

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：32665

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23522

研究課題名(和文) 界面制御技術による高性能SiスピンMOSFETの創製

研究課題名(英文) Development of highly efficient Si spin-MOSFETs by interface-controlled techniques

研究代表者

石川 瑞恵 (Ishikawa, Mizue)

日本大学・工学部・講師

研究者番号：60751865

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：将来の電子機器の更なる小型化・高速化・低消費電力化への貢献が期待されるシリコン(Si)スピン電界効果トランジスタ(SiスピンMOSFET)の実現には、実用レベルのスピン信号強度の観測が必須である。本研究では、ホイスラー合金/MgOトンネルバリア界面に着目した。ホイスラー合金としてMgOトンネルバリアとの格子ミスマッチ(格子不整合率)が小さく、スピン分極率100%のハーフメタルとして期待され、且つキュリー温度が高いCo₂MnSnの結晶構造評価と、スピン伝導評価用の微細素子を形成する微細加工プロセスの立上げを行った。これらの技術が応用できれば、SiスピンMOSFETのスピン信号の増大が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年進展が目覚ましいIoT(Internet of Things：モノのインターネット)技術を支える電子機器等にとって、メモリやLSIといった半導体デバイスの更なる性能向上は、情報通信産業の発展に必要不可欠である。新しい動作原理に基づくシリコン(Si)スピン電界効果トランジスタ(SiスピンMOSFET)は、将来の電子機器の更なる小型化・高速化・低消費電力化への貢献が期待できる極めて重要な新型半導体デバイスである。SiスピンMOSFETが実現されれば、現在消費電力の増大が問題となっているデータサーバーへの貢献や、半導体製品そのものの低消費電力化への応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：To realize silicon-based spin metal-oxide-semiconductors (Si spin-MOSFETs) expected to contribute to the future semiconductor industry, it is important to enhance a magnitude of the spin signals. In this study, we focused on the interface between Heusler alloy/MgO barrier layers. Co₂MnSn is one of the Heusler alloys which are half-metallic materials and show high Curie temperature. We deposited a Co₂MnSn layer on MgO(001) substrate and investigated the crystal structure by X-ray diffraction analyses. We also set up a microfabrication process for measuring the spin signals. These techniques accelerate the enhancement of the spin signals for realizing Si spin-MOSFETs.

研究分野：電気電子

キーワード：spin Heusler Si spin-MOSFETs

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

これまで半導体デバイスの性能を向上させる手段には、主に微細化技術が用いられてきたが、現在では物理限界に近づきつつあり、更には消費電力や製造コストの増大といった問題も顕在化してきている。これらの問題を解決するために新しい動作原理に基づく新型半導体デバイスの実用化が期待されている。その候補であるスピン電界効果トランジスタ(スピンMOSFET)[Appl. Phys. Lett. 84, 2307 (2004)]は、MOSFET構造のソース・ドレイン電極に強磁性体を用い、スピン注入・輸送・検出現象をMOSFET構造で実現することで、強磁性電極の磁化配置を利用した不揮発メモリ機能を発現する(図1)。つまり、不揮発メモリとロジック機能を1つのデバイスで実現できる夢の低消費電力電子デバイスであり、無充電スマホなどの実現が期待できる。また、Si-LSI技術との整合性が高いSiチャネルを用いることで、現行の製造工程への組み込みが容易に実現できる。

SiスピンMOSFETを実現するための最重要技術は、Siへのスピン注入技術であり、2007年頃から目覚ましく発展してきた。2011年にはSi中の室温スピン伝導、2015年にはバックゲート構造ではあるがスピンMOSFET動作が報告された[Appl. Phys. Exp. 8, 113004 (2015)]。しかし、現状では不揮発メモリ機能を付与するために重要な指標となる「磁気抵抗(MR)比」が~0.06%程度と非常に小さいため、実用に必要なMR比(~100%)には遠く及んでいない。

申請者は高MR比の実現に向け、これまで強磁性体電極に着目し、Siへのスピン注入効率の増大が期待できる高スピン分極率ホイスラー合金 Co_2FeSi を検討してきた。ホイスラー合金は有力な強磁性体電極材料であり、申請者が以前所属していた大阪大学基礎工学研究科の浜屋研究室では、その成膜技術において、これまで他機関を圧倒する技術を申請者自らが中心となって確立しており、世界トップレベルの優位性を有している。しかし、申請者の最近の研究では、この Co_2FeSi をSiスピンMOSFETへ利用した場合、スピン注入・検出効率が低減しスピン信号が増大しないことが明らかになってきた[大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻、石川瑞恵、博士課程学位論文(2018)]。つまり、ホイスラー合金を用いたSiスピンMOSFETにおいてスピン信号を増大させるには、これまで検討していなかった新たな改善・制御が必要である。

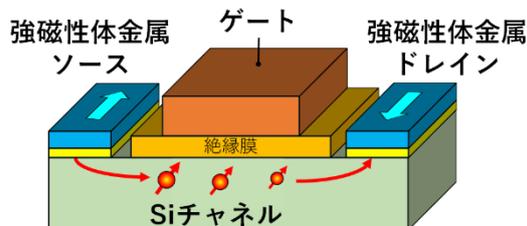


図1. SiスピンMOSFETのデバイス構造。

2. 研究の目的

本研究では、ホイスラー合金/MgOトンネルバリア界面に着目し、界面構造を制御することで、スピン伝導信号を増大させることを目的とする。ホイスラー合金には、MgOトンネルバリアとの格子ミスマッチ(格子不整合率)が小さく、スピン分極率100%のハーフメタルとして期待され、且つキュリー温度が高い Co_2MnSn を検討する。またスピン伝導評価のための微細加工素子を作成するため、微細加工プロセスの立上げを行う。

3. 研究の方法

Co_2MnSn は、MgOトンネルバリアとの格子ミスマッチが1%未満と小さく、且つキュリー温度が800K以上のハーフメタル材料として期待される有力なホイスラー合金の一つであるが、これまでデバイスへ応用した研究報告は無い。本研究ではRFスパッタリング法を用いて、まずはMgO(001)基板上での Co_2MnSn の結晶成長を評価した(図2上)。また Co_2MnSn の表面酸化を防ぐためTaキャップ層を形成した。 Co_2MnSn の結晶構造評価にはX線回折法(Out-of-Plane および In-Plane)を用いた。

次に、図2下に示すようなスピン伝導評価用の微細加工素子を作製するため、微細加工プロセスの立上げを行った。微細加工素子の作製には、チャネル層となるSi層と強磁性体電極層のエッチング加工が重要となる。本研究では、これらの加工方法として半導体素子の加工によく用いられる反応性イオンエッチング(RIE)を用い、その条件出しを行うこととした。今回はチャネル層となるSi層の条件出しを行うため、レジストを塗布したSi on Insulator(SOI)基板を用い、電子線描画やコンタクトアライナーによるパターニング形成後、RIEによるエッチング加工を行った。エッチングに使用した反応性ガスには SF_6 を用いた。

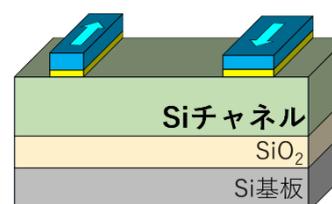
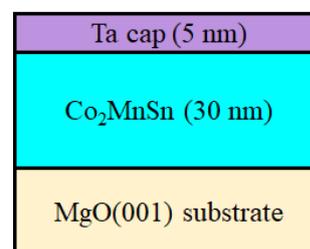


図2. Co_2MnSn の結晶成長(上)と微細加工素子の形成(下)。

4. 研究成果

Co₂MnSnの成膜条件としてRF電力は50~100W, Arガス圧を1~3Paに変調させ成膜を行った. 種々の成膜条件で作製したCo₂MnSn(Samples A~D)の結晶構造評価(Out-of-Plane)の結果を図3に示す. 比較のため, MgO(001)基板のみの結晶構造評価についても合わせて示す. 図3.に示す通り, いずれのCo₂MnSnにおいてもMgO(001)基板由来のピークが観測されており, 各条件による違いは見られず, Co₂MnSn層がMgOとの格子ミスマッチが非常に小さい単結晶構造を有している可能性を示唆している. ホイスラー合金の結晶構造因子を考慮すると, B2構造のCo₂MnSnでは, 2θ~30°においてCo₂MnSn(200)ピークが観測されるが, 図3からわかるように今回成膜したCo₂MnSnでは観測されなかった. 次に代表的なCo₂MnSn(Sample C)を用いて, In-plane回折測定を行った(図4). 図4より2θ~42.6°にピークが観測されていることがわかる. MgO(110)の面間隔(5.958Å)とCo₂MnSnの格子定数(6.00Å)からブラッグ条件を考慮すると, 2θ~42.6°のピークはA2構造で観測されるCo₂MnSn(200)のピークと判断できる. よって, 今回成膜されたCo₂MnSnはA2構造を形成していると考えられる. 今後は, さらにCo₂MnSnの結晶規則度を向上させるため, スパッタ装置内での加熱成膜を検討していく予定である. 既に加熱成膜を行うための装置改造を行い, 設定条件の検討を開始している.

次に, スピン伝導評価用の微細加工素子を作製するため, RIEによるSiチャンネル層のエッチング条件出しを行った. 条件出しには, Si(001)基板を用い, レジスト(OFPR-800LB)を露光・現像し作製したHall-barパターンを形成した(図5左). その後, エッチング時間ごとのレジストとSiのエッチング厚さの関係を評価した. RIEによるエッチング後のレジスト残りをナノスペック(光干渉式膜厚測定装置)を用いて, エッチング時間とレジストの厚さとの関係を評価した. またSi部分のエッチングレートは段差計を用いて測定した. レジストとSi部分のそれぞれのエッチングレートを図5右に示す. Siのエッチングレートはレジストより高いことが図5右よりわかる. 図5右の傾きよりレジストとSiのそれぞれのエッチングレートを算出した結果, レジストは136 nm/min, Siは214 nm/minと算出された. 以上の結果から, 今回使用したレジスト厚さ(~1200 nm)では, 約9分間のエッチングが可能と考えられる. Siチャンネル層は~100 nmのため, このエッチングレートの関係であればSi層のエッチングは十分可能であることがわかる. 今後は, 今回得られたSiのエッチング条件を用いてSiチャンネル層の形成を行うとともに, 強磁性層のエッチング条件出しを行い, 微細加工プロセスを確立する予定である. この技術が確立できれば, スピン伝導評価が可能となり, Co₂MnSnによるスピン信号強度の増大が期待できる.

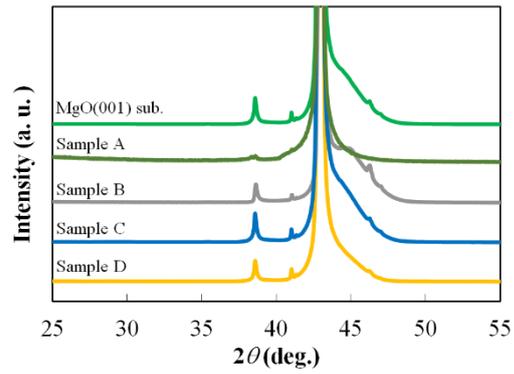


図3. Co₂MnSnの結晶構造評価.
(Out-of-Plane)

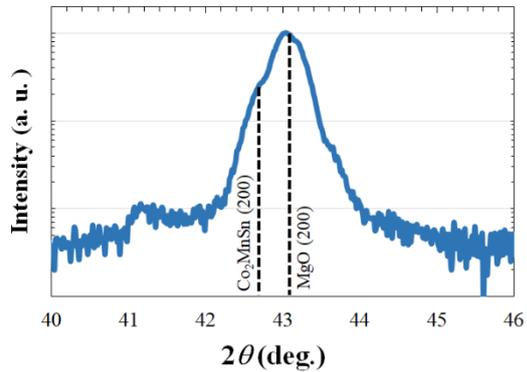


図4. Sample Cの結晶構造評価.
(In-Plane)

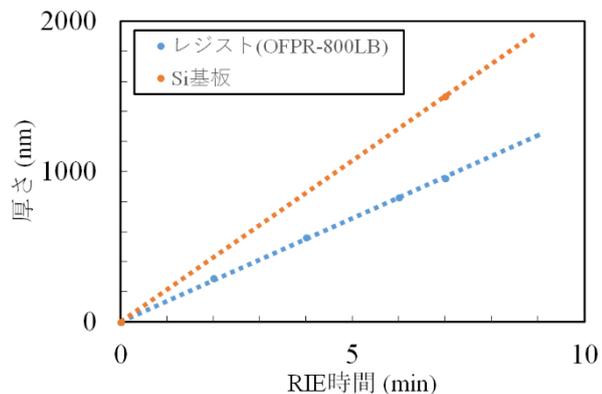
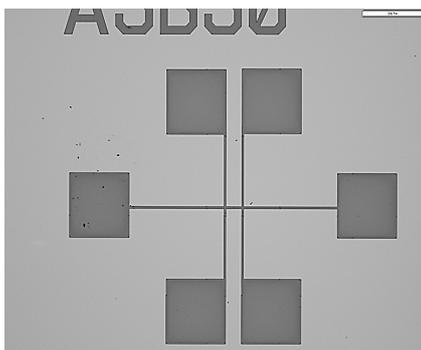


図5. Si(001)基板上に形成したレジストパターン(左)とRIEによるエッチングレート(右).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 M. Ishikawa, Y. Saito, K. Hamaya	4. 巻 44
2. 論文標題 Study of spin transport and magnetoresistance effect in silicon-based lateral spin devices for spin-MOSFET applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetism Society of Japan	6. 最初と最後の頁 56-63
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3379/msjmag.2005RV002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石川瑞恵, 浜屋宏平
2. 発表標題 n+-Si スピン伝導チャネルにおけるスピン緩和について
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------