## Germanium spintronics developed by semiconductor technologies

### K. Hamaya

Graduate School of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka, 560-8531, Japan

Because of high intrinsic electron and hole mobility, germanium (Ge) is promising for a new channel material in next-generation complementary metal oxide semiconductor (CMOS) transistors. Recently, the operation of Ge-CMOS transistors was reported at last.<sup>1)</sup>

Up to now, we have focused on the integration of spintronic technologies with Ge by using novel crystal growth techniques.<sup>2)</sup> First of all, high-quality Heusler-alloy films were grown by molecular beam epitaxy at room temperature.<sup>3)</sup> Next, a newly developed delta-doping method was utilized for achieving electrical spin injection and detection.<sup>4)</sup> Using Ge-based lateral spin-valve (LSV) devices with a heavily doped transport layer ( $\sim 10^{19}$ cm<sup>-3</sup>), we clearly detected spin transport and obtained relatively short spin diffusion lengths of ~ 800 nm at low temperatures.<sup>5)</sup> Finally, for Ge-based spin-based MOSFET, gate-stack structures were developed only by low-temperature fabrication processes.<sup>6)</sup> Despite a process less than 300°C, the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GeO<sub>2</sub> structures can operate as a gate-stack for a Ge spin-MOSFET structure. We would like to simultaneously utilize the techniques of the spin injection/detection and of the gate-stack fabrication in a single device structure.

The author appreciates good collaboration research with H. Nakashima, K. Sawano, A. Hirohata, V. Lazarov, S. Yamada, M. Yamada, and Y. Fujita. This work was partly supported by ImPACT from Cabinet Office of the Government of Japan, and Grant-in-Aid for Scientific Research (A) (No. 25246020 and 16H02333) from JSPS.



Fig.1 (a) Schematic of a Ge-based LSV with Heusler-alloy spin injector and detector. (b) TEM image of the detla-doped P layer with Si near the Heusler/Ge heterointerface. (c) J-V characteristic of the Heusler/Ge Schottky tunnel contact (d) Nonlocal spin signal at 8 K. (e) Hanle-effect curve at 8 K. (f) Top-view of the fabricated Ge-spin MOSFET structure. (g) I-V characteristics with gate-voltage applications.

Reference

- 1) H. Wu et al., 2014 International Electron Devices Meeting (IEDM).
- 2) K. Kasahara et al., Appl. Phys. Exp. 7, 033002 (2014).
- 3) S. Yamada et al., Appl. Phys. Lett. 105, 071601 (2014).
- 4) M. Yamada et al., Appl. Phys. Lett. 107, 132101 (2015).
- 5) Y. Fujita et al., (submitted).
- 6) Y. Fujita et al., Jpn. J. Appl. Phys. 55, 063001 (2016).

# Co<sub>2</sub>FeSi/MgO/n<sup>+</sup>-SOI デバイスの室温スピン信号

石川瑞恵<sup>1,2</sup>、テイワリアジャイ<sup>1</sup>、杉山英行<sup>1</sup>、井口智明<sup>1</sup>、浜屋宏平<sup>2</sup>、手東展規<sup>3</sup>、斉藤好昭<sup>1</sup> (<sup>1</sup>㈱東芝研開セ、<sup>2</sup>阪大院基礎工、<sup>3</sup>東北大院工)

### Room-temperature spin accumulation and transport signals in Co<sub>2</sub>FeSi/MgO/n<sup>+</sup>-SOI devices M. Ishikawa, A. Tiwari, H. Sugiyama, T. Inokuchi, K. Hamaya<sup>\*</sup>, N. Tezuka<sup>\*\*</sup> and Y. Saito (Toshiba Corporate R&D Center., <sup>\*</sup>Osaka Univ., <sup>\*\*</sup>Tohoku Univ.)

#### <u>はじめに</u>

再構成可能な論理回路や不揮発メモリへの応用が期待されるスピン MOSFET [1]を実現するためには、室温スピン信号の増 大が必要不可欠である。これまで我々は Si 中でのスピン蓄積やスピン伝導を評価し[2-6]、強磁性電極のスピン分極率や MgO バリア/SOI 界面のラフネスがスピン信号に影響することを見出してきた。今回我々はこれまでの知見をもとに、ホイスラー合 金 Co<sub>2</sub>FeSi/MgO/n<sup>+</sup>-Si on insulator (SOI) 接合において大きな室温スピン信号を観測したためその内容を報告する。

### 実験方法

リンを高濃度にドープした 3inch の SOI 基板を真空中で 600°Cに加熱後、基板を冷却し た後にマグネトロンスパッタ法により Mg 層(0.6nm)を形成し、電子線蒸着法による MgO 層をウェッジ状に成膜した[7]。その後、マグネトロンスパッタ法により Co<sub>2</sub>FeSi 層(15nm) 及び Ru-cap 層(7nm)を成膜した。なお基板加熱及び成膜は全て真空一貫で行った。図 1 に SOI 基板表面の In-situ 反射高速電子回折(RHEED) 像の結果を示す。 600°C加熱した SOI 基板表面は、Si(2×1)洗浄表面となっていることがわかる。また、600°Cの加熱処理 により SOI 基板表面のラフネスが低減していることを X 線底角反射率法、断面 TEM に より確認している。この SOI 基板上に成膜した MgO 層及び Co<sub>2</sub>FeSi 層はいずれも図 1. に示すようにエピタキシャル成長していた。成膜後、リソグラフィー、RIE(Reactive ion etching)、Ar イオンミリングを用いて電極を加工し、MgO 膜厚の異なる試料を一度に作 製し、3 端子及び4 端子 Hanle、Nonlocal-MR 信号のスピン信号を室温において測定した。 さらに室温スピン信号のアニール温度依存性を評価した。



図 1. 各層での RHEED 像

### 結果および考察

図2に典型的な室温での4端子 Hanle 信号の結果を示す(アニール温度 325°C)。図2のスピン信号をフィッティング[8]した結果、41%の比較的大きなスピン分極率が得られた。これは同様に室温において測定した3端子 Hanle 信号から得られたスピン分極率とほぼ同じ値であることを確認している。当日は、これらの室温スピン信号を詳細に解析した結果とアニール温度依存性について議論する予定である。

本研究の一部は、革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)及び科学研究費補助金の支援を受けて行ったものである。

### 参考文献

S. Sugahara and M. Tanaka, Appl. Phys. Lett., 84, 2307 (2004).
 M. Ishikawa, *et al.*, J. Appl. Phys., 114, 243904 (2013).
 Y. Saito, *et al.*, J. Appl.

Phys. 115, 17C514 (2014). [4] M. Ishikawa, *et al.*, Appl. Phys. Lett. 107, 092402 (2015). [5] Y. Saito, *et al.*, J. Appl. Phys. 117, 17C707 (2015).
[6] T. Inokuchi, *et al.*, Appl. Phys. Lett., **105**, 232401 (2014). [7] H. Sugiyama, *et al.*, Solid State Commun. **190**, 49 (2014). [8] F. J. Jedema, *et al.*, Nature 416, 713 (2002).



図2. 室温での4端子 Hanle 信号

# Co<sub>2</sub>(FeMn)Si ホイスラー合金を用いた Ge へのスピン注入

大兼幹彦<sup>1</sup>、小池剛央<sup>1</sup>、小野敦央<sup>1</sup>、高田哲朗<sup>2</sup>、齋藤秀和<sup>2</sup>、安藤康夫<sup>1</sup> (1 東北大学、2 産業技術総合研究所)

### Spin injection into Ge using Co<sub>2</sub>(FeMn)Si Heusler alloy M. Oogane<sup>1</sup>, T. Koike<sup>1</sup>, A. Ono<sup>1</sup>, T. Takada<sup>2</sup>, H. Saito<sup>2</sup> and Y. Ando<sup>1</sup> (1Tohoku University, 2AIST)

### <u>背景</u>

半導体へのスピン注入技術は急速に進展している一方で、室温におけるスピン注入信号は未だ小さいのが現状である。スピン信号を増大させるために、ハーフメタル材料を用いることは有望な手段の一つである。我々は、ハーフメタル材料として Co 基のホイスラー合金に着目し大きな磁気抵抗効果を観測することに成功してきた。さらに、高品質なホイスラー合金薄膜を半導体上に作製するための技術開発も進めている。本研究では、δドープした n 型 Ge 基板上に Co<sub>2</sub>(FeMn)Si (CFMS) ホイスラー合金を電極としたスピン注入素子を作製し、そのスピン注入信号について系統的に調べた。

### 実験方法

超高真空マグネトロンスパッタ法を用いて、 $\delta$ ドープ Ge 基板上に Mg(0.8)/MgO(0.75)/ CFMS(30)/Ta(5) (単位:nm)の多層膜を作製した。極薄の Mg 膜は Ge/MgO 界面状態を改善し、MgO および CFMS 層を高品質化するために挿入している。スピン注入素子は、フォトリソグラフィーおよ び Ar ミリングを用いて作製した。素子構造は Fig. 1 に示す通りであり、3 端子ハンル効果を 10 K にお いて測定した。

### 実験結果

Fig. 2に観測したハンル信号の印加電流依存性を示す。 信号には複数のピークが重畳しており、いくつかのスピ ン緩和過程が存在していることが示唆される。また、信 号形状は印加電流に対して劇的に変化した。このような 複雑なハンル効果の振舞いは先行研究でも観測例がほ ぼ皆無であり、非常に興味深い。観測されたハンル信号 のメカニズムを明らかにすることで、スピン注入信 号を増大させるための指針が得られると考えられ、 講演にて議論する。

### <u>謝辞</u>

本研究は ImPACT プログラム (プログラムマネージ ャー: 佐橋政司)および科学研究費補助金基盤 S (No.24226001)の支援により行われた。

### <u>参考文献</u>

1) Y. Sakuraba *et al.*, Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 052508.

 S. J. Hashemifar *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97** (2006) 026602.





H(kOe) Fig.2 スピン注入信号の印加電流依存性

5

10

0

S

-10

-5

# 5d 遷移金属単原子層による Fe および Co 表面における 磁気異方性の電界変調増強

# 辻川 雅人<sup>1,2</sup>, 白井 正文<sup>1,2</sup>

(東北大通研<sup>1</sup>,東北大 CSRN<sup>2</sup>)

Enhancement of electric-field modulation of the magnetic anisotropy at Fe and Co surfaces covered by

5*d* transition-metal monolayer

Masahito Tsujikawa<sup>1,2</sup>, Masafumi Shirai<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>RIEC, Tohoku Univ., <sup>2</sup>CSRN, Tohoku Univ.)

### <u>はじめに</u>

巨大な磁気異方性エネルギー(MAE)の電界変調を示す材料の開発は、超低消費電力かつ高速な電圧駆動型 のスピントロニクスデバイスを実現する上で重要な課題である。直径 10 nm サイズの素子にて電圧磁化反転 を実現するには 1000 fJ/Vm を超える MAE の電界変調率が必要とされる。最近、MgO/Fe/Cr 膜にて 300 fJ/Vm [1]と大きな値も報告されているが、あと数倍大きな効果が必要である。本研究では、巨大な MAE の電界効 果を得るために 5d 遷移金属の巨大なスピン軌道相互作用を利用することを考えた。Fe または Co と 5d 遷移 金属からなり、巨大な MAE の電界変調率を示す積層構造の理論設計を第一原理計算により行った。

### <u>方 法</u>

bcc-Fe(001)および hcp-Co(111)表面を 5*d* 遷移金属単原子層で覆った Cu/Fe(Co)/TM 膜 (TM = Hf, Ta, W, Os, Ir, Pt, Au) について MAE の電界効果の大きさを系統的に調べた。計算には平面波基底と Projector Augmented Wave 法を用いた第一原理計算コード vasp を用いた[2]。MAE の見積りは force theorem を用いて行った。面内 格子定数はそれぞれ bcc Fe (2.86 Å)および hcp Co (2.51 Å)のバルク値に合わせている。MAE の電界変調率  $\gamma$  の符号は正の場合に表面の電子蓄積に対して垂直磁気異方性エネルギーが低下するよう定義した。

### <u>結果</u>

各薄膜の MAE と $\gamma$ の大きさを Fig. 1 に示す。Fe 表面上で は Ta, Os, Ir が、Co 表面上では Hf, W, Ir が 100 fJ/Vm を超え る大きな電界効果を示している。これらの膜は MgO の比誘電 率を考慮すると MgO との接合構造にて 1000 fJ/Vm を超える電 界効果を示すことが期待できる。最も顕著な電界効果が得られ た Co/Hf 膜では、表面原子当たり僅か 0.01 個の電子数変化に対 して 0.25 meV の MAE 変化が生じる。また、Co/Ir 膜では MAE が 4.5 mJ/m<sup>2</sup>、 $\gamma$ が 136 fJ/Vm と垂直磁気異方性エネルギーと電 界効果が共に大きな値を示す結果が得られた。講演では大きな MAE の電界変調が得られた起源についても議論する。

### <u>謝辞</u>

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム(ImPACT) により、科学技術振興機構を通して委託された。

### 参考文献

- 1) T. Nozaki et al., Phys. Rev. Appl. 5 (2016) 044006.
- G. Kresse and J. Furthmüller, Vienna *Ab-initio* Simulation Package, University of Wien, 2001.



Fig. 1 Magnetic anisotropy energy (MAE; top panel) and the electric-field variation of MAE (bottom panel) in Cu/Fe(Co)/5d transition-metal films.

## 磁性金属超薄膜における結晶磁気異方性、交換スティフネス、 ジャロシンスキー・守谷相互作用力に対する電界効果

中村浩次、名和憲嗣、秋山亨、伊藤智徳 (三重大工)

# Electric field effect on magnetocrystalline anisotropy, exchange stiffness, and Dzyaloshinskii-Moriya interaction in magnetic metal thin films

### K. Nakamura, K. Nawa, T. Akiyama, T. Ito

(Mie Univ)

### 1. はじめに

磁性金属薄膜に対する電界効果は、結晶磁気異方性エネルギーを始め、キュリー温度、交換バイアス、磁壁 移動、磁気緩和、磁気表面波など様々に磁気的性質に対して実験的に観測されてきた。理論的観点からも、 第一原理計算を中心に、金属薄膜や絶縁体界面での結晶磁気異方性エネルギーが外部電場印加により変化す ること、さらに交換相互作用力やジャロシンスキー・守谷相互作用力も外部電場依存性を示すことが示され ている。本発表では、遷移金属超薄膜や希土類金属超薄膜、sp 重金属超薄膜における結晶磁気異方性エネル ギーの電界効果に関して、第一原理計算により系統的に調べた結果を報告する。また、交換スティフネス、 ジャロシンスキー・守谷相互作用力(DMI)の電界効果についても検討する。

### 2. 計算方法

第一原理計算には外部電場を導入した film full-potential linearized augmented plane-wave (film-FLAPW) 法<sup>1)</sup>を用いた。交換相関ポテンシャルには一般化勾配近似を、希土類金属薄膜のf軌道にはオンサイトクー ロン相互作用+U補正を施した。結晶磁気異方性エネルギーは磁化が面内と垂直方向に仮定したときのスピン 軌道相互作用を考慮した全エネルギーの差から算出し、遷移金属薄膜と sp 重金属薄膜に対してはフォース理 論を用いて、希土類薄膜に対してはセルフコンシステントに求めた。交換スティフネス及び DMI の計算には スピンスパイラル構造の形成エネルギーから見積もった。

### 3. 結果と考察

結晶磁気異方性に対する電界効果の理解を得るために、まず、フリーステンディング遷移金属単原子層に対して金属元素(3d,4d,5d)を変えて系統的に調べた。なお、バルク4d、5d金属は非磁性体であるが、フリーステンディング単原子層や強磁性体界面では磁化されることを確認した。計算の結果、金属元素のスピン軌道相互作用力の大きさに比例して、磁気異方性エネルギーと電界効果が大きくなることが示唆された。しかし、Fe/Mg0(001)界面にこれらの金属超薄膜を挿入した場合、例えばPt単原子層の場合、定性的にはフリースタンディング単原子層モデルの傾向を示したが、定量的にはFe/Mg0理想系の結果に比べて数倍程度以下の増大であった。希土類金属単原子層の場合も、結晶磁気異方性エネルギーは例えばSm/FeでFe/Mg0理想系に比べ3倍程度も大きくなったが、電界効果はほとんどみられなかった。これらの結果から、実用に向けた大きな電界効果を得るためには、スピン軌道相互作用の大きい重金属の利用のみでなく、新しい界面材料の提案が必要であるものと考えられる。また、交換スティッフネス及びDMIに対する電界効果に対して、Pt(111)基板上のCo単原子層膜モデルを用いて計算した結果、結晶磁気異方性エネルギーと同様に、両者とも外部電場依存性を示すこと、しかしDMI 定数の外部電場依存性は交換スティフネス定数に比べ1オーダー程度小さい結果となった。発表では、遷移金属超薄膜における交換スティフネスを系統的に調べた結果も報告する。

### 参考文献

1) K. Nakamura et.al, PRB 67,014420 (2003); PRL 102, 187201 (2009); M. Oba et. al., PRL 114, 107202 (2015).