

(独) 科学技術振興機構
戦略的創造研究推進事業
平成 21 年度 研究領域中間評価用資料

「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」

2010. 4. 14

1. 戦略目標

[1] 名称

光の究極的及び局所的制御とその応用

[2] 具体的な達成目標

光・光量子科学技術は、非常に幅広い多様な研究分野に関わりを持つ横断的で重要な基盤となる分野である。また、天然資源に乏しい我が国は、人的資源の活性化をもとに新規産業を世界に先駆けて創出し、産業面での国際競争力を確保・持続していく必要がある。このため、我が国が優位に立っている光・光量子科学技術を核にした次世代基盤技術を早期に開拓することが重要である。このような観点に立って、以下のような領域について基盤的研究を進めるとともに、応用技術の開発にも努める。

(1) 究極的な光の発生技術とその検知技術の創出

- ・ 究極的に高品質な光源および超小型光情報処理素子の実現を目指した量子ドット、フォトリソニック結晶、非線形光学などの飛躍的発展
- ・ 量子通信や極限計測技術の飛躍を目指した単一光子光源や単一光子検出技術の創出

(2) 光と物質の局所的相互作用に基づく新技術の創出

- ・ 近接場光などを活用した回折限界を超えた超微細加工技術の高度化
- ・ 非線形光学や近接場光などのナノ構造・生体物質の観察・分析技術への展開

(3) 光による原子の量子的制御と量子極限光の開拓

- ・ ボース・アインシュタイン凝縮やフェルミ凝縮などを利用した光による原子の精密制御の開拓や光の本質にもとづく新たな物質科学の創出

[3] 目標設定の背景及び社会経済上の要請

(1) 量子ドット、フォトリソニック結晶、非線形光学などの研究開発による高品質の光発生技術の開発及び近接場光をはじめとする光と物質との局所的相互作用の解明と利活用は、光科学発展のために極めて重要であり、我が国において最先端の研究が進められている。これらの研究開発は基礎科学への貢献のみならず、新しい概念に基づく光源などの素子開発、超微細加工技術開発、計測技術開発など産業界へ多様な波及効果も期待されることから、今後も我が国が世界をリードしていくために、さらに強化を図る必要がある。

(2) 原子の量子制御技術や量子極限光の研究は、光と物質の相互作用や光の本質を解明することによって、光に関する研究開発全体の基礎となるものであり、新しい材料開発にもつながる可能性を秘めており、中長期的な観点から研究開発に取り組んでいく必要がある。

これまででは、我が国において光科学に関する研究開発の一端を企業が担っていたが、最近の不況により研究者が転職するなど企業の研究開発力が低下傾向にあった。また、このような状況下で後継若手研究者・技術者の育成も不十分な状況にあり、これまで培ってきた研究開発力

を維持発展させるためには早期に国家的に取り組む必要がある。

[4] 目標設定の科学的裏付け

我が国は、光ファイバ通信技術、LED、光計測・加工技術など光科学の産業応用技術開発において米国と並んで主導的に研究開発を行って世界をリードしてきた。これらの技術開発は、単なる商品開発にとどまらず、継続的に新しい技術を生み出し光科学の学問的発展にも貢献してきた。量子ドットやフォトニック結晶などは、その一例であり、当初は学問的興味から進められたが、今日では実用的な素子に応用しその効果を引き出せる段階に至っている。また、非線形光学効果活用は材料面での地道な努力などにより、さらなる進展が期待される。

光・光量子科学技術の未だ十分に解明されていない本質的な課題である量子レベルでの物質との相互作用や非線形性の起源などを探究することは、今後の科学技術の展開に必須のものであり、学術的に大きな意義を有する。

2. 研究領域

「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」（平成 17 年度発足）

本研究領域は、情報処理・通信、材料、ライフサイエンスなど、基礎科学から産業技術にわたる広範な科学技術の基盤である光学および量子光学に関して、光の発生、検知、制御および利用に関する革新的な技術の創出を目指す研究を対象とするものである。

具体的には、情報処理・通信技術や計測技術などの飛躍を目的とした量子ドット、フォトニック結晶、非線形光学の応用などによる新しい光機能素子などの原理や技術、分子・原子や化学反応の制御、生体観察・計測、産業・医療などへの利用を目的とした未開拓の波長域発生などの新しい光源・検出手法の開発・高度化と利用技術、近接場光などを利用した光と物質の局所的相互作用の解明と超微細加工や超大容量メモリなどの利用技術、光による原子の量子的制御技術や光の本質に基づく新たな物質科学などの創出を目指す研究を対象とする。また、以上の研究にブレークスルーをもたらす、新材料に関する研究も対象としている。

3. 研究総括

伊澤 達夫 (東京工業大学 理事・副学長)

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	研究費*
平成 17年度	岸野 克巳	上智大学理工学部 教授	ナノコラム結晶による窒化物半導体レーザの新展開	470
	末宗 幾夫	北海道大学電子科学研究所 教授	超伝導フォトンクス創成とその応用	477
	野田 進	京都大学工学研究科 (兼) 光・電子理工学教育研究センター 教授・副センター長	フォトリソグラフィを用いた究極的な光の発生技術の 開発	529
	堀 裕和	山梨大学大学院医学工学総合研究部 教授	ナノ光電子機能の創生と局所光シミュレーション	398
	山下 幹雄	北海道大学大学院工学研究科 特任教 授 名誉教授	極限光電場波形制御による新光量子技術の創出	458
平成 18年度	兒玉 了祐	大阪大学大学院工学研究科 教授	高エネルギー密度プラズマフォトンクス	355
	五神 真	東京大学大学院工学系研究科 教授	時空間モルフォロジーの制御による能動メゾ光学	330
	馬場 俊彦	横浜国立大学大学院工学研究院 教授	フォトリソグラフィナノ構造アクティブ光機能デバイスと集 積技術	341
	松岡 隆志	東北大学金属材料研究所 教授	温度安定性に優れた光通信用 InN 半導体レーザの研究	399
	宮野健次郎	東京大学先端科学技術研究センター 教 授	電子相関による光と電子の双方向制御の実現	332
	渡部俊太郎	東京大学物性研究所 教授	高強度光電界による電子操作技術の開拓	333

平成 19年度	太田 淳	奈良先端科学技術大学院大学物質創成 科学研究科 教授	バイオメディカルフォトニック LSI の創成	263
	門脇 和男	筑波大学大学院数理物質科学研究科 教授	超伝導による連続 THz 波の発振と応用	279
	橋本 秀樹	大阪市立大学大学院理学研究科 教授	光合成初期反応のナノ空間光機能制御	225
	平山 秀樹	(独)理化学研究所 テラヘルツ量子素子 研究チーム チームリーダー	230-350nm 帯 InAlGa _N 系深紫外高効率発光デバイスの 研究	279
	宮永 憲明	大阪大学レーザーエネルギー学研究 センター 教授	アダプティブパワーフォトリクスの基盤技術	273
			総研究費	5,749

* 研究費：平成21年度上期までの実績額に平成21年度下期以降の計画額を加算した金額

* 重点配分した理由

研究費の配分は申請内容を精査の上決定したが、高額な装置などで研究遂行上大きな効果を発揮すると考えられる申請については特に認めることとした。

野田チームで高精度電子ビーム露光装置が導入できるよう配慮した。これは、100kV以上の高い加速電圧をもち、フィールドの分割数 50 万以上という超高精度の電子ビーム露光装置である。さらに、極めて高いステージ移動精度をも有しており、共振器の任意の位置に、極めて精度良く、かつ安定して量子ナノ構造を配置することが可能であり、高度な発光制御を目指す本プロジェクトには欠くことの出来ない装置と考えられた。中間評価時点でもこの装置の導入によって大きな進展があったと評価している。

この他、末宗チームには MgB₂ 用電子ビーム蒸着装置、超伝導 Qubit 回路と、光子 Qubit 生成ダイオードの双方を冷却する 300mK クライオスタットの導入、岸野チームにはナノコラムレーザ共振器作成に必要な最高性能の誘電体 DBR 膜形成装置などの導入を認めた。

5. 研究総括のねらい

光科学技術は、1960 年にレーザ技術が開発されて以来、光ファイバ通信、光ディスクメモリ、レーザ溶接、LED 照明など広く産業に取り入れられ、各技術分野の機能や効率を抜本的に改善するなど、社会・経済に与えた影響は非常に大きい。産業応用だけでなく、Spring-8、X 線自由電子レーザ、極短パルスレーザなどの光技術は、超電導、強磁性の機構解明、たんぱく質の構造解析、化学反応の超高速動態変化の瞬時計測など物理・化学現象の解明などに広く使われ、学問の進展に大きな貢献を果たしてきた。

20 世紀後半に進められた光科学技術の進展において、日本の科学技術者が果たした役割は大きなものがあつたが、いわゆる IT バブルの崩壊と共に企業の研究開発投資が急減し研究者が他分野に移動するなどにより、日本の研究者の影響力・貢献度は後退気味であつた。

平成 15 年度に文部科学省に光科学技術の推進に関する検討会が設けられ、光科学技術の重要性が再認識され、平成 17 年度より独立行政法人科学技術振興機構において光の究極的および局所的制御とその応用についての研究が進められることとなり、研究領域“新機能創成に向けた光・光量子科学技術”が開始された。

発足時には光科学関係の大型研究プログラムがなかったため、対象とする研究分野は、光科学技術に関連する材料開発、光源などの素子開発、計測技術、物性解明など幅広いものとし、関連する学問分野も物理、化学、バイオ、工学など多岐にわたって独創性に優れ成功の暁にはその研究分野で大きな影響力を残す可能性のある提案を選定した。

この様に幅広い分野を対象とした研究領域は、評価尺度も多様化し十分な成果を上げるためには運用が必ずしも容易でないが、あえて挑戦することとした。このためにアドバイザーには、各分野の光科学で十分な実績をあげた研究者を実験・理論の両面で揃え、研究総括を多面的に補佐していただき本プロジェクトが効果的に進むよう配慮した。

6. 選考について

(1) 研究総括の募集・選考・研究領域運営にあたっての方針

光技術は、通信・情報処理機器をはじめとして民生機器、医療・産業機器、科学分析・計測機器などにも幅広く使われており、その発展によりこれら機器の機能・性能が飛躍的に改善される可能性を持っている。特に、新しい光源、検出器などの開発によって機器の性能改善だけでなく、今まで不可能と思われた新しい応用技術を生み出すことも期待できる。さらに、近接場光やレーザクーリングなど新しい手法を使った物質科学の進展とその応用技術の開拓も期待される。

本研究領域では、このような現状認識に立って光機能素子、測定・加工技術や関連する光科学など幅広い研究分野で世界を牽引していく可能性を秘めた革新的提案を期待し、選考にあたった。また、研究推進に当たっては、研究シナリオ、マイルストーンなどを事前に明示し、研究進捗状況を客観的に評価しながら進めることを求め、選考でも留意した。更に、研究領域の概要に例示した語句にとらわれることなく真に革新的・挑戦的な提案を歓迎する旨明示した。

選考に当たっては、特定の組織に偏ることがないように配慮し、特に小規模研究機関に所属し研究実績のある研究者の優れた提案が漏れることの無いよう慎重な審査を行った。

(2) 選考結果

平成 17 年度は 69 件の応募があり、11 名の領域アドバイザーと共に書類審査を行い、14 件の提案について面接審査を経て、最終的には 5 件の提案を採択した。採択テーマは、フォトリソグラフィ、超伝導・光量子科学、極限光電場波形制御、窒化物半導体レーザ、近接場光について各 1 件である。

平成 18 年度は 37 件の応募があり、12 名の領域アドバイザーと共に書類審査を行い、9 件の提案について面接審査を経て 6 件の提案を採択した。採択テーマは、高強度電界による電子操作、電子相関による光と電子の双方向制御、InN レーザ、時空間モルフォロジ制御による新しい光材料の開拓、高エネルギープラズマを用いた超小型光源の開発、フォトリソグラフィナノ構造デバイスである。

平成 19 年度は 32 件の応募があり、12 名の領域アドバイザーと共に書類審査を行い、11 件の提案について面接審査を経て、最終的には 5 件の提案を採択した。採択テーマは、高温超伝導ジョセフソンジャンクションによる THz 波の発振、光合成初期反応の解明と制御、バイオメディカル用フォトリソグラフィ LSI の開発と応用、パワーレーザの空間・時間特性制御、InAlGaAs 系深紫外高効率発光デバイスの開発である。

各年度の採択テーマはいずれも、十分実績のある研究者からの極めて質の高い提案であり、中間評価時点でも外部から高く評価される研究実績をあげているグループが多い。

7. 領域アドバイザーについて

領域 アドバイザー名	現在の所属	役職	任期
荒井 滋久	東京工業大学	教授	平成 17 年 6 月～平成 19 年 3 月
荒川 泰彦	東京大学	教授	平成 17 年 6 月～平成 25 年 3 月予定
伊藤 弘昌	東北大学	教授	平成 17 年 6 月～平成 25 年 3 月予定
植田 憲一	電気通信大学	教授	平成 17 年 6 月～平成 25 年 3 月予定
大津 元一	東京大学	教授	平成 17 年 6 月～平成 25 年 3 月予定
加藤 義章	光産業創成大学 院大学	学長	平成 17 年 6 月～平成 25 年 3 月予定
菊地 眞	防衛医科大学校	副校長 教授	平成 18 年 5 月～平成 25 年 3 月予定
小柴 正則	北海道大学	教授	平成 17 年 6 月～平成 25 年 3 月予定
小林 哲郎	大阪大学	特 任 教 授・名譽 教授	平成 17 年 6 月～平成 25 年 3 月予定
中沢 正隆	東北大学	教授	平成 17 年 6 月～平成 25 年 3 月予定
花村 榮一	東京大学	名譽 教授	平成 17 年 6 月～平成 25 年 3 月予定
春名 正光	大阪大学	特任 教授	平成 17 年 6 月～平成 25 年 3 月予定

* 人選に当たっての考え方

本領域が扱う研究分野は、光科学の多方面にわたるので半導体光デバイス（荒井、荒川）、近接場光（大津）、大出力レーザ・超短パルスレーザ（加藤、植田）、光ファイバ通信システム（中沢）、バイオ（春名、菊地）、物性理論（花村、小柴）、光材料・素子（荒川、小林）非線形光学（伊藤、花村）、テラヘルツ波（伊藤）など各分野で著名な研究業績をあげている研究者にお願いした。

荒井先生は、自ら本領域に応募したいとの申し出があり、退任された。また、17 年の募集でバイオ関係の応募が多かったため菊地先生に加わっていただいた。

8. 研究領域の運営について

本領域の各テーマは研究代表者の独創性に基づくもので、その運営についても研究代表者の自主性を尊重することを旨としたが、設定目標、マイルストーンからの大きな乖

離、特に進行状況については十分な管理・指導を行った。特に、研究を幅広く展開しすぎて進捗がおもわしくないチーム、研究チーム内の管理で問題が発生した場合などについては必要に応じて議論・指導を行った。また、必要に応じて学会等の会合や電話・メールで十分な連絡が取れるよう配慮した。

研究課題の指導については、研究開始年度に開催したキックオフミーティング、毎年一回開催する研究報告会、研究総括と関連分野の領域アドバイザーが参加するサイトビジットをこれまでに17回実施して、研究状況を把握し、進捗のための助言を行った。

キックオフミーティングは非公開で開催し、研究総括、領域アドバイザー、関係研究チームのメンバーが参加し、当該年度に研究を開始する研究チームの全体計画、当該年度計画、中間時点のマイルストーン、研究終了時の成果のイメージについて説明を求め、研究総括と領域アドバイザーが研究チームに対して、速やかな研究立ち上げのための助言を行った。

毎年開催している研究報告会は、非公開で研究総括、領域アドバイザー、関係研究チームのメンバーが参加して開催し、研究開始後1年を経過した研究チームに対して、研究の経過と成果の報告を求めた。研究総括と領域アドバイザーが研究チームに対して、それ以降の研究推進のための助言を行った。この報告会で明らかになった課題の解決に向けて、別途研究総括が電話、メール等で議論を深め、研究予算の追加等の措置をとった。

研究設備の準備状況や研究の進捗度を確認するためサイトビジットを実施し、研究担当者からの研究発表を求めるとともに研究総括並びに参加領域アドバイザーとの討論を行い、研究チームが効率的に研究を進められるよう配慮した。特に、研究推進上の各種課題について率直な意見の交換を行い、問題の解消に努めた。

採択後3年程度経過した時点でそれまでの研究成果を公開シンポジウムで報告してもらうとともに、研究総括、領域アドバイザー、研究代表者が参加する非公開の中間評価報告会を開催した。ここでは忌憚のない議論が行われ各チームに対し下記のような対応を行った。

①岸野チーム

一体集積化三原色LEDの実現の可能性も高いので、一層の推進を図るため、実験製作のキー治具であるガリウム分子線蒸発源2台の予算追加を行った。

②末宗チーム

最終の目標である「もつれあい光子対生成」に研究を集中し、一層の研究を推進し目標達成を図るべく指導し、1.55ミクロンもつれあい光子対測定用単一光子対検出器及び高速相関測定系に関連する追加予算を行った。

③野田チーム

これまでも高い研究成果をあげているが、より一層の研究の推進をはかるべく、光子寿命測定用高速電子倍增管とフォトニクス結晶作成基板関連の予算追加を行った。

④山下チーム

本研究で開発された広帯域 SLM は、超短パルスの波形制御、超短パルス発生から、繰り返し周波数制御に至るまで、幅広い応用範囲をもつ。その応用の一つとしての遺伝子発現制御の研究を加速するため、高次高周波スペクトル評価装置、試料マクロ循環装置関連の予算を追加した。

⑤堀チーム

研究の構想は優れており、新しい光科学を創出するもので、本領域の目標に合致しているが、実験面での進展が遅れている。後半は特に実験面を加速すると共に、研究代表者が強いリーダーシップを発揮して、全メンバーの研究をまとめていくよう特に指導した。

⑥松岡チーム

チームの構成は、結晶成長デバイス化、光学物性評価、結晶基板、DFB 化の 4 つであり、実用的レーザ完成を目指すにはよい構成である。しかし、結晶成長技術の進展が十分でなく、簡単な構成のレーザを実現する目途も立っていない。DFB レーザの作製のためには、回折格子の作製技術も必要であるが、まず半導体レーザの発振達成に注力し、そのために最良の研究体制に組み直すよう指導した。これに伴い、前年度まで進めてきた回折格子作製技術については、本研究テーマ内での研究を中止した。

9. 研究の経過と所見

(1) 岸野チーム「ナノコラム結晶による窒化物半導体レーザの新展開」

三原色半導体レーザの実現は、フルカラーを利用する産業分野の発展に大きな波及効果をもつが、緑色半導体レーザが未開拓なため、第二高調波発生に頼らざるを得ず、全半導体化の目処は立っていない。緑色半導体レーザの開拓は、既存半導体の材料限界によって阻まれており、新たな材料開拓と結晶制御が必要である。

本研究は、窒化物半導体レーザの波長域拡大を阻むこの壁を、本研究代表者が創成したナノコラムとナノ結晶効果を最大限活用し、緑色 InGa_N 系ナノコラム半導体レーザ実現への道を拓くことを目的としている。特に、①ナノコラム結晶の無転位性を利用しつつ、高い発光特性の理由を探求して、新領域のナノ結晶効果を学術的に明らかにし、ナノコラム結晶を基礎とする新物性現象を探索する。また、②青色域半導体ナノレーザの作製と構造の最適化から研究を進展させ、ナノコラム結晶の均一化、規則配列化技術を確立して、緑色域ナノレーザへ発展させる。更に、③これらの研究の成果として、ナノコラム結晶を基礎とする窒化物半導体レーザの新分野の開拓を行なう。

InGa_N/Ga_N ナノコラムの潜在能力の発現にはナノコラム形状の均一化と位置の精密制御が必須である。これまでに、Ga_N ナノコラム選択成長法を用いて、同一基板上においてナノコラム径と周期を系統的に変化させながら、規則配列 InGa_N MQW ナノコラムを作製し、低密度と高密度の光励起下でその発光特性を調べ、さらにナノ結晶効果による新物性現象の発現を探索した。また規則配列ナノコラム発光デバイスの作製を進めるとともに、新たにナノウォールの検討を開始した。

ここでは InGaN ナノコラムからの発光色がコラム径によって変化することを実験的に見出して、その発光色制御の成長メカニズムを明らかにした。この新しい現象は発光色の異なる LED の同一基板上への集積化への道を拓いている。

また規則配列 LED を作製し、初期的ながら青色域電流注入発光を得た。さらに、ナノコラム周期構造にもとづく分布帰還 (DFB) 機構の発現を確認し、ブラッグ波長における強い光増強効果を観測して、強励起下において最初のコラムレーザ発振を得た。波長は 471nm の青色域であったが、コラムの周期と径を微調すれば緑色域で同じ効果が得られと予測される。

また、微小電極(径 1.2 μ m)自己形成ナノコラム LED では、青緑色域(波長 507nm)での発光スペクトル半値全幅が 13nm と非常に狭く、過去の報告値(~ 33 nm)の半分以下であって、微小領域で色純度の高い均一な発光特性を有するナノコラム集団の存在を示唆する結果を得ている。

これらの進展をもとに窒化物半導体ナノコラム、ナノウォールを用いて、緑色半導体レーザと三原色 LED の基盤技術を確立する見通しを得ている。

(2) 末宗チーム「超伝導フォトニクス創成とその応用」

量子情報処理ネットワークに関する研究が活発に進められているが、量子情報処理を行うために必要な光源の開発が大きな課題の一つである。本研究の究極の目標は、電子クーパ対を半導体量子ドットレーザに結合させ、On demand で単一の量子もつれ合い光子対を発生するレーザ光源の実現することにある。

これまでに得られた主な成果は以下のとおりであり、おおむね順調に進展している。

- 1) Nb 超伝導電極から n 型 InGaAs 系への電子クーパ対注入ならびに p 型 InGaAs 系への正孔クーパ対注入をジョセフソン電流の観測により確認した。
- 2) Nb 超伝導電極と直接コンタクトした InAs 量子ドット PL 発光の超伝導臨界温度以下での増大を観測した。
- 3) InGaAs 系超伝導発光ダイオードからの EL が超伝導臨界温度以下で増大することを観測した。さらに、EL 発光強度と発光寿命の関係を詳細に検討し、発光再結合寿命が短縮（発光再結合レートが増大）していることを確認した。
- 4) より高い温度で超伝導 LED を動作させることを目指して MgB₂ 薄膜の検討を進め、GaAs 基板上で超伝導臨界温度 30 K を持つ MgB₂ 膜の形成に成功した。

(3) 野田チーム「フォトリック結晶を用いた究極的な光の発生技術の開発」

一般に、物質からの発光は、多くの光の状態（モード）をもつ場の中で生じるために、望まない発光現象までもが同時に起こることになり、このことが現在の光デバイス技術におけるボトルネックの 1 つとなっている。例えば、半導体レーザにおいては、レーザモード以外の不要モードに結合する自然放出成分が、閾値の増大や雑音をもたらしている。また発光ダイオードにおいては、デバイス外部への放射モード以外に結合する光が、量子効率の低減をもたらしている。さらに、大面積レーザにおいては、数多くの縦・横モードの

存在が、動作の不安定性をもたらしている。

本研究では、研究代表者等がこれまで培ってきたフォトニック結晶技術を用いて、発光体を取り囲む光子場を様々に制御し、究極的な光の発生技術を開発することを目指すものである。これまでの研究成果を纏めると以下のとおりであるが、その内容は多岐にわたり、それぞれが重要な成果として外部からも高く評価されている。

(A) 2次元フォトニック結晶による究極的な光の発生技術の開発においては、1) 量子ナノ構造の導入によるキャリアの3次元閉じ込め効果により、2次元フォトニックバンドギャップ効果により期待されるキャリア寿命の増大効果を理論値近く(15~17倍程度)まで到達させることができた。また、2) 2次元フォトニック結晶に、光ナノ共振器を導入し、 0.4 W/cm^2 という極微小励起レベルから、ナノ共振器モードに基づく高効率発光現象の観察に成功し、蓄積キャリアの効果的な再配分効果の実証を行った。

(B) 3次元フォトニック結晶による究極的な光の発生技術の開発に関しては、ウエハボンディング法による完全3次元結晶に関し、その積層数を9層から、17層へと増大し、透過率の減衰を-30dBから、-46dBと大幅に増大するとともに、点欠陥モードの Q 値の大幅な増大を実現した。

(C) 大面積コヒーレント動作可能なレーザ技術の開発においては、格子点形状の制御が上下方向への光閉じ込め効果の制御にも有効であり、面発光出力を増大させるために有効であることを見出し、単一縦横モードで動作する面発光レーザとして、世界最大の 60 mW (CW) を達成することに成功した。さらに、格子点形状構造として、新たに直角3角形が有効であることを見出し、室温パルス条件で、 1 W に迫る出力強度を得ることに成功した。また、デバイス内部の光帰還作用を利用するという新たな手法により、 0.85 W/A という極めて高いスロープ効率を実現した。また、デバイス特性の大幅向上(しきい値の低減)を目指した検討の結果、しきい値電流密度を 65 kA/cm^2 から、 5.4 kA/cm^2 へと大幅に低減することに成功した。

(4) 堀チーム「ナノ光電子機能の創成と局所光シミュレーション」

本研究は、信号情報伝達の本質が「電磁氣的励起の輸送とその制御」にあることに注目し、従来の配線型デバイスから脱却し、ナノメートルサイズの半導体量子構造に閉じ込めた励起電子系を近接場光相互作用で結合させることで、ナノスケールで完結した「局所光による励起伝達」を基本とする光電子機能(ナノ光電子機能)を世界に先駆けて創生し、信号処理機能をナノ化する。これと同時に、近接場光相互作用の相互作用距離に依存する階層性を生かし、階層構造型の信号処理系を持つ新概念の光電子機能システムの構築を目指す。

これまでの研究成果を纏めると以下のとおりである。当初研究の進捗がおもわしくなかったが、デバイス作成に成功し一定の進歩があり、今後の更なる進展を期待したい。

スピントラップ制御励起移動デバイス製作では、量子井戸内に局在する励起子とその近傍に

配列させた磁性イオンとの相互作用の外部磁界による変調を基本動作原理とし、分子線エピタキシー法で作製した希薄磁性半導体と非磁性半導体が障壁層を介して結合する二重量子井戸構造において、スピン選択的励起移動の素過程検証を行うとともに、トンネル電子制御による近接場光プローブ顕微分光装置を開発し、STM計測レベルの平坦性を持つ試料における近接場光励起輸送の実証と階層性の実験的評価に成功した。

シミュレーション技術の開発では、近接場光が生み出す機能をシミュレーションするための数値計算法の基礎的研究、特に精度保証法に関する研究を行った。基礎となる Maxwell 方程式にまつわるモデリングおよびその逆問題に関する研究を行った。さらに、この方程式を解く陰的 SimplecticFDTD 法の実装化と従来の FDTD 法との性能比較を行った。又近接場光に現れる現象に関する、これまでにない全く新しい数値モデルの構築を行った。

(5) 山下チーム「極限光電場波形制御による新光量子技術の創出」

このチームは研究テーマ提案時に、近赤外・可視域で世界最短の 2.8 fs・1.5 サイクルのクリーンで単一の理想的なフーリエ変換限界(TL)光パルスの発生と正確な波形計測に成功している。本研究ではこの技術を基に、極限光電場波形制御による新光量子技術の創出をめざし、以下の3つを目的とする。

- 1) 励起用モノサイクル域光の電場波形を任意にフィードバック制御することによって、未踏な 100 アト秒(as)以下のX線域パルスを効率よく発生する技術を開発すること。
- 2) 励起用極短パルス光電場波形を制御することによって、光パルス圧縮に最適な、スペクトル構造・分散の両者に対し複雑さを有しない、近赤外・可視域から紫外域に渡る超広帯域コヒーレント光を独自の手法で発生させること、ならびにフィードバック位相補償により、未開拓な 1000 アト秒域以下のパルス光を発生する技術を開発すること。
- 3) 励起用極短パルス光電場波形の任意制御を基にした超高速量子状態制御法により、DNAハイブリダイゼーションの高効率可逆光スイッチング(遺伝子発現レーザ選択制御)技術を開拓することである。

これまでに、300~1600 nm 透明新液晶の 648ピクセル・空間光振幅変調器(648・UV~NIR・A(ω)・SLM)を試作し、380~420 nm 紫外フェムト秒パルス光と 500~900 nm 可視・近赤外フェムト秒パルス光とに対して周波数シフト・相似スペクトルペア光発生の実験を行い、超広帯光の任意振幅変調が可能であることを確認した。これは、これまでで報告されてきたなかで最も広帯域な光波の振幅変調結果である。また、DNA ハイブリダイゼーションの高効率可逆光スイッチング(遺伝子発現レーザ選択制御)技術についても可逆的な光スイッチングに成功するなど着実な進展がある。

(6) 兒玉チーム「高エネルギー密度プラズマフォトンクス」

レーザで生成できる高エネルギー密度プラズマをコヒーレントに制御したり、規則性を維持した状態の過渡的なプラズマを利用したりすることで、新たな光機能素子としての可能性を探求する。このようなプラズマをコヒーレント高エネルギー密度プラズマとして位置づけ、わが国オリジナルな新概念のプラズマフォトンデバイス開発を行う。これは、通常の光学系、制御デバイスでは直接制御が困難な桁違いに高い強度の電磁波や高出力レ

ーザで励起される高エネルギー密度量子ビームを直接取り扱うことができる高い耐力と機能をもったデバイスである。この様な発想の下に具体的には、相対論電子ビーム制御 X 線発生デバイス、光分散プラズマデバイス、テラヘルツ波増幅プラズマデバイスを開発することを目的としている。

高エネルギー密度電子ビーム制御プラズマ、光制御・光分散プラズマ、電磁波発生プラズマおよびデバイスとしての機能性評価に関して以下の成果を得た。

光制御・光分散プラズマと機能性評価については、新しい集光プラズマミラーによる高強度集光の実証、相対論振動プラズマミラーによる高エネルギー電子生成、高繰り返し対応可能なプラズマフォトリックデバイスを目指したプラズマ生成、固体ープラズマ中間状態層の状態方程式データベース構築とそのモデル化を達成した。

電子ビーム制御プラズマと機能性評価については、超高強度レーザ生成相対論電子ビーム集光プラズマの実証に成功した。また、電磁波発生プラズマと機能性評価については、細線ガイドレーザー誘起 MeV 電子による X 線放射、レーザ誘起 MeV 電子による単色・高指向性 X 線チェレンコフ発生評価、DARC(dc to ac radiation converter)による高輝度テラヘルツ光源開発、2 波長レーザ励起プラズマによる高輝度テラヘルツ波発生に成功するなど多くの成果をあげている。

(7) 五神チーム「時空間モルフォロジーの制御による能動メゾ光学」

本研究では、レーザ光を時間軸と空間軸で同時に高度に制御し、それを用いて、物質相の究極的制御と波長以下の特異構造の動的制御を行い、新しい光機能を引き出す、“能動メゾ光学”を開拓することが目的である。これにより、光と物質の基礎科学を深化させ、新たな光技術の突破口を見いだすことを狙う。

これを実現するために、1) 巨大光応答物質相探索とモルフォロジー制御光機能開拓、2) 時空間光波束操作による 3 次元構造の動的制御、について研究を進める。それにより、物質科学の新たな研究ツールの開拓、それを用いた新たな知見の獲得、光やテラヘルツ領域における新光機能開拓、さらには光計測手法への応用をめざす。本研究は未利用の光学原理の発掘、多体量子系の物理といった基礎科学に主眼をおくものであるが、光源・計測技術開拓も重要な目標である。また、光機能の活用を常に心がけ、応用に繋げるための道筋をつける研究も戦略的に進める。

これまでに、研究代表者が発見した誘電体キラルフォトリック結晶における巨大旋光性について、実験、計算の両方からその発現機構についての解明を進め、誘電体構造における導波路共鳴が、巨大旋光性の発現に関して重要な役割を担っていることを明確にした。

更に、ダイヤモンド中における電子正孔液滴の中赤外領域における誘導吸収スペクトルを観測することに成功し、シリコンやゲルマニウムと比較して桁違いに高密度の液滴形成事実を明らかにするとともに、モルフォロジー制御による非相反光学応答、巨大光応答物質相の制御、光と物質の相互作用を巨大化する物質相の探索など興味深い現象を見出している。

これまでに上記のような多くの成果をあげ、研究は順調に進展していると評価する。

(8) 馬場チーム「フォトリックナノ構造アクティブ光機能デバイスと集積技術」

本プロジェクトでは、フォトリック結晶のパッシブデバイスとしての特性を高めること

に加えてアクティブ的な光学現象を探索し、それを利用した光機能デバイスを開発することが目的である。また細線導波路などの高屈折率差構造を併用し、高度な光信号処理に利用し得る高性能・高機能な光積技術の実現を目指す。

特にフォトニック結晶の研究は、パッシブ機能の完成度をさらに高めるとともに、アクティブ機能について現象解明、応用開発、高効率光取り出し、チューニング、などに取り組むとともにアクティブ・パッシブ融合についても研究を広げることを目指す。

これまでに、フォトニック結晶導波路スローライトデバイスにおいて熱光学効果を用いて可変遅延時間を330ピコ秒と大幅に増大させることに成功した。また、キャリア効果を付加することにより応答時間8ピコ秒という高速可変遅延を実証し、伝搬を完全に停止させる動的制御ストップライトの可能性も検討した。

フォトニック結晶共振器型デバイスでは、作製や集積化に適した構造の改良や新規構造の探索・実証を進めると共に、デバイスを電氣的に高速制御するための PIN 接合をフォトニック結晶面内に形成する技術を立ち上げ、光変調器などの基本動作を確認した。さらに微小共振器における強力な光局在を用いたオプトメカニカル効果をこれまで理論的に議論してきたが、それを実証すべく二層構造のフォトニック結晶を試作、初期的な効果を確認した。

(9) 松岡チーム「温度安定性に優れた光通信用 InN 半導体レーザの研究」

光ファイバ通信用光源として、低密度波長分割多重通信方式 (CWDM) の低価格化のためにペルチェ素子による冷却を必要としない uncooled laser と、高密度波長分割多重通信方式(DWDM)の高密度化のために波長間隔の狭小化を可能にする波長に関して温度安定性に優れたレーザとを、実現することは重要な課題の一つである。

本プロジェクトは、研究代表者が初めて見出した InN の温度特性を利用すれば、発振波長の温度依存性を $0.01\text{nm}/^\circ\text{C}$ 程度に抑えることができるとの予測から、 $1.55\mu\text{m}$ で発振する DFB レーザを開発しようとする挑戦的な試みである。

これまでに以下に掲げる成果をあげているが、最終目標に到達するまでには多くの課題が残されている。InN 薄膜結晶成長に関しては独自の横型反応炉を開発し、X 線回折線幅が一桁低減し、結晶性を改善することができた。また、成長速度も 20～30 倍向上させることに成功し大きな前進があった。結晶性をさらに向上するために格子整合性の良い $\beta\text{-FeSi}_2$ 、 LaBGeO_5 単結晶育成に成功し、InN 用基板としての有用性を精査した。

(10) 宮野チーム「電子相関による光と電子の双方向制御の実現」

本研究の目標は、光と電子系の相互作用を最適・最大化し、光が電子系全体の秩序を遷移させる、あるいは電子系が光の状態を変化させる、という双方向の制御関係が単一の界面や結晶格子一層によっても実現できることを実証することにある。

遷移金属酸化物や有機半導体においては、電子が局在と非局在の境界にありながら様々な相互作用によって、全体として相関を持って運動する、いわゆる強相関 (電子)

系と呼ばれる物質群が存在する。強相関係では電子の電荷、スピン、波動関数といった属性が持つそれぞれの秩序の組み合わせによって、非常に多数の安定・準安定電子秩序状態が存在し、それらは巨視的にも著しく異なった物性を示す。これらの状態間の遷移の対称性、エネルギー、時間発展などは、光のパルスが持つ対称性、エネルギー、時間発展とよく対応する。従って、両者が合致した場合に非常に大きな電子・光子相互作用が生じる。本研究では、目標を達成するために、1) 光と強相関係の相互作用のダイナミクスを明らかにして、光と物質の関わり合いがどのように進行するのかという知見を得ること、2) 物質系を原子スケールで構造化することによって制御された局在状態を作り出すこと、を通じてこの相互作用を最適化、最大化することを目指す。

これまでに、光励起によって強相関係に生じる金属・絶縁体転移、電荷密度波・モット絶縁体・金属三相間転移など様々な相転移現象を見出してきた。また、絶縁体の接合面に生じる金属相、反強磁性体の接合面に生じる強磁性相など電子相間の不連続性やフラストレーションがもたらす局在相、光キャリアドープによる高度に制御された2次元電子ガスなど、新規な物質相を開拓してきた。このように、これまでは新しい現象を見つけることに重点を置いて研究を行ってきた。

酸化物ヘテロ構造における光励起/電荷注入相制御技術の開発では、ペロブスカイト型遷移金属酸化物ヘテロ接合界面でのキャリア移動に注目して、キャリア生成層と強相関酸化物層からなるヘテロ構造を用いた光励起/電荷注入相制御技術の開発を進めてきた。さらに、磁性制御のプロトタイプとして、マンガン酸化物と SrTiO_3 (STO) からなる二種類のヘテロ接合 $\text{Nd}_{0.52}\text{Sr}_{0.48}\text{MnO}_3/\text{STO}$ および $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{MnO}_3/\text{STO}$ を作製し、時間分解光磁気 Kerr 効果と過渡反射分光の同時測定による光キャリア注入磁性制御の可能性を検討した。いずれの場合も STO からマンガン酸化物への正孔注入がやはり時間分解能(200フェムト秒)以内の高速で生じるが、 $\text{Nd}_{0.52}\text{Sr}_{0.48}\text{MnO}_3/\text{STO}$ では、正孔の増加によって電荷秩序相への不安定性が増加することにより100ピコ秒の時間スケールで磁化の減少が生じるのに対し、 $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{MnO}_3/\text{STO}$ では、正孔注入後ただちに磁化の増加が生じることがわかった。その他、界面ハーフメタリシティの検証、伝導性 $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ 界面のキャリア密度変調効果、伝導性 $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ 界面の分極カタストロフィー効果検出など興味深い物性を明らかにした。

(1 1) 渡部チーム「高強度光電界による電子操作技術の開拓」

XUV・軟X線の高強度パルスと電界波形のコントロールされた高強度光発生技術を研究開発し、電子の光電界による直接的操作の技術を開拓して、物質科学や計測における新しい展開の基盤技術を提供することを目的とする。

この目的に必要な光源を開発し、これを用いて、固体内殻励起にともなうオージェ過程の電子・電子相関を明らかにする等を通じて、物質中の電子をアト秒領域で操作する技術を開拓するとともに、アト秒オシロスコープなどの新機能の実証を目指す。これまでの研究

成果は以下に示すとおりであるが、順調に研究が進展している。

キャリア・エンベロップ位相(CEP)を制御した TW 級 OPCPA(光パラメトリックチャープパルス増幅)システム(5.5 fs、2.7 W、1 kHz)の出力光を、パルスガスジェット中に集光することにより、著しいブルーシフトを観測し、更に短いサブ 4 fs のパルスを得ることに成功した。この光源を用いて水の窓領域での高調波発生実験ならびに世界最短波長での高調波の CEP 依存性の観測を行った。各種薄膜フィルターを用いることにより水の窓領域である $\sim 300\text{eV}$ の高調波を確認した。また現在 CEP 依存性が確認されている 13 nm よりはるかに短波長の軟 X 線領域(7 nm、180 eV近傍)で CEP 依存性を観測した。これと改良した 4fs レーザを用いて 180eV 近傍で高調波を発生することにより、孤立サブ 100 アト秒パルスが可能となる見通しを得た。

更に、アト秒オシロスコープを実現するために、多波長位相同期パルスのフーリエ合成による電界波形の完全に制御された高強度任意波形レーザの開発に取り組んでいる。前年度までに、パラメトリック増幅の励起光源として、Yb ファイバレーザ増幅器を用いて、パルスエネルギー $5\mu\text{J}$ の基本波と $1\mu\text{J}$ の第二高調波パルス光源が得られていた。今年度は、チャープパルス増幅のストレッチ幅の増大と大口径ファイバを用いたパワー増幅器の追加により、10 倍のパルスエネルギー $50\mu\text{J}$ への高出力化に成功した。また、ファイバレーザの第二高調波を励起光源としたパラメトリック増幅による任意波形の高強度化に着手した。任意波形光源の一分成分であるチタンサファイアレーザに対して、100 倍程度の増幅を確認することができた。今後はさらに、任意波形光源をマイクロジュールレベルまで増幅し、高強度電界波形の合成技術の確立と電界波形に依存した現象の観測による波形の直接測定をめざす。

(12) 太田チーム「バイオメディカルフォトリック LSI の創成」

フォトリック技術と Si-LSI (大規模集積回路) 技術を融合することで、バイオ技術、医療技術への適用を可能とする新しいバイオメディカルフォトリックデバイスの創成を目的とするものである。

具体的には、① Si-LSI 技術をベースとした高機能 CMOS イメージセンサ(ビジョンチップ)技術を用いた超小型(mm 角程度)マルチモーダルセンシングチップ“バイオメディカルフォトリック LSI”を開発し、これを複数個分散的に生体脳内に埋植し、自律的・能動的にセンシング・細胞刺激を行うシステムを確立し、②このシステムを用いて 従来では困難であった実験動物を生きのまま完全に非拘束状態で生体脳内深部でのリアルタイム($\sim 10\text{ msec}$)・高分解能($10\text{-}100\mu\text{m}$)分子イメージング実現を目指す。更に③ 本デバイスをパーキンソン病等の治療を目的とした脳深部刺激治療への適用検討を行い、医療応用までを視野にいたした全く新しいバイオ・医療応用フォトリックデバイス創出に向けた取り組みを行う。

バイオメディカルフォトリック LSI (bmp-LSI) の高分解能化を目指して、これまでに開発したライトガイドアレイ技術を埋植可能なデバイスとして実現できる実装技術との結合

を完了した。自由行動マウスへの埋植では、チップ設計を見直し入出力ポート数を 12 個から 4 個に減らすことで、安定して計測が可能な方式を開発した。これにより自由行動状態で蛍光検出が可能となり連続記録を行えるようになった。高機能化では、より安定して脳機能計測が可能なシャンク形状 bmp-LSI の開発を行った。さらに bmp-LSI の広範な応用を目指して小動物脳スライスやヒト脳スライスへの適用、またカルシウムイメージングへの適用を行った。さらにヒト脳スライス標本において、点電極システムを用い、脳内のネットワークを構成する細胞をリアルタイムで観察しながら細胞を電気刺激し電気活動を測定する技術を開発するなど順調な研究進展があった。

(13) 門脇チーム「超伝導による連続 THz 波の発振と応用」

研空代表者は、良質な高温超伝導体単結晶を用いて、適当なサイズの固有ジョセフソン接合を作成すれば、強力な THz 帯の電磁波を連続発振させることが可能であることを理論および予備的な実験により明らかにしている。本研究は、高温超伝導体の良質な単結晶を微細加工することによって、発振源となる固有ジョセフソン接合素子を作成し、THz 波を発生させ、その物理特性を調べとともに、応用の基礎を確立することにある。

これまでに、矩形メサ、円盤状メサや正方形メサなど、様々な形状とサイズのメサを作成し、その放射強度角度依存性や放射スペクトルの測定を行った。その結果から、メサ内部に発現する電磁波モードの特定を行い、形状と発振周波数やモードがどのような関係にあるのかなどを明らかにした。また、高温超伝導体の固有ジョセフソン接合系から発振される THz 波の理論研究も大きく進み、放射角度依存性などをシュミレーションできるまでになっている。しかしながら、当初の目標に至るまでには多くの課題を抱えている。

(14) 橋本チーム「光合成初期反応のナノ空間光機能制御」

光合成細菌の光合成系は、自然が創造した超高速 (100 フェムト秒以下) かつ高効率 (〜100%) な光エネルギー変換機構を解明するための本質的なバイオナノデバイスであるばかりでなく、太陽光エネルギーの有効利用と言う観点から眺めた場合、人類の存亡に関わる根源的な問題解決に向けての急務な研究対象である。光合成初期過程の機能発現には、LH2、LH1 と呼ばれる 2 種類のアンテナ色素蛋白複合体と光反応中心複合体 (RC) の合計 3 種類の色素蛋白複合体が関係している。AFM を用いた光合成膜のその場観察により、これら 3 つの色素蛋白複合体が自己組織化により集積した超分子配列が、機能発現に密接に関係している様相が明らかにされつつある。

本研究は、天然由来の色素蛋白複合体及び精密有機合成と分子生物学の技術を駆使して色素および蛋白構造を改変した人工の色素蛋白複合体を脂質二重層膜に任意の比率で配列させた人工光合成膜を創成する。TEM 及び AFM により膜内での色素蛋白複合体の超分子配列の確認を行いながら、極限の時間分解能と安定性を有するコヒーレント分光計測と時間分解顕微分光計測を適用することにより、光合成初期過程の真の実時間計測を達成し、世界にさきがけて、個々の色素蛋白複合体間の位相緩和情報も含めたエネルギー伝達のメカニズムの本質的な理解を達成することにある。

構造を改変した光合成色素蛋白超分子複合体を、ナノ空間において自在に配列させた、

人工光合成膜試料を作成し、超高速時間分解コヒーレント分光および時間分解顕微分光を用いた励起エネルギー移動の実時間計測と広い周波数領域でのフォノン物性の測定を行い、統括的な励起エネルギー移動メカニズムの解明及びデバイスとしての利用指針を確定することで、21世紀をリードするバイオナノテクノロジーの基盤技術形成を促進することを目的として研究を推進した。これまでに、高分解能原子間力顕微鏡装置（AFM）の性能最適化を実施するとともに最適なカンチレバーの網羅的探索を行い、現状での最適性能を追求した。その結果、マイカ基板上に固定した一枚の人工光合成膜の高分解能 AFM 画像の取得に成功した。

超高速コヒーレント分光計測に関しては、LH2 アンテナ色素蛋白複合体に結合したカロテノイド色素の縮退4光波混合信号の測定と実験結果を解釈するための数値シミュレーションを行った。これにより、LH2 複合体に結合したカロテノイドがバクテリオクロロフィルへ高効率エネルギー移動を達成している様相が、分子振動をも時間分解できる程度の超高速な時間スケールで解釈できるようになるなど研究は順調に進展している。

（15）平山チーム「230-350nm 帯 InAlGa N系深紫外高効率発光デバイスの研究」

波長 230nm-350nm 帯の紫外高効率発光ダイオード（LED）、半導体レーザ（LD）は、殺菌・浄水、各種医療分野、高密度光記録、高演色 LED 照明、紫外硬化樹脂等の化学工業、ダイオキシシンや PCB、NO_x ガスなど公害物質の高速分解処理、バイオ工学、各種情報センシング等、幅広い分野での応用が期待されている。これまで深紫外光源としては、エキシマレーザや各種 SHG レーザ等のガス・固体紫外レーザやガスランプしか存在しなかった。これらは、大型で効率が低く、寿命も短く、また高価であるため一般への応用が難しかった。それに対し、もし深紫外高輝度 LED・深紫外 LD が実現すれば、コンパクトで安価・高効率・長寿命紫外光源となり、上記の応用分野が飛躍的に広がると考えられる。

本研究では、波長 200-360nm 帯の発光波長域を持ち深紫外発光素子を実現する上で最も有力な材料である AlGa_xN 系半導体を用い、波長 230nm-350nm 帯の深紫外高効率発光ダイオード（LED）、深紫外半導体レーザ（LD）を実現することを目標とする。これまで、AlGa_xN 系材料は結晶成長や各種材料物性に起因する問題から、十分な性能を有するバッファ層、発光層、ドーピング層の実現が難しかった。そのため深紫外発光素子の高効率動作はいまだ実現されていない。

本研究では、ナノ構造結晶制御高品質 AlN バッファ層、In 組成変調高効率発光層、自己組織量子ドット発光層、原子層制御高ホール濃度 P 型層等を用いることにより、深紫外発光素子の発光効率を飛躍的に向上させる計画である。これらの手法を用いて、いまだ実現されていない、波長 300-340nm 帯紫外半導体レーザ、波長 280-350nm 帯紫外 LED の数百 mW出力動作、波長 230-280nm 帯紫外 LED の数十 mW出力動作を実現することを目標とする。

これまでに、深紫外高効率 LED、紫外 LD 実現を目指し、「紫外 LD 用低貫通転位 AlN

結晶のための基礎技術の開拓」、「AlGaIn および InAlGaIn 系 220-350nm 帯 LED の高効率化の実現」、「AlGaIn 系深紫外 LD の検討」について研究を進めた。「紫外 LD 用低貫通転位 AlN 結晶のための基礎技術の開拓」では、ELO ストライプ周期拡大による AlN 結晶の低貫通転位化を行い、世界に先駆け $7 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ の貫通転位密度を（昨年に比べ 1/4）を実現した。また、ELO-AlN バッファ層上に紫外 LED を作製し、ミリワット出力連続動作を実現した。

「AlGaIn および InAlGaIn 系 220-350nm 帯 LED の高効率化の実現」では、①核形成制御による AlN 貫通転位低減、②4 インチ対応大面積均一 AlN 高品質テンプレート実現と紫外 LED の高出力化、③多重量子障壁の導入による 250-260nm 帯紫外 LED の飛躍的高効率化、④220nm 帯短波長 LED の垂直放射特性の確認、⑤In ドープによる短波長 AlGaIn 量子井戸 LED 高効率化などについて検討を行い、これらの成果により、昨年度までの紫外 LED 効率・出力の世界記録を更新した。特に、多重量子障壁の導入による電子ブロック効果の増強では、外部量子効率の世界最高値を約 3 倍更新した。また、これまで実現が大変難しかった短波長領域での高出力化に成功し、波長 240nmLED で 1.2mW、波長 262nmLED において 10.4mW の連続動作出力を実現するなど優れた成果をあげている。

（16）宮永チーム「アダプティブパワーフォトリクスの基盤技術」

本研究は、レーザと物質との相互作用の多様で高度な制御に資するために、超短パルス高出力レーザとアダプティブ光学の融合を図り、アダプティブパワーフォトリクスの基盤技術を確立することを目指している。具体的には、従来のアダプティブ光学の概念にとどまらず、光波制御における次のような技術を開発する。

- 1) 光波のスペクトル位相の制御：フェムト秒領域でのパルス波形制御、時間的位相変調の制御により分子等の材料における超高速励起・緩和過程の制御のみならず、強い非線形過程を伴うレーザ・プラズマ相互作用時のダイナミクスを超高速で制御可能となる。
- 2) 光波の空間的位相分布の制御：レーザ光の空間的位相分布を制御することによって、レーザと物質の相互作用を空間的に制御可能となる。
- 3) 光波の空間的偏光分布の制御：レーザと物質の相互作用は電界を通じて行われるため、空間的に偏光制御されたベクトルビームは新しい相互作用を誘起できる可能性がある。

これまでに、基幹装置の主要部分がほぼ設置完了し、現在調整中であるが、数サイクルの分野では世界最高出力の光パラメトリック（OPA）励起用レーザを完成した。そのフロントエンドとして高出力ファイバ増幅技術を完成し、加工等の他分野へも技術移転中である。6fs CEP 安定化パルスの発生を確認するとともに、新方式の OPA によって 500nm（1.7 サイクル）の増幅帯域幅を実証するなど着実な進展がある。

10. 総合所見

16 件採択した研究テーマは、いずれも挑戦的であり独創性に優れたものである。挑戦的であるがゆえに一部のチームでは必ずしも十分な進展を見せていないものもあ

るが、多くは順調に進んでいる。その中で、特筆すべき成果としては以下のものがある。

野田グループで進めているフォトリック結晶関連の研究で、ナノ共振器の Q 値で 360 万という大きなものを作ること成功するとともに量子ドット・ナノ共振器系の発光現象を解明するなどフォトリック結晶に関する理解を深めた。さらに、フォトリック結晶レーザのさらなる高出力化にも取り組み、室温パルス条件において、35 W という極めて高い出力動作を実現することに世界で初めて成功した。

このような研究実績は、フォトリック結晶技術が単なる科学的興味だけでなく、産業応用上も重要なものを示しており今後の更なる進展が期待される。これらの成果は、英科学誌 *Nature* および *Nature Materials* などの極めてインパクトファクターの高い雑誌に複数掲載されるとともに、各種の国内外のメディアに数多く取り上げられた。また、MRS Fall Meeting、IEEE Nano 2009、CLEO、UK Semiconductor 2009 を始めとする多くの国際会議で、基調講演や招待講演を行った。さらに、IEEE Nanotechnology Pioneering Awards、文部科学大臣賞、江崎玲於奈賞などの多くの賞も受賞するなど外部からも高く評価されている。

岸野チームでは、400~600 nm の波長領域で発光する LED の開発に成功しており、光励起ではあるが 471 nm でのレーザ発信にも成功している。また、平山チームでは、240~260 nm での LED 開発に成功しており、結晶品質の向上を進め 320~340 nm でのレーザ発振を目指している。これらの技術は産業的に利用される可能性も大きく今後の進展が期待される。

児玉チームで開発したプラズマミラーによる高強度レーザの集光技術は、従来技術に比べ 10 倍以上の集光強度を実現することができ、フランスの研究機関でも利用されるなど海外でも高く評価されている。また、山下チーム、渡部チームで進められている光計測技術は物性解明に大きく貢献する可能性がある。

研究領域のマネジメントについては開始当初から十分配慮してきたつもりであり、また、領域アドバイザーの協力も得て進めてきたが、途中で領域総括が大学の副学長に就任したこともあり、十分な時間が取れず研究代表者に迷惑をかけたことも多い。幸い、メール、電話等で連絡を取り合い最低限のことはやって来たつもりであるが、更に時間を割くよう努力したい。

研究成果については、当初予想した以上に多くの成果をあげており、特にフォトリック結晶、紫外発光素子、緑色発光素子などのように産業応用の可能性を短期間で高めたものもある。また、プラズマミラー、超高速光計測技術などは、今後の基礎科学技術の発展に貢献する成果として高く評価できる。

本領域の設定により、光科学の広い分野で活躍する研究者を支援し優れた成果を上げつつあるが、このような活動を通して日本のこの分野における国際貢献がますます大きくなると確信している。前述したように、いくつかのチームでは、すでに国内外で高く評価され

ており今後産業応用についても期待できる。幸い、平成 20 年度から“先端光源を駆使した光科学光技術の融合展開”の領域も発足し、光関係の研究支援が拡大したことは、この分野の研究者を勇気づけるものとなっている。