

最先端・次世代研究開発支援プログラム
事後評価書

研究課題名	スピントロニクス技術を用いた超省電力不揮発性トランジスタ技術の開拓
研究機関・部局・職名	独立行政法人産業技術総合研究所・ ナノスピントロニクス研究センター・研究チーム長
氏名	齋藤 秀和

【研究目的】

近年、コンピュータ等の IT 機器が消費するエネルギーはその急速な普及に伴って急激に増大しており、主要な温室効果ガスの排出源の一つに数えられるに至っている。具体的には、IT 機器の消費電力は既に総消費電力の 5%を占めており、このまま省電力化を図らなければ 2020 年にはさらに 5 倍に増大してしまうと予想されている。このため、IT 機器の省電力化は将来の高度情報化社会と低炭素社会を両立するための緊急課題である。

IT 機器が消費する電力の中でも待機電力が大部分を占めており、省電力化のためにはその削減が必要不可欠である。これは、現在のコンピュータの主要半導体メモリが電源を切ると情報が失われてしまう「揮発性」メモリで構成されていることから、たとえ機器を使用していない間でも電源を切ることができないためである。そのため、電源を切っても情報が失われない「不揮発性」メモリデバイスで既存メモリを置き換えることができれば消費電力の大幅な抑制が可能となるはずである。さらに、より抜本的な省消費電力化のためにはメモリのみならず論理演算回路を含めた LSI 全体を不揮発化することが必要である。実際、最近このような観点の研究開発の重要性が広く認識されるようになり、例えばトンネル磁気抵抗 (TMR) 素子を既存の CMOS と組み合わせるアプローチが試みられるようになった。しかし、TMR 素子と CMOS を組み合わせるこのハイブリッド的な手法は、より現実的ではあるもの、一方では素子構造の複雑さや、デバイス性能が TMR 素子に律速されるという問題も抱えている。そのため、長期的かつ根本的な観点からは単一素子で機能する不揮発性トランジスタの出現が期待される。

このような背景より、電子の電荷とスピン自由度を半導体単一素子中で利用して不揮発機能を達成するスピントランジスタが、将来の半導体メモリ開発の指針となる ITRS ロードマップにも記載されるなど世界的に注目されている。しかしながら、これまでスピンに依存したトランジスタ動作を明確に実証した例はない。この大きな要因は、その動作原理の根幹を成す、一方の強磁性電極より半導体伝導帯中へスピン偏極電子を注入 (スピン注入) し、もう一方の強磁性電極でスピン情報を検出 (スピン検出) する技術が確立されていないためである。換言すれば、この課題を克服できれば

後の開発研究は 3 端子化等の既存の MOS トランジスタ作製技術で対応できるフェイズに移行できることになる。本提案は、スピントランジスタの基盤技術である VI 族半導体への室温でのスピン注入・検出技術の確立を目的とする。成功の鍵を握るのは、強磁性電極/半導体間の接合品位であるが、申請者は既に目的達成のための重要な手掛かりを得ている。最近、申請者は GaAs と強磁性電極 (Fe) の間に酸化ガリウム (GaO_x) というトンネル障壁層を挿入することにより、これまでの常識を覆す高い電流注入効率を達成すると同時に、低温ではあるもののスピン注入にも成功している。このことは、従来の絶縁障壁層を用いた接合では電流注入効率が低く、そのため検出感度が十分に確保できないという課題を克服できることを示している。スピントランジスタを実デバイスとして捉えた場合、半導体材料としては必然的に VI 族半導体である Si および Ge がターゲットとなる。しかしながら、歴史的に半導体スピントロニクスの研究には GaAs が多く用いられており、VI 族半導体と比較して電子スピンに関する物性の理解や金属とのハイブリッド構造に関する研究が進んでいる。このため、まず GaAs においてスピン注入・検出を実証することが、その後、VI 族半導体へ展開する上での重要なブレークスルーに繋がると期待される。

そこで本研究では、まず GaAs におけるスピン注入・検出を室温で実証する。その後、この実験で蓄積した知見を Si および Ge に適用することにより、同様にスピン注入・検出を室温で実現する。

【総合評価】	
	特に優れた成果が得られている
○	優れた成果が得られている
	一定の成果が得られている
	十分な成果が得られていない

【所見】
① 総合所見
本研究課題は超省電力不揮発性トランジスタの実現を念頭に、「IV 族半導体への室温でのスピン注入・検出技術の確立」を目的としている。スピン緩和時間が極めて短い Ge において、単結晶 Fe/MgO をスピン注入ソースとして電气的スピン注入に成功している点や新たなトンネル障壁層として GeO_2 を開発し、スピン注入に必要な電流密度を 3 桁程度、削減している点は評価に値する。一方、当初の目標である「GaAs における研究展開」が著しく遅延しているが、ネックとなっていた装置の改良も進み、今後の大きな成果が期待される。

② 目的の達成状況
・ 所期の目的が (□全て達成された ・ ■一部達成された ・ □達成されなかった)
本研究課題は、待機電力ゼロを実現するスピントロニクスデバイス開発に向けて、

まずは III-V 族半導体へ、最終的には IV 族半導体への室温でのスピン注入とその検出を具体的な目標として設定している。途中、東日本大震災により長期間研究の中断を余儀なくされたにも関わらず、IV 族半導体である Ge への室温でのスピン注入に世界で初めて成功しており、最大の目標値をほぼ達成している。また、その実現手法は、酸化膜の品質を向上させるという独自性の高いものであり、今後の発展も期待させることから、現時点で本研究課題の目的はほぼ達成されたと判断できる。

その一方で、計画では最初に実現する予定であった III-V 族半導体へのスピン注入の実験が、当予算で購入した最も高額な III-V 族半導体成膜装置の不調から未だ実現しておらず、その点は好ましい状況とは言い難い。事後報告書において装置の改良がなされたことが明記されており、今後の成果が期待できる。

③ 研究の成果

・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が
(ある ・ ない)

・ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が
(創出された ・ 創出されなかった)

・当初の目的の他に得られた成果が (ある ・ ない)

本研究課題で、IV 族半導体への室温でのスピン注入に成功したのは、絶縁酸化膜を制御し、界面に生じる固有の界面状態密度を小さく抑えた、高品位の電極を作製したことが主要因であると結論している。地道な取り組みが先端の成果を生んだと言えるが、作製されたスピンドバイスの挙動は、既存のスピン拡散モデルでは記述できないことから、スピンドバイス設計モデルの修正が必要である可能性も出てきた。これらの成果は、本研究課題の成果の高い先進性によるものと判断できる。

主要な半導体である、IV 族半導体に室温でスピン注入するという、極めて重要で基本的な成果は当初の目的を超えた成果であり、今後のスピンドバイス実用化に向けて、大きなブレークスルーとなる成果であると言える。

④ 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が
(見込まれる ・ 見込まれない)

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が
(見込まれる ・ 見込まれない)

本研究結果の結果として、「半導体への効率的スピン注入のための障壁層材料の指針（酸化物／半導体界面の不完全性の低減）」が得られており、今後のデバイス設計に有用である。また、得られた結果を基にして、従来理論の見直しを迫っており、「実験と理論の有機的連携」が期待される。

本研究の目的はグリーン・イノベーションに寄与する「超消費電力不揮発性トランジスタの実現」であり、それに向けた必須の要素技術である「半導体への電気的スピン注入」が成果として得られている。一方、半導体における電子スピンは量子演算素

子において重要な役割を担うことから、将来的に本成果の社会的・経済的な課題の解決への貢献が期待される。

⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが (■行われた ・ □行われなかった)

研究計画書作製当初は、従来から取り組んできた GaAs 等の III-V 族半導体を研究期間の前半に実施し、その後、Si および Ge 等の IV 族半導体へのスピン注入に移行する予定であった。しかし、IV 族半導体、特に Ge をベースとしたスピントロニクス技術が非常に注目を集めるようになってきた状況を踏まえ、Ge(Si) へできるだけ早急に移行すべきと判断し、優先して研究に取り組んだ。その結果、Ge への世界初のスピン注入に成功する等、目標を前倒しで達成することができた。研究の方向性を的確に判断し、成果をあげたことは、研究マネジメントが適切行われた一つの証でもある。今後は、GaAs 系に関しても早急に実験を進める予定である、とされており、大いに期待したい。

プロジェクト開始以降の国民との科学技術対話の累積実施件数は 3 件であった。国民との科学技術対話は、1) 研究代表者の所属機関である産業技術総合研究所の一般公開、2) 研究代表者が所属する日本磁気学会主催の公開講演会において実施されており、いずれも、研究成果の成果発信だけではなく、実験のデモンストレーションを行うことなどにより、特に小中学生の興味を引くよう最大の努力を払っており、研究成果は適切に発信されていると判断される。