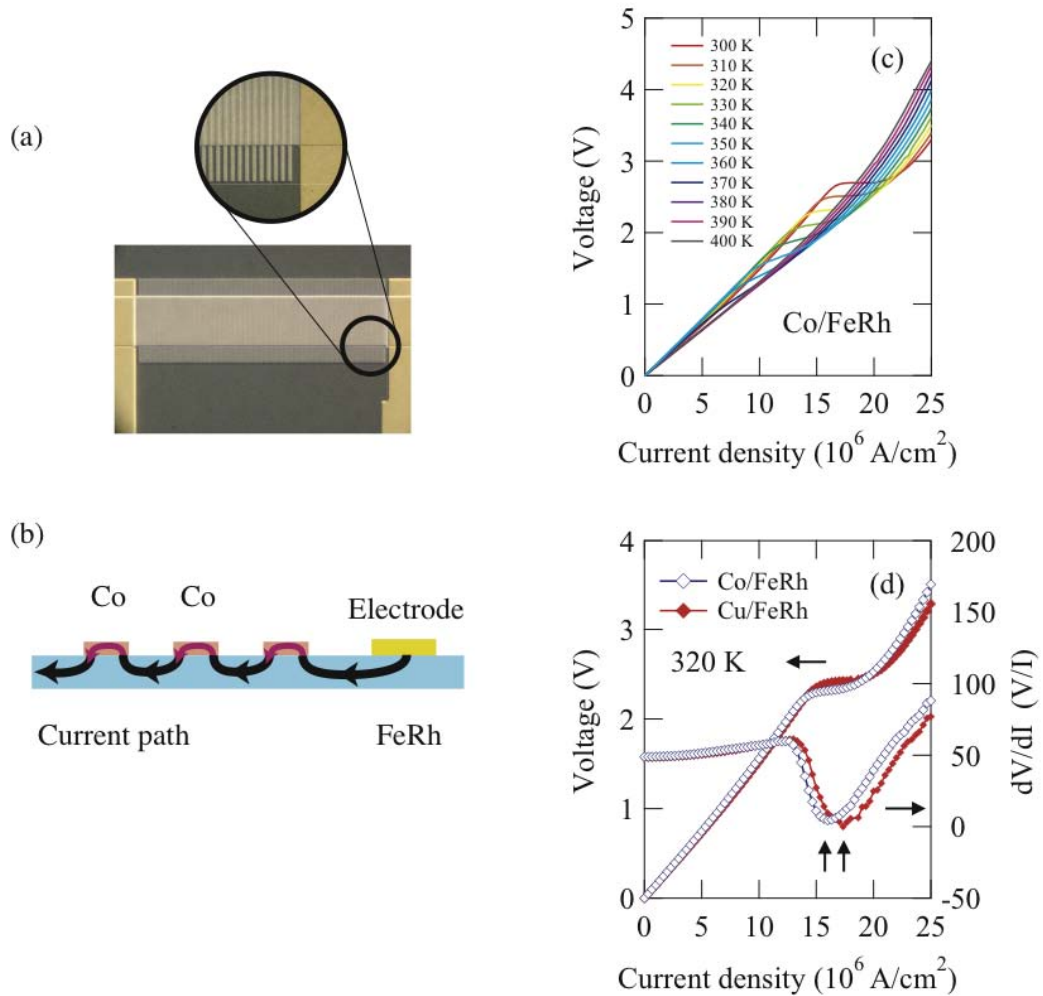


図 2-2 (a) コバルト細線/FeRh細線接合試料の光学顕微鏡写真。(b)接合試料を流れる電流パスの模式図。(c) 接合部付近におけるFeRhの電流-電圧特性。電流密度約 $1.5 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 付近で磁気相転移に伴う屈曲が観測される。(d)320Kにおける接合部付近でのFeRhの微分抵抗。強磁性コバルトを接合した場合と非磁性銅を接合した場合とでは、磁気相転移が誘起される電流密度に 13%程度の相違が現れる。

次に図 2-3(a)に示すように単一のコバルト細線からFeRh細線へスピン偏極電子を注入し、それに伴う磁気相転移の挙動を電氣的に検出した。本試料は、非磁性の電極からの電流注入効果を同時に計測できるよう、FeRh細線にコバルト細線に加え銅細線を接合した構造となっている。図 2-3(b)–(d)にコバルト細線/FeRh細線注入端および銅細線/FeRh注入端でのFeRhの電気抵抗率の温度依存性を種々の電流密度に対して測定した結果を示す。電流密度が $8 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ の時にはコバルト細線/FeRh注入端および銅細線/FeRh注入端におけるFeRhの電気抵抗率の温度依存性に変化が認められない。一方、電流値を増加させると両者に顕著な相違が現れることがわかる。注目すべきは、銅細線/FeRh注入端では電流密度を変化させても基本的な振る舞いに変化が見られないのに対して、コバルト細線/FeRh注入端ではFeRhが反強磁性を示す370K以下において電流密度の増加に伴い電気抵抗率が低下する点である。この結果は、コバルトからのスピン偏極電子の注入によって接合端付近から徐々にFeRhの反強磁性状態が強磁性状態に変化していることを示唆している。また、銅細線/FeRh注入端で電流密度に依存した効果が全く見られないことから、スピン偏極電子の注入がFeRhの磁気状態に変調を与えたと考えるのが妥当である。さらに、低電流密

度ときには、電気抵抗率に温度ヒステリシスが見られるのに対して、電流密度の増加に伴って温度ヒステリシスが消失する傾向が観測される。この結果は磁気相転移挙動が電流密度に依存することを示唆するが、その詳細については現在のところ検討中である。

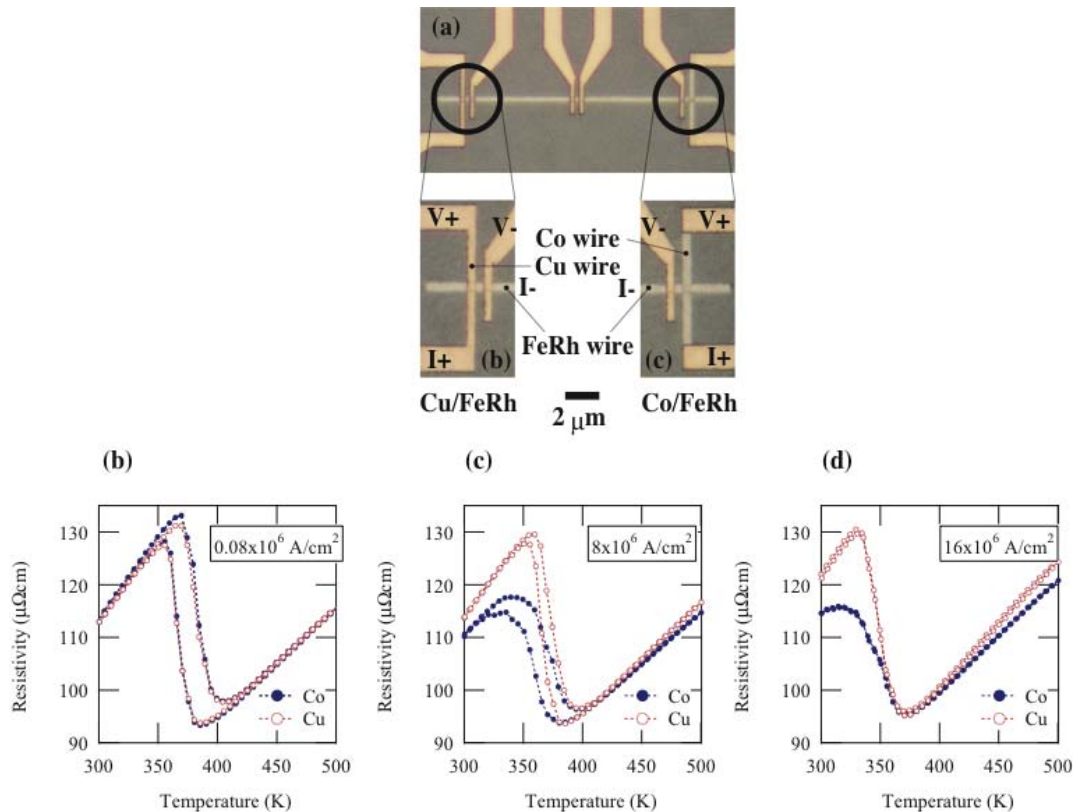


図 2-3 (a) 単一コバルト(銅)細線/FeRh 細線接合試料の光学顕微鏡写真。(b)–(d) 異なる電流値に対して測定した接合部付近における FeRh の電気抵抗率の温度依存性。

以上の結果より、本研究ではスピン配向した電子を FeRh 合金細線に注入することで反強磁性–強磁性磁気相転移を誘起することができることを世界で初めて実証することに成功した。本成果は、スピン配向した電子群を注入することで誘起される磁気相転移を利用することで、外的に制御可能なスピン源を創出するための基盤技術の構築のための基礎的知見を提供するものである。

(2) 磁性絶縁体／半導体量子井戸ヘテロ構造におけるスピン注入機構の制御

強磁性金属のスピン配向した電子群を半導体に高効率に注入するためには、強磁性金属／半導体界面におけるスピン伝導機構の解明と、注入された電子のスピン配向の明確な評価手法の開発が必須である。そしてこれら要素技術を構築することによって、例えば図 2-4(a)に示すようなスピン配向した電子の注入による円偏光発光 LED 構造(スピン LED)が実現される。上記の課題の克服に向けた従来の研究として、後者に関しては、既に図 2-4(a)に示すようなデバイス構造において、半導体量子井戸における電子–正孔再結合により生じる発光の円偏光度が量子井戸に注入された電子のスピン配向の程度と直接的な対応関係を持つという理論的裏付けに基づいて定量化する手法が確立している(図 2-4(c))。一方、前者に関しては多くの点で不明な点が多い。特に界面付近における電子状態の変化がスピン配向した電子の伝導過程に大きな影響を与えると考えら

れている。本研究では、フェリ磁性体マグネタイトの電荷秩序化に伴う電子状態の変化を利用することで、半導体量子井戸に注入される電子のスピンの配向の程度を制御するための手法を提案し、実証した。以下に具体的な研究成果の詳細を記す。

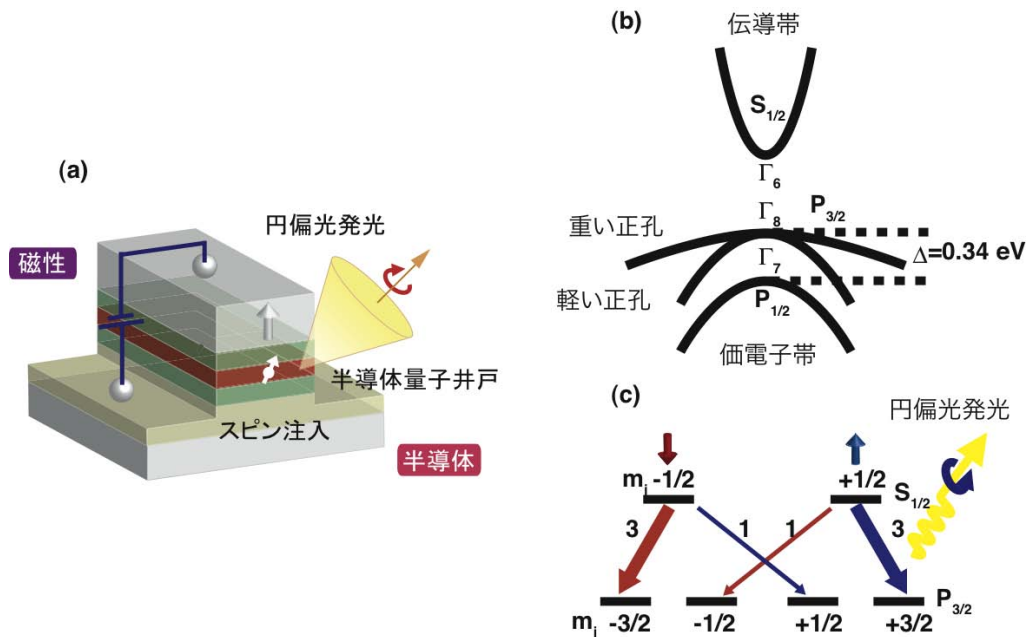


図 2-4 (a)強磁性体から半導体へのスピン注入と円偏光発光素子(スピンLED)の概念図。(b)GaAs のバンド構造の模式図。(c)スピンの依存した電子-正孔再結合過程。100%スピン偏極した電子が GaAs に注入されると、50%の円偏光度を持つ円偏光発光が生じる過程を表している。このことから発光の円偏光度を解析することで GaAs に注入された電子のスピンの配向の程度を見積もることが可能となる。

マグネタイト(Fe_3O_4)は、室温でフェリ磁性磁気秩序を持ち電気的には金属的性質を示すが、温度の低下に伴って約 120Kにおいて Fe^{2+} イオンと Fe^{3+} イオンが秩序的に配列する絶縁体相に相転移する。これはVerwey転移として広く知られている現象である。これを半導体量子井戸表面に接合し、ナノメートルスケールのマグネタイトを介して電子群を半導体量子井戸に注入すると、室温では、マグネタイトが金属的フェリ磁性体であることからマグネタイト中のスピン配向した電子が半導体へと注入される(図 2-5(a)左図)。一方、温度がVerwey転移温度よりも低温になると絶縁的電気特性を示すフェリ磁性体へと変化するため、電子はマグネタイト層をトンネル伝導して半導体へと注入される(図 2-5(a)右図)。その際、トンネル障壁としてのマグネタイトはフェリ磁性体であるため、電子が持つスピンの方向によってトンネル障壁の高さが異なり、結果としてトンネル確率は電子のスピンの方向に依存することになる。このことは、マグネタイトトンネル障壁が一方のスピンの持つ電子を良く透過させ、他方のスピンの持つ電子を透過させない、いわゆるスピンのフィルターとしての役割を担うことになる。この相転移現象を利用すると半導体にスピン配向の程度の異なる電子群を注入することが可能となる。

これを実証するために本研究では、マグネタイト薄膜を反応性分子線エピタキシー法により GaAs/AlGaAs 量子井戸上に成長し、マグネタイト上に取付けた電極から GaAs 量子井戸に電子を注入し、その際に半導体量子井戸から生じる発光の円偏光度を詳細に解析することによって、注入された電子群のスピンの配向の程度(スピン偏極率)を定量化した。具体的には、図 2-5(b)に示すように電子注入により生じた GaAs 量子井戸からの発

光の右回り円偏光成分と左回り円偏光成分を分離計測することで発光の円偏光度を算出し、それに基づいて注入された電子群のスピンの偏極率を定量化した。その結果、発光は全ての温度範囲で部分円偏光化しており、スピン配向した電子群が半導体に注入されることが確認された。さらに興味深いことに、図 2-5(d)に示すように、室温で注入された電子群のスピンの偏極率は10%程度であるのに対して、温度を低下させるとVerwey 転移温度である120K 以下においてスピンの偏極率が急激に増大し、10K においては44%にまで到達することが明らかとなった。この大きな注入電子のスピンの偏極率は従来のスピン注入に関する報告と比較しても特に大きく、絶縁性磁性体を介したトンネル伝導が半導体への高効率なスピン注入に有効であることを初めて明確に示した成果と言える。

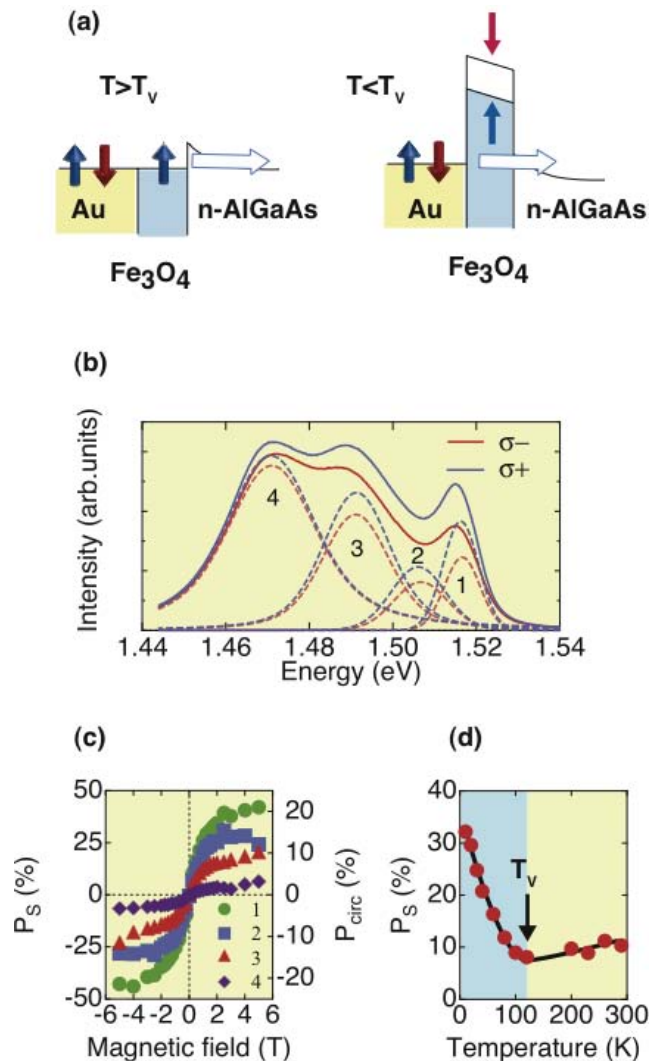


図 2-5 (a)マグネタイトから GaAs 量子井戸へのスピン注入過程。左図は Verwey 転移温度以上、右図は Verwey 転移温度以下でのスピン注入過程を模式的に表している。(b)10K における発光スペクトルの右回り円偏光成分(σ^-)と左回り円偏光成分(σ^+)。それぞれの発光スペクトルが 4 本のサブピークから構成されることがわかる。サブピーク 1 が GaAs 量子井戸からの発光であり、サブピーク 2-5 は GaAs バルク由来の発光である。(c)各サブピークに対する円偏光度とそれから算出された注入電子のスピンの偏極率の磁場依存性。5T において 44%のスピンの偏極率が得られている。(d) 注入電子のスピンの偏極率の温度依存性。Verwey 転移である120K 以下においてスピンの偏極率が急激に上昇することがわかる。

以上の結果より、マグネタイトの示す Verwey 転移を利用することで、半導体へ注入される電子群のスピンの配向を制御することが可能であることを世界で初めて実証することに成功した。本成果は、磁性体の電荷秩序化相転移を利用することで外的に制御可能なスピン源を創成するための基盤技術を提供するという観点から大きな意義を持つと考えられる。

(3) 磁性金属／半導体量子井戸ヘテロ構造におけるスピン伝導機構の解明と電圧制御

上記(2)では磁性体から半導体へスピン配向した電子群を注入する技術について検討した。本研究項目では、半導体中の電子が磁性体へと伝導する過程の電子のスピンの配向依存性について詳細に調査することで、磁性金属／半導体接合界面を介した電子透過率の制御手法について検討した。一般に半導体量子井戸に円偏光を照射すると量子力学的法則に基づいてスピン配向した電子群を半導体量子井戸に生成することができることが広く知られており、円偏光スピン励起手法と呼ばれている(図 2-6)。これは図 2-4(c)に示した円偏光発光過程の逆過程に対応する。本研究では、円偏光スピン励起手法を利用してスピン配向した電子(スピン偏極電子)を半導体量子井戸中に生成し、そのスピン偏極電子が磁性薄膜／半導体界面を透過する際の透過率のスピンの依存性を図 2-6 に示す光電流計測に基づいて評価した。その結果、接合界面に印加する電圧に依存して電子透過率のスピンの配向依存性が大きく変化し、特定の電圧印加時にはそのスピンの配向依存性の符号が反転することを見出すことに成功した。以下にその詳細を記す。

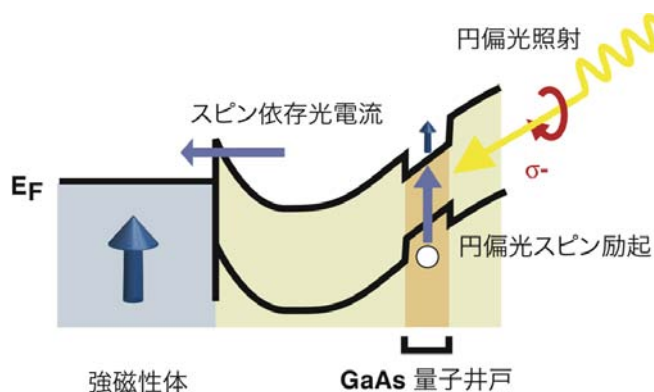


図 2-6 円偏光照射により GaAs 量子井戸にスピン偏極電子が励起され、励起されたスピン偏極電子のスピンの向きに依存した光電流が観測される過程。

分子線エピタキシー法により膜厚 5nm を有する Fe 薄膜を GaAs/AlGaAs 量子井戸構造上に成長し、これに光電流計測用の電極端子を取付け試料とした。この試料に対して、膜面に垂直に磁場を印加して Fe を磁化させた状態で、右回り円偏光、左回り円偏光を膜面に垂直に交互に照射する(実際には、光弾性変調器を用いて 50kHz の周波数で照射光の円偏光度を変調した)。右回り円偏光、左回り円偏光の照射によりそれぞれ反対向きにスピン偏極した電子群を生成することが可能であることから、それぞれの円偏光照射により生じる光電流の差が、界面を介した電子透過率のスピンの配向依存性の指標を与えることとなる。このようにして測定した光電流の差 (ΔI)、すなわち電子透過率のスピンの配向依存性を界面に印加したバイアス電圧の関数として評価すると、図 2-7(a)(b)に示すようにバイアス電圧により明瞭に透過率のスピンの配向依存性が変化することが明らかとなった。特にバイアス電圧が特定の値に一致した時には、そのスピン依存性が反転する現象(図 2-7(a)の ΔI に見られるくぼみ)が観測された。この現象は、図 2-7(d)に示す

ように界面に形成される局在化した電子準位 (IRS) と光照射により生成された電子のエネルギーとが一致する際に特異的に現れる局在準位を介した共鳴トンネル伝導過程として理解することができる。一方で理論的には、Fe/GaAs 接合界面にはスピン分極した局在化した準位が形成されることが予測されており、このようなスピン分極した界面状態を介した電子伝導によっても上記の結果が理解される。このように特定の電圧を接合界面に印加することで界面を介した電子透過率のスピン配向依存性が変化するという知見は、印加電圧を操作することで界面の電子スピン透過率を制御可能であることを示している。

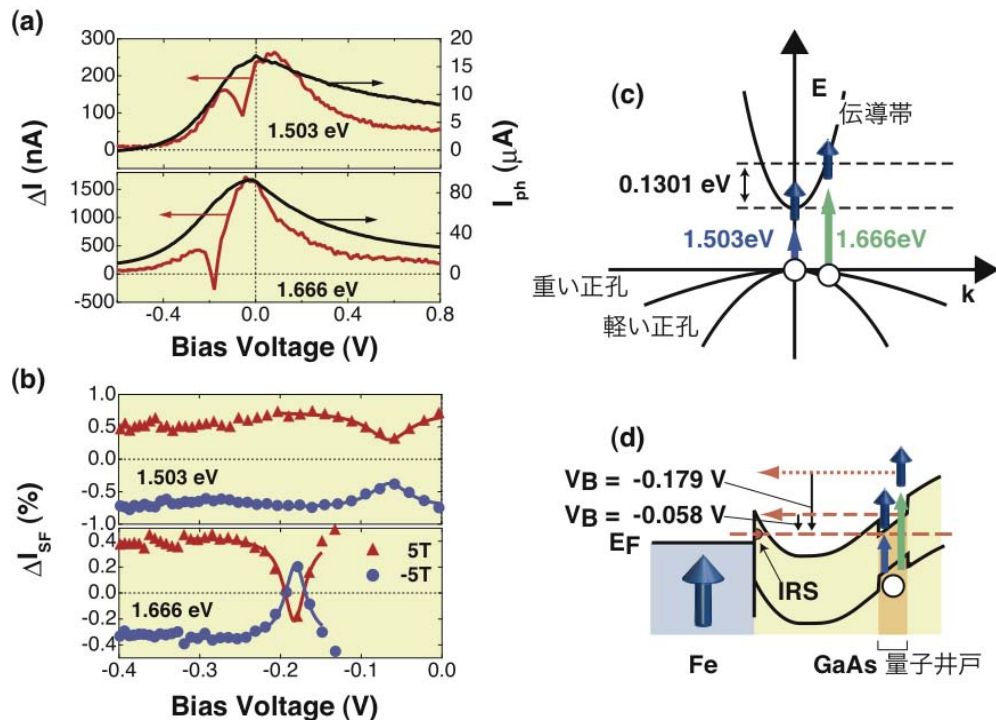


図 2-7 (a)スピン依存光電流成分(左軸)および全光電流(右軸)のバイアス電圧依存性。照射円偏光のエネルギーが異なる 2 つの場合に対して図示してある。(b)全光電流で規格化したスピン依存光電流のバイアス電圧依存性。磁場の反転に伴い符号が反転し、また、特定のバイアス電圧においては、急激なスピン依存性の減少および符号反転が観測される。(c)円偏光照射時におけるスピン偏極電子の励起過程の模式図。(d)界面に形成される局在準位 (IRS) を介したスピン依存伝導を示す模式図。バイアス電圧を印加することで励起電子のエネルギーと界面局在準位とが一致する際に共鳴トンネル伝導が生じる様子を表している。

以上の結果より、Fe/AlGaAs 界面に形成される局在準位を介した電子伝導が生じるときにおいてのみ電子透過率のスピン依存性が反転するという本研究において初めて見出された知見を利用することで、磁性体／半導体接合界面での電子伝導のスピン依存性を電圧により制御可能であることを実証することに世界で初めて成功した。本成果は、電圧制御可能なスピン源を創成するための基盤技術の構築に貢献できるものと期待できる。

以上のように、本研究では上記 3 研究項目について外的に制御可能なスピン源の創成に向けた新手法を提案し、基礎的知見の収集を通してスピン源への適用の可能性を検討した。いずれも世界に先駆けて見出された独自性の高い研究成果と言える。

3. 今後の展開

上記の研究において得られたスピン配向の程度を外的に制御するための技術基盤に関する知見は、現段階ではその原理が実証された段階であり、それを実際に利用可能なスピントロニクスデバイスに適用するためには、今後どのような物質が最適であり、それに向けてどのような新たな物質開発が必要となるのか等、検討すべき事項は多い。また、さらにはそれをエレクトロニクスデバイスとして組込むときに生じる様々な制約を克服することで初めて実際のデバイスとしての動作が可能となってくる。そのため、本研究は未だ原理実証段階の黎明期であると言わざるを得ず、我々を含め多くの研究者の更なる研究と努力により、本研究で得られた成果が人類の生活において活用されるような技術に育ち展開されることを切に願っている。

4. 自己評価

研究課題を採択頂いた当初は研究室を立ち上げたばかりで、研究施設も十分とは言える状況でなく、そのような状況においてさきがけ研究は開始された。本プロジェクト研究の目的のために当初選択した物質は、1年間取り組んではみたが、あまり筋が良くなく、研究総括、アドバイザーの先生のご助言で研究開始1年後に思い切って物質を変える決断をした。薄膜成長において全く異なる物質への変更は一からのスタートを意味し、残り2年間でどこまで目的を達成することができるか不安な気持ちもあったが、結果としてこれが功を奏し当初の予測をある程度実証することができた。また、当初計画としては単にスピン偏極率の評価に利用するだけの目的で想定していた半導体量子井戸へのスピン注入に関する実験は、予想以上に大きく進展し、新しいスピン偏極率の制御法の提案、実証にまで展開することができた。このような成果を挙げることができたことは、ひとえに研究総括、アドバイザーの先生が長期的視野で研究の進展を見守り、的確なご助言を下されたことによると大変感謝している。一方で、積み残した仕事も多く、実際スピン源の原理とその実証は実現できたが、スピン源を創成しその動作を確認するまでには至っていない。このような積み残した課題やさらに本プロジェクトでの成果から波及的に得られた研究課題について引き続き研究を推進してゆきたいと考えている。また、本研究に関連して国際的な共同研究の提案を頂いたことも本プロジェクトの成果として今後の研究活動における大きな励みとなっている。研究開始当初とは異なり研究設備もかなり充実したものとなったことを付記する。

5. 研究総括の見解

谷山研究者は、外部からスピン偏極度を制御できるスピン注入源を作製しようとする独創的かつ挑戦的な課題に取り組んできました。

スピントロニクスにおいては、強磁性の金属電極からスピン偏極した電子を半導体などの磁気をもたない材料に注入するのですが、スピン偏極度はいわば作り付けで外部から制御することができませんでした。谷山研究者は、次に述べる3つの方法で外部から制御することを提案し、いずれにおいても原理的にこれらを実証することができました。

(1) まず一つは、ある温度で反強磁性-強磁性の磁気相転移を示す物質を使って、相転移点付近の電流注入で磁気相転移を誘起しようという試みです。当初、彼は、以前から研究を進めていたマンガン・ガリウム・炭素の合金で研究を進めましたが、顕著な電流注入制御の効果が検証できませんでした。それで、開始1年後になって、領域会議におけるアドバイスを受け入れ、相転移温度が高い鉄ロジウム合金に変更することを決断し、この物質上にコバルトの細線を載せた微細構造において電流注入による反強磁性-強磁性相変化を実現することに成功しました。(2) つぎに、金電極/マグネタイト/半導体量子井戸というヘテロ構造において、温度によるマグネタイトの金属・絶縁体転移を使ってスピン注入を制御する試みを行いました。詳細は、省きますが、金属相では10%程度だったスピン偏極度が低温絶縁相(5K)では44%にも達することを見いだしました。(3) さらに、鉄/半導体量子井戸において、円偏光励起光電流の円偏光依存性が電圧で大きく変化することを通じて、磁性体/半導体接合界面での電子伝導のスピン依存性が電圧により制御可能であることを実証しました。

チューナブルスピン源という難しい課題に地道に取り組み、材料の選択やプロセスの工夫・改良によって、まだ原理的・基礎的ではあるものの、基礎研究として重要な成果であると考えます。この成果を、磁気抵抗素子などに応用することは、今後の課題であると思います。

6. 主要な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1.	T. Taniyama, E. Wada, Y. Shirahata, M. Itoh, M. Yamaguchi, "Spin injection into semiconductors towards spin-based electronic devices", npg asia materials, submitted (2011).
2.	T. Naito, I. Suzuki, M. Itoh, and T. Taniyama, "Effect of spin polarized current on magnetic phase transition of ordered FeRh wires", J. Appl. Phys. in press (2011).
3.	Y. Shirahata, E. Wada, M. Itoh, and T. Taniyama, "Inversion of spin dependent photocurrent at Fe ₃ O ₄ /modulation doped GaAs heterointerfaces", J. Appl. Phys. in press (2011).
4.	I. Suzuki, T. Naito, M. Itoh, T. Sato, and T. Taniyama, "Clear correspondence between magnetoresistance and magnetization of epitaxially grown ordered FeRh thin films", J. Appl. Phys. in press (2011).
5.	E. Wada, Y. Shirahata, T. Naito, M. Itoh, M. Yamaguchi, and T. Taniyama "Spin polarized electron transmission into GaAs quantum well across Fe ₃ O ₄ : optical spin orientation analysis", Appl. Phys. Lett. 97 (17) (2010) 172509.
6.	E. Wada, Y. Shirahata, T. Naito, M. Itoh, M. Yamaguchi, and T. Taniyama, "Inversion of spin photocurrent due to resonant transmission", Phys. Rev. Lett. 105 (15) (2010) 156601.
7.	E. Wada, K. Watanabe, Y. Shirahata, M. Itoh, Y. Yamaguchi, and T. Taniyama, "Efficient spin injection into GaAs quantum well across Fe ₃ O ₄ spin filter", Appl. Phys. Lett. 96 (10) (2010) 102510.
8.	E. Wada, M. Itoh, T. Taniyama, and M. Yamaguchi, "Spin polarization of electrons Injected from Fe into GaAs quantum well characterized using oblique Hanle effect", Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1183 (2009) FF06-05.
9.	I. Suzuki, T. Koike, M. Itoh, T. Taniyama, T. Sato, "Stability of ferromagnetic state of epitaxially grown ordered FeRh thin films", J. Appl. Phys. 105 (7) (2009) 07E501.

(2)特許出願

研究期間累積件数:0 件

(4)その他(主要な学会発表、受賞、著作物等)

学会発表

1. T. Taniyama, "Optically oriented electron spin transmission across ferromagnet/ semiconductor interfaces", SPIE Optics+Photonics 2011, San Diego, USA, 21-25 Aug. (2011) (Invited).
2. E. Wada, K. Watanabe, Y. Shirahata, M. Itoh, M. Yamaguchi, and T. Taniyama, "Efficient Spin Injection from Fe₃O₄ into GaAs Triggered by Verwey Transition", 55th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials (MMM2010), Atlanta, USA, 14-18 Nov. (2010).
3. T. Naito, I. Suzuki, M. Itoh, and T. Taniyama, "Effect of Spin Polarized Current on Magnetic Phase Transition of Ordered FeRh Wires", 55th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials (MMM2010), Atlanta, USA, 14-18 Nov. (2010).
4. 谷山 智康, "異種材料複合化によるナノ磁性スピントロニクス", 日本磁気学会第 34 回ナノマグネティックス専門研究会, 東京, 14 May (2010). (招待講演).
5. 谷山智康, "酸化物材料を利用したスピントロニクスの最近の進展", 未踏・ナノデバ

イステクノロジー第 151 委員会材料分化学会合同公開シンポジウム, 東京, 31 Aug. (2009). (招待講演).

6. I. Suzuki, T. Koike, M. Itoh, and T. Taniyama, "Stability of Ferromagnetic State of Epitaxially Grown Ordered FeRh Thin Films", 53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2008), Austin, USA, 10-14 Nov. (2008).

著作物

1. T. Tsurumi, H. Hirayama, M. Vacha, and T. Taniyama, Nanoscale Physics for Materials Science, Tayler & Francis, New York, 2009.