

京都大学	博士 (工学)	氏名	李 垂範 (Soobeom LEE)
論文題目	Study on Electrical Generation and Manipulation of Spin Current in n-Si Spin MOSFET (n 型 Si スピン MOSFET におけるスピンの電氣的生成と操作に関する研究)		
<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 スピン MOS トランジスタ (FET) の詳細なデバイス物性物理と同素子を用いて Si 中を伝搬するスピンのスピン軌道相互作用を介した外部電場による操作及びその背景学理をまとめたものである。</p> <p>第一章では、スピントロニクス領域の創成と発展の歴史、更に本研究で扱う半導体スピントロニクス、特に Si スピントロニクスにおける重要な業績がまとめられており、本研究の立ち位置が客観的に示されている。</p> <p>第二章では本研究において重要ないくつかの理論的バックボーンが述べられている他、本研究で遂行された実験結果を解析するための基礎方程式の導出と物理的意味、更に実験で用いた測定手法について詳細が述べられている。</p> <p>第三章からが研究成果のまとめとなる。</p> <p>第三章は Si スピン MOSFET におけるスピン信号のソース＝ドレインバイアス電圧依存性について議論がなされている。Si スピン MOSFET のスピン信号は低バイアス電圧領域では従来理論の範疇で説明できる振る舞いをしているが、高バイアス電圧領域では理論で予想される信号強度より小さな信号しか観測されない、という問題があった。本研究では、Si 中のスピン拡散長や拡散係数はバイアス電圧に対して変化しない一方、強磁性電極の界面抵抗が高バイアス電圧によって急激に減少し、それによって静特性では回避できるようにデバイス設計がなされていた、いわゆる「伝導度ミスマッチ」問題が高バイアス電圧領域で顕在化してしまうことで Si へのスピン注入効率が低下することが原因であることを初めて見出している。実験結果は強磁性電極の界面抵抗の変化を従来理論計算に新たに導入することでよく再現できることも確認されている。</p> <p>第四章では Si スピン MOSFET におけるスピン信号が高ゲート電圧領域において、従来理論で説明できない信号強度の飽和・減少を見せる背景学理を明らかにする、という問題に取り組んでいる。Si スピン MOSFET 動作にはゲート電圧の印加は必須であるため、この問題は同素子の応用展開の大きな障害となりうるものである。本研究では、まず正のゲート電圧印加によって Si の伝導度が向上することでスピンのドリフト速度が減少し、その結果としてスピン信号が減少するという背景学理を明らかにしている。更に、負のゲート電圧印加の結果 Si の伝導度が減少し Si 中のバイアス電界強度が大きくなるため、Si 中に光学フォノンが励起され、この光学フォノンによる散乱によってスピン拡散長が減少することがスピン信号の減少をもたらすことも実験的に明らかにされている。</p> <p>第五章では Si 中のスピン寿命を決定する物理機構が議論されている。Si スピン MOSFET においてスピン信号強度を決定する大きな要因の 1 つがスピン寿命である。スピン寿命が長いほど出力できるスピン信号も一般に大きくできデバイス応用範囲が広がることが予想できる。Si におけるスピン寿命は Elliott-Yafet 機構と呼ばれるスピン軌道相互作用に基づくスピン散乱機構で支配されていることが過去の研究から既に明らかとなっているが、より詳細なスピン散乱要因については十分な理解が得られていなかった。そこで本研究では縮退 Si を用いて広範な温度領域でスピン寿命を決定する物理的要因を、抵抗率・スピン寿命などの温度依存性から検討し、極低温領域では不純</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	李 垂範 (Soobeom LEE)
<p>物散乱が、室温領域ではフォノン散乱が支配的であることを系統的に明らかにしている。</p> <p>第六章では Si スピン MOSFET におけるスピン軌道相互作用の外場制御の発見について述べられている。Si は軽元素からなり更に結晶の空間反転対称性を有するためバルクではスピン軌道相互作用 (SOI) が無視できるほど小さい。しかしながら Si スピン MOSFET ではスピンチャネルを形成する n 型 Si 層が 100 nm 程度と薄く、更にゲート絶縁膜である SiO₂ との界面も存在するため、系の対称性がバルク Si と比較して低い。そのため特に Rashba 型 SOI が人工的に創発されている可能性が否定できない。本研究では同素子の Si チャネル中のスピン緩和の異方性という観点から、人工的に創発される Si 中の SOI の存在を実験的に明らかにするとともに、Si 中を伝搬するスピンを、SOI を介して磁場を用いず外部電場のみで操作することに世界で初めて成功した。本成果は従来の Si 物性の理解を大きく覆すと共に、人工 Rashba スピン軌道相互作用系という新しい固体物性像を提示することに成功した点にも重要な意義を持つ。</p> <p>第七章は本研究で得られた成果のまとめが述べられている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、新機能情報処理素子である Si スピン MOS トランジスタ (FET) の詳細なデバイス物性物理、同素子中を伝搬するスピンのスピン軌道相互作用を介した外部電場による操作とその背景学理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. Si スピン MOSFET におけるスピン信号は強磁性電極の界面抵抗が、印加されたバイアス電圧によって急激に減少し、それによって Si へのスピン注入効率が低下することが原因であることを初めて見出し、実験結果が強磁性電極の界面抵抗の変化を従来のモデル計算に新たに導入することでよく再現できることが確認された。
2. Si スピン MOSFET 動作において、正のゲート電圧印加によって Si の伝導度が向上することでスピンのドリフト速度が減少し、その結果としてスピン信号が減少するという、及び負のゲート電圧印加の結果 Si 中のバイアス電界強度が大きくなるため、Si 中に光学フォノンが励起され、それによってスピン拡散長が減少することがスピン信号の減少をもたらすことも実験的・理論的に初めて明らかにした。
3. Si スピン MOSFET においてスピン信号強度を決める大きな要因である Si 中のスピン寿命について、極低温においては不純物散乱が、室温領域においてはフォノン散乱が支配的であることを明らかにした。
4. Si は本来バルクではスピン軌道相互作用 (SOI) が無視できるほど小さいが、Si スピン MOSFET ではスピンチャネルを形成する n 型 Si 層が薄く SiO₂ との界面も存在するため特に Rashba 型 SOI が人工的に創発されている事実を見抜き、Si チャネル中スピン緩和の異方性という観点から人工的に創発される Si 中の SOI の存在を実験的に明らかにするとともに、Si 中を伝搬するスピンを SOI を介して磁場を用いず外部電場のみで操作することに世界で初めて成功した。

本論文は、以上のように学術上寄与するところが少なくなく、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 3 年 1 月 22 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、申請者である李垂範氏による論文内容の説明、及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、また申請者が本研究に関する十分な物理的知見を深い理解を有していることを確認できたことから、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。