

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

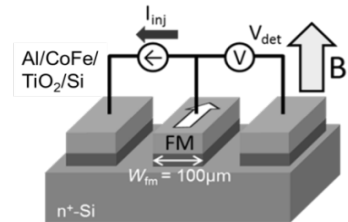


Fig.1. Schematic of fabricated 3-terminal spin accumulation device

Si2p スペクトルおよび Si サブオキサイ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 サブオキサイドが形成されるが、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サイ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)、サブオキサイ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)

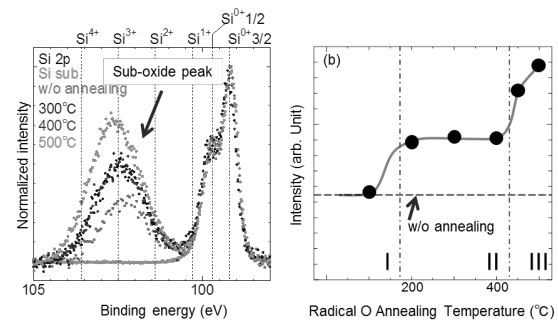


Fig. 2 (a) XPS Si2p spectra of TiO₂/Si samples, in which radical oxygen annealing temperatures are varied. (b) Annealing-temperature dependence of integrated sub-oxide peak intensity of the Si2p spectra.

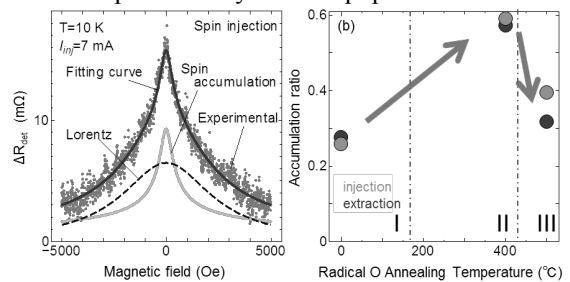


Fig. 3 (a) Hanle-effect signal and its fitting curves for 400 °C-annealed sample. (b) Intensity ratio for the channel spin component as a function of annealing temperature.