The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Study on electrically and thermally generated spin current in n-type Si
Author(s)	亀野, 誠
Citation	大阪大学, 2015, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/53949
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　（　亀野　誠　）	
論文題名	Study on electrically and thermally generated spin current in n-type Si (n型Si中の電気的・熱的スピン流に関する研究)

論文内容の要旨

電子の持つ電荷自由度を伝播するカレントが電流であるが、電子の持つもう一つの自由度であるスピン角運動量を伝播するカレントとして「スピン流」があり、近年の固体物理学において非常に重要なカレントとして関心を集めている。現在、スピン流は様々な固体中で生成・伝播可能となっているが、中でも半導体中におけるスピン流を生成・輸送・制御し、詳細な物性の理解を目的とする半導体スピントロニクス研究が基礎と応用の両面から極めて盛んに行われている。

本研究における第一の重要な成果は、半導体の中でもユビキタス材料であり比較的良好なスピンコヒーレント状態が得られるシリコン(Si)を用いて、室温での電気的スピン流生成と輸送の達成をベースに、それまで十分には理解されていなかったSi中のスピン流輸送物性を理論と実験の両面から検討し、さらに本研究によって理解されたスピン流輸送物性の学理を活かして現在の電荷ベースの情報処理デバイスである金属酸化物半導体電界効果型トランジスタ(MOSFET)にスピン機能を付加したスピンMOSFETの室温動作を世界で初めて成功させた点である。スピンMOSFETの実現により、強磁性ソースドレイン電極の磁化配置を外部磁場によって制御することで再構成可能な論理回路の構築が可能となる。これは半導体エレクトロニクス分野で永年希求されてきた新機能トランジスタ、いわゆるBeyond-CMOSデバイスの実現を意味しており、半導体スピントロニクスの応用展開の可能性を開拓した点で非常に重要な成果であると言える。

本論文におけるもう一つの重要な成果は、熱誘起の室温スピン流輸送を半導体中で初めて達成した点である。スピン流の生成手法としてこれまで用いられてきた電気的、動力学的な手法など様々な手法が開発されてきたが、近年熱がスピン流を誘起できることが発見され、熱流とスピン流の相関を研究するスピンカロリトロニクスもまた近年のスピントロニクスにおける重要な研究領域である。現在のCMOSでは集積化に伴う膨大なジュール熱が利用されることなく廃熱として捨てられることが深刻な問題であり、論理回路システムの低消費電力化を目指すに当たって障壁となっている。本研究の意義は半導体Siデバイス中で現在廃熱として活用できていない熱による情報伝播の可能性を開拓した点にある。以下に本論文の構成と内容をまとめる。

第一章では、金属スピントロニクスを含めたスピントロニクスの概論に加え、Siスピントロニクス研究史と重要な先行研究について詳しく紹介し、本研究の意義を述べる。第二章では、スピン輸送の根幹を担うスピン拡散現象とスピンドリフト現象のうちMOSFET構造にした際に支配的なスピンドリフト現象の基礎理論について詳細に議論したのち、Haynes-Shockley実験(半導体中の電子輸送がドリフト現象と拡散現象の両方によって担われることを実証した実験)のスピン版と言える実験の詳細を説明し、スピンドリフト現象の定量的評価を行った結果を示す。第三章では、非縮退Siを用いたSpin-MOSFETの作成とその動作の達成、さらに非縮退Si中で顕在化するスピンドリフト現象の定量的理解について詳細を述べる。第四章では、ジュール熱を情報伝達可能なスピン流へと変化するスピンカロリトロニクスの視点に立ち、Siスピンデバイスを用いた熱誘起スピン流の生成と室温スピン輸送の実現、更にモデル計算により生成されるスピン信号と熱勾配との相関について詳細に議論する。第五章では本論文の内容についてまとめる。

様式7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　亀野　誠　）			
論文審査担当者	（職）	氏　名	
	主 査　教 授	浜屋 宏平	
	副 査　教 授	白石 誠司	（京都大学 大学院工学研究科）
	副 査　教 授	北川 勝浩	
	副 査　教 授	鈴木 義茂	

論文審査の結果の要旨

本論文はシリコンを用いた半導体スピントロニクスに関する研究をまとめたものである。スピントロニクスは従来金属材料を主な対象材料として発展してきたが、21世紀になり半導体をスピンチャネルとする新機能スピントロニクス素子が理論的、実験的に提案・研究されるようになった。半導体スピントロニクスには、スピン軌道相互作用を積極的に活用するアプローチと、スピン軌道相互作用の小さな材料にスピン注入してその良好なスピンコヒーレンスを活用するアプローチがあるが、本研究はシリコンの有する良好なスピンコヒーレンスに着目した研究であり、後者に分類される。そのためシリコンスピントロニクス研究は、現在のCMOSエレクトロニクスが直面しつつある微細化限界や発熱の問題を解決するための有力な候補素子であるスピンMOSトランジスタの創成に繋がる研究として応用研究面で期待されているだけでなく、グラフェンのような材料の全てが表面であるゼロギャップ半導体という特殊な系ではなく結晶の対称性が高く外界からの影響に強い材料系を用いたスピン輸送・スピン緩和物性の理解という基礎研究面でも大きな意義を持つ。そのためシリコンスピントロニクス研究の推進は強く希求されてきたが、その研究史の中で測定法や実験結果の解釈において紆余曲折があり、期待されたような研究の進度ではなかった。

亀野氏による本研究は、停滞傾向にあったシリコンスピントロニクス分野において、室温におけるn型シリコン中のスピン伝導、及びシリコンスピンMOSトランジスタの室温動作の実現とスピン伝導のゲート変調という2つの基盤技術を軸に、半導体中のスピン輸送において枢軸的な役割を果たすスピンドリフト効果を定量的かつ精密に測定・評価を行い、本分野の停滞を打破した優れた研究である。これは従来のグラフェンを用いた研究では遂行されていなかった研究であり、半導体スピントロニクス全般において大きな意義を有する。更にスピンドリフト効果が特に非縮退n型シリコン中で顕著に現れ、外部電場との協奏によって様々な従来知られていない効果を発現できることを見出した。応用面での本研究の意義は、スピンドリフト効果を有効に用いることでシリコンスピンMOSトランジスタ中での21ミクロン以上の長距離スピン輸送を実現できたことであり、スピン素子設計の自由度が大きく広がった。更に現在のCMOSで問題となっている廃熱をスピン信号に変換して再利用する応用面での視点に端を発してスピン依存ゼーベック効果を半導体で初めて発現させる実験に取り組みそれに成功した点も意義深い。従来のスピンカロリトロニクス研究は金属材料が用いられてきたが、本研究の成果はスピンカロリトロニクス研究に半導体を用いた新たな視座を提供できる点でも重要な成果である。

本論文は5章構成になっており、第1章は序論、先行研究の紹介、本研究で重要な物理的コンセプトや理論の紹介がなされている。第2章はシリコン中のスピンドリフト効果の定量的評価について亀野氏が新たに提案した実験手法も含めて結果が記述され詳細な議論が行われている。第3章ではシリコンスピンMOSトランジスタの室温動作とスピン信号の変調に現れるスピンドリフト効果の役割がこれも定量的に議論されている。第4章では半導体スピンカロリトロニクス研究の嚆矢としての熱流誘起純スピン流の実験的観測と実験結果の理論的解釈がなされている。第5章では本論文のまとめがなされている。

平成27年8月6日に審査担当者と亀野氏で審査委員会を開き亀野氏に博士論文の内容について説明を行わせ質疑・討論・及び口頭試問を行った。論文の内容はいづれも世界的にもこの分野を牽引する高度な内容と十分な先進性を有していること、実験は極めて緻密であること、質疑において亀野氏は本分野における十分な物理的知見を有していることが確認できたことから、本論文は博士（工学）の学位論文として価値があるものと認めるに至った。