

京都大学	博士 (工学)	氏名	山下 尚人
論文題目	Study on the Physics of Metal/Si Interfaces in Si-based Spin Devices (Si スピン素子における金属/Si 界面物性の研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文では、新機能情報処理素子である Si を用いたスピン素子において重要な金属/界面物理を多角的かつ詳細に研究し、新たなスピン注入物理の実証およびそのデバイス応用に向けた学理をまとめたものである。</p> <p>第 1 章では、本研究の位置づけが述べられている。近年の電子素子に対する発熱と省エネルギー化の問題を取り上げ、その解決案としてスピン素子が着目されていることが述べられている。スピン素子の代表例であるスピン MOS トランジスタ (FET) について、新たな性能指標を定義し性能比較により Si が有力候補材料であることが定量的に示されている。当該研究領域における重要な業績がまとめられており、本研究の立ち位置と目的が客観的かつ明確に示されている。</p> <p>第 2 章からが研究成果のまとめとなる。</p> <p>第 2 章では、半導体素子において重要な熱処理の影響を調査している。熱処理はスピントロニクス分野の代表的な素子においてスピン偏極率を向上できる手法として知られている。Si スピン素子においてもスピン信号増大の報告があるものの、電極にホイスラー合金を用いており、界面の絶縁性トンネル膜との遷移金属との結晶配向性に着目した研究はないため着目された。本研究では電極の強磁性体に一般的な強磁性体であるコバルト (Co) や鉄 (Fe) を用いて熱処理の耐性を調査し、300°C の熱処理によりスピン信号が倍増することが発見され、また熱処理前後の試料で X 線回折 <math>\theta - 2\theta</math> 測定を行い面内の配向性を調べたところ、熱処理後に Fe のスペクトルピークが強まっていることが確認された。これより、MgO と強磁性金属界面において配向性が改善されたことによるスピン偏極率の向上が示された。また、実験を進める中で 350°C 程度の熱処理により素子破壊が観測されたため、原因の解明を試みた。現在一般的に用いられている集積回路製造工程では 400°C 程度の熱処理は一般的に行われているため、低い熱処理耐性 Si スピン素子の応用上問題となる可能性がある。金属/Si 界面に着目して観察したところ、非磁性電極の材料の一部が 7 <math>\mu\text{m}</math> 離れた強磁性電極付近にて観測された。その原因となる非磁性電極のコンタクト層に拡散防止バリアとして効果的であるタンタルを用いることを着想した。その結果、400°C の熱処理後でもスピン信号の観測に成功し、集積回路工程と親和性の高い Si スピン素子の構造が提案されている。</p> <p>第 3 章では、半導体で問題となる発熱を利用するという独創的な発想によりゼーベック効果のスピン流版であるスピン依存ゼーベック効果の半導体における理論的研究および実証実験が報告されている。まず半導体におけるスピン依存ゼーベック効果のモデル計算を行い、スピンドリフト拡散方程式に熱流の項を加えたスピン依存ゼーベック効果によるスピン信号が見積もられた。その結果、Si では一般的な金属である銅と比較して 400 倍大きな信号を得られることが解明されると共に、大きな信号を得られる要因は導電率が低いこととスピン拡散長が大きいことであることが明らかにされている。次に、ロックイン法とフーリエ解析を用いて Si におけるスピン依存ゼーベック効果の測定が行われて、電流によるスピン信号の非線形成分とスピン偏極率のバイアス依存性による非線形成分を差し引くことにより、過渡的なジュール熱によるスピ</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	山下 尚人
<p>ン信号の検出に成功している。さらに主幹物性パラメーターとして、Fe のスピンゼーベック係数 <math>6 \mu\text{V}/\text{K}</math>、強磁性金属/Si 界面の温度差 <math>200 \text{ mK}</math> において熱によるスピン信号が <math>8 \mu\text{V}</math> という値が得られている。本実験は、Si だけでなく半導体を用いたスピン依存ゼーベック効果として初めての実証となった。さらに、実験と理論の比較から直流印加測定で得られるスピン信号のうち 20%はジュール熱に由来することが明らかになった。</p> <p>第4章では、金属・半導体界面の最も基礎的かつ重要な課題であるショットキー障壁の課題がスピントロニクス視点から議論されている。一般的には、電子デバイスではドーピング密度を高めることにより界面抵抗の低減が行われるが、高密度のドーパントはスピン散乱の要因となるため、スピン素子では異なるアプローチが求められる。そこで本研究では金属の仕事関数低減による低抵抗化を試み、材料として室温でスピン偏極を有する Fe と低仕事関数を有するガドリニウム (Gd) の合金に着目し、新たに非縮退の n 型シリコンにオーミックコンタクトを形成できることが発見された。また、光電効果による測定から、合金の仕事関数は <math>3.0 \text{ eV}</math> と鉄に比べて <math>1.9 \text{ eV}</math> も低下していることが発見され、その背景を仕事関数の鏡像力モデルに基づいて検討したところ、電子密度が減少していることが原因であると推定された。本成果により界面抵抗の二桁低減が実現され、スピン MOSFET の磁気抵抗比を飛躍的に増大するための基盤技術が開拓された。</p> <p>第5章では本研究で得られた成果のまとめ及び今後の展望が述べられている。</p>			

氏名	山下 尚人
----	-------

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、シリコン(Si)スピントロニクスにおける現在の重要な課題である Si スピン素子の磁気抵抗比増大に向けて、同課題解決のための、基盤技術開発及び金属/Si 界面物性開拓に焦点を当てた研究成果がまとめられている。得られた成果は以下の通りである。

1. 磁気抵抗比増大のため、金属/Si 界面におけるスピン偏極率の増大に着目した。強磁性金属と絶縁体の積層からなる磁気トンネル接合において、熱処理によりスピン偏極率増大および磁気抵抗効果の増大が報告されている。Si スピン素子においても磁性トンネル接合の構造を含むため熱処理によりスピン信号増大が期待される。本研究では真空中 300℃の熱処理によりスピン信号が2倍に増加することを Si スピン素子において初めて発見した。また、集積回路としての応用上重要となる素子の熱処理耐性の向上にも取り組み、400℃の熱処理後でもスピン信号の観測に成功した。
2. スピントロニクスに熱電現象を組み合わせたスピントロニクスの研究領域で新奇現象の発見が相次いでいる。中でも、ゼーベック効果のスピン流版であるスピン依存ゼーベック効果を用いれば、ジュール熱から非磁性体中のスピン流生成を可能とする(熱スピン流)。半導体スピントロニクス特有の非線形性を考慮した解析手法を新規に考案し、ジュール熱による Si 中のスピン流生成に成功した。スピン信号に対する熱スピン流の寄与はおよそ 20%と見積もられ、熱によるスピン流付加効果があることを示した。これより、半導体 Si 中に熱スピン流を生成でき、半導体素子で生じる熱をスピン流として回収できることを実証した。
3. スピンに依存しない寄生抵抗を低減することも、磁気抵抗比増大に有効である。特に、金属/Si 界面抵抗の低減は重要である。通常、室温強磁性を示す遷移金属は仕事関数が大きいためショットキー障壁が生じ高抵抗となる。本研究では、合金による仕事関数制御の手法を強磁性に適応し、Si スピン素子に求められる低界面抵抗かつ室温強磁性を開発した。非晶質合金の仕事関数を表面組成との相関に関する貴重な実験データが取得された。その結果、鉄に低仕事関数元素をわずか 20%添加するだけで仕事関数が激減し、室温強磁性かつ、n-Si にオーミックコンタクトを形成できることが明らかとなった。仕事関数低減要因を考察するため、表面元素組成依存性を測定して鏡像力モデルによる解析が行われ、表面再構成の消失による仕事関数の激減を示唆する結果を得た。

本論文は、申請者の研究が世界的に当該研究分野において優れた内容と先進性を有しており、本研究に関する十分な物理的知見および深い理解を有していることを確認でき、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、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。

また、令和3年6月21日に、博士学位論文調査委員の3名(白石誠司・木本恒暢・引原隆士)の前で申請者である山下尚人氏による論文内容の説明、および論文内容とそれに関連した物性物理学に関する事項について試問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は京都大学学位規定第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。