

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「次世代エレクトロニクスデバイスの創出
に資する革新材料・プロセス研究」
研究課題「革新的プロセスによる金属／機能性酸
化物複合デバイスの開発」

研究終了報告書

研究期間 平成21年10月～平成27年3月

研究代表者：湯浅 新治
((独)産業技術総合研究所、研究セン
ター長)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

強磁性金属／機能性酸化物複合デバイスの開発目標に、(i)スパッタ成膜プロセスの開発、(ii)電圧印加磁化反転技術の開発、(iii)電圧駆動型スピントロニクス3端子素子の実現、の3項目を柱にして研究開発を行った。

(i)の項目では、産総研とキヤノンアネルバが連携して研究を行い、新しいスパッタカソードの開発、超低抵抗トンネル障壁の作製などを行った。また、産総研において原子状酸素源を用いたフェライト系酸化物超薄膜の作製プロセスを開発し、フェライト系酸化物／MgO 複合トンネル障壁スピントロニクス素子による大きな磁気抵抗効果(スピントロニクス素子としては室温で世界最高値)を実現した。

(ii)の項目は大阪大学が中心となって産総研と共同で遂行し、まず MgO-MTJ 素子構造を用いて強磁性金属超薄膜の垂直磁気異方性を電界(電圧)によって制御することに世界で初めて成功し、従来 100 V 程度の大きな電圧が必要だった磁気異方性制御を 1 V 以下の実用的な電圧によって実現した。さらに、超薄強磁性電極の MgO-MTJ 素子にサブナノ秒のパルス電圧を印加することによる双方向磁化反転を世界で初めて、しかも室温で実現した。また、高抵抗の MTJ 素子を用いて同様パルス電圧誘起の双方向磁化反転を実現し、現在最先端の電流書き込み型 MRAM (STT-MRAM) に比べても約 2 桁小さな消費電力で磁化反転 (MRAM の書き込み) が可能なことを実証した。これにより、超省電力の電圧書き込み型 MRAM (「電圧トルク MRAM」と命名) の可能性が示された。さらに、電圧書き込み層上に MgO キャップ層を積層した実用メモリ構造を用いて、電圧による磁気異方性変調効果の大幅な増大に成功し、電圧書き込み層の厚膜化による熱擾乱耐性(記憶保持期間)の改善が可能となった。また、マイクロ波電圧の印加による強磁性層の保磁力の変調に成功し、マイクロ波電界アシスト磁気記録の可能性が示された。

(iii)の項目では、産総研と大阪大の連携で電圧駆動型3端子スピントロニクス素子(電圧駆動スピントランジスタ)を新たに研究項目に追加し、大阪大学のシミュレーションにより、 10^4 を超える電力増幅率、1 を超える電圧増幅率、非常に大きな Fan-out が実現可能であることを示すとともに、産総研の3端子素子の試作研究により困難な3端子素子加工プロセスにも目処をつけることができた。また、電圧駆動スピントランジスタを作製するための要素技術として MgO 表面濡れ性改善技術の研究を行い、表面修飾による MgO 表面濡れ性の画期的な改善に成功した。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1.

概要:

磁性金属における電圧誘起磁気異方性変化の大きさは絶縁体/金属界面の電界強度によって決まるため、絶縁層を薄くすることにより、低電圧駆動が可能であると考えられる。そこで、これまでのポリミドと MgO の複合絶縁膜をピンホールのない MgO 単層に変えた。このことにより、従来は磁気容易軸のスイッチのために 200 V 以上の電圧印加が必要であったものを、数百 mV にまで下げることに成功した。

2.

概要:

電圧によって垂直磁気異方性変化を誘起した時の磁化ダイナミクスに着目し、サブナノ秒の超高速パルス電圧を用いた電圧誘起磁化反転の実現を目指して実験を行った。その結果、正電圧パルスにおいては初期磁化配置によらず磁化反転はが全く観測されなかったが、負電圧パルスにおいては 0.55 ns のパルス幅に対して双方向磁化反転の実現に成功した。また反転

確率の電圧パルス幅依存性を調べたところ明瞭な振動が観測され、磁化の歳差運動を反映したダイナミック磁化反転であることを実証した。初期の実験では面内磁化配置の MTJ を用いていたが、その後応用上重要となる垂直磁化配置の MTJ においても同様の電圧誘起ダイナミック磁化反転を実証した。

3.

概要:

強磁性共鳴ダイナミクスを利用したアシスト磁化反転の電圧駆動化に世界で初めて成功した。共鳴アシスト磁化反転は、次世代磁気記録の重要な書き込み技術として磁気記録分野で精力的な研究がなされているが、共鳴ダイナミクスの励起に大きな電流の印加が必要であることが課題となっている。本研究では電圧磁気異方性制御を利用することで同様なアシスト効果が得られることを実験実証し、飛躍的な低消費電力駆動化が可能な新しいアシスト磁化反転技術を提供した。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1.

概要:

金属/機能性酸化物複合構造の作製を目指し、高品質な極薄酸化物成膜を試みた。CoFeB/MgO/CoFeB-MTJ 素子では MgO 障壁層の膜厚が 1.0 nm より薄くなると MgO が as depo. 状態でアモルファス構造になってしまい、特性が劣化してしまうという問題があった。この問題に対して、超薄 MgO 層の結晶化を促進するために *in-situ* での加熱処理を可能にする機構を開発し、MgO 層の *in situ* 加熱により $1 \Omega \mu\text{m}^2$ という超低 RA の MTJ 素子において 176% という世界最高の MR 比を実現した。

2.

概要:

電圧による磁気異方性制御は金属磁性層の超薄膜化が必須であることから、ナノスケール素子に微細化した場合の熱安定性低下が課題となっている。この問題を解決するためには電圧効果の大きさを低下させることなく磁性薄膜の垂直磁気異方性を増大させることが必要となる。本研究では、STT-MRAM および電圧駆動型3端子素子の開発経緯から MgO 2重障壁トンネル接合における電圧磁気異方性制御に取り組み、Gbit 級メモリに対応可能な垂直磁気異方性と、100 fJ/Vm を超える大きな電圧誘起磁気異方性変化率を達成した。

3.

概要:

強磁性トンネル障壁層によるスピントラップ効果には MgO トンネル磁気抵抗素子を超える高い磁気抵抗効果が予測されており、これを利用したスピン増幅素子やスイッチング素子の実現が期待される。本研究ではスピントラップ効果が期待される強磁性酸化物 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 層と MgO 層を組み合わせたハイブリッド型トンネル障壁構造を有するトンネル磁気抵抗素子を開発し、低温で Fe/MgO/Fe(220%) を超える 270%、また室温でも 100% を超える抵抗変化率を得ることに成功し、強磁性酸化物層を有するトンネル磁気抵抗素子としては世界最高性能を達成した。

§3 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 「産総研」グループ(キヤノンアネルバ含む)

研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	湯浅 新治	産業技術総合研究所 ナノスピントロニクス 研究センター	研究センター長	H21.10～
	久保田 均	産業技術総合研究所 ナノスピントロニクス 研究センター	研究チーム長	H21.10～
	福島 章雄	産業技術総合研究所 ナノスピントロニクス 研究センター	副研究センター 長	H21.10～
	薬師寺 啓	産業技術総合研究所 ナノスピントロニクス 研究センター	主任研究員	H21.10～
	野崎 隆行	産業技術総合研究所 ナノスピントロニクス 研究センター	主任研究員	H23.4～ (大阪大グルー プから異動)
	塩田陽一	産業技術総合研究所 ナノスピントロニクス 研究センター	研究員	H26.4～ (大阪大グルー プから異動)
	甲野藤 真	産業技術総合研究所 ナノスピントロニクス 研究センター	主任研究員	H21.10～H21.10
*	臼田 悦子	産業技術総合研究所 ナノスピントロニクス 研究センター	契約職員	H21.10～
	松本 利映	産業技術総合研究所 ナノスピントロニクス 研究センター	研究員	H24.10～
○	恒川 孝二	キヤノンアネルバ	部長	H21.10～
	永峰 佳紀	キヤノンアネルバ	課長	H21.10～
	前原 大樹	キヤノンアネルバ	技術員	H21.10～H26.3
	西村 和正	キヤノンアネルバ	技術員	H21.10～
	細谷 裕之	キヤノンアネルバ	技術員	H21.10～
	奥山 博基	キヤノンアネルバ	技術員	H21.10～H24.3
	David D. Djayaprawira	キヤノンアネルバ	部長	H21.10～H22.11
	猿谷 武史	キヤノンアネルバ	技術員	H24.4～H25.3
	江村 藍	キヤノンアネルバ	技術員	H25.4～

研究項目

- ・スパッタ装置の作製と改造
- ・MBE装置の改造
- ・酸化物スパッタプロセスの開発

- ・成膜プロセスと材料の最適化
- ・酸化物表面の濡れ性改善技術
- ・電圧駆動型 3 端子素子
- ・基本材料と構造の探索
- ・不揮発性スピン・スイッチ素子の開発

②「大阪大」グループ

研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	鈴木 義茂	大阪大学	教授	H21.10～
*	田村 英一	大阪大学	特任研究員	H23.3～H24.3
	水落 憲和	大阪大学	准教授	H22.12～H24.3
	三輪 真嗣	大阪大学	助教 (H23/4～)	H23.10～
	塩田 陽一	大阪大学	大学院生	H21.10～H26.3
	村上 真一	大阪大学	大学院生	H22.6～H24.3
	野崎 隆行	大阪大学	助教	H21.10～H23.3
*	Frederic Bonell	大阪大学	特任研究員	H24.10～H25.10
	Frederic Bonell	大阪大学	招へい教員	H25.10～
	Duong Lam Duc	大阪大学	大学院生	H24.4～
	吉田 茂	大阪大学	大学院生	H24.4～H25.3
	高橋 良彰	大阪大学	大学院生	H24.7～H26.3
	縄岡 孝平	大阪大学	大学院生	H25.4～
	林 寛	大阪大学	大学院生	H25.4～
	松田 健彰	大阪大学	大学院生	H26.4～
	Pham Van Thach	大阪大学	特任研究員	H26.7～
	田村 英一	大阪大学	特任教授	H26.12～

研究項目

- ・トンネル素子における磁場アシスト電圧磁化反転の実現と電圧磁化反転の機構解明
- ・物質探索と電圧のみによる磁化反転検証（大阪大グループ）
- ・新酸化物素子の評価（大阪大グループ）
- ・電圧駆動型 3 端子素子（産総研グループ、大阪大グループ）

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

- ・電圧誘起磁気異方性変化の詳細な物理機構を解明するために、Spring8 および欧州 ESRF の放射光施設と連携して X 線吸収(XAS)および X 線磁気円二色性(XMCD)の研究を行っている。
- ・「革新的研究開発推進プログラム (ImPACT)」(プログラムマネージャーPM: 佐橋政司) の枠組みを活用して、産総研、東芝、大阪大、NIMS、東北大、富士通、京都大、Spring8 などの連携により、電圧トルク MRAM 実現を目指した基盤技術の研究開発を開始する予定となっている。

§ 3 研究実施内容及び成果

3. 1 スピンフィルタートンネル磁気抵抗素子の開発 (産総研)

(1) 研究実施内容及び成果

MgO 障壁層を用いたトンネル磁気抵抗素子は室温で数百%に及ぶ大きな磁気抵抗変化率(MR 比)を示すことから、超高密度ハードディスクドライブ用磁気センサー、および不揮発性固体磁気メモリの開発に大きく寄与してきた。一方で、スピンを利用した3端子増幅素子やスイッチング素子などの新しい機能性を有するスピントロニクスデバイスを実現するためには、1000%をはるかに超えるような大きな MR 比の実現が必要となる。

このような超巨大トンネル磁気抵抗効果を実現する1つのアプローチとして期待されているのが強磁性トンネル障壁層を介したスピンフィルター効果である。これは強磁性酸化物中のスピンに依存したトンネル障壁高さに起因する現象であり、スピントロニクスが誕生した初期から注目されてきた。しかしながら、トンネル障壁層となる極薄領域で高品質な酸化物薄膜を作製することが困難であるために、低温で 100%、室温に至っては数%程度と、期待される MR 比はいまだ実現されていない。

本研究では①原子状酸素を用いた新規酸化プロセス、および②MgO 障壁層とのハイブリッド構造化の2つの特徴を利用した新規トンネル磁気抵抗素子を開発することで、これまでのスピンフィルター素子を上回る MR 比の実現に成功した。

図1(a)に開発したトンネル磁気抵抗素子の模式図を示す。強磁性酸化物材料として着目したのが γ -Fe₂O₃ (マグヘマイト)である。Fe 酸化物の電気伝導特性は酸素組成に非常に敏感であり、全く酸素欠損の無い γ -Fe₂O₃ は強磁性絶縁体となるが、酸素欠損が存在すると導電性を示すようになり、Fe₃O₄は室温で導電物質となるため、酸化制御のテスト材料として最適である。また、本研究独自のアプローチとして、原子状酸素による酸化プロセスを導入した。この方法は酸化力が非常に強い一方でイオンによるダメージ等がないため、高品質な酸化物薄膜の形成が期待される。

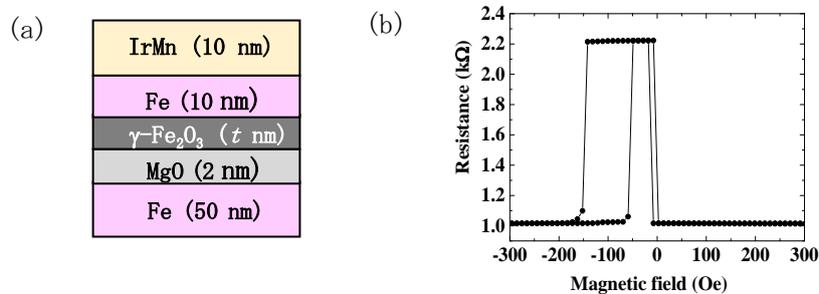


図1 (a)ハイブリッド障壁層型スピンフィルター素子の模式図、および(b)MR 曲線の一例

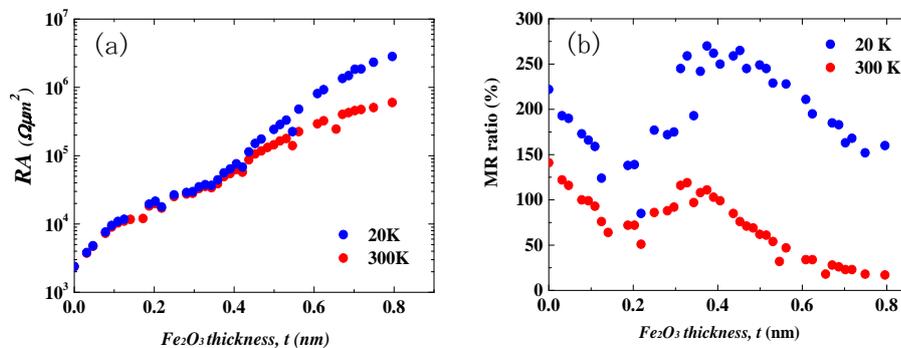


図2 ハイブリッド障壁層型スピンフィルター素子の(a)RA 値、および(b)MR 比のマグヘマイト層厚依存性

MgO 障壁層は、波動関数対称性フィルタリング効果とスピンフィルター効果を組み合わせた MR エンハンス効果への期待だけでなく、下部 Fe 層とマグヘマイト層の磁気的な結合を分断すること、およびマグヘマイト層の結晶成長用テンプレートとしても重要な役割を担っている。また、通常強磁性酸化層は角型性の低い磁気ヒステリシスを示し、反平行磁化状態が得られにくいため、MR 比の低下を招く。この問題を解決するために、本素子では上部 Fe 層をマグヘマイト層上に積層することで交換結合を利用して磁気特性改善を試みた。その結果、図 1(b)に示すように、理想的な並行・反平行磁化状態を有する MR 曲線を得ることに成功した。

図 2(a)、および(b)にハイブリッド障壁型トンネル磁気抵抗素子の抵抗×面積(RA)値、および MR 比のマグヘマイト層厚(t)依存性を示す。RA 値がマグヘマイト層厚に対して指数関数的に増大していることから、導電性を有する Fe₃O₄ ではなく、トンネル障壁層として機能するγ-Fe₂O₃ が形成されていることが確認された。特筆すべきは低温での MR 比であり、マグヘマイト層厚約 0.4nm において、Fe/MgO/Fe(220%)を超える約 270%の MR 比エンハンス効果が観察された。マグヘマイト層が薄い領域で一旦 MR 比が低下している点を考慮すると、MgO 障壁層によるコヒーレントトンネリング効果だけではこのエンハンスは説明できず、マグヘマイト層を介したスピンフィルター効果に起因するものであると考えられる。室温においては、このエンハンス効果は弱まっているものの、特定の膜厚領域では 100%以上の MR 比が得られている。これらの値は表1に比較した通り、強磁性酸化層をトンネル障壁層に導入した磁気抵抗素子としては世界最高特性である。

表1 スピンフィルター素子の特性比較

構造	MR@L.T.	MR@R.T.	Ref.
Pt/CoFe ₂ O ₄ /AlO _x /Co	-18%	-3%	A.V. Ramos, APL 2007
Pt/CoFe ₂ O ₄ /MgO/Co	-30%	-3%	Y. K. Takahashi, APL 2010
CoFe ₂ /CoFe ₂ O ₄ /Ta	124%	0.1%	N. Tezuka, JMMM 2012
LaSrMnO/NiFe ₂ O ₄ /Au	50%	-	U. Luders, Adv. Mat. 2006
Fe/MgO/γ-Fe ₂ O ₃ /Fe	270%	130%	This study

温度依存性、およびバイアス電圧依存性の詳細な解析より、マグヘマイト層が厚い領域における MR 比の劣化はホッピング伝導に起因する、スピンに依存しないトンネル伝導の寄与が原因であることが分かった。ホッピングサイトの起源については現在のところ不明であるが、恐らく今回作製したマグヘマイト層中にはまだ酸素欠損によるホッピングサイトがわずかに残存しており、膜厚が厚い程その影響が顕著に出ているためと考えられる。酸化条件のさらなる最適化によりこのホッピングサイトを抑制することができれば、室温でも Fe/MgO/Fe を超える高い MR 比が実現可能であると期待され、ハイブリッド障壁層型スピンフィルター素子の高いポテンシャルが示された。

3. 2 極薄 Fe 酸化層を用いた濡れ性改善技術の開発(産総研)

(1)研究実施内容及び成果

本研究は上記のスピンフィルター素子開発の過程において偶発的に見出された成果である。

トンネル磁気抵抗素子は通常、磁化フリー層/MgO/磁化固定層のサンドイッチ構造を基本とし、低駆動電力化においては、情報を記憶する磁化フリー層の薄膜化が1つの指針となっている。この磁化フリー層を MgO の上に配置する構造をトップフリー構造、下に配置する構造をボトムフリー構造と呼ぶ。トップフリー構造の場合、①強固な磁化固定層が得られる、②加工プロセスが容易である、③磁化固定層からの静磁気的影響を抑制できるといったメリットがある。しかしながら、MgO の表面エネルギーが Fe などの 3d 遷移金属よりも小さいことに起因して MgO 上への Fe 合金の濡れ性は非常に悪く、ある程度以上薄膜化すると島状成長となり、その結果磁気特性も劣化することが知られている。本研究では、MgO

上に Fe を形成する際に、非常に薄い Fe 酸化物層を挿入することで濡れ性が劇的に改善することを見出した。

濡れ性改善効果を確認するために作製した試料の模式図を図 3(a)に示す。トンネル障壁層を想定した MgO(2nm)上に直接、および極薄 Fe 酸化物層を挿入した後に超薄膜 Fe 層を形成した場合の結晶性、および平坦性を反射高速電子線回折(RHEED)、および暗視野 STEM 観察により行った。

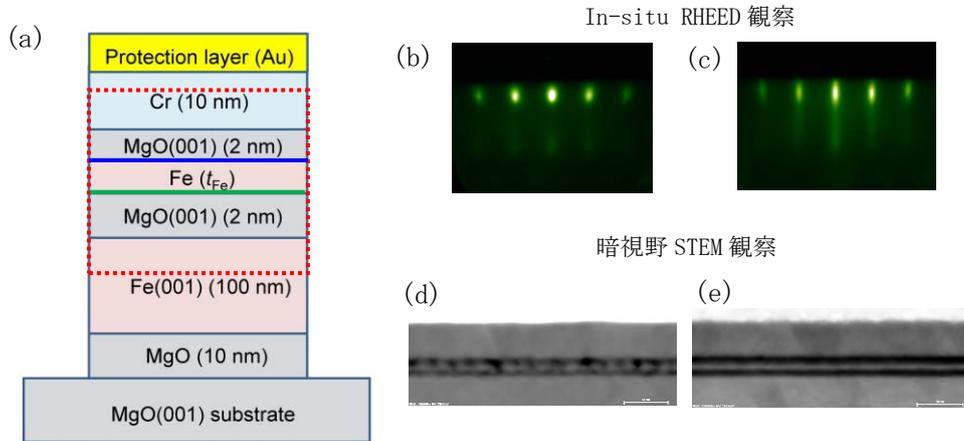


図 3 (a) 試料の断面構造。緑実線に極薄 Fe 酸化物層を挿入している。青実線は(b)、(c)の RHEED 観察面。赤点線枠は、(d)、(e)の暗視野 STEM 観察視野。

(b)MgO 上、および(c) Fe 酸化物 0.3nm 上の超薄膜 Fe(1 nm)の RHEED 像、
(d)MgO 上、および(e) Fe 酸化物 0.3nm 上の超薄膜 Fe(0.8 nm)の暗視野 STEM 像

図(b)に示すように、MgO 上に直接 Fe1nm を形成した場合、島状成長を反映したスポット状の RHEED 像が得られたのに対し、Fe 酸化物層 0.3nm を挿入した場合には明らかな結晶性・平坦性の改善を示すストリークパターンが得られた(図 3(c))。より直接的に平坦性の改善効果を確認するために暗視野 STEM 観察を行った結果を(d)、(e)に示す(図 3(a)赤点線領域の視野のみ)。中央の黒色の領域が MgO であり、その中に含まれる白色層が超薄膜 Fe 層である。MgO 上に直接 Fe(0.8 nm)を形成した場合(図 3(d))は、RHEED 観察結果が示唆した通り島状となっており、MgO との境界も不明瞭になっていることが分かる。一方、わずか 0.3 nm の極薄 Fe 酸化物層を挿入するだけで超薄膜 Fe 層は連続膜となっており、明瞭な改善効果が確認された。

この結晶性・平坦性改善効果は磁気特性にも大きな影響を与える。図 4 に(a) MgO 上に直接超薄膜 Fe を成長させた場合、および(b) γ -Fe₂O₃ (0.2 nm)を挿入した後に超薄膜 Fe を成長させた場合の面内磁化曲線の Fe 層厚依存性の例を示す。MgO 上に直接成長させた場合は、RHEED、および暗視野 STEMでの観察結果から予測される通り、1nm 以下では島状成長の影響により超常磁性となっている。一方、極薄マグヘマイト層を挿入した場合にはこの特性は劇的に変化し、わずか 0.6nm の場合でも保磁力を有するヒステリシスが得られており、さらに 0.4nm まで超薄膜化した場合においても強磁性ヒステリシスが維持されていることが分かる。

より詳細な比較を行うために、保磁力の Fe 層厚依存性を各マグヘマイト層厚に対してプロットした結果が図 4(c)である。MgO 上の直接成長では 1nm 以下で超常磁性となるのに対し、マグヘマイト層を 0.2nm 以上挿入した場合に明瞭な改善効果が見られ、Fe 層厚 0.4nm まで強磁性が維持されている。マグヘマイト層を挿入した場合の共通の特徴として、保磁力が 0.9nm 程度でピークを取る傾向が見られた。これは、Fe 層厚の減少とともに、Fe とマグヘマイト層間の強磁性的界面交換結合の影響が強くなるために一旦保磁力が上昇するものの、ある程度の膜厚以下では Fe 層の極薄膜化によるキュリー温度低下の影響が表れて低下するものと理解される。いずれにしても、わずか 0.2nm と非常に極薄のマグヘマイト層

挿入による劇的な磁気特性改善効果は初めて見出された現象である。

この他、Ni フェライトや Co フェライト等、その他のフェライト材料系においても超薄膜 Fe に対する濡れ性改善効果を確認した。また、MgO 上に Co 層を成長させた場合、通常 hcp 構造が安定であり、1nm 以下の極薄領域に限って非平衡 bcc 相が得られることが知られているが、平坦な極薄層を形成することは通常困難である。一方、マグヘマイト挿入による濡れ性改善効果を利用した場合、1nm 程度の非平衡 bcc-Co 層の形成が可能であることも見出した。非平衡 bcc-Co は MgO トンネル磁気抵抗素子に適用した場合に、Fe と比較してより高い抵抗変化率を示すため重要な材料であり、前節のスピントラッキング効果と組み合わせることで磁気抵抗特性を改善する高い可能性を秘めていると期待される。本成果に関しては、2015 年応用物理学会春季学術講演会にて Poster Award を受賞した。

これらの技術はキャノンアネルバグループに技術移転を進め、スパッタリング成膜においても適用可能であることを確認した。極薄フェライト層を利用した濡れ性改善効果はスピントロニクスデバイスの磁気特性・磁気抵抗特性を制御する新しい界面エンジニアリングを提供すると期待される。

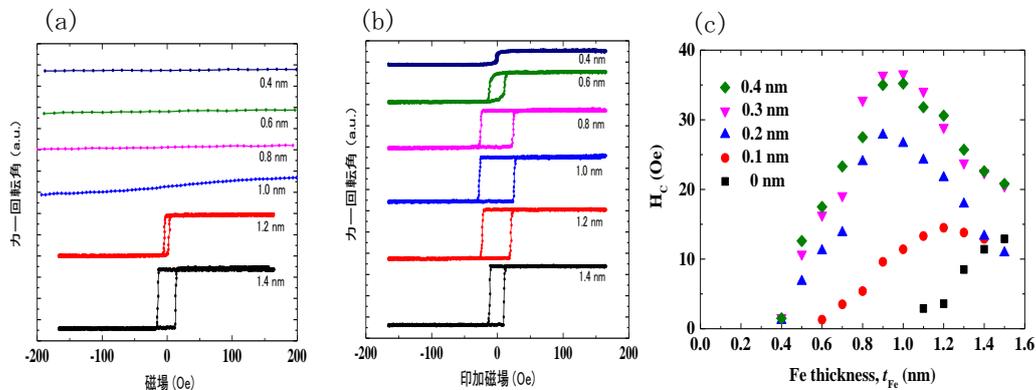


図 4 (a)MgO 上直接成長、および(b)MgO/Fe 間にマグヘマイト 0.2nm を挿入させた場合の超薄膜 Fe 層の磁気ヒステリシス例。(c)各マグヘマイト挿入構造における超薄膜 Fe 層の保磁力変化

3.3 2重障壁トンネル磁気抵抗素子における電圧磁気異方性制御(産総研)

(1)研究実施内容及び成果

本研究は大阪大学との共同研究で開発している電圧駆動型3端子素子の基本構造となる、MgO2重障壁構造における電圧効果の基礎実験として着手したものであるが、後述の理由から2端子素子における電圧効果としても重要な意義を持つ。

電圧による磁気異方性制御は、現在のスピントロニクスの中核技術であるトンネル磁気抵抗素子に容易に導入できる点で低消費電力スピン制御技術の最有力候補として期待されているが、実用化する上で課題となっているのが熱安定性である。磁気メモリでは磁化の向き(例えば上向き・下向き)を2値情報として記録するが、その2状態間の磁気エネルギー障壁が小さいと熱エネルギーによって磁化の向きが揺らいでしまい、記録情報が失われてしまう。この磁気エネルギー障壁の高さは記録層の垂直磁気異方性の大きさと素子の体積によって決まるため、超薄膜化を必要とする電圧磁気異方性制御は通常の電流駆動型よりも素子の微細化による熱安定性の低下が強く出ることになる。この問題を回避するためには、磁気異方性が高く、かつ電圧効果も大きい材料・構造の開発が必須となる。

本研究ではその1つのアプローチとして、MgO2重障壁構造に着目した(図 5(a))。この構造は電流駆動型素子の熱安定性向上を目的として産総研で開発されたものであり、FeB 層が有する垂直磁気異方性が MgO 層との界面に起因する点に着目し、界面2層化により異方性増強する試みである。ただし、本研究では電圧効果を目的としているため、下部側 MgO 層が電流駆動型と比較して十分に厚い(2.5nm)こと、および、FeB 層の膜厚が若干薄

い(1.5nm)ことが特徴となっている。上部側 MgO 層は下部と比較して薄く(1.5nm)設計されており、さらにキャップ層とのミキシングにより低 RA 値となっているため、電圧効果はほぼ下部側 MgO/FeB 層界面で生じる。

図 5(b)に本素子におけるトンネル磁気抵抗曲線から算出した界面磁気異方性エネルギーのバイアス電圧強度依存性の結果を示す。まず、バイアス電圧零における垂直磁気異方性エネルギーは上部を Ta キャップとした場合($\sim 150\mu\text{J}/\text{m}^2$)と比較して約2倍となっており、期待通りの垂直磁気異方性のエンハンス効果が得られた。この値は $\Phi 30\text{nm}$ の MTJ 素子においても熱安定性約 $50k_B T$ を維持できる数値となっている(表2参照)。また、注目すべきは正バイアス方向における電圧効果の傾きである。単位電界当たりの界面磁気異方性エネルギー変化量は約 $110 \text{ fJ}/\text{Vm}$ となっており、これは我々が Au/FeCo/MgO 構造において従来報告してきた数値の約3倍、最近報告された Ta/CoFeB/MgO 構造における値と比較しても2倍に相当する。このような電圧効果のエンハンスが得られた起源は、原子レベルで平坦な単結晶 MgO 障壁層を用いたことに加え、従来下部側に配置されていた電圧駆動層を上部側に配置することにより界面への非磁性元素の偏析効果が抑制され、理想的に清浄な磁性層/誘電層界面が得られたことに起因すると考えられる。

一方、負バイアス側の特性は従来観察されていた結果と大きく異なる。例えば FeB 上層を Ta 層に置き換えた場合、垂直磁気異方性はバイアス電圧に対して符号をまたいで線形に変化し、負バイアス側では垂直磁気異方性は低下する。一方、本実験結果では、負バイアス方向においても、傾きは大幅に低下するものの異方性の増大が見られた。この異常の起源については現在も調査中であるが、このような偶関数的な異方性変化はスピントルクと電圧効果を組み合わせる場合に有効となる可能性があり、電圧効果の可用性を高めると期待している。

以上の成果により、表2に示す通り従来構造と比較して高い熱安定性と大きな電圧効果を両立する素子開発に成功し、電圧磁気異方性制御のスケーリングに重要な知見を与え、電圧駆動型3端子素子の開発に道筋をつけた。

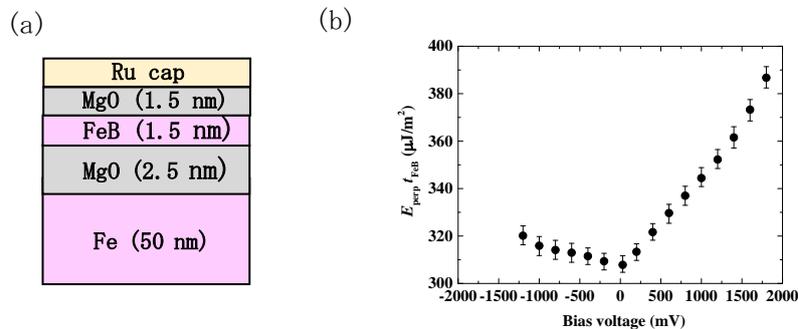


図 5 (a) 2重障壁型電圧駆動トンネル磁気抵抗素子の構造模式図、(b) FeB 中間層の垂直磁気異方性エネルギーに対するバイアス電圧印加効果

表2 熱安定性、および電圧効果の比較表

構造	熱安定性($\Phi 30\text{nm}$ を仮定)	電圧効果の傾き(fJ/Vm)	
Au/FeCo(0.5nm)/MgO	9	37	T. Nozaki APL2010
Ta/CoFeB(1.2nm)/MgO	20	50	W. Wang, J.Phys.D2013
MgO/FeB(1.5nm)/MgO	51	110	This study

3. 4 高周波電圧アシスト磁化反転技術の開発(産総研)

(1)研究実施内容及び成果

磁化反転に必要な電力を低減するための1つのアプローチとして注目されている技術に、マイクロ波アシスト磁化反転(MAMR)が挙げられる。これは、外部磁界により磁化方向を反転させる際に、磁化の共鳴周波数に一致するマイクロ波(高周波磁界)を印加することによ

って強磁性共鳴ダイナミクスを励起し、磁化反転の磁気エネルギー障壁を見かけ上低くすることで反転磁界を低減する方法であり、次世代磁気記録の書き込みアシスト技術として注目が高まっている(図 6(a)概念図参照)。しかしながら、通常 MAMR 効果が観測されるのに十分な共鳴ダイナミクスを励起するためには数 mA~数十 mA に及ぶ大電流印加が必要であり大きな電力消費を要する。本研究ではこの課題を解決し得る新しいアプローチとして、電圧駆動型のアシスト磁化反転の原理実証を試みた。

高周波電圧印加を容易に実現するため本実験では電圧駆動型トンネル磁気抵抗素子を用いた(図 6(b)参照)。Cr / 垂直磁化 Fe 参照層 / MgO(2.5 nm) / Fe(0.3 nm)/FeB(1.5 nm) / Ta cap 構造からなるトンネル磁気抵抗素子を MBE およびスパッタ成膜により作製した。Fe/FeB 積層が電圧磁気異方性制御を行う垂直磁化フリー層である。RA 値、および素子サイズを $430\text{k}\Omega\mu\text{m}^2$ 、 $2\times 6\mu\text{m}^2$ と電流によるトルクの影響を無視出来るように大きく設計した。この素子に高周波電圧を印加すると、周期的に変化する垂直磁気異方性をトルクとして強磁性共鳴ダイナミクスが励起される。そこで、トンネル磁気抵抗曲線を測定する際に、それと重畳させる形でさまざまな周波数、強度を有する高周波電圧を印加し、フリー層の反転磁界への影響を調べた

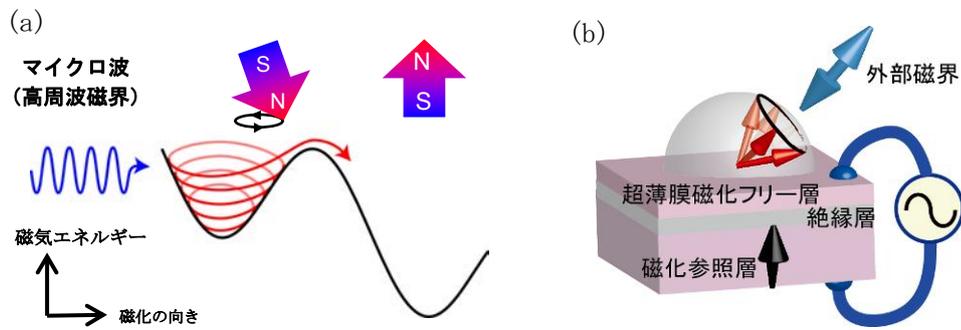


図 6 (a) マイクロ波アシスト磁化反転の概念図、および(b)高周波電圧アシスト磁化反転用素子の模式図。

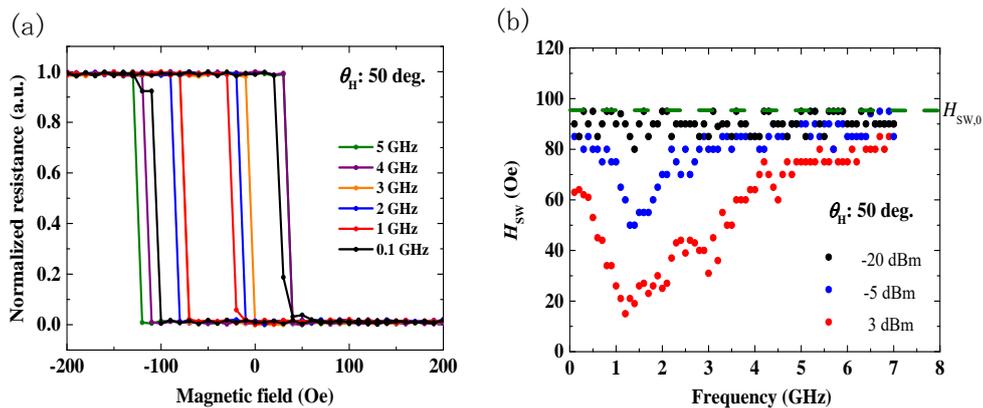


図 7 電圧駆動型トンネル磁気抵抗素子を用いた高周波電圧アシスト磁化反転の実験例。
(a) さまざまな周波数の高周波電圧印加 (3 dBm) 下におけるフリー層のマイナーMR 曲線、
(b) フリー層反転磁界の印加高周波電力強度および周波数依存性

図 7(a)に外部磁界仰角 50 度、印加高周波電力 3 dBm(電圧実効値 315 mV)の条件下で測定したマイナーMR 曲線(フリー層の磁化反転ヒステリシス)の印加周波数依存性を示す。フリー層の反転磁界は印加周波数に大きく依存し、1GHz において最も小さくなっていることが分かる。より詳細な反転磁界(H_{SW})の印加高周波電力強度、および周波数依存性を図

7(b)にまとめた。印加電力が-20 dBm と小さい場合には反転磁界の周波数依存性はほとんど見られなかったのに対し、-5 dBm、3 dBm と増大させるにつれて明瞭なアシスト効果が表れ、3 dBm では1 GHz において最大 80%もの反転磁界低減率を達成した。この時磁気抵抗素子に流れている電流は 0.1mA 以下と電流駆動型と比較して 10 分の 1 以下であり、電圧駆動型の有効性が確認された。

現在のところ電圧駆動フリー層が有する垂直磁気異方性は磁気記録や磁気メモリ素子で求められる値と比較して非常に小さく、また、磁気記録に適用するためには磁気抵抗素子型ではなく、書き込み磁気ヘッドからの高周波電界印加を必要とするなど、実用デバイスの要求とは大きな隔りがある。しかしながら、電圧による超低消費電力アシスト磁化反転が原理的に可能であることを初めて実験実証し、新しいアプローチの可能性を示した点では重要な意味を持つと考えている。

3. 5 大阪大学グループへの素子提供(産総研)

(1)研究実施内容及び成果

上記の研究に加えて、大阪大学との共同研究の中で特にエピタキシャル成長を特徴とする電圧実験用素子の作製を担当し、試料提供を行った。主な目的と使用用途は以下の通りである。実験結果の詳細については大阪大学グループの報告に譲る。

① 電圧磁気異方性制御の起源解明を目指した軌道磁気モーメント測定

電圧による垂直磁気異方性変化は界面電荷蓄積による電子占有状態変化によると理論的に説明されているが、その直接的な証拠はまだ得られていない。大阪大学では Spring-8 での XMCD 測定による軌道磁気モーメント解析を通して起源の解明に取り組んでいる。産総研では、これまでに大きな電圧効果が観察されている FePd 合金に着目し、原子相互積層により膜厚や積層構造を精密に制御した $[\text{Fe}/\text{Pd}]_n$ 多層膜を作製した。図 8(a)は $n=4$ 積層(約 1.4nm)の場合の RHEED 像であり、超薄膜領域で良好なエピタキシャル膜が得られていることが分かる。この $[\text{Fe}/\text{Pd}]_n$ 多層膜に MgO/Polyimide 層からなる絶縁層を適用した電圧駆動素子を作製し、大阪大学に提供した。

② 面内1軸異方性の電圧制御

本プロジェクトを推進する中で、将来的にサラウンドゲート型の電圧駆動3端子素子が重要となることの方針が得られた。ただし、サラウンドゲートによる側面からの電圧印加により垂直異方性制御が可能であるかは必ずしも自明ではなく、その実証が重要な鍵となる。しかしながらこのような効果が期待される素子は 10nm Φ オーダーの極微小素子であり、実素子での実証は非常に困難である。そのため、まず原理実証として対称性が等価な面内1軸異方性の電圧制御に取り組むこととなった。産総研では、面内1軸異方性を有する系として、MgO(110)基板/Cr(211)/hcp-Co(1-100)/構造に着目した。図 8(b)は Co 層厚約 1nm の場合の RHEED 像であり、良好なエピタキシャル成長を示すストリークパターンが観察された。また、磁気光学測定により 1nm 程度の超薄膜 Co において良好な1軸異方性を得ることに成功した。この技術を適用した電圧駆動素子を作製し、大阪大学に提供した。

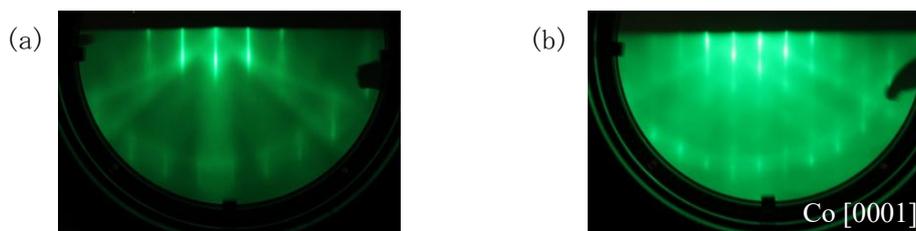


図8 (a)原子相互積層型 $[\text{Fe}/\text{Pd}]$ 超薄膜(約 1.4 nm)、および(b)超薄膜 hcp-Co(約 1 nm)の RHEED 観察像

3. 6 電圧駆動3端子素子(産総研・前半の一部は阪大と共同研究)

(1)研究実施内容及び成果

本サブテーマは、不揮発性を有するスピントロニクス版FETの実証を最終目標としている。まず本研究では、電圧による磁化制御技術(電圧誘起磁気異方性変化)を利用した3端子スピントランジスタの提案とその微細構造の作製を行った。

我々が提案した電圧駆動型3端子素子のデバイス構造概念図を図9に示す。素子はドレイン、ソース、ゲートの三つの端子を持つ。ドレイン端子の下に磁化固定層を上部にした磁気トンネル接合(MTJ)素子があり共通の磁化回転層からソース端子をとっている。その磁化回転層の下にMgO絶縁膜を挟み、ゲート電極が配置されている。電圧効果を得る為には磁化回転層膜面内の磁化を面直方向に一定角傾ける必要があるため外部磁界を印加する。その状態でゲート・ソース間に電圧

を印加すると、MgO絶縁膜を挟んだ磁化回転層界面に電界が生じる。それにより磁化回転層界面において磁気異方性が変化し、回転層磁化が動く。回転層の磁化と磁化固定層の磁化の相対角が変化するためMTJ部位の抵抗が増減し、ドレイン・ソース間の電力を制御することができる。結果としては、ゲート電圧によってドレイン側の出力電力が制御でき、この電力変化量がゲートに印加された電力より大きければこの素子は増幅作用を持ったスピントランジスタとして動作する。また、パルス電圧による磁化回転層の磁化反転が可能になれば、不揮発性を有するスイッチングの機能も持つことになる。

次に微細構造作製について述べる。シリコンから作製するFETと異なり、電圧駆動型3端子素子は積層型構造を持つMTJ膜から作製するため、三端子構造の作製が原理的に困難となる。特に、厚さが数nmオーダー程度の磁化回転層からソース電極を取り出し、ドレイン・ソース間の導通を取ることが困難とされていた。こうした課題を解決するため、まず

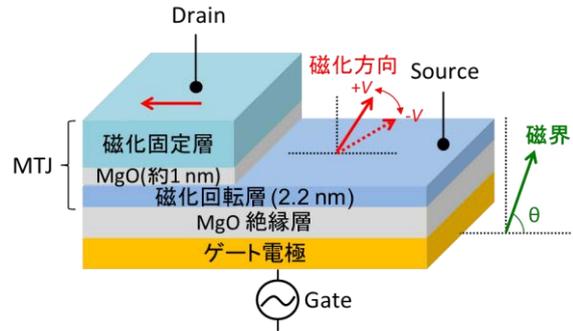


図9 電圧誘起磁気異方性変化を利用した三端子スピントランジスタの概念図

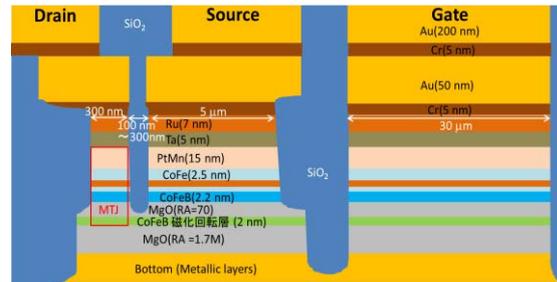


図10 素子断面概念図

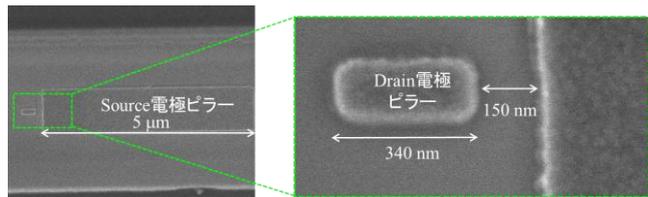


図11 ドレイン・ソース部分のSEM画像

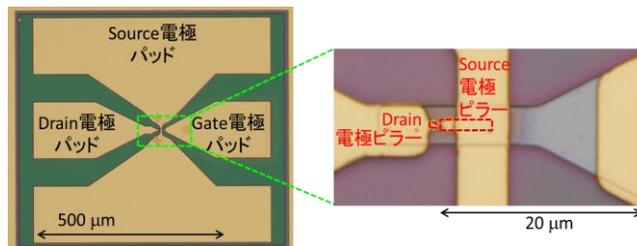


図12 完成した素子の光学顕微鏡写真

素子微細加工工程の考案を行い、次にそれに則った構造作製を行った。

我々が考案した工程で作製される素子の断面の設計図を図 10 に示す。本研究で使用した積層膜の構造は以下の通りである。Si 基板 / バッファ層(100~120) / Ta (5) / CrB (2.5) / MgO (RA : $1.7 \text{ M}\Omega\mu\text{m}^2$) / CoFeB (2) / MgO (抵抗面積積 RA : $70 \text{ }\Omega\mu\text{m}^2$) / CoFeB (2) / CoFe (0.8) / Ru (8.5) / CoFe (2.5) / PtMn (15) / Ta (5) / Ru (7) (単位: nm)。図 10 において、左端の電極がドレインであり、その下に MTJ 素子にあたる部分が配置されている。MTJ 素子は横 100 nm ×縦 300 nm の矩形である。中央部のソース電極は磁化回転層を共有する形でドレイン電極と導通している。このソース電極は、ドレイン電極下の MTJ 素子と同様の膜構造を持っているが、MTJ 部分に比べ十分面積が広い($1 \text{ }\mu\text{m}$ × $5 \text{ }\mu\text{m}$)ことから単純な金属電極であるとみなすことができる。右端のゲートは下部ボトム層を通じてドレイン及びソースと繋がっている。こちらもソース電極と同様面積が十分広い($30 \text{ }\mu\text{m}$ × $30 \text{ }\mu\text{m}$)ことから単純な金属電極とみなせる。

実際に作製した素子のドレイン・ソース部分の SEM 画像を図 11 に示す。ほぼ設計通りの形状に加工できた。特に、ドレイン・ソース間に数百 nm オーダーのギャップが実現されている点が肝要である。このようにギャップ間隔を狭くするのは、ドレイン・ソース間の抵抗のうち、磁化回転層薄膜に起因する寄生抵抗値を抑えるためである。

完成した素子の光学顕微鏡写真を図 12 に示す。伝導特性の評価をするためには図 12 左の写真の通り数百ミクロンオーダーの電極パッドが必要であるのに対し、ドレイン・ソース間のギャップが数百 nm オーダーしかない。図 12 右の写真のように、ドレイン・ソースそれぞれに対して電極の引き伸ばしを行うことで、それぞれから導通を取ることができるようにした。

ドレイン・ソース間の電気抵抗測定の結果の例を図 13 に示す。仮に、ドレイン・ソース間のギャップにおいて、エッチングが浅く MgO 層に達していなかった場合は MgO バリアをトンネルすることなく上部金属層部分のみを伝導するためショートとなるはずである。逆にエッチングが深すぎた場合は、磁化回転層が切れてしまい、絶縁となるはずである。そうした加工不良の特徴は図 13 には見られない。また、MTJ 部分に起因する磁気抵抗曲線まで図 13 で確認することができる。さらに、同一基板上に作製された素子のドレイン・ソース抵抗の分布は $1500 \text{ }\Omega$ ~ $2000 \text{ }\Omega$ で、 RA から見積もられる抵抗値($1400 \text{ }\Omega$)に近かった。磁化回転層薄膜に起因する寄生抵抗値も抑えられていることが分かった。以上の研究結果から、最も困難とされたドレイン・ソース間の導通を取るとい課題を解決し、電圧駆動型3端子素子実証のための要素技術の一つである3端子素子構造作製に成功したと言える。

続いて、電圧効果を得るための多層膜構造の改善に取り組み、図 14(a)のような素子の作製を行った。図 14(b)は実際に作製した素子の光学顕微鏡図である。図 14(c)はソース、ドレイン部の加工を行った後の SEM 観察像であり、図 14(b)の丸で囲った部分に相当する。ここでソース部の抵抗値はドレイン部の抵抗値に比べて十分無視できるようにドレイン部に比べて素子サイズを大きく設計している。

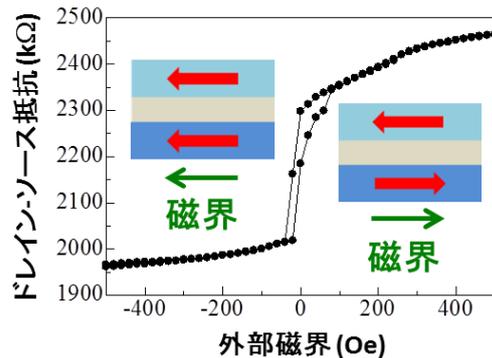


図 13 ドレイン・ソース間抵抗の磁界依存性

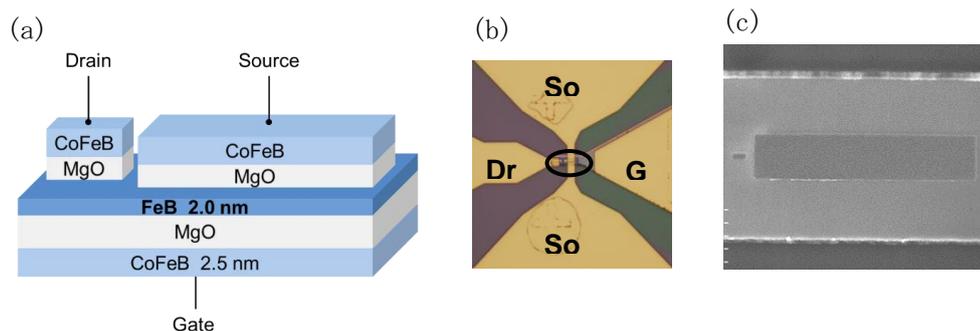


図 14 (a) 電圧駆動 3 端子素子の概念図、(b) 作成した素子の光学顕微鏡図、(c) ソース部とドレイン部の SEM 写真。素子サイズはそれぞれ $1.0 \times 5.0 \mu\text{m}^2$ (ソース)、 $0.1 \times 0.3 \mu\text{m}^2$ (ドレイン) でギャップは $0.25 \mu\text{m}$ である。

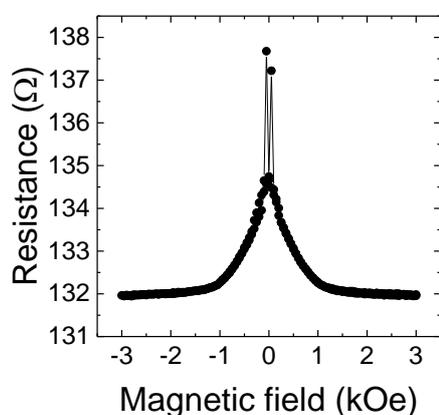


図 15 面内磁場下におけるソースドレイン間の磁気抵抗曲線

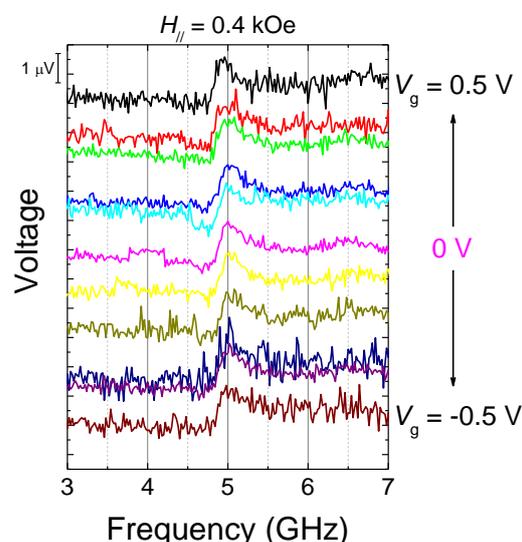


図 16 様々なゲート電圧下におけるソースドレイン間のホモダイン検波スペクトル

次に作成した素子において、ソースドレイン間の磁気抵抗曲線を面内磁場下において測定した。印可電圧は 0.05 V である。図 15 が示すように、フリー層の磁化容易軸は膜面垂直方向であるが、磁場 1.0 kOe 程度で面内に飽和しているのがわかる。次に電圧効果を確認するためにゲート電圧 V_g を加えながら、ホモダイン検波測定を行った。図 16 に面内磁場 0.4 kOe において様々なゲート電圧条件下で測定したホモダイン検波スペクトルを示す。まず 5 GHz 付近に磁気共鳴が観測された。ソースドレイン間の抵抗値は電圧効果用の素子に比べると小さいため、強磁性共鳴は電圧トルク及びスピントランスファートルクによって励起されたものと考えられる。次に共鳴周波数に着目すると $V_g = 0.5 \text{ V}$ の時、 $V_g = 0.0 \text{ V}$ に比べると低周波数側にシフトしているのがわかる。これはゲート電圧によりフリー層の垂直磁気異方性が変化したことを示唆しており、3 端子構造において電圧効果が誘起されたとはいえるが、得られた効果は期待される値よりも非常に小さかった。

3 端子構造のままでは電圧効果の定量的な評価が難しいため、3 端子素子用多層構造を用いて 2 端子素子を作製し、磁気抵抗曲線のバイアス電圧依存性から電圧磁気異方性変化の観測を試みた (図 17)。これまでの報告と比較して半分程度であったが、 1 V 印加時で $8 \mu\text{J}/\text{m}^2$ の異方性変化が確認された。増幅効果を得るには最適化が必要であるが、フリー層の膜厚設計等により電圧で磁化を面内-面直間遷移させるゲート制御は実現可能であると考えられる。

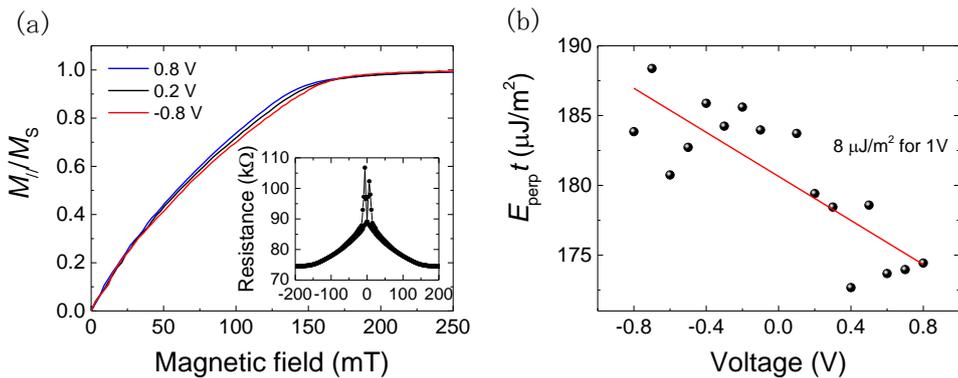


図 17 (a) 二端子構造における面内磁場下の磁気抵抗曲線から求めた磁化曲線。挿入図は 0.2 V 下における磁気抵抗曲線。(b) 垂直磁気異方性エネルギーのバイアス電圧依存性。

最後に実験で得られたパラメータを元に電圧駆動型スピントランジスタの性能予測を行った。図 18 にスケーリングおよび MTJ の RA に対して期待されるパワーゲインを示した。ここで電圧効果に関しては、ゲート電圧で磁化が面内-面直遷移するものと仮定している。サイズが小さくなるにつれてゲート抵抗値が大きくなるため、大きなパワーゲインが得られることがわかる。ゲート抵抗値、および TMR 比はそれぞれ $1\text{M}\Omega\mu\text{m}^2$ 、および 100%と仮定している。現可能なドレイン部 MTJ の RA 値として $1\ \Omega\mu\text{m}^2$ を仮定すると、数 10nm スケールへの微細化により 10^4 以上の非常に大きなパワーゲインが得られることが示された。今回の試作では 3 端子構造において大きな電圧効果が観測されなかったためパワーゲインの実証にまで至らなかったが、その 1 つの要因は 3 端子化のエッチングプロセスにおいてチャンネル(フリー)層にわずかながら酸化等のダメージが入り、ゲート/チャンネル界面の状態にまで影響を与えたと予測される。そのため、3 端子素子における増幅機能を実現するためには in-situ での超低ダメージエッチングプロセスの開発が今後の重要な鍵になると考えている。

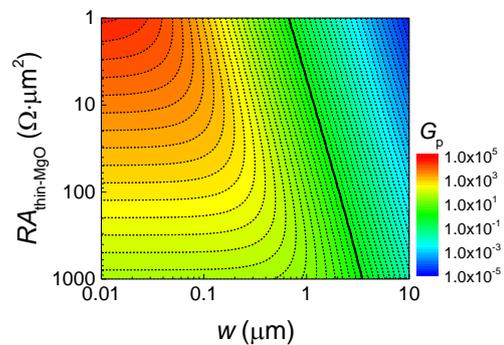


図 18 電圧駆動型スピントランジスタにおいて期待されるパワーゲイン

3.7 電圧誘起強磁性共鳴を利用したマイクロ波検波器(産総研)

(1) 研究実施内容及び成果

2012 年に産総研の野崎らによって電圧誘起強磁性共鳴が実証された。しかしながら当時の MTJ 素子は MR 比が 20%程度と小さく、さらにピン層を有していなかったため、マイクロ波検波器として見ると出力が小さかった。本研究では、スパッタ法を用いて成膜したピン層/MgO 障壁層/フリー層からなるトンネル磁気接合素子を用いることで、電圧誘起強磁性共鳴を利用した高出力可能なマイクロ波検波器の開発を試みた。

図 19 は $\text{IrMn}(10\text{ nm}) / \text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}(2\text{ nm}) / \text{Ru}(0.7\text{ nm}) / \text{Co}_{16}\text{Fe}_{64}\text{B}_{20}(3\text{ nm}) / \text{MgO}(2\text{ nm})$

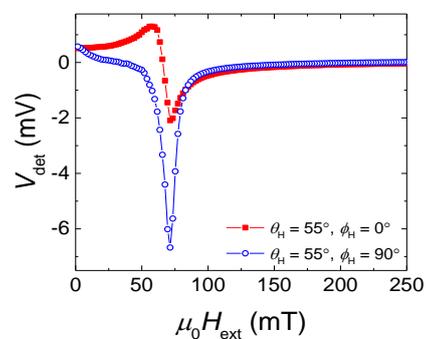


図 19 電圧誘起強磁性共鳴のホモダイン検波スペクトルの面内磁場角度依存性

/ $\text{Co}_{16}\text{Fe}_{64}\text{B}_{20}$ (2 nm)におけるホモダイン検波スペクトルである。外部磁場の仰角(面内から面直方向における角度)は出力電圧が最大となるように 55° に固定し、回転角(ピン層の磁化方向からの面内角度)は 0° または 90° とした。その結果、回転角が 0° の時はアンチローレンツ型、回転角が 90° の時はローレンツ型のスペクトルが得られ、電圧トルクに起因したスペクトル形状の変化が観測された。これは磁気共鳴が電圧トルクによって励起されていることを明確に示した結果である。また、大きな出力電圧を得るためには、ピン層とフリー層が面内相対角 90° となる条件が最適であることを見出した。

次に上述の素子に直流電圧を加えて、非線形効果を利用した出力電圧の向上を目指して実験を行った。ここでの非線形効果とは、非対称磁気ポテンシャルにおいて磁気共鳴を励起し、歳差運動の中心が平衡状態からずれることによって起こる現象で、そのことによって生じる抵抗変化と直流電圧を加えた際に生じるトンネル電流との積によって出力電圧が増幅される。図 20 は直流電圧下でのホモダイン検波スペクトルである。この時、外部磁場の回転角は 0° である。まずゼロ電圧においては前述したとおり、電圧トルクによる強磁性励起に起因したアンチローレンツ型のスペクトルが得られた。次に直流電圧を加えることでスペクトルの形状がローレンツ型へと変化すると同時に、出力電圧も向上した。 -1.0 V 下での出力電圧はゼロ電圧のスペクトルに比べて9倍程度出力を大きくすることに成功した。

さらに入力パワーに対して出力電圧を調べた。スピントランスファートルクを用いたマイクロ波検波器の場合、入力パワーまたは直流電圧が大きくなると、素子に流れる電流密度が大きくなり、磁化が不安定になる臨界電流付近またはそれ以上の電流が流れてしまうため、出力電圧が低下する。先行研究では $1\ \mu\text{W}$ 程度で出力電圧が飽和してしまっていた。本研究では図 21 に示す通り、 $100\ \mu\text{W}$ の入力パワーに対しても出力電圧はほぼ線形に増加しているのがわかる。これは電圧誘起強磁性共鳴特有の特性であり、磁気共鳴励起に電流を用いる必要がないため、入力パワーを大きくまたは直流電圧を大きくしても、素子に流れる電流を小さく抑えることができることに起因する。このような特性は電圧誘起強磁性共鳴を用いたマイクロ波検波器の特性として、実用上優位な点であると考えられる。

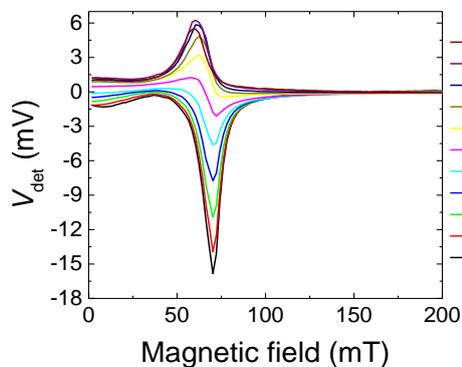


図 20 直流電圧下でのホモダイン検波スペクトル

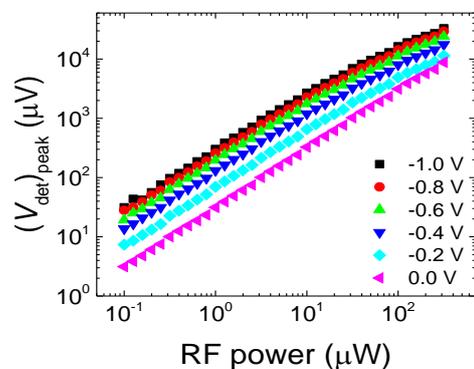


図 21 出力電圧の入力パワー依存性

3.8 MTJによる低電圧化(大阪大学)

(1)研究実施内容及び成果

本プロジェクトが発足する以前に報告された電圧誘起磁気異方性変化の先行研究において実験に用いられた素子は $1\ \mu\text{m}$ 以上の厚い有機絶縁層を有していた。そのために、明瞭な磁気異方性変化を観測するためには $\pm 200\text{ V}$ という大電圧を印加する必要があった。しかしながら、磁気異方性変化の起源は電界の大きさによって決まるため、電流による損失が大きくなならない領域で絶縁層を薄くすることにより、低電圧駆動化が可能である。そこで MgO 単層から構成されるトンネル接合素子を作製し、電圧による磁気異方性制御を試みた。

分子線エピタキシー法を用いて $\text{MgO}(001)$ 基板上に $\text{MgO}(10) / \text{Cr}(10) / \text{Au}(50) / \text{Fe}_{80}\text{Co}_{20}(t_{\text{FeCo}}) / \text{MgO}(1.5) / \text{Fe}(10)$ (単位: nm)を成膜し、電子線リソグラフィ・Ar イオンミリン

グを用いて $0.2 \times 0.8 \mu\text{m}^2$ のピラーに微細加工した素子を用いた。素子の抵抗面積値は $56 \Omega \mu\text{m}^2$ 、MR 比は 16% であった。ここで FeCo は膜厚依存性を系統的に調べるために同一基板上にウェッジ膜として成膜した。次にそれぞれの素子において面内及び面直方向に磁場を印加し磁気抵抗 (MR) 曲線を測定した。すると FeCo の膜厚を薄くしていくと垂直方向への飽和磁場が小さくなり、およそ $t_{\text{FeCo}} = 0.60 \text{ nm}$ 以下では磁化容易軸が面直方向に向くことがわかった。次にバイアス電圧を変化しながら MR 曲線を測定した。一例として図 22(a) に $t_{\text{FeCo}} = 0.70 \text{ nm}$ の素子における様々なバイアス電圧下での垂直磁場 MR 曲線を示す。ここでそれぞれのバイアス電圧下における曲線の形状のみを比較するために抵抗値の最大値と最小値で規格化した曲線で比較する。すると、バイアス電圧に依存して垂直方向への飽和磁場の大きさの変化が観測できた。これはバイアス電圧による FeCo 層の垂直磁気異方性変化を反映した結果と言える。

次に MTJ 素子における磁化の相対角とコンダクタンスの関係式から、MR 曲線を磁化曲線に変換し、その曲線を用いてそれぞれのバイアス電圧下における垂直磁気異方性エネルギーを計算した。その結果を図 22(b) に示す。磁気異方性エネルギーはバイアス電圧に対して線形に変化しているのがわかる。また線形近似曲線の傾きから電圧誘起磁気異方性変化量を定量的に評価し、この素子においては $-31 \text{ fJ}/(\text{Vm})$ であった。さらに様々な膜厚に対して、磁気異方性のバイアス電圧依存性を求めると、 $t_{\text{FeCo}} = 0.58 \sim 0.73 \text{ nm}$ の膜厚範囲においては顕著な膜厚依存性は見られず、 $-30 \sim 40 \text{ fJ}/(\text{Vm})$ という値が得られた。この値は理論計算と比較してもほぼ同じオーダーである。

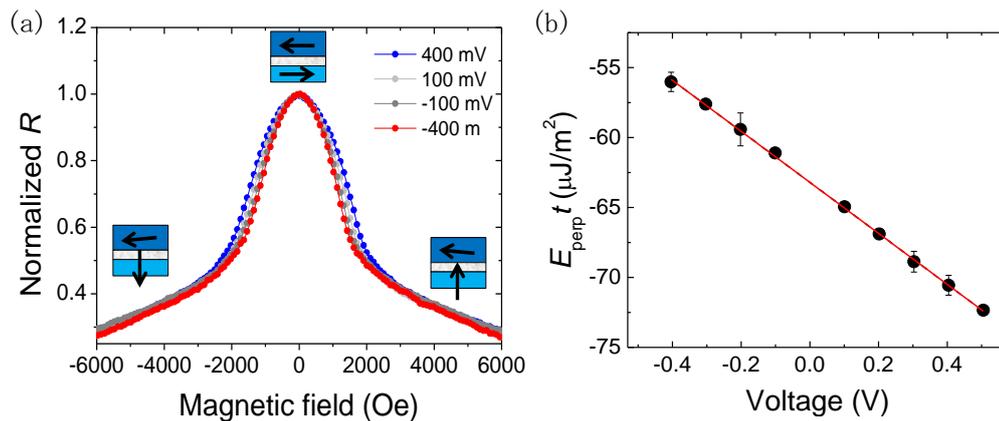


図 22 (a) $t_{\text{FeCo}} = 0.70 \text{ nm}$ の素子において様々なバイアス電圧下での垂直磁場 MR 曲線。(b) 垂直磁気異方性エネルギーのバイアス電圧依存性

3. 9 面内磁化配置の MTJ における電圧誘起ダイナミック磁化反転(大阪大学)

(1) 研究実施内容及び成果

磁化反転は磁性メモリーデバイスにおいて書き込み技術として用いられる基本動作の一つである。より低消費電力で駆動させるには、半導体産業において CMOS テクノロジーが技術革新をもたらしたように、電圧駆動型の磁化反転技術の開発が望まれる。本研究は電圧誘起磁気異方性変化を利用して、電圧のみによる双方向かつ高速(サブナノ秒以下)な磁化反転の実現を目指して実験を行った。

まずは 4.8 節で得られた実験結果から、電圧による磁化反転の可能性についてシミュレーションを用いて評価した。まず電圧誘起磁気異方性変化によって発生するトルクを効率よく用いるために、初期磁化状態として面直方向にバイアス磁場を印可し磁場を面内から面直方向に 30° 傾けた。このような条件下で -1.5 V の電圧を加えると、電圧印加中は磁化の安定点が面直方向となる。その時磁化にはその安定点を中心とした歳差運動が励起される。そこでちょうど磁化が反転した時に電圧を OFF にすると磁化の平行・反平行状態に

よらない双方向磁化反転の制御が可能である。一方、磁化が元の状態に戻ったところで電圧を OFF にすると見た目上は磁化反転が生じていないことになる。図 23 に磁化の軌道を計算したシミュレーション結果を示す。赤色の矢印が初期磁化状態 (I.S. : Initial state)、青色の矢印が終磁化状態 (F.S. : Final state) を表しており、赤色の線は電圧が ON の状態の時の軌道、青色の線は電圧が OFF の状態の時の軌道を表している。この結果より、電圧のパルス幅 τ_{pulse} に依存して、終磁化状態が振動しているのがわかる。

次にシミュレーション結果で得られた

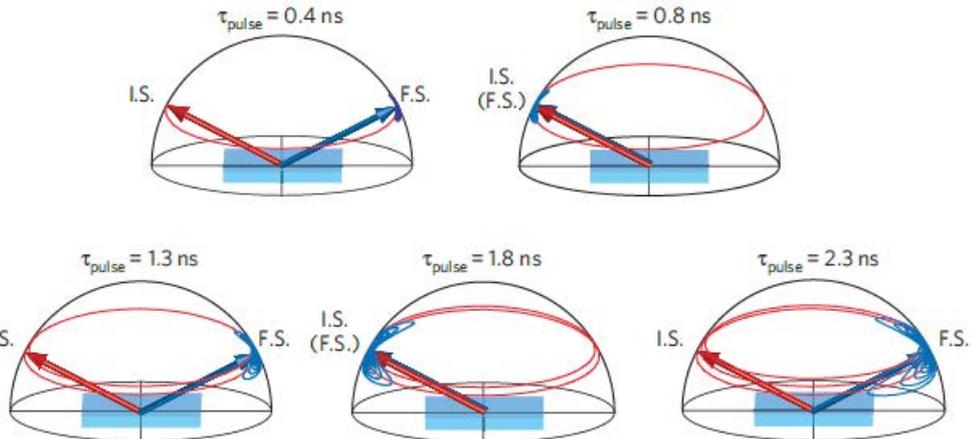


図 23 電圧誘起ダイナミック磁化反転の磁化の軌道を計算したシミュレーション結果

得られた知見を元に、実証実験に取り組んだ。実験に用いた素子は 4.8 節で用いた素子であり、FeCo 層の膜厚は $t_{\text{FeCo}} = 0.70 \text{ nm}$ のものを使用した。まず電圧誘起磁気異方性変化によって発生するトルクを効率よく用いるために、磁化を面直方向に傾ける必要がある。また実デバイスとシミュレーションとの違いは、上部 Fe からの漏れ磁場が存在していることである。そこで上部 Fe からの漏れ磁場を打ち消しつつ垂直磁場を印加するために、実験では外部磁場 (H_{ext}) を面内容易軸から面直方向に 84° 傾けて印加した。ここで $H_{\text{ext}} = 700 \text{ Oe}$ の時、FeCo の磁化は面直方向に 30° 傾いており、図 24(a) が示すように形状を反映した面内 2 準位の安定点をとる。次にパルス電圧を印可して、電圧誘起ダイナミック磁化反転の実証を試みた。参照層との磁化の関係が平行状態または反平行状態かの判定はトンネル磁気抵抗効果を通じて高抵抗または低抵抗状態として観測した。図 24(b) は負のパルス電圧 (電圧強度: -1.5 V 、パルス幅: 0.55 ns) を印加する毎に素子の抵抗を測定した結果である。平行・反平行状態間への双方向磁化反転が単極の電圧のみで誘起されているのがわかる。また正のパルス電圧を加えた時には、初期磁化状態によらず磁化反転は誘起されなかったことから、これは電流誘起の磁化反転とは異なる現象である。

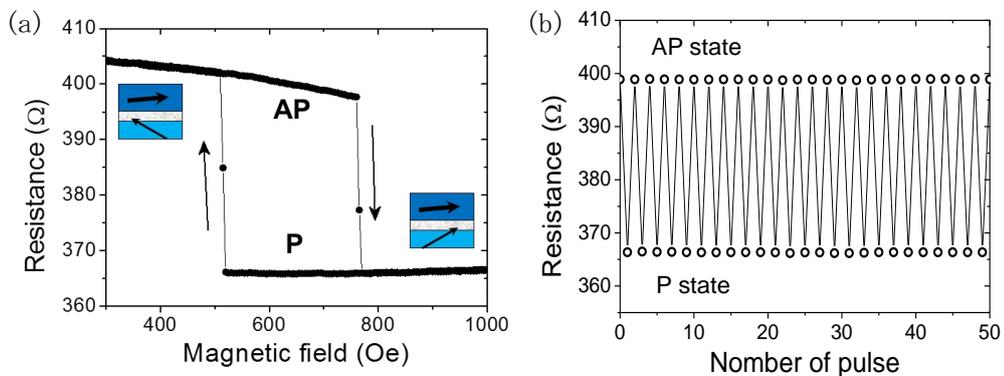


図 24 (a)外部磁場 84° 傾けた時の MR 曲線。(b)パルス電圧印加による平行(P)状態・反平行(AP)状態への双方向磁化反転

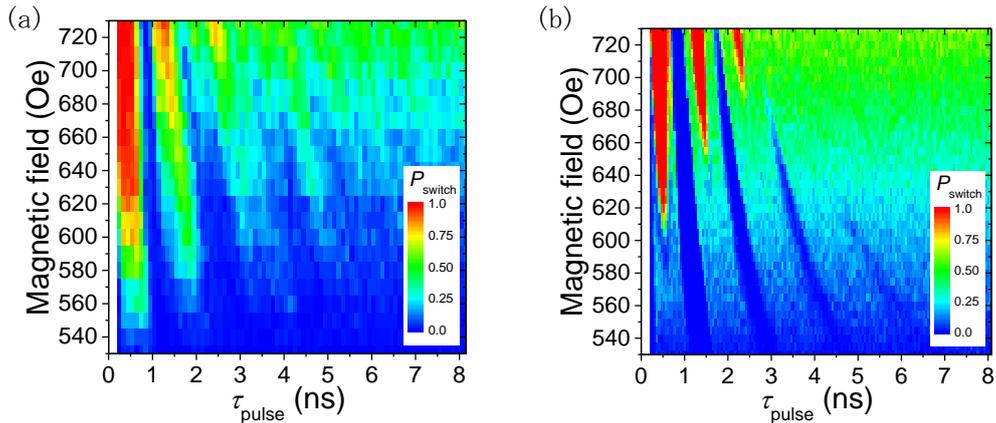


図 25 反平行状態から平行状態への反転確率の電圧パルス幅及び外部磁場依存性。
(a)実験結果、(b)シミュレーション結果

さらに電圧のパルス幅及び外部磁場依存性に関して詳細に調べた。まずパルス電圧を加える前に、外部磁場を制御することで初期磁化状態は反平行配置にした。次に特定の電圧パルス幅・外部磁場において 100 回の繰り返し測定を行い反転確率を求めた。図 25 は反転確率のパルス幅および外部磁場依存性を調べた結果である。まず外部磁場依存性に着目すると、磁場強度が小さいところでは反転確率が小さいことがわかる。これは外部磁場の面内成分が上部 Fe からの漏れ磁場をきちんと打ち消すことができていないため、反平行配置の方が安定状態となっているからだと考えることができる。次に電圧パルス幅依存性に着目すると、反転確率の振動が観測されていることがわかる。これは磁化の歳差運動を反映したものであると考えられる。パルス幅が長くなると、歳差運動の軌道が熱擾乱によって乱され、コヒーレンスが保たれなくなるため、反転確率が 0.5 に近づく。この結果は図 25(b)に示すように、熱の効果を導入したシミュレーション結果とも定性的かつ定量的に実験結果を再現することができることから、以上の考察は妥当であると考えられる。

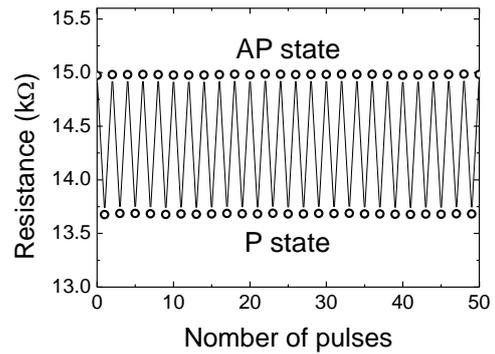


図 26 パルス電圧による平行(P)状態・反平行(AP)状態への双方向磁化反転

以上の結果より、磁気トンネル接合(MTJ)素子においてパルス電圧印加による高速な双方向磁化反転の観測に成功したが、MgOの膜厚が1.5 nmという薄い膜厚であるがために、電圧を加えた際スピン注入磁化反転の閾電流密度とほぼ同等の電流密度が流れてしまい、電圧駆動本来が有する低消費電力性が十分に発揮されていなかった。そこで、膜構成はほぼ同じでMgOの膜厚を2.0 nmとした素子において同様の実験を行った。この時、素子の抵抗値は前回の素子の40倍であった。図26に示すように、高抵抗MTJ素子においても電圧を印加する毎に磁化反転が観測され、双方向磁化反転の観測に成功した。印加したパルス電圧の電界強度は -1.35 V/nm でパルス幅は 0.65 ns である。この時流れる電流は前回の素子の $1/10$ 以下に低減することができた。このことにより、 $\phi 30 \text{ nm}$ のピラーサイズと比較すると、今回の電圧駆動型の書き込みに必要な電力は電流駆動型のSTT-MRAMに比べて $1/60$ 以下であることを示すことに成功した。リーク電流もない理想的な回路ではさらに $1/30$ 程度の低消費電力化が可能となる。

3. 10 垂直磁化配置の MTJ における電圧誘起ダイナミック磁化反転(産総研)

(1)研究実施内容及び成果

上記の実験では面内磁化配置の MTJ を用いていたが、熱安定性などの観点から応用上重要と考えられる垂直磁化配置の MTJ においても同様の磁化反転を実証することが望まれる。そこで、産総研が所有する産業用のスパッタリング装置 (C7100:キャノンアネルバ製)を用いて成膜した垂直磁化型 MTJ においても電圧誘起ダイナミック磁化反転の実験を行った。

素子構造は垂直ピン層/W(0.15 nm)/MgO/FeB(1.8 nm)/W(2 nm)/Ta(3 nm)で、下部電極の垂直ピン層は $[\text{Co}(0.24 \text{ nm})/\text{Pt}(0.16 \text{ nm})]_7/\text{Co}(0.24 \text{ nm})/\text{Ru}(0.46 \text{ nm})/[\text{Co}(0.24 \text{ nm})/\text{Pt}(0.16 \text{ nm})]_5$ からなる構造を有しており、上部の FeB 層がフリー層である。また素子は 350°C 1 時間の加熱処理を加えており、RA は $250 \Omega \mu\text{m}^2$ である。図 27(a)は垂直磁場下での TMR のマイナー曲線であり、この素子が垂直磁化の MTJ であることを示している。また、正電圧印加に対しては保磁力が減少し、負電圧印加に対しては保磁力が増加していることから、この素子が電圧効果を示していることがわかる。

次に電圧誘起ダイナミック磁化反転の実験を行った。面内磁化配置の場合は垂直磁場を印可する必要があったが、垂直磁化配置の場合は面内磁場を印可する必要がある。また 4.9 でも記述したとおり、ピン層からの漏れ磁場を打ち消す必要がある。そこで、外部磁場を垂直方向から 55 度傾斜させ、 -240 Oe の磁場を印可し磁化反転の実験を行った。図 27(b)は反転確率のパルス幅依存性を示している。電圧が低い場合にはほとんど反転が起これなかったが、 1.2 V の電圧を加えた時はパルス幅に対して明瞭な振動が観測された。これは磁化の歳差運動に起因しており、電圧誘起ダイナミック磁化反転の特徴である。また 1 ns のパルス幅の時は図 24(b)に示しているような双方向の磁化反転が観測されていることから、この磁化反転は電圧による垂直磁気異方性の変化から誘起されたものと結論付けることができる。

垂直磁化配置の MTJ においても同様の磁化反転が可能であることを実証できたことは、この技術が応用に向けて有効な手法であることを示すことができたといえる。

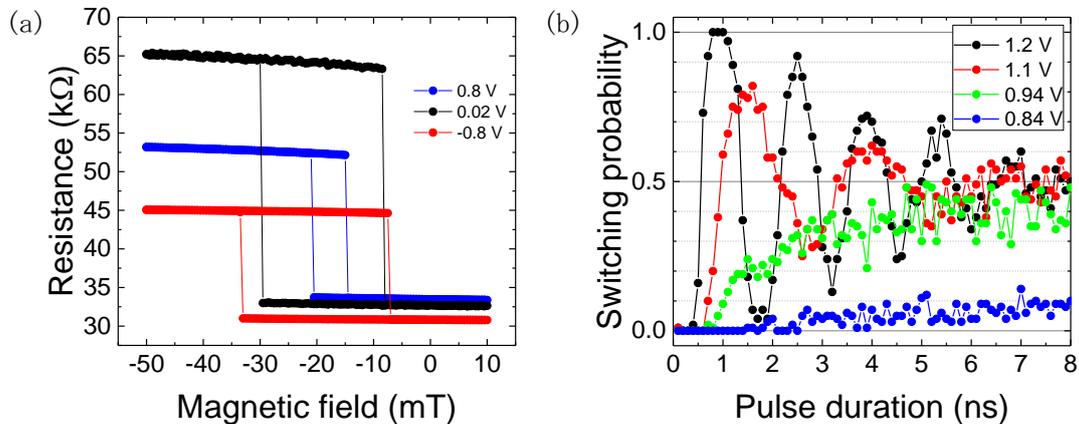


図 27 (a) 垂直磁場下での磁気抵抗曲線。(b)外部磁場を面直から 55 度傾斜し、 -240Oe 印可した時の反転確率のパルス幅依存性。

3. 11 下地層の違いによる電圧効果の符号逆転(大阪大学)

(1)研究実施内容及び成果

電圧による磁化の制御を行うにあたって、電圧トルクの符号及び強度を制御することは重要なパラメータの一つである。通常、電圧効果は強磁性層/絶縁層の界面に敏感であると考えられる。しかし、Ta 下地及び Ru 下地の CoFeB(1.4) / MgO(2.0) (単位:nm)接合における電圧誘起磁気異方性変化の極性が異なることがわかった。図 28 にそれぞれの下地における CoFeB/MgO 接合の磁気抵抗曲線から求めた磁気異方性エネルギーのバイアス

電圧依存性を示す。ここで線形近似の傾きは電圧効果の大きさを表し、Ta 下地では-35 fJ/(Vm)、Ru 下地では+18 fJ/(Vm)であった。これは下地層が CoFeB / MgO 界面に影響を及ぼしているものと考えられる。この結果から今後、電圧効果を大きくするための材料探索として下地層に着目することも重要であると考えられる。

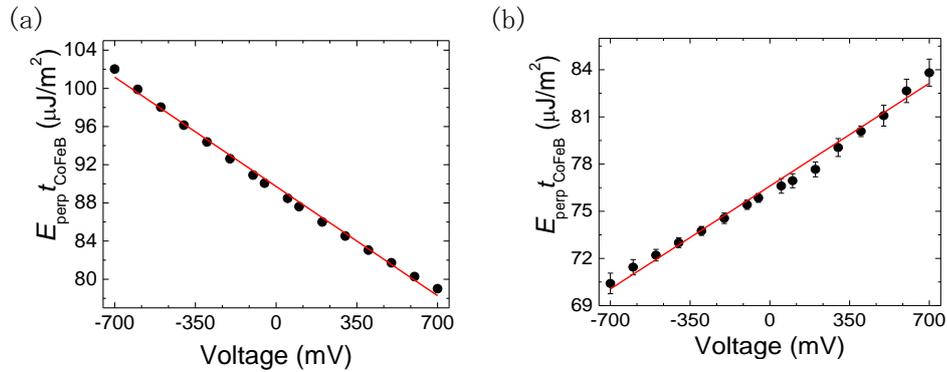


図28 CoFeB/MgO接合における磁気異方性エネルギーのバイアス電圧依存性。
(a) Ta 下地、(b) Ru 下地

3. 12 V|Fe, FeGd|MgO MTJ の電圧効果 (大阪大学)

(1) 研究実施内容及び成果

電圧効果を大きくする目途は今のところ立っておらず、早急にその方針を見つける必要があるが、現在電圧効果のほとんどが 3d 遷移金属において調べられており、その他の磁性金属はあまり調べられていない。そこで本項目では大きな軌道角運動量を持つ 4f 金属に着目し、その電圧効果を調査した。Molecular Beam Epitaxy 法により V|Fe, Fe₉₀Gd₁₀|MgO|Fe を製膜して MTJ に微細加工し(図 29 (a))、電気効果を MR カーブから評価した(図 29 (b, c))。V バッファを採用した理由は、V バッファ上の Fe は大きな垂直磁気異方性を示し、また、電界効果も大きくなるという報告があるからである。結果としては、作製した MTJ の界面磁気異方性と電界効果は V|Fe において 641 μJ/m², 20 fJ/Vm、V|Fe_{0.9}Gd_{0.1} において 321 μJ/m², 17 fJ/Vm と、Gd の混入による電圧効果の大きな変化は見られなかった。この値はこれまで報告された電圧効果と同じ程度の効果である。原因としては、Gd の混入量が 1 割程度と少なかったこと、Gd の 4f 電子がフェルミ面から深い位置にいるために外場からの影響に強いことなどが考えられる。そのため、磁性を担う 4f 電子がフェルミ面にかかっている、大きな軌道角運動量をもつ Tb や Nd などですらに調査する必要がある。

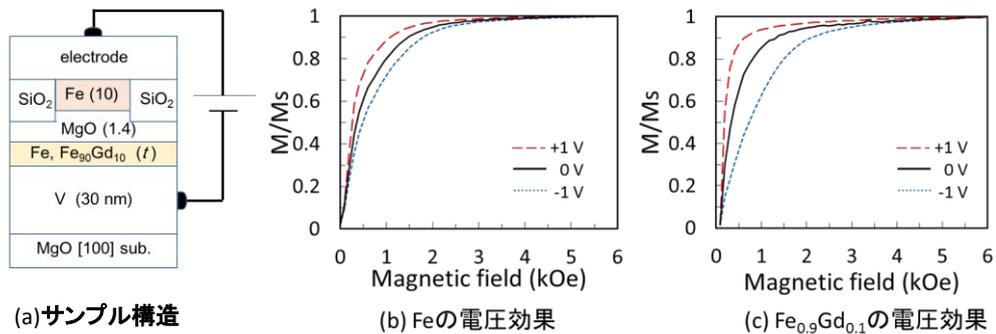


図29 Fe および Fe_{0.9}Gd_{0.1} 薄膜の電圧効果

3. 13 放射線分光による電圧素子の界面解析(大阪大学)

(1)研究実施内容及び成果

本研究項目では電圧効果の物性解明およびより高品質な素子の作りこみのための実験を行った。具体的には(1)FeCo|MgO 界面における電圧印加による界面状態の変化、そして(2)Au|Fe 構造における Fe 表面への Au 偏析を放射線分光により評価した。

(1) FeCo|MgO 界面における電圧印加による界面状態の変化

本研究では磁気トンネル接合に電圧を印加しつつ X 線吸収分光を測定可能な測定系を構築することを目的とした。X 線吸収及び磁気円二色性の測定は Spring8 の BL25 で行った。信号検出には 100 eV のエネルギー分解能を持つシリコンドリフト検出器を用意し、蛍光収量法を採用した(図 30(a))。まずは直径 100 μm の太さの X 線を直径 200 μm の大きさの Au/FeCo/MgO/SiO₂/ 上部電極から構成される接合に照射し、測定を行った。まずは FeCo/SiO₂ 界面に形成される酸化 FeCo に注目した評価を行ったので報告する。

図 30(b)は X 線吸収(XAS)及び X 線磁気円二色性(MCD)信号の測定結果である。2 V の電圧を印加した時、XAS・MCD 信号の FeL₂ 端及び L₃ 端の両方において信号強度が増大することを見出した。また、それに伴いスペクトルの肩が消失した。-2 V 印加時には逆の現象が起こった。L₃ 端において ± 2 V における差は XAS で 16%、MCD で 25%であった。これは 0.26 原子層相当分の FeCo 酸化層が電圧印加により可逆な酸化還元反応を起こした結果であると結論付けられる。

このようにピラー形状において電圧を印加しつつ放射線分光が行えるようになった。今回は元から FeCo に酸化層が導入された素子で実験を行ったため、酸化還元反応のその場観察を捉える結果となった。今後はこのセットアップを用いて電圧誘起磁気異方性変化の起源を探るための実験が設計可能となるはずである。具体的には電圧効果と軌道磁気モーメントの関係等の評価が重要であり、本項目で開発して測定系が役に立つ可能性が大きい。

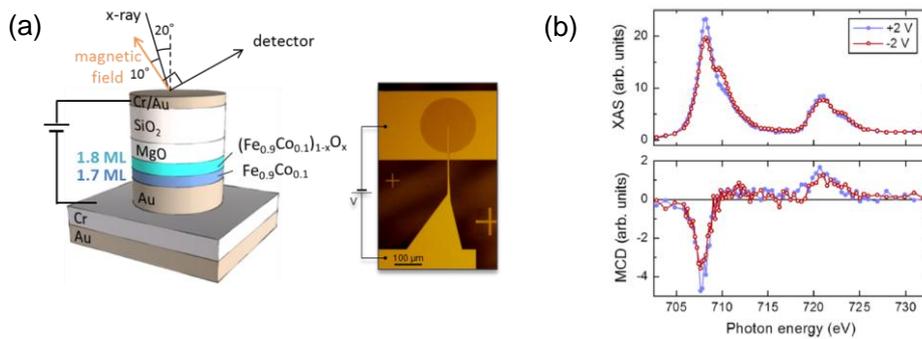


図 30 (a)素子構造、(b)X 線吸収及び磁気円二色性信号

(2)Au|Fe 構造における Fe 表面への Au 偏析

Fe 薄膜の L₃ 端における X 線吸収分光を行った。Fe 薄膜は分子線エピタキシー法によりそれぞれ Cr(001)、Au(001)、Ag(001)上に蒸着したものをを用いた。結果として Fe を 1 nm 室温蒸着すると Au は 0.8 ± 0.3 原子層、Ag は 2.0 ± 0.3 原子層、Fe 表面に偏析することがわかった。

具体的な実験は下記の手順で行った。図 31(a)は実験で用いた素子であり、分子線エピタキシー法により作成した。本実験により 2 種類のバッファ層(Au 及び Cr)、そして Au キャップ層の膜厚変化が起こす影響を評価できる。X 線吸収分光(XAS)は Spring-8 の BL25 で行い、図 31(a)の階段ステップよりも小さなビーム径(400 μm)の X 線を用いた。検出には全電子収量法を用いた。図 31(b)は XAS 信号のキャップ層膜厚依存特性である。図から分かるようにバッファ層、そしてキャップ層の差に応じた信号強度の変化を観測した。このバッファ層違いによる X 線吸収量の差(t_{seg})が下地層の Fe 表面への偏析量を意味する。この結果

Fe1 nmを室温蒸着すると、下地層のAuが 0.8 ± 0.3 原子層偏析することがわかった。更に同様の実験をAuからAgに変更して行った。結果としてFe1 nmを室温蒸着すると下地層のAgが 2.0 ± 0.3 偏析することがわかった。

電圧誘起磁気異方性は界面の状態変化が支配的であると考えられている。従って、本実験から得られた知見は極めて重要である。例えば本プロジェクトではAu/FeCo/MgOにおける電圧効果を評価してきた。本項目の結果から鑑みるにAu/Fe/MgO構造はAu/Fe/Au(1原子層)/MgO構造であったと考えるのが自然である。従って電界が印加されるFe/MgO界面にAuが1原子層挟まっていたことになる。このAuの偏析は電界効果を抑制する可能性があるため、今後は偏析と電界効果の対応を精査し、電界効果増大への道標となるような研究を行う必要がある。

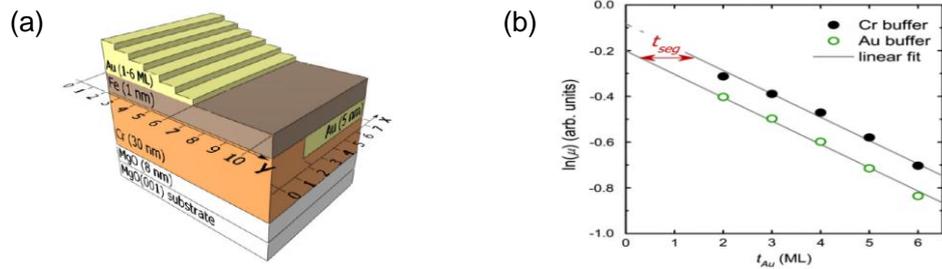
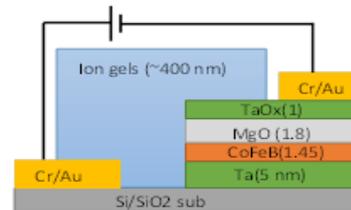


図 31 (a)素子構造、(b)X線吸収信号強度のAu膜厚依存特性

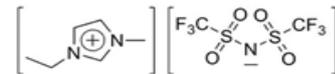
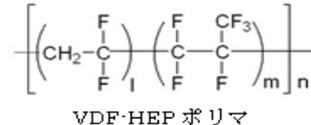
3.14 高電界印加を可能とするイオンジェルの開発及びそれを用いた電圧効果の評価

本項目では大きな電圧効果を得るため、高電界印加を可能とするイオンジェルの開発及びそれを用いた電圧効果の評価を行った。

スパッタリング法によりCoFeB(1.45 nm) / MgO(1.8 nm) / TaO_x(1 nm) 積層膜を作成し、VDF-HEP ポリマーにイオン液体([EMIM]⁺[TFSI]⁻) を含ませたイオンジェルをスピコート法により作成した。(a)デバイス構造、(b)イオン液体の分子構造、および(c)電圧誘起磁気異方性変化の測定結果を図32にまとめた。±1.5 Vの電圧印加によりCoFeB 磁気異方性を大きく変調することに成功した。電圧効果の大きさは220 μJ/m²であり、MgO絶縁膜を用いる従来法に対して10倍程度であった。イオンジェルの電界効果自体は既に知られた現象であるが、本研究では絶縁膜の併用により素子の経時変化を大幅に低減できたこと、およびX線耐性が期待できるC=O結合を含まないポリマーを用いたことなどに新規性があり、今後想定される放射線分光を用いた電界効果の起源解明実験に有用であると期待される。

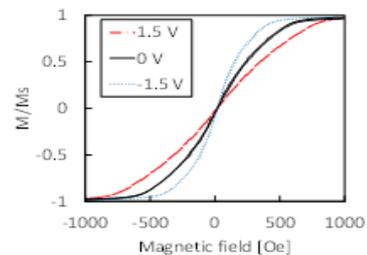


(a) デバイス構造



(b) イオン液体

[EMIM]⁺



(c) イオン液体を用いたCoFeB薄膜の電圧効果

図 32 イオン液体を用いた大面積高電界印加の実験

3.15 超低抵抗 MgO-MTJ の作成と VHF カソードスパッタの開発

本研究では、金属/機能性酸化物複合構造の作製を目指し、スピネルフェライト等の機能性酸化物のテンプレートに応用できるような、膜厚が 1 nm 程度の超低抵抗極薄高配向 MgO トンネル障壁層の作成を行った。また、さらに薄い 1 nm 以下の領域でも高品質な極薄酸化膜が得られるような専用の新規スパッタチャンバの開発を行った。

酸化物スパッタの特徴として、スパッタリング過程で形成される負イオンがシーズ電圧 (V_{dc}) により加速されて高エネルギー粒子となり、この粒子が基板に衝撃を与えることで堆積酸化物の結晶性や化学組成比を劣化させることが知られている。これが、酸化物の極薄膜を作成する際の問題点である。我々は高品質な酸化物薄膜を作成するため以下の 2 つのアプローチを行った。まず 1 つ目が劣化した酸化物薄膜を in-situ の後アニールにて回復する方法である。上記の評価のために、これまでにその特性が良く調べられている CoFeB/MgO/CoFeB 強磁性トンネル接合 (MTJ) 素子を使用した。まず初めに、結晶構造改善のため、専用の高速加熱チャンバーを開発し、その改善効果を評価した。

次に、ダメージの少ない酸化物薄膜を形成する方法として、負イオンのエネルギーを軽減させた V_{dc} の低減が可能なスパッタチャンバの新規開発を行った。本スパッタチャンバには 2 基のカソードが搭載され (図 33)、一方は DC/RF (13.56MHz) 兼用カソード、他方は VHF(60MHz) 専用カソードとなっている。DC/RF 兼用カソードでは、パルス DC を用いた金属ターゲットの酸素雰囲気中反応性スパッタ成膜や RF を用いた酸化物ターゲットのダイレクトスパッタ成膜が可能である。また、VHF 専用カソードでは一般の商用周波数よりも高い周波数による酸化物ターゲットのダイレクトスパッタ成膜を行うことが可能である。さらに、本成膜チャンバの基板ホルダーには基板加熱機構を設け、酸化物の成膜中や成膜直後に基板温度を 400°C まで加熱可能とした。また、本チャンバをキヤノンアネルバ所有の既存設備 (超高真空マルチスパッタリングシステム) に接続し (図 34)、成膜した酸化物を真空一貫で金属膜と積層したり、高速加熱/冷却などのプロセスを実施したりすることを可能とした。既存設備には分析チャンバが接続されているため、真空状態を破ることなく薄膜の表面状態の分析や化学分析などが実施できる。このような環境を整えることで、金属/酸化物複合構造作成プロセスの開発を強力に推し進めることが可能となった。本成膜チャンバの性能評価として、 V_{dc} の投入電力周波数依存性の評価を行った。



図 33 酸化物スパッタ成膜チャンバの外観

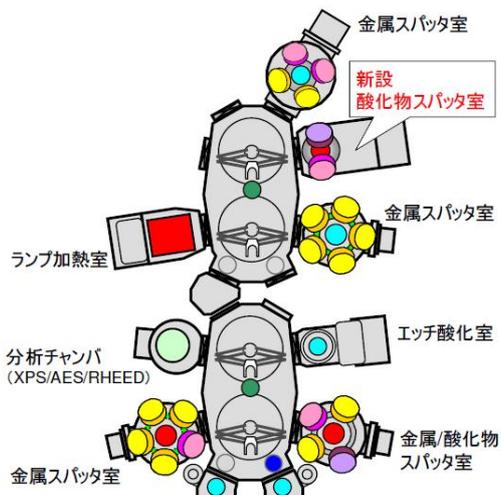


図 34 既存設備に接続後のスパッタ装置構成図

次に、13.56 MHz の RF スパッタリングと基板加熱機構を用いて

CoFeB/MgO/CoFeB 構造の MTJ 素子の作製を行い、MR 特性の評価を行った。MgO トンネル障壁層は酸化物ターゲットのダイレクトスパッタ法によってアモルファス CoFeB 下地電極上に作製した。また、MgO トンネル障壁層の膜厚を 0.99-1.13 nm まで変化させた MTJ 素子を作製している。なお、MgO トンネル障壁層の結晶化促進のため、成膜直後に in-situ で 300°C の加熱処理を行った。図 35(A) に規格化トンネル抵抗値 (RA) と MR 比の関係の MgO 膜厚依存性を示す。MgO 膜厚がわずか 0.2 nm 変化しただけで MR 比は劇的に低下してしまうが、MgO 膜厚が 1.05 nm 程度までは非常に高い MR 比が維持できている。図 36 は MgO 膜厚が 1.05 nm の場合の RA-H 特性である。室温において良好な磁気特性と $1.0 \Omega\mu\text{m}^2$ の超低 RA で 176% もの MR 比が得られている。これは、現在でも低抵抗領域における MR 比の世界最高値であり、低抵抗領域で最も高い MR 比が示されている Isogami (APL 93, 192109 (2008).) らの報告と比較して、RA を半分以下に低減することができている。このように、MgO トンネル障壁層を用いた MTJ 素子の高性能化を実現することができた。また、伝導特性を明らかにするため、図 35 における (a)、(b) および (c) のサンプルについて抵抗値の温度依存性を調査した。(b) および (c) では、温度の低下に伴い抵抗値の低下がみられることから、金属伝導が支配的になっていると考えられる。一方、(a) のサンプルは温度の低下に伴い抵抗値の上昇が確認できることから、トンネル伝導が支配的であると考えられる。この結果から、MgO はその膜厚が 1.05 nm 程度まで、トンネル伝導を有したテンプレート層として応用が可能であることが分かった。このような膜厚では、余計なトンネル抵抗をほとんど生じない。それにも関わらず、MgO にはスピン偏極した電子を生成する機能を有しているため、今後実現を目指す電圧印加磁化反転やスピンフィルター素子のためのテンプレート層等に非常に適している。

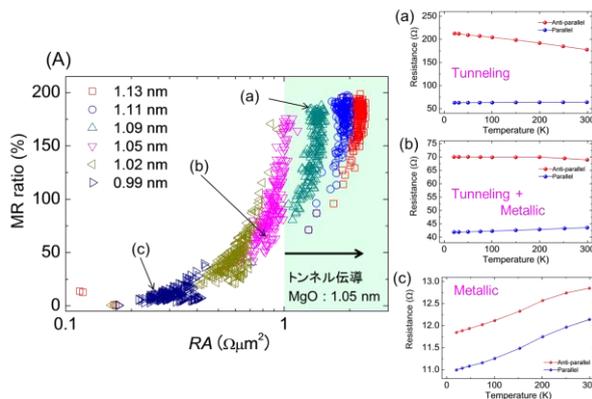


図 35 (A) RA と MR 比の関係の MgO 膜厚依存性。
(a) (b) (c) 代表的な素子の抵抗値の温度依存

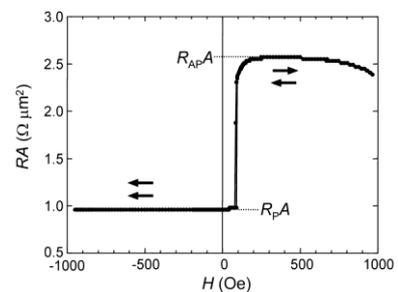


図 36 RA-H 特性 (MgO 膜厚=1.05 nm)

次に新規開発したカソードにおける MgO 成膜時の V_{dc} の圧力依存性について図 37 に示す。グラフには、投入電力の周波数を 13.56 MHz と 60 MHz とした場合の結果を示している。13.56 MHz の場合には、 V_{dc} が約 75 V であるのに対し、60 MHz の場合には数 V 程度まで小さくなった。さらに、放電圧力に関して、0.018 Pa の低圧にしても十分安定な放電を維持している。この結果から、極薄酸化物成膜の手法の一つとして VHF スパッタリングが有効であることが分かった。さらに、投入電力を 3 倍 (600W) にしても、 V_{dc} は 13.56 MHz の

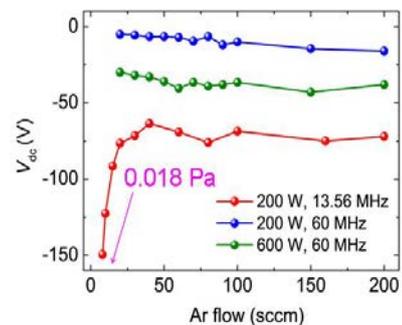


図 37 MgO ターゲット表面近傍におけるシース電圧の周波数による比較

場合の半分以下になるため、高周波化によってより広いプロセスウィンドウを確保できることが分かった。この結果は、スピネルフェライトなどの酸化物材料の成膜プロセスへ応用可能であり、重要である。新規酸化物用成膜チャンバの開発は、当初の研究計画を遂行できたと言える。

§ 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 0件、国際(欧文)誌 20件)

1. Seung-Seok Ha, Nam-Hee Kim, Sukmock Lee, Chun-Yeol You, Yoichi Shiota, Takuto Maruyama, Takayuki Nozaki and Yoshishige Suzuki, "Voltage induced magnetic anisotropy change in ultrathin Fe₈₀Co₂₀/MgO junctions with Brillouin light scattering", Appl. Phys. Lett., vol. 96, no.14, 142512-1-3, 2010.
2. Hiroki Maehara, Kazumasa Nishimura, Yoshinori Nagamine, Koji Tsunekawa, Takayuki Seki, Hitoshi Kubota, Akio Fukushima, Kay Yakushiji, Koji Ando, and Shinji Yuasa, "Tunnel Magnetoresistance above 170% and Resistance-Area Product of $1 \cdot (\cdot m)^2$ Attained by In situ Annealing of Ultra-Thin MgO Tunnel Barrier Tunnel Magnetoresistance above 170% and Resistance-Area Product of 1 Omega (μm)² Attained by In situ Annealing of Ultra-Thin MgO Tunnel Barrier", Applied Physics Express, vol. 4, no.3, 033002_1-3, 2011.
3. Yoichi Shiota, Shinichi Murakami, Frederic Bonell, Takayuki Nozaki, Teruya Shinjo, Yoshishige Suzuki, "Quantitative Evaluation of Voltage-Induced Magnetic Anisotropy Change by Magnetoresistance Measurement", Applied Physics Express, vol.4, no.4, 043005_1-3, 2011.
4. Rie Matsumoto, Akio Fukushima, Taro Nagahama, Eiiti Tamura, Yoshishige Suzuki, Koji Ando, and Shinji Yuasa "Quantitative analysis of coherent and incoherent tunneling currents in MgO-based epitaxial magnetic tunnel junctions", Japanese Journal of Applied Physics, vol. 4, 043005, 2011.
5. Y. Shiota, T. Nozaki, F. Bonell, S. Murakami, T. Shinjo, Y. Suzuki, "Induction of coherent magnetization switching in a few atomic layers of FeCo using voltage pulses", Nature Materials, Vol. 11, pp.39-43, 2012.
6. F. Bonell, S. Murakami, Y. Shiota, T. Nozaki, T. Shinjo, Y. Suzuki, "Large change in perpendicular magnetic anisotropy induced by an electric field in FePd ultrathin films", Applied Physics Letters, Vol. 98, pp.232510_1-3, 2011.
7. Y. Suzuki, H. Kubota, A. Tulapurkar, and T. Nozaki, "Spin control by application of electric current and voltage in FeCo-MgO junctions", Phil. Trans. R. Soc. A, vol.369, no.1951, pp.3658-3678, 2011.
8. Y. Shiota, S. Miwa, T. Nozaki, F. Bonell, N. Mizuochi, T. Shinjo, H. Kubota, S. Yuasa, and Y. Suzuki, "Pulse voltage-induced dynamic magnetization switching in magnetic tunneling junctions with high resistance-area product", Appl. Phys. Lett., 101, pp.102406_1-4, 2012.
9. Takayuki Nozaki, Hitoshi Kubota, Akio Fukushima and Shinji Yuasa, "Enhanced Tunnel Magnetoresistance Effect in an Epitaxial Magnetic Tunnel Junction with a Hybrid γ -Fe₂O₃/MgO Barrier", Appl. Phys. Exp., vol. 6, pp.053005_1-3, 2013.
10. Takayuki Nozaki, Kay Yakushiji, Shingo Tamaru, Masaki Sekine, Rie Matsumoto, Makoto Konoto, Hitoshi Kubota, Akio Fukushima and Shinji Yuasa, "Voltage-Induced Magnetic Anisotropy Changes in an Ultrathin FeB Layer Sandwiched between Two MgO Layers", Appl. Phys. Exp., vol. 6, pp.073005_1-3, 2013.
11. Takayuki Nozaki, Tadakatsu Ohkubo, Yoichi Shiota, Hitoshi Kubota, Akio Fukushima, Kazuhiro Hono, Yoshishige Suzuki and Shinji Yuasa, "Growth of a High-Quality Ultrathin

- Fe(001) Layer on MgO(001) by Insertion of an Ultrathin $\text{Co-Fe}_2\text{O}_3$ Layer”, Appl. Phys. Exp., vol. 6, pp.053005_1-3, 2013.
12. Hiroyuki Hosoya, Yoshinori Nagamine, Koji Tsunekawa, Vadym Zayets, and Shinji Yuasa, “Characterization of Ultrathin Fe-Co Layer Grown on Amorphous Co-Fe-B by In situ Reflective High-Energy Electron Diffraction”, Appl. Phys. Express 6, 063003, 2013.
 13. Y. Shiota, F. Bonell, S. Miwa, N. Mizuochi, T. Shinjo, Y. Suzuki, “Opposite signs of voltage-induced perpendicular magnetic anisotropy change in CoFeB/MgO junctions with different underlayers”, Appl. Phys. Lett., 103, 082410, 2013.
 14. D. D. Lam, F. Bonell, S. Miwa, Y. Shiota, K. Yakushiji, H. Kubota, T. Nozaki, A. Fukushima, S. Yuasa, Y. Suzuki, “Composition dependence of perpendicular magnetic anisotropy in Ta/CoxFe80-xB20/MgO/Ta (x=0, 10, 60) multilayers.”, Journal of Magnetism, 18(1), 5-8, 2013.
 15. D. D. Lam, F. Bonell, S. Miwa, Y. Shiota, K. Yakushiji, H. Kubota, T. Nozaki, A. Fukushima, S. Yuasa, Y. Suzuki, “MgO overlayer thickness dependence of perpendicular magnetic anisotropy in CoFeB thin films”, J. Korean Phys. Soc. 62,10,1461-1464, 2013.
 16. F. Bonell, Y. T. Takahashi, D. D. Lam, S. Yoshida, Y. Shiota, S. Miwa, T. Nakamura and Y. Suzuki, “Reversible change in the oxidation state and magnetic circular dichroism of Fe driven by an electric field at the FeCo/MgO interface”, Appl. Phys. Lett., 102, 15, 152401, 2013.
 17. F. Bonell, D. D. Lam, Y. T. Takahashi, Y. Shiota, S. Miwa, T. Nakamura, Y. Suzuki, “Investigation of Au and Ag segregation of Fe(001) with soft x-ray absorption.”, Surface Science, 616.125-130, 2013.
 18. S. Yuasa, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nozaki, M. Konoto, H. Maehara, H. Kubota, T. Taniguchi, H. Arai, H. Imamura, K. Ando, Y. Shiota, F. Bonell, Y. Suzuki, N. Shimomura, E. Kitagawa, J. Ito, S. Fujita, K. Abe, K. Nomura, H. Noguchi, and H. Yoda, “Future Prospects of MRAM Technologies”, IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) Technical Digest, 56-59, 2013.
 19. Takayuki Nozaki, Hiroko Arai, Kay Yakushiji, Shingo Tamaru, Hitoshi Kubota, Hiroshi Imamura, Akio Fukushima, and Shinji Yuasa, “Magnetization switching assisted by high-frequency voltage-induced ferromagnetic resonance”, Appl. Phys. Exp. 7, 073002 (2014)
 20. Takayuki Nozaki, Hitoshi Kubota, Akio Fukushima, and Shinji Yuasa, “Interface engineering using an Fe oxide insertion layer for growing a metastable bcc-Co on MgO(001)”, Appl. Phys. Lett. 106, 022405 (2015)

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. 鈴木義茂, 「スピントロニクススピンの使い方(基調講座ホップ・ステップ・ジャンプ)」, 応用物理, 81,2,156-159.(2012)
2. 鈴木義茂, 小西克典, 「ナノスピントロニクス素子の展開—トンネル磁気抵抗素子を中心として—Progress of Nano-spintronics Devices : Focus on Magnetic Tunnel Junctions」, 電子情報通信学会誌, 95,4,294-298(2012)
3. Y.Suzuki,H.Kubota edited by Evgeny Y. Tsybal, Igor Zutic, 「Spin Torques in Magnetic Tunnel Junctions」, Handbook of Spin Transport and Magnetism (Hall/CRC (2011) Chapter 14. pp.267-284(2011)

4. 鈴木義茂、小西克典 吉田貞史, 金原繁, 「スピントロニクス評価「磁気抵抗評価」「スピンドYNAMICS評価」」, 薄膜の評価技術ハンドブック, 第II部、第2章、第6節、第1項・第2項、pp.294-299, 2013
5. 塩田陽一、野崎隆行, 鈴木義茂, 「電界によるスピン制御技術」, まぐね, Vol. 8, pp.4-11, 2013
6. 塩田陽一、鈴木義茂, 「電界を用いた高速磁化反転」, 化学工業(3月号), 64,3,171-177(2013), 2013
7. 野崎隆行、塩田陽一、鈴木義茂, 「電界によるスピン制御技術」, 工業材料, 61.8,27-31, 2013
8. Y. Suzuki, S. Miwa, T. Nozaki, Y. Shiota, 「Control of Spins in a Nano-sized Magnet Using Electric-current and Voltage」, AAPPS BULLETIN, Vol.25, No.1, p17-24 (2014)

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 13件、国際会議 52件)

1. 鈴木義茂, 野崎隆行, 塩田陽一, 丸山拓人, 白石誠司, 新庄輝也, “電界誘起磁化反転”, 2010年春季第57回応用物理学会学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 2010/3/18
2. Y. Suzuki, “Voltage Control of Magnetic Anisotropy in Au/Fe Co (001) Ultrathin Layer/MgO Junctions”, ISIF2010, San Juan, Puerto Rico, 2010/6/15
3. 鈴木義茂, “電流および電圧による磁化の制御”, つくばナノテク拠点シンポジウム, 筑波大学, 茨城, 2010/8/6
4. C.-Y. You, S.-S. Ha, S. Lee, Y. Suzuki, T. Nozaki, Y. Shiota, M. Shiraishi, and T. Shinjo, “Variation of the Perpendicular Magnetic Anisotropy with Bias Voltage in Ultra Thin Ferromagnetic Layers”, ICEAA2010, Sydney Masonic Centre, Sydney (Australia), 2010/9/20
5. Y. Suzuki, “Electric field effects on the magnetic anisotropy in ultrathin Fe and FeCo films”, TU Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany, 2010/10/4
6. Y. Suzuki, “Spin-torque FMR and large rectification sensitivity in Fe-rich CoFeB-MgO”, IVESC2010&NANOcarbon2010, Southeast University(Nanjing, China), 2010/10/14
- *7. Y. Suzuki, “Voltage Effects on the Magnetic Anisotropy in Ultrathin Fe and FeCo Films”, ICAUMS2010, Hotel Lotte Jeju, Jeju Island, Korea, 2010/12/7
- *8. Y. Shiota, S. Murakami, F. Bonell, T. Nozaki, T. Shinjo, Y. Suzuki, “Magnetization switching using pulse voltage induced magnetic anisotropy change”, The 2011 International Magnetism Conference (INTERMAG), Taipei, 2011/4/26
- *9. T. Nozaki, “Voltage-induced magnetic anisotropy in ultrathin Fe(Co)/MgO junctions”, 2011 MRS Spring Meeting and Exhibit, San Francisco, California, USA, April 25-29, 2011
10. T. Nozaki, “Voltage control of magnetic anisotropy in an ultrathin ferromagnetic metal film”, 5th International Workshop on Spin Currents, Sendai, Japan, July 25-28, 2011
11. 野崎隆行, 「垂直磁気異方性はどこまで理解されたか」, 日本物理学会 2011年秋季大会、領域 3,5,9 合同シンポジウム、富山、2011/9/2

12. 湯浅新治、「不揮発エレクトロニクスによるグリーンイノベーション」、日本セラミックス協会 資源・環境関連材料部会講演会、名古屋、2011/9/22
- *13. T. Nozaki, “Voltage induced magnetization dynamics in an ultrathin FeCo layer.”, 56th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials, Scottsdale Arizona, 2011/10/30-11/3
14. S. Yuasa, Kay Yakushiji, Hitoshi Kubota, Akio Fukushima, Koji Ando, “Magnetic tunnel junctions with perpendicular anisotropy for high-density spin-torque MRAM”, 日本一ポーランド合同ワークショップ, ワルシャワ, 2011/11/15-18
15. Y. Suzuki, “Electric field induced dynamic magnetization switching in FeCo ultrathin films at room temperature”, 日本一ポーランド合同ワークショップ, ワルシャワ, 2011/11/15-18
16. S. Yuasa, Kay Yakushiji, Hitoshi Kubota, Akio Fukushima, Koji Ando, “Magnetic tunnel junctions for non-volatile memory”, 2011 Tsukuba Nanotechnology Symposium (TNS’ 11), つくば, 2011/12/16
17. 鈴木義茂, “電流と電圧によるスピンの制御 -高速省エネルギー不揮発性素子の実現に向けて”, 学振主催:アモルファス・ナノ材料第147委員会第114回研究会, 東京弘済会館, 東京, 2011/12/16
18. S. Yuasa, Kay Yakushiji, Hitoshi Kubota, Akio Fukushima, Koji Ando, “Magnetoresistance and spin-transfer torque in magnetic tunnel junctions”, The 2nd ASRC International Workshop on Magnetic Materials and Nanostructures, 茨城県東海村, 2012/01/10
19. S. Yuasa, Kay Yakushiji, Hitoshi Kubota, Akio Fukushima, Koji Ando, “Magnetoresistance and spin-transfer torque in magnetic tunnel junctions”, The 2nd CSIS Int. Symp. on Spintronics-based VLSIs and 8th RIEC Int. Workshop on Spintronics, 仙台, 2012/02/02
20. Y. Suzuki, “Electric field induced dynamics in FeCo ultrathin films”, M-SNOW workshop, Les Houches France, 2012/2/5-10
21. 湯浅 新治、薬師寺啓、久保田均、福島章雄、安藤功兒、「磁気トンネル接合のトンネル磁気抵抗効果とスピントルク」、第 59 回 応用物理学会関係連合講演会、東京、2012/3/15
22. Y. Suzuki, “Electric field induced anisotropy change and a dynamics in FeCo ultrathin films”, The 88th Korean Physics Society, Korea, 2012/4/27
- *23. S. Yuasa, “MgO-based Magnetic Tunnel Junctions for High-density Spin-transfer-torque MRAM”, IEEE International Memory Workshop, Milan, Italy, 2012/05/20
24. Y. Suzuki, “Electric field induced magnetic dynamics in magnetic tunnel junctions with an FeCo ultrathin layer”, The 9th RIEC International Workshop on Spintronics, Tohoku University, Sendai, Japan, 2012/6/2
25. S. Yuasa, “MgO-based Magnetic Tunnel Junctions for High-density Spin-transfer-torque MRAM”, 2012 Annual Conference of Taiwan Association for Magnetic Technology, Kaohsiung, Taiwan, 2012/06/27
- *26. S. Yuasa, “MgO-based Magnetic Tunnel Junctions for High-density Spin-transfer-torque MRAM”, International Conference on Magnetism (ICM 2012),

Busan, Korea, 2012/07/09

27. S. Yuasa, "MgO-based Magnetic Tunnel Junctions for High-density Spin-transfer-torque MRAM", 6th WCU International Symposium on Nanomaterials and Electronics (WCU-06), Gwangju, Korea, 2012/09/22
- *28. T. Nozaki, Y. Shiota, S. Miwa, S. Murakami, F. Bonell, S. Ishibashi, H. Kubota, K. Yakushiji, T. Saruya, A. Fukushima, T. Shinjo, S. Yuasa and Y. Suzuki, "Voltage control of spin dynamics and spin-filtering effect in fully epitaxial magnetic tunnel junctions", International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS2012), Shanghai, China, 2012/09/25
29. Y. Suzuki, "Dynamic switching of a magnetization using voltage pulses", London Royal society meeting, Kavli centre, London (UK), 2012/9/26-27
- *30. T. Nozaki, Y. Shiota, S. Miwa, S. Murakami, F. Bonell, S. Ishibashi, H. Kubota, K. Yakushiji, T. Saruya, A. Fukushima, T. Shinjo, S. Yuasa and Y. Suzuki, "Spin dynamics in FeCo ultrathin films exerted by voltage pulses", International Conference of the Asian Union of Magnetism Societies (ICAUMS 2012), Nara, Japan, 2012/10/2-5
31. S. Yuasa, "MgO-based Magnetic Tunnel Junctions for High-density Spin-transfer-torque MRAM", MINT Workshop, Alabama, USA, 2012/11/02
32. S. Yuasa, "MgO-based Magnetic Tunnel Junctions for High-density Spin-transfer-torque MRAM", Luc Berger Mini-Symposium, Pittsburg, USA, 2012/11/12
33. F. Bonell, Y. Shiota, T. Nozaki, S. Miwa, T. Shinjo, Y. Suzuki, "Voltage Control of Magnetic Anisotropy in Ultrathin FePd and FeCo, and Coherent Magnetization Switching Using Voltage Pulses", Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems, Hawaii, USA, 2012/12/3
34. S. Yuasa, "MgO-based Magnetic Tunnel Junctions for High-density Spin-transfer-torque MRAM", セミコン・ジャパン 2012, 幕張, 2012/12/5
- *35. Y. Shiota, Y. Suzuki, S. Miwa, F. Bonell, T. Nozaki, N. Mizuochi, T. Shinjo, "High-speed dynamics induced by electric field in magnetic tunnel junctions", The 12th Joint MMM/Intermag Conference, Chicago, Illinois (USA), 2013/1/15
36. 鈴木義茂, "磁気 RAM の現状と将来—スピン流および電界による磁気書き込みの動向—", 応用物理学会関西支部第 2 回講演会, 大阪大学中之島センター, 大阪, 2013/1/25
37. S. Yuasa, "MgO-based Magnetic Tunnel Junctions for High-density Spin-transfer-torque MRAM", SEMI Technology Symposium(STS) 2013, Seoul, Korea, 2013/1/30
- *38. Y. Shiota, T. Nozaki, S. Miwa, F. Bonell, N. Mizuochi, T. Shinjo, Y. Suzuki, "Dynamic magnetization switching and spin wave excitations by voltage-induced torque", 2013 APS March Meeting, Baltimore Convention Center, 2013/3/21
- *39. S. Yuasa, "Fundamentals of Magnetic Tunnel Junctions, SpinTransfer Torque and MRAM", Material Research Society (MRS) Spring Meeting, San Francisco (USA), 2013/4/1
40. Y. Suzuki, Y. Shiota, F. Bonell, T. Nozaki, D. D. Lam, S. Miwa, N. Mizuochi, T. Shinjo, "Electric field induced magnetization dynamics in tunnel junctions with an FeCo ultrathin

- layer”, International Workshop of Computational Nano-Materials Design on Green Energy , Awaji Yumebutai International Conference Center Japan, 2013/6/18
41. 湯浅新治、薬師寺啓、野崎隆行、甲野藤真、松本 利映、久保田均、福島章雄、安藤功兒、「トンネル磁気抵抗効果とスピントルクの基礎と応用」、第 77 回半導体・集積路技術シンポジウム 回半導体・集積路技術シンポジウム、東京、2013/7/11
 - *42. T. Nozaki, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa, “Enhanced Tunnel Magnetoresistance Effect in an Epitaxial Magnetic Tunnel Junction with a Hybrid γ -Fe₂O₃/MgO Barrier”, ISAMMA 2013, Taichung (Taiwan), 2013.7.25
 - *43. S. Yuasa, “Novel spintronics devices based on magnetic tunnel junctions: beyond magnetic sensor and memory”, Gordon Research Conference on Spin Dynamics in Nanostructures, Hong Kong (China), 2013.8.22
 - *44. S. Yuasa, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nozaki, M. Konoto, H. Maehara, H. Kubota, K. Ando, “Future prospects of magnetoresistance, spin manipulation technology and their applications to novel spintronic devices”, Joint European Magnetism Symposia (JEMS 2013), Rhodes (Greece), 2013.8.29 (基調講演)
 45. 鈴木義茂, 「電圧による磁気異方性の制御」, 新世代研究所第 1 回スピントロニクス研究会, ホテル龍名館東京, 2013/8/30
 46. S. Yuasa, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nozaki, M. Konoto, H. Maehara, H. Kubota, K. Ando, “Future prospects of magnetoresistance, spin manipulation technology and their applications to novel spintronic devices”, International Conference on Nano-Magnetism (ICMN-2013), Istanbul (Turkey), 2013.9.2
 - *47. T. Nozaki, Y. Shiota, S. Miwa, F. Bonell, H. Kubota, K. Yakushiji, S. Tamaru, R. Matsumoto, M. Konoto, T. Saruya, H. Maehara, A. Fukushima, T. Shinjo, S. Yuasa, Y. Suzuki, “Electric-field induced ferromagnetic resonance in magnetic tunnel junctions”, 58th Annual Conference on MMM, Denver (USA), 2013/11/8
 48. S. Yuasa, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nozaki, M. Konoto, H. Maehara, R. Matsumoto, H. Kubota, T. Taniguchi, H. Imamura, K. Ando, “Future Prospects of Spintronic Devices”, Nano-scale dynamics in magnetism workshop, Daejeon (Korea), 2013/11/16
 49. 鈴木義茂, 野崎隆行, 塩田陽一, F. Bonell, 中村哲也, D.D. Lam, 三輪真嗣, 水落憲和, 新庄輝也, 「電圧による強磁性金属の磁気異方性制御」, CCMS 第3回シンポジウム, 東京大学物性研究所・柏の葉キャンパス, 2013/11/19
 50. S. Yuasa, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nozaki, M. Konoto, H. Maehara, H. Kubota, K. Ando, “Novel phenomena for spintronic device applications”, The 2nd STT-MRAM Global Innovation Forum 2013, Tokyo, 2013/11/20
 51. Y. Suzuki, “Voltage induced magnetization dynamics in tunnel junctions with an iron-cobalt ultrathin layer”, The 2nd STT-MRAM Global Innovation Forum 2013, Tokyo, 2013/11/20
 52. F. Bonell, Y. Shiota, S. Miwa, D.D. Lam, Y.T. Takahashi, K. Tanaka, Y. Suzuki, T. Nozaki, S. Yuasa, F. Wilhelm, A. Rogalev, T. Nakamura, “Electric field control of anisotropy in ferromagnetic thin films”, International Japanese-French Workshop on Spintronics, LAL - Laboratoire de l’Accélérateur Linéaire (Bures-sur-Yvette, France), 2013/11/28
 - *53. S. Yuasa, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nozaki, M. Konoto, H. Maehara, H. Kubota,

- T. Taniguchi, H. Arai, H. Imamura, K. Ando, Y. Shiota, F. Bonell, Y. Suzuki, N. Shimomura, E. Kitagawa, J. Ito, S. Fujita, K. Abe, K. Nomura, H. Noguchi, and H. Yoda, “Future Prospects of MRAM Technologies”, IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM 2013), Washington DC (USA), 2013.12.9
54. 湯浅新治、福島章雄、薬師寺啓、野崎隆行、甲野藤真、前原大樹、久保田均、谷口知大、荒井礼子、今村裕志、安藤功兒、塩田陽一、Frederic Bonnel、鈴木義茂、下村尚治、北川英二、伊藤順一、藤田忍、安部恵子、野村久美子、野口紘希、與田博明、「不揮発性メモリ MRAM の現状と将来展望」、応用物理学会シリコンテクノロジー分科会第 16 回研究集会、東京・機械振興会館、2014/1/29
55. S. Yuasa, T. Nozaki, A. Fukushima, K. Yakushiji, H. Kubota, H. Maehara, M. Konoto, T. Taniguchi, H. Arai, H. Imamura, Y. Shiota, F. Bonell, and Y. Suzuki, “Novel functional devices based on magnetic tunnel junctions”, REIMEI 2014, Grenoble(France), 2014/2/11
56. 野崎隆行、「電界によるスピンドYNAMICS制御」、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、相模原市、2014/3/18
57. 鈴木義茂、「ナノサイズ強磁性体の電流と電圧による磁化制御」、ナノ学会、京都大学宇治キャンパス、2014/5/22
58. Y. Suzuki, Y. Shiota, T. Nozaki, F. Bonell, S. Yuasa, T. Shinjo S. Miwa, “Electric field induced high speed dynamics in FeCo ultrathin films”, Magnetic North IV: Controlling magnetism and its excitations, Victoria (Canada), 2014/5/23
59. T. Nozaki, “Voltage control of magnetic anisotropy in an ultrathin ferromagnetic metal layer”, JSPS Core-to-Core Program A. Advanced Research Networks: Computational Materials Design on Green Energy, 大阪, 2014/7/2
60. T. Nozaki, Y. Shiota, S. Miwa, F. Bonell, H. Kubota, K. Yakushiji, S. Tamaru, R. Matsumoto, M. Konoto, A. Fukushima, S. Yuasa, Y. Suzuki, “Towards the realization of voltage-driven spintronics”, The 1st Asia Joint Workshop on Functional Materials Science, 札幌, 2014/8/1
- *61. Y. Suzuki, F. Bonell, Y. Shiota, S. Miwa, T. Nozaki, T. Shinjo, “Voltage Control of Magnetization and Its Chemical Properties”, ECS2014 (226th Meeting of the Electrochemical Society), Cancun (Mexico), 2014/10/5-10
- *62. S. Yuasa, “Future Prospects of MRAM Technologies”, ICAUMS 2014, Haikou (China), 2014/10/29 (基調講演)
63. S. Yuasa, “Challenges for ultrahigh-density MRAM and novel functional devices”, A*Star-IME STT-MRAM Workshop, Singapore, 2014.11.11
64. S. Yuasa, K. Yakushiji, A. Fukushima, T. Nozaki, Y. Shiota, M. Konoto, R. Matsumoto, H. Kubota, K. Ando, Y. Suzuki, “Perspectives on Spintronics and MRAM Technologies”, IEDMS 2014, Hualien (Taiwan), 2014.11.20 (基調講演)
65. 湯浅 新治、薬師寺啓、福島章雄、久保田 均、野崎 隆行、塩田 陽一、甲野藤 真、安藤 功兒、三輪 真嗣、鈴木 義茂、「金属スピントロニクス応用の現状と将来ビジョン」、応用物理学会 春期学術講演会、神奈川・東海大学、2015/03/13

② 口頭発表 (国内会議 26件、国際会議 11件)

1. 縄岡孝平, 塩田陽一, 三輪真嗣, 水落憲和, 新庄輝也, 鈴木義茂, “薄膜 Fe 中のスピン

- 波伝搬における外部電圧印加効果”, 日本物理学会(2014年)第69回年次大会, 東海大学湘南キャンパス, 2014/3/28
2. 室岡勇太、久保田均、薬師寺啓、福島章雄、湯浅新治、安藤功兒、前原大樹、西村和正、恒川孝二、ダビッド ジャヤプラウイラ、「二重 MgO 障壁強磁性トンネル接合の磁気伝導特性」、第34回日本磁気学会学術講演会(2010)、2010/9/4
 3. 塩田陽一、野崎隆行、新庄輝也、白石誠司、鈴木義茂、「磁気ノイズ測定を用いた電圧誘起磁気異方性変化の定量評価」、つくば国際会議場、第34回日本磁気学会学術講演会(2010)、2010/9/7
- 村上真一、塩田陽一、野崎隆行、新庄輝也、白石誠司、鈴木義茂、「Ag/超薄膜 Fe/MgO 接合における電圧誘起磁気異方性制御」、2010年秋季第71回応用物理学会学術講演会、長崎大学、長崎、2010/9/17
4. F. Bonell, S. Murakami, Y. Shiota, T. Nozaki, T. Shinjo, and Y. Suzuki, “Effect of an electric field on the magnetic anisotropy of epitaxial FePd ultrathin films”, MMM2010, Atlanta, Georgia, USA, 2010/11/16
 5. 野崎隆行、塩田陽一、村上真一、F. Bonell、新庄輝也、鈴木義茂、Fe/MgO 接合系における電界誘起磁気異方性制御の最近の進展、東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究(H22/A03)研究会、東北大学、2010/12/17
 6. F. Bonell, S. Murakami, Y. Shiota, T. Nozaki, T. Shinjo, Y. Suzuki, “Large change of magnetic anisotropy induced by an electric field in FePd ultrathin films”, The 2011 International Magnetism Conference, Taipei, 2011/4/29.
 7. F. Bonell, S. Murakami, Y. Shiota, T. Nozaki, T. Shinjo, Y. Suzuki, “Effet d’un champ électrique sur le magnétisme de films ultraminces de FePd”, XIVeme Colloque Louis Neel, Brest Oceanopolis France, 2011/9/21
 8. 村上真一、吉田 茂、塩田陽一、Frédéric Bonell、三輪真嗣、新庄輝也、鈴木義茂 「4d 貴金属/Fe(Co)/MgO 接合における電圧による磁気異方性の制御」、日本物理学会秋季大会、富山大学、2011/9/23
 9. 塩田陽一、村上真一、Frédéric Bonell、野崎隆行、新庄輝也、鈴木義茂、「パルス電圧によるダイナミック磁化反転」、第35回日本磁気学会学術講演大会、新潟コンベンションセンター、2011/9/29
 10. F. Bonell, S. Murakami, Y. Shiota, T. Nozaki, T. Shinjo, Y. Suzuki, “Voltage control of the magnetic anisotropy of FePd ultrathin films in epitaxial magnetic tunnel junctions. ”, 56th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials, Scottsdale Arizona, 2011/11/1
 11. S. Yuasa, T. Nozaki, A. Fukushima, “Spintronic devices based on metal/oxide hybrid structure”, Frontier of Functional-Oxide Nano Electronics “Application to Novel Three Terminal Switches”, つくば, 2011/11/10
 12. H. Maehara, K. Nishimura, H. Hosoya, K. Tsunekawa, “Bi-stable magnetization switching controlled by the voltage induced magnetic anisotropy change”, Frontier of Functional-Oxide Nano Electronics “Application to Novel Three Terminal Switches”, つくば, 2011/11/10
 13. Y. Suzuki, Y. Shiota, T. Nozaki, “Bi-stable magnetization switching controlled by the voltage induced magnetic anisotropy change”, Frontier of Functional-Oxide Nano Electronics “Application to Novel Three Terminal Switches”, つくば, 2011/11/10

14. 塩田陽一, 野崎隆行, F. Bonell, 村上真一, 三輪真嗣, 水落憲和, 新庄輝也, 鈴木義茂, “パルス電圧によるダイナミック磁化反転の電界強度依存性”, 2012 年春季第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学, 東京, 2012/3/18
15. Frederic Bonell, Yoichi Shiota, Takayuki Nozaki, Shinji Miwa, Teruya Shinjo and Yoshishige Suzuki, “Electric field control of magnetic anisotropy in magnetic tunnel junctions with FeCo and FePd ultrathin films.”, 日本磁気学会第 43 回スピントロニクス専門研究会, 京都大学, 2013/1/7
16. Hiroyuki Hosoya, Hiroki Maehara, Ai Emura, Takeshi Saruya, Kazumasa Nishimura, Yoshinori Nagamine, Koji Tsunekawa, Hitoshi Kubota, Akio Fukushima and Shinji Yuasa, “Fabrication of MgO/Co Ferrite-Based Magnetic Tunnel Junctions”, 12th Joint MMM-Intermag Conference, Chicago, Illinois, USA, January 2013.
17. 塩田陽一, 野崎隆行, Frédéric Bonell, 村上真一, 三輪真嗣, 水落憲和, 新庄輝也, 鈴木義茂, 「パルス電圧によるダイナミック磁化反転の電界強度依存性」, 2012 年春季第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 2012/03/18
18. F. Bonell, Y. Shiota, S. Miwa, T. Nozaki, N. Mizuochi, T. Shinjo, Y. Suzuki, “Voltage control of magnetic anisotropy of FePd ultrathin films in epitaxial magnetic tunnel junctions”, the 21th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS2012), Fudan University, Shanghai, China, 2012/9/25
19. 塩田陽一, Frédéric Bonell, 三輪真嗣, 水落憲和, 新庄輝也, 鈴木義茂
「Co₁₆Fe₆₄B₂₀/MgO 接合における電界誘起異方性変化の下地層依存特性」
2013 年春季 第 60 回 応用物理学関係連合講演会, 2013/3/27-30
20. T. Nozaki, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa, “Tunnel magnetoresistance effect in Fe/MgO/Fe₂O₃/Fe/IrMn junctions”, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川, 2013/3/30
21. 野崎隆行, 薬師寺啓, 田丸慎吾, 松本利映, 甲野藤真, 久保田均, 福島章雄, 湯浅新治, “MgO/FeB/MgO 構造における電圧磁気異方性制御”, 第 37 回日本磁気学会学術講演会, 札幌市, 2013/9/5
22. 野崎隆行, 久保田均, 福島章雄, 湯浅新治, “ σ -Fe₂O₃/MgO 障壁層を介したトンネル磁気抵抗効果”, 第 37 回日本磁気学会学術講演会, 札幌市, 2013/9/5
23. 塩田陽一, 三輪真嗣, F. Bonell, 水落憲和, 新庄輝也, 鈴木義茂, “電圧誘起強磁性共鳴による電圧トルク評価”, 第 37 回日本磁気学会学術講演会, 北海道大学, 2013/9/5
24. D.D. Lam, F. Bonell, S. Miwa, Y. Shiota, K. Yakushiji, H. Kubota, T. Nozaki, A. Fukushima, S. Yuasa, Y. Suzuki, “MgO overlayer thickness dependence of perpendicular magnetic anisotropy in Ta/CoFeB/MgO/Ta multilayers”, 第 74 回応用物理学会学術講演会, 同志社大学, 2013/9/19
25. Takayuki Nozaki, Kay Yakushiji, Shingo Tamaru, Rie Matsumoto, M. Konoto, Hitoshi Kubota, Akio Fukushima, Shinji Yuasa, “Voltage-induced magnetic anisotropy change in an MgO/FeB/MgO junction”, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 京田辺市, 2013/9/19
26. Y. Shiota, S. Miwa, F. Bonell, N. Mizuochi, T. Shinjo, Y. Suzuki, “Evaluation of voltage-torque by voltage-induced ferromagnetic resonance in CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions.”, 58th Annual Conference on MMM, Denver, USA, 2013/11/8

27. 縄岡孝平, 塩田陽一, 三輪真嗣, 水落憲和, 新庄輝也, 鈴木義茂, “Fe 薄膜におけるスピン波伝搬の電圧変調”, 電通研共同プロジェクト研究会, 東北大学電気通信研究所, 2013/11/27
28. 塩田陽一, 三輪真嗣, 水落憲和, 新庄輝也, 鈴木義茂, “超薄膜 3d 遷移金属/MgO 接合系における電圧効果及びスピン波共鳴の分裂”, 電通研共同プロジェクト研究会, 東北大学電気通信研究所, 2013/11/27
29. 野崎隆行, 塩田陽一, 三輪真嗣, 薬師寺啓, 荒井礼子, F. Bonell, 田丸慎吾, 松本利映, 甲野藤真, 猿谷 武史, 久保田均, 今村裕志, 福島章雄, 新庄輝也, 鈴木義茂, 湯浅新治, “電界によるスピンドイナミクス制御 Electric-field control of spin dynamics”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学相模原キャンパス, 2014/3/18
30. F. Bonell, T. Nozaki, S. Miwa, D.D. Lam, K. Tanaka, Y. Shiota, Y. Takahashi, S. Yuasa, F. Wilhelm, A. Rogalev, Y. Suzuki, “XMCD study of magnetoelectricity in L10 FePd ultrathin films”, Functional Materials for Electronics Workshop, ESRF Auditorium, Grenoble, France, 2014/2/3
31. 塩田陽一, 三輪真嗣, Frederic Bonell, 水落憲和, 新庄輝也, 鈴木義茂, “Evaluation of voltage-torque through the voltage-induced ferromagnetic resonance”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学相模原キャンパス, 2014/3/20
32. 縄岡孝平, 塩田陽一, 三輪真嗣, 水落憲和, 新庄輝也, 鈴木義茂, “薄膜 Fe 中のスピン波伝搬における外部電圧印加効果”, 日本物理学会 (2014 年) 第 69 回年次大会, 東海大学湘南キャンパス, 2014/3/28
33. 野崎隆行, 荒井礼子, 薬師寺啓, 田丸慎吾, 久保田均, 今村裕志, 福島章雄, 湯浅新治 (産総研), 高周波電圧アシスト磁化反転, 日本磁気学会, 横浜, 2014/9/2
34. 野崎隆行 (産総研), 大久保忠勝 (NIMS), 塩田陽一 (阪大), 久保田均 (産総研), 福島章雄 (産総研), 宝野和博 (NIMS), 鈴木義茂 (阪大), 湯浅新治 (産総研), 極薄 Fe 酸化物挿入による MgO 上 Fe 層成長の濡れ性改善効果, 日本磁気学会, 横浜, 2014/9/4
35. 田中和仁 (阪大), 三輪真嗣 (阪大), 塩田陽一 (産総研), 田村英一 (阪大), 水落憲和 (阪大), 新庄輝也 (阪大), 鈴木義茂 (阪大), “Voltage induced anisotropy change in FeGd”, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 2014/9/19
36. 縄岡孝平 (阪大), 塩田陽一 (産総研), 三輪真嗣 (阪大), 富田博之 (産総研), 水落憲和 (阪大), 新庄輝也 (阪大), 鈴木義茂 (阪大), “スピン波電圧変調における伝搬方向対称性の評価”, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014/9/7
37. Yoichi Shiota, Shinji Miwa, Shingo Tamaru, Takayuki Nozaki, Hitoshi Kubota, Akio Fukushima, Yoshishige Suzuki, Shinji Yuasa, “High-output microwave detector using voltage-induced ferromagnetic resonance”, 2015 年応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015/3/13
- ③ ポスター発表 (国内会議 9件、国際会議 15件)
1. Y. Shiota, S. Murakami, T. Nozaki, T. Shinjo, S. -S. Ha, S. Lee and C. -Y. You, Y. Suzuki, Quantitative estimation of voltage induced magnetic anisotropy change in an ultrathin Fe₈₀Co₂₀ / MgO junctions, Workshop on “Spin-wave aspects in spintronics”, TUKaiserslautern, Kaiserslautern, Germany, 2010/10/4
2. S. Murakami, Y. Shiota, T. Nozaki, F. Bonell, T. Shinjo, and Y. Suzuki, “Voltage Control of Magnetic Anisotropy in a Ag/ultrathin Fe/MgO Junction”, ICAUMS2010, Hotel Lotte Jeju, Jeju Island, Korea, 2010/12/5-8

3. 村上真一, 塩田陽一, 野崎隆行, 新庄輝也, 鈴木義茂, “Ag/超薄膜Fe/MgO構造における電圧による磁気異方性制御とその定量評価”, 日本物理学会第66回年次大会, 新潟大学, 新潟, 2011/3/26
4. D.D. Lam, F. Bonell, K. Konishi, Y. Fujii, S. Murakami, Y. Shiota, T. Shinjo, Y. Suzuki, “Perpendicular Magnetic Anisotropy of CoFeB thin films”, The 5th international Workshop on spin currents, Sendai International Center, Sendai, JAPAN, 2011/7/24-28
5. 塩田陽一, 村上真一, Frédéric Bonell, 野崎隆行, 新庄輝也, 鈴木義茂, 「電圧誘起磁気異方性変化によるダイナミック磁化反転制御」, 秋季応用物理学会学術講演会, 2011/08/31
6. Y. Shiota, S. Murakami, F. Bonell, T. Nozaki, T. Shinjo, Y. Suzuki, “Electric-field dependence of switching probability for dynamic magnetization switching in a few atomic layers of FeCo”, 56th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials, Scottsdale Arizona, 2011/10/30-11/3
7. D.D. Lam, F. Bonell, S. Miwa, Y. Shiota, K. Yakushiji, H. Kubota, T. Nozaki, “Dependence of perpendicular magnetic anisotropy of CoFeB thin films on thickness of MgO overlayer”, The 19th International Conference on Magnetism(ICM2012), Busan (Korea), 2012/7/9
8. Y. Shiota, S. Miwa, N. Mizuochi, T. Shinjo and Y. Suzuki, “Spin wave propagation in single crystal Au(001)/Fe(001)/MgO(001) waveguides”, The 19th International Conference on Magnetism(ICM2012), Busan (Korea), 2012/7/13
9. F. Bonell, Y. Shiota, S. Miwa, T. Nozaki, N. Mizuochi, T. Shinjo, Y. Suzuki, “Voltage control of magnetic anisotropy of FePd ultrathin films in epitaxial magnetic tunnel junctions”, ICMFS2012, Fudan University, Shanghai, China, 2012/9/24-28
10. P. Sheng, F. Bonell, S. Miwa, T. Nakamura, Y. Shiota, S. Murakami, D. D. Lam, S. Yoshida, and Y. Suzuki, “Observation of Spin-Dependent Quantum Interference Effects in Magnetic Tunnel Junctions with Fe Quantum Wells”, the 21th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS2012), Fudan University, Shanghai, (China), 2012/9/24-28
11. D.D. Lam, F. Bonell, S. Miwa, Y. Shiota, K. Yakushiji, H. Kubota, T. Nozaki, A. Fukushima, S. Yuasa, Y. Suzuki, “MgO overlayer thickness dependence of perpendicular magnetic anisotropy in Ta/CoxFe80-xB20/MgO/Ta (x = 0, 10, 60) multilayers”, International Conference of the Asian union of Magnetic Societies (ICAUMS2012), Nara, Japan, 2012/10/4
12. F. Bonell, D. Lam, S. Yoshida, Y. Takahashi, Y. Shiota, S. Miwa, T. Nakamura, Y. Suzuki, “X-ray magnetic circular dichroism of ultrathin Fe-Co under an electric field”, The 12th Joint MMM/Intermag Conference, Chicago, Illinois (USA), 2013/1/16
13. Y. Shiota, F. Bonell, S. Miwa, N. Mizuochi, T. Shinjo, Y. Suzuki, “Voltage-induced perpendicular magnetic anisotropy change in sputtered Ru/CoFeB/MgO structure”, The 8th International Symposium on Metallic Multilayers (MML2013), Kyoto Japan, 2013/5/20
14. D.D. Lam, F. Bonell, S. Miwa, Y. Shiota, N. Mizuochi, T. Shinjo, Y. Yomogida, T. Takenobu, Y. Iwasa, Y. Suzuki, “Voltage control of magnetic anisotropy in CoFeB thin films with ion gel dielectrics”, The 8th International Symposium on Metallic Multilayers (MML2013), Kyoto Japan, 2013/5/23

15. 高橋良彰, 塩田陽一, 三輪真嗣, F. Bonell, 水落憲和, 新庄輝也, 鈴木義茂, “Tunnel magnetoresistance in MgO-based magnetic tunnel junctions with rare-earth materials”, 第 74 回応用物理学会学術講演会, 同志社大学, 2013/9/16
16. 塩田陽一, 三輪真嗣, 水落憲和, 新庄輝也, 鈴木義茂, “Au(001)/Fe(001)/MgO(001)におけるスピンの波伝搬の Fe 膜厚依存性”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013/9/25
17. Hiroyuki Hosoya, Hiroki Maehara, Yoshinori Nagamine, Koji Tsunekawa, Vadym Zayets, Shinji Yuasa “Characterization of Ultrathin Fe-Co Layer Grown on Amorphous Co-Fe-B by In-situ Reflective High-Energy Electron Diffraction” 58th Annual Conference on MMM, Denver Colorado, 2013/11/5
18. Takayuki Nozaki, Hitoshi Kubota, Akio Fukushima, and Shinji Yuasa, “Enhanced tunnel magnetoresistance effect in an epitaxial magnetic tunnel junction with a hybrid γ -Fe₂O₃/MgO barrier”, 58th Magnetism and Magnetic Materials Conference, Denver, 2013/11/8
19. K. Nawaoka, Y. Shiota, S. Miwa, N. Mizuochi, T. Shinjo, Y. Suzuki, “Voltage-induced-modulation of propagating spin-wave in Fe”, The 18th Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS-18), Osaka University, 2013/12/9
20. 田中和仁, 高橋良彰, 塩田陽一, 三輪真嗣, 田村英一, 水落憲和, 新庄輝也, 鈴木義茂, “Perpendicular anisotropy in V/Fe_{1-x}Gdx (x = 0, 10, 20) multilayers”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学相模原キャンパス, 2014/3/17
21. 佐々木香織, 塩田陽一, 三輪真嗣, 水落憲和, 新庄輝也, 鈴木義茂, “CoFeB 薄膜細線におけるスピンの波伝搬の幅依存性”, 日本物理学会 (2014 年) 第 69 回年次大会, 東海大学湘南キャンパス, 2014/3/27
22. Frederic Bonell, D. D. Lam, 吉田茂, 高橋良彰, 塩田陽一, 中村哲也, 三輪真嗣, ○鈴木義茂, “Au, Ag(001)/超薄 bcc-Fe(001)積層膜における表面偏析の XAS による解析”, 日本物理学会 (2014 年) 第 69 回年次大会, 東海大学湘南キャンパス, 2014/3/27
23. 塩田陽一(産総研), 三輪真嗣(阪大), 水落憲和(阪大), 新庄輝也(阪大), 鈴木義茂(産総研), “Spin wave spectroscopy in Au/ultrathin-Fe/MgO structure using vector network analyzer”, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 2014/9/17
24. 野崎隆行(産総研), 大久保忠勝(NIMS), 塩田陽一(産総研), 久保田均(産総研), 福島章雄(産総研), 宝野和博(NIMS), 鈴木義茂(阪大), 湯浅新治(産総研), “Improvement in magnetic properties of ultrathin Fe and Co layers grown on MgO(001) by inserting an ultrathin Fe oxide layer”, 第62回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015/3/11

(4)知財出願

①国内出願 (4件)

1. 「スピネルフェライト薄膜の製造方法」、恒川孝二、細谷裕之、キヤノンアネルバ株式会社、2011/4/13、2011- 89277
2. 「スピネルフェライト薄膜の製造方法」、恒川孝二、細谷裕之、キヤノンアネルバ株式会社、2011/4/13、2011- 89278
3. 「磁気的多層膜及びトンネル磁気抵抗素子」、湯浅新治、野崎隆行、独立行政法人産業技術総合研究所、2012/8/31、2012-192115

4. 「電圧駆動型三端子素子」、野崎隆行、松本利映、福島章雄、久保田均、薬師寺啓、湯浅新治、鈴木義茂、関家大輔、独立行政法人産業技術総合研究所、国立大学法人大阪大学、2012/9/10、2012-198496
5. 「マイクロ波検波器及びマイクロ波検波方法」、塩田陽一、野崎隆行、独立行政法人産業技術総合研究所、2014/11/12、2-14-229766

②海外出願 (1件)

1. 「磁気的多層膜及びトンネル磁気抵抗素子」、湯浅新治、野崎隆行、独立行政法人産業技術総合研究所、2013/8/7、PCT/JP2013/072812

(5)受賞・報道等

①受賞

- *1. IEEE Distinguished Lecturer Award、湯浅新治、2012年1月
- *2. 平成25年度文部科学省科学技術賞(研究部門)、鈴木義茂、2013年4月
- *3. 文部科学大臣表彰 若手科学者賞、野崎隆行、2013年4月16日
- 4. 平成25年度 大阪大学総長顕賞(研究部門)、鈴木義茂、2013年8月
- *5. 応用物理学会フェロー表彰、鈴木義茂、2013年9月
- 6. 平成26年度 大阪大学総長顕賞(研究部門)、鈴木義茂、2014年7月
- *7. 日本磁気学会 2014 業績賞、鈴木義茂、2014年9月
- *8. 応用物理学会フェロー表彰、湯浅新治、2014年9月
- *9. 第31回井上研究奨励賞、塩田陽一、2015年2月
- 10. 第5回応用物理学会春季学術講演会 Poster Award、野崎隆行、2015年3月
- *11. 第14回船井学術賞、野崎隆行、2015年4月(予定)

②マスコミ(新聞・TV等)報道

1. 大阪大・JST プレス発表:「電圧パルスによる磁石の反転に成功—省エネな磁気記録書き込み手法の発見—」、2011年11月11日
 (概要) 磁石の磁極の向きを反転させる従来の手法として、外部から磁界を加える手法やスピン注入法などがありますが、いずれも電流による反転手法であるため高電流密度が必要であり、低消費電力化の限界にせまることは難しいとされていました。そこで電力をほぼ消費しない「電圧によるスピン制御」が長く望まれていました。本研究では、代表的な磁石材料である鉄コバルト合金の超薄膜に絶縁層を介して1ナノ秒程度の電圧パルスを加えることにより、磁極方向を反転させることに成功しました。この手法は低消費電力であり、室温でも動作する上に高速であるため、将来の新たな省エネ磁気記録書き込み手法として固体磁気メモリなど電子機器への応用が期待できます。
 (掲載誌)(1)中日新聞「磁石に電圧、NS 反転—阪大チーム メモリー省力化期待」、2012/01/13、(2)MSN 産経 west「電圧で磁石のNS反転に成功 阪大チーム 省電力メモリー開発に期待」、2012/01/13、(3)読売新聞「瞬時の電圧で磁極反転の素子 阪大グループ開発」、2012/01/23、(4)その他 Web 報道多数
2. 産総研・JSTプレス発表:「電圧によるスピン制御の高効率化に成功」、2013/6/24
 (概要) 電圧によるスピン制御技術は、電子スピンを利用した新しいエレクトロニクスデバイスの創製を目指すスピントロニクスの超低消費電力駆動化を実現するためのキーテ

テクノロジーとして注目されていますが、現状では効率が低いことが応用上の課題となっています。今回、超薄膜化した金属磁石を酸化マグネシウム2層で挟みこんだ新しい積層構造において電圧によるスピン方向制御を試み、従来と比較して3倍の高効率化に成功しました。

(掲載誌)(1) 日刊工業新聞、「電圧で高効率制御」、2013年6月24日、(2) 鉄鋼新聞、「電圧で磁気異方性を制御 新素子構造で高効率化」、2013年6月28日、(3) 電波新聞、「電圧で生じる磁気異方性 変化量を3倍高効率化」、2013年7月3日、(4) その他 Web 報道多数

3. 産総研・JST プレス発表:「超低消費電力な磁気書き込みを実現する新技術を開発」、2014/6/27

(概要) 鉄を主とした金属磁石材料を超薄膜化し、酸化マグネシウム絶縁層を介して磁化の共鳴周波数に一致する高周波電圧を印加しながら磁化反転挙動を調べた。その結果、電圧印加により誘起される磁気異方性の周期的な変化により磁化の歳差運動が生じ、磁化反転磁界が大幅に低減されることを見出した。磁気記録や不揮発性固体磁気メモリなどの低消費電力な情報書き込み技術への適用が期待される。

(掲載誌)(1) 日刊工業新聞、「高周波電圧で磁化反転」、2014年6月13日、(2) 化学工業日報、「省電力の磁化反転技術」、2014年7月1日、(3) その他 Web 報道10件

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

・革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)「無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現」(プログラムマネージャーPM: 佐橋政司、H26~29)の中核テーマとして採択され、H26年10月から開始予定

§ 5 研究期間中の活動

5. 1 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2011年11月 10-11日	Frontier of Functional-Oxide Nano Electronics "Application to Novel Three Terminal Switches"	物質・材料 研究機構 (つくば)	約 100 人	酸化物エレクトロニクスに関 係する国際シンポジウム。海 外から6名の招待後援者を 招聘した。

§ 6 最後に

本CRESTの共同研究が縁となって、大阪大学グループの主力メンバーとして活躍していた野崎隆行氏と塩田陽一氏が産総研に常勤研究職員として移籍し、さらに大阪大学の鈴木義茂教授を非常勤のチーム長にして2014年4月に「電圧スピントロニクスチーム」を産総研ナノスピントロニクス研究センター内に新設した(写真1)。この新チーム設立の当初の目的は本CREST終盤の研究の加速であったが、その後、革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)「無充電で長期間使用できる究極のエコIT機器の実現」(H26~29、PM:佐橋政司)が採択されたため、ImPACTにおいても電圧スピントロニクスチームを中核にして「電圧トルクMRAM」の研究開発を推進する予定となっている。

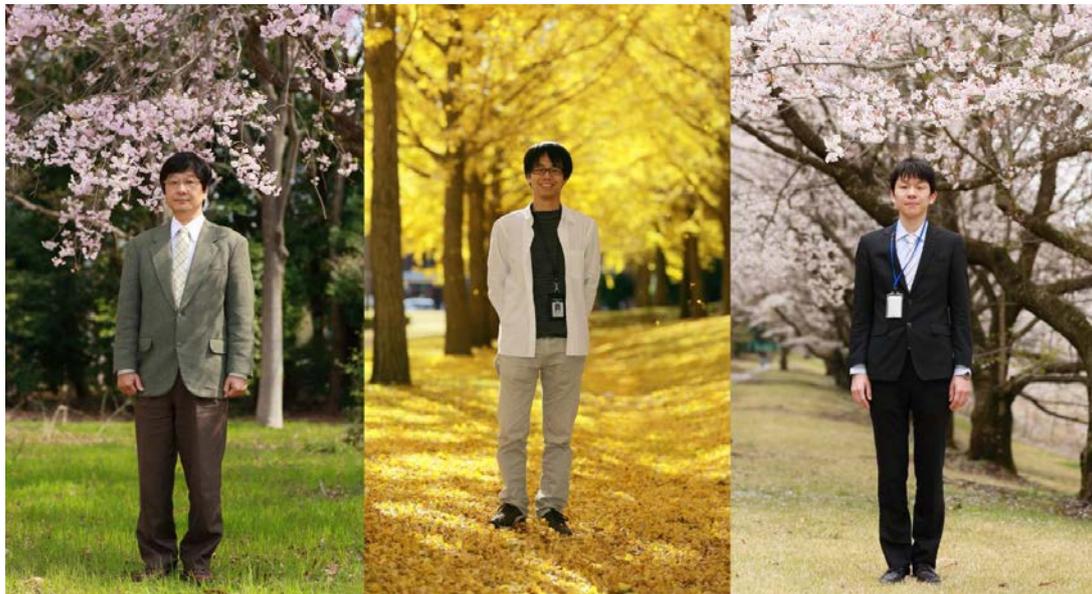


写真1 電圧スピントロニクスチームの主要メンバー。左から、鈴木氏、野崎氏、塩田氏(撮影者:湯浅新治、撮影場所:産総研つくば中央キャンパス内)