

氏名	白土 優
所属機関	大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 准教授
研究題目	光による反強磁性スピン励起を利用した反強磁性／強磁性界面スピン制御

## 1. 研究の目的

ユビキタスネットの発達によりデジタル情報は増加し続け、電子デバイスの更なる発展が必要とされる。このため、デジタル情報を高集積・高速に加えて低消費電力に扱うデバイスは、社会要請となっている。磁性体のスピンを利用したスピンメモリは、大容量や高速に加えて情報保持に電力供給を必要としない不揮発性を実現できる唯一のユニバーサルメモリであるが、従来研究は大容量化についての研究に偏っており、超高速性を実現するための研究開発は発展途上にある。本研究では、スピンメモリの超高速性を実現するための手法として、申請者らがこれまでに構築した反強磁性／強磁性スピンの強固な磁気結合、反強磁性スピンの等温反転などの申請者の独自技術に基づいた新しいスピン制御手法について検討する。具体的には、反強磁性体として酸化物反強磁性体である  $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用い、 $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の光スピン励起と電界効果を合わせた新規な反強磁性スピン制御方法について検討する。本研究で開発される技術は、例えば、コンピュータのクイック・オン、ノーマリー・オフなどの低消費電力社会での IT 機器に必須な機能を実現でき、電子機器の低消費電力化を抜本的に推進できる画期的技術となる。学術的波及効果としては、次世代通信技術であるテラヘルツ通信での電磁ノイズカットに必要な超高速スピン反転の学理構築にも寄与できる。

## 2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

### 試料作製方法

試料作製には、これまでに実績のある超高真空 DC マグネトロンスパッタリング装置を用いた。用いた装置の到達真空度は、 $10^{-7}$  Pa 台である。作製した試料の基本的な構成は、Pt/Co/ $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt および、Pt/Co/Pt/ $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt とした。試料作製方法の詳細(製膜速度、膜厚など)については、申請者が既に発表している論文等(例えば、Y. Shiratsuchi et al., Appl. Phys. Express, 3, 113001 (2010).)を参照されたい。

### 各種評価方法

作製した試料に対する各種評価として、構造評価、光学特性評価、磁気特性評価、ならびに、電気特性評価を行った。構造評価には、上記製膜システム中に具備された反射高速電子線回折(Reflection high-energy electron diffraction: RHEED)、X線回折(X-ray diffraction: XRD)を用い、その結果から、作製した薄膜の各層は、Pt(111)、Co(111)、 $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001)にそれぞれ配向していることが分かった。光学特性評価として、磁気光学 Kerr 効果(Magneto-optic Kerr effect: MOKE)スペクトル測定と $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>層の吸収スペクトル測定を行った。磁気特性評価には、振動試料型磁力計(Vibrating Sample Magnetometer: VSM)、極 Kerr 配置による MOKE 測定、異常ホール効果(Anomalous Hall Effect: AHE)を用いた。電気特性評価は、上記 AHE 用試料を用いて 2 端子法による電気抵抗測定を行った。また、AHE 測定ならびに電気特性評価のために、作製した薄膜をフォトリソグラフィと Ar イオンミリングを用いて 20  $\mu$ m 径のマイクロドットに微細加工した。

磁気特性評価、光学特性評価、電気特性評価については、次項で述べる。

## 2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

### 研究結果

#### 1. $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層の光学定数の決定

作製した Pt/Co/ $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt 薄膜に対する Kerr 回転角スペクトルが、光子エネルギーに対する明確な振動を示した。(Fig. 1(a))また、Kerr 回転角が最少となる光子エネルギーにおいて、Kerr 楕円率がピーク(絶対値として最大)を示した。(Fig. 1(b))この結果を、各層からの光学干渉を仮定したモデル計算によって再現した結果(Fig. 1 中の実線)、MOKE スペクトルの振動現象ならびにピーク構造は、 $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層内での光学干渉によって生じていることが分かり、実験結果をもちいて  $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層の光学定数(屈折率  $n$ , 消光係数  $\kappa$ ) を高精度に決定することが出来た。さらに、得られた光学定数を用いて、 $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜厚の異なる薄膜に対する MOKE スペクトルも良く再現させることが分かった。

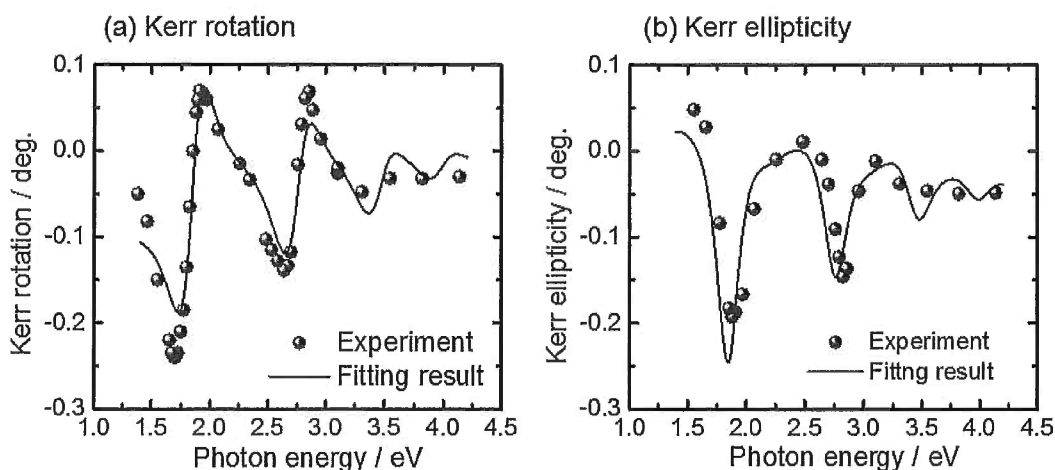


Fig. 1 Pt/Co/ $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt 薄膜における(a) Kerr 回転角スペクトルと(b) Kerr 楕円率スペクトル. 図中の点(緑および青)は実験値, 実線は各層の光学定数をフィッティングパラメータとした計算値を表わす.

#### 2. $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の電気磁気効果を利用した界面スピン制御

20  $\mu$ m に微細加工したマイクロドットを用いて、 $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層に対する電界印加を可能にした。 $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜は、1200kV/cm 以上においても絶縁性を有しており、リーク電流密度も 1200 kV/cm において  $10^{-2}$  A/cm<sup>2</sup> 以下の低い値を示した。本素子を用いて、電気磁気効果による  $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層の反強磁性スピン反転に成功した。また、電磁気効果によって反転した反強磁性スピンを強磁性スピンと交換結合させることにより、強磁性スピンの同時反転にも成功している。 $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜における電気磁気効果は、申請者を含めて世界で 2 グループでのみ可能な極めて独創性の高い成果である。本成果については、現在論文投稿中である。(4.3 成果論文参照。)

### その他(装置開発状況, 特記事項)

#### 3. 装置開発状況

次の段階として、光照射と電気磁気効果を組み合わせた光励起反強磁性スピン制御への展開に向けて、光照射下での低温・垂直磁場 AHE 測定装置の開発を完了させている。現在は、本装置を用いて、光照射下での電磁気磁気効果の変調、反強磁性スピンの光制御の可能性についての検討を進めている。

#### 4. 特記事項

上記の成果が認められ、助成期間中に 4 件の国際会議招待講演, 5 件の国内会議招待講演を受け、平成 26 年度にも招待講演, 原稿執筆依頼を受けている。さらに、平成 26 年度の第 35 回本多記念研究奨励賞, 大阪大学総長奨励賞【研究部門】を受賞するなど、研究成果を認められている。

### 3. 研究の結論、今後の課題

#### 現時点での結論

$\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の光学特性、絶縁性、電磁気機効果については、薄膜とバルクにおける結晶構造の相違等から、特に、 $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜においては議論が続けられているが、本研究で採用した超高真空マグネトロンスパッタリング法を用いることにより、バルクと同等の特性を有する $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜が作製できることが明らかになった。これは、 $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>をスピンエレクトロニクスデバイスに適用する場合等には重要な知見であり、デバイスへの実現を加速させるものである。

また、 $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜においても電気磁気効果による界面磁性制御が可能であることが明らかになったため、今後は電気磁気効果の定量的評価、低エネルギー化、室温動作も含めて、デバイス応用に向けた検討を展開する予定である。

#### 今後の課題と展望

本課題では、光励起反強磁性スピン制御のベースとなる、(1)  $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜内での光学干渉と光学定数の決定ならびに、(2)  $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜における電気磁気効果の発現と反強磁性スピン制御を達成した。今後は、現時点で装置開発が完了している光照射下異常 Hall 効果測定装置を利用して、電気磁気効果の増強、すなわち、低エネルギースピン反転技術の開発に展開する予定である。

特に、現時点では、 $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜における電気磁気効果は、260 K (-13°C) 以下の低温領域に限られるため、本効果を室温以上で実現することが大きな課題の一つである。今後は、 $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>層の形成方法（下地層の選択等）も検討課題として、室温動作に向けた検討も進める。

#### 4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

##### 4. 1. 社会的価値

スピントロニクスは、従来の半導体と異なり、電子の電荷とスピンを同時に利用することで、デバイスの革新的な高性能化を可能にする。本研究で得られた成果は、例えば、これまでメモリ(記録)とロジック(演算)を個別の素子に対して、これらを同一素子で行うこと可能な革新的デバイス(ロジック・イン・メモリ)の創製を可能にする。これが可能になると、例えば、コンピュータのCPUに搭載した場合、ノーマリー・オフ・コンピューター(テレビのように瞬時に立ち上がるコンピュータ。このため、通常は電源を切れる。)の基盤技術となり得るため、情報デバイスの消費電力を1/10以下にすることが可能になる。

##### 4. 2. 学術的価値

$\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ の電気磁気効果は1960年代初頭に発見されたにもかかわらず、これまでバルク(鉱物)における効果に留まっており、デバイスに必須となる $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ 薄膜における効果が見出されていなかった。これに対して、本研究において $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ 薄膜を用いて電気磁気効果の実現が可能になったことは、デバイス応用の観点とともに、本研究で示したように界面磁性の電界制御を可能にする点で、学術的にも極めて高い意義を有する。

また、交換磁気異方性と呼ばれる界面磁性の外場制御が可能になったことにより、これまで静的な効果として利用されてきた反強磁性スピンをデバイス中で制御可能な動的効果に発展させることが可能になったことは、スピントロニクスデバイスに新しい機能性を付与できる革新的成果として位置づけられる。

##### 4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

Y. Shiratsuchi, K. Toyoki, Y. Nakano, S. Onoue, Y. Takechi, C. Mitsumata and R. Nakatani

High-temperature regeneration of perpendicular exchange bias in a Pt/Co/Pt/ $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ /Pt thin film system  
Applied Physics Express, vol. 6, no. 12, pp. 123004(4pp) (2013).

K. Toyoki, Y. Shiratsuchi, T. Nakamura, C. Mitsumata, S. Harimoto, Y. Takechi, T. Nishimura, H. Nomura and R. Nakatani

Equilibrium surface magnetization of  $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$  studied through interfacial chromium magnetization in Co/ $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$  layered structure

Submitted to Applied Physics Express (under review).

K. Toyoki, Y. Shiratsuchi, A. Kobane, S. Harimoto, S. Onoue, H. Nomura and R. Nakatani

Switching of perpendicular exchange bias in Pt/Co/Pt/ $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ /Pt layered structure using magneto-electric effect

Submitted to Journal of Applied Physics (under review).