

シリコンゲルマニウム光スピントロニクスの開拓



研究代表者	大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授	
	浜屋 宏平 (はまや こうへい)	研究者番号：90401281
研究課題情報	課題番号：24H00034	研究期間：2024年度～2028年度
	キーワード：半導体、スピントロニクス、シリコンゲルマニウム、量子構造、	

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

●研究の全体像

スマートフォンやパソコンなどの身の回りの電子機器のみならず、人工知能(AI)や電気自動車(EV)、量子コンピュータ関連などの最先端技術に至るまで、全てにおいて「半導体」が関係している。半導体とは文字通り、金属のような「導体」とゴムのような「絶縁体」の中間の電気伝導率を示す物質のことであるが、一般的にトランジスタと呼ばれる電流のON/OFFを制御する電子部品(デバイス)やそれを集積した回路・システムも全て「半導体」と呼ぶことが多い。この「半導体」には、色々な種類や役割が存在しているが、特にAI技術の発展によって地球環境問題に発展する極めて深刻な課題が発生し始めている。それは、生成AIの利用拡大に伴う大規模データセンターの電力消費量の急拡大である。JST(国の機関)の低炭素社会戦略センターが発表しているデータによると、データセンターの電力消費は2050年には、2018年度比で2500倍以上にも膨張すると見積もられており、データセンターの消費電力量の約6~8割は「半導体」が占めているという試算もある。そのため、2050年のカーボンニュートラル社会を実現するという我が国の目標達成には、この「半導体」の消費電力を減らす革新的な技術を開発するしかない。

本研究では、研究代表者と研究分担者が10年以上にわたって独自に研究開発してきた「室温半導体スピントロニクス技術」を基軸に、図1に示すような「電子-スピン-光融合集積半導体システム」の基盤技術と基本学理の構築を目標とする。特に、本基盤(S)研究では、シリコンゲルマニウム(SiGe)という半導体材料系に注目し、不揮発メモリ機能や大容量通信の核となる「スピントロニクス技術」を搭載した半導体光スピントロニクスデバイスをシリコン(Si)プラットフォーム上に実現する。これは、スピンを用いた演算機能・メモリ機能・光(暗号)通信機能を有する次世代半導体デバイスをSi基板上に同時実証した究極のチップ内光配線型・低消費電力半導体システムへと発展する可能性のある革新的な省エネ半導体技術基盤とその基本学理の構築となる。

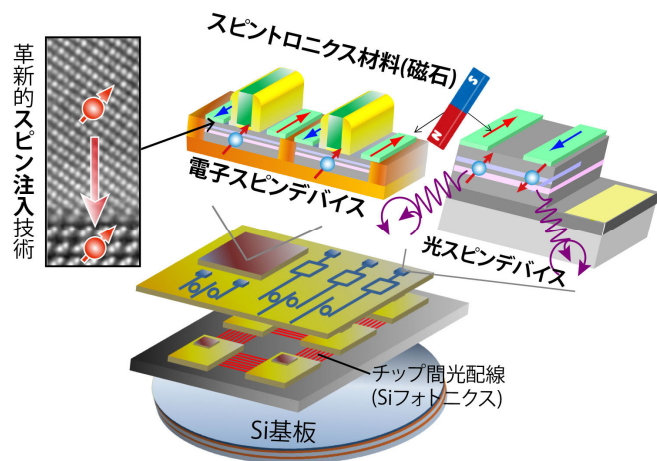


図1 研究全体(長期展望)のイメージ図と本研究で実証を目指す光スピントロニクスデバイスの模式図(右)。

(なお、模式図は大学の研究室レベルの実証であることを考慮して模型トランジスタ構造を記載しているが、20~30年後の未来の最先端半導体技術の電極構造がスピントロニクス材料であるものをイメージしている。)

●本研究の重要性とコア技術など

図1のような、Si基板上(低コスト)に、光配線技術(発熱・通信遅延を減らした省エネ情報通信技術)と相性が良く、不揮発メモリを搭載しており(待機電力削減=省エネ)、オンチップ集積(小型化=省エネ)することができる革新的な半導体技術を開拓するためには、スピントロニクス技術と整合し、通信波長帯で動作する光デバイスへと繋がる半導体である『ゲルマニウム(Ge)』の利用が極めて有望である。

これまで研究代表者と研究分担者は、この重要性を認識しながら、上記の要請を満たすための半導体スピントロニクス学術基盤の構築に取り組んできた世界でトップレベルの研究チームである。既に図1(左)に示したような、スピントロニクス磁性材料とGeの原子層レベルの超高品質接合を実証し、室温で不揮発メモリ動作するゲルマニウム「電子スピンドバイス」構造の実証(図2)を済ませている。本研究では、この技術を活用して、GeやSiとの合金であるSiGe(シリコンゲルマニウム)からなる様々な量子構造と融合することにより、「SiGe光スピンドバイス」の実証に挑戦する。

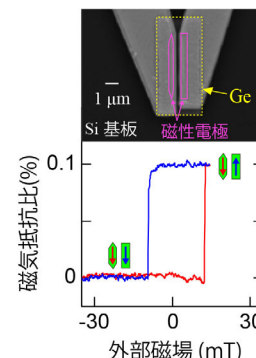


図2 Ge電子スピンドバイスにおける室温不揮発メモリ効果

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●テーマ1: Ge/SiGe多重量子井戸(MQW)への室温・高効率スピン注入

貼り合わせプロセスを用いてSiO₂上に高品質SiGe層を実現する技術を確認し、通称SiGe-on-Insulator (SGOI)構造を実証する。さらに、そのSGOI上へGe/SiGe多重量子井戸(MQW)構造を実現し、このMQW層への室温・高効率スピン注入を実証することにより、光スピンドバイス実現のための基盤技術構築する。ここで、SGOI構造を用いるメリットは、これまでのSi基板上のGeバッファ層に存在していた多数の転位や欠陥を最小化しながら、光の閉じ込め効果を増大することができ、且つ、将来の光配線のための導波路を作製することができる点である。

●テーマ2: Ge/SiGe-MQWと用いたスピンLEDの実証

テーマ1で構築する予定の技術を利用して、高効率な室温スピン注入と通信波長帯での発光を同時に実現できる「円偏光スピンLED」を実証する(図3)。電気的に注入されたスピン(角運動量)は光学選択則(角運動量保存則)に従い、量子井戸内でホールと再結合する過程で円偏光(右回り or 左回り)として発光する。今回のLEDデバイスは、強磁性電極の高品質作製条件の関係で[111]方向に積層する予定であり、発光を取得する端面(側面)はGeの劈開面ではないことから、MQWデバイス側面の微細加工ダメージがデバイスの高性能実証に影響を及ぼす可能性が高い。そこで本研究では、Ge/SiGeスピンLEDデバイスに対する独自の微細加工プロセスを開発する。

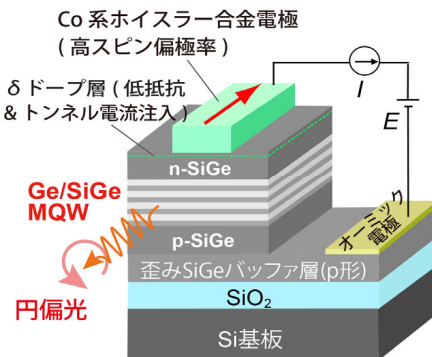


図3 テーマ2の実証例の模式図

●テーマ3: オンチップスピンレーザー技術の構築

テーマ1およびテーマ2で独自開発した技術を結集して、面内共振器構造を取り入れたスピンレーザーまたは垂直共振型面発光スピンレーザーの実証に挑戦する。テーマ1およびテーマ2で得られるスピン物性の結果や微細加工技術と、個別に先行検討する予定の非磁性電極構造を用いたGe/SiGeレーザー技術(分担者担当)を融合し、代表者と分担者の共同でGe/SiGeスピンレーザー(電流注入)の実証を目指す。重要な点は、室温での円偏光レーザー発振のために大電流印加を要求される可能性が高いことであるが、我々の高効率・低抵抗スピン注入技術は従来技術よりも2桁近い低電圧で閾値電流を得ることができると予想され、低電圧駆動のスピンレーザーを実証する上で非常に有望であると期待される。

- 研究体制：大阪大学 浜屋宏平 (代表)、東京都市大学 澤野憲太郎 (分担)、九州大学 山本圭介 (分担)