

# ラジカル酸素アニールによる高品質トンネル障壁を有する CoFe/MgO/Si および CoFe/AlO<sub>x</sub>/Si コンタクトを用いたスピン蓄積の評価

患七泰樹<sup>1</sup>, 高村陽太<sup>2</sup>, 周藤悠介<sup>1</sup>, 菅原聡<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 東工大像情報, <sup>2</sup> 東工大電子物理)

Spin accumulation using CoFe/MgO and AlO<sub>x</sub>/Si contacts with high quality tunnel barriers prepared by radical-oxygen annealing

T. Akushichi<sup>1</sup>, Y. Takamura<sup>2</sup>, Y. Shuto<sup>1</sup>, and S. Sugahara<sup>1</sup>

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

## はじめに

MOSFET にキャリアスピンによる機能を付加したスピン MOSFET<sup>1</sup> は, CMOS ロジックシステムのエネルギー削減効率を究極的に高められる不揮発性パワーゲーティングのキー・デバイスとして注目されている<sup>2</sup>. スピン MOSFET を実現するために最も重要な課題の一つは Si チャネルへの高効率スピン注入・検出の実現である. CoFe/MgO/n-Si, CoFe/AlO<sub>x</sub>/n-Si トンネルコンタクトは Si へのスピン注入・検出の検証に広く用いられているスピン注入源である. これらのトンネル障壁である MgO や AlO<sub>x</sub> は主に電子線蒸着法やプラズマ酸化法によって形成されている<sup>3,4</sup>. 今回, 我々は Si 基板上に堆積した Mg 薄膜および Al 薄膜のラジカル酸化によって MgO, AlO<sub>x</sub> 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 MgO, AlO<sub>x</sub> 薄膜をトンネル障壁とする CoFe/MgO/n-Si, CoFe/AlO<sub>x</sub>/n-Si スピン注入源を作製して, スピン蓄積の評価を行った. ラジカル酸素アニールによるトンネル障壁の膜質改善によってスピン蓄積信号に顕著な変化が現れた. この詳細について報告する.

## 実験方法

スピン注入源として, Al(100nm)/CoFe(30nm)/MgO/n<sup>+</sup>-Si および Al(100nm)/CoFe(30nm)/AlO<sub>x</sub>/n<sup>+</sup>-Si トンネルコンタクトを作製した. Pドープ n<sup>+</sup>-Si 基板のキャリア濃度は  $4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  である. トンネルコンタクト構造の作製はスパッタ/ラジカル酸化/分子線堆積 (MBD)・マルチチャンバーシステムを用いて真空一貫で行った. 超高真空中での熱処理によって Si の清浄表面を形成し, この Si 表面に室温でスパッタ法を用いて Mg または Al を 0.5nm 堆積した. 次に, 室温でラジカル酸化を行い, トンネル障壁を作製した. この後, ラジカル酸素雰囲気中でのトンネル障壁のアニールを 400°C で 30 分間施し高品質化した. 次いで, MBD 法を用いて 400°C で CoFe を堆積した. 比較用のサンプルとしてラジカル酸素アニールを施していないトンネルコンタクトも作製した. スピン注入の評価として, 図1に示す 3 端子スピン蓄積デバイスを作製し, Si チャネルに蓄積されたスピンの Hanle 効果の観測を行った.

## 実験結果

図2に CoFe/MgO/Si および CoFe/AlO<sub>x</sub>/Si コンタクトによるスピン注入測定およびス

ピン抽出測定の結果を示す. (a)および(b)が AlO<sub>x</sub> トンネル障壁, (c)および(d)が MgO トンネル障壁の場合である. (b)と(d)がトンネル障壁形成後にラジカル酸素アニールを行ったものである. この結果から, ラジカル酸化による室温形成トンネル障壁を用いた場合には, どちらのトンネル障壁でもスピン注入・抽出測定で得られた信号はともにローレンツ関数でよくフィッティングできることがわかった. 一方, ラジカル酸化後にラジカル酸素アニールを行ったサンプルでは, 得られた信号をローレンツ関数のみでは, 精度よくフィッティングすることができなかった. トラップスピンはローレンツ型のスピン蓄積信号となるが, Si 中の蓄積スピンについてはローレンツ型とはならず, ローレンツ型よりシャープな形状の信号となる<sup>5</sup>. そこで, この二つの関数形を仮定して, フィッティング解析を行った. ラジカル酸素アニールのないものはローレンツ関数のみでフィットできるのに対して, ラジカル酸素アニールを行ったサンプルでは 2 つの関数の重ね合わせによって, フィッティングできた. これらの結果は, トンネル障壁の形成後にラジカル酸素アニールを行うことによって, トラップスピンによる信号(ローレンツ関数)が減少し, Si へのスピン注入成分が現れることを示している. ラジカル酸素アニールによるトンネル障壁の膜質と界面の高品質化は Si チャネルへのスピン注入に有効である.

## 参考文献

- 1) S. Sugahara, IEE Proc. Circuits, Devices & Sys. **152**, 355 (2005).
- 2) S. Yamamoto, *et al.*, Electronics Lett. **47**, 1027 (2011).
- 3) T. Uemura, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **101**, 132411 (2012).
- 4) T. Inokuchi, *et al.*, J. Appl. Phys. **111**, 07C316 (2012).
- 5) Y. Takamura, *et al.*, J. Appl. Phys. **115**, 17C307 (2014).

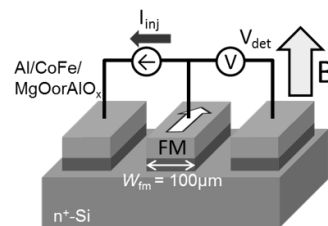


Fig. 1 3T spin accumulation device

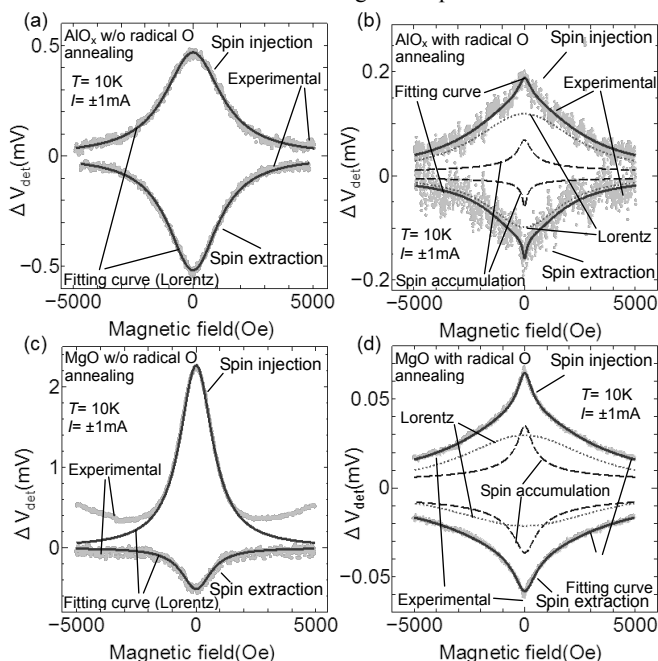


Fig. 2 Hanle-effect signals at 10K for spin injection and extraction measurements using CoFe/MgO/Si and CoFe/AlO<sub>x</sub>/Si spin injectors, and their fitting curves (a) AlO<sub>x</sub> tunnel barrier without radical-oxygen annealing (b) AlO<sub>x</sub> tunnel barrier with radical-oxygen annealing, (c) MgO tunnel barrier without radical-oxygen annealing (d) MgO tunnel barrier with radical-oxygen annealing.