OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Siスピントロニクス素子におけるスピン緩和機構と高効率スピン注入・検出に関する研究
Author(s)	石川, 瑞恵
Citation	大阪大学, 2019, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/72273
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　石川　瑞恵　）	
論文題名	Siスピントロニクス素子におけるスピン緩和機構と高効率スピン注入・検出に関する研究

論文内容の要旨

次世代新デバイスとして期待されるシリコン(Si)スピンMOSFETを実現するためには，そのソース・ドレイン構造に用いられるn^+-Si中でのスピン伝導(注入・輸送・検出)を理解し，高性能化への指針を得ることが重要である．これまで，n^+-Si中でのスピン伝導やスピン注入・検出効率について10例ほど報告されているが，それらのデータの信頼性には疑義があり，特にSiスピンMOSFETの性能指標であるMR比(Magnetoresistance ratio)の現状を説明・理解するには至っていない．本博士論文では，信頼性の高いn^+-Si中でのスピン伝導を実証し，これまで明らかになっていないn^+-Si中でのスピン緩和機構およびスピン注入・検出効率についてより正確に議論し，それらの知見を基に，MR比を増大させるための指針を得ることで，SiスピンMOSFETの実現のための重要な要素技術を提示することを目的とした．以下に，本研究で得られた成果をまとめる．

Siスピントロニクス素子における微細素子の重要性

微細加工技術を確立し，Siチャネル幅が従来の1/20である5~7 μmのCoFe/MgO/n^+-Si横型スピンバルブ微細素子を作製した．非局所4端子磁気抵抗・Hanle効果測定により，従来研究より信号強度を1桁増大した信頼性の高いスピン伝導信号を電気的に検出した．さらに，スピン拡散長およびスピン緩和時間の温度依存性を算出することでn^+-Si中のスピン緩和機構を議論し，ドナー・フォノン誘起谷間スピン反転散乱が主たるスピン緩和機構であることを明らかにした．結果として，SiスピンMOSFETの実現には，室温でのフォノン誘起谷間スピン反転散乱機構を抑制することが重要であることを見出した．つまり，チャネル層に歪みを導入する技術などで，伝導帯の谷準位の縮退を解き，谷間スピン反転散乱を抑制することが応用上極めて重要であるという知見を得た．

Siスピン伝導チャネルの結晶方位とスピン注入・検出効率の関係

信頼性の高いスピン伝導信号から見積られたスピン注入・検出効率は，室温において~3 %と非常小さく，これまでの研究で見積もられていた値は過大評価であった可能性が示された．一方，デバイス応用に向けては，スピン注入・検出効率の更なる向上への指針を明らかにする必要がある．そこで，これまでほとんど調査されたことが無いSiの結晶方位とスピン注入・検出効率およびスピン伝導に関する情報を取得するため微細素子を用いて検証した．具体的には，従来のチャネル方位Si<110>(Si<110>素子)に対して，新たにSi<100>素子の作製を試み，上記2つの横型スピンバルブ微細素子のスピン伝導信号を取得することで精密に評価した．その結果，信号強度や信号の磁場依存性の振舞いが大きく異なり，Si<100>素子を用いる方がスピン信号取得に有利であることが示された．詳細な解析から信号強度の違いは，Siの結晶方位によって，スピン緩和時間やスピン拡散長ではなく，スピン注入・検出効率が変化するためであることが判った．現在，この主要因としては，GaAs系で報告があるトンネル異方性スピン偏極の存在が挙げられるが，Siチャネルに特有の原因として，Si伝導帯の谷構造を反映したスピン依存トンネル現象などが関係していることを併せて考察した．

高磁気抵抗(MR)比実現のための要素技術

高MR比の実現に向け，スピン注入・検出効率の大きなチャネル方位Si<100>の横型スピンバルブ微細素子を用いて局所スピン信号を測定した結果，これまでで最大級の信号変化を観測した．しかし，MgOトンネル障壁層の影響による高い寄生抵抗値が原因で，MR比として計算すると0.06 %に留まった．この値は，室温における世界最高値ではあるものの，SiスピンMOSFET応用のために必要とされる値(MR比100 %以上)には遠く及ばない．そこで，高MR比の実現に向け，MgOトンネルバリア層の薄膜化とスピン注入源として新たに高スピン分極率ホイスラー合金Co_2FeSiを用いることで，低抵抗と高スピン注入・検出効率の両立を目指した様々な検討を行った．結果として，0.6 nmのMgOトンネルバリア層を用いた場合に低い寄生抵抗接合界面を実現したが，Co_2FeSi層の結晶規則化が不十分であるためにスピン注入・検出効率を改善することができなかった．今後，これらを両立させるため，MgOと格子不整合率が小さなCo_2MnSnのような高スピン分極率ホイスラー合金を利用することが重要であるという提案をした．

以上の成果は，SiスピンMOSFETの実用化に必要なn^+-Si中のスピン伝導(注入・輸送・検出)，およびスピン緩和機構に関して包括的に議論した先駆的研究であり，室温動作する高性能なSiスピンMOSFETの実現に向けた重要な指針を示すものである．

様式７

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　　名　　（　　石川　瑞恵　　）		
	（職）	氏　　名
論文審査担当者	主 査　　教　授	浜屋 宏平
	副 査　　教　授	田中 秀和 (産業科学研究所)
	副 査　　教　授	中村 芳明
	副 査　　准 教 授	服部 公則

論文審査の結果の要旨

本論文は，次世代の不揮発ロジック回路技術のコアデバイスと成り得る「SiスピンMOSFET」の実現に向けて，その高性能化を実現するための基礎研究である．具体的には，そのソース・ドレイン構造に用いられるn^+-Si中でのスピン伝導(注入・輸送・検出)を理解し，SiスピンMOSFETの性能指標であるMR(Magnetoresistance)比の現状を理解するとともに，その高出力化に関する要素技術を詳細に検討している．

本論文は5章から構成されている．第1章では序論としてシステムLSIの現状，スピントロニクス技術への期待，SiスピンMOSFET研究の現状（先行研究）と課題が紹介されている．ここでは，未だにSi横型スピン素子構造における信頼性の高いスピン注入・検出効率やスピン緩和現象の理解などが乏しいことが詳細に述べられており，微細素子を用いたスピン伝導現象の解析に対する高信頼性の確保と，それを用いたスピン緩和現象の正しい理解が重要であることを述べている．第2章では，素子を微細化することによりスピン信号強度が増大した点，スピン伝導・緩和現象の解析に対して，信頼性が増している点を述べ，それを用いたスピン緩和現象の議論が展開されている．特に，今回議論したn^+-Si中でのスピン緩和現象は，従来研究で議論されていたメカニズム(EY機構)とは異なり，ドナー不純物・フォノン誘起の谷間スピン反転散乱が主たるスピン緩和の要因であることを見出している．第3章では，2章で得られたスピン注入・検出効率が先行研究に比べてかなり低い点に言及し，これまで報告されているスピン注入・検出効率値には実験的な誤差が大きく含まれている可能性について言及している．一方，スピン注入・検出効率を増大させる指針を得るために，GaAs系において議論されているスピン注入電極の磁化方向と半導体チャネル層の結晶方位の関係に注目し，詳細なスピン伝導現象の解析を行っている．その結果，Si<100>チャネル層を用いた場合において，従来のSi<110>チャネル層よりも高いスピン注入・検出効率が得られることを示している．また，理論計算を用いてこの原因についても議論しており，GaAs系で議論されていいた効果以外のメカニズムについても言及している．第4章では，不揮発メモリ効果の出力のパラメータであるMR比に注目し，3章までで得られた知見を統合した素子を用いることで，世界最高値の室温MR比を実現したことを述べている．一方で，その値は目標値の3桁以下であるという課題が残っていることに言及し，その解決指針について検討・議論している．その一つに強磁性ホイスラー合金をスピン注入源とする取り組みがあることを示し，低接合抵抗と高スピン注入・検出効率を両立するためには，今後も解決すべき課題があることを述べており，これは高性能デバイス化に向けた重要な指針を提示するものである．第5章では，研究の総括と今後の展望が述べられており，これまでの成果を基に，SiスピンMOSFET実現に向けた課題や検討すべき事項がまとめられている．特に，スピン緩和機構の解明から，伝導帯の谷構造の縮退を解くことが重要であるという提案や，強磁性ホイスラー合金としてMgO層と格子マッチングした材料を選定することに関する提案は，今後の技術開発の重要な指針を与えるものである．

平成31年2月15日に，審査担当者4名と石川氏で審査委員会を開催し，石川氏に上記の博士論文の内容に関する説明を行わせた後，質疑・討論及び口頭試問を行った．論文の内容は世界的にも独自性の高い極めて優れた内容を有していること，実験技術やその性能向上への取り組みは先進性と新規性に富んでいること，研究業績は十分であることを確認した．また，石川氏は質疑においても本分野における十分な物理的知見を有しており，広範な知識と深い理解を有していることが確認できた．よって，本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値があるものと認めるに至った．