

戦略的創造研究推進事業

－CRESTプログラム－

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」

研究領域中間評価用資料

平成18年3月18日

## 1. 戦略目標

### 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（平成14年度設定）

#### 1. 名称

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

#### 2. 具体的な達成目標

2010年に訪れると予想されている現方式のシリコン集積回路の微細加工限界（ムーアの法則の限界）を越えた、次世代の情報処理・通信を担う新たな情報処理・通信用デバイス・材料・システム開発をめざす。この際、シリコン基板及び非シリコン基板の双方の取組みを実施する。

また、これらデバイス・材料・システムを活用するためのインターフェースとしても有用な各種センシング技術（最先端的計測法・先端センサー素子とセンサー管理システムの開発等）による健康・環境計測法の実現を目指す。

これらの目標達成のため、革新的な物性を有する物質創成からデバイス・システム開発までの総合的な推進を目指す。

このため、2010年代に実用化・産業化を図るべく、以下のような成果等を目指す。

・現在の半導体よりも演算速度を2桁向上するとともに、消費電力を2桁以上低減する情報通信用デバイスの探索。

・革新的なナノ素材とナノプロセスの開拓、新機能・新特性を持つ超集積素子の実現及び、医療応用・障害克服などに貢献するための集積システムの生体親和性の飛躍的向上。

・革新機能を付与した単一分子の合成及び高度集積化法の開拓等、機能分子を望むように集積して回路を形成する技術の確立及び分子デバイスシステムへ応用

・ナノメモリーの原理・素材・方式の解明を通じ、現在のハードディスクの記録密度の1000倍程度の記録密度を目指す。

・固体量子ビット素子、超伝導系量子磁束素子、相関電子素子、相関光子素子、スピン制御素子、ナノチューブ・ナノワイヤ素子等、新原理素子の探索及び技術的な壁の打破  
・大容量・超高速の光通信技術に必要な光発生、光変調、光スイッチ、光増幅、光検出、光メモリ、表示などへの革新につながるナノ構造フォトンクスや材料の開発を通じた次世代光技術の創製

・バイオ分子の自己組織化を利用したナノスケールの新素子、新材料の創製を通じた高集積バイオチップの開発

・半導体、酸化物や磁性体中の電子の持つもう1つの自由度であるスピンを電子デバイスにおける新しい自由度として積極的に活用した、新しいナノ構造を利用したスピンエレクトロニクス材料の探索・創製

・超分子を用いたバイオナノ超分子センサー、導電性超分子スイッチング素子、ナノマシンなどの分子デバイス、ナノ材料の開発

・フラーレンの集積化、ナノデバイスへの応用に不可欠なCNT超微細加工技術、コンポジット材料開発

・フラーレン、ナノチューブに次ぐ新たなナノ集合体材料の創製と開発を通じたクラスター・ナノ粒子集合体をベースにした素子の実用化

・従来は全く異なる物質・材料として扱われてきた有機物質と無機物質とをナノスケールで融合させた構造を持つ全く新しい物質・材料群による素子の開発

### 3. 目標設定の背景及び社会経済上の要請

経済のグローバル化と国際競争の激化等に伴う産業競争力の低下、雇用創出力の停滞といった現下の経済社会の課題を科学技術、産業技術の革新により克服し、我が国の産業競争力を強化し、経済社会の発展の礎を着実に築くことが不可欠である。このような革新的な科学技術、産業技術の発展の鍵を握るものとして、ナノレベルで制御された物質創製、観測・評価等の技術であるナノテクノロジーが、近年急速に注目されている。

具体的には、

- ①半導体を用いた高速・高集積・低消費電力デバイス技術に関し、国際競争力を確保することに加え、
- ②全く新しい原理を用いた次世代のデバイス・材料の礎を確立することが長期的展望にたった我が国の国際的な技術競争力の確保にとり必要不可欠である。

また、これらの実用化・産業化の目標を達成するためには、ナノレベルでの計測・評価、加工、数値解析・シミュレーションなどの基盤技術開発や、革新的な物性、機能を有する新物質創製への取り組みが必須である。

なお、総合科学技術会議分野別推進戦略（平成13年9月）においても、情報通信分野においては、国家的・社会的課題の克服のため、「次世代情報通信システム用ナノデバイス・材料」が5つの重点領域の1つとして位置づけられているところである。

### 4. 目標設定の科学的な裏付け

情報通信分野における我が国の技術競争力は、欧米に比べて全体的に低下傾向にある。これまで大きな役割を果たしてきた民間の研究開発については、その投資額の日米格差が急速に拡大しており、内容的にも製品開発に重点を移しつつあるため、我が国の競争力強化に向け、リスクの高い研究開発等について国の役割が一層重要となっている。

特に、次世代情報通信システム用ナノデバイス材料においては、2010年に訪れると予想されている現方式のシリコン集積回路の微細加工限界（ムーアの法則の限界）を越えた、次世代の情報処理・通信を担う多様な新原理デバイス・材料・システムの構築に向け、現在、各国が世界標準の獲得競争のまっただ中にある。我が国として、次世代情報通信用デバイス開発において、世界を凌駕するための取り組みを緊急に準備することが必要であるが、この際、シリコン基板及び非シリコン基板の双方について産業化を見据えながら段階的な目標設定も行いつつ、戦略的に取り組むことが必要である。

ソフトウェア無線等の新規通信方式への転換につれて、通信システムの急速な高速・大容量化が今後とも予想されているが、半導体の集積化・高機能化はムーアの予測に従い、3年で4倍のペースで進んでおり、2005年には素子の最小寸法が100nmを切り、ナノデバイス時代に突入することとなる。このため、大容量、高演算速度、省エネルギー、高セキュリティーその他の画期的な機能を有する新原理デバイス・材料・システムの開発が急がれている。

具体的には、

- ・現在の延長の技術においては、高速化限界、セキュリティー問題、消費電力等の課題の克服に加え、量子効果等により現れる素子の動作や製造技術上の物理的な限界、製造コスト等の問題を回避するための革新的なナノ素材やプロセスの開発、量子ドット、量子細線、ナノチューブ等を取り込んだスイッチ素子の開発が求められる。
- ・現在使われているLSIメモリ、磁気ディスク、光ディスクの性能限界の壁をうち破るとともに、強誘電体メモリーなどの次世代メモリーの開発が求められている。
- ・更に、現在の方式の集積回路とは全く異なる新たな原理に基づくデバイスとして、単一分子素子、各種固体Qビット素子、超伝導系新量子磁束素子、スピンエレクトロニク

ス等の技術開発も次世代の世界標準獲得の観点から積極的に取り組むべき重要な課題である。

・加えて、このようなデバイスやシステムの開発に際しては、革新的な物性、機能を有する新物質創製が必須であり、超分子、カーボンナノチューブ、フラーレン、クラスター・ナノ粒子をはじめとした積極的開発が必要である。

## 5. 重点研究期間

ナノテクノロジー分野については、競争が激しく多くの研究領域を推進する必要があるため初年度のみ公募とし、次年度以降には新たに同じ研究領域での公募は行わない。1 研究課題は概ね5年の研究を実施する。(なお、優れた研究成果を上げている研究課題については、厳正な評価を実施した上で、研究期間の延長を可能とする。)

## 2. 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」  
(平成14年度発足)

### 領域の概要

従来のデバイス・システムに対して、ナノスケールの超微細構造形成技術や革新的ナノプロセス、および超集積化技術を活用することにより、これまでの情報処理や通信システムの性能を飛躍的に高めるデバイス・システムの創製に係わる研究を対象とする。具体的には、情報伝達の超高速化や広帯域化と超省電力化に向けた新規デバイスの構造・材料に係わる研究、極微デバイスが直面する限界に挑戦する革新的なナノ素材やナノプロセスの研究、極微デバイスにおける物理機構の解明と制御に係わる研究、超微細構造の活用により従来の光デバイスの性能を凌駕する新しいナノ構造フォトニクスデバイスの創製に係わる研究、および、これらの関連研究等が含まれる。

## 3. 研究総括

榊 裕之 (東京大学生産技術研究所 教授)

#### 4. 採択課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究代表者	中間評価時 所属・役職	研究課題	予定研究費 H18, H19 は 予定額積算
平成 14年度	秋山英文	東京大学 助教授	量子細線レーザーの作製とデバイス特性の解明	272
	安達千波矢	九州大学 教授	有機半導体レーザーの構築とデバイス物理の解明	253
	荒井滋久	東京工業大学 教授	低次元量子構造を用いる機能光デバイスの創製	242
	大谷俊介	電気通信大学 教授	多価イオンプロセスによるナノデバイス創製	262
	河口仁司	山形大学 教授	シフトレジスタ機能付超高速光メモリの創製	318
	小柳光正	東北大学 教授	共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの創製	638
	新田淳作	東北大学 教授	半導体スピンエンジニアリング	248
	藤巻 朗	名古屋大学 教授	単一磁束量子テラヘルツエレクトロニクス創製	261
	古屋一仁	東京工業大学 教授	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	254
	吉川明彦	千葉大学 教授	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による新展開	283
			<b>総研究費</b>	3,030

## 5. 研究総括のねらい

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、多様な機能を持つ高性能レーザーなど、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。こうしたデバイス・システムの実現のために、既にナノメートル級の超薄膜構造が随所に活用されており、ナノテクノロジーが駆使されてきたと言っても過言ではない。今後、情報通信技術の質を一段と高めるには、従来のデバイス構造を極限的に微細化するだけでなく、様々な個性を備えた物質群の中から、最も適した材料を選び、斬新なナノ構造に成形し、これをデバイス内部に巧みに取り込むことにより、デバイスの機能・応答速度・消費電力などを飛躍的に高める必要がある。本研究領域では、こうした試みの推進を目指している。

## 6. 選考方針

今回の公募に対して、37件の研究提案の応募があった。まず、提案書類を基にした1次審査を行い、合議の結果17件を選考した。続いて、口頭説明と質疑を基に、2次審査を行い、最終的に10件の研究提案を採択した。今回の選考に当たっては、対象とするデバイス構造の実現に必要な要素技術に関して、これまでどんな準備や実績を積んできたかを考慮するとともに、今後の発展を支配する主要な技術課題に如何に取り組み、それが達成された際に、当該のデバイス・システム分野にどのような影響を与えるかに関し、明確な問題意識を持っている提案を優先した。また、研究経費に関しても、研究の狙いを吟味・厳選し、中核的な目的に研究資源を集中させるタイプの研究計画を優先した。

わが国には、優れたデバイス研究者が多く存在することを反映し、応募のあった提案の研究対象は、半導体に限らず、金属・磁性体・超伝導体・有機物にも及んでおり、さらにその多くが高いレベルを備えていたため、1次審査も2次審査も極めて困難なものとなった。

結果として採択された研究課題は、本研究領域が目指す情報処理や通信システムの高速化、省電力化、高性能化を飛躍的に進めるデバイス・システムの創製において、素晴らしい成果を上げてくれるものと期待している。

## 7. 領域アドバイザー

領域アドバイザー名	所属	役職	任期
長谷川 英機	北海道大学	COE 客員教授	平成14年11月～平成20年3月
井筒 雅之	(独)情報通信研究 機構	上席研究 員	平成14年11月～平成20年3月
岩井 洋	東京工業大学	教授	平成14年11月～平成20年3月
小林 功郎	東京工業大学	教授	平成14年11月～平成20年3月
三村 高志	(株)富士通研究所	フェロー	平成14年11月～平成20年3月
平山 祥郎	NTT 物性科学基礎 研究所	部長	平成14年11月～平成20年3月
鳳 紘一郎	東京大学	教授	平成14年11月～平成16年3月

研究領域が半導体のみならず金属、磁性体、超伝導体、有機物までの幅広い材料を用いたデバイス・システムを対象としている。このため、領域アドバイザーとしてはシリコン半導体、化合物半導体、これらの電子物性とプロセス技術およびデバイス技術、光デバイスおよび通信システムなどの分野で高い業績をあげていて深い見識を持った方々をお願いした。これまで領域会議、領域シンポジウム、中間評価会において、物理的な観点、デバイ

ス化、システム化に亘って高い見地からのアドバイスを頂いている。

## 8. 研究領域の運営

当研究領域には超高速・超省電力をキーワードとした10課題のチームがあるが、それぞれの課題によって研究のフェーズがかなり異なっている。物理現象や新しい材料を探索する課題もあれば、比較的近い将来に適用可能なデバイス、あるいは10年後の通信システムの一端を担うことを目指した課題もある。このため、それぞれのフェーズに合わせた推進を加速するよう指導を心がけてきた。

10研究チーム全体が集まって議論する領域会議は1年に1度開催している。初年度は研究代表者と総括・アドバイザーでの発表・議論としたが、2年目は共同研究者や研究員にも参加を要請し、より具体的な話題を提供してもらうこととした。3年目の公開シンポジウムでは研究代表者による10件の口頭発表の他、40件のポスター発表を行うとともに、講演要旨集（口頭、ポスター）をホームページ上で公開した。領域会議などを通して議論を深めることにより、新たな研究協力が生まれている。量子細線の物理探索を主題とする秋山チームとより実用的なレーザーを目指した荒井チームの連携研究がその例である。

それぞれの研究代表者はその分野において実績を残してきた方々であるので、これまでは自主運営を基本としてきた。中間期のチェックポイントに当たり、今後の2年間に向けて領域の主題である超高速・超省電力のデバイス・システムに現在取り組んでいるナノ構造やその形成技術がどのように役立つかを意識して研究を推進するよう方向付けを行った。このために、探索的テーマであってもデバイスを意識して探索研究を進めるように研究チーム内グループ間の連携を強めることを要請しグループ再編成を検討中のチームもある。

## 9. 研究の経過

各研究チームにおいて研究計画書に沿って確実な進展が見られ、権威ある学術雑誌へも多くの掲載がなされている。また、研究フェーズの違いのためチームによって差はあるが特許出願も比較的順調になされている。

### (1) 超高速・超省電力光通信システムに関する研究

近年、情報伝達の主要手段は光通信となっているが、その発生源を半導体レーザーが担っている。扱う情報量の増大に伴い、高速性・省電力性が益々重要となってきた。半導体内電子の自由度を3次元から2次元、2次元から1次元へと低次元化することで状態密度が先鋭化し半導体レーザーではより低閾値、すなわち省電力での発振が期待できる。荒井チームでは電子線描画と低損傷ドライエッチングを用いた現実的なトップダウン手法によって量子細線レーザーを製作する研究を進めている。すでにほぼ任意形状の量子細線を実現し、室温で寿命が2万時間を越える $1.5\mu\text{m}$ 波長帯量子細線レーザーを実現している。一方量子細線構造の基礎的な物性とその理論的解明を進めることを目的として、秋山チームではへき開再成長法によって作られる構造均一性の極めて高いT型量子細線構造を対象として研究を進めている。ここではその光学特性および光励起でのレーザー発振特性の基礎的知見が得られている。理論面では、擬1次元電子-正孔系の理論解析を行い、従来の量子細線の自由なキャリアの状態密度効果や単純な励起子で説明されてきた量子細線の発光の描像を大幅に修正して電子間相互作用にもとづく量子多体状態の関与の可能性を指摘するなどの成果が得られている。秋山チームと荒井チームとの連携研究も生まれ、新しい評価技術の開発や電流注入型量子細線レーザーに向けた課題の明確化やレーザーの基礎科学の解明への貢献が期待される。

一方通信システムとしては高速化を実現するために全光による情報処理が求められている。河口チームでは、全光型超高速光バッファメモリを、二次元アレイ偏光双安定面発光半導体レーザーを用いて実現するとともに、シフトレジスタ機能を研究する。これまでに、面発光半導体レーザーの偏光双安定性を用い、世界最小光入力および世界最高スイッチング周波数のフリップフロップ動作を実現するとともに、全光信号再生の原理確認、1ビットの光信号のメモリ動作の原理確認に成功している。

これらは情報通信の基幹となる技術の1つとして、来るべき高度情報社会に貢献できるものである。一方で、個人が扱う機器としてはよりフレキシブルで人に優しく、製造や大面積化などが容易な機器が求められる。この点で有機半導体材料が注目されている。安達チームでは有機半導体でレーザー発振を実現するという研究を推進している。現在までに、光励起下であるが常温で連続発振する独自の低閾値有機レーザー材料を見出している。また電流励起発光を目指し、 $100 \text{ kA/cm}^2$ 以上の電流注入を可能とするデバイス構造も実現している。現状では電流輸送機構の解明や励起子の失活の機構解明と制御など、電流駆動レーザーの実現には困難が予想されるが、実現すればその技術的インパクトは大きく産業にも波及効果が期待できる。

## (2) 超高速・超省電力情報処理に関する研究

情報処理の分野においては処理ビット数の増大にともない、従来のシリコン LSI は微細化の困難さや、発熱限界などによりその性能向上の限界を向かえつつある。処理の並列化によって処理速度のさらなる高速化が可能であるが、並列処理のための情報の分配、結合には依然として高速な処理が必要とされる。古屋チームでは金属・絶縁物を半導体に埋め込む独自技術の超ヘテロナノ構造形成技術を用いて半導体中を電子が無衝突で進むバリステック電子デバイスを試作し、世界最小のエミッタ幅やエミッタ面積をもつヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) や幅 25nm のエミッタをもつホットエレクトロントランジスタを実現した。また、GaInAs/AlAs 共鳴トンネルダイオードとスロットアンテナを集積化した素子で3次高調波として、テラヘルツ帯の発振を観測しており、固体素子が室温でテラヘルツに届くことを初めて示した。

情報の不揮発な記憶としては半導体ではフラッシュメモリーが現在では主流であるが、現在の方式では 64G ビットあたりに限界が予想される。小柳チームでは、ナノドットを用いたメモリーの高機能化のためにドット材料に磁性材料を用い、磁気トンネルで電子の注入を制御する新しい不揮発性メモリーを実現する研究を進めている。現在までに層状の FePt 浮遊ゲートをもつ磁気フラッシュメモリー構造を試作し、磁気トンネルによるメモリー効果の確認、FePt ナノドットを形成する方法やアニール法の検討により、サイズ 3-5 nm、密度  $10^{13}/\text{cm}^2$ 以上の磁気ナノドット層を形成するプロセスを確立するとともに、これらが、室温で保磁力 20KOE の良好な磁化特性を持つことを明らかにするなどの成果を得ている。また、ナノドットの磁化状態の直接観察に成功するという物性面での知見も得られている。

さらに研究領域では情報処理の飛躍的な超高速化、超省電力化を実現する超電導回路と量子効果素子にも取り組んでいる。高温超伝導体 (HTS) による単一磁束量子 (SFQ) 回路の基盤技術を構築する研究を藤巻チームが進めている。高温超伝導体ではランプエッジ接合のジョセフソン接合が主流であったが、本プロジェクトでは独自の積層構造素子を開発することにより集積化への道を拓きつつある。SFQ 回路への光インターフェイスグループとして、光ミキシング法により超伝導素子に 50GHz を越える光信号の入力に成功するという成果が得られている。光出力側のサブテラヘルツ動作が今後の課題である。

最近、半導体にスピンの自由度を導入する材料が世界的に活発化しているが、新田チームでは非磁性半導体材料のヘテロ界面やナノ構造のゲート制御によりスピンを制御するという独創的なアプローチにより、磁場制御に比べて空間的な制御性に優れ、機能デバイス化する上で有効なゲート電界制御によるデバイス実現を目指している。これまでに、2つの量子ドット中の局在スピンの RKKY 相互作用により強磁性的に結合することを実証するとともに、電子スピンの回転角度をゲート電圧で電氣的に制御することに成功した。これらの成果は次世代スピントロニクスや将来のスピンをベースとした量子情報処理技術に向けて重要な役割を果たしていくと考える。

## (3) 新材料・新プロセスの研究

将来の超高速・超省電力デバイス・システムにつながる基盤技術として新材料や新プロセスの研究も推進している。吉川チームでは新しい材料として窒化物半導体の中で、もっとも小さいバンドギャップを持ち、かつ高い電子移動度を有する InN を対象として MBE 法を用いた結晶成長技術の確立に取り組んでいる。極性制御に着目した成膜プロセスのその場観察制御を行うことにより高品質な結晶成長が可能となり、InN/InGa<sub>N</sub>、InN/InAlN の量子井戸構造の成長および InN ナノドットやナノコラムの成長などが実現できている。今後

は光通信波長域で動作する超高速光デバイスや超高速・超省電力デバイスなどの可能性を検討することが課題となる。

またユニークな取り組みとして多価イオンを用いたナノ構造の創製にも取り組んでいる。大谷グループは多価イオン1個の照射を確実に検出できることを確認し、固体表面で価数により変化するナノスケールの改質が生じることを確認するなどの成果を得ている。現状では多価イオンナノプロセスの有用性を明確にすることが今後の課題である。

## 10. 総合所見

本研究領域は加速度的に情報量が増大する次世代の社会において、通信や情報処理を高速・省電力で制御するための主要なデバイスやシステムを創製することを目的としている。このため課題選考に当たっては、探索的テーマであっても次世代に要求されるものを明確に示せる点に主眼を置いた。この結果採択された課題は材料としては半導体のみならず金属・磁性体・有機材料を含み、分野としてはナノ構造の形成技術、デバイス、通信システムを含むものとなった。全チームが一同に会して行う領域会議により研究チーム間の意見交換を行い、研究総括が研究サイトへ訪問、チーム内研究報告会へ参加することで個別課題についての深い議論を行った。このような議論の中で新しい見方やアイデアが生まれつつある。

ナノバーチャルラボ全体としては探索型研究が多い中で本研究領域は実際の次世代デバイス・システムなどの要求に対してどのようなナノ構造が必要かを打ち出していることが領域としての特徴である。独自の方式による光通信の制御方式や新しいアイデアに基づく不揮発性メモリの提案とその実証、新材料による有機半導体レーザーなど今後の社会に必要な材料やデバイス・システムに多くの情報を発信してきている。

一方、基礎的かつ探索的研究として、構造均一性が極めて高い量子細線構造を実現し、低次元構造における光学特性の評価と1次元系の理論研究を進めている。これらの研究から、より現実的な量子細線レーザーの低閾値化(省電力化)の指針を与えることが期待される。またスピントロニクスにおいては将来のスピンをベースとした量子情報処理の基礎となる物理において有用な知見を見出し学会やチームが主催した国際シンポジウムで発表している。これらを実用的なデバイスとして完成させるには時間をかけた研究推進が必要である。

探索の段階が異なるチームが同一領域で研究することで新たな提携研究が発生してきている。領域会議での発表をきっかけとする議論の進展によって探索的な課題のチームと実用に近い課題のチームが共通の話題を持つことができることが領域単位で研究を遂行する利点である。上述の量子細線中の1次元キャリアを用いたレーザーが良い例である。ナノバーチャルラボ制度の全体会議として10領域全部の研究代表者がポスター発表を行ったが、ここでも他領域との交流から材料提供の話し合いが出てきており有意義であった。

領域内には優れた加工技術を有するチームがあるため、他チームが一から立ち上げる必要のある技術を領域会議等で知り、相互協力により研究加速でき得ることも研究領域の大きな利点の一つである。実際に微細加工を得意とするチームと別チームとの協力も進んでいる。

中間評価時点までの研究は、全体としてかなり順調に進展した。それぞれのチームの得意とする分野を延ばしてきたことによるものと考えている。本プロジェクトの後半では領域全体の目標である高速・省電力デバイス・システムへの方向付けをより明確に意識した研究を目指す。このことは中間評価の機会を通して各チームに伝えている。今後の進展を見守ると共に必要に応じて重点の明確化や軌道の修正もお願いする予定である。

領域評価用資料 添付資料 (CRESTタイプ)

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」

1. 応募件数・採択件数

採択年度	応募件数	採択件数
平成14年度	37	10
平成15年度	12	0
平成16年度	25※	0
採択数 計		10

※ 平成16年度は戦略目標（3目標）毎に公募し、ナノテク分野別バーチャルラボ9領域全体で選考した。

## 2. 主要業績

		論文発表		口頭・ポスター発表		解説		外部発表	特許出願	
		国内	海外	国内	海外	国内	海外	合計	国内	PCT
H14 年度 採択	秋山	0	24	57	18	4	0	103	0	0
	安達	2	25	71	43	35	5	181	8	1
	荒井	0	28	72	51	0	0	151	0	0
	大谷	1	16	13	18	2	2	52	2	1
	河口	3	21	45	40	4	1	114	7	1
	小柳	0	36	35	36	0	0	107	2	0
	新田	0	26	44	61	5	0	136	7	1
	藤巻	0	48	65	74	20	0	207	2	0
	古屋	1	24	51	29	0	0	105	6	0
	吉川	0	8	43	46	0	0	97	2	0
領域合計		7	256	496	416	70	8	1253	36	4

研究課題：量子細線レーザーの作製とデバイス特性の解明

研究代表者：秋山英文

(1) Yasushi Takahashi, Yuhei Hayamizu, Hirotake Itoh, Masahiro Yoshita, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, and Ken W. West,  
"Room-temperature excitonic absorption in quantum wires"

**Appl. Phys. Lett.** 87, 223119 (2005)

20周期量子細線レーザー試料を用いて透過吸収実験を行い、一次元量子細線において室温励起子吸収を初めて観測した。

(2) Yasushi Takahashi, Yuhei Hayamizu, Hirotake Itoh, Masahiro Yoshita, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, and Ken W. West,

"Strong photo-absorption by a single quantum wire in waveguide-transmission spectroscopy"

**Appl. Phys. Lett.** 86, 243101 (2005)

単一量子細線に対して導波路透過測定を行って吸収スペクトルを測定し、励起子吸収のピークで80/cmという極めて強い光吸収係数が得られていることを示した。

(3) J-W Oh, M. Yoshita, Y. Hayamizu, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, and K. W. West,  
"Micro-photoluminescence characterization of local electronic states in a (110) GaAs quantum well fabricated by cleaved-edge overgrowth",

**J. Appl. Phys.** 96, 6370-6374 (2004).

へき開再成長法と成長中断アニールを用いて作製される(110)GaAs量子井戸について、界面に形成される原子ステップによる局在電子状態の分布を顕微 PL 分光および画像計測法により評価した。

研究課題：有機半導体レーザーの構築とデバイス物理の解明

研究代表者：安達千波矢

(1) T. Aimonio, Y. Kawamura, K. Goushi, H. Yamamoto, H. Sasabe, and C. Adachi  
"100% fluorescence efficiency of 4,4'-bis[(N-carbazole)styryl]biphenyl (BSB-Cz) in a solid

film and the very low amplified spontaneous emission (ASE) threshold”

**Appl. Phys. Lett.**, 86, 071110 (2005)

有機半導体レーザー用材料として、BSB-Cz は  $0.32\mu\text{J}/\text{cm}^2$  の極めて低い ASE 発振閾値を示すことを見出した。BSB-Cz は固体薄膜中で 100%の PL 量子効率を有し、一重項励起子からの放射失活速度定数も  $k=10^9\text{s}^{-1}$  の大きな値を有することを明らかにした。

(2) T. Oyamada, H. Sasabe, C. Adachi, S. Murase, T. Tominaga, and C. Maeda  
“Extremely low voltage driving of organic light-emitting diodes with a Cs-doped phenyldipyrenylphosphine oxide layer as an electron injection layer”

**Appl. Phys. Lett.**, 86, 033503 (2005)

有機ELデバイスにおける電子輸送層として優れた性能を有する新規化合物POP<sub>y</sub><sub>2</sub>を見出した。特に、Csと共蒸着することにより4Vで $J=100\text{mA}/\text{cm}^2$ の電流密度を実現し、有機ELデバイスの低駆動電圧化に大きく貢献した。

(3) Yuichiro Kawamura, Jason Brooks, Julie J. Brown, H. Sasabe and C. Adachi  
“Intermolecular interaction and concentration quenching of phosphorescent Ir(III) complexes in a solid film”

**Phys. Rev. Lett.**, 96, 017404 (2006).

Ir 金属化合物は、有機発光デバイスにおいて高効率発光を与える重要な材料である。本論文では、固体薄膜中における PL 効率の Ir 錯体濃度依存性から Ir 錯体の分子間相互作用について議論し、分子間エネルギー移動が Forster 型の dipole-dipole 相互作用に基づくことを明らかにした。

研究課題：低次元量子構造を用いる機能光デバイスの創製

研究代表者：荒井滋久

(1) H. Yagi, K. Miura, Y. Nishimoto, D. Plumwongrot, K. Ohira, T. Maruyama and S. Arai, “Low-threshold-current operation of 1540 nm GaInAsP/InP distributed-feedback lasers with multiple-quantum-wire active regions,”

**Appl. Phys. Lett.**, 87: 223120-1-223120-3 (2005).

EB 露光、CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> 混合ガスを用いたドライエッチング及び OMVPE による埋め込み再成長法により、歪補償多層量子細線活性層(細線幅: 24 nm)を有する活性層分離型 DFB レーザーを作製した。室温連続駆動において、低しきい値電流動作( $I_{th} = 2.7\text{ mA}$  ( $J_{th} = 270\text{ A}/\text{cm}^2$ ))及び良好な単一モード動作(SMSR = 51dB (@I = 2I<sub>th</sub>))が得られた。

(2) H. Yagi, T. Sano, K. Ohira, D. Plumwongrot, T. Maruyama, A. Haque, S. Tamura and S. Arai, “GaInAsP/InP Partially Strain-Compensated Multiple-Quantum-Wire Lasers Fabricated by Dry Etching and Regrowth Processes,”

**Jpn. J. Appl. Phys.**, 43 (No. 6A), 3401-3409 (2004).

低しきい値、高効率動作を目的とした多層歪補償量子細線レーザーを EB 露光、ドライエッチング及び埋め込み再成長法を用いて作製した。特に、歪補償量子井戸構造を元ウェーハに用いることにより、エッチング・埋め込み成長界面における非発光再結合電流成分が低減され、室温連続動作下で 7,000 時間以上動作後も劣化のないことが示された。また、活性層を細線化したレーザーにおいて、体積効果に起因する低電流・高効率動作が約 85°C の高温域まで得られることを示した。

(3) Jae-Kuk Seo and Tetsuya Mizumoto, “Measurement of pump-induced absorption and refractive index changes in GaInAsP/InP waveguides using an optical loop mirror interferometer,” **Jpn. J. Applied Physics**, 43 (No.8B), 5800-5804, (2004).

GaInAsP/InP

導波路における光強度依存屈折率変化をピコ秒以下の時間分解能で測定するために、ファイバープ型干渉系を用いる測定系を考案した。また、測定結果から、ポンプ光強度が約

40MW/cm<sup>2</sup> 以下の場合、ピコ秒オーダーのポンプ光に追従して導波層 GaInAsP の屈折率が変化することを明らかにし、その大きさが 2 準位系に基づく理論予測と矛盾のないことを示している。

**研究課題：多価イオンプロセスによるナノデバイス創製**

**研究代表者：大谷 俊介**

(1) Y. Baba, K. Nagata, S. Takahashi, N. Nakamura, N. Yoshiyasu, M. Sakurai, C. Yamada, S. Ohtani, and M. Tona

“Surface modification on highly oriented pyrolytic graphite by slow highly charged ions”  
**Surf. Sci.** 599 : 248-254 (2005)

高価数多価イオンの高配向性グラファイト (HOPG) 表面に対する照射効果を STM 観察・ラマン分光法を使って調べた。単一多価イオンによって HOPG 表面に隆起状の構造が生成され、この照射痕の周りには  $\sqrt{3} \times \sqrt{3} R 30^\circ$  再構成構造も観察された。このような照射痕には、単空孔、2 量体空孔だけでなく、カーボン原子がクラスターとして飛び出した結果生成したクラスター空孔が含まれていることを明らかにした。

(2) N. Yoshiyasu, S. Takahashi, M. Shibata, H. Shimizu, K. Nagata, N. Nakamura, M. Tona, M. Sakurai, C. Yamada, and S. Ohtani

“Demonstrative experiment for single ion implantation technique using highly charged ions”

**Jpn. J. Appl. Phys.** 45 : 995-997 (2006)

多価イオンの高い 2 次電子放出特性を利用し、その検出による多価イオンの入射イベント回数を確度 100% で計数しうることを示した。高配向性グラファイト (HOPG) に Xe<sup>44+</sup> を入射し、放出された 2 次電子をマイクロチャンネルプレートを使って検出した。その結果ビーム強度から見積もられた入射イオン数と、2 次電子検出イベント数とが一致した。さらに、STM を使って、照射後の HOPG 表面に生成されたナノ構造の数を計数した結果、照射痕の数密度が多価イオン入射密度と一致した。

(3) M. Tona, K. Nagata, S. Takahashi, N. Nakamura, N. Yoshiyasu, M. Sakurai, C. Yamada, and S. Ohtani

“Some characteristics in the interaction of slow highly charged I<sup>q+</sup> ions with a Si(111) 1x1-H surface”

**Surf. Sci.** 600 : 124-132 (2006).

ヨウ素多価イオンによる水素終端 Si(111)1×1 表面からのイオンスパッター率の価数依存性 (裸ヨウ素イオン I<sup>53+</sup>まで) について Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry を用いて測定した。多価イオンによる“ポテンシャルスパッタリング”によって、40 価以上になると、多価イオン 1 個で表面から 1 個以上のプロトンを飛び出させるといった結果が観測された。さらに基板材料に対するポテンシャルスパッタリングの効果が約 25 価以上から顕著になることが示された。

**研究課題：シフトレジスタ機能付超高速光メモリの創製**

**研究代表者：河口仁司**

(1) H. Kawaguchi

Semiconductor active devices for all-optical signal processing (Keynote Address)

**Proceedings of SPIE ITCOM 2005** 6014: 601406-1-601406-8 (2005)

偏光双安定面発光半導体レーザー (VCSEL) とそれを用いた全光型信号処理の最近の進展について述べた。極めて小さな光入力でのフリップ・フロップ動作、高繰り返し光フリップ・フロップ動作について述べ、全光型信号再生および光バッファメモリ実現の可能性について述

べた。

(2) T. Mori, Y. Yamayoshi, and H. Kawaguchi

Low-switching-energy and high-repetition-frequency all optical flip-flop operations of a polarization bistable vertical-cavity surface-emitting laser

**Appl. Phys. Lett.**: accepted for publication

偏光双安定VCSELを用い、光フリップ・フロップ動作を実現した。セット光およびリセット光の波長とVCSELの発振波長との差を精密に制御することにより、0.2~0.3 fJという極めて小さな光入力での動作（世界最小）、および10 GHzという高繰り返し動作（世界最高速）を実現した。

(3) Y. Sato, Y. Takahashi, Y. Kawamura, and H. Kawaguchi

Field dependence of electron spin relaxation during transport in GaAs

**Japanese J. Appl. Phys.** 43: No. 2A, L230-L232 (2004)

GaAs中を輸送されるスピン偏極電子の低温（10 K）でのスピン緩和時間の電界依存性を検討した。2  $\mu$ mドリフトする間に生ずるスピン偏極度の変化をフォトルミネッセンスから測定し、電界を印加することによりスピン緩和が速くなることを明らかにした。

研究課題：共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの創製

研究代表者：小柳光正

(1) Takeshi Sakaguchi, Youn-Gi Hong, Motoki Kobayashi, Masaaki Takata, Hoon Choi, Jeoung-Chill Shim, Hiroyuki Kurino and Mitsumasa Koyanagi,

“Proposal of New Nonvolatile Memory with Magnetic Nano-Dots”,

**Japanese Journal of Applied Physics (JJAP)**, Vol.43 (No.4B), 2203-2206 (2004).

固定磁性体として働く磁気ナノドットを浮遊ゲート電極に用いた共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリについて提案した最初の論文である。パーマロイ（NiFe）制御ゲート電極と磁気ナノドット浮遊ゲート電極をもつMOSダイオードを試作し、共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの基本動作の確認を行っている。

(2) Hyuckjae Oh, Hoon Choi, Takeshi Sakaguchi, Jeoung-Chill Shim, Hiroyuki Kurino and Mitsumasa Koyanagi,

“Novel Silicon On Insulator Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors with Buried Back Gate”,

**Japanese Journal of Applied Physics (JJAP)**, Vol.43 (No.4B), 2140-2144 (2004).

共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリのメモリトランジスタ部分となるSOI（Silicon-on-Insulator）MOSFETを実際に試作し、良好な特性を得ている。大きなメモリトランジスタ電流を得るために、選択エピタキシャル成長法により形成したエレベーター・ソース/ドレイン構造を採用するとともに、その表面に低抵抗のニッケルシリサイドを自己整合で形成している。

(3) Cheng-Kuan Yin, Ji-Chel Bea, Youn-Gi Hong, Masanobu Miyao, Kenji Natori, Mitsumasa Koyanagi,

“New Magnetic Flash Memory with FePt Magnetic Floating Gate, Extended Abstr”

**International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM)**, 1046-1047 (2005).

共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの磁気トンネル効果を詳細に評価するために、FePt浮遊ゲート電極とパーマロイ（NiFe）制御ゲート電極をもつMOSダイオードを試作し、FePt浮遊ゲート電極とパーマロイ制御ゲート電極の間で磁気トンネル効果が起こっていることを観測した。

研究課題：半導体スピンエンジニアリング  
研究代表者：新田淳作

(1) Hiroyuki Tamura and Leonid. I. Glazman  
“Tunable Kondo Screening in a Quantum Dot Device”  
**Physical Review B** 72, 121308(R) (2005)  
2つの量子ドットが1次元量子細線と結合した系の電気伝導を議論した。量子ドット中に局在した電子スピンの量子細線中の伝導電子と結合することにより、ドット中スピン間にRuderman-Kittel-Kasuya-Yosida(RKKY)相互作用が生じ、2つのスピンの強磁性的に揃う。このような系の近藤効果を測定したとき、磁場を印加するとドット中スピンの伝導電子系によって遮蔽される「近藤スクリーニング」が自在に調節できることを示し、RKKY相互作用を近藤効果によって検証する有効なデバイス構造および測定方法を提案した。

(2) F. Meijer, A. Morpurgo, T. Klapwijk, and J. Nitta  
**Physical Review Letters** 94, 186805 (2005)  
“Universal spin-induced time reversal symmetry breaking in two-dimensional electron gases with Rashba spin-orbit interaction”  
スピン軌道相互作用とゼーマン効果の競合について調べた結果、ゼーマン効果によりスピン緩和時間が増大すること、位相緩和時間はスピン軌道相互作用とゼーマンエネルギーの比によって普遍的な振る舞いを示すことを見出した。

(3) J. Ohe, M. Yamamoto, T. Ohtsuki, and J. Nitta  
“Mesoscopic Stern-Gerlach Spin Filter by Nonuniform Spin-orbit Interaction”  
**Physical Review B** 72, 41308(R) (2005)  
スピン軌道相互作用をゲートで空間制御することにより磁場や磁性体を一切使用しないで非磁性半導体中にスピン偏極したキャリアを生じる Stern-Gerlach 効果スピンフィルターを提案した。

研究課題：単一磁束量子テラヘルツエレクトロニクスの創製  
研究代表者：藤巻 朗

(1) Y. Yoshinaga, S. Izawa, K. Wakita, T. Kito, M. Inoue, A. Fujimaki, and H. Hayakawa  
“Investigation of Properties of Stacked-type Interface-Treated Josephson Junctions Fabricated with PrGaO<sub>3</sub> Doping Process”  
**IEEE Trans. Appl. Superconductivity**, 13 (2), 805-808 (2003)  
積層サンドイッチ構造を持つ高温超伝導体ジョセフソン接合のトンネル障壁層形成法とその特性に関する論文である。下部超伝導電極表面を改質した後にPrGaO<sub>3</sub>をごく微量添加することでリーク電流が減り、ジョセフソン接合の特性向上と歩留まりの向上が確認された。

(2) M. Inoue, Y. Yoshinaga, K. Wakita, K. Taniike, T. Kimura, A. Fujimaki and H. Hayakawa  
“Analysis of the Barrier in Vertically-Stacked Interface-Treated Josephson Junctions”  
**IEEE Transaction on Applied Superconductivity**, 15 (2), 141-144 (2005)  
高温超伝導積層型ジョセフソン接合のトンネル障壁の構造解析に関する論文である。透過電子顕微鏡により構造が不明であったトンネル障壁を解析した結果、良好な特性を示す接合では明確な障壁層は存在しないものの、構成元素のひとつであるYが僅かに過剰な状態になっていることが分かった。これは、実際のトンネル障壁は超伝導電極の構成元素が置換等によって絶縁体に遷移してできていることを示唆している。

(3) T. Kimura, K. Wakita, Y. Yoshinaga, K. Taniike, T. Nishitani, M. Inoue, A. Fujimaki

and H. Hayakawa

“Vertically-Stacked Josephson Junctions Using  $\text{YbBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  as a Counter Electrode for Improving Uniformity”

**IEEE Transaction on Applied Superconductivity**, 15 (2), 141-144 (2005)

高温超伝導積層型ジョセフソン接合において上部電極と下部電極の材料を変えることにより、接合特性の均一性が向上したことを報告している。これは、イオン半径の異なる材料を用いることで界面での絶縁体遷移が促進され、トンネル障壁が均質になったためと考えられる。

**研究課題：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**

**研究代表者：古屋一仁**

(1) Kazuhito Furuya, Yasunori Ninomiya, Nobuya Machida, and Yasuyuki Miyamoto, "Young's Double-Slit Interference Observation of Hot Electrons in Semiconductors"

**Phys. Rev. Lett.** :91, 216803, (2003)

GaInAs 中の 25nm 間隔 InP スリットによりヤングのダブルスリット実験を行った。80nm 周期微細電極で観測したコレクタ電流の磁場依存性は理論と一致し、固体半導体中でのホットエレクトロンの波面の 3 次元広がりを観測し、将来の波面制御の可能性を示した。

(2) Keigo Yokoyama, Koji Matuda, Toshihiro Nonaka, Yasuyuki Miyamoto, and Kazuhito Furuya,

"Fabrication of GaInAs/InP heterojunction bipolar transistors with a single tungsten wire as collector electrode",

**Jpn. J. Appl. Phys.** : 42 L1501-L1503 (2003)

0.1 ミクロン幅の 1 本の金属細線を InP 半導体中に埋め込み、その直上に微細エミッタ構造を形成することで、ベースコレクタ容量の低減を図った HBT 構造を作製した。埋込成長条件の最適化により良好なエミッタ接地特性と電流密度-利得特性を得た。

(3) Katsuhiko Takeuchi, Hiroshi Maeda, Ryo Nakagawa, Yasuyuki Miyamoto and Kazuhito Furuya,

"InP Hot Electron Transistors with Emitter Mesa Fabricated between Gate Electrodes for Reduction in Emitter-Gate Gate-Leakage Current",

**Jpn. J. Appl. Phys.** : L183-L186 (2004)

注入されたホットエレクトロンが真性半導体のみを走行することにより、走行時間を最小化するホットエレクトロントランジスタにおいて、ゲートリーク電流を減らす為に上部から電子を注入する構造を作製し、低いリーク電流と高い相互コンダクタンスを得た。

**研究課題：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ーによる新展開**

**研究代表者：吉川明彦**

(1) S.B.Che, W.Terashima, Y.Ishitani, T.Matsuda, H.Ishii, S.Yoshida and A.Yoshikawa, "Fine structure N-polarity InN/InGaN multiple quantum wells grown on GaN underlayer by molecular-beam epitaxy"

**Appl.Phys.Lett.**, Vol.86, 261903, (2005)

As・P系に代わる環境にやさしい窒化物半導体をベースとした光通信波長域光デバイス応用を目指したInN系量子井戸構造の作製と評価。分子線エピタキシー法(MBE)によるInN/InGaN多重量子井戸構造の結晶成長を行い、良好なヘテロ界面を持つ周期構造の作製に成功した。透過電子顕微鏡、X線回折測定によりInN井戸層およびInGaN障壁層の形成が確認され、近赤外域(1.7 $\mu\text{m}$ 付近)での発光を確認し、窒化物半導体による光通信波長光デバイス応用の可能性を示した。

(2) A.Yoshikawa, N.Hashimoto, N.Kikukawa, S.B.Che, Y.Isihtani,  
 “Growth of InN quantum dots on N-polarity GaN by molecular-beam epitaxy”  
**Appl.Phys.Lett.**, Vol.86, 153115 1-3, (2005)

InNによるナノ構造の実現を目指したInN量子ドットの成長制御を目指し、高密度 ( $\sim 10^{11} \text{cm}^{-2}$ ) の量子ドット構造の実現に成功した。反射高速電子線回折像と分光エリプソメトリーによるその場観察制御法によりGaN上InNの成長初期過程について調べ、InN層の格子緩和が1分子層を超えて起こる、つまり、臨界膜厚が1分子層であることを実験結果により示した。

(3) X.Wang and A.Yoshikawa,  
 "Molecular beam epitaxy growth of GaN, AlN and InN"  
**Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials**, Vol.48-49, 42-103 (2005)  
 分子線エピタキシー法を用いた窒化物半導体結晶 (AlN, GaN および InN) 成長技術の現状と将来動向について、当該研究グループでの成果を中心にまとめたレビュー論文。エピタキシブプロセスのその場観察制御の重要性や極性制御による高品質窒化物結晶成長とその成長過程に関する理解、デバイス応用に向けた量子構造の作製と評価など、MBE 成長における窒化物結晶の特徴と問題点について詳しく述べている。

### 3. 受賞等

平成 17 年 9 月 30 日現在

受賞者名	賞の名称	授与者名	受賞日 (時期)
安達千波矢	第 2 回船井情報科学振興財団振興賞	財団法人 船井情報技術振興財団	平成 15 年 3 月 21 日
浅田雅洋	JJAP 論文賞	応用物理学会	平成 15 年 8 月 31 日
小柳光正	第 1 回光・電子集積技術業績賞 (林巖雄賞)	応用物理学会	平成 16 年 3 月 30 日
藤巻 朗	第 8 回超電導科学技術賞	社団法人 未踏科学技術協会	平成 16 年 6 月 21 日
古屋一仁	電子情報通信学会フェロー	電子情報通信学会	平成 16 年 9 月 22 日
浅田雅洋	市村学術賞	新技術開発財団	平成 17 年 4 月 28 日
田中由喜夫	第 8 回超電導科学技術賞	社団法人 未踏科学技術協会	平成 17 年 6 月 23 日

### 4. シンポジウム等

平成 17 年 9 月 30 日現在

シンポジウム名	日時	場所	入場者数	特記事項
第 1 回研究領域会議	平成 14 年 4 月 28 日	渋谷研究事務所	非公開 21 名 (総括・アドバイザー・研究代表者・JST 関係者)	研究代表者 9 名による発表と議論
第 2 回研究領域会議	平成 15 年 12 月 15 日	JST 東京展示館	非公開 33 名 (総括・アドバイザー・研究代表者・)	研究代表者 9 名による発表と議論

			共同研究者・JST 関係者)	
第3回研究領域会議	平成16年 12月14日	JST東京 展示館	非公開 38名 (総括・アドバイザー・研究代表者・ JST関係者)	研究代表者10 名による発表 と議論
「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・システムの創製」公開シンポジウム	平成17年 10月18日	東京ガーデンパレス	公開 190名 (内訳：大学等21名、民間企業53名、 領域関係者111名、 その他JST関係者 5名)	講演10件、 ポスター発表 40件

## 5. その他の重要事項（新聞・雑誌・テレビ等）

- ・朝日新聞掲載 平成17年6月28日夕刊「量子細線は光の98%吸収」：秋山チーム  
他、科学新聞（平成17年6月24日）、柏市民新聞（平成17年7月8日）に掲載
- ・日経産業新聞掲載（平成17年6月16日）  
「常温でテラヘルツ光、小型の光源、用途幅広く」：古屋チーム（浅田雅洋）

## 6. その他の添付資料

なし

## 7. 中間評価結果

### 平成14年度採択平成17年度中間評価

1-1. 研究課題名： 量子細線レーザーの作製とデバイス特性の解明

1-2. 研究代表者名： 秋山 英文 東京大学物性研究所 助教授

1-3. 概要

へき開再成長法によって作られる構造均一性の極めて高いT型量子細線を対象に、量子細線内の1次元励起子の特性を明らかにするとともに、レーザー素子を作製し、低発振閾値や高微分利得などを実証することを目指している。光励起を用いてレーザー発振を実現し、その特性や発光利得吸収スペクトルなどの計測と解析を行うとともに、理論的な解明を進めてきている。さらに、試料の高品質化、高温動作、電流注入レーザーの作製に向けて実験が進行中である。

1-4. 中間評価結果

1-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

ベル研との共同研究により、へき開面上の再成長を利用するユニークな技術で断面形状をよく制御した量子細線を作製し、そのPL、PLE(PL Excitation)、顕微PL測定から1次元における励起子、励起子分子の基礎的な振る舞いを明らかにしてきたことは評価できる。理論的にも理想的な一次元系の励起子に対する研究が進展しており、実験との比較も興味深い。一方この細線では、キャリアの閉じ込めが弱い弱点があり、当初計画した電流注入発振には至っていない。実験・理論グループ間の交流を意識的、意欲的に進めていることは評価できる。また、他チームとの連

携が進められており新たな展開も期待できる。本研究のレーザー構造は、応用面から見れば大量生産に不向きであるが、断面形状がよく制御された細線の光物性の解明は重要である。実験と理論が両輪で研究を展開できるグループ構成になっており、非常に妥当な体制である。

#### 1-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

構造や組成の制御性が高いT型 GaAs 量子細線およびそれを用いたレーザー構造の製作に成功している。その光学特性および光励起でのレーザー発振特性の基礎的知見が得られている。理論面では、擬1次元電子-正孔系の理論解析を行い、1次元系の状態密度や励起子で説明されてきた量子細線の発光の従来の描像を再吟味し、電子間相互作用にもとづく量子多体状態を解析し、その関与の重要性を指摘した。1次元量子構造のレーザー特性に加えて、非線形性の起源となる励起子や励起子分子の振る舞いが明らかになりつつある。実験と理論との比較により理想的な1次元光物性を議論する素地ができつつある。物性科学としては順調な成果が期待できる。電流注入レーザー発振に関しては困難が予測されるが、その克服も期待する。

#### 1-4-3. 今後の研究に向けて

T型 GaAs 量子細線は基礎物性の研究には適しており、実用的レーザーへの展開は期待しにくい。しかし、基礎科学的知見を提供することにより、プロジェクト全体が目指す超高速・省電力デバイスの実現に量子細線がどこまで貢献できるかを明らかにすることができる。今後細線の性能の向上により、細線の光学物性や素子機能を明らかにすることが望まれる。この意味で、実用的な1.5 $\mu\text{m}$  帯量子細線レーザーを研究する荒井チームとの連携と共同研究は極めて好ましい。現在、物性研究とデバイス研究の両方を対象としているが、CREST 研究には基礎をしっかりと押さえる研究もあるべきであり、理想的な1次元系が作成できるメリットと理論(小川)グループとの共同を考えると、1次元系での光物性解明の研究を重点的に進め学問的に高いインパクトを持つ成果を出す方向を選択するのが得策と思われる。なお、電流注入型レーザーの実現のための努力も進め、その技術的課題も明らかにしてほしい。

#### 1-4-4. 戦略目標に向けての展望

形状がよく制御された細線の物性探求は基礎的研究であるが1次元系のナノ構造の素子応用可能性に関する知見が得られるので戦略目標に合致している。プロジェクト内において実験・理論チームの共同研究、プロジェクト外グループとの交流なども強化し、量子細線に関する物理を明らかにし、デバイス応用の基礎を築くことによって目標が達成可能と思われる。

#### 1-4-5. 総合的評価

へき開再成長法を用いて高品質な量子細線を作製・評価し、理論チームとの密接な検討により、1次元励起子や細線のレーザー発振に関し重要な知見を得ている。より実用的な量子細線レーザーを研究する荒井チームとの連携研究により、多様な量子細線の光物性に対する総合的知見を得るとともに、電流注入型量子細線レーザーの振る舞いについて深い知見が得られることは高く評価できる。良質な細線に関する詳細な光物性計測と実験家と理論家との協業により、1次元系レーザーの基礎的研究として世界的にすぐれた成果(論文・特許)を期待する。

2-1 研究課題名： 有機半導体レーザーの構築とデバイス物理の解明

2-2. 研究代表者名： 安達 千波矢 九州大学未来化学創造センター 教授  
(千歳科学技術大学光科学部物質光科学科 客員教授)

#### 2-3. 概要

本プロジェクトでは、有機半導体レーザーダイオード(有機LD)の実現を最終的な研究目標としている。有機LD実現のためには、有機半導体層への高電流密度の注入の実現、高電流密度下での励起子相互作用の解明、低閾値を示す新規有機レーザー活性材料の開発が必要である。本プロジェクトでは、有機半導体デバイスの機構を支配する物理機構の解明と制御法を探索し、有機LDの実現を目指している。

## 2-4. 中間評価結果

### 2-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

有機薄膜への高密度電流注入、低閾値活性材料の発掘、光励起レーザー発振の面では順調な進捗が見られている。光励起ではあるが非常に低いエネルギーで発振する材料を発掘し、固体ダイオードレーザーのCW発振を実現したことは、実用システムにつながる可能性を示す成果と考えられる。また、有機半導体の電荷輸送、発光特性、励起子失活に対する理解も進展している。一方、電流駆動に関しては大電流密度の電流を有機膜に注入することを実現しているが、電極面積が微小の場合に限られておりさらに機構解明が必要である。

### 2-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

- (1) 光励起下であるが常温で連続発振する独自の低閾値有機レーザー材料を見出した。
- (2) 電流励起発光を目指し、100 kA/cm<sup>2</sup>以上の電流注入を可能とするデバイス構造を考案した。
- (3) 励起子の失活機構の解明を図りその対応法の探索を進めた。

という点から、これまでは順調な進捗が認められる。光励起発振が確認出来ているので、次のターゲットは電流注入型デバイスの実現である。励起子失活を防ぐことは容易ではなく、電流注入レーザー発振のハードルは高いが、これが実現されれば産業への波及効果も大きいので、資源の集中と関連研究者の協力も得て研究を進めることが求められる。

### 2-4-3. 今後の研究に向けて

これまでの3年間は化学の専門をいかして、光励起下で連続発振する有望かつ独自の発光材料を開発した点は高く評価できる。残り2年はターゲットを絞り当初目標である有機半導体レーザーの実現に向け研究に邁進することが重要である。ここでは複雑な電極構造に対する電子状態モデルと電流輸送機構の解明、励起子の失活の機構解明と制御など物理的考察力が問われる局面が重要となる。グループ内の強化ないしは国内外のこれを専門とする研究者との連携により、この面を強化することが望まれる。

### 2-4-4. 戦略目標に向けての展望

ここまでの3年間の研究成果は一定の水準にあると考えられるが、当初目標である電流注入レーザー動作に向けた取り組みでは電荷注入・輸送機構の解明など種々の課題が残されている。材料が独自であることが高く評価でき、これを用いて電流駆動の有機半導体レーザーダイオードが実現できれば、その技術的インパクトは大きい。また、その過程で有機半導体デバイスの今後の発展に寄与するような波及効果の高い成果が期待される。

### 2-4-5. 総合的評価

有機薄膜中への高密度電流注入の達成、低閾値エネルギーでレーザー発振する材料の発掘と光励起による有機色素固体レーザーのCW発振、DFBタイプのレーザーの実現など、国内外の類似の研究と比較してトップグループを行く成果が得られていると認められる。プロジェクトの目標である電流駆動レーザーの実現には困難が予想されるが、デバイス物理に関しグループ外の専門家とも連携を強め研究・開発を推進することが望まれる。実現すればその技術的インパクトは大きく、産業上も学術上も波及効果が期待できる。

## 3-1. 研究課題名： 低次元量子構造を用いる機能光デバイスの創製

3-2. 研究代表者名： 荒井 滋久 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

## 3-3. 概要

光ファイバ通信素子に適用可能な高品質の低次元量子構造（特に量子細線）形成法の確立とこれを用いる高性能レーザーおよび全光スイッチング素子の実現を目的とする。低損傷ドライエッチングによるナノ加工法の開拓と歪補償量子井戸構造の利用や再成長技術を駆使するこ

とにより、ほぼ任意形状の量子細線を実現し、室温での寿命が2万時間を超える1.5 $\mu\text{m}$ 波長帯量子細線レーザーを実現した。全光スイッチング素子を、回折格子を組込んだ構造で実現し、100Gbit/sの高速応答の可能性を示すと共に、バルク結晶、量子井戸構造、量子細線構造に対する光誘起屈折率変化を測定・評価した。

### 3-4. 中間評価結果

#### 3-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

電子線描画・エッチング・埋め込み再成長からなる他にはまねのできないトップダウン的ナノ加工技術で高品質量子細線レーザーを実現しているのは世界的にも本チームのみであり、研究のレベルは高い。量子細線レーザーの低閾値化や寿命試験も進め、ナノ加工法の信頼性を確立するなど、多彩かつ有用な結果を得ている。全光スイッチの研究でもバルクに較べて大きい光励起の屈折率変化の評価、偏光無依存の全光スイッチングを実現するなどの成果が得られており、チーム全体としても進捗は良好と認められる。

#### 3-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

InGaAsP 歪補償量子井戸の設計と成長および電子線描画とドライエッチングからなる独自のナノ構造形成法で、1.5 $\mu\text{m}$ 帯量子細線DFBレーザーを実現、 $J_{th}=176\text{A}/\text{cm}^2$ という量子井戸レーザーより低い閾値電流密度や、21,000時間以上の室温連続動作を達成した。また、誘電体やポリマー材料をクラッド層とするDFBレーザーを試作し、光励起で有望な特性を実現、偏光無依存の全光スイッチの実現などの成果も得ている。本ナノ加工技術を駆使し、量子細線の局所ひずみ制御、任意形状の低次元構造を有する光学デバイスへの展開や、ウェハ張り合わせ技術による高性能光デバイスなどへの発展も見込むことができる。

#### 3-4-3. 今後の研究に向けて

本研究では、産業的に実績のある半導体加工技術を極限までに発展させ、所望の構造とデバイス性能を実現するアプローチを採っており、産業化しやすい信頼性の高い成果を得ている。この特徴を活かしてさらに高性能・高機能の新デバイスの実現と機能の集積化を期待する。また、物理の面では、細線構造を変形発展させた構造の探索も含めて、量子構造、量子効果の統一的知見が得られることを期待したい。この点で秋山チームとの連携によって量子細線光物性や素子機能の解明の努力も進めて欲しい。特許に関しては、本研究がデバイスよりのテーマであることを考えると、基本的な発明が含まれる可能性があり、少数の基礎概念について特許登録の努力も期待する。

#### 3-4-4. 戦略目標に向けての展望

量子細線など先端ナノ構造の質を高めることで、量子井戸レーザーを越える性能のレーザーなどが実現できることを実証することを、最優先の目標として研究が進められている。プロジェクト全体の目指す超高速・超省電力ナノ構造デバイスの研究開発という主旨に合致しており、目標達成の可能性も高い。

#### 3-4-5. 総合的評価

ひずみ補償高品質埋め込み量子細線の形成、量子細線DFBレーザーの実現と特性解明、強い光閉じ込め効果を持つ新構造DFBレーザーなどに関して優れた着実な成果を上げている。全光スイッチに向けた研究も、応答速度の改善の課題はあるが、発展が期待できる。全体として成果のレベルは高く、論文発表、国際会議発表も比較的順調である。基礎的な成果については特許化の努力も期待する。秋山チームとの共同研究も含め、プロジェクト後半において、さらなる成果が期待される。

4-1. 研究課題名： 多価イオンプロセスによるナノデバイス創製

4-2. 研究代表者名： 大谷 俊介 電気通信大学レーザー新世代研究センター 教授

#### 4-3. 概要

多価イオンは、物質との相互作用をする時に自身の持つ大きな内部エネルギー（例えば裸のヨウ素イオンで 200 keV）を付与するため、高い反応性を示す。この反応性豊かな 1 個のイオンが誘き起こす表面ナノプロセスの実態を詳しく調べ、それを利用して新しいナノ構造形成法の可能性を探る研究を行う。元々は、原子（核）物理研究用に開発された世界に稀有な高価数多価イオン生成装置に、新たにビームラインを附設し、低速多価イオンを半導体などに照射できるようにした。そして、単一イオン入射の検知を確認するとともに、Si やグラファイト面上に、多価イオンを入射させた後に生成されるナノ構造の形状や、表面から剥離されるイオン量などが制御できることが判った。

#### 4-4. 中間評価結果

##### 4-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

多価イオンをナノ加工法として応用する挑戦的テーマである。多価イオン 1 個の照射を確実に検出できることを確認したこと、固体表面で価数により変化するナノスケールの改質が生じることを確認したことは評価できる。多価イオンのスパッタリング機構の解明やそれに伴う表面元素種の高感度分析など研究は計画通りに進捗している。しかし作製されたナノ構造の組成・形状・物性評価、多価イオンを配列照射する技術については進展が遅れている。プロジェクト後半においては多価イオンプロセスによるナノ構造創製に重点をおき、デバイス関係の研究者との協力や連携も考慮に入れて研究を加速することが望まれる。

##### 4-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

(1) 高配向性グラファイトに種々の多価イオンを照射し、単一イオン照射により隆起したナノ構造が形成され、その直径は入射エネルギーによらず、多価イオンの価数、すなわち、イオンのポテンシャルエネルギーによることを示した。

(2) SiO<sub>2</sub> 薄膜、Si (111) (7x7) 表面、水素終端シリコン表面に、種々の多価イオンを照射した場合、価数が充分高いと、ナノメートル寸法の孔が形成されるとともに、H, O, Si イオンの脱離が認められることを示した。

(3) Er 多価イオン照射によるシリコンへの Er 導入について、ある程度の見通しを得た。これらの成果は得られているものの、物性評価が不十分である上に、目的に系統性を欠いておりナノ加工プロセスとして真価や問題点が明らかにされていない。多価イオンナノプロセスの有用性を確認する研究の加速的進展を期待する。

##### 4-4-3. 今後の研究に向けて

今後の研究において優先すべきは「ナノ加工法としての多価イオンプロセスの有用性と問題点」を明らかにすることである。今後は研究内容を絞り、半導体加工プロセスへの応用であれば、形成されるナノ構造の形状・組成・物性とそれらの制御可能性を明らかにするとともに、プロセス誘起欠陥の有無の評価などを通してナノ加工法としての特徴を明確にすることが必要である。また、その過程で多価イオンのエネルギー緩和過程を基礎科学的に解明し、現象を定量的に記述できるモデルの構築と実証に関する研究も望まれる。

##### 4-4-4. 戦略目標に向けての展望

挑戦的なテーマであり、戦略目標の達成につながるか否か、先行きに不透明感はある。今後、多価イオンがナノデバイス創製にどのように役立つかという観点を中心に置いて、多価イオンの特徴を活かしたナノ加工法の確立に期待したい。

##### 4-4-5. 総合的評価

多価イオンをナノテクノロジーに応用する挑戦的テーマに取り組み、少しずつ成果を得ている。試みに作製されたナノ構造の評価や多価イオンの配列照射に向けた取り組みには遅れが見られる。単一の多価イオンの照射を確実に検出し、価数に依存して生じるナノスケールの表面改質を

確認したこと、クーロン電荷による爆発的な物質の飛散現象を見つけたことは評価できる。高ビーム強度多価イオン源開発の取り組みも順調に推移している。多価イオンを用いたナノ加工プロセスそれ自体は、独創的なもので、ナノ加工としての有用性が示されれば、そのインパクトは大きい。また、その過程で、多価イオンのエネルギー緩和や表面反応過程が解明されれば、科学的なインパクトも高い。多価イオンの加工法としての応用においては適用対象を絞ることで個々の現象やナノ構造の特質を明らかにし、ユニークな加工法として真価を示すことを期待したい。

5-1. 研究課題名： シフトレジスタ機能付超高速光メモリの創製

5-2. 研究代表者名： 河口 仁司 山形大学工学部 教授

5-3. 概要

本研究では、全光型超高速光バッファメモリを、偏光双安定性を持つ面発光半導体レーザを用いて実現するとともに、二次元アレイ化してシフトレジスタ機能の実証を目指す。これまでに、面発光半導体レーザの偏光双安定性を用い、世界最小光入力および世界最高のスイッチング周波数でのフリップフロップ動作を実現するとともに、全光信号再生の原理確認を行った。又、面発光半導体レーザを製作し、偏光双安定動作に関する新知見を得ている。1ビットの光信号のメモリ動作の原理確認にも成功している。

5-4. 中間評価結果

5-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

研究の中心である山形大グループでは、偏光双安定 VCSEL の動作特性向上や全光型信号再生実験の成功、1ビット光バッファメモリの実現など計画に沿った進展が認められる。また、分担研究を担当する東工大と慶応大グループも高速光メモリに不可欠な周辺技術である光ヘッダ処理、時空間変換光制御システムに関して独自の研究を進めている。また阪府大グループは動作波長の長波長化に向けた新規な InGaAsSbN 系材料の成長技術の開発を順調に進めている。当初計画になかった新しい方向として、山形大グループで結晶貼り合わせによる InGaAsP 系材料による長波長化の取り組みを開始した。研究目標が明確なプロジェクトであり、その明確な目標に向かって順調に進捗している。

5-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

- (1) 1ビットの 10Gb/s 全光型フリップフロップ動作に成功。
- (2) 1ビットの光信号の書き込み・読み出しに成功。
- (3) DA 変換型光ヘッダ識別の基本動作実証。
- (4) 6.25GHz 間隔 AWG(Arrayed-Waveguide Grating) 実現。ただし損失が大きい。
- (5) InGaAsSbN 量子井戸半導体レーザの実現

これらの結果は当初計画に沿っており、当初の目標を達成できる見込みは高い。また各グループからの特許出願が順調であることも評価できる。

5-4-3. 今後の研究に向けて

本研究の光メモリの方向付けのためには、シリコンベースの電子的メモリを用いた場合と比べ、消費電力・スピード・ビット数の点で、どのようなメリットがあるかを種々の状況を想定して数値的に明らかにしてほしい。これまでの実験結果を基に定量的な予測と評価が可能と思われる。その上で、デバイスの性能の向上に取り組むべき方向を明らかにすることが望まれる。また多ビット化やシフトレジスタの実現のための計画を明確にすることが必要である。光ヘッダ処理、時空間変換光制御の各グループの成果を集積化し、小規模であっても実用に耐える光メモリのアプリケーションを設定し、高速光メモリシステムの実証を主要目標にすることが望まれる。なお、1.55 $\mu\text{m}$  系材料への展開については、光通信応用上意義は十分にあるが、マンパワーが割かれるために、多ビット化やシフトレジスタの実現といった

課題への取り組みが弱くなることが生じないよう、十分な留意が必要とされる。

#### 5-4-4. 戦略目標に向けての展望

偏光双安定 VCSEL を用いた二次元アレイが実現され、動作が高速化される可能性は高い。長波長偏光双安定 VCSEL が実現できる見込みもある。各グループの努力により光ヘッダ処理、時空間変換光制御などの周辺装置も使用に耐えるものが完成することが見込まれるため、各グループの連携をうまく行なうことにより最終目標であるシフトレジスタ機能付き高速光メモリの実証も可能である。今後の成果はかなり期待できる。

#### 5-4-5. 総合的評価

偏光双安定動作を利用したメモリ機能の実現とそのシステム化についてはオリジナルな研究で、他に類似研究はない。キャリアの増減を殆ど伴わないスイッチング動作であるため、高速化に優れた方式として期待できる。現在、 $0.98\mu\text{m}$  帯で1ビット全光型フリップフロップの世界最小光入力動作の基本機能確認と世界最高速の 10Gbps が達成できた段階であり、第一ステップとして高く評価される。一方実用化に向けては、多ビット化、高速性と低消費電力の両立、長波長化などの解決すべき課題があり、全光ネットワークへの適用を目指すには依然としてハードルは高い。電気的手法との比較を行い、偏光双安定性を用いるという本研究の独自の創造的アプローチの利点を実証し、小規模であっても実用になる独自の全光システムを構成することが望まれており、達成できれば技術的インパクトは非常に大きい。

6-1. 研究課題名： 共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの創製

6-2. 研究代表者名： 小柳 光正 東北大学大学院工学研究科 教授

#### 6-3. 概要

本研究は、代表者が提案した共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリを実現し、その動作を確認し、それを用いた新しいメモリ回路の可能性を示すことを目的としている。SAND 法と呼ぶ新しい膜形成手法を用いて、ドット粒径が  $1\sim 3\text{nm}$  で、従来より約 1 桁高いドット密度 ( $2\times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ ) をもつ FePt ナノドットの形成に成功した。また、FePt ナノドットを浮遊ゲートとする MOS 構造を用いて磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの基本的な動作の確認にも成功している。

#### 6-4. 中間評価結果

##### 6-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

磁気ナノドットは熱処理に対して不安定性を示すことや磁性が劣化するなどの課題があったが、ある程度までの磁化特性を持つ FePt ナノドットの形成条件が確立され、FePt 浮遊磁気ナノドットへの電子のスピン選択トンネルとメモリ効果を確認した。これは目標のデバイスの基礎原理を確認したものであり重要な進展である。FeSi 系材料の検討においては基本的な性質を探るためバルクや薄膜で特性を評価している段階であり、ナノドットに向けた取り組みとしてはやや遅れている。モデリングに関しては、磁気ナノドットデバイスのシミュレーションに向けて磁界や磁化制御などの計算をしているが、収束などの問題が残っている。スピン依存トンネル特性などに関してもさらなる検討を要し、本格的なデバイスのシミュレーションの確立にはさらなる工夫が必要である。今後は磁気ナノドット形成のプロセスとトランジスタ作製技術との組み合わせが必要であり、両方のプロセスの整合性も重要となる。

##### 6-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

- (1) 層状の FePt 浮遊ゲートをもつ磁気フラッシュメモリ構造を試作し、磁気トンネルによるメモリ効果を確認した。
- (2) FePt ナノドットを形成する方法やアニール法を種々検討し、アニール後でサイズ  $3\sim 5\text{nm}$ 、密度  $10^{13}/\text{cm}^2$  以上の磁気ナノドット層を形成するプロセスを確立するとともに、これらが室

温で保持力 20K0e の良好な磁化特性を持つことを明らかにした。

(3) ナノドットの磁化状態の直接観察に成功した。

(4) ダマシンプロセスにより、ヨーク構造付埋め込みビット線を形成するプロセスを確立した。などの成果が得られている。今後メモリとしてのトータルプロセスの構築が要求されるが、代表者のグループはシリコン系半導体デバイス作製に関して技術蓄積があり、プロジェクトの期間内に実現できると思われる。

#### 6-4-3. 今後の研究に向けて

本研究では、メモリ情報の保持においてドットに蓄えられた荷電量の安定性を利用している。磁気トンネルの方向性は完全に一方向性ではないためドットに蓄積した荷電の長期保持が可能かの検討を要する。また磁気ドットも寸法が小さいため、スーパーパラ磁性状態に近い状態にあると考えられるため長期間同一磁化状態に留めうるかという疑問が残る。これらに対する基礎的検討、実験的検討が望まれる。ナノドットの磁気特性の研究で批判に耐える基礎科学上の成果を確立するためには、グループ内の人的な強化、国内外の専門研究者との連携などを行い、研究体制を強化することも望まれる。

本研究と関連して、フラッシュメモリや MRAM 他多くの代替技術がある。現在主流のフラッシュメモリの大容量化は応用面で益々重要になってきているが、64G ビットあたりに限界が予想されている。本研究のデバイスについて、メモリ容量・書き換え回数・消費電力などに関し検討を加え、現行の技術やスピンをを用いないナノドットメモリに比べどの程度メリットがあるか、定量的に見積もり、その利点 (Figure of Merits) を明らかにすることが重要である。

#### 6-4-4. 戦略目標に向けての展望

磁気ナノドット、それを用いたデバイスは戦略目標に良く合致した研究テーマである。現在はメモリ試作の準備が整い、これから単体・メモリセル試作へ進む段階である。磁気ナノドットの作製と特性の制御はある程度順調に進展することが見込まれる。メモリデバイスとして有効性を示す段階に達することを期待する。予想通りのデバイス動作が実現すれば産業界にインパクトを与え得る。

#### 6-4-5. 総合的評価

近年 Si ナノドットや金属ナノドットを用いたメモリの研究開発が活発に行われているが、本研究では、そのドット材料に磁性材料を用い、磁氣的トンネル効果でそれを制御する新しい不揮発性メモリを実現しようとするものである。FePt ナノドットがハードな磁気特性を示すことを発見するなどの進展があり、デバイスのプロセスや構造に関し解決すべき技術課題が明確化されてきている。高密度磁気ナノドット形成法の確立、磁気ナノドットによるメモリ効果の確認など基本部分では順調に進展している。デバイス化やデバイス特性の評価は遅れ気味ではある。しかし、デバイス化は代表者が実績をもつシリコン技術の延長線上にあるので解決されることを期待する。最終的なデバイスが完成すれば、シリコン集積回路技術に新たな自由度が導入され、インパクトは大きい。積極的に推進すべきプロジェクトである。

7-1. 研究課題名： 半導体スピンエンジニアリング

7-2. 研究代表者名： 新田 淳作 東北大学大学院工学研究科 教授

#### 7-3. 概要

電子スピンは、最小の磁気要素でありこれまで磁場により制御されてきた。ゲート電界によるスピン制御は空間的および時間的な制御性と省電力性などで優れており、次世代スピン機能デバイスの実現を図る上で重要技術である。これまでに、2つの量子ドット中の局在スピンの RKKY 相互作用により強磁性的に結合することを実証するとともに、電子スピンの回転角度をゲート電圧で電氣的に制御することなどに成功した。これらの成果は次世代スピントロニクスや

将来のスピンをベースとした量子情報処理に向けて重要な役割を果たしていくと考える。

#### 7-4. 中間評価結果

##### 7-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

スピン伝導特性の研究においてはスピン注入に関する部分はやや進捗が鈍いが、電界制御スピン干渉実験、ドット列の前段階であるドット・細線・ドット系を用いた非局所的なスピン相関と科学的にレベルの高い成果が得られている。スピンの関与した光物性の研究でも、量子ドット列や低キャリア密度系の光物性評価が順調に進展している。特に、ポテンシャルの横方向変調を加えた横型ナノ構造に対して、アクセプタ準位と伝導電子の関与したスピン依存型の発光現象を明らかにしたことは興味深い。論文、国際会議発表も順調であり、海外特許を含む特許出願も非常に活発である。

##### 7-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

(1) InGaAs/InAs/InGaAs ヘテロ構造を用いて、 $g$ -因子のゲート制御に成功した。

(2) Rashba スピン軌道相互作用に対するヘテロ界面の重要性を指摘するとともに、この効果を利用したスピン干渉ループデバイスを試作し、スピン干渉のゲート制御に成功した。さらに、Rashba スピン軌道相互作用が産み出す有効磁場の空間変調を原理とする Stern-Gerlach 型スピンフィルターを提案した。

(3) 量子細線に2個の量子ドットがトンネル結合した構造をゲート制御し、両方のドットが奇数個の電子を含む状態では、RKKY 相互作用によってドット内スピンが強磁性的に揃うことを見出した。

これらの成果から、これまでの研究の良好な進捗が示されている。今後、これらの結果をデバイスの実現に向けて進展していくことが望まれる。

##### 7-4-3. 今後の研究に向けて

ゲートによるスピン制御という観点は、電子デバイスとして極めて魅力的であり、新しい物理現象の存在の実証や解明、物理的パラメータの決定などの観点から順調に成果を達成している。今後の研究では本プロジェクトが主題とする、「超高速・省電力デバイスの探索」に向けてこれまでの結果を活用することが必要である。そのためには得られた知見をゲート制御の電子デバイスの観点から再検討し、入出力・機能・性能、動作温度の関係を明らかにするとともに、ゲート制御型の超高速・省電力情報処理スピンデバイスの実現につながる方向に的を絞って研究を進めることが望ましい。ことに、達成された成果は、量子通信や量子コンピューティングの基本構成要素となる量子ゲートの実現に展開できる可能性があり、この方向に的を絞ることも考えられる。当初の計画ではカゴメ格子によるゲート制御強磁性の実現が主目標のひとつであったが、進捗はさほど大きくない。しかし、強磁性実現の可否について、実験的な立場から明確な結論を出すことを期待する。

##### 7-4-4. 戦略目標に向けての展望

本プロジェクトは、サイエンスよりの研究が主体となっているが、量子ナノ構造のスピン相関の解明と制御は戦略目標に良く合致している。量子ドットにおけるスピン相関の制御やその光学的計測に関する研究が着実に進展しており、今後も科学的にインパクトのある成果とそのデバイス展開が見込まれる。さらに、量子ドット列での強磁性の実現とそのゲート制御が実現できれば、スピントロニクスに変革をもたらす大きな成果になると思われる。

##### 7-4-5. 総合的評価

最近、半導体にスピンの自由度を導入する材料が世界的に活発化しているが、半導体に磁性元素を導入し希薄強磁性化する手法、または半導体に磁性金属を接触させてスピン分極した電子を注入するなどのアプローチが主体である。これに対し、本研究は非磁性半導体材料のヘテロ界面やナノ構造においてゲート電圧によりスピンを制御するアプローチであり、極めて独創的であり、基礎科学上の高度な成果が得られている。このスピン制御技術は、将来の量子コンピュータや量子通信の素子などへの発展も期待される。現在は極低温環境下でのデバイスアイデアの創出と

原理検証が中心であるが、室温動作実現に向けた努力や技術的課題の解明を期待したい。また高速性、低消費電力性、機能性などの観点から、デバイスとしての優位性を示す効果的な情報発信にも注力願いたい。

8-1. 研究課題名： 単一磁束量子テラヘルツエレクトロニクスの創製

8-2. 研究代表者名： 藤巻 朗 名古屋大学 教授

### 8-3. 概要

本研究では、サブテラヘルツ領域で動作する集積回路を目指し、高温超伝導体 (HTS) による単一磁束量子 (SFQ) 回路の基盤技術を構築する。基本となるジョセフソン接合において、性能向上阻害要因等を実験・理論の両面から検討し、その結果から超高速集積回路に耐える積層構造のジョセフソン接合を開発する。急峻な超伝導/絶縁体界面の形成が重要であることが分かり、元素置換などを利用した新たな作製手法を提案した。また、サブテラヘルツでの応用には光入出力が必須である。これまでに光ミキシング技術を取り入れた初の手法により 50GHz の信号入力、及び SFQ 動作の静的検出に成功した。

### 8-4. 中間評価結果

#### 8-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

高温超伝導体のジョセフソン接合で主流であったランプエッジ接合に対し、本プロジェクトチームの持つ独自の技術で積層構造素子を開発することにより集積化への道を拓きつつある。高温超伝導接合に関する基礎研究を基に、積層構造の大きな課題である素子バラツキをランプエッジ接合同程度に制御することが可能となっている。この点は今後の展開の基礎となり大きな進捗である。IcRn 積の制御やナノブリッジ形成に関しても進捗が見られるが、こちらは少し遅れ気味である。トンネル接合のモデル化、光ミキシング信号検出システムの確立、高温超伝導体の電流の光変調、磁気光学顕微鏡を用いた高温超伝導体中の磁束量子の観察などでも成果が出ている。高温超伝導接合の理論的検討、超伝導のゆらぎを中心にした基礎研究に関してもレベルの高い成果が出ている。ほぼ予定通りの進捗と判断される。

#### 8-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

(1) 高温超伝導体 HTS ジョセフソン接合グループでは、従来のランプエッジ構造の接合と比較してより寄生インダクタンスが小さくできる独自の積層型接合を研究開発し、優れた IcRn 積値を得るとともに、素子バラツキを減らすことに成功した。

(2) 光インターフェイスグループでは、光ミキシング法により超伝導素子に 50GHz を越える光信号の入力に成功するとともに、磁気光学効果により光出力インターフェイスを構成する基礎を確立した。

(3) SFQ 基礎グループでは、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し、トンネル障壁と高温超伝導体の界面に薄い常伝導体金属が存在するという新しいモデルに到達した。

このように、比較的良好な進捗状況にある。今後も積層型高温超伝導トンネル接合の特性改善と物性理解に関し、着実な成果が見込まれる。光インターフェイス技術でも進展が期待される。

#### 8-4-3. 今後の研究に向けて

高温超伝導体の接合を用いても、ジッター抑制のためには Nb 系に近い極低温動作が必要となるとの立場に立てば、本研究の意義は Nb 系では困難なサブテラヘルツ領域での動作の可能性を実証することになる。従って今後検討を要する主なポイントとして、①適正なゲート規模を設定した上でプロセスや回路開発を図るとともに、②磁気光学効果を利用して光出力のサブテラヘルツ動作を実証することが挙げられる。プロセス技術が Nb 系よりはるかに難しい高温超伝導体では、集積化規模により解決すべき技術課題が異なってくる。このため適正規模の設定が重要となる。光出力側のサブテラヘルツ動作については、実現を図る時に現れる諸課題が

不明であるため、サブテラヘルツ動作を実証するための具体的で総合的な試みを進めることが重要と思われる。

#### 8-4-4. 戦略目標に向けての展望

積層構造を用いた高温超伝導トンネル接合においては素子バラツキ低減、 $I_c R_n$  積値の向上の見通しなど研究の進展が見られる。サブテラヘルツ域の超伝導回路の実用化の鍵のひとつは超高速の光入出力方式の確立である。現在、光ミキシング法により、超伝導素子に 50GHz を越える光信号を入力することに成功している。プロジェクト後半で、計画より遅れ気味の SFQ 回路の実現と超高速光出力技術が実現出来れば、Nb 系低温超伝導体と相補関係にある高温超伝導体の超高速周波応用への関心が高められることが期待できる。

#### 8-4-5. 総合的評価

積層構造を用いた高温超伝導トンネル接合の均一性の向上、トンネル接合のモデル化、光ミキシング信号検出システムの確立、高温超伝導体の電流の光変調、磁気光学顕微鏡を用いた高温超伝導体中の磁束量子の観察など成果が出ている。高温超伝導接合の理論的検討、超伝導のゆらぎを中心にした基礎研究に関してもレベルの高い成果が出ている。全体として着実に進んでいる。一方でシリコン回路も高速化が進み、小規模の CMOS インバータでは数ピコ秒のスイッチングが実現されている。しかし、超電導回路は、原理的に電力・遅延時間積に関して、半導体系の回路を数桁凌駕し得るので、回路規模を選び、光入出力を活用してサブテラヘルツ超高速超伝導集積回路動作を実証できれば、その技術的インパクトは極めて大きく、学術への貢献も少なくない。

### 9-1. 研究課題名： 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

9-2. 研究代表者名： 古屋 一仁 東京工業大学大学院 教授

#### 9-3. 概要

埋め込み微細金属電極など超ヘテロナノ構造技術の開発により①弾道的な電子放出電極と無散乱で走行可能な領域からなるトランジスタ、②素子寸法や寄生容量や直列抵抗成分を極小化したヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT)、③二重スリット量子干渉デバイスの実現や高性能化を図り、(γ)遮断周波数 1THz 超デバイスの設計と心臓部の動作確認、(イ)世界最小のエミッタと埋め込み金属コレクタを持つ HBT を実現し、世界最小のベース・コレクタ容量を達成、(ウ)電子波二重スリット干渉を世界で初めて観測した。また、④共鳴トンネルダイオード (RTD) 特性向上と超高速周波発振の研究を進め、1 THz の発生などに成功した。

#### 9-4. 中間評価結果

##### 9-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

金属・絶縁物を半導体に埋め込むという独自技術である超ヘテロナノ構造を用いた微細 HBT やホットエレクトロントランジスタに向けたデバイス構造作成が当初の計画に沿って順調に進展している。テラヘルツ波発生に向けた共鳴トンネルを用いた素子も順調であり、中間点としては合格点と評価できる。

##### 9-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

(1) 世界最小のエミッタ幅やエミッタ面積をもつ HBT や幅 25nm のエミッタメサをもつホットエレクトロントランジスタを実現した。現段階では、試作した HBT はまだ、超高速性能を示しておらず、予測性能を妨げる寄生的効果の解析と制御により超高速化を追求している。

(2) シリコン基板上に  $\text{CaF}_2/\text{CdF}_2$  ヘテロ構造で共鳴トンネル素子を形成し、10 万を超えるピーク・バレー電流比を実現した。

(3) 共鳴トンネルダイオードとスロットアンテナを集積化した素子で 3 次高調波として、テラヘルツ帯の発振観測に初めて成功した。固体素子が室温でテラヘルツに届くということを示したものでインパクトは大きい。

(4) 二重スリット素子によるバリスティック電子に伴う量子の干渉現象を観察したことは、学術

的に優れた成果として評価できる。今後、素子機能上の得失を明らかにする。

#### 9-4-3. 今後の研究に向けて

代表者グループの独自技術である 3 次元超ヘテロナノ構造形成技術を適用してはじめて実現可能な新デバイス構造を提案・実証する方向の検討も望まれる。また共鳴トンネルダイオードでは基本波でのテラヘルツ帯の発振の実証とアレイ化によるミリワット級出力はインパクトが非常に大きく、進展が期待される。高周波に向けた取り組みはデバイスのみならず、デバイスのマウントなど外部によるところも大きいいため、デバイス構造の最適化を進めることと並行して、周辺部分や測定系に対する配慮も怠らないようにして欲しい。

#### 9-4-4. 戦略目標に向けての展望

電子デバイスの超高周波化に金属埋め込み構造とバリスティック電子活用は非常に重要で戦略目標に良くマッチしている。これまでの3年間はバリスティック電子を実現するデバイス構造形成に重点が置かれていたが、デバイス性能を決める真性および寄生素子の解析が進んできたため、今後は最高性能実現に向けた進展が期待できる。

#### 9-4-5. 総合的評価

超微細電極の埋め込みなど3次元超ヘテロナノ構造形成技術を開発・駆使し、複数種類の半導体デバイスを試作・解析し、超高速動作実現に向けた取り組みが行われている。埋め込み金属電極構造の作製技術などでは、世界最高レベルにあり、その重要性も認められる。極小のエミッタやコレクタを持つ HBT では世界最小の素子容量を実現したが、遮断周波数などの高周波特性では最高性能に達していない。今後、寄生素子や測定技術の改善を、ホットキャリア素子の研究推進とともに期待する。共鳴トンネルダイオード発振器を用い3次の高調波ではあるが半導体素子では初めてのテラヘルツ波の発生に成功している。今後、基本波でのテラヘルツ発振とアレイ化による大電力化などの検討と推進を期待する。また電子波の波面操作を用いた新機能素子は、学術上興味深い素子機能上の利点や課題に関し、さらなる検討を要する。本研究の超ヘテロナノ構造形成技術は、半導体産業で実績のあるトップダウン技術の延長上にあり、親和性も高いので、この手法で一群の超高速デバイスやその集積化が実現できれば、技術的インパクトは大きい。

10-1. 研究課題名： 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による新展開

10-2. 研究代表者名： 吉川 明彦 千葉大学 教授

#### 10-3. 概要

窒化物半導体の中で、もっとも小さいバンドギャップを持ち、かつ高い電子移動度を有する InN を対象としてエピタキシおよび物性制御を図るために、極性制御に着目した成膜プロセスのその場観察制御を行っている。これにより高品質 InN 単結晶の成長技術および InN を組み込んだナノデバイス構造の形成プロセスを MBE 法により確立し、InN を用いた窒化物系ナノ構造の極限機能発現と活用によって、光通信波長域で動作する超高速光デバイスや超高速・超省電力デバイスの実現可能性を検討する。

#### 10-4. 中間評価結果

##### 10-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

極性を制御した InN の高度な結晶成長技術が確立されつつある。それにより、InN のさまざまな物性がより良く評価できるようになって来た。また、InN/InGa<sub>N</sub>、InN/InAl<sub>N</sub> の量子井戸構造の成長および InN ナノドットやナノコラムの成長など、着実な進展が見られる。また、InN の1分子層を周期的に挿入した InN/GaN 超格子構造の試作も進んでいる。これらの構造を利用したデバイス化の検討が進み、方向性を明示することを期待する。

#### 10-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

In 極性と N 極性など結晶成長条件の違いが結晶の品質に予想以上の影響をおよぼすことを見出して、良好な InN 膜を MBE 成長する条件をかなりの程度明らかにした。また成長膜の電気的特性を調べ、バンドギャップ内準位の存在を指摘した。高度な成長技術は外部からも評価され、他の研究機関との共同研究や試料提供も行っている。成長技術に関しては高いレベルの研究が期待できる。InN、GaN、AlN 系の窒化物混晶がカバーする禁制帯幅範囲は、既存の半導体を陵駕しているので、高品質な InN エピタキシャル膜の成長とそのデバイスへの応用が達成できればインパクトは非常に大きい。

#### 10-4-3. 今後の研究に向けて

InN をベースにしたヘテロ構造やナノ構造の成長に関して順調に研究が進捗しているので、後半はデバイスに向けて電気的光学的測定を強化し、成長した構造をデバイス機能の実証につなげることを積極的に進めることが望まれる。デバイス応用上では残留キャリアの制御が非常に重要であるため、今後伝導型とキャリア密度の制御手法を確立して欲しい。今回チームを組んでいる研究代表者のグループとその他のグループ、さらにはグループ外の研究者への結晶の提供と共同評価を通して、InN 結晶膜・コラム・ドットなどの高品質化をさらに進めるとともに、デバイス展開へと進めることが望ましい。このためには、チーム内で共通の目標と共同作業の設定により一層の連携を深めることが望まれる。

#### 10-4-4. 戦略目標に向けての展望

極性の違いによる成長条件の違いに着目し高度な InN の結晶成長技術を確立しており、結晶成長と物性評価に関して目標を達成見込みである。今後、ナノドット、ナノコラムや1分子層といったナノプロセスを利用して、新しいデバイス機能の実証に向けた取り組みが課題となる。

#### 10-4-5. 総合的評価

InN は N 系の新しい半導体材料であり、結晶成長が難しいものの将来が期待される新しい材料である。本プロジェクトはこの InN に関して、様々な基板上への成長、高品質化、InGaN や InAlN と組み合わせたヘテロ構造の作製を実現し、世界でトップレベルの結晶成長を実現している。今後は得られた知見をもとに、InN 系ヘテロ構造の潜在的な優位性を具現化できるデバイス構造の試作と機能の実証を期待したい。