

機関番号：11501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560315

研究課題名（和文）

スピン注入磁化反転による半導体 - 強磁性薄膜への高速光励起磁気記録の可能性

研究課題名（英文）

High speed magnetic recording in semiconductor/ferromagnetic thin films by optically-aligned spin injection

研究代表者

高橋 豊 (Takahashi Yutaka)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：00260456

研究成果の概要（和文）：磁性金属/半導体接合系は、将来の磁気記録、スピントロニクス素子において重要な役割を果たすと期待される。本研究では量産レベルで使われる RF マグネトロンスパッタ法を用いて GaAs(001) 上に Fe(001) 薄膜をエピタキシャル成膜できることを XRD により示し、薄膜の飽和磁化と磁気異方性が単結晶バルク Fe と同程度であることを VSM 測定により示した。また、FMR により得られた磁気緩和係数は 0.003 程度で、これまで報告されている最小値に近い値を示すことが分かった。

研究成果の概要（英文）：We have investigated Fe thin films on GaAs, which will be of great importance in the future magnetic devices. We have show epitaxial Fe(001) films can be fabricated on GaAs(001) by conventional RF magnetron sputtering. The magnetic properties of the films were close to those of bulk single-crystal Fe, and the damping coefficient, which represents magnetic dynamics, estimated from FMR measurements was 0.003.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
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：電気電子工学・電子デバイス、電子機器

キーワード：スピントロニクス、磁気記録、磁気緩和係数、スピン輸送係数、強磁性共鳴測定、磁気光学カー効果測定

1. 研究開始当初の背景

(1) スピントロニクスにおいて磁性金属と半導体を組み合わせたデバイスの研究が進められている。当初は金属のみ、あるいは半導体のみからなるデバイスも提案されたが、金属だけではキャリア密度の制御が出来ないためトランジスタのような能動3端子素

子が作れず、一方半導体では室温で強磁性を示す物質がいまだに開発されていない。双方の問題点を補う（あるいは双方の利点を生かした）デバイスとして、強磁性が必要な部分には金属を、能動素子を形成するためには半導体を、という形で組み合わせて使用するの

が現状での現実的な戦略と考えられる。

磁性金属と半導体の接合系として Fe/GaAs が広く研究されている。両者ともそれぞれの分野で長い研究の蓄積があり、この組み合わせは格子整合系であるという利点がある。GaAs は直接遷移型半導体で光との相互作用が強く、またそのバンド構造の特性から円偏光励起によりスピン偏極電子が生成される。更に GaAs から Fe へスピン偏極電子を注入して、スピン注入磁化反転により Fe 中の磁化を制御することが出来れば、円偏光(電磁場) \leftrightarrow スピン偏極電子(半導体) \leftrightarrow 磁化(強磁性金属)という連鎖を使って、光により磁化を制御できる可能性がある。

ここで主要な役割を果たすスピン注入磁化反転は、磁性金属薄膜にスピン偏極電子を電流注入することによりその磁化方向を反転させる技術で、これまで、たとえばハードディスクでの磁気記録に使われてきた Oersted field による磁化制御とは全く異なる考え方に基づく。このためこの技術を実際のデバイスに適用するためには、その基本的なメカニズムについてのより深い理解が必要になる。

(2) 磁気ディスク装置の大容量化のために、記録の高密度化が急速に進んでいるが、記録ビットの微細化による「トリレンマ」の問題、つまり微小ビットの熱安定性を確保するために高磁気異方性材料を使うと保磁力も増大し、磁気ヘッドの起磁力の限界を超えてしまい、書き込みが出来なくなる問題が指摘されている。様々な対応策が提案されているが、本研究ではヘッド磁場に加えてスピン注入磁化反転を用いて記録ビットの磁化反転をアシストする手法を提案した。

2. 研究の目的

本研究では、低ヘッド磁場で高速な書き込みを目指して上述した光による磁化制御を用いた光励起磁気記録を提案し、それを実現するために必要な技術的問題点に関する基礎的な研究を行った。

本研究で提案した光励起磁気記録において、低電流で高速な書き込みを実現するためにはスピン偏極電子が注入される環境下での磁性薄膜中の高速磁化ダイナミクスを理解することが必要になる。磁気ヘッドを使った書き込みの場合には薄膜の磁化反転速度は Gilbert 磁気緩和係数 に依存しており、

この値が大きいほど(緩和が速く)高速で磁化反転が起きる。一方スピン注入磁化反転に必要な電流は緩和係数 に比例しており、反転電流低減という観点では緩和係数は小さいことが望ましい。磁気緩和係数は材料自体とともに膜厚、下地層にも依存する。本研究では Fe/GaAs 系における Fe 薄膜の が様々な製膜条件にどのように依存するか検討した。

3. 研究の方法

(1) 製膜: 本研究では GaAs 基板上への Fe 薄膜成長を RF マグネトロンスパッタリングにより行った。これまでの研究において、この種の薄膜成長には超高真空中での物理製膜である MBE 法が使われてきており、GaAs(001)基板を使った場合には格子整合した bccFe(001)面が cube-on-cube のエピタキシャル関係で製膜できることが示されている。MBE 法は製膜条件の制御性が良く、再現性も高いために、実験室レベルでの研究には適するが、製膜速度が遅く、装置が複雑であるために最終的に量産工程には向かないという問題がある。これに対して我々が採用した RF マグネトロンスパッタ法は大面積の基板に高速で製膜できるため、たとえば磁気ディスクの製造など量産レベルでの磁気薄膜成長に使用されている。将来の量産工程を見通すとこちらの製膜法で高品質の Fe 薄膜を作製できる可能性、および膜の磁気的特性はどのような傾向を示すかを実験で確認しておく必要がある。

(2) 静的磁気特性測定: VSM により飽和磁化、残留磁化などの測定を行った。また薄膜表面の磁気特性評価のために磁気光学カー効果測定装置を立ち上げた。

(3) 磁気緩和係数測定: X バンド(9 GHz 帯)と Q バンド(35 GHz 帯)の強磁性共鳴(FMR)測定装置により磁気緩和係数 を測定した。

4. 研究成果

(1) 薄膜作製と結晶構造解析

試料は RF マグネトロンスパッタリング法により Fe(3N)ターゲットを用い epi-ready *n*-GaAs(001)基板(Wafer Technology 製)上に製膜を行った。真空槽の背圧は $0.8\text{-}1.0 \times 10^{-4}$ Pa で製膜時の Ar ガス圧は 0.8 Pa とした。製膜は室温で行った。GaAs(001)基板上の酸

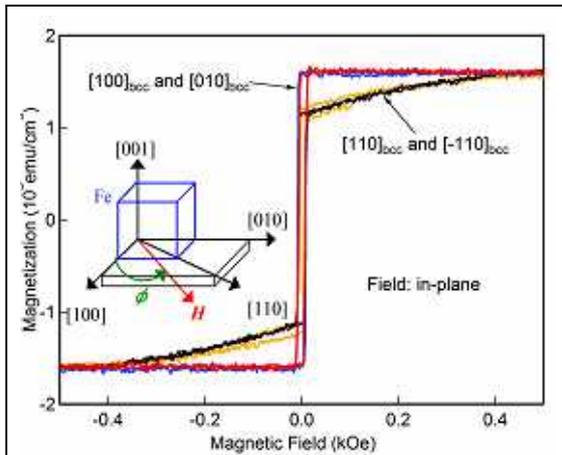


図2 膜厚 12 nm の Fe 薄膜の磁化曲線。挿入図に示すように磁場は面内に印加しており、赤線は[100]_{bcc} 方向、青線は[010]_{bcc} 方向、橙ま[110]_{bcc} 方向、黒線は[1 10]_{bcc} 方向の場合。

向きの関係に注意を払う必要がある。印加磁場が十分に強くない場合にはこの2つの向きが平行にならないためにデータの解釈に注意が必要になる。本研究ではQバンドという高い周波数を用いているために共鳴する磁場も強く図 3(a)に示すようにいずれの角度でも 5 kOe を越えている。図 2 に示した VSM のデータより困難軸方向であってもこの印加磁場の強さであれば磁化は飽和しており、磁化の向きは磁場に平行と考えることが出来る。

この場合 FMR 共鳴磁場 H_r は薄膜の異方性磁場を直接反映し、図 3(a)に示すデータは [100]_{Fe} 方向を容易軸、[110]_{Fe} 方向を困難方向と面内 4 回対称の異方性を持つことを示している。これは先に挙げた VSM の測定結果とも一致する。

(3) 強磁性共鳴測定：磁気(スピン)緩和

膜面内に印加した磁場の角度と共鳴線幅 H_r の関係を図 3(b)(下の図)に示した。これらのデータは室温で Q バンド FMR により測定した。この測定データの重要なポイントは線幅が(これまで報告されている最小値と同程度に)狭く、かつ(実験精度の範囲内で)面内の印加磁場角度に依存しないという点にある。

測定された線幅は intrinsic damping と呼ばれる Gilbert 磁気緩和係数 α からの寄与に加えて、試料の磁気的不均一性を反映したいわゆる extrinsic damping からの寄与を含むので注意が必要である。

試料内で結晶軸の向きに分散がある場合に

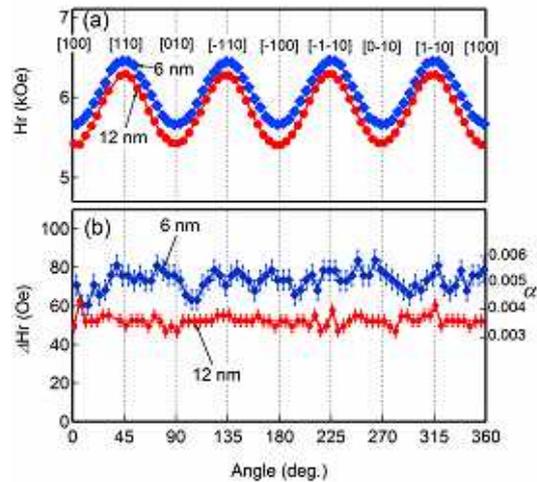


図3 Q バンド強磁性共鳴測定結果。(a)共鳴磁場と(b)共鳴線幅 の面内印加磁場方向依存。

は、共鳴磁場は試料の場所によって異なるために線幅の不均一拡がりの原因となる。(これは mosaicity と呼ばれる) 共鳴磁場が 4 回対称の角分布を示す場合に mosaicity の寄与があると、共鳴線幅は 8 回対称の角分布を示すことになる。しかし測定された試料ではそのような角分布は見られないため mosaicity の寄与は極めて小さいと考えられる。

Extrinsic damping の主要な原因としては薄膜に発生した misfit dislocation を介した Two-Magnon Scattering が指摘されている。Intrinsic damping では線幅は磁場の印加方向に依存しないのに対して、Two-Magnon Scattering の場合には dislocation の方向に依存して共鳴線幅には角度依存が現れる。

膜厚 6 nm と 12 nm の試料で測定された H_r の角分布(図 3(b))を見ると、膜厚 12 nm の試料では H_r は角度に依存せず、一定の値を示している。膜厚 6 nm の試料でも、データのばらつきは大きいものの明瞭な角度依存は見られない。また H_r の値自体も報告されている Fe 薄膜の共鳴線幅としてはかなり小さい値を示しており、磁気緩和係数に換算すると $\alpha = 0.003 \sim 0.004$ となる。この最小値としては、バルク単結晶 Fe では $\alpha = 0.0018$ という値が、本研究と同じ Fe/GaAs では $\alpha = 0.002$ という値が報告されている。Fe での最も小さい値は MgO 基板上の Fe 薄膜で $\alpha = 0.0019$ という値が報告されている。(これらはいずれも MBE 法による製膜である。) これから判断して本研究でスパッタ法により作製した Fe 薄膜の共鳴線幅では Gilbert 磁気

緩和からの寄与が支配的であり、extrinsic dampingの影響は小さいと考えられる。

(3) まとめ

本研究により RF マグネトロンスパッタ法により GaAs(001)面上に Fe(001)エピタキシャル薄膜を作製することに成功した。薄膜の磁気特性はバルク単結晶 Fe に相当し、その磁気緩和係数は MBE 法により作製された薄膜に近い値を示した。本研究の結果は、磁気デバイスへの作製に広く使われているスパッタ法でも高品質な薄膜を成長できることを示している。

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3件)

Y. Takahashi, H. Ikeya, N. Inaba, F. Kirino, M. Ohtake, M. Futamoto
“Q-Band Ferromagnetic Resonance Study of Fe Thin Films on GaAs(001) Deposited by RF Magnetron Sputtering”
IEEE Transactions on Magnetics (投稿中、掲載決定済み) 査読有

H. Ikeya, Y. Takahashi, N. Inaba, F. Kirino, M. Ohtake, M. Futamoto
“Magnetic Properties of Fe(001) Thin Films on GaAs(001) Deposited by RF Magnetron Sputtering”
Journal of Physics: Conference series **266** 012116 (2011) 査読有

Yutaka Takahashi, Nobuyuki Inaba, Fumihiko Hirose
“Temperature dependence of spin-polarized electron transport including electron-electron interaction”
Journal of Applied Physics **104** 023714 (2008) 査読有

[学会発表](計8件)

大橋 栄久、高橋 豊、稲葉 信幸
「Fe-Co/Ru/Fe-Co系反強磁性結合SULの強磁性共鳴線幅と層間結合との関係」
第58回応用物理学関係連合講演会
2011年3月26日 神奈川工科大学

和田 祐也、池谷 浩和、高橋 豊、稲葉 信幸、桐野 文良、大竹 充、二本 正昭
「RF マグネトロンスパッタリング法により

GaAs(001)基板上に作製した Fe(001)薄膜の磁気特性評価」

電子情報通信学会 MR 研究会
2010年12月10日 愛媛大学

Y. Takahashi, H. Ikeya, N. Inaba, F. Kirino, M. Ohtake, M. Futamoto
“Spin damping of sputter-deposited Fe thin films on GaAs(001) measured by ferromagnetic resonance spectroscopy”

The 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VI)
2010年8月3日 University of Tokyo, Japan
(事前審査有)

池谷 浩和、高橋 豊、稲葉 信幸、桐野 文良、加藤 宏朗、小池 邦博
「RF スパッタ法により作製した GaAs(100)基板上 Fe 薄膜の特性」
第64回応用物理学学会東北支部学術講演会
2009年12月3日 日本大学工学部(郡山)

藤田 倫仁、小高 達昭、木村 隼人、稲葉 信幸、高橋 豊
「Co/Ru多層膜の強磁性共鳴吸収線幅のRu層膜厚依存性」
電気学会 基礎・材料部門大会
2009年9月11日 静岡大学工学部

小林 康介、田中 孝浩、大竹 充、稲葉 信幸、二本 正昭、高橋 豊
「Ni-Fe単結晶薄膜の結晶配向と強磁吸収線幅との関係」
第70回応用物理学学会学術講演会
2009年9月9日 富山大学

Kousuke Kobayashi, Nobuyuki Inaba, Yosuke Sudo, Takafumi Seko, Mitsuru Otake, Masaaki Futamoto, Fumiyoshi Kirino, Yutaka Takahashi
“Crystal Direction Dependence of Damping Constants for Fe(001) and FeCo(001) Single Crystal Thin Films on MgO(001) Single Crystal Substrates”
International Conference on Magnetism (ICM2009)
2009年7月30日 Karlsruhe Germany
(事前審査有)

瀬古 貴文、藤田 倫仁、小林 康介、大竹 充、稲葉 信幸、二本 正昭、高橋 豊
「Fe単結晶薄膜の強磁性共鳴吸収線幅と印

加磁界角度との関係」
第 56 回応用物理学関係連合講演会
2009 年 3 月 30 日

〔その他〕

ホームページ等

<http://takahashi lab.yz.yamagata-u.ac.jp>

/

6 . 研究組織

(1)研究代表者

高橋 豊 (TAKAHASHI YUTAKA)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：00260456

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

稲葉 信幸 (INABA NOBUYUKI)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：50396587