

平成 21 年 6 月 22 日現在

研究種目：特定領域研究(公募)
 研究期間：2008～2008
 課題番号：20042011
 研究課題名(和文) ZnSe 障壁層を用いたスピン発光素子の開発
 研究課題名(英文) Development of spin-polarized light-emitting diodes with a ZnSe tunnel barrier

研究代表者

齋藤 秀和 (SAITO HIDEKAZU)
 独立行政法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス研究部門・主任研究員
 研究者番号：50357068

研究成果の概要：本研究では電子のスピン機能を利用して情報を記憶する新型トランジスタの実現に必要なトンネル障壁層材料の開発を行った。その結果、酸化ガリウム(GaO_x)という新障壁層材料を見出した。主な成果は以下の通りである。

- 1) 金属/絶縁体/半導体(MIS)型構造を有する $\text{Fe}/\text{GaO}_x/\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ トンネル磁気抵抗(TMR)素子を作製し、MIS型素子では世界最高性能(磁気抵抗変化率 58%)を達成した。
- 2) $\text{Fe}/\text{GaO}_x/n\text{-AlGaAs}$ MIS型トンネル素子において、 GaO_x の有効バリア高さが極めて低い(室温で 0.10 eV)ことを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,900,000		1,900,000
年度			
総計	1,900,000		1,900,000

研究分野：スピントロニクス

科研費の分科・細目：応用物理

キーワード：半導体、磁性体、ヘテロ構造、スピン注入、エレクトロルミネッセンス

1. 研究開始当初の背景

近年、電子の電荷のみならずスピン自由度をも半導体素子中で制御して利用する、いわゆる半導体スピントロニクス技術が世界的に注目されている。それは、既存のシリコンテクノロジーの限界が見えつつある現在、スピントロニクス技術の本質である不揮発機能が今後のエレクトロニクスの発展には必要不可欠であるからである。半導体スピント

ロニクス素子の最終目標とも言えるのが情報記憶機能を有するトランジスタ、“スピントランジスタ”である。1990年の Datta と Das による理論提案以来[1]、理論・実験両面より精力的に研究が行われてきた。しかしながらその開発は困難を極め、これまで明瞭にスピンに依存したトランジスタ動作を実現した例は無い。

スピントランジスタの実現を困難にして

いる最大の原因は、半導体へのスピン注入と呼ばれる技術が未確立であるためである。スピン注入とは、強磁性体からスピン偏極した電子を非磁性半導体の伝導帯へ注入し、そのままスピン情報を保持しつつトランジスタのチャンネル幅程度 (~ 100 nm) を伝播させる技術である。スピン注入実験には、強磁性体/絶縁障壁層/中間半導体層/半導体量子井戸から構成されるスピンLEDが用いられる。絶縁障壁層は金属と半導体間の伝導率不一致 [2] と呼ばれる、スピン注入を阻害する要因を回避するために必要である。スピン偏極電流は、強磁性体からトンネル障壁層を介して半導体中間層に電氣的に注入され、その後、量子井戸へと流れる。量子井戸からのELの偏光度を測定することにより、スピン偏極電子の偏極率を見積ることができる。これまでに、トンネル障壁材料としてAlO_x [3] やMgO [4]、中間半導体層にGaAsをそれぞれ用いたスピンLEDにおいて、数十%に達する高いELの偏光度が報告されている。特に、MgOはFeなどの通常の3d遷移磁性金属に対して高スピン分極率を持つ電子のみを通過させる機能を持つことから、最も注目されている。

従来、スピンLEDを用いた実験では専らELの偏光度のみが議論されてきた。しかし、トランジスタ動作の観点からはその強度、すなわち、発光効率も極めて重要である。なぜなら、発光効率が著しく低い絶縁体/半導体接合をスピントランジスタに用いた場合、そもそも増幅機能が実現できないためである。以下に詳細を説明する。図1は金属/絶縁体/半導体接合における伝導経路の模式的である。伝導経路は主に2つあり、1つは伝導帯に直接トンネルする経路、もう1つは絶縁体/半導体界面に形成される界面準位を介して流れる経路である(経路は複数あるが、図では1つのみ表示)。このうち、経路の電子のみがトランジスタ動作に貢献する。したがって、界面準位密度が非常に高い場合は経路が支配的となり、増幅機能は望めない。

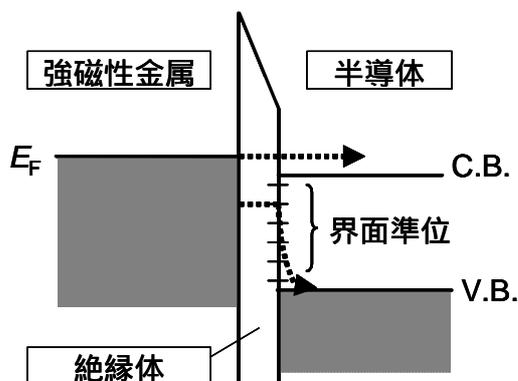


図1 金属/絶縁体/半導体接合における伝導経路の模式図。 E_F 、C.B.およびV.B.はそれぞれフェルミレベル、伝導帯、荷電子体を示す。

ここで、LEDにおいて、発光に寄与するのは経路の電子である。よって、界面準位密度が非常に高い場合はEL強度の著しい低下を招くことになる。極端な例を挙げれば、経路

の電流値が経路のその僅か1%であったとしても、高いスピン偏極率を有してさえいれば、当然高いELの偏光度が観測されよう。しかし、このような絶縁体/半導体界面を有するトランジスタは増幅機能を望めないことは明白である。既に申請者はFe/GaAs界面にMgOを挿入することにより、発光強度が極端に低下することを明らかにしている。

これまで申請者は、独自に開発した複合材料成膜装置を駆使し、異種材料間ヘテロエピタキシャル接合とそのスピン依存伝導デバイスへの応用研究に取り組んできた。その結果、金属/II-VI/III-V族半導体ヘテロ構造を有する単結晶トンネル磁気抵抗(TMR)素子の開発[5]に成功するなど、他グループの追従を許さない独創的な成果を挙げている。特に、昨年度来、効果的なスピン注入に必要な障壁層材料の探索を、独自技術により作製した金属/絶縁体/半導体構造を有するFe/障壁層/(Ga,Mn)As TMR素子の伝導特性の評価によって行ってきた。その結果、GaAsとの格子不整合の小さな(0.2%)II-VI族半導体ZnSeが障壁層材料に有望であることを世界に先駆けて見出した[6,7]。この新材料を用いることにより、高いELの偏光率と発光強度が同時に得られるものと期待される。

参考文献

- [1] S. Datta and B. Das, Appl. Phys. Lett. **56**, 665 (1990).
- [2] S. Schmidt *et al.*, Phys. Rev. B **62**, R4790 (2000).
- [3] T. Manago and H. Akinaga, Appl. Phys. Lett. **81**, 694 (2002).
- [4] X. Jiang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 056601 (2005).
- [5] H. Saito *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 086604 (2005).
- [6] H. Saito *et al.*, Appl. Phys. Lett. **89**, 232502 (2006).
- [7] K. C. Agarwal *et al.*, IEEE Trans. Mag. **43**, 2809 (2007).

2. 研究の目的

本提案ではIII-V族半導体への高いスピン注入・発光効率を実現するための障壁層材料の開発を行う。具体的には、ZnSe障壁層を有するスピンLEDのスピン・電荷注入効率を測定し、MgO障壁層を用いたスピンLEDとの比較検討を行う。従来のスピンLEDに匹敵するEL偏光率(20~30%)と一般のLEDで用いられるショットキー接合並みの発光効率の両立を目標とする。

3. 研究の方法

本研究で用いるスピンLED素子の膜構造を図2に示す。障壁層にはZnSeの他に、Ga₂O₃の導入も試みる。Ga₂O₃は酸化物絶縁体中、GaAsに対して最も界面準位の少ない接合界面を形成できるため [1]、高品位の障壁層材料として期待される。強磁性電極と発光部にはスピンLED構成材料として実績のあるFeおよびn-AlGaAs/GaAs量子井戸/p-AlGaAsをそれぞれ用いる。なお、スピン注入・発光効率は電極材料や量子井戸構造にも依存することが予想されるが、本研究では絶縁障壁層の開発を目的とするため、電極部およびLED部は統一した材料および構造を用いることとする。

試料作製の際に最も注意すべきことは、接合界面の酸化の問題である。特に、GaAsは表面酸化により表面(界面)に多数の状態が形成されることが知られている。したがって、スピンLEDは一貫して超高真空中で成膜する必要がある。そこで、本提案では複合材料成膜装置を用いた分子線エピタキシー(MBE)法によって試料を作製する。この装置はIII-V族半導体(GaAsもしくはAlGaAs)、II-VI族半導体(ZnSe)、および金属・酸化物絶縁体(Fe, Ga₂O₃ およびMgO)用の3台の成膜装置から構成される。それぞれの成膜室は搬送室で連結されているため、試料を大気に曝すことなく超高真空中での連続成膜が可能である。半導体系および金属・酸化物材料はクヌーセルおよび電子ビーム銃をそれぞれ用いて成膜を行う。各々の成膜室には反射高速電子線回折(RHEED)装置が備えられており、膜の成長様式や表面形態をその場で観察することができる。

作製した膜は、コンタクトアライナー、アルゴンイオンミリング、スパッタリング等を用いた通常の微細加工プロセスにより、面内発光LED素子に加工される。加工装置およびプロセスはこれまでのTMR素子作製において



図2 素子構造

十分な実績がある。素子サイズは十分な光量を得るために100 μm角程度の比較的大きな素子を用いる。

スピンLED試料は光学窓付きの超伝導マグネット中にセットされる。面内発光ELの偏極率を測定するためには、強磁性電極の磁化を面直方向に飽和(Feの場合低温で2.2 T必要)させる必要がある。本研究で使用する超伝導マグネットの最大印加磁場は7 Tであり、Feの磁化を十分に飽和させることができる。試料からのELはレンズで集光され分光器に導かれる。マグネットと分光器の間にはλ/4板と直線偏光板が置かれ、これによりELの左右の円偏光成分を分離する。すなわち、ELの偏極度(=左右の円偏光成分の強度差)に応じて分光器へ入る光の透過率が変調される。このときのELの偏極度が電子のスピン分極率に相当する。また、発光強度はλ/4板と直線偏光板を除いたときのEL強度より求めることができる。以上の実験方法はスピン注入実験で実績のある手法である[2,3]。

参考文献

- [1] R. N. Nottenburg et al., Appl. Phys. Lett. **52**, 218 (1988).
- [2] T. Manago and H. Akinaga, Appl. Phys. Lett. **81**, 694 (2002).
- [3] X. Jiang et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 056601 (2005).

4. 研究成果

- 1) 金属/絶縁体/半導体(MIS)型構造を有するFe/GaO_x/Ga_{1-x}Mn_xAsトンネル磁気抵抗(TMR)素子を作製し、MIS型TMR素子では従来の最高値である磁気抵抗変化率58%を達成した(図3)
- 2) Fe/GaO_x/n-AlGaAs MIS型トンネル素子において、素子抵抗の対数がGaO_x膜厚に比例することを示し(図4)、GaO_xの有効バリア高さが極めて低い(室温で0.10 eV)ことを明らかにした。

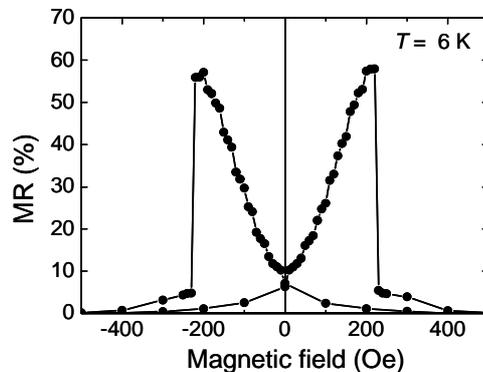


図3 Fe/GaO_x/GaMnAsの磁気抵抗曲線

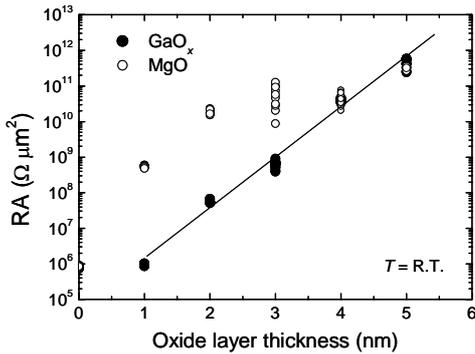


図4 Fe/(GaO_x, MgO)/n⁺-AlGaAsにおける素子抵抗の障壁層膜厚依存性

3) Fe/(GaO_x, MgO)/(Al)GaAs量子井戸発光素子のエレクトロルミネッセンス(EL)測定より、GaO_xはMgOと比較してGaAsへの高効率の電子注入が可能であることを示した(図5)

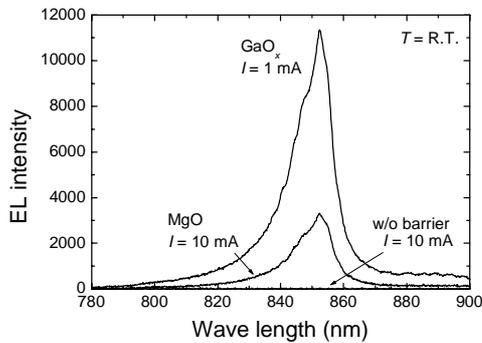


図5 Fe/(GaO_x, MgO)/(Al)GaAs 量子井戸の室温におけるELスペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2件)

J. C. Le Breton, H. Saito, A. Yamamoto, S. Yuasa, and K. Ando, Appl. Phys. Lett. **94**, 152101-1-3 (2009). 査読有り

H. Saito, A. Yamamoto, S. Yuasa, and K. Ando, Appl. Phys. Lett. **93**, 172515-1-3 (2008). 査読有り

〔学会発表〕(計 2件)

H. Saito, A. Yamamoto, S. Yuasa, and K. Ando, " Tunneling magnetoresistance in Fe/GaO_x/Ga_{1-x}Mn_xAs magnetic tunnel diodes ", International conference of Magnetism and Magnetic Materials, 2008.11.11, オースチン市、アメリカ

齋藤秀和、湯浅新治、安藤功兒、“金属/半導体複合素子におけるスピン依存伝導”(招待講演)、応用物理学学会秋季学術講演会、2008年9月3日、中部大学

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)
無し

取得状況(計 0件)
無し

〔その他〕
無し

6. 研究組織

(1)研究代表者

齋藤 秀和(SAITO HIDEKAZU)

独立行政法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス研究部門・主任研究員

研究者番号：50357068

(2)研究分担者

無し

(3)連携研究者

無し