

戦略的創造研究推進事業
チーム型研究(CREST)
研究領域事後評価用資料

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」

2015年3月

目次

1. 研究領域の概要	1
(1) 戦略目標	1
(2) 研究領域	5
(3) 研究総括	5
(4) 採択課題・研究費.....	6
2. 研究領域および研究総括の選定について(JST 記載)	9
3. 研究総括のねらい	10
4. 研究課題の選考について	11
(1) 選考方針	11
(2) 採択結果	12
5. 領域アドバイザーについて	13
6. 研究領域の運営について	15
(1) 総論	15
(2) 研究現場マインドの実態把握.....	15
(3) 研究成果の実用化シナリオの明確化.....	16
(4) 世界的プレゼンスの向上.....	16
(5) 企業参入の奨励.....	17
(6) 情報共有の促進.....	18
7. 研究を実施した結果と所見	18
(1) 各研究チームの結果・所見.....	18
(2) 論文、特許、国際招待講演数、受賞について.....	31
(3) 特筆すべき研究成果.....	32
(4) 産業への波及・実用化.....	33
(5) 今後の展開・期待.....	34
8. 総合所見	35

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

① 戦略目標名

「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」

② 該当する戦略重点科学技術との関係

本戦略目標は既存のシリコンデバイスの特性を超越する新概念・新構造に基づく次世代デバイスの創製を目指すものであり、「ナノ・材料」分野の戦略重点科学技術のうち、次の3つに密接に関係する。

- 1 イノベーションを生む中核となる革新的材料・プロセス技術
- 5 デバイスの性能の限界を突破する先端のエレクトロニクス
- 9 ナノ領域最先端計測・加工技術

③ 他の戦略重点科学技術等に比して優先して実施しなければならない理由、緊急性、専門家や産業界のニーズ

CMOS に代表される半導体集積回路(LSI)で使うシリコンは、電子情報社会の今日の発展に欠かせない材料であり、国民の生活を支える基盤材料とも言える。半導体製造技術は日々高度化され、CMOS の微細加工精度がナノ領域に及ぶなど、ナノテクノロジー技術と不可分な関係にある。ところが、このシリコン CMOS の生産ラインにおける微細化が極めて困難になる hp(ハーフピッチ)32nm が目前に迫っており、従来のシリコン CMOS とは異なる新概念・新原理に基づいたデバイスの開発が求められている。

我が国では、1980 年代以降、ポストシリコン材料の探索とデバイス開発のために積極的な研究投資がなされ、世界的に見ても優れた数多くの萌芽的研究成果を持つこととなった。JST 戦略的創造研究推進事業においても、ナノテクノロジー分野別バーチャルラボとして、平成 14 年度より「情報処理・通信における集積・機能限界の克服実現のためのナノデバイス・材料・システムの創製」の戦略目標の下、「非シリコン系半導体材料を用いた次世代デバイス用材料の開拓」、「新概念の論理回路・情報ストレージ等の構築のための強相関材料の開拓」、「分子エレクトロニクスに関連する材料の開拓」等のプロジェクトにおいて、優れた研究シーズを創出してきた。

一方、諸外国、特に米国は、NSF(National Science Foundation)が中心となって、複数の産学連携組織*)による「ハイリスク・ハイリターン」な研究開発を進めている。なぜ基礎サイエンスを担当する NSF がイニシアチブを取っているかと言えば、シリコン CMOS の延長では対応できない「次世代エレクトロニクス(Beyond CMOS)への壁」を突破できた国こそが、10~15 年後のエレクトロニクスの覇権を握ると認識しているからに他ならない。

シリコン CMOS での微細化に限界が見えた今こそ、我が国が持つこれらの優れた研究資

産を活用し、イノベーションとして生かす重要な時期であり、本戦略目標は喫緊に取り組むべき最重要課題である。

*)Nanoelectronics Research Initiative (NRI)、Western Institute of Nanoelectronics (WIN)、Nano Electronics Research Corp (NERC)、Institute for Nanoelectronics Discovery and Exploration (INDEX)、South West Academy for Nanoelectronics (SWAN) 等

④ この目標の下、将来実現しうる革新的な成果のイメージ(イノベーション創出の姿。具体例を含めて)、及びその背景、社会・経済上の要請

今後迎えるユビキタス・情報ネットワーク社会では、ネットワークの高速化、コンテンツの大容量化に伴って、高度に集積化されたCPUやメモリーデバイスの実現が必須となる。以下、本戦略によって将来実現しうる代表的な成果のイメージを列挙する。

- ・Ga-As, In-Sb などの化合物半導体、GaN, AlN, ダイヤモンド[※]などのワイドギャップ[※]半導体の開拓: 高い移動度・高い飽和速度を利用した超高速・低消費電力デバイスにより、次世代のモバイル機器の実現が可能
- ・強相関材料(含む超伝導材料)の開拓: 電子のスピン・軌道制御により、新原理に基づいた超高速の論理回路素子や高密度の不揮発性メモリへの展開が可能
- ・カーボンナノチューブや量子ドット等の新材料・新構造デバイスの開拓: ナノレベル・分子レベルでの加工性に基づいた単一電子デバイス、自己組織化を利用したナノ構造転写技術の確立が可能
- ・有機分子材料(高分子/低分子)の開拓: 軽量で衝撃に強く携帯性に優れるフレキシブルデバイスの創製が可能。例としては、折りたたみ可能な大面積ディスプレイ、ローラブル携帯コンピュータ、血圧や体温等を常時測定して健康管理ができるウェアラブルデバイス等が挙げられる。

このように本戦略は、数多くのイノベーションを創出する革新的なもので、社会・経済的要請にも十分応えるものである。

⑤ 戦略事業実施期間中に達成を目指す研究開発目標(イノベーションの源泉となる知識の創出。技術シーズ。証明を目指す技術概念等)

本戦略では、以下の技術領域における材料開拓とそれらのデバイス化に向けたプロセス開発により、次世代ナノエレクトロニクスデバイスの実現につながるイノベーションを創出することを目標とする。

- ・非シリコン系半導体(Ga-As, In-Sb などの化合物半導体、GaN, AlN、ダイヤモンド[※]などのワイドギャップ[※]半導体)による従来の CMOS を超える次世代デバイス用材料の開拓とプロセス開発
- ・光・電気・磁気機能の多元的な融合・変換を利用して新規なデバイスの構築を可能にする材料の開拓とプロセス開発
- ・ナノレベル・分子レベルでの加工により新規なデバイスの構築を可能にする材料の開

拓とプロセス開発

- ・薄く、軽量で、湾曲性・屈曲性ならびに耐衝撃性を有する携帯デバイス用の材料開拓とプロセス開発

⑥ 戦略事業実期間中に達成を目指す研究開発目標の科学的裏付け（関連研究の進捗状況、今後の当該分野の発展の可能性、優れた研究提案が数多くなされる見込み）

JST の戦略的創造研究推進事業として進められているナノテクノロジー分野別バーチャルラボは、当該戦略目標において、萌芽的成果を数多く挙げてきた。これらの成果をもとに、先端ナノサイエンスを駆使して、シリコン CMOS を超越する次世代デバイスの創製に直結する材料開発が期待できるとともに、多くの優れた研究提案が見込める。以下、各研究開発目標に関連した研究の進捗状況をまとめる。

(i) 非シリコン系半導体(シリコンよりも高い性能が期待できる Ga-As, In-Sb などの化合物半導体、GaN, AlN、ダイヤモンドなどのワイドギャップ半導体)による従来の CMOS を超える次世代デバイス用材料の開拓とプロセス開発

- ・シリコンよりも数倍高い電子の移動度または高い到達速度を利用 → ナノサイズのデバイス中では、格子等に散乱されることなく電子が走行可能となり、1THz を超える高周波数で動作可能なデバイスの設計が可能となった。

(ii) 光・電気・磁気機能の多元的な融合・変換を利用して新規なデバイスの構築を可能にする材料の開拓とプロセス開発

- ・局在電子や伝導電子が互いに影響を及ぼす強相関材料 → 磁氣的、電氣的、光学的な特性を制御した新機能デバイスの構築を可能にする。例として、磁気ナノドットを MOS トランジスタと融合させた超高速、低電力動作が可能な不揮発メモリの試作が行われている。
- ・フォトリソ機能材料による光制御 → 電子で行っていたスイッチングなどの機能を、光で行う超高速光情報処理デバイスを構築する見通しが立ちつつある。

(iii) ナノレベル・分子レベルでの加工により新規なデバイスの構築を可能にする材料の開拓とプロセス開発

- ・カーボンナノチューブ・グラフェンに代表されるナノカーボン材料 → 単一分子素子の形成が可能で、新規な量子情報素子やスイッチングデバイス用材料として期待できる。
- ・量子細線・量子ドット → 量子サイズ効果を利用した超高速・超省電力のレーザーデバイス等が期待できる。

(iv) 薄く、軽量で、湾曲性・屈曲性ならびに耐衝撃性を有する携帯デバイス用の材料開拓とプロセス開発

- ・ペンタセンに代表される有機半導体材料 → 軽量、大面積、フレキシブル、印刷が可能などの特性を利用した、電子ペーパー、フレキシブルディスプレイの応用が期待されるとともに、有機レーザーダイオードとしての応用も検討されている。

⑦ この目標の下での研究実施にあたり、特に研究開発目標を達成するために解決が必要となる研究上の課題、留意点、既存の施策・事業等との重複

本戦略目標として取り上げた達成目標は、ナノサイエンスに基づいた基礎からの材料研究を中心としたテーマである。しかし、大学における基礎研究のみでは、容易にイノベーションにはつながらない。それには明確な「ものづくり」の目標を設定した研究拠点を中心としたコンソーシアムや産学連携による目的指向型の研究が必要である。さらに研究総括の強力なイニシアチブのもと、互いのグループ間の連携を密にして、ときには共通インフラも使いながら融合効果を出すことが必要となる。基礎(大学)、応用(企業)の明確な役割分担、理論と実験の協力、産学官の連携を通じた人材の交流等、研究投資を有効に成果につなげるための具体的なシステムが喫緊に必要である。

既存の施策として、平成 19 年度に終了する JST の戦略的創造研究推進事業として進められて来たナノテクノロジー分野別バーチャルラボのエレクトロニクス関連領域がある。これらの領域は当該戦略目標の萌芽的研究にあたる成果を数多く挙げてきた。これらの成果をイノベーションに結びつけるためにも、本研究戦略がこれらの研究領域を引継ぎ発展する必要がある。シーズとなるこれらの材料のデバイス化やそれらの集積化が可能な研究拠点や共同研究施設の整備が、日本では十分に整っていない。本戦略目標を、次期ナノテクノロジー総合支援プロジェクトとも有効に結び付け、推進していくことが必要である。

半導体産業を継続的に発展させるために半導体技術の開発方向や開発技術に関する議論が米国主導で日本と欧州が参画して行われてきた。その結果、開発すべき技術をテーマごとに分け、それぞれいつまでにどの程度の開発フェーズ(完成度)となっていることとするかが合意された。それを纏めたテーブルが国際半導体技術ロードマップ(International Technology Roadmap of Semiconductor : ITRS)と命名され、世界に配布された。それ以降、毎年必要に応じて修正・追加を行う活動が定着している。この議論の中で、開発テーマを分類し以下の3つの戦略が立てられた。① Moore の法則と呼ばれている「一定期間で一定の微細化率を達成する」という開発戦略を「More Moore」と呼ぶ。② 従来のシリコン高集積化回路(LSI)では実現できない新しい機能を開拓する戦略を「More than Moore」と呼ぶ。さらに③ 従来の情報処理演算の基本素子となっているシリコン CMOS を超える演算手法を開拓する戦略を「Beyond CMOS」と呼ぶ習慣が定着した。本研究領域の取り組む対象として、「More Moore」戦略はすでに企業や関連省庁で精力的に取り組まれていることから除外し、取り組む対象として「More Than Moore」戦略、および「Beyond CMOS」戦略に焦点を当て、それを実現するための新材料の開拓と新プロセスの開発を目標とした。具体的には、以下のテーマを戦略事業実施期間中に達成することを目標にした。

① 非シリコン系半導体による従来の CMOS を超える次世代デバイス用材料およびそのプロセス開発

② 光・電気・磁気機能の多元的な融合・変換を利用して新規なデバイスの構築を可能にする材料およびそのプロセス開発、

- ③ナノレベル・分子レベルでの加工により新規なデバイスの構築を可能にする材料
およびそのプロセス開発、
- ④薄く、軽量で、湾曲性・屈曲性ならびに耐衝撃性を有する携帯デバイス用の材料
およびそのプロセス開発

(2) 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」(平成 19 年度発足)

この研究領域は、半導体ロードマップ戦略に基づく技術進化の飽和を超越することを目的として、微細化追及パラダイム(「More Moore」戦略)のみでは実現できない機能・性能を持つ、革新的かつ実用化可能なエレクトロニクスデバイスを創製するための材料・構造の開発及びプロセス開発を行う研究を対象とする。新材料や新プロセスにより実現させるデバイスは、新しい原理により消費電力の増大、製造コストの巨額化といった実用上の問題を解決するための「高集積情報処理デバイス」、および有機物を含め異種材料や技術の融合により新機能・高性能を実現する「新機能付加デバイス」(More than Moore 戦略)、あるいは新しい情報処理演算原理に基づく「新動作原理デバイス」(Beyond CMOS 戦略)である。さらに、これらの新デバイスがもたらす「新しいアプリケーション」を開拓する研究も含まれる。これらのデバイスを志向する新材料・新プロセスの開発において、現象の物理的な理解を徹底に進めると同時に、得られた成果(新技術や新知見)が実用化に資することが十分見込まれることを重視する。

(3) 研究総括

渡辺 久恒

(株)半導体先端テクノロジーズ 代表取締役社長 (～平成 23 年 6 月)

(株)EUVL 基盤開発センター 代表取締役社長(平成 23 年 1 月～平成 26 年 3 月)

(株)EUVL 基盤開発センター 相談役(平成 26 年 4 月～)

(4) 採択課題・研究費

(千円)

採択年度	研究代表者	所属・役職(研究終了時)	研究課題	研究費
平成 19 年度	秋永広幸	産総研 センター長	機能性酸化物を用いた界面相転移スイッチングデバイスの開発	405,500
	尾辻泰一	東北大 教授	グラフェン・オン・シリコン材料・デバイス技術の開発	505,595
	佐々木孝友	大阪大 特任教授	真空紫外レーザー光発生用非線形光学結晶の開発	284,414
	菅原 聡	東工大 准教授	ハーフメタル強磁性体を用いたスピン機能MOSFETの開発	296,998
	田川精一	大阪大 特任教授	極微細加工用レジスト研究とプロセスシミュレータの開発	433,082
	二瓶瑞久	産総研 特定研究専門員	LSI用3次元カーボン・アクティブ配線の開発 ¹	201,500
平成 20 年度	遠藤哲郎	東北大 教授	縦型ボディーチャンネルMOSFETとその集積プロセスの開発	443,088
	木下博雄	兵庫県立大 教授	コヒーレントEUV光を用いた極微パターン構造計測技術の開発	304,739
	鳥海 明	東京大 教授	Ge High-kCMOSに向けた固相界面の理解と制御技術の開発	301,477
	前川禎通	原研機構 センター長	数値シミュレーションによる新材料・新機能の開発	196,800
	松井真二	兵庫県立大 教授	超高速ナノインプリントリソグラフィ技術のプロセス科学と制御技術の開発	372,194
平成 21 年度	大毛利健治	筑波大 准教授	ナノデバイスのピコ秒物理の解析による揺らぎ最小化設計指針の開発	279,500
	岡田 晋	筑波大 准教授	計算科学によるグラファイト系材料の基礎物性解明とそのデバイス応用における設計指針の開発	169,500
	神谷庄司	名工大 教授	高密度多層配線・三次元積層構造における局所的機械強度の計測手法の開発	252,700
	木村 崇	九州大 教授	電荷レス・スピン流の三次元注入を用いた超高速スピンデバイスの開発	225,140
	長谷川剛	NIMS 主任研究員	3端子型原子移動不揮発性デバイス「アトムトランジスター」の開発	298,040
	森 伸也	大阪大 准教授	原子論から始まる統合シミュレータの開発	220,894
	湯浅新治	産総研 センター長	革新的プロセスによる金属/機能性酸化物複合デバイスの開発	343,350
			総研究費	5,534,511

¹ 当初5.5年の研究期間を予定した本研究課題は、最先端研究開発支援プログラム (FIRST) の「グリーンナノエレクトロニクスのコア技術開発」(中心研究者: 横山直樹) の中で発展させるため、研究開始から2.5年で終了した。

①研究課題・研究費の査定

採択課題の研究費については、研究提案の書類評価、面接評価の結果に応じ妥当と思われる予算に修正し当初予算とした。大きく減額修正した研究課題については、期待するコア成果は何かを明確化しこれを確実に実現できるかを相談し、結果として期待から大きく外れないように決定した。平成 19 年度の採択では、新材料の開拓に不可欠な装置購入を含むテーマが高額となった。平成 20 年度の研究課題については、高く評価される提案が多く競争が激しかったが、採択したものについてはできるだけ提案に沿い大きな減額は行わなかった。平成 21 年度の研究課題については、大胆な挑戦的なテーマの提案が多かったが、提案規模が大きすぎると判断し大きく減額して採択したものもあった。すべての期間で、理論研究者のみで構成される理論チームについては、実験チームの半額レベルを上限として研究予算を付与した。

②追加研究費の活用

(i) 総括裁量経費

総括裁量経費の活用方針としては、採択後の研究進捗状況に応じて、①研究加速の結果、1～2年で効果が期待できるもの、②従来の計画内容の範囲ではないが、技術完成度のさらなる向上のため、追加すべきものと判断したもの、③実用化検証のため、しっかりとデータを整備しておくべきもの、を優先して配賦している。①の具体例としては、鳥海チームに、試作構造における材料物性データをあらかじめ把握しておくための測定器を導入した。②の具体例としては、森チームに、先端 T-CAD (HyENEXSS) との融合を目指し、伊藤公平グループを追加した。③の具体例としては、田川チームにシミュレーションプログラム製作費を追加し、得られた科学的な知見を企業が活用しやすい形に仕上げるように促した。その結果、本研究領域参加者の古澤教授らが NEDO プロジェクトに採択され、先端レジスト材料の開発加速に貢献できる体制とすることができた。

また、課題成果の最大化および ACCEL や企業等との共同研究など次フェーズへの橋渡しが見込める研究課題(佐々木チーム、尾辻チーム)については総括裁量経費を増額して支援し、1年間の延長を行った。

(ii) 男女共同参画支援策

JST 男女共同参画支援制度を利用することにより、秋永チーム(平成 22～23 年度)、佐々木チーム(平成 20～21 年度)、長谷川チーム(平成 25～26 年度)では、実験補助者の雇用などを通し当初計画に近い形で研究開発を推進でき、女性研究者も予定通り復帰できた。

(iii) 国際強化支援策

本制度を利用して国際シンポジウム・ワークショップを計 7 件実施した。それぞれに

ついて、開催趣旨などを申請段階で確認し、新規現象の学術的面白さは当然のこととして、それだけに留まらず、実デバイス化に向けての課題を国際的な現状と照らし合わせて深く議論できるようにチームに検討を促し、本研究領域の狙いに沿って開催していただいた。

表 1 国際強化支援策によるシンポジウム・ワークショップ

開催日	シンポジウム名称	開催場所	研究チーム
2008年11月 17日～19日	ISDG2008(グラフェンデバイス国際シンポジウム・第1回)	会津大学(福島)	尾辻チーム
2010年10月 27日～29日	ISDG2010(グラフェンデバイス国際シンポジウム・第2回)	東北大学電気通信研究所(宮城)	尾辻チーム
2010年11月 17日～18日	EUVレジスト国際シンポジウム	大阪大学中之島センター(大阪)	田川チーム
2011年11月 10日～11日	JST/CREST 国際ワークショップ「機能性酸化ナノエレクトロニクスへのフロンティア～3端子スイッチ素子への応用～」	物質・材料研究機構/千現地区 第一会議室(茨城)	秋永チーム、長谷川チーム、湯浅チーム合同
2012年11月 5日～9日	ISGD 2012(グラフェンデバイス国際シンポジウム・第3回)	放射光施設SOLEIL(フランス)	尾辻チーム
2013年2月 13日～14日	EUVレジスト国際シンポジウム	大阪大学中之島センター(大阪)	田川チーム
2014年9月9日～11日	JST-CREST ワークショップ「ナノトランジスタにおけるキャリア輸送:理論と実験」「コンパクトモデル:デバイス特性のより良い洞察を可能に」(SISPAD 2014)	パシフィコ横浜(神奈川県)	森チーム

(iv) 社会還元策

2009年9月に研究成果の社会還元を促進するテーマ選定の要請を受け、研究進捗を鑑みて、木下チームのEUV極微パターン構造計測技術の開発用マスクに関する申請を最も高く評価し、追加予算を認めた。その結果、企業の協力により微細なプログラム欠陥マスクを製作・入手でき、検査アルゴリズムの開発が加速し、実用化に向けた成果が得られた。この結果、平成23年度のNEDOプロジェクト採択に至った。また、田川チームの微細加工用レジストのシミュレータ開発では、レジスト材料の放射線化学反応のモデル化を進め、二次元シミュレーションによる重要な知見が得られた。そこで、三次元化、高速化、GUIの追加などプロセスシミュレータの汎用化のための追加予算を確保し、企業のレジスト設計ツールとして活用され易い成果とした。

(v) JST-RA 制度

平成 21 年度を迎えるに当たり、JST 本部からの趣旨説明を理解し、博士後期課程の学生について、各研究チームより申請を募り、4 チームで計 7 名の適用を得た。各研究チームで積極的に本研究領域における研究に参画し、発表を行うなど、若手育成が有効に行われた。

(vi) 東日本大震災の被災からの復旧復興支援

情報収集を行ったのち、2011 年 5 月に東北大学サイトビジット(遠藤研究室(遠藤チーム)、尾辻研究室・末光研究室(尾辻チーム)、中川研究室(松井チーム))を実施した。事前に書面で知らされていた本震・余震の被害情報に留まらず、研究進捗に支障を来たす故障設備の現場の被害状況がよく理解でき、研究チーム内の予算組み換えや増額支援などの対策の準備が円滑に行えた。これをうけて、学生・若手研究者一丸となって、復帰期間を半年以下に圧縮でき、当初の研究スケジュールに近づけられた。

2. 研究領域および研究総括の選定について (JST 記載)

(1) 研究領域の選定について

以下の検討結果に基づいて本研究領域が選定された。

本研究領域は、ポストスケール時代求められる「次世代エレクトロニクスデバイス」の基盤技術を提供する目的に対し、半導体ロードマップ戦略に基づく技術進化の飽和を超越することを目的として、近い将来にエレクトロニクス分野が直面する諸問題解決に材料開拓やプロセス開発から取り組む研究や、従来とは異なる原理や構造に基づいた新規デバイスの創成、それらに関わる様々な現象の解明を目指す研究を対象とする。

本研究領域においては、優れた機能・性能をもつナノ材料、ナノスケール科学に基づいた加工技術、およびその要素技術における研究代表者の新デバイス構想の実現に向け、代表者を中心とする産学連携を目指した機関横断的あるいは分野横断的チームにより研究を行う。それらにより本研究領域は、実用化技術に到るまでの方向性を明確にすると同時に、従来の微細化パラダイムのみでは実現されない革新的なデバイス技術の創出が期待でき、戦略目標の達成に向けて適切に設定されている。

以上のように、既存デバイスのみでは解決できない課題の解決策を見出す研究や、実用化技術を直接ターゲットとする研究を横断的にチーム型研究によって推進することで、広範な科学・技術分野を偏り無く対象とし、戦略目標の達成に向けてブレークスルーを生み出す優れた研究提案が多数見込まれる。

(2) 研究総括の選定について

以下の検討結果に基づいて研究総括が選定された。

渡辺久恒は、企業において集積回路、マイクロ波・光デバイス、プロセス、量子効果物性、特に半導体材料（Si、III-V 族、II-VI）に深く携わり、基礎理論から製品開発、特許戦略に到るまで半導体エレクトロニクス産業の発展に貢献しており、本研究領域について先見性・洞察力を有していると思われる。選定時、株式会社半導体先端テクノロジーズ代表取締役社長、MIRAI プロジェクトリーダー、及びつくば半導体コンソーシアム（TSC）プロジェクトリーダーを務め、情報通信分野における企業を中心とした最先端の研究・開発において卓越した指導力を発揮していたことから、次世代エレクトロニクスに向けて基礎のみに終わらないブレークスルーを目指す本研究領域について、適切なマネジメントを行う経験・能力を有していると思われる。

また、科学技術庁注目発明、STS Award 等数々の受賞歴があり、応用物理学会世界物理年委員会委員、独立行政法人物質・材料研究機構監事、スーパーCOE 評価委員、IEEE EDS Tokyo Chapter Chair、IUPAP C8 Chair、ISSCC FE Chair 等数々の学会委員・公的委員を歴任している。これらを総合すると、関連分野の産学の研究者から信頼され、公平な評価を行うと見られる。

3. 研究総括のねらい

本研究領域で推進する研究課題の位置づけや技術的分類は 1. で述べたとおりであるが、さらに、研究総括のねらいとして、得られるであろう成果がもつ科学的な位置づけ、具体的には、その科学的理解の深さや成果表現の普遍性の有無あるいは世界的な産業活動構造への波及形態などを考察し、各チームの成果がもたらすインパクトの性質と大きさを明確化することを目的に、採択テーマを以下の 3 分類に当て嵌めた。①Discovery Science (DS) 型、②Disruptive Technology (DT) 型、③Fusion Device (FD) 型。これらに分類されるテーマを研究する姿勢は以下のようなものである。Discovery Science 型とは、解決しようとする課題を基礎に戻って徹底的に理解し普遍的モデルや物理数式の発見を狙う研究姿勢である。Disruptive Technology 型とは、開発している技術の当面の性能が必ずしも現状ニーズから見て十分ではないが、実用化した後で更なる高性能化を進めるなかで、いずれ従来技術に取って代わることを狙う研究姿勢である。Fusion Device 型とは、現在のシリコン LSI に新材料や新構造を融合し飛躍的高性能化や新機能開拓を狙う研究姿勢である。採択した 18 テーマは全てこの 3 つの分類に当て嵌めたが、研究推進主体である研究代表者の狙いや開発姿勢と異なることも想定し、推進期間中に随時議論し研究総括の考え方との整合に向けて調整した。

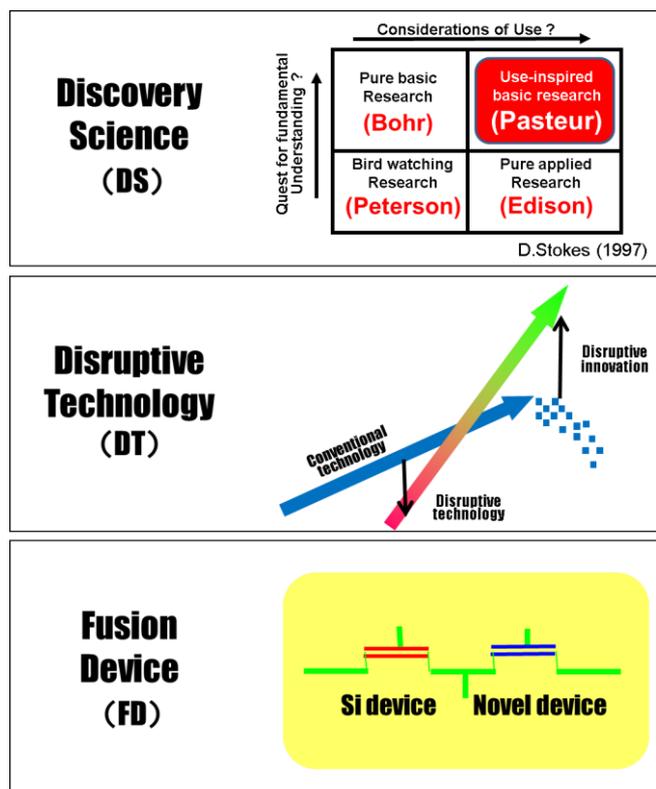


図 1 成果タイプの分類

4. 研究課題の選考について

(1) 選考方針

研究課題の採択にあたっては、下記の方針で選考を行った。

- 1) 戦略目標・研究総括のねらいに整合していること
- 2) チーム編成(予算ばらまきではなく統合して目標を達成する)
- 3) 実験グループと理論グループ(理論グループには実験グループとの連携)
- 4) インパクトの大きさが想定できる(研究総括の一本釣り)
- 5) 新ジャンル(新しい科学・技術体系の創出)
- 6) 同時発足経産省プロジェクトとのテーマ棲み分け

研究領域が発足した平成 19 年度の初回の公募に当たっては、本研究領域と同時にスタートした経済産業省「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発—うち新材料・新構造ナノ電子デバイス」プロジェクトとの連携を意図しつつ、本研究領域とプロジェクトの合同公募説明会を開催し、公募・採択に研究課題の選考については、採択対象課題として、半導体分野における新材料の開拓、新プロセス開発、デバイス創成技術とした。

また、2 年度目以降に採択するテーマに関しては、それまでに採択された課題と同じ材料、プロセスを扱う提案であったとしても、新規なアプローチや独創的なアイデアに基づく意

欲的・挑戦的な提案は募集の対象として歓迎した。さらに、これらの研究の遂行に関して産学連携を通して積極的に実用化に挑戦しようとする提案姿勢を重視した。

(2) 採択結果

研究課題の公募を行った結果、平成 19 年度採択は 6 件であり、前記で説明した 3 つの成果タイプ DS 型、DT 型、FD 型がそれぞれ 2 件となりバランスよいテーマ配分となった。平成 20 年度採択テーマは、DS 型 3 件、と DT 型 2 件、計 5 件であった。平成 21 年度採択テーマは、DS 型 3 件、DT 型 3 件および FD 型 1 件となった。本研究領域 3 年間で 18 件の研究課題を採択したが全体では DS 型が 8 件、DT 型が 7 件、FD 型が 3 件の構成となった。

本研究領域では募集・選考方針の中で、実用技術へ発展することが十分見込まれる研究を対象とするとしているため、採択時には出口シナリオが明確化されることを求めて、すべての研究課題に対して「～の開発」という研究課題名に統一させてもらった。理論的解析やシミュレーション技術の研究であっても「・・・に関する設計指針の開発」とした。

採択したテーマ内容を技術カテゴリーで分類すると以下のようになり、「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」領域として原理、材料、プロセス、計測、シミュレーションをカバーしたバランスのよい構成となった。

新動作原理：5 件(強相関電子、スピン 2 件、イオン移動トランジスタ、縦型 MOS)

新材料：4 件(グラフェン 2 件、Ge 界面、電界スピン制御)

新プロセス科学：3 件(レジスト、ナノインプリント、非線型光学結晶)

新計測原理：3 件(EUV 散乱計測、トランジスタノイズ、多層配線局所強度)

物性予測シミュレーション：3 件(スピン機能、ナノカーボン物性、統合シミュレータ)

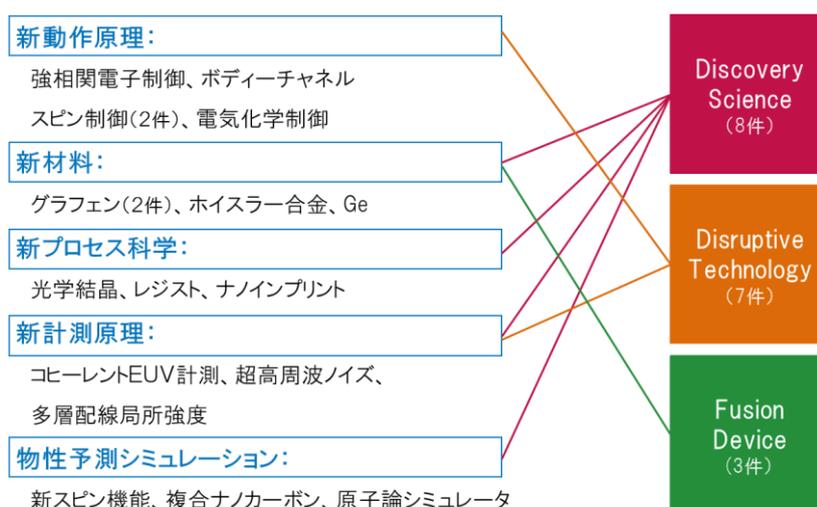


図 2 採択課題のポートフォリオ

表 2 採択課題のカテゴリー分類

採択年度	研究チーム	成果タイプ	技術カテゴリー
平成 19年度	秋永チーム	DT型	新動作原理
	尾辻チーム	FD型	新材料
	佐々木チーム	DS型	新プロセス科学
	菅原チーム	FD型	新動作原理
	田川チーム	DS型	新プロセス科学
	二瓶チーム	FD型	新材料
平成 20年度	遠藤チーム	DT型	新動作原理
	木下チーム	DT型	新計測原理
	鳥海チーム	DS型	新材料
	前川チーム	DS型	物性予測シミュレーション
	松井チーム	DS型	新プロセス科学
平成 21年度	大毛利チーム	DS型	新計測原理
	岡田チーム	DS型	物性予測シミュレーション
	神谷チーム	DT型	新計測原理
	木村チーム	DT型	新動作原理
	長谷川チーム	DT型	新動作原理
	森チーム	DS型	物性予測シミュレーション
	湯浅チーム	DT型	新材料

5. 領域アドバイザーについて

領域アドバイザーの選出にあたっては、専門分野、研究業績から、深い学術的見識を有する学識経験者、および、現在の市場と将来に向けて産業界が求める目的基礎研究のニーズを知る企業の有識者に依頼した。また、所属機関の多様性の観点については、国立大学に偏らないように、私立大学、企業、独立行政法人の有識者にも協力を仰ぎ、また、性別、年齢なども配慮した陣容として、幅広く多様な視点からのコメント、助言が得られる体制とすることができた。

領域発足後の大きな変更として、榊裕之が平成20年度をもって退任された。平成22年度から研究課題の中間評価を開始するにあたり、高木信一に領域アドバイザーに就任いただいた。平成24年度には前口賢二が退任され、後任として福間雅夫を領域アドバイザーとして迎えた。

また、光学結晶や極端紫外線についてはそれぞれの専門家を外部評価委員として島村清史および岡崎信次を招聘した。

表 3 領域アドバイザー

氏名	領域終了時の所属・役職	任期
石原 宏	東京工業大学 名誉教授	平成 19 年 4 月～ 平成 27 年 3 月
大泊 巖	早稲田大学 名誉教授	平成 19 年 4 月～ 平成 27 年 3 月
大野 英男	東北大学 教授	平成 19 年 4 月～ 平成 27 年 3 月
榊 裕之	豊田工業大学 学長 ※	平成 19 年 4 月～ 平成 21 年 3 月
財満 鎮明	名古屋大学 教授	平成 19 年 4 月～ 平成 27 年 3 月
高木 信一	東京大学 教授	平成 22 年 6 月～ 平成 27 年 3 月
福間 雅夫	一般社団法人 半導体産業研究所 代表理事所長	平成 24 年 10 月 ～平成 27 年 3 月
前口 賢二	(株)東芝マイクロエレクトロニクス 顧問※	平成 19 年 4 月～ 平成 24 年 10 月
百瀬 寿代	(株)東芝 デバイスプロセス開発センター 主務	平成 19 年 4 月～ 平成 27 年 3 月
和田 敏美	技術研究組合次世代パワーエレクトロニクス研究開発 機構(FUPET) 専務理事	平成 19 年 4 月～ 平成 27 年 3 月

(※退任時の所属)

表 4 外部評価委員

氏名	領域終了時の所属・役職	任期
島村 清史	(独)物質・材料研究機構 光材料センター 光周波数変 換グループ グループリーダー※	平成 19 年 4 月～ 平成 25 年 3 月
岡崎 信次	ギガフォトン株式会社 開発部 部長付 ※	平成 19 年 4 月～ 平成 26 年 3 月

(※退任時の所属)

6. 研究領域の運営について

(1) 総論

領域運営として以下の事項を行った。

戦略目標決定、運営方針策定、募集方針決定、領域アドバイザー決定、書類選考、採択面接・決定、チーム研究計画策定、5か年予算の決定、領域ニュース発行、サイトビジット、個別チームヒアリング、進捗レポート作成、追加予算獲得配布、論文・特許促進、年度別チーム事後評価、全体中間評価、年度別成果報告ワークショップ、出口シナリオ明確化、最終全体事後評価。

これらの運営事項に関し、以下の点に留意して行った。

- 1) 研究現場マインドの実態把握
- 2) 研究成果の実用化シナリオの明確化
- 3) 世界的プレゼンスの向上
- 4) 企業参入の奨励
- 5) 情報共有の促進(領域 News の発行)

(2) 研究現場マインドの実態把握

研究進捗の管理に当たっては、成果の理解以上に研究現場マインドの実態把握が重要と考え、現場を見る・知ることを心掛けた。具体的には、それぞれの年度の研究課題がスタートして半年後に、研究チームの現場を訪問(サイトビジット)した。そこでは、購入装置など研究室の準備状況を視察し、研究チームに所属する若手研究者も交えた活動報告、質疑応答を通して研究現場のマインドを把握し、研究チーム毎の研究代表者のガバナンス、研究構想の浸透度を確認することに努めた。また、サイトビジットの際には領域アドバイザーにも同行していただき、なまの進捗を把握していただき、その場で適切なご助言をいただいた。

研究開始1年半後のタイミングで、領域アドバイザーの参加のもとに研究進捗報告会を実施した。研究の進展状況と当初の研究構想との整合性を確認しながら、新たに発生した課題などを積極的に把握することに努めた。研究進捗報告会の開催に当たっては、研究代表者による概要発表の後、研究チームを構成する研究グループ毎に発表していただき、さらに、若手研究者による進捗発表を奨励した。これを通して、研究総括の期待を直接的に若手研究者にも伝えた。また、研究チーム毎にどの程度まで研究代表者のガバナンスが機能しているかを確認した。研究進捗報告会の開催後に領域アドバイザーから書面によるコメントをいただき、これを基に研究総括の見解を加味し、各研究チームにフィードバックを行い、本研究領域での狙いや出口シナリオの周知徹底に努めた。

さらにその1年後にあたる研究開始2年半後には、研究総括と研究代表者、共同研究グループリーダーとの個別面談を実施し、中間評価に向けた当初の研究目標の確認と終了シ

ナリオを想定して、進捗状況、成果物、残る課題について議論し、双方の目標に関する意識・見解を統一する努力を行った。研究総括面談はサイトビジットを含め、計 80 回ほどに及んだ。

(3) 研究成果の実用化シナリオの明確化

研究成果の実用化シナリオを判りやすくするために、研究課題のタイトルをすべて「～の開発」という表現に統一した。理論・シミュレーションをテーマとするチームには、具体的なデバイスの設計に役立つ「～シミュレータの開発」、あるいは設計の指針となるべく「～設計指針の開発」とした。新規デバイスの開拓を狙うチームには、目標デバイスの実現に資する材料・プロセス研究を含め「～デバイスの開発」と呼称した。

理論・シミュレーションの研究チームについて、理論計算やシミュレーションの結果、新たな原理のデバイスの可能性を考えついたら、それを基に具体的なデバイス構造として提案できるレベルまで進めることを求めた。例えば、前川チーム(理論)には、数値計算によるスピン物性の予測にとどまらず、スピンと場の相互作用を利用した新デバイス原理の提案を求めた。また、開発したシミュレーションプログラムが一般に使用可能な形で提供できるレベルまで完成度を上げるように促した。岡田チーム(シミュレーション)には、グラフェンをチャンネル材料として用いる場合の現実的構造(エッジ形状、非平面性、欠陥、ゲート絶縁膜界面、コンタクト抵抗、等)における物性を系統的かつ網羅的に計算し、デバイス設計者の指針となるよう求めた。さらに、現実条件(サイズ、統合集積構造、放熱問題、など)における課題を明確化し、次のステップとして実験的検証に進むことを求めた。

実用化に向けて知的財産権、特許を確保しておくことは極めて重要であり、最近の著名な科学者達の特許化マインドは非常に高く、科学研究の成果＝非特許化とするという風潮は弱まっていることを訴えた。産業競争力の源泉となるべくコア成果の知的財産化を求め、実用化シナリオを描く際にコア成果の特許化整備状況も説明できるように求めた。特に事業的インパクトが高いと思われるアイデアに関しては、特許明細書の内容チェックに踏み込み、請求項の不備を指摘し、修正を進めた。

(4) 世界的プレゼンスの向上

世界的プレゼンスの向上に向けて、研究成果の世界に向けた自発的なアピール活動を奨励した。

科学研究のフロンティアとして注目されるべくその科学的先行性を世界に発信することを奨励した。原著論文の報告数では、研究課題の性質と配分研究費に応じたガイドラインを設けた。また各チームの世界的なプレゼンスの向上を図るべく、国際シンポジウムの主催を奨励した。具体的には、グラフェンデバイスを研究している尾辻チームでは、グラフェン FET のデバイスの特性が出始めたタイミングで、後にノーベル賞受賞者となったノボセロフ博士を含む世界の有力研究者を招致し、本格的なグラフェン国際シンポジウムを開

催した。また、機能性酸化物デバイスを研究している秋永・長谷川・湯浅の各 3 チームは合同主催による世界初の酸化物 3 端子デバイスに関する国際シンポジウムを開催し、このグループの狙いのユニークさを世界に披露した。また、レジストシミュレーションの開発を手がける田川チームは、EUVL レジストに特化した世界初の国際シンポジウムを開催し、その科学的先進性を世界に示した。森チームでは、既存の国際学会 (SISPAD) と共催して国際ワークショップを開催した。

このように、ユニークな本研究領域の研究チームの成果を積極的に公開することで、各チームのプレゼンス向上のみならず、本研究領域における独特な運営を披露し、日本における科学技術の幅広い取り組みを宣伝した。これらの施策により、世界から有力な情報が集まり、研究の質や完成度の向上に資することができた。

(5) 企業参入の奨励

実用化の早期化対策として、研究期間中における企業の参入を奨励した。

平成 19 年度採択チームでは、佐々木チームが共同グループに成果活用を狙う企業に採択当初から参画してもらい、その実用化チェーンを活用して、長寿命化技術、高信頼技術の迅速な社会還元成功している。田川チームでは、国内レジスト企業及びレジストユーザである海外企業との情報交換や検証連携を進めた。平成 20 年度採択チームでは、木下チームが成果の実用性向上のために、EUV リソグラフィのインフラ技術を開発している民間コンソーシアムと連携し実用化検証を進めた。遠藤チームでは、縦型 MOS デバイスの実践的成果に注目した国内企業が当初から参画しただけでなく、新たに実用化希望を表明した企業が現れ、実用化への期待を高めた。この動きはさらに大規模化され、JST の大型研究プログラム ACCEL を利用した実用化を目指した研究開発につながった。前川チームでは、テーマはスピンに関する純粋な理論的基礎研究という性格が強いにもかかわらず、前川チームの発案に基づく応用法に興味を持った国内外の複数の実験研究者が積極的に現象発現の確認実験に取り組んで成功し、応用に向けた議論を活発化した。松井チームでは日本独自のナノインプリント法(広島メソッド)、及び、ナノインプリント材料設計(離型剤フリー)に注目した国内外企業に実用化加速を支援する体制が構築された。平成 21 年度採択チームでは、神谷チームが、国内計測装置メーカーの参画により、多層配線における破壊メカニズムを分析する世界独自の装置開発に成功しつつある。

いずれの企業連携も研究の成果の進捗と各社の事業計画の整合性をもとに途中の見直しもあったが、受け皿として期待できるケースとなっている。

また、各チームの研究成果を公開するシンポジウムを本研究領域主催で開催し、研究代表者らが広く産業界からの意見を集められる場を設けた。毎回、参加者のほぼ半数(80~120名)が企業からであり、アンケートや意見交換会を通じてさまざまなご意見をいただいた。

(6) 情報共有の促進

研究総括とチームメンバーとの意思疎通とチーム横断の情報交流をはかる場として、18チームの採択チームが揃った時点の2009年12月から、「領域News」を発刊し四半期ごとに発行し、最終年度の第20号まで完遂した。チームメンバーからの成果トピックスに対して、研究総括の狙いや期待をコメント欄で表明することにより研究総括の方針・期待の浸透を図ってきた。また、成果トピックスと並行して領域アドバイザー・外部評価委員の先生方には過去の貴重な経験談や研究開発の「想い」を寄稿していただき、現役の研究者には参考、刺激になる内容であったと考えている。事務局からは連絡・報告事項に加え、「情報やぶにらみ」と称しその時々に合わせて肩の凝らない話題やよもやま話を載せ、領域Newsに親近感を持ってもらう工夫をした。その後、他の領域からの問い合わせがあったり、同様なニュースが発行されたりなど、ほかの部門や領域に少なからず影響や刺激を与えた。

7. 研究を実施した結果と所見

(1) 各研究チームの結果・所見

以下、採択した18チームのうち、途中でFIRSTプログラムに移管された二瓶チームを除いて、各チームの結果概要と今後の期待を示す。

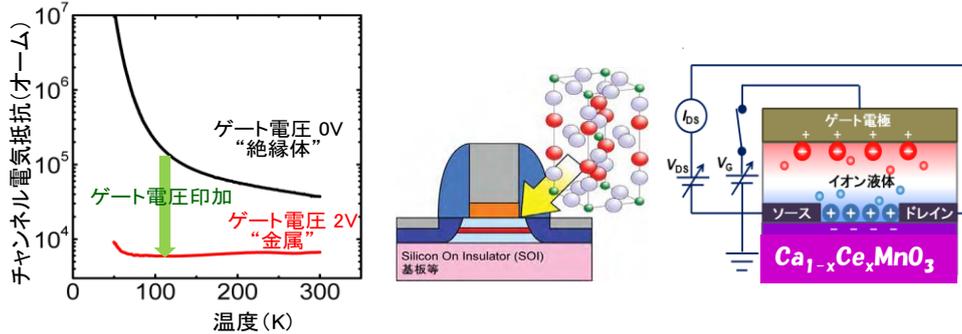
① 平成19年度採択チーム

【秋永チーム】機能性酸化物を用いた界面相転移スイッチングデバイスの開発(DT型)

電圧印加による強相関物質の抵抗変化を利用した3端子素子(Mottトランジスタ)に関しては、イオン液体を用いたゲート構造であるものの、世界トップレベルの $10^3\sim 10^5$ のオン・オフ比と室温動作に成功したことは注目できる。また、遷移金属酸化物の界面物性を制御する素子(Redoxトランジスタ)では、アニールプロセスの改善により大きなオン・オフ比の確認ができた点も評価できるが、印加電圧の大きさ、切替え急峻性など、微細化デバイスとしての課題は残る。

強相関物質を用いた新デバイス動作原理を提案した高い目標に対して、強相関物質科学およびその制御法開発に一定の進展は認められる。今後、集積化システムにおける3端子素子としてのポテンシャルを検証することを期待する。

モット絶縁体をチャンネルとする「モットランジスタ」の室温動作に成功

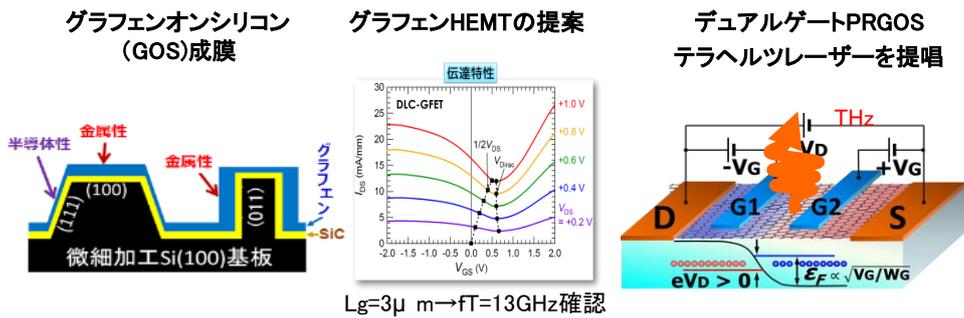


モット絶縁体をチャンネル、イオン液体を用いたゲート構造で世界トップレベルの $10^3 \sim 10^5$ のオン・オフ比を有するモットランジスタの室温動作に初めて成功、固体化が課題

【尾辻チーム】 グラフェン・オン・シリコン材料・デバイス技術の開発 (FD 型)

グラフェンの高移動度・高周波応答性をシリコン基板上で利用するデバイス (GOS²) の開拓を目指して、高品質薄膜形成技術、相補型スイッチングデバイス (CGOS) 技術、及びプラズモン共鳴テラヘルツデバイス (PRGOS) 技術の研究開発を進めた。CGOS では、オン/オフ比が小さい材料を用いることの困難性を解決する構造としてグラフェン HEMT (δ ドープによる G_m の向上) を考案し、しきい値制御による相補型動作の可能性を示した。PRGOS では、グラフェンを利用した独自性の高いテラヘルツ領域の各種デバイスを提案し、実験とシミュレーションによる基礎特性の解析・実証した。

本研究チームが提案する Si 基板上への CGOS・PRGOS・Si-CMOS のモノリシック集積化構想はグラフェン応用としてユニークな提案であり、今後、グラフェン成膜技術の高度化を進め、実現に向けた取り組みが望まれる。



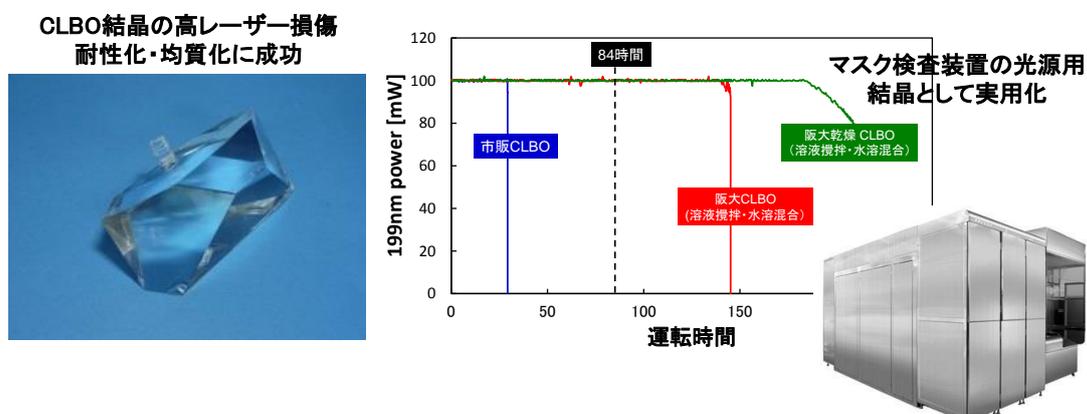
グラフェンをシリコン基板上で利用するデバイス(GOS)の開拓として、グラフェンHEMT、独自性の高いテラヘルツ領域の各種デバイスを実証、モノリシック集積化システムの提案

² Graphene on Silicon

【佐々木チーム】真空紫外レーザー光発生用非線形光学結晶の開発 (DS 型)

産業界から要請される高品質・長寿命の数値目標 (波長 199nm、出力 200mW で寿命 10,000 時間以上) を大きく超えて達成し、フォトマスク検査装置の搭載光源結晶として実用化した。1 年延長した成果として、CLBO 結晶³のさらなる高品質化に成功し、“OSAKA CLBO” ブランドとして市場展開に結びつけた。170nm 帯レーザー光源結晶の開発では、LBO 結晶による 179nm 光の発生確認および新組成 LBCO 結晶の合成成功は注目される。

本研究チームの体制は、出口シナリオに向けた役割分担が明確で、期待した通り早期実用化に大いに機能した。今後は、欠陥発生メカニズムの解明を通して CLBO 結晶のポテンシャルを最大限引き出し、ウェハ検査や微細加工機用の高出力光源などへの展開にも注力してほしい。



CLBO結晶の高レーザー損傷耐性化・均質化の数値目標を超えて達成し、マスク検査装置の搭載光源結晶として実用化、さらなる高品質化により、“OSAKA CLBO”ブランドとして市場展開

【菅原チーム】ハーフメタル強磁性体を用いたスピン機能 MOSFET の開発 (FD 型)

スピン MOSFET のソース、ドレイン用ハーフメタル材料の開発、ならびに疑似スピン MOSFET の作製と回路設計など、当初掲げたスピン MOSFET につながる技術的課題に取り組む、結晶規則度の高いホイスラー膜の作製、回路上への MTJ⁴の作製、スピン注入信号の観測を行った。NV-SRAM⁵、NV-DFP⁶でのパワーゲーティングなど、実用的な観点からの提案や、それに関する知的財産化に取り組んだ。

MTJを用いた疑似スピン MOSFET ではトランジスタの作製工程自体を変更する必要がないため、企業との共同開発に持ち込みやすい利点があるが、今後、事業性(作製コスト、安定性、設計マージン、オーバーヘッド等)の検証を期待する。

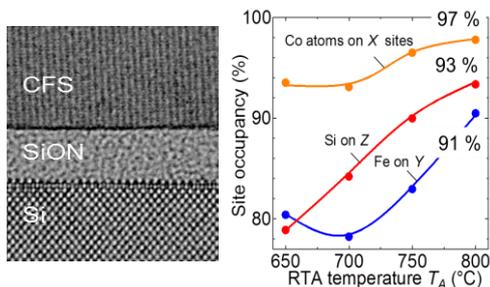
³ CsLiB₆O₁₀

⁴ Magnetic tunnel junction

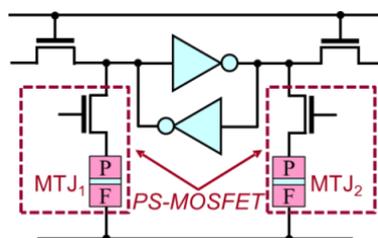
⁵ Non-volatile static random-access memory

⁶ Non-volatile delay flip-flop

**高品質フルホイスラー合金トンネル構造
形成法を開発**



**スピンドバイス融合不揮発性ロジックで
低消費電力化の提案**



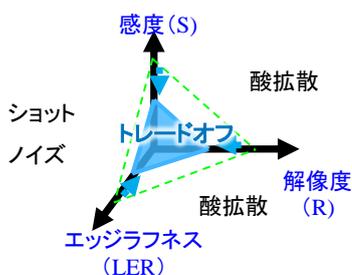
高規則度のホイスラー合金膜をSDとしたスピントランジスタのスピ注入実証、疑似スピ
ン型ではNV-SRAM、NV-DFEから構成される低消費電力パワーゲーティング回路の提案

【田川チーム】極微細加工用レジスト研究とプロセスシミュレーターの開発 (DS 型)

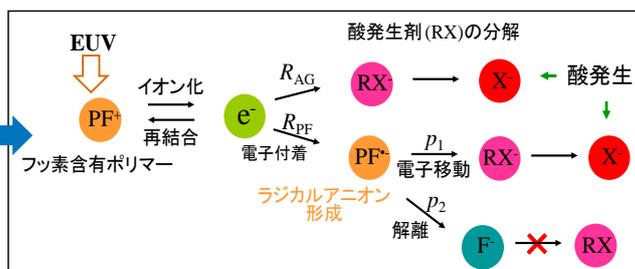
EUV リソグラフィ等の高エネルギー露光源用レジストにおける詳細な物理・化学反応
素過程を解析し、材料選択の指導原理を与えると共に、その成果をシミュレータという
ユーザーが使える形で結実させた。RLS⁷トレードオフ問題に系統的に取り組み、EUV レジ
ストの開発基盤を作り、ユーザーにシミュレータという形で提供できたことは、科学的
知見に留まらず、産業界への貢献として開発意義が認められる。

本研究成果はレジスト反応原理が同様である電子線レジストプロセスにも適用できる
ため、その高性能化に貢献している副次的な効果も期待できる。

**パルスラジオリシス法を用いて
EUVレジスト反応初期過程を解明**



レジストの像形成過程のモデル化



電離放射線化学の見地から得られた化学増幅型レジスト反応プロセスの科学的理解と、
性能向上に寄与するモデルをツール化した実用的シミュレータを開発

② 平成 20 年度採択チーム

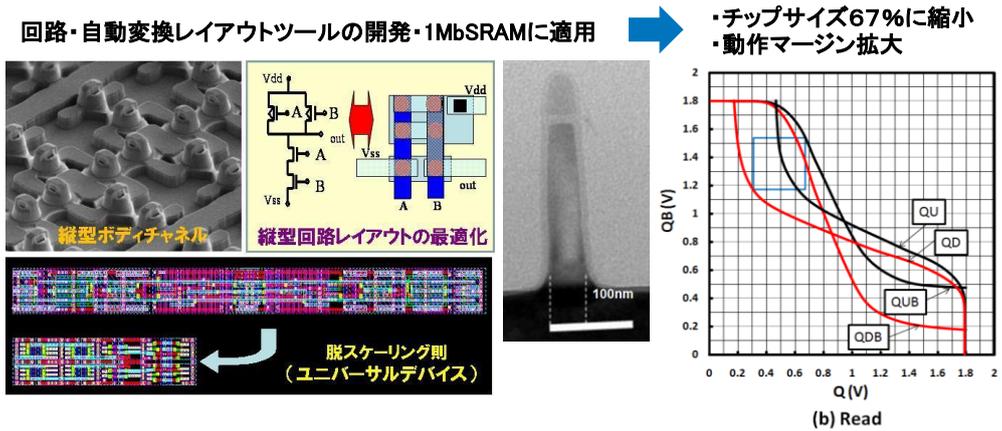
【遠藤チーム】縦型ボディーチャネル MOSFET とその集積プロセスの開発 (DT 型)

縦型ボディーチャネル MOSFET のデバイス・回路設計・微細化プロセスに関する集積化
プラットフォーム技術の成果として、単体 MOSFET の高いオン/オフ比と低消費電力性を
実証し、縦型デバイス用レイアウト設計ツールを自作した。ロジックに留まらないアナ

⁷ Resolution、Line-edge-Roughness (LER)、Sensitivity

ログ、パワー、メモリ各デバイスへの応用拡大の可能性の提示は、当初計画にはないが今後の発展が期待できる。

今後は、ゲートスタック、コンタクト、配線構造(浮遊容量・浮遊抵抗)などデバイス基本パラメータの最適化に向けた科学的深掘りを大学主導で進める一方、縦型 MOSFET のバラツキ・信頼性・プロセスコストなどの課題を企業連携によって実践的に解決することが望まれる。

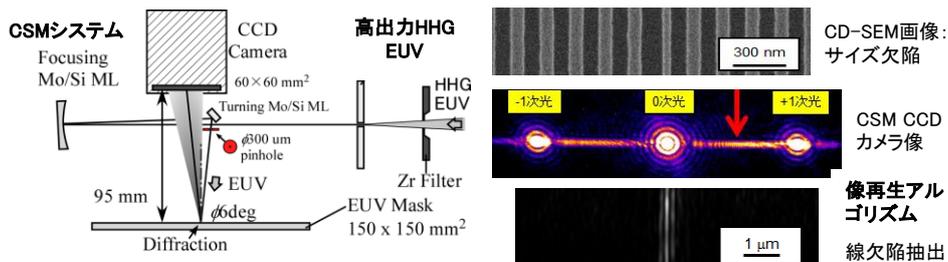


縦型ボディチャンネルMOSFETの高いオン/オフ比と低消費電力性を実証し、設計ツールを含む集積化プラットフォームを開発、アナログ・パワー・メモリデバイスへの適用可能性提示

【木下チーム】コヒーレント EUV 光を用いた極微パターン構造計測技術の開発 (DT 型)

EUV 光によるレンズレス光学系を用いたマスク構造計測システム (CSM) のための、安定・高出力の EUV コヒーレント光源及び像再生・欠陥検出の計測アルゴリズムを開発した。EUV コヒーレント光源の開発として、高次高調波 EUV 光発生システム (HHG) およびこれを励起する高出力超短パルスレーザー (励起光源) の開発に取り組み、HHG では光学系の安定化・最適化を重ね当初目標の 1000 倍の $1 \mu\text{W}$ の EUV 光の発生に成功した。一方、励起光源の開発では、期待した出力強度を得るためには光学結晶の耐熱性が課題であることが分かった。計測アルゴリズムでは、CD 計測繰り返し精度 0.1nm 、CD 欠陥検出精度 2nm など主要目標を達成した。また、EUV コヒーレント光源の安定化を図り、マスク全面検査時間目標の 90 分に目処をつけた。

今後は、さらなる検査速度の向上のため、光源の安定化・高出力化を期待する。

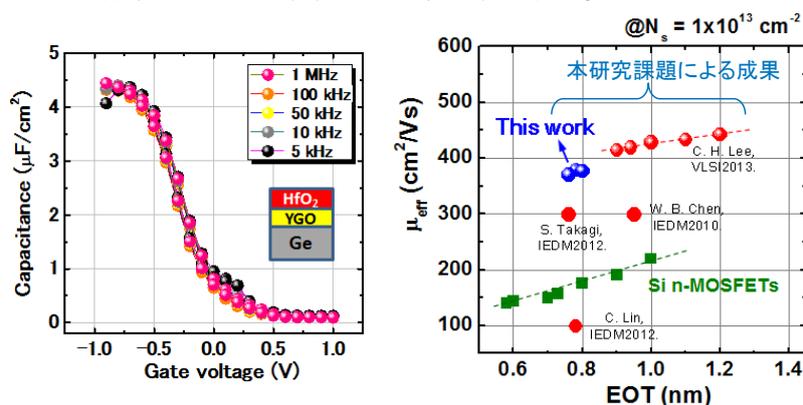


安定・高出力のEUVコヒーレント光源と像再生・欠陥検出の計測アルゴリズムを開発し、露光波長でレンズレス光学系のマスク構造計測システム(CSM)の実用化実証

【鳥海チーム】 Ge High-k CMOS に向けた固相界面の理解と制御技術の開発 (DS 型)

高品質 Ge 界面実現の課題である Ge/GeO₂ ゲート界面形成メカニズムを熱力学・反応速度論的に理解を深め、(1)Ge 基板の結晶欠陥低減処理、(2)表面平坦化処理、(3)平坦性を維持する酸化処理、の基本 3 プロセスを実現することにより、高移動度チャネル形成の科学的根拠に基づいた指導原理を提示した。また、その結果として電子・正孔とも世界トップの移動度を実現した。

今後は、GeCMOS におけるメタルコンタクトや pn 接合などに関する課題についても、その特性を決める一般化された指導原理の構築を期待する。

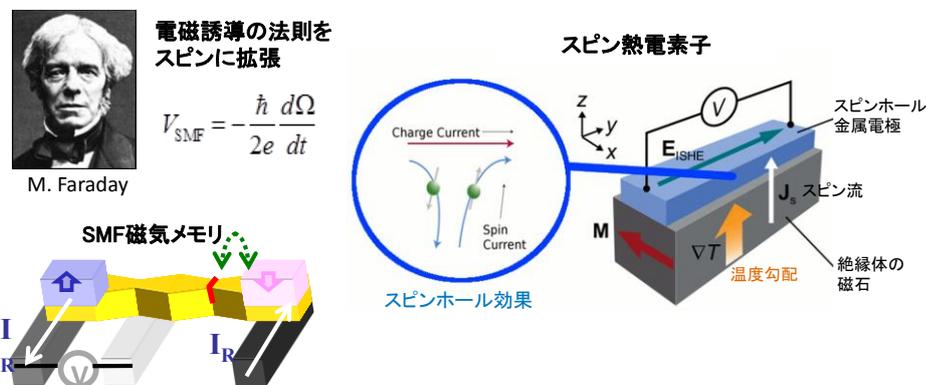


Ge/GeO₂ゲート界面形成メカニズムを熱力学・反応速度論的に理解を深め、高移動度チャネル形成の指導原理を提示し世界トップの移動度を実現

【前川チーム】 数値シミュレーションによる新材料・新機能の開発 (DS 型)

ファラデーの法則にスピンの効果を加えた理論をベースに、スピントロニクス分野における新現象を予測し、実験グループとの共同研究により理論の妥当性を実証した。また、それらの現象を具体的なデバイス構造として提案し、特許化している。スピントロニクスの理論構築とシミュレーションによる機能・材料探索という基礎的な取り組みは、世界の実験グループを先導しており、科学技術の情報発信力としてインパクトは大きかった。

今後、共同研究者を通じて、実用化への道筋を定量的に示すことを期待する。

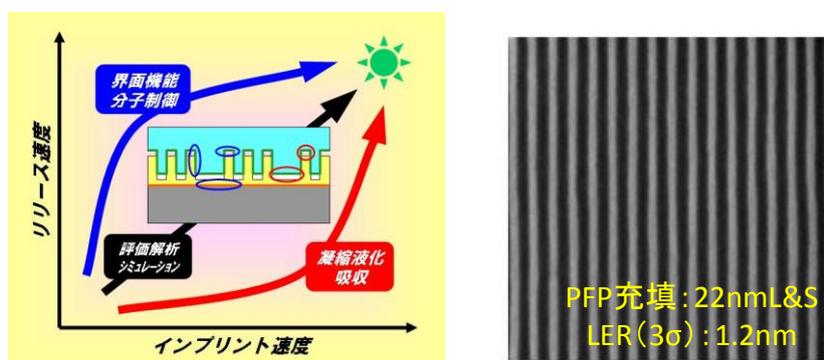


ファラデーの法則にスピンの効果を加えた理論をベースに、スピントロニクス分野の新現象を予測・実証、スピン起電力やスピン熱電効果を日本独自で発見

【松井チーム】超高速ナノインプリントリソグラフィ技術のプロセス科学と制御技術の開発 (DS 型)

独自アイデアである凝縮性ガス (PFP⁸) を用いたナノインプリント技術において、スループットと離型耐性にそれぞれ量産時の数値目標を設定し、スループットでは 300mm ウェハ 100 枚/時の目標を実験とシミュレーションにより達成可能であることを示した。量産離型では、実験環境の制約から目標の 10 万ショット/モールドには届かなかったが (2 万ショット/モールド)、レプリカモールドの利用で事実上実用的な数値であると判断できる。PFP 吸収によるパタンのラインエッジラフネス (LER) の劣化には、吸収の少ない樹脂材料を設計・開発し解決した。

今後は、プロトタイプ装置の製作により要素技術を統合した検証を期待する。



独自アイデアのPFP凝縮ガスを用いたナノインプリント技術(広島法)で、高スループットと量産離型耐性(低欠陥)を達成し、実用可能性を実証

③ 平成 21 年度採択チーム

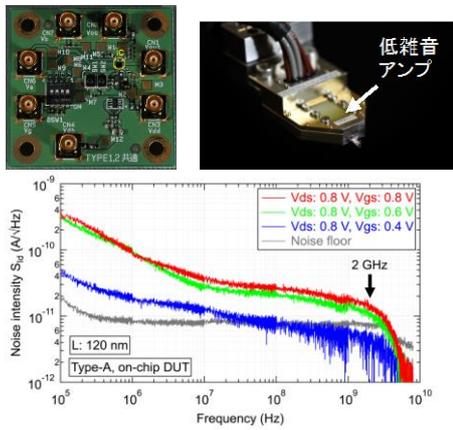
【大毛利チーム】ナノデバイスのピコ秒物理の解析による揺らぎ最小化設計指針の開発 (DS 型)

Si ナノワイヤデバイス構造を対象に、(1)専用プローブ、オンウェハー測定などにより $1/f$ ノイズの特性を従来比 2 桁以上高精度・高周波領域まで測定可能にし、(2)界面電荷の存在でキャリア離散性に基づくノイズが拡大することを解明した。独自開発プローブで 800MHz、オンチップで GHz 超のノイズ測定が実現できるようになったことは、雑音測定系の高度化の点でインパクトがあり、広く活用できる成果である。また、シミュレーションや理論的な知見が、ナノサイズ・ピコ秒領域の雑音解析という新しい研究領域の創出に貢献した。

今後、集積回路システムの微細化において雑音源の把握とその制御に基づく低雑音化設計指針となることを期待する。

⁸ Pentafluoropropane

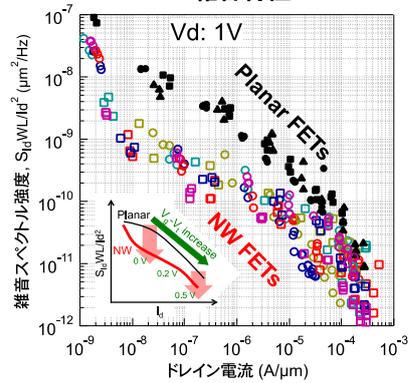
測定プローブのIC化 (DUT*の内臓)



*DUT: device under test

専用プローブ、オンウエハー測定器の開発により1/fノイズ特性を従来より2桁以上の高精度・高周波領域測定を可能にし、ナノスケールデバイスの本質的で新たな揺らぎを示唆

プレーナーとナノワイヤ(NW)の雑音特性

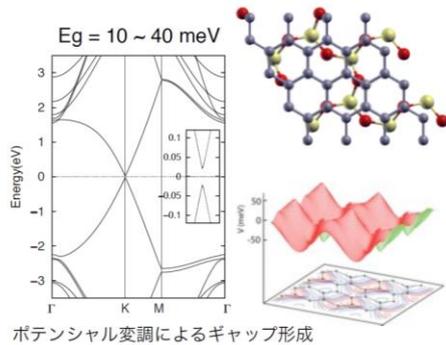


【岡田チーム】計算科学によるグラファイト系材料の基礎物性解明とそのデバイス応用における設計指針の開発 (DS 型)

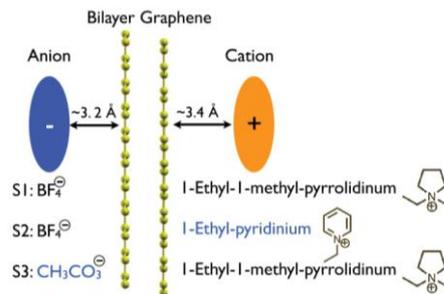
グラフェンをチャンネル材料として用いる場合のエッジ形状、非平面性、層構造、欠陥の有無、ゲート絶縁膜界面、コンタクト抵抗、ゲート電界の効果などのパラメータとデバイス特性との関連を系統的かつ網羅的に明らかにした。グラフェンのもつ超高移動度を保ちつつバンドギャップを拡大することは本質的に難しく、結果として超高速・低リークのスウィッチング素子のチャンネルには適用しにくいことを示唆した。ドーピングに依らない p 型・n 型半導体相の形成可能性、グラファイト材料系のフォノン物性、光子との相互作用など、当初想定外の成果も少なからずあった。

今後、新規デバイスの考案を目指して理論的検討を継続すると共に実験グループとの連携・検証を期待する。

構造変調・複合構造形成とデバイス特性の関連を系統的・網羅的に解明



ドーピングに依らないp型・n型半導体グラフェンの形成可能性の提示



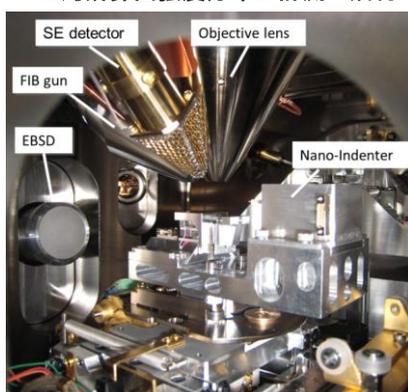
グラフェンをチャンネル材料として用いる場合の各種パラメータとデバイス特性との関連の系統的・網羅的な理解と、理論に基づく新規グラフェンデバイスの提案

【神谷チーム】高密度多層配線・三次元積層構造における局所的機械強度の計測手法の開発(DT型)

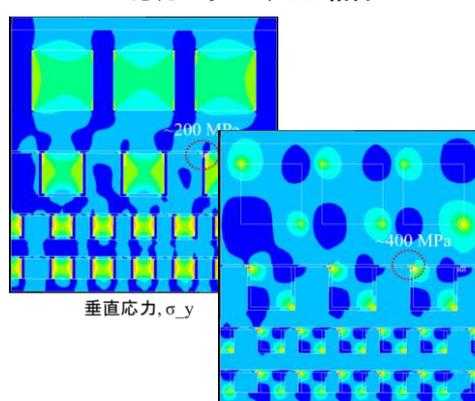
同一真空装置内に SEM、FIB、ナノインデントおよび EBSD⁹をコンパクトに搭載した世界でもユニークな評価ステーションを製作し、それを用いて Cu 配線の結晶方位や粒界構造に依存した局所界面強度分布の計測に成功した。得られた局所界面強度データから界面エネルギーを求めるプログラムを開発し、それを基にき裂進展シミュレータとして汎用化し、さらに TCAD プロセスシミュレータの応力パラメータを結合させ、エネルギー解放率分布から破壊確率リスクを定量化する手法を構築した。

機械工学的手法をナノ領域集積デバイスに適用し、多層配線構造の破壊リスクを定量的に予測するというジャンルを創生したことは特筆すべき点であり、今後、3次元実装等の信頼性解析にも適用可能な信頼性工学におけるイノベーションに繋がることを期待する。

オリジナル評価ステーションを製作、Cu配線の局所界面強度分布の計測に成功



TCADプロセスシミュレータの応力パラメータとの結合



ユニークな自作評価ステーションによりCu配線の局所界面強度分布、結晶方位、粒界構造を計測、TCADシミュレーションとの結合で破壊確率リスクの定量化手法を構築

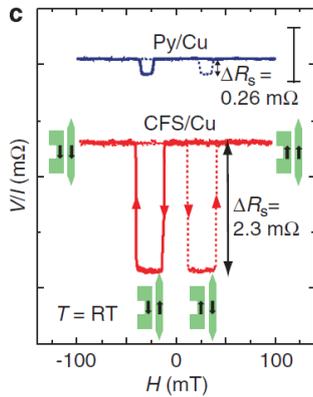
【木村チーム】電荷レス・スピン流の三次元注入技術を用いた超高速スピンドバイスの開発(DT型)

MRAM の微細化に伴う熱擾乱耐性の劣化の解決を狙った電荷レス・スピン流(純スピン流)を用いたスピン RAM を提案し、純スピン流による磁化反転の実現およびその最適化を狙ってスピン注入量の増大化、純スピン流生成の高効率化、スピン吸収の高効率化に成功した。集積化におけるセルレイアウト、書き込み消費電力、セルサイズの見積もりに対して、従来 MRAM と比較しながら、エリアペナルティの少ないレイアウト、低消費電力性を具体的に提示した。

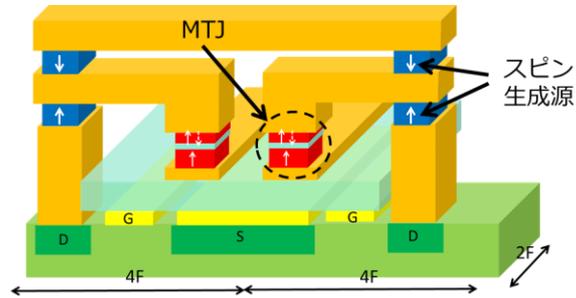
今後、純スピン流生成に必要な電力およびそれに付随して発生する熱量について、集積回路構造を想定した解析を行い、本手法の有用性を検証することを期待する。

⁹ Electron Back Scatter Diffraction Patterns

高スピン偏極のホイスラー合金電極による
高効率の純スピンの生成に成功



高集積化可能な
純スピンの流型MRAM構造の提案



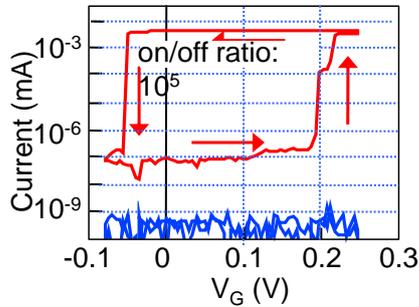
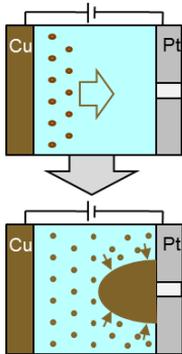
電荷レス・スピン流(純スピン流)を用いたMRAMを提案、スピン注入量の増大化、純スピン流生成の高効率化、スピン吸収の高効率化に成功

【長谷川チーム】 3端子型原子移動不揮発性デバイス「アトムトランジスター」の開発
(DT型)

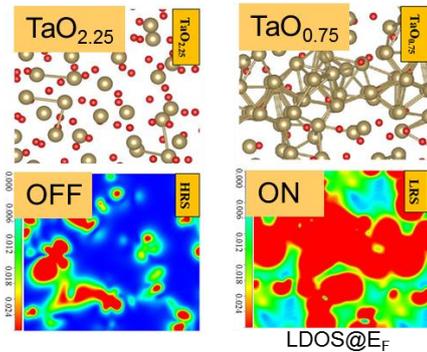
ゲート電極からゲート絶縁膜中に金属イオンを拡散し、ソース・ドレイン電極間を短絡させてスイッチONを誘起させるという3端子スイッチ(アトムトランジスター)の動作に成功した。n型動作の低電圧化、高いオン・オフ比特性、繰り返し動作耐性などいくつかのデバイスの特性指標を達成した。電極とイオン拡散層との酸化還元反応をその場XPS測定により観測し、理論的考察を通して金属イオンの伝導経路の微視的構造を推定した。p型動作への挑戦では、電気化学的な反応による界面構造の破壊が起きるため連続的オン・オフ動作が不可能であり、CMOS化が困難であることが分かった。

今後、3端子構造におけるオン状態の物理的構造を解明し、集積回路におけるスイッチング素子としての有用性の検証を期待する。

n型動作の低電圧化、高いオン・オフ比特性、
繰り返し動作耐性を確認



金属イオンの伝導経路の
微視的構造を推定

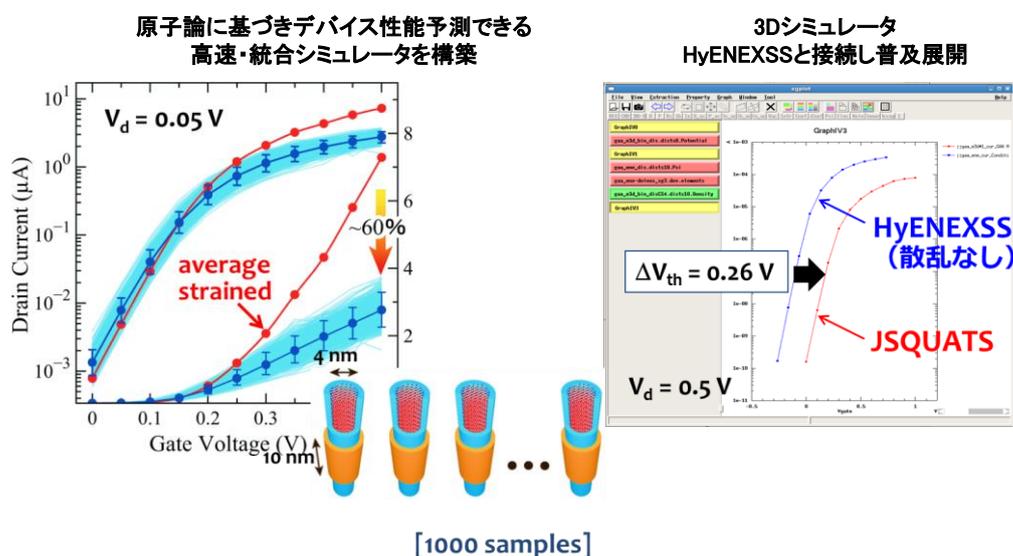


アトムトランジスターのn型動作の低電圧化、高いオン・オフ比特性、繰り返し動作耐性を達成。
p型動作では連続的オン・オフ動作不可能によりCMOS化の困難さを示唆

【森チーム】原子論から始まる統合シミュレータの開発(DS型)

原子論的電子輸送シミュレータやフォノン輸送シミュレータなど要素技術を組み合わせ、新しい計算アルゴリズムの導入により短時間処理が可能な統合シミュレータを構築した。シミュレーション結果の精度も文献値と比較検討し、ベンチマークを通してその優位性を確認できた。また、既存の3Dシミュレータ HyENEXSS に接続し、具体的な普及活動まで進めたことは特筆に値する。

今後は、多様なユーザー活動を通じて、本シミュレータでなければ解析・予測できない事例を積み上げて、汎用性とユーザビリティを高めることにより、デバイス設計イノベーションに繋がることを期待する。



[1000 samples]
新計算アルゴリズムの導入によりクラスターPCでの短時間処理が可能な統合シミュレータを構築、既存の3Dシミュレータと接続し普及展開

【湯浅チーム】革新的プロセスによる金属／機能性酸化物複合デバイスの開発(DT型)

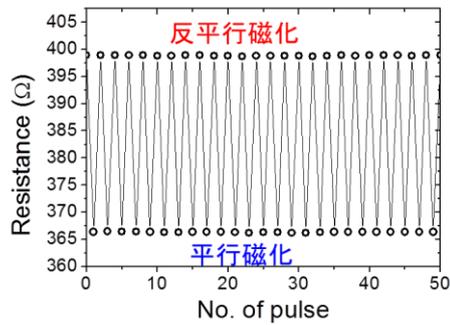
サブナノ秒のパルス電界を用いた双方向磁化反転に世界で初めて成功し、材料・膜厚の最適化による低電圧化への道筋を示した。また、スパッタ成膜プロセス技術の最適化、Fe/MgO 界面への γ -Fe₂O₃ の挿入による MR 比のエンハンスメント効果を実現した。マイクロ波アシスト磁化反転や電圧トルクによるマイクロ波検波などの新たな提案は、応用対象の明確化などの発展を待つ。

今後は、電圧印加磁化反転の物理の解明により、スイッチング素子における制御性の向上につながることを期待する。

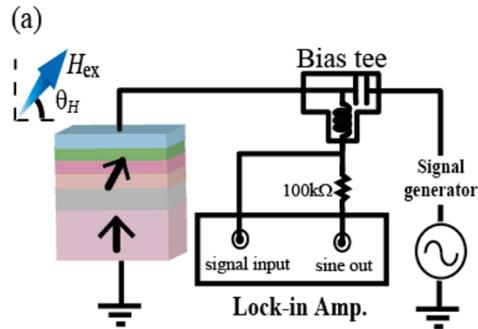
サブナノ秒パルス電界による
双方向の磁化反転に成功

$H_{\text{ext}} = 700 \text{ Oe}$, $\tau_{\text{pulse}} = 0.55 \text{ ns}$

$V_{\text{pulse}} = -1.0 \text{ V/nm}$



マイクロ波アシスト磁化反転
による反転磁界の低減



サブナノ秒のパルス電界を用いた双方向磁化反転に成功、材料・膜厚の最適化による低電圧化への道筋を提示。マイクロ波アシスト時間反転など新たな動作原理を提案

採択した 18 チームの DS 型、DT 型、FD 型への分類に際し、研究総括として期待したポイント、実現するための課題、および終了時点の成果をベースにした実用的インパクトを纏めた結果を表 5~7 に示す。

表 5 採択チームに期待した研究総括のねらい(DS 型)

採択年度	チーム	Discovery Science として期待する普遍モデル・数式	終了時点の成果をベースにした実用的インパクト
平成 19 年度	佐々木チーム	光学結晶における光学損傷の発達過程の普遍的モデルの構築	高次高調波を用いた高寿命の計測・検査用レーザーの実現
	田川チーム	露光潜像の形成過程と最終構造形成の普遍的モデルの構築	EUV レジストにおける課題(RLS トレードオフ問題)の解決
平成 20 年度	鳥海チーム	MOS 界面構造の形成過程を理解する普遍的モデルの構築	実用レベルの高品質界面 Ge-CMOS の実現
	前川チーム	スピン自由度を加えた新規電磁方程式の創製と新現象予測	スピントロニクス新機能・材料特性予測と新規デバイス開拓
	松井チーム	ナノインプリント技術におけるモールド界面現象のモデル化	ナノインプリントリソグラフィの超高速スループット化
平成 21 年度	大毛利チーム	超微細 MOS トランジスタの雑音解析における限界解明	ナノ MOS デバイスのノイズ・ばらつき特性の限界予測
	岡田チーム	低次元カーボン構造が発現する新物性予測とその応用開拓	グラフェン/カーボン複合体を用いた新機能デバイスの予測
	森チーム	微細構造における原子の種類と配置を基に電気特性を予測	ナノワイヤ CMOS の特性予測と設計指針の提供

表 6 採択チームに期待した研究総括のねらい(DT 型)

採択年度	チーム	Disruptive Technology として期待したポイント	挑戦課題	期待されるインパクト
平成 19 年度	秋永 チーム	酸化物絶縁体を 3 端子スイッチとして実現	低電界駆動による界面強 相関電子の制御	10nm 以細超高集積回路の 消費電力の低減
平成 20 年度	遠藤 チーム	縦型 MOS 化による LSI 設 計インフラの変革	従来の平面 MOS 集積回路 インフラ技術との融合	4 応用(ロジック、メモリ、 パワー、アナログ) 展開
	木下 チーム	光学レンズ系を用いない 計測装置の開拓	超微細で任意形状の欠陥 構造の抽出	レンズレス化による小 型・軽量・低コスト計測・ 検査原理の開拓
平成 21 年度	神谷 チーム	機械工学に基づく多層配 線の破壊現象の解析手法 の開拓	微細化多層構造における 適用限界の打破	信頼性解析の革新による 短 TAT 設計
	木村 チーム	電荷を利用しないで演算 する集積デバイスの開拓	10nm 以細デバイスの放射 線耐性の確保	無電荷流による革新原理 メモリ・ロジック
	長谷川 チーム	固体電解質利用による新 原理 CMOS スwitchの開拓	電流チャネルの原子レベ ル構造の解明・制御	高 On/Off 比を特徴とす る酸化物エレクトロニク スの開拓
	湯浅 チーム	電界スピン制御型 3 端子 スwitchの開拓	電界印加効果の解明・制 御	電荷制御型酸化物エлек トロニクスの開拓

表 7 採択チームに期待した研究総括のねらい(FD 型)

採択年度	チーム	Si LSI との融合による期 待されるメリット	融合化における課題	期待されるインパクト
平成 19 年度	尾辻 T	複合的新機能を搭載した 高付加価値デバイス	高移動度性以外のグラフ ェン物性の魅力開拓	テラヘルツデバイスの開 拓
	菅原 T	スピン物性を利用した不 揮発性ロジックの開拓	高効率スピン注入、磁化 反転動作	超低消費電力集積回路ア ーキテクチャの開拓
	二瓶 T	多層配線リミットの超高 速化限界の打破	コンタクト電極・物性の 制御	カーボンナノエレクトロ ニクスの開拓

(2) 論文、特許、国際招待講演数、受賞について

論文・特許については下記のようにチームごとの研究員数や予算による数値目標を定め「論文・特許の勧め」として H19 年の公募開始時点から提示した。論文数に関しては、各チームに参加する研究員数の平均値(約 8 人)がそれぞれ年一方の論文を発表することを前提に領域全体(17 チーム)の目標として 680 件と定めた。成果の論文化は大いに奨励したが毎年の件数管理には立ち入らず各チームの自主努力に任せたが、結果としては大幅な目標達成となった。また、発表する論文は海外の著名なジャーナルばかりとせず国内のジャーナルにも投稿することをお願いした。当時、国内の学会誌の世界的認知度を向上させるように各種の学界活動による期待を受けたためである。これに関しても進捗管理せず自主努力に任せたが、結果としては領域全体の主要論文約 80 件の 40%弱が国内ジャーナルに掲載された。この割合は当初想定以上のものとして受け止めている。国際会議から招待されることで成果や研究者の国際的認知度向上に効果があるが、それ以上に質の高い情報を交換するチャンスとなることを訴え、奨励した。その数値目標は定めなかったが、合計 491 件となった。本研究領域に参加した研究者の合計は 500 人レベルであるので、平均一人 1 回が国際招待講演を行ったことになり、悪くない結果と思える。しかし現実には一人で突出した回数 of 国際招待講演をなさった方も何人かおられるので、この目標設定に関してはまだ工夫の余地があると思える。

特許出願については、2 通りの考え方で目標を定めた。フルタイム換算の研究者数にそれぞれ年 1 件の特許作成を求める場合は、目標が約 170 件となる。一方、配分予算を基にする場合、DT 型および FD 型チームは 2000 万円あたり年 1 件、DS 型チームには 4000 万円あたり年 1 件とすると領域全体の目標は 220 件となった。このような計算の根拠は当時の企業研究機関で使われていた方式を取り入れた結果である。特許出願に関しては、研究期間の前半では各チームの所属する機関の特許政策もあり自主努力としてきたが、後半になり、特許出願がゼロとなりそうなチーム(主に理論やシミュレーション関連)に対しては特許キャラバンを行い、また JST 知財センターにも支援していただき、結果として特許ゼロのチームを無くすることができた。件数目標でみると、予算ベースの目標には届かなかったが、研究者数ベースの目標値を達成する見込みとなった。やや物足りない感じを受けているが、近年国家的な特許政策が変わりつつあるので、妥当性の判断は今後に預けたい。

表 8 論文・特許の目標

	研究総括による奨励	最終目標	実績
原著 論文 ・講演	1. 1論文/年・研究員 以上(平均値)	680 件	886 件
	2. 外国系ジャーナル(Nature、JAP など) 以外 に日本系ジャーナルに掲載奨励 (JJAP, APEX, JPSJ など)	-	主要論文 ¹⁰ のうち 37.5% が日本系ジャーナル
	3. 国際会議招待講演をプラス評価	-	491 件
特許 出願	1. 1 件以上/年・フルタイム研究者	170 件	166 件
	2. 2000 万円単位で1 件以上 (DS 型はDT 型の2 分の1)	220 件	
	3. 必要に応じて背景調査、戦力化支援	-	特許キャラバンの実施、 JST 知財センターによる 出願支援

(平成 27 年 1 月 30 日現在)

CREST 研究期間中、受賞理由に CREST 研究成果が含まれる顕彰・受賞は計 23 件であった。研究代表者の国際的受賞の顕著な例として、木下教授の「Joseph Fraunhofer Award / Robert M. Burley Prize」(米国光学会 (OSA)、2012)、前川センター長の「Magnetism Award and Néel Medal」(国際純粋・応用物理学連合 (IUPAP)、2012)を挙げる。いずれも当該分野に顕著な貢献をした研究者に贈られる賞であり、研究の先進性が国際的に認識されている。国内での受賞としては、情報技術・情報科学研究の発展への寄与が認められ、「第 12 回 船井学術賞 船井哲良特別賞」(船井情報科学振興財団、2013)が木村教授に贈られた。また、産業化・実用化の観点では、佐々木教授、森教授、吉村准教授の「山崎貞一賞(材料分野)」(2014)は、CLBO 結晶の発見と実用化への貢献が受賞理由とされ、CREST 研究成果の寄与は少なくないと思われる。

(3) 特筆すべき研究成果

Discovery Science を重視した研究成果として、鳥海チームの Ge/GeO₂ ゲート界面形成メカニズムの熱力学・反応速度論的な理解が挙げられる。研究チームは当初目標の高品質 Ge 界面実現の課題に対し、高移動度チャンネル形成の科学的根拠に基づいた指導原理を提示した。その結果として電子・正孔とも世界トップの移動度を実現したことは特筆に値する。また、前川チームが中心となって開拓したスピン起電力やスピン熱電効果は日本独自で発見された現象として世界的に認知されており、海外の著名な論文誌に 140 編以上の論文が掲載され傑出している。

Disruptive Technology を重視の研究成果として、遠藤チームによる縦型ボディーチャ

¹⁰ 添付資料「3.2 主要論文」にリストアップした全 80 件の論文

ネル MOSFET のデバイス・回路設計・微細化プロセスに関する集積化プラットフォーム技術の開発が挙げられる。遠藤チームでは途中参画企業を含む複数企業との連携により、300mm ウェハでのプロセス開発、プロトデバイス試作を行い、当初目標を大きく超えて達成したと評価できる。これまでに構築した企業とのネットワークおよび、研究代表者の発信力とリーダーシップによる「国際集積エレクトロニクス研究開発センター」の創設は特筆すべき点として今後の発展が期待できる。

Fusion Device を重視した研究成果として、尾辻チームによるグラフェンの高移動度・高周波応答性をシリコン基板上で利用するデバイス(GOS)の開拓が挙げられる。本チームが提案する Si 基板上への CGOS・PRGOS・Si-CMOS のモノリシック集積化構想は、グラフェン応用としてユニークな提案であり、注目される。多数の論文発表に加え、国際ワークショップを創設・継続開催するなど学術的な存在感のある本チームにより、今後、実現に向けた取り組みが望まれる。

(4) 産業への波及・実用化

佐々木チームが開発した高品質の CLBO 結晶は、次世代フォトマスク欠陥検査装置に必要となる高レーザー損傷耐性・高均質性(波長 199nm、出力 200mW で寿命 10,000 時間以上)の水準をクリアし、参画企業によって半導体製造ラインで利用される検査装置に搭載するに至った。CREST 研究開始以前に本研究チームが発見した CLBO 結晶の固有性能の高さを実証したことの科学的インパクトは大きいだけでなく、その固有性能をさらに引き出し、要請される寿命を著しく超えるレベルに引き上げ世界的普及に導いたことで、一世代・二世代先の微細化を可能にした成果の半導体産業界へのインパクトは世界的に認められた。

木下チームが開発した EUV 光源のコヒーレント化による検査・計測システムの簡略化(小型化、低コスト化、等)は原理が先行しており、その実証が大きな懸念であったが、注意深い実験装置の組み立て・調整を通して実験検証に成功した意義は大きい。それをベースに、光源ビームをミクロンレベルに絞り、EUVL マスクの微小欠陥の検出・構造同定を可能とする実用的マスク欠陥検査装置(μ CSM)の開発プロジェクト(NEDO 委託研究)につなげた。

森チームによる原子論に基づく統合シミュレータの開発は、統合化するための個々の要素シミュレータの開発分担がグループ間で適切に行われ、TCAD との接続を担うグループを途中で新設し、既存の 3D シミュレータ HyENEXSS に接続し、具体的な普及活動まで進めた。積極的な学会発表(SSDM 21 件、SISPAD 17 件、IEDM 5 件)を通して、シミュレータとしての独自性・先行性の高さとともに実践的有用性が世界的に評価され、次世代シミュレータとして世界的潮流を築きつつある。

(5) 今後の展開・期待

① 新ジャンル開拓

前川チームは、スピンの変化の自由度を加えた「前川の電磁誘導の法則」と呼ぶに相応しい理論をベースに、スピントロニクス分野の新現象・新応用の可能性を次々に予測した。これに共鳴された実験チームが、本研究領域の枠を超えて時間を置かずに実証した。新しい電磁誘導の法則は新ジャンル開拓という側面が強く、本研究課題が主眼としている集積化デバイスのみならず、今後もしろいろな新現象や新応用が発掘されることと期待される。

神谷チームは、機械工学的知見をナノ寸法の LSI 多層配線構造の破壊の解析に適用することを試み、ナノインテンダー、SEM、結晶方位評価(ESD)などを組み込んだ世界でも類を見ない装置を作り上げ、Cu 多結晶界面と相関絶縁膜との界面における密着力の定量的測定に成功した。さらに、一部のハガレ箇所から多層構造全体に伝搬する現象をシミュレーションし、設計における重要な注意点を示した。今後は、破壊発生の着目箇所を増やすと同時に構造全体を視野に入れたナノ力学解析を高度化させ、チームが主導する当該ジャンルの世界的プレゼンスが確立されることが期待できる。

② 他の大型プログラムへの展開

本研究領域における研究の発展として、他の大型プログラムへの展開がある。表 9 と表 10 に、本研究領域の研究成果の次の展開のうち、企業との共同研究など公表できないものを除く公的プログラムを示した。

尾辻チームはプラズモン共鳴テラヘルツデバイス (PRGOS) を発展させ、本研究課題で志向したロジックデバイスに加え、光通信デバイス応用への新展開を見せた。田川チームおよび木下チームでは、NEDO プロジェクトで民間コンソーシアムと連携して成果の実用性向上を目指した。

また、遠藤チームは、現在のプレーナー構造という集積回路プラットフォームの革新を狙った、まさに「Disruptive Technology」の見本のようなテーマで、極めて挑戦的といえる。これまでに構築した企業とのネットワークおよび、研究代表者の発信力とリーダーシップにより「国際集積エレクトロニクス研究開発センター」が創設された。当面メモリ応用から始め企業と組んで本格的な試作段階にきているが、将来的にはメモリ応用以外にロジック、アナログ、パワーにも適用できるメリットがあるとされ、今後注目すべき大型テーマである。

表9 研究期間中に連携した研究課題

採択年度	研究チーム	対応事業	テーマ	開始年度
平成19年度	尾辻チーム	JSPS 科研費・特別推進研究	グラフェンテラヘルツレーザーの創出	平成23年度
	田川チーム	NEDO	EUVレジスト材料基礎研究 (代表：古澤 孝弘)	平成23年度
平成20年度	木下チーム	NEDO	EUVマスクパターン欠陥検査装置開発	平成23年度

表10 今後、大型プログラムとして次の展開が期待される研究課題

採択年度	研究チーム	対応事業	テーマ	開始年度
平成19年度	田川チーム	JST NexTEP	リソグラフィ用レジストの高性能化モジュール	平成26年度
平成20年度	遠藤チーム	JST ACCEL	縦型 BC-MOSFET による三次元集積工学と応用展開	平成26年度
	鳥海チーム	JST CREST	二次元界面場により創出される新規材料物性の機能化	平成26年度
平成21年度	大毛利チーム	START	LSI の動作信頼性向上に寄与する半導体素子の雑音計測技術の事業化(研究代表者：蓮沼 隆)	平成26年度
	湯浅チーム	ImPACT	無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現(PM: 佐橋 政司)	平成26年度

8. 総合所見

本研究領域の狙いは、シリコン LSI の微細化限界を新たな材料や構造を採用することで乗り越え、高性能化(高速化、低消費電力化など)あるいは新たな機能(不揮発性化、新演算手法など)を追求・開拓することである。この狙いを遂行するには、現状課題を徹底的に科学的に分析、理解することが不可欠であり、この過程で普遍的なモデルや数式化が可能となれば、それらの成果は世界的に見ても非常に質の高いものとする事ができる。一方、開発した新技術が魅力的であっても、まだ性能が十分でないために、あるいは企業の製造現場で使われている技術体系との整合性が不足しているためにすぐに産業現場で採用されるとは限らない。しかし、いずれ従来技術を置き換えるほどの魅力やインパクトを有しており、少しずつ実用化する中で高性能化や高整合性化を図り、やがて従来技術に取って代わることになれば、非常にインパクトが大きい技術であると言える。このように、成果の性質を分類するために、前者に相当する研究テーマを Discovery Science 型と命名し、後者に相当する研究テーマを Disruptive Technology 型と命名した。一方、現在のシリコ

ン LSI インフラをベースに新技術を融合することで新機能付加・高度化を図る研究テーマを Fusion Device 型と呼んだ。これら分類は本研究領域で初めて用いたものであるが、研究のタイプを分類するだけでなく、研究総括が期待する「成果の質」や「期待されるインパクト」を明示し、各チームとの意識共有をはかり期待する方向にマネジメントする手段でもあった。

マネジメントの具体的業務に関しては、その種類と多さは当初想定した以上に多岐にわたり、大変手間のかかるものであった。必ずしも、納得できる運営を全うできたとは言えないが、マネジメントする中で大事にした 4 点は以下のことである。①本研究領域の狙いを研究総括と研究現場とで意識共有できている状態であること、②社会還元(実用化)イメージを持った終了シナリオを明確にすること、③世界から先進的で良質な情報が集まるべく世界的なプレゼンスを向上させること、④連携できる企業を早めに勧誘し彼らの事業との整合性を確認すること、である。このような研究総括の期待を進捗ヒアリングやサイトビジットを通して伝え、各チームの個性に応じた対応に結びついた。

実用化の見通しに関しては、現時点ですでに実用化が始まっているもの、あるいは実用化に向けた具体的な動きが明確になっているものがある。このような状態となったものは全採択テーマのうち約 30%程度である。これに対し、実用化の可能性は認められるもののその実現には相当時間がかかりそうなものテーマの割合は 45%程度である。残りの 25%のテーマはこのままでは実用化は困難・不可能と判断せざるを得ないものである。一方、本研究領域の成果として、先進的で新規な着想を持つ科学的知見が得られた場合も少なくなく、この種の科学的知見という成果も大事にしてきた。これらの知見の適用範囲が広く普遍的であればあるほど重要視し、早期に世界的に公表(論文化)することを奨励してきた。将来思わぬ形でイノベーションを誘発させる貴重な知見となることを期待しているからである。

期待されるイノベーションのレベルは、その斬新さや規模において様々なものがある。科学的な斬新さの高さ見ると、前川チームの新規電磁方程式の提案とそれに基づく新物理現象の開拓に関する成果は大いに注目したい。彼らの成果は著名な海外ジャーナルでも多数発表され、今後、世界の関連研究者が触発されて科学的・学術的なイノベーションをもたらすものと期待している。スケールの観点で見ると、遠藤チームが取り組んだ縦型 CMOS の採用によるシリコン LSI 産業のデバイス設計・製造に関するインフラ革新は今後 10 年以上の時間は覚悟するとしても成功すればスケールの大きなイノベーションとなるであろう。実際、彼らの活動を引き継ぐ形で大型研究プログラム ACCEL に採択され、少なからぬ関係者の期待も高まっている。

戦略目標である「新材料・プロセス」によるデバイスイノベーションは、デバイス化のシナリオが判りやすくても「新材料」の採用は製造現場にしばしば嫌われるテーマである。新材料による量産ライン汚染の対策、安全管理、歩留まりや経時変化の確認など非常に多くの手間がかかる。新材料を使った新製品の例として DRAM や CPU などが有名であるが、こ

れらでも、新材料採択の方向が固まった後、製品化には 10 年以上の時間を費やしている。

また、「新プロセス」の採用でも、使用する新しいガスや薬液あるいは新原理プロセス装置に対しても新材料採用と同様な量産化前の確認事項が非常に多い。このような現実をみると、社会的に認知されるイノベーションまで育てるには、本研究領域の成果の量産化を意識して実践的に高度化するための多くの後続開発が必要である。量産前の製品化開発は主に企業の仕事であるが、企業の量産化の決断を促すには、まだ本研究領域の成果の大半は注目させるにはまだ訴える力が弱い段階である。イノベーションを誘発するものとして世に送り出すためには、更なる完成度向上を目指した後継プロジェクトの策定・推進が不可欠である。

最後に、本研究領域に採択された 18 チームの研究代表者と数 100 名にのぼる研究員の方々には、研究総括の持つ様々な想いを受け止めながら、多大な成果を創出していただいたことに心より感謝を申し上げたい。また、研究期間を通して終始適切な助言・激励・指導をいただきました領域アドバイザーの皆様には改めて深く感謝したい。研究総括の進めたすべての業務・マネジメントにおいて、主体的に創意・提案していただきながら様々な課題を克服し、8 年間に及ぶ研究領域を完遂するべく強力に支えていただいた遠藤伸裕領域参事、および JST 担当者(松村郷史および嶋田義皓)には特段の謝意を表したい。

以上