

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26889007

研究課題名(和文) 金属薄膜磁性の電界変調効果の増大を目指した材料開発

研究課題名(英文) materials development for electric field induced magnetism in metallic thin film

研究代表者

金井 駿 (Kanai, Shun)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：40734546

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：電界による磁化反転時の消費電力を低減するため、磁性の電界制御効率を向上することを念頭に、磁性の電界制御技術を開発した。磁気特性の測定系および評価手法の確立、素子の最適化を行い、超低消費電力素子のポテンシャルを十分に引き出すための指針を得た。具体的には下記を行った。(1)磁気輸送測定を効率的に行う素子構造・プロセスの開発 (2)X線磁気円二色性を用いた磁気異方性の起源の解明 (3)電界誘起強磁性共鳴を用いた素子加工後の磁気特性の評価 (4)超低消費電力を低減する高性能磁気トンネル接合素子の設計

研究成果の概要(英文)：We have investigated electric field effect on magnetism for future application for high performance spintronics memory/logic system with ultralow energy consumption by enhancing electric field effect. We have developed materials, process, and measurement setup/ systems to draw a potential for low energy consumption of the electric field effect spintronics devices by following subthemes; (1) development of the device structure/ process and measurement system setup for magnetotransport measurement (2) clarification of the origin of the magnetic anisotropy with x ray circular dichroism (3) electric field induced ferromagnetic resonance under dc bias voltage (4) designing and demonstration of the ultralow switching energy consumption of the electric field induced magnetization reversal devices

研究分野：電子工学

キーワード：スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

磁性体メモリの動作電力が高集積化に伴い急速に増大する問題を解決するため、スピン注入磁化反転方式を用いた磁気トンネル接合の研究が盛んになっている。ナノ(10^9)メートルオーダーのサイズの磁性体のメモリ素子動作が実証され、現在実用化に向けた研究が行われている。これまでに、スピン注入磁化反転方式とほぼ同様の素子構造において更に数 100 倍小さな消費電力で動作可能な「電界誘起磁化反転」が原理実証されているが、この磁化反転方式は情報保持時間や書き込みエラーの問題等を抱えている。これは磁気特性の電界変調量が小さいことが最大の原因である。

2. 研究の目的

現在電界による磁化反転時の消費電力は磁化反転に実質的に寄与しない、Joule 熱が支配しており、電界誘起磁化反転のポテンシャルから 2 桁以上消費電力の観点で非効率である。本研究では、材料開発によりこれらの問題解決を目指す。また、磁気特性の測定系および評価手法の確立、素子の最適化を行い、超低消費電力素子のポテンシャルを十分に引き出すための指針を得る。

3. 研究の方法

次世代スピントロニクスメモリ素子に用いられる CoFeB/MgO を対象とし、磁気異方性とその電界効果について下記の方法で研究した。

- (1) 磁気輸送測定を効率的に行う素子構造・プロセスの開発 3 インチウェハを用いて磁気輸送測定用素子を作製する。磁気輸送測定の感度は素子サイズに依存しないため、素子微細化が可能であり、素子を集積することで磁気異方性の電界効果の材料依存性の評価の再現性と効率を向上する。熱酸化膜付き Si 基板上 Ta(5 nm)/Ru(10 nm)/Ta(5 nm)/CoFeB(*t*)/MgO(2 nm)/AlO(5 nm)をスパッタリング法により成膜後、Hall バー形状に加工する。その後 AlO(30 nm)を原子層堆積法により成膜し、コンタクトホールを作製したのちに上部電極およびパッド部分を Cr/Au により作製する。設計・作製した素子パターンは、3 インチ基板中に 400 個の試料を持ち、ウェハ中の素子作製条件を 20×20 の条件で連続的に変化させることが可能である。
- (2) X 線磁気円二色性を用いた磁気異方性の起源の解明：X 線磁気円二色性と総和則を用いて、磁化の軌道磁気モーメントおよびスピン磁気モーメントを測定する。3d 遷移金属原子中の電子の軌道磁気モーメントの異方性は磁気異方性と Bruno の関係式により関係している。X 線を用いることにより、軌道磁気モーメントの磁性金属元素依存性を測定する。熱酸化膜

付き Si 基板上に Ta(5 nm)/Ru(10 nm)/Ta(5 nm)/CoFeB (0.85 nm または 2.0 nm)/MgO(1 nm)/Ta(1 nm)をスパッタリング法により作製した。CoFeB の膜厚依存性から CoFeB/MgO 界面の各磁性原子中の電子状態を評価した。試料に 1 T の外部磁界を印加し、X 線吸収スペクトルを全電子収量法により測定した。

- (3) 電界誘起強磁性共鳴を用いた素子加工後の磁気特性の評価：磁気トンネル接合に高周波電圧を印加することで、磁気異方性の電界変調効果を介して強磁性共鳴を誘起することが可能である。磁化歳差運動により素子抵抗と反射係数が変化し、磁化歳差振幅は接合から入力側に反射される高周波電圧の変化として検出される。ここでは入力信号と素子抵抗変化の周波数が同一であることから、ホモダイン変調された直流成分により、素子の強磁性共鳴の周波数スペクトルを測定した。素子は Al₂O₃ 基板上に、Ta(5 nm)/Ru(10 nm)/Ta(5 nm)/CoFeB(0.9 nm)/MgO(1.4 nm)/CoFeB(1.8 nm)/Ta(5 nm)/Ru(5 nm)をスパッタリング法により成膜し、直径 40 nm の円形素子に電子線リソグラフィと Ar イオンミリングを用いて加工した。コプレーナ導波路線路を素子の上下電極をシグナル線中に直列に接続されるよう設計し、Cr/Au と光学リソグラフィにより加工した。素子の抵抗は約 40 kΩ、トンネル磁気抵抗比は 133%である。強磁性共鳴の誘起には 1-40 GHz の高周波電圧を用いた。バイアススティにより、印加した電圧を直流成分 (<1 kHz) と高周波成分に分離した。入力信号は、感度よく測定するために 23 Hz でパルス変調し、変調された直流成分をロックイン増幅器により測定した。入力電圧を直流電圧を重畳することによるスペクトル信号の変化を測定し、磁気異方性の電界変調効果を評価した。
- (4) 超消費電力を低減する高性能磁気トンネル接合素子の設計：電界誘起磁化反転において消費電力を低減するため、絶縁膜膜厚を最適化した素子を作製する。Ta(5 nm)/Pt(5 nm)/[Co(0.34 nm)/Pt(0.4 nm)]₆/Co(0.4 nm)/Ru(0.42 nm)/[Co(0.34 nm)/Pt(0.4 nm)]₂/Co(0.34 nm)/Ta(0.3 nm)/CoFeB(1 nm)/MgO/CoFeB(1.8 nm)/Ta(5 nm)/Ru(5 nm)構造をスパッタリング法により成膜し、(3)と同様の手法により直径 60 または 150 nm の磁気トンネル接合素子に加工した。電界による磁化反転時に素子中に流れる電流が発生する Joule 熱によるエネルギーを低減するため、MgO 膜厚を 1.0~2.8 nm で変化させ、その特性を調べた。

4. 研究成果

- (1) 磁気輸送測定を効率的に行う素子構造・プロセスの開発：(単位面積当たりの

CoFeB/MgO 界面の磁気異方性)と(単位体積当たりの CoFeB の反磁界エネルギー密度×CoFeB 膜厚)の大小関係により磁化容易軸が決まる。界面の磁気異方性の電界変調は 50 fJ/Vm 程度であり、一般的に印加可能な電界は変調量にして約 0.7 V/nm である。自発磁化を 1.4 T 有する CoFeB の磁化容易軸方向の切り替えの達成には、CoFeB の膜厚を 0.05 nm 以下で再現性良く制御する必要がある。CoFeB を傾斜膜とし、上述の設計した素子パターンを用いて 400 のホール素子を 1 ウェハ上に作製した。電界印加による磁化容易軸方向の切り替えを CoFeB/MgO において室温で達成した。今後本技術を用いた電界による磁性変調の様々な作製条件依存性の評価を予定している。

- (2) X 線磁気円二色性を用いた磁気異方性の起源の解明(雑誌発表③、学会発表④、④): Fe および Co の軌道磁気モーメントの CoFeB 膜厚依存性を測定した。CoFeB 膜厚が 0.85 nm と 2.00 nm の場合の軌道磁気モーメントの異方性を比較すると、0.85 nm の CoFeB の Fe の軌道磁気モーメントが特に大きい。これは、垂直磁気異方性の起源が CoFeB/MgO 界面の Fe の軌道磁気モーメントの異方性によるものであることを示しており、最先端スピントロクス材料素子において、重要な役割を担っている垂直磁気異方性の起源を初めて明らかにした。
- (3) 電界誘起強磁性共鳴を用いた素子加工後の磁気特性の評価(雑誌発表②、学会発表②、④、⑥): 直流電圧入力を印加せずに高周波電圧を入力し、強磁性共鳴をホモダイン検波した場合、強磁性共鳴スペクトルは、周波数掃引に対して反対称ローレンツ関数形状となる。共鳴周波数の外部磁界依存性を磁化歳差運動を記述する Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を用いてフィットした。実験結果は垂直磁気異方性をフィッティングパラメータとして理論曲線によりよく再現された。直流電圧入力を高周波電圧に重畳させた場合、スペクトルには反対称ローレンツ関数と対称ローレンツ関数、および周波数依存性のないオフセット電圧が重畳する。高周波反射係数と直流入力電圧の積の直流成分は複素磁化率の絶対値に比例し、対称ローレンツ関数として検出されたと考えられる。オフセット電圧は、素子抵抗のバイアス依存性に起因する反射係数の変化×高周波入力電圧の直流成分に起因すると考えられる。共鳴周波数の外部磁界依存性から磁気異方性を算出し、磁気異方性の直流電圧依存性を評価した。磁気異方性は直流印加電圧に対して線形に変化し、電界 1 V/nm 当たりの異方性磁界の変調量は 64 mT であった。本評価手法は、磁性の電界変調効果を磁気トンネル接合

素子加工後に評価する手法であり、今後最先端スピントロクス材料の特性評価手法として用いられる。

- (4) 超消費電力を低減する高性能磁気トンネル接合素子の設計(雑誌発表①、学会発表①): MgO 絶縁膜を厚くすることにより、トンネル抵抗は指数関数的に増大する。スピン注入磁化反転方式においてよく用いられる磁気トンネル接合と比較して約 3 倍の膜厚(2.8 nm)を持つ MgO 絶縁膜を用いることで、素子抵抗約 60 MΩ という 10,000 倍以上高抵抗の素子を作製した。外部面内磁界を印加しながら、電圧パルスを入力することにより、パルス電界継続時間依存性に対する磁化反転確率の明瞭な振動を観測した。従って高抵抗の磁気トンネル接合素子においても電界による磁化反転が可能であることを確認した。MgO 絶縁膜膜厚を増大することにより、Fouler-Nordheim(FN)効果等による素子抵抗のバイアス依存性が増大し、動作時の抵抗が低減することを明らかにした。一般的に用いられる 1.3 V/nm の印加電界を用いた場合、絶縁膜膜厚の増大によって達成できる消費電力の大きさは 200 fJ 程度であり、電界誘起磁化反転で必須となる数 100 afJ 程度の電荷蓄積のエネルギーと比較して数 1,000 倍大きい。この FN 効果は印加電圧の減少に対して指数関数的に抑制されるため、絶縁膜膜厚の増大に加えて、印加電界強度を低減することにより、消費電力を低減した。0.8 V/nm の電界印加により、6 fJ/bit という磁性メモリにおいて世界最小の動作時消費電力を達成した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① [Shun Kanai](#), Fumihito Matsukura, and Hideo Ohno, "Electric-field-induced magnetization switching in CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions with high junction resistance" *Applied Physics Letters* **108**, 192406 (2016). DOI: 10.1063/1.4948763 査読有
- ② [Shun Kanai](#), Martin Gajek, Daniel Worledge, Fumihito Matsukura, and Hideo Ohno, "Electric field-induced ferromagnetic resonance in a CoFeB/MgO magnetic tunnel junction under dc bias voltages," *Applied Physics Letters* **105**, 242409 (2014). DOI: 10.1063/1.4904956 査読有
- ③ [Shun Kanai](#), Masahito Tsujikawa, Yoshio Miura, Masafumi Shirai, Fumihito Matsukura, and Hideo Ohno, "Magnetic anisotropy in Ta/CoFeB/MgO investigated by x-ray magnetic circular dichroism and first-principles calculation," *Applied Physics Letters* **105**, 222409 (2014). DOI: 10.1063/1.4903296 査読有

[学会発表] (計 14 件)

- ① S. Kanai, Y. Nakatani, H. Sato, F. Matsukura, and H. Ohno, "Electric field control of magnetism and magnetization switching in CoFeB-MgO," 2016 Joint MMM-Intermag Conference (San Diego, United States, January 15, 2016)
- ② 金井 駿、仲谷栄伸、岡田篤、佐藤英夫、松倉文礼、大野英男、強磁性体の電界制御とその記録素子応用、第 20 回スピン工学の基礎と応用 (PASPS-20) (東北大学電気通信研究所、宮城県仙台市、2015 年 12 月 3 日~4 日)
- ③ 金井 駿、磁気異方性の電界制御とその応用、日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大学、大阪府吹田市、2015 年 9 月 16 日~19 日)
- ④ S. Kanai, M. Gajek, D.C. Worledge, F. Matsukura, and H. Ohno, "dc-bias Dependence of Ferromagnetic Resonance Spectra of a CoFeB-MgO based Magnetic Tunnel Junction," International School and Conference (SPINTECH VIII) (Basel, Switzerland, August 10-13, 2015)
- ⑤ 金井 駿、仲谷栄伸、岡田篤、松倉文礼、大野英男、強磁性薄膜における電界効果と磁化ダイナミクス、日本磁気学会 第 54 回スピントロニクス専門研究会、スピンの電圧制御の現状と将来展望 (中央大学駿河台記念館、東京都千代田区、2015 年 6 月 10 日)
- ⑥ 金井 駿、M. Gajek、D.C. Worledge、松倉文礼、大野英男、dc Bias Voltage Dependence of Magnetic Anisotropy in CoFeB/ MgO Investigated by Electric Field-Induced Ferromagnetic Resonance、the 62nd JSAP Spring Meeting, 2015 (Tokai University, Hiratsuka, March 11-14, 2015)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金井 駿(Kanai Shun)

東北大学 電気通信研究所 助教

研究者番号 : 40734546