

CREST 研究領域「次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する革新材料・プロセス研究」
追跡評価報告書

総合所見

本研究領域は、「新原理・新機能・新構造デバイス実現のための材料開拓とナノプロセス開発」を戦略目標としてわが国における半導体産業の低迷、停滞を打破すべく、革新的エレクトロニクスデバイス創製のための新たな材料・構造・プロセス技術の開発を目指した。従来の CMOS と異なる新しい原理、新しい機能、新しい構造を持つデバイスの実現と、そのための材料、プロセス開発を行うことを目標として、①非シリコン系半導体による次世代デバイス、②光、電気、磁気機能の融合、変換による新規デバイス、③ナノ、分子レベル加工による新規デバイス、④フレキシブルかつ耐衝撃性を持つ携帯デバイス用材料、の4つの達成目標を掲げて実施された。研究期間中に上記4つの達成目標に関連した複数の研究成果が出ていたが、研究終了後もそれらの研究成果の多くは順調に発展し、多くの研究成果につながった。具体的には、①ゲルマニウム(Ge)やグラフェンによるデバイス研究が進展し、ゲルマニウム CMOS に関して重要な科学的知見が得られた、②複数のスピントロニクス研究において多くの新規な成果に基づき新原理デバイスの提案がなされた、③原子、分子を利用したスイッチや原子スケールの界面を利用したデバイスの提案に基づき脳型情報処理に向けた研究の実施など、新原理・新機能・新構造デバイス実現のための材料開拓とナノプロセス開発が進行中である。

これらの優れた研究成果は、FIRST、ImPACT、SIP、ACCEL、A-STEP、NexTEP、OPERA、NEDOなどの大型プロジェクトに引き継がれ、研究代表者がキープレイヤーとしてプロジェクト研究を牽引して発展的に研究が進められている。さらには、産学官連携により果敢に応用開発研究にチャレンジし、日本の半導体産業を復活し、継続的に発展させて日本の産業活性化に資すると思われる多くの特許出願に至っている。企業との連携による実用化や社会実装に向けた開発や技術移転が進行しており、ベンチャー企業を自ら起業したものも含め、出願された特許のいくつかは既に実用化されており、社会的・経済的に十分な波及効果が期待できる。

今後は、集積エレクトロニクスへの展開を指標に研究課題を改めて精査し、新たなプロジェクト研究として研究終了後の成果も含めて発展させ、価値の最大化を図る取組がなされることを期待する。

1. 研究成果の発展状況や活用状況

研究終了後の研究の継続・発展状況や活用状況は①論文数、②研究の質の評価、③継続状況、④特許数、⑤研究成果から、継続して世界を先導する研究成果を発信していると高く評価できる。

- ①約5年間の研究終了後の発表論文数は827報を数え、これは研究期間中の実績1434報の約6割に上る。これらの内、被引用数Top10%以内の論文の割合は研究期間中が約13%であるのに対し、研究終了後も約9%を保持しており、いずれも高い水準にあると言える。研究終了後も発表論文の概ね1割程度がTop10%以内であることは、継続して新規で先駆的な知見を獲得し、世界に発信していることを示している。
- ②研究終了後の招待講演数が全体で326件あり、平均で年間60件以上に上ることは国際的に高い水準の研究成果を創出し続けていることの証である。特に数人の研究代表者は年間10～20件程度の招待講演を行っており、当該分野における高いビジビリティを示している。研究成果の報道発表も活発で、研究終了後に194件の報道があり、また研究代表者らの受賞が36件にも達し、内訳は研究課題が密接に関連する学会の受賞や産学連携に関わる内閣総理大臣賞などがある。これらの実績は継続して各研究者が成果をさらに発展させるための取組を続けた結果であり、前者は学術の発展への大きな貢献を表わし、後者は産業の発展に資することを表している。
- ③本研究領域の継続状況として、得られた研究成果がFIRST、ImPACT、SIP、ACCEL、A-STEP、NexTEP、NEDOなどの国家プロジェクトに引き継がれ、研究代表者がキープレイヤーとしてプロジェクト研究を牽引して研究が進展している。研究終了後に、研究代表者が獲得した大型の競争的研究資金は34件に上り、研究期間中の成果を発展させるための研究に努めていると評価できる。
- ④特許出願に関しては研究期間中に国内123件、海外50件であったのに対し、研究終了後には国内71件、海外68件と、海外への特許出願が増加している。
- ⑤新産業創出の観点から、エレクトロニクスデバイス技術の発展のためにはベンチャー起業による貢献が社会的・経済的波及効果の一つとして最も期待される。特に海外に比べて起業率の低い日本においては、CRESTの研究のような先端科学技術をベースにしたベンチャー企業が生まれることが重要である。本研究領域に関連して3つのベンチャー企業((株)創晶超光、パワースピン(株)、(株)デバイスラボ)が設立されており、研究終了後に得られた研究成果の複数が実用化され活用されている。

以上、本研究領域では研究終了後に産学官連携により果敢に応用開発研究にチャレンジし、日本の半導体産業の復活を目指して、継続的に研究を進展させている。日本の産業活性化に資すると思われる多くの特許出願に至っており、事業化を目標にしてベンチャー企業3社が立ち上げられ、基礎研究(マテリアル)→応用開発研究(デバイス)→事業化(システム・ソフトウェア)へと進む三つの階層性が構成されていると高く評価できる。

2. 研究成果から生み出された科学的・技術的および社会的・経済的な波及効果

(1) 研究成果の科学的・技術的観点からの貢献

本研究領域では、研究期間中に得られた成果をベースにして、研究終了後の継続研究によって高いレベルの成果が複数出ており、下記のように科学的・技術的観点から十分な貢献が

認められる。

○科学的な観点からの貢献

- ①鳥海らは次世代半導体の候補であるゲルマニウムの酸化機構がシリコンとは大きく異なることについて研究終了後も解明に取組み、体系化することに成功した。この基礎・基盤的知見はゲルマニウムを集積回路材料として発展させるのに大きな貢献を果たすものと期待でき、ゲルマニウム CMOS に向けた重要な知見となっている。一連の研究成果は 44 ページの長大な招待論文として掲載された。
- ②秋永らは酸化物を用いた相転移スイッチングの研究において金属と酸化物界面の電気的特性を酸素欠陥で制御できることを見出した。研究終了後、この知見を活かして ReRAM の動作原理を解明し、さらにこの現象を用いてアナログ抵抗変化素子を実現し、近年研究が世界的に活発化しているニューロモルフィックデバイスへの応用を目指した研究が進行中である。ReRAM に関して執筆された論文は被引用数 Top0.1%に入っており既に 500 近く引用されており、国際的にも高く評価されている。
- ③湯浅らの Ir ドープ強磁性金属(Fe)/機能性酸化物(MgO)複合による MTJ デバイスにおける電界による磁化反転機構の発見と解明は、低消費電力・不揮発性デバイスや、将来の人工知能(ニューロモルフィック計算)や車の自動運転に不可欠の磁場センサーなどへの応用も期待される。スピン電流を流さないために省エネルギー・高感度・高集積が可能となり、超省エネルギーの人口シナプスなど多くの量子情報技術への応用が期待されている。また、MRAM などへの応用を目指して産業界との共同研究も進んでいる。
- ④尾辻らは二重楯型ゲート構造をもつトランジスタによって半導体表面に生成した電子の粗密(プラズモン)と電磁波の相互作用の研究を進め、本研究領域ではグラフェンを対象材料とし、多くの先駆的知見を見出した。研究終了後の研究においては数テラヘルツの電磁波のレーザ発振を実現することに成功し、新しいテラヘルツ波発生源として学術的先駆性の高い成果を挙げた。実際、国際会議での招待講演数の多さは際立っている。
- ⑤前川らのスピントロニクスに関する理論研究は研究終了後にスピン流体に適用され、スピンをもつ流体の流れから電気エネルギーを得るスピン流発電という新しい原理の発電が提案された。また、スピン流に関する英文教科書、およびスピントロニクスに関する日本語の教科書を執筆し、同分野の啓蒙活動にも貢献している。

○技術的な観点からの貢献

- ①電子スピンを利用した論理演算は Beyond CMOS 技術の筆頭に挙がるものであるが、その電子物性を利用して論理回路を構成するには電圧(電界)で電子スピンを制御する技術の開発が重要である。湯浅らは研究期間中に開発した電界によるスピン制御技術を研究終了後にさらに発展させ、従来よりも 3 倍高効率の電圧によるスピン制御を実現した。電圧駆動型の磁気メモリーへの応用では書き込み時の電圧波形を制御してエラー率を大幅に

低減する技術も併せて開発した。これらの研究成果は低電力で動作する高集積論理演算の実現方法として発展することが期待される。

- ②遠藤らにより次世代のメモリーを目指して縦型ボディチャネル MOSFET の技術開発が行われたが、懸案であった Si 原子移動の問題を研究終了後に解明し、国内基板メーカーと共同でこの問題が起こらない基板の開発に成功し、製品化されている。この成果は FinFET でも問題となっていることから広い波及効果が期待される。また、上記 MOSFET の直上に磁気トンネル結合を形成し、128 Mbit の STT-MRAM を試作し、世界最高の書き込み速度を実証している。一連の成果が発表された複数の論文が被引用数 Top1%に入っており、国際的に高い水準にある。
- ③鳥海らはシリコンよりも移動度が大きくシリコン CMOS 半導体技術を代替する可能性のあるゲルマニウム CMOS 実現を目指し、世界最高水準の高品質ゲルマニウム界面実現のための理論解析と指導原理を提案し、応用物理学会業績賞を受賞した。歪みのない Ge により Ge MOSFET を作製し、世界最高レベルの移動度を実証し、Ge ショットキー界面の制御にも成功していることから将来の大きな発展に繋がることが期待され、多くの海外企業でも開発が始まっている。

以上より、これらの研究成果は複数の分野を融合する新しい研究分野を創成し、現実のデバイスを目指した応用開発研究にも重要な指針を与えるため、産業応用を目指す上での重要な基盤を与えている。

(2) 研究成果の社会的・経済的観点からの貢献

特許出願数やベンチャー企業の創設数などのデータから判断すると、将来の科学技術イノベーションを生み出すことを通して社会的・経済的観点からの貢献を期待できる。特に、本研究領域の研究成果を社会実装することを目的として設立された、(1) 株式会社創晶超光 (大阪大学)、(2) パワースピン株式会社 (東北大学)、(3) 株式会社デバイスラボ (筑波大学)、は研究成果の社会的・経済的な波及効果を高めることが期待される。このような期待と予想を裏付ける証左として下記に具体的な研究成果を示す。

- ①佐々木らにより半導体マスク検査装置用光源を目指して深紫外レーザ光源の開発が行われ、深紫外レーザ用の非線形光学結晶の高品質化が達成された。その結果、高出力化が可能な高品質な結晶の開発やレーザだけでなく、深紫外域における光学部品用の結晶の開発も開始されている。国内 2 社と特許ライセンス契約も締結しており、社会実装に向けて進捗している。尚、この非線形光学結晶大口径実用化は半導体・オブ・ザ・イヤー2016 半導体用電子材料部門グランプリを受賞している。
- ②田川らの EUV リソグラフィプロセス用レジスト研究の成果に基づき、研究終了後に光増感化学増幅レジストを用いて、解像性やラフネス特性を犠牲にせず高感度化が達成できる露光モジュールが開発された結果、メーカーとの共同研究開発を介して実用化され、7nm 世代の EUV 露光に活用されている。

- ③松井らのナノインプリント用のモールド作製技術をベースに、研究終了後に A-STEP プログラムの下でメーカーと共同でサブミクロン解像度を持つローラー型モールドが実現された。また、大面積のインプリントを目指してロール・トゥ・ロールプロセスの開発も進められている。
- ④大毛利らにより半導体デバイスの雑音評価のための計測技術が開発されたが、研究終了後にこの雑音計測技術をコアとするベンチャー企業が設立され、複数の半導体大手企業や国研と共同で雑音評価・解析を行っている。本件では、研究代表者は大学の職を辞してこの会社を起業し、代表取締役として開発にあたっていることは特筆に値する。
- ⑤尾辻らによりグラフェンを用いた THz デバイスの研究が行われ、その中で開発されたオペラント顕微 X 線分光技術が実用化され、企業が分光・解析サービスを提供できる準備が進められている。
- ⑥木下らによりコヒーレント EUV 光を用いた極微パターンの計測技術が開発されたが、研究終了後に同技術を用いてコヒーレントスキャトロメトリー顕微鏡が開発され、50 nm 以下の位相欠陥が観察可能となり、同技術はマスク検査装置として実用化されている。さらにマスク検査のみならずスタンドアロンの EUV 顕微鏡としても実用化を目指している。

以上、本研究領域では研究期間中に得られた成果をベースにして、非常に多くの実用化や社会実装に向けた研究開発と技術移転が進行しており、十分な社会的・経済的な観点からの波及効果が認められる。

(3) その他の特記すべき波及効果

機能性酸化物を用いた界面相転移スイッチングの研究、アトムスイッチの研究、MTJ デバイスの研究などは人工シナプスの創成に応用できる大きなポテンシャルを持っている。実際、研究終了後、秋永、長谷川らによりニューロモルフィックデバイスの研究プロジェクトへの展開が行われている。また、湯浅らはフランスの CNRS のグループと共同してニューロモルフィックコンピューティング・デバイスを創製し、パターン認識への AI 応用論文を Nature 誌に発表している。本研究領域の研究をベースとする更なる研究の新展開により、量子物質・新材料の開発、量子構造中のスピン制御、量子スピンドバイスの創成に関するブレークスルーを実現し、それらを基盤として、社会が必要とする情報通信処理技術、たとえば量子情報処理、量子通信・量子中継処理、量子メモリー・量子センサー、への研究開発に発展することが予測される。

3. その他

本研究領域は材料およびプロセス技術開発において物理的限界を迎えつつあるシリコン集積回路と相補的に、あるいは、その代替として今後の社会の発展を支える情報処理機能の創生と提供を強く意識し、将来のエレクトロニクスの発展に利活用できる多くの知見を創

出した。シリコンエレクトロニクスの真骨頂は大規模集積化であり、「Beyond CMOS」技術開発を支えるものには集積化による機能創出が可能であることが求められる。本研究領域で生み出された知見を将来的に価値のあるものに発展させるには、集積化エレクトロニクスの観点から課題設定した新しい取組が有効であると考えられる。このような視点から、基礎研究（マテリアル）→応用開発研究（デバイス）→事業化（システム・ソフトウェア）へと階層を越えて、真に我が国の半導体産業の復活と発展に寄与するためには、「さきがけ」研究領域で大きなブレークスルーを成した若手研究者を中心に CREST 研究領域を構成し、真に独創的な研究成果によって世界を先導する、さらなる研究力強化を検討することが必須であるとする。