

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560019
 研究課題名 (和文) Fe-Si 系半導体/強磁性体ヘテロ構造における強磁性層間結合への圧力効果
 研究課題名 (英文) The pressure effect to the magnetic interlayer coupling in the Fe-Si system with semiconducting/ferromagnetic hetero-structure.
 研究代表者
 武田 薫 (TAKEDA KAORU)
 福岡工業大学・工学部・講師
 研究者番号：90236464

研究成果の概要：

Fe-Si 系半導体/強磁性体における磁化層間結合の圧力印加による効果を調べた。すなわち $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{FeSi}_2$ 超格子積層膜を作製し圧力印加下で室温において電気抵抗の変化を測定した。強磁性結合膜と反強磁性結合膜を比較した場合、反強磁性結合膜の方が抵抗変化率が大きい結果が得られた。このことが磁気層間結合に対してどのように関与しているかは、まだ不明である。また、圧力印加時に対して離散的なとびを持つ抵抗変化が観測された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物性・結晶工学

キーワード：ヘテロ構造

1. 研究開始当初の背景

薄膜作製技術の進展に伴い、異種原子を原子スケールで交互に積層した今までにない新しい原子配列構造の物質が半導体材料や金属材料を用いて作製され、それぞれ半導体超格子、金属人工格子と呼ばれている。

これらの人工設計の新物質では電子が今までに見せたことのない振る舞いを演じ新奇な物性・機能が多数報告されており、次世代の新しい電子デバイスへの応用の可能性が大いに期待されている。中でも強磁性金属/非磁性金属人工格子で観測される巨大磁気

抵抗効果は、抵抗変化が強磁性層間の磁化の平行・反平行に対応することから、伝導電子のスピンの依存散乱に起因することが明らかとなり、スピントロニクスへの応用が期待された。多機能化を目指す上で、磁性体のスピン依存特性と従来の半導体技術の融合が極めて興味深い。半導体と磁性体は結晶構造や化学結合などの性質が互いに極端に異なるため、それらを組み合わせたヘテロ構造は、良質な単結晶性と界面の急峻性・熱力学的安定性を維持したまま作製することが極めて困難であった。しかし、その構造が実現され

ば、材料設計の自由度が大幅に広がり、従来の半導体および金属からのみからなる構造では得られなかった偏極スピンを利用した新しいデバイスの実現が期待される。

その中で、スピントロニクスの代表的構造である強磁性金属/半導体積層膜は、おもに GaAs/GaMnAs で研究されてきたが、以下のような課題がある。

(1) キュリー温度が室温以下で実用的でない。

(2) GaMnAs のスピン偏極電子が主に d 電子であるのに対して半導体相の GaAs が s, p 電子系であるためにスピン注入効率は極めて小さい。

それに対して我々は、Fe-Si 系化合物による強磁性金属/半導体積層膜に着目している。Fe-Si 系化合物には強磁性相の Fe_3Si と半導体層相のナノ微結晶 (NC) FeSi_2 , $\beta\text{-FeSi}_2$ 等が存在する。なかでも Fe_3Si と FeSi_2 の積層膜では、

- (1) 強磁性 Fe_3Si のキュリー点が 850 K と高く室温以上で動作できる。
- (2) Si, $\beta\text{-FeSi}_2$, Fe_3Si は互いに格子不整合が 4 % と小さいためにエピタキシャル成長が可能であり Si テクノロジーとの和合性が高い。
- (3) 共に d 電子が伝導に寄与しており、フェルミ準位で高偏極率を示す。したがって Fe_3Si から効率よく半導体層 FeSi_2 に偏極スピンを注入できる可能性がある。
- (4) 強磁性金属/半導体ヘテロ構造では電気伝導率のミスマッチが数桁と大きくスピン注入効率を低下させる原因となっているが、本組み合わせでは 1 桁以内と極めて小さい。

等の利点があり、スピントロニクスの新しい系として興味深い。強磁性金属/半導体積層膜では、強磁性金属/非磁性金属人工格子の巨大磁気抵抗効果の原因である磁化の平行・反平行状態のスイッチングを半導体の電子状態を変化させることで、磁場印加以外で例えば光照射、圧力印加などでスイッチングできる可能性がある。過去に Fe_3Si 膜が Si 基板上に室温でエピタキシャル成長することを報告し、その構造と磁気特性および積層膜についても報告した。すなわち、 $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{FeSi}_2$ ヘテロ構造人工格子膜の基本的な作製方法は確立している。本研究では、全く初めての試みとして圧力印加により半導体層の電子状態を変化させることで磁化の平行・反平行の制御の可能性を試みる。

2. 研究の目的

$\text{Fe}_3\text{Si}/\text{FeSi}_2$ 積層膜を作製し FeSi_2 の膜厚を変えることにより、層間結合が反強磁性、強磁性膜が得られ、磁気抵抗効果も測定できて

いる。更に磁気層間結合が強く良質な量子井戸層が形成されている。また、他の観点からこの積層膜において、面内方向において電流注入磁化反転の現象も見出されている。非磁性層として、金属ではなく電子構造が圧力に敏感な半導体層 FeSi_2 を採用していることが特徴である。研究の目的は層間結合に及ぼす圧力印加の効果調べることであり、層間結合を圧力印加によりスイッチングできるかどうかを実験的に調べるが、圧力に対する層間結合のスイッチングが得られた場合、実験結果をもとにその起源に対して物理的考察を行なう。

3. 研究の方法

対向ターゲットスパッタ法により Si (111) 基板上に Fe_3Si 膜をエピタキシャル成長させ、その上に NC- FeSi_2 を作製し、更に Fe_3Si 膜と交互にスパッタリングを行い Fe_3Si 膜をエピタキシャル成長させ、20 層の積層膜を作製した。 Fe_3Si の膜厚を 25 Å に固定し、半導体相の FeSi_2 の膜厚を変えることにより、強磁性結合、反強磁性結合の膜を容易に作製することができる。結晶構造とエピタキシャル成長の確認は XRD を使用した。Si 基板温度は室温でもエピタキシャル成長し、積層膜の作製は可能であるが、膜質の温度依存、磁化特性を考慮すると基板温度 300°C がベストである。したがって基板温度は 300°C とした。強磁性、反強磁性結合の確認および磁化特性は VSM を使用した。電気抵抗の測定は面内方向とし、ナノボルト計のおよびナノアンペア計を使用して 4 端子法で測定した。このとき電流の方向は変えて接触抵抗はキャンセルするようにした。試料は幅約 1 mm 弱、長手方向 2 mm 程度に切り出し、0.025 mm の金線をリード線としダイヤモンドペンで深く押し付けるように傷をつけ、そこに金線を銀ペーストで固めた。それを図 1 に示すピストン型圧力印加装置にセットして、面直方向に圧力を加えながら、電気抵抗は面内方向で測定した。電気抵抗は圧力印加時と圧力開放時に測定した。

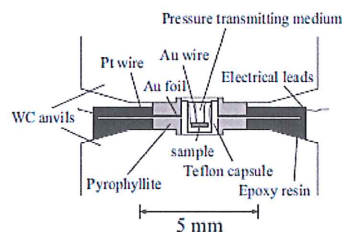


図 1 ピストンシリンダー型圧力印加装置の試料セット部分

4. 研究成果

Fe-Si系、強磁性体/半導体ヘテロ構造の積層膜 $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{FeSi}_2$ において新しい試みとして圧力印加による半導体層 (FeSi_2) の電子状態に変化をもたらし、圧力印加により層間結合の強磁性結合、反強磁性結合の探索を目指して室温で圧力印加による電気抵抗変化を調べた。

図2は強磁性結合膜と反強磁性結合膜の電気抵抗変化を比較するために、圧力印加後の圧力開放時の抵抗変化を無圧力下での抵抗値で規格化したものである。反強磁性結合膜の抵抗変化の仕方が強磁性結合膜のそれより大きい。このことから、反強磁性結合膜と強磁性結合膜の抵抗変化の違いがかなりはっきりしているが、磁気層間結合に対して、どの様に関連しているか現在のところ不明である。また、圧力印加時においては抵抗変化がとびとびの離散的な変化を示すことが観測された。これが量子井戸構造に起因する本質的な現象であるか、他の原因によるものか、明言できるデータはないのではっきりとわからない。一方、この試料においては、電流注入磁化反転も観測されているので、測定時のバイアス電流にも細心の注意を払わなければならない。更に詳細な実験が必要である。現時点では論文にて明確に結果を報告できるところまで至っていないが、ひきつづき、今後の展望として、磁化による層間結合を解明するには、圧力下での磁気抵抗測定、更に低温下での測定などは必要不可欠であるので現在、その準備を進めている。

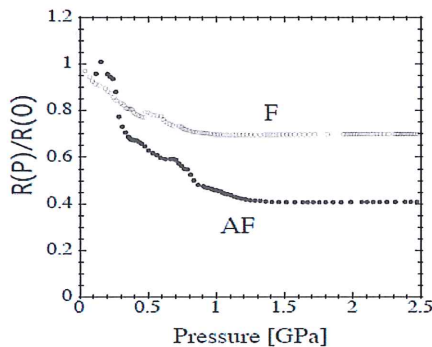


図2 強磁性結合膜 (F), 反強磁性結合膜の圧力印加時における抵抗の変化率

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① K. Takeda, T. Yoshitake, Y. Sakamoto (+4) Interfacial structure of $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{FeSi}_2$ layered films on Si(111) at elevated substrate-temperature., *Int. J. Mod. Phys.*, 査読有, 2009 (in Press).
- ② K. Takeda, T. Yoshitake, Y. Sakamoto (+7), Enhanced Interlayer Coupling and Magnetoresistance Ratio in $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{FeSi}_2$ Superlattices, *Appl. Phys. Express*., 査読有, vol. 1, NO. 2, 2008, 021302 (3pages)
- ③ K. Takeda, T. Yoshitake, D. Nakagauchi, (+7), Epitaxy in $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{FeSi}_2$ Superlattices Prepared by Facing Target Direct-Current Sputtering at Room Temperature., *Jpn. J. Appl. Phys.*., 査読有, 46, No. 12, 2007, pp. 7846-7848
- ④ 武田 薫・梶原寿了・吉武 剛, 強磁性エピタキシャル成長した $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{FeSi}_2$ 超格子の構造と層間結合、福岡工業大学エレクトロニクス研究所所報、査読無、第24巻、2007、pp19-22

[学会発表] (計 6 件)

- ① K. Takeda, Epitaxy of Fe_3Si layers across FeSi_2 layers in $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{FeSi}_2$ superlattices, International Conference on Electronic Materials 2008, 28th July to 1st August 2008, Sydney Hilton (Sydney・Australia)
- ② K. Takeda, $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{FeSi}_2$ superlattices prepared at elevated temperatures. In International Conference on Electronic Materials 2008, 28th July to 1st August 2008, Sydney Hilton (Sydney・Australia)
- ③ 武田薫, $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{FeSi}_2$ 人工格子の基板温度と磁気特性, ナノ学会第6回大会, 2008. 5. 7, 九州大学
- ④ 武田薫, $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{FeSi}_2$ 人工格子のエピタキシャル成長と磁気特性, ナノ学会第6回大会, 2008. 5. 7, 九州大学
- ⑤ 武田薫, $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{FeSi}_2$ 人工格子の光照射に伴う電気抵抗の変化, 応用物理学会学術講演会, 2008. 3. 29, 日本大学

- ⑥ K. Takeda, Magnetic properties of $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{FeSi}_2$ superlattices, International Conference on Materials for Advanced Technologies 2007, 1-6 July 2007., Singapore

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田 薫 (TAKEDA KAORU)
福岡工業大学・工学部・講師
研究者番号：90236464

(2) 研究分担者

中西 剛司 (NAKANISI TAKESI)
福岡工業大学・工学部・准教授
研究者番号：70297761

梶原 寿了 (KAJIWARA TOSIYUKI)
福岡工業大学・工学部・教授
研究者番号：00185779

(3) 連携研究者

吉武 剛 (YOSHITAKE TUYOSHI)
九州大学・総合理工学研究院・准教授
研究者番号：40284541