

半導体スピン注入を用いた核スピンのコヒーレント制御

秋保貴史, 蝦名優也, 山本眞史, 植村哲也
(北海道大学)

Coherent control of nuclear spins using spin injection into semiconductor

T. Akiho, Y. Ebina, M. Yamamoto and T. Uemura,
(Hokkaido University)

はじめに

近年, 強磁性体電極から半導体に注入された電子スピンにより核スピンを効率的に偏極する動的核スピン偏極(DNP), 及び, 核磁気共鳴(NMR)による核スピン制御が量子情報デバイスへの応用の観点から注目されている. 最近, 我々は, ホイスラー合金 Co_2MnSi (CMS)から GaAs への高効率なスピン注入と, 注入された電子スピンを用いた高効率な DNP を実証した[1,2]. 本研究の目的は, 半導体スピン注入技術を利用し, NMR による核スピンのコヒーレント制御を実証することである.

実験方法

CMS 電極をスピン源, n 型 GaAs をチャネルとするスピン注入素子に対し, 4 端子非局所配置にて, 大きさ 114 mT の静磁場 (\mathbf{B}_0)を Fig. 1 に示すように z 軸から約 5 度傾けた方向に印加し, 460 秒間待機した. 注入電流 (I)は $90 \mu\text{A}$ であり, このとき, DNP により生成される核磁場と外部磁場が打ち消しあい, 電子スピンの作用する有効磁場はほぼゼロとなる. この状態を初期状態として, 周波数 $f = 1150 \text{ kHz}$ の正弦波高周波磁場 (\mathbf{B}_{ac})を時間 τ_p の間印加したときの非局所電圧 (V_{NL})変化を計測した. \mathbf{B}_{ac} の周波数は ^{69}Ga に対する NMR の共鳴周波数に相当する. なお, 測定はすべて 4.2 K で行った.

結果および考察

Fig. 2 に $\tau_p = 56, 112 \mu\text{sec}$ の \mathbf{B}_{ac} パルス照射後の V_{NL} の時間変化を示す. V_{NL} は RF パルス照射により ΔV_{NL} だけ変化し, その後, 数百秒の時間スケールで初期状態まで回復した. V_{NL} の急峻な変化は, ^{69}Ga の核磁場が NMR により変化することで, 電子スピンの作用する有効磁場が増大し, その結果, 電子スピンの歳差運動が誘起されたために生じたものと考えられる. さらに, Fig. 3 に示すように, ΔV_{NL} は τ_p に対し明瞭に振動し, このことは, 核スピンの \mathbf{B}_0 方向の成分が高周波磁場印加によりコヒーレントに振動すること, すなわち, 核スピン系に形成された量子準位間の Rabi 振動を意味する[3]. 半導体スピン注入を用いた Rabi 振動の実証は本研究が初めてであり, 量子 Hall 素子を用いた従来研究[4]に比べ, 低磁場, かつ, 高温での実証は, デバイス応用上, 有用と考えられる.

参考文献

- [1] Y. Ebina et al., APL **104**, 172405 (2014). [2] T. Akiho et al., PRB **87**, 235205 (2013). [3] T. Uemura et al., PRB **91**, 140410(R) (2015). [4] T. Machida et al., APL **82**, 409 (2003).

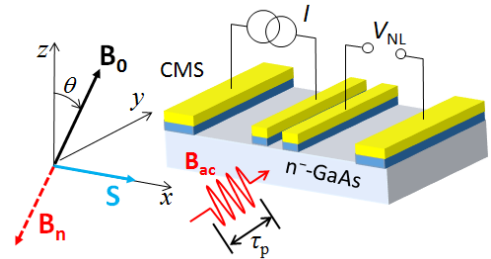


Fig. 1. Schematic diagram of device structure and circuit configuration.

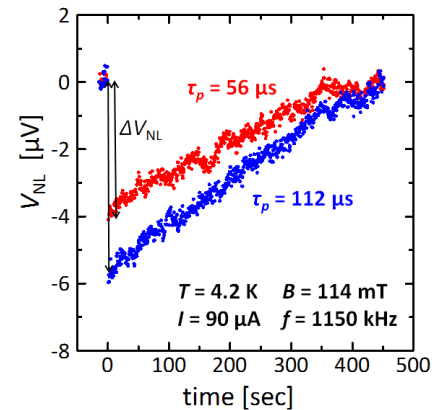


Fig. 2. Time evolution of V_{NL} . Pulsed rf-magnetic field with duration of 56 μs (blue curve) and 112 μs (red curve) was applied at $t = 0$.

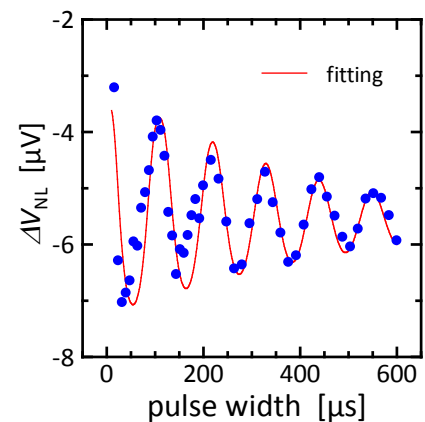


Fig. 3. ΔV_{NL} vs. τ_p (Rabi oscillation).

Sb δ -doping of non-degenerate Ge(001) for a spin-FET with a high-mobility channel

T. Takada^{1,2}, H. Saito¹, A. Spiesser¹, R. Jansen¹, S. Yuasa¹, and N. Miura²
(¹AIST, Spintronics Research Center, ²Meiji Univ.)

Introduction

Spin-dependent transport in a lateral semiconductor (SC) channel with two ferromagnetic (FM) contacts is the fundamental operation principle of the spin field-effect-transistor (spin-FET). For an effective transport of the spin-polarized carriers, the use of a non-degenerate SC is desirable because longer spin lifetimes are expected. The major requirement to employ a non-degenerate SC channel is to suppress the thermionic emission current and enhance the tunneling transport across the FM/SC contact by reducing the depletion region width in the SC region [1]. Recently, Hamaya and his co-workers have developed low-resistance FM tunnel contacts on *n*-type non-degenerate Ge(111) using the Sb δ -doping and low-temperature Ge homoepitaxy [2, 3]. On the other hand, Ge(001) is also a promising candidate as a channel of the spin-FET since epitaxial FM/MgO(001) tunnel barrier can be easily grown, providing a canonical spin injector/detector. Here, we have investigated the effect of the Sb δ -doping on the electrical transport process of Fe/MgO/non-degenerate Ge(001) devices.

Sample preparations

Films were grown by molecular beam epitaxy on *n*-type Ge(001) substrates (a carrier concentration of $\sim 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$). Sb was evaporated at room temperature (RT), followed by a 10 nm-thick Ge layer. We prepared several samples with different sheet doping densities of Sb (n_{Sb}) and growth temperature (T_g) of the homoepitaxial Ge layer. Finally, Au(20 nm) / Fe(5 nm) / MgO(1.5 nm) layers were deposited at RT. Reflection high-energy electron diffraction (RHEED) image revealed that the MgO layers have (001)-oriented single-crystalline or textured structure depending on T_g and n_{Sb} .

Results

Figure 1(a) shows the current-voltage (I - V) characteristics of the devices grown at different T_g with a constant $n_{\text{Sb}} = 2.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. The devices with $T_g = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ and $350 \text{ }^\circ\text{C}$ reveal a clear rectifying behavior, showing that the thermionic emission is the dominant transport process. With decreasing T_g , the current under reverse bias dramatically increases, and the rectifying behavior finally disappears above $T_g = 250 \text{ }^\circ\text{C}$. For the devices with $T_g = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ and $200 \text{ }^\circ\text{C}$, there is no large difference in the resistance-area products (RA) as plotted in Fig.1 (b). This indicates that tunneling becomes the major transport process for $T_g \leq 250 \text{ }^\circ\text{C}$.

References

- [1] R. Jansen and B. C. Min, Phys. Rev. B **99**, 246604 (2007). [2] K. Sawano *et al.*, Appl. Phys. Lett. **97**, 162108 (2010). [3] K. Kasahara *et al.*, J. Appl. Phys. **111**, 07C503 (2012).

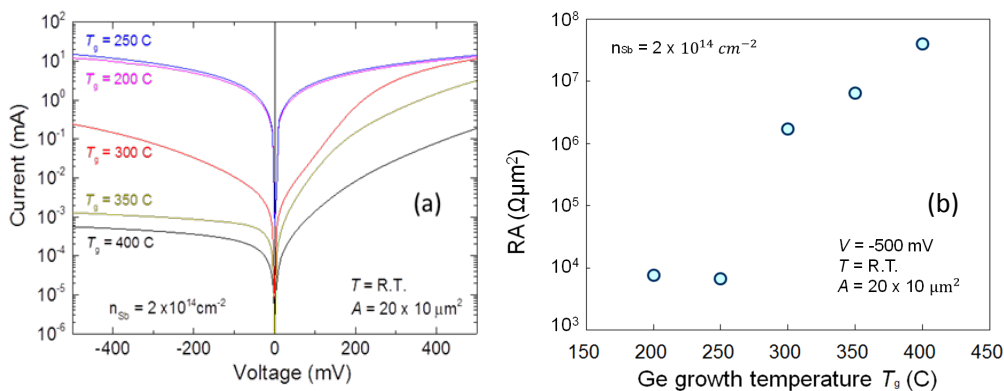


Fig.1 (a) Current-voltage characteristics of Fe/MgO/*n*-Ge(001) devices and (b) the corresponding RA at -500 mV as a function of T_g measured at RT. The sheet Sb doping density n_{Sb} is kept constant with a $2.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$.

非弾性散乱トンネルスペクトロスコピーを用いた n-Si/MgO/CoFe 接合中のスピン依存伝導機構の解析

井口智明, 石川瑞恵, 杉山英行, 斉藤好昭
(東芝・研究開発センター)

Spin-dependent transport mechanisms in n-Si/MgO/CoFe junctions
investigated by inelastic tunneling electron spectroscopy

T. Inokuchi, M. Ishikawa, H. Sugiyama, Y. Saito
(Corporate R&D Center, Toshiba Corporation)

はじめに

スピン MOSFET に代表される半導体スピントロニクスデバイスでは、強磁性体と半導体の間でのスピン注入/検出効率がデバイスの性能を決めるキーパラメータとなる。理想的な状況においては、半導体/トンネルバリア/強磁性体接合におけるスピン注入/検出効率は強磁性体中の電子のスピン偏極率、トンネルバリアでのスピン選択率およびコンダクタンスマッチング条件によって決まるはずであるが、現実の系ではそれらのパラメータから予測される値とは異なったスピン注入/検出効率が観測される場合があり（特に 3 端子 Hanle 信号）、その要因として接合中の欠陥準位などに起因した 2 ステップトンネリングやトンネル確率の磁場依存性等の影響が指摘されている。今回はそれらの要因がスピン依存伝導に与えている影響を解明し、スピン注入/検出効率を高めるための手がかりを得ることを目的として研究を行った。

実験方法

本研究では n-Si 基板/MgO (2.2 nm)/CoFe/Ru からなる接合に対して、直流 Hanle 効果測定を行い、その後同試料に対して非弾性散乱トンネルスペクトロスコピーを行った。非弾性散乱トンネルスペクトロスコピーを行う際には、接合に対して直流バイアス電圧と交流電圧を印加して 2 階微分コンダクタンスを測定し、その 2 階微分コンダクタンスの直流バイアス電圧依存性と、その磁場依存性を測定している。

実験結果

図 1 に直流 Hanle 効果測定の結果を示す。本試料においては主に低バイアス領域で半値幅の大きい、すなわち、電子のスピン寿命が短いことを意味する Hanle 信号と、高バイアス領域で半値幅の小さい、すなわち、電子のスピン寿命が長いことを意味する Hanle 信号の 2 種類の成分が観測される。つまり、本研究で用いた接合ではスピン寿命の異なる伝導機構が存在していると解釈することができる。次に、本接合の 2 階微分コンダクタンスの直流バイアス電圧および磁場依存性を測定した結果を図 2 に示す。2 階微分コンダクタンスは直流 Hanle 効果と同様にローレンツ型の磁場依存性を示し、その半値幅は直流 Hanle 効果測定で観測された半値幅の広い成分のものとはほぼ一致する。これらの結果は、半値幅の広い Hanle 信号は接合中の欠陥準位によって非弾性散乱される伝導パスにおいて観測されていることを示唆している。本発表ではこれらの結果について述べると共に、これらの知見からスピン注入/検出効率を高めるための道筋について考察した結果を述べる。なお、本研究の一部は科学研究費補助金（基盤研究 (A) 25246020）の支援を受けて行ったものである。

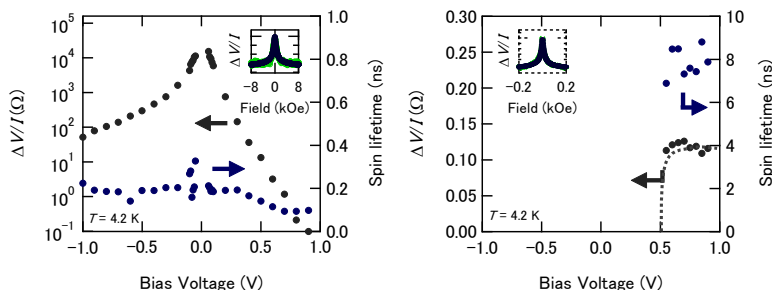


図 1. 直流 Hanle 信号の直流バイアス電圧依存性

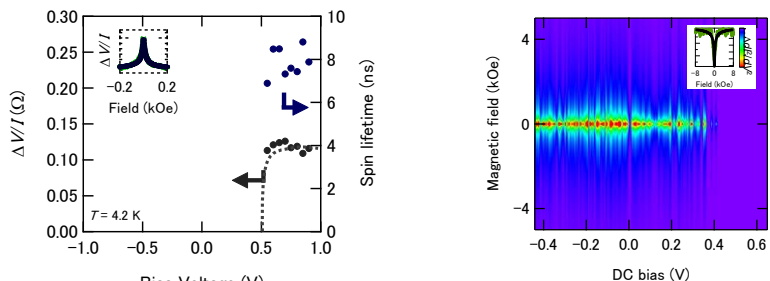


図 2. 2 階微分コンダクタンスの直流バイアス電圧および外部磁場依存性

参考文献

- 1) R. Jansen *et al.*, Phys. Rev. B **85**, 134420 (2012).
- 2) Y. Song *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 047205 (2014).
- 3) T. Inokuchi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **105**, 232401 (2014).

Co₂FeSi_{0.5}Al_{0.5}/n⁺-Ge ショットキートンネル接合を用いた n-Ge 中の室温スピン伝導検出

藤田裕一¹, 岡孝保¹, 山田晋也¹, 山田道洋², 澤野憲太郎³, 金島岳¹, 浜屋宏平¹
(¹阪大基礎工,²慶應理工,³東京都市大工)

Spin transport in n-Ge at room temperature by using Co₂FeSi_{0.5}Al_{0.5}/n⁺-Ge Schottky-tunnel contacts

Y. Fujita¹, T. Oka¹, S. Yamada¹, M. Yamada², K. Sawano³, T. Kanashima¹, K. Hamaya¹

(¹Graduate School of Engineering Science, Osaka Univ., ²School of Fundamental Science and Technology, Keio Univ., ³Advanced Research Laboratories, Tokyo City Univ.)

【はじめに】

Ge チャネルスピントランジスタの実現のためには、Ge への電氣的スピン注入・検出が必要不可欠である。これまで我々は、低温分子線エピタキシー(MBE)法を用いて n-Ge 上にホイスラー合金 Co₂FeSi(CFS)を高品質に形成し、それを用いて Ge 中のスピン伝導の電氣的検出に成功してきた[1]。しかし、それは 200 K 程度の低温に留まっており、未だ室温での観測には至っていない。今回、室温での高いスピン機能が実証されているホイスラー合金 Co₂FeSi_{0.5}Al_{0.5}(CFSA)[2]を Ge 上に高品質に形成することに成功し、それを利用した室温スピン伝導の電氣的検出を報告する。

【実験方法】

Ge(111) 基板の上に、n-Ge チャネル層(~50 nm)と n⁺-Ge 層 (~5 nm、~10¹⁹ cm⁻³)をそれぞれ形成後、MBE 法による Co, Fe, Si, および Al の非化学量論組成比での同時蒸着[3]により、CFSA 薄膜(10 nm)を室温形成した。その上に電子線蒸着法により Co 層(20 nm)を形成し、Co/CFSA/n⁺-Ge/n-Ge 構造とした。電子線リソグラフィおよび Ar⁺ミリングを用いて、この試料を横型素子構造へと加工した。

【実験結果】

Fig. 1 の断面 TEM 像から急峻な CFSA/Ge ヘテロ接合の実現が確認され、CFSA 膜中の電子線回折パターンからは、L₂₁ 構造の形成が示唆された。つまり、室温での高いスピン機能が期待できる、高品質な CFSA を Ge 上に形成することに成功したと言える。

Fig. 2 に、T = 300 K、電流値 I = +2.5 mA における四端子非局所磁気抵抗の面内磁場依存性を示す。Co/CFSA 電極の磁化配置が平行(↑↑)・反平行(↑↓)状態において、約 36 mΩ の非局所磁気抵抗の変化(非局所スピン信号)を観測することに成功した。

本研究の一部は、革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)及び科研費基盤研究(A)(No. 25246020)からの支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] K. Kasahara *et al.*, Appl. Phys. Express **7**, 033002 (2014).
[2] N. Tezuka *et al.*, Appl. Phys. Lett. **94**, 162504 (2009).
[3] K. Tanikawa *et al.*, Thin Solid Films **557**, 390-393 (2014).

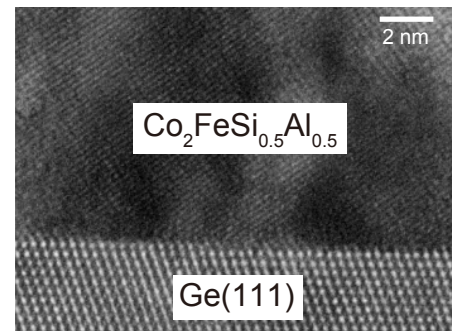


Fig. 1 Cross sectional TEM image of a CFSA/Ge(111) heterojunction.

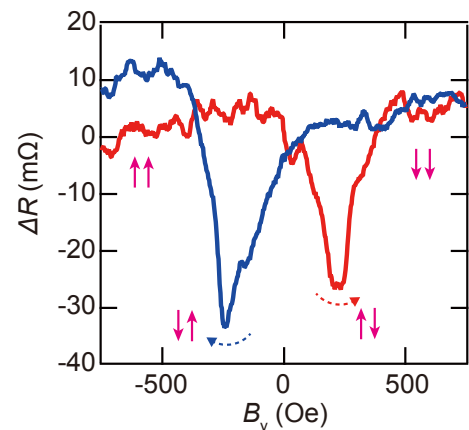


Fig. 2 Nonlocal magnetoresistance curve at 300 K.

CoFe/TiO₂/Si トンネルコンタクト型スピン注入源における ラジカル酸素アニールの効果

生瀬裕之¹, 悪七泰樹¹, 周藤悠介¹, 高村陽太², 菅原聡¹
(¹東工大像情報,²東工大電子物理)

The effect of radical oxygen annealing on CoFe/TiO₂/Si tunnel-contact-type spin injector

Y. Ikuse¹, T. Akushichi¹, Y. Shuto¹, Y. Takamura², and S. Sugahara¹

(¹Imaging Sci. and Eng. Lab., Tokyo Inst. of Tech., ²Dept. of Physical Electronics, Tokyo Inst. of Tech.)

【はじめに】 電子の持つスピンの自由度を利用してトランジスタの出力特性を制御できるスピン MOSFET¹⁾などのスピントランジスタが注目されている。スピン MOSFET を実現するためには Si チャンネルへのスピン注入および Si チャンネルにおけるスピン伝導の実現が必要である。また、スピン MOSFET の実現が期待されるナノスケールのチャンネルでは、チャンネルのオン抵抗は非常に低く、これまでに研究が進められている AlO_x や MgO をトンネル障壁としたトンネルコンタクト型のスピン注入源では、トンネル抵抗が高く、抵抗率不整合の問題やトランジスタ性能の劣化といった問題を生じる。そこで、我々はナノスケールのチャンネルに適合した低抵抗スピン注入源として TiO₂ をトンネル障壁として用いたスピン注入源を提案した²⁾。この構造では、TiO₂ は Si との接合において Si の伝導帯側に 0.1eV 程度の極めて低いエネルギー障壁を形成³⁾できる。これに低仕事関数のハーフメタル CoFe₂Si_xAl_{1-x}(CFSA)を強磁性電極に用いることで、非常に低いトンネル抵抗を実現し、さらに高いスピン注入効率の期待できるスピン注入源となることが予想される。TiO₂は低抵抗の MTJ のトンネル障壁として研究・開発されていたこともあり、TMR も観測されている⁴⁾。したがって、CFSA/TiO₂/Si トンネルコンタクトはスピン MOSFET のスピン注入源として有望であると考えられる。今回、我々は Ti 薄膜のラジカル酸化によって TiO₂ 薄膜を形成し、さらにラジカル酸素アニールによって高品質化した TiO₂ 薄膜をトンネル障壁とし、CoFe を強磁性電極に用いた CoFe/TiO₂/n⁺-Si スピン注入源を作製して、スピン注入の評価を行った。特に、ラジカル酸素アニールの効果について詳細に調べた。

【実験方法】 TiO₂ は、超高真空中で熱クリーニングにより清浄表面を露出させた n⁺-Si 基板上に Ti をスパッタ堆積した後、室温でラジカル酸化を行うことで形成した。室温での Ti の堆積はシリサイドの形成を防ぐためである。次いで、形成した TiO₂ に 200-500°C の温度でラジカル酸素アニールを施した。さらに、この表面に CoFe を分子線堆積(MBD)法によって堆積した。これの一連の成膜にはマルチチャンバーシステムを用いて、試料を大気暴露することなく、すべて超高真空中で行った。次に、CoFe/TiO₂/n⁺-Si トンネルコンタクト構造をスピン注入源とした 3 端子スピン蓄積デバイスを作製した(Fig.1)。

【実験結果】 はじめに、室温でラジカル酸化によって形成した TiO₂/Si およびこの構造にラジカル酸素アニール処理を行った試料を XPS によって評価した。Fig. 2(a),(b)に

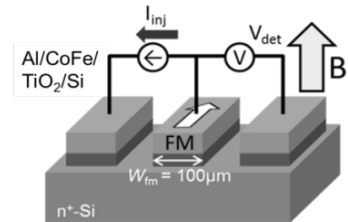


Fig1. Schematic of fabricated 3-terminal spin accumulation device

Si2p スペクトルおよび Si サブオキシドピークの積分値をそれぞれ示す。ラジカル酸化を行うことにより、Si サブオキシドが形成されるが、これは 100°C でラジカル酸素アニールを行っても変化しなかった (Fig. 2(b) の領域 I)。ラジカル酸素アニールを 200°C ~400°C で行くと、領域 I と比較してサブオキシドのピーク強度が増大するが、この温度範囲内ではピーク強度は一定となり、界面構造が安定化することが確認された (Fig. 2(b) の領域 II)。さらに、アニール温度を増加させると (450°C 以上)、サブオキシドピークのピーク強度が増大することが分かった (Fig. 2(b) の領域 III)。次に、この領域 I~III の条件で形成した CoFe/TiO₂/Si トンネルコンタクトをスピン注入源とする 3 端子スピン蓄積デバイスを作製し、スピン注入の評価を行った。領域 I~III の条件で作製したすべてのデバイスにおいて、スピン注入およびスピン抽出に関する Hanle 効果信号の観測に成功した。得られた信号はどれも単一の Lorentz 関数ではフィッティングを行うことができず、トラップスピンを表す Lorentz 関数とチャンネルスピンを表す関数⁵⁾との重ね合わせによって、精度よくフィッティングを行うことができた (Fig.3(a))。また、信号に含まれるトラップスピン成分に対するチャンネルスピン成分の割合は、領域 II の条件で作製したデバイスが最も高くなり (Fig.3(b))、ラジカル酸素アニール温度の最適化によるスピン注入効率を大幅に改善できることがわかった。以上の結果から、TiO₂ トンネル障壁は Si チャンネルに関するスピン注入源に適用が可能であると考えられる。

【参考文献】 1). S. Sugahara, IEE Proc. Circuits, Devices & Sys. **152**, 355 (2005). 2). K. Takahashi, *et al.*, The 38th Annual conference on MAGNETICS in Japan (2014). 3). J. Robertson, J. Vac. Sci. Technol. B **18**, 1785 (2000). 4). J. Gang, Zhu, and C. Park, Mater. Today, **9**, 36(2006). 5). Y. Takamura, *et al.*, J. Appl. Phys. **115**, 17C307 (2014)

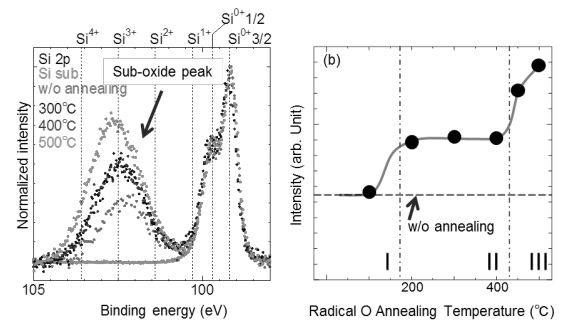


Fig. 2 (a) XPS Si2p spectra of TiO₂/Si samples, in which radical oxygen annealing temperatures are varied. (b) Annealing-temperature dependence of integrated sub-oxide peak intensity of the Si2p spectra.

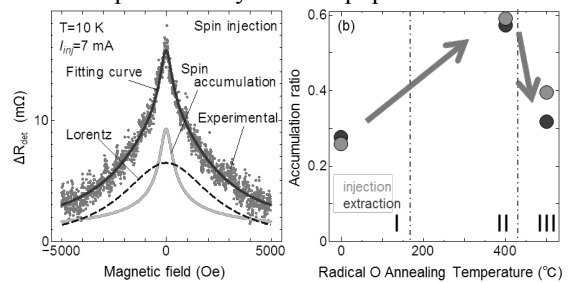


Fig. 3 (a) Hanle-effect signal and its fitting curves for 400 °C-annealed sample. (b) Intensity ratio for the channel spin component as a function of annealing temperature.