

(独)科学技術振興機構
戦略的創造研究推進事業
チーム型研究(CREST)
追跡評価用資料

研究領域「超高速・超省電力高性能ナノデ
バイス・システムの創製」
(2000-2007年度)

研究総括 榑 裕之

2013 年 10 月

目次

要旨	1
第 1 章 追跡調査概要.....	3
1.1 研究領域の概要.....	3
1.1.1 戦略目標	3
1.1.2 研究領域概要.....	3
1.1.3 研究総括	3
1.1.4 領域アドバイザー.....	3
1.1.5 研究課題および研究代表者.....	3
1.2 研究領域終了後の進展と波及効果.....	5
1.2.1 研究成果の発展状況や活用状況.....	5
1.2.2 研究成果の科学技術的および社会・経済的な波及効果.....	5
第 2 章 追跡調査	9
2.1 追跡調査について.....	9
2.1.1 調査の目的.....	9
2.1.2 調査の対象.....	9
2.1.3 調査の方法.....	9
2.2 アウトプット概要.....	10
2.2.1 研究費	10
2.2.2 論文	13
2.2.3 特許	14
2.3 アウトカム.....	19
2.3.1 科学技術的アウトカム.....	19
2.3.2 社会・経済的アウトカム.....	20
第 3 章 各研究課題の主な研究成果および波及効果.....	22
3.1 2002 年度採択課題	22
3.1.1 量子細線レーザの作製とデバイス特性の解明（秋山 英文）	22
3.1.2 有機半導体レーザの構築とデバイス物理の解明（安達 千波矢）	28
3.1.3 低次元量子構造を用いる機能光デバイスの創製（荒井 滋久）	33
3.1.4 多価イオンプロセスによるナノデバイス創製（大谷 俊介）	36
3.1.5 シフトレジスタ機能付超高速光メモリの創製（河川 仁司）	40
3.1.6 共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの創製（小柳 光正）	44
3.1.7 半導体スピンエンジニアリング（新田 淳作）	47
3.1.8 単一磁束量子テラヘルツエレクトロニクス創製（藤巻 朗）	52
3.1.9 超ヘテロナノ構造によるバリスティック電子デバイスの創製（古屋 一仁）	56

3. 1. 10 InN 系窒化物ナノデバイス／ナノプロセスの分子線エピタキシ法による新展開 (吉川 明彦)	60
第 4 章 科学技術イノベーションに資する研究成果の状況.....	64
4. 1 研究領域からの研究成果事例.....	64
4. 1. 1 有機半導体レーザの構築とデバイス物理の解明 (安達 千波矢)	64
4. 1. 2 共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの創製 (小柳 光正)	67
4. 2 研究領域関係者の所見.....	69
4. 3 まとめ.....	70

要旨

本資料は、戦略的創造研究推進事業のチーム型研究 CREST の研究領域「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・システムの創製」(2002 年度-2007 年度)において、研究終了後一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況等を明らかにし、独立行政法人科学技術振興機構(JST) 事業及び事業運営の改善等に資するために、追跡調査実施した結果、および追跡調査に引き続き、科学技術イノベーション創出に資する展開をしていると思われる数事例について調査するとともに、本領域のアドバイザーにこの研究領域の全般的な状況についてインタビューした結果をまとめたものである。

本研究領域は、「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」を戦略目標とし、ナノメートル級の超微細構造の形成技術および超集積化技術を活用することにより、情報処理や通信システムの性能を飛躍的に高めることのできる次世代デバイス・システムを創製することを目指した。採択された 10 課題は、超高速性・超省電力性を持った「情報通信技術・光素子」や「情報処理技術」を目指した研究からなるが、次世代デバイス・システムの基礎を支えるナノプロセス技術の研究や、ナノデバイスにおける物理過程の解明と制御に係る研究も含まれる。高性能デバイスの技術要素として近い将来に取り込まれることが期待されるものから、当面は次世代の新規デバイスやシステムを実現させるための学術基盤・技術基盤として貢献するものまで、実用化までの距離は様々であったが、5 年間の研究期間で数多くの成果を挙げ、これらの成果が今後の研究開発をさらに誘発・促進し、次世代の情報処理・通信分野における高速化・省電力化・高性能化に大きく貢献することが期待された。本研究領域終了以降も、超高速・超省電力性の「情報通信技術・光素子」、「情報処理技術」、および「ナノプロセス技術の開拓によるナノデバイスの実現を目指した研究」が継続され、多くの成果が新たに得られている。

第 1 の超高速性・超省電力性の情報通信技術や光素子を目指した研究では、熱活性型遅延蛍光(TADF)による励起子生成効率の向上という、有機 EL デバイスの実用化に向けた大きなブレークスルーを始め、小規模超高速光回路創製、量子細線レーザのデバイス特性の理論的解明、低消費電力かつ光閉じ込めを従来の 3 倍以上に高めた半導体薄膜構造の実現などの成果が得られた。

第 2 の超高速性・超省電力性の情報処理技術を目指した研究においては、InP 系ヘテロ接合バイポーラトランジスタおよびバリスティックトランジスタ等の特性向上、超伝導体を用いた基本回路の試作評価、磁気ナノドット形成層を利用した不揮発性メモリデバイスの構造最適化、磁気ナノドットの高誘電率膜や高透磁率膜形成への応用といった成果が得られた。

第 3 の次世代デバイス・システムの基礎を支えるナノプロセス技術の開拓によるナノデバイスの実現を目指した研究においては、高品質結晶成長技術および 1 分子層成長技術を用いた InN 系 LED の試作・評価という成果が得られた。

情報処理および通信網の超高速化、超低消費電力化という要請に応える社会・経済的波及効果としては、高効率 TADF の実現等の画期的な技術革新に基づき、大学と産業界を結びつけた研究開発拠点が設立され、有機 EL デバイスの実用化を産学協同で強力に推し進める

ことになったことが特筆される。また、超高速、超低消費電力 LSI チップについては、シリコン素子上にレーザ光源を作り込んで高速の光配線を実現し、さらにテラヘルツ波発振器を作り込んで LSI チップ間の通信を実現するプロジェクトが、本研究領域の 2 つの研究課題の研究代表者を含む多分野の研究者の共同体制でスタートし、このプロジェクトを推進するための組織が新設され、本研究領域内の相乗効果ももたらされていた。

第 1 章 追跡調査概要

1.1 研究領域の概要

1.1.1 戦略目標

「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」

1.1.2 研究領域概要

近年の情報通信技術の目覚ましい発展は、超高速の通信用トランジスタ、超高集積・低消費電力型の LSI、多様で優れた機能を持つ半導体レーザなど、様々なデバイスの驚くべき進歩によって達成されてきた。本研究領域では、ナノメートル級の超微細構造の形成技術および超集積化技術を活用することにより、情報処理や通信システムの性能を飛躍的に高めることのできる次世代デバイス・システムを創製することを目指した。公募を開始した 2002 年度には 37 件の応募があり、1 次と 2 次の審査を経て 10 件を採択した。2003 年度の追加公募には、12 件の応募があったが、採択に到らなかった。

採択 10 課題は、超高速性・超省電力性を持った「情報通信技術や光素子」を目指した課題および「情報処理技術」を目指した課題からなるが、次世代デバイス・システムの基礎を支えるナノプロセス技術の研究やナノデバイスにおける物理過程の解明と制御に係る研究も含まれている。

1.1.3 研究総括

榊 裕之（豊田工業大学 学長）

1.1.4 領域アドバイザー

表 1-1 領域アドバイザー

領域アドバイザー	所属	役職	任期
鳳 紘一郎	東京大学	教授	2002 年 11 月～2004 年 3 月
長谷川 英機	北海道大学	名誉教授	2002 年 11 月～2008 年 3 月
小林 功郎	東京工業大学	教授	2002 年 11 月～2008 年 3 月
井筒 雅之	（独）情報通信研究機構	高級研究員	2002 年 11 月～2008 年 3 月
岩井 洋	東京工業大学	教授	2002 年 11 月～2008 年 3 月
三村 高志	（株）富士通研究所	フェロー	2002 年 11 月～2008 年 3 月
平山 祥郎	東北大学	教授	2002 年 11 月～2008 年 3 月

（註）所属と役職は本研究領域終了時点

1.1.5 研究課題および研究代表者

研究課題と研究代表者は表 1-2 に記すとおりである。

表 1-2 研究課題と研究代表者

採択 年度	研究課題	研究代表 者	採択時の所属・役職	終了時の所属・役職	追跡調査時の所属・ 役職
2002 年度	量子細線レーザ の作製とデバイス 特性の解明	秋山英文	東京大学物性研究 所 助教授	東京大学物性研究所 准教授	東京大学 物性研究 所 准教授
2002 年度	有機半導体レー ザの構築とデバ イス物理の解明	安達千波 矢	千歳科学技術大学 光科学部 助教授	九州大学未来化学創 造センター 教授	九州大学 未来化学 創造研究センター 教授
2002 年度	低次元量子構造 を用いる機能光 デバイスの創製	荒井滋久	東京工業大学量子 効果エレクトロニ クス研究センター 教授	東京工業大学量子ナ ノエレクトロニクス 研究センター 教授	東京工業大学量子ナ ノエレクトロニクス 研究センター 教授
2002 年度	多価イオンプロ セスによるナノ デバイス創製	大谷俊介	電気通信大学レー ザ新世代研究セン ター 教授	九州大学未来化学創 造センター 教授	電気通信大学 名誉 教授
2002 年度	シフトレジスタ 機能付超高速光 メモリの創製	河口仁司	山形大学工学部 教 授	奈良先端科学技術大 学院大学 物質創成 科学研究科 教授	奈良先端科学技術大 学院大学 物質創成 科学研究科 教授
2002 年度	共鳴磁気トンネ ル・ナノドット不 揮発性メモリの 創製	小柳光正	東北大学大学院工 学研究科 教授	東北大学大学院工学 研究科 教授	東北大学未来科学技 術共同研究センター 教授
2002 年度	半導体スピンエ ンジニアリング	新田淳作	NTT 物性科学基礎研 究所 機能物質科学 研究部 グループリ ーダー	東北大学大学院工学 研究科 教授	東北大学 大学院工 学研究科 知能デバ イス材料科学専攻 教 授
2002 年度	単一磁束量子テ ラヘルツエレクト ロニクスの創 製	藤巻朗	名古屋大学大学院 工学研究科 助教授	名古屋大学大学院工 学研究科 教授	名古屋大学大学院工 学研究科 量子工学 専攻 教授
2002 年度	超ヘテロナノ構 造によるパリス ティック電子デ バイスの創製	古屋一仁	東京工業大学大学 院理工学研究科 教 授	東京工業大学大学院 理工学研究科 教授	東京高専、校長(2010 年4月1日付け)
2002 年度	InN 系窒化物ナノ デバイス／ナノ プロセスの分子 線エピタキシ法 による新展開	吉川明彦	千葉大学電子光情 報基盤技術研究セ ンター センター 長、工学部教授	千葉大学大学院工学 研究科 教授	千葉大学名誉教授

1.2 研究領域終了後の進展と波及効果

1.2.1 研究成果の発展状況や活用状況

本研究領域で戦略目標とした「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」については、超高速性・超省電力性の情報通信技術や光素子を目指した研究、超高速性・超省電力性の情報処理技術を目指した研究、および次世代デバイス・システムの基礎を支えるナノプロセス技術の開拓によるナノデバイスの実現を目指した研究の3つに大別される。

第1の超高速性・超省電力性の情報通信技術や光素子を目指した研究では、熱活性型遅延蛍光(TADF)により励起子生成効率を向上させるという有機 EL デバイス実用化に向けた大きなブレークスルーと、実用化のための企業との連携を図る研究開発センターの設立という進展が特筆される。その他、シフトレジスタ機能を有する4ビット全光型バッファメモリ等の高速光回路創製、低消費電力で、かつ、光閉じ込めを従来の3倍以上に高めた半導体薄膜構造の実現という進展が得られた。

第2の超高速性・超省電力性の情報処理技術を目指した研究では、金属細線および絶縁物を埋め込んだ InP 系ヘテロ接合バイポーラトランジスタ、およびチャネル幅を 15nm に微細化したバリスティックトランジスタ等の遮断周波数や電流密度特性の向上、超伝導体を用いたシストリック・ビットシリアル半精度浮動小数点乗算器(FPM) やトグルフリップフロップ回路等の基本回路の試作評価、高効率にスピン偏極電流を生み出す方法の確立によるデバイス創製の基礎となる手法開発、磁気ナノドット形成層を複数層重ねた構造やコバルトのナノドットと酸化ハフニウムの絶縁膜の組み合わせによる不揮発性メモリデバイスの試作等の構造最適化や磁気ナノドットの高誘電率膜や高透磁率膜形成への応用といった進展が見られた。

第3の次世代デバイス・システムの基礎を支えるナノプロセス技術の開拓によるナノデバイスの実現を目指した研究では、高品質結晶成長技術および1分子層成長技術を用いて、種々の膜構成の InN 系 LED の試作・評価という進展が見られた。

全体として、本研究領域においては、有機発光半導体の分野でデバイス実用化に向けた大きなブレークスルーと企業との連携の進展が得られ、その他の多くの分野でデバイス実用化に向けた試作評価および物理過程の理論的解明についての進展が見られた。

さらに研究領域間の連携として、LSI チップの計算速度の向上と消費電力の大幅削減を実現するために、シリコン素子上にレーザ光源を作り込んで高速の光配線を実現し、さらにテラヘルツ波発振器を作り込んでLSI チップ間の通信を実現する研究がスタートしたことは、異なる分野の研究者の協力のもと、社会インフラとしての情報通信レベルを大きく発展させる展開として特筆される。

1.2.2 研究成果の科学技術的および社会・経済的な波及効果

(1) 科学技術の進歩への貢献

第1の超高速性・超省電力性の情報通信技術や光素子を目指した研究においては、実用化の進展に寄与する科学的知見とともに、デバイス性能の向上に寄与する数多くの科学技

術的成果が得られた。有機 EL デバイスについては、TADF により励起子生成効率を向上させるという、発光特性の飛躍的向上を実現する大きなブレイクスルーが得られ、異なる 2 つの分子の会合体によって発生するエキサイプレックス発光を利用し、電流励起による高効率発光で世界トップレベルの成果を得た（安達）。超高速光メモリについては、酸化狭窄構造を導入して従来より 1 桁低いバイアス電流での偏光双安定動作を実現し、また、シフトレジスタ機能を有する $1.55\mu\text{m}$ 帯 4 ビット全光型バッファメモリを試作した（河口）。低次元量子構造光デバイスについては、細線構造による活性層分離型 DFB レーザや分布反射型 (DR) レーザを取り込んだ構造とし、さらに、クラッド層に屈折率が低い透明誘電体を用いて光閉じ込めを従来の 3 倍以上に高めた半導体薄膜構造を実現した（荒井）。

第 2 の超高速性・超省電力性の情報処理技術を目指した研究においては、基本回路、基本素子の試作、材料、構造の最適化等に関する知見が得られた。バリスティック電子デバイスについては、半導体中に埋め込んだ金属細線および絶縁物をコレクタ領域周囲に埋め込んだ構造の InP 系ヘテロ接合パイポーラトランジスタ、およびチャネルメサ幅を 15nm に微細化したバリスティックトランジスタ等を試作し、遮断周波数や電流密度特性の向上を実現した（古屋）。単一磁束量子エレクトロニクスについては、超伝導体を用いた FPM およびトグルフリップフロップ回路の試作評価を行い、それぞれクロック周波数 25GHz および 500GHz までの動作に成功した（藤巻）。半導体スピンエンジニアリングについては、半導体のみを用いて高効率にスピン偏極電流を生み出す方法を確立した（新田）。ナノドット不揮発性メモリについては、磁気ナノドット形成層を複数層重ねた構造やコバルトのナノドットと酸化ハフニウムの絶縁膜の組み合わせによる不揮発性メモリデバイスの試作等の構造を最適化して 2 ビットセルの可能性を確認した（小柳）。

第 3 のナノプロセス技術の開拓によるナノデバイスの実現を目指した研究においては、高品質結晶成長技術および 1 分子層成長技術を用いて、種々の膜構成の InN 系 LED の試作・評価を行い、In/InGa_N の量子井戸 LED 構成による紫色から緑色に渡る発光 (410nm~530nm) を実現し、電荷キャリアの挙動がフォノン・プラズモン結合を考慮したモデルで説明できることを明らかにした（吉川）。多価イオンのナノ領域への入射技術および高価数多価イオンの高効率生成法の開発を行って、多価イオン照射によるグラファイトの正磁性が発現することを明らかにした（大谷）。

(2) 社会・経済的波及効果

光科学技術はレーザの発明を機に飛躍的に発展し、その応用分野は非常に多岐に渡っている。それらの光量増加や消費電力低減など、いっそうの性能向上のためには、光と物質の関わりについて新たな視点で見直し、光の潜在力をさらに引き出す新技術の研究開発が必要である。そのため、分光学・量子光学、半導体デバイス工学、ナノ材料化学と量子多体系理論などの密接な連携によって、物質の励起状態に生じる多数の電子間の相互作用や量子力学的位相相関電子系の挙動を理解し制御する必要がある。

また、通信網の消費電力は年々増加しており、大きな問題となっている。通信の高速化に寄与している光通信においても、通信経路の途中で、いったん電気信号に変換する必要があるために、そのための電力消費と処理時間とを要している。伝送路上での光-電気変換の必要性のない新たな全光型通信が実現すれば、より一層の信頼性向上、高速化、消費

電力削減につながり、情報通信産業にとって大きな意義がある。

これらの社会的要請に応えうる、超高速性・超省電力性の情報通信技術や光素子を目指した研究においても、革新的デバイスの創製につながる成果が得られた。

有機 EL 素子において、高効率 TADF の実現と新機構有機 EL への展開を図り、りん光発光と同等以上の発光特性を実現したこと（安達）は画期的な技術革新であり、研究開発拠点として最先端有機光エレクトロニクス研究センター（OPERA）が 2010 年に設立され、また、有機光エレクトロニクス実用化開発センター（i³-OPERA）が 2013 年に設立されるなど大学と産業界を結びつけて実用化を推進する体制が作られた。TADF を使った有機 EL パネルは、レアメタルを使用するりん光材料に比べて製造コストが約 10 分の 1 であり、韓国等とのコスト競争でも優位で、産業競争力の面でも効果が大きい。国内パネル事業会社との共同研究も決定し、さらに有機半導体レーザ、有機太陽電池、有機トランジスタ、有機メモリ等の次世代有機半導体デバイスへの展開にもつながりうる技術である。

超高速、超低消費電力 LSI チップについては、シリコン素子上にレーザ光源を作り込んで高速の光配線を実現し、さらにテラヘルツ波発振器を作り込んで LSI チップ間の通信を実現するプロジェクトが、本研究領域の 2 つの研究課題の研究代表者（荒井、古屋）を含む多分野の研究者の共同体制でスタートし、このプロジェクトを推進するための組織として、東京工業大学に「量子ナノエレクトロニクス研究センター」が設立された。

T 型量子細線で低い閾値を得るとともに、実験とよい一致を示す定量的な利得の理論計算を行ったこと（秋山）は、ナノ細線構造の光デバイス応用の発展の基盤となる。

また、超高速光メモリについては、光信号のまま一時蓄えて送り出すタイミングを制御する光バッファメモリなどの素子開発が進められ（河口）、伝送路上での光－電気変換を必要としない全光型通信を実現する基盤となる。

一方、近年、情報社会を牽引してきたシリコン半導体の限界が現実味を帯びて議論されるようになってきた。現在の微細化技術が物理的な壁にぶつかって早ければ 2020 年ごろには新しい原理のデバイスが必要になるとの見方が高まっている。また、不揮発性半導体メモリの中心的な位置を占めているフラッシュメモリに代わる高速処理可能でより低消費電力のデバイスとして MRAM、ReRAM、PRAM など数種類の候補があり、それらの開発が多くの企業、研究機関により推進されている。これらの課題を克服する技術候補は、電子が持つ電荷とスピンの両方を工学的に利用、応用するスピントロニクス、あるいは、半導体回路などと比較して桁違いの低電力かつ高速性を実現できる可能性がある超伝導素子を利用した回路などである。超高速、超低消費電力という特長を有するスピンを利用したトランジスタなどが実現すれば、電子機器の一層の高速化、低消費電力が期待でき、情報処理産業にとって大きな革新に繋がる技術となる。

超高速性・超省電力性の情報処理技術を目指した研究においても、これらの社会的要請に応えうる革新的デバイスの創製を目指し、以下のそれぞれの領域において、社会的・経済的に有用なデバイス応用につながる取り組みがなされた。

半導体スピンエンジニアリングについては、半導体のみを用いて高効率にスピン偏極電流を生み出す方法を確認するなど（新田）、スピントロニクスの基礎的知見を広げ、スピン制御によるデバイス応用につながる。

ナノドット不揮発性メモリについては、高密度ナノドットの形成技術に加えて、大きな

保磁力を持つ磁性ナノドットを実現する成果を得ており、また、磁気ナノドットを用いた高誘電率膜や高透磁率膜の形成により三次元回路において重要な受動素子の飛躍的特性改善を実現する成果を得ており（小柳）、演算回路と記憶回路とを積み重ねて、処理速度が100倍、消費電力が10分の1以下にできる三次元集積化回路に組み込むことによって、大規模複合化集積回路の超高速化、低電力化に繋がる技術となる。

超伝導単一磁束量子回路については、Nb および高温超伝導体を用いた回路が試作されており（藤巻）、シリコン LSI の限界を越えた情報処理システムの構築への可能性につながるものである。

現在、青色ないし緑色発光デバイスには Ga を含むものが主であるが、Ga は主に中国、カザフスタン、ウクライナに偏在している。カントリーリスクからは、その他の元素材料に代替したデバイスの開発が望ましく、InN 系発光デバイスの実用化が可能になれば、有用なデバイス応用展開につながる（吉川）。

第 2 章 追跡調査

2.1 追跡調査について

2.1.1 調査の目的

追跡調査は、研究領域終了から一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況を明らかにし、科学技術振興機構（JST）の事業および事業運営の改善に資するために行うもので、研究終了後の研究代表者の研究課題の発展状況等を、JST 提供資料「平成 21 年度 戦略的創造研究推進事業（ナノテクバーチャルラボ）に係る成果論文展開調査」も含めて調査した。

2.1.2 調査の対象

本追跡調査は CREST 研究領域「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・システムの創製（2002～2007 年度）」の研究代表者全員を対象とする。表 2-1 に調査対象と調査対象期間を示す。

表 2-1 調査対象と調査対象期間

採択年度	研究領域期間	追跡調査対象期間	研究課題数
2002 年度	2002 年 11 月～2008 年 3 月	2008 年 4 月～2012 年 9 月	10

2.1.3 調査の方法

(1) 研究助成金

研究終了以降に、研究代表者が代表もしくはそれに相当する立場（総括研究者、プロジェクトリーダー等）で獲得した外部研究資金を調査した。

対象となる外部研究資金と調査方法は以下の通りである。

① 科研費

科学研究費助成事業データベース (<http://kaken.nii.ac.jp/>) から、研究代表者が代表となっている研究課題を検索した。さらに、本プロジェクト研究の規模から継続・発展が図られているかという観点から、大型（1 千万円／件 以上）のものを抽出した。

② JST 事業

JST ホームページ (<http://www.jst.go.jp/>) のサイト内検索で研究代表者の情報を検索し、本研究領域終了以降に研究代表者が代表となって採択された事業もしくはプロジェクト（研究領域の総括としての関与は含まない）を抽出した。

③ NEDO プロジェクト

NEDO ホームページ (<http://www.nedo.go.jp/>) のサイト内検索、および成果報告書データベース (<https://app5.infoc.nedo.go.jp/disclosure/Login>) から、研究代表者の情報を

検索し、本研究領域終了以降に代表者、もしくはプロジェクトリーダー等として実施しているプロジェクトの有無を確認した。

④ 最先端・次世代研究開発支援プログラム

最先端研究開発支援プログラム (FIRST) のホームページ (<http://first-pg.jp/about-us/about-30.html>) および最先端・次世代研究開発支援プログラムのホームページ (<http://www.jsps.go.jp/j-jisedai/life.html>) から、研究代表者の採択実績を確認した。

(2) 論文

研究期間中および研究終了以降の研究代表者の発表論文について、Scopus (Elsevier) の名寄せ機能を用いて検索を行った。

終了以降の論文のうち、著者名だけでは研究代表者の論文と特定できない場合には、所属機関の情報や内容から絞り込みを行った。

次に、研究期間中および研究終了以降の論文数を求めた。研究終了以降の論文については Article と Review に絞り込み、さらに研究代表者が筆頭著者 (1st Author) もしくは責任著者 (Last Author) となっている論文 (以下「責任著者論文」) の数を求めた。

(3) 特許

研究期間中出願特許の成立および海外出願の状況と、研究終了以降の国内・海外出願特許について調査した。国内特許の出願・成立状況の検索・確認には、国内特許公報 ATMS を、海外 (国際) 出願・成立状況の検索・確認には、欧州特許庁の esp@cenet を用いた。

研究期間中に出願特許については、まず国内出願特許の成立状況を国内特許公報 ATMS で確認した。次に、その出願を優先権とする国内・海外 (国際) 出願と成立状況を esp@cenet で確認した。

研究終了以降の出願特許については、研究代表者が発明者に含まれる国内出願特許を検索し、成立状況を確認した。海外 (国際) 出願と成立状況については、研究期間中出願特許の確認方法に準じ、esp@cenet を用いて行った。

2.2 アウトプット概要

2.2.1 研究費

表 2-2 に、研究費獲得状況を示した。

10 課題の研究代表者のうち、その後代表者等としての研究費獲得が確認されたのは 9 名であった。

まず特筆すべきは安達千波矢で、NEDO「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」(BEANS プロジェクト) では、研究項目「バイオ・有機材料融合 プロセス技術の開発」のなかで、有機半導体を中心とする機能性有機材料を対象に、有機材料ナノ界面融合プロセス技術、及びバイオ・有機材料高次構造形成プロセス技術の開発に取り組んでいる。また、FIRST に「スーパー有機 EL デバイスとその革新的材料への挑戦」が採択され、

研究開発拠点である OPERA が 2010 年に設立され、京都大学や広島大学など 10 の大学と新日鉄化学や東芝など 9 社が参画して大学と産業界を結びつけて実用化を推進する体制が作られた。

JST 先端的低炭素化技術開発 (ALCA) に採択された研究代表者が 2 名おり、藤巻朗は「超伝導システム」分野の「低エネルギー情報ネットワーク用光・磁気・超伝導融合システム」(2011 年度採択) の中で、新しい単一磁束量子回路を採用したマイクロプロセッサや高速メモリの開発、磁性体を利用した新しい大容量メモリの開発、さらに、超伝導単一光子検出器を利用した光入力技術も取り入れ、データセンターの核となる信号処理システムの低消費エネルギー化を目指した研究開発を行っている。吉川明彦は「太陽電池および太陽エネルギー利用システム」分野の「マジック超構造による窒化物太陽電池スマートイノベーション」の中で、窒化物半導体の独創的なスマートイノベーションにより、変換効率 50 % のタンデム太陽電池実現の基盤技術開拓を目指している。いずれも本研究領域の超省電力デバイスというコンセプトを、低炭素化技術として展開している。

小柳光正は、JST CREST 研究領域「ディペンダブル VLSI システムの基盤技術」領域に研究課題「自己修復機能を有する 3 次元 VLSI システムの創製」が採択され (2009～2014 年度)、この中で 3 次元 LSI 技術と超並列処理技術を駆使して、自己修復・自己組織化・自己調整・再構成・自己診断などの機能を有する新しいディペンダブル VLSI を世界に先駆けて開発することを目指している。

河口仁司は、「高次機能半導体フォトリックデバイスを用いた全光型パケットスイッチノードに関する研究」が情報通信研究機構 (NICT) 国際共同研究助成金を受け、ケンブリッジ大学ほかと国際共同研究を行っている。

表 2-2 研究代表者の研究助成金獲得状況

A. 助成金リスト																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
-----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

2.2.2 論文

原著論文発表数の推移は、研究者の研究活動状況を示す最も的確かつ重要な指標の一つであると考えられるため、表 2-3 に、各研究代表者別に研究期間中と研究終了以降の発表論文を期間等で分類して示した。表中、研究期間中の論文数を①に、うち研究代表者の論文数を②に、研究終了後の研究代表者の論文数を③に、うち研究代表者が責任著者である論文数を④に示した。

研究領域期間中の全論文数は、終了報告書に記載のある論文のうち、2009 年に行ったナノテクバーチャルラボ（以下 NTVL と記す）成果論文展開調査で、データベース（使用データベースは Web of science）に収録のあるものをカウントした結果、本研究領域では 573 報であり、うち研究代表者の論文数②は 292 報である。本研究領域終了後の研究代表者の論文数③は 299 報であり、②と③を比較すると、ほぼ同数となった。個別に見ると、安達（52 報→96 報）の増加が際立っており、研究の大きな進展を意味している。

本研究領域終了後の論文で研究代表者が責任著者となっている論文は 233 報であり、8 割近くに及んでいる。全体として、本研究領域期間中と同等のペースで活発な研究発表が行われ、その多くで研究代表者自身が中心となって研究を進めていることを示している。

表 2-3 研究者の論文（原著論文）数

採択 年度	研究課題	研究代表者	① 研究期 間中の 論文数	② ①のうち 研究代表 者の 論文数	③ 研究 終了後の 論文数	④ 研究 終了後の 責任著者 論文数
2002 年度	量子細線レーザーの作製とデバイス特性の解明	秋山 英文	65	47	13	2
2002 年度	有機半導体レーザーの構築とデバイス物理の解明	安達千波矢	52	52	96	75
2002 年度	低次元量子構造を用いる機能光デバイスの創製	荒井 滋久	41	27	31	31
2002 年度	多価イオンプロセスによるナノデバイス創製	大谷 俊介	46	38	23	9
2002 年度	シフトレジスタ機能付超高速光メモリの創製	河口 仁司	43	14	18	18
2002 年度	共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの創製	小柳 光正	79	13	36	33
2002 年度	半導体スピンエンジニアリング	新田 淳作	52	28	25	23
2002 年度	単一磁束量子テラヘルツエレクトロニクスの創製	藤巻 朗	91	8	20	12

2002 年度	超ヘテロナノ構造によるバリ スティック電子デバイスの創 製	古屋 一仁	32	13	9	8
2002 年度	InN 系窒化物ナノデバイス／ ナノプロセスの分子線エピタ キシ法による新展開	吉川 明彦	72	52	28	22
	合計		573	292	299	233

データ取得日 ①、②は 2009 年 10 月（NTVL 成果論文展開調査）

③、④は 2012 年 9 月

2.2.3 特許

特許出願件数は、研究から産業への、ひいては社会への貢献度を示す重要な指標の一つであると考えられる。中でも、特許成立数は、独創性、進歩性、産業への活用の可能性を客観的に認められたものであり、特に重要な産業への貢献度を示す指標と考えられる。

表 2-4 に、各研究代表者の研究期間中、および研究終了以降の出願件数、成立件数を国内出願と国際出願に分けて示した。

本研究領域は実用化を強く意識した領域であり、研究期間中・終了以降を通じて、全研究代表者が特許出願を行っていた。出願件数が突出しているのが安達で、研究期間中は国内 13 件・海外 5 件の特許を出願し、研究終了以降は研究期間中を上回るペースで出願を行っている。表 2-5 に示したように特許の成立については、安達・吉川は国内よりも海外での成立が多い。世界的に競争が激しく、技術の進歩も早い分野であることから、戦略的に海外での権利化を重視していることも考えられる。

表 2-4 研究期間中・終了以降の特許出願・成立状況

採択 年度	研究代表者	研究期間中				研究終了以降			
		出願件数		登録件数		出願件数		登録件数	
		国内	海外 (国際)	国内	海外 (国際)	国内	海外 (国際)	国内	海外 (国際)
2002 年 度	秋山 英文	3	0	2	0	0	0	0	0
	安達 千波夫	13	5	0	2	26	7	0	0
	荒井 滋久	0	0	0	0	4	0	0	0
	大谷 俊介	2	1	2	1	2	2	0	0
	河口 仁司	3	1	2	0	1	0	0	0
	小柳 光正	2	1	0	0	7	2	0	1
	新田 淳作	5	0	5	0	7	0	0	0
	藤巻 朗	2	0	1	0	0	0	0	0
	古屋 一仁	1	1	0	0	0	0	0	0
	吉川 明彦	6	7	2	4	5	0	1	0
領域全体		37	16	14	7	52	11	1	1

データ取得日：2012 年 9 月

表 2-5 研究期間中および終了後の成立特許

秋山 英文

区 分	出願番号	公開番号	登録 番号 (国内)	発明の名称	出願人／ 権利者	発明者	海外での 成立
期 間 中	2003-162987	2004-333457	4052389	複数の発光成分の発光量測定法およびその発光測定装置	アトー株式会社	秋山 英文 近江谷克裕 榎本 敏照 堀 隆司 久保田英博	
	2006-025047	2007-183229	4883501	総発光量測定基準容器および測定方法	アトー株式会社、国立大学法人東京大学、独立行政法人産業技術総合研究所	秋山 英文 安東 頼子 近江谷克裕 久保田英博	

安達 千波矢

区 分	出願番号	公開番号	登録 番号 (国内)	発明の名称	出願人／ 権利者	発明者	海外での 成立
期 間 中	2005-258587			有機色素固体レーザー	独立行政法人科学技術振興機構	中野谷一 安達千波矢	KR1009743 22
	2007-212863	2009-048837	5079421	有機エレクトロルミネッセンス素子および有機レーザーダイオード	国立大学法人九州大学、ローム株式会社	横山 大輔 中野谷一 八尋 正幸 安達千波矢 瀬戸口陽介 守分 政人 大西 大	US7965037

大谷 俊介

区分	出願番号	公開番号	登録番号 (国内)	発明の名称	出願人／ 権利者	発明者	海外での 成立
期間中	2004-296890	2006-108054	4868330	多価イオン発生源およびこの発生源を用いた荷電粒子ビーム装置	独立行政法人科学技術振興機構	櫻井 誠 中嶋 史晴 福本 卓典 中村 信行 大谷 俊介 益子 信郎	US7544952
	2005-125806	2006-302785	4747361	多価イオン照射装置及びそれを用いた微細構造の製造方法	独立行政法人科学技術振興機構	戸名 正英 大谷 俊介 櫻井 誠	

河口 仁司

区分	出願番号	公開番号	登録番号 (国内)	発明の名称	出願人／ 権利者	発明者	海外での 成立
期間中	2002-340372	2003-337355	4368573	双安定半導体レーザを用いた超高速光メモリ装置	独立行政法人科学技術振興機構	河口 仁司	
	2003-299463	2005-069845	4439857	光パルスの位相測定方法及び装置	独立行政法人科学技術振興機構	森 隆 河口 仁司 片山 健夫	

小柳 光正

区分	出願番号	公開番号	登録番号 (国内)	発明の名称	出願人／ 権利者	発明者	海外での 成立
終了以降	2012-056531 (2006-53187 1の分割)	2012-129551		三次元積層構造を持つ半導体装置の製造方法	株式会社ザイキューブ	小柳 光正	CN1017145 12

新田 淳作

区分	出願番号	公開番号	登録 番号 (国内)	発明の名称	出願人／ 権利者	発明者	海外での 成立
期間 中	2004-029863	2005-223158	4480411	トンネル接合体およびトンネル接合体を用いたメモリ	日本電信電話株式会社	新田 淳作 関根 佳明	
	2004-054788	2005-244097	4477901	スピンフィルタおよびスピン状態分離方法	日本電信電話株式会社、 ポール ドルーデ インステイテュー ト フィア フェストケ ルパーエレ クトロニ ク イム フォーション グスフェル ブント ベル リン イーブイ	新田 淳作 寒川 哲臣 パウロ・サントス	
	2004-207689	2006-032569	4700933	スピンフィルタ及びスピン状態分離方法	日本電信電話株式会社	新田 淳作 赤崎 達志	
	2004-207692	2006-032570	4700934	スピンフィルタ及びスピン状態分離方法	日本電信電話株式会社	新田 淳作 赤崎 達志	
	2005-185332	2007-005641	5030397	スピントランジスタ	日本電信電話株式会社	赤崎 達志 高柳 英明 新田 淳作	

藤巻 朗

区分	出願番号	公開番号	登録番号 (国内)	発明の名称	出願人／ 権利者	発明者	海外での 成立
期間中	2005-028917	2006-216831	4863622	ジョセフソン 接合の作製方法、及びジョセフソン接合	独立行政法人科学技術 振興機構	谷池浩一郎 井上 真澄 藤巻 朗	

吉川 明彦

区分	出願番号	公開番号	登録番号 (国内)	発明の名称	出願人／ 権利者	発明者	海外での 成立
期間中	2007-19584	2008-211197	5024765	酸化物基板の 清浄化方法及 び酸化物半導 体薄膜の製造 方法	株式会社フ ジクラ、国 立大学法人 千葉大学	貝淵 良和 大道 浩児 藤巻 宗久 吉川 明彦	
	2005-178650	2006-351974	4491610	半導体機能素 子	国立大学法 人千葉大学	崔 成伯 吉川 明彦 石谷 善博	
	2003-314057	2004-140339		窒化物系ヘテ ロ構造を有す るデバイス及 びその製造方 法	千葉大学長	吉川 明 彦徐 科	US6856005 TWI228337 KR1005762 79 CN1282257
終了以降	2008-018263	2008-211197	5024765	酸化物基板の 清浄化方法及 び酸化物半導 体薄膜の製造 方法	株式会社フ ジクラ、国 立大学法人 千葉大学	貝淵 良和 大道 浩児 藤巻 宗久 吉川 明彦	

2.3 アウトカム

2.3.1 科学技術的アウトカム

(1) 受賞

学会賞・学術賞の受賞歴は、研究内容あるいは成果に対する評価を図る指標の一つとなる。表 2-6 に、本研究領域終了以降の研究代表者の受賞歴を示した。

10 名の研究代表者のうち、何らかの受賞歴が確認されたのは 6 名であった。科学技術の振興に寄与する活動を行い、顕著な功績があった者に贈られる文部科学大臣表彰が 2 名(荒井、河口)を始め、継続的な学会活動への貢献によるフェロー表彰を、応用物理学会(荒井、古屋、吉川)、米国電気電子工学会(IEEE)(荒井、古屋)、電子情報通信学会(荒井)、日本工学会(小柳)から受けている。

安達が 2010 年に Applied Physics Letters に発表した論文は、同年に同誌に発表された論文の Top 20 Most Download Articles に選ばれている(詳細は次項で示す)。

小柳は、半導体工学の分野において、高集積・大容量半導体メモリ DRAM の基本素子であるスタックド・キャパシタ型メモリセル(スタックセル)の発明、世界に先駆けて三次元集積型集積回路の試作に成功するなど、日本および世界の半導体産業の発展における貢献が評価され、2011 年の紫綬褒章を受賞した。

表 2-6 受賞リスト

受賞者	賞の名称	受賞年
安達 千波矢	Applied Physics Letters Top 20 Most Download Articles	2009
	ACOE2010 Best Poster Award	2010
荒井 滋久	平成 19 年度 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ賞	2008
	文部科学大臣表彰 科学技術賞	2008
	応用物理学会フェロー	2008
	米国電気電子工学会(IEEE) フェロー	2010
	電子情報通信学会業績賞	2011
	電子情報通信学会フェロー表彰	2011
河口 仁司	KDDI 財団 優秀研究賞	2009
	文部科学大臣表彰 科学技術賞	2011
小柳 光正	エレクトロニクス実装学会創立 10 周年記念功労賞	2008
	紫綬褒章	2011
	日本工学会フェロー	2011
	IEEE Electronic Components and Technology Conference(ECTC) Outstanding Session Paper Award	2011
古屋 一仁	応用物理学会フェロー	2009
	米国電気電子工学会(IEEE) フェロー	2009
吉川 明彦	応用物理学会フェロー	2008

(2) 学会への貢献

荒井と古屋は、継続的な学会活動への貢献により、応用物理学会フェロー表彰と、IEEE のフェロー表彰を受けた。吉川明彦も応用物理学会フェロー表彰を受けている。さらに、荒井は電子情報通信学会から、小柳は日本工学会から、それぞれフェロー表彰を受けている。

藤巻は、電子情報通信学会の超伝導エレクトロニクス研究会の専門委員長を 2009 年度に、河口は同学会のレーザ・量子エレクトロニクス研究会の専門委員長を 2010 年度に務めた。

吉川は、日本学術振興会ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第 162 委員会の委員長を務めている（2011 年 4 月～2016 年 3 月）。

(3) 共同研究・技術指導等

新田は、NTT、ポール・ドルーデ固体エレクトロニクス研究所（ドイツ）との共同研究で、電子スピンの向きを超音波によって制御する実験に世界で初めて成功した（2011 年 5 月 30 日東北大学 ニュースリリース）。

荒井と古屋は、本研究での研究成果を基礎として、新たな研究方向である「電子と光、テラヘルツという三つの信号を組み合わせる新型回路」を開発する研究が文部科学省の特別推進研究に選定された。新型素子は従来の電子に加えて LSI 内の信号伝送路に光配線を活用し、LSI チップ間はテラヘルツ波でやり取りするものであり、計算速度の向上と消費電力の低減が実現する（2008 年 6 月 16 日日経産業新聞）。

2.3.2 社会・経済的アウトカム

(1) 新聞報道等

安達が開発した、りん光発光と同等以上の発光特性を有する TADF は画期的な技術革新であり、研究開発拠点である OPERA が 2010 年に設立され、京都大学や広島大学など 10 の大学と新日鉄化学や東芝など 9 社が参画して大学と産業界を結びつけて実用化を推進する体制が作られた。レアメタルを使わない TADF を使った有機 EL パネルは、リン光材料を使ったものに比べて製造コストが約 10 分の 1 であり、サムスンなど韓国勢とのコスト競争でも有利である。2012 年には事業を開始したばかりの国内中小型パネル事業の統合会社、ジャパンディスプレイも OPERA での共同研究に参画することを決定した。このように、学理上の成果だけでなく、有機 EL の特長を生かした応用が、携帯電話やスマートフォンを始めとして、次世代の高精細ディスプレイ、照明、デジタルサイネージなどの分野に広がり、21 世紀の環境適応型技術として産業上の意義が大きいと報じられた（2012 年 7 月 25 日日経産業新聞）。

河口は、偏光方向を自在に切り替えられる面発光レーザを用いて、光信号を一時蓄えて送り出す時期を調整する素子、および一ビットの信号を切り替えられる素子を 4 個つないだ 4 ビット処理装置などを試作した。これらは光信号だけで制御する光通信網の実現に役立つと報じられた（2009 年 3 月 27 日日経産業新聞）。

新田が開発した、強磁性体や外部磁場を用いずにスピンの揃った電流を生成する方法など、半導体中での電子スピンの向きを制御する手法は、スピンの向きをデータ記憶に利用

できる可能性を拓くものであり、次世代省電力・高速半導体トランジスタ実現に向けたブレークスルーとなる（2009 年 6 月 5 日日経産業新聞）

(2) アウトリーチ活動

安達がセンター長を務める OPERA では、中高生を対象として科学の魅力を伝える市民講座を毎年開催しており、講演会やラボツアーを行っている。

新田は、FIRST の「量子情報処理プロジェクト」（中心研究者：山本喜久（スタンフォード大学教授））におけるアウトリーチ活動の一環として行われた「半導体量子効果と量子情報の夏期研修会」（第 2 回、2012 年 8 月）に、関連分野で先端を走る研究者として招待講演に招かれ、若手研究者や学生を主な対象とした講演を行った。

第 3 章 各研究課題の主な研究成果および波及効果

3.1 2002 年度採択課題

3.1.1 量子細線レーザの作製とデバイス特性の解明（秋山 英文）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

2 つの量子井戸の平面シートを T 字型に直交して配置すると、紙面に垂直な交線上に 1 次元量子構造（量子細線）を精密なサイズで作ることができる。本研究では、界面揺らぎの少ない均一なへき開再成長 T 型量子細線レーザを、独自の成長中断アニール法を用いて作製し、低発振閾値電流や高微分利得など、超高速・超省電力に直接結びつく優れた性能を実証するとともに、1 次元電子系に特有の物性やデバイス特性を解明するための物理計測をも詳細に行い、量子細線レーザ発振の起源・特性および擬 1 次元高密度電子-正孔状態での多体電子相関効果を明らかにするために、実験と理論の両面から取り組んだ。

② 期間中の研究成果

- (i) 電流注入レーザ発振は、30-70K にわたる温度領域において良好なシングルモード発振を示し、30K において発振閾値電流が 0.27mA と小さく、低温ではあるがこれまで報告された T 型量子細線の結果よりも低い閾値を得た。
- (ii) 1980 年代初めに我国の研究者らによって提案・予言された「半導体レーザの活性層を低次元化すれば非常に閾値の低いレーザが実現できる」という命題を、低温領域においてではあるが科学的に証明することが出来た。
- (iii) 量子細線レーザの利得メカニズムについて、量子細線を高品質化したことで、曖昧さの無いデータが得られ、励起子分子や、多体クーロン相互作用の影響をうけた電子正孔プラズマの寄与が明確になった。
- (iv) 多体クーロン相互作用をハートリーフォックレベルの近似で取り入れた定量的な利得の理論計算ができ、それが実験とよい一致を示したことは、このレーザ理論が有効であり、今後、さまざまな量子閉じ込めを受けて多体相互作用の影響が強まった半導体レーザの解析の強力なツールとして使えることを示した。

これらの成果は、学術論文が英文 68 件/和文 0 件、口頭発表が国際会議 14 件/国内会議 80 件、ポスター発表が国際会議 35 件/国内会議 39 件として纏められ、国内外に積極的な発信を行った。なお、招待講演は国際会議 8 件/国内会議 8 件、受賞 3 件である。特許は、共同研究企業との連名の関連出願が 3 件である。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト(3 報以内)

- 1) Hayamizu Y., Yoshita M., Takahashi Y., Akiyama H., Ning C. Z., Pfeiffer L. N., West K. W., "Biexciton gain and the Mott transition in GaAs quantum wires", *Phys.*

Rev. Lett. 99, 167403 (2007)

- 2) Ihara T., Hayamizu Y., Yoshita M., Akiyama H., Pfeiffer L. N., West K. W., "One-dimensional band-edge absorption in a doped quantum wire", *Phys. Rev. Lett.* 99, 126803 (2007)
- 3) Huai P., Akiyama H., Tomio Y., Ogawa T., "Coulomb Enhancement and Suppression of Peak Gain in Quantum Wire Lasers", *Jpn. J. Appl. Phys.* 46, L1071-L1073 (2007)

(2) 研究終了後の継続と発展状況

本研究では量子細線レーザの作製とデバイス特性の解明の両面から研究が実施されたが、終了後の研究では、量子細線レーザのデバイス特性の理論的解明に重点が置かれている。

本研究終了後に、科研費基盤研究(B)「低閾値量子細線レーザの作製とその発振特性の物理」(2008年度～2010年度)〈Pj.1〉(以下、各研究代表者ごとに得た研究助成金に連番を付す)、科研費新学術領域研究(研究領域提案型)「低次元半導体レーザの低閾値光学利得と高速光非線形性」(2008年度～2012年度)〈Pj.2〉、科研費 特別研究員奨励費「クリーン量子井戸及び量子細線半導体レーザにおける次元性とキャリア間相互作用」(2009年度～2011年度)〈Pj.3〉、科研費 特別研究員奨励費「利得スイッチングによる半導体量子構造レーザからの短光パルス発生」(2010年度～2011年度)〈Pj.4〉、及び科研費基盤研究(B)「多体クーロン相互作用を含む利得理論計算の実用化と高品質量子細線レーザによる検証」(2011年度～2013年度)〈Pj.5〉などの競争的資金を得て、量子細線レーザの研究を展開している。

また、微細なナノ構造の発光を高感度に検出する技術、絶対量を定量計測する技術を発光生物に適用した研究は、本研究終了後に開始された科研費萌芽研究(→挑戦的萌芽研究)「生物発光スペクトル絶対定量分光計測とホタル発光色決定機構」(2008年度～2009年度)〈Pj.6〉に発展している。

① 科学技術の進歩への貢献

(i) T型量子細線の特性解析と作製・評価技術改良

本研究での成果をもとに、0.27mA程度の低閾値で発振可能なへき開再成長 T型量子細線(図 3-1)のレーザ発振特性と光学物性を計測し、理論予測どおりかを確認した。

光励起により半導体レーザ中にキャリア生成を行った場合は中性の電子正孔系が形成されるが、p-n 接合から電流注入を行った場合には一般に非中性の電子正孔系が形成される。そこで、同一の量子細線 LD 試料(量子細線部 6nm x 14nm)に対して、光励起と電流注入により励起を行って導波路放光スペクトルを測定し、

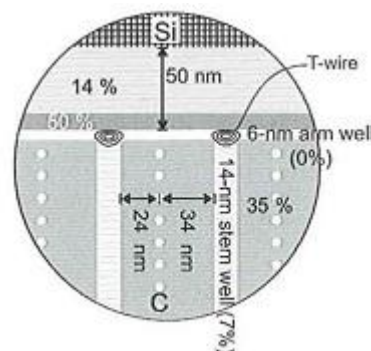


図 3-1 T型量子細線の構造

そこから利得スペクトルを求めたところ、中性電子正孔系の形成が期待される光励起の場合は従来のノンドーブ系で得られている利得の特徴をよく再現した。一方、電流注入の場合には、利得ピークのレッドシフトやブロードニングなど新たな特徴が観測され、非中性電子正孔系における余剰キャリアの影響すなわち遮蔽クーロン相互作用の結果として解釈された^{2), 4)}。<Pj. 1><Pj. 2> (図 3-2)

さらに、光学利得における余剰キャリアの影響をより明確に見るために、n 型変調ドーブによって余剰電子ガスを有する単一量子細線レーザとノンドーブの同型試料とを作製し、高反射コートを施したうえで光励起によって利得の形成の様子を比較した。非中性系では状態占有のため非常に低い光励起密度において利得が発生し、低閾値でレーザ発振することが観測された。また、得られた利得スペクトルは、静的遮蔽ハートリーフォック計算と良い一致を示した。<Pj. 1>

また、良質の T 型量子細線半導体レーザの開発を進めるにあたって、より迅速かつ効率のよい物性計測を行うため、試料を加工する前に試料全体の PL 計測評価を行って高品質な領域を選別し、ホルダーから取り外してクリーニングを行って後のプロセスに用いるという、新しい評価および加工プロセスを確立した。また、T 型量子細線を作製する上で必須のへき開再成長法を行うために、MBE 装置に試料マウント、へき開用治具、試料アライメント用光学測定系などの改良を施した。へき開再成長試料の評価においても、これまで蓄積されてきた独自の評価手法に改良を加え、効率のよい導波路評価法の開発を進めた。

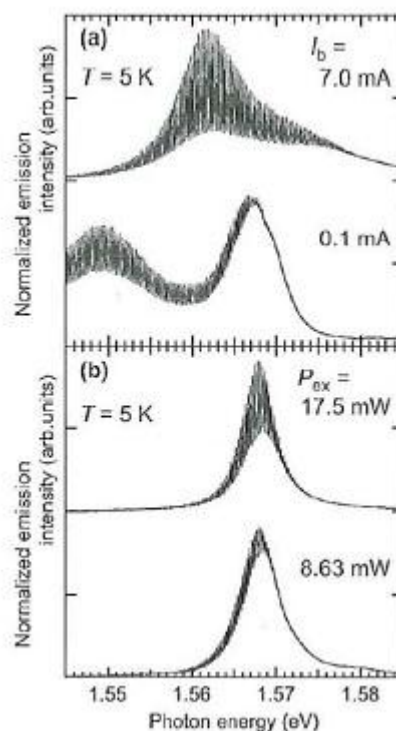


図 3-2 電流注入 (a) と光励起 (b) による放出光スペクトルの違い

(ii) 2次元量子井戸構造における基礎特性解析

1.5 μ m 通信波長帯埋め込み型量子井戸レーザを作製し、閾値電流が室温で 5mA、低温 100K で 0.3mA という高品質なデバイスの利得特性・スペクトルの温度依存性を計測し、電子間相互作用の効果を取り入れた光学スペクトル計算と比較する研究を行った。利得ピークから化学ポテンシャルエネルギー近傍のスペクトル形状は実験と理論で良い一致が得られたが、利得ピークから低エネルギー側のバンド端のテールの部分の形状は著しく差異があることが明らかになった。<Pj. 2>

半導体レーザにおける電子正孔系の光学応答を研究する上では、キャリア温度の評価が重要である。そこで、ケナード・ステファノフ関係式(KS 関係式)という基礎関係式を用いることでその温度評価を行う研究を進めた。KS 関係式の成立条件が比較的達成されやすいと期待される n 型ドーブ 2 次元量子井戸系において実験を行い、モデルに拠らずにキャリアの絶対温度がきちんと評価できることを確認した¹⁾。<Pj. 2>

(iii) 高感度定量計測技術の応用

T 型量子細線の特性解析のために開発した、微細なナノ構造の発光を高感度に検出する技術、絶対量を定量計測する技術、ナノ構造の透過吸収を計測する技術、顕微分光や画像計測の技術、ソリッドイマージョン顕微技術などを用いて、ホテルやクラゲやウミホテルの生物発光やルミノール化学発光などの研究を、生物学の専門家や民間会社と共同で進めた。その中で生物化学溶液発光の絶対定量分光計測を行うための技術・装置開発の高精度化を行って、ホテルの発光強度が、発光物質「ルシフェリン」から理想的な条件下で出ると考えられる光の強度の 47% 程度であることを明らかにした。この値は、本研究期間内に行った研究結果である 41% という値とほぼ同じであった。また、水溶液の酸性度 (pH) を変化させたときに、赤色発光のライフタイムは 0.4 ns とほぼ一定であるのに対して緑色発光のライフタイムは 0.5~5 ns と大きく変化することを明らかにした³⁾。〈Pj. 6〉

② 社会・経済的波及効果

光科学技術はレーザの発明を機に飛躍的に発展し、身近なレーザーポインターや CD・DVD 等の読み取り書き込み、バーコードスキャナ、レーザーマウスなどを始めとして、その応用分野は通信、工業、科学研究、医療、軍事、芸術と非常に多岐に渡っている。それらの光量増加や消費電力低減などいっそうの性能向上のためには、光と物質の関わりについて新たな視点で見直して光の潜在力をさらに引き出す新技術の研究開発が必要である。そのため、分光学・量子光学、半導体デバイス工学、ナノ材料化学と量子多体系理論などの密接な連携によって、物質の励起状態に生じる多数の電子間の相互作用や量子力学的位相相関電子系の挙動を理解し制御する必要がある。

本研究において、T 型量子細線で低い閾値を得るとともに、定量的な利得の理論計算を行って実験とよい一致を得た。この理論計算は量子閉じ込めを受けて多体相互作用の影響が強まった半導体レーザの解析の強力なツールとして使えることを示した。これらの成果は、さまざまなナノ細線構造の光応用デバイスを開発する際の基盤技術となる。

研究期間中および研究終了後の成果をもとに、科研費 基盤研究 (B) 「低閾値量子細線レーザの作製とその発振特性の物理」(2008 年度~2010 年度)、科研費 新学術領域研究 (研究領域提案型) 「低次元半導体レーザの低閾値光学利得と高速光非線形性」(2008 年度~2012 年度)、及び科研費 基盤研究 (B) 「多体クーロン相互作用を含む利得理論計算の実用化と高品質量子細線レーザによる検証」(2011 年度~2013 年度) などのテーマで各プロジェクトに応募し、採択された。

これらのプロジェクトにおいて、動的相関電子系によって生じる新規な光効果を探索し、その基礎学理を創り、応用への道筋を切り開くことによって、高性能レーザ等の光学機器開発やその関連産業の発展につながることを目指している。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト (4 報以内)

- 1) Ihara T., Maruyama S., Yoshita M., Akiyama H., Pfeiffer L.N., West K.W., “Thermal-equilibrium relation between the optical emission and absorption spectra of a doped semiconductor quantum well”, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 80, No.33307(2009).

- 2) Okano M., Yoshita M., Akiyama H., Huai P., Ogawa T., Pfeiffer L. N., West K. W., “Coulomb-modulated gain spectra in current-injection T-shaped quantum-wire lasers”, *Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics*, 8, 20-23(2011).
- 3) Ando Y., Akiyama H., “PH-dependent fluorescence spectra, lifetimes, and quantum yields of firefly-luciferin aqueous solutions studied by selective-excitation fluorescence spectroscopy”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 49, No.117002(2010).
- 4) Yoshita M., Okano M., Akiyama H., Pfeiffer L.N., West K.W., “Optical waveguide-transmission spectroscopy of one-dimensional excitons in T-shaped quantum wires”, *AIP Conference Proceedings*, 1399, 589-590(2011).

④ その他

本研究では、秋山をリーダーとする東京大学物性研究所が実験を、大阪大学大学院理学研究科物理学専攻教授の小川哲生をリーダーとする阪大グループが理論研究を行う共同研究体制がとられた。

それぞれのグループから昇進・ポスト獲得等の状況を以下に記す。

(東大物性研)

- ・ 吉田正裕 (研究期間中は東大物性研・助教) は、2008 年 6 月より東北大学・未来科学技術共同研究センター(NICHE)・客員准教授となり、秋山との共著論文を引き続き発表している。
- ・ 井原章之 (研究期間中は東大物性研博士課程) は、研究終了の 2008 年 3 月に学位を取得し、東大特任助教を経て、2011 年 7 月より京都大学化学研究所(金光義彦研究室)の助教に着任した。同研究室には、同じく研究期間中博士課程に在学していた岡野真人も特定助教として在籍している。
- ・ CREST 研究員として研究に参加した安東頼子が、研究終了後に北海道大学大学院医学系研究科連携研究センターの特任助教のポストに就いている。
- ・ 早水裕平 (研究期間中は東大物性研博士課程) は、東京工業大学大学院理工学研究科准教授となり、JST さきがけ研究領域「ナノシステムと機能創発」の 3 期生(2010 年度)に採択された (研究課題名：機能性ペプチドを用いたナノシステムの創製)
- ・ 高橋和 (研究期間中は東大物性研博士課程) は、大阪府立大学 21 世紀科学研究機構(ナノ科学・材料研究センター)の特任講師となり、JST さきがけ研究領域「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス」の 3 期生(2009 年度)に採択された (研究課題名：フォトリソグラフィナノ共振器シリコンラマンレーザーの開発)
- ・ 伊藤弘毅 (研究期間中は東大物性研博士課程) は、JST ERATO「十倉マルチフェロイックプロジェクト」研究員を経て、東北大学大学院理学研究科(岩井研究室)の助教となっている。
- ・ 鵜沼毅也 (研究期間中は東大物性研博士課程) は、名古屋大学大学院 工学研究科 マ

テリアル理工学専攻（岸田研究室）の助教となっている。

- 木下基（研究期間中は東大物性研修士課程）は、産業技術総合研究所・計測標準部門・電磁波計測科・高周波標準研究室の研究員となっている。
（阪大）
- 浅野健一は、2003年2月よりCREST研究員として本研究に参加し、研究期間中の2004年3月に小川研究室の助教授に昇進、現在は同准教授となっている。
- 石川陽は、2005年8月まで研究生として本研究に参加し、同年9月よりJST CREST研究領域「新しい物理現象や動作原理に基づくナノデバイス・システムの創製」領域の「光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製」研究（研究代表者：大阪府立大学 石原一）での研究員を経て、2009年3月より山梨大学大学院医学工学総合研究部・先端領域若手研究リーダー育成拠点が研究支援を行う特任助教の一人に採用された。

3.1.2 有機半導体レーザの構築とデバイス物理の解明（安達 千波矢）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

有機半導体レーザの実現には $\sim 1000\text{A}/\text{cm}^2$ の大電流密度に耐える有機材料やデバイス構造の開発とともに、低閾値で発振可能な新レーザ材料の開発と高電流密度下における励起子失活過程の抑制、薄膜構造による光学伝播特性の制御が必要である。本研究では、優れた有機半導体の開発を軸に、電流励起型の有機半導体レーザの発振実現のための先導的研究を進めた。

② 期間中の研究成果

- (i) 有機単層デバイスのモデル素子に関し、最大電流密度(J_{max})の膜厚や陰極サイズへの依存性、高熱伝導率基板などを検討し、材料や構造パラメータを最適化により最大電流密度を上昇させた。特に、放熱性に優れたシリコン、サファイヤ基板を用いた微小デバイスでは、世界最高の $J_{\text{max}} > 1\text{MA}/\text{cm}^2$ 以上の電流密度を実現した。また、電流励起発光が可能な pn 接合型有機薄膜積層構造においても、積層界面への混合層の導入によって $1,000\text{A}/\text{cm}^2$ に達する高電流密度を達成した。
- (ii) 光励起により、電流励起可能なデバイス構造からの明瞭な ASE（自然放出光の増幅現象）を観測した。特に、陰極構成が $\text{ITO}(30\text{nm})/\text{MgAg}(1\text{nm})$ においては、最も低い ASE 閾値 $9.0 \pm 1.8 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ を達成し、光励起ではあるが、電流励起可能なデバイス構造での ASE を実現した。さらに、FET 構造を用いて、電子と正孔の二重注入・蓄積に成功し、FET からの線状の EL 発光に成功した。
- (iii) 素子構造内で、有機-有機ヘテロ界面を無くし、界面に生じる励起子-ポーラロン消滅を抑制する試みを行った。特に、ヘテロ界面のない有機 LED を、BSB-Cz を発光材料として試作した。構造は、 $\text{ITO}/\text{MoO}_3:\text{BSB-Cz}/\text{BSB-Cz}/\text{Cs}:\text{BSB-Cz}/\text{Al}$ と $\text{ITO}/\text{MoO}_3/\text{BSB-Cz}/\text{Cs}:\text{BSB-Cz}/\text{Ag}$ の 2 種類である。これらのデバイスでは、電流密度 $1\text{A}/\text{cm}^2 \sim 100\text{A}/\text{cm}^2$ の高電流注入下でも、外部量子効率がほぼ一定に保たれ、失活が抑制された。また、この素子では、光励起による ASE 発振（発振閾値 $E_{\text{th}}=24.3 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ）を測定することにも成功した。

これらの成果は、学術論文（英文 53 件／和文 7 件）、口頭発表は国際会議 24 件/国内会議 134 件、ポスター発表は国際会議 46 件／国内会議 7 件である。この他、招待講演が国際会議 18 件/国内会議 18 件あり、この分野のリード役を果たしていることを示している。また、受賞は 3 件、特許出願が国内出願 14 件（研究機関からの出願を含む）/外国出願 3 件である。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト(3 報以内)

- 1) Nakanotani H., Akiyama S., Ohnishi D., Moriwake M., Yahiro M., Yoshihara T., Tobita S., Adachi C., “Extremely Low-Threshold Amplified Spontaneous

Emission of 9,9'-Spirobifluorene Derivatives and Electroluminescence from Field-Effect Transistor Structure ” , *Advanced Functional Materials*, 17, 2328-2335 (2007)

- 2) Yokoyama D., Nakanotani H., Setoguchi Y., Moriwake M., Ohnishi D., Yahiro M., Adachi C., “Spectrally Narrow Emission at Cutoff Wavelength from Edge of Electrically Pumped Organic Light-Emitting Diodes”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 46, L826-829 (2007)
- 3) Matsushima T., Adachi C., “Observation of Extremely High Current Densities on Order of MA/cm² in Copper Phthalocyanine Thin-Film Devices with Submicron Active Areas”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 46, L1179-L1181 (2007)

(2) 研究終了後の継続と発展状況

本研究終了後、科研費挑戦的萌芽研究「三重項から一重項励起状態への逆エネルギー移動機構を用いた新機構有機電界発光素子」(2009 年度～2010 年度) <Pj. 1>、及び、FIRST 「スーパー有機 EL デバイスとその革新的材料への挑戦」(2010 年 3 月～2014 年 3 月) <Pj. 2> などの競争的資金を獲得して、本研究で実施した有機 EL デバイスおよび有機半導体レーザの材料開発、デバイス物理の解明などに引き続き取り組んでいる。

さらに、その成果を受けて有機半導体発光デバイスの高性能化を実現しており、有機半導体レーザについても試作を行った。

① 科学技術の進歩への貢献

(i) 熱活性型遅延蛍光材料の開発と高効率有機 EL デバイスの実現

有機 EL デバイスの効率は、従来の蛍光材料よりも近年開発されたりん光材料を用いる方が高く、理論限界に迫る外部 EL 量子効率が実現されている。しかし、高電流密度領域では発光効率が急激に減少する三重項励起子失活の発生や、化合物が Ir、Pt 等の貴金属を含有する化合物に限定されるといういくつかの課題がある。そこで、従来の蛍光材料における優れた高電流密度特性や材料選択の多様性などの利点を生かしつつ、75%の三重項励起子が熱失活してしまい、25%の一重項励起子しか EL 発光には利用できないという課題に対して、図 3-3 に示すように、熱活性型遅延蛍光(TADF)により三重項準位から一重項準位への逆エネルギー移動を高効率で可能にし、原理的に蛍光プロセスにおいても 25%以上の励起子生成効率を実現できる材料開発を行った。

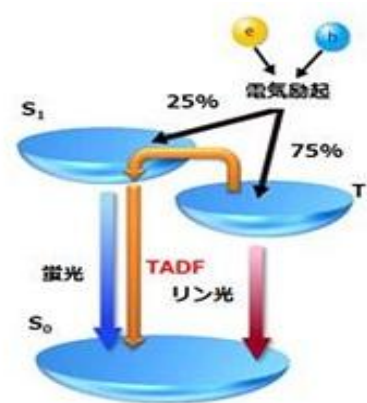


図 3-3 TADF を用いた有機 EL の原理

三重項準位と一重項準位との差が小さいほど有効であるが、新たに合成した 2-biphenyl-4,6-bis(12-phenylindolo[2,3-a]

carbazole-11-yl)-1,3,5-triazine(PIC-TRZ) では 0.11eV 、 2,4-bis{3-(9 H-carbazol-9-yl)-9 H-carbazol-9-yl}-6-phenyl-1,3,5-triazine (CC2TA)では0.06eV であった。〈Pj. 1〉

蛍光材料において、逆エネルギー移動を高効率で可能にするには、三重項準位と一重項準位とを近づける必要があり、そのような材料としてスズポルフィリン錯体を用いて TADF により励起子生成効率を向上させ、世界初の TADF-EL に成功した。遅延発光スペクトルは蛍光スペクトルに一致し、温度上昇に伴い PL 発光強度が上昇するなど TADF に特有な現象を見出している。

さらに、三重項準位と一重項準位とのエネルギーギャップを精密に制御してエネルギー移動の効率を改善するために、分子間の電子遷移に関わるエネルギーギャップを 50meV と極めて小さくして、異なる 2 つの分子の会合体によって発生するエキサイプレックス発光を利用した結果、電流励起による高効率発光では世界トップレベルの成果を得た³⁾。

さらにまた、内部発光効率 η_{int} がほぼ 100%の発光効率を示す新しい発光分子（カルバゾリルジシアノベンゼン誘導体：CDCB）の創出に成功した（図 3-4）。CDCB を発光層に有する有機 EL 素子において、外部発光効率 η_{ext} は 19.3%となり、極めて高い値が得られた。（2012 年 12 月 12 日九州大学プレスリリース）

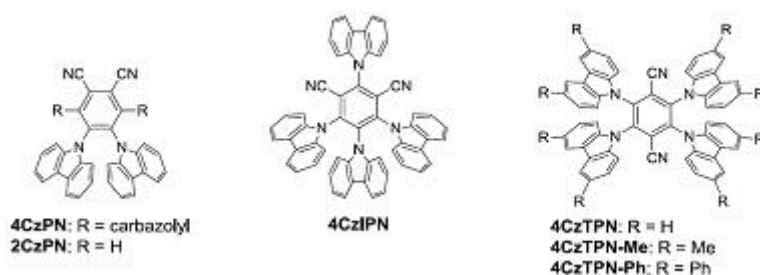


図 3-4 高効率 TADF を示す新規有機 EL 発光材料

(ii) 分子配向等の有機ナノ構造の制御による光電子物性の飛躍的な向上

究極の凝集状態である有機単結晶薄膜を有機 EL 素子に用いることにより、飛躍的な素子性能の向上が期待できる。1,4-Bis(4-methylstyryl)benzene (BSB-Me) を用いた有機単結晶 EL 素子では、わずか 19V の印加電圧により 100mA/cm² に達する電流密度が得られる。通常の薄膜 EL 素子では、20MV/m 以上の電界強度印加により、キャリア注入が開始されるが、有機単結晶をキャリア輸送層として用いた素子においては、一桁以上低い電界強度 (<2MV/m) で素子駆動が可能である。この成果を発表した論文は 2010 年 2 月の Applied Physics Letters Top 20 Most Downloaded Articles に選ばれた¹⁾。

また、アモルファス薄膜中における分子配向の重要性に着目して、電荷輸送材料であるトリフェニルアミン多量体、オキサジアゾール誘導体や、超低閾値を示すレーザ色素である BSB-Cz は、アモルファス薄膜中で基板に対して平行配向することを明らかにした。さらに、ディスコティック状平面分子は、電極上において平行配向することによって、著しく低電圧での電荷注入が可能であることがわかった²⁾。

(iii) 有機半導体レーザの構築

これまでの有機発光材料の成果をもとに、新規なスピロビフルオレン誘導体 (hexylbiphenyl-spirobifluorene (HBP-Spiro) および triphenylamine-spirobifluorene (TPA-Spiro)) を合成して、高分子導波路による青色の分布帰還型有機半導体レーザとしての性能を評価したところ、HBP-Spiro を用いた場合に、スロープ効率 3.6%、閾値 $1.9 \mu\text{J}$ を実現した。励起パルス 1.2ns 、 $3.0 \mu\text{J}$ での波長 355nm 発振時の動作寿命は 27,000 ショットであった⁴⁾ (図 3-5)。

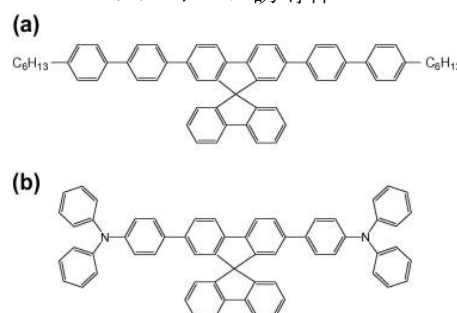


図 3-5 有機半導体レーザの材料

② 社会・経済的波及効果

この間に得られた材料を足がかりに、分子設計を進め、一重項励起状態と三重項励起状態のエネルギー差がより小さい材料の開発を進め、高効率 TADF の実現と新機構有機 EL への展開を図り、りん光発光と同等以上の発光特性を TADF を用いて実現したことは画期的な技術革新であり、蛍光、りん光に次ぐ第 3 世代の発光材料と位置づけることができる。

FIRST「スーパー有機 EL デバイスとその革新的材料への挑戦」(2010 年 3 月～2014 年 3 月)において、研究開発拠点である OPERA が 2010 年に設立され、京都大学や広島大学など 10 の大学と新日鉄化学や東芝など 9 社が参画して大学と産業界を結びつけて実用化を推進する体制が作られた。レアメタルを使わない TADF を使った有機 EL パネルは、りん光材料を使ったものに比べて製造コストが約 10 分の 1 であり、サムスンなど韓国勢とのコスト競争でも有利であり、2012 年には事業を開始したばかりの国内中小型パネル事業の統合会社、ジャパンディスプレイも OPERA での共同研究に参画することを決定した(2012 年 7 月 25 日日本経済新聞)。

有機 EL は 21 世紀の環境適応型技術として期待が高く、RGB など発光色の多様化により、自発光、抜群の視認性、高画質、低消費電力、フレキシブル性などの有機 EL の特長を生かした応用が、次世代の高精細ディスプレイ、照明、デジタルサイネージなどの分野に広がることは、産業上の意義が大きい。また、究極の凝集状態である有機単結晶への展開は、将来の有機デバイスの高性能化へ向けて重要な研究課題であり、有機半導体レーザ、有機太陽電池、有機トランジスタ、有機メモリ等の次世代有機半導体デバイスへの展開につながる。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト(4 報以内)

- 1) Nakanotani H., Adachi C., “Organic light-emitting diodes containing multilayers of organic single crystals”, *Appl. Phys. Lett.*, 96, 053301 (2010)
- 2) Kim J.Y., Yokoyama D., Adachi C., “Horizontal orientation of disk-like hole transport molecules and their application for organic light-emitting diodes requiring a lower driving voltage”, *Journal of Physical Chemistry C*, 116, 8699-8706(2012)

- 3) Goushi K., Adachi C., “Efficient organic light-emitting diodes through up-conversion from triplet to singlet excited states of exciplexes”, *Applied Physics Letters*, 101, No.23306, (2012)
- 4) So H., Watanabe H., Yang Y., Oki Y., Adachi C., Yahiro M., “A distributed-feedback organic waveguide blue laser using spirobifluorene derivatives”, *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON*, No.5686685, 440-443(2010)

④ その他

本研究に CREST 研究員として参加した若手研究者のポスト獲得に該当するものとして、以下のことが挙げられる。

- ・ 横山大輔は九州大学未来化学創造センター助教を経て、現在は山形大学大学院理工学研究科助教となり、横山大輔研究室を運営している。
- ・ 松島敏則は北陸先端科学技術大学院大学マテリアルサイエンス研究科の助教となり、2009 年 7 月に応用物理学会 有機分子バイオエレクトロニクス分科会から、第 7 回有機分子バイオエレクトロニクス分科会奨励賞を受けている。
- ・ 河村祐一郎は出光興産株式会社の研究員として有機 EL 材料開発に関わっている。

3.1.3 低次元量子構造を用いる機能光デバイスの創製（荒井 滋久）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

本研究では、光ファイバ通信用長波長光源に用いられている GaInAsP/InP 系の半導体を対象に、電子線リソグラフィと埋め込み成長による量子細線形成法を飛躍的に高め、実用的な低閾値電流・高効率で動作が可能な量子細線レーザ実現のための技術基盤を確立した。細線の寸法制御によりバンドギャップを面内で自在に制御する技術も確立し、受動素子・レーザ・検出器を一体化した新素子も可能とした。なお、歪補償を取り入れた幅 23nm の量子細線レーザで、40,000 時間以上（2008 年 1 月時点）の室温連続発振に成功している。

② 期間中の研究成果

- (i) 歪補償量子井戸を用いた 10nm 級のエッチングと再成長プロセスを確立した。この方法で懸念される損傷や寸法揺らぎを抑制し、試作素子の特性と信頼性を実際に評価し、有効性を示した。
- (ii) 誘電体やポリマー材料をクラッド層とする半導体薄膜 DFB レーザを試作し、光励起ではあるが、有望な特性を得た。
- (iii) 量子細線においてバンドギャップが線幅で制御できることを活用し、面内にレーザの活性層だけでなく分布反射鏡領域や光検出素子などを一括集積形成する手法を開拓した。
- (iv) GaInAsP のバルク結晶、量子井戸、量子細線について、光で誘起する屈折率変化の大きさや応答速度を明らかにし、DFB 波導路中に全光スイッチを形成し、100Gb/s の動作を実証した。
- (v) 量子細線をレーザ活性層として活かす試みでは、細線の寸法揺らぎがある程度まで残り、閾値電流やスペクトル幅に関しては、量子井戸に及ばない結果となった。

これらの成果についての発表は、国際学術誌の論文 42 件、国内論文 0 件、口頭発表は、国際会議 61 件、国内会議 90 件、ポスター発表は国際会議 12 件、国内会議 12 件である。この他、国際会議で 12 件、国内会議で 3 件の招待講演を行った。受賞は 4 件。また、特許の出願はない。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト(3 報以内)

- 1) Yagi H., Sano T., Ohira, K. Plumwongrot D., Maruyama T., Haque A., Tamura S., Arai S., “GaInAsP/InP Partially Strain-Compensated Multiple-Quantum-Wire Lasers Fabricated by Dry Etching and Regrowth Processes,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 43, 3401-3409 (2004)
- 2) Ohira K., Murayama T., Tamura S., Arai S., “Low-Threshold and High-Efficiency Operation of Distributed Reflector Lasers with Width-Modulated Wirelike Active

Regions,” *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, 11, 1162-1168 (2005)

- 3) Maruyama T., Okumura T., Sakamoto S., Miura K., Nishimoto Y., Arai S.,
“GaInAsP/InP Membrane BH-DFB Lasers Directly Bonded on SOI Substrate,”
Optics Express, 14, 8814-8818 (2006)

(2) 研究終了後の継続と発展状況

① 科学技術の進歩への貢献

本研究終了後に開始された科研費 特別推進研究「Si 系 LSI 内広帯域配線層の為の InP 系メンブレン光・電子デバイス」(2007 年度～2011 年度) <Pj. 1>において、本研究での細線形成技術等の研究成果を基礎とし、電気配線に代わる光配線技術として、薄膜に加工した III-V 族半導体を用いたメンブレン光集積回路を提案し取り組んでいる。60-200nm 厚の薄膜半導体層を低屈折率材料で挟んだメンブレン型レーザの研究では、クラッド層にベンゾシクロブテン (BCB) などの屈折率が低い透明誘電体を用いることにより、光閉じ込めを従来の 3 倍以上に高めた半導体薄膜構造を実現した。また、5 層の量子細線が周期的に配置された活性層を構成している横方向キャリア注入型 DFB レーザとしては初の室温発振を実現した²⁾ <Pj. 1> (図 3-6)。

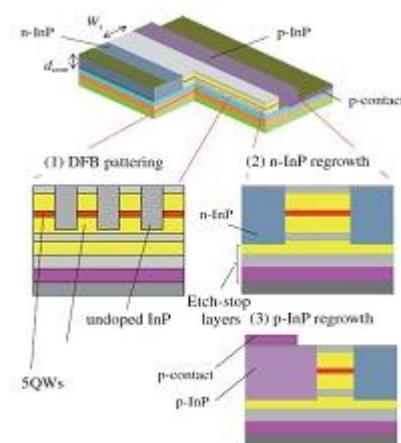


図 3-6 5 層の量子細線 (5QW) が周期的に配置された活性層を構成している横方向キャリア注入型 DFB レーザの構造と製造プロセス

② 社会・経済的波及効果

科研費特別推進研究「Si 系 LSI 内広帯域配線層の為の InP 系メンブレン光・電子デバイス」では、シリコン素子上にレーザ光源を作り込んで高速の光配線を実現し、さらにテラヘルツ波発振器を作り込んで LSI チップ間の通信を実現することにより、LSI チップの計算速度の向上と消費電力の大幅削減を目標としている。電子・光・テラヘルツという異なる 3 分野の研究者の協力のもとに、異なる機能ブロックを統合した効率的なデバイスを実現して、情報通信網の高速化と低消費電力化につなげようとしている。

この研究を推進するための組織として、東京工業大学に「量子ナノエレクトロニクス研究センター」が設立されており、別研究「超ヘテロナノ構造によるバリスティック電子デバイスの創製」の研究代表者である古屋 一仁とも連携して (古屋は 2010 年に東京工業大学から東京高専の校長に転出しており、その後は古屋の研究室を継承した准教授の宮本恭幸と) 研究が推進されている (2008 年 8 月 16 日 日経産業新聞)。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト (4 報以内)

- 1) Okumura T., Ito H., Kondo D., Nishiyama N., Arai S., “Continuous wave operation

of thin film lateral current injection lasers grown on semi-insulating InP substrate”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 49, 402051-402053(2010)

- 2) Okumura T., Koguchi T., Ito H., Nishiyama N., Arai S., “Injection-type GaInAsP/InP membrane buried heterostructure distributed feedback laser with wirelike active regions”, *Applied Physics Express*, 4, No. 42101(2011)

④ その他

荒井は 2008 年に「長波長帯光ファイバ通信用半導体レーザに関する先進的研究貢献」で電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ賞を、「光通信用 1.5 ミクロン波長帯半導体レーザの研究」で文部科学大臣表彰（科学技術賞）を、2011 年に「長波長帯半導体レーザに関する先導的研究」で電子情報通信学会業績賞を受賞した。また、学会への貢献として、2008 年に応用物理学会から、2010 年には米国電気電子工学会 (IEEE) から、2011 年に電子情報通信学会から、フェロー表彰を受けている。

人材育成面では、丸山武男は本研究終了後の 2008 年 4 月に東京工業大学助教から金沢大学理工研究域の准教授に昇進し、同年「第 21 回安藤博記念学術奨励賞」を受賞した。

本研究で光制御光スイッチングデバイスの研究を担当した、共同研究者の横井秀樹（研究期間中は芝浦工業大学准教授）は、本研究終了後に同大学教授に昇進した。

本研究に CREST 研究員として参加した若手研究者のポスト獲得としては、八木英樹は住友電気工業株式会社伝送デバイス研究所の研究員として、研究を継続している。

3.1.4 多価イオンプロセスによるナノデバイス創製（大谷 俊介）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

多価イオン源 Tokyo-EBIT を用いて、様々な物質の表面層に新しいナノプロセスを引き起こし、その実態と物理機構を調べ、ナノデバイス応用に向けた研究を行った。Tokyo-EBIT は、多価イオンの分光学的性質を調べる原子物理学の研究を目的に開発された大型の装置で、多価イオンを固体試料に照射する用途に向けて、小型で運転経費の低いナノプロセス専用多価イオン源「KobeEBIS」を開発した。

② 期間中の研究成果

- (i) 大量に放出する 2 次電子の検出により単一イオン入射を検知可能とした。多価イオンが入射する場合、運動エネルギーが極めて小さく、例えば、10 eV の Xe^{44+} の場合、100 個程の 2 次電子を放出する。このため、2 次電子放出特性を用いて、多価イオンの入射イベント回数を確度 100% で計数できることを示した。
- (ii) 1 個のイオン衝突により、100% の確率で表面ナノ領域が改質される。加工範囲は、表面深さ方向が 2, 3 層に留まるが、水平方向の大きさは価数とともに増し、多価イオンの価数の選択により Si 表面の場合には 0.5 から 10 nm まで加工範囲を制御する見通しを得た。
- (iii) 多価イオンと表面との相互作用は数 nm のサイズに限定され、単一の多価イオン衝突によって、安定な表面にナノスケールの活性点が生成される。化学的に安定な HOPG 表面上で、多価イオンの照射痕の生じることや、表面化学反応によって水素終端 Si(100) 表面上にナノ構造が作製できることも見出した。
- (iv) 多価イオンを 1 次ビームとして使った 2 次イオン質量分析法(多価イオン SIMS)は、Auger 電子分光法などの元素分析の手法に比べ、桁違いに高感度で表面元素種を検出できることがわかった。たとえば、Si(100) 面に対して得られた多価イオン SIMS スペクトルでは、清浄化処理法に依存して、不純物イオンの強度が異なることが観察された。従って、多価イオン SIMS は、半導体表面の処理法の評価に有効な手段となり、表面数層に存在する元素の同定にプローブとして作用できることが示された。
- (v) ナノプロセスへの応用を念頭に置いた、電子ビーム多価イオン源「KobeEBIS」を開発した。中価数領域で TokyoEBIT の $10^3 \sim 10^4$ 倍の強度のイオンを生成することが出来た。

これらの成果についての発表は、国際学術誌 51 件、国内論文 3 件、口頭発表は、国際会議 2 件、国内会議 40 件、ポスター発表は国際会議 26 件、である。この他、国際会議で 19 件の招待講演を行っている。また、受賞は 1 件。特許は国内 2 件、外国 1 件を出願している。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト(3 報以内)

- 1) Tona M., Nagata K., Takahashi S., Nakamura N., Yoshiyasu N., Sakurai M., Yamada C., Ohtani S., "Some characteristics in the interaction of slow highly charged Iq^+ ions with a Si(111) 1×1 -H surface", *Surf. Sci.* 600 (2006) 124
- 2) Tona M., Watanabe H., Takahashi S., Nakamura N., Yoshiyasu N., Sakurai M., Terui T., Mashiko S., Yamada C., Ohtani S., "Nano-crater formation on a Si(111)-(7 $\times$ 7) surface by slow highly charged ion-impact", *Surf. Sci.* 601 (2007) 723

(2) 研究終了後の継続と発展状況

本研究の研究代表者である大谷は 2009 年 3 月に定年退職しており、研究室は准教授の中村信行が後継している。中村は本研究終了後に開始された科研費 基盤研究(B)「自動電離状態における一般化ブライト相互作用効果の研究」(2009 年～2013 年) <Pj. 1>の研究代表者として本研究から必要となった課題、「多価イオン源の開発および多価イオン原子物理学」の研究に取り組んでいる。B. E. Kane が提唱 (Nature 393, 133-137, 1998) した、所謂「ケーン型シリコン量子コンピュータ」(シリコン基板中に埋め込まれたリン原子の核スピンをキュービットに用いる) の実現には、リン原子 1 個 1 個をナノメートルの位置精度でシリコン中に入射させる必要があることから、共同研究者の櫻井誠 (神戸大学理学部物理学科 准教授) らが高強度多価イオン源「KobeEBIS」を用いて、ナノ領域に多価イオンビームを入射させるための基礎研究を進めている。

① 科学技術の進歩への貢献

多価イオンの 2 電子性再結合は、太陽コロナや核融合プラズマなどの高温プラズマ中での基礎過程として重要であり、イオンが重元素の場合には相対論的效果なども顕著になるため原子物理学的にも重要である。指向性を持った電子ビームでイオンが励起されると磁気量子数分布に偏りが生じ、その脱励起による放射は非等方的な角度分布を有することがクーロン相互作用に加えて磁氣的相互作用と仮想光子遅延効果とを考慮したブライト相互作用をもとにして理論的に予測されていた。Au の Li 様イオンの 2 電子性再結合に伴う X 線の非等方性パラメータ (Alignment parameter) A_2 を初めて実験的に求めたところ、 A_2 が負 (角度分布が 90 度で凸) であることが示され、ブライト相互作用を考慮する重要性が実験的に確認された²⁾。(図 3-7)

本研究期間中に使用した高性能多価イオン源をもとに、よりコンパクトな筐体と液体ヘリウムを使わない低ランニングコストの小型多価イオン源を開発して、核融合研究や宇宙物理学において特に重要な中程度の価数の多

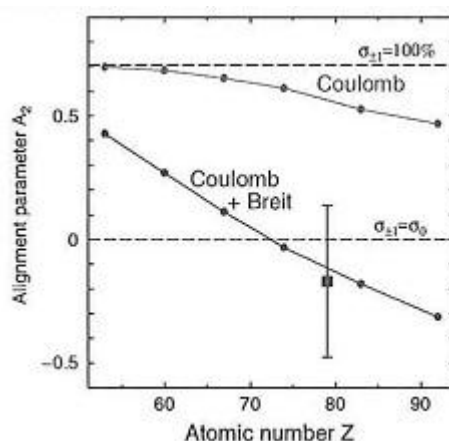


図 3-7 非等方性パラメータ A_2 の原子番号 Z 依存性 (実験結果■はクーロン+ブライトの理論値と一致)

価イオンを効率よく供給することを可能にし、発光スペクトルの電子エネルギー依存性を広いエネルギー範囲にわたって検討した¹⁾。<Pj.1>

また、効率的なイオン引き出しを可能とするような制御システムを製作して、ビスマス多価イオンの2電子性再結合過程の測定をこれまでにない高分解能で行うことに成功した。その結果、放射性再結合と2電子性再結合の干渉により現れる非対称構造を、ベリリウム様ビスマスと電子との衝突において明瞭に観測することができた。その非対称構造を理論的にも説明するため、新たな計算手法を開発し、実験において得られた構造をこれまでにない精度で再現することに成功した。理論と実験の比較により、非対称構造には放射減衰効果と、ブライト相互作用が極めて重要であることが分かった。<Pj.1>

上述のような金やビスマスなど金属元素多価イオンの生成には、CREST 研究において開発されたレアメタル元素の多価イオン生成技術が活かされている。この技術により、周期律表のほとんどの元素の多価イオン生成が可能となり、原子番号に依存する相対論効果などの物理現象を捉えることが可能となった。

また、2光子を同時に放出する再結合過程の2重微分断面積を調べるための、2光子同時計測システムの立ち上げとその試験を行った。水素様クリプトンの2電子性再結合において同時に放出される2つのK-X線の同時観測で試験した結果、十分な同時計測率が得られることが分かった。<Pj.1>

KobeEBISを用いて多価イオンを用いたナノプロセス技術の基礎となる、穴あきカンチレバーを用いた多価イオンのナノ領域への入射技術、多価イオンのフルエンス $10^{13}/\text{cm}^2$ で検知可能な多価イオン照射領域の観察技術、KobeEBISの「パルス運転」による高価数多価イオンの高効率生成法の開発を行った。

KobeEBISを用いた物理実験としては、多価イオン照射によりグラファイトに正磁性が発現することを発見したこと(S. Liu et al., e-j. Surf. Sci. Nanotech., 9, 241-246, 2009)、多価イオン照射による物質(絶縁体・金属)からの発光を空間分解観測したことなどが挙げられる。

② 社会・経済的波及効果

核融合炉による発電はエネルギー問題の解決策の1つの候補であるが、多価イオンの挙動の理解が極めて重要な鍵を握っており、世界最大規模の多価イオン源に加えて、よりコンパクトな小型多価イオン源を利用した多価イオン研究は、核融合研究機関との共同研究を進展させ、核融合発電によるエネルギー問題の解決の一助につながる。

また、多価イオンからの極端紫外光は、本プロジェクトで検討されたが、本研究終了後においては、多価イオン源KobeEBISを用いて、穴あきカンチレバーを用いた多価イオンのナノ領域への入射技術、多価イオンのフルエンス $10^{13}/\text{cm}^2$ で検知可能な多価イオン照射領域の観察技術など、ナノプロセス技術の基礎となる各基盤技術の開発を進めている。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト(4報以内)

- 1) Sakaue H. A., Kato D., Ding X., Murakami I., Koike F., Nakano T., Yamamoto N., Ohashi H., Yatsurugi J., Nakamura N., “Spectroscopy of highly charged tungsten ions with Electron Beam Ion Traps”, *AIP Conf. Proc.* 1438, 91-96(2012)

- 2) Hu Z., Han X., Li Y., Kato D., Tong X., Nakamura N., "Experimental Demonstration of the Breit Interaction which Dominates the Angular Distribution of X-ray Emission in Dielectronic Recombination", *Phys. Rev. Lett.* 108, 073002 (2012)

3.1.5 シフトレジスタ機能付超高速光メモリの創製（河 口 仁 司）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

次世代の超高速の光通信システムの実現には、信号処理を全て光で行う全光化が必須とされている。本研究では、光信号を電気信号に変換することなく、偏光双安定性を持つ面発光半導体レーザ（VCSEL）アレイ内の各レーザの偏光情報として、時系列の光信号を1ビットずつ記録でき、必要なタイミングにあわせ時系列信号として記録信号を読み出すことができる光バッファメモリの実現をめざした。特に、二次元アレイ内で信号を転送・記録できるシフトレジスタ機能に重点をおいて研究し、これにより全光型でのパケット単位のルーティングが実現でき、光通信システムの超高速化が期待できる。また、長波長 VCSEL の開発や、光パケットスイッチングに必要な光ヘッダ識別回路、時空間変換型光パケット生成・転送技術の実現も試みた。

② 期間中の研究成果

- (i) 超高速光メモリとして、980 nm 帯偏光双安定 VCSEL を自作し、偏光状態に依存する電流－光出力特性を得て、双安定スイッチング特性が実現できた。双安定半導体レーザは、エネルギーが 0.2～0.3 fJ ほどの光入力で安定なフリップ・フロップ動作を示した。この双安定半導体レーザは、最高でくり返し 10 GHz（世界最高速）までの動作が確認できた。
- (ii) VCSEL を 2 個並列に用いて、2 ビットの光バッファメモリ動作を実現した。この VCSEL（VCSEL1）の発振光を 2 番目の VCSEL（VCSEL2）へ注入することにより、VCSEL2 の偏光をスイッチし、情報を転送することができる。全ての組み合わせ、つまり、“0” → “1”，“1” → “1”，“1” → “0”，および “0” → “0” の転送について実験的に実証した。この結果から、本研究の最大の目標であるシフトレジスタ機能付光メモリが実現できたと言える。
- (iii) 光パケットの行き先情報ラベル識別器の実現を目的として、光デジタル・アナログ変換器を用いた高速光ラベル識別技術の確立と半導体集積化を目指し、半導体ハイメサ導波路構造での 4 ビット動作を 10 Gbps および 40 Gbps で確認した。異なるラベル入力に対する異なる振幅を持つ出力信号のパルス幅拡張を行うことにより、40 Gbps でのラベル識別動作も実現した。また光パケットスイッチのプロトタイプを構築し、300 ns 以下の遅延でのパケット転送を実現した。

これらの成果についての発表は、国際学会誌 43 件、国内論文 1 件、口頭発表は、国際会議 60 件、国内会議 71 件、ポスター発表は国際会議 9 件、国内会議 5 件である。その他、国際会議で 12 件、国内会議で 9 件の招待講演を行っている。また、受賞は 3 件。特許は国内 8 件を出願している。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト（3 報以内）

- 1) Mori T., Yamayoshi Y., Kawaguchi H., “Low-switching-energy and high-repetition-frequency all-optical flip-flop operations of a polarization bistable vertical-cavity surface-emitting laser”, *Appl. Phys. Lett.*, 88 101102-1~3 (2006)
- 2) Kawaguchi H., Mori T., Sato Y., Yamayoshi Y., “Optical buffer memory using polarization-bistable vertical-cavity surface-emitting lasers”, *Japanese J. Appl. Phys., Express Lett.*, 45 L894-L897 (2006)
- 3) Katayama T., Sato Y., Mori T., Kawaguchi H., “Polarization bistable characteristics of 1.55 μm vertical-cavity surface-emitting lasers”, *Japanese J. Appl. Phys., Lett.*, 46, L1231-L1233 (2007)

(2) 研究終了後の継続と発展状況

本研究の中心課題は、光ファイバ通信の光源として用いられている半導体レーザに、単に光を出すだけではなく、新しい機能をもたせることによって、伝送路上での光－電気変換の必要性のない新たな全光型通信用のデバイス創製に結びつけることである。この研究をさらに発展させることを目指して、本研究期間中に開始された科研費特定領域研究「偏光双安定面発光半導体レーザを用いた全光型信号処理」(2005 年度～2008 年度) <Pj. 1>、科研費萌芽研究「スピン偏極電子注入面発光半導体レーザの実現と量子情報処理への応用」(2007 年度～2008 年度) <Pj. 2>、および、本研究終了後に開始された科研費基盤研究(B)「光通信波長帯多ビット偏光双安定光メモリ」(2009 年度～2011 年度) <Pj. 3>、科研費挑戦的萌芽研究「スピントニクデバイスの創成」(2011 年 4 月 28 日～2013 年 3 月 31 日(予定)) <Pj. 4>、情報通信研究機構 (NICT) 国際共同研究助成金「高次機能半導体フォトリックデバイスを用いた全光型パケットスイッチノードに関する研究」(2011 年～2012 年) <Pj. 5>、科研費基盤研究(A)「高次機能半導体ナノフォトリックデバイス」(2012 年 4 月 1 日～2015 年 3 月 31 日(予定)) <Pj. 6>、科研費基盤研究(S)「高次機能半導体ナノフォトリックデバイスとその光 RAM への応用」(2012 年 5 月 31 日～2015 年 3 月 31 日(予定)) <Pj. 7>といった数多くの研究の研究代表者として研究開発に取り組んでいる。

① 科学技術の進歩への貢献

GaAs/AlGaAs (110) 量子井戸はスピン緩和時間が(100) 量子井戸に比べ長く、スピン偏極電子がひきおこすレーザ発振特性の変化を利用する本研究のデバイス用の構造として有用である。そこで、GaAs (110) 基板上の MBE 成長条件の最適化、特に、MBE 成長中に成長を一時中断して界面の平坦性を向上させる効果について検討し、電子スピン緩和時間の温度依存性が平坦性向上によって変化することを明らかにした。界面平坦性向上により電子スピン緩和時間が室温で 2.1ns まで長くなることを見い出した¹⁾。 <Pj. 2>

980nm 帯偏光双安定 VCSEL に初めて酸化狭窄構造を導入し、従来より 1 桁低い mA オーダーのバイアス電流で偏光双安定動作を実現した。閾値電流は 0.22 mA であり、光双安定性

が確認された。偏波消光比 20 dB 以上の直線偏光であること、単一縦モード・単一横モード発振であることがわかった。又、極めて小さな光入力 ($2.6 \mu\text{W}$) でフリップ・フロップ動作が得られた²⁾。<Pj.3>

光通信において実際に用いられている $1.55 \mu\text{m}$ 帯での全光型バッファメモリの開発に取り組み、4 つの偏光双安定性 VCSEL を組み合わせたシフトレジスタ機能を有する 4 ビット全光型バッファメモリを初めて試作し³⁾ <Pj.3> (図 3-8) 自在に信号を切り出して送信できることを確認した。この成果は新聞でも取り上げられた(2009 年 3 月 27 日 日経産業新聞)。

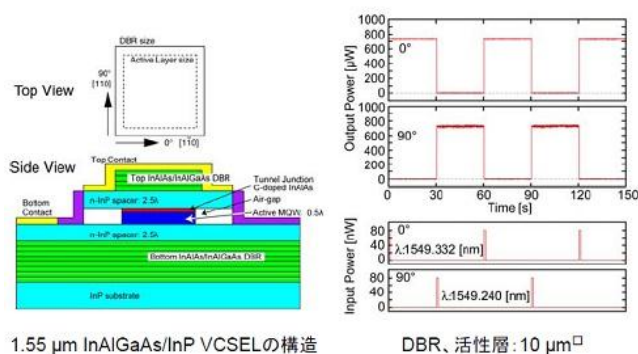


図 3-8 1.55 μm 帯 全光型フリップフロップ動作

② 社会・経済的波及効果

通信網の消費電力は年々増加しており、大きな問題となっている。通信の高速化に寄与している光通信においても、信号の一部を別のルートへ送るには、信号の切り分けや一時記憶のために、いったん電気信号に変換する必要がある、そのための電力消費と処理時間とを要している。ここで開発された電子スピン緩和時間増大技術および全光型信号処理回路技術は、通信網のより一層の高速化、消費電力削減につながる技術である。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト(4 報以内)

- 1) Iba S., Fujino H., Fujimoto T., Koh S., Kawaguchi H., “Correlation between electron spin relaxation time and hetero-interface roughness in (1 1 0)-oriented GaAs/AlGaAs multiple-quantum wells”, *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 41, 870-875(2009)
- 2) Katayama T., Yanai A., Yukawa K., Hattori S., Ikeda K., Koh S., Kawaguchi H., “All-optical flip-flop operation at 1-mA bias current in polarization bistable vertical-cavity surface-emitting lasers with an oxide confinement structure”, *IEEE Photonics Technology Letters*, 23, 1811-1813(2011)
- 3) Katayama T., Ooi T., Kawaguchi H., “4-Bit all-optical buffer memory with shift Register function using polarization bistable VCSELs”, *Conference on Optical Fiber Communication, Technical Digest Series*, No.5032298(2009)

④ その他

河口は、「双安定半導体レーザと光 RAM の先駆的研究」で、2011 年に文部科学大臣表彰(科学技術賞)を受けた。

本研究に CREST 研究員として参加した研究者のうち、佐藤祐喜は同志社大学理工学部電子工学科の准教授のポストを得ている。

3.1.6 共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの創製（小柳 光正）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

本研究では、スピン状態による選択的なトンネリング現象とドットによるキャリア蓄積効果の二つの現象を、増幅機能を持つトランジスタと組み合わせることにより、新しいタイプの不揮発性メモリ機能を備えた磁気ナノドットメモリを実現する目標のもとに研究を進めた。

② 期間中の研究成果

最終的なデバイスの完成には到らなかったが、研究の過程で以下の多くのインパクトのある成果が出ている。

- (i) 従来より約 2 桁高いドット密度 ($2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$) をもつ磁気ナノドットの成膜方法を確立した。
- (ii) FePt ナノドットについて、アニール法の検討およびアニールによる酸化状態の解明とその還元について詳細に検討した。その結果、密度が高く、保磁力が高く、膜質も良好で、耐熱性のあるナノドット層を形成するプロセスが確立できた。
- (iii) 電子線ホログラフィを用いてナノドットの磁化特性を微視的に評価することに成功した。
- (iv) 磁気薄膜では電子のスピン選択トンネリングとメモリ効果を確認し、メモリの基本動作の原理実証を行った。

これらの成果は、学術論文数が英文 81 件、和文 1 件、口頭発表は、国際会議 69 件、国内会議 77 件、ポスター発表は国際会議 34 件、国内会議 29 件である。この他、国際会議で 16 件、国内会議で 8 件の招待講演を行っている。また、特許は国内 2 件を出願している。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト（3 報以内）

- 1) Yin C.-K., Bea J.-C., Hong Y.-G., Fukushima T., Miyao M., Natori K., Koyanagi M., “New Magnetic Flash Memory with FePt Magnetic Floating Gate”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 45, 3217-3221, 2006
- 2) Yin C.K., Fukushima T., Tanaka T., Koyanagi M., Bea J.C., Choi H., Nishijima M., Miyao M., “Magnetic properties of FePt nanodots formed by a self-assembled nanodot deposition method”, *APPLIED PHYSICS LETTERS*, 89, 063109-1-063109-3, 2006
- 3) Yin C.-K., Murugesan M., Bea J.-C., Oogane M., Fukushima T., Tanaka T., Miyao M., Samukawa S., Koyanagi M., “New Magnetic Nanodot Memory with FePt Nanodots”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 46, 2167-2171, 2007.

(2) 研究終了後の継続と発展状況

本プロジェクト終了後も、継続して研究が続けられ、最終的なデバイスが試作できるまでになり、その特性評価が行われている。ナノドット材料を変えた場合、および絶縁膜材料を変えた場合についても性能比較が行われた。また、新たにナノドット形成層を複数重ねた構造のメモリデバイスについても試作と性能評価が行われた。

本研究終了後に開始された科研費基盤研究(S)「グラフォアセンブリーによる三次元積層型光電子集積システム・オン・チップ」(2009年度～2013年度) および CREST 研究領域「ディペンダブル VLSI システムの基盤技術」(2009年度～2014年度) では、三次元集積回路の研究に取り組んでいる。これらの研究では、ナノドット不揮発性メモリに関する研究は採り上げられていないが、三次元集積回路に搭載するための磁気ナノドットを使ったインダクタンスに関する研究に本研究の成果が引き継がれている。

① 科学技術の進歩への貢献

本研究期間中に確立した自己組織化ナノドット成膜方法を用いて、サイズ 2nm 以下で密度 $\sim 1.2 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ という微細高密度の FePt 磁気ナノドットを形成して不揮発性メモリデバイスを試作した。ファウラーノルトハイムトンネリングによる書き込みと消去で閾値の差は約 6V と大きく、 10^3 サイクルの書込消去後も良好なデータ保持特性を示した。ナノドット形成後の熱処理で表面平坦度が改善されることも確認した¹⁾。(図 3-9、3-10)

さらに、FePt 磁気ナノドット形成層を複数層重ねた構造の不揮発性メモリデバイスを提案して試作した。閾値の差は、より大きな値であったが、書き込み消去時間、データ保持特性などは十分ではなく、最適化の検討が必要である²⁾。

ナノドットの材料としては、タンゲステン、コバルトなどについて、また、絶縁膜材料としては、酸化シリコンの他に酸化ハフニウムについてもデバイスを試作して評価した。コバルトのナノドットと酸化ハフニウムの絶縁膜の組み合わせによるメモリデバイスでは、書き込み消去時間およびデータ保持時間など優れた特性が得られており、閾値の差も大きいこと、および材料、膜厚等の最適化により、次世代不揮発性メモリの候補となりうることを示された³⁾(図 3-11)。

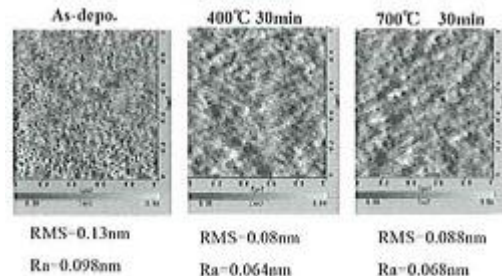


図 3-9 FePt ナノドット層の熱処理による平坦性改善

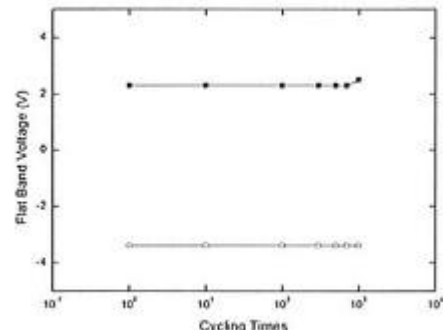


図 3-10 FePt ナノドットデバイスのデータ保持特性

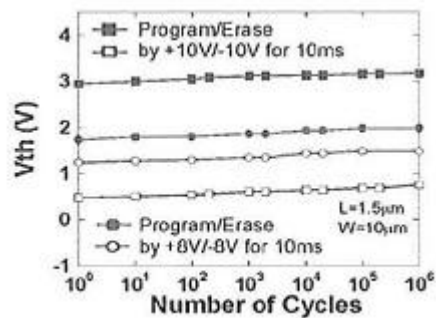


図 3-11 Co ナノドットと HfO₂ 絶縁膜を用いたデバイスのデータ保持特性

② 社会・経済的波及効果

不揮発性半導体メモリの市場規模は拡大を続けている。従来中心的な位置を占めていたフラッシュメモリに代わり、より高速処理が可能で低消費電力のデバイスとして MRAM、ReRAM、PRAM など数種類の候補があり、多くの企業、研究機関によりそれらの開発が行われている。その中でもスピンを用いたデバイスは、将来の低消費電力デバイスとして発展が見込めるものである。ここで開発された高密度ナノドットの形成技術、大きな保磁力を持つ磁性ナノドットの形成技術は、今後の磁性ナノ素子などによる高速処理、低消費電力のシステム実現につながるものである。さらに演算回路と記憶回路とを積み重ねて、処理速度が 100 倍、消費電力が 10 分の 1 以下にできる三次元集積化回路に組み込むことによって、大規模複合化集積回路の超高速化、低電力化に寄与することができる。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト(4 報以内)

- 1) Song Y.H., Bea J.C., Lee K.W., Lee G.-H., Tanaka T., Koyanagi M., “A reliable nonvolatile memory using alloy nanodot layer with extremely high density”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 48, 1065051-1065054(2009)
- 2) Song Y.H., Bea J.C., Tanaka T., Koyanagi M., “Characteristics of a multiple alloy nanodot memory with an enhanced charge storage capability”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 49, 742011-742015(2010)
- 3) Pei Y., Yin C., Kojima T., Bea J.-C., Kino H., Fukushima T., Tanaka T., Koyanagi M., “MOSFET nonvolatile memory with high-density cobalt-nanodots floating gate and HfO₂ High-k blocking dielectric”, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 10, 528-531(2011)

④ その他

小柳は、工学・工業分野において学術・技術上顕著な業績を挙げ、わが国を代表する研究者として、2011 年に日本工学会フェロー表彰を、また半導体工学の分野において、高集積・大容量半導体メモリ DRAM の基本素子であるスタックド・キャパシタ型メモリセル（スタックセル）の発明、世界に先駆けて三次元集積型集積回路の試作に成功するなど、日本および世界の半導体産業の発展への貢献が評価され、2011 年の紫綬褒章を受賞した。

人材育成面では、研究当時東北大学の工学研究科准教授だった田中徹は、同大学医工学研究科の教授に昇進し、医用ナノシステムの研究を行っている。同じく東北大学工学研究科の准教授だった小野崇人も、研究終了後に教授に昇進した。

3.1.7 半導体スピエンジニアリング（新田 淳作）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

トランジスタなどの半導体素子の最大の特徴は、第三電極を用いた電氣的制御により三端子動作が可能となる点にある。実際、半導体素子の多くでは、電子が持つ「電荷」の増減を電氣的に制御して、基本機能が実現されてきた。本研究では、電子や正孔の「スピン」が関与する現象、即ち 1) 交換相互作用、2) スピン軌道相互作用、3) g -因子に着目し、これらをゲート電極により電氣的に制御し、キャリアのスピンを自在に操作・制御する手法を開発することを目的として研究を進めた。これにより、スピンの自由度に起因した新機能を創出し、超高速性や超省電力性や高機能性を備えた量子情報処理用の基本素子として活用することを目指した。

② 期間中の研究成果

- (i) InAs 層を挿入した InGaAs チャネルは、バンドオフセットが小さいため、ゲート電圧により電子の波導関数の分布が大きく変化する。試作した素子で、角度変調磁場中での磁気抵抗測定を行い、InAs 層挿入 InGaAs チャネルの g -因子を評価した結果、 g -因子がゲート電圧により大きく制御できることを実証した。
- (ii) 量子ドット A 中の電子数が奇数のときにだけ、量子ドット B の近藤効果が抑制されることが観測された。これは、空間的に離れた 2 つの量子ドットにおいて、遠隔的に近藤効果がオン・オフ制御できることを示すものである。InGaAs 量子井戸を含む InP/InGaAs/InAlAs ヘテロ構造において、InGaAs 層の厚さがスピン軌道相互作用のゲート電圧依存性に強く影響することを見出した。
- (iii) ゲート電界によりスピン軌道相互作用を制御する素子として、スピン干渉デバイスを提案し、微細加工を用いて多重スピン干渉ループ素子を作製して、スピン干渉効果を実証した。この結果、キャリアスピンの歳差回転角度がゲート電界により制御できることが示され、このスピン干渉効果は、電界によるスピン位相の制御に起因した干渉効果であり、電子版アハロノフ・キャッシャー効果の直接的観測に相当する。

これらの成果は、学術論文が英文 62 件、口頭発表は、国際会議 30 件、国内会議 66 件、ポスター発表は国際会議 67 件、国内会議 3 件である。この他、国際会議で 25 件、国内会議で 18 件の招待講演を行っている。また、特許は国内 7 件、外国 2 件（内 1 件は 3 カ国）を出願している。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト (3 報以内)

- 1) Bergsten T., Kobayashi T., Sekine Y., Nitta J., “Experimental Demonstration of the Time Reversed Aharonov-Casher Effect”, *Phys. Rev. Lett.*, 97, (2006), 196803

- 2) Sasaki S., Kang S., Kitagawa K., Yamaguchi M., Miyashita S., Maruyama T., Tamura H., Akazaki T., Hirayama Y., Takayanagi H., "Non-local control of the Kondo effect in a double quantum dot-quantum wire coupled system", *Phys. Rev. B* 73, 161303(R) (2006)
- 3) Nitta J., Lin Y., Akazaki T., Koga T., "Gate controlled electron g-factor in InAs-inserted-channel InGaAs/InAlAs heterostructure", *Appl. Phys. Lett.*, 83, (2004), 4565

(2) 研究終了後の継続と発展状況

本研究期間中に開始された科研費基盤研究(A)「磁性半導体・半導体ハイブリッド構造におけるスピン三端子デバイス」(2006年度～2009年度) <Pj. 1>、科研費萌芽研究「スピン注入による半導体スピンホール効果の電氣的検出」(2007年度～2008年度) <Pj. 2>、科研費特定領域研究「スピン軌道相互作用を用いたスピン流の電氣的な検出と制御」(2007年度～2010年度) <Pj. 3>及び、本研究終了後に開始された科研費挑戦的萌芽研究「面内磁場を用いた永久スピン旋回状態の検出と電界制御」(2009年度～2010年度) <Pj. 4>、科研費 基盤研究(S)「相対論的效果を用いたスピndeバイスの創製」(2010年5月31日～2015年3月31日(予定)) <Pj. 5>、科研費挑戦的萌芽研究「電流誘起マグノニック結晶」(2011年4月28日～2013年3月31日(予定)) <Pj. 6>の研究代表者として、本研究の課題である「電子や正孔のスピンを操作・制御する手法の開発」および「スピンの制御を利用した新たな基本素子の開発」を目標とした研究に継続して取り組んでおり、次世代省電力・高速半導体デバイスの実現に寄与する基礎的な知見が得られている。

① 科学技術の進歩への貢献

(i) 電子や正孔のスピンを操作・制御する手法の開発

InGaAs/InAlAs ヘテロ構造において、スピン軌道相互作用の電界制御性を保ちつつスピン緩和を抑制するために、幅 $1\mu\text{m}$ 以下の細線構造を作製し、弱反局在の解析によりスピン緩和時間を評価した結果、1 桁近く長くなることを確認した。また、細線上に形成したゲート電界によりスピン緩和時間が大幅に増加することがわかった。さらに、細線の結晶方位によってスピン緩和長が大きく異なることを見いだした¹⁾。<Pj. 3>

また、界面近傍に形成された2次元電子系に垂直方向に電場をかけたときにスピン分裂が現れるスピン軌道相互作用である Rashba スピン軌道相互作用と、空間反転対称性が破れている III-V 族化合物半導体結晶が作る電場に起因したスピン軌道相互作用である Dresselhaus スピン軌道相互作用が等しくなると、スピン軌道相互作用の作る有効磁場の向きが一軸性となりスピン緩和が抑制される。このような永久スピン旋回状態では散乱を受けてもスピンの歳差運動は乱されず、スピンのコヒーレンスが保たれた状態が実現する。そこで、細線構造のスピン軌道相互作用とゼーマン効果を組み合わせることにより、2つのスピン軌道相互作用の強度比を伝導実験から求める手法を新たに提案し、細線に印加する面内磁場の角度に依存した弱反局在が大きな異方性を示すことを確認して、その有効性を実験的に確認した。<Pj. 3>

さらに、電子スピンの向きを超音波によって制御する実験に世界で初めて成功した。超音波を用いて半導体中の電子を移動させた際、回転運動するスピンの分布を図示化する新しい測定手法を開発し、さらに、スピンをいくつかの異なる方向に移動させた場合や超音波強度を変えた場合のスピンの回転速度の違いを分析することで、超音波によって生じる歪みや電場が、スピン軌道相互作用の大きさを決める一因となっていることを確認した。ここで明らかにした超音波がもたらす新しいタイプのスピン軌道相互作用を用いれば、外部からの電場に代わって、超音波の強度を調節することにより、スピンの向きを自在に操作することが可能となる。

この成果は NTT、ポール・ドルーデ固体エレクトロニクス研究所（ドイツ）との共同研究によるものであり、2011 年 5 月 30 日付で NTT と東北大学のホームページに同時にニュースリリースされた（NTT 持株会社ニュースリリース「半導体中の電子スピンの向きを超音波により制御することに成功～半導体スピントロニクス素子の実現に一步前進～」、<http://www.ntt.co.jp/news2011/1105/110530a.html>）。

また、これまでスピン軌道相互作用に起因した有効磁場の方向がブロッホ球上に作る立体角（スピン幾何学位相）の観測は困難であったが、スピンの幾何学的位相を検出することに成功した。スピン干渉デバイスのリング径を変えることにより電子スピンが感じる面直成分の磁場を変化させ、スピン幾何学位相を系統的に変調させた実験を行ったところ、リング径を大きくするに従い、スピン干渉の周期は短くなるとともに、スピン軌道相互作用の小さい領域にシフトする様子が観測された。この結果を詳細に理論と比較することによりスピンの幾何学的位相は、最大で 1.5 ラジアン程度で、スピンの回転に伴う動的位相と比べて無視できない大きさであることが分かった。この成果の発表論文²⁾は、米国物理学会の注目論文(Selected for a Viewpoint in Physics)として取り上げられたほか、オンラインジャーナル「Physics」に独レーゲンスブルク大学 Klaus Richter 教授による同研究成果の解説記事が掲載されるなど、注目を集めた。

(ii) スピンの制御を利用した新たな基本素子の開発

スピンの向きが揃った電流を生み出すために、上向きスピンと下向きスピンを空間的に分離するシュテルン・ゲルラッハの大掛かりな実験をヒントに、ナノメートルサイズのトランジスタ構造を作製し、両端の電極間に生じる伝導度のゲート電圧依存性からスピン状態の測定を行った（図 3-12）。

その結果、伝導度のサイドゲート電圧依存性は、有効磁場の空間勾配が小さい状態では、通常のアナログサイズのトランジスタに見られる、量子化された階段状の伝導度が観測されたが、トップゲート電圧を変えて有効磁場の空間勾配が大きいく状態にすると、量

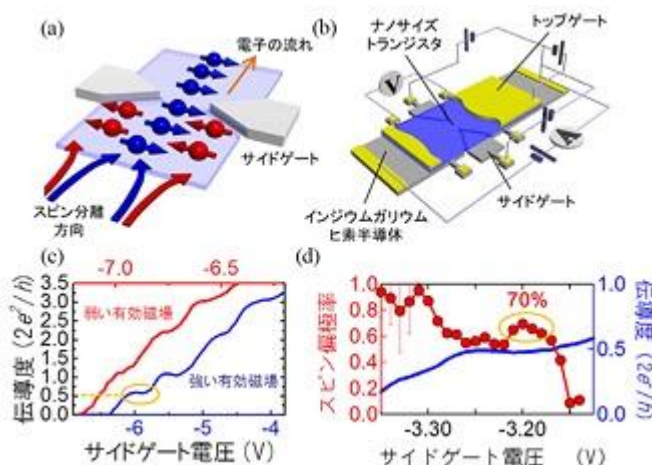


図 3-12 導体中の電子スピンを揃える手法

子化された伝導度のステップは2分の1の大きさになり、新しい伝導チャンネルが形成されることが分かった。

このことは、強磁性体や外部磁場を用いることなく、半導体のみを用いて高効率にスピン偏極電流を生み出せることを意味する⁴⁾。この成果は、次世代省電力・高速半導体デバイスの実現につながるものとして、2012年9月24日付で東北大学・京都大学・科学技術振興機構・東邦大学・NTTの5者連名で報道発表された(NTT持株会社ニュースリリース「強磁性体や外部磁場を用いずに電子のスピンを揃えることに世界で初めて成功—半導体中でシュテルン-ゲルラッハのスピン分離実験を実現—」、<http://www.ntt.co.jp/news2012/1209/120924a.html>)。

② 社会・経済的波及効果

近年、情報社会を牽引してきたシリコン半導体の限界が現実味を帯びて議論されるようになってきた。現在の微細化技術が物理的な壁にぶつかって早ければ2020年ごろには新しい原理のデバイスが必要になるとの見方が高まっている。この壁を打ち破る候補の1つとして、電子が持つ電荷とスピンの両方を工学的に利用、応用するスピントロニクス分野の研究開発が積極的に進められており、巨大磁気抵抗(GMR)効果やトンネル磁気抵抗効果(TMR)のような、スピンに依存する電気伝導現象を利用して、磁気ディスクのヘッドや不揮発性メモリなどが開発されている。ここで開発されたゲート電界によるスピン制御技術は、このようなスピントロニクスの基礎的知見を広げ、スピン制御の基礎的方法を確立するもので、スピン利用トランジスタや新型不揮発メモリへの期待が新聞でも報じられた(2009年6月5日 日経産業新聞)。

また、スピンの幾何学的位相を検出することに成功したことによって、散逸を伴わない永久スピン流の制御やスピン情報処理の最小単位となる量子ビットへの応用が期待されることが新聞でも報じられた(2012年2月29日 日刊工業新聞および2012年3月9日科学新聞)。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト(4報以内)

- 1) Kunihashi Y., Kohda M., Nitta J., “Enhancement of spin lifetime in gate-Fitted InGaAs Narrow wires”, *Physical Review Letters*, 102, No.226601(2009)
- 2) Nagasawa F., Takagi J., Kunihashi Y., Kohda M., Nitta J., “Experimental demonstration of spin geometric phase: Radius dependence of time-reversal aharonov-casher oscillations”, *Physical Review Letters*, 108(8), No.86801(2012)
- 3) Kohda M., Lechner V., Kunihashi Y., Dollinger T., Olbrich P., Schonhuber C., Caspers I., Bel’Kov V.V., Golub L.E., Weiss D., Richter K., Nitta J., Ganichev S.D., “Gate-controlled persistent spin helix state in (In,Ga)As quantum wells”, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 86, No.81306(2012)
- 4) Kohda M., Nakamura S., Nishihara Y., Kobayashi K., Ono T., Ohe J., Tokura Y.,

Mineno T., Nitta J., “Spin-orbit induced electronic spin separation in semiconductor nanostructures”, *Nature Communications*, 3, No.1082(2012)

④ その他

人材育成に関する内容として、研究当時東北大学助教として参加した好田誠は、同大学特任准教授となり、JST さきがけ研究領域「界面の構造と制御」領域の 3 期生として採択された（2009～2011 年度、採択課題名「半導体ヘテロ界面のスピン軌道相互作用制御による電气的スピン生成・検出機能の創製」）。好田は 2010 年 3 月に財団法人トーキン科学技術振興財団研究奨励賞を、同年 7 月には財団法人本多記念会原田研究奨励賞を受賞している。

3.1.8 単一磁束量子テラヘルツエレクトロニクスの創製（藤巻 朗）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

本研究では、高温超伝導体 YBCO ジョセフソン接合の高性能化を進め、テラヘルツ帯で動く単一磁束量子 (SFQ) 回路の実現を目指す研究を進めた。特に、積層型 JJ で問題となる YBCO と障壁との界面特性を均質プラズマの活用で格段に高める技術を開発し、高い $I_c R_n$ 積を得た。この結果、SFQ 型分周回路で、500GHz (0.5THz) 動作が実現した。また、YBCO 系超高速回路での入出力を光学的に行う手法に関し、新知見を得た。

② 期間中の研究成果

- (i) 積層構造ジョセフソン接合において、優れた $I_c R_n$ 積値を得るとともに、素子ばらつきを減らすことに成功し、すぐれた特性を有する SFQ 回路を構成する見通しを得た。
- (ii) SFQ 回路への入出力方式がひとつの課題であるが、100GHz を越える光信号の入力に成功し、特性は不十分ながら MO 効果による出力手法が示された。
- (iii) 高温超伝導体ジョセフソン接合の特性を基礎的な立場から検討により、高温超伝導体ジョセフソン接合の特性劣化要因の新しいモデルを提案した。
- (iv) 近接磁性体を用いた新規ジョセフソン接合構造を提案し、ジョセフソン接合動作を検証した。

これらの成果についての発表論文数は、英文 95 件、和文 1 件、口頭発表は、国際会議 40 件、国内会議 134 件、ポスター発表は国際会議 81 件、国内会議 2 件である。この他、国際会議で 43 件、国内会議で 2 件の招待講演を行った。また、受賞は 5 件。特許は国内出願 4 件、新規ジョセフソン接合の構造に関して 1 件の外国出願を行った。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト (3 報以内)

- 1) Kimura T., Wakita K., Yoshinaga Y., Taniike K., Nishitani T., Inoue M., Fujimaki A., Hayakawa H., "Vertically-Stacked Josephson Junctions Using YbBa₂Cu₃O_{7-x} as a Counter Electrode for Improving Uniformity", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15, 145-148 (2005)
- 2) Inoue M., Nishitani T., Fujimaki A., Yamada T., Sawaki K., Kawayama I., Tonouchi M., "Study on the optical input interface for Nb single-flux-quantum logic circuits", *Applied Physics Letters*, 89, Art.-No.252511 (3 pages) (2006)
- 3) Kawayama I., Doda Y., Kinjo R., Kiwa T., Murakami H., Tonouchi M., "Study on Sub-THz Signal Input for Superconducting Electronic Devices", *IEICE Transactions on Electronics*, E90-C, 588-594 (2007)

(2) 研究終了後の継続と発展状況

本研究では、「高温超伝導デバイスの優位性実証」を中心的課題としていたが、本研究終了後の研究においては、本研究で得られた学術的、技術的成果を利用するとともに、高温超伝導材料に限定せず、ニオブ系の材料についてもデバイス応用、回路応用に向けた研究を進めている。

本研究期間中に開始された科研費特定領域研究「単一磁束量子局在電磁波集積回路プロセスに関する研究」（2006～2009 年度）＜Pj. 1＞及び、本研究終了後に開始された科研費萌芽研究→挑戦的萌芽研究「大容量単一磁束量子スピンメモリ」（2008～2009 年度）＜Pj. 2＞、科研費基盤研究(B)「サブテラヘルツ回路ブロック実装による超伝導デジタル RF 受信機の開発」（2008～2010 年度）＜Pj. 3＞、科研費挑戦的萌芽研究「低損傷ナノメートル加工による高温超伝導体ダイオードの創製とその応用」（2011 年 4 月 28 日～2013 年 3 月 31 日）＜Pj. 4＞、JST 先端計測分析技術・機器開発事業「単一磁束量子信号処理の超小型中性子回折装置」（2008～2010 年度）＜Pj. 5＞、JST 先端的低炭素化技術開発 (ALCA)「低エネルギー情報ネットワーク用光・磁気・超伝導融合システム」（2011 年度～未定）＜Pj. 6＞の研究代表者として「超伝導単一磁束量子テラヘルツエレクトロニクス」の基盤確立と、そこで用いる高温超伝導デバイスの優位性実証」を目標とした研究に継続して取り組んでいる。

① 科学技術の進歩への貢献

数千個の単一磁束量子(SFQ) 浮動小数点演算ユニットからなる大規模再構成可能データパス(LSRDP)のための回路ブロックとして、Nb 材料を用いたシストリック・ビットシリアル半精度浮動小数点乗算器(FPM)を設計・試作して、クロック周波数 25GHz で動作することを確認した。回路の大きさは 6. 22mm x 3. 78mm で、11044 個のジョセフソン接合を有している¹⁾ (図 3-13、3-14)。

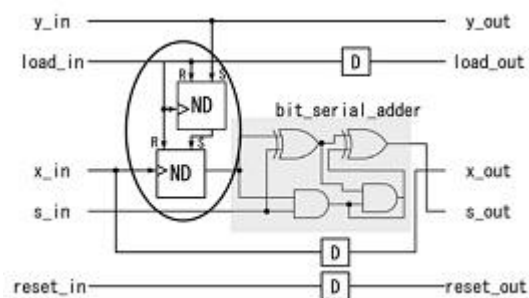


図 3-13 シストリックアレイ・ビットシリアル乗算器の回路構成

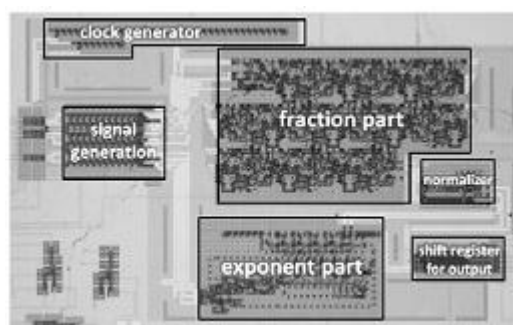


図 3-14 SFQ 半精度 FPM 回路 (高速テスト用回路を含む)

ジョセフソン接合よりも構造が簡単なナノブリッジを、高温超伝導材料を用いて作製した。世界最小の 30nm 幅まで細線化することに成功し、電気特性の評価を行った。MgO 基板に堆積する $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の膜厚を 30nm まで薄膜化したところ、ジョセフソン接合に匹敵する電流-電圧特性を示すようになり、再現性も優れていた。臨界電流密度は $620\text{MA}/\text{cm}^2$ で、臨界温度は 87K であった。高温超伝導膜のパターン形成の際に ECR エッチングによる損傷を

回復するために、2～3nm の極薄 YBCO 膜で被覆して良好な超伝導特性を得ることができた²⁾ (図 3-15)。

絶縁層として YBCO と格子ミスマッチの小さな PGO 膜を用いることにより、MgO 基板上に形成した 180～240nm 厚の YBCO 膜の上に結晶性の良い上層 YBCO 膜を積層した構造を形成して、高温超伝導積層ジョセフソン接合によるトグルフリップフロップ回路を試作し、500GHz までの動作に成功した。これは、高温超伝導材料を用いた回路では最高の値である³⁾ (図 3-16)。

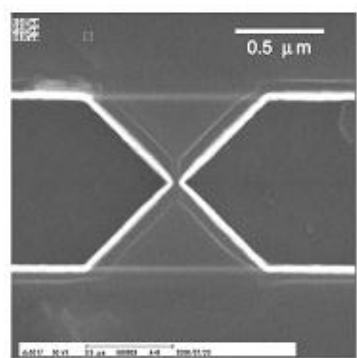


図 3-15 30nm 幅の YBCO ナノブリッジの SEM 像

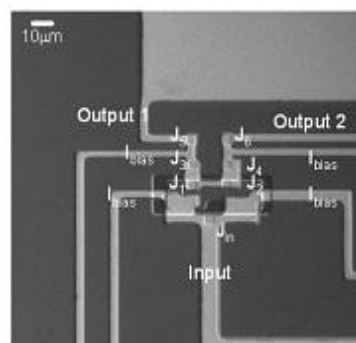


図 3-16 トグルフリップフロップ回路の SEM 像

100GHz 以上の高速性が必要な部分（ヘッドとなる量子干渉素子と周波数を下げるトグルフリップフロップ）にのみ高温超伝導回路を使用した A/D 変換器(ADC)を試作評価した。層間絶縁層を電極となる高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ と同じ結晶構造を持つ Ga ドープ $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ に変えることにより 120GHz での安定動作を得ることができた。〈Pj. 3〉

良好な特性が得られたアモルファスホウ素薄膜をトンネル障壁層とした、臨界温度の高い MgB_2 ジョセフソン接合を作製・評価した。また、 MgB_2 薄膜を用いた中性子検出器によって、従来の電離ガス中性子検出器と比べ応答速度や空間分解能、大きさにおいて大幅に優れている超小型中性子回折装置を試作した。検出器として用いる 2 入力単一磁束量子回路を作製し、時間分解能 20ns 消費電力 $400 \mu\text{W}$ の結果を得た⁴⁾。

② 社会・経済的波及効果

ジョセフソン接合のスイッチングによる消費エネルギーは 0.2aJ 程度、遅延時間は数 psec である。超低消費電力で超高速という超伝導単一磁束量子回路は、極低温環境を必要とするが、その冷却に要する電力を考慮しても、半導体回路などと比較して桁違いの低電力かつ高速性を実現できる可能性があり、ここで開発された単一磁束量子回路技術は有望な情報処理技術の確立につながる技術である。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト(4 報以内)

- 1) Hara H., Obata K., Park H., Yamanashi Y., Taketomi K., Yoshikawa N., Tanaka M., Fujimaki A., Takagi N., Takagi K., Nagasawa S., “Design, implementation and

on-chip high-speed test of sfq half-precision floating-point multiplier”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19, 657-660(2009)

- 2) Kajino K., Kimura T., Horii Y., Watanabe M., Inoue M., Fujimaki A., “Preparation of narrowed YBa₂Cu₃O_{7-x} nanobridges down to 30 nm with reduced degradation”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19, 178-182(2009)
- 3) Kimura T., Kajino K., Watanabe M., Horii Y., Inoue M., Fujimaki A., “Operation of toggle flip-flop circuits up to 500 GHz based on vertically-stacked high-temperature superconductor josephson junctions”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19, 127-130(2009)
- 4) Fujimaki A., Nakanishi I., Miyajima S., Arai K., Akita Y., Ishida T., “Proposal of a compact neutron diffraction system with a single-flux-quantum signal processor”, *IEICE Transactions on Electronics*, E94-C, 254-259(2011)

④ その他

研究は4つのグループに分かれており、それぞれのグループの昇進・ポスト獲得等に至った例を記す。

<HTS 接合グループ>

- ・ 井上真澄（研究名古屋大学講師）は、藤巻研究室の准教授となっている。

<光インターフェースグループ>

- ・ 紀和利彦（研究当時博士研究員）は、岡山大学自然科学研究科の准教授となっている。

<SFC 結合グループ>

- ・ 前田京剛（研究当時東京大学准教授）は、東京大学総合文化研究科の教授となっている
- ・ 田仲由喜夫（研究当時名古屋大学准教授）は、名古屋大学の教授となっている。
- ・ 北野晴久（研究当時東京大学助教）は、青山学院大学理工学部の准教授となっている。
- ・ 井上亮太郎（研究当時 CREST 研究員）は、東京大学先端科学技術研究センターの特任助教となっている。
- ・ 木下健太郎（研究当時 CREST 研究員）は、鳥取大学工学部の助教となっている。

3.1.9 超ヘテロナノ構造によるバリスティック電子デバイスの創製（古屋 一仁）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

InP 系ヘテロ構造を用いた高速電子デバイスの応答速度が急速に向上し、ヘテロバイポーラトランジスタでは 700GHz を超える遮断周波数も報告されている。これは、電子走行領域の微細化によって、電子飽和速度 $3 \times 10^7 \text{cm/s}$ を上回る電子速度が達成されたことによる。しかし、従来デバイスの構造を微細化するだけでは電子のバリスティック性を十分に活かしきれない。

本研究では、1THz に迫る超高速電子素子を目指し、設計解析と試作技術の研究を進め、半導体に加えて金属や絶縁体までを含む複合ヘテロ型ナノ構造を 3 次元的に配置できるプロセス技術を開発し、新構造のヘテロバイポーラトランジスタやゲート制御型のホットエレクトロントランジスタを試作、改良次第で、従来素子の速度限界を凌ぐ可能性を示した。さらに、共鳴トンネル素子を高度化し、3 次高調波成分であるが、室温動作固体素子で初の 1THz を越す発振を実現した。

② 期間中の研究成果

- (i) 世界最小のコレクター容量を有するヘテロバイポーラトランジスタ (HBT)、幅 25nm のメサ型エミッタを備えたホットエレクトロントランジスタを実現した。
- (ii) シリコン基板上に形成した CoSi₂/CdF₂/Si ヘテロ構造の共鳴トンネルダイオードを試作し、ピークバレー電流比として 33 を室温で実現した。
- (iii) 3 次高調波で THz に届く常温固体発振素子の実現、半導体クライストロンの提案とその原理を検証した。
- (iv) 半導体内の電子が量子力学に従って、平面波としての性質を示すことを実証するために、ダブルスリット構造を通過した電子が伝搬の後に干渉し、干渉パターンを形成することを観測し実験的に証明し、その素子応用を提案した。

これらの成果は、学術論文（英文 34 件、和文 2 件）として発表された。口頭発表は、国際会議 26 件、国内会議 92 件、ポスター発表は国際会議 16 件、国内会議 7 件である。この他、国際会議で 17 件、国内会議で 9 件の招待講演を行っている。また、受賞は 3 件。特許は、国内出願が 6 件であり、そのうち、ホットエレクトロントランジスタ、HBT、超高速トランジスタを利用した新光通信システム構成法の 3 件については、外国出願も行った。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト（3 報以内）

- 1) Igarashi M., Furuya K., Miyamoto Y., “Cutoff frequency characteristics of gate-controlled hot-electron transistors by Monte Carlo simulation”, *Phys.stat.sol.(c)* 5, 70-73 (2007)
- 2) Orihashi N., Suzuki S., Asada M., “One THz Harmonic Oscillation of Resonant

Tunneling Diode”, *Appl. Phys. Lett.*, 87, 233501 (2005)

- 3) Miyamoto Y., Nakagawa R., Kashima I., Ishida M., Machida N., Furuya K.,
“Current Gain and Voltage Gain in Hot Electron Transistors without Base Layer,”
Trans. IECE of Japan, vol. E89-C, 972-978 (2006)

(2) 研究終了後の継続と発展状況

本研究終了後に科研費 基盤研究(B)「電子波フーリエ変換機能に基づく固体デバイス実現のための基礎研究」(2009 年度) <Pj.1>を研究代表者として獲得し、本研究に引き続いて電子波面制御デバイスについて実験的、理論的な研究を行った。2010 年 4 月に古屋が国立東京工業専門学校校長となり、研究室は准教授の宮本恭幸が継承している。

本研究の課題であるヘテロ接合バイポーラトランジスタおよびバリスティックトランジスタについても継続して理論的解析とデバイス試作を行って、高性能化を進めている。

① 科学技術の進歩への貢献

(i) ヘテロ接合バイポーラトランジスタ

GaAs に比べて速度が 2 倍程度速くなると考えられる InP を用いた InP/InGaAs ヘテロ接合バイポーラトランジスタを試作した。半導体中に埋め込んだ金属細線をコレクタ電極とすることで、総ベースコレクタ容量 1fF 以下という世界最小の容量を実現し、絶縁物をコレクタ領域周囲に埋め込むことで高速化を図り、シングルヘテロ構造で遮断周波数 f_T が 468GHz という結果を得た。さらに、ベースコレクタ容量の低減による寄与を解析し、コレクタ領域に SiO_2 細線を埋め込んだダブルヘテロ構造では f_T が 213GHz という結果を得た¹⁾ (図 3-17)。

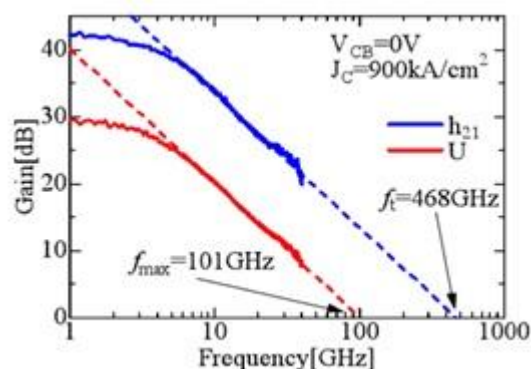


図 3-17 遮断周波数 468GHz の素子の特性

(ii) バリスティックトランジスタ

本研究において提案したノンドーブ InGaAs メサ構造をチャネル領域に用いてバリスティック走行させるゲート制御型ホットエレクトロントランジスタを試作した。従来のチャネルメサ幅 25nm をさらに微細化したチャネルメサ幅 15nm、チャネル長 60nm の素子を試作して 7MA/cm² という大きな電流密度を実現した²⁾ (図 3-18)。

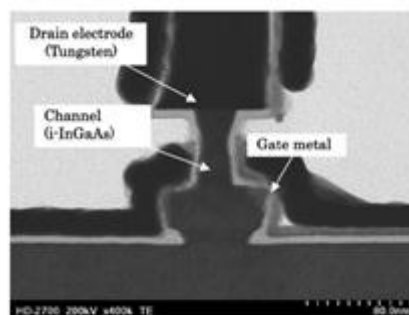


図 3-18 チャネル幅 15nm の素子の断面 STEM 像

(iii) InP/InGaAs チャネル MOSFET

チャネル領域を高移動度の複合膜 In(5nm)/InGaAs(12nm) とし、低抵抗で高注入電流を可能とするためにソース／ドレイン領域を追加成長した構造の MOSFET (チャネル長 150nm) を試作し、ドレイン電流 $0.93\text{mA}/\mu\text{m}$ ($V_g=3\text{V}$, $V_d=1\text{V}$) および相互コンダクタンス $0.53\text{mS}/\mu\text{m}$ という良好な結果を得た³⁾。

(iv) 電子波面制御デバイス⁴⁾ <Pj. 1>

走査探針/金薄層/i-InP/i-GaInAs/i-InP/ δ ドープ層/i-InP/n-GaInAs という層構造において、走査探針からホットエレクトロンを注入し、貫通電流を検出することによって電子波コヒーレンスの挙動を解明することを目指している。そのために必要な金/InP の良好なショットキー特性を硫化アンモニウム処理により達成した(ショットキー障壁高さ 0.64eV)。探針を 2 次元走査し、コレクタ電流の 2 次元分布を描画し、回折現象を観測し、回折特性から波面広がり进行评估した。

また、上記デバイスの最適構造・測定条件における電子波伝搬のシミュレーションを行った結果、S/N 比は 3 となり、信号検出が可能になったことが明らかになった。

さらに、コヒーレントフォノンとコヒーレントホットエレクトロンの相互作用を理論的に研究した。InP に ZnO 薄膜を 5nm 堆積させた構造で膜厚方向に 400GHz (または 100GHz)、1V を加えた時の縦波変位振幅は 2pm、ブラッグ反射による阻止帯幅は 8.3meV であり、室温で観測可能との見通しを得た。

② 社会・経済的波及効果

InP 系ヘテロ構造、および、金属や絶縁体までを含む複合ヘテロ型ナノ構造を生かしたさらなる高速電子デバイスが実用化されれば、電子情報機器のより一層の高速化を実現するものとなる。

InP 系光デバイスの担当として、研究室を継承した宮本や、本研究での共同研究者であった浅田雅洋 (東京工業大学大学院総合理工学研究科教授) が参加する科研費特別推進研究「Si 系 LSI 内広帯域配線層の為の InP 系メンブレン光・電子デバイス」(研究代表者: 荒井滋久) は、LSI チップの計算速度の向上と消費電力の大幅削減を実現するために、シリコン素子上にレーザ光源を作り込んで高速の光配線を実現し、さらにテラヘルツ波発振器を作り込んで LSI チップ間の通信を実現する研究であり、電子・光・テラヘルツという異なる 3 分野の研究者の協力のもとに、異なる機能ブロックを統合した効率的なデバイスを実現して、情報通信網の高速化と低消費電力化につなげることを目指している (2008 年 6 月 16 日/6/16 日経産業新聞)。この研究を推進するための組織として、東京工業大学に「量子ナノエレクトロニクス研究センター」が設立されており、本研究領域の別研究「低次元量子構造を用いる機能光デバイスの創製」の研究代表者である荒井滋久とも協力して、連携した研究が推進されている。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト (4 報以内)

- 1) Takebe N., Kobayashi T., Suzuki H., Miyamoto Y., Furuya K., “Fabrication of InP/InGaAs DHBTs with buried SiO₂ wires”, *IEICE Transactions on Electronics*,

E94-C, 830-834(2011)

- 2) Saito H., Miyamoto Y., Furuya K., “Fabrication of vertical InGaAs channel metal-insulator-semiconductor field effect transistor with a 15-nm-wide mesa structure and a drain current density of 7MA/cm²”, *Applied Physics Express*, 3, 84101(2010)
- 3) Kanazawa T., Wakabayashi K., Saito H., Terao R., Ikeda S., Miyamoto Y., Furuya K., “Submicron InP/InGaAs composite-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor with selectively regrown n⁺-source”, *Applied Physics Express*, 3, No.94201(2010)
- 4) Nishimura S., Furuya K., Miyamoto Y., “Design and simulation of hot-electron diffraction observation using scanning probe: Quantitative evaluation of observation possibility”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 47, 8652-8658(2008)

④ その他

古屋は、学会への長年の貢献を評価され、応用物理学会と米国電気工学会(IEEE)からフェロー表彰を 2009 年に受けている。2010 年 4 月からは国立東京工業専門学校の校長となり、研究遂行で得た知見や最先端研究の経験を生かして、若い技術者の卵たちをこれからの日本のモノづくり産業の担い手に育成する事業に取り組んでいる。研究室は准教授の宮本恭幸が継承している。

研究参加研究員のうち、研究期間中博士課程在学中だった鈴木左文は、東京工業大学の助教となっており、総務省の戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)に採択されている(2011 年度 採択課題名「共鳴トンネルダイオード発振器の直接 ASK 変調による大容量テラヘルツ通信」)。

3.1.10 InN 系窒化物ナノデバイス／ナノプロセスの分子線エピタキシ法による新展開 (吉川 明彦)

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

窒化インジウム(InN)は、理論電子移動度が高いため高速電子素子材料として期待され、また、GaN との混晶として、青色発光デバイスの材料としても使われてきている。しかし、純粋な InN は成長が難しく、品質と純度の高い結晶は得にくいため、物性計測の多くは低純度の多結晶材料を用いて行われ、エネルギーバンドギャップを含め、信頼に足るデータが得られていなかった。このような状況の中で、本研究では、青色 LED に必須の窒化物半導体の中で、基礎物性も材料科学的性質も詳らかでなかった InN に着目し、分子線エピタキシーによる成長、物性解明と応用探索の研究を進めた。特に、InN 表面の極性の精密制御によって、結晶の高品質化の手法を示した。その結果、一分子層 InN を含む量子井戸の実現と青紫色 LED への応用、InN 内の残留電子濃度の低減と p 型 InN の成長が可能となり、InN の素子応用の基盤が築かれた。

② 期間中の研究成果

- (i) InN 量子ドット、ナノコラムなどの成長メカニズムをその場観察 MBE 法を用いて調べ、低次元量子構造の成長技術を開拓した。InN 系材料のエピタキシ過程を解明し、極めて平坦な表面と高品質の結晶を実現した。
- (ii) 残留電子濃度の低減とその起源を調べ、主として刃状貫通転位に因ることを見出した。成長条件を改善し、残留電子密度を $2\sim 6\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ まで低減させ、 $2000\text{cm}^2/\text{Vsec}$ 程の電子移動度を持つ高品質結晶の成長を可能とした。また、Mg ドープで p 型化に成功、正孔移動度約 $25\text{cm}^2/\text{Vsec}$ を得た。
- (iii) 成長条件を最適化し、1 分子層の InN を InGaN および GaN に埋め込んだ量子井戸や超格子を作製、X 線回折で、良好なサテライトピークを観測した。また、この構造を活かした発光ダイオードを試作し、青紫、青緑色の発光を確認した。1 分子層の InN を埋め込んだ HEMT 構造の可能性を検討し、電子の移動度や濃度に関して調べ、電子素子応用の道筋を示した。

発表論文は、英文 65 件、和文 14 件である。口頭発表は、国際会議 45 件、国内会議 98 件であり、ポスター発表は国際会議 26 件、国内会議 0 件である。この他、国際会議で 16 件、国内会議で 5 件の招待講演を行った。また、特許は国内 6 件、外国 1 件（6 カ国）を出願した。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト(3 報以内)

- 1) Yoshikawa A., Che S.B., Yamaguchi W., Saito H., Wang X.Q., Ishitani Y., Hwang E.S., “Proposal and achievement of novel structure InN/GaN multiple quantum wells consisting of 1 ML and fractional monolayer InN wells inserted in GaN

matrix”, *Applied Physics Letters* 90, 073101 (2007).

- 2) Wang X., Che S.-B., Ishitani Y., Yoshikawa A., “Systematic study on p-type doping control of InN with different Mg concentrations in both In and N polarities”, *Applied Physics Letters* 91, 242111 (2007).
- 3) Che S.-B., Mizuno T, Wang X., Ishitani Y., Yoshikawa A., “Fabrication and properties of coherent-structure In-polarity InN/In_{0.7}Ga_{0.3}N multi-quantum wells emitting at around 1.55 μm ”, *Journal of Applied Physics* 102, 083539 (2007)

(2) 研究終了後の継続と発展状況

本研究に引き続いて科研費特定領域研究「極広域分光による窒化物半導体ナノデバイス構造の精密評価」(2006 年度～2010 年度) <Pj. 1>、及び、科研費基盤研究(A)「窒化物半導体超薄膜 “1 分子層”量子井戸構造光素子の基盤科学技術開拓」(2011 年 4 月 1 日～2015 年 3 月 31 日) <Pj. 2>の研究代表者と研究助成金を獲得している。本研究により開発された高品質結晶成長技術および 1 分子層成長技術を用いて、種々の膜構成の InN 系 LED を試作し、その光学特性を評価、解析した。

また、JST 先端的低炭素化技術開発 (ALCA)「太陽電池および太陽エネルギー利用システム」“マジック超構造による窒化物太陽電池スマートイノベーション”(2011 年 3 月 1 日～2016 年 3 月 31 日(予定)) <Pj. 3>の中で、本研究により開発された 1 分子層 InN/GaN マトリクス量子井戸がコヒーレント構造であることから、短周期超格子による InGa_{0.5}N 疑似混晶を利用し、次世代高効率太陽電池を提案し、光電変換特製の検討を進めている。

① 科学技術の進歩への貢献

以下に示すような 1～2 分子層の InN 層成長技術を適用して、Ga_{0.5}N/InN/InGa_{0.5}N/GaN の非対称量子井戸構造による青緑色発光 (～500nm)、および In/InGa_{0.5}N の量子井戸 LED 構成による紫色から緑色に渡る発光 (InGa_{0.5}N 層の In 比により 410nm～530nm) を得た ^{1), 2)} (図 3-19、3-20)。

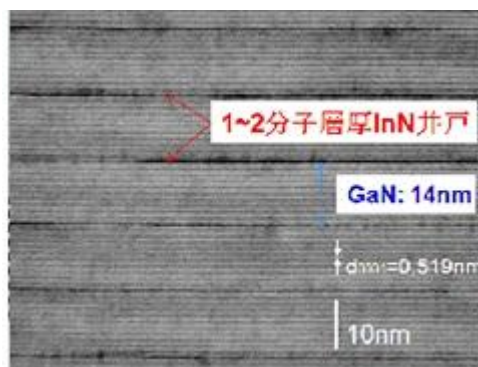


図 3-19 1 分子層 InN/GaN 多層量子井戸の断面電子顕微鏡像



図 3-20 1 分子層 InN ナノ構造を発光層とした青緑 LED の構造例

また、Mg ドープによる p 型伝導 InN 層の電氣的性質、光学的性質および構造的性質について、広い Mg 添加量の範囲で系統的かつ詳細に解析し、p 型伝導制御の条件を確立した。また、N 極性の InN 膜では In 極性の膜に比べて格子欠陥の量が増加することなどを確認した<Pj. 1>。

さらに、Mg ドープの有無に依らず InN 層中に In の薄いナノ構造部分が形成されると大きな磁気抵抗効果が生ずることを確認した⁴⁾。

これらの成果は、InN 層の均一性の向上や 1 分子層量子井戸デバイスの開発促進に寄与して、InN 系デバイスの発光波長範囲の拡大および実用化につながる技術である。

また、InN/GaN 短周期超格子による InGaN 疑似混晶は、実効的な In 組成を高めた場合でも基本的にコヒーレント構造でデバイスを作製しようとするものであり、発光・受光いずれにも応用可能な技術である。

② 社会・経済的波及効果

1 分子層 InN 膜形成技術をもとに、InGaN の実効的な混晶比を変えた膜を積層すると、広い範囲にわたる太陽光スペクトルを有効に利用できるタンデム型太陽電池ができるので、太陽電池の効率の改善に有用な技術となる。本研究の成果を発展させた InN/GaN 短周期超格子によるコヒーレント構造の疑似混晶化は発光・受光いずれにも応用可能であり、光学素子としての広い応用につながる技術である。

また、現在、青色ないし緑色発光デバイスには Ga を含むものが主であるが、地球上の資源の偏在を考慮すると、In に比べて Ga は主に中国、カザフスタン、ウクライナに偏在している。カントリーリスクからは、その他の元素材料を主体とするデバイスの開発が望ましいので、この間に得られた成果をもとに、各層の電氣的性質、光学的性質および構造的性質を解明して、量子井戸構造のさらなる最適化を推進することによって、InN 系発光デバイスの実用化が可能になれば、有用なデバイス応用展開につながる。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト(4 報以内)

- 1) Che S., Yuki A., Watanabe H., Ishitani Y., Yoshikawa A., “Fabrication of asymmetric GaN/InN/InGaN/GaN quantum-well light emitting diodes for reducing the quantum-confined stark effect in the blue-green region”, *Applied Physics Express*, 2, No.21001(2009)
- 2) Yuki A., Watanabe H., Che S.-B., Ishitani Y., Yoshikawa A., “1-2 ML thick InN-based quantum wells with InGaN barriers for blue-green light emitters”, *Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics*, 6, S417-S420(2009)
- 3) Schoche S., Hofmann T., Sedrine N.B., Darakchieva V., Wang X., Yoshikawa A., Schubert M., “Infrared ellipsometry and near-infrared-to-vacuum-ultraviolet ellipsometry study of free-charge carrier properties in In-polar p-type InN”, *Materials Res. Soc. Symp. Proc.*, 1396, 199-204(2012)

- 4) Komissarova T.A., Shakhov M.A., Jmerik V.N., Parfeniev R.V., Paturi P., Wang X., Yoshikawa A., Ivanov S.V., “Large magnetoresistance effect in InN epilayers”, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 82, No.245204(2010)

④ その他

吉川は学会へ長年の貢献から、2008年に応用物理学会フェロー表彰を受けている。

研究終了以降の人材の昇進・ポスト獲得については以下のとおりである。

<千葉大学グループ>

- ・ 石谷善博（研究期間中は千葉大学准教授）は、千葉大学の教授となっている。
- ・ 寺島亘（研究期間中は博士課程学生）は、理化学研究所基幹研究所の研究員となっている（テラヘルツ光研究グループ）
- ・ 王新強（研究期間中は研究員）は、北京大学物理学系の教授となっている。

<埼玉大学グループ>

- ・ 矢口裕之（研究期間中は埼玉大学助教）は、埼玉大学の教授となっている。
- ・ 土方泰斗（研究期間中は埼玉大学助教）は、埼玉大学の准教授となっている。

<帝京科学大学グループ>

- ・ 内田恭敬（研究期間中は帝京科学大学准教授）は、帝京科学大学の教授となっている。

第 4 章 科学技術イノベーションに資する研究成果の状況

追跡調査時点において、科学技術イノベーション創出に資する展開をしていると思われる数事例について研究代表者にインタビューを行い、基礎研究からの展開について本章でまとめた。また、この領域の動向に精通しているアドバイザーにインタビューしてこの研究領域の全般的な状況について説明を受け、併せて本章でまとめた。

4.1 研究領域からの研究成果事例

4.1.1 有機半導体レーザーの構築とデバイス物理の解明（安達 千波矢）

4.1.1.1 研究テーマの状況

有機発光デバイスのための有機 EL 材料は、研究終了後に実現した新しい第 3 世代である熱活性型遅延蛍光 (TADF) 材料の開発によって、内部効率の高さと低コストとを両立させることができた (図 4-1)。(3.1.2. 参照)

4.1.1.2 研究成果の波及と展望

(1) TADF 材料開発の展開

三重項準位 T_1 と一重項準位 S_1 とのエネルギーギャップ ΔE_{ST} を $\sim 0.1\text{eV}$ にした TADF 材料を 2012 年 12 月に発表¹⁾したが、2013 年 6 月には ΔE_{ST} を 0.01eV にまで小さくした材料も合成して同様の高効率発光が可能であることを確認した²⁾。

さらに、三重項準位 T_1 が一重項準位 S_1 よりも上になるようなマイナスギャップを目指した革新的材料の開発を進めている。マイナスギャップ材料は発光時に位相の揃った光を得ることができて、有機レーザーへの適用の可能性が期待できる (図 4-2)。

TADF 材料により、低コスト材料を使って発光効率の飛躍的向上が実現できたので、次の技術的課題は、信頼性向上である。長寿命化については、現在緑色発光で 3,000 時間というレベルに達しており³⁾、実用化の

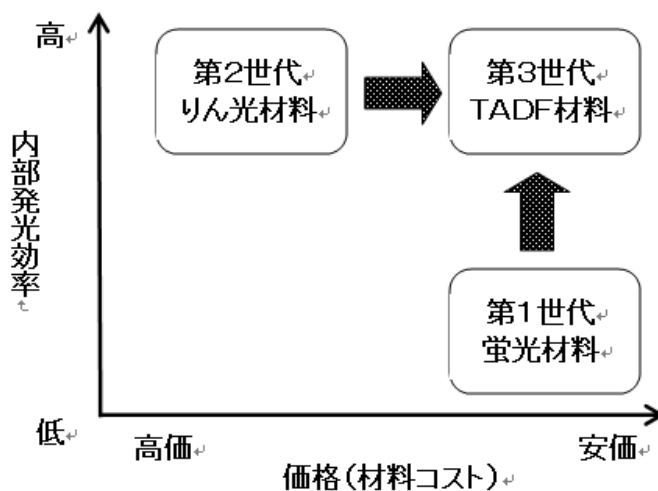


図 4-1 有機 EL 材料の発展

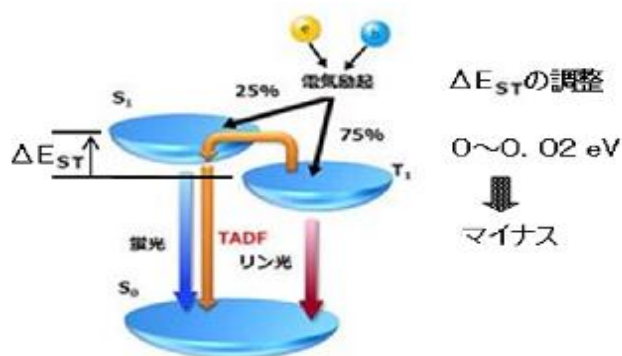


図 4-2 TADF 材料のエネルギーギャップ ΔE_{ST} の調整

メドである1万時間に近づいている。

表示ディスプレイに適用するには、フルカラー表示のための3原色の発光あるいは「白色光源+カラーフィルタ」という構成が必要になる。そこで、緑色に加え第2世代のリン光材料では実現できていないピュアーな青色発光材料の開発に成功し⁴⁾、また3原色のうち開発が遅くなると予想されていた赤色についても新たなTADF材料を開発が進んでいる。

(2) 企業との連携枠組みの発展

大学での研究により有機ELデバイスの発光効率の飛躍的向上を低コスト材料で実現できる技術の基礎・基盤を確立してきたが、次の段階は、実用化に向けて製品を作る企業との連携により生産段階へつなげることが重要になる。そのためには、企業との連携のあり方すなわち連携枠組みの発展も必要になる。

本研究終了後に行われた「最先端研究開発支援プログラム(FIRST)(2009年度~2013年度)」では、九州大学に最先端有機光エレクトロニクス研究センター(OPERA)を創設し、多数の企業との連携を強化し、一つ屋根の下で産学が連携するOpen Innovation体制を構築した。これまでの個別企業と九州大学との一対一の連携ではなく、大学という開かれた研究機関を中核として、企業の研究者同士も議論できる大部屋方式で進めることにし、それぞれの寄与に応じた比率でライセンスする仕組みにした。どのテーマにも必ず大学が加わるようにして、知的財産権が大学に残るようにしている。

2012年4月、福岡県産業・科学技術振興財団(ふくおかIST)のもとに設立したi³-OPERAは、企業とのコラボレーションのための拠点である⁵⁾。i³-OPERAでは、企業が自前で持つのが難しい新たな材料向けのデバイス試作や評価のための装置を揃えて実用化の後押しをする。

また、来年1月~3月頃には、有機発光デバイス実用化に向けた材料開発を行うために、大学発のベンチャーを発足させる予定である。有機ELデバイスの積層構造を形成する各層の材料開発にはそれぞれを得意とする材料メーカーがあるので、相互に協力して実用化のための開発を推進できるようにする(図4-3)。

新たな連携の枠組みは、これらの組織を地域的に接近したところに設立することで、効率的な運営を推進することができる(図4-4)。また、近くには研究者や学生が住むための

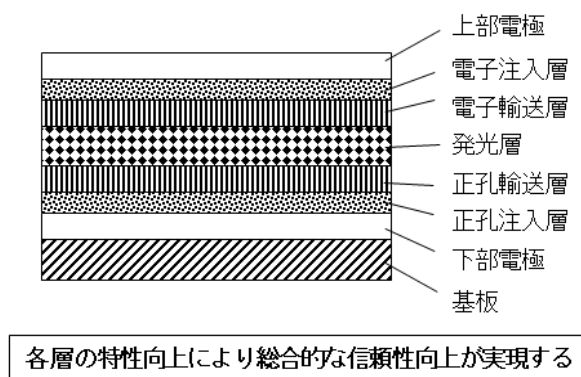


図4-3 有機ELデバイスの構成と信頼性向上

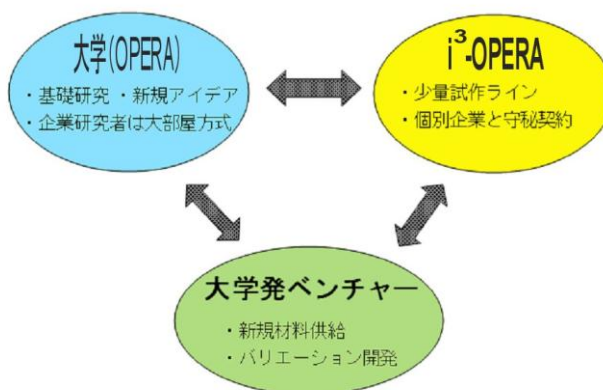


図4-4 企業との連携枠組み

宿舎もある。

共同で研究開発を進めたいという企業からの話は多いが、企業の立場としてコンフィデンシャルな形を希望するときに、直接大学と共同で行うのではなく、i³-OPERA と企業との守秘契約を交わしてアライアンスを進めるようにしていく計画である。

以上のような研究開発組織を支えるための優秀な人材を世界中から確保する必要がある。また、米国カリフォルニアのシリコンバレーには、すでに開設されている九州大学カリフォルニアオフィスがあり、そこを拠点とした連携なども行っていくことで、必要な開発技術に優れた人材の確保やベンチャーとしてのネットワークなどを構築できる可能性があると考えている。(図4-5)。

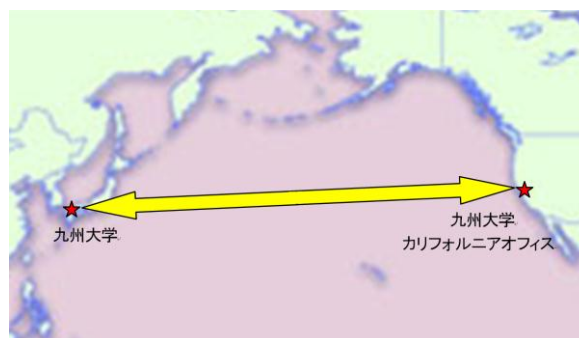


図 4-5 世界的な人材ネットワークの活用

4.1.2 共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの創製（小柳 光正）

4.1.2.1 研究テーマの状況

磁気ナノドットによる不揮発性メモリについては、研究終了後に、ナノドットの微細高密度化を実現して良好な特性を確認し、また、磁気ナノドットを複数層重ねた構造を提案して試作評価を行った。ナノドット材料として FePt の他に、タングステン、コバルトなどについて、また絶縁膜材料として酸化シリコンの他に、酸化ハフニウムについてもデバイス試作と評価を行った。（3.1.6 参照）

4.1.2.2 研究成果の波及と展望

(1) 磁気ナノドット材料応用の展開

磁気ナノドット材料は、不揮発性メモリとしての応用以外に、受動デバイスへの応用が開けてきている。特に、三次元回路には占有面積の小さな大容量キャパシタや大容量インダクタが必要となるが、磁気ナノドットを応用して高誘電率膜や高透磁率膜の形成が可能になることを確認した。

インダクタへの応用では、SiO₂ 層と磁気ナノドット層を交互に積層した膜構造を形成し、そこに Cu コイルを埋め込むことで、高インダクタ素子を小面積に作成することができ、高周波特性が改善され Q 値も改善される（図 4-6）。この構造は電源部の大容量キャパシタの形成にも応用できる。

また、磁気ナノドットや磁性体ピラーを使ったスーパーキャパシタを開発して蓄電技術へ応用できることも確認した。

電解質を使うのではコンパクトにならないが、磁界を周期的に変えるように磁性体を SiO₂ に埋め込むと実効的な誘電率が数桁も大きくできる。電磁波方程式による解析ではナノピラー構造にするのが有効であることが分かり、実際に試作して確認している。寸法がナノのレベルであることが必要だが、ナノレベルのパターン形成後に熱処理で寸法が変化しないことも大きなポイントである（図 4-7）。

磁気ナノドットや磁性体ピラーは、微細構造を作り込んで電磁波に対する特異な性質を現す材料であるメタマテリアルの一種であり、様々な応用につながる技術である。

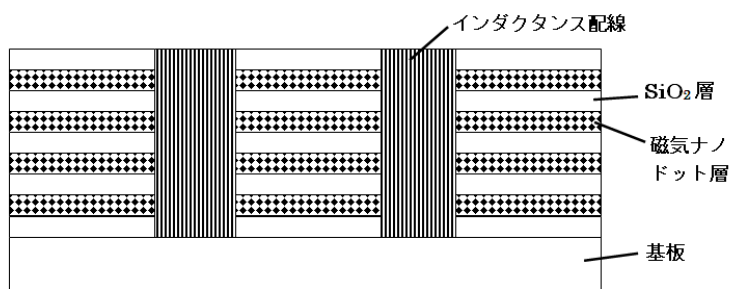


図 4-6 磁気ナノドットのインダクタへの応用

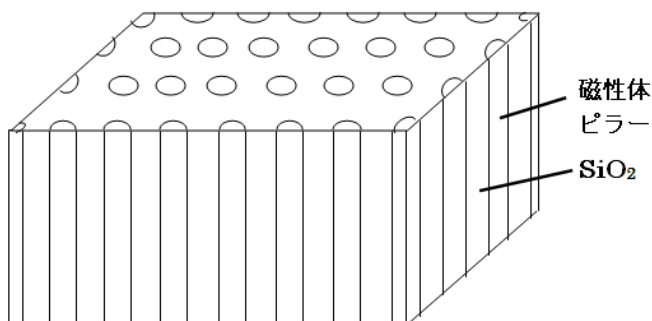


図 4-7 磁性体ピラーのキャパシタンスへの応用

(2) 企業との連携枠組みの発展

磁気ナノドット形成技術の基礎・基盤を確立してきたが、三次元回路に組み込んで実用化を図るには、企業との連携により生産段階へつなげることが重要になる。そのためには、企業との連携のあり方すなわち連携枠組みの発展が必要になる。

三次元回路の実現には、従来の半導体製造技術・装置とは異なる技術・装置が必要であり、LSI 技術と実装技術を総合的に精通していないといけないが、これらの技術や装置を企業が新たに準備するには大きな投資が必要になる。

そこで、2010 年 4 月に小柳教授が中心になって東北マイクロテック株式

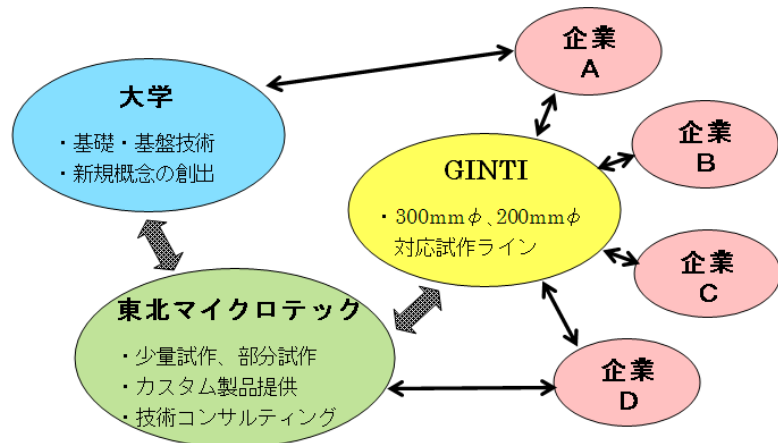


図 4-8 三次元回路実用化のための連携枠組み

会社を設立した。三次元 LSI の少量試作、部分試作サポート、技術コンサルティングを行うとともに、半導体製造技術及び MEMS 製造技術をベースに脳科学研究用のカスタム脳プローブ製品を提供している。さらに、東北震災後の復興事業の一環として、宮城産業振興機構が主体となって、宮城復興パークが多賀城市のソニー仙台の敷地内に設けられたが、その中に、未来科学技術共同研究センターの分室として、12 インチ（300mm）および 8 インチシリコン基板対応の 3 次元 LSI 用試作ラインが三次元スーパーチップ LSI 製造拠点（Global INTEgration Initiative, Tohoku: GINTI）として 2013 年 3 月に完成した⁶⁾。

東北マイクロテックと GINTI がそれぞれ企業と連携して、三次元回路の試作検討を進め、実用的な視点で性能向上や課題抽出することで、三次元回路の実用化に貢献する。東北マイクロテックと GINTI は相互に協力するとともに、大学とも密接に連携して、全体として大学と企業との連携をより具体的な形で強化することができる（図 4-8）。

4.2 研究領域関係者の所見

この研究領域において、4.1 で報告した事例以外に、半導体光研究、超高速・省電力化デバイス研究がこの分野での今日の基礎基盤研究形成に役立っている状況、応用展開が難しい状況などこの研究領域の全般的な現況について、領域アドバイザーの一人である小林功郎にインタビューした。その内容を以下にまとめる。

この榊領域と梶村領域（「新しい物理現象や動作原理に基づくナノデバイス・システムの創製」を目指す）とは関連する領域であり、榊領域も基礎・基盤を築くことが大きな柱だが、梶村領域よりは実用に近いところまで踏み込むという位置付けであったように思われる。

この研究領域は、デバイスとシステム、あるいは量子細線レーザやスピントロニクスなど広範囲の分野のテーマを含んでいたが、なかでも量子細線レーザ関連は研究総括である榊先生の専門とする分野であり、おおいに期待されていた。ただ、その点では、状況の変化があり、テーマに直接は含まれていない量子ドットレーザが世の中に先に出てきた。量子細線の方は次に述べるように基礎的な物理の理解という点では本研究で大いに進展したが、作りにくいという点から量子ドット関連に先行されたものと思われる。

レーザの分野では、量子井戸レーザの実用化によって性能が大幅に向上しており、量子細線や量子ドットというさらに低次元化するという研究の方向は当然の方向であった。また、その方向の研究テーマにおける基礎的な成果は出ている。ただし、そこから社会へつながっていく道を見つけていくのは簡単ではない。量子ドットレーザは、量子ドットの自己形成技術の活用により、実用化が果たされた。

バリスティックやスピニエレクトロニクスなどの省電力を目指す取組はますます重要になってきているが、難しい課題だ。省電力を実現するには、パワーデバイス関連の方が直接的に大きな影響を与えるので、今回のテーマのようにロジック回路での省電力化を目指すのも重要な課題だが、インパクトの大きな成果を生み出しにくいという事情もあるように思われる。

演算と通信を全て光で行う全光回路を実現するのは高速・省電力化の観点で重要な課題であるが、実用化はなかなか見えてこない難しいテーマである。シリコン等のエレクトロニクス低消費電力化と光伝送・光スイッチングなどのフォトリソの組み合わせが良いのではないと思われる。

研究開始後に、IT バブルやリーマンショックがあり、日本の光デバイス関連企業の力は相当落ちてきているように感じられる。その意味では、この研究領域をはじめとする基礎・基盤の研究から実用化の芽が出てくることを期待したいのだが、日本企業が世の中の動きに適切に対応できるかどうか心配である。企業から声をかけてくるだけの余裕が無い現状では、大学の方から手を伸ばして大学主導で研究領域の成果を実用化に持っていくのが望まれる。その意味では、この研究領域の成果をもとに、企業等との連携の具体化の動きがいくつか始まっているのは大変心強い。

現在のところ、光インターコネクションは、ボード間については、スパコンなどのハイパフォーマンスコンピュータに使われはじめている。チップレベルでの光伝送が課題である。チップ内は光伝送で行い、チップ間はテラヘルツ伝送というやり方が本研究領域の続きの新たな研究として提案されているのは興味深い。チップ内の光通信は、1970 年に初

めて室温で半導体レーザ発振を実現した林厳雄さんが提唱して以後 30 年来のテーマであり簡単ではないが、スピードと省エネの両立のためには光に期待がかかる。

最近の通信事情は、インターネットのトラフィックが依然高い率で増加を続けており、これを支える技術やシステムもさらなる発展が切望されている状況に変わりはない。世界的にも、欧・米・韓で光関係の研究開発が積極的に進められており、国からの援助も相当にある。例えば、欧州のインフィニオン等では波長多重送受信機の集積化の開発を進めている。韓国・中国等も力をつけてきている。日本では、NTT がフォトニック結晶に基づく半導体レーザ・光集積デバイスの研究開発を進めている。前述のチップ内光伝送の光源として期待されている。NTT では、位相変化を使ったデジタルコヒーレント技術の研究開発に注力し、2010 年に国際標準化された 100Gbit/s イーサネット用デバイス的高速化と低消費電力化を図っている。100Gbit/s イーサは、NEC、富士通、アンリツなどと共同で製品化されているが⁷⁾、そのような流れにこの研究の成果がつながるとよい。

今回のこの研究領域のテーマはいずれも最先端のテーマであり、すぐに実用化して世の中に展開されるのは難しいものであった。ほとんどのテーマで基礎・基盤を強化するという点では大いに成果が得られたと言える。

特に、「有機半導体レーザの構築とデバイス物理の解明」(安達千波矢研究代表者)のテーマは、これまでの主流であった半導体とは違う有機の分野であり、基礎研究として良いテーマであった。レーザ開発が当初の狙いであったが、発光デバイスの発光効率およびコストを画期的に改善するアイデアが出てきて、表示用あるいは照明用として実用化に向けて大きな発展があった。

4.3 まとめ

この研究領域の課題はいずれも最先端のテーマであり、すぐに実用化して世の中につながるのは難しいものであったが、いずれも基礎・基盤を強化するという点では大いに成果が得られた。

その中で、「有機半導体レーザの構築とデバイス物理の解明」(安達)のテーマについては、研究終了後に実現した第 3 世代である TADF 材料の開発によって、内部効率の高さと低コスト化を両立させることができ、実用化に向けて大きな発展が得られた。

また、企業とのコラボレーションのための拠点として、デバイス試作や評価のための装置を揃えて実用化の後押しをする i³-OPERA を設立し、さらに、材料メーカーと協力して実用化を推進する材料開発を行うための大学発ベンチャーを発足させる予定であり、相互に連携しながら効率的な運営を推進する枠組みが作られてきている。

「共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの創製」(小柳)のテーマについては、不揮発性メモリとしての応用以外に、受動デバイスへの応用が大きな発展が得られた。特に、三次元回路には占有面積の小さな大容量キャパシタや大容量インダクタが必要となるが、磁気ナノドットを応用して高誘電率膜や高透磁率膜の形成が可能になることを確認した。

磁気ナノドット形成技術を三次元回路に応用して実用化を図るには、企業との連携により生産段階へつなげることが重要になる。そこで、三次元 LSI の少量試作、部分試作サポート、技術コンサルティングを行うための東北マイクロテックを設立し、さらに 3 次元 LSI

用試作ラインを有する三次元スーパーチップ LSI 製造拠点 (GINTI) を設立して、三次元回路の実用化を推進する大学と企業との連携の枠組みが強化された。

[引用文献等]

- 1) Uoyama H., Goushi K., Shizu K., Nomura H., Adachi C., “Highly efficient organic light-emitting diodes from delayed fluorescence”, *Nature*, **492**, 234-238(2012)
- 2) Sato K., Shizu K., Yoshimura K., Kawada A., Miyazaki H., Adachi C., “Organic Luminescent Molecule with Energetically Equivalent Singlet and Triplet Excited States for Organic Light-Emitting Diodes”, *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 247401-247405 (2013)
- 3) Nakanotani H., Masui K., Nishide J., Shibata T., Adachi C., “Promising operational stability of high-efficiency organic light-emitting diodes based on thermally activated delayed fluorescence”, *Scientific Reports*, **3**, 2127, (2013)
- 4) Zhang Q., Li J., Shizu K., Huang S., Hirata S., Miyazaki H., Adachi C., “Design of Efficient Thermally Activated Delayed fluorescence Materials for Pure Blue Organic Light Emitting Diodes”, *JAm. Chem. Soc.*, **134**, 14706-14709(2012)
- 5) 月刊「事業構想」オンライン、2013 年 7 月号、
<http://www.projectdesign.jp/201307/howtofind/000636.php>
- 6) 2013/09/24 日経 BP 半導体リサーチ、
<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20130923/304840/?ST=SCR>
- 7) 2011/12/14、インプレス INTERNET Watch、
http://internet.watch.impress.co.jp/docs/release/20111214_498282.html