

機関番号： 11301

研究種目： 基盤研究(B)

研究期間： 2008～2010

課題番号： 20360001

研究課題名（和文）強磁性半導体中の電流誘起磁壁移動

研究課題名（英文）Current-induced domain wall motion in ferromagnetic semiconductors

研究代表者

松倉 文礼 (MATSUKURA FUMIHIRO)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号： 50261574

研究成果の概要（和文）：

強磁性半導体(Ga,Mn)As 中の磁壁運動に関連する物理現象の観測を行い、

- (1) (Ga,Mn)As の表面粗さをバッファ層により制御することで、磁壁クリープ運動のユニバーサリティ・クラスは素子の表面粗さにより決まること、
- (2) 磁壁を外部磁界で移動させた際に、電流誘起磁壁移動の逆効果として磁壁移動に伴う起電力発生が生じること、を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We have investigated the domain wall related phenomena in (Ga,Mn)As and found that

- (1) Universality class of domain wall creep motion in (Ga,Mn)As is governed by the surface roughness,
- (2) Electromotive force can be induced by the domain wall motion, which is a reciprocal effect of the current induced domain wall motion.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2009年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2010年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

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： スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

強磁性体の電氣的磁化方向制御手法として電流誘起磁壁移動が注目されている。強磁性半導体(Ga,Mn)As においても伝導電子の流れと磁壁が相互作用することにより磁壁が移動することが示されている。この電流誘起磁壁移動機構は断熱的スピン移行機構により生じていることが理論モデルとの定量的比較により明らかにされている。また、電流

誘起磁壁クリープ運動は、(Ga,Mn)As において初めて観測された現象であり、従来知られていないユニバーサリティ・クラスに属するクリープ運動であることが示されている。これらのことは、強磁性半導体(Ga,Mn)As は磁壁に関連する物理現象の探索と理解のために、最も理想的な材料の一つであることを示している。

2. 研究の目的

強磁性半導体中の磁壁移動の物理を理解するために、

(1) 磁壁移動速度と材料パラメータの関係

(2) 磁壁移動に伴う新規物理現象の観測

を目的とする。(1)に関しては、(Ga,Mn)As を異なるバッファ層上に成長し、磁壁移動速度の表面粗さ依存性を調べることにした。(2)に関しては、電流誘起磁壁移動の逆効果とみなすことができる磁壁移動に伴う電気起電力の発生に着目した。

3. 研究の方法

強磁性半導体の電流誘起及び磁界誘起磁壁移動に関連する電気的信号の測定と磁気光学効果顕微鏡による磁区観察を通して、磁壁移動機構と磁壁移動関連した物理現象の実験的評価を行う。また、実験結果と理論モデルとの定量的比較から、現象の起源に関する理解を含める。

結晶成長は分子線エピタキシー法により行った。試料構造は2種用意した。一つは組成を徐々に制御した(In,Al)As バッファ層を用いたものであり、もう一方は(In,Ga)As バッファ層を用いたものである。(Ga,Mn)As の Mn 組成は5%、膜厚は30 nm とした。原子間力顕微鏡による表面観察から、(In,Al)As をバッファ層としたものの表面平均粗さは0.65 nm であり、(In,Ga)As をバッファ層としたものはその4倍の表面粗さを持つ。磁気光学効果顕微鏡を用いた磁区観察から磁壁移動速度の外部磁界強度依存性を測定し、クリープに対するスケーリング式から実験結果を解析した。

また、(In,Al)As バッファ層を持つ試料は10 μm 幅の細線構造に加工し、その中で磁壁を外部交流磁界で動かすことにより発生する電気起電力の測定を行った。交流磁界により発生する誘導起電力の影響を差し引くために、磁壁を配置している場合と配置していない場合の電気信号の差分を取ることで磁壁運動による起電力の成分を抽出した。電気的測定と磁気光学効果顕微鏡による磁区構造の観察を比較することで、電気的信号が磁壁運動に関連するものかどうかを確認した。

4. 研究成果

(1) 強磁性半導体(Ga,Mn)As の磁壁クリープ運動のユニバーサリティ・クラスは素子の表面粗さにより決まることを明らかにした。

比較的平坦な試料に対しては、クリープ磁壁移動速度と外部磁界の関係を記述するスケーリング式においてスケーリング指数1.4を得た。これは、ランダム・フィールドに関連したクリープに分類される。一方、表面の粗い試料においてはスケーリング指数0.27を得、これはランダム・ボンドに分類

される。前者のクリープ運動に対しては Mn イオン等の集団ピンニングが、後者に対しては縞状欠陥によるピンニングがクリープ運動を支配するものと考察される。更に、広い温度領域において電流誘起磁壁移動速度を決め、スケーリング・プロットからスケーリング指数0.38を得た。この値は、過去の報告と同等であり、電流誘起磁壁クリープ運動は、磁界誘起磁壁クリープ運動と異なるユニバーサリティ・クラスに属している。

(2) 電流誘起磁壁移動の逆効果として、磁壁移動に伴う起電力発生が生じることを明らかにした。

磁化のダイナミクスに伴い起電力が発生することが理論的に示されている。この起電力は、磁性スピンとキャリア・スピンに関する角運動量とエネルギーの保存則を満たすように発生することが示されている。この起電力発生を確認するために、(Ga,Mn)As 中の磁壁運動に伴う起電力の有無を調べることとした。

(In,Al)As バッファ層上のキュリー温度90 Kを持つ30 nm厚の(Ga,Mn)As を10 μm 幅の細線構造に加工し、更に表面に段差構造を設けることで保磁力の異なる3つの領域を素子中に配置した。素子は電気端子を伴い、素子中に発生する電気的信号を検出することができる。試料を光学窓が附属するクライオスタットに入れ、クライオスタットをヘルムホルツ・コイル中に配置した。ヘルムホルツ・コイルは直流磁界もしくは矩形交流磁界を素子に印加するために用いられる。

交流磁界を印加して、素子に発生する起電力をロックインアンプにより測定した所、起電力は交流磁界の強度と周波数の両方に対して線形に変化することが分かった。このことは、観測している起電力は電磁誘導により、発生する起電力であることを示唆している。起電力と外部磁界強度・周波数の関係から、測定系中に数 mm 径のループが存在することによって考えられ、この信号を測定系の改善で除去することは困難である。

そこで、素子中に磁壁を配置した場合と配置していない場合の両方の信号を計測した。測定温度は55 Kである。交流磁界周波数は4.23 Hz に固定し、その強度を掃印した所、二つの信号には明確な差が観測された。この差分が磁壁運動に起因する起電力に相当すると考慮される。

この差分信号が磁壁運動に起因するものかを確認するために、半周期分の交流磁界を印加後の磁区観察を行った。交流磁界により、磁壁運動が誘起されている磁界強度においてのみ、差分信号が存在することが明らかになった。これは、強磁性半導体中で磁壁運動起電力を観測した初めての例である。

磁壁運動起電力は磁性体中のキャリアの

スピン偏極率に比例することが理論的に指定されている。金属伝導を示す(Ga,Mn)As中のキャリアのスピン偏極率は磁化に比例することが知られており、磁化の大きさは温度の関数であり、温度の増加につれて減少する。そのため、測定温度を変えることでキャリアのスピン偏極率を制御可能である。55 K, 65 K, 75 Kで磁壁起電力信号の計測を行った所、温度の上昇につれて信号強度が減少することが分かった。このことは、磁壁運動起電力はキャリアのスピン偏極率の関数であることを示している。

一方で、理論で示されているような磁界強度に対して比例する信号は得られなかった。ここでの測定パラメータ内で、磁区構造観察から決めた磁壁移動速度はクリープのスクレーリング式に従い、磁壁運動はクリープ運動である。クリープ運動に対しては、磁壁は空間で一様に動かず、ゼーマン・エネルギーと弾性エネルギーが釣り合うように伸びた状態で移動する。この伸びの長さは外部磁界に逆比例するので、弾性エネルギーの寄与が存在する場合の起電力は外部磁界に対して比例していない可能性がある。

以上のように、強磁性半導体(Ga,Mn)As中の磁壁運動を観測することで、磁壁運動に関連する物理現象に対して、いくつかの新しい知見を得ることができた。今後の新規スピトロニクス素子実現に向けた基礎動作実証、信頼性の確認等に強磁性半導体を用いた磁壁に関連する物理現象の理解が応用されることと期待される。

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2件)

- ① A. Kanda, A. Suzuki, F. Matsukura, and H. Ohno, "Domain wall creep in (Ga,Mn)As," 査読有、Appl. Phys. Lett. **97**, 032504 (2010). Doi: 10.1063/1.3467048
- ② 千葉大地、山ノ内路彦、松倉文礼、大野英男、強磁性半導体における磁壁の電流駆動、査読有、まぐね 4 (8)、pp. 390-295、Aug. 2009.

[学会発表] (計5件)

- ① A. Suzuki, A. Kanda, F. Matsukura, and H. Ohno, "Buffer layer dependence of magnetic domain wall creep in (Ga,Mn)As," The 1st CSIS International Symposium on Spintronics-based VLSIs and The 7th RIEC International Workshop on Spintronics, Sendai, February 3-4, 2011.
- ② 鈴木淳士、神田明典、松倉文礼、大野英男、"(Ga,Mn)Asにおける電流誘起磁壁移

動の膜厚依存性," 第71回応用物理学会学術講演会 (長崎大学 文教キャンパス、2010年9月14日-9月17日).

- ③ 神田明典、松倉文礼、大野英男"(Ga,Mn)As中の磁壁の磁場誘起クリープ," 第56回応用物理学関係連合講演会 (筑波大学、2009年3月30日-4月2日).
- ④ 神田明典、松倉文礼、大野英男、"(Ga,Mn)As中の磁場誘起クリープのスクレーリング指数," The 13th Symposium on the Physics and Application of Spin-Related Phenomena in Semiconductors (東北大学電気通信研究所附属ナノ・スピン実験施設、2009年1月27日-28日).
- ⑤ 大野英男、松倉文礼、"強磁性半導体: その物性と電流による磁壁駆動," 未踏・ナノデバイステクノロジー第151委員会 第84回研究会 (東京工業大学大岡山キャンパス、2008年4月24日).

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松倉 文礼 (MATSUKURA FUMIHIRO)
東北大学・電気通信研究所・准教授
研究者番号：50261574

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者
()

研究者番号：