

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名 「フォトニック結晶による究極の光制御と新機能デバイス」

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

研究代表者

野田 進 (京都大学大学院工学研究科 教授)

主たる共同研究者:

浅野 卓 (京都大学大学院工学研究科 講師)

今田 昌宏 (京都大学大学院工学研究科 助手)

馬場 俊彦 (横浜国立大学工学部電子情報工学科 教授)

山本 宗継 (産業技術総合研究所光技術研究部門 研究員)

大西 大 (ローム(株) 研究員)

横山 光 (コニカミノルタ(株) 研究員)

赤羽 良啓 (住友電気(株) 研究員)

初田 蘭子 (TDK(株) 研究員)

高野 仁路 (松下電気(株) 研究員)

北川 均 (アルプス電気(株) 研究員)

3. 研究内容及び成果

本プロジェクトにおいては、次の2点を目標に設定し研究を進めた。(i)研究代表者が世界に先駆けて実現に成功した完全3次元フォトニック結晶に様々な発光体や人為欠陥を導入し、フォトニック結晶による究極の光制御の可能性を実証すること、(ii)3次元結晶に比べ、より簡便に作製でき、早い時期に世に出すことが期待できる2次元フォトニック結晶による光制御の可能性を検討すること。上記のうち、(ii)に関しては、具体的には、研究代表者自身の提案になる (a)2次元フォトニック結晶レーザおよび (b)2次元フォトニック結晶欠陥活用デバイスに焦点をあて、これらのデバイス物理を明らかにするとともに、研究開始時点で初期段階にあったデバイス性能を飛躍的に向上させることを目指した。研究は、京都大学を中心に、横浜国大、産総研、さらには、ローム、ミノルタ、住友、TDK、松下電気、アルプス等の各企業から研究員を受け入れて連携し、延べ62名の体制で研究を進められた。主な成果は以下のとおりである。

(1)3次元フォトニック結晶と光制御

本サブテーマの研究目的は、本研究開始直前に開発に成功した完全ギャップ結晶に様々な欠陥・発光体を導入し、自然放出の完全制御という極めて物理的に興味深い現象の解明とともに、極微デバイス・回路の実現のための基盤技術開発を行うことであった。本目的達成のために、大規模計算による構造設計、3次元結晶への発光体・点欠陥の導入、線欠陥の導入、またこれらの基

礎となるプロセス条件の詳細な検討を行い、様々な重要な結果を得た。中でも、特筆すべき成果は、自然放出の完全制御を世界で初めて示すことに成功したことである。フォトニック結晶の概念が初めて登場した際に、最も注目を集めた概念は、「発光可能な物質であっても、その物質が3次元フォトニック結晶へ導入されると、完全フォトニックバンドギャップ効果により、その発光は根本から抑えられる。逆に、人為的に結晶の周期性を乱すと、その乱れ、すなわち欠陥部分において、物質からの強い発光が可能となる」という発光現象の根本制御の可能性の示唆であった。本研究を通じて、初めてその実証に成功することが出来たと言える。この自然放出制御の研究は、当初予定していなかった2次元結晶による非常に興味深い発光制御の発見にもつながった。さらに、本研究により、完全3次元結晶への線欠陥導波路の形成にも成功し、初めて光導波現象の観察に成功するなど、当初の計画を超える成果を挙げることが出来た。

#### (2) 2次元フォトニック結晶と機能デバイス(I) – フォトニック結晶レーザー

本サブテーマは、フォトニックバンド構造のバンド端における定在波状態を半導体レーザーの共振器として用いるという研究代表者の独自のアイデアに基づくもので、どのような大面積であっても、常に単一の縦横モードで発振可能という従来の概念を越えた新しい半導体レーザーの実現に資するものと期待される。本研究では、フォトニック結晶(2次元結晶)のバンド端のレーザー作用を詳細に検討し、原理の実証、性能の飛躍的な向上を目的として研究を推進した。その結果、本レーザーが確かにフォトニック結晶のバンド端における定在波状態に基づいて動作し得るということを実証することに成功するとともに、どのバンド端において発振可能かなどの深い知見を得ることが出来た。また、当初、2~3アンペアと極めて高かった動作閾値を、50ミリアンペア以下と、1/40以下にまで低減し、室温連続発振に世界で初めて成功した。さらに、格子点制御という新たな概念を提案し、偏光を始めとする発振モード制御の可能性を実証することに成功した。特に、本研究を通じて、日本発の新型レーザーが実現出来たことは注目に値する。

#### (3) 2次元フォトニック結晶と機能デバイス(II) – 欠陥活用光機能デバイス

2次元フォトニック結晶においては、周期構造をもたない上下方向の光閉じ込めをどのように行うかがポイントとなる。研究代表者は、本研究開始前に、結晶の厚さを光波長程度としたスラブ構造を用い、そのスラブ厚さ、上下方向の屈折率差、格子点の大きさの適切な設計により、2次元結晶であっても、擬3次元的な光閉じ込めが可能であり、線欠陥導波路においては無損失伝搬が可能なことを世界に先駆けて提唱した。本サブテーマにおいては、上記の知見をもとに、2次元結晶スラブに線・点欠陥を導入し様々な光制御を行うとともに、その機能デバイスへの展開を目的として研究を進めた。まず、2次元フォトニック結晶スラブにおける線欠陥導波路の近傍に、点欠陥を導入すると、線欠陥導波路を伝播する光のうち、点欠陥共振器に共鳴する光が捕獲され上下方向に放出されることを世界で初めて見出した。この発見は、例えば、光通信で重要な光合分波デバイスの超小型化等につながると期待され、実際、この成果の発表後、“Defects Boost Optical Communication” (Physics Web)と大きな注目を集めることとなった。本研究では、さらに、この点欠

陥による光子の捕獲と放出現象の詳細な理論・実験的検討を行い、その体系化を図った。さらに、「面内ヘテロ構造」という新たな概念を導入し、1.25nmという極めて小さな格子定数差をもつヘテロ・フォトニック結晶を実現し、複数波の光合分波デバイス機能の実証にも成功した。この成果により、フォトニック結晶を用いた初めての光ナノデバイスが実現されたと世界的に認識された。さらに、本研究は、点欠陥共振器のQ値が劇的な増大という、当初全く予想していなかった展開にもつながり、様々な分野への波及効果をもたらした。

#### (4) 2次元フォトニック結晶と機能デバイス(III) – 光伝搬制御 –

本サブテーマでは、上記(3)の基礎となる、2次元フォトニック結晶における光伝搬現象を明らかにすることを目的として研究を進め、2次元フォトニック結晶スラブにおける線欠陥導波路とバルクそのものにおける光伝搬現象の深い検討を行った。まずフォトニック結晶導波路の伝搬現象を実験面から探求し、研究代表者が提唱していた理論上無損失な伝搬が可能であることを指示する非常に明快な実験結果を得ることに初めて成功した。また、代表者のヘテロ構造のアイデアをモディファイしたチャープ構造を提案し、広帯域での群速度制御の1つの指針を示した。さらに、バルクフォトニック結晶では、透過バンドの特異な光伝搬を利用したスーパープリズム効果の理論特性を明らかにし、構造の最適化と動作実証に成功し、世界の研究者に対し、有用な指針を与えることが出来たと考えている。

### 4. 事後評価結果

#### 4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

本チームに内在していた研究能力がCRESTの支援により大きく発展した観がある。特に困難と思われた3次元フォトニック結晶内への発光源の導入に成功した点、3次元フォトニック結晶内に導入される欠陥の性質の解析とその実験的検証を行ったこと、さらに2次元フォトニック結晶においても自然放光の制御が自在にできることを立証した点など、応用上も学問的にも重要な成果を得ている。また、2次元フォトニック結晶を利用したレーザに関しては、室温において連続発振するレーザを実現し、発振特性が2次元フォトニック結晶の構造によって完全に決定されることを証明し、これをもとにレーザのモード制御の指導原理を明らかにした点、2次元フォトニック結晶の欠陥特性に関して、面内ヘテロ接合という新原理を着想し、分・合波器としての機能を実証した点は高く評価される。論文発表は英文115件、和文1件、口頭発表(ポスター発表含む)は国際会議224件、国内会議479件、そのうち招待されたものが夫々115件、138件、特許出願は国内46件(バイドール条項適用の機関からの出願28件を含む)、海外24件(バイドール国内出願の海外出願15件を含む)など国際的評価の高い学会誌や国際会議に多くの優れた研究成果が発表されており、下記は其中でも特筆すべきもので、いずれも世界で初めて報告され、且つ一流の世界の学会をリードする独創的な成果である。

- (a) 3次元フォトニック結晶の作製技術においてキーとなる基板融着条件を理論的にも検討し、熱膨張係数の差に基づく歪みが融着可能面積を決めていることを明らかにし、低温長時間

加熱と基板薄膜化プロセスが重要であることを明らかにした。

- (b) 完全3次元結晶に発光体と欠陥を導入し、完全結晶部においては自然光放出が抑制され、欠陥部では逆に発光現象が起こることを世界に先駆けて実証。
- (c) 3次元結晶に線欠陥導波路を導入し光の伝播現象を世界最初に実現。
- (d) 2次元フォトニック結晶を用いたレーザの室温発振の成功。
- (e) 欠陥による光操作機能を明らかにし、ナノデバイス実現に成功。特に明確な ADD/DROP 動作の実証に成功。
- (f) 新概念「面内ヘテロ構造」を提唱し、更にナノ共振器Q値増大の指針を示すと共に世界最大の光閉じ込め効果の実証に成功。
- (g) slow light & dispersion management を応用。
- (h) 当初予期していなかった新展開の中、特に価値ある成果は下記の如きものである
  - ① 2次元フォトニック結晶による自然放出光の抑制と再配分効果の発見
  - ② 面内ヘテロ構造と光制御。光子の操作効率を飛躍的に増大できることを実証
  - ③ 高Q値ナノ共振器の実現: ガウス型光閉じ込めによりQ値が増大できることを理論的に予測し、さらに共振器端部の空気孔のチューニング、ダブルヘテロ構造、更にはマルチ・ステップ構造により 100 万に近いQ値の実現に成功

#### 4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

この分野における全世界の研究をリードしている第一級の研究成果を挙げているが、中でも特筆すべき研究成果の戦略目標・科学技術への貢献は下記の如くである。

- (1) フォトニック結晶で実現の可能性が期待されていた発光現象の制御を3次元、2次元フォトニック結晶を用いて世界で初めて実証した科学的貢献は大きい
- (2) 格子点制御によりレーザの発振モードを制御しようとする概念は科学的に重要であり、これによりレーザのモード制御の指導原理を明らかにし、大面積で室温発振する2次元フォトニック結晶レーザを実現した技術的貢献は大である。
- (3) フォトニック結晶に点欠陥、線欠陥を導入することによるフォトン機能制御の物理を解明した科学的貢献は大きく、これを用いて光導波路とそれによる slow light の実現、高性能スーパープリズムの問題点とその解決方法を示したこと、高Q光共振器を実現した技術的貢献も大きい。
- (4) 面内ヘテロ構造という概念をフォトニック結晶に導入したことはフォトニック結晶内のフォトン制御について新しい手法を見出したもので科学的にも重要であり分・合波器としての機能を実証したことは技術的にも大きな価値を有する貢献である。
- (5) ガウス型光閉じ込めの概念を提唱し、100 万に近いQ値を有する光ナノ共振器を実証したことは今後の光量子コンピュータへの応用も考えられ技術的貢献は極めて大きい。

#### 4-3. その他の特記事項

3次元フォトニック結晶、2次元フォトニック結晶に関する総ての面で本研究チームが世界最高水準の研究成果を挙げたことは Nature3 件や Science4 件に上る論文収録、116 編の論文発表、224 件の国際会議での口頭発表の内 115 件は招待講演であること、479 件の国内会議での口頭発表の内 138 件は招待講演であること、55 件にも上る解説記事を依頼されていること、国内外の新聞・雑誌等でも 124 件以上に亘り取り上げられていることをみても明らかである。

3次元フォトニック結晶の作製で、理論的に予測されていた特性を実証して国内外の研究の流れを創り出し、将に科学、技術の面で新分野を確立したことは科学的に高く評価される。

今後発展が期待される光技術の分野においてフォトニック結晶を用いた先端光素子は我国の産業技術戦略上重要な位置づけであり、先行して研究開発したことは極めて意義が大きい。また、多くの企業と共同研究を行っており、産業化が期待される。3次元フォトニック結晶製作では極めて洗練された技術の研究、開発に成功しており他の追随を許していない。今後もその優位な状況をキープして欲しい。

本研究はCRESTプロジェクトが極めて有効に活用された例であり、このような基礎研究を支援する制度の重要性を具体的に実証したといえる。

受賞に関しては以下の通りである。

①野田進，光協会櫻井健二郎氏記念賞(2002.12.5)，「完全3次元フォトニック結晶および2次元フォトニック結晶レーザの実現」、②宋奉植，応用物理学会講演奨励賞受賞(2003.8.30)，「面内ヘテロ構造の境界面を用いた波長分合波効率の向上」、③横山光、野田進，日本光学会光設計奨励賞受賞(2003.12.8)，「2次元フォトニック結晶面発光レーザの偏光制御」、④野田進，電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ賞受賞(2004.9.22)，「フォトニック結晶に関する先駆的・独創的研究」、⑤野田進，大阪科学賞(2004.11.1)，「フォトニック結晶に関する先駆的・独創的研究」、⑥野田進，応用物理学会光量子エレクトロニクス業績賞(2005.3.29)，「半導体フォトニック結晶に関する研究」、⑦田中良典，応用物理学会講演奨励賞(2005.3.29)，「2次元フォトニック結晶スラブ点欠陥共振器への3次元加工による放射パターンの制御」、⑧野田進，国際コミュニケーション基金優秀研究賞(2005.4.25)，「半導体フォトニック結晶を用いた超小型光回路の研究」、⑨Susumu Noda(2005.10.24)，IEEE/LEOS Distinguished Lecture Award (2003-2005)。