# 若手研究者助成金 実績報告書

令和　7　年　4 月 20 日

日 本 大 学 学 長　　殿

氏　　名：　石川　瑞恵
所属・資格：　工学部・　専任講師
実施研究所：　工学研究所

下記のとおり報告いたします。

1　研究課題

| |
|---|
| 和文表記（40 字以内）<br><br>**高感度かつ高分解能なスピン信号測定による半導体中でのスピン伝導メカニズムの解明** |
| 英文表記<br>Clarification of Spin Conduction Mechanisms in Semiconductors through High Sensitivity and High Resolution Spin Signal Measurement |

2　研究期間

令和　6 年度

3　研究目的

スピントロニクスとは，電気を構成する電子が持つ磁石の性質（**スピン**）を利用することで情報処理を行う技術である．**スピン**は電子が自転する動きとして考えられており，その動き方を利用した電子部品をスピントロニクスデバイスと呼ぶ．スピントロニクスデバイスの性能評価には，電子の**スピン**がどのように動いているかを示すスピン信号の観測機器（**スピン信号測定器**）が必要不可欠であり，そのためには高感度かつ高分解能な測定器の立上げが急務となっている．

本研究では，申請者が提案する**スピン信号測定器**を実現することで，スピントロニクスデバイスの動作原理を解析することを目的とする．これにより，半導体中でのスピン伝導のメカニズムを詳細に解析することができ，**スピン**の動的振舞いや相互作用メカニズムの理解により，新たな物理現象を解明することが可能となる．さらに，スピントロニクスデバイスの設計に新たな視点をもたらし，分野全体の発展への貢献が期待できる．

４　研究概要

スピントロニクスは，電子が持つ**スピン**の性質に基づく情報処理技術を探求する分野であり，近年，情報技術の発展に革新的な可能性をもたらしている．メモリや LSI といった従来の半導体デバイスでは，電子が持つ電荷の性質のみを利用し情報処理を行ってきたが，スピントロニクスでは電子の**スピン**の性質も併せて利用することで，**図 1** に示すシリコンスピン電界効果トランジスタ(Si **スピン** MOSFET)[Appl. Phys. Lett. **84**, 2307 (2004)]などの新しい動作原理に基づく新型半導体デバイスが提案されている．特に，Si **スピン** MOSFET は高速かつ低消費電力でコンピュータなどを処理するロジック機能と，電力を遮断しても情報を記録する不揮発性メモリ機能を一つのデバイスで実現できる，夢の半導体デバイスとして期待されている．

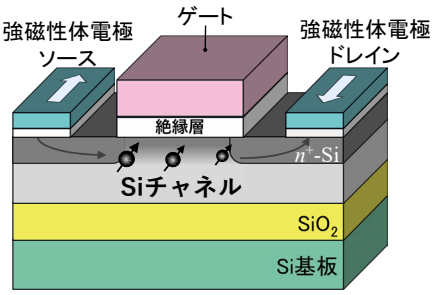



**図 1. Si スピン MOSFET**

Si **スピン** MOSFET に代表されるスピントロニクスデバイスの性能評価には，Si 半導体中でのスピンの動き(スピン伝導)を示す“スピン信号”を観測しなければならない．Si 中でのスピン伝導において観測される典型的なスピン信号を**図 2** に示す．外部磁場($B$)を印加しながら**図 1** のソース・ドレイン電極間抵抗($R$)を測定することで，Si 中のスピン伝導に依存した**図 2** のような抵抗変化($\Delta$R)が検出され，$\Delta$R が大きいほど実用化が可能となる．半導体中でのスピン伝導は，これまで多くの研究者がスピン信号の観測に挑んできたが，未だ理論に一致する結果は得られておらず，実用に必要なスピン信号は得られていない．この原因としては，熱励起や半導体中での結晶欠陥，測定ノイズなどの影響による**スピン**の損失が考えられるが，未だ明らかにはなっておらず，学術的な見地から明らかにしていく必要がある．そのため，スピン信号を正確に評価する**スピン信号測定器**の立上げが，スピントロニクスデバイスの設計と最適化に必要不可欠となる．

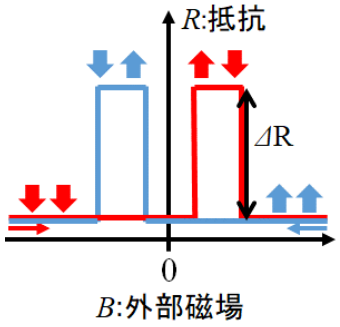



**図 2. スピン信号**
**(上下の矢印は，それぞれソース・ドレイン電極の磁化方向を示す．)**

高精度なスピン信号検出から新たな物理現象の解明が可能か？申請者は昨年度よりスピン信号測定器の立上げを行っているが，高精度な信号評価を行うためには更なる改良が必要となる．本研究では，高感度かつ高分解能な**スピン信号測定器**を構築し，その性能を評価することを目的とする．これにより，半導体中でのスピン伝導のメカニズムを詳細に解析することができ，スピンの動的振舞いや相互作用メカニズムの理解により，新たな物理現象を解明することが可能となる．さらに，スピントロニクスデバイスの設計に新たな視点をもたらし，分野全体の発展への貢献が期待できる．

本研究では，高感度かつ高分解能な**スピン信号測定器**を立ち上げるため，試料作製や金配線の適切な選定・準備による①測定精度向上のための条件出しや，②条件に基づいた測定器の改造，③スピン信号の観測から，結果をフィードバックし研究を進めた．

５　研究結果

本研究では，上記の目的を達成するために，①高感度かつ高分解能なスピン信号測定器の立上げと実装を行い，室温下で高出力なスピン信号の観測を可能にし．②測定条件・測定環境が半導体中のスピンダイナミクスに与える影響を定量化することで，デバイス動作に及ぼす影響を評価することの２つの課題(テーマ)を実施した．

**①高感度かつ高分解能なスピン信号測定器の立上げと実装**

スピン信号測定には種々の測定方法があるが，いずれも微弱な信号のため信頼性の高いスピン信号観測には測定ノイズの低減が必要である．本研究ではスピン信号測定の一つである３端子 Hanle 信号を用いて，今回立ち上げたスピン信号測定器の高感度化および高分解能化を行うこととした．3 端子 Hanle 信号とは，スピントロニクスにおけるスピンの注入・検出特性を評価するための測定手法の一つであり，主に半導体や金属中でスピンがどのように輸送されるかを調べるために使用される．特に，スピン緩和時間($\tau$)やスピン注入効率($P$)を評価する際に使用される手法である．**図 3** に典型的な 3 端子 Hanle 信号を示す．外部磁場の影響により，スピンの向きが歳差運動する現象(Hanle 効果)を利用し，検出された抵抗変化を解析することにより，半導体や金属中での$\tau$や $P$ を算出することができる．しかし，3 端子 Hanle 信号は一般的に非常に微弱な信号のため，熱雑音や環境ノイズ，機械的ノイズなどを低減させる必要がある．**図 4** に今回測定に使用した半導体スピン素子の断面図および 3 端子 Hanle 信号の測定配置を示す．印加磁場 $B$ は-500～+500 Oe，印加電流は 1~10 mA で行った．測定は室温(300 K)で行った．**図 5(a)**に測定開始初期の 3 端子 Hanle 信号の測定結果を示す．ここで，印加電流は 10 mA を用いた．図中の矢印は外部磁場 $B$ の印加方向を示す．**図 5(a)**より，$B$ が-500 Oe の測定開始直後から 0 Oe にかけて抵抗値が徐々に増加し素子の内部抵抗が変化していることがわかる．そこで，測定開始時間(HT)を 0 sec から 180 sec にした場合を評価した．その結果を**図 5(b)**に示す．**図 5(b)**より，HT を 180 sec とすると測定開始直後の抵抗変化はほぼ見られなくなっていることがわかる．よって，HT を最適化することで電流印加直後の抵抗変化は抑制できると考えられる．さらに測定回数(MT)について

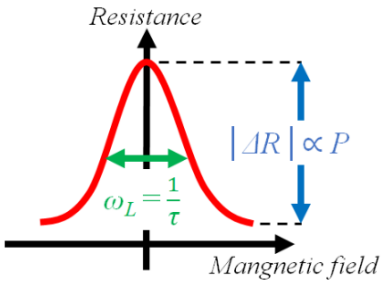



**図 3. 3 端子 Hanle 信号**

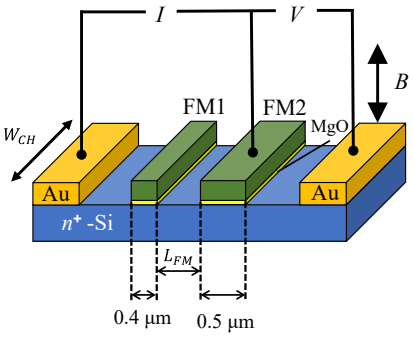



**図 4. 3 端子 Hanle 信号の測定配置**

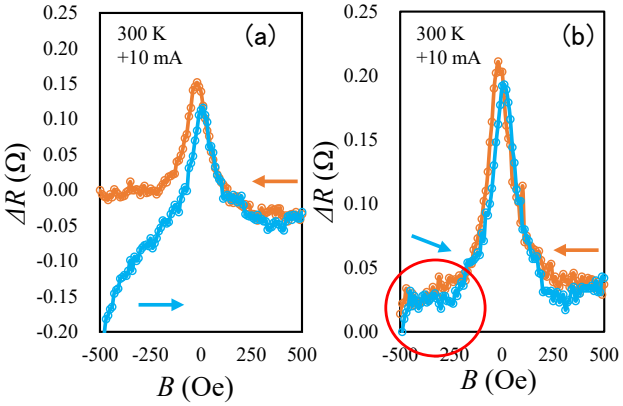



**図 5. 3 端子 Hanle 信号の測定結果**
**[(a)HT:0 sec, (b)HT:180 sec]**

〔５　研究結果（つづき）〕

も最適化し，3 端子 Hanle 信号の測定条件の最適化に成功した．なお今回評価した測定条件以外にも測定分解能の向上が期待できる測定時の積分時間や測定読取時間などの設定条件について評価を行ったが，これらの条件については測定バラツキやノイズへの影響は軽微であり測定時間の大幅な増加となってしまった．そのため，HT と MT 以外の設定条件については，測定器の初期設定値を利用することとした．

**②測定条件・測定環境が半導体中のスピンダイナミクスに与える影響の定量化**

以上の測定条件の最適化により，3 端子 Hanle 信号の電流量依存性を評価した．その結果を**図 6** に示す．印加電流が 1 mA の場合，磁性体内部の電気抵抗が電流方向と磁化方向の相対角度に依存して生じる異常磁気異方性(AMR:Anisotropic Magnetoresistance)効果の影響が顕著になり，3 端子 Hanle 信号が検出できていないことがわかる．また印加電流が 5 mA と 10 mA の結果を比較すると，3 端子 Hanle 信号の信号強度は 5 mA のほうが大きくみえるが，詳細な評価には AMR 効果を除去し評価する必要がある．

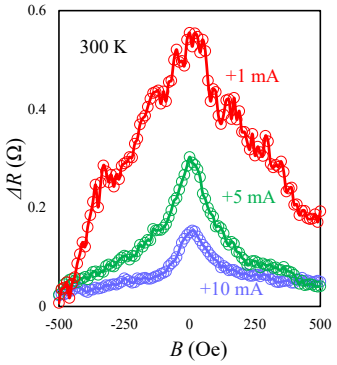



**図 6. 3 端子 Hanle 信号の電流量依存性**

そこで 5 mA と 10 mA の測定結果より，AMR 効果を除去し 3 端子 Hanle 信号の Fitting 式[F. J. Jedema *ec al.*, NATURE , **416** , 713-716 (2002).]を用いて$\tau$の算出を行った．その結果を**図 7** に示す．Fitting の結果，5 mA と 10 mA の$\tau$値はそれぞれ 1.44 nsec と 1.19 nsec となった．これらの値は，これまでに報告されている $n^+$-Si 層における$\tau$値[S.Lee *et al.*, Appl. Phys. Lett, **110**, 192401 (2017).]とほぼ同程度であった．今後は 3 端子 Hanle 信号によるスピン緩和時間と印加電流量との関係をより詳細に評価し Si 中でのスピン伝導メカニズムの解明を行っていく．

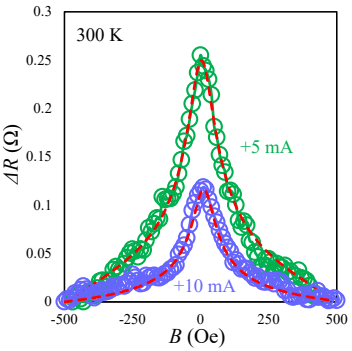



**図 7. AMR 効果を除去した 3 端子 Hanle 信号 Fitting**

最後に、今回得られた最適化された測定条件を用いて，**Si スピン MOSFET** の性能評価となるスピン信号(Local 信号)の測定を室温で行った．その結果を**図 8** に示す．外部磁場 $B$ を FM 電極の長手方向に印加することで，FM1・FM2 の磁化方向が平行から反平行へと変化し，抵抗値が急峻に変化することを確認した[**図 8(b)**]. 以上により，今回立ち上げた高感度かつ高分解能なスピン信号測定器において室温での Local 信号の検出に成功し，測定条件・測定環境による半導体中のスピンダイナミクスに与える影響を定量化できることを確認した．今後は，これらの結果がデバイス動作に及ぼす影響を評価し，**Si スピン MOSFET** の実現を目指す．

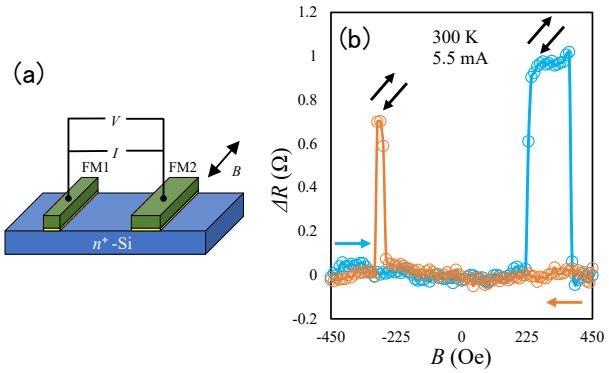



**図 8. Local 信号の(a)測定配置と(b)測定結果**

６　将来獲得を目指す学内外競争的資金の種類

日本大学学術研究助成金，科研費(基盤研究 C)

７　本研究をもとに申請した外部研究資金及びその獲得状況

| 氏　　名 | 申請年度 | 研 究 種 目 | 研　究　課　題 | 採・否 |
|---|---|---|---|---|
| なし | | | | |

８　学会発表等

要旨集の抜き刷り，発表原稿のコピー等及び発表したことがわかるものを添付してください。

| 発表者名 | 学会，発表会名等 | 発表テーマ | 発表年月 |
|---|---|---|---|
| 李 奕禧，谷口 柊，阿部智瑛，石川瑞恵 | 第 72 回応用物理学会 | 半導体スピン素子のための高濃度 $p$ 型 Si 層の作製・評価 | 2025 年 3 月 |
| 李 奕禧，石川　瑞恵 | 日大工学部学術研究報告会 | Si スピン MOSFET の実現に向けた 3 端子 Hanle 信号の測定条件の最適化 | 2024 年 12 月 |

９　著書・雑誌論文

著書，雑誌，抜き刷り等を添付してください。コピーの場合は掲載されたことが客観的にわかるものを添付してください。

| 著者・執筆者 | 著書名・雑誌名／論文名 | 巻・号 | 年月 | 出版社・発行所 |
|---|---|---|---|---|
| なし | | | | |

１０　本研究課題に関するその他の発表（新聞，一般雑誌掲載等）

なし

１１　他の研究への発展

次世代デバイスとして期待されるスピントロニクスデバイスの一つである Si スピン MOSFET は，現在 IoT 技術で求められている高性能化、微細化・小型化、低消費電力化といった一連の課題に加え，放射線耐性をもつ半導体デバイスとして，今後日本の新たな強い産業を実現できる有望な電子デバイスである．以上の課題を一気に解決できる“Si スピン MOSFET”が実現できれば、ロボット産業や宇宙産業，IoT 市場などの半導体産業への応用が期待できる。

１２　その他の成果

なし

１３　本研究課題による発明届の提出及び知的財産権の出願・取得状況

| 名　　称 | 知的財産の種類 | 発　明　者<br>（考案者・創作者） | 権　利　者 | 出願・登録番号 | 出願年月日 | 取得年月日 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| なし | | | | | | |

**※ホームページ等での公開（☑可・□否）**いずれかをチェックしてください。
否の場合は，理由書を別途添付のこと。