

「フォトリソグラフィによる究極の光制御と 新機能デバイス」

平成 12 年 11 月～平成 17 年 10 月

研究代表者：野田 進

(京都大学大学院工学研究科、教授)

1 研究実施の概要

1.1 基本構想と研究目的

フォトニック結晶は、その内部に周期的な屈折率分布をもつ新しい光ナノ構造で、ある特定の波長域(フォトニックバンドギャップ波長域)において光の伝播、さらにはその存在すら許さないことを特長とする。この結晶中に人為的に欠陥や発光体を導入することにより、光を極微小域で漏れなく直角に曲げたり、あるいは発光現象の完全制御を可能とするなど、光を自在に操ることが出来るものとして、大きな注目を集めている。研究代表者は、本事業開始前に、独自のナノ加工技術を用いて、光デバイスに最適な III-V 族半導体により、完全 3 次元フォトニック結晶を世界に先駆けて実現することに成功していた。本事業ではこの成果を受け、開発に成功した完全 3 次元結晶内部に発光体や欠陥を人為的に導入することで、フォトニック結晶による発光や光伝播制御の可能性を実証し、革新的な極微小光デバイス実現の基礎を築くことを第 1 の目的とした。

一方、周期的屈折率分布を 2 次元面内のみに設けた結晶、2 次元フォトニック結晶は、3 次元結晶に比べると、光閉じ込め次元が 1 次元低くなるが、作製面での容易性に優位点がある。この 2 次元結晶においても、2 次元面内の光閉じ込め・制御を利用することにより、各種の機能デバイス実現が可能となると考えられる。本研究プロジェクトの第 2 の目標は、研究代表者が世界に先駆けて提案した、(i)2 次元フォトニック結晶のバンド端活用による大面積コヒーレントレーザ作用および(ii)2 次元結晶スラブにおける線・点欠陥による光子の操作に対して、その原理の詳細な検討とデバイス展開に向けた基礎を築くことにあった。またそれと並行して、これら 2 次元フォトニック結晶デバイスの基礎として、(iii)2 次元フォトニック結晶における光伝搬現象の解明をも目的として研究を進めた。

1.2 研究成果の概要

研究は、京都大学を中心に、横浜国立大学、産業技術総合研究所、さらには、ローム(株)、ミノルタ(株)、住友電気工業(株)、TDK(株)、松下電工(株)、アルプス電気(株)等の各企業(これらの企業からは京都大学への研究員派遣を行ってもらった)とも連携し、延べ 62 名の体制で実施した。この際、1.1 で述べた研究代表者のアイデアを基礎として、フォトニック結晶分野における最も重要となる課題を全体的に網羅し、世界のトップを走る研究を推進することを心がけた。以下には、主な研究成果の概要をサブテーマ毎に纏めて記す。

(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、プロジェクト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目指すことであった。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、様々な重要な成果を得ることが出来た。中でも、特筆すべき成果は、自然放出の完全制御、すなわち、「物質における発光現象を根本から抑えたり、逆に強めたりする、究極の発光制御の可能性」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。この概念が、そもそも、フォトニック

結晶に対する世界的な関心を集める契機となった。その後、様々な形でフォトニック結晶の研究が進められたが、これまで、この科学的に最も重要かつ興味深い概念は、実証されずに残っていた。本CREST事業を通じて、初めてその実証に成功することが出来た。この成果は、米科学誌サイエンスにも掲載され、国内外の多くの注目を集めた。また、本研究により、完全3次元結晶への線欠陥導波路の実現にも成功し、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と自負している。

上記の自然放出制御の研究は、当初予定していなかった2次元結晶による興味深い発光制御の可能性の実証にもつながった。フォトニック結晶としては、全反射効果により上下方向にも強い光閉じ込め効果をもつ2次元フォトニック結晶スラブを用いた。まず、フォトニック結晶をもたない通常のスラブ構造(内部に発光体を包含)においては、発光は主にスラブ面内に対して起こり、わずかな光だけが上下方向へと放射されることを確認した。次に、このスラブ構造に2次元フォトニック結晶を導入し自然放出現象を調べた。その結果、2次元バンドギャップ効果により面内方向への発光が禁止され、自然放出割合が大幅(約 1/5 程度)に減少することを見出した。さらに、同時に、フォトニック結晶効果が存在しない上下方向の発光効率が大幅に増大することを見出した。つまり、2次元フォトニック結晶を用いると、面内方向の自然放出が禁止されると同時に、蓄えられたエネルギーが、バンドギャップ効果の存在しない上下方向の発光へと再配分されることが可能となることを見出した。この成果は、例えば、発光ダイオード(LED)等の発光デバイスの大幅な効率改善にも寄与出来ると期待される。一般のLEDでは、デバイス内部で発光した光の大部分がそのまま内部に全反射で閉じ込められるため、外部量子効率が高いことが問題になっているが、上述の原理を適用し、デバイス内部への発光を最初から禁止し、投入したエネルギーを全てデバイス外部へと出射可能な光の発生にのみ用いることが出来れば、大幅な効率向上にもつながるものと期待される。幸いにも、この成果も、米科学誌サイエンスにも掲載され、国内外の多くの注目を集めることが出来た。

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

上記(1)の研究は、フォトニックバンド構造において、光の存在が禁止されるバンドギャップに注目したものであるが、一方、バンド端に注目すると、この点は光の群速度が零、言い換えれば様々な方向に伝搬する光が各種のブラッグ反射を通じて、結合し定在波状態が形成される点を与える。この定在波状態を共振器として用いることにより、大面積でのコヒーレント発振可能なレーザーの実現につながる。その結果、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なレーザー動作が可能となり、従来の概念を越えた新しいレーザーの実現が期待される。このアイデアは、研究代表者が、本事業開始前に世界に先駆けて提案したものである。本サブテーマでは、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。

本研究により、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で、動作していることを、理論・実験を通じて実証するとともに、どのバンド端において発振しやすいかなどの深い知見を得ることが出来た。また、デバイスの低閾値化に取り組み、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。以上の成果は、幸いにも、米科学誌サイエンスにも掲載され、世界的に大きな注目を集めることが出来た。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次元フォトリック結晶と機能デバイス(II)―欠陥活用光機能デバイス―

全方向にバンドギャップをもつ3次元結晶に対し、2次元フォトリ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、本事業開始前に、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る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次元フォトリ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実証した。この現象は、点欠陥に光が捕獲されると上下方向の全反射条件が破れることに起因したもので、極微小点欠陥を介して、面垂直方向から結晶への光の出入れが可能になることを意味し、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る。実際、この成果は、英科学誌ネイチャーにも掲載されるとともに、”Defects Boost Optical Communication” (Physics Web)と大きな注目を集めることとなった。本事業では、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・フォトリック結晶を実現し、複数波の光合分波デバイス機能の実証にも成功した。この成果は、米科学誌サイエンスにも掲載され、フォトリ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。このヘテロ構造の概念は、そのヘテロ界面での光の振る舞いの理解とともに、当初計画に含まれていない新たな展開であった。

さらに、本研究においては、点欠陥共振器の Q 値の劇的な増大という、当初全く予想していなかった成果を挙げることに成功した。点欠陥の Q 値を十分に上げることが出来ると、上下方向への光の漏れが低減できるために、より大規模な光回路への展開が期待出来る。さらに、十分に小さなモード体積に光を非常に強く閉じ込めることが出来るようになると、光を一個一個放出可能な次世代量子通信用光源、光をそのままの状態で記憶することの出来る光バッファメモリ、分子数個をも検知できるような超高感度センサーや新しいバイオ応用、等々への展開が可能となる。これらは、極微小域での光と物質との相互作用の極限的な増大、強い光閉じ込め効果により光の滞在時間が十分に長くなること等の効果に基づくものである。点欠陥共振器の端部に位置する格子点をわずかに(60nm 程度)シフトすると、 Q 値が大幅に(一桁以上)増大することを見出した。これは、詳細な検討の結果、格子点シフトにより、共振器内部に閉じ込められた電界の包絡線関数が最も自由空間への光の漏れを少なく出来るガウス関数型に近づくためであることを突き止めた。このガウス関数型閉じ込めという概念に従い、さらに、 Q 値を上げる方法として、ヘテロ構造を2つ組み合わせたダブルヘテロ構造が最も理想的であることを見出し、結果として、100 万にも迫る世界最大の Q 値の実現に成功した。以上の成果は、英科学誌ネイチャーおよびネイチャーマテリアルズにも掲載され(特に、後者においては、その表紙を飾るという栄誉を得た)、世界的な注目を集めることとなった。

(4) 2次元フォトリック結晶と機能デバイス(III)―光伝搬制御―

上記、2次元フォトリック結晶と機能デバイス(II)の基礎となる、2次元フォトリ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た。特に、2次元フォトリ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。まずフォトリ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世界で初めて成功した。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。

1.3 研究成果の社会的インパクト等

チーム全体として、成果の外部発表、特許出願、技術移転等を積極的に行った。外部発表としては、まず、学術誌において、米科学誌サイエンス 4 編、英科学誌ネイチャー3 編、ネイチャーマテリアルズ 1 編を含む 116 件の発表を行った。また、77 件の解説記事・書籍の執筆を行った。国際会議では、224 件(内、招待講演 115 件)、国内会議では、479 件(内、招待講演 138 件)の発表を行った。さらに、研究代表者が、IEEE/LEOS Distinguished Lecturer を勤め、世界各地で、講演を行い、得られた成果の世界への発信を行った。これらの成果は、国内外の新聞や雑誌等でも、124 件以上に渡り取り上げられるなど世界的に大きな注目を集めた。

以上の研究成果により、幸いにも、研究代表者が、第 14 回日本 IBM 科学賞(2000 年 12 月)、第 18 回櫻井健二郎氏記念賞(光産業技術振興協会、2002 年 12 月)、電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ賞(2004 年 9 月)、第 22 回大阪科学賞(2004 年 11 月)、平成 16 年度国際コミュニケーション基金優秀研究賞(2004 年 11 月)、応用物理学会光量子エレクトロニクス業績賞(2005 年 3 月)、と多数の賞を受賞する栄誉を得た。また、本研究に参加した研究員や学生らが国際会議論文賞、応用物理学会奨励賞等の賞を受賞するという栄誉を得た。

また、特許出願に関しても、総計 40 件以上の出願を行った。事業移転等に関しても積極的に努めた。特に、本研究プロジェクトには、多くの企業(ローム、ミノルタ、住友電気工業、TDK、松下電工、アルプス電気)が参加しているため、研究を進めることは同時に、企業への技術移転を行っていることに他ならないと言える。

以上のように、この 5 年間のプロジェクトを通じて、世界に向けて多くの新しい知見を発信し、世界のフォトニック結晶研究拠点としての地位を固めることが出来たと自負している。

2 研究構想及び実施体制

2.1 研究構想

(1) 研究の背景、目標

A. 研究の背景

フォトリック結晶とは、内部に周期的な屈折率分布をもつ新しい光ナノ構造であり、固体結晶における電子のエネルギーバンド構造に対応して、光子のエネルギーバンド構造が形成されるという特徴を持つ。特に、屈折率分布が3次元のダイヤモンド構造となるときには光がどの方向にも伝播できない、完全バンドギャップが形成される。フォトリック結晶において最も興味深い点は、このようなフォトリックバンドギャップの存在にある。バンドギャップにおいて光は状態を取り得ないため、真空場における現象とは全く異なった現象が生じることになる。自然放出制御はその一つであり、フォトリック結晶中に閉じ込められた原子系(発光体)からの発光の抑制や欠陥導入による超高効率発光(究極的には零しきい値発振、さらには、自然放出がないことによる超低雑音レーザ、アンプへとつながる)が可能となる。また、原子系を外場から遮断することが可能となり、いくつかの閉じ込められた原子系同士の純粋な相互作用を可能とする。近年注目を集めている量子コンピューティングが構成可能な量子場を提供するものとしても期待される。また、フォトリック結晶中に人為的に線状の欠陥列を導入することにより、導波路を形成することも可能である。この導波路の特長は、バンドギャップの存在により導波路以外の部分に光が漏れないことにあり、従来に比べて2~3桁程度小さな極微小の2~3次元光回路の構成が可能となる。以上のように、フォトリック結晶には光分野における様々な応用が期待されるが、これまで技術的な難しさから、国内外共に、光波長域(特に光通信で重要な1 μ m帯)において完全なバンドギャップをもつ3次元結晶は実現されていなかった。

B. 研究の目標

上記のような背景のもと、研究代表者は全く独自の極微細構造融着技術により、研究開始直前に、完全バンドギャップをもつ3次元結晶を、発光デバイスに最適なIII-V族半導体を用いて初めて実現した。作製した結晶は、サブミクロン周期のストライプ層を4~8層積層させたダイヤモンド結晶構造をもち、光通信波長域で、透過率の減衰量として-40dBという世界的に例の無い理想的な値をもつ。本研究の第一の目標は、開発に成功した3次元結晶に様々な欠陥や発光体を導入し、微小光デバイス・回路を実現のための基礎を確立することである。その際、自然放出光の完全制御という物理的にも非常に興味深い現象を解明していくことを目指した。

一方、周期的な屈折率分布を2次元面内のみに設けた結晶、すなわち2次元フォトリック結晶は、3次元結晶に比べると、光閉じ込めの次元が1次元減るため、完全な光制御は望めないが、作製が容易であるというメリットをもつ。この2次元結晶においても、2次元面内の光閉じ込め・制御を利用することにより、各種の機能デバイスが実現可能であると期待される。研究代表者は、2次元フォトリック結晶構造をもつ半導体レーザにより、大面積にわたるコヒーレント発振の可能性を世界に先駆け提言していた。また、これとは別に、研究代表者は、2次元フォトリック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、本事業開始直前に、世界に先駆けて提唱していた。また、2次元結晶スラブ導波路の近傍に欠陥を導入することにより、導波路中を伝播する光子のうち、欠陥周波数に対応する光子を捕獲し、自由空間への放射が可能であることを示唆する興味深い結果を得つつあった。この現象は、波長多重通信における超小型アッド・ドロップや波長モニターデバイスなど、革新的な超小型通信用デバ

イスを提供するものと期待される。本研究の第2の目標は、以上のように2次元結晶を用いた萌芽的な新しい現象、機能デバイスをより詳細に検討し、原理のさらなる実証、デバイスとして十分使えるところまでもっていくことであった。

以上の目標を達成するために、京都大学を中心に、横浜国立大学、産業技術総合研究所、さらには、ローム(株)、ミノルタ(株)、住友電気工業(株)、TDK(株)、松下電工(株)、アルプス電気(株)等の各企業(これらの企業からは京都大学への研究員派遣を行ってもらった)とも連携し、延べ62名の体制のもと研究を推進した。

(2) 具体的な研究目標・計画

A. 3次元フォトニック結晶と光制御

本サブテーマにおける研究目的は、プロジェクト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である。

この目的達成のために、(a)大規模計算機による電磁界シミュレーションにより基本構造の設計を行うこと、(b)完全3次元フォトニック結晶への発光体導入の基本技術を確立すること、(c)実際に、発光体や欠陥を導入し、完全結晶部においては、自然放出の抑制が可能であること、一方、欠陥部分では、逆に強く発光が起こることを実証すること、(d)3次元フォトニック結晶による極微光回路の基盤技術として、完全結晶に、線欠陥導波路を導入し、光の伝播現象を実証するとともに、様々な導波路構造の設計にも取り組むこと、さらに(e)これらのための重要な基礎として、高精度ウエハ位置合わせ装置の開発を目指して研究を進めた。

B. 2次元フォトニック結晶と機能デバイス(I)ーフォトニック結晶レーザー

本サブテーマは、研究代表者が独自に提案したフォトニック結晶レーザーにおける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。

このレーザーは、フォトニック結晶のバンド端に注目したものである。バンド端は、光の群速度が零、言い換えれば、様々な方向に伝搬する光が各種のブラッグ反射を通じて、結合し定在波状態が形成される点を与える。この定在波状態を共振器として用いることにより、大面積でのコヒーレント発振可能なレーザーの実現につながる。その結果、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なレーザーの実現が可能となり、従来の概念を越えた新しいレーザーの実現が可能となると期待される。本研究では、このようなレーザーが確かに実現可能であることを実証することからスタートし、さらには、格子点形状の制御にも取り組み、縦・横モードのみならず、偏光までも制御したデバイス技術の確立を目指した。また、研究開始時点で2アンペア程度であった閾値電流を、大幅に低減させ、実用化に必要な不可欠である室温連続発振の達成をも目指した。

C. 2次元フォトニック結晶と機能デバイス(II)ー欠陥活用光機能デバイス

前項でも述べたように、研究代表者は、2次元フォトニック結晶に線状欠陥導波路および点状欠陥共振器の両方を導入すると、線欠陥導波路を伝搬する光子のうち、点欠陥共振器の共振周波数のエネルギーをもった光子は欠陥共振器により補足され、上下方向に放射されるという現象が起こりうるという非常に興味深い現象を見出しつつあった。本研究では、この新しい現象を実証するとともに、2次元フォトニック結晶スラブの各種デバイス応用に向けた様々な知見を得ることを目的として研究を進めた。

具体的には、(a)上述の点・線欠陥の複合欠陥による光子操作の可能性を実証すること、(b)点欠陥共振器により、実際にどの程度の効率で光が自由空間へと放射されるかの定量的

な評価を行なうこと、(c)面内と垂直方向の共振の関係を種々に変化させ、実際に上下への取り出し効率がどのように変化しうるかを明らかにすること、(d)点欠陥共振器の Q 値制御を行うこと、(e)大きさの異なる欠陥を複数個用意し、多波長のアッド・ドロップ機能や波長モニター機能が可能となるようデバイス全体の設計、作製、評価を行っていくこと、などを具体的な目標として研究を進めた。

D. 2次元フォトニック結晶と機能デバイス(III)－光伝搬制御－

上記、2次元結晶欠陥活用デバイスの基礎として、2次元フォトニック結晶線欠陥導波路の導波特性を明らかにすることを本サブテーマの第 1 の目標とした。さらにフォトニック結晶の分散特性を利用した新しいデバイスへの展開を図るために、(a)2次元結晶線欠陥導波路におけるバンド端近傍での光の群速度異常の理解、(b)バルク結晶中の特異な分散性に基づく光伝播特性の検討、さらに、(c)それらを用いた光機能創出の可能性を探ることを第 2 の目標として研究を行った。

2.2 研究開始後の新展開

(1) 2次元フォトニック結晶による自然放出制御

これは、前項 2.1(1)A の「3次元フォトニック結晶と光制御」を推進している際に発生した当初予期しなかった新展開である。当初の構想では、全方向にバンドギャップをもつ 3次元フォトニック結晶を用いた自然放出制御を研究することが主題であったが、一方で全方向に対する完全バンドギャップをもたない 2次元フォトニック結晶を用いた場合に自然放出がどのように制御されるかを検討することも非常に興味深い研究課題と考え、2次元結晶を用いた自然放出制御の研究にも踏み込んだ。ここでは、2次元結晶として、屈折率差による全反射により上下方向にも光閉じ込めが可能であり、擬 3次元的な光閉じ込めが期待できる 2次元フォトニック結晶スラブを用いることとした。

(2) 面内ヘテロ構造と光制御

これは、前項 2.1(1)C 「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－」を推進している際に発生した当初の計画にはなかった新展開である。フォトニック結晶を用いて様々な光機能を得るためには、結晶に導入した様々な欠陥(点欠陥共振器、線欠陥導波路等)の光結合状態を制御することが必須である。例えば、線・点欠陥の結合により、本研究で追求している光機能の 1 つ、すなわちアッド・ドロップ機能が実現出来るが、ここで、動作波長を変化させるために、例えば、点欠陥の大きさを少しでも変化させると、欠陥間の結合バランスが崩れ、動作特性が変化してしまう。従って、最適なデバイス特性を保ったまま、多波長動作を行うためには、欠陥間の結合を崩さずに、波長を変化させることが必須となる。このような要求を満たすものとして、本研究では、結晶の構造を比例的に変化させ、これを結合させる、すなわち、「面内ヘテロ構造」を用いることが極めて有効であることを見出した。本研究では、このヘテロ構造の有効性を様々な観点から検討することとした。

(3) 世界最高のQ値をもつ光ナノ共振器の実現

これも、前項 2.1(1)C 「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－」を推進している中で発生した当初予期しなかった新展開である。本研究では、点欠陥の共振器の端部の空気孔をわずか、60nm 程度シフトさせるだけで、Q 値が劇的に増大することを見出した。この Q 値増大のメカニズムをさらに深く検討することにより、2次元フォトニック結晶

における普遍的な Q 値の増大法の発見へと展開することとなった。この研究は、世界中の研究者に大きな衝撃を与えるような成果へと繋がることとなった。

2.3 研究計画の項目毎の達成度

(1) 3次元フォトニック結晶と光制御

+2次元フォトニック結晶による自然放出制御

本サブテーマの研究目的は、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目指すことであった。前節 1.2(1)でも述べたように、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、様々な重要な成果を得ることが出来た。中でも、特筆すべき成果は、自然放出の完全制御、すなわち、「物質における発光現象を根本から抑えたり、逆に強めたりする、究極の発光制御の可能性」を世界で初めて示すことに成功したことである。この成果は、米科学誌サイエンスにも掲載され、国内外の多くの注目を集めた。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実現にも成功し、初めて光導波現象の観察に成功した。

上述の 3 次元結晶による自然放出制御の研究は、前節 2.2(1)でも述べたように、当初予定していなかった 2 次元結晶による興味深い発光制御の可能性の実証にもつながった。つまり、2 次元フォトニック結晶により、面内方向の自然放出が禁止されると同時に、蓄えられたエネルギーが、バンドギャップ効果の存在しない上下方向の発光へと再配分されることが可能となることを初めて実証することに成功した。この成果は、1.2(1)でも述べたように、例えば、発光ダイオード(LED)等の発光デバイスの大幅な効率改善にも寄与出来ると期待される。一般の LED では、デバイス内部で発光した光の大部分がそのまま内部に全反射で閉じ込められるため、外部量子効率が低いことが問題になっているが、上述の原理を適用し、デバイス内部への発光を最初から禁止し、投入したエネルギーを全てデバイス外部へと出射可能な光の発生にのみ用いることが出来れば、大幅な効率向上にもつながるものと期待される。幸いにも、この成果も、米科学誌サイエンスにも掲載され、国内外の多くの注目を集めることが出来た。

本サブテーマの成果は、上述の米科学誌サイエンスへの発表 2 編を含む数多くの学術雑誌、国際会議での発表へと繋がった。これらの成果は、国内外の新聞や雑誌等でも、数多く取り上げられるなど大きな注目を集めた。以上のことより、本項目において、初期に予定した以上の成果を達成できたと自負している。

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

本サブテーマでは、研究代表者が独自に提案した 2 次元フォトニック結晶レーザーのデバイス物理の解明と高性能化に取り組んだ。これより、2 次元結晶のバンド端効果に基づくレーザー作用を明らかにし、研究代表者の提案になるデバイスが、確かに 2 次元フォトニック結晶レーザーとして動作しうること示すことに成功した。さらには楕円形状の格子点を用いることで、大面積、コヒーレント、縦横単一のみならず、偏光までそろった面発光レーザーが実現可能であることを実証することにも成功した。また、当初 2~3 アンペアと高かった閾値を、デバイスの構造の最適化により、50mA 以下と、1/40 まで閾値を低減することに成功し、実用化に向けて必要不可欠である室温連続発振を達成することに初めて成功した。以上の成果は、米科学誌サイエンスに掲載されるとともに、国内外の新聞雑誌等でも多くの報道を受け、世界的に大きな注目を受けるに至っている。さらに、本研究の成果は、2002 年から 2005 年の 4 年間連続してシートック(エレクトロニクスショー)に出展した。特に、2005 年度には、初めて、実際のレーザー素子を

展示し、その場で動作させるというデモンストレーションを行い、多くの企業・機関から多数の引き合いが来るに至っている。

以上のことより、本サブテーマにおいても、初期に予定した成果を十分達成できたと自負している。

(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― ＋面内ヘテロ構造と光制御 ＋世界最高のQ値をもつ光ナノ共振器の実現

本項目では、研究代表者が独自に提唱した点欠陥による光子の捕獲と放出現象を詳細に検討するとともに、新しい光機能デバイスへの展開を行うことを目指して研究を進めた。前節1.2(3)でも述べたように、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、点欠陥を導入することにより、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実証することに成功した。この成果は、英科学誌ネイチャーにも掲載されるとともに、“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。この成果は、米科学誌サイエンスにも掲載され、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。

上述のヘテロ構造の概念は、2.2(2)でも述べたように、当初計画に含まれていない新たな展開であった。フォトニック結晶を用いて様々な光機能を得るためには、結晶に導入した様々な欠陥(点欠陥共振器、線欠陥導波路等)の光結合状態を制御することが必須である。例えば、線・点欠陥の結合により、本研究で追求している光機能の1つ、すなわち光アッド・ドロップ機能が実現出来るが、ここで、動作波長を変化させるために、例えば、点欠陥の大きさを少しでも変化させると、欠陥間の結合バランスが崩れ、動作特性が変化してしまう。従って、最大のデバイス特性を保ったまま、多波長動作を行うためには、欠陥間の結合を崩さずに、波長を変化させることが必須となる。このような要求を満たすものとして、本研究では、結晶の構造を比例的に変化させ、これを結合させる、すなわち、「面内ヘテロ構造」を用いることが極めて有効であることを見出した。デバイス効率(合分波効率)や波長分解能(Q値)は、無次元量であるため、点・線欠陥を含む基本単位の大きさを比例的に変化させると、その結合関係を崩すことなく、多波長動作が可能になるわけである。さらに、興味深いことは、ヘテロ界面での光の反射を積極的に利用すると、デバイスの動作効率を100%に出来ることである。

さらに、本研究においては、2.2(3)でも述べたように、点欠陥共振器のQ値の劇的な増大という、当初全く予想していなかった成果にも繋がった。点欠陥のQ値を十分に挙げることが出来ると、上下方向への光の漏れが低減できるために、より大規模な光回路への展開が期待出来る。さらに、十分に小さなモード体積に光を非常に強く閉じ込めることが出来るようになると、光を一個一個放出可能な次世代量子通信用光源、光をそのままの状態に記憶することの出来る光メモリー、分子数個をも検知できるような超高感度センサーや新しいバイオ応用、等々への展開が可能となる。点欠陥共振器の端部に位置する格子をわずかに(60nm程度)シフトすると、Q値が大幅に(一桁以上)増大することを見出した。これは、詳細な検討の結果、格子点シフトにより、共振器内部に閉じ込められた電界の包絡線関数が最も自由空間への光の漏れを少なく出来るガウス関数型に近づくためであることを突き止めた。このガウス関数型閉じ込めという概念に従い、さらに、Q値を上げる方法として、ヘテロ構造を2つ組み合わせたダブルヘテロ構造が最も理想的であることを見出し、結果として、100万にも迫る世界最大のQ値の実現に成功した。以上の成果は、英科学誌ネイチャーおよびネイチャーマテリアルズにも掲載

され(特に、後者においては、その表紙を飾るという栄誉を得た)、世界的な注目を集めることとなった。

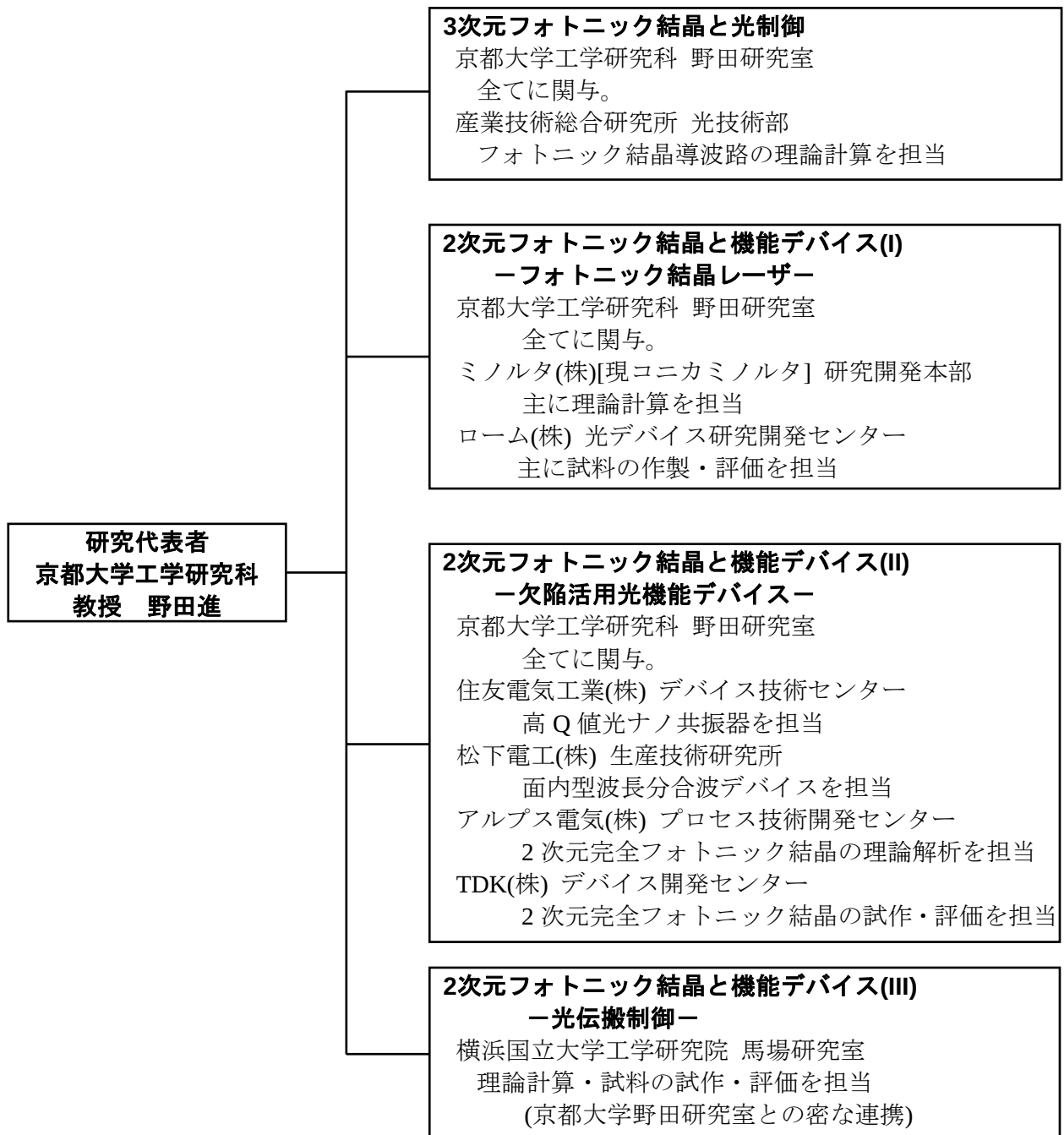
以上より、本サブテーマにおいて、初期に予定した以上の高い成果を達成できたと言える。

(4) 2次元フォトリック結晶と機能デバイス(III)ー光伝搬制御ー

本項目では、2次元フォトリック結晶線欠陥導波路の導波特性を明らかにするとともに、フォトリック結晶の分散特性を利用した新しいデバイスの可能性を検討した。その結果、まず、フォトリック結晶線欠陥導波路の光伝搬特性においては、研究代表者の理論的予測を支持する明快な結果を得ることに成功した。続いて、線欠陥導波路におけるバンド端近傍での光の群速度異常に着目した検討をも行った。ここでは、2.2(2)の面内ヘテロの概念をモディファイしたチャープ構造を提案し、その詳細な検討を通じて、光遅延素子への応用の可能性を示すことに成功した。また、バルク結晶の分散特性を利用したデバイスとして、スーパープリズムやスーパーレンズについて詳細な検討を行い、入射端・出射端における反射を低減する構造を見出すとともに、高分解能化と高効率化が可能なデバイス構造を設計・実証することに成功した。得られた成果の波及には、国際会議でのチュートリアル講演などにより、積極的に努めた。

以上のことより、本項サブテーマにおいても、初期の予定を上回る成果を達成できたと自負している。

2.4 実施体制



3 研究成果

3.1 チーム全体の成果

(1) 成果の概要

1 および 2 章で、すでに述べたように、本研究プロジェクトでは、(i)研究開始直前に、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、を目標に設定し研究を推進した。このうち、(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、住友電気工業、TDK、松下電工、アルプス電気等の各企業(これらの企業からは京都大学への研究員派遣を行ってもらった)とも連携し、延べ 62 名の体制で研究を進めた。この際、上記の研究代表者のアイデアを基礎として、フォトニック結晶分野における最も重要となる課題を全体的に網羅し、世界のトップを走る研究を推進することを心がけた。

次項以降で詳述するように、幸いにも 3 次元結晶、2 次元結晶の両分野で世界のトップを走る研究成果を挙げることが出来たと自負している。主たる成果を列挙すると(a)完全 3 次元結晶を用いて「物質における発光現象を根本から抑えたり逆に強めたりする、究極の発光制御の可能性」の世界で初めての実証、(b)2 次元フォトニック結晶による極めてユニークな自然放出制御現象の発見、(c)2 次元フォトニック結晶のバンド端における定在波状態を利用した大面積コヒーレントレーザの実現と高性能化、(d)2 次元フォトニック結晶へ導入した点・線欠陥による光ナノデバイスの初めての実現、(e) フォトニック結晶におけるヘテロ構造の概念の提唱、(f)世界最大の閉じ込め効果をもつナノ共振器の実現、等が挙げられる。これらの成果は、極めてインパクトファクターの高い米科学誌サイエンス、英科学誌ネイチャー、さらには、英科学誌ネイチャーマテリアルズなどの雑誌にも数多く掲載されるとともに、国内外の新聞・雑誌等でも数多く報道され、世界的に大きな注目を集めることが出来た。

(2) 国内外の類似研究との比較

詳細な比較は次項以降で行うが、3 次元結晶および 2 次元結晶の全ての研究面で、本グループが世界最高水準の研究を行ってきたと自負している。幸いにも、3 次元フォトニック結晶による光制御、2 次元フォトニック結晶レーザに関する研究においては、現状では他を寄せ付けない状況にあると言える。2 次元フォトニック結晶点欠陥活用光機能デバイスの研究に関しては、我々のグループの研究成果に触発され、他の国内外のグループが、研究を著しく進展させている様子も見取れる。これは、一般に研究をスタートしやすい 2 次元結晶の研究においては、我々が世界に向けて発した様々な知見が世界的に波及しつつあることを示している。

(3) 成果の発表とそのインパクト

本研究を通じて、世界をリードする様々な成果を挙げることが出来た。その成果は、すでに述べたように米科学誌サイエンス 4 遍、英科学誌ネイチャー 3 遍、英科学誌ネイチャーマテリアルズ 1 遍(うち一編は表紙を飾る)を含む 116 件の学術雑誌に掲載された。掲載された論文の引用回数も非常に多く、すでに、一編で 260 件を超えるものも存在する。また、Thomson-ISI から、物理分野で最も引用の多い論文として、Fast Moving Front article (ESI Special Topics Website for January, 2006 at the following link: <http://esi-topics.com>) として位置づけられた論文も存在する。

上記の学術論文の他にも、本研究の成果の国内外への発信のために、国際会議では、224 件(内、招待講演 115 件)、国内会議では、479 件(内、招待講演 138 件)の発表を行った。また、77 件の解説記事・書籍の執筆を行った。さらに、研究代表者が、IEEE/LEOS Distinguished Lecture を勤め、世界各地で講演を行った。また、特許出願に関しても、総計 40 件を超える出願を行った。これらの成果は、国内外の新聞や雑誌等でも、124 件以上に渡り取り上げられた。また、IBM 科学賞、IEEE/LEOS Distinguished Lecturer 賞、大阪科学賞、電子情報通信学会エレクトロニクスサイエティ賞、応用物理学会光量子エレクトロニクス業績賞、光協会櫻井賞を始め、多数の賞を頂くことが出来た。

(4) 今後の展開見込み、科学技術・社会への考えられる波及効果

本研究で達成した様々な成果(3 次元・2 次元結晶による自然放出制御の実証、大面積コヒーレント発振可能なレーザの実現、点・線欠陥複合欠陥による光子操作の実証、面内ヘテロ構造の概念の提唱、超高 Q 値光ナノ共振器の実現、等々)は、いずれも、光の自在な制御技術の基本概念を示すもので、極めて科学的・技術的意義が高いと位置づけることが出来る。これらの成果は、今後、より究極的な光制御を目指す研究へと展開され、様々な分野(量子通信・情報、照明、加工、光ピンセット、マイクロフレイディスク、バイオフォトンクス、超高密度光記憶、大規模通信網、光バッファメモリー、超高感度センサー等を始めとする様々な分野)への波及効果をもち、次世代の光技術の核となっていくものと確信する。以下、より具体的に今後の展開、波及効果を述べる。

まず、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スラブ)による発光制御に関する研究により、フォトニック結晶を用いた自然放出の根本制御の可能性を実証すること成功したが、この成果は、場の制御により、不要な発光を一切許さず、真に必要な発光のみにエネルギーを集中させるという極めて理想的な状況が達成されたことを意味する。今後、この成果を発展させることにより、極めて高効率な発光デバイス(LED 等含む)の実現が可能となると期待される。さらに、単一光子発生技術や強結合状態の形成など、量子通信・量子情報等の次世代の通信・情報処理のための基盤技術開発にも、貢献出来るものと考えられる。将来的には、3 次元結晶に点欠陥を導入することによる極限的に高い Q 値をもつ光ナノ共振器と量子ナノ構造との結合体を複数個集積化し、互いに相互作用が出来るところまで、展開出来るようになると、固体光量子コンピュータの方向へも研究が進展するものと期待される。これらは、究極的な光の世界、光の本質へと向かうことになるため、学術的な価値は極めて高く、様々な分野への波及効果が期待される。

一方、2 次元フォトニック結晶レーザの研究は、日本発の新型レーザの開発に成功したと位置づけることが出来る。このレーザは大面積単一モード動作が可能であるため、今後、単一デバイスで 1W を遙かに超える大出力レーザの実現に資すると考えられる。また、格子点制御を始め、様々なフォトニック結晶構造の人為的制御により、様々なビーム形状をもったレーザが誕生するものと期待される。これらは、フォトンクス分野のみならず、光ピンセット、マイクロフレイディスク、バイオフォトンクス、超高密度光記憶、等々様々な分野への波及効果が期待出来る。

さらに、2 次元フォトニック結晶欠陥活用光機能デバイスおよび光伝搬制御の研究においては、2 次元フォトニック結晶スラブを舞台に、自在な光子制御技術が確立し、超小型光合分波デバイスの実現の基礎が確立された。今後、この成果は、より多彩な光機能をもった超小型デバイスの実現へとつながり、将来の大規模通信網のキーデバイスとしての展開が期待される。さらに、高 Q 値ナノ共振器の実現は、2 次元結晶をベースとした光チップ、単一光子光源、電子光子強結合状態形成、光メモリー、超高感度センサーや新しいバイオセンサー応用等への様々な波及効果をもつと期待され、今後、益々、発展していくものと確信する。

3.2 3次元フォトニック結晶と光制御

(1) 研究成果の内容

A. はじめに

A.1 : 本研究のねらい

本研究のねらいは、研究開始時点において研究代表者が世界に先駆けて実現に成功した光通信波長域完全3次元フォトニック結晶(図1、図2参照)に様々な発光体や欠陥を導入し、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をねらいとする。これにより、図3の概念図に示すような、フォトニック結晶中に様々な機能を集積した超小型光デバイス・回路実現のための基盤技術の確立を目指す。

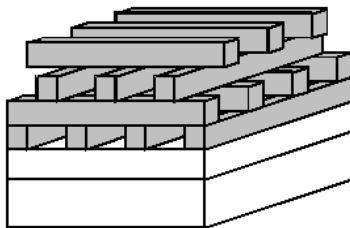


図1 完全3次元フォトニック結晶の模式図

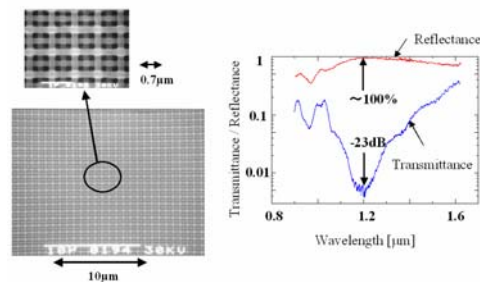


図2 (a)作製した3次元フォトニック結晶(4層積層結晶)の電子顕微鏡写真。(b)透過・反射スペクトルの測定結果。光通信波長域において、～23dBの減衰と、それに対応して～100%の反射率が得られている。

A.2 : 研究実施体制

研究は、基本的に、京都大学を中心に実施してきた。光伝播制御(3次元光導波路)に関しては、産総研グループと連携しながら研究を進めた。理論研究と実験研究をバランス良く行うために、理論グループと実験グループを形成し、両グループ間で、密接に打ち合わせをしながら研究を進めた。幸いにも連携は非常にうまく機能し、下記のような様々な成果を得ることが出来た。なお、研究従事者の詳細は4.研究参加者に記す通りである。

B. 3次元フォトニック結晶による自然放出制御

完全3次元フォトニック結晶に導入する点欠陥共振器の設計

図3に示すような、フォトニック結晶による究極の光デバイス・回路実現のためには、結晶に導入する様々な人為欠陥の設計を行い、その指針を得ることが必要不可欠である。特に、発光デバイスの究極的な姿は、完全3次元フォトニック結晶中に発光体を内蔵する単一欠陥を導入し、この極微小な単一欠陥中に光子を局在させて動作させる完全に自然放出を制御したデバイスへと展開していくところにある。しかしながら、これまで、3次元フォトニック結晶中における極微小点欠陥共振

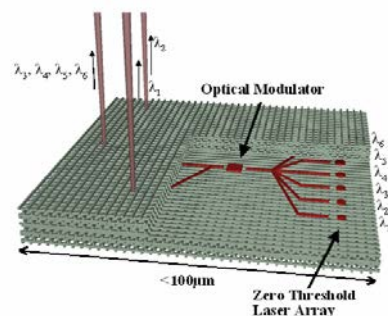


図3 3次元フォトニック結晶による超小型光回路の概念図。

器に関する報告は皆無であり、まずその理論的な設計からスタートする必要があった。

本研究においては、スーパーコンピュータを駆使し、3次元の電磁界シミュレーション(平面波展開法およびFDTD法)により、3次元フォトニック結晶中での単一欠陥共振器の理論解析を行った。検討課題として、(i)欠陥準位のバンドギャップ内での広範囲なチューニングが可能かどうか、(ii)同一欠陥において複数の欠陥準位が存在する場合、それらの準位間隔が十分広くとれるかどうか、(iii)欠陥共振器のQ値が十分高くとれるかどうか、を念頭に置き、(a)どのような形状の欠陥を導入すべきか、また(b)欠陥位置は、結晶中のどの位置がよいのか、さらに(b)上下に何層程度のフォトニック結晶層が存在すればよいのかの検討を行った。

まず、出発点となる欠陥構造として、図4(a)に示すような、正方形の欠陥($\Delta x = \Delta y$)を考え、その位置は、同図(b)に示すような対称位置とした。この構造に対し、まず、欠陥の大きさを変化させた場合、欠陥準位がどのように変化するかを計算した。その結果を図5に示す。同図から、欠陥の大きさに応じて、欠陥周波数がバンドギャップ中で十分チューニング可能であることが分かる。ただ、同図から分かるように、複数の欠陥準位が存在し、第一欠陥準位と第二欠陥準位のエネルギー差が小さく、2モード動作の可能性があることが分かった。2モード動作をする場合、導入した発光体のエネルギーが2分されるという不都合が生じるため、モード間隔は十分大きくする必要がある。そこで、モード間隔を拡大すべく、欠陥形状の設計を行った。まず、モード間隔が近い原因として、図4から分かるように、欠陥の対称性が高すぎるため、2つのモードの縮退が生じかけている可能性があることが予測される。そこで、図6に示すように、欠陥の位置をまず、非対称とするとともに、それぞれの欠陥準位の電界分布の観察から、y方向の長さをx方向の半分とすることとした。その結果、図7に示すように、2つの欠陥準位間隔は大幅に増大され、図5の場合のほぼ3倍の値を得ることが出来るようになった。続いて、共振器の良さ、すなわちQ値の検討を行った。図8(a)には、フォトニック結晶を構成するストライプの層数に対するQ値が示されて

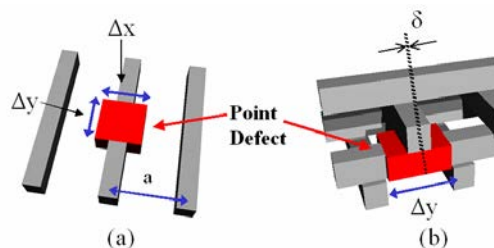


図4 点欠陥共振器の模式図。(a)上面図、(b)側面図。

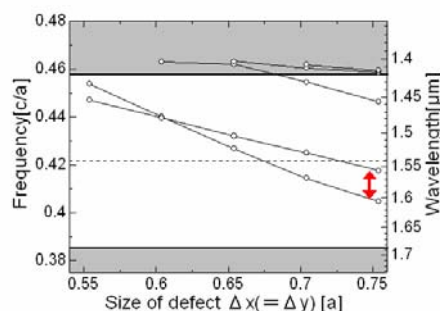


図5 図4の構造で欠陥の大きさを変化させたときの欠陥準位の計算結果。

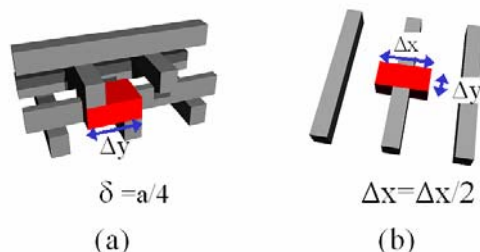


図6 非対称性を導入した点欠陥共振器の模式図。(a)上面図、(b)側面図。

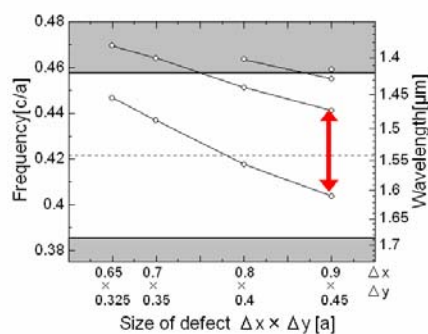


図7 図6の非対称構造で欠陥の大きさを変化させたときの欠陥準位の計算結果。

いる。この結果より、比較的少ない総数で、1000 を越える Q 値が得られることが分かった。また、同図(b)に示すように、この Q 値は、欠陥周波数によらず、ほぼ一定に保たれることも分かり、欠陥共振器として非常に好ましい動作をすることが示された。また、本研究では、さらに、線欠陥導波路の設計や、線欠陥と点欠陥との複合欠陥による光の制御に関する理論検討も併せて行った。

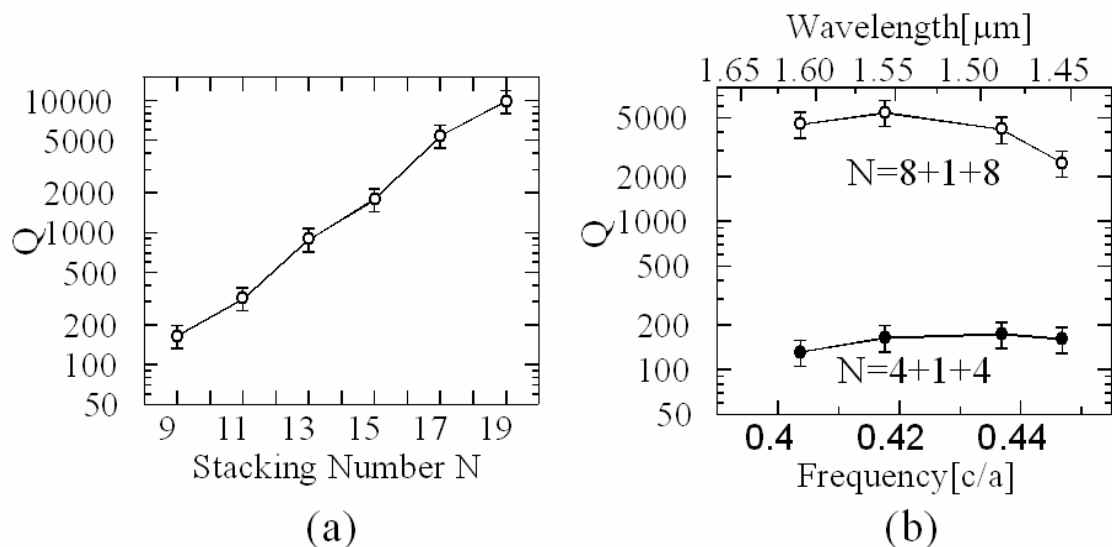


図8 点欠陥共振器のQ値の計算結果。(a)Q値の積層数依存性、(b)4+1+4(計9層)と8+1+8(計17層)の場合のQ値の欠陥周波数依存性。

B.1：発光層導入のための異種材料ウエハ融着技術の開発

3次元結晶による発光制御を実現するためには、GaAs フォトニック結晶中に、光通信波長域で発光可能な発光材料、すなわち InP 基板上的 InGaAsP MQW を導入する必要がある。しかしながら、GaAs と InP では熱膨張係数が異なるため、これらをウエハ融着法によって一体化することは、GaAs 同士あるいは InP 同士のような同種材料を融着する場合に比べて、より工夫が必要となる。本研究では、InP 系発光材料を GaAs 系 3次元フォトニック結晶に導入するために、異種材料間のウエハ融着プロセスの最適化条件を検討し、低温長時間加熱と、基板薄膜化プロセスがキーとなることを見出した。

図 9(a)は本研究で実現を目指した結晶構造の一つ(2+1+2 構造)の模式図を示す。1 周期(4 層)の GaAs 3次元フォトニック結晶の中央に、InP 基板上に成長した発光層にストライプパターンを形成したものが導入されている。図 9(b)は試料の作製方法の模式図である。まず (i)GaAs 基板上的 3次元フォトニック結晶と InP 基板上的発光層の表面を化学処理した後、それらをレーザ光回折位置あわせ法によって精密に位置あわせする、(ii)続いて、2 枚のウエハを接触させる。この段階で、基板表面の-OH 基の水素結合によって 2 枚のウエハは室温接合する、(iii)水素雰囲気中で 500°C 以上に加熱することで両者は強固に融着する。(iv)その後 InP 基板を化学エッチングによって除去する。これによって GaAs 系 3次元フォトニック結晶上に発光層を積層することができる。もう一組の GaAs 3次元フォトニック結晶 2 層と(iii)のウエハを接合することで、図 9(a)に示す構造が形成出来る。しかしながら、ここで、先に述べたように材料間の熱膨張係数差の存在により、InP 基板上的発光層と GaAs 基板上的 3次元フォトニック結晶を融着するためには、条件の最適化が必要となる。

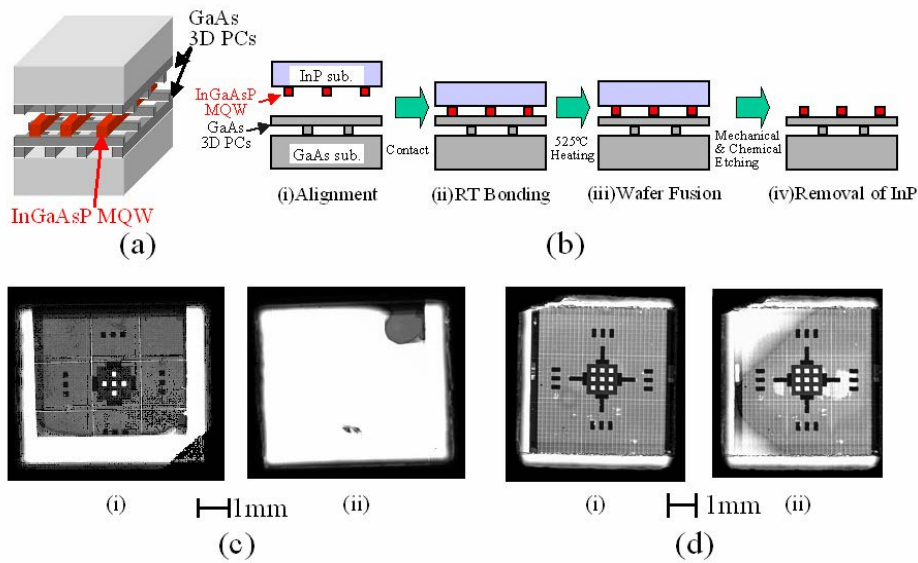


図9 (a)本研究で実現を目指した発光層を内蔵した3次元フォトニック結晶の模式図。(b)3次元フォトニック結晶への発光層導入方法の模式図。(c)(i)加熱前と(ii)525°C加熱後のSAM像。(d)(i)220°Cと(ii)300°Cで加熱後のSAM像。

熱膨張による歪みが融着界面に与える影響を評価するために、融着界面の様子を本CRESTプログラムで購入した走査型超音波顕微鏡(Scanning Acoustic Microscope: SAM)を用いて評価した。SAMとは、融着界面における超音波の反射強度を調べることで、融着界面の様子を非破壊で評価する技術である。超音波は物質の音響インピーダンス(音速と密度の積で表される)が大きく変化する場所で強く反射されるため、例えば融着界面に隙間が存在する場合は、その部分からの反射強度が強くなり画像上で白く表示される。一方、隙間無く接触・融着した場合には反射強度は小さく画像上では黒く表示される。よって反射強度の面内分布を調べることで融着界面の様子を非破壊で観察することが可能となる。図9(c)の左図は加熱前のSAM像の一例である。試料周囲の白い領域は剥離を示しているのではなく、上側の基板と下側の基板の大きさが異なるために、基板がはみ出している部分である。中央にある5つの白い領域は図9(a)に示したようなフォトニック結晶領域であり、この部分はストライプ状に空気の領域が存在しているため、それを反映して周囲よりも反射強度が強くなっている。この図よりフォトニック結晶パターンを反映した反射強度の違いは見られるが、同じパターンの領域では反射強度に面内不均一は見られず、2枚のウェハは全面で均一に接合していることが分かる。一方、図9(c)の右図は同じサンプルを525°Cで加熱した後のSAM像である。界面に隙間が生じていることを示す白い領域がほぼ試料全面に渡って広がっており、これはGaAsとInPの熱膨張係数差による熱歪みによって、加熱中に融着界面が剥離することを明確に表している。一般的に、熱歪みによる歪みエネルギーは温度が高いほど大きくなり、ある温度で融着界面の融着強度を表す表面エネルギーよりも大きくなることにより、剥離が生じると考え

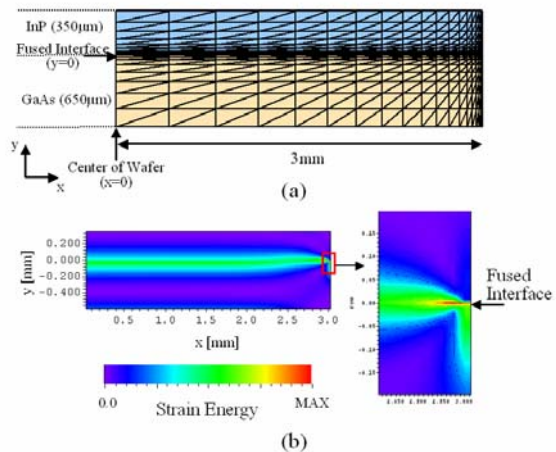


図10 (a)InPとGaAsの融着時における歪みエネルギー計算のために仮定した構造の模式図。(b)熱歪みによる歪みエネルギー分布の計算結果。

られる。そこで融着界面における熱歪みと融着強度の関係を明らかにするために、剥離の生じない加熱温度について検討を行った。その結果が図 9(d)であり、図 9(d)の左図は 220°C で加熱した場合、右図は 300°C で加熱した場合の SAM 像である。この結果より 300°C 程度まで加熱した際に歪みエネルギーによって剥離が生じることが分かる。

熱歪みについて、より詳細に検討するために、2 次元有限要素法(FEM)を用いて熱歪みによる歪みエネルギーについて計算を行った。計算に用いた構造の模式図を図 10(a)に示す。基本的な値は図 9(d)に示した試料と同じ値を用い、InP 基板厚さ 350 μm 、GaAs 基板厚さ 600 μm とした。対称性より、試料の片側だけを計算した。また、試料の長さを 3mm とした。InP と GaAs の物性値は以下の通りである。ヤング率 E は 6.19×10^3 (InP)、 8.70×10^3 (GaAs) (kg/mm^2)、ポアソン比は 0.36 (InP)、0.31 (GaAs)、熱膨張係数は 4.6×10^{-6} (InP)、 6.4×10^{-6} (GaAs) (K^{-1}) である。

図 10(b)は 300°C に加熱した場合の歪み分布の計算結果である。歪みエネルギーが融着界面に集中していることが分かる。特に図 10(b)の付図に示したように、基板の端の部分において歪みエネルギーが最大になっていることが分かる。この部分における歪みの値は、他の部分に比べて約 2 倍の値になっており、これは基板端の部分ではせん断応力が大きくなるためである。図 9(d)の右図において、剥離が試料の端の部分から生じていることを考えると図 10(b)の計算結果とよく対応していることが分かる。次にウエハ端における歪みエネルギーの加熱温度依存性を調べた結果を図 11(a)に示す。歪みエネルギーは温度の 2 乗に比例していることが分かるが、これは歪み量が温度に比例し、エネルギーは歪み量の 2 乗に比例するためである。

図 9(d)と図 11(a)の結果を比較することで、試料の融着強度を表す表面エネルギーはおおよそ $1000 \sim 2000 \text{ mJ/m}^2$ 程度であると考えられる。これらの結果より、 1800 mJ/m^2 以下程度に歪みエネルギーを抑制すれば剥離が生じない可能性が高いことが分かる。この条件を満足するためには、2 つの方法が考えられる。一つは融着温度を下げる方法である。つまり図 9(b)における加熱を剥離の生じない 220°C 付近の低温加熱で終了する方法である。しかしながら、実際に 220°C 加熱後に InP 基板の除去(図 9(b)の(iv))を行ってみたところ、部分的にフォトニック結晶領域が剥離することが分かった。これは 220°C 加熱だけでは融着強度(表面エネルギー)が不足していることを意味している。もう一つの方法は InP、もしくは GaAs 基板を薄くすることで熱歪みを小さくする方法である。図 9(b)に示したように InP 基板は最終的には除去するので、InP 基板を薄くしても特に問題にならない。そこで InP 基板厚さを変えたときに歪みエネルギーがどのように変化するかを計算した結果を図 11(b)に示す。この図より、InP 基板を 20 μm 以下まで薄くすることで、例えば 525°C の高温加熱時においても歪みエネルギーは剥離が生じる値よりも低く保つことが可能であることが分かる。また 300°C 加

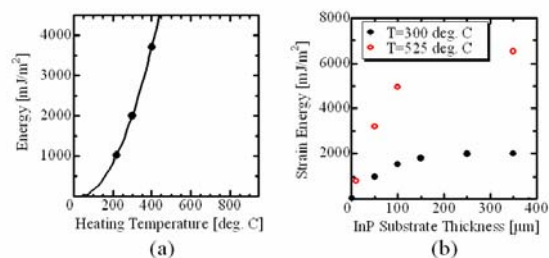


図11 (a)歪みエネルギーの加熱温度依存性の計算結果。(b)525°C加熱時と300°C加熱時の歪みエネルギーのInP基板厚さ依存性の計算結果。同図には、220°Cでの加熱時の表面エネルギーも図示されている。

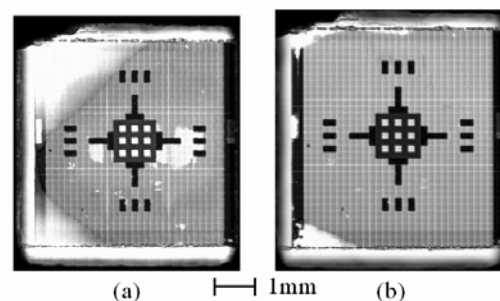


図12 (a)InP基板を薄膜化せずに300°C加熱した際の融着界面のSAM像[図9(d)右図と同じ図]。(b)InP基板を150 μm まで薄膜化した上で300°C加熱した場合の融着界面のSAM像。

熱の場合であれば、InP 基板を 150 μm 程度まで薄くすれば良いことが分かる。この計算結果を確かめるために、実際に InP 基板を 150 μm まで薄くした上で 300 $^{\circ}\text{C}$ 加熱を行った結果を図 12 に示す。図 12(a)は InP 基板を薄くする前に 300 $^{\circ}\text{C}$ で加熱した場合の SAM 像である(図 9(d) 左図と同じ図)。この場合は、先に述べたように試料の角の部分で剥離が生じていることが分かる。他方、InP 基板を薄くして 300 $^{\circ}\text{C}$ 加熱をした場合には図 12(b)に示すように融着状態が大幅に改善されていることが分かる。

これらの結果より図 9(a)に示す構造が、以下の 3 段階加熱法によって実現出来ると結論づけられる。(i)2 枚のウェハの位置あわせを行った上で、220 $^{\circ}\text{C}$ の低温加熱で融着する、(ii)InP 基板を 150 μm 以下に研磨することで熱歪みを減少させより高温(300 $^{\circ}\text{C}$)での加熱を可能にし、より強い融着強度を得る、(iii)InP 基板を 1 μm 以下まで薄膜化することで熱歪みをさらに減少させ、525 $^{\circ}\text{C}$ 加熱で完全に融着させる。以上の低温長時間加熱と基板薄膜化プロセスにより、実際に、3 次元結晶中に発光層の導入が可能になった。

B.2 : 様々な形状の発光体導入とその効果

完全 3 次元フォトニック結晶のバンドギャップ中に発光スペクトルをもつ発光体を結晶中に導入することにより、それまで許されていた発光の大幅な抑制が期待される。また、人為的な欠陥を同時に導入することにより、その部分でのみ、非常に強い発光が起こることが期待される。これは、3 次元結晶による超小型光デバイス・回路の構成要素である超効率発光素子アレイへの展開への重要な一歩を与える重要な研究課題である。また、これらの現象は、まだ世界的にも実証されておらず、非常に興味深い研究課題と言える。

本研究では、完全 3 次元フォトニック結晶の内部に発光層を導入することを初めて試み、その効果を実験的に調べた。最初のステップは完全バンドギャップを消失させない条件で発光層を導入し、完全バンドギャップで、発光の抑制を観測することである。3 次元結晶への発光層の導入法には、図 13(a)、(b)に示す 2 つの方法が存在する。図 13(a)は、最も理想的な方法であり、結晶の周期性を乱さずに結晶中に発光層を導入することを意図している。この場合、同図の下図に示されるように、バンドギャップ波長域は、発光層を導入しない場合と同じ幅をもつ。一方図 13(b)は、非常に薄い平坦な発光層を導入する場合の模式図であり、この場合は、導入した発光層が欠陥層となるため、図 13(b)下図に示すように完全フォトニックバンドギャップは、図 13(a)の周期性を乱さない場合に比べて小さくなる。しかしながら、発光層の厚さが 50nm 程度以下と非常に薄い場合は、図 13(b)下図のように低エネルギー側に、全方向に渡るバンドギャップが形成されることが分かった。一方、薄膜発光層の厚さが、100nm を越えるとバンドギャップが完全に消失することも分かった。これらを踏

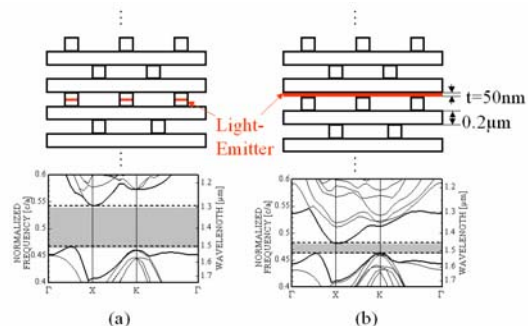


図13 3次元フォトニック結晶への発光層導入方法の模式図とフォトニックバンド構造の計算結果。(a)理想的な場合。(b)非常に薄い(50nm)の発光層を導入した場合。灰色の領域が完全バンドギャップに対応する。

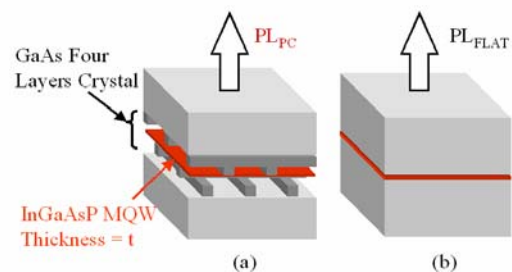


図14 作製した試料の模式図。(a)フォトニック結晶で発光層を挟み込んだフォトニック結晶領域、(b)参照用に平坦なGaAs層で発光層を挟み込んだ領域。

まえて、本研究では、まず、発光層導入の第一段階として、図 13(b)の結晶の中央部に超薄膜状の発光層を導入する方法を採用した。具体的には、図 14(a)に示すように、GaAs ストライプ層 4 層からなる 1 ユニットのフォトニック結晶の中央部に、InGaAsP 多重量子井戸を含む薄膜発光層の導入を試みた。この際、発光層の厚さが(i)150nm と比較的厚い場合と、(ii)50nm と薄いものの 2 種類のものを用意して、上記の理論的検討との比較を試みた。なお、比較試料として、図 14(b)に示すようなフォトニック結晶層をもたない GaAs のみで発光層を挟み込んだ試料を同じサンプル内に設けた。図 15 は、発光層の厚さが 150nm と比較的厚い場合の PL(Photo Luminescence)測定結果であり、この場合、同図(a)に示されるように、フォトニック結晶で挟み込まれた発光層からの発光 PL_{pc} の方が、フォトニック結晶をもたないもの PL_{flat} よりも強い発光を示すことが分かった。同図(b)は、 PL_{pc} を PL_{flat} で規格化したものを表し、フォトニック結晶中に導入された発光体から最大 10 倍以上の発光の増大が見られた。これは、先にも述べたように、発光層の厚さが厚いため、完全にバンドギャップが消失し、逆に、欠陥準位に結合して、上部方向により強く発光が生じたものと考えることが出来る。一方、図 16 には、発光層の厚さを 50nm と極めて薄くした場合の結果が示されている。この場合、次のような非常に興味深い結果が得られた。つまり、ある波長を境として、その短波長側では、フォトニック結晶層の方からより強い発光が見られ、逆に長波長側では、フォトニック結晶層からの強度が弱くなる傾向が見られた。これは、図 13(b) 下図のバンド図と比較すると、短波長側では、バンドギャップが消失し、その代わりに生じた欠陥準位に結合することにより、フォトニック結晶層の方の発光が強くなり、逆に、長波長側では、完全バンドギャップが存在しているため、バンドギャップ効果によりフォトニック結晶層からの発光が弱くなったものと考えることが出来る。このようなバンドギャップによる発光現象の抑制を示唆する結果が、わずか 4 層のストライプからなる結晶で得られたことは、非常に勇気づけられる結果である。

上記の結果を受け、続いて図 13(a)の理想的な条件での発光層の導入を試みた。図 17 に、フォトニック結晶部および参照領域での PL 結果を示す。フォトニック結晶は GaAs ストライプからなり、発光層は、ストライプ形状 InGaAsP 多重量子井戸構造(MQW)からなり、1.3~1.55 μ m 域を含む波長域で発光可能である。同図(b)には、参照領域の発光スペクトルでフォトニック結晶領域の発光スペクトルを除した結果をも示している。同図から分かるように、完全バンドギャ

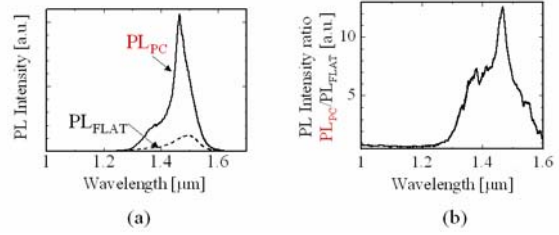


図15 導入した発光層の厚さが150nm程度と比較的厚い場合のPL特性。(a)結晶領域(PC)と参照領域(FLAT)のそれぞれのPL特性。(b)参照領域のPLでフォトニック結晶領域のPLを規格化した結果。

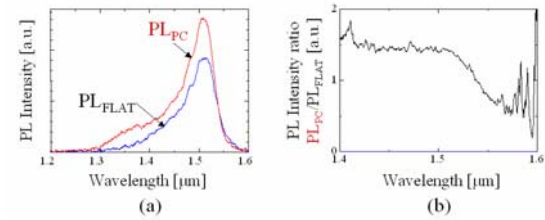


図16 導入した発光層の厚さが50nm程度と薄い場合のPL特性。(a)結晶領域・参照領域それぞれのPL特性。(b)参照領域のPLでフォトニック結晶領域のPLを規格化した結果。

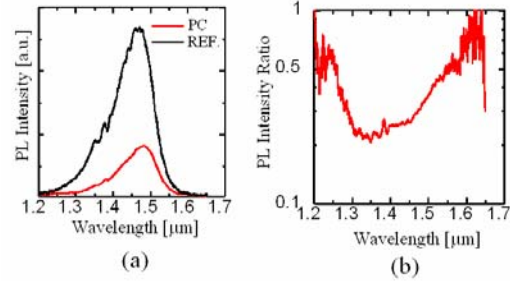


図17 図13(a)の方法で、発光体を導入した場合の結果。(a)は、フォトニック結晶部と参照領域のPLスペクトル。(b)は参照領域のPLでフォトニック結晶部のPLを規格化した特性。完全バンドギャップ域で発光が抑制されているのが明確に分かる。

ップの全波長域(1.3~1.55 μm)で、フォトニック結晶からの発光が大幅に抑制されていることが分かる。図 18 にこれまでの結果を纏めて示す。この 3 つの結果を比べることにより、発光層の導入の仕方が、屈折率分布を乱さない理想的な導入に近づく(つまり、比較的厚い発光層[図 18(a)]→非常に薄い発光層[図 18(b)]→ストライプ型発光層[図 18(c)])につれて、より広い波長域で、かつより大きく発光が抑制されるようになる様子がよく分かる。この結果は、完全 3 次元フォトニック結晶が発光の抑制に大きな効果をもつことを非常に明確に示す結果と言える。

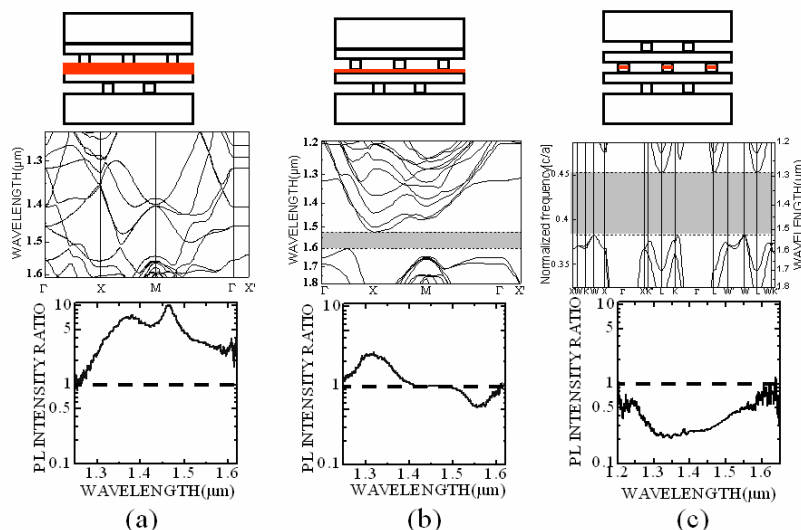


図18 各種の発光層の導入法の模式図とそのバンド構造の計算結果、フォトニック結晶効果の比較。(a)比較的厚い(150nm)平坦な発光層を導入した場合、(b)薄い(50nm)平坦な発光層を導入した場合、(c)ストライプ型発光層を導入した場合。

B.3 : 3次元フォトニック結晶への発光体と点欠陥共振器の同時導入

前項では、完全結晶の周期性を乱さない形で、発光層の導入を行い、完全バンドギャップの存在により、自然放光が抑制されていることを強く示唆する結果が得られたことを示した。次のステップは、いよいよ発光体と同時に点欠陥を導入し、欠陥部分では、発光が強く起こり、欠陥のない部分では発光が抑制されることを示し、究極の発光デバイス: 零しきい値レーザ実現へ向けての大きな一歩を踏み出すことにある。そこで世界に先駆けて、完全 3 次元結晶へ点欠陥と発光体の同時導入を行い、その効果を調べた。

作製した試料は図 19 に示すようにストライプパターンを形成した InGaAsP MQW 発光層(発光波長 1.5 μm)の両側をそれぞれ GaAs2 層積層構造で挟み込んだ 5 層積層構造であり、その内部に同図に示すように大きさの異なる 2 種類の単一欠陥が形成されている。それぞれの欠陥の大きさは、1.6x3.0 μm^2 (欠陥 A)および 2.3x3.6 μm^2 (欠陥 B)である。試料中には、欠陥 A、B の上下を GaAs フォトニック結晶で挟み込んだフォトニック結晶領域(全体で 5 層積層構造)と、同じ欠陥 A、B の上下をフォトニック結晶をもたな

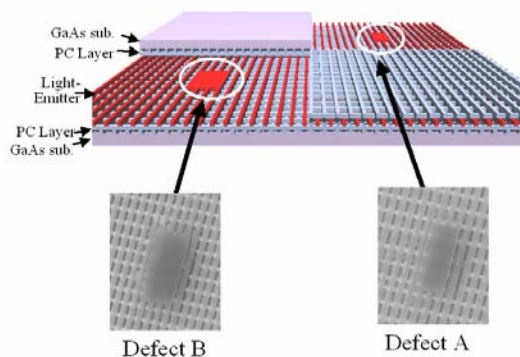


図19 3次元フォトニック結晶への点欠陥と発光体の同時導入の模式図。添付図は、欠陥部分の SEM写真。

い平坦領域で挟み込んだ参照領域の 2 つの領域が形成されており、フォトニック結晶への欠陥＋発光体同時導入の効果を、参照領域の発光特性で規格化することにより評価した。欠陥が導入されていない完全結晶＋発光体に関する結果は、図 17(あるいは、図 18(c))に既に表示されており、フォトニック結晶の効果により発光が大幅に抑制されてことは前項で述べたとおりである。さて、欠陥＋発光体を同時導入の効果は、図 20 に示されている。同図と図 18(c)を比較することにより、欠陥の導入により、バンドギャップ領域中に強い発光ピークが形成されていることが分かる。これは、まさしく欠陥導入により、発光可能な準位が形成され、その準位が強い発光を誘起しているものと言うことが出来る。欠陥 A と B でスペクトルが異なるのは、当然、欠陥の大きさに応じて、欠陥準位が異なるためであり、特に欠陥 B では、欠陥の大きさが大きいいため、少なくとも 2 つの発光ピークが現れたと言える。図 21(a)は、波長 1450nm において発光強度をマッピング測定した結果を示している。同図より、欠陥 A 以外では、発光が抑制され、欠陥 A のみが強く発光している様子が分かる。図 21(a)付図は欠陥付近をより細かく測定した結果であり、発光領域は顕微 PL の測定分解能である約 $2\mu\text{m}$ の領域に限定されていることが分かる。一方、波長 1510nm においてマッピング測定を行った結果を図 21(b)に示す。同図より、今度は、欠陥 B のみが強く発光し、その他の部分では、発光が抑制されていることが分かる。これらの結果は、3 次元結晶における欠陥と発光体の同時導入により、欠陥以外と欠陥部分で発光の様子が大きく変化することを明確に示す初めての結果であり、学術上極めて、重要な結果であると言える。

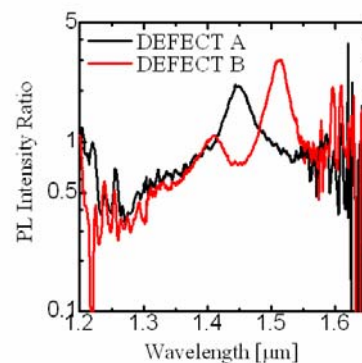


図20 点欠陥A、BにおけるPLスペクトル。縦軸は、フォトニック結晶を形成していない参照領域の発光強度で規格化している。

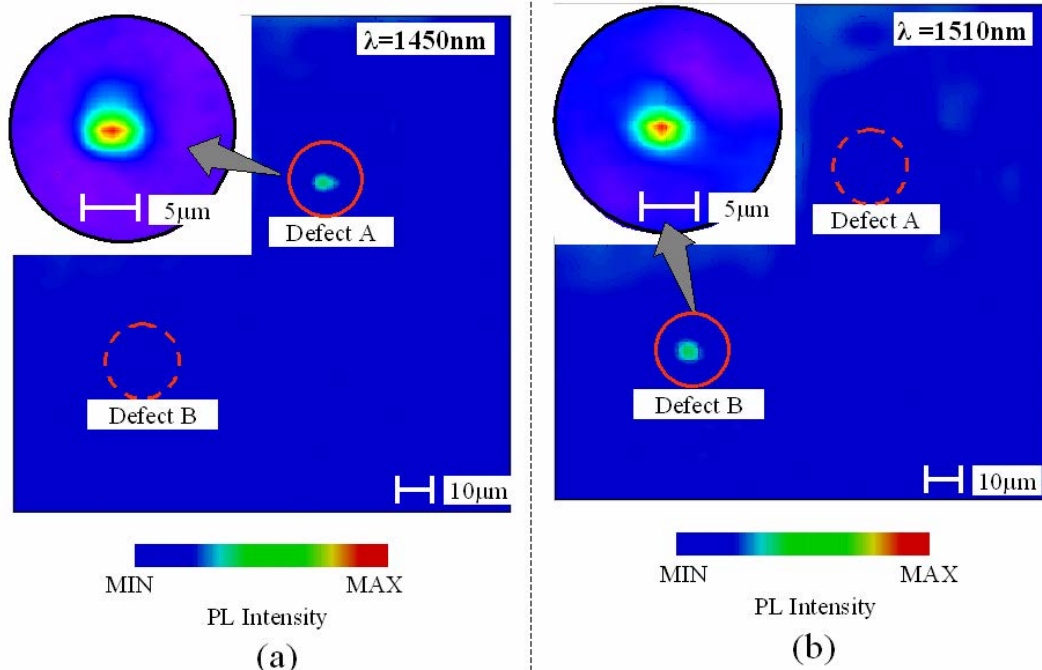


図21 顕微PLマッピング結果。(a)は、測定波長を1450nmにした場合で、欠陥Aのみが強く発光し、(b)は測定波長を1510nmとした場合で、欠陥Bのみが強く発光する。

以上、3次元結晶による発光制御の可能性を示す明確な結果を得ることに成功したが、上記においては、結晶の積層数は、2+1+2 構造、すなわち全部で5層の積層構造であった。ここで、さらに積層数を増加させ発光抑制効果の増大を図ることは極めて重要である。また同時に、様々な方向からの発光スペクトルの観測を行い、全方位において発光の抑制が実現されていることを示すことも重要であると言える。そこで、多層化した試料の作製を行った。図22に作製した試料のSEM像および走査型超音波顕微鏡像を示す。試料は、上下にGaAsストライプ層4層ずつ、中央部にInP/InGaAsP量子井戸発光層をもつ4+1+4構造となっており、層数が5層→9層と倍増されている。図22の5層積層時のSEM像より作製した試料は、ストライプの崩れもなく、また、9層積層後のSAM像より良好な融着がなされていることが分かる。作製された試料において、図23に示すように、様々な方向に対して、発光スペクトルの測定を行った。その結果を図24(a)に示す。同図から分かるように、測定方向に応じて、発光スペクトルは変化するが、いずれの方向においても、1.45~1.6 μm 域近傍において、発光強度が20dB程度減衰している様子が見て取れる。本試料において、別途透過スペクトル観測を行い、完全バンドギャップ域を見積もったところ、ほぼ発光の抑制が得られる上記の波長域と一致し、このことは、発光の抑制は、完全バンドギャップ効果によることを示唆している。ちなみに、前述の2+1+2構造(5層積層構造)に対する様々な方向に対する発光スペクトルを図24(b)に示すが、同図(a)と比較すると明らかなように、積層数を倍増することで、発光の抑制効果は大幅に増加し、積層層の増加の効果が明確に見て取れる。

次のステップは、多層化された結晶に、点欠陥と発光体を同時導入することである。すでに、2+1+2構造により、完全3次元結晶へ点欠陥と発光体の同時導入を行い、確かに欠陥部分においてのみ発光が見られ、欠陥以外の部分では発光が抑制されることを示したが、フォトニック結晶の構造が2+1+2と比較的少ない層数であったことと、欠陥の大きさも $1.6 \times 3.0 \mu\text{m}^2$ 、 $2.3 \times 3.6 \mu\text{m}^2$ と比較的大きいものであった。次のステップとして、フォトニック結晶の層数そのものの増加と、欠陥の大きさを様々なように変化させることにより、どのようにフォトニック結晶効果が大きくなるかを調べることは非常に重要である。このために作製した試料の構造を図25に示す。図25(a)(b)に示すように、層数を倍増した4+1+4構造のフォトニック結晶の発光部に様々な大きさの欠陥(i)-(vii)を導入した。このような様々な欠陥を含む試料に対し、顕微PL(フォトルミネッセンス)測定を行った。各欠陥部分の

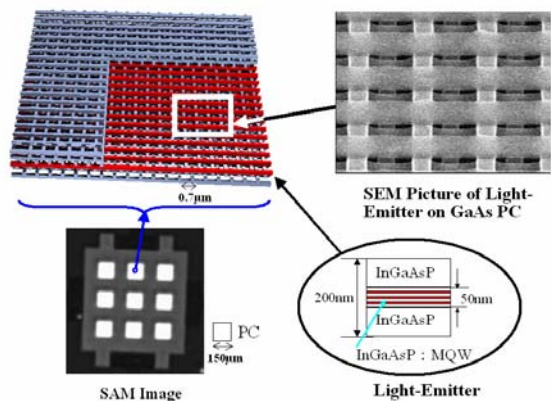


図22 作製した試料の模式図、SEM像および走査型超音波顕微鏡像。

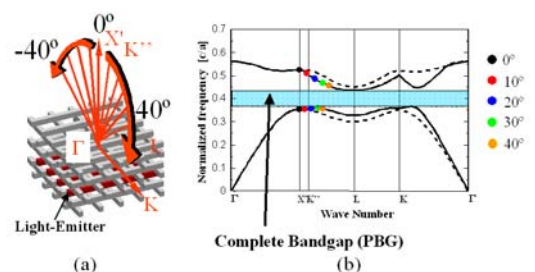


図23 (a)発光スペクトルの測定方向。(b)それぞれの測定角度とバンド図との対応関係。様々な角度から測定することで、完全PBG波長域を知ることができる。

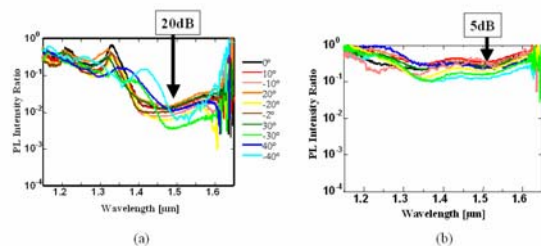


図24 様々な測定方向に対する発光スペクトル。(a)4+1+4構造(9層積層構造)の結果。(b)2+1+2構造(5層積層構造)の結果。

PL スペクトルを、参照領域(発光層をフォトニック結晶を形成していない平坦なGaAs層で挟み込んだ領域)のPL スペクトルで規格化したものを図 25(c)に示す。また比較のため、それぞれのスペクトルにおいて、欠陥を形成していないフォトニック結晶領域(完全結晶部分)を上述の参照領域で規格化したものも合わせて示している。同図において、欠陥領域の発光スペクトル(赤線)と、欠陥の無い領域のスペクトル(黒線)を比較することで、全ての欠陥部分において、欠陥に起因する明確な発光が見られることが分かる。さらに、各欠陥領域のスペクトルを比較すると、欠陥の大きさが大きくなる((vii)→(i)となる)に従って、広い波長域において、欠陥部分と完全結晶(PC)部の発光強度の差が大きくなり、ブロード発光が現れるようになる。これは、欠陥の大きさの増大とともに、発光に関与するモード数が増加し、これらのモードに応じた様々な発光スペクトルが重なりブロード化することを意味する。ただ、ハッチを施した波長域においては、欠陥サイズの大きな(i)、(ii)等においても、ブロードな中でも、明確なピークが見て取れる。このハッチを設けた部分は、先に述べた完全バンドギャップが存在する波長域に相当し、それ以外の完全バンドギャップ外の波長域に比べて、光閉じ込め効果が強くなり、Q 値が向上し、ピークがよりはっきりするものと思われる。測定は、試料に垂直な方向([100]方向)について行っているため、ハッチをつけた部分以外にも、[100]方向にはストップバンドが存在するが、より発光のピークがはっきり見られるのは、完全バンドギャップに相当する部分であると思われる。さらに、特徴的なのは、その

大きさが波長程度の極微小欠陥(vi)、(vii)においても、明確なスペクトルが見られることであり、このような小さな欠陥においては、2+1+2 構造では、発光スペクトルが観測出来なかったものである。4+1+4 構造により初めて観測出来たのは、層数が倍増することにより、フォトニック結晶による光閉じ込め効果が大きくなったことが最大の要因と考えられる。これらの発光ピークの半値幅から、Q 値は、100~200 程度と見積もることが出来る。一方、理論的には、図 26 に示すように、4+1+4 構造においては、Q 値は、欠陥の大きさ(横軸に欠陥の長さを周期で規格化したもの)が取られている)にあまり依存せず、ほぼ、100~200 程度となっており、実験結果は、理論と良く一致することが分かる。また、同図より、層数を 8+1+8 構造とすると、Q 値は、5000 近くの値が得られることが分かり、完全 3 次元光閉じ込め効果がより大きくなることが期待される。

点欠陥共振器の効果をさらに確実に評価するために、発光強度のマッピング測定を行った結果が図 27 である。フォトニックバンドギャップ波長外においては図 27(a)に示すように欠陥を形成した領域、形成していない領域で一様な発光が得られており、発光強度には差は見ら

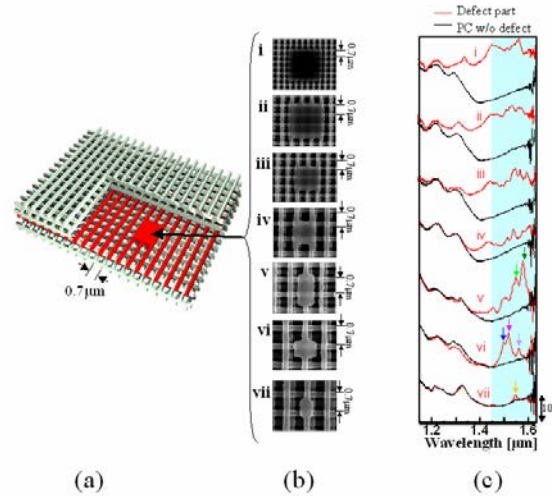


図25 (a)内部に導入した点欠陥の模式図、(b)各点欠陥のSEM観察像。(c)各欠陥部分のPLスペクトル。参照領域(フォトニック結晶をもたない発光部だけの試料)のPLスペクトルで規格化している。また比較のため、それぞれのスペクトルにおいて、欠陥のないフォトニック結晶領域(完全結晶部分)を参照領域で規格化したものも合わせて示している。

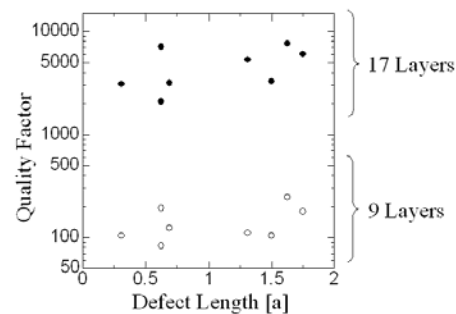


図26 9層積層構造と、17層積層構造について、様々な大きさをもつ点欠陥のQ値の計算結果。

れていないのが分かる。一方、フォトニックバンドギャップ内の欠陥モードに対応する波長では、図 27(b)に示すように点欠陥を形成していない領域では発光が抑制されているのに対して、点欠陥領域においてのみ明るい発光が見られていることが分かる。発光領域の大きさは $2\mu\text{m}$ 程度であり、これは測定に使用した顕微測光測定システムの空間分解能で決定されていると考えられる。この結果は、発光体からの自然放出が、点欠陥を形成していない領域ではバンドギャップによって抑制されているのに対して、点欠陥領域では点欠陥モードによって増強されていることを明確に示していると考えられる。

次に点欠陥共振器の詳細な発光特性評価として、これまで述べてきた試料表面に対して垂直な方向([100]方向)以外についても評価を行った。評価した方向の模式図、および点欠陥の SEM 写真を図 28 に示す。この図に示すように、垂直方向以外に Γ -K 方向に ± 40 度傾けて測定を行った。その結果、図 29 に示すように正方 1 周期欠陥においては、欠陥モードの共振波長は測定角度を変えても一定であり、また共振ピークの Q 値も変化しないことが確認できた。それに対して、図 30 に示すように縦長 1 周期欠陥の場合は、測定角度を 0 度から 40 度方向に変化させたときにピークの波長が変化しない、また Q 値が一定であるということは先の欠陥と同様であるが、 30 度、 40 度に傾けたときは欠陥ピークが観測されない、つまり縦長 1 周期欠陥では欠陥モードに放射角依存性があることが分かった。そこで、この原因について検討するために、3 次元 FDTD 法を用いて点欠陥から放射される光の放射角依存性を計算した。計算結果を図 31 に示す。この図から分かるように、縦長 1 周期欠陥の場合、 0 度方向に弱く放射されているが、 40 度方向にはほとんど放射されておらず、またメインの放射はさらに広角側に存在することが分かった。以上の結果より、観測されているピークは点欠陥における共振モードを反映した放射角依存性をもつことが明らかになった。以上の結果の一部は 2004 年 7 月に米科学誌サイエンスにも掲載され、完全フォトニックバンドギャップによる自然放出制御の実現として、大きな注目を集めた。

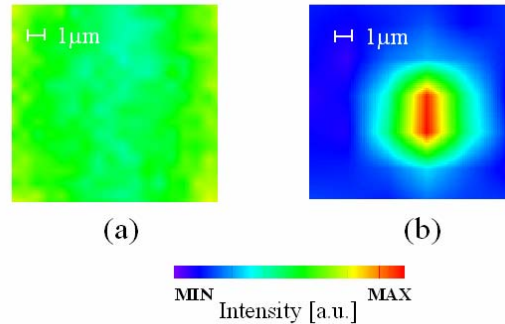


図27 発光強度の顕微測定結果。(a)フォトニックバンドギャップ外の波長、(b)欠陥準位に対応する波長でのマッピング結果。

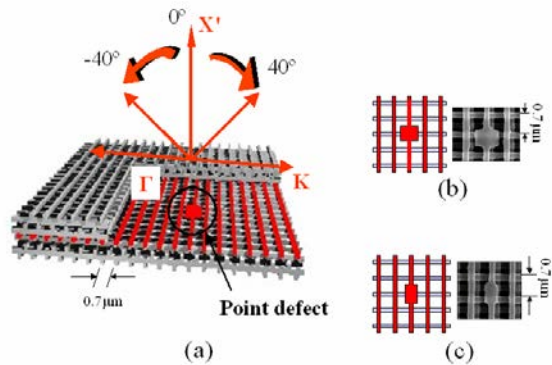


図28 (a)PLスペクトルの角度依存性の測定方法、(b)正方1周期欠陥($0.6 \times 0.6 \mu\text{m}^2$)の模式図とSEM像、(c)縦長1周期欠陥($0.6 \times 0.45 \mu\text{m}^2$)の模式図およびSEM像。

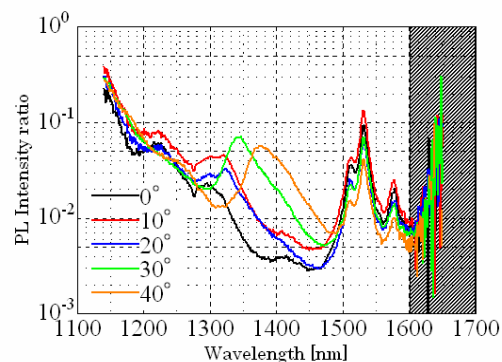


図29 正方1周期点欠陥共振器のPLスペクトルの角度依存性。参照領域(フォトニック結晶をもたない発光部のみ領域)のPLスペクトルで規格化している。斜線部は光検出器の測定感度外を表す。

これらの結果により、3次元フォトニック結晶の完全フォトニックバンドギャップによって、発光層の自然放出を制御できることを示した。さらに、強い光閉じ込め効果を実現するために、図32の模式図に示すような8+1+8層の計17層構造の作製にごく最近成功した。今後、本試料を用いて、どのような効果が得られるのかを評価していく予定である。

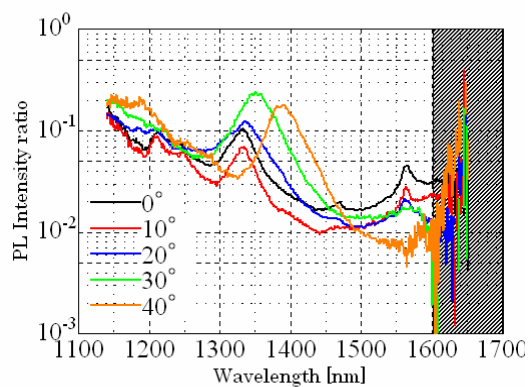


図30 縦長1周期点欠陥共振器のPLスペクトルの角度依存性。参照領域(フォトニック結晶をもたない発光部みの領域)のPLスペクトルで規格化している。

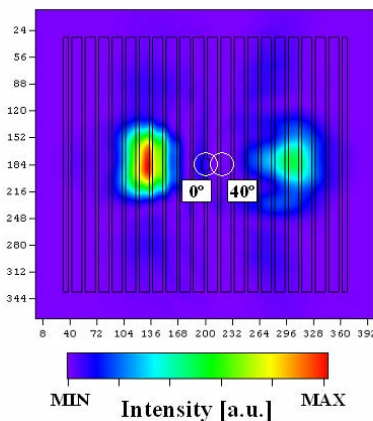


図31 縦長1周期点欠陥共振器からの光放射の計算結果。中央の白丸は、それぞれの角度における観測範囲を示す。

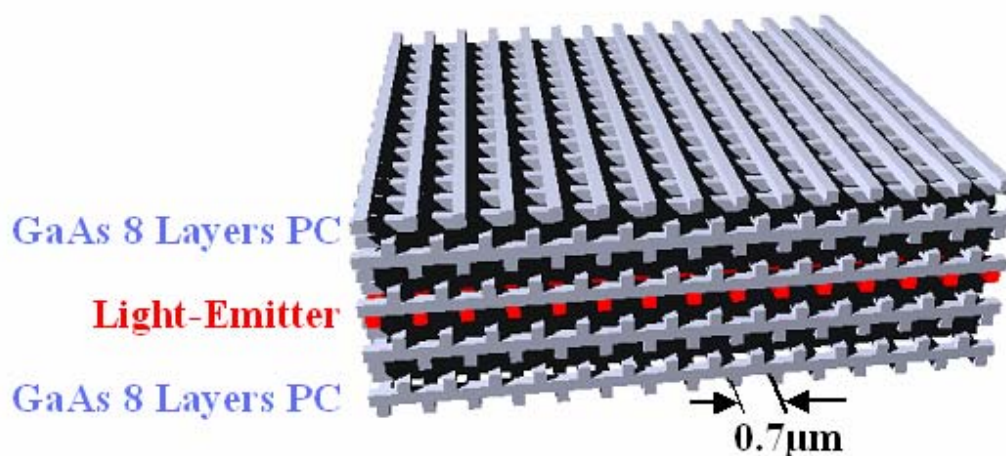


図32 発光層を中央に導入した17層積層構造の模式図。

C. 3次元フォトニック結晶による光伝搬制御

C.1：光通信波長域3次元フォトニック結晶線欠陥導波路の試作

これまでB.1～B.4において3次元結晶による発光の完全制御を目指した研究成果について述べてきた。これは、3次元結晶を用いた超小型光デバイス・回路において、発光部の実現の鍵となるものである。一方、光を伝播させるための導波路も、発光部と同様、欠くことの出来ない光エレメントである。そこで、光通信波長域において3次元フォトニック結晶導波路の作製を行い、世界に先駆けて3次元導波路での導波現象の観測に成功したので、以下その成果について述べる。

図33(a)は、作製した導波路の模式図を示す。3次元結晶の一本のストライプを太くことにより、欠陥導波路としたものである。上記と同様に、GaAsストライプを積層することにより、全部で9層構造を作製した。この場合は、発光層を含めないため、欠陥層は、まわりのフォトニック結晶層と同じGaAsストライプを用いている。その一本のストライプの幅をまわりに比べて大きくしている。図33(b)は、4層フォトニック結晶に導波路を含む1層のGaAsストライプ層を融着した全部で5層状態での表面SEM写真を示す。また、図33(c)は、完成後の結晶の断面SEM写真を示す。以上の図から、3次元フォトニック結晶導波路が形成出来ていることが分かる。

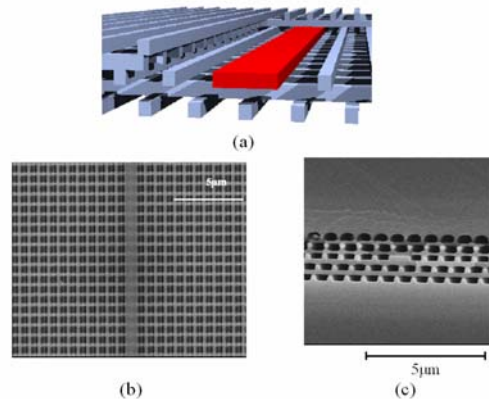


図33 (a)作製した導波路の模式図。(b)4層3次元フォトニック結晶に導波路層を積層した際の平面SEM像。(c)完成後の結晶の断面SEM像。

この試料の端面から、様々な波長のレーザ光を入射させて、そのときに導波路を伝搬する様子を試料上側から観測した様子を図34に示す。この図より分かるように、導波路部分においてのみ、レーザ光がフォトニック結晶内部に侵入しており、光が伝搬している様子が見て取れる。さらに、入射させる光の波長によって導波路を伝搬する長さが異なっていることが分かる。この理由について検討するために、作製した導波路のバンド構造との対応を検討した。図35が導波路のバンド構造を計算した結果であり、試作した導波路では多数の伝搬モードが存在することが分かる。

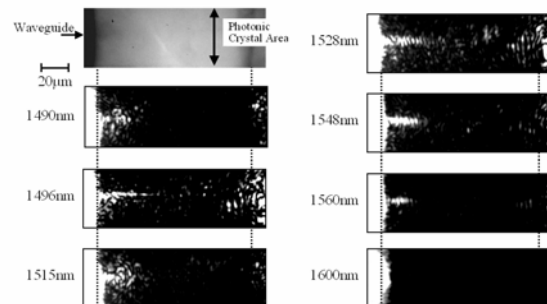


図34 試料の顕微鏡写真および様々な波長の光を導波路端から入射させ、導波路を伝搬する様子を試料上方より赤外カメラで観察した結果。

図34では、試料垂直方向から伝搬の様子を観測しているため、図35において灰色で覆った領域に対応する波数の光はGaAsと空気の界面で全反射されて観測できない。つまり、今回観測された導波は、図35で左側の領域に存在する導波モードに対応することになる。次に、各モードにおいて導波路を伝搬する長さ L を考えてみると、 $L = -Qv_g/\omega \ln T$ で表される。ただし Q は導波モードの Q 値(閉じ込めの強さ)、 v_g は群速度、 ω は周波数、 T は透過率である。すなわち、伝搬距離 L は群速度 v_g に比例することが分かる。このことから考えると、バンド構造において、傾きの小さいバンドは群速度が小さいため伝搬距離が短くなり、伝搬は観測されにくく、一方傾きの大きいバンドは群速度が速く伝搬距離が長くなり観測されやすいと考えられる。このことから考えると、今回観測された導波は図35において赤線で示したバンドに対応すると考

えられる。そこで3次元FDTD法を用いて、このバンドにおける伝搬距離の波長依存性を計算し、実験結果と比較した。図36(a)は計算の際に仮定した構造の模式図であり、実際の試料と同様、9層積層フォトニック結晶の中央に導波路が存在しその外側にはGaAs基板が存在する。Z方向の境界条件には完全吸収境界(PML)を仮定し、XY面内については周期境界条件を用いた。計算によって得られた伝搬距離と、図34に示した実験結果より見積もられた伝搬距離を重ねてプロットしたものを図36(b)に示す。この図より分かるように計算結果と実験結果では傾向が一致しており、このことから、観測された光は、先に述べたように図35のバンド構造において赤色で示した導波モードに対応していることが確認できた。このように3次元結晶において、光通信域で導波の様子を明確に示した結果は、これが世界で初めてである。

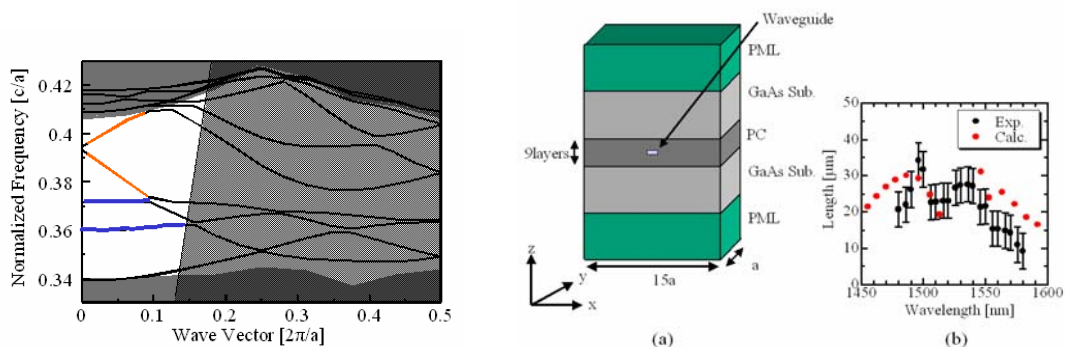


図35 試作した導波路のバンド構造の計算結果。図中、影の領域は、今回の測定では観測できない領域を表す。また青線で示した傾きの小さいバンドは、群速度が遅く伝搬が観測しにくい。一方、赤線で示した傾きの大きいバンドは群速度が速く、伝搬が観測しやすい

図36 伝搬距離の理論計算結果。(a)計算に用いた構造の模式図。(b)計算結果と実験結果を同一のグラフ上にプロットしたもの。

C.2 : 3次元フォトニック結晶導波路の伝搬損失の理論解析

3次元フォトニック結晶においては、フォトニックバンドギャップで全方位に渡る光閉じこめを行っているため、2次元フォトニック結晶などでは実現が困難な、伝搬部を空気とする空気導波路なども実現可能である。しかしながら、我々が試作しているストライプ積層型3次元フォトニック結晶においては、2次元面内の周期数は容易に増やすことが可能であるが、ストライプ積層方向の周期数は積層回数によって決定される。そこで、導波路として用いる際に実際に必要となる積層数を知るために、数値解析による伝搬損失の見積もりを行った。

導波路としては、図37に示すような3次元フォトニック結晶を構成するストライプを1本除去した空気欠陥導波路を仮定した。図38はバンド構造の計算結果であり、規格化周波数で0.385~0.43の広い帯域に渡る単一モード導波路であることが分かる。この空気導波路において、導波路層上下に積層するフォトニック結晶の積層数を変えた場合の透過率を3次元FDTD法で計算した。図39が計算結果であり、導波路層の上下に存在するストライプ層数を片側3周期(全体で7層)から片側6周期(全体で13層)の4種類の場合において、様々な長さの導波路($L=20a \sim$

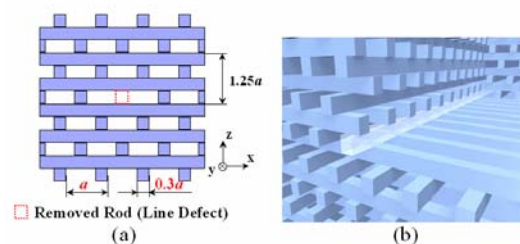


図37 計算した空気導波路の(a)断面、および(b)斜め方向からみた模式図。中央のストライプ1本を除去した領域が導波路として機能する。

160a, a は格子間隔)を伝搬した後の透過スペクトルの計算結果を示している。この図を見ると、規格化周波数で 0.42 より高周波数側では、上下に積層したフォトニック結晶の積層数に関係なく高い透過率が得られていることが分かる。これはこの周波数域では導波モードが図 38 中の空気ライトラインより下側になるため、フォトニックバンドギャップ効果によって導波路層に閉じ込められて伝搬するのではなく、フォトニック結晶表面での全反射で光閉じ込めが生じ、これによって高い透過率(すなわちロス無く伝搬している)が得られていることに注意が必要である。一方、規格化周波数で 0.42 以下の低周波数側では、空気ライトラインより左上になるため、純粋にフォトニックバンドギャップによる閉じ込め効果によって伝搬することになる。この周波数域では、積層数が少ない場合(図 39(a))は、導波路長 L を長くするに従って、透過率が減少しており、伝搬損失が大きいことが分かる。一方、図 39(a)→図 39(d)と積層数を増やすに従って、透過率の伝搬距離依存性がどんどん小さくなり、片側に 6 層(全体で 13 層)積層した図 39(d)の場合には、伝搬距離を長くしても透過率はほとんど変化が見られない、つまり伝搬損失が非常に小さいことが分かる。この計算結果より求めた、透過バンド全域にわたる平均伝搬損失を図 40 に示す。図中、Air はフォトニック結晶の上下が空気クラッド層の場合、GaAs はフォトニック結晶の上下が GaAs クラッド層の場合の計算結果を示す。この結果から分かるように積層数を増やすに従って伝搬損失が指数関数的に減少し、導波路上下に 6 層ずつフォトニック結晶を積層すれば 1dB/mm 以下という、超小型の光回路で用いるに十分な低損失伝搬が期待できることが分かった。

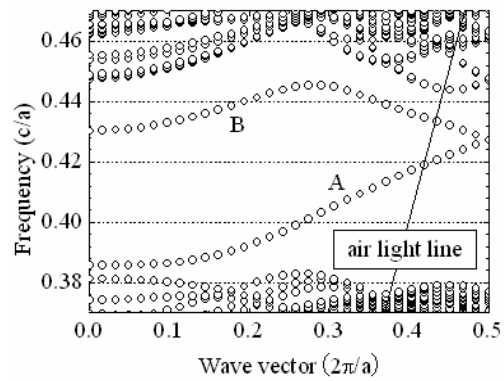


図38 3次元フォトニック結晶空気導波路の分散関係。図中においてA、Bで示したモードが導波モードである。

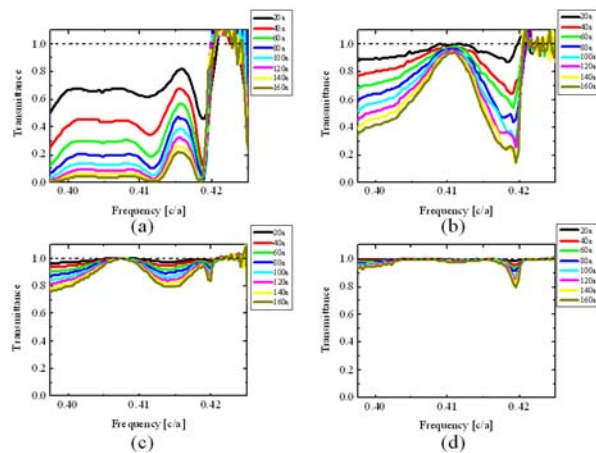


図39 導波路層の長さを変化させたときの透過スペクトルの計算結果。フォトニック結晶の上下には空気クラッド層を仮定している。(a)～(d)では、導波路層を挟み込むフォトニック結晶層の層数を変えて計算しており、それぞれ(a)3層(導波路層を含めて全体で7層積層構造)、(b)4層(同、9層積層)、(c)5層(同、11層積層)、(d)6層(同、13層積層)に対応する。この図より、6層(全体で13層積層)で、波長や距離にほとんど依存しない平坦な透過特性が得られることが分かる。

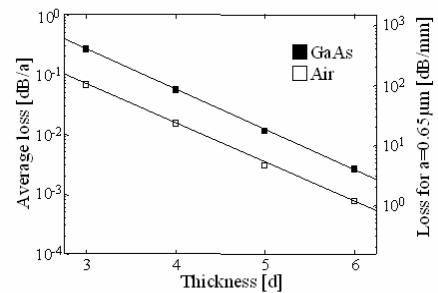


図40 伝搬損失の積層数依存性の計算結果。横軸は1層の厚さで規格化しており、積層数を表す。フォトニック結晶導波路の上下が空気クラッド層の場合(□)と、GaAsクラッド層の場合(■)のそれぞれについて計算した結果を示している。

C.3：新しい3次元フォトニック結晶導波路の設計—面内型光導波路—

これまで、3次元フォトニック結晶導波路として、図41(a)に示すように誘電体を付加した場合と、図41(b)のように誘電体を除去した場合について検討を行ってきた。図41(a)の誘電体導波路構造では、導波路部分が高屈折率材料であるため、モードフィールドが小さいという特長を有するが、マルチモード化しやすく、広いシングルモード帯域が得られないという問題があった。一方図41(b)の空気導波路は、広いシングルモード帯域を容易に得られるが、導波路が屈折率の低い空気であるためモードフィールド

が大きいという課題があった。そこで、さらに進んだ構造として、図42に示すように誘電体の追加と除去を同時に行うことで、広いシングルモード帯域をもち、かつモードフィールドの小さい新しい導波路構造を実現することに取り組んだ。具体的には、図42(a)に示すように、シングルモード帯域が広い空気導波路構造をベースとして、その上下に誘電体を追加した構造を理論的に検討した。図43(a)~(h)は、空気導波路の上下に追加する誘電体の太さを変えた時のバンド構造を計算した結果であり、誘電体の追加によって導波モードが低周波数側にシフトし、新たな導波モードが高周波側からバンドギャップ内に現れてくる様子が分かる。追加する誘電体の幅が $0.3a$ の場合には、図43(h)に示すように従来の空気導波路よりもさらに広い帯域、ほぼ完全バンドギャップ波長全域をカバーする単一の導波モードが存在することが分かる。この導波モードの電磁界分布を計算した結果が図44(c)、(d)であり、従来の空気導波路の計算結果(図44(a)、(b))と比

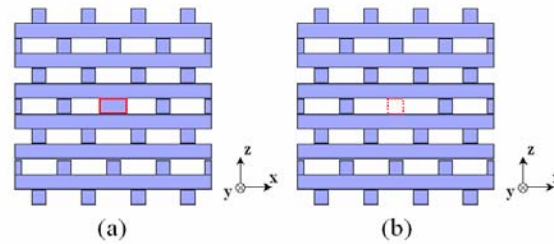


図41 3次元フォトニック結晶への線欠陥導波路導入方法の模式図。(a)誘電体を付加する方法、(b)誘電体を除去する方法。

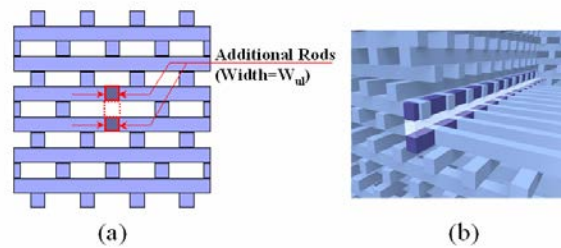


図42 (a)新たに設計した導波路構造の模式図。中央の誘電体を除去しつつ、その上下に誘電体を追加している。(b)導波路構造を斜め方向から見た模式図。

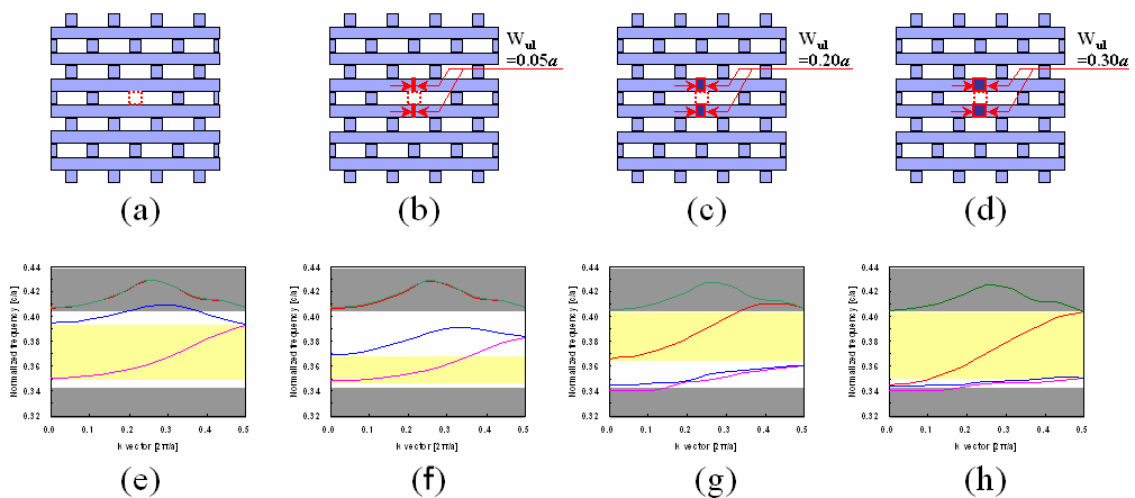


図43 (a)~(d)上下に追加する誘電体幅を変えた導波路、(e)~(h)それぞれの誘電体幅におけるバンド構造の計算結果。薄黄色で塗りつぶした領域はシングルモード帯域を表す。

較すると、今回設計した構造では、電磁界が中央の狭い領域に集中していることが分かる。もっとも電磁界が集中している部分は、空気の部分であり、基本的には空気導波路であることが分かる。これらの結果より、従来よりも帯域を広くしつつ、モードフィールドが小さい導波路を設計することができた。

次に、図 45(a)に示すように、先に設計した構造を元に、もっとも電磁界が集中する部分に誘電体を追加することで、誘電体導波路の設計にも取り組んだ。図 46(a)～(h)は、中央部分に追加する誘電体の幅を変化させたときのバンド構造の計算結果である。追加する誘電体の幅を広くするにつれて導波モードが低周波数側にシフトし、新たな導波モードが現れていることが分かる。誘電体の幅が $0.25a$ の時に図 46(h)から分かるようにシングルモード帯域が最も大きくなっている。このときの電磁界分布を見ると、図 47(a)、(b)に示すようにやはりモードフィールドが小さく、かつ電磁界は誘電体部分に集中しており、誘電体導波路として機能することが分かる。

これらの結果より、空気導波路・誘電体導波路の両方において、シングルモード帯域が広くかつモードフィールドが小さい導波路構造を設計することが出来た。これらの新しく設計した導波路構造において、注目に値するのは、単に単一モード帯域が広いだけでなく、(i)導波路を構成する3層の内、中心の1層に誘電体が存在する・しない、という違いによって空気導波路と誘電体導波路を作り分けることができること、(ii)図 47 から分かるようにいずれの導波路もモードフィールドが同程度であるためこれら空気導波路

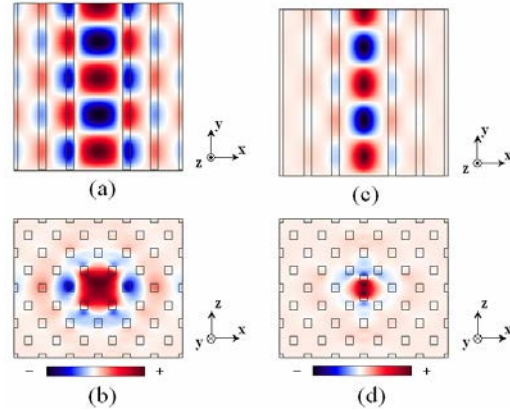


図44 従来の空気導波路の電磁界分布の計算結果(a)XY面内、(b)XZ面内。および新たに設計した導波路の電磁界分布の計算結果(c)XY面内、(d)XZ面内。

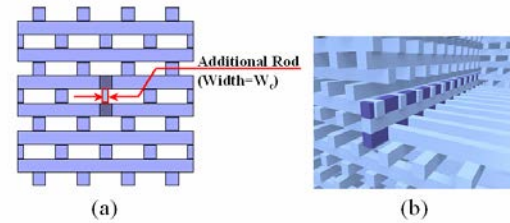


図45 (a)図42の導波路において、中央に誘電体を付加した導波路構造。(b)斜め方向から見た模式図。

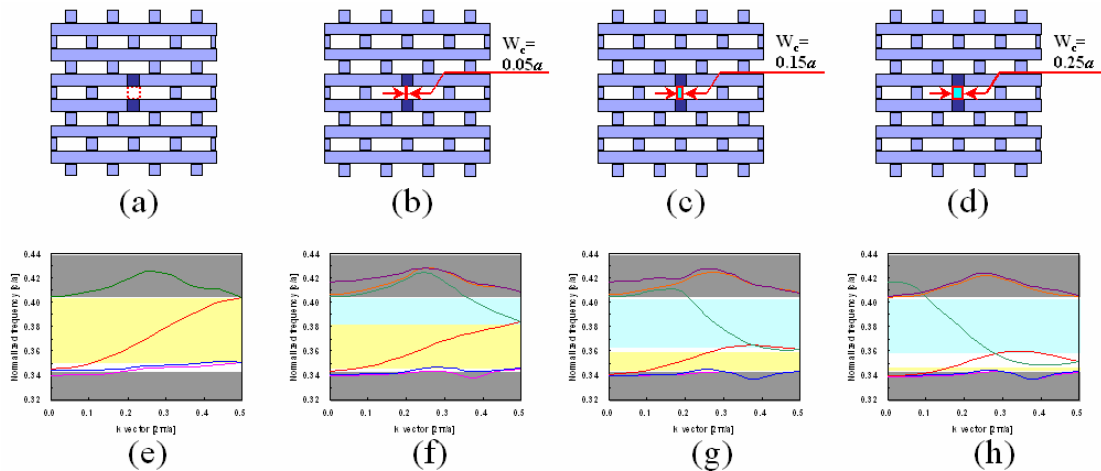


図46 (a)～(d)中央に付加する誘電体幅を変えた導波路構造、(e)～(h)それぞれの誘電体幅における導波モードの計算結果。薄黄色・水色で塗りつぶした領域はシングルモード帯域を表す。

と誘電体導波路を接続した場合の結合効率も高いと期待されること、(iii)より狭い領域に光が閉じ込められているため従来の空気導波路に比べて少ない積層数で低損失伝搬が期待できること、などである。

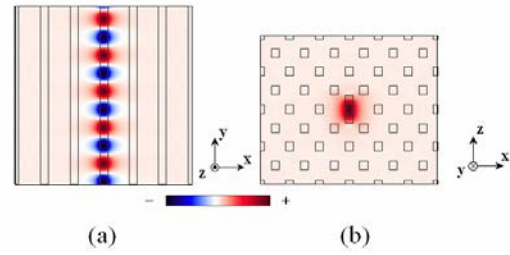


図47 新たに設計した誘電体導波路の電磁界分布の計算結果(a)XY面内、(b)XZ面内。

C.4：新しい3次元フォトニック結晶導波路の設計—垂直型光導波路—

これまで、ストライプ積層型 3 次元フォトニック結晶を用いて、ストライプの存在する面内の導波路構造の検討を行ってきたが、垂直方向の導波路を用いれば立体的な光回路への展開も可能となり、さらなる高機能化・高集積化が期待される。そこで、ストライプ積層方向の垂直型光導波路構造についても検討・設計を行った。

まず単純な構造として、ストライプ積層方 3 次元フォトニック結晶の 1 周期(4 層積層構造)の中の 1 層のみに欠陥を導入した場合について検討を行った。その結果が図 48 であり、図 48(b)のバンド構造をみると、完全フォトニックバンドギャップ中に単一モードではあるが帯域の狭い導波モードが形成されることが分かる。帯域幅を広げるためには、複数層に欠陥を導入することが考えられ、そこで 1 周期(4 層)の中の 2 層に欠陥を導入した場合について計算を行った。計算した構造の模式図とバンド構造の計算結果を図 49 に示す。図 49(b)のバンド構造の計算結果から分かるように、欠陥を多層化することによって帯域は広がるものの、モードが複数生じ、マルチモード化することが分かる。そこで欠陥位置のファインチューニングを行った結果、図 50(a)に示すように半導体ストライプの交差のない位置に欠陥を配置することにより、図 50(b)のバンド構造から分かるように面内空気導波路とほぼ同程度の単一モード帯域を有する垂直導波路が実現できることがわかった。

この垂直導波路を前述の面内導波路と組み合わせることで、超小型光回路から光を垂直方向に取り出す・導入する、あるいは回路

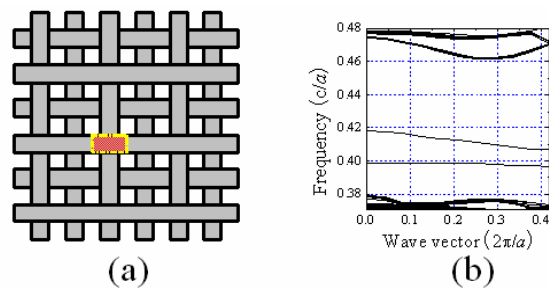


図48 (a)1周期(4層)の内、1層に誘電体を付加した導波路構造。赤い部分が誘電体を導入した箇所を表す。(b)導波モードの計算結果。

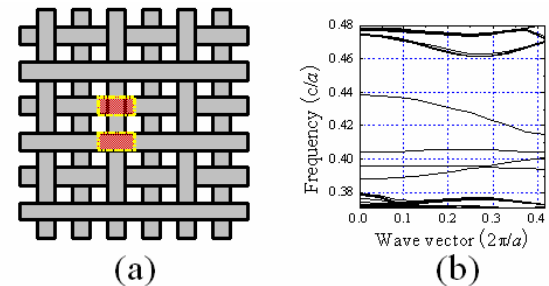


図49 (a)1周期(4層)の内、2層に誘電体を付加した導波路構造。赤い部分が欠陥を導入した箇所を表す。(b)導波モードの計算結果。

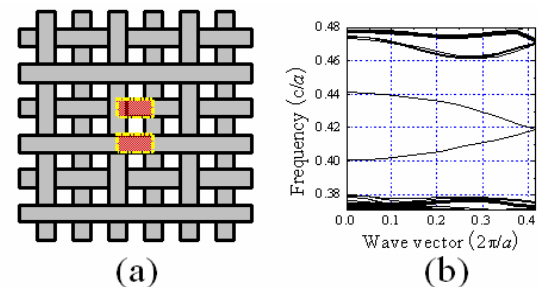


図50 (a)欠陥位置をファインチューニングした導波路構造。誘電体は1周期(4層)の内の2層の赤色で示した位置に付加されている。(b)導波モードの計算結果。

内に多層光配線を形成し、それらの間を垂直導波路で接続する、などへの発展が期待される。

D. 新たな展開

D.1 : 2次元フォトニック結晶スラブによる自然放出制御

究極的な自然放出制御を実現するためには、上述の通り全方向に対する完全バンドギャップを有する3次元フォトニック結晶が必要不可欠である。一方、3次元に比べて作製が容易な2次元フォトニック結晶では、フォトニックバンドギャップは2次元面内方向の光に対してのみ作用し、上下方向には作用しないため、上下方向への放射(漏れ)モードが発生する。しかしながら、3次元フォトニック結晶による自然放出制御の研究を進めていく中で、2次元面内にしかバンドギャップを有しない2次元フォトニック結晶に置いても、図51に示すような半導体の上下を空気で挟み込んだスラブ構造を形成し、漏れモードが存在する上下方向については、屈折率差による全反射を用いた光閉じ込めを利用すると、擬3次元的な光閉じ込めが実現され、上下方向の漏れモードを最小限に抑え、PBGによる自然放出制御が可能であることが明らかになった。以下では、この2次元フォトニック結晶スラブによる自然放出制御について述べる。

自然放出は真空場の揺らぎによって生じ、所謂弱結合状態においては、自然放出レート(R_{spon})はフェルミの黄金律によって与えられ、場における光の状態密度数によって決定される。そのため、自然放出を制御するためには、光の状態密度を意図的に操作する必要がある。実験では、図51に示すように単一量子井戸を埋め込んだ2次元フォトニック結晶スラブを作製した。このような薄い2次元フォトニック結晶における光のモードは、A)上下方向の屈折率差による全反射によって光が2次元面内に閉じ込められる「スラブモード」と、B)全反射条件を満足せず、スラブ外部に放射される「放射モード」の2つに分けることができる。励起された電子・正孔対が量子井戸で発光再結合する際は、これらスラブモード・放射モードのいずれかに結合することになり、自然放出レート R_{spon} はスラブモードの自然放出レート R_{slab} と放射モードの自然放出レート R_{vertical} を用いて、 $R_{\text{spon}} = R_{\text{slab}} + R_{\text{vertical}}$ と表すことができる。図に示すような半導体スラブにおいては、高い屈折率をもつ半導体が、低い屈折率をもつ空気で挟まれているため光はスラブ内に強く閉じ込められ、 $R_{\text{slab}} \gg R_{\text{vertical}}$ と考えることができる。よって、量子井戸からの自然放出光は主にスラブモードに結合すると考えられる。一方、このスラブに2次元フォトニック結晶を形成した場合は、2次元面内のフォトニックバンドギャップによって面内の光の状態密度が減少するため、 R_{slab} が大幅に減少すると考えられる。一方、放射モードは面内バンドギャップの影響を受けないため、 R_{slab} の減少に伴って R_{spon} が大幅に減少するものと考えられる。また、面内フォトニックバンドギャップによって、量子井戸からの自然放出光は主に放射モードに結合するようになると考えられる。

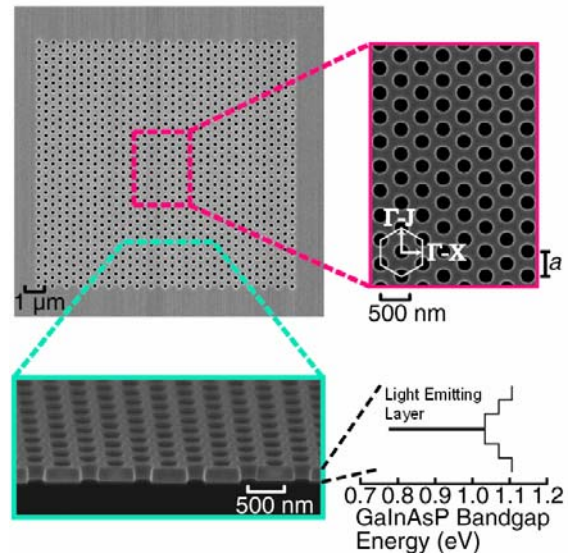


図51 2次元三角格子フォトニック結晶を形成した半導体(InGaAsP)スラブのSEM写真。格子定数aは300~500nmで円孔半径は0.29a、スラブ厚さは245nm。スラブの中央には単一量子井戸発光層が導入されている。

これによって、垂直方向に対して高い効率で自然放出が起こると考えら得る。これら、2つの効果、すなわち、「面内バンドギャップによってスラブモードへの自然放出が抑制され自然放出レート R_{spon} が減少する効果」と、「放射モードへの自然放出効率の増大の効果」が同時に生じると考えられる。これは、2次元フォトニック結晶によって、面内方向から、垂直方向へ光エネルギーの再分配が生じることを意味する。

この自然放出の抑制とエネルギーの再分配をより定量的に評価するために、フォトニック結晶を形成した場合と形成していない場合について、自然放出レートと垂直方向への放出の割合を3次元FDTD法によって計算した結果を図52に示す。図52(a)は自然放出レートの計算結果であり、フォトニックバンドギャップ波長域においては、バンドギャップ外の波長域に比べて、自然放出レートが約1/15に減少することを示している。それと同時に図52(b)に示すように垂直方向への自然放出の割合がバンドギャップ波長域においては、約15倍程度増加することが分かる。図52の上部の添付図には、これらの効果が図示されている。同図は、全方向への放射エネルギーが同一になるようにスラブの中央を励振した際の電界分布を示している。この図から、発光波長がフォトニックバンドギャップ外の場合には、先に述べた $R_{\text{slab}} \gg R_{\text{vertical}}$ によって、電子・正孔対のエネルギーは主にスラブモードに放射され、垂直方向に放射される割合は小さいのに対して、発光波長がフォトニックバンドギャップ内にある場合には、 R_{vertical} の値は変わらないにもかかわらず、面内バンドギャップによってスラブモードへの自然放出レートが大幅に減少するため、光エネルギーが垂直方向への放射モードに分配される様子が見て取れる。

この現象を実験的に評価するために、2次元フォトニック結晶の円孔三角格子の周期 a (図51右の拡大図参照) を $a=300\text{nm} \sim 500\text{nm}$ の範囲で、 10nm ステップで変化させたフォトニック結晶を同一ウエハ上に作製し、それらの発光特性を比較した。励起には波長 980nm 、パルス幅 2ps のTi:Sapphireレーザ光を用いた。励起条件としては、電子・正孔対が十分に供給される強励起条件 ($10\text{W}/\text{cm}^2$) と、図52の計算と同様に量子井戸においてTEモードでのみ再結合が起こる弱励起条件 ($0.5\text{W}/\text{cm}^2$) の2通りで行った。スラブの光吸収係数を $2 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$ とすると、励起される電子・正孔対の密度は $8 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ と見積もられる。測定は 4K において行い、励起された電子・正孔対の寿命を表す時間分解ス

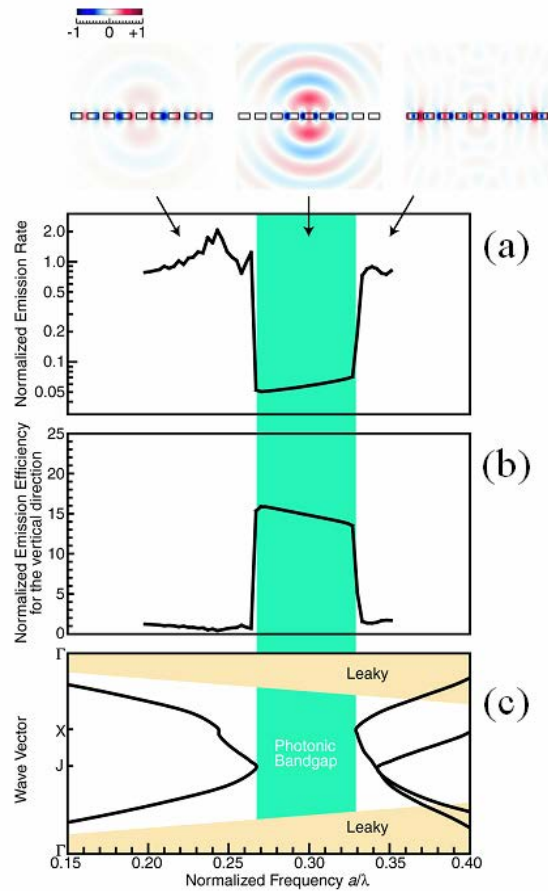


図52 2次元フォトニック結晶スラブにおける自然放出抑制とエネルギー再分配に関する3次元FDTD法による計算結果。InP基板上のフォトニック結晶を形成していない平坦なInGaAsP発光層を仮定した場合と比較している。半導体スラブの屈折率は3.27、厚さは $0.6a$ であり、基板のInPの屈折率は3.13、空気は1.0を用いた。(a)自然放出レートの周波数依存性の計算結果。(b)垂直方向への放射効率の周波数依存性の計算結果。(c)フォトニックバンド構造の計算結果。緑色で示した周波数 $0.267 \sim 0.330$ の周波数域がフォトニックバンドギャップに対応し、Leakyと表示した領域は全反射条件を満足せず垂直方向への漏れが生じる領域を表す。同図の上部には、発光がバンドギャップ内およびバンドギャップ外で起こる場合の電磁界分布の例が示されている。

ペクトルと、垂直方向への放出効率を表す時間積分スペクトルを測定した。得られた結果の代表的なものを図 53 に示す。

量子井戸の発光波長がフォトニックバンドギャップ波長域内にある場合 ($a=390 \sim 480\text{nm}$) は、図 53(b) に示すように $1/R_{\text{spon}}$ に対応する自然放出寿命が、フォトニック結晶を形成していない試料に比べて約 5 倍に増加していることが分かる。同時に、図 53(a) の時間積分スペクトルから分かるように、垂直方向への放射効率も増加した。一方、量子井戸の発光波長がフォトニックバンドギャップ外の場合 ($a=350\text{nm}$ および 500nm) は、自然放出寿命と垂直方向への放射効率はフォトニック結晶を形成していない領域と同程度であることが分かる。図 54 はこれらの結果を、格子間隔 a で規格化した規格化周波数を横軸に、自然放出寿命から求まる自然放出レート(図 54(a))と規格化した垂直方向への放射効率(図 54(b))を縦軸にしてまとめたものであり、2 次元フォトニックバンドギャップの効果が明確に現れている。量子井戸発光層の発光波長がフォトニックバンドギャップ内の場合には、バンドギャップ外の場合に比べて自然放出レートが $1/5$ に減少し、垂直方向への放射効率が増大していることが見て取れる。これら実験結果は、図 52 で示した理論計算結果と傾向が良く一致しており、自然放出の抑制とエネルギーの再分配を明確に実証できていることが分かる。

さらに定量的な評価として、得られた実験結果を、励起された電子・正孔対の非発光再結合を考慮してフィッティングを行った。非発光再結合には表面再結合・オージェ再結合などが考えられるが、表面再結合が主

であると考え、非発光再結合レート R_{non} が、量子井戸の体積 V_w とエッチングによって露出した量子井戸表面積 S_w に比例すると考えた場合、表面再結合速度を v_s 、円孔の半径を r とすると、非発光再結合レート $R_{\text{non}} = S_w/V_w \cdot v_s = 4\pi r v_s / (\text{SQRT}(3)a^2 - 2\pi r^2)$ と表される。最終的な再結合レート R_T は $R_T = R_{\text{spon}} + R_{\text{non}}$ で表される。測定結果は R_T に対応し、また垂直方向への放射効率も非発光再結合によって変化することになる。これらの仮定の下、様々な非発光再結合速度 v_s を用いて測定結果をフィッティングした結果、表面再結合速度として $1.2 \times 10^3 \text{cm/s}$ を仮定したときに計算結果と実験結果が良く一致することが分かった。この値は、量子井戸の材料である InGaAsP の室温における値の約 $1/10$ であり、試料を 4K まで冷却したことを考慮すると妥当な値であると言える。また、エッチング後の試料に表面処理を施すことによって、同程度の表面再結合速度を室温で得られる可能性もあり、また量子ナノ構造等を用いキャリアの 3 次元閉じ込めを行えば、表面再結合の影響は避けられると考えられる。この結果は、フォトニック結晶による自然放出の抑制とエネルギーの再分配を初めて明らかにしたものであり、1.2(1)でも述べ

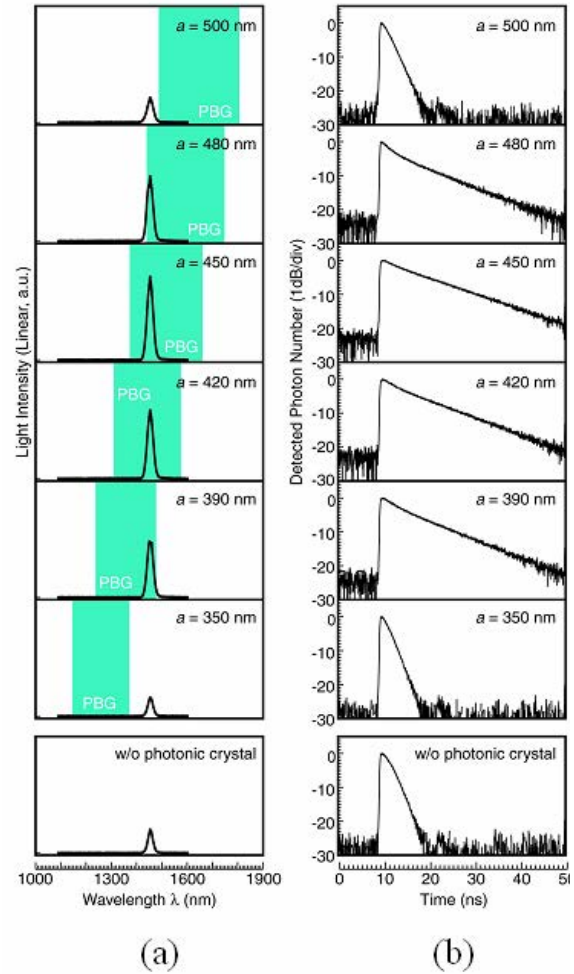


図53 2次元フォトニック結晶スラブにおける自然放出抑制とエネルギー再分配の実験結果。(a) フォトニック結晶周期を350～500nmの範囲で変化させた場合の時間積分スペクトルの測定結果。緑色で示した波長域がフォトニックバンドギャップに対応する。(b)それぞれの試料における時間分解PL測定結果。

たように、LED の外部量子効率の大幅な向上等、様々な光技術分野に革命をもたらす基礎となるものである。以上の結果は、米科学誌サイエンス2005年5月号に掲載され、大きな注目を集めた。

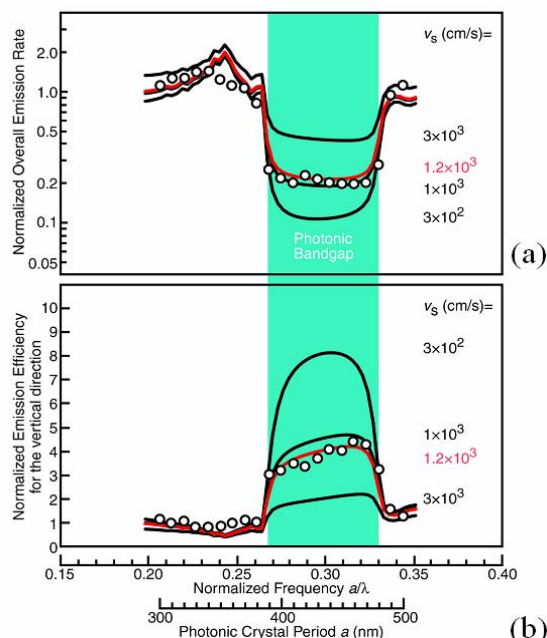


図54 実験結果(白丸)と様々な表面再結合速度を仮定した場合の計算結果(実線)を比較した結果。横軸は規格化周波数を表す。それぞれフォトニック結晶を形成していない試料の結果で規格化している。(a)規格化した自然放出レート、(b)規格化した垂直方向への放射効率。表面再結合速度 $v_s=1.2 \times 10^3 \text{ cm/s}$ と仮定した場合(赤色実線)に実験結果と計算結果がよく一致することが分かる。

D.2 : ナノメートル精度のウエハ位置合わせ装置の開発

本研究では、2次元周期構造を、精密位置合わせおよびウエハ融着法を用いて多層積層するという独自の方法で3次元フォトニック結晶を作製してきた。この際、重要なポイントとして、ウエハ同士の位置あわせが挙げられる。より高い精度の位置あわせを安定して実現するため本CRESTプログラムで新しい精密位置合わせ装置を導入し、いくつか位置合わせ方法の改善を試みた。

図55は、従来用いていた位置合わせ装置および位置合わせ方法の模式図である。簡単に従来の方法を説明すると、2枚のウエハを数 μm 程度の間隔を開けて向かい合わせに位置させる。それぞれのウエハ表面には、図55(b)のような位置合わせ用の回折格子が形成されており、この回折格子にレーザ光を入射させ、回折パターンを観測すると、図55(c)のように2つの回折格子の相対位置に対応して回折スポットの明るさが変化する。そこでこの回折スポットをCCDカメラで観測し、所望のスポットが得られるように、下側の基板をピエゾステージでXY θ 方向に微調整し、位置合わせ終了後にZ方向に下側の基板を上げて2枚のウエハを接触させるというものである。ここで、注意すべき点として、本研究で目指す位置あわせの精度は、通常のマスクアライメントの精度1~2 μm の約1/10以下の0.1 μm という非常に高い精度である。このような高い精度を実現するために重要な点の1つが、いか

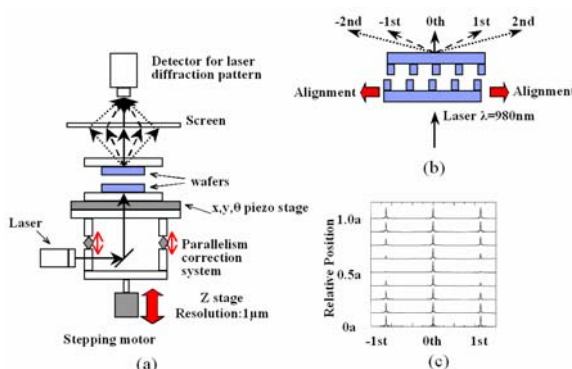


図55 (a)これまで使用してきた位置合わせ装置の模式図、(b)レーザ回折を用いたアライメント方法の模式図、(c)上下のストライプパターンの相対位置を変化させたときの回折スポット強度の計算結果。

に 2 枚の基板の間隔を狭くした状態で位置あわせを行うかということである。通常のマスクアライメントのように $10\mu\text{m}$ 以上の隙間をあけて位置あわせを行った場合、たとえ精度良く位置あわせができて、その後基板を Z 方向に移動させて接触させる際の XY θ 方向のわずかなズレが問題となる。この問題を避けるためには、できるだけ 2 枚の基板の間隔を狭くし、かつ両者が接触していない状態で位置あわせを行うことが必要である。このような観点に基づいて、新たなウエハ位置合わせ装置を開発した。図 56 は、新たに設計・開発した位置合わせ装置の模式図であり、従来の位置合わせ装置に比べて、

以下のような改良・改善を試みた。(i) 基板間隔をより細かく制御することを目指して Z 軸の移動分解能を従来の $1\mu\text{m}$ から $1/10$ の $0.1\mu\text{m}$ にした。(ii) 従来、ウエハ同士が接触したかどうかは、透過像のコントラストの変化など間接的な情報から判断しており、どの段階で接触したのかを正確に検知することが困難であった。そこで Z 軸内部に荷重センサーを導入し、ステージの Z 方向に加わる荷重をリアルタイムで測定することで、基板が接触したかどうかを直接的に検知できるようにした。(iii) ウエハ同士を接触させずに、近接させるためには 2 枚のウエハの間隔が面内で一定であること、つまりウエハ表面同士が平行であることが必要不可欠である。そこでウエハ表面同士の間での干渉スペクトルを測定することで、ウエハ同士の平行度を直接測定できるようにした。(iv) 従来の回折パターンを観察する方法では、ウエハ同士のズレの有無は容易に検知できるが、ズレの絶対量・向きを直接的に知ることができないという課題があった。そこで、アライメントマークを工夫することで、この課題の解決を試みた。

図 57(a) は 2 枚のウエハ同士を近づけていったときの荷重を測定した結果であり、Z ステージが $12.5\mu\text{m}$ の点を境にして荷重が急激に上昇していることが分かる。これは、この点において 2 枚のウエハが接触したことを意味しており、荷重センサーがウエハの接触ポイントを知る上で有効であることを示している。図 57(b) は干渉測定によってウエハ表面同士の間隔の面内分布を測定した結果である。測定を行った約 6mm 角の領域において、表面同士の間隔のばらつきは $0.6\mu\text{m}$ 程度と、 $1\mu\text{m}$ 以下の平行度が得られていることが分かる。この $0.6\mu\text{m}$ という値が、我々が要求するアライメント精度を達成するために十分な値かどうかについては、今後実際のアライメント結果と対応させていくこと

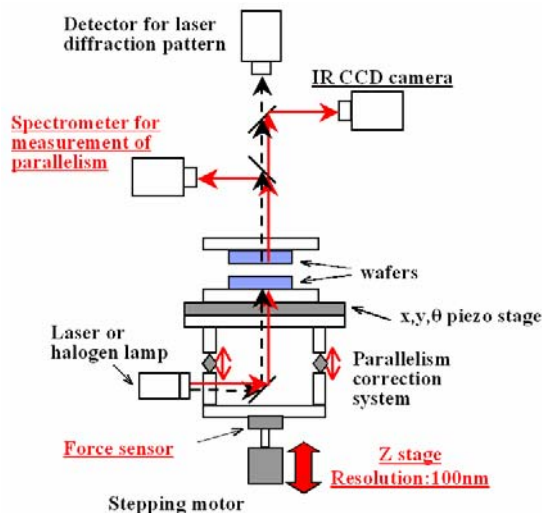


図 56 今回新たに開発した位置合わせ装置の模式図。

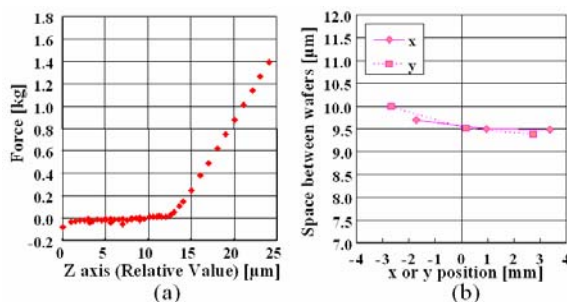


図 57 (a) ウエハ同士の間隔を狭くしていったときの荷重センサーの測定結果。(b) ウエハ同士の間隔の面内分布を測定した結果。

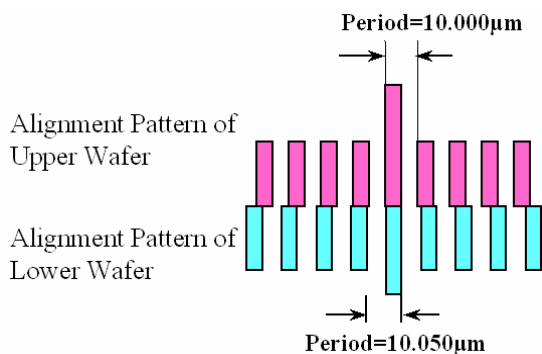


図 58 主尺・副尺を用いたアライメントマークの模式図。

で検討する必要があるが、今回、平行度を実測する手法を確立したことは重要であると考えている。図 58 は、新たに工夫したアライメントマークの模式図であり、2 枚のウェハに、周期が 50nm だけ異なるマークを形成し、主尺・副尺の関係を用いることで、ウェハ同士のズレの絶対量と向きを 50nm 単位で判別することができる。図 59 は、実際のアライメントマークの CCD 観察像であり、まず図 59(a)の左右両端に注目すると、右側に比べて左側の方が上下のマークのズレが小さいことが分かる。このことより、ウェハの相対位置がわずかに左側にずれていることが分かる。次にもっとも上下のマークが一直線に並んでいる箇所に注目すると、中央から左側の 2 本目が最も合っていることが分かる。このことよりズレの絶対量としては、 $50\text{nm} \times 2 = 100\text{nm}$ 程度であることが判断できる。図 59(b)は、ピエゾステージを動かして位置あわせを行った後の観察像であり、図 59(a)と比較すると、その違いは明らかである。このことは、GaAs 基板を透過した波長 $1\mu\text{m}$ 程度の光で観察しているにもかかわらず、波長の $1/10$ 以下、即ち 100nm 以下の精度で位置あわせが可能であることを意味している。この精密位置合わせ装置は、単に 3 次元フォトニック結晶の作製のみならず、任意の 3 次元構造物を高精度に実現するために有効であると確信している。

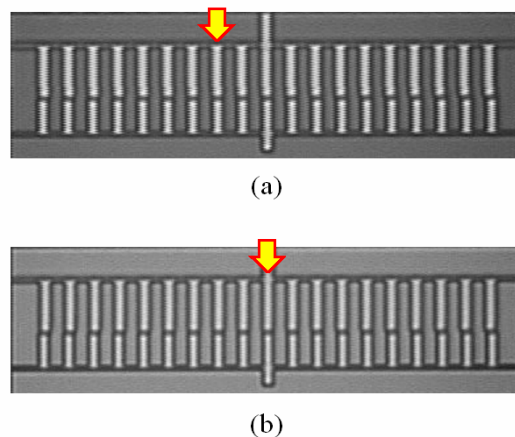


図 59 実際のアライメントマークの透過像を CCD カメラで観察した結果。(a) 上下のウェハで約 100nm ずれている場合、(b) 上下のウェハをアライメントした場合。

(2) 得られた研究成果の評価及び今後期待される効果

A. 類似研究の国内外の動向との比較

本研究と同じストライプ積層構造をもつ完全 3 次元フォトニック結晶の研究は、米国アイオワ大学アメス研究所、トルコ国ビルケント大学等で精力的になされているが、対象とする波長域が、マイクロ波領域に留まっているため、発光制御や光伝播制御、さらには、光チップへの展開は不可能である。また、理研・物材研を中心とするグループが、InP 系のストライプをマイクロマニピュレーションの技術を用いて積層し、3 次元結晶の作製に成功しているが、波長域がまだ $3 \sim 4\mu\text{m}$ 域に留まっているのと、作製出来る面積が $10 \sim 15\mu\text{m}$ 角程度と非常に小さなものに限られるのが現状である。他のアプローチとしては、3 方向からの光ビームをあてて、光の干渉を用いて有機材料に 3 次元結晶を作製する方法に、英国オックスフォード大学、大阪大学等が取り組んでいるが、屈折率コントラストがとれないため、完全ギャップをもつことが出来ないという問題がある。結晶の周りを高屈折率のもので埋めるという方法も検討されているが、なかなか良好な結晶が出来ていないのが現状である。その他にも、オーバルと呼ばれる自己形成的な研究が、世界各所でなされているが、同様の問題を抱えている。以上の客観的事実から、3 次元結晶とそれによる発光・光伝播制御の研究は、世界的にみて、本グループの研究水準が最も高い状況にあると言える。またこの研究を通じて、新たな展開として行うことになった、2 次元結晶による自然放出制御の研究においても、本グループが世界の一步先を走る水準にあると言える。世界各地の他のグループは、点欠陥(それほど高い Q 値をもつものではないが)を 2 次元結晶に導入し、単に、点欠陥モードで発光が見られたという報告に終始しているが、

我々は、より根本にさかのぼり、まず、点欠陥をもたない 2 次元結晶そのもので、面内方向への自然放出を抑え、蓄えたエネルギーを上下方向に用いるという極めてユニークかつ重要な成果を挙げることが出来た。

B. 成果の発表とそのインパクト等

本テーマに関する成果は、米科学誌サイエンス 2 編を含む 20 件の学術誌に掲載された。(これらのうち、代表的な論文 10 編の総被引用回数は、本事業開始直前に発表した重要論文 1 件を含めて、総計 300 件を超えており、本研究は、世界的な注目を集めていると言える)。さらに、解説記事・書籍等で 20 件の執筆を行うとともに、国際会議では 38 件(内、招待講演 21 件)、国内会議では 86 件(内、招待講演 23 件)の発表を行った。これらの成果は、国内外の新聞や雑誌等でも、数多く取り上げられた。特許出願に関しても 5 件程度行った。また、新たな展開として位置づけられる 2 次元結晶による自然放出の抑制と再分配効果の発見は、次世代の固体照明として期待される LED の高効率化にもつながるため、成果の発表後、多くの企業からの訪問を受け、技術移転の打診を受けるに至っている。

C. 波及効果

本研究により、フォトニック結晶を用いた自然放出の根本制御が実現可能であることが明らかになった。これは、場の制御により、不要な発光を一切許さず、真に必要な発光のみにエネルギーを集中させるという極めて理想的な状況が達成されたことを意味する。また、3 次元フォトニック結晶中における理想的な光伝搬制御技術に関する重要な知見を得ることが出来た。今後、これらの成果を発展させることにより、極めて高効率な発光デバイス(LED 等含む)の実現をはじめ、単一光子発生技術や強結合状態の形成など、量子通信・量子情報等の次世代の通信・情報処理のための基盤技術開発にも、貢献出来るものと考えられる。将来的には、点欠陥による極限的に高い Q 値をもつ光ナノ共振器と量子ナノ構造との結合体を 3 次元導波路を介して、複数個集積化し、互いに相互作用が出来るところまで、展開出来るようになると、固体光量子コンピュータの方向へも研究が進展するものと期待される。これらは、究極的な光の世界、光の本質へと向かうことになるため、学術的な価値は極めて高く、様々な分野への波及効果が期待される。

3.3 2次元フォトニック結晶と機能デバイス(I)ーフォトニック結晶レーザー

(1) 研究成果の内容

A. はじめに

A.1 : 本研究のねらい

上記「3 次元フォトニック結晶と光制御」の研究は、フォトニックバンド構造において、光の存在が禁止されるバンドギャップに注目したものであるが、一方、バンド端に注目すると、この点は、光の群速度が零、言い換えれば、様々な方向に伝搬する光が各種のブラッグ反射を通じて、結合し定在波状態が形成される点を与える。この定在波状態を共振器として用いることにより、大面積でのコヒーレント発振可能なレーザの実現につながる。その結果、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なレーザの実現が可能となり、従来の概念を越えた新しいレーザの実現が可能となると期待される。このアイデアは、研究代表者が、本プロジェクト開始前に世界に先駆けて提案したものである。本サブテーマでは、フォトニック結晶(2 次元結晶)のバンド端のレーザ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。

A.2 : 研究実施体制

本研究は、京都大学を中心として、ミノルタ、ロームといったの企業と連携しながら進めてきた。特に、発振モードの同定や、格子点形状制御によるレーザ特性の制御等、基本物理に関わる研究は、ミノルタと連携し、また閾値の低減等デバイスの特性向上に関しては、ロームと連携している。連携は非常にうまく行き、成果の一部は、米科学誌サイエンスに掲載されるに至っている。なお、研究従事者の詳細は 4.研究参加者に記す通りである。

B. 2次元フォトニック結晶レーザの発振原理と基礎特性

本研究では、まず研究代表者が提案した 2 次元フォトニック結晶レーザの詳細な発振特性を調べることで、狙い通り大面積コヒーレントなレーザ発振が実現できていることを実証することを目指した。

図 60(a)は、2 次元三角格子構造と呼ばれる 2 次元フォトニック結晶の模式図である。図中左下の 2 つの矢印は 2 次元三角格子構造の代表的な 2 方向を表しており、それぞれ Γ -X、 Γ -J と呼ばれる。なお図では示していないが、三角格子構造の 6 回対称性より、等価な Γ -X、 Γ -J 方向がそれぞれ 6 つ存在している。この結晶中を、 Γ -X 方向の周期と等しい波長をもつ光が、ある Γ -X 方向に伝搬する場合を考える。この場合図 60(a)左に示すように反対(180°)方向への回折においてブラッグ回折条件を満足しており、ブラッグ共振器が形成される。これは従来の 1 次元周期構造を用いた分布帰還型 (Distributed Feedback: DFB) レーザと全く同

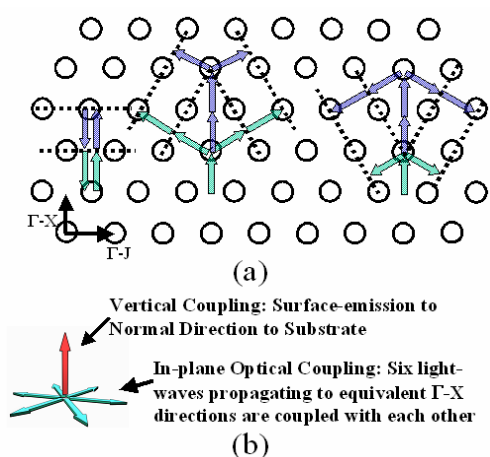


図60 (a)2次元三角格子構造におけるブラッグ反射の模式図。ある Γ -X方向に伝搬する光は、 180° 方向だけでなく、その他の Γ -X方向($\pm 60^\circ$ 、 $\pm 120^\circ$)に対してもブラッグ回折条件を満足し、結果として6つの透過な Γ -X方向が結合して2次元的なブラッグ共振器として動作する。(b)ブラッグ回折によって面内の6つの Γ -X方向が結合するとともに垂直方向にも回折される様子の模式図。

じ回折であり、特に目新しい現象ではない。一方図 60(a)中央や右に示すようにその他の Γ -X 方向($\pm 60^\circ$ 、 $\pm 120^\circ$)の方向に対してもブラッグ回折条件を満足することが分かる。つまり 2 次元ブラッグ回折によって 6 つの等価な Γ -X 方向が結合し合っ、全体として 1 つの共振器を形成することになる。これは従来の 1 次元周期構造では実現し得ない 2 次元周期構造を有する 2 次元フォトニック結晶特有の現象であり、これによって面内の電磁界分布が完全に規定される全く新しいレーザを実現することができる。さらにこのようなレーザにおいては、発振領域を大面積化しても単一のモードで発振することが可能であり、従来の概念を越えたレーザの実現が可能となる。またこの構造においては、ブラッグ回折によって図 60(b)に示すように垂直方向に光を取り出すことも可能であり、面発光レーザとして動作することも特長の一つである。このように、この 2 次元フォトニック結晶レーザは、単一縦横モードで大面積にコヒーレント発振できるという点で従来とは、根本的に新しいレーザ特性を提供するものと期待される。

図 61 は 2 次元三角格子構造のバンド図であり、図 60 で説明した共振点は図中の point III に相当する。この点以外にもブラッグ共振器が形成される点(図 61 中でバンドの傾きが零になるバンド端)が複数存在しており、図 61 付図に代表的なバンド端におけるブラッグ回折の方向を模式的に示してある。例えば point I では、前進波と後進波の結合のみが生じる。これは先に述べたように従来の 1 次元 DFB レーザと同じであり、3 つのブラッグ共振器が独立にレーザ発振し、2 次元的な光の結合によるレーザ発振は期待できない。point II では、3 つの Γ -X が 2 次元的に結合し、結果的に周回モード的な発振が生じると考えられるが、光が面内の 3 方向に出射されるため、光の取り出しに問題を生じると考えられる。一方 point IV では、6 つの方向が結合して point III と同様に 2 次元レーザ発振が可能であるが、上下方向へのブラッグ回折が模式図に示すように垂直以外の方向にも生じるため、光の取り出しに問題がある。これらより、我々は point III が 2 次元フォトニック結晶をレーザ共振器として用いる際に、最も好ましいバンド端であると言える。

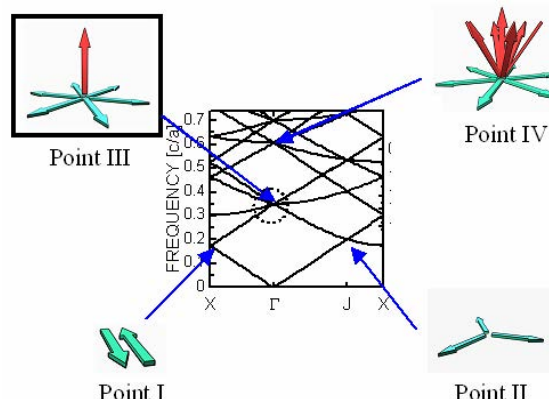


図61 2次元三角格子構造におけるブラッグ各バンド端におけるブラッグ反射の模式図。各バンド端で異なるブラッグ共振が生じることが分かる。

図 62 は実際に研究代表者等が試作したレーザの模式図である。このレーザは有機金属気相成長(MOVPE)法によって成長した多重量子井戸発光層をもつウエハ A と、表面に 2 次元三角格子構造を形成したウエハ B を、ウエハ融着法によって融着して作製している。具体的な作製方法は以下の通りである。まずウエハ B に電子線描画およびドライエッチングによって深さ $0.1\mu\text{m}$ の 2 次元三角格子構造を形成(図 62 付図に平面 SEM 写真を示す)した。次に 2 枚のウエハ表面を洗浄し、表面同士を重ね合わせて水素雰囲気中で $620^\circ\text{C}/30$ 分の加熱を行い、ウエハ同士を融着させた。その後ウエハ A 側の InP 基板を選択的にエッチング除去し、最後に円形電極(直径 $350\mu\text{m}$)を表面に形成した。なお発光層の発光波長 $1.3\mu\text{m}$ が図 61 のバンド端 III の周波数に一致するように 2

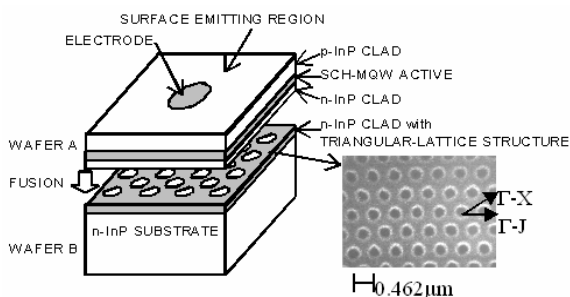


図62 作製したデバイスの模式図。付図は実際に作製した2次元三角格子構造の電子顕微鏡写真。

次元三角格子の周期を $a=0.462\mu\text{m}$ で設計している。

このデバイスは室温パルス条件で電流注入発振し、図 63 の近視野像に示すように大面積においてレーザ発振することが確認された。また図 64 に示す顕微分光測定結果より、大面積で発振しているにもかかわらず、先に述べた 2 次元フォトニック結晶における 2 次元的な光の結合を反映して、デバイス全面において同一波長かつ単一モードでレーザ発振していることが分かる。

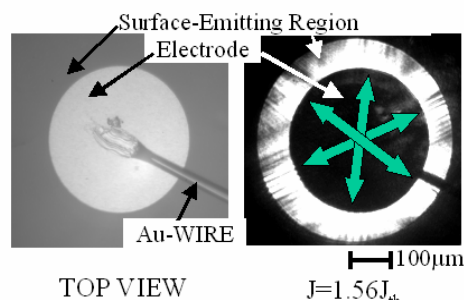


図63 作製したデバイスの顕微鏡写真と発振時の近視野像。電極上の6つの矢印は、等価な6つの Γ -X方向を表す。

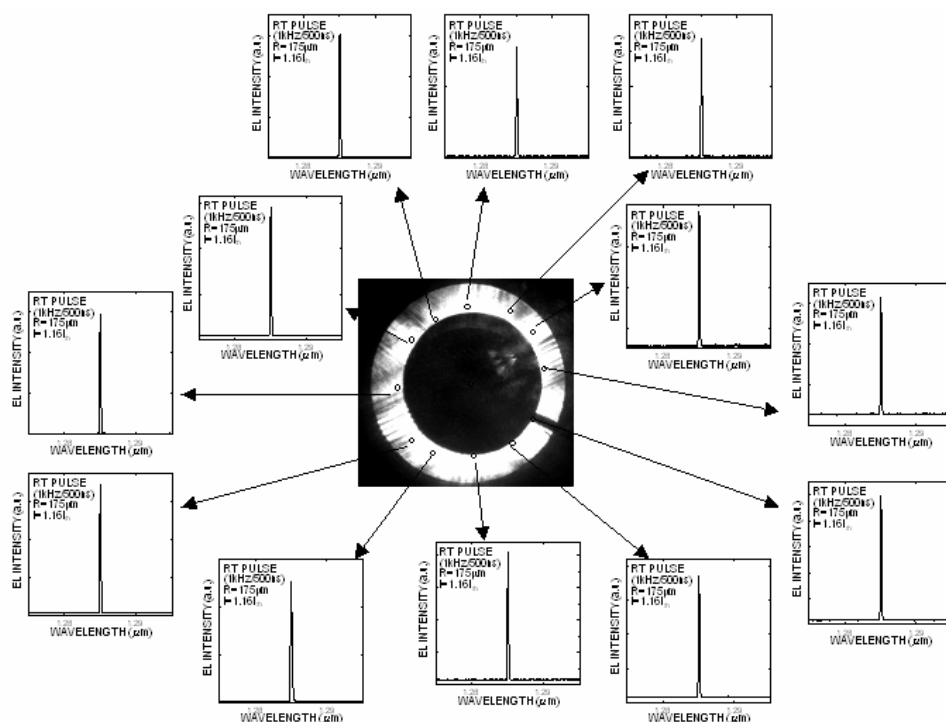


図64 近視野像の各領域における発振スペクトルの測定結果。

さらに詳細な検討として、2 次元フォトニック結晶のバンド構造を計算し、実験結果との比較を試みた。2 次元平面波展開法を用いて計算した、2 次元三角格子フォトニック結晶の Γ 点近傍のバンド図を図 65 に示す。同図より、レーザ発振は、縮退する 2 つのバンド端を含んで、全部で 4 つの点で動作しうることが示唆される。図 66 には、実際に実験的に、作製したいくつかのデバイスの発振波長を調べた結果を示す。同図より、発振波長は、4 つに分類出来ることが分かり、図 65 のバンド端 A-D と良く一致する。このことは、本レーザの発振がバンド端の定在波状態に起因していることを強く示唆する。さらに、より確実

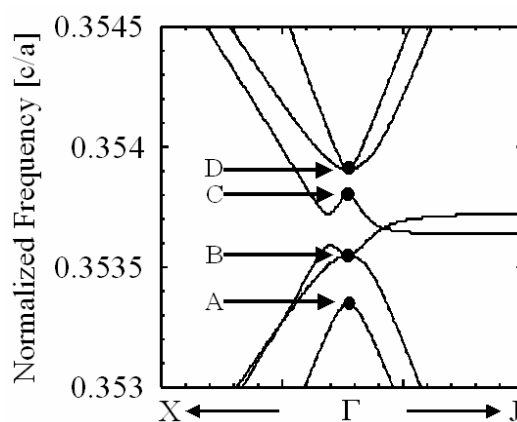


図65 本レーザを構成する2次元三角格子フォトニック結晶の Γ 点(折り返し点)近傍のバンド図

な理論・実験の対応を得るために、発振したデバイスの偏光特性を、対応するバンド端の発振モードがもつ偏光特性と比較した結果が図 67 である。図 67(a)には、図 65 におけるバンド端 A での電磁界分布の計算結果を示す。同図より、レーザの各部の電界は、接線方向を向くことが分かる。一方、実際にバンド端 A で動作していると思われるデバイスに対して、各部分での電界分布を実験的に測定した結果が図 67(b)であり、これらと比較すると、実験と理論の両結果は非常に良く一致することが分かる。この結果より、確かに、作製したレーザは研究代表者の提案になる原理(バンド端での定在波状態を利用したもの)で動作していることが分かる。

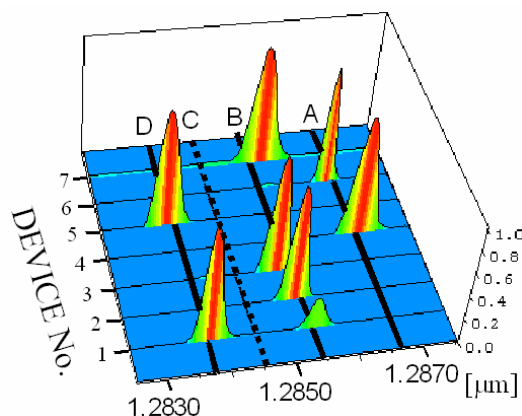


図66 作製したいくつかのデバイスの発振波長。

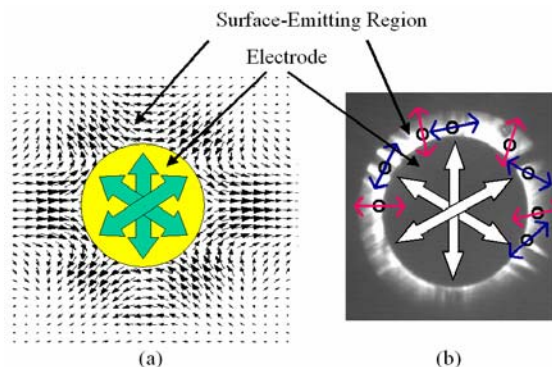


図67 (a)バンド端Aでの電磁界分布の計算結果。(b)実際にバンド端Aで動作していると思われるデバイスに対して、各部分での電界分布を実験的に測定した結果。

C. デバイス特性の向上

C.1 : デバイス構造の最適化による低閾値化

前項では、主に、フォトニック結晶レーザの基本特性の検討を行ってきたが、より詳細にレーザ作用の解明を行うとともに、このレーザを産業展開するためには、室温連続発振を達成することが不可欠である。前項のデバイスの閾値は2~3A程度と非常に高いものであるため、室温連続発振を実現するためには、数10分に1以下に閾値を低減することが重要である。ここで、先に述べたレーザ構造から以下の変更を行った。まず2次元フォトニック結晶の構造として、三角格子構造から、より単純な構造である2次元正方格子構造に変更した。発光層として、InGaAsP系多重量子井戸(発光波長1.3μm)から、より強い電子の閉じ込めが可能であり、発振閾値の低減が期待できるGaAs/InGaAs系歪み多重量子井戸(発光波長0.98μm)に変更した。

まず、閾値を低減するために、デバイス構造をどのような方針で変更するべきかを検討した。簡単な近似として、1次元周期構造を形成した分布帰還型(DFB)レーザを考えると、回折格子の結合係数 κ は、 $n_a^2 - n_b^2$ と Γ_g に比例する。ただし n_a 、 n_b は回折格子を形成する媒質の屈折率であり、 Γ_g は回折格子層に分布する光の割合である。発振閾値を決定する上で重要である、回折格子による反射率は κL で決まるため、より高い結合係数 κ を得ることができれば、共振器長 L をその分小さくすることができ、閾値電流の絶対値を下げるができる。ここで、前項で述べたデバイス構造について考えてみると、屈折率差 $n_a^2 - n_b^2$ は、空気と半導体という高い屈折率差をもつ構造を用いているため、十分大きな値である。一方、フォトニック結晶層に分布する光の割合 Γ_g については、フォトニック結晶表面と活性層との距離を250nm程度と比較的大きくし、その結果 $\Gamma_g=1.3\%$ と、比較的小さな値で設計していた。この250nmに設定した理由は2つ

あり、1 つは、 $350\mu\text{m}$ を超える大面積でのコヒーレント発振を実証するため、フォトニック結晶効果をあまり大きくしすぎないこと、もう一つは、フォトニック結晶と活性層を一体化する際にウエハ融着法を用いているが、このウエハ融着が、活性層に与える影響を懸念して、出来る限り融着界面と活性層の距離を離すことを意図していた。このように、 250nm の距離がある場合、例えば、本 2 次元構造に対し、1 次元分布帰還型レーザモデルを用いて、(一方向の)結合係数を見積もると $70\sim 100\text{cm}^{-1}$ 程度となる。閾値電流を低減させるためには、この結合係数を十分に大きくすると同時に、レーザそのものの面積を十分に小さくする必要がある。そのためには、フォトニック結晶層と活性層との間隔を十分接近させ、フォトニック結晶の効果を十分高くする必要がある。例えば、その距離を $50\sim 80\text{nm}$ 程度に設定すると、フォトニック結晶部に存在する光の割合を 7% 程度以上と大幅に増加させることが出来、結果としてフォトニック結晶効果を従来よりも大幅に高めることが可能となる。そこで、まず、ウエハ融着が活性層に与える影響を実験的に調べることにし、まずは、フォトニック結晶をもたないレーザ構造に対して、融着界面が活性層の 150nm と従来よりも 100nm 程度活性層に近づいたデバイスを作製した。結果、このような場合でも活性層が劣化せずに、十分にレーザ発振しうることを確認することが出来た。この状態で、活性層に対して、フォトニック結晶をより近づけるためには、従来フォトニック結晶は、図 62 に示すように、活性層と異なる基板側に形成していたが、今回は、図 68 に示すように、活性層側のウエハ (図 68 のウエハ B 側) に形成し、活性層とフォトニック結晶の距離が最短で、 50nm 程度となるように設定した。また、フォトニック結晶の厚さも 100nm として、十分に回折効率が大きくなるように考慮した。計算値では、1 次元分布帰還型半導体レーザモデルで、結合係数は、 1000cm^{-1} を超え、フォトニック結晶効果は、従来の 10 倍を超えることになる。その結果、デバイスの面積もこれまでの $350\mu\text{m}$ 〇から、 $30\sim 50\mu\text{m}$ 〇と大幅に減少させることが可能となると期待される。

そこで、いよいよ上記の設計に基づき、デバイスを作製した。デバイスの模式図を図 69 に、その表面写真を図 70 に示す。先に述べたように、2 次元フォトニック結晶を当初の三角格子構造から、正方格子構造に変更したが基本的な発振原理は三角格子の場合と同様である。図 69 の付図に示すように 2 次元正方格子フォトニック結晶構造には 4 つの等価な Γ -X 方向が存在しており、ある Γ -X (例えば 0°) に伝搬する光は 2 次元のブラッグ反射によって 180° 以外に $\pm 90^\circ$ 方向にも回折されるため、4 つの Γ -X が互いに結合して 2 次元的な共振器が形成される。また、面垂直方向にもブラッグ条件を満足するため、面発光レーザとして動作する点も同様である。先述のデバイス設計に基づき、

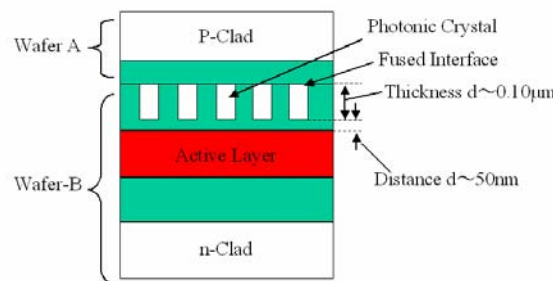


図68 低閾値化のため、フォトニック結晶効果を強くすることを狙った新しいデバイス構造。

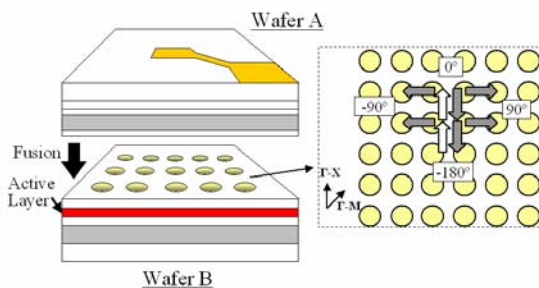


図69 2次元正方格子フォトニック結晶レーザの構造の一例とバンド端における定在波の形成メカニズム。

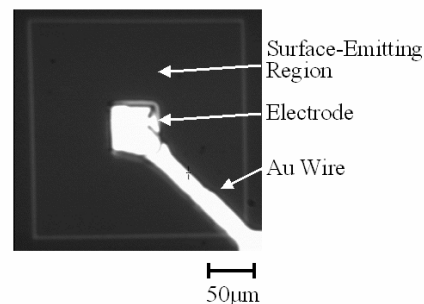


図70 デバイスの表面写真。

電極サイズは、従来の $350\mu\text{m}\phi$ から大幅に小さくし $50\mu\text{m}\square$ とした。本デバイスに対する光出力-電流特性の一例を図 71 に示す。同図より、閾値、 $40\sim 50\text{mA}$ 程度と、従来の $2\sim 3\text{A}$ から $1/40$ という大幅な低減に成功することが出来た。このデバイスは、 -20°C での連続発振にも成功し、産業展開へ向けた大きな一歩を踏み出すことが出来たと言える。図 72 には、様々な電流値における近視野像と、スペクトルを示している。同図から 2 次元面内全域での発振が実現されており、かつまたコヒーレント動作が達成されていることが分かる。

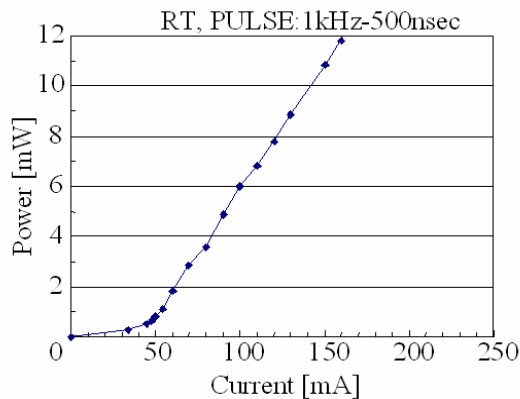


図71 電流-光出力(I-L)特性。

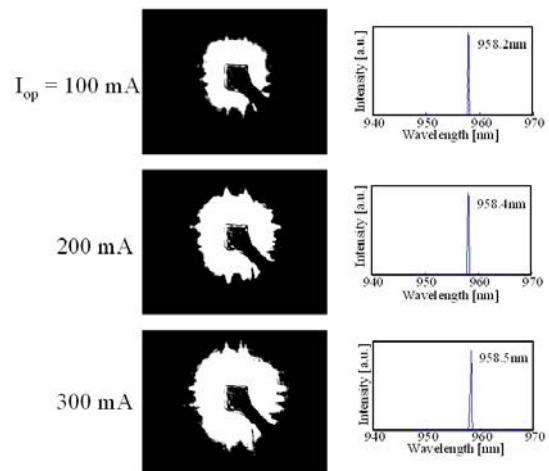


図72 デバイスの近視野像と発振スペクトル。

C.2 : 室温連続発振の達成

上述の通り閾値を従来の $1/40$ と大幅に低減することに成功し、 -20°C という低温であるが初めて連続発振に成功した。そこで、 -20°C では連続発振するが、室温で連続発振しない原因について検討するために、パルス条件下において閾値の温度依存性を評価した。図 73 の●印がその結果であり、デバイスの温度が上がるにつれて、閾値が急激に上昇していることが分かる。閾値の温度依存性を表す指標である特性温度 T_0 は約 50K と見積もられ、これは本デバイスで InGaAs 活性層を用いていることを考えるとかなり低い値であると言える。この原因として、温度が高くなるにつれて、キャリアが量子井戸からあふれて光学利得に寄与するキャリアの割合が減少している可能性がある。図 74 は本デバイスの電子・正孔のエネルギーバンド構造の

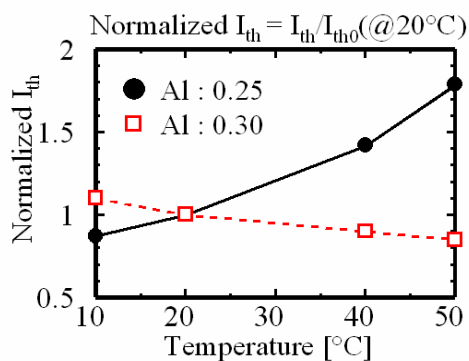


図73 発振閾値の温度依存性の測定結果。20°C における閾値で規格化している。

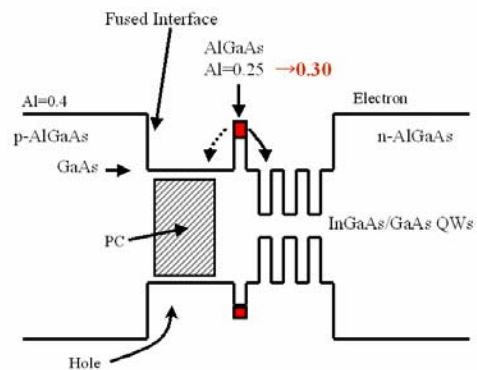


図74 デバイスの電子・正孔に対するエネルギーバンド構造。

模式図である。キャリアのオーバーフローを抑えるために、多重量子井戸近傍に Al 組成 0.25 の AlGaAs 層を導入しているが、この層の障壁高さがわずかに不足していると考えられる。そこで、キャリアのオーバーフローをより確実に抑えるために、Al 組成を 0.30 まで増やした活性層を用いて同様のデバイス構造を作製し温度特性の評価を行った。同様にパルス駆動条件下で閾値の温度特性を評価した結果、図 73 の□で示すように、閾値は温度が上昇しても増加せず、温度特性を大幅に改善することができた。なお、閾値が温度とともに減少しているのは、本デバイスでは 2 次元フォトニック結晶の周期によって決まる発振波長を、活性層の発光ピーク波長よりもやや長波長側になるように設計しているためである。活性層の発光ピーク波長は温度上昇とともに長波長側に移動するため、温度上昇とともに発振波長での光学利得が大きくなり閾値が減少するのである。以上の結果より、Al 組成を 0.3 まで上昇させることで、デバイスの温度が上昇した際のキャリアの漏れを抑制することができた。図 75 は室温かつ連続動作における I-L 特性であり、この図は、室温連続に初めて成功したことを明快に示している。この結果は、Al 組成を 0.3 と高くしたキャリアブロック層が有効に働いていることを意味する。この試料の近視野像と発振スペクトルの面内分布を顕微測定システムで測定した結果が図 76 であり、デバイス全面で 2 次元的に発光しており、2 次元フォトニック結晶における 2 次元的な光の結合によって全ての測定点において同一波長で発振していることが分かる。図 77 はデバイスの遠視野像であり、極めてユニークなドーナツ形状をしていることがわかる。

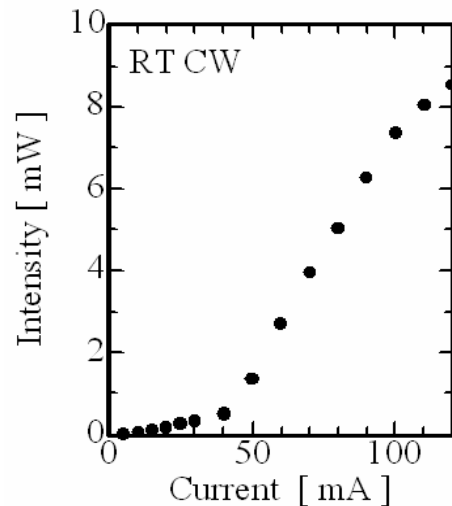


図75 デバイスのI-L特性。

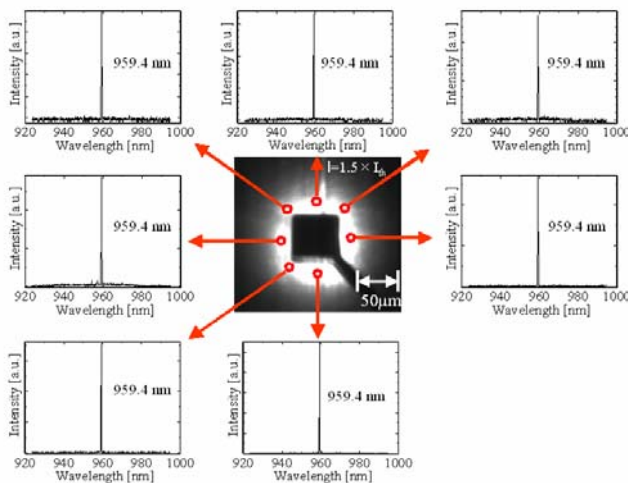


図76 デバイスの近視野像と、各点における発振スペクトルの測定結果。

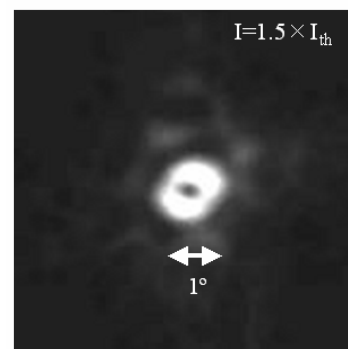


図77 遠視野像の測定結果。

D. デバイス特性の詳細な検討

D.1 : 各発振モードにおけるQ値の検討

レーザ特性のより詳細な検討を行うため、数値計算手法を用いて、2次元発振可能なモード解析を行った。解析モデルとしては、図78に示すような2次元フォトニック結晶スラブを仮定し、格子点は真円円孔とした。2次元フォトニック結晶は空気円孔($\epsilon_a=1$)を誘電体スラブ($\epsilon_b=11.5$)に配置することで形成しており、スラブの厚さとしては

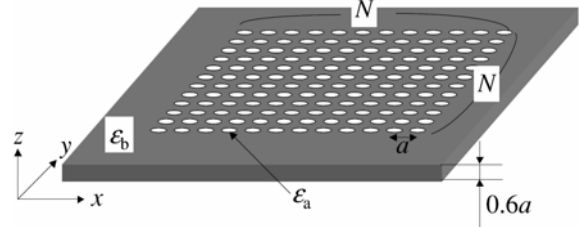


図78 計算に用いたデバイスの構造。屈折率(ϵ_b)=11.5のスラブに屈折率(ϵ_a)=1の円孔が正方格子配列している。スラブ厚さは0.6a。単位格子あたりの空気の割合は0.2。スラブの上下クラッド層は空気を仮定。Nは計算時に仮定した Γ -X方向の周期数。

0.24 μm (=0.6a, a はフォトニック結晶の格子定数)とした。円孔は図78に示すように正方格子配列しており、単位格子における円孔面積の割合(フィリングファクター)は0.2を仮定した。スラブ上下のクラッド層は空気であり、Murの2次吸収境界を用いた。対応する

バンド端の共振周波数を見積もるために、面内方向は Bloch 境界条件、上下方向は Mur の2次の吸収境界条件を用いて3次元 FDTD 法でバンド構造も計算した。FDTD 計算に用いたパラメータとしては、 $\Delta x=\Delta y=\Delta z=1/10a$ 、 $\Delta t=0.5\Delta x/c$ 、ただし c は真空中の光速とした。

まず、2次の Γ 点におけるバンド端の周波数を見積もるために、xy平面内に無限の周期構造を仮定してバンド構造と各バンド端の電磁界分布を計算した。次に、有限周期の2次元フォトニック結晶スラブを仮定し、得られたバンド端の周波数で2次元スラブの中央を励振した。励振には比較的広い周波数帯域をもつガウス型パルスを使用した。周期構造が有限であっても共振モードがほとんど Bloch 波であることを考慮し、無限周期構造に対する計算で得られた電磁界分布の節の部分に周期的に励振点を配置した。また共振モードは TE-like モードと仮定した。次に共振周波数を電磁界の時間変化のフーリエ変換より計算した。ここで得られた共振周波数は、無限周期の2次元フォトニック結晶を仮定した場合の計算結果とはわずかに異なっているので、励振周波数を有限周期構造を仮定して得られた共振周波数に変えて再度計算を行った。この際、本研究で注目している Γ 点における各バンド端の周波数の差は小さいため、励振に用いるガウス型パルスは隣接するバンド端を励振しない狭い周波数帯域である必要がある。一方、周波数帯域が狭すぎると、励振に用いたパルス幅そのもので構造の Q 値が決まってしまう。そこでこの点に注意して励振パルスのパルス幅を決定した。

面発光成分の遠視野像は、フォトニック結晶スラブ表面から40a離れた平面上で観測した。具体的には、観測面に垂直な方向のポインティングベクトルを積分することで計算した。遠視野像における偏光方向は、観測面における電界分布より計算した。ここで注意すべき点として、ここで計算した遠視野像は、レーザ発振後の遠視野像とは完全には対応しないことが挙げられる。レーザ発振後のスペクトルの半値幅は、ここで考慮している共振モードの半値幅に比べて非常に狭いため、この計算で得られる遠視野像は発振直前のものである。また同様に近視野像も重要な特性であるが、実際に光が発光する面を一意に決めることができないため、計算することが非常に難しい。例えば、スラブの上下方向の中央を発光面と考えた場合、ポインティングベクトルはスラブに垂直な方向の成分を持たないため、近視野像を計算できない。もしスラブの表面を発光面と考えた場合は、ポインティングベクトルの垂直方向成分を計算することは可能である。しかしながらスラブ表面近傍ではエバネッセント成分が支配的であり、ポインティングベクトルにはさほど意味がない。これらの点を考慮すると、遠視野像を逆フーリエ変換することが実際的だと考えられるが、これについてはより詳細な議論を今後検討していきたい。

共振モードの Q 値を計算する方法としては、異なる3つの方法を用いた。1つめの方法は、共振スペクトルの半値幅から見積もる方法である。2つめの方法は、共振器に蓄えられたエネルギーが指数関数的に時間減衰する傾きから求める方法である。3つめは、計算領域の境界面で吸収される強度を共振器内部に蓄えられた強度で割る方法である。最初の方法だと Q 値が高い場合には、 Q 値を正確に計算するために多くのタイムステップが必要となる。一方、2つめ、3つめの方法はいずれも今回の目的に合致していると考えられる。今回は主に2つめの方法を用いて Q 値を計算したが、2つめの方法と3つめの方法で計算した Q 値を比較し、両者に矛盾がないことを確認した。また、フォトニック結晶スラブを伝搬するモードにより生じる損失と、フォトニック結晶スラブの垂直方向に放射される放射損失を区別して考えるために、共振器の Q 値(Q_{total})を面内方向の Q 値($Q_{\parallel}$)と垂直方向の Q 値($Q_{\perp}$)に分けて検討した。

図79は3次元FDTD法を用いて計算した Γ 点近傍のバンド構造であり、4つのバンド(第2、第3、第4、第5バンド)が存在し、それぞれのバンドがバンド端(A、B、C、D)を持っていることが分かる。特にバンド端CとDは縮退していることが分かる。この結果は、バンド端の周波数がシフトしている以外は、平面波展開法で計算した場合と同様である。次に有限周期構造(Γ -X方向の周期数 $N=30$)における Γ 点近傍の共振モードの電磁界分布を計算した。フォトニック結晶スラブの中央における垂直方向の磁界成分の計算結果が図80であり、図80(a)、図80(b)がそれぞれバンド端A、Bの計算結果を示している。バンド端C、Dは縮退しているため電磁界分布が一意に決まらないので同図に示していない。矩形の点線で囲んだ領域がフォトニック結晶領域を示しており、図80の付図はフォトニック結晶領域の中央部における電磁界分布の拡大図である。この図において、黒線で示した円は格子点の位置と形状を表しており、この電界分布は、2次元平面波展開法で計算した結果と良く一致していることから、これがバンド端における共振モードに由来するものであることが分かる。図80(a)では磁界強度はフォトニック結晶領域の端に近づく程減少していることが分かる。一方、図80(b)では磁界強度の分布に振動が見られることが分かる。これは、図81に示した、フォトニック結晶領域における磁界分布をフーリエ変換して得られる、波数空間(k 空間)における強度分布から理解することができる。厳密には、波数空間における強度分布は、磁界分布を空間的・時間的にフーリエ変換する必要がある。しかしながら、バンド端における共振モードはフォトニック結晶領域が有限周期であってもほとんど定在波と考えることができるため、各瞬間の電磁界分布は基本的に同じ分布となる。よって、実空間におけるある瞬間の電磁界分布をフーリエ変換することで、波数空間における強度分布を得ることができる。波数空間における分布を正確に得るためには、フーリエ変換時の窓関数の影響について考慮する必要があるが、本研究では、フォトニック結晶領域は矩形領域に

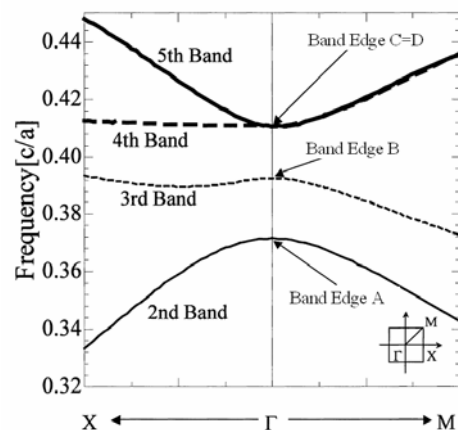


図79 3D FDTD法で計算したTEモードの Γ 点近傍のバンド図。

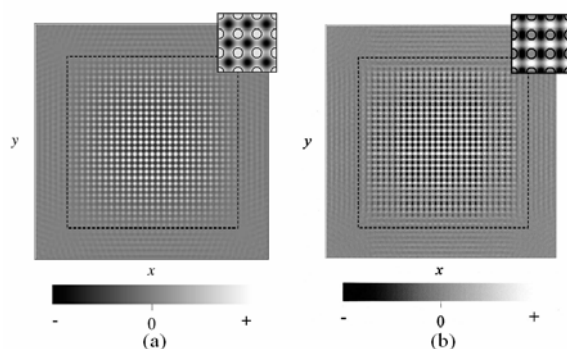


図80 フォトニック結晶スラブの中心における垂直方向の磁界成分の計算結果。 Γ -X方向の円孔数(N)は30。(a)バンド端Aの計算結果。(b)バンド端Bの計算結果。

形成されているため、窓関数の影響を抑えることができる。しかし領域の分割数が 2 の累乗で無い場合は、高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform: FFT)で計算する場合に窓関数の影響が生じる。そこで、本研究では、波数空間における分布を計算するために、離散フーリエ変換(Discrete Fourier Transform: DFT)を用いた。図 81 において、点線の矩形で示した領域が、第一ブリルアンゾーンを表している。図 81(a)に示す波数空間の分布を見ると、強度の強い部分は Γ 点の周辺にわずかに広がって存在していることが分かる。これは、周期構造が有限周期であるために、波数が完全に Γ 点だけに限定されず、ある程度の広がりを持つためである。一方、図 81(b)に示すバンド端 B では、波数空間における広がり図 81(a)に比べると広いことが分かる。図 81(b)において白い矢印で示すように、 Γ 点以外に弱いスポットが存在していることが分かる。この弱いスポットは Γ 点の近傍、少し Γ -X 方向に寄ったところにあり、これが磁界分布の計算結果図 80(b)において強度分布の振動が見られる原因である。またこれらは Γ 点近傍のバンド図からも説明できる。図 79 においてバンド端 A 近傍のバンドは単純に上に凸な形をしているが、バンド端 B 近傍のバンドは、特に Γ -X 方向に関しては、バンド端 A のバンドに比べてかなり平坦であると同時に、周波数が一度減少してから増加するという複雑な形状をしている。それゆえバンド端 B においては、図 81(b)に示したように、波数空間において Γ 点近傍における広がりが大きくなるとともに、周波数は同じであるが異なる波数をもつ点に弱いスポットが生じるのである。この現象はバンド端 B の遠視野像にも影響を与える。図 82(a)、(b)はそれぞれバンド端 A、B の遠視野像を計算した結果であり、図において白色矢印は各部分における電界の向き、つまり遠視野像の偏光方向を表している。バンド端 A、B のいずれにおいても遠視野像はドーナツ形状をしていることが分かる。このような形状をしているのは、以下のように理解できる。もしフォトニック結晶領域が無限周期存在する場合は、各点から放射される電界同士が打ち消し合うため、バンド端 A、B の固有モードはフォトニック結晶に対して垂直の方向に伝搬するモードと結合することができない。しかしフォトニック結晶の周期が有限の場合には、先に図 81 で示したように波数は完全に Γ 点のみに固定されず、 Γ 点近傍である広がりを有することになる。このような場合、 Γ 点からわずかにずれた波数をもつモードは上下方向に伝搬するモードと結合することができるが、伝搬方向がフォトニック結晶に垂直な方向からわずかにずれる。この結果として、図 82 に示すように、中央部が暗いドーナツ形状の遠視野像が得られるのである。特にバンド端 B では、 Γ 点近傍のモードが不連続な波数をもつため、放射される方向がより複雑になり、図 82(b)に示すように複雑な遠視野像を有する。これによって、各バンド端が有する Q 値が影響を受ける。

次にバンド端 A と B の共振モードが有する Q 値について検討を行った。フォトニック結晶領域の周期数 N を変化させたときのバンド端 A、B の Q 値(Q_{total})を計算した結果が図 83 であり、周期数 N が大きくなるに従って Q_{total} が増加していること、またバンド端 B に

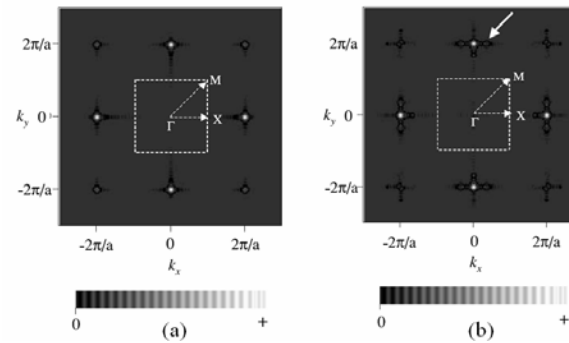


図81 図80の磁界成分の計算結果をフーリエ変換して波数空間(k空間)で表したもの。(a)はバンド端A、(b)はバンド端Bに対応する。中央の矩形破線は第一ブリルアンゾーンを表す。

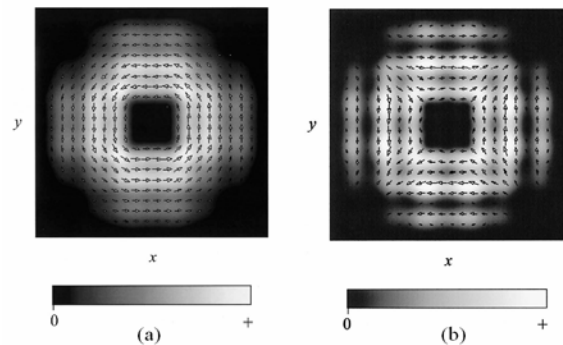


図82 (a)バンド端Aおよび(b)バンド端Bの遠視野像の計算結果。中央が暗いドーナツ状のプロファイルが得られていることが分かる。

比べてバンド端 A の方がいずれの周期数においても高い Q_{total} を持つことが分かる。周期数 $N=50$ の場合、バンド端 A では 5,000 という高い Q_{total} が得られている。一方、バンド端 B の Q 値は、バンド端 A の Q_{total} に比べて約半分程度であることが分かる。先に図 79 のバンド図で示したように、 Γ 点近傍ではバンド端 A に比べてバンド端 B はより平坦なバンド構造を有する。平坦なバンド構造は、群速度がより遅いことを意味しており、群速度の低下とともに Q 値は増加するので、図 83 で示した計算結果と一見矛盾する。しかしながらこれは、 Q_{total} を $Q_{\parallel}$ と $Q_{\perp}$ に分けて考えることで説明できる。

図 84 はバンド端 A と B について、フォトリック結晶の周期数 N に対する $Q_{\parallel}$ と $Q_{\perp}$ の計算結果である。バンド端 A の場合、図 84(a) から分かるように、 $Q_{\perp}$ は常に $Q_{\parallel}$ より大きい。一方、バンド端 B の場合は、図 84(b) に示すように $Q_{\parallel}$ が常に $Q_{\perp}$ より大きいことが分かる。しかしながらバンド端 A と B で $Q_{\parallel}$ の差はそれほど大きくない。このような違いは、それぞれのモードが Γ 点近傍で波数の広がりを持つことから生じる。先に述べたように、バンド端 A に比べてバンド端 B は、 Γ 点近傍でより平坦なバンド構造をもつため、波数空間において Γ 点近傍での広がりが大きい。もし、モードが Γ 点のみに限定されている場合は、垂直方向への光の放射は生じず、 $Q_{\perp}$ は無限大となる。一方、波数が Γ 点からずれた場合には垂直方向への放射が生じ、 $Q_{\perp}$ は有限の値を持つことになる。特に波数がより Γ 点からずれると垂直方向に放射される成分が大きくなり、 $Q_{\perp}$ はより小さくなる。バンド端 B のように Γ 点近傍のバンドが平坦で波数空間でより広がりを持つモードは、それを反映して共振スペクトルの半値幅が広くなり、つまり Q_{total} が小さくなり漏れやすいモードとなる。結果的に $Q_{\perp}$ と Q_{total} が減少することになると考えられる。図 85 は無限周期を有する 2 次元フォトリック結晶スラブにおいて Γ 点近傍の Q_{total} を計算した結果である。無限周期の場合、面内方向の損失は生じないため $Q_{\parallel}$ は無限大となり、 Q_{total} は $Q_{\perp}$ と等しくなる。これまで述べてきたように、 Γ 点においてバンド端 A と B の $Q_{\text{total}}=Q_{\perp}$ は無限大となるが、波数が Γ 点からずれるに従って急激に減少

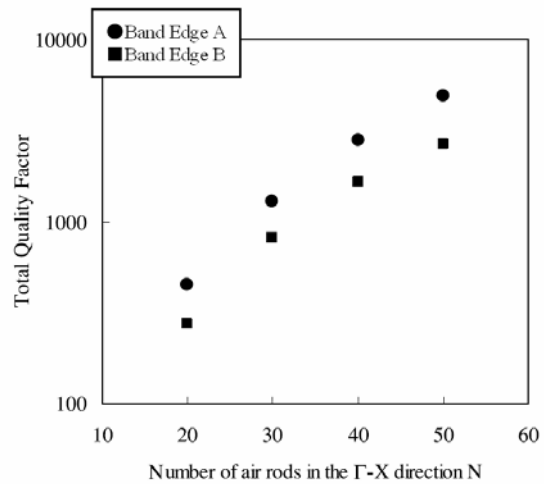
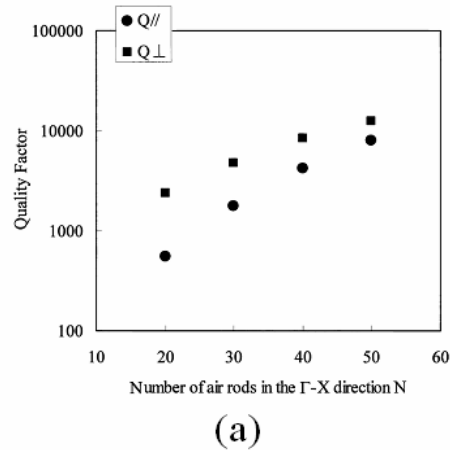
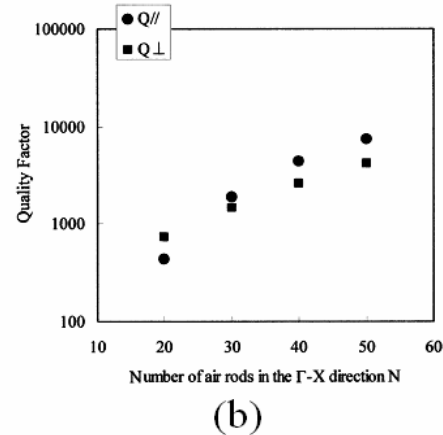


図83 Γ -X方向の円孔数(N)を変化させたときのバンド端A、Bの Q 値の計算結果。周期数を増やすに従って Q 値は単調に増加しており、また同じ周期数であればバンド端Aの方がバンド端Bよりも高い Q 値を持つことが分かる。



(a)



(b)

図84 Γ -X方向の円孔数(N)を変化させたときの(a)バンド端A、(b)バンド端B、の $Q_{\parallel}$ と $Q_{\perp}$ の計算結果。 $Q_{\parallel}$ と $Q_{\perp}$ はそれぞれ面内方向、および垂直方向の光閉じ込めの強さを表す。

していることが分かる。一方、バンド端 C、D では Γ 点においても Q 値が低い、これはこれらのモードが垂直方向へ放射されるモードと結合可能な、いわゆる漏れやすいモードであるためである。このことから考えると、バンド端 C、D は有限周期のフォトニック結晶においても Q_{total} は小さいと考えられる。実際、バンド端 C、D で適切な電磁界分布を仮定して有限周期構造における Q_{total} を計算してみると、図 86 に示すようにバンド端 A、B に比べて約 1/10 程度の低い Q_{total} であることが分かる。このような場合でも $Q_{\parallel}$ を比較した場合は、バンド端 A、B と C、D での差はそれほど大きくなく、各バンド端における Q_{total} の差は主に $Q_{\perp}$ に依存することが分かった。一方、 $Q_{\parallel}$ は各バンドのバンド構造よりは、結晶の周期数に依存することも分かった。

以上の結果は、バンド端によって、発振しやすいモードと発振しにくいモードが存在することを示しており、真円形状の場合は、バンド端 A がより発振しやすいことを示唆している。ただ、今回は計算量を減少させるため、スラブ構造を計算モデルとして用いているため、 $Q_{\parallel}$ と $Q_{\perp}$ の差は実際のデバイス構造を仮定した場合に比べて、より大きくなっているものと考えられるが、今回用いた手法は、発振可能なモードの Q 値を制御するために、格子点形状を変えるなど、より高度な結晶構造制御を検討する際にも有効であると期待される。

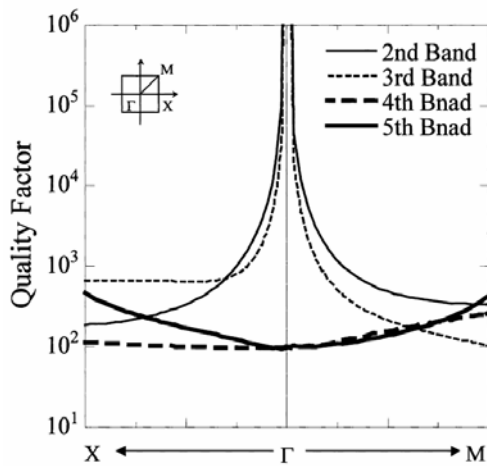


図85 無限周期を仮定したときの Γ 点近傍における各バンドの Q 値の計算結果。バンド端A、Bは Γ 点において Q 値が無限大になっているのに対して、バンド端C、Dでは小さい値であることが分かる。

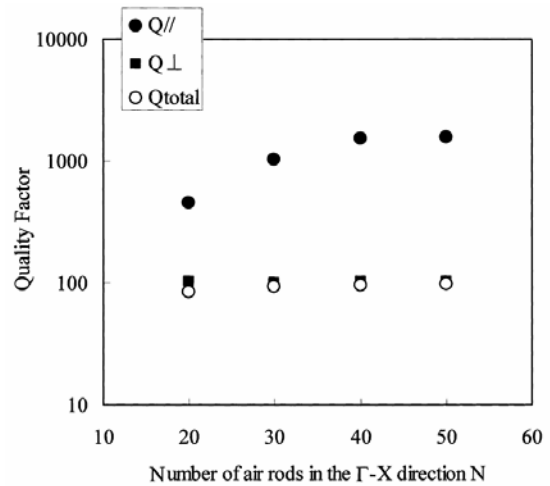


図86 Γ -X方向の円孔数(N)を変化させたときのバンド端C、Dの Q 値(Q_{total})と面内の Q 値($Q_{\parallel}$)、垂直方向の Q 値($Q_{\perp}$)の計算結果。バンド端A、Bに比べて約1桁小さいことが分かる。

D.2 : バンド構造の実測とそれによる発振バンド端の同定

3.3B 節では、デバイスの発振波長と理論計算で得られるバンド構造との対応関係は、偏光特性等から間接的に検討を行っていた。しかし、今後格子構造を様々に制御することで発振モードを意図的に制御していくことを考えると、実際のデバイスのバンド構造を測定し、発振スペクトルと比較することで、発振波長とバンド構造の対応関係をより直接的に把握し、格子制御によって、どのように発振モードが変化したのかを直接的に調べることが必要である。そこで、新たな測定系を用いて、作製したデバイスのバンド構造を測定し、発振波長とバンド端との対応関係を同定することを行った。

図 87 に測定原理を示す。フォトニック結晶中を伝搬する光は、結晶と半導体、および半導体と空気の界面においてスネルの法則に従って屈折を受ける。この際、面内方向の波数は常に保存される、つまり図 87 において $k_{PC//} = k_{Semi//} = k_{Air//}$ の関係が成り立つこと、また空气中において波数の絶対値 k とデバイス面内方向の波数の関係が同図に示すように $k_{Air//} = k_{Air} \cdot \sin\theta$ で表されることが、を用いると、試料に対してある角度 θ 傾けた際のスペクトルを測定することで、フォトニック結晶中を伝搬する光の波数 $k_{PC//}$ を測定することができる。この測定を試料垂直方向から Γ -X 方向および Γ -M 方向の様々な θ に対して行うことで、 Γ 点近傍のバンド構造を直接的に測定するものである。

測定系の模式図が図 88(a)であり、試料からの発光はレンズにより集光され光ファイバーで波長分解能 0.2nm のマルチチャンネル分光器に導かれる。集光レンズは電動回転アーム上におかれており、アームの角度を Γ -X 方向および Γ -M 方向それぞれに 0° から 10° の間、 0.1° 単位で変化させ、その時のスペクトルを測定した。図 88(b)は、発振閾値以下の LED 動作の状態、実際に角度を傾けてデバイスの発光スペクトルを測定した結果であり、角度に対応してピークがシフトしていることが分かる。このピークが各バンドに対応していることになる。図 89 は実際に測定で得られたバンド構造(a)と、平面波展開法で計算したバンド構造(b)を比較したものであり、測定結果と計算結果が良く対応していることが分かる。

次に発振波長とバンド端との対応関係を調べた結果が図 90 である。同図(a)は発振閾値以下で測定したバンド構造であり、同図(b)は発振閾値直後に測定したバンド構造である。図 90(a)に比べるとバンド構造に対応するピークが小さくなっているように見えるが、これは発振ピークの強度に合わせてプロットしているためである。図 90(c)はバンド端(Γ 点)近傍を拡大したものであり、発振ピークがバンド A のバンド端に対応していることが明確に見て取れる。

また、発振直前の Γ 点におけるスペクトルが図 91 であり、各バンド端に対応するピークが観測できる。これらピークの半値幅より、各バンド端の Q 値を見積もったところ、バンド端 A が最も大きく、バンド端 B がこれに続き、バンド端 C、D の Q 値はバンド端 A、B に比べてかなり低い。これは先に述べた、各バンド端の Q 値の計算結果とも良く一致している。

最後に、バンド端 A の遠視野像の測定結果と計算結果を比較した結果が図 92 であり、両者が一致していることから、レーザ発振は実際にバンド端 A で発振していることが確認できた。また、今回構築したバンド構造測定システムは、詳細な発振モードの検討や、さらに進んだ格子

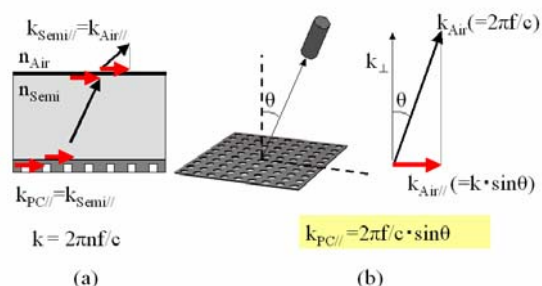


図87 (a)フォトニック結晶を伝搬する光が上方に放射される時の各媒質中の波数の関係を模式的に示したもの。(b)試料に対して斜め方向から測定することで、フォトニック結晶内部を伝搬する光の波数を測定できることを模式的に示した図。

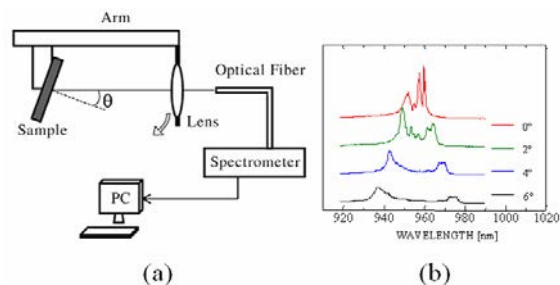


図88 (a)測定系の模式図、(b)測定したスペクトルの例。

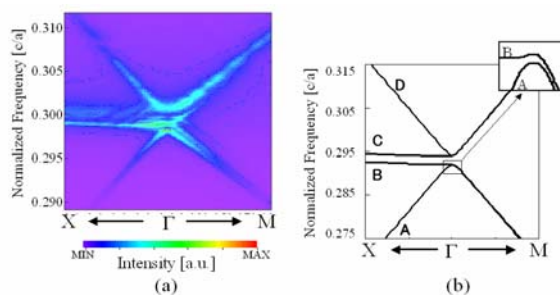


図89 (a)バンド構造の測定結果と(b)計算結果。

構造制御を行った場合にバンド構造がどのように変化するかを評価していく上で非常に有効であるといえる。

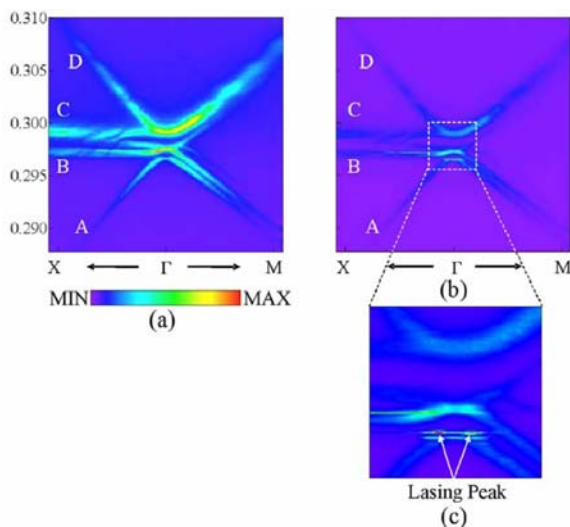


図90 (a)発振閾値以下におけるバンド構造の測定結果。(b)発振閾値以上の電流を注入したときのバンド構造の測定結果。(c)発振時のバンド端近傍の拡大図。発振はバンド端Aで生じている。

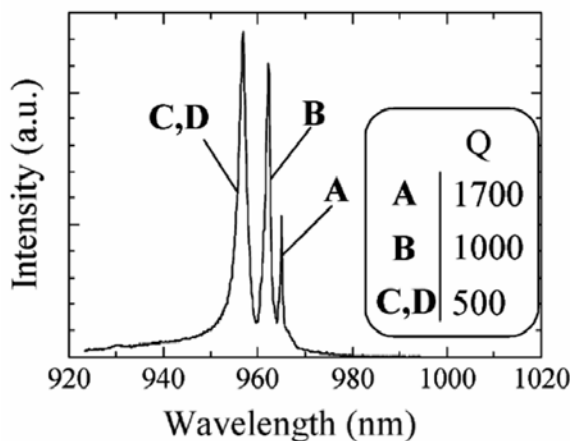


図91 発振直前の Γ 点におけるスペクトルの測定結果。

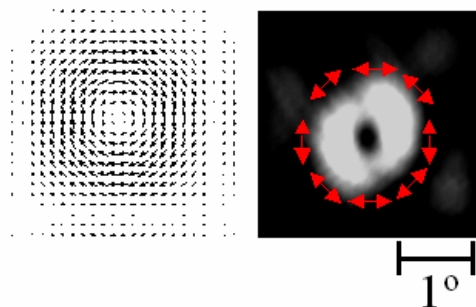


図92 バンドA端における共振モードの遠視野像の計算結果(左)と実験結果(右)。

E. 格子点形状制御による出射光制御

E.1：格子点形状制御による偏光制御

これまでに述べてきたように、研究代表者は、2次元フォトニック結晶をレーザ共振器として用いることで、縦モード・横モードの両方を制御し、2次元大面積でコヒーレント面発光発振が可能なレーザを提案・実証した。このような、2次元大面積において電磁界分布を完全に規定することは周期構造を有するフォトニック結晶ならではの特性であり、他の方式のレーザでは不可能なことである。しかしながら、2次元フォトニック結晶の対称性を反映して、各部分の偏光が様々な成分(接線方向の偏光)をもち、全体としては接線方向の偏光をもつことが判明した。このようなビームは、光ピンセットへの応用や、フォトニック結晶ファイバーの光源など、用途によっては有用と考えられるが、一般には、偏光をある一定の方向に揃えた方が有利な場合が

多い。そこで、本研究では、偏光までも制御した、単一縦・横・偏光モード面発光レーザという究極のレーザ実現のための検討を行い、理論・実験両面から、初めて偏光制御が可能であることを示すことに成功した。

図 93 は、 Γ 点におけるバンド端 A、B における結晶内部の電磁界分布を計算した結果である。この図において、赤色と青色はそれぞれフォトニック結晶を形成した平面に対して垂直な方向の磁界成分の正・負に対応し、矢印はフォトニック結晶面内における電界の向きを表している。また黒線の円は格子点の位置を示している。すでに述べたように、このような回転対称性の高い電磁界分布が、ドーナツ状の遠視野像、さらに接線方向の偏光特性を与えている。

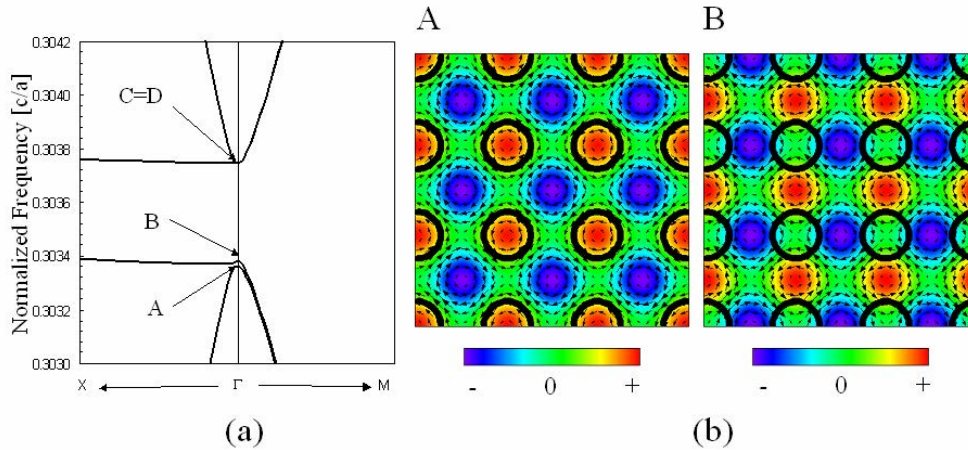


図93 真円格子点をもつフォトニック結晶のバンド図(a)と、 Γ 点におけるバンド端A、Bにおける結晶内部の電磁界分布。

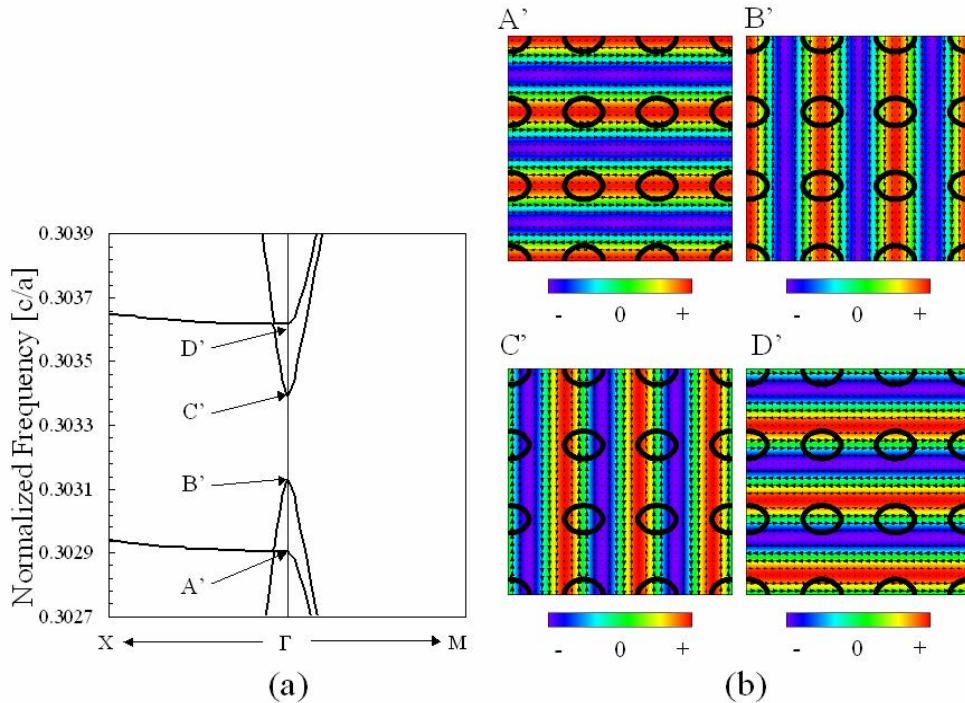


図94 (a)格子点形状を楕円にした場合のバンド図の計算結果。(b)バンド端A'～D'の電磁界分布の計算結果。

これは、格子点形状の対称性が高すぎることに起因していると考えられるため、格子点形状の対称性崩し、真円から楕円形状へと変化させることを考えた。その結果を図 94 に示す。同図 (a)から分かるように、楕円形状の格子点を採用することにより、まず、バンド端 C、D の縮退が解けると共に、各バンド端のエネルギー間隔が開いてくる(以下では楕円格子点にしたことによって生じたバンド端をそれぞれ A'、B'、C'、D'とする)。さらに重要なのは、同図(b)に示すように、楕円形状の採用により、電磁界分布が直線状の分布に変化することである。その結果、これらのバンド端で発振した時に、試料垂直方向に取り出される面発光成分は、一方向に電界分布が揃ったものとなり、期待通り偏光までも一方向に揃った面発光発振の可能性が示唆される。このように格子点形状を楕円形にすることで、バンド端 C と D の縮退が解けるだけでなく、電磁界分布が 1 方向にそろえることは群論からも説明することができる。

上記のような理論設計に基づき、実際にデバイス作製を行い、実験的にも偏光制御が可能かどうかを検討した。図 95 に示すように、楕円形状をもつ 2 次元正方格子フォトニック結晶を、利得媒質と融着することにより、2 次元フォトニック結晶レーザを作製した。活性層は、InGaAsP 多重量子井戸をもち、発光波長は $1.3\mu\text{m}$ 域に設計されている。フォトニック結晶の格子定数は、 $0.4\mu\text{m}$ とした。電極面積は、 $300\mu\text{m}$ としたが、これはフォトニック結晶全域をカバーするものでなく、電極周囲の領域を面発光領域として作用するように設計されている。作製したデバイスの近視野像、いくつかの面発光部におけるスペクトルと偏光状態を図 96 に示す。同図から分かるように、発振領域が $300\mu\text{m}$ 以上と非常に大きいにも関わらず、単一縦モードで動作しているのみならず、偏光方向までも一方向に揃っていることが分かる。以上より、大面積で、単一縦・横動作のみならず、偏光までも一方向に制御された理想的な面発光レーザが実現可能であることが実証されたと言える。以上の成果は米科学誌サイエンス 2001 年 8 月号に掲載され、大きな注目を集めた。

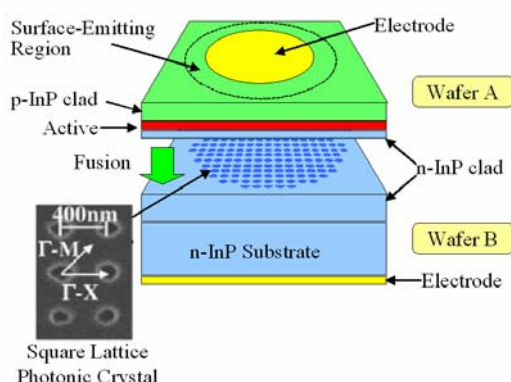


図95 楕円格子点形状の2次元正方格子フォトニック結晶レーザの模式図。付図は作製したフォトニック結晶の電子顕微鏡写真。

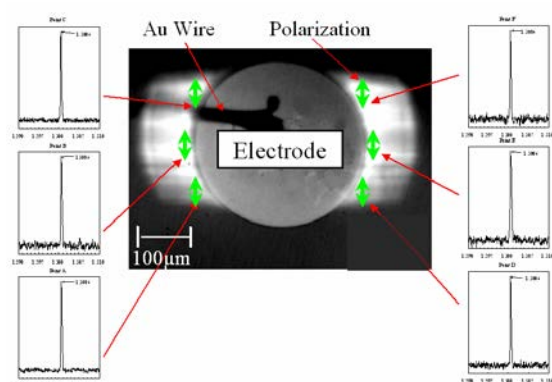


図96 作製したデバイスの近視野像と、顕微分光システムで測定した各点のスペクトルおよび偏光特性。

E.2：出射光形状に関する考察

前項で、結晶構造を変化させることにより、偏光制御が可能となることが分かった。本項では、出射ビームの形状およびその制御に関する検討結果を述べる。ここでのポイントの 1 つは、前節で見出した楕円形状の格子点形状を用いることである。以下、解析結果を示す。

解析は、楕円格子点をもつ 2 次元フォトニック結晶を仮定し、FDTD 法で行った。図 97(a)は解析した構造の模式図であり、楕円形状をした空気円孔をもつ、正方格子 2 次元フォトニック

結晶である。実際のデバイス構造においては、フォトニック結晶層に分布する光の強度は全体のごく一部であるが、計算上は無限の高さをもつ 2 次元周期構造を仮定するために有効屈折率近似を行った。また解析に用いた周期構造の大きさとして、計算機のメモリ容量などの観点より、実際のデバイスにおける周期数(700x700 周期)よりも小さい周期数(100x100 周期)を用いた。これらの近似を踏まえて、高誘電率側の誘電率として、 $\epsilon_1=12$ を用い、低誘電率側の誘電率として、実際のデバイスで用いている空気誘電率 $\epsilon_2=1$ ではなく、 $\epsilon_2=9$ を用いた。また低誘電率材料の占有率 (Filling Factor:FF) として 15.7%と用いた。TE モードに対しては Γ 点に 4 つのバンド端が存在するが、前節までの検討により、バンド最も低周波数側のバンド端が垂直方向の光閉じ込めが強いと考えられるため、このバンド端 A について解析を行った。

すでに、D.1 項でも議論したとおり、無限周期構造を考えた場合、バンド端 A においては、対称な電界分布により垂直方向に放射される光では、干渉によって打ち消し合い、結果的に垂直方向に光は放射されない。つまり、面内において互いに逆方向に伝搬する進行波と反射波それぞれによる回折光が打ち消しあって、垂直方向への回折が禁止される。一方、実際のデバイスと同様の有限周期構造を考えた場合、状況が変化する。フォトニック結晶領域の端の部分においては、フォトニック結晶領域の外側に伝搬する光(進行波)の方が、フォトニック結晶領域内部に伝搬する光(反射波)に比べて強度が大きくなる。その結果、フォトニック結晶領域の中央部では、無限周期の場合と同様に干渉による打ち消し合いによって直上方向への回折が生じないが、フォトニック結晶領域の外周部においては、干渉による打ち消し合いが完全ではなく、垂直方向への光の回折が生じることになる。さらには、図 97(a)に示すように y 方向の電界成分 E_y は y 軸に対して非対称な電界分布をもつため、干渉後の電界分布についても y 軸に対しては非対称な電界分布をもつことになる。それゆえ E_y 成分については y 軸上のみならず、全ての y-z 平面上で打ち消し合うことになる。このような現象は、波数空間で考えた場合にも説明できる。発振モードは、フォトニック結晶の周期が有限であるが故に波数空間において、バンド端($k=0$)の近傍である程度の広がりをもつ。バンド端($k=0$)に由来する成分は非対称な電界分布による干渉で完全に打ち消されるが、バンド端近傍、すなわち $k \neq 0$ の成分は、図 98(a)に示すように完全には打ち消されず、干渉後もある程度の値をもつ。波数空間における電界分布、つまり E_x 成分と E_y 成分をフォトニック結晶

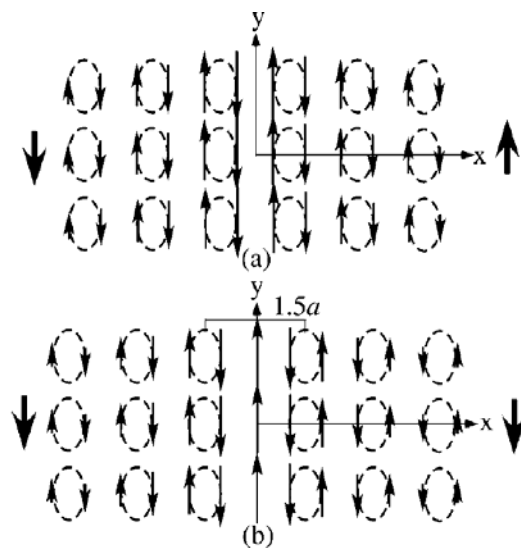


図97 解析に用いた楕円格子点を持つ2次元正方格子フォトニック結晶の模式図。(a)位相シフト無しの場合、(b) π 位相シフトを導入した場合。細い矢印はy方向の電界成分 E_y を表す。太い矢印は、打ち消し合うような干渉が生じた後位相シフト部の左右から放射された光の位相を表す。

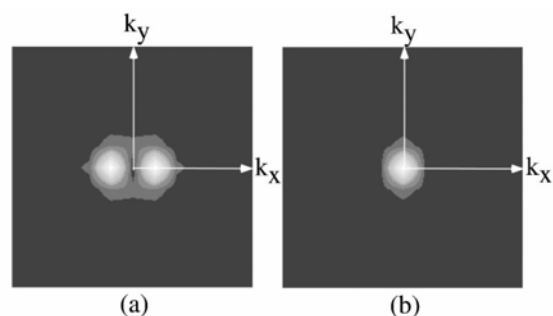


図98 楕円率80%の場合の電界強度 $|E_x|^2 + |E_y|^2$ の時間平均 (すなわち遠視野像) の計算結果(a)位相シフトの無い場合。(b) π 位相シフトを導入した場合。

平面で空間フーリエ変換した結果は遠視野像に対応することから、楕円格子点をもつ有限周期の2次元フォトニック結晶より垂直方向に放射される光は双峰型となることが分かる。

次にフォトニック結晶領域の中央に位相 π の位相シフトを導入した場合について考えてみると、図97(b)に示すように周期構造とそれによる電界分布の位相が変化し、放射される光の位相が π シフトすることになる。ここで、フォトニック結晶の周期 a は、発振波長に等しいため、位相 π のシフトは $a/2$ のシフトに相当する。図より分かるように放射される光の位相は、 y 軸に対して対称になるため、 E_y は y 軸を含む全ての y - z 平面上で強め合うように干渉する。図98(b)は、楕円格子点(楕円率=楕円の短軸/長軸比=0.8)をもつ2次元フォトニック結晶中に π シフトを導入した場合の遠視野像の計算結果であり、出射ビームは単峰型になっていることが分かる。(なお、図98(a)には、位相シフトがない場合の遠視野像の計算結果を示している。)

次に、位相シフトを導入した場合の出射光の偏光方向について検討を行った。図98(a)において、格子点形状が楕円率0.8の楕円形であるため、双峰ピークは主に E_y 成分によって生じており E_x 成分の寄与は小さい。このため、出射光はほぼ y 方向に偏光しており直線偏光と考えられる。ここで、どの程度直線偏光しているかを表す尺度として、 E_y の最大値と E_x の最大値の比、 $I_{\max}(E_y)/I_{\max}(E_x)$ を導入する。ここで $I_{\max}(E_{[x,y]})$ はバンド端($k=0$)の近傍における $E_{[x,y]}$ の最大値である。図99(a)(c)は楕円率0.8のフォトニック結晶を仮定したときの、波数空間における E_x と E_y の分布を表したものである。この場合、 $I_{\max}(E_y)/I_{\max}(E_x)=6.74$ と見積もられた。一方図99(b)(d)は π シフトを導入した場合の E_x 、 E_y の分布であり、直線偏光度 $I_{\max}(E_y)/I_{\max}(E_x)=27.3$ と大幅に向上した。このように直線偏光度が大幅に向上した理由は次のように説明できる。 E_y 成分について考えてみると、位相シフトを導入することで y 軸に対する対称性が反対になり、単峰型となった。一方、 E_x 成分については位相シフトを導入したことで、 E_y 成分と同様、 y 軸に対する対称性が反対になり、その結果反対称モードとなった。そのため、 y 軸を含めて全ての y - z 平面上で打ち消し合うような干渉が生じ、 E_x 成分の遠視野像は図99(b)に示すように4峰型となった。しかしながら、図99(a)と図99(b)で全体の電界強度を積分した結果はほとんど等しく、つまり図99(a)に比べて図99(b)での各ピークの強度は $1/2$ になったと考えられる。一方、図99(d)においては、ピークの強度は単峰化によって図99(c)に比べて約2倍になる。よって直線偏光度は π シフトを導入することによって、導入する前に比べて約4倍になったと説明できる。図100(a)は、楕円格子点の楕円率を0.8~1に変化させたときの直線偏光度を計算した結果であり、どの楕円率においても π シフトを導入することで直線偏光度が4倍向上していることが分かる。

2次元フォトニック結晶レーザにおける重要な特性として、2次元大面積単一モード動作に不可欠である2次元的な光の結合の度合いが上げられる。この2次元的な光の結合、つまり x 方向と y 方向に伝搬する光の結合は、格子点形状が真円で x 方向と y 方向が等方的なときに最も強くなり、格子点形状を真円から楕円にしていくに従って x 方向と y 方向の結合の度合いが減少していき、2次元的な光の結合が弱くなる。さらに今回のように π シフトを導入することでフォトニック結晶構造がさらに非等方性を増すと考えられる。そこで、 π シフトを導入することで2次元

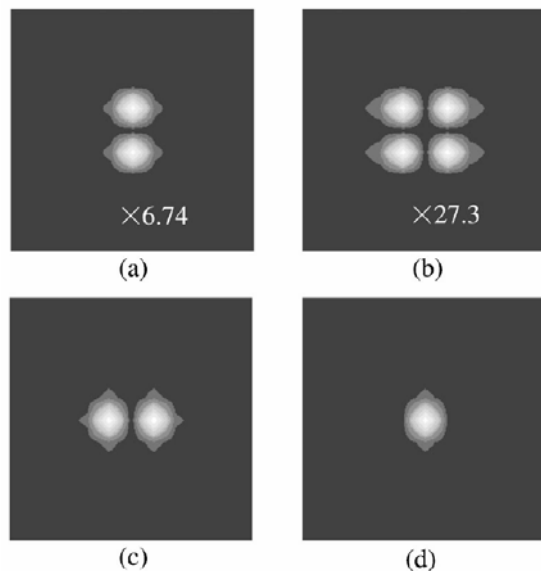


図99 電界成分の波数空間での時間平均の計算結果。(a)位相シフト無しの場合の E_x 、(b)位相シフト有りの場合の E_x 、(c)位相シフト無しの場合の E_y 、(d)位相シフト有りの場合の E_y 。(c)と(d)のピーク強度は1で規格化されており、(a)と(b)は示された値の分だけ強調されている。

的な光の結合がどのように変化するかについて検討を行った。2次元的な光の結合を評価するために、x 方向に伝搬する光と y 方向に伝搬する光の強度比 $c_{xy} = |H_z(2\pi/a, 0)|^2 / |H_z(0, 2\pi/a)|^2$ を定義した。ここで H_z は波数空間における磁界強度である。ここで、これまで用いてきた面内の電界成分 $E_{[x,y]}$ ではなく、垂直方向の磁界成分 H_z を用いたのは、 H_z は面内の共振にだけ関与し、垂直方向への放射には一切寄与しないため、純粋に面内における光の結合度を評価できるからである。格子点形状が真円の場合、 c_{xy} は最も大きく 1 となり、1 から離れていく程、2次元的な光の結合が弱くなることを意味する。図 100(b)は楕円率を 0.8~1 で変化させたときの c_{xy} の計算結果であり、いずれの楕円率においても c_{xy} は π シフトを導入することで約 20% 増大していることが分かる。これは π シフトを導入することによって結晶の非等向性が増したためと考えられるが、 c_{xy} の変化の絶対量は小さく、このことから考えると π シフトの導入が、2次元的な光の結合に与える影響は小さいと評価できる。

以上の計算では、2次元 FDTD 法を用いて無限の高さをもつ 2次元フォトニック結晶を仮定しているため、得られた直線偏光度や 2次元的な光の結合度の絶対値をそのまま、有限な高さの 2次元フォトニック結晶をもつ実際のデバイスに当てはめることはできないが、これらの結果は、 π シフトを導入することによって出射光を単峰化できるだけでなく、直線偏光度も向上できることを示しており、 π シフトを導入することが、単峰・直線偏光な 2次元コヒーレント発振を実現するために有効であることを示している。また、導入する位相シフトを工夫することで、出射光形状を単峰化だけでなく、様々な形に変化させることができると考えられる。これらの結果は、結晶構造を意図的に変化させることで、発振モードを様々な制御できることを意味しており、さらなる高機能化が可能であることを示している。

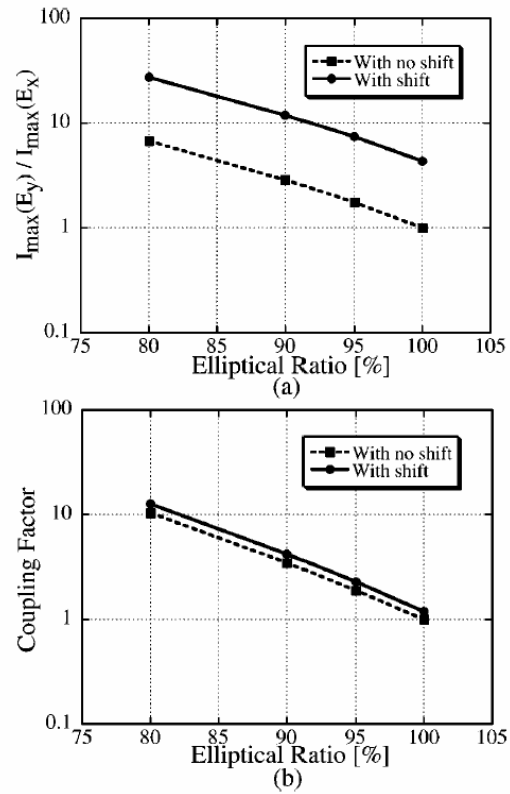


図100 (a)直線偏光度の楕円率依存性の計算結果。(b)2次元結合係数の楕円率依存性の計算結果。いずれの場合もフィリングファクターは 15.7%と仮定した。

(2) 得られた研究成果の評価及び今後期待される効果

A. 類似研究の国内外の動向との比較

本研究のグループの成果の発表を受け、米国 Navel Research Lab グループ、Stanford のグループ、ハーバード大学、韓国 Kaist グループ、ヨーロッパの各所のグループ、日本では、NTT のグループ等が相次いで、研究をスタートしており、本研究の重要性が世界的に認識されてきたと言える。ただ、現在のところは、他のグループの研究は、理論計算を始めたばかりのところや、実験においても、光励起での実験が多いのが実情である。以上の客観的事実から、2次元フォトニック結晶レーザの研究においても、世界的にみて、本グループの研究が最も水準が高く、かつまた、電流注入により、室温連続発振を実現していることから、産業展開にも最も近い位置にあると言える。

B. 成果の発表とそのインパクト等

本研究で得られた成果は、米科学誌サイエンスを含む 17 件の学術雑誌に掲載された。(特に、サイエンスの論文は、掲載後、90 件を超える多くの引用を受けるとともに国内外の多くの新聞や雑誌等で、数多く取り上げられるなど大きなインパクトがあったと言える)。また、本テーマに関して、17 件の解説記事・書籍等の執筆を行うとともに、国際会議では、35 件(内、招待講演 28 件)、国内会議では、81 件(内、招待講演 33 件)の発表を行った。特許出願も積極的に行い、本サブテーマに関しては、10 件以上の出願を行った。すでに述べたように、本研究の成果は、ロームと共同で、2002 年から 2005 年の 4 年間連続して、シーテック(エレクトロニクスショー)に出展している。特に、2005 年度は、初めて、チップを展示し、その場で動作させるというデモンストレーションを行い、多くの企業・機関から多くの引き合いが来るに至っている。

C. 波及効果

この研究により、日本発の新型レーザが誕生した。このレーザは大面積単一モード動作が可能であるため、今後、単一デバイスで 1W を遙かに超える大出力レーザの実現に資すると考えられる。また、格子点制御を始め、様々なフォトニック結晶構造の人為的制御により、様々なビーム形状をもったレーザが誕生するものと期待される。これらは、フォトニクス分野のみならず、光ピンセット、マイクロフレイディクス、バイオフォトニクス、超高密度光記憶、等々様々な分野への波及効果が期待出来る。

3.4 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―

(1) 研究成果の内容

A. はじめに

A.1 : 本研究のねらい

全方向にバンドギャップをもつ3次元結晶に対し、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。本デバイスは、超小型チャンネルアッド・ドロップとしての応用など通信情報分野や、さらには、非線形・バイオとの融合分野などへの多彩な展開が期待出来る。

A.2 : 研究実施体制

本研究は、京都大学を中心としつつ、住友電工・TDK・松下電工・アルプス電気等の企業とも連携しながら進めている。先の2次元フォトニック結晶レーザの研究と同様に、企業からの研究員の派遣を受け、京都大学の主導のもと、非常に良好な連携状態を保って、研究を進めている。なお、研究従事者の詳細は4.研究参加者に記す通りである。

B. 欠陥による光捕獲現象の基本原理の実証

研究代表者は、本研究開始直前に、図101に示すような2次元フォトニック結晶スラブ(薄板)における点・線欠陥複合欠陥に基づく新しい機能の発現の可能性を提案した。これは、2次元フォトニック結晶スラブ(薄板)中に設けた線状欠陥導波路に様々な光子エネルギーをもつ光を導波させ、導波路の近傍に設けた点欠陥により、点欠陥準位に相当するエネルギーをもつ光子を捕獲し、点欠陥共振器中で共振している間に、垂直方向に光が取り出されるという原理に基づくものである。これは、先にも述べたように、光波長多重通信において重要な超小型の面出力型の光アッド・ドロップデバイスの実現等に繋がるものと期待される。

本研究では、このようなデバイス応用を念頭に置きつつ、点欠陥により捕獲された光子の状態を詳細に調べることを目的として研究を進めた。そのために、まず、図102に示すような単一欠陥(アクセプタ型点欠陥)を1つ含むデバイスを作製し、その欠陥の半径を様々に変化しつつ、また欠陥と導波路の距離も様々に変化させ、欠陥から放射される光子のエネルギースペクトルを評価した。また、そのスペクトルから、欠陥共振器のQ値を見積もった。なお、デバイスは、材料としてInGaAsP/InP系半導体を用い、また加工には、通常反応性イオンエッチング(RIE)により行った。図103には、欠陥からの放射ス

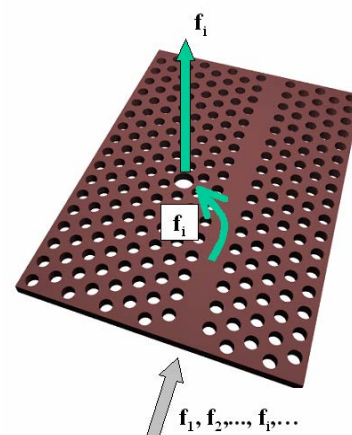


図101 2次元フォトニック結晶スラブ(薄板)における点・線欠陥複合欠陥に基づく新しい機能の発現の可能性。

ペクトルの一例を示す。同図から、分かるように、比較的シャープなスペクトルが得られ、Q値として、450程度の値を見積もることが出来た。図104には、欠陥の大きさと捕獲された光子の周波数の関係を示す。同図から、欠陥の大きさを変化させることにより、捕獲される光子の周波数が確かにチューニング出来ることが分かる。

続いて、ドロップ光の偏光状態に関する検討を行った。用いた点欠陥は、前述のように形状が円形のアクセプタ型点欠陥である。この場合、理論計算の結果、円孔を取り囲むように電界成分が分布し、出力光の偏光状態は、ほぼ無偏光となることが分かった。しかしながら実験的には、ドロップ光は、図105に示すように導波路に垂直な方向に直線偏光すること

が判明した。この理由を探るために、欠陥の形状を良く調べたところ、図105(a)に示すように、楕円形状をもつとともに、欠陥の位置が、若干、対称位置からずれていることが分かった。その結果をもとに、電磁界分布を計算したところ、図106(a)に示すように、電界成分は、円孔を取り囲むのではなく、欠陥位置がずれたところに集中することが明らかになった。その結果、偏光状態は、図106(b)に示すように、導波路に垂直な方向に直線偏光となり、実験結果と一致することが分かった。この結果は欠陥形状とその位置の制御により、任意の偏光をもったドロップ光を得ることが可能となることを示唆している。実際、欠陥の形状を楕円とし、その位置をわずかに中心位置からずらしつつ、回転させると、偏光方向が任意にコントロールしうることが分かった。

以上のようなドロップ動作の基本特性の把握の後、さらに、逆動作「アッド動作」に関する検討をも行った。これは、図107に示すように、外部から光子を点欠陥に入射し、その共振周波数に共鳴する光子を捕獲し導波路へと導く動作である。この現象を実証することにより、光アッド・ドロップデバイスとして動作することを示すことが出来る。図108にその実験結果を示す。実験は、デバイス上部から光を点欠陥へ入射し、導波路端部からその出力光を観察した。同図は、ちょうど点欠陥の共鳴波長に相当する光を入射した場合の結果を示し、導波路端部から光が出射している様子が分かる。

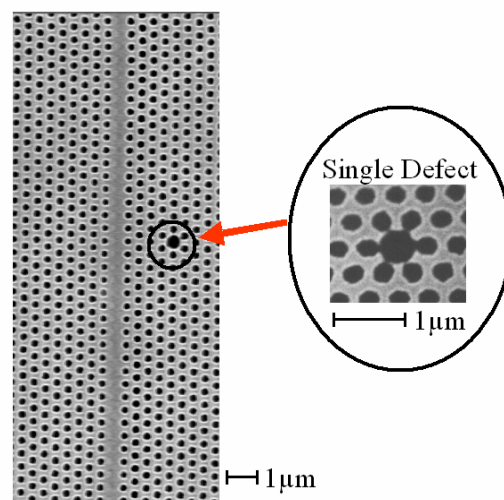


図102 線欠陥導波路の近傍に、点欠陥を1つ含むデバイスのSEM写真。

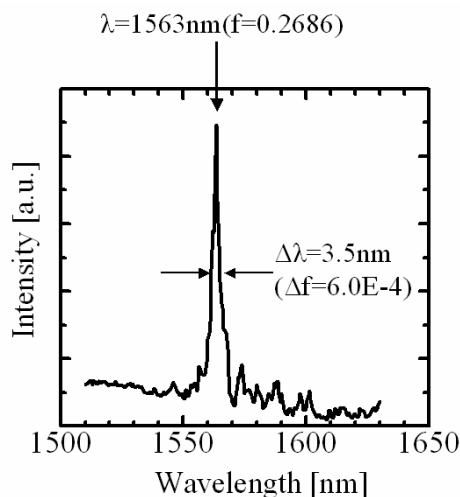


図103 欠陥から放射スペクトルの一例。

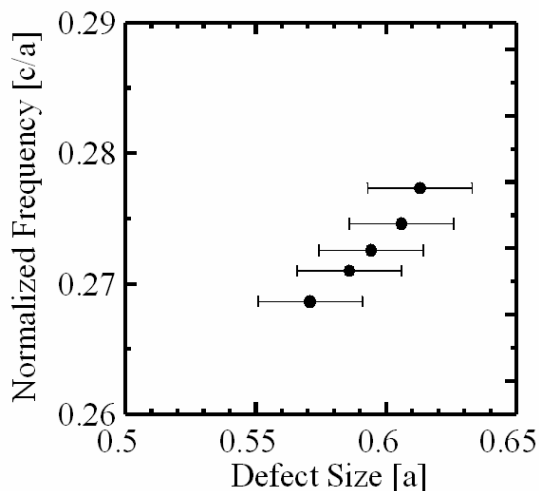


図104 欠陥の大きさと放射光の周波数の関係。

また、このアッド動作のスペクトルは、同デバイスにおいて、その逆の動作である光ドロップ動作のスペクトルとほぼ同じスペクトルを示すことが分かった。また、より詳細な比較をするため、光アッド動作の際の入射光の偏光状態を変化させて、導波路端からの出射光スペクトルを測定した結果と、逆に、光ドロップ動作の際の欠陥からの出射光の偏光特性を比較したところ、全く同一の偏光特性を示した。これらの結果は、まさしく光アッド動作が実証されたことを示している。

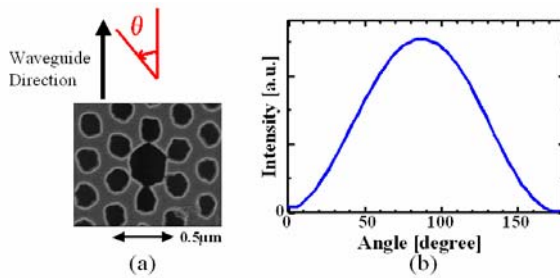


図105 点欠陥から放出される光の偏光特性。(a)は欠陥のSEM写真。(b)は偏光の測定結果。

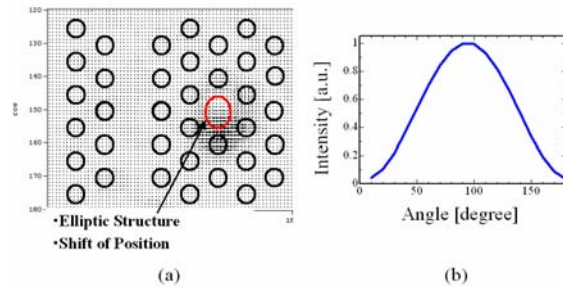


図106 点欠陥から放出される光の偏光特性の理論計算結果。(a)は図105(a)のSEM写真から欠陥形状、位置を考慮して計算した電磁界分布。(b)は偏光特性の理論計算結果。

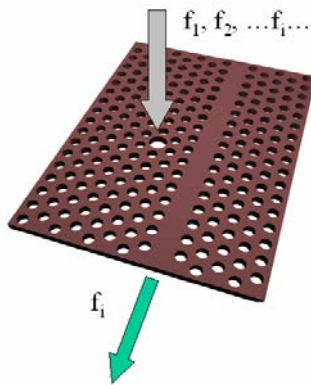


図107 光アッド動作の模式図。

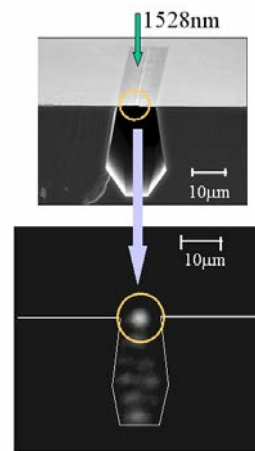


図108 光アッド動作の実験結果。波長1528nmの光を上部から点欠陥へ入射した際に、導波路端面から光出射が観測された。

C. 欠陥による光捕獲現象の詳細な評価

上述のように、基本動作の実証に成功したが、いくつか解決すべき重要な課題が残されている。その一つが加工精度である。これまでは、材料系として InGaAsP/InP 系を用い、また、エッチングの手法としては、RIE 法を用いていたため、作製された試料は、図 109(a)に示すように、大きな揺らぎをもったものであった。そこで、次のステップとして、十分に揺らぎの少ない試料を作製する技術を確認するとともに、得られた試料をもとに、より定量的な評価(特に本項では、点欠陥からの光の取り出し効率の定量的な評価)を行うことを目的に研究を進めた。

本 CREST プログラムにより購入した高精度電子ビーム露光(EB)装置、ICP エッチング装置を駆使し、かつまた、材料系もより加工の容易な Si を用いることにより、加工精度の大幅な向上を目指した。具体的には EB 露光時のレジスト膜厚の制御、電子ビーム露光量、加速電圧の最適化、さらには、ICP エッチング条件等(ICP 電力、加速電圧等々)の様々な検討を通じて、最終的に、図 109(b)に示すような非常に揺らぎの少ない試料の作製条件を見出すことに成功した。

以上の条件により作製した試料に対し、線欠陥導波路の透過スペクトル、点欠陥から上部へのドロップスペクトルを測定した結果を図 110(a)に示す。同図より、波長 1.51~1.60 μm 域において光が導波路を透過している様子が明確に見てとれる。また、この透過スペクトルには鋭い共振が乗っているのが見られるが、これは、導波路端面でのファブリー・ペロー共振に起因するもので、両端面の無反射化により除去できるものと考えられる。さて、同図で、最も重要なのは、1.55 μm 近傍において透過強度が明確に減衰している点である。これは、同図のドロップスペクトルのピークと明確に一致しており、点欠陥による光のトラップ・放射により、透過スペクトルが減衰していることを意味している。この透過スペクトルの減衰量から、点欠陥による光の取り出し効率を定量的に求めることが出来る。図 110(b)は、透過率(Trans)、ドロップ効率(Drop)を理論計算により求めたものである。横軸には、点欠陥における面内方向の Q 値($Q_{\parallel}$)と、垂直方向の($Q_{\perp}$)の比がとられている。ここに、 $Q_{\parallel}$ は、点欠陥と導波路との距離で決まり、距離が大きいほど、 $Q_{\parallel}$ が大きくなり、逆に、距離が小さいほど、 $Q_{\parallel}$ は小さくなる。一方、 $Q_{\perp}$ は、欠陥の上下の光閉じ込めの強さに依存し、欠陥の形状等が決まると、導波路との距離にほぼ関係なく一

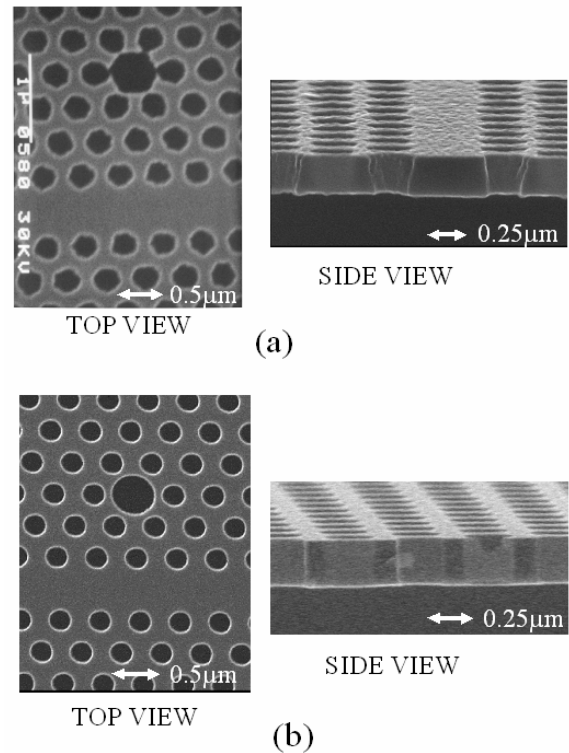


図109 (a)従来の作製法で作製した試料のSEM写真。(b)本CRESTプログラムにより購入した高精度電子ビーム(EB)露光装置、ICPエッチング装置を用いて作製した試料のSEM写真。

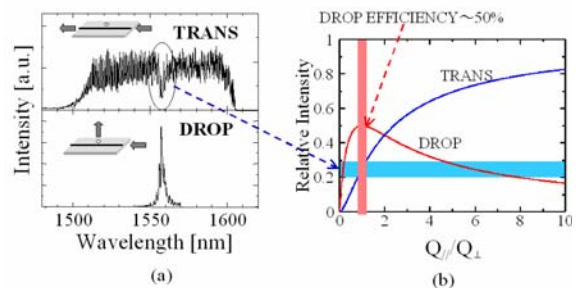


図110 (a)線欠陥導波路の透過スペクトルおよび点欠陥から上部へのドロップスペクトルの測定結果、(b)ドロップ効率、透過率の理論曲線と実験結果との比較。

定値をとることになる。図 110(b)の意味するところは、横軸 $Q_{\parallel}/Q_{\perp}$ が大きいとき(すなわち、相対的に $Q_{\parallel}$ が大きいとき)は、導波路と点欠陥の距離が大きく、結果として導波路を伝播する光はあまり点欠陥を感じずに導波路をそのまま光が伝播し、Trans が大きくなる。一方、 $Q_{\parallel}/Q_{\perp}$ が小さい(すなわち $Q_{\parallel}$ が相対的に小さい)ときは、導波路と点欠陥の距離が近く、導波路から点欠陥へと光がトラップされやすくなるが、上下の光閉じ込めが相対的に強くなるため、上下方向へは光が放射されにくくなり、結果として、光は再び、導波路へと反射され、Trans も Drop も小さくなる。以上より、最も Drop が大きくなるのは、 $Q_{\parallel}/Q_{\perp}=1$ の時となる。同図の透過率と、図 110(a)で実験的に得られた透過率を比較することにより、同図(b)に示されるように、欠陥による光取り出し効率 45~50%が得られることになる。これは、ほぼ理論的に得られる最大値と一致し、作製した試料は、ほぼ理想的な振る舞いをしていると判断出来る。なお、光取り出し効率は、さらに大きくすることが可能であることも見出しており、この詳細については、後述する。

D. 欠陥活用光機能デバイスの高機能化

D.1 : ドナー型欠陥によるQ値の向上

図 109(b)に示したように、ほぼ理想的な構造の試料が作製出来、かつまた、図 110 に示すように、理論最大効率に近いドロップ効率が得られることが、実験的に証明出来たと言える。今後、この機能を波長分合波デバイスとして、さらに深く展開していく際、重要なことの1つは、波長分解能を大幅に向上させることである。図 110(a)のドロップ・スペクトルの半値幅から、波長分解能は、3~4nm と見積もることが出来る。波長分解能を決めているのは、欠陥共振器の Q 値であり、Q が大きいほど、分解能が向上する。3~4nm の半値幅から Q 値は、400~500 程度と見積もられる。Q 値を大幅に増大させるためには、より詳細な欠陥エンジニアリングを行っていく必要がある。これまで、我々は、図 111(a)に示すように、欠陥のタイプとして、まわりの格子点よりも、半径を大きくした欠陥、いわゆるアクセプタ型欠陥を用いてきた。この欠陥は、主に空気から構成されているため有効屈折率が低く、上下の光閉じ込めを十分に大きくすることが困難である。このことは、欠陥共振器の上下方向の Q 値($Q_{\perp}$)が十分大きく出来ないことを意味する。そこで、今回、欠陥タイプをこれまでのアクセプタ型から、格子点を半導体で埋めたドナー型欠陥を採用することにした。つまり、図 111(b)に示すように、格子点を半導体で埋めた構造(同図は、3つの格子点を埋めた場合)について、検討を行った。

まず、理論計算を行った結果を図 112 に示す。横軸は、格子定数 a で規格化した、点欠陥と導波路との距離である。縦軸は、計算によって得られた $Q_{\parallel}$ 、 $Q_{\perp}$ の値である。

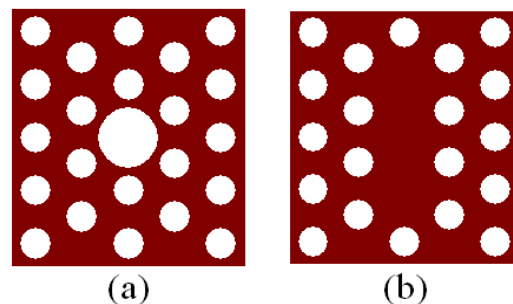


図111 (a)アクセプタ型欠陥の模式図。(b)ドナー型欠陥。同図は、格子点を半導体で埋めた構造を示す。

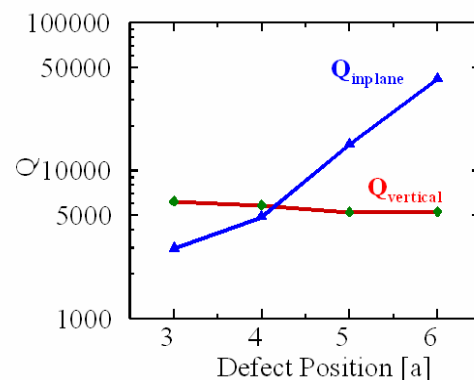


図112 ドナー型欠陥における $Q_{\parallel}$ 、 $Q_{\perp}$ の理論計算結果。

同図から、点欠陥と導波路の距離が離れるにつれ、 $Q_{\parallel}$ が増大していくことが分かる。この理由は、先に述べたとおりである。重要なのは、 $Q_{\perp}$ であり、ほぼ 6,000～7,000 程度の値が得られることが分かる。全体の Q は、 $1/Q=1/Q_{\parallel}+1/Q_{\perp}$ の関係から決まるため、最大効率が得られる $Q_{\parallel}/Q_{\perp}=1$ の条件を考慮すると、取り出し効率を最大に保ったまま期待出来る最大の Q は、3,000～4,000 程度となる。つまり、ほぼ従来の 10 倍の Q 値が期待出来、結果として、波長分解能は～0.4nm とかなり高精度な分解能が期待出来る。以上の理論的検討ののち、図 113 に示すような試料を実際に作製した。その試料に対し、ドロップスペクトルを測定した結果を図 114 に示す。同図より、 Q 値として、3,800 と極めて高い値が得られていることが分かり、波長分解能として、理論通り 0.4nm が実現出来たことが分かる。

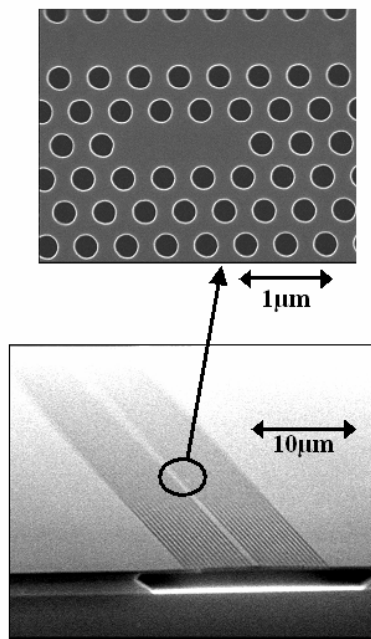


図113 ドナー型欠陥を用いて作製した試料の SEM写真。

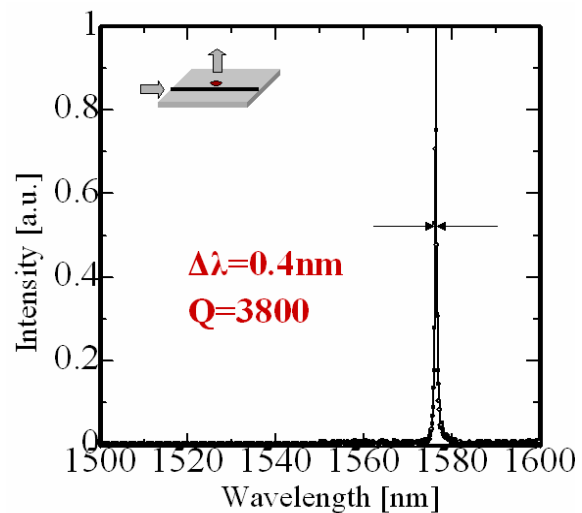


図114 図113のドナー型欠陥を形成した試料に対し、ドロップスペクトルを測定した結果。

D.2：新しい概念「面内ヘテロ構造」の提唱

前述の通り、ドナー型点欠陥を用いることで、点欠陥の Q 値として従来の 10 倍もの値が得られた。次のステップとしては、この高い Q 値を保ちながら多波長動作を実現することである。この際、次の 2 つのことを考える必要がある。1 つは、図 113 に示すようなドナー型欠陥の場合、そもそも欠陥周波数をチューニングするために、欠陥の大きさを変化させることが従来のアクセプタ型欠陥のように簡単ではないこと。もう一つは、仮に、欠陥の大きさを何らかの方法で変化させることが出来たとしても、その際に次のような問題が生じる。それは、すでに述べたように、欠陥の Q 値は、面内方向の $Q_{\parallel}$ と上下方向の $Q_{\perp}$ により決められるが、取り出し効率を最大にするためには、 $Q_{\parallel}=Q_{\perp}$ の条件を満たす必要がある。欠陥部分のみの大きさを変化させた場合、 $Q_{\parallel}$ はほぼ一定に保たれるが、欠陥部分の有効屈折率が変化するために上下方向の $Q_{\perp}$ が変化することになる。この場合、 $Q_{\parallel}=Q_{\perp}$ の条件が崩れてしまうため、光の取り出し効率が減少し、デバイス特性が大きく劣化するという重要な問題が生じることになる。本研究では、この重要な問題に対処するため、「面内ヘテロ構造」という新しい概念を提唱した。この概念は、全てのフォトニック結晶デバイスへ適用出来るものと確信する。

この概念を理解するために、まずフォトニック結晶のバンド構造について考えてみる。これは言うまでもなくフォトニック結晶中の光子の周波数 f と波数 k の分散関係を示すものである。ここで、 f と k は、結晶の格子定数 a で規格化される。この規格化により、格子定数 a が様々に異なる結晶においても、結晶の構造が比例的に変化する場合には、バンド構造は全く同じものとなる。この場合、それぞれの結晶中に、様々な欠陥(線欠陥や点欠陥)を導入した場合でも、欠陥間の光結合の大きさを一定に保つことが可能となる。一方、動作波長そのものは、格子定数 a の絶対値で決定されることになる。以上の議論により、格子定数の異なる結晶(それぞれは、比例的な大きさを持ち、同じ欠陥群が導入されている)ものを順次並べて、「面内ヘテロ構造」を作ることにより、それぞれの結晶領域で、同じ動作を得つつ、波長をチューニングすることが可能となる。図 115 がその概念図である。以上が、「面内ヘテロ構造」の原理である。

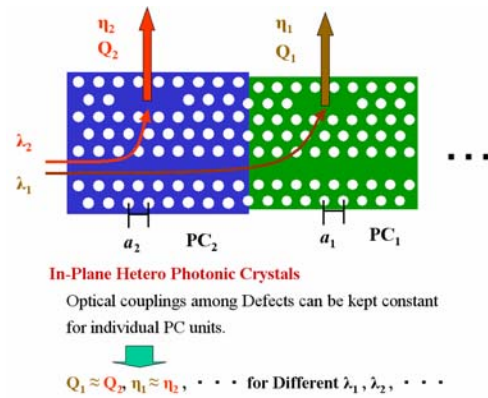


図115 面内ヘテロ構造の概念図。

D.3：面内ヘテロ構造による欠陥活用デバイスの多波長化

以上の考えに基づき、実際に図 116 に示すような7つの異なるフォトニック結晶領域からなる「面内ヘテロ構造」を作製した。各領域の格子定数は、 $a_7=418.75\text{nm}$ 、 $a_6=417.5\text{nm}$ 、 $a_5=416.25\text{nm}$ 、 $a_4=415\text{nm}$ 、 $a_3=413.25\text{nm}$ 、 $a_2=412.5\text{nm}$ 、 $a_1=411.25\text{nm}$ であり、また、それぞれの領域に線欠陥導波路とドナー型点欠陥共振器が導入されている。各領域は、線欠陥が一行につながるように配置されている。格子定数の差は、 1.25nm と極めて小さいため、図 116 に添付されたヘテロ界面部分の電子顕微鏡写真から分かるように、その差は全く区別することが出来ない。この試料に対して、領域 7(PC₇)の導波路端から光を入射し、その波長を様々に変化させた場合の各領域の点欠陥からの光ドロップの様子を図 117(a)に示す。また、それぞれのドロップスペクトルを同図(b)に示す。同図の上部には、領域 1(PC₁)の導波路端部から測定した透過スペクトルが添付されている。なお、領域 7(PC₇)の欠陥からのドロップスペクトルは、入射導波路端部での散乱光の影響を大きく受けたため示されていない。図 117 から、 $5\sim 7\text{nm}$ の波長間隔で、各領域の欠陥から光がドロップされていることが明確に見て取れる。また、それぞれの欠陥の Q 値は、 $\sim 3,800$ で、先に述べたドナー型欠陥で得られた Q 値が、全ての欠陥に対して維持されていることが分かる。これは、我々が提案した「面内ヘテロ構造」の利点を実証されたことを意味する。また、図 117(b)より、領域 1-4 の欠陥から放出された光の強度は、一定であることも分かる。これは、やはり「面内ヘテロ構造」の採用により、線欠陥、点欠

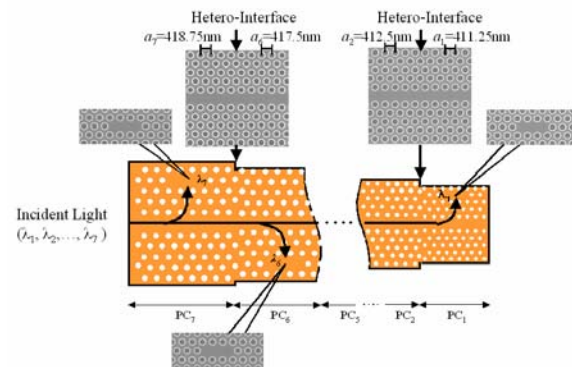


図116 作製した試料の模式図および各部のSEM写真。7つの異なるフォトニック結晶領域からなる「面内ヘテロ構造」となっている。各領域の格子定数は、 $a_7=418.75\text{nm}$ 、 $a_6=417.5\text{nm}$ 、 $a_5=416.25\text{nm}$ 、 $a_4=415\text{nm}$ 、 $a_3=413.25\text{nm}$ 、 $a_2=412.5\text{nm}$ 、 $a_1=411.25\text{nm}$ であり、また、それぞれの領域に線欠陥導波路とドナー型点欠陥共振器が導入されている。各領域は、線欠陥が一行につながるように配置されている。

陥および自由空間の結合状態が一定に保たれ、光取り出し効率が一定に保たれていることを意味している。同図(b)でさらに興味深い点は、領域5、6からのドロップ光が、Q値を $\sim 3,800$ と一定に保ちつつ、そのドロップ光強度が、他の領域1-4からのドロップ光強度に比べて、かなり大きくなっていることである。また、透過スペクトルを見ると、領域5、6のドロップ波長において、透過光強度がほぼ零に近づいている様子が見られる。これは、領域5、6でドロップされきれなかった光が、ヘテロ界面(領域1,2の界面)で反射され、再び、領域5、6へ戻り、再度ドロップされ、結果として、ドロップ光強度が大幅に増大したものであり、詳細については次節で述べる。以上の成果は米科学誌サイエンスの2003年6月号に掲載され、大きな注目を集めた。

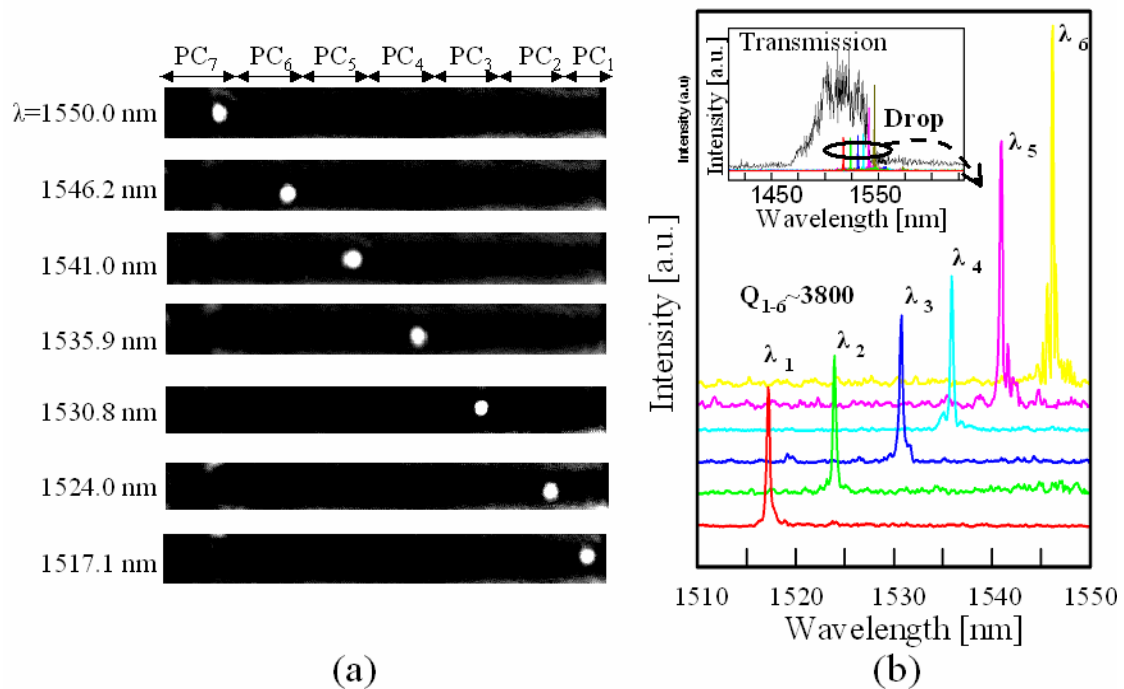


図117 (a)図116の試料に対して、領域7(PC₇)の導波路端から光を入射し、その波長を様々に変化させた場合の各領域の点欠陥からの光ドロップの様子。(b)それぞれの領域の欠陥からのドロップスペクトル。上部には、領域1(PC₁)の導波路端部から測定した透過スペクトルが添付されている。なお、領域7(PC₇)の欠陥からのドロップスペクトルは、入射導波路端部での散乱光の影響を大きく受けたため示されていない。

D.4 : 面内ヘテロ構造による光取り出し効率の向上

D.3 で述べたとおり、周期が 1.25nm ずつ異なるフォトニック結晶を 7 つ(PC₁～PC₇)接続した「面内ヘテロ構造」を作製し、作製したデバイスの各点欠陥からのドロップ光強度を詳しく調べた結果、図 117 に示すように Q 値は $\sim 3,800$ と一定であるが、PC₅、PC₆からのドロップ光強度が、他の PC₁～PC₄からのドロップ光強度に比べて、かなり大きくなっていることが分かった。また、透過スペクトルより、PC₅、PC₆のドロップ波長において、透過光強度がほぼ零に近づいている様子が見られた。これは、PC₅、PC₆でドロップされきれなかった光が、ヘテロ界面(PC₁とPC₂の界面)で反射され、再び、PC₅、PC₆へ戻り、再度ドロップされ、結果として、ドロップ光強度が大幅に増大したものと考えられる。そこで、ヘテロ界面で光が反射された場合の光取り出し効率について、モード結合理論を用いて解析を行った。図 118 に仮定した構造の模式図を示す。光は左側の端面から入射し(強度 S_{+1})、一部は点欠陥に結合($Q_{//}$:導波路と点欠陥の結

係数)し、点欠陥で共振し(光強度 a)、その一部が自由空間に放射される($Q_{\perp}$ は垂直方向の閉じ込めの強さを表す)。点欠陥に結合しなかった光はヘテロ界面に到達(強度 S_2)し反射される(反射光強度 S_{+2})。この光は再度点欠陥に結合し自由空間に取り出されるが、点欠陥に結合しなかった光が入射端に戻ってくる。また入射した光の一部は点欠陥で反射されるため、入射端に戻ってくる光強度 S_{-1} はこれら2つの和となる。ヘテロ界面で反射されて入射端に戻ってきた光と、点欠陥で反射されて入射端に戻ってきた光は位相差 θ をもつ。モード結合理論を用いて光取り出し効率 η を求めた結果、図 119 の上部に示すような式で表され、特定の条件を満足した場合に $\eta=1$ となることが分かった。図 119 は取り出し効率 η と θ の関係を計算した結果であり、ヘテロ界面を利用することで、かなり広い範囲の θ において約 90% 以上の取り出し効率が期待できることが分かる。より詳細な検討として、図 120(a)に示すように $\eta=1$ が期待される構造を仮定して 3 次元 FDTD 計算を行った結果、図 120(b)に示すように $\sim 100\%$ の取り出し効率が得られることが確認できた。このことより、面内ヘテロ・フォトニック結晶を用いることで、多波長動作が実現可能でできるだけなく、取り出し効率も大幅に向上可能であることが示された。これらの結果は、我々が提案した面内ヘテロ・フォトニック結晶構造がデバイスの高性能化に非常に有効であることを示す結果である。

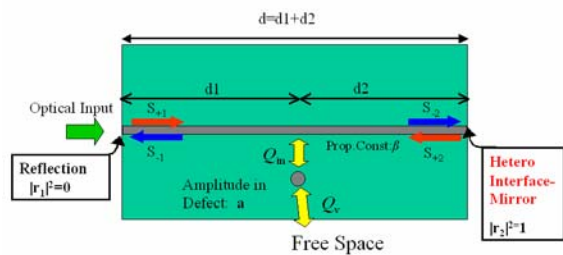


図118 フォトニック結晶導波路と点欠陥共振器、ヘテロ界面反射鏡をもつ構造の模式図。

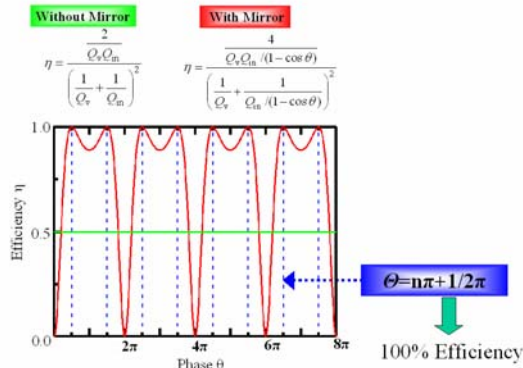


図119 ヘテロ界面反射鏡のある場合と無い場合の光取り出し効率の計算結果。

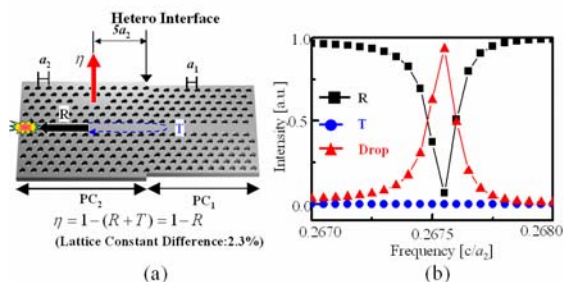


図120 (a)理論計算で想定した構造の模式図。(b) 反射率・透過率・光取り出し効率の計算結果。

D.5 : 面内型デバイスの実現

これまで述べてきた波長分合波デバイスは、導波路を伝搬する光を点欠陥共振器で捕獲し、試料上方に光を取り出す面出力型のものであった。これは、点欠陥共振器の光閉じ込めの強さを表す Q 値が小さいため、光が共振器内に完全には閉じ込められず上方へ放射されるという現象を積極的に利用したものである。一方、実際の光ネットワークで使用されるデバイスへの応用を考えると、導波路中を伝搬する様々な波長の光のうち、所望の波長の光だけを点欠陥共振器で捕獲し、別の導波路に取り出す、図 121 に示すような面内型デバイスの実現が望まれる。そこで、本研究では面内型デバイスの実現に向けて研究を行った。

面内型デバイスを考えた場合、点欠陥共振器の Q 値である Q_T は、共振器から上方への漏れを表す Q_v と、入力導波路と点欠陥共振器の結合を表す $Q_{in-input}$ 、出力導波路と点欠陥共振器の結合を表す $Q_{in-output}$ を用いて、 $1/Q_T = 1/Q_v + 1/Q_{in-input} + 1/Q_{in-output}$ という式で表される。この式より分かるように、 Q_v が大きくない場合は、 Q_T はおもに Q_v によって決定され、上方への放射が生じると同時に、波長分解能を決定する共振波長の半値幅も大きくなり、デバイスの特性が著しく悪くなる。一方、 Q_v が十分大きければ、放射損失も低減され、入出力導波路と共振器の結合を適切に設計することで、所望のデバイス特性を実現することが可能となる。このため、面内型デバイスを実現するためには、高 Q 値共振器の実現が必要不可欠であるが、次項 E で詳述するように、本研究では、45,000 という極めて高い Q 値をもつ共振器を実現することに成功した(これは、2.2(3)でも述べたように当初予定していなかった新たな展開による成果である)。ここでは、この高 Q 値共振器を用いた検討を行う。

図 122 は本研究で作製した試料の SEM 写真である。基本的には、これまで述べてきた試料と同様に 2 次元三角格子フォトニック結晶を厚さ 250nm の Si スラブに形成したものである。格子周期 a も従来と同様 $a=420\text{nm}$ であり、円孔半径は 120nm である。最も重要な箇所が点欠陥共振器であり、図 122(b)に示すように 3 個の円孔を埋めた構造になっており、45,000 以上の高い Q_v を実現するために共振器両端の円孔を本来の位置から 63nm シフトさせた構造となっている(詳細は、次項 E 参照)。理論計算より、放射損失は 6%以下に抑制することが可能であり、また波長分解能を決定する全体としての Q 値 Q_T は約 3,000 であり、これは波長分割多重(WDM)通信システムへの応用を考えた際に十分な値である。もう一つの重要な箇所が出力導波路である。図 122(a)から分かるように出力導波路には 60° 曲がりを導入し、点欠陥共振器部以外の場所で入力導波路と出力導波路の間隔を離すことで、入出力導波路間で光が結合しないようになっている。3次元FDTD法による理論計算では、 60° 曲がり導波路の透過帯域(透過率 90%以上)は、規格化周波数で $0.270 \sim 0.273(c/a)$ であるのに対して、共振器の共振周波数は $0.266(c/a)$ であり、このままでは取り出された光が曲がり導波路部で大きな曲がり損失をうけてしまう。そこで、3次元FDTD計算によって、曲がり導波路の透過帯域を欠陥の共振周波数までシフトするように曲がり部の構造を設計した。具体的には、図

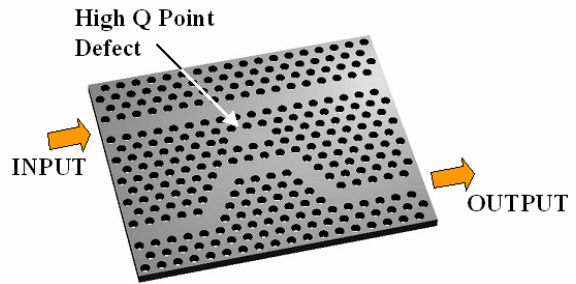


図121 面内型デバイスの構造模式図。

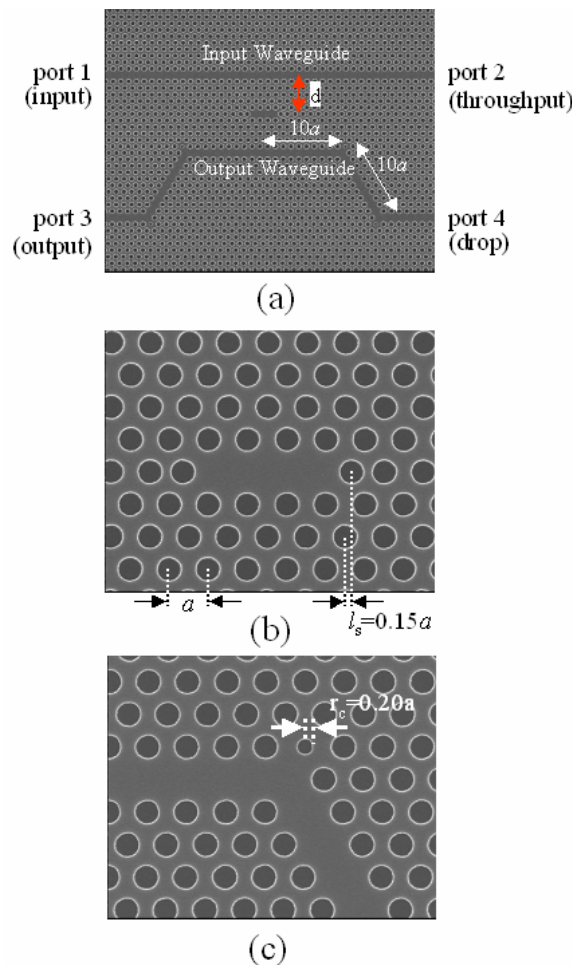


図122 試作した面内型デバイスの(a)全体のSEM写真、(b)共振器部、(c)曲がり導波路部、のSEM写真。

122(c)に示すように曲がり部の角の部分の円孔半径を通常の120nmから76nmに変えた。入力導波路と出力導波路の距離は点欠陥共振器の部分で円孔12列であり、それ以外の領域では22列とした。

図123は上記で述べた構造パラメータを用いて、ポート1(もしくはポート2)から入射させた時にポート4(もしくはポート3)に取り出されるドロップ光のスペクトルを3次元FDTD法で計算した結果であり、共振器の共振周波数0.266(c/a)の光が取り出されることが分かる。この計算結果を踏まえて、実際に作製したデバイスの評価を行った。波長可変レーザ光をポート1から入射させ、ポート2(透過光)、ポート4(分波光)を赤外カメラもしくはフォトダイオードで検出した。図124(a)(b)はそれぞれ、入射させた光の波長が共振器の共振周波数に一致する場合、および一致しない場合のポート2・ポート4の赤外カメラ像である。ポート2・4の出射光にピン点を合わせているため、デバイスの像はぼけて見えている。入射光の波長が共振波長と一致する場合(波長1.576 μm)は図124(a)に示すように、分波した光がポート4より出力されており、一部分波されなかった光がポート2から出力されていることが分かる。一方、入射光の波長と共振波長が一致しない場合(波長1.575 μm)は図124(b)に示すように、点欠陥に捕獲しなかった光がそのままポート2だけに出力されており、ポート4には出力されていないことが分かる。次に入射光の波長を変えながらポート2・ポート4のそれぞれに出力される光の波長をフォトダイオードで検出し、スペクトルを測定した。図125(a)は、ポート4から出力される光のスペクトルであり、付図は拡大図である。この図から分かるように測定を行った1510～1600nmの波長範囲において、分波されたピークは1つだけであり、意図したとおり面

入出力型動作が実現できていることが分かる。分波スペクトルの半値幅は0.12nmであり、これは共振器のQ値として $Q_T=13,000$ に対応する。また、曲がり導波路で狙い通り透過帯域がシフトしていることを確認するため、ポート3から光を入射させ、ポート4から出力される光のスペクトルを測定した結果が図125(c)である。この図より、透過帯域は1552nm～1580nmにあり、共振器の共振波長(1576nm)を含んでいることが分かる。また図125(b)はポート2より出力された光のスペクトルである。図125(a)の分波光のピーク強度と、図125(b)の共振波長における透過光強度から分波効率を見積もった結果、65%程度とかなり高効率であることが分かった。理論計

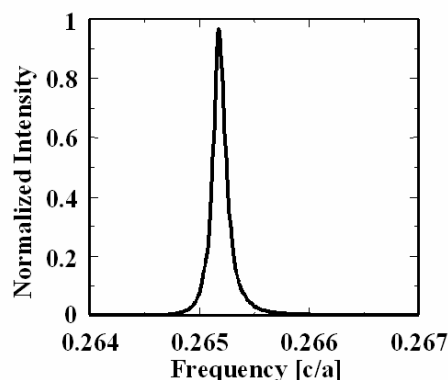


図123 ドロップスペクトルの理論計算結果。

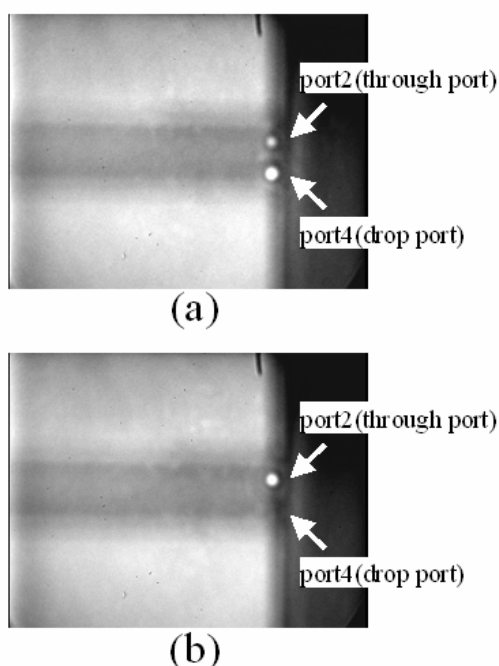
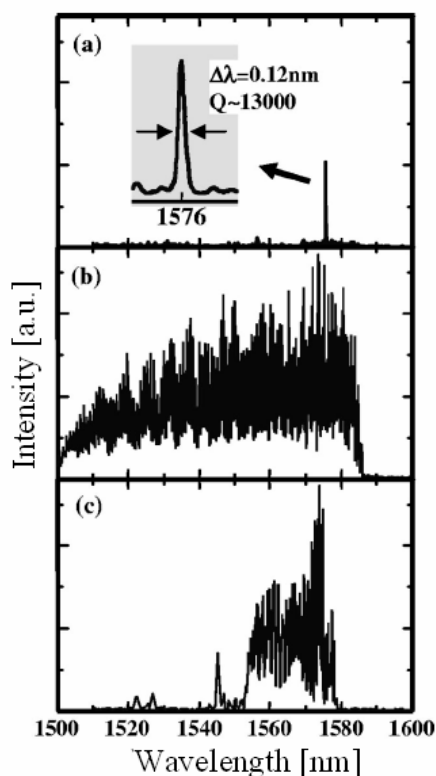


図124 面内光取り出し型波長分合波デバイスに波長可変レーザ光を入射させたときの様子。(a)入射光の波長が点欠陥共振器の共振波長と等しい場合。光が共振器によってDropポートに取り出されている。(b)入射光の波長が点欠陥共振器の共振波長と等しくない場合。全ての光がThroughポートに取り出されていることが分かる。



算より予測される分波効率 は 25%程度であり、実験でこのように高い効率が得られたのは、導波路端面で反射した光による干渉で分波効率が向上したものと考えられる。

この結果は、2次元フォトニック結晶スラブを用いたデバイスの応用範囲を広げることにつながり、極めて重要な成果と言える。既に述べた面内ヘテロフォトニック結晶と組み合わせることで、多波長でかつ高効率動作への展開も可能である。

図125 面内型デバイスのスペクトル測定結果。
(a)ポート4より取り出されたドロップ光のスペクトル。(b)ポート2より取り出された透過光のスペクトル。(c)ポート3から光を入射させポート4に取り出された光のスペクトル。

E. 新たな展開：高Q値光ナノ共振器の実現

E.1：点欠陥共振器における損失要因の解明

波長程度の小さなモード体積に光を強く閉じ込める光ナノ共振器は、前項 D.5 で述べた面内型超小型デバイス実現にとって極めて重要である。さらにこのような光ナノ共振器は、コヒーレントな電子－光子相互作用、超低閾値レーザ、非線形光学、量子情報処理などの様々な物理・工学分野においても極めて重要となると考えられる。しかしながら、一般にモード体積 V に反比例して放射損失が大きくなるため、高 Q 値かつ波長程度まで体積が小さい共振器の実現は非常に困難であると考えられていた。本研究において、図 122(b)に示したように、ドナー型共振器の端部の空気孔をわずかにシフトさせるだけで、 Q 値が劇的に増大するという現象を思いがけず発見した。以下では、高 Q 値ナノ共振器を実現するための原理について述べる。

2次元フォトニック結晶スラブの点欠陥共振器を用いて、高い Q/V を実現するためには、上下方向の全反射条件を如何に満足するように光を閉じ込めるか、ということが重要になる。そこで、スラブの上下方向の光閉じ込めについて検討するために、まず図 126(a)に示すような簡単なモデルを検討した。共振器は厚さ T 、長さ L の誘電体で構成されており、両端は光を完全に反射する完全ミラーと仮定し、 x 方向に光を閉じ込める。 y 方向については、簡単のために同様と仮定した。 z 方向については、上下の空気と誘電体の界面で全反射が生じることで光が閉じ込められる。図 126(b)は、共振器長が波長の 2.5 倍という非常に短い場合の共振モードの電界分布である。

上下方向(z 方向)の全反射による光閉じ込めの強さは、共振器内の電界分布を空間フーリエ変換して様々な波数成分を持つ平面波の重なりで表すことによって評価することができる。各々の平面波の波数ベクトル k の接線成分($|k_y|$ もしくは $|k_x|$)が 0 から $2\pi/\lambda_0$ (ただし λ_0 は空気中における光の波長)の間に存在する場合は、誘電体と空気の境界面における波数保存則(い

わゆるスネルの法則)が満足されるため、光は共振器から上下の空気クラッド層に漏れ出すことができ、光の閉じ込めが弱くなる。ここで空気クラッド層における $|k_{\parallel}|$ は x - z 平面内の伝搬方向に応じて 0 から $2\pi/\lambda_0$ の間の値をとるが、共振器内部での $|k_{\parallel}|$ は、光が極微小領域に閉じ込められたことによって、様々な値をとり得ることに注意が必要である。共振器内における $|k_{\parallel}|$ が $2\pi/\lambda_0$ より大きい場合は、空気と誘電体の境界面で波数保存則を満足できないため、光は空気クラッド層に漏れ出すことができなくなり、共振器内に強く閉じ込められることになる。図 126(c)は、電界分布をフーリエ変換して波数空間で表示したものである。中央の薄く塗りつぶされた領域は $|k_{\parallel}|$ が $2\pi/\lambda_0$ より小さい漏れ領域を表している。この図より分かるように、漏れ領域内に電界の成分が多く存在しており、これは放射損失が大きいことを意味している。

ここで、漏れ、すなわち損失の生じる原因についてさらに検討を行う。共振器内部の電界分布は、波長 λ の正弦波で表される基本波と、共振器の構造によって決まる包絡線関数 $F(x)$ の積で表される。基本波のフーリエ変換結果は $k=\pm 2\pi/\lambda$ にデルタ関数で表され、これが包絡線関数のフーリエ変換で変化することになる。図 126(a)に示す共振器の場合、包絡線関数は $F(x)=1$ ($-L/2 < x < L/2$)、 $F(x)=0$ ($x < -L/2$, $L/2 < x$) で表され、対応するフーリエスペクトルは幅 $2\pi/L$ の sinc 関数となる。基本モードによって生じるフーリエスペクトルは漏れ領域の外側に存在しているが、共振器端 ($x=-L/2$, $L/2$) における包絡線関数の急激な変化によって、漏れ領域内に存在する成分が生じ、これが放射損失の原因となる。特に共振器の体積が小さい程、端面の影響が大きくなり、急激に Q 値が減少することになる。

この結果を踏まえて考えると、放射損失を抑制するためには、フーリエスペクトルにおいて漏れ領域内部に成分を持たないようにするため、共振器端部において包絡線関数が急激に変化するのではなく、逆によりなめらかに変化することが好ましいと言うことになる。そこでなめらかな包絡線関数として、例えばガウス関数を用いた場合の電界分布とそのフーリエスペクトルを図 126(d)、(e)に示す。先程の図 126(c)の場合と異なり、漏れ領域に存在する成分が大幅に減少していることが分かる。つまり極微小高 Q 値共振器の実現には共振モードの電界分布の設計が非常に重要であり、緩やかでかつ空間的に局在した包絡関数をもつ共振モードが非常に有効であることが分かった。

次にさらに高い Q 値を得るために、点欠陥共振器の共振モードがもつ包絡線関数として、どのような関数が望ましいのか、ということ

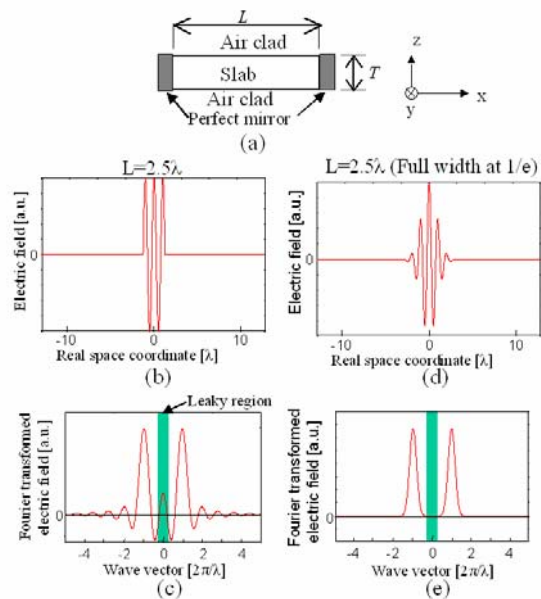


図126 共振器における損失要因についての検討。(a)計算に用いた、単純化した共振器の模式図。両端には完全ミラーを、上下は空気クラッド層を仮定した。(b)共振器内部の電界分布、および(c)そのフーリエ変換結果。漏れ領域は図中青色で示されている。(d)ガウス型の包絡線関数を仮定した場合の共振器内部の電界分布、および(e)そのフーリエ変換結果。

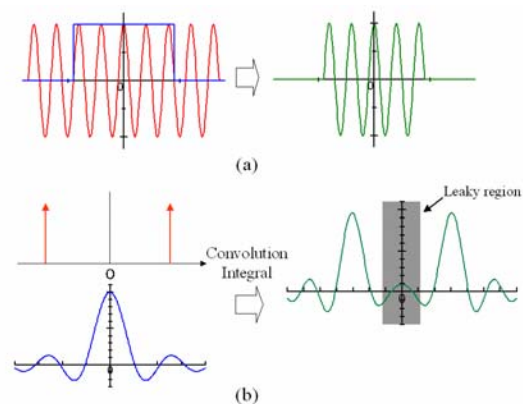


図127 (a)共振器内部の電界分布（基本正弦波と矩形包絡線関数の積で表される）および(b)そのフーリエ変換。いずれも模式的に示している。

について理論的に検討を行った。先程と同様、共振器内の電界分布を、波長 λ (ここでは $1.7a$ に相当)をもつ基本正弦波と共振器構造で決まる包絡関数との積として考えると、先に述べたようにそのフーリエスペクトルは、図 127 に示すように基本波による $k=\pm 2\pi/\lambda$ にピークをもつデルタ関数と、包絡関数をフーリエ変換したものとのたたみ込み積分となる。これは、実空間での積が、フーリエ空間での畳み込み積分に相当するためである。先に検討したように、包絡線関数として、図 127(a)に示すような箱型関数を考えた場合、基本波は漏れ領域外部にピークをもっているが、包絡関数のフーリエ変換が漏れ領域内の電磁界成分を生み出している。一方、図 128 に示すように包絡線関数として、ガウス関数を考えた場合、波数空間ではサイドローブが小さく、漏れ領域内の成分は小さくなる。つまり、高い Q 値を得るためには、包絡線関数としては、波数空間上でサイドローブ成分の小さいことが重要であることが分かった。このような包絡線関数としては、ガウス関数以外にローレンツ関数が考えられる。そこでこれら 2 つのうち、どちらが高い Q 値が得られるかを、理論的に計算した。すなわち、包絡線関数が完全にガウス関数・ローレンツ関数になった場合の、漏れ領域内に存在する電磁界成分の割合について計算を行った。その結果が図 129 であり、灰色の領域が漏れ領域である。この図を見るとわかるように、ガウス関数に比べて、ローレンツ関数のほうが、漏れ領域内に入る電磁界のエネルギー成分は約 4 桁も大きいことがわかる。これは、高い Q 値を目指すためには、ガウス関数に近い包絡線をもつ共振器が望ましいことを表している。

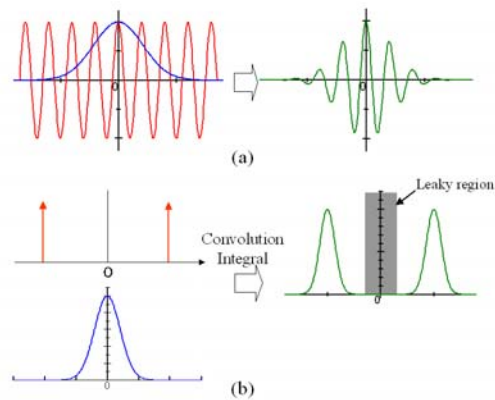


図128 (a)共振器内部の電界分布が基本正弦波とガウス型包絡線関数の積で表される場合。(b)そのフーリエ変換後の模式図。

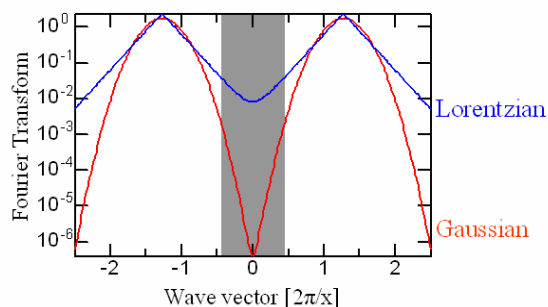


図129 包絡線関数として、ローレンツ関数とガウス関数を仮定した場合の、電界成分の波数依存性の計算結果。ローレンツ関数に比べてガウス関数の方がライトコーン(灰色の領域)内に存在する電界強度が4桁以上小さいことが分かる。

E.2 : ナノメートル精度の格子点位置制御による高 Q 値共振器

以上の結果を受けて、実際の 2 次元フォトニック結晶中に導入した点欠陥共振器で高い Q 値をもつ構造の設計を行った。基本的な構造としては、図 130(a)に示すように厚さ 250nm の Si スラブに、 420nm 間隔で三角格子状に規則正しく空気穴を設けた 2 次元フォトニック結晶の一部に、直線上に 3 つ空気穴を埋めた極微小点欠陥を用いた。図 131(a)は図 130(b)に示す共振器における共振モードの電界分布を 3 次元 FDTD 法によって計算した結果である。この電界分布を 2 次元フーリエ変換した結果が図 131(b)であり、この図において、光が全反射条件を満足しない領域、つまり光が漏れ出す領域は中央のグレーの円内に相当する。この図からわかるように、大部分は円外の漏れ出さない領域に存在しているが、一部が円内の漏れ出す領域に存在することが分かる。そこで、前項の知見に基づき、光をより緩やかに閉じ込め、全反射条件を満足しない領域に存在する電界成分を減少させることを目指した。具体的には、共振器端部でのブラッグ反射条件を変化させることを試みた。ブラッグ反射は、共振器端部付

近の空気円孔それぞれによる反射の和で考えることができる。端部に存在する円孔を移動させた場合、この格子点から部分反射される光の位相が変化するため、ブラッグ反射の位相整合条件からずれることになり、反射率が小さくなると考えられる。反射率が小さくなると、光はより深くフォトニック結晶領域にしみ出し、さらに外側の円孔によってブラッグ反射される。つまり共振器端部における電界の変化がより緩やかになると考えられる。さらに格子点の移動量を適切に設計することにより、共振器における電界分布が理想的なガウス分布に近づくと考えられる。この考えに基づき、図 130(c)に示すように共振器端部に位置する空気穴をほんのわずかに、通常位置よりも外側にシフトした構造を設計した。シフトさせた

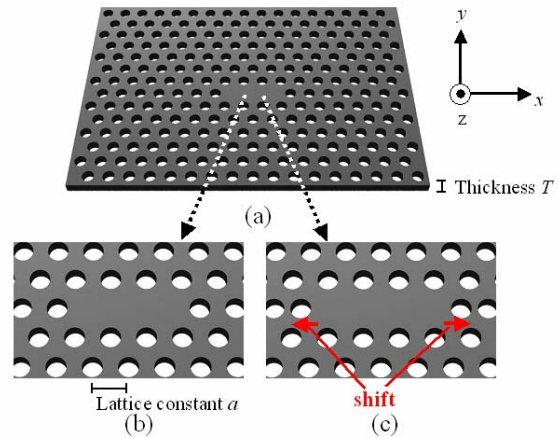


図130 (a)点欠陥共振器をもつ二次元フォトニック結晶スラブの模式図、(b)通常の3個埋めドナー型点欠陥共振器、(c)ドナー型共振器の両端の円孔位置をシフトさせた共振器。

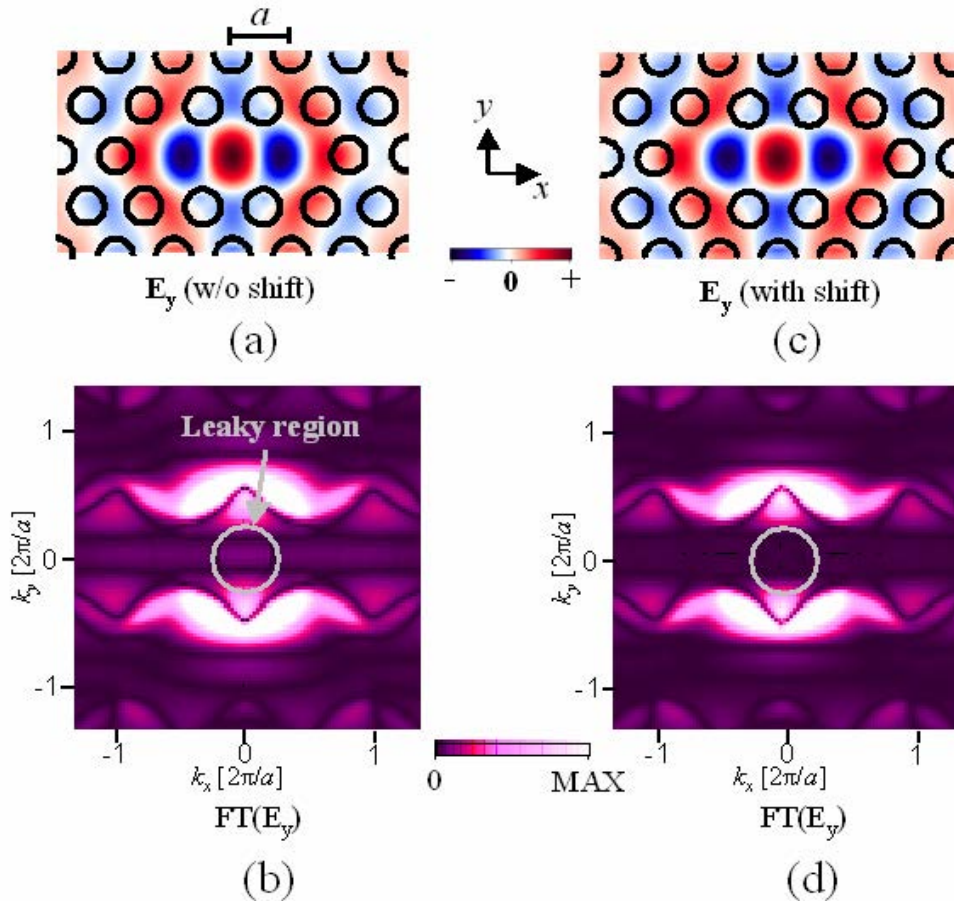


図131 (a)図130(b)で示した通常の3格子点埋めドナー型欠陥における電界(E_y)分布、および(b)そのフーリエ変換結果。図中の円の内部が漏れ領域に相当する。(c)図130(c)で示した、両端の円孔をシフトさせたドナー型共振器における電界(E_y)分布、および(d)そのフーリエ変換結果。円孔のシフト量は $0.15a$ を仮定した。

場合の電界分布を図 131(c)に、その 2 次元フーリエ変換結果を図 131(d)に示す。図 131(b)と (d)を比較すると、円孔をシフトさせることで漏れ領域(円内)に存在する成分が減少していることが分かる。これは、円孔をシフトさせることで、予想どおり電界分布が、ガウス分布に近くなったためと考えられる。以上の結果より、円孔をシフトさせることで光の漏れ出しが抑えられ、高い Q 値をもつ共振器が実現できることが明らかになった。

上記の計算結果を、実験的に実証するために、実際に最近接円孔を少しずつシフトさせたデバイスを作製し、共振器の Q 値を測定した。図 132 は、作製した共振器の SEM 観察像と共振スペクトルの測定結果である。円孔をナノメートル単位でシフトさせることで共振スペクトルの半値幅が大幅に変化し、円孔を $\sim 60\text{nm}$ シフトさせた場合に共振スペクトルの半値幅が最小 (0.045nm)になることが分かる。この共振器の Q 値は、約 45,000 であり、シフトさせない場合の Q 値 $\sim 3,800$ に比べて 1 桁以上高い Q 値を実現することに成功した。また共振器の体積 V は 3 次元 FDTD 法による電界分布の計算結果より $6\sim 7 \times 10^{-14}\text{cm}^3$ と極めて小さく、単位体積あたりの Q 値は $6.4 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}(=120,000/\lambda^3)$ と、当時報告されていた値に比べて 1~2 桁大きい、世界最高の値を実現することに成功した。この結果は英科学誌ネイチャーにも掲載され、世界最高の光閉じ込め効果をもつ光ナノ共振器として大きな注目を集めた。

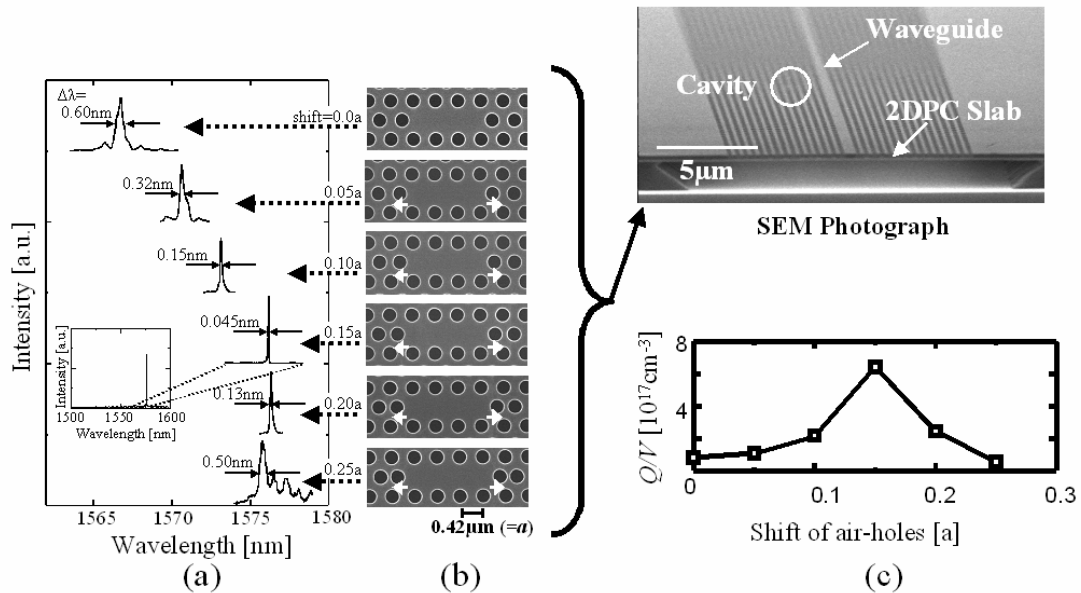


図132 円孔シフト共振器の実験結果。(a)(b)円孔シフト量を様々に変化させた場合の共振スペクトルと、共振器の電子顕微鏡写真。付図は円孔を0.15aシフトさせた共振器の共振スペクトルを広い波長域に渡って測定した結果。(c)見積もられた Q/V の円孔シフト量依存性。最大 $Q/V=6.4 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}(=120,000/\lambda^3)$ が得られた。

E.3 : 格子点位置の微調整によるQ値の向上

前述のとおり、点欠陥共振器の両端部にある 2 つの空気孔位置をシフトさせることで(図 133(a)(b)に再掲)、 $Q=45,000$ 、 $V=7.0\times 10^{-14}\text{cm}^3(=0.69(\lambda_0/n)^3)$ という波長の 3 乗程度のモード体積 V をもつ高 Q ナノ共振器の実現に成功した。ここで、図 133(e)に示す共振器の電界分布の計算結果と、ガウス型包絡線をもつ理想的な電界分布の比較結果を良く見てみると、0.20a シフトさせた共振器の電界分布でも、ガウス関数の包絡関数を用いた近似曲線と比べて、最近接空気孔 A よりも外側の部分ではまだ減衰が大きいことが分かる。そこで包絡線関数をよりガウス関数に近づけるべく同共振器の両端部にある 6 つの空気孔位置を微調整することで(図 133(c))、さらなる Q 値向上について理論的・実験的に検討を行った。計算には、3 次元 FDTD 法を用いた。まず、位置 A(最近接)の空気孔をシフトさせた共振器について、 Q 値とモード体積(V)を導出した。それぞれの計算結果を図 134(a)に示す。この図から分かるように、 Q 値は、空気孔シフト量とともに劇的に上昇し、あるシフト量を過ぎると Q 値が低下していることが分かる。なお、最大の Q 値は、位置 A の空気孔を 0.200a シフトさせたときに得られ、その値は約 100,000 であった。一方、モード体積 V については、空気孔シフトに対してほとんど変化が無いことが分かる。この原因は、共振器サイズに比べて空気孔シフト量が比較的小さいことに加え、点欠陥中央付近に電界が集中しているために点欠陥端部の影響が少ないからだと思われる。次に空気孔 A の位置を Q 値が最も高い位置($=0.200a$)に固定し、位置 B(第 2 近接)の空気孔を少しずつシフトさせたときの Q 値とモード体積の変化を計算した。その結果を図 134(b)に示す。図に示すように、位置 B の空気孔シフト量が 0.025a のときに Q 値は最大となり、おおよそ 130,000 という値が得られた。つまり、位置 B の空気孔シフトは、 Q 値増大に対して効果が期待できることが分かる。さらに、この位置に空気孔 A、B を固定し、位置 C(第 3 近接)の空気孔をシフトさせた。その結果を図 134(c)に示す。図に示すように、位置 C のシフト量が 0.200a のときに Q 値は最大となり、約 260,000 という非常に高い値が得られた。つまり、位置 C の空気孔シフトは、 Q 値増大に大きな効果があることが示唆される。なお、この最大値は、シフト無しの点欠陥の Q 値(5,200)より 50 倍も大きい。一方、図 134(b)、(c)に示すように、それぞれのモード体積 V は空気孔シフトに対してほぼ一定であり、 Q 値最大ときでも $7.4\times 10^{-14}\text{cm}^3(=0.73(\lambda_0/n)^3)$ と極めて小さい。以上から、位置 A に加えて位置 B、C の空気孔をシフトさせることで、光ナノ共振器のモード体積をほぼ一定に維持したまま Q 値を大幅に向上できることが示唆された。

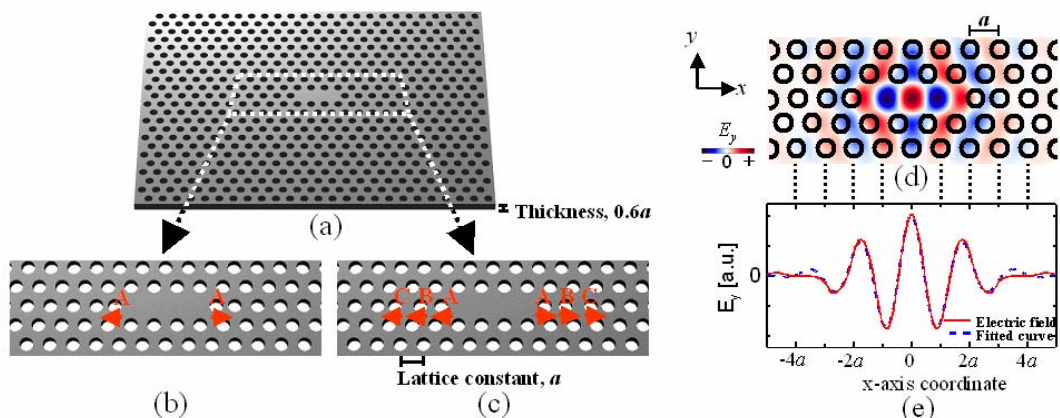


図133 (a)ドナー型点欠陥の模式図、(b)ドナー型共振器の両端の第一近接円孔をシフトした点欠陥の模式図、(c)第一近接円孔に加えて、第二、第三近接円孔もシフトさせた点欠陥の模式図、(d)第一近接円孔だけをシフトした点欠陥の電界分布の計算結果、(e)第一近接円孔をシフトした共振器の電界分布の計算結果を、包絡線が理想的なガウス関数の場合の電界分布と比較した結果。

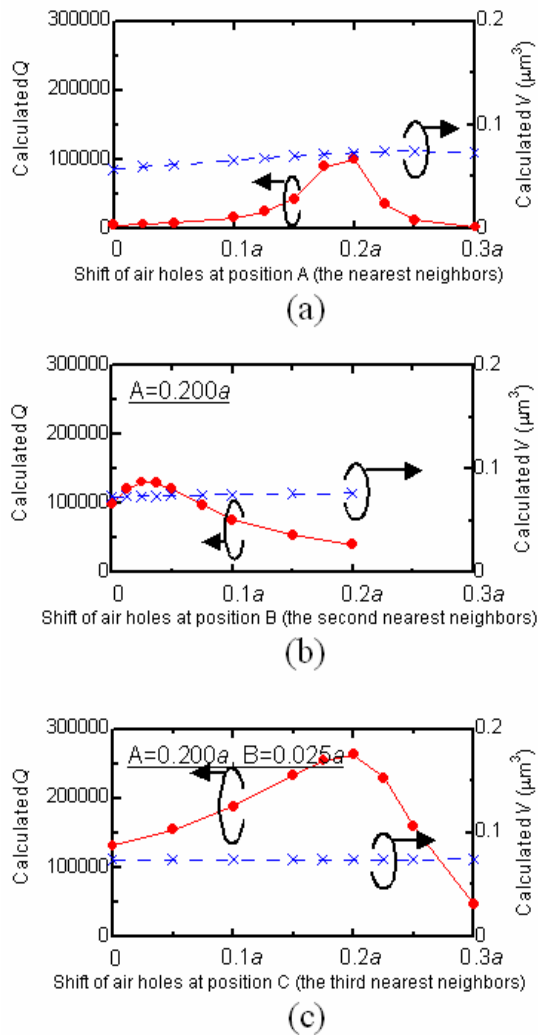


図134 (a)第一近接円孔をシフトさせた場合のQ値および共振器体積の計算結果、(b)第一近接円孔を最もQ値が高くなる位置に固定して第二近接円孔をシフトさせた場合のQ値および共振器体積の計算結果、(c)第一、第二近接円孔を最もQ値が高くなる位置に固定して第三近接円孔をシフトさせた場合のQ値および共振器体積の計算結果。

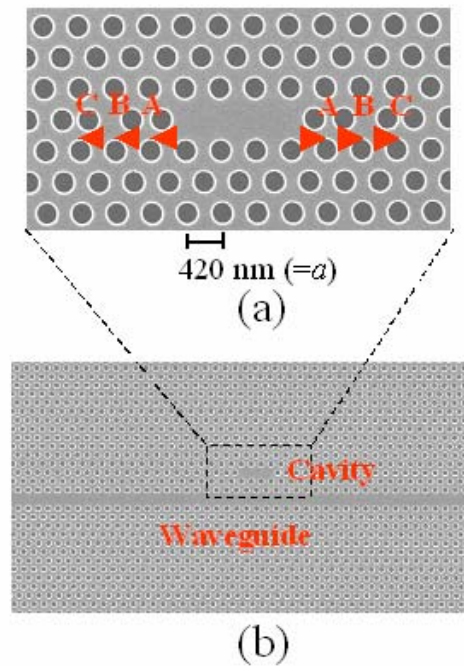


図135 第三近接まで格子点をシフトした点欠陥共振器の電子顕微鏡写真(a)拡大図、(b)全体図。

上記計算結果をもとに、実際に空気孔 A～C の位置を種々の量シフトさせた試料を作製した。位置 A、B、C の空気孔をシフトした作製試料例の SEM 像を図 135(a)および(b)に示す。図 135(b)に示すように、線欠陥導波路も点欠陥共振器の近傍に導入した。まず、位置 A の空気孔シフト量を昨年度の実験結果よりも一部さらに細かい間隔で変えた試料を作製し、点欠陥の Q 値を実験的に評価した。その結果を図 136(a)に示す。なお、同図には、各シフト量に対して複数の結果を示しているが、これは点欠陥と導波路との距離を変えた複数のサンプルについての評価結果である。同図から、再現性は非常に良いことが分かる。また、同図から分かるように、シフト量に応じて Q 値が上昇し、あるところを超えると下降していることが分かる。そして、位置 A の空気孔を $0.176a$ シフトさせたときに Q 値は最大となり、63,000 という値が得られた。前述した計算結果(図 134(a))と比較すると、空気孔シフト量に対する Q 値増減傾向は、計算値と実験値で同傾向であることが分かる。この Q 値が最も高かった位置に空気孔 A を固定

し、次に位置 B の空気孔を少しずつシフトさせたときの実験結果を図 136(b)に示す。図に示すように、位置 B の空気孔シフト量が $0.024a$ のときに Q 値は最大となり、65,000 という値が得られた。さらに、この位置に空気孔 A、B を固定し、位置 C の空気孔をシフトさせた。その結果を図 136(c)に示す。図に示すように、位置 C のシフト量が $0.176a$ のときに Q 値は最大となり、 $\sim 100,000$ が得られた。これはシフト無しの点欠陥の Q 値 ($5,000$)より 20 倍も大きい。つまり、位置 A、B、C の空気孔シフトは Q 値増大に大きな効果があることが実験的にも実証された。また、図 136(b)、(c)をそれぞれの計算結果に相当する図 134(b)、(c)と比較すると、位置 A の空気孔シフト同様、空気孔シフト量に対する Q 値増減傾向の点で、実験結果は計算結果とよく一致している。最大の Q 値 ($Q_{\perp}=100,000$)が得られたときの点欠陥からの放射スペクトルを図 137に示す。同図から分かるように、 18pm という非常に狭い線幅が得られており、導波路への結合損失も含んだ Q 値(Q_{total})でさえ $88,000$ という非常に高い値が得られている。以上のように、最初の予想通り、空気孔 A だけでなく B および C のシフトにより、さらに Q 値を高くすることに成功した。

次に、光ナノ共振器の良さの指標である単位体積辺りの Q 値、すなわち Q/V について考察する。先に述べたように、モード体積 V は空気孔シフトに対してほぼ一定であり、得られた Q 値(実験値)の最大構造について計算すると、 $7.2 \times 10^{-14} \text{cm}^3 (=0.71(\lambda_0/n)^3)$ と極めて小さい。その結果、 Q/V は $1.4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3} (=1.4 \times 10^5 (\lambda_0/n)^{-3})$ であり、シフト無しの点欠陥の 16 倍に向上させることに成功した。

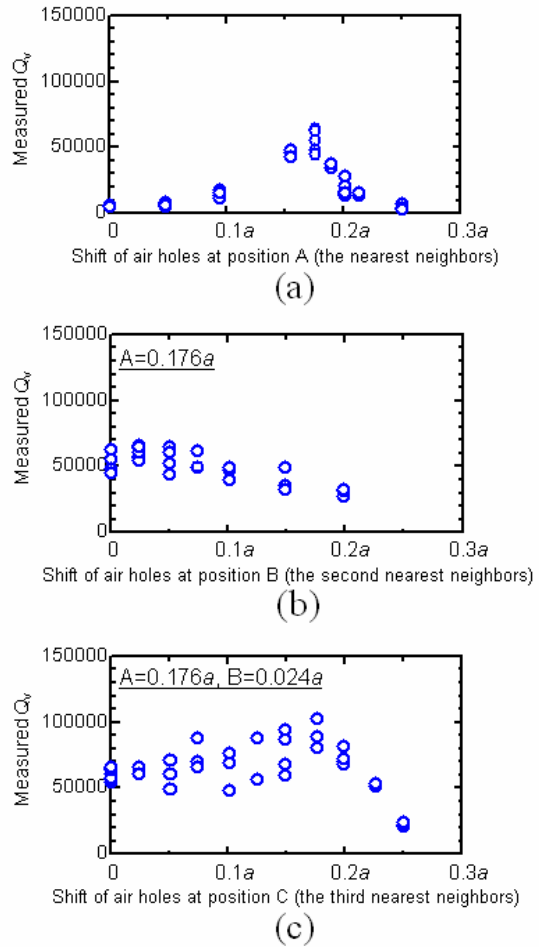


図136 (a)第一近接円孔をシフトさせた場合のQ値の測定結果、(b)第一近接円孔を最もQ値が高くなる位置に固定して第二近接円孔をシフトさせた場合のQ値の測定結果、(c)第一、第二近接円孔を最もQ値が高くなる位置に固定して第三近接円孔をシフトさせた場合のQ値の測定結果。

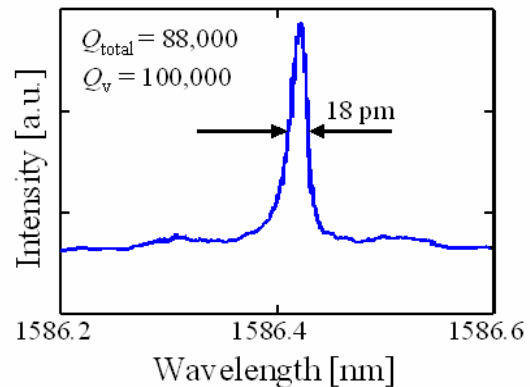


図137 最も高いQ値をもつ共振器の共振のスペクトル。Q値として100,000が得られている。

E.4：フォトニック・ダブルヘテロ構造による超高Q値ナノ共振器の実現

これまで述べてきたように、光共振器においてより高い Q 値を実現するためには、共振器端部において共振モードの電界分布が急激に減衰するのではなく、なめらかに減衰するように、それによってフーリエ空間において漏れ領域内に存在する電界成分を減少させることが重要である。具体的には、共振器内に閉じ込められた共振モードの包絡線関数がガウス関数に近づけることが高 Q 値実現の鍵であり、共振器端部の円孔をナノメートル単位でシフトさせることで、より理想的なガウス関数に近い光閉じ込めを実現し、約 100,000 という高い Q 値を実現した。しかしながら、さらに高い究極の Q 値を実現するためには、共振モードの電界分布をさらに細かく制御することが必要不可欠であり、共振器周辺の円孔位置をシフトさせるという方法だけでは限界があると考えられる。そこで、本研究では、新たな共振器構造として、研究代表者が提案した「ヘテロ・フォトニック結晶」を用いて両側から光を閉じ込める「フォトニック・ダブルヘテロ構造」を提案し、これによるさらなる究極の Q 値実現を目指した。

図 138 はフォトニック・ダブルヘテロ構造の概念図である。同図(a)に示すように 2 次元三角格子構造を形成した 2 次元フォトニック結晶スラブの中に Γ -J 方向に円孔を 1 列埋めた導波路が基本的な構造である。この構造のバンド構造の模式図が図 138(b)である。青い矢印は光が導波路を伝搬できる透過帯域を表しており、一方赤い矢印は光の伝搬が禁止されるモードギャップ領域を示している。ここで透過帯域とモードギャップ帯域の関係を考量しつつ、図 138(c)に示すように周期 a_2 のフォトニック結晶(領域 II)の両側に、周期 a_1 のフォトニック結晶(領域 I)

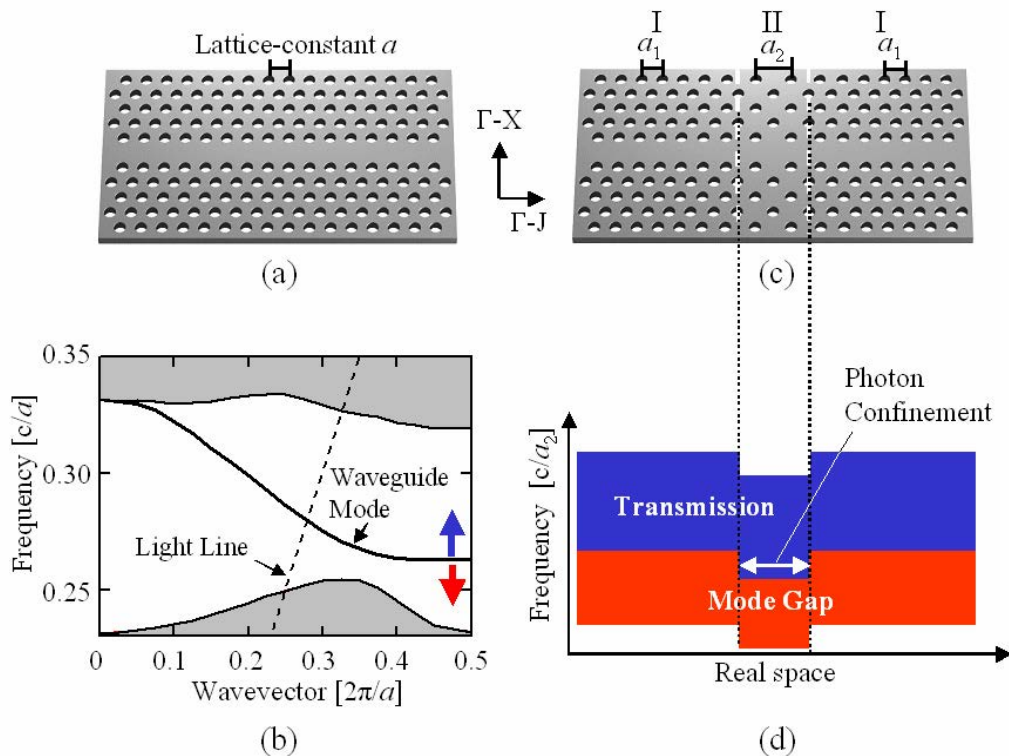


図138 フォトニック・ダブルヘテロ構造の概念図。(a)線欠陥導波路を導入した2次元三角格子フォトニック結晶スラブの模式図。(b)(a)の構造に対するバンド構造の計算結果。青い矢印は導波路の伝搬帯域を、赤い矢印はモードギャップ領域を表す。(c)周期の異なるフォトニック結晶領域Iと領域IIを接続したフォトニック・ダブルヘテロ構造。領域IとIIでは導波路方向の周期が異なる(領域I= a_1 、領域II= a_2 、 $a_2 > a_1$)。(d)導波路方向のバンド構造の模式図。特定の周波数をもつ光はフォトニック結晶領域IIの導波路領域にのみ存在が許される。

を形成する($a_2 > a_1$)。ここで導波路と直交する方向に対しての周期は、境界面での格子整合条件を満たすために領域ⅠとⅡともに同じに保ちつつ、導波路と平行な方向の周期を変化させる。これによって、図 138(d)の模式図に示すように、領域Ⅰと領域Ⅱにおける透過帯域とモードギャップ帯域の関係にずれが生じる。これによって、特性のエネルギーをもつ光子は領域Ⅱにのみ存在が許されることになる。フォトニック結晶領域Ⅱが十分短い場合は、半導体量子井戸において内部に存在する電子の状態が量子化されるのと同様に、この領域内に存在できる光子がとり得る周波数が量子化され、光ナノ共振器として振る舞うことになる。

ここでフォトニック・ダブルヘテロ構造の重要な特長は、光子を周期的な円孔配列によるフォトニックバンドギャップ効果で閉じ込めるのではなく、フォトニック結晶領域ⅠとⅡで格子定数が異なることに起因する導波路のモードギャップによって閉じ込めると言うことにある。このため、フォトニック結晶領域Ⅱの導波路に閉じ込められた光の電界分布は、フォトニック結晶領域Ⅰの導波路領域にエバネッセント的にしみ出しながら閉じ込められることになる。この導波路に平行な方向のしみだしの大きさは、2つのフォトニック結晶領域の格子定数の差で、決まるため、先に述べた共振器端部の円孔をシフトさせる方法に比べて、より細かく制御することができる。さらに、後述するように多段のヘテロ構造を用いることで、より自在な電界分布の制御が可能となる。図 139(a)、(b)はフォトニック・ダブルヘテロ共振器における電界分布と、その導波路方向の断面を計算した結果である。図 139(b)において実線は計算で得られた電界分布、破線は理想的なガウス分布を示している。計算には3次元FDTD法を用い、フォトニック結晶領域Ⅰ、Ⅱの格子定数はそれぞれ $a_1=410\text{nm}$ 、 $a_2=420\text{nm}$ を用い、スラブの厚さ $T=0.6a_2$ を仮定した。共振器端部の円孔をシフトさせた場合の電界分布とその断面図が図 139(c)、(d)である。同図

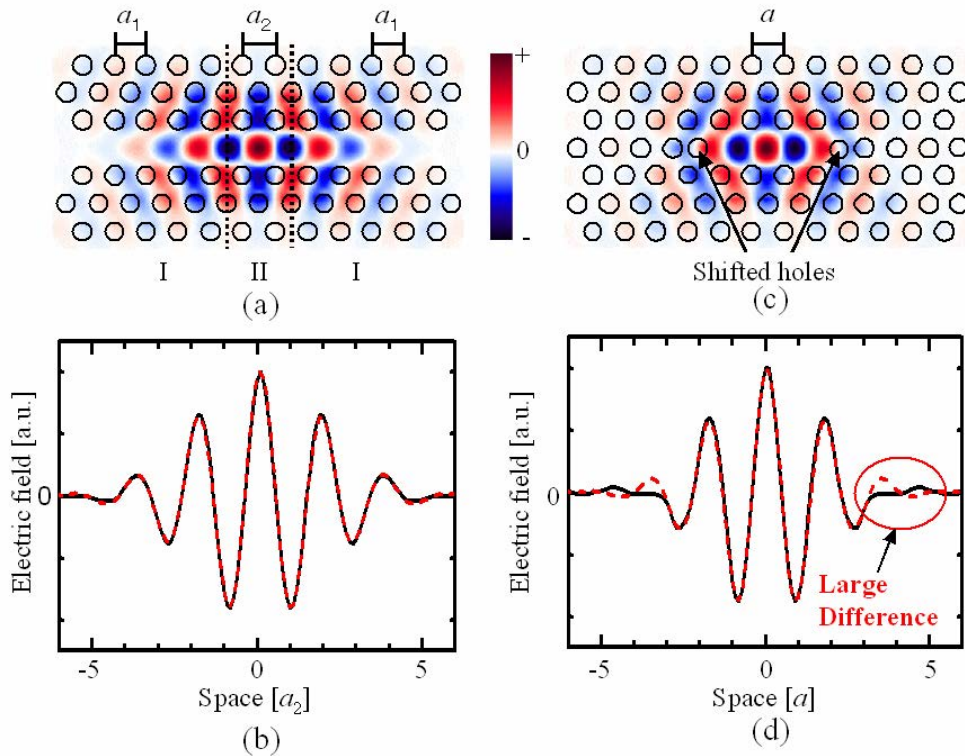


図139 3次元FDTD法によって計算した電界分布。フォトニック・ダブルヘテロ構造における(a)電界分布の計算結果と、(b)導波路方向の断面プロファイル。黒色実線は計算された電界プロファイル、赤色破線はガウス型包絡線関数を仮定した場合のプロファイルを示す。(c)第一近接円孔をシフトした場合の電界分布の計算結果と、(d)導波路方向の断面プロファイル。

より、シフト型共振器に比べ、フォトニック・ダブルヘテロ共振器においては、全領域において理想的なガウス分布に非常に近い電界分布が得られていることが分かる。これは、先に述べたように 2 つの結晶の格子定数差を変えることで電界分布を一様に制御することができるためである。このように理想的なガウス型光閉じ込めによって、理論的には、フォトニック・ダブルヘテロ共振器が円孔シフト型共振器に比べて 1 桁高い数百万という非常に高い Q 値をもつと見積もられた。一方、共振器体積は $1.2(\lambda_0/n)^3$ 程度(λ_0 は真空中での共振波長、 n は誘電体スラブの屈折率を表す)と非常に小さい。フォトニック結晶領域 I と II の格子定数差が 10nm と非常に小さいにもかかわらず、このように小さい共振器体積が得られるのは、フォトニック結晶導波路の特異な分散カーブによるものである。

次にこの結果を踏まえて、実際にダブルヘテロ共振器を作製し特性の評価を行った。図 140 は作製した試料の電子顕微鏡写真であり、格子定数として $a_1=420\text{nm}$ 、 $a_2=410\text{nm}$ を用いた。フォトニック結晶領域 II の長さは $2a_2$ とし、円孔半径はフォトニック結晶領域 I、II とともに $0.29a_2$ とした。この試料のドロップスペクトルを測定した結果が図 141 であり、共振スペクトルの半値幅として 2.8pm、 Q 値として 600,000 という驚異的な Q 値を実現することができた。これは、先に述べた、第 3 近接円孔までシフトさせた共振器の結果に比べても、さらに 1 桁近く大きな Q 値であり、当然世界最高の光閉じ込め効果をもつ光ナノ共振器である。

さらに、これ以上の Q 値の向上が可能かどうか、理論的に検討を行った。具体的には、図 142(a)に示すように、フォトニック・ダブルヘテロ構造の領域 I と II の間に、新たな層 II' を挟み込んだ、多段フォトニック・ダブルヘテロ構造を検討した。このような構造を用いることで、さらに細かく共振モードの電界分布を理想的なガウス分布に近づけることができる。領域 I、II の格子定数を先程と同様、 $a_1=410\text{nm}$ 、 $a_2=420\text{nm}$ とし領域 II' の格子定数を $a_2'=(a_1+a_2)/2$ として、領域 I、II、II' の円孔の半径 r と、領域 II' の長さ d を変化させて Q 値を 3 次元 FDTD 法で計算した結果が図 142(b)であり、 $d=2a_2'$ 、 $r=0.26a_2$ の時に最大 24,000,000 という高い Q 値が期待されることが分かった。一方、共振器体積を計算した結果、多段ヘテロ構造であっても、元の構造に対して 10%程度しか増加していないことが分かった。

この結果は、光の波長程度の体積しかない光ナノ共振器であっても、他の非常に大きな体積を有する高 Q 値共振器と同等の Q 値が実現可能であることを示す結果であり、単

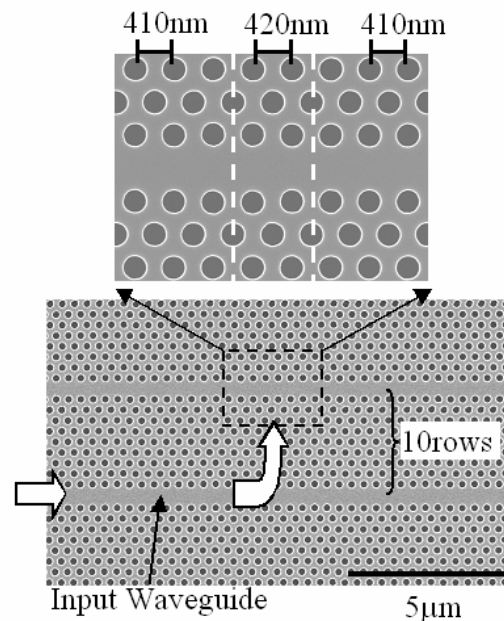


図140 作製したフォトニック・ダブルヘテロ構造の電子顕微鏡写真。

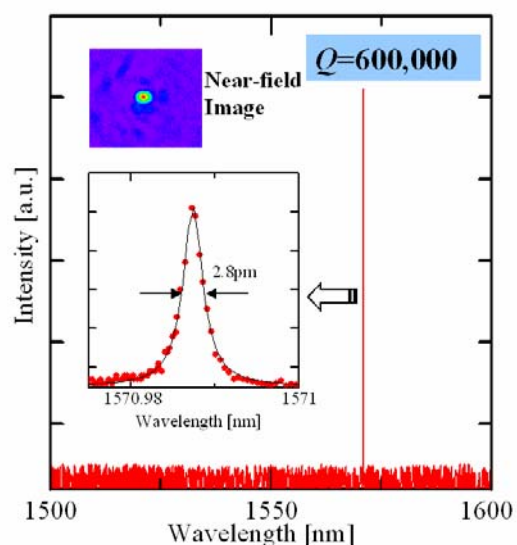


図141 フォトニック・ダブルヘテロ共振器の共振スペクトル。

一光子光源、超低閾値レーザ、超小型光チップ、原子の光トラップ、バイオや環境分野での超高感度検出器、など様々な分野への応用が期待される。さらには、この超高 Q 値共振器によって、光を一定時間蓄積すること光メモリの実現も期待される。またそれと同時に、我々が提唱した面内ヘテロ・フォトニック結晶を応用してフォトニック結晶の構造を様々に変化させることで、光を自在に制御できることを一段と強く示す結果である。これらの成果は英科学誌ネイチャーマテリアルズ 2005 年 3 月号に掲載され、国内外の注目を集めた。

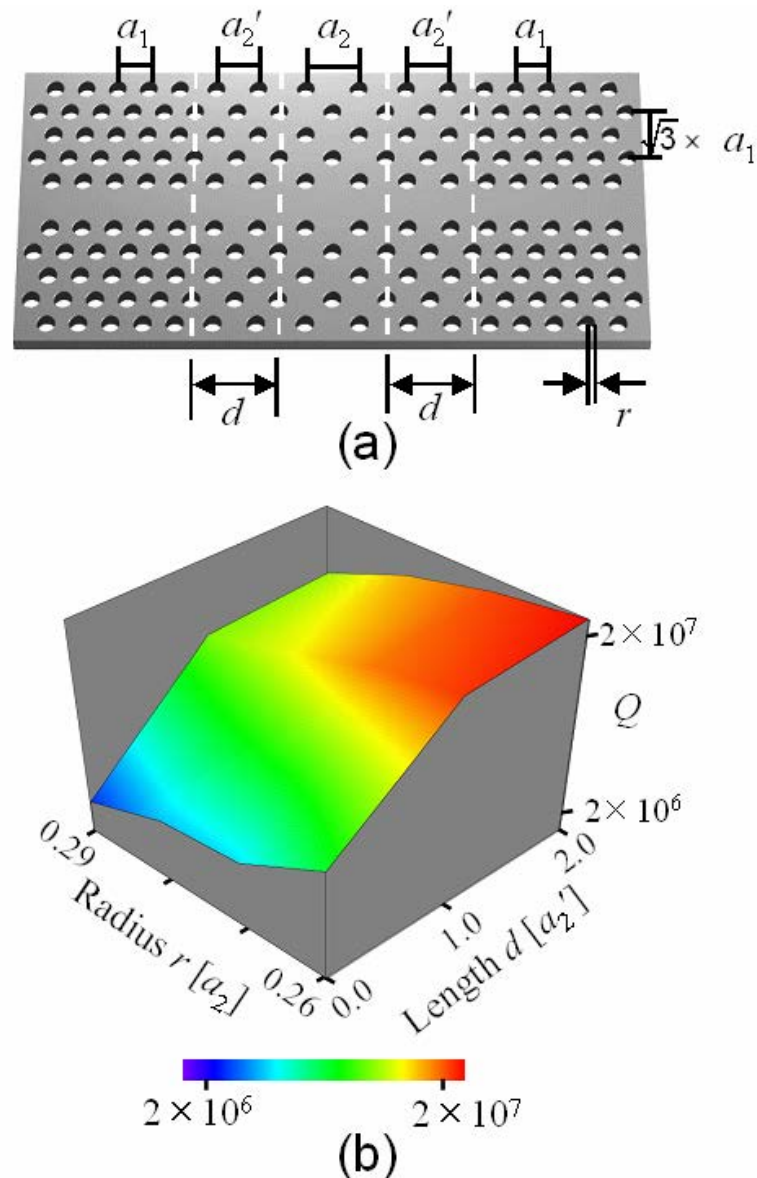


図142 (a)多段ヘテロ構造を用いたフォトニック・ダブルヘテロ構造の模式図。領域I(周期 a_1)とII(周期 a_2)の間に領域II'(周期 $a_2'=(a_1+a_2)/2$)を導入した。(b)領域II'の長さ d および、円孔半径(r 、領域I、II、II'で同一)を様々に変化させた場合の Q 値を3次元FDTD法によって計算した結果。

(2) 得られた研究成果の評価及び今後期待される効果

A. 類似研究の国内外の動向との比較

2次元フォトニック結晶は、もともと作製が3次元結晶に比べて容易であるため、2000年前後から、世界各地の研究機関で、爆発的に2次元結晶デバイスの研究が行われるようになった。ヨーロッパでは、グラスゴー大学、セントアンドリュース大学、エコールポリテクニカ研究所、EMEC、等々、米国では、サンディア研究所、モトローラ、カルテック、各種ベンチャー企業等、日本でも、NTT、NECを始め、各種の企業、大学で、研究がスタートし、学会等でも非常に多くの発表がなされるようになった。ただし、当初はきちっと理論を押さえた研究を行っているところが極めて少なく、かつまた加工精度を十分に確立して研究しているところが少なく、研究内容は極めて初期的なものが多かった。しかしながら、最近では、我々のグループの研究成果に触発され、世界各地の研究が大幅に進展してきた。これは、我々のグループの世界に向けた発信の成果の賜と位置付けることが出来る。

また、面内ヘテロ構造の概念は、我々のグループが、2003年に提唱した概念であるが、その後、様々な国内外の機関で利用されつつある。NTT、韓国 KAIST などがその例である。

高 Q 値ナノ共振器に関しては、我々のグループが、ガウス型閉じ込めによる Q 値増大の概念を提唱して以来、世界中の多くの機関が、我々の共振器を用いた研究を開始するようになってきている。これは、高 Q 値ナノ共振器に、様々な活性媒質を導入し、単一光子光源や、新しい量子演算デバイス等への展開を意識したグループが多く存在するためであろう。このような新しい展開の基礎を築くことが出来たことは、極めて喜ばしいことと考えている。

B. 成果の発表とそのインパクト等

本研究で得られた成果は、米科学誌サイエンス1編、英科学誌ネイチャー3編、英科学誌ネイチャーマテリアルズ1編を含む30件の学術雑誌に掲載された。(これらの論文の被引用数は、極めて多く、一編で260件を超えるものも存在する。また、別の論文では、Thomson-ISI から、物理分野で最も引用の多い論文として、Fast Moving Front article (ESI Special Topics Website for January, 2006 at the following link: <http://esi-topics.com>)として位置付けられたものも存在する。また、国内外の多くの新聞や雑誌等で、数多く取り上げられるなど世界的に大きな注目を集めた)。本テーマに関しては、さらに、国際会議では、51件(内、招待講演25件)、国内会議では、122件(内、招待講演26件)の発表を行った。また、14件の解説記事・書籍の執筆を行った。特許出願に関しては、25件以上の出願を行った。

C. 波及効果

本研究により、2次元フォトニック結晶スラブを舞台に、自在な光子制御技術が確立し、超小型光合分波デバイスの実現が達成された。今後、この成果は、より多彩な光機能をもった超小型デバイスの実現へとつながり、将来の大規模通信網のキーデバイスとしての展開が期待される。さらに、高 Q 値ナノ共振器の実現は、2次元結晶をベースとした光チップ、単一光子光源、電子光子強結合状態形成、光メモリー、超高感度センサーや新しいバイオセンサー応用等への様々な波及効果をもつと期待され、今後、益々、発展していくものと考えられる。

3.5 2次元フォトニック結晶と機能デバイス(III)ー光伝搬制御ー

(1) 研究成果の内容

A. はじめに

A.1 : 本研究のねらい

上記 3.4 の 2 次元結晶欠陥活用デバイス研究の基礎として、2 次元フォトニック結晶線欠陥導波路の導波特性を明らかにすることを本サブテーマの第 1 の目標とした。さらにフォトニック結晶の分散特性を利用した新しいデバイスへの展開を図るために、(a)2 次元結晶線欠陥導波路におけるバンド端近傍での光の群速度異常の理解、(b)バルク結晶中の特異な分散性に基づく光伝播特性の検討、さらに、(c)それらを用いた光機能創出の可能性を探ることを第 2 の目標として研究を行った。

A.2 : 研究実施体制

本研究は、研究代表者と密に連絡を取りながら、横浜国大を中心に推進した。グループ内では、馬場リーダー以外は常時 5～10 名の大学院生が本格的に研究に参画し、多くの成果を得る原動力となった。なお、研究従事者の詳細は 4.研究参加者に記す通りである。

B. フォトニック結晶導波路の伝搬特性解明

B.1 : 基本構造とフォトニックバンド解析

研究対象となるフォトニック結晶線欠陥導波路の SEM 写真を図 143 に示す。これは、前節 3.4 で用いてきた線欠陥導波路と基本的に同じものである。本項では、この導波路の基本特性について詳細に検討した結果を述べる。

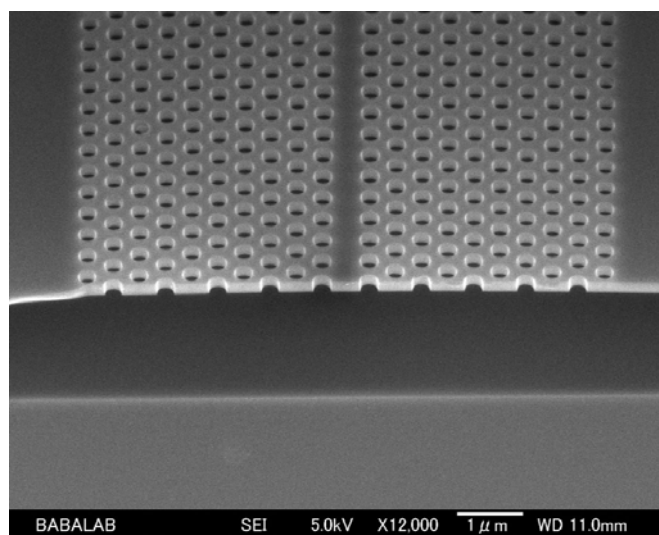


図143 SOI基板上に作製されたフォトニック結晶導波路

この導波路の設計パラメータには、スラブの屈折率と厚さ、空孔の形状と大きさ、配列の格子形状と格子定数、上下クラッドの屈折率がある。スラブの屈折率は材料で決まるが、本研究のような Si の場合は、3.4 程度となる。上下クラッドを屈折率 1.0 の空気とすると、上下方向の光閉じ込めが波長 $1.55\mu\text{m}$ で単一モード条件を満たすコアの厚さは $0.327\mu\text{m}$ 以下となる。ただし

スラブがあまり薄いと光がクラッド層へ大きくしみ出し、スラブのわずかな揺らぎに光伝搬が敏感になる。そこで本研究では、 $0.20\sim 0.32\mu\text{m}$ を標準的なスラブの厚さとした。一方、空孔には様々な形状が考えられるが、後述する作製プロセスを考えると、形状が自然と円形に近づくと考えられる。そこで本研究では円形に議論を限定した。代表的な格子形状として三角格子と正方格子があるが、前者のみが両偏波にわたる完全な 2 次元 PBG を生むことが知られており、ここでも三角格子に議論を限定する。

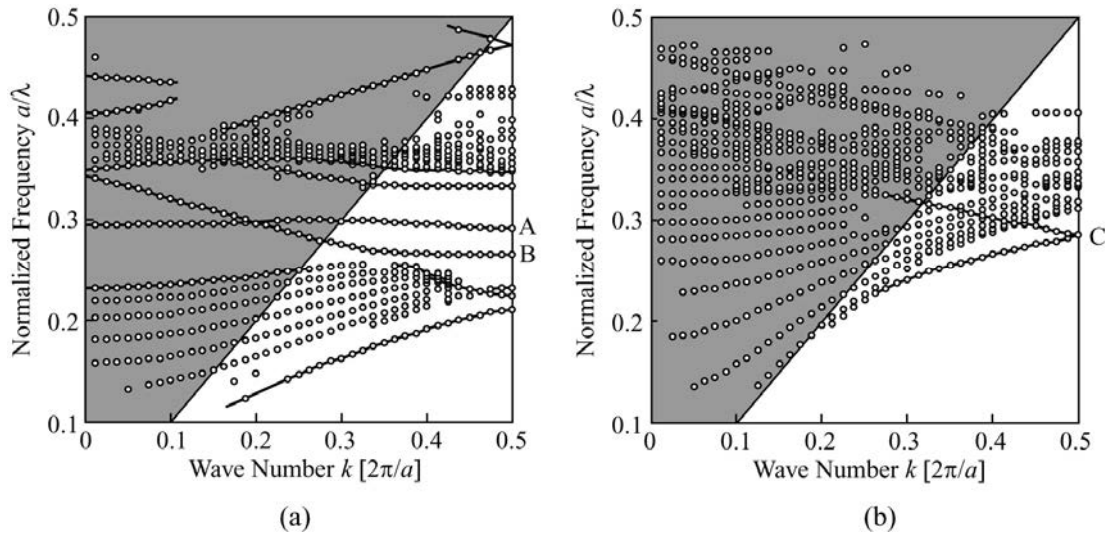


図144 3次元FDTD法で計算されたフォトニック結晶1列線欠導波路のバンド図。(a)TE-like偏波。(b)TM-like偏波。灰色領域はライトラインより高周波数側の放射モード領域。プロット点が集中している領域はスラブモード。直線で結ばれたバンドは、線欠陥に光が閉じ込められるモードを表す。BはTE-like偏波の偶対称モード、Aは奇対称モード。CはTM-likeモードの偶対称モード。

残された重要なパラメータは、円孔直径 $2r$ と格子定数 a 、上下クラッドの屈折率 n_0 である。これらに対して理論を単純化するため、寸法を格子定数で規格化する。規格化円孔直径 $2r/a$ を 0.57 とし、導波路に沿った方向の波数 k と規格化周波数 a/λ の関係で与えられる導波路のフォトニックバンドを図 144 に示す。バンド計算には、FDTD 法に周期境界条件を適用したバンド計算法を用いた。図 144(a) では、電界が面に平行な偏波(TE-like 偏波)に対して、スラブモード領域に挟まれた PBG が現れている。そしてその中に、さらに 2 本のバンド曲線が生じている。このうち、低周波数側のバンド B は偶対称性、高周波数側のバンド A は奇対称性のモードに対応し、実際の応用では前者が重要になる。このバンドは、バンド図の右端(ブリュアンゾーン端、あるいはバンド端と呼ばれる)を低周波数端とし、高周波数側に伸びている。一方、灰色で表される領域は光がスラブからクラッド層へ漏れ出す条件を表し、その境界線は漏れ領域(ライトラインと呼ばれる)を表す。ライトラインは、上下クラッドの屈折率によって一意に決定される。光が無損失で伝搬する帯域は、バンド端とライトラインに挟まれた領域となる。すなわち典型的な規格化周波数範囲は $0.25\sim 0.28$ となり、波長 $1.55\mu\text{m}$ に対して格子定数は $0.39\sim 0.43\mu\text{m}$ となる。このような状況で円孔直径を大きくすると、導波路バンドはゆっくりと高周波数側に移動する。しかしライトラインは移動しないので、結果として伝搬帯域が狭くなる。一方、円孔直径を小さくすると PBG 自体が急速に狭くなるため、こちらも伝搬帯域が狭くなる。最終的に規格化円孔直径 $0.5\sim 0.6$ が最適なことがわかった。このときの伝搬帯域は、中心周波数のおよそ 10% である。これは光通信帯域の C バンドと L バンドをカバーし、様々な応用に利用可能と考えられる。

ところで同じ条件下で上下クラッドの媒質を SiO_2 のような誘電体とすることは、将来の素子の実装にとって重要になると思われる。しかしこの場合、そのクラッドの屈折率の比率だけライトラインが低周波数側に下がる。これは伝搬帯域を著しく狭くし、応用範囲を限定することにつながる。また、磁界が面に平行な偏波(TM-like 偏波)に対して計算されるバンドを図 144(b)に示す。ここでは PBG が生じていない。最初に三角格子は両偏波に対する完全 PBG を生じることには触れたが、それは規格化円孔直径が 0.9 以上と大きい場合である。フォトニック結晶スラブでそこまで円孔直径を拡大すると、導波バンドがライトラインの上端付近に達し、伝搬帯域をほとんど確保することができない。つまり TM-like 偏波の PBG を利用することは不可能であり、PBG を動作原理とするフォトニック結晶導波路は TE-like 偏波に限定される。ただし図 147(b)では導波バンド C が現れている。これは全反射によって閉じ込められる屈折率導波型モードを表している。つまり PBG に期待されるような強い光閉じ込めは期待できないが、単なる直線導波路として利用できる。いずれにせよ、クラッド媒質と偏波依存性はフォトニック結晶導波路を利用する上での制約として認識しておく必要がある。

B.2 : SOI基板上への作製と評価

すでに、前節 3.4 では断り無く述べてきたが、ここでは、少し立ち戻って、フォトニック結晶スラブを構成する材料(ここでは、SOI 基板)についてまず考えてみる。導波路に要求される重要な仕様として、Si 層と SiO_2 層の厚さがある。上で述べたように、前者には $0.20 \sim 0.32 \mu\text{m}$ が必要となる。一方、後者には、光が Si 基板にしみ出さない程度の厚さ、すなわち波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯に対して $1 \mu\text{m}$ 以上が要求される。これらを満たす SOI ウエハには、スマートカット法またはサイモックスとボンディングを併用した方法で製造されるものが市販されている。いずれの基板も、例えば 6 インチウエハ端部 1cm 程度の範囲には層厚の不均一性が見られるが、それ以外の範囲では電子顕微鏡観察でも層厚の違いは観察誤差範囲内に収まった。すなわち高品質なフォトニック結晶導波路の作製に十分使用できる。

フォトニック結晶導波路の作製プロセスには電子ビーム露光法によるパターン描画、Si 層のドライエッチング、 SiO_2 層のウェットエッチングを用いた。作製した試料(図 143)を、走査型電子顕微鏡で詳細に観察したところ、側面のエッチング角度はほぼ 90° 、側面のエッチング粗さは 5nm 以下であることが判明した。

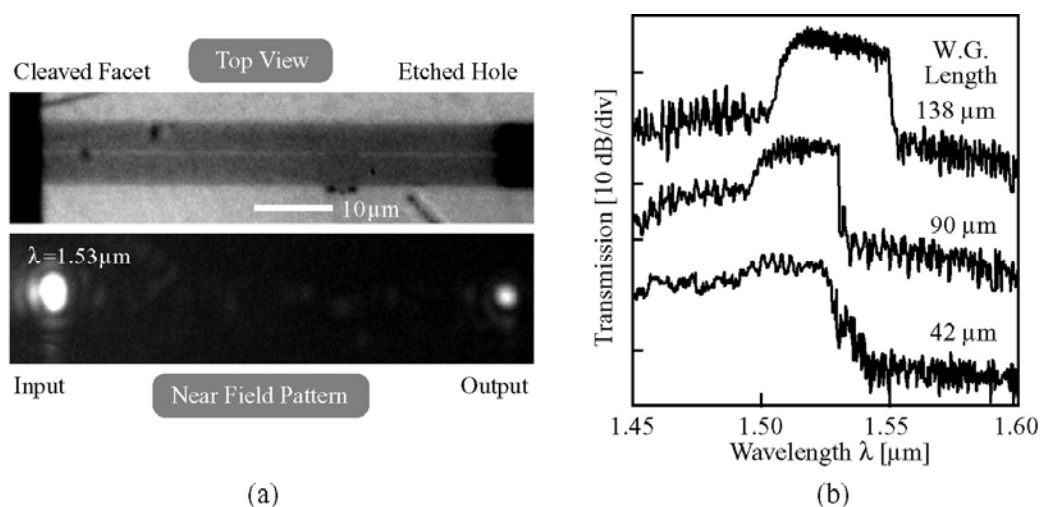


図145 SOI基板上に作製されたフォトニック結晶導波路の光伝搬観測。(a)表面の様子と伝搬光の近視野像。(b)長さが異なる導波路の透過スペクトル。

試料の評価では、可変波長レーザからの光をレンズで集光して導波路の劈開端面に結合させた。導波特性の測定には、導波路パターン描画の途中で導波路を終端し、その近傍に矩形孔を形成することで光を意図的に上部へ放射させることにした。こうすると劈開で出射端を形成する必要がなく、大きな試料片を容易に実装することができる。また矩形孔からの出射光の放射パターンをFDTD計算したところ、スラブに強く閉じ込められた光が大きな広がり角で放射されるため、上方からでも十分な出射パワーを検出できることがわかった。そこであらかじめ長さが異なる複数の導波路を同一基板上に作製し、出射光の近視野像を観察すると共に、出射スペクトルを測定、損失を評価した。スラブの厚さを $0.213\mu\text{m}$ 、格子定数を $0.44\mu\text{m}$ 、円孔直径を $0.27\mu\text{m}$ としたときの光伝搬の観測結果を図 145 に示す。近視野像には導波路に沿った散乱光や放射光が見られず、矩形孔から明確な出射光が確認される。伝搬帯域は長波長側で急峻に終わっており、バンド端のカットオフに起因することを裏付けている。一方、短波長側の出力低下は、試料が短いとあいまいに、試料が長いと急峻になっている。これは、ライトラインより上の放射モードによる損失を伴った光伝搬を表している。また円孔直径を変化させたときの伝搬帯域のシフトをフォトニックバンドと比較したところ、明確な対応が確認された。長さが異なる試料に対して出射パワーを比較したところ、初期の伝搬損失は 11dB/mm と評価された。その後、さらにプロセスは改善されたが、導波路長の制約から、 10dB/mm 以下の伝搬損失の評価は難しいことがわかった。より長尺の導波路を作製することができれば、例えば 1dB/mm といった桁違いに小さな損失が評価されると期待されたが、本研究内ではこれ以上の追求は行わなかった。この 1dB/mm という値は、例えば 1mm 角の面積に光回路を集積するような目的においては、既に実用上十分な低損失である。

C. フォトニック結晶導波路による光の伝搬速度制御(スローライト効果)

C.1 : スローライトへの期待とチャープ構造の導入

フォトニック結晶導波路の基本特性が前項までで明らかになった。ここでは、さらにフォトニック結晶導波路を用いたユニークな光機能を追求するため、伝搬帯域のカットオフ周波数付近で構造分散が増大し、光が低速化あるいは停止するスローライト効果に注目した。

光の低速性に対して期待されるのは、例えば、光バッファの実現である。次世代の基幹光通信にはペタビット級の超大容量が要求されているが、これを実現するにはネットワークのノード部分での高速な光ルーティングが必須となる。光ルーティングでは、信号の行き先を切り替える光スイッチとタイミングを調整する光バッファが基本構成要素となる。スローライトによってタイミングを自在に制御できるようになれば、光バッファの有力な候補となる。またスローライトは光エネルギーを一時的に蓄積することを意味するので、高密度の光と母体材料との大きな相互作用が期待される。例えば母体材料として直接遷移半導体を用いれば、短距離で大きな光吸収や利得を得ることができる。仮に群屈折率を 100 とすると、長さ $10\mu\text{m}$ で 20dB の高利得を与える半導体光増幅器が実現されることが期待される。あるいは高密度の光により非線形効果が増大する。逆にいえば、低入射光エネルギーかつ短いデバイス長で期待する非線形を起こすことができるようになる。なお、3.3 節の 2 次元フォトニック結晶レーザは、まさしく 2 次元面内において光の群速度が零の点、即ち、バンド端を利用したデバイスであり、フォトニック結晶によるスローライトの有効性は、すでに本 CRESTにおいて、積極的に利用されている点に注意されたい。

導波路のバンド端を用いる光の群速度制御には、2 つの重要な解決すべき課題がある。1 つは図 144 のバンド図からも明らかのように、スローライトを与える周波数がまさにピンポイントになるという点である。群速度はバンドの傾きによって与えられるが、傾斜が零に近づくと、そ

れに比例して帯域も零に近づく。2 つ目は巨大な構造分散を利用していること自体が、短パルスや高速変調信号を歪ませてしまうという課題である。

本研究では、上記の課題に対処するために、フォトニック結晶導波路の構造を微調整して零群速度条件と変曲点を併せもつフォトニックバンドを生成し、これをチャープさせることを考案した(図 146)。(ここでチャープとは、フォトニック結晶や線欠陥の何らかのパラメータを導波路に沿って可能な限り滑らかに変化させることを指す。このチャープ構造は、3.4D.2 で記述された面内ヘテロ構造の変形版とも言える)。導波モードの変曲点は 2 次の分散を零にするが、高次分散や変曲点のまわりの分散は大きくなる。このようなバンドをチャープさせると、光が正と負の分散を受けるため、結果として広帯域にわたって全ての分散が補償されることになる。ここでは自己位相変調のような非線形効果をいっさい用いていないが、低群速度によって連続した光信号を圧縮することができると期待される。よってもし遅延時間のチューナブル化が実現されれば、光バッファとして動作させることができると期待される。

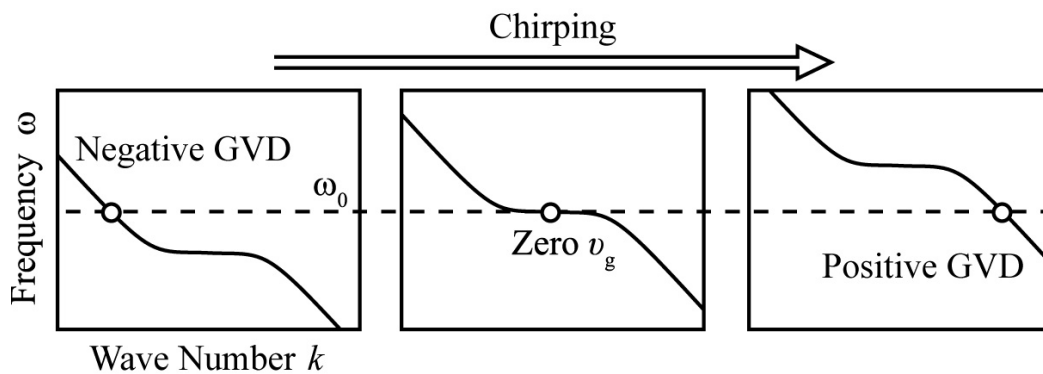


図146 零群速度条件と変曲点をもつフォトニックバンドをチャープ構造によってシフトさせる概念。

本方法の重要な課題は、上記のような理想的なバンド形状の生成である。この目的に対して、本研究では3種類の方法を見出した。すなわち①PC導波路の構造微調整、②同じPC導波路から成る結合導波路、③逆分散をもつ2種類の導波路から成る方向性結合器である。①は2004年に報告した最も単純な手法であり、例えばPCスラブの円孔直径を広げる、線欠陥導波路の幅を狭くするといったことで実現される。これは、これらの構造調整を行ったとき、導波バンドとスラブモードのバンドが相互作用を起こして歪むためである。ただしこのときの変曲点はスラブモード近傍に位置するため、チャープ構造を用いても利用できる帯域は狭い。②は2005年に考案した方法である。一般に2本の導波路の方向性結合器では、偶対称と奇対称の結合モードが生じ、それらの位相速度の違いによって光パワーの交換が行われる。PC導波路でも同様の方向性結合器が特に短い結合長で構成できることは、本グループが理論的に証明している。これらのモードは、フォトニックバンド図の上ではバンドの分裂となって現れる。このとき、導波路周辺の構造を微調整すると、バンドに任意の歪みをもたせることができる。例えば方向性結合器中央の円孔を拡大すると、偶モードのみが強い影響を受けて変形し、偶モードと奇モードのバンドの分裂量が多くなるため、結合長をさらに短縮できることが明らかになった(この発案には、本CRESTに参加している産総研グループが寄与した)。このような歪みをうまく調整することで、零群速度条件と変曲点を同時に表す理想的なバンド形状を偶モードに与えることができることを思いついた。そこで例えば入射光を二分岐させて同相で二本の導波路に入射させ、偶モードのみを選択的に励振すれば、理想的なスローライト特性が得られることになる。本研究では③と区別するため、このような素子を結合導波路と呼んでいる。分岐・合

流での過剰損失を低減することが実際の課題となるが、この方法は理想的なバンド形状を与える最も有望な構造と考えている。③は 2004 年に最初に報告した構造であるが、構成はやや複雑である。ここでは 2 種類の導波路それぞれのバンド端の零群速度条件を利用するが、逆分散をもつバンドどうしを方向性結合させることで等価的に変曲点を実現する。方向性結合を効果的に起こすためには両導波路のバンド端を正確に一致させる必要があり、さらに完全一致のときでも両バンドの反発によってわずかなギャップが生じるため、多少の反射損失が避けられない点が課題として残る。

C.2：平均群屈折率の期待値

これらの手法がデバイス内部でどの程度の遅延時間 ΔT を生むかについては、チャープ構造の全範囲にわたって平均化された群屈折率 $\langle n_g \rangle$ が指標となる。いまチャープの始点を $x=0$ 、終点を $x=\Delta L$ とすると、 ΔT は

$$\Delta T = \int_0^{\Delta L} \frac{dx}{v_g(x)} = \int_0^{\Delta L} \frac{n_g(x)}{c} dx$$

で与えられる。よって、光のスローダウンの程度を表す平均群屈折率 $\langle n_g \rangle$ は

$$\langle n_g \rangle = \frac{c}{\tilde{v}_g} = \frac{c}{\Delta L / \Delta T} = \int_0^{\Delta L} n_g(x) dx / \Delta L$$

となる。ここでチャープ構造によってバンドをシフトさせたとき、フォトニックバンドの形状はほとんど変化しないと仮定する。(実際のところ、スラブの屈折率をわずかに変化させるチャープでは、バンドの形状はほとんど変化せず、周波数シフトのみが起こる。また円孔直径を変化させるチャープではバンドの形状が変化するが、直径の変化が少なければその変化はほとんど無視できる)。このとき、バンドのシフトに対する特定周波数の群速度の変化は、特定のバンドの群速度の周波数依存性から把握することができる。つまり

$$\langle n_g \rangle \cong \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} n_g(\omega) d\omega / \Delta\omega = \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} c \frac{dk}{d\omega} d\omega / \Delta\omega = \int_{k_0}^{k_0 + \Delta k} c dk / \Delta\omega = c \frac{\Delta k}{\Delta\omega}$$

としてもよいことになる。ここで ω_0 と k_0 は $x=0$ に対応する周波数と波数、 $\Delta\omega$ と Δk は ΔL に対応する周波数幅と波数幅である。つまり $\langle n_g \rangle$ はバンドの細かい形状に依らず、チャープの始点と終点を結ぶ線の傾きで決まる。よって $\Delta\omega$ を低群速度条件付近に限定することで、 $\langle n_g \rangle$ を大きくすることができる。

一方、スローライトを利用することができる光信号帯域 $\Delta\Omega$ は、本デバイスの動作原理とバンド形状のために、 $\Delta\omega$ よりも制限される。本デバイスにおいてチャープ構造を用いて分散を補償するためには、正の分散のバンドと負の分散のバンドそれぞれがもつ周波数帯域、つまり $\Delta\omega/2$ よりも $\Delta\Omega$ を小さくしなければならない。よって変曲点と零群速度を併せもつ理想的にバンドの場合には、 $\Delta\Omega \leq \Delta\omega/2$ が必要条件となる。これより群屈折率と光信号帯域の積で与えられるスローライトのフィギュアオブメリット指数は、

$$\langle n_g \rangle \frac{\Delta\Omega}{\omega} \leq \langle n_g \rangle \frac{\Delta\omega}{2\omega} = \frac{\Delta k}{2k}$$

となる。バンド図からもわかるように、 $\Delta\omega$ を限定すると Δk もある程度小さくなるので、フィギュアオブメリット指数は小さくなる。

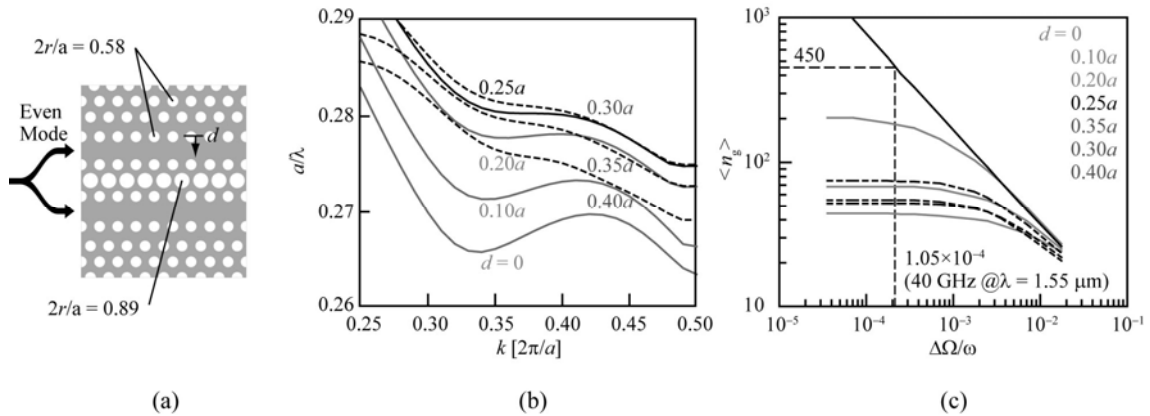


図147 低群速度デバイスとその期待性能。(a)デバイス構造。(b)偶モードのフォトニックバンド構造。(c)期待される平均群屈折率と規格化信号帯域の関係。

図 147 は②の代表的な構造と偶モードのバンド、ならびに期待される平均群屈折率 $\langle n_g \rangle$ の計算結果を表している。ここでは導波路より外側の円孔列のシフト量 d をパラメータとしている。変曲点で零群速度となる $d=0.25a$ に対しては、規格化信号帯域 $\Delta\Omega/\omega$ を0に近づけると平均群屈折率が無限大に発散する。例えば波長 $1.55\mu\text{m}$ で 40GHz の規格化帯域は 2.1×10^{-4} であり、図 147 より平均群屈折率は450となる。これは $670\mu\text{m}$ のデバイス長で遅延時間 1ns を実現する値である。 d が $0.25a$ からずれるとバンドに傾斜、またはうねりが現れる。傾斜が現れると、平均群屈折率が単純に小さくなる。逆にうねりが現れると、負の群速度をもつ変曲点と、零群速度をもつ2つの極点が現れる。この極点には含まれた帯域は、素子の正常な動作のために確保する必要がある余分な帯域である。いずれにせよバンドが理想形状からずれると、たとえ信号帯域を0に近づけても平均群屈折率は飽和する。逆の見方をすると、バンドを理想状態からずらすことによって平均群屈折率を桁違いに変化させることができる。 d の変化だけでなく、局所的な屈折率変化でも同様の変化は起こるので、結果的に遅延時間を外部制御することができるようになる。

以上は簡単な理論から提案するデバイスの低群速度を予測したが、①～③全ての構造に対してFDTD計算を用いた光伝搬の検証を行った。詳細は省略するが、結果として 300fs の半値全幅をもつ超短パルスが最終的な形状を変えることなく遅延するという期待どおりの動作が確認された。

C.3：実験での観測

実験に関しては、最初に理論研究を開始した③について取り組んだ。通常の分散をもつ導波路としては通常の1列線欠陥導波路を採用したが、伝搬帯域をもう一方の導波路と整合させるために線欠陥幅をわずかに調整した。逆分散をもつ導波路としては、線欠陥に近傍の円孔と同位相の小さな円孔が配置されたものを用いた。この導波路においては、フォトニックバンド計算ではバンド端から低周波数側に伸びるバンドが確認された。両者をSOI基板上に作製し、透過スペクトルとファブリーペロー共振から見積もられる群屈折率スペクトルを測定した結果を図 148 に示す。まず円孔直径を変化させることで、伝搬帯域がシフトする様子が確認される。また通常の線欠陥導波路では伝搬帯域の長波長側、小円孔導波路では短波長側で群屈折率が100前後にまで急激に大きくなる様子が現れ、理論的に予測された巨大な分散が確認された。

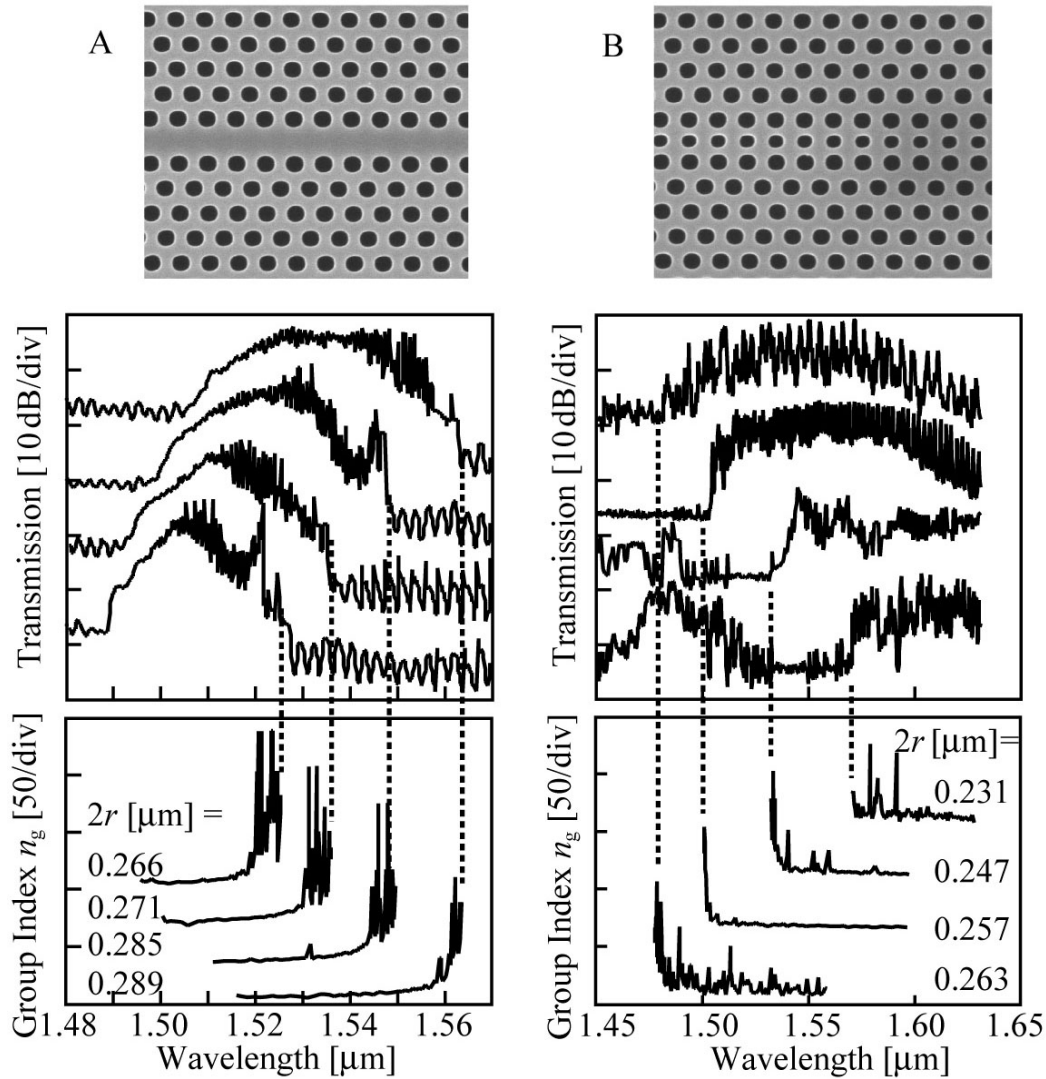


図148 2種類のフォトニック結晶導波路の電子顕微鏡写真と透過スペクトル、および群屈折率スペクトル。円孔直径 $2r$ をパラメータとしている。

一方、チャープ構造によるフォトニックバンドのシフトを検証するため、本研究では円孔直径のチャープを検討した。理論的には導波路のモード屈折率のチャープが理想的な光パルス伝搬を生むことがわかっていたが、これを実現するためには局所的な屈折率変化やスラブ膜厚の傾斜など、複雑なプロセスが要求される。一方、円孔直径の変化であれば、パターンの微調整のみで作製できる。実際のプロセスでは直径データを変化させる方法と電子ビーム露光時間を変化させる方法を試したが、後者の方が装置の最小グリッドに制約されずにより滑らかなチャープを実現することがわかった。通常の線欠陥導波路に円孔直径を徐々に小さくするチャープを導入し、光伝搬の近視野像を観察したところ、光が低速化し、局在したことに起因すると思われるスポット光が導波路途中で確認された。このスポットの位置は、長波長側ではより手前に、短波長側ではより遠方に達し、さらに短波長側ではライトラインによる放射光も観察された。円孔直径に対するフォトニックバンドの変化と、実験で観測されたスポットの位置と放射の位置の円孔直径依存性を図 149 に示す。バンド図から予測されるバンド端とスポット位置、ライトラインと放射位置はおおよそ対応しており、フォトニックバンドのシフトが確認されたものと考えられる。

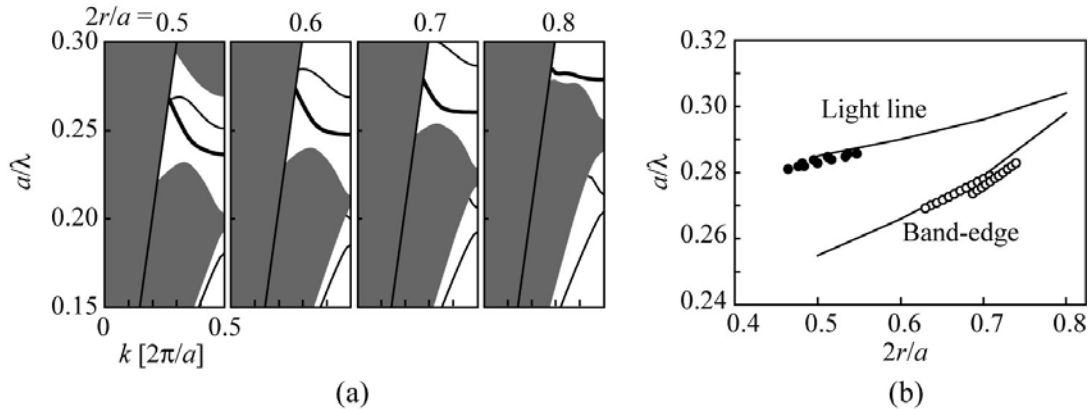


図149 円孔直径チャープ構造によるバンドのシフトの観測。(a)フォトニックバンドのシフト。太い実線が期待する伝播モード、灰色の領域がスラブモードとライトラインより上の放射モード領域を表す。(b)バンド端とライトラインの評価。プロットは伝搬光の近視野像観測からの評価。実線はバンド計算からのプロット。

そこで次に、2種類の導波路の方向性結合器と円孔直径チャープを融合させた③のデバイスを作製した。その結果、チャープ構造に対応した結合によるスポット光のシフト、ならびに結合前と結合後で出力導波路が切り替わる様子が観測された。ただしこの場合、結合に伴う反射が生じるため、内部でのファブリーペロー共振が複雑になる。このため、透過スペクトルには多くの不規則な共振ピークが見られた。このようなスペクトルから群屈折率を読みとると、30nmの波長範囲にわたって約 30 という値が見積もられた。この値は理論的には妥当であるが、不規則な共振ピークに対する十分な説明が得られていないため、正しい結果かどうかはさらに検証が必要である。バンド端をより精密に一致させて不要な共振を除去する、時間領域測定を行うことで現象をより直接的に把握するなどが解決策として考えられる。また同様のプロセスを用いれば②の構造も実現できる。ここでは、入出射導波路とデバイスを接続するために分岐と合流が必要となるが、わずかに構造調整を施したフォトニック結晶分岐、合流を用いることで全挿入損失を0.11dBに抑えられることがFDTD計算より明らかになった。そこでこの構造についても今後、実証が期待される。

D. スーパープリズム光学系の解明と実証

D.1 : 課題と解決法

一般にフォトニックバンドは、ブリュアンゾーン中の代表的な $\mathbf{k}$ ベクトルの軌跡に対する固有周波数の連続曲線により与えられる。一方、ブリュアンゾーン中の全ての固有周波数の等高線表示は分散面と呼ばれる。フォトニックバンドの傾きが群速度を表すことに対応して、分散面の勾配は光のポインティングベクトルを表す。フォトニック結晶格子に対して光の周波数が十分に低いときには、格子による回折が起こらず、光はフォトニック結晶の平均的な屈折率を感じて進む。よって分散面の断面(等周波数線)は円形であり、光伝搬は等方的である。一方、周波数が徐々に高くなり、分散面がブリュアンゾーン端に近づくとき、ブラッグ条件によりPBGが生じるため、分散面は徐々に歪んでくる。さらにPBGより高周波数側では、折り返された分散面が相互作用して複雑な形状を作る。これらは様々な興味深い光伝搬を生むことになる。例えば等周波数線が先鋭的な形になると、光の入射角度がわずかに変わっただけでフォトニック結晶中の伝搬角度が大きく変化する。このとき、わずかに周波数を変えると等周波数線も敏感に変化するので、光伝搬は周波数の変化に対しても大きく変化するようになる。これらの現象は狭義のスーパープリズム効果と呼ばれている。また等周波数線が直線的な形のときには、入

射角度が変わってもフォトニック結晶中の伝搬角度が全て同じになってしまう。このような現象はスーパーコリメート効果と呼ばれる。さらに等周波数線が進行方向に向かって凹の滑らかな曲線であるとき、光はフォトニック結晶内部で集光される。このような現象はスーパーレンズ効果と呼ばれる。これらの効果を組み合わせたデバイスをここではスーパープリズム光学系と総称することにする。

スーパープリズム効果が発見されてすぐに期待された応用は、高分解能波長フィルターである。すなわち通常の回折格子に比べて、例えば 100 倍(周波数の選び方によって変わる)といった著しく大きな角度分散が得られるので、これを用いれば 100 倍高分解能、または 100 倍小さな分光器が得られることが期待された。しかしここで暗に見過ごされてきたのは、大きな角度分散と入射角度依存性がほとんど同時に現れるという点である。フォトニックバンドや分散面は、ある $\mathbf{k}$ ベクトルをもつ平面波の伝搬特性を表している。つまり理想的な現象は無限に広い平面波に対して起こる。しかし実際に入射される光は有限幅のビームであり、そこには一定の角度広がりがある。最終的な光伝搬は、この角度広がりに対応した平面波の総和で与えられることになる。もし周波数には敏感で入射角度には鈍感といったスーパープリズム条件が見いだされれば、高分解能が得られるはずである。しかしこのような特性を検討した研究は皆無であった。

またこれはスーパープリズム光学系全般にいえることであるが、分散面から得られる特性は入射光とフォトニック結晶の関係によって決まる。しかしそこには、フォトニック結晶端面での光の整合という課題が全く含まれていない。実は入射側の媒質を空気のような低屈折率媒質と仮定すると、整合の問題は小さくなるのが FDTD 計算よりわかる。低屈折率媒質から高い平均屈折率をもつフォトニック結晶に光が入射される場合は、フォトニック結晶内部での全反射が抑制され、比較的低損失で光がフォトニック結晶を通過する。しかし実際には、空気から適度に平行な光ビームを入射させ、再び空気に出射させることができるようなフォトニック結晶は、少なくとも現状では存在しない。両端を劈開端面とするフォトニック結晶スラブが候補として挙げられるが、ここでは上下方向に光を強く絞って入射させなければならず、極めて大きな非点収差を与える必要が出てくるが、これは基礎実験においても結構大変な作業である。したがって、実際はフォトニック結晶が形成されていないスラブに光を入射させ、そこでビーム形状を整えて、フォトニック結晶に入射させるといった状況の方が好ましい。この場合、高屈折率媒質から低い平均屈折率をもつフォトニック結晶への入射となるため、フォトニック結晶内部で全反射が起こりやすく、結果として光の透過を著しく妨げる。実際、このような状況を FDTD 計算すると、スーパープリズムが生じる PBG よりも高周波数側の帯域で 10dB 以上の大きな反射損失が生じることがわかる。また単純な還元ゾーン形式の分散面からは予測できない多くの回折光が発生し、期待される光伝搬はとうてい観測できないことも併せて認識される。

以上の問題は本研究開始当初にすぐに認識されたため、本研究ではまずスーパープリズムの分解能に対する理論の構築と入射端の無反射構造の最適化に取り組んだ。その後、スーパープリズムと並んで興味深い機能であるスーパーレンズの最適化、両者の融合を理論的に議論した。さらに実験によってこれらの特性を検証した。

D.2 : スーパープリズムの分解能

ここではスーパープリズム単体で光ビームを分光する状況を考える。本研究では、次の 2 つのパラメータを独自に定義した。

$$p \equiv \partial\theta_c / \partial\theta_i, \quad q \equiv \partial\theta_c / \partial(a/\lambda)$$

ここで θ_c はフォトニック結晶内の光の伝搬角、 θ_i は入射光の角度である。 p はわずかな入射角の変化に対していかにフォトニック結晶内の伝搬角が変化するかを表す。言い方を変えれば、 $1/p$ はフォトニック結晶中でいかに光がコリメートされるかを表す指標となる。そこで以下で

は、 $1/p$ をビームコリメートパラメータと呼ぶことにする。一方、 q は角度分散を表すが、ここでは波長感度パラメータと呼ぶことにする。このとき異なる周波数の光ビームを空間的に分解するのに必要な規格化伝搬距離 L/λ は

$$L/\lambda > [\pi n(w_0/\lambda)^2](1/p)$$

となる。ここで n は入射媒質の屈折率、 w_0 はそこでのビームスポット半幅である。すなわち入射ビームが広く、コリメートパラメータが大きいほど、長い伝搬距離が必要になることがわかる。一方、最終的に得られる規格化分解能は

$$\Delta\lambda/\lambda = 2/[\pi n(w_0/\lambda)(a/\lambda)(q/p)]$$

となる。これより波長感度パラメータが大きいほど高分解能が得られるのは当然として、さらにビームが広く、コリメートパラメータが大きい方が有利となることがわかる。つまり伝搬距離と分解能は排他的な関係にあるという分光の基本的な関係がここでも成り立つことが明らかになる。

はたして高いコリメートパラメータと波長感度パラメータを同時に与える条件があるだろうか。この点を調べるため、具体的なフォトニック結晶のブリュアンゾーンに対してこれらのパラメータを計算した結果が図 150 である。ここでは標準的なフォトニック結晶スラブの第 2 バンドを対象としている。これより明らかなのは、ブリュアンゾーン全体にわたってコリメートパラメータが小さいことと波長感度パラメータが大きいことである。すなわちフォトニック結晶中では光が広がりやすく、しかも波長に敏感なことが示唆されている。コリメートパラメータと波長感度パラメータが共に大きいとき高い分解能が与えられるので、図 150 では q/p を波長分解能パラメータと定義して、その分布も示している。ブリュアンゾーン中で q/p はほとんど均一であるが、わずかな領域で大きな q/p が現れている。しかしそれを許容する入射角度の範囲は非常に狭いため、光ビームを十分に広げて入射させる必要がある。これが結果として伝搬距離 L を長くする。例えば波長 $1.55\mu\text{m}$ の高密度波長多重通信にしばしば要求される波長分解能 0.4nm を目指すことを考えると、必要となる入射ビーム全幅は $100\mu\text{m}$ 以上、伝搬距離は 10cm 以上となる。これらは、当初、スーパープリズムに対して期待された小型・高分解能フィルターが実現できないことを表している。

このような結果の原因はどこにあるのか。1 つは既に述べてきたように、コリメートパラメータと波長感度パラメータの両方を大きくする条件が狭いことが挙げられる。しかしさらに大きな原因は、スーパープリズムという角度分散素子のみで分光器を構成しようと試みた点にある。通常の分光器では、角度分散素子にレンズのようなビーム整形素子を組み合わせて、システム全体を小型化している。スーパープリズムでも同様の工夫が必要ということになる。ただしいずれにしてもフォトニック結晶内部では光が大きく広がるため、そうならないための条件を注意深く利用するか、高い集光特性をもつレンズと組み合わせる必要が出てくる。これについては D.5～6 で再び議論する。

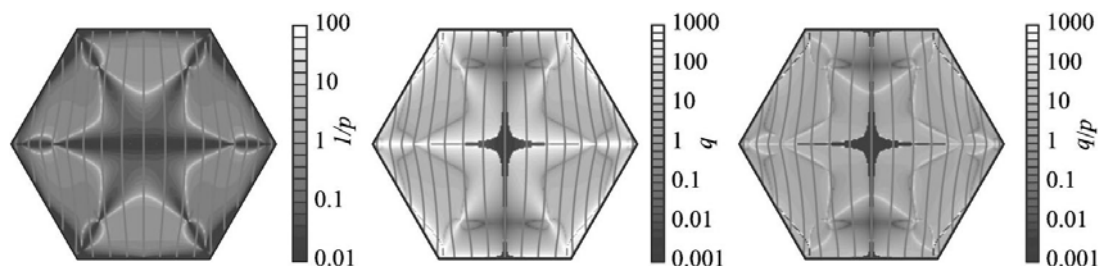


図150 三角格子円孔配列フォトニック結晶から成るスーパープリズムの3つの特性パラメータの計算結果。

D.3 : $\mathbf{k}$ ベクトルスーパープリズム光学系

従来、議論されてきたスーパープリズム光学系の諸現象は、分散面の変形によってフォトニック結晶中のポインティングベクトル $\mathbf{S}$ が特異な振る舞いを示すことに由来する。しかし実は、 $\mathbf{S}$ ベクトルと同時にフォトニック結晶内 $\mathbf{k}$ ベクトルも大きく変化している。これを積極的に利用する新たな機能デバイスを本研究では $\mathbf{k}$ ベクトルスーパープリズム光学系と名付けた。

一般にフォトニック結晶の入出射端では、 $\mathbf{k}$ ベクトルの接線成分が保存されるように結晶内 $\mathbf{k}$ ベクトルが決まる。フォトニック結晶格子による高次の回折光の発生を無視すると、入出射端が平行ならば入射光と出射光は常に平行になるはずである。この場合、結晶内 $\mathbf{k}$ ベクトルの効果は現れない。一方、入射端に対して斜めに射出端を設けると、射出端では結晶内 $\mathbf{k}$ ベクトルの影響を受けた出射光が生成される。これは $\mathbf{S}$ ベクトルスーパープリズムと同程度の大きな角度分散を生み、しかもビーム広がり抑制する効果を現す。図 151 は $\mathbf{S}$ ベクトルスーパープリズムと同様に定義された波長分解能パラメータを $\mathbf{k}$ ベクトルスーパープリズムに適用した例である。ここでフォトニック結晶には様々な構造を試したが、結果として 45° 回転させた正方格子が大きな波長感度パラメータを示したため、ここでもそのときの結果を示している。ただしここでは、射出端で第 1 ブリュアンゾーンと第 2 ブリュアンゾーンの $\mathbf{k}$ ベクトルに対する保存則によって導かれる出射光、ならびに菱形のフォトニック結晶の表側と裏側に伝搬するときの出射光の計 4 つの場合を全て示しており、黒い領域は出射光が発生し得ない条件を表している。計算結果を図 150 の波長分解能パラメータと比較すると、全般に極めて高い値が得られていることがわかる。この内訳を分析すると、このような $\mathbf{k}$ ベクトルプリズムのコリメートパラメータも波長感度パラメータも、 $\mathbf{S}$ ベクトルプリズムに比べると大きな変動が少ない。特にコリメートパラメータが大幅に改善されており、結果として高分解能が生まれている。

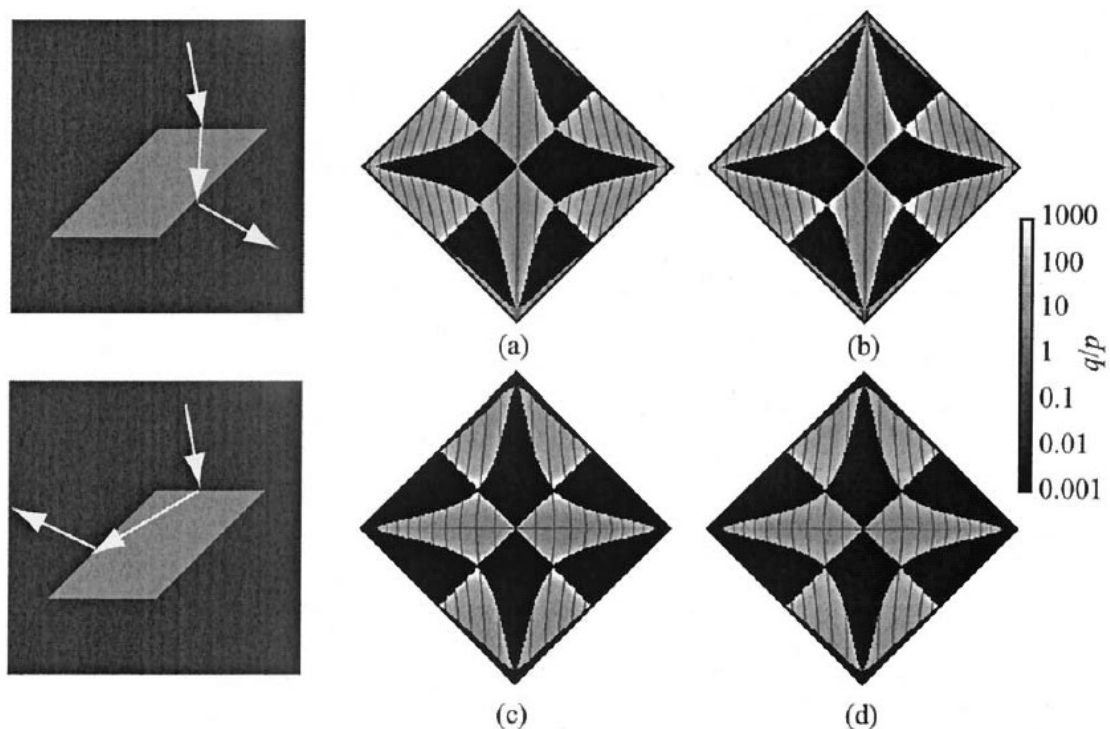


図151 45° 回転された正方格子円孔配列フォトニック結晶から成る $\mathbf{k}$ ベクトルスーパープリズムの分解能パラメータの分布。(a)、(b)は表側への光出力、(c)、(d)は裏側への光出力。(a)、(c)は第1ブリュアンゾーン、(b)、(d)は第2ブリュアンゾーンの回折光への結合。

k ベクトルプリズムの重要な利点は、フォトニック結晶を極端に小さくすることができる点にある。 S ベクトルプリズムでは理論上、高分解能が得られるとはいっても、例えば 10cm 以上の長さによって光を伝搬させると実際のデバイスでは大きな損失が生じることが予想される。これに対して、 k ベクトルプリズムは単に k ベクトルの変換のために利用されており、実際に異なる周波数の光はフォトニック結晶外の光伝搬で空間分解される。よってフォトニック結晶を例えば 100 μm オーダーにまで極端に小さくすることができる。また S ベクトルプリズムでは周波数によって光の到達位置が変化したのに対して、 k ベクトルプリズムでは光の出射角度自体が変化する。よってプリズムの外に屈折型レンズ(k ベクトルを変換するレンズ)を配置すれば、必要となる光伝搬距離をレンズの焦点距離程度に短縮でき、角度の変化を位置の変化に置換して分解することができる。このように、他の光学系との組み合わせが容易になる点も k ベクトルプリズムの有利な点といえる。(ただし後述するように、 S ベクトルプリズムとスーパーレンズ(S ベクトルレンズ)を組み合わせると、より高分解能かつ小型の分光システムを構築することができる。)

D.4 : 入出射端の最適化

入出射端は、平面波に近い入射ビームがフォトニック結晶内部のブロッホ波に滑らかに結合するように最適化する必要がある。これには 2 種類の方法が考えられる。1 つは境界部に局所的な構造変調を加えることで両者の整合をとる方法、もう 1 つは構造を断熱的に変化させて入射光をブロッホ波に導く方法である。前者は短い構造で要求が満足されるが、入射角度や周波数範囲に制約が生じる。後者は構造が長くなるが、角度や周波数の許容範囲を広くすることができる。当初、本研究では両方の可能性を探索したが、結果的には前者を採用して研究を進めた。

本研究で提案、採用した構造は、フォトニック結晶スラブの入出射端にある 1 列の円孔を外側に三角突起状に伸ばした構造である。突起の高さを円孔直径の 3 倍に設定し、スーパープリズム効果が生じる第 2 バンドの周波数の光を境界面に対して垂直に入射させると、フォトニック結晶に対する挿入損失が 0.3dB 以下にまで低減されることがわかった。何も工夫を施さない場合には 10dB 以上の損失となることから、この突起の効果は明らかである。当初、この構造には断熱的変化の効果も期待されたが、透過率が突起の長さに対して周期的に変化することから、入射光の横方向分布をブロッホ波に整合させるのがこの突起の主な役割であることが明らかになった。ただし低損失が得られる周波数範囲はスーパープリズム効果が生じる範囲全てをカバーする程に十分広い。ただしスーパープリズムでは光を垂直に入射させることはなく、例えば 10° 程度傾けることが多い。この場合はやや突起を変化させる必要がある。様々な調整を試みた結果、入射光とは反対の方向に 20° だけ突起を傾けるのが最適となることが判明した。図 152 はそのような突起を設けた正方格子フォトニック結晶の光伝搬の FDTD 計算結果である。境界面ではスーパープリズム特有の負の屈折を示して光が透過しているが、突起の効果により余計な散乱、回折はほとんど見られない。このとき、1 端面あたりの損失は 0.2dB 以下と見積もられた。本研究では、同様の最適化を、後述する k ベクトルスーパープリズムの斜め出射端や、平坦面で光を集光させるスーパーレンズに対しても行った。例えば前者に対しては出射端に対して半円を傾けて配置させる、後者については 4 次関数曲面の前面と三角形の背面にもつ空孔を配置することで、それぞれの目的に対して低損失が得られることがわかった。

一方、断熱的な変化に関しても、円孔直径を徐々に大きくする構造を検討した。ただしここで注意する必要があるのは、それぞれの円孔直径に対する分散面が滑らかにつながっている必要があるという点である。実際に直径が 0 の状態から典型的なスーパープリズムの直径である 0.5 a 付近までの分散面を追跡すると、等周波数線の形状は大きく変化し、必ず 1 回以上の局所的な PBG が発生してしまうため、最終的に大きな反射損失が残ってしまうことがわかった。したがってこの段階で最適化を休止し、本研究を上述の三角突起等の境界構造に集中させ

た。ただしこの断熱的な構造は、実は十分な低損失を実現することが最近、ジョージア工科大によって明らかにされた。ここでは断熱変化途中の格子形状や空孔形状を細かく変化させることで局所的な PBG の発生が回避され、結果として 1dB 以下の低損失が極めて広い周波数範囲や入射角度で実現され得ることが示されている。この場合、最初に述べたように構造が大きくなってしまう欠点はあるが、境界構造と適所に併用すれば、幅広い応用に対して反射の問題を完全に解消できると考えられる。

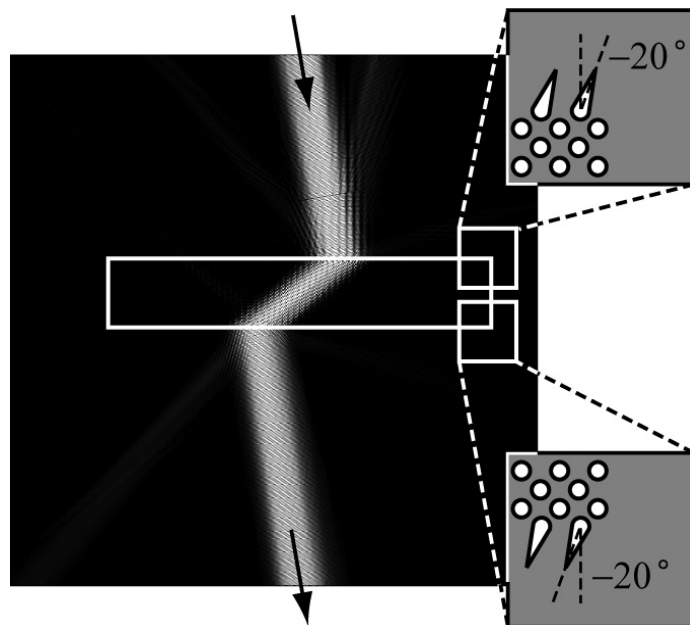


図152 45°回転された正方格子円孔配列フォトニック結晶スーパープリズムの入出射端面を最適化したときの光伝搬のFDTD計算結果。

D.5 : スーパーレンズ

スーパーレンズの集光はデバイス境界面の形状に由来するのではなく、分散面の形状に由来する。このため、通常の屈折型レンズと比べて様々なユニークな特長を表す。まずこれは平坦な入射端をもつレンズであり、余計な凹凸がないため、プリズムなど、他の光学要素と組み合わせる際にシステム全体をコンパクトに収める効果がある。また平坦面にもかかわらず、極めて集光角が大きい、言い換えれば開口数が多いレンズが得られる。さらに最も本質的に重要な点は、左にあるものは左に、手前にあるものは手前に結像されるという具合に実像結像が実現される点である。これはレンズ近くにある多くの発光点を小さなレンズで一括結像させるような画期的な光学設計を可能にする。このような特長を生かした応用に関しては、今後、議論が盛んになるものと予想する。

さて、スーパーレンズを実現する進行方向に向かって凹形状をもつ等周波数線は、様々なフォトニック結晶の分散面に見られる。特に高次のバンドではゾーン折り返し効果によってバンドの勾配が逆になるので、ブリュアンゾーンの中心(Γ 点)付近に見られる円形の等周波数線が集光条件を満たすようになる。このような円形の等周波数線については、負の屈折率が定義できることを NTT(株)が 2000 年に指摘している。この条件では、いかなる光に対しても完全集光が実現されることが特別な注目を集めているが、実はこれが達成されるのは入射媒質の屈折率と負の屈折率が同じ大きさをもつときのみであり、両者の大きさが異なるときには収差が完全集光を妨げる。またフォトニック結晶導波路で頻繁に議論したように、フォトニック結晶スラブ

を利用する際にはライトラインより高周波数側の放射損失を避ける必要がある。ところが Γ 点付近は最もこの制約が厳しく、実現が困難となる。したがって本研究では、むしろブリュアンゾーン端付近に見られる局所的な凹形状の等周波数線に着目した。無収差を与える理想的な等周波数線は放物線であるが、この付近ではそれに近い形が比較的広い周波数範囲で見られる。

一例として、 45° 回転させた正方格子配列フォトニック結晶スラブに対して垂直に光ビームを入射させたときの集光の FDTD 計算結果を図 153 に示す。ただしここでは、入出射端に前述の最適構造を配置して反射損失を 0.6dB まで抑制している。図よりフォトニック結晶中で光が集光されている様子が確認される。入射ビームのビームウェストにおけるスポットが 1λ のとき、集光スポット幅は 1.7λ である。入射スポットを 1.5λ まで拡大しても集光スポット幅は 1.7λ のままである。この領域では収差が集光スポットを制限するためである。一方、入射スポットを 2λ 、 2.5λ とすると、集光スポットは拡大される。この領域では入射光の角度広がり小さくなるため、収差が小さくなり、結晶内 $\mathbf{k}$ ベクトルの回折限界が集光スポットを制限するためである。入射スポットを 3.0λ まで拡大すると収差はほぼ完全に抑制され、集光スポットは 3.2λ となる。このように実像集光系では、一般に入射スポットと集光スポットはほぼ同じ大きさになる。またそれぞれのサイドローブレベルを見ると、収差によって制限されるスポット幅の条件ではサイドローブレベルが -15dB 程度と高く、収差成分が雑音となっていることがわかる。収差が抑えられる条件ではレベルが -30dB 以下と十分に低くなり、良好な集光が得られていることがわかる。

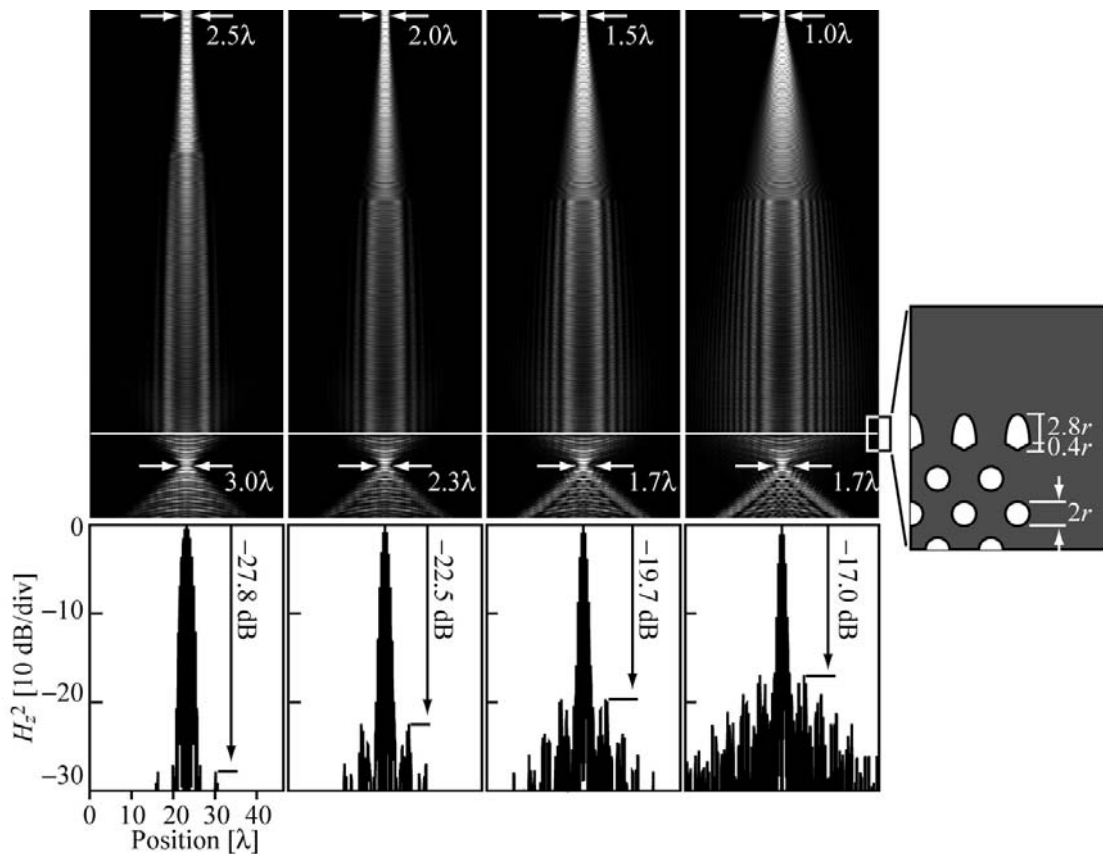


図153 45° 回転された正方格子円孔配列フォトニック結晶スーパーレンズの入出射端面を最適化したときの集光のFDTD計算結果

D.6 : スーパープリズムとスーパーレンズの融合

通常の分光システムでは、回折格子による光の偏向とレンズによる集光を併用することでシステム全体を小型化している。同様のことを **S** ベクトルスーパープリズムと屈折型レンズを用いて行うことを考える。議論を単純化するためにフォトニック結晶の入出射端を平行とすると、スーパープリズムで偏向され出射端位置に達した光は、常に入射光に対して平行になる。そのため、屈折レンズに光が入射し1点に集光されてしまい、空間的に分解されない。つまり、**S** ベクトルスーパープリズムと屈折レンズの組み合わせは機能しない。一方、**k** ベクトルスーパープリズムは出射光の角度を変化させるので、屈折レンズによって空間分解を行うことができる。ただし **k** ベクトルプリズムの光伝搬を厳密に分析すると、角度の変化に併せてわずかな位置の変化が起こるため、屈折レンズへの光入射位置のずれが収差を発生させるという問題が生じることがわかった。そこで、**S** ベクトルスーパープリズムにスーパーレンズを組合せた新たな波長フィルターを提案、検討した。図 154 に示すように、このフィルターでは入出射端が平行なフォトニック結晶をスーパープリズムとして用い、さらに平坦な入射端をもつ別のフォトニック結晶をスーパーレンズとして用いる。スーパーレンズはスーパープリズムに対して光の入射角 θ_i と同じ角度だけ傾けて配置されている。スーパープリズムに入射した光は偏向された後、入射光と平行に出射され、続けてスーパーレンズに垂直に入射、集光される。異なる周波数に対してスーパープリズムが与える出射位置の移動よりも集光スポットが小さければ、空間的に分解される。スーパーレンズでは入射位置に依存しない集光が得られるので、スーパープリズムの大きな波長感度を表す条件を利用しても拡大されたビームを集光することができる。

図 154 には FDTD 計算された光伝搬の様子を併せて示してある。入出射端には最適構造がモデル化されており、不要な反射、散乱損失を合計で 1dB 以下に抑えた状態で、上で述べた動作が実現されていることがわかる。ここで本フィルターはレンズを用いてデバイス全体を小型化してはいるが、スーパープリズムでの光伝搬距離と波長分解能には排他的な関係がある点はスーパープリズム単体の分光と同様である。このフィルターの分解能はビームコリメート性には無関係であり、むしろ波長感度パラメータとレンズの集光スポットが重要となる。仮に収差が無視できる状態で 2λ の集光スポットが得られたとすると、波長感度パラメータが 20 以上のとき波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯で分解能 0.4nm が得られる。図 150 よりわかるように、このような波長感度パラメータは実際に可能である。このときのデバイス全体の面積は、利用可能な波長範囲 $\Delta\lambda$ に依存する。 $\Delta\lambda$ を限定すると、大きな波長感度をピンポイント的に用いることができるので、面積を極めて小さくすることができる。例えば $\Delta\lambda=3\text{nm}$ とすると、面積 S は 0.1mm^2 ($300\mu\text{m}$ 角)となる。光通信の C バンドを全てカバーする $\Delta\lambda=35\text{nm}$ としても、 $S=0.9\text{mm}^2$ に収まる。

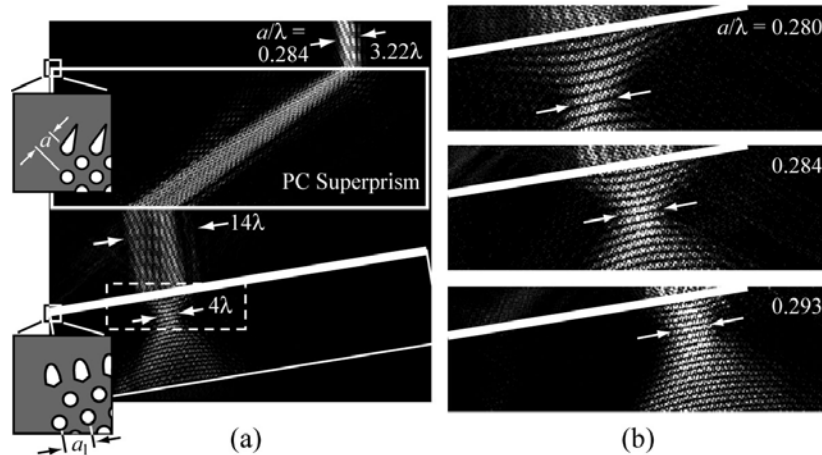


図154 スーパープリズムとスーパーレンズを組み合わせた波長フィルターの構造と光伝搬のFDTD解析結果。(a) 全体像。(b) 集光スポット付近の拡大図。

D.7 : 実験による観測

ここまで述べてきたデバイス設計は、全てフォトニック結晶スラブへの適用性を最大限考慮している。すなわちフォトニック結晶は 2 次元とし、空気のライトラインより下の分散面を選んで利用している。また入出射媒質は単なる半導体スラブを仮定している。したがって、この設計をそのまま実験に利用できる。作製プロセスはフォトニック結晶導波路のときと全く同じである。ここでもフォトニック結晶スラブの下に SiO_2 を除去したエアブリッジ構造としているが、フォトニック結晶全体を例えば $100\mu\text{m}$ 角以上と大きくすると、エアブリッジが歪んでしまう点に注意が必要である。図 155 は、作製された k ベクトルスーパープリズムと FDTD 計算による光伝搬の予測、観測された分波スペクトルをまとめている。スーパープリズムは 45° 回転させた正方格子とし、所望の光ビームを入射させるために、Si 細線導波路に導入された光をテーパで適度に拡大し、スーパープリズムに入射させている。スーパープリズムの入射端には前述の突起が配置されている。左側に設けられた 45° の出射端で光は周波数に依存した屈折角を示し、良好にコリメートされた出射ビームが生成されている。この出射端から約 1.1mm 離れた位置で観測されたスペクトルでは、 30nm 異なる波長が明瞭に分解されている。この分解能を向上させるためには、既に議論したように伝搬長をさらに長くするか、レンズを集積化することが必要になる。

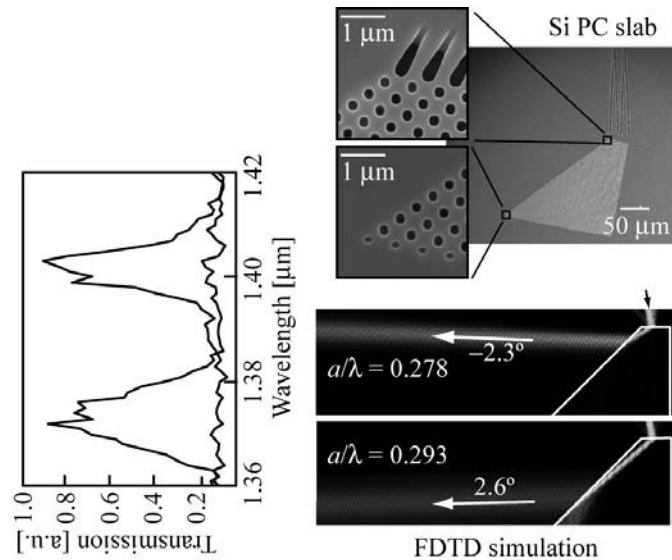


図155 SOI基板上フォトニック結晶スラブを用いて作製した k ベクトルスーパープリズムとその光伝搬のFDTD計算結果、ならびに実験で観測された分波スペクトル。

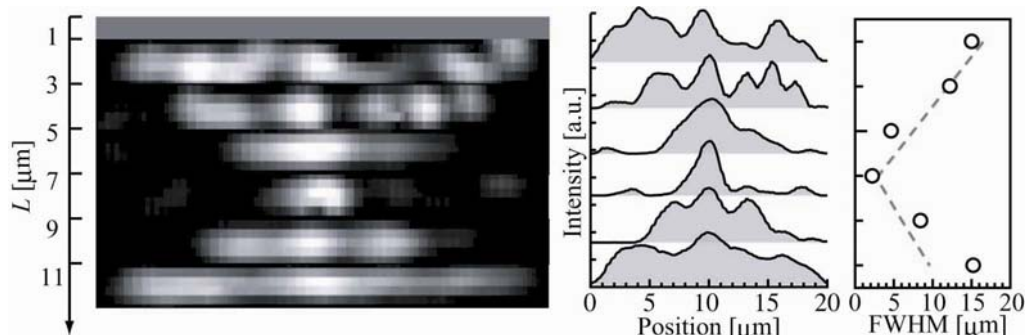


図156 SOI基板上フォトニック結晶スラブを用いて作製したスーパーレンズの長さ L を変えたとき、出射端での光の近視野像の変化、その強度分布、および半値全幅のプロットと分散面から予測されるスポット幅の理論曲線。

スーパーレンズに関しては、これまでのところ光の周波数帯で明確な実証例がない。2004年にスウェーデン王立工科大がフォトニック結晶の外での集光を報告しているが、計算、実験共に不明瞭な結果となっている。この原因の 1 つはやはり入出射端の最適化不足による不要な反射、散乱の発生だと思われる。本研究では既に最適化した 4 次関数突起を配置した試料を上と同様の方法で作製した。ここでも光の入射にはテーパ付きの Si 細線導波路を用い、光を適度に拡散させてフォトニック結晶へ入射させた。このときフォトニック結晶を通る光を上方から観察することはできないので、フォトニック結晶の出射端近傍に意図的に光を散乱させる溝を用意した。そしてフォトニック結晶の長さを様々に変化させ、溝で散乱される光の幅を調べることで、集光の様子を間接的に観測した。その結果を図 156 に示す。この場合、波長 $1.53\mu\text{m}$ の光は焦点距離 $14\mu\text{m}$ で $2.2\mu\text{m}$ のスポットまで集光されている。この結果は分散面より計算される光線追跡とよく一致した。集光スポットの広がり収差が主な原因である。

(2) 得られた研究成果の評価及び今後期待される効果

A. 類似研究の国内外の動向との比較

2次元フォトニック結晶導波路そのものに関する研究は世界各地で多くなされている。しかしながら、理論や作製技術のしっかりとしたベースのもとに理論・実験バランスよく研究を進めているところは、非常に少なく本グループおよびNTTに限られている。つまり、2次元フォトニック結晶スラブ導波路の基本となる重要な成果の多くは、研究代表者と馬場グループの理論・実験によって得られたものと言え、世界をリードしているものと言える。スローライトに関しては、最近世界的な関心を集めており、その研究人口は増えつつある。フォトニック結晶を用いたスローライトの研究は、本グループの他、IBMやNTTなどで進められている。

フォトニック結晶の透過帯域における分散性を利用した超小型プリズムに関しては、当初は、東北大・NECグループがリードしていたが、最近では、超小型プリズムの研究を行っているところは、かなり少ないのが実情である。これは、先にも述べたように、光ビーム伝搬の様子が、実際には、非常に複雑かつ光の入射条件に非常に敏感なためで、評価・実験が非常に難しいためと考えられる。そのような中で、本グループは、着実に、その問題点と向き合い、分解能等を基礎から押さえる研究を進めることが出来たと評価出来る。一方、非線形を用いたものに関しては、世界的にも研究はまだ初期段階にあると言えるが、今後、本グループが精力的に研究を進めることにより、世界をリード出来るものと考えている。

B. 成果の発表とそのインパクト等

本研究で得られた成果は、49件の学術誌に掲載された。(そのうち、代表的な論文10編程度の総被引用回数は、180件程度に達し、その反響は十分に大きかったと言える)。本テーマに関しては、さらに、国際会議では、100件(内、招待講演41件)、国内会議では、196件(内、招待講演58件)の発表を行った。また、26件の解説記事の執筆を行った。さらに、国際会議でのチュートリアル講演を複数回行うなど、成果の世界への波及にも積極的に努めた。

C. 波及効果

本研究により、フォトニック結晶導波路の伝搬特性を明らかにしたことは、フォトニック結晶による光制御の基礎を築いたと評価出来る。また、同導波路の広帯域・零分散に基づく光の群速度の制御は、科学的にも、技術的にも非常に興味深く、その波及効果は極めて高いと言える。さらにスーパープリズム光学系、特にスーパーレンズの実証は従来とは全く異なる集光系や結像系をもたらす重要な研究へと発展しうると評価出来る。

4 研究参加者

4.1 3次元フォトニック結晶と光制御

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
野田 進	京都大学	教授	全てに関与。全体の取りまとめ。	平成12年10月～平成17年10月
今田昌宏	京都大学	学振PD 平成15年4月より助手	3次元結晶の作製	平成12年10月～平成17年10月
チュティナン アロンカーン	京都大学	D3 CREST研究員	フォトニック結晶全般の理論解析	平成12年10月～平成13年2月 平成14年4月～平成15年3月
岡野 誠	京都大学	M2～D3 平成16年4月からCREST研究員	3次元フォトニック結晶の理論解析	平成12年10月～平成17年10月
小川新平	京都大学	M1～D3	3次元フォトニック結晶への発光体・欠陥の導入	平成12年10月～平成17年3月
吉本 晋	京都大学	M1～M2	3次元フォトニック結晶の評価	平成13年4月～平成15年3月
李 来和	京都大学	M1～M2	3次元フォトニック結晶導波路の作製	平成13年4月～平成15年3月
富士田誠之	京都大学	CREST研究員 平成15年4月より学振PD	2次元フォトニック結晶デバイスの評価	平成14年4月～平成17年10月
加古伸一	京都大学	M1～M2	3次元フォトニック結晶の評価	平成14年4月～平成16年3月
川島祥一	京都大学	D1～D3	3次元フォトニック結晶導波路の設計・作製	平成15年10月～平成17年10月
古川哲也	京都大学	M1～M2	3次元フォトニック結晶の作製	平成15年4月～平成17年3月
鴻池一暁	京都大学	M1～M2	2次元フォトニック結晶デバイスの解析・評価	平成15年4月～平成17年3月
高橋重樹	京都大学	B4～M2	3次元フォトニック結晶の評価	平成15年10月～平成17年10月
石崎賢司	京都大学	B4～M1	3次元フォトニック結晶の評価	平成16年10月～平成17年10月
山本宗継	産総研	研究員	3次元フォトニック結晶導波路の設計・理論計算	平成12年10月～平成17年11月
渡辺正信	産総研	副部門長 平成15年5月より部門長	3次元フォトニック結晶導波路の設計・理論計算	平成14年10月～平成16年3月
矢嶋弘義	産総研	研究部長	3次元フォトニック結晶導波路の設計・理論計算	平成12年10月～平成13年3月

4.2 2次元フォトリック結晶と機能デバイス(I) ー2次元フォトリック結晶レーザー

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
野田 進	京都大学	教授	全てに関与。全体の取りまとめ。	平成12年10月～平成17年10月
チュティナン アロンカーン	京都大学	D3 CREST研究員	フォトリック結晶全般の理論解析	平成12年10月～平成13年2月 平成14年4月～平成15年3月
横山 光	ミノルタ	研究員	2次元フォトリック結晶レーザーの作製・評価・解析	平成12年10月～平成17年3月
大西 大	ローム	研究員	2次元フォトリック結晶レーザーの作製・評価	平成12年10月～平成17年10月
宮井英次	京都大学	京大VBL PD 平成15年4月より 21COE研究員	2次元フォトリック結晶レーザーの解析	平成14年1月～平成17年10月
平野兼史	京都大学	M1～M2	2次元フォトリック結晶レーザーの作製・評価	平成13年4月～平成15年4月
酒井恭輔	京都大学	M1～D2	2次元フォトリック結晶レーザーの作製・評価	平成14年4月～平成17年10月
岡野誉之	京都大学	M1～M2	2次元フォトリック結晶レーザーの作製・評価	平成15年4月～平成17年3月

4.3 2次元フォトリック結晶と機能デバイス(II)ー欠陥活用光機能デバイスー

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
野田 進	京都大学	教授	全てに関与。全体の取りまとめ。	平成12年10月～平成17年10月
浅野 卓	京都大学	助手 平成15年10月より講師	2次元フォトリック結晶機能デバイスの設計・評価	平成12年10月～平成17年10月
チュティナン アロンカーン	京都大学	D3 CREST研究員	フォトリック結晶全般の理論解析	平成12年10月～平成13年2月 平成14年4月～平成15年3月
望月理光	京都大学	M1～M2	2次元フォトリック結晶デバイスの解析	平成12年10月～平成14年3月
宋 奉植	京都大学	D1～D3 平成16年10月より CREST研究員	2次元フォトリック結晶欠陥活用デバイスの作製・評価	平成14年10月～平成17年10月

田中良典	京都大学	M1～D3	2次元フォトニック結晶デバイスの解析	平成13年4月～平成17年10月
清田和明	京都大学	M1～M2	2次元フォトニック結晶欠陥活用デバイスの作製・評価	平成13年4月～平成15年3月
赤羽良啓	住友電工	研究員	2次元フォトニック結晶デバイスの作製・評価	平成13年4月～平成17年10月
國師 渡	京都大学	M1～M2	2次元フォトニック結晶欠陥活用デバイスの評価	平成15年4月～平成16年3月
石原邦亮	京都大学	M1～M2	2次元フォトニック結晶デバイスの評価	平成15年4月～平成17年10月
中村誠宏	京都大学	B4～M1	2次元フォトニック結晶の評価	平成15年10月～平成17年10月
高野仁路	松下電工	研究員	2次元フォトニック結晶デバイスの作製・評価	平成14年11月～平成17年10月
初田蘭子	TDK	研究員	2次元フォトニック結晶デバイスの作製・評価	平成15年4月～平成15年10月
上杉利次	京都大学	M1～M2	2次元フォトニック結晶デバイスの作製・評価	平成16年4月～平成17年10月
松原一平	京都大学	B4～M1	2次元フォトニック結晶デバイスの評価	平成16年10月～平成17年10月
永島拓志	京都大学	B4～M1	2次元フォトニック結晶欠陥活用デバイスの評価	平成16年10月～平成17年10月
高山清市	TDK	研究員	2次元フォトニック結晶の作製・評価	平成16年4月～平成17年3月
Roberto Fenollosa Esteve	京都大学	研究員	2次元フォトニック結晶デバイスの評価	平成16年4月～平成17年9月

4.4 2次元フォトニック結晶と機能デバイス(III)－光伝搬制御－

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
馬場俊彦	横浜国大	助教授 平成17年4月より教授	光伝搬制御グループの全てに関与。グループのとりまとめ。	平成12年10月～平成17年10月
坂井 篤	横浜国大	D2～D3	2次元光伝搬デバイスの作製・評価	平成12年10月～平成14年3月
富士田誠之	横浜国大	D1～D3	2次元光伝搬デバイスの作製・評価	平成12年10月～平成14年3月
井下京治	横浜国大	M2～D3	2次元光伝搬デバイスの作製・評価	平成12年10月～平成16年3月
松本 崇	横浜国大	M1～D2	スーパープリズム・スーパーレンズの検討	平成14年4月～平成17年10月
井上尚子	横浜国大	M2～D1	2次元光伝搬デバイスの作製・評価	平成16年4月～平成17年10月

野崎謙悟	横浜国大	M1～D1	2次元光伝搬デバイスの作製・評価	平成15年4月～平成17年10月
森 大祐	横浜国大	M1～D1	チャープ構造の検討	平成15年4月～平成17年10月
大崎大輔	横浜国大	M2	端面低反射構造の検討	平成12年10月～平成13年3月
神原浩平	横浜国大	M2	2次元光伝搬デバイスの作製・評価	平成12年10月～平成13年3月
深谷尚志	横浜国大	M2	2次元フォトニック結晶導波路の作製・評価	平成12年10月～平成13年3月
市川宏之	横浜国大	M1～M2	2次元光伝搬デバイスの設計・評価	平成12年10月～平成14年3月
岩井 剛	横浜国大	M2	2次元光伝搬デバイスの設計・評価	平成13年4月～平成14年3月
牛込礼生奈	横浜国大	M1～M2	2次元光伝搬デバイスの作製・評価	平成12年10月～平成14年3月
佐野大介	横浜国大	M2	2次元光伝搬デバイスの作製・評価	平成15年4月～平成16年3月
中川敦生	横浜国大	M2	2次元光伝搬デバイスの作製・評価	平成15年4月～平成16年3月
深澤竜彦	横浜国大	M1～M2	2次元光伝搬デバイスの作製・評価	平成14年4月～平成16年3月
茂木 歩	横浜国大	B4～M2	フォトニック結晶導波路の作製・評価	平成14年4月～平成17年3月
志賀正浩	横浜国大	B4～M2	2次元光伝搬デバイスの作製・評価	平成15年4月～平成17年10月
森藤康輔	横浜国大	M2	2次元光伝搬デバイスの作製・評価	平成16年4月～平成17年3月
石井 理	横浜国大	M1～M2	2次元光伝搬デバイスの作製・評価	平成16年4月～平成17年10月
大野文彰	横浜国大	M1～M2	2次元光伝搬デバイスの作製・評価	平成16年4月～平成17年10月
黒木雄介	横浜国大	M1～M2	2次元光伝搬デバイスの作製・評価	平成16年4月～平成17年10月
水田栄一	横浜国大	M1～M2	2次元光伝搬デバイスの作製・評価	平成16年4月～平成17年10月

4.5 チーム事務員

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
八巻美奈	京都大学	CREST事務員	チーム事務	平成15年4月～平成17年10月

5 成果発表等

5.1 論文発表

学術論文：和文1件、英文115件

解説記事・書籍：和文67件、英文10件

(1) 学術論文

- [1] S. Noda, A. Chutinan, and M. Imada, "Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure," *Nature*, vol.407, no.6804, pp.608-610 (2000).
- [2] K. Sakoda, N. Kawai, T. Ito, A. Chutinan, S. Noda, T. Mitsuyu, and K. Hirao, "Photonic bands of metallic systems. I. Principle of calculation and accuracy," *Physical Review B*, vol.64, no.4, pp.45116 (2001).
- [3] M. Yokoyama, K. Akimoto, M. Imada, and S. Noda, "Wafer fusion condition for GaAs/AlGaAs system and its application to laser diode," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.40, no.8A, pp.L847-L849 (2001).
- [4] S. Noda, "Two- and three-dimensional photonic crystals in III-V semiconductors," *MRS Bulletin*, vol.26, no.8, pp.618-621 (2001). (Invited)
- [5] S. Noda, M. Yokoyama, M. Imada, A. Chutinan, and M. Mochizuki, "Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser by unit cell structure design," *Science*, vol.293, no.5532, pp.1123-1125 (2001).
- [6] A. Chutinan, M. Mochizuki, M. Imada, and S. Noda, "Surface-emitting channel drop filters using single defects in two-dimensional photonic crystal slabs," *Applied Physics Letters*, vol.79, no.17, pp.2690-2692 (2001).
- [7] N. Yamamoto, S. Ogawa, M. Imada, and S. Noda, "Photonic crystal preparation by a wafer bonding approach," *Proceedings of SPIE "Advances in Microelectronic Device Technology"*, vol.4600, pp.73-79 (2001).
- [8] S. Noda, "Teaching light new tricks," *SPIE OE Magazine*, vol.1, no.10, pp.28-31 (2001).
- [9] S. Noda and M. Imada, "2D photonic crystal surface-emitting laser using triangular-lattice structure," *IEICE Transactions on Electronics*, vol.E85C, no.1, pp.45-51 (2002). (Invited)
- [10] S. Ogawa, K. Tomoda, and S. Noda, "Effects of structural fluctuations on three-dimensional photonic crystals operating at near-infrared wavelengths," *Journal of Applied Physics*, vol.91, no.1, pp.513-515 (2002).
- [11] T. Tanaka, S. Noda, A. Chutinan, T. Asano, and N. Yamamoto, "Ultra-short pulse propagation in 3D GaAs photonic crystals," *Optical and Quantum Electronics*, vol.34, no.1-3, pp.37-43 (2002).
- [12] A. Chutinan, M. Okano, and S. Noda, "Wider bandwidth with high transmission through waveguide bends in two-dimensional photonic crystal slabs," *Applied Physics Letters*, vol.80, no.10, pp.1698-1700 (2002).
- [13] S. Noda, M. Imada, and M. Okano, "Semiconductor photonic crystals and functional devices," *Proceedings of SPIE "Photonic Bandgap Materials and Devices"*, vol.4655, pp.160-172 (2002).
- [14] M. Imada, A. Chutinan, S. Noda, and M. Mochizuki, "Multidirectionally distributed feedback photonic crystal lasers," *Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology*, vol.5, no.18 (2002).
- [15] M. Imada, S. Noda, A. Chutinan, M. Mochizuki, and T. Tanaka, "Channel drop filter using a single defect in a 2-D photonic crystal slab waveguide," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol.20, no.5, pp.845-850 (2002).
- [16] M. Imada, A. Chutinan, S. Noda, and M. Mochizuki, "Multidirectionally distributed feedback photonic crystal lasers," *Physical Review B*, vol.65, no.19, pp.195306 (2002).
- [17] M. Yokoyama, M. Imada, and S. Noda, "Two-dimensional photonic crystal lasers," *Proceedings*

of SPIE "Novel In-Plane Semiconductor Lasers", vol.4651, pp.222-232 (2002).

- [18] T. Asano, S. Noda, K. Kiyota, Y. Tanaka, Y. Akahane, B. S. Song, M. Mochizuki, and M. Imada, "Channel-add operation of a device using defects in a two-dimensional photonic crystal slab," Materials Research Society Symposium Proceedings "Materials and devices for optoelectronics and microphotonics", vol.722, pp.363-367 (2002).
- [19] M. Imada, S. Noda, and T. Asano, "Optical functional devices based on photonic crystals: laser and add-drop devices," Proceedings of SPIE "Active and Passive Optical Components for WDM Communications II", vol.4870, pp.348-356 (2002).
- [20] S. Noda, M. Imada, M. Okano, S. Ogawa, M. Mochizuki, and A. Chutinan, "Semiconductor three-dimensional and two-dimensional photonic crystals and devices," IEEE Journal of Quantum Electronics, vol.38, no.7, pp.726-735 (2002).
- [21] S. Noda, M. Imada, A. Chutinan, and N. Yamamoto, "III-V based-semiconductor photonic crystals," Optical and Quantum Electronics, vol.34, no.8, pp.723-736, (2002).
- [22] A. Chutinan and S. Noda, "Recent progress of semiconductor photonic crystals," Proceedings of SPIE "Materials and Devices for Optical and Wireless Communications", vol.4905, pp.67-77 (2002).
- [23] M. Okano, A. Chutinan, and S. Noda, "Analysis and design of single-defect cavities in a three-dimensional photonic crystal," Physical Review B, vol.66, no.16, pp.165211-1-6 (2002).
- [24] N. Yamamoto and S. Noda, "Accurate identification of the band gap of photonic crystals from transmission spectra," Journal of Applied Physics, vol.92, no.5, pp.2256-2259 (2002).
- [25] E. Miyai, M. Okano, M. Mochizuki, and S. Noda, "Analysis on coupling between 2D photonic crystal slab and external waveguide," Applied Physics Letters, vol.81, no.20, pp.3729-3731 (2002).
- [26] M. Okano, A. Chutinan, and S. Noda, "Analysis and design of single-defect cavities in a three-dimensional photonic crystal," Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology, vol.6, no.18 (2002).
- [27] Y. Akahane, M. Mochizuki, T. Asano, Y. Tanaka, and S. Noda, "Design of a channel drop filter by using a donor-type cavity with high-quality factor in a two-dimensional photonic crystal slab," Applied Physics Letters, vol.82, no.9, pp.1341-1343 (2003).
- [28] Y. Tanaka, T. Asano, Y. Akahane, B. S. Song, and S. Noda, "Theoretical investigation of a two-dimensional photonic crystal slab with truncated cone air holes," Applied Physics Letters, vol.82, no.11, pp.1661-1663 (2003).
- [29] D. Ohnishi, K. Sakai, M. Imada, and S. Noda, "Continuous wave operation of surface emitting two-dimensional photonic crystal laser," Electronics Letters, vol.39, no.7, pp.612-614 (2003).
- [30] S. Ogawa, M. Imada, and S. Noda, "Analysis of thermal stress on wafer bonding of dissimilar materials for the introduction of InP-based light-emitter into GaAs-based three dimensional photonic crystals," Applied Physics Letters, vol.82, no.20, pp.3406-3408 (2003).
- [31] T. Asano, M. Mochizuki, S. Noda, M. Okano, and M. Imada, "A channel drop-filter using a single defect in a 2D photonic crystal slab - Defect engineering with respect to polarization mode and ratio of emissions from upper and lower sides -," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol.21, no.5, pp.1370-1376 (2003).
- [32] B. S. Song, S. Noda, and T. Asano, "Photonic devices based on in-plane hetero photonic crystals," Science, vol.300, no.5625, pp.1537-1537 (2003).
- [33] T. Asano, B. S. Song, Y. Tanaka, and S. Noda, "Investigation of a channel-add/drop-filtering device using acceptor type point defects in a two-dimensional photonic crystal slab," Applied Physics Letters, vol.83, no.3, pp.407-409 (2003).
- [34] Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, and S. Noda, "Investigation of high- Q channel drop filters using donor-type defects in two-dimensional photonic crystal slabs," Applied Physics Letters, vol.83, no.8, pp.1512-1514 (2003).

- [35] M. Okano, S. Kako, and S. Noda, "Coupling between a point-defect cavity and a line-defect waveguide in three-dimensional photonic crystal," *Physical Review B*, vol.68, no.23, pp.235110-1-235110-10 (2003).
- [36] M. Yokoyama and S. Noda, "Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser having a square lattice structure," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol.39, no.9, pp.1074-1080 (2003).
- [37] Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, and S. Noda, "High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal," *Nature*, vol.425, no.6961, pp.944-947 (2003).
- [38] M. Okano, S. Kako, and S. Noda, "Coupling between a point-defect cavity and a line-defect waveguide in three-dimensional photonic crystal," *Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology*, vol.8, no.26 (2003).
- [39] M. Fujita, T. Ueno, T. Asano, S. Noda, H. Ohhata, T. Tsuji, H. Nakada, and N. Shimoji, "Organic light-emitting diode with ITO/organic photonic crystal," *Electronics Letters*, vol.39, no.24, pp.1750-1752 (2003).
- [40] E. Miyai and S. Noda, "Structural dependence of coupling between a two-dimensional photonic crystal waveguide and a wire waveguide," *Journal of the Optical Society of America B*, vol.21, no.1, pp.67-72 (2004).
- [41] S. Noda and T. Baba, "Special issue on photonic crystals and their device applications," *IEICE Transactions on Electronics*, vol.E87C, no.3, pp.257-257 (2004).
- [42] M. Yokoyama and S. Noda, "Finite-difference time-domain simulation of two-dimensional photonic crystal surface-emitting laser having a square-lattice slab structure," *IEICE Transactions, Special Issue on Photonic Crystals and Their Device Applications*, vol.E87C, no.3, pp.386-392 (2004).
- [43] H. Takano, Y. Akahane, T. Asano, and S. Noda, "In-plane-type channel drop filter in a two-dimensional photonic crystal slab," *Applied Physics Letters*, vol.84, no.13, pp.2226-2228 (2004).
- [44] D. Ohnishi, T. Okano, M. Imada, and S. Noda, "Room temperature continuous wave operation of a surface-emitting two-dimensional photonic crystal diode laser," *Optics Express*, vol.12, no.8, pp.1562-1568 (2004).
- [45] T. Asano and S. Noda, "Tuning holes in photonic-crystal nanocavities," *Nature*, vol.429, doi:10.1038, no.6988 (2004).
- [46] S. Ogawa, M. Imada, S. Yoshimoto, M. Okano, and S. Noda, "Control of light emission by 3D photonic crystals," *Science*, vol.305, no.5681, pp.227-229 (2004). (; published online 3 June 2004 (10.1126/science.1097968))
- [47] T. Asano, K. Kiyota, D. Kumamoto, B. S. Song, and S. Noda, "Time-domain measurement of picosecond light-pulse propagation in a two-dimensional photonic crystal-slab waveguide," *Applied Physics Letters*, vol.84, no.23, pp.4690-4692 (2004).
- [48] M. Okano and S. Noda, "Analysis of multimode point-defect cavities in three-dimensional photonic crystals using group theory in frequency and time domains," *Physical Review B*, vol.70, no.12, pp.125105-1-125105-15 (2004).
- [49] M. Fujita, A. Sugitatsu, T. Uesugi, and S. Noda, "Fabrication of Indium Phosphide compound photonic crystal by Hydrogen Iodide/Xenon inductively coupled plasma etching," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.43, no.11, pp.L1400-L1402 (2004).
- [50] B. S. Song, T. Asano, Y. Akahane, Y. Tanaka, and S. Noda, "Transmission and reflection characteristics of in-plane hetero-photonic crystals," *Applied Physics Letters*, vol.85, no.20, pp.4591-4593 (2004).
- [51] Y. Tanaka, T. Asano, R. Hatsuta, and S. Noda, "Analysis of a line-defect waveguide on a silicon-on-insulator two-dimensional photonic-crystal slab," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol.22, no.12, pp.2787-2792 (2004).

- [52] T. Asano, W. Kunishi, M. Nakamura, B. S. Song, and S. Noda, "Dynamical wavelength tuning of channel-drop device in two-dimensional photonic crystal slab," *Electronics Letters*, vol.41, no.1, pp.37-38 (2005).
- [53] Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, and S. Noda, "Fine-tuned high-Q photonic-crystal nanocavity," *Optics Express*, vol.13, no.4, pp.1202-1214 (2005).
- [54] B. S. Song, S. Noda, T. Asano and Y. Akahane, "Ultra-high-Q photonic double-heterostructure nanocavity," *Nature Materials*, vol.4, no.3, pp.207-210 (2005).
- [55] B. S. Song, T. Asano, Y. Akahane, Y. Tanaka, and S. Noda, "Multi-channel add/drop filter based on in-plane hetero photonic crystals," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol.23, no.3, pp.1449-1455 (2005).
- [56] E. Miyai and S. Noda, "Phase-shift effect on a two-dimensional surface-emitting photonic-crystal laser," *Applied Physics Letters*, vol.86, no.11, pp.111113-1-111113-3 (2005).
- [57] Y. Akahane, T. Asano, H. Takano, B. S. Song, Y. Tanaka, and S. Noda, "Two-dimensional photonic-crystal-slab channel-drop filter with flat-top response," *Optics Express*, vol.13, no.7, pp.2512-2530 (2005).
- [58] M. Yokoyama and S. Noda, "Finite-difference time-domain simulation of two-dimensional photonic crystal surface-emitting laser," *Optics Express*, vol.13, no.8, pp.2869-2880 (2005).
- [59] B. S. Song, T. Asano, Y. Akahane, and S. Noda, "Role of interfaces in heterophotonic crystals for manipulation of photons," *Physical Review B*, vol.71, no.19, pp.195101-1-195101-5 (2005).
- [60] M. Fujita, S. Takahashi, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda, "Simultaneous inhibition and redistribution of spontaneous light emission in photonic crystals," *Science*, vol.308, no.5726, pp.1296-1298 (2005).
- [61] H. Takano, B. S. Song, T. Asano, S. Noda, "Highly efficient in-plane channel drop filter in a two-dimensional heterophotonic crystal," *Applied Physics Letters*, vol.86, pp.241101-1-241101-3 (2005).
- [62] K. Sakai, E. Miyai, T. Sakaguchi, D. Ohnishi, T. Okano, and S. Noda, "Lasing band edge identification for a surface-emitting photonic-crystal laser," *IEEE Journal of Selected Area in Communications*, vol.23, no.7, pp.1330-1334 (2005).
- [63] S. Takayama, H. Kitagawa, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda, "Experimental demonstration of complete photonic band gap in two-dimensional photonic crystal slabs," *Applied Physics Letters*, vol.87, no.6, pp.061107-1-061101-3 (2005).
- [64] M. Imada, S. Ogawa, S. Yoshimoto, and S. Noda, "Introduction of an InP-based light emitter into a GaAs-based 3D photonic crystal by improved wafer bonding of dissimilar materials," *Sensors and Materials*, vol.17, no.6, pp.343-353 (2005).
- [65] S. Kawashima, L. H. Lee, M. Okano, M. Imada, and S. Noda, "Design of donor-type line-defect waveguides in three-dimensional photonic crystals," *Optics Express*, vol.13, no.24, pp.9774-9781 (2005).
- [66] Y. Watanabe, N. Yamamoto, and K. Komori, "Numerical Analysis of Waveguides in Three-Dimensional Photonic Crystal with Finite Thickness," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.43, pp.2015-2018 (2004).
- [67] N. Yamamoto, Y. Watanabe and K. Komori, "A design of the photonic crystal directional coupler with a high extinction ratio and a short coupling length," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.44, pp.2575-2578 (2005).
- [68] H. Ichikawa, K. Inoshita and T. Baba, "Reduction in surface recombination of GaInAsP/InP micro-columns by CH₄ plasma irradiation," *Appl. Phys. Lett.*, vol.78, no.15, pp.2119-2121 (2001).
- [69] A. Sakai, G. Hara and T. Baba, "Propagation characteristics of ultra-high Δ optical waveguide on silicon-on-insulator substrate," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.40, no.4B, pp.L383-L385 (2001).
- [70] M. Fujita, R. Ushigome and T. Baba, "Large spontaneous emission factor of 0.1 in a microdisk injection laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.13, no.5, pp.403-405 (2001).

- [71] T. Baba, N. Fukaya and A. Motegi, "Clear correspondence between theoretical and experimental light propagation characteristics in photonic crystal waveguides," *Electron. Lett.*, vol.37, no.12, pp.761-762 (2001).
- [72] M. Fujita, K. Teshima and T. Baba, "Low threshold continuous wave lasing in photo-pumped GaInAsP microdisk lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.40, no.8B, pp.L875-L877 (2001).
- [73] M. Fujita, R. Ushigome, T. Baba, A. Matsutani, F. Koyama and K. Iga, "GaInAsP microcylinder (microdisk) injection laser with AlInAs(O_x) claddings," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.40, no.9A, pp.5338-5339 (2001).
- [74] T. Baba and D. Ohsaki, "Interfaces of photonic crystals for high efficiency light transmission," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.40, no.10, pp.5920-5924 (2001).
- [75] M. Fujita and T. Baba, "Proposal and FDTD simulation of whispering gallery mode microgear cavity," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.37, no.10, pp.1253-1258 (2001).
- [76] T. Baba and N. Fukaya, "Light propagation characteristics of defect waveguides in a photonic crystal slab," *Photonic Crystals and Light Localization* (Ed. M. Soukoulis), pp.105-116, Kluwer Academic (2001).
- [77] M. Fujita, R. Ushigome and T. Baba, "Strain relaxation effect in microdisk lasers with compressively-strained quantum wells," *Appl. Phys. Lett.*, vol.80, no.9, pp.1511-1513 (2002).
- [78] M. Fujita and T. Baba, "Microgear laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol.80, no.12, pp.2051-2053 (2002).
- [79] A. Sakai, T. Fukazawa and T. Baba, "Low loss ultra-small branches in Si photonic wire waveguides," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E85-C, no.4, pp.1033-1038 (2002).
- [80] T. Baba, A. Motegi, T. Iwai, N. Fukaya, Y. Watanabe and A. Sakai, "Light propagation characteristics of straight single line defect optical waveguides in a photonic crystal slab fabricated into a silicon-on-insulator substrate," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.38, no.7, pp.743-752 (2002).
- [81] T. Baba and M. Nakamura, "Photonic crystal light deflection devices using the superprism effect," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.38, no.7, pp.909-914 (2002).
- [82] T. Baba and T. Matsumoto, "Resolution of photonic crystal superprism," *Appl. Phys. Lett.*, vol.81, no.13, pp.2325-2327 (2002).
- [83] R. Ushigome, M. Fujita and T. Baba, "GaInAsP microdisk Injection laser with Benzocyclobutene polymer cladding and its athermal effect," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.41, no.11A, pp.6364-6369 (2002).
- [84] T. Fukazawa, A. Sakai and T. Baba, "H-tree-type optical clock signal distribution circuit by a Si photonic wire waveguide," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.41, no.12B, pp.L1461-L1463 (2002).
- [85] T. Baba and T. Iwai, "Enhancement of third order nonlinearity calculated for 2-D photonic crystals," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.42, no.4A, pp.1603-1608 (2003).
- [86] K. Inoshita and T. Baba, "Lasing at bend, branch and intersection of photonic crystal waveguides," *Electron. Lett.*, vol.39, no.11, pp.844-846 (2003).
- [87] T. Baba, M. Shiga and K. Inoshita, "Carrier plasma shift in GaInAsP photonic crystal point defect cavity," *Electron. Lett.*, vol.39, no.21, pp.1516-1518 (2003).
- [88] K. Inoshita and T. Baba, "Room temperature lasing characteristics of bend and branch in photonic crystal waveguides," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.42, no.11, pp.6887-6891 (2003).
- [89] T. Baba and D. Sano, "Low threshold lasing and Purcell effect in microdisk lasers at room temperature," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol.9, no.5, pp.1340-1346 (2003).
- [90] K. Inoshita and T. Baba, "Fabrication of GaInAsP/InP photonic crystal lasers by ICP etching and control of resonant mode in point and line composite defects," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol.9, no.5, pp.1347-1354 (2003).
- [91] K. Nozaki, A. Nakagawa, D. Sano and T. Baba, "Ultralow threshold and singlemode lasing in microgear lasers and its fusion with quasiperiodic photonic crystals," *IEEE J. Sel. Top. Quantum*

Electron., vol.9, no.5, pp.1355-1360 (2003).

- [92] H. Ichikawa and T. Baba, "Efficiency enhancement in surface grating type two-dimensional photonic crystal light emitting diode," Appl. Phys. Lett., vol.84, no.2, pp.457-459 (2004).
- [93] T. Fukazawa, T. Hirano, F. Ohno and T. Baba, "Low loss intersection of Si photonic wire waveguides," Jpn. J. Appl. Phys., vol.43, no.2, pp.646-647 (2004).
- [94] A. Sakai, T. Fukazawa and T. Baba, "Estimation of polarization crosstalk at a micro-bend in Si photonic wire waveguide," J. Lightwave Technol., vol.22, no.2, pp.520-525 (2004).
- [95] T. Matsumoto and T. Baba, "Photonic crystal k-vector superprism," J. Lightwave Technol., vol.22, no.3, pp.917-922 (2004).
- [96] T. Matsumoto and T. Baba, "Design and FDTD simulation of photonic crystal k-vector superprism," IEICE Trans. Electron., vol.E87-C, no.3, pp.393-397 (2004).
- [97] T. Fukazawa, F. Ohno and T. Baba, "Very compact arrayed-waveguide-grating demultiplexer using Si photonic wire waveguides," Jpn. J. Appl. Phys., vol.43, no.5B, pp.L673-L675 (2004).
- [98] T. Baba, D. Mori, K. Inoshita and Y. Kuroki, "Light localization in line defect photonic crystal waveguides," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol.10, no.3, pp.484-491 (2004).
- [99] K. Nozaki and T. Baba, "Quasiperiodic photonic crystal microcavity lasers," Appl. Phys. Lett., vol.84, no.24, pp.4875-4877 (2004).
- [100] D. Mori and T. Baba, "Dispersion-controlled optical group delay device by chirped photonic crystal waveguides," Appl. Phys. Lett., vol.85, no.7, pp.1101-1103 (2004).
- [101] T. Ide, T. Baba, J. Tatebayashi, T. Iwamoto, T. Nakaoka and Y. Arakawa, "Lasing characteristics of InAs quantum-dot microdisk from 3K to room temperature," Appl. Phys. Lett., vol.85, no.8, pp.1326-1328 (2004).
- [102] T. Baba, T. Matsumoto and M. Echizen, "Finite difference time domain study of high efficiency photonic crystal superprisms," Opt. Express, vol.12, no.19, pp.4608-4613 (2004).
- [103] T. Baba, D. Sano, K. Nozaki, K. Inoshita, Y. Kuroki and F. Koyama, "Observation of fast spontaneous emission decay in GaInAsP photonic crystal point defect nanocavity at room temperature," Appl. Phys. Lett., vol.85, no.18, pp.3989-3991 (2004).
- [104] A. Furukawa, S. Sasaki, M. Hoshi, A. Matsuzono, K. Moritoh, and T. Baba "High-power single-mode vertical-cavity surface-emitting lasers with triangular holey structure," Appl. Phys. Lett., vol.85, no.22, pp.5161-5163 (2004).
- [105] A. Nakagawa, S. Ishii and T. Baba, "Photonic molecule lasers composed of GaInAsP microdisks," Appl. Phys. Lett., vol.86, no.4, pp.041112 (2005).
- [106] T. Ide, T. Baba, J. Tatebayashi, T. Iwamoto, T. Nakaoka and Y. Arakawa, "Room temperature continuous wave lasing in InAs quantum-dot microdisks with air cladding," Opt. Express, vol.13, no.5, pp.1615-1620 (2005).
- [107] 馬場俊彦, 坂井篤, 深澤達彦, 大野文彰, "Si細線導波路," 電子情報通信学会論文誌, vol.J88-C, no.6, pp.363-373 (2005) (招待論文).
- [108] F. Ohno, T. Fukazawa and T. Baba, "Mach-Zehnder interferometers composed of μ -bends and m-branches in the Si photonic wire waveguide," Jpn. J. Appl. Phys., vol.44, no.7A, pp.5322-5323 (2005).
- [109] K. Nozaki and T. Baba, "Carrier and photon analyses of photonic microlasers by two-dimensional rate equations," IEEE J. Sel. Area. Commun., vol.23, no.7, pp.1411-1417 (2005).
- [110] K. Sasaki, F. Ohno, A. Motegi and T. Baba, "Arrayed waveguide grating of $70 \times 60 \mu\text{m}^2$ size based of Si photonic wire waveguides," Electron. Lett., vol.41, no.14, pp.801-802 (2005).
- [111] K. Nozaki, T. Ide, J. Hashimoto, W-H. Zheng and T. Baba, "Photonic crystal point shift nanolaser with ultimate small modal volume," Electron. Lett., vol.41, no.15, pp.843-845 (2005).
- [112] S. Ishii and T. Baba, "Bistable lasing in twin microdisk photonic molecule," Appl. Phys. Lett.,

vol.87, no.18, pp.181102 (2005).

- [113] D. Mori and T. Baba, "Wideband and low dispersion slow light by chirped photonic crystal coupled waveguide," Opt. Express, vol.13, no.23, pp.9398-9408 (2005).
- [114] T. Matsumoto, S. Fujita and T. Baba, "Wavelength demultiplexer consisting of photonic crystal superprism and superlens," Opt. Express, vol.13, no.26, pp.10768 – 10776 (2005).
- [115] T. Ide, J. Hashimoto, K. Nozaki, E. Mizuta and T. Baba, "InP etching by HI/Xe inductively coupled plasma for photonic-crystal device fabrication," Jpn. J. Appl. Phys., vol.45 (2006, in press).
- [116] S. Ishii, A. Nakagawa and T. Baba, "Modal characteristics and bistability in twin microdisk photonic molecule laser," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol.12 (2006, in press).

(2) 解説記事・書籍等

- [1] 野田進, "半導体フォトニック結晶と期待される応用," オプトロニクス, no.226, pp.112-120 (2000).
- [2] 野田進, "フォトニック結晶," 光学, vol.30, no.1, pp.56-64 (2001).
- [3] 野田進, "フォトニック結晶と欠陥エンジニアリング," 物理学会誌, pp.46-49 (2001).
- [4] 野田進, "解説：半導体3次元フォトニック結晶," 日本結晶成長学会誌, vol.28, no.1, pp.3-12 (2001).
- [5] 野田進, "新しい光ナノ材料・デバイス: フォトニック結晶 — 究極の光の制御を目指して —," KEC情報誌, no.178 (2001).
- [6] 野田進, "総論：フォトニック結晶とその狙い," オプトロニクス：特集「注目のフォトニック結晶」, vol.20, no.235 (2001).
- [7] 今田昌宏, 野田進, "半導体フォトニック結晶とその応用," 表面科学：特集「フォトニック結晶」, vol.22, no.11, pp.715-722 (2001).
- [8] 野田進, "CLEO/QELS 2001「フォトニック結晶」報告," レーザ学会誌「レーザ研究」, vol.29, no.547, pp.548 (2001).
- [9] 野田進, "フォトニック結晶と欠陥エンジニアリング," 日本物理学会誌, vol.57, pp.46-49 (2002).
- [10] 山本 宗継, 野田 進, "ウエハ融着を用いた3次元フォトニック結晶," レーザー学会誌「レーザー研究」, vol.30, no.2, pp.59-64 (2002).
- [11] 横山光, 今田昌宏, 野田進, "二次元フォトニック結晶面発光レーザー," MATERIAL STAGE：技術特集「半導体通信レーザーの新展開」 (2002).
- [12] 野田進, "究極の光制御材料：フォトニック結晶," 固体物理, vol.37, no.5 (2002).
- [13] 野田進, "新しい光ナノ材料：フォトニック結晶," 光技術コンタクト(日本オプトメカトロニクス協会), vol.40, no.9, pp.28-35 (2002).
- [14] 野田進, "フォトニック結晶," 電子情報通信学会誌：特集「ナノテクノロジーの光とエレクトロニクスへの応用」, vol.85, no.11, pp.839-846 (2002).
- [15] 野田進, 浅野卓, 山本宗継, "フォトニック結晶による光子制御," 応用物理学会誌, vol.71, no.11, pp.1357-1361 (2002).
- [16] 横山光, 野田進, "二次元フォトニック結晶レーザー," 月刊化学工業(化学工業社刊), pp.37-44 (2002).
- [17] 野田進, "フォトニック結晶," 化学同人 (2002).

- [18] S. Noda, "Semiconductor-based photonic crystals," International Union of Material Research Society (IUMRS) Magazine: Facets, vol.2, no.1, pp.12-15 (2003).
- [19] 野田進, 今田昌宏, 小川新平, 岡野誠, 吉本晋, "3次元フォトニック結晶と光制御," OplusE : 特集「フォトニック結晶」, pp.169-174 (2003).
- [20] 横山光, 野田進, "二次元フォトニック結晶面発光レーザー," 日本赤外線学会誌 : 特集「ナノテクノロジー・材料と赤外線」, vol.12, no.2, pp.17-23 (2003).
- [21] 野田進, "フォトニック結晶デバイスの最近の進展," オプトロニクス : 特集「光とナノテクノロジー」, vol.22, no.8, pp.100-105 (2003).
- [22] 野田進, "巻頭言「周期構造の美しさ」," 光学, vol.32, no.8, pp.467-467 (2003).
- [23] 浅野卓, 野田進, "フォトニック結晶," 工業材料 : 特集「高速・大容量化に対応する光学材料」, vol.51, no.8, pp.51-55 (2003).
- [24] 野田進, "新しい光ナノ構造ーフォトニック結晶ー," 電子情報通信学会誌 : 特別小特集「ブレークスルーそして独創的な技術は生まれた」, vol.87, no.1, pp.26-32 (2004).
- [25] 野田進, "フォトニック結晶," ニューガラス, vol.19, no.1, pp.51-59 (2004).
- [26] 野田進, "次世代の光デバイス目指すー大きさ従来の1/1,000~1/10,000以下にー," JST基礎研究最前線, vol.5, pp.8-9 (2004).
- [27] 野田進, "3.4.2フォトニック結晶," 光産業の将来ビジョンーボーダレス化の中での進化と展開ー(光産業技術振興協会), pp.207-209 (2004).
- [28] 野田進, "フォトニック結晶で光を自在にコントロールーナノ構造でフォトニックバンドギャップを実現ー," Japan Nanonet Bulletin, no.1, pp.11-12 (2005).
- [29] 野田進, "2次元・3次元フォトニック結晶の現状と将来展望," 応用物理学会誌, vol.74, no.2, pp.147-159 (2005).
- [30] 野田進, "6.2項"フォトニック結晶," 21世紀の情報技術産業を支える有機エレクトロニクス材料 (有機エレクトロニクス材料研究会 編、ぶんしん出版), pp.185-194 (2001).
- [31] 野田進, "II-1 総説ー2次元フォトニック結晶を例としてー" および "II-2. 半導体完全3次元フォトニック結晶の作製と応用," CMC「フォトニック結晶の基礎と光デバイスへの応用」 (2001).
- [32] 野田進, "2.5節、"フォトニック結晶," 光産業技術振興協会編光産業技術動向調査 (2001).
- [33] 野田進, "3章3節「フォトニック結晶」," マイクロマシン(江刺正喜監修、(株)産業技術サービスセンターISBN:4-915957-38-1), pp.127-130 (2002).
- [34] 野田進, "第8章 総論ーバンドギャップとバンド端の性質と応用ー," フォトニック結晶技術とその応用(監修／川上彰二郎, CMC出版, ISBN4-88231-337-5) (2002).
- [35] 野田進, "第9章 半導体完全3次元フォトニック結晶の作製と応用," フォトニック結晶技術とその応用(監修／川上彰二郎, CMC出版, ISBN4-88231-337-5) (2002).
- [36] 野田進, 馬場俊彦, 納富雅也, 小野雄一編, 「フォトニック結晶研究の現状と将来展望 -テクノロジーロードマップを目指して-(改訂版)」, (財団法人光産業技術振興協会) (2002).
- [37] 野田進, "フォトニック結晶とその狙い," 光通信技術の最新資料集6(オプトロニクス社 ; ISBN4-900474-92-4), pp.69-75 (2002).
- [38] 野田進, "II部1章「フォトニック結晶とその応用」," ナノマテリアル最前線 : 現実になった究極のもののづくり(平尾一之 編、化学同人刊、ISBN 4-7598-0737-3), pp.18-30 (2002).
- [39] 野田進, 横山光, "フォトニック結晶を使った半導体レーザー," 図解ナノテク活用技術のすべて(川合 知二【監修】工業調査会刊ISBN:4-7693-7108-X) (2002).

- [40] 野田進, “半導体フォトニック結晶と期待される応用,” 光通信技術の最新資料集5(オプトロニクス社 ; ISBN 4-900474-89-4), pp.196-204 (2002).
- [41] 野田進, “2編6章3節「フォトニック結晶」,” 「21世紀版薄膜作製応用ハンドブック」(権田俊一監修、エヌ・ティー・エス、ISBN4-86043-019-0) (2003).
- [42] 野田進, “第2章第2節「フォトニック結晶の開発状況ー超小型光集積デバイスを目指してー」,” 「新しいフォトニクス時代の材料とデバイス」増補改訂版(株式会社ティー・アイ・シー) (2003).
- [43] 野田進, “第5章第1節「光で光を制御するデバイス半導体光制御デバイス」,” 「新しいフォトニクス時代の材料とデバイス」増補改訂版(株式会社ティー・アイ・シー) (2003).
- [44] 野田進, “10章3節「フォトニック結晶とその応用」,” 超高速光エレクトロニクス技術ハンドブック(監修 小林 孝嘉, サイパック社ISBN:4898080421) (2003).
- [45] 野田進, “新しいナノ構造：フォトニック結晶,” 「大学と科学」公開シンポジウム講演収録集：光でナノテク・ナノサイエンス(クバプロ出版, ISBN:4-87805-0340-9), pp.96-101 (2003).
- [46] 野田進, “2-1-2節「半導体フォトニック結晶」,” ナノテクノロジー基礎シリーズ ナノエレクトロニクス(オーム社編、ISBN 4-274-19719-0) (2004).
- [47] S. Noda, M. Imada, A. Chutinan, and N. Yamamoto, “Semiconductor photonic crystals,” Photonic Crystals and Light Localization in the 21st Century (Edited by C. M. Soukoulis) NATO Science Series C: Mathematical and Physical Sciences Vol.563 Kluwer Academic Publishers ISBN 0-7923-6948-3, pp.93-105 (2001).
- [48] S. Noda and T. Baba, edited, “Roadmap on Photonic Crystals”(Kluwer Academic Publisher ISBN:1-4020-7464-6) (2003).
- [49] S. Noda, “Three-dimensional photonic bandgap crystals by wafer-bonding approach,” Book on “Direct wafer bonding: Application and Technology” edited by Prof. Goessel, Springer Verlag ISBN 3-540-21049-0 (2004).
- [50] K. Inoue, K. Ohtaka, S. Noda, “Chap. 10 Interaction between light and matter in photonic crystals, Chap. 14 Perspective (S. Noda and K. Ohtaka 299-302),” Book on “Photonic Crystals: Physics, Fabrication and Applications” (Eds. K. Inoue and K. Ohtaka), Springer Verlag ISBN:3-540-20559-4 (2004).
- [51] S. Noda, T. Kawashima, S. Kawakami, “Chap.7 Three-dimensional photonic bandgap crystals,” Book on “Photonic Crystals: Physics, Fabrication and Applications” (Eds. K. Inoue and K. Ohtaka), Springer Verlag ISBN:3-540-20559-4, pp.151-174 (2004).
- [52] 馬場俊彦, “フォトニック結晶材料と応用技術,” 電子情報通信学会誌, vol.84, no.3, pp.172-176 (2001).
- [53] 馬場俊彦, 深谷尚志, 坂井篤, “マイクロガイド,” O Plus E, vol.22, no.10, pp.1300-1306 (2000).
- [54] 馬場俊彦, “極限微小光素子の研究,” 真空ジャーナル, no.75, pp.34-35 (2001).
- [55] 馬場俊彦, “フォトニック結晶発光素子の現状,” オプトロニクス, vol.20, no.7, pp.192-196 (2001).
- [56] 馬場俊彦, 井下京治, 市川弘之, “プラズマプロセスによる半導体フォトニック結晶加工と表面処理,” 表面科学, vol.22, no.11, pp.710-714 (2001).
- [57] 馬場俊彦, “フォトニック結晶 --- 新しい光技術,” 超精密, vol.11, pp.47-51 (2001).
- [58] T. Krauss and T. Baba, “Introduction to the feature section on photonic crystal structures and applications,” IEEE J. Quantum Electron., vol.38, no.7, p.724 (2002).
- [59] 馬場俊彦, “総説：フォトニック結晶形半導体発光素子の概要,” “フォトニック結晶点欠陥レーザ,” フォトニック結晶の基礎と光デバイスへの応用(川上彰二郎編), pp.185-205

(2002).

- [60] 馬場俊彦, “フォトニック結晶発光素子,” 光通信技術の最新資料集6 - ブロードバンド時代の通信インフラを目指して--, オプトロニクス, pp.81-85 (2002).
- [61] 馬場俊彦, “「フォトニック結晶の最新トレンド」解説小特集によせて,” レーザー研究, vol.30, no.2, p.58 (2002).
- [62] 馬場俊彦, “フォトニック結晶の現状と将来,” 日経先端技術, no.6, pp.12-15 (2002).
- [63] 馬場俊彦, “オプトエレクトロニクス・光デバイス,” 光学, vol.31, no.5, pp.237-238 (2002).
- [64] 馬場俊彦, “フォトニック結晶のインパクト,” 光技術コンタクト, vol.40, no.8, pp.463-472 (2002).
- [65] 馬場俊彦, “第63回応用物理学会学術講演会(2002年) 量子エレクトロニクス,” 応用物理, vol.72, no.1, pp.88-89 (2003).
- [66] 馬場俊彦, “フォトニック結晶,” 応用物理学会応用電子物性分科会誌, vol.9, no.3, pp.156-157 (2003).
- [67] 馬場俊彦, “フォトニック結晶 --- その原理と応用,” 日本学術振興会学術月報, vol.56, no.9, pp.915-919 (2003).
- [68] T. Baba, “Photonic crystal and high index contrast structure devices,” IEEE/LEOS News Letter, vol.18, no.3, pp.11-12 (2004) (Invited Paper)
- [69] T. Baba, “Applications of photonic crystals: general devices,” Photonic Crystals: Physics and Applications (Eds. K. Inoue and K. Ohtaka), Springer Verlag, pp.237-260 (2004).
- [70] 馬場俊彦, 中川敦生, 石井理, “マイクロディスクによるフォトニック分子レーザ --- 新しい光機能素子への期待---,” 電子情報通信学会誌, vol.88, no.2, pp.105-109 (2004).
- [71] 馬場俊彦, “フォトニック結晶光機能素子の優位性,” 応用物理, vol.23, no.2, pp.167-172 (2005).
- [72] T. Baba, “Photonic crystals,” Encyclopedic Handbook of Integrated Optics (Eds. K. Iga and Y. Kokubun), Marcel Dekker (2005).
- [73] 馬場俊彦, “その他の半導体レーザ,” レーザーハンドブック, オーム社 (2005).
- [74] 馬場俊彦, “フォトニック結晶,” 光科学研究の最前線, 日本学術会議 (2005).
- [75] 馬場俊彦, “フォトニック結晶,” 電子物性・材料の事典, 朝倉書店 (2005).
- [76] 馬場俊彦, “VCSELとLEDの特性改善,” “概説,” “フォトニック結晶導波路とシリコン細線,” “フォトニック結晶微小レーザ,” フォトニック結晶技術の新展開 ---産業化への動向--- (川上彰二郎編集), シーエムシー出版 (2005).
- [77] 馬場俊彦, “フォトニック結晶,” 現代化学, no.408, pp.55-59 (2005).

5.2 口頭発表

(国際学会発表及び主要な国内学会発表)

- ①国際学会224件、内招待講演115件
- ②国内学会479件、内招待講演138件

(1) 国際学会

- [1] S. Noda, “Semiconductor based photonic crystals,” 3rd International Symposium on Advanced Science and Technology of Silicon Materials, Kona, Hawaii, USA, Nov. 2000. (Invited)

- [2] S. Noda, "Photonic crystal fabrication by a wafer bonding approach," 2001 Materials Research Society Spring Meeting, San Francisco, USA, Apr. 2001. (Invited)
- [3] S. Noda, "Semiconductor photonic crystals," 5th RIKEN International Conference: Coherent Control in Matter, Hayama, Japan, Apr. 2001. (Invited)
- [4] S. Noda, "Semiconductor 2D and 3D photonic crystals," OSA Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS'01), Baltimore, USA, May 2001. (Invited)
- [5] S. Noda, "III-V semiconductor photonic crystals," 2001 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Nara, Japan, May 2001. (Invited)
- [6] S. Noda, "Functional 2D and 3D photonic crystal structures," Euro-conference on Electromagnetic Crystal Structures, St. Andrews, UK, Jun. 2001. (Invited)
- [7] T. Tanaka, M. Imada, A. Chutinan, M. Mochizuki, and S. Noda, "Optical properties of a single defect in a 2D photonic crystal slab for possible application to ultrasmall channel drop filters," OSA Top. Meet. Integrated Photon. Research, Monterey, USA, Jun. 2001.
- [8] S. Noda, "3D and 2D semiconductor photonic crystals," 4th QNANO Workshop, Stockholm, Sweden, Jun. 2001. (Invited)
- [9] S. Noda, "Present status and future prospect of semiconductor photonic crystals," The 8th International Workshop on Femtosecond Technology (FST'01), Tsukuba, Japan, Jun. 2001. (Invited)
- [10] M. Okano, A. Chutinan, and S. Noda, "Analysis of single-defect cavities in 3D photonic crystal," The 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/PR2001), Makuhari, Japan, Jul. 2001.
- [11] M. Yokoyama, M. Imada, A. Chutinan, and S. Noda, "Fabrication of surface-emitting laser with two-dimensional square-lattice photonic crystal," The 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/PR2001), Makuhari, Japan, Jul. 2001.
- [12] S. Noda, "Semiconductor 3D and 2D photonic bandgap structure," The 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/PR2001), Makuhari, Japan, Jul. 2001. (Invited)
- [13] M. Imada, A. Chutinan, M. Mochizuki, T. Tanaka, and S. Noda, "Theoretical analysis of trapping and emission of photons by a single defect in a 2D photonic crystal slab," The 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/PR2001), Makuhari, Japan, Jul. 2001.
- [14] S. Noda, "Photonic crystals and devices," Asia-Pacific Radio Science Conf., Tokyo, Japan, Aug. 2001. (Invited)
- [15] S. Noda, "Photonic bandgap crystals and devices," Alaska Meeting on Fundamental Optical Processes in Semiconductors (AMFOPS'01), Alaska, USA, Aug. 2001. (Invited)
- [16] S. Noda, "Semiconductor photonic crystals and devices," 27th European Conference on Optical Communication (ECOC'01), Amsterdam, Netherlands, Sep. 2001. (Invited)
- [17] S. Noda, "Semiconductor photonic crystals," Seminar van der Waals-Zeeman Colloquium, Amsterdam, Netherlands, Oct. 2001. (Invited)
- [18] N. Yamamoto, S. Ogawa, M. Imada, and S. Noda, "Photonic crystal preparation by a wafer bonding approach," Optoelectronics and Microelectronics 2001, Nanjin, China, Nov. 2001. (Invited)
- [19] M. Imada and S. Noda, "Semiconductor photonic crystals for lasers and functional devices," The 14th annual meeting of the IEEE Lasers & Electro-Optics Society (LEOS2001), San Diego, USA, Nov. 2001. (Invited)
- [20] S. Noda, "Functional photonic crystal devices: -Photonic crystal laser and channel drop defect filter-, " Fall Meet. Mat. Res. Sys, Boston, USA, Nov. 2001. (Invited)
- [21] S. Noda and M. Imada, "Semiconductor photonic crystals and functional devices," SPIE Photonics WEST, San Jose, California, USA, Jan. 2002. (Invited)

- [22] M. Yokoyama, M. Imada, and S. Noda, "Two dimensional photonic crystal lasers," SPIE Photonics WEST, San Jose, California, USA, Jan. 2002. (Invited)
- [23] T. Asano, S. Noda, K. Kiyota, Y. Tanaka, Y. Akahane, B.S. Song, M. Mochizuki, and M. Imada, "Channel-add operation of a device using defects in a two-dimensional photonic crystal slab," 2002 MRS Spring Meeting, San Francisco, USA, Apr. 2002.
- [24] S. Noda and M. Imada, "Semiconductor photonic crystals," 201st meeting of the Electrochemical Society, Philadelphia, USA, May 2002. (Invited)
- [25] S. Noda, T. Asano, and M. Imada, "Semiconductor photonic crystals and devices," 14th International Symposium on InP and Related Materials (IPRM 2002), Stockholm City Conference Center, Stockholm, Sweden, May 2002. (Invited)
- [26] S. Noda, "Photonic crystal: Novel nanostructures for light," JSPS Science in Japan Forum -Nanoscale Science and Technology, the Cosmos Club, Washington DC, USA, Jun. 2002. (Invited)
- [27] K. Kiyota, T. Asano, Y. Akahane, and S. Noda, "Investigation on donor-type defects in two-dimensional photonic crystal slabs for the possible application to optical add/drop filters," The 9th International Workshop on Femtosecond Technology, Tukuba, Japan, Jun. 2002.
- [28] S. Noda, "Present status and future prospect of photonic crystals," 7th Optoelectronics Communication Conference (OECC 2002), Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, Jul. 2002. (Invited)
- [29] S. Noda, "Semiconductor photonic crystal and devices -Part I-," The 3rd International Wilhelm and Else Heraeus Summer School entitled 'Photonic Crystals: Optical materials for the 21st century', Wittenberg, Germany, Jul. 2002. (Invited)
- [30] S. Noda, "Semiconductor photonic crystal and devices -Part II-," The 3rd International Wilhelm and Else Heraeus Summer School entitled 'Photonic Crystals: Optical materials for the 21st century', Wittenberg, Germany, Jul. 2002. (Invited)
- [31] S. Noda and M. Imada, "Optical functional devices based on photonic crystals: laser and add-drop devices," SPIE Itcom, Boston, USA, Jul. 2002. (Invited)
- [32] M. Yokoyama and S. Noda, "Two Dimensional Photonic Crystal Lasers," Photonic Crystal Down Under, Canberra, Australia, Aug. 2002. (Invited)
- [33] T. Asano and S. Noda, "Surface-emitting type channel add/drop filtering devices based on 2D photonic crystal slab," Workshop and European Optical Society topical meeting on Two Dimensional Photonic Crystals, Centro Stefano Franscini, Ascona, Switzerland, Aug. 2002. (Invited)
- [34] M. Imada and S. Noda, "Recent progress of semiconductor photonic crystals," The Second IEEE Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO2002), Washington DC, USA, Aug. 2002. (Invited)
- [35] E. Miyai, M. Okano, M. Mochizuki, and S. Noda, "Analysis on coupling between 2D photonic crystal waveguide and external waveguide," International Conference on Solid State Devices and Materials, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan, Sep. 2002.
- [36] S. Noda and T. Asano, "Photonic crystals and their applications," International Conference on Solid State Devices and Materials, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan, Sep. 2002. (Invited)
- [37] A. Chutinan and S. Noda, "Recent progress of semiconductor photonic crystals," Asia-Pacific Optical and Wireless Communications (APOC2002), Shanghai, China, Oct. 2002. (Invited)
- [38] S. Noda, "2D and 3D semiconductor photonic crystals and devices," International Workshop on Photonics and Electromagnetic Crystal Structure (PECS-IV), Los Angeles, USA, Oct. 2002. (Invited)
- [39] S. Noda, "Photonic crystals and their applications," Symposium on Nanophotonics Technology, Convention Center, Osaka University, Nov. 2002. (Invited)
- [40] S. Noda, "Photonic crystal lasers and related functional devices," The 15th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS2002), Glasgow, UK, Nov. 2002. (Invited)

- [41] S. Noda, "Recent progress in photonic crystals," 5th Sweden-Japan QNANO Workshop, Yokohama, Japan, Dec. 2002. (Invited)
- [42] S. Noda, T. Asano, and M. Imada, "Photonic Crystals -from Fundamentals to Applications-," Nano-Tech 2003+Future, Makuhari, Japan, Feb. 2003. (Invited)
- [43] S. Noda, "Semiconductor photonic crystals," International Symposium Nanotechnology for Photonics and Opto-Electronics, Tokyo, Japan, Mar. 2003. (Invited)
- [44] S. Noda, "Semiconductor photonic crystals," 2003 Material Research Society Spring Meeting, Marriott Hotel, San Francisco, USA, Apr. 2003. (Invited)
- [45] S. Noda, "Photonic crystals and applications," 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka International Convention Center, Osaka, Japan, May 2003. (Invited)
- [46] T. Asano, S. Noda, B. S. Song, and Y. Akahane, "Characterization of channel add/drop functions using donor/acceptor point defects in two dimensional photonic crystal slabs," 2003 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) / Quantum Electronics & Laser Science Conference (QELS), Baltimore Convention Center, Baltimore, USA, Jun. 2003.
- [47] B. S. Song, S. Noda, and T. Asano, "Ultrasmall channel add/drop devices based on in-plane proportional hetero photonic crystals," 2003 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) / Quantum Electronics & Laser Science Conference (QELS), Baltimore Convention Center, Baltimore, USA, Jun. 2003.
- [48] S. Noda, "Design and fabrication of 2D and 3D photonic crystals," CLEO/EUROPE EQEC 2003, International Conference Centre, Munich, Germany, Jun. 2003. (Invited)
- [49] T. Asano, K. Kiyota, D. Kumamoto, B. S. Song, and S. Noda, "Ultrashort pulse propagation in two-dimensional photonic crystal slab waveguides," The 10th International Workshop on Femtosecond Technology, Makuhari Messe, Chiba, Japan, Jul. 2003.
- [50] S. Noda, T. Asano, and M. Imada, "Novel nanostructures for light: Photonic crystals," The Third IEEE Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO2003), Moscone Convention Center, San Francisco, USA, Aug. 2003. (Invited)
- [51] S. Noda, "Semiconductor photonic crystals and devices for communication," 29th European Conference on Optical Communication/14th International Conference on Integrated Optics and Optical Fibre Communication (ECOC-IOOC), Venue Plan, Rimini, Italy, Sep. 2003. (Invited)
- [52] S. Noda, "Photonic crystal technology on photonic network," 16th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-16), Nara, Japan, Oct. 2003. (Invited)
- [53] S. Noda, "Photonic nanostructures and devices based on photonic crystals," The 2nd KAIST International Symposium on Frontier Issues in NBI Technologies, KAIST, Daejeon, Korea, Oct. 2003. (Invited) (Plenary talk)
- [54] S. Noda, "Various engineerings in photonic crystals for manipulation of photons," 9th Microoptics Conference, Tokyo International Exchange Center, Tokyo, Japan, Oct. 2003. (Invited)
- [55] S. Noda, "Photonic nanostructure and devices based on photonic crystals," Annual Meeting of IEEE/LEOS Tokyo Chapter, Tokyo International Exchange Center, Tokyo, Japan, Nov. 2003. (Invited)
- [56] S. Noda, "Photonic crystal slabs and their applications to active functional devices," International Symposium on Quantum Dots and Photonic Crystals 2003 (QDPC2003), University of Tokyo, Tokyo, Japan, Nov. 2003. (Invited)
- [57] S. Noda, "Photonic crystal devices," IEEE/LEOS Benelux Chapter Annual Symposium 2003, University of Twente, Enschede, the Netherlands, Nov. 2003. (Invited)
- [58] S. Noda, "Photonic crystals -Recent progress-," 6th Annual Symposium on Japanese-American Frontiers of Science, Shonan Village, Kanagawa, Japan, Dec. 2003. (Invited)
- [59] S. Noda, "Manipulation of photons by artificial defects in photonic crystals," CLEO/PR 2003, Taipei, Taiwan, Dec. 2003. (Invited)

- [60] D. Ohnishi, K. Sakai, and S. Noda, "Continuous wave operation of surface emitting two-dimensional photonic crystal laser," The 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, The Grand Hotel, Taipei, Taiwan, Dec. 2003.
- [61] S. Noda, "Photonic crystal lasers and related devices," Pre-Conference of IEEE International Semiconductor Laser Conference 04, Dec. 2003. (Invited)
- [62] Y. Tanaka, T. Asano, Y. Akahane, B. S. Song, and S. Noda, "Theoretical investigation of a vertically asymmetric photonic crystal slab," The 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, The Grand Hotel, Taipei, Taiwan, Dec. 2003.
- [63] Y. Tanaka, T. Asano, R. Hatsuta, and S. Noda, "TE-TM mode coupling in a waveguide formed in two-dimensional photonic crystal slab with vertically asymmetric configuration," International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V, Kyoto International Conference Hall, Kyoto, Japan, Mar. 2004.
- [64] M. Okano, S. Kako, and S. Noda, "Design of coupling between a point-defect cavity and a line-defect waveguide in 3D photonic crystal," International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V, Kyoto International Conference Hall, Kyoto, Japan, Mar. 2004.
- [65] S. Takayama, H. Kitagawa, T. Asano, and S. Noda, "Experimental demonstration of complete photonic bandgap in two dimensional photonic crystal slab," International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V, Kyoto International Conference Hall, Kyoto, Japan, Mar. 2004.
- [66] M. Imada, L.H. Lee, M. Okano, S. Kawashima, and S. Noda, "Light-propagation control by 3D photonic crystal-Fabrication of line-defect waveguide at near-infrared wavelength-," International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V, Kyoto International Conference Hall, Kyoto, Japan, Mar. 2004.
- [67] S. Ogawa, M. Imada, S. Yoshimoto, S. Kako, T. Furukawa, M. Okano, and S. Noda, "Light-emission control by 3D photonic crystal at near-infrared wavelengths," International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V, Kyoto International Conference Hall, Kyoto, Japan, Mar. 2004.
- [68] Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, and S. Noda, "Demonstration of ultrahigh-Q photonic nanocavity based on Gaussian-like optical confinement," International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V, Kyoto International Conference Hall, Kyoto, Japan, Mar. 2004.
- [69] S. Noda, B. S. Song, Y. Akahane, and T. Asano, "In-plane hetero photonic crystals," International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V, Kyoto International Conference Hall, Kyoto, Japan, Mar. 2004.
- [70] B. S. Song, T. Asano, Y. Akahane, and S. Noda, "Photon tunneling through an ultra-thin barrier in in-plane hetero photonic crystals," International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V, Kyoto International Conference Hall, Kyoto, Japan, Mar. 2004.
- [71] H. Kitagawa, T. Asano, and S. Noda, "Design of two-dimensional photonic crystal slab with complete bandgap," International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V, Kyoto International Conference Hall, Kyoto, Japan, Mar. 2004.
- [72] T. Asano, W. Kunishi, K. Kiyota, B. S. Song, and S. Noda, "Dynamic properties of artificial defects in two-dimensional photonic crystal slab," International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V, Kyoto International Conference Hall, Kyoto, Japan, Mar. 2004.
- [73] H. Takano, Y. Akahane, T. Asano, and S. Noda, "In-plane type channel drop filter in a two-dimensional photonic crystal slab," International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V, Kyoto International Conference Hall, Kyoto, Japan, Mar. 2004.
- [74] D. Ohnishi, T. Okano, E. Miyai, K. Sakai, M. Imada, and S. Noda, "Room temperature continuous wave operation of surface-emitting photonic crystal laser," International Symposium on Photonic

and Electromagnetic Crystal Structures V, Kyoto International Conference Hall, Kyoto, Japan, Mar. 2004.

- [75] K. Sakai, D. Ohnishi, T. Okano, T. Sakaguchi, and S. Noda, "Lasing band edge identification of surface-emitting photonic crystal laser," International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V, Kyoto International Conference Hall, Kyoto, Japan, Mar. 2004.
- [76] E. Miyai, M. Yokoyama, and S. Noda, "Polarization mode control of surface-emitting photonic crystal laser with triangular unit-cell structure," International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V, Kyoto International Conference Hall, Kyoto, Japan, Mar. 2004.
- [77] W. Kunishi, M. Nakamura, T. Asano, B. S. Song, and S. Noda, "Tuning of drop wavelength in channel filtering device based on 2D photonic crystal slab," International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V, Kyoto International Conference Hall, Kyoto, Japan, Mar. 2004.
- [78] H. Takano, B. S. Song, T. Asano, and S. Noda, "Highly efficient in-plane type filtering device in two-dimensional photonic crystal slabs," 2004 Conference of lasers and electro optics (CLEO) / International quantum electronics conference (IQEC), Moscone Center West, San Francisco, USA, May 2004.
- [79] S. Ogawa, M. Imada, S. Yoshimoto, S. Kako, T. Furukawa, M. Okano, and S. Noda, "Control of light emission by 3D photonic crystal," 2004 Conference of lasers and electro optics (CLEO) / International quantum electronics conference (IQEC), Moscone Center West, San Francisco, USA, May 2004.
- [80] Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, and S. Noda, "Fine-tuned high-Q photonic crystal nanocavity based on a gentle confinement of light," 2004 Conference of lasers and electro optics (CLEO) / International quantum electronics conference (IQEC), Moscone Center West, San Francisco, USA, May 2004. (Invited)
- [81] S. Noda, "Photonic nanostructure and devices based on photonic crystals," Annual Meeting of IEEE/LEOS Denver Chapter, The National Center for Atmospheric Research, Boulder, USA, May 2004. (Invited)
- [82] S. Noda, "Photonic nanostructure and devices based on photonic crystals," Annual Meeting of IEEE/LEOS Norfolk Chapter, Old Dominion University, Norfolk, USA, May 2004. (Invited)
- [83] S. Noda, "Photonic nanostructure and devices based on photonic crystals," Annual Meeting of IEEE/LEOS Ottawa Chapter, Montreal Road Campus of the National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, May 2004. (Invited)
- [84] S. Noda, "Photonic crystal and its application to lasers and PICs," 16th International Symposium on InP and Related Materials (IPRM'04), Kagoshima, Japan, May 2004. (Invited)
- [85] S. Noda, "Recent progress and future prospects of photonic crystals," International Commission of Optics (ICO 2004), Chiba, Japan, Jun. 2004. (Invited)
- [86] S. Noda, "Photonic nanostructures and devices based on photonic crystals," 2004 ICO International Conference Optics & Photonics in Technology Frontier, Makuhari Messe, Chiba, Japan, Jul. 2004. (Invited)
- [87] T. Asano and S. Noda, "High-Q photonic nanocavity," SPIE's 49th Annual Meeting, Colorado Convention Center, Denver, USA, Aug. 2004. (Invited)
- [88] S. Noda, "Photonic nanostructures and devices based on photonic crystals," The 8th International Conference on Near-field Nano Optics & Related Techniques, Lotte Hotel, Seoul, Korea, Sep. 2004. (Invited)
- [89] S. Noda, "Photonic crystal semiconductor lasers," 19th IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2004), Kunibiki Messe, Matsue-shi, Japan, Sep. 2004. (Invited)
- [90] H. Kitagawa, T. Asano, and S. Noda, "Design of two-dimensional photonic crystal slab with complete bandgap for infrared spectroscopy," Federation of Analytical Chemistry and

Spectroscopy Societies, Oregon Convention Center, Portland, USA, Oct. 2004.

- [91] S. Noda, "Photonic nanostructures and devices based on photonic crystals," International Workshop on Photonic Crystals, Taipei, Taiwan, Oct. 2004. (Invited)
- [92] S. Noda, "Photonic nanostructures and devices based on photonic crystals," 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS 2004), The Westin Rio Mar Beach, Puerto Rico, USA, Nov. 2004. (Invited)
- [93] D. Ohnishi, M. Imada, and S. Noda, "Room temperature CW operation of a surface-emitting two-dimensional photonic crystal laser," 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS 2004), The Westin Rio Mar Beach, Puerto Rico, USA, Nov. 2004. (Invited)
- [94] S. Noda, "Photonic Nanostructures and Devices Based on Photonic Crystals," 2004 Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices (COMMAD 2004), The University of Queensland, Brisbane, Australia, Dec. 2004. (Invited)
- [95] T. Kimoto, Y. Kawakami, J. Suda, M. Imada, S. Noda, and M. Araki, "Advanced photonic and electronic devices based on nano-scale approaches," Japan Nano 2005, Tokyo Big Sight, Tokyo, Japan, Feb. 2005.
- [96] S. Noda, "Photonic Crystals and Nanocavities," International Symposium on Quantum Dots and Photonic Crystals 2005 (ISQDPC2005), Toranomon Pastoral, Tokyo, Japan, Mar. 2005. (Invited)
- [97] B. S. Song, S. Noda, T. Asano and Y. Akahane, "On the modest modal volume increase in a photonic double-heterostructure nanocavity," International Symposium on Quantum Dots and Photonic Crystals 2005 (ISQDPC2005), Toranomon Pastoral, Tokyo, Japan, Mar. 2005.
- [98] R. Fenollosa, Y. Tanaka, T. Asano, B. S. Song, S. Noda, T. Nakanishi, K. Sugiyama, and M. Kitano, "Theoretical analyses on spontaneous decay time modification of atoms in gas phase near photonic crystal nano-cavities," International Symposium on Quantum Dots and Photonic Crystals 2005 (ISQDPC2005), Toranomon Pastoral, Tokyo, Japan, Mar. 2005.
- [99] S. Noda, "Photonic Crystals and Nanocavities," 2005 Sweden-Japan workshop on quantum nano-physics and electronics, Campus Plaza Kyoto, Kyoto, Japan, Apr. 2005. (Invited)
- [100] S. Noda, "Photonic Crystals: Novel Nano-structures for Light," IEEE Montréal - IEEE Laser & Electro-Optics Society Joint event with: Microwave Theory and Techniques, Antennas and Propagation chapters, Centre PolyGRAMES, Montreal, Canada, Apr. 2005. (Invited)
- [101] S. Noda, "Photonic Nanostructures and Devices based on Photonic Crystals," Nanophotonics for Information Systems, Hilton San Diego Resort, San Diego, California, USA, Apr. 2005. (Invited)
- [102] E. Miyai, D. Ohnishi, K. Sakai, T. Okano, and S. Noda, "Phase-shift effect on a two-dimensional surface-emitting photonic-crystal laser," Conference on Lasers and Electro-Optics, Quantum Electronics & Laser Science Conference (CLEO/QELS2005), Baltimore Convention Center, Baltimore, USA, May 2005.
- [103] B. S. Song, T. Asano, Y. Akahane, and S. Noda, "Ultrahigh-Q Nanocavity based on Photonic-Crystal Double Heterostructure," Conference on Lasers and Electro-optics (CLEO)/Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS) 2005, Baltimore Convention Center, Baltimore, USA, May 2005.
- [104] S. Noda, "Photonic nanostructure and devices based on photonic crystals," IEEE LEOS Distinguished Lecturer, St. Andrews University, UK, Jun. 2005. (Invited)
- [105] S. Noda, "Photonic-crystal based functional devices," CLEO Europe/EQEC, International Congress Centre, Munich, Germany, Jun. 2005. (Invited)
- [106] H. Kitagawa, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda, "Effect of 2D photonic crystal slab with C_{3v} symmetry on introduction of asymmetry for the vertical direction," International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (PECS-VI), Aghia Pelaghia, Crete, Greece, Jun. 2005.
- [107] S. Noda, B. S. Song, Y. Akahane, H. Takano, M. Fujita, S. Takahashi, Y. Tanaka, and T. Asano,

- “Recent progresses in 2D photonic crystal slabs -Ultra-high-Q cavities, nano-devices, and spontaneous emission control-,” International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (PECS-VI), Aghia Pelaghia, Crete, Greece, Jun. 2005. (Invited)
- [108] S. Takahashi, M. Okano, M. Imada, and S. Noda, “New Fabrication Method of Woodpile 3D Photonic Crystals,” International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures VI, Aghia Pelaghia, Crete, Greece, Jun. 2005.
 - [109] S. Noda, “Photonic nanostructure and devices based on photonic crystals,” IEEE LEOS Distinguished Lecturer, Ecole Nationale Supérieure des Telecommunications, UK, Jun. 2005. (Invited)
 - [110] S. Noda, “Ultra-high-Q photonic nanocavities,” The fourteenth annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'05), Keihanna Plaza, Kyoto, Japan, Jul. 2005. (Invited)
 - [111] T. Asano and S. Noda, “Ultra-high-Q photonic nanocavities,” Photonic Crystals: Fundamentals to Devices Workshop and International Workshop on OWTNM, Star City Hotel, Sydney, Australia, Jul. 2005. (Invited)
 - [112] Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda, “Trapping of Ultrashort Optical Pulse into Ultra-high-Q Photonic Nanocavity,” International Conference on Quantum Electronics 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005, Toshi Center Kaikan, Tokyo, Japan, Jul. 2005.
 - [113] K. Sakai, E. Miyai and S. Noda, “Coupled-Wave Model for Square-Lattice 2D Photonic Crystal Distributed-Feedback Laser with TE-like Mode,” International Conference on Quantum Electronics 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005 (IQEC/CLEO-PR 2005), Toshi Center Kaikan, Tokyo, Japan, Jul. 2005.
 - [114] M. Fujita, S. Takahashi, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda, “Spontaneous emission control by defect-free 2D photonic crystal slabs,” The 18th Annual Meeting of IEEE Lasers & Electro-Optics Society (LEOS2005), Hilton Sydney, Sydney, Australia, Oct. 2005.
 - [115] Y. Tanaka, S. Takayama, T. Asano, and S. Noda, “Polarization mode converter based on 2D photonic crystal slab,” The 18th Annual Meeting of IEEE Lasers & Electro-Optics Society (LEOS2005), Hilton Sydney, Sydney, Australia, Oct. 2005.
 - [116] Y. Watanabe, N. Yamamoto, and K. Komori, “Simulation of the propagation loss of three-dimensional photonic crystal waveguide,” The 10th International Workshop on Femtosecond Technology, Makuhari, Chiba, Japan, 17 June (2003).
 - [117] Y. Watanabe, N. Yamamoto, and K. Komori, “Numerical analysis of waveguide in three-dimensional photonic crystal,” International Conference on Solid State Devices and Materials, Keio Plaza Inter Continental, Tokyo, Japan, 17 Sep. (2003)
 - [118] Y. Watanabe, N. Yamamoto, and K. Komori: “Propagation loss of waveguide in three-dimensional photonic crystal with finite thickness,” International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V, Kyoto, Japan, March 7-11 (2004).
 - [119] N. Yamamoto, Y. Watanabe, and K. Komori: “A design of the photonic crystal directional coupler with a high extinction ratio and a short complete coupling length” International Conference on Solid State Devices and Materials, Tower Hall Funabori, Tokyo, Japan, Sept. 14-17 (2004).
 - [120] Y. Watanabe, N. Yamamoto, and K. Komori: “Analysis of air waveguides in three-dimensional photonic crystal” International Conference on Solid State Devices and Materials, Tower Hall Funabori, Tokyo, Japan, Sept. 14-17 (2004).
 - [121] N. Yamamoto and K. Komori, “Novel Fabrication Method for Semiconductor 3D Photonic Crystal,” International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (PECS-VI), Aghia Pelaghia, Crete, Greece, Jun. 2005.
 - [122] N. Yamamoto, T. Ogawa and K. Komori, “Directional Coupler Switch -Small Coupling Length, High Extinction Ratio, Small Switching Length and Wide Bandwidth-,” International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (PECS-VI), Aghia Pelaghia, Crete, Greece, Jun. 2005.

- [123] N. Yamamoto, T. Ogawa and K. Komori, "Photonic Crystal Directional Coupler Switch," International Conference on Quantum Electronics 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005 (IQEC/CLEO-PR 2005), Toshi Center Kaikan, Tokyo, Japan, Jul. 2005.
- [124] T. Ogawa, N. Yamamoto, Y. Watanabe, K. Komori, M. Ito, and T. Tanidagai, "The design method of a photonic crystal directional coupler switch with short switching length and wide bandwidth," SPIE's Symposium on Integrated Optoelectronic Devices, Jan. 2005.
- [125] M. Fujita, R. Ushigome and T. Baba, "Large spontaneous emission factor confirmed in cw lasing microdisk injection laser," IEEE/LEOS Annual Meeting, Puerto Rico, 2000.
- [126] T. Baba, "Photonic microstructures --- microdisk lasers and photonic waveguides," IEEE/LEOS Annual Meeting, Puerto Rico, no.WK-1, 2000 (Invited Paper).
- [127] H. Ichikawa, K. Inoshita and T. Baba, "Reduced surface recombination and strongly enhanced light extraction in CH₄-plasma-irradiated GaInAsP photonic crystals," IEEE/LEOS Annual Meeting, Puerto Rico, no.WK-3, 2000.
- [128] A. Sakai, G. Hara and T. Baba, "Sharply bent optical waveguides on silicon-on-insulator substrate," SPIE Photonic West "Physics and Simulation of Optoelectronic Devices," San Jose, no.4283-75, 2001.
- [129] T. Baba, "Recent development of microdisk lasers and waveguides," Int. Topical Meet. Indium Phosphide and Related Mat., Nara, no.Tu-B-2, 2001 (Invited Paper).
- [130] T. Baba, "Light propagation characteristics of microguides in photonic crystal slabs," Int. Workshop on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, St. Andrews, no.II-6, 2001 (Invited Paper).
- [131] T. Baba, N. Fukaya and A. Motegi, "Light propagation characteristics in photonic crystal waveguides," Conf. on Laser and Electro-Optics Pacific Rim, Makuhari, no.TuA4-5, 2001 (Invited Paper).
- [132] T. Baba, D. Ohsaki, T. Iwai and M. Nakamura, "Transmission-type photonic crystal devices with efficient input/output interfaces," Conf. on Laser and Electro-Optics Pacific Rim, no.TuA3-5, 2001.
- [133] A. Sakai, G. Hara and T. Baba, "Large effective index and sharp bends in SOI optical waveguides," Conf. on Laser and Electro-Optics Pacific Rim, no.MA1-2, 2001.
- [134] M. Fujita and T. Baba, "Stable single whispering gallery mode microgear cavity," Conf. on Laser and Electro-Optics Pacific Rim, no.MA1-4, 2001.
- [135] M. Fujita, K. Teshima and T. Baba, "Low threshold cw lasing in photo-pumped GaInAsP microdisk lasers," Conf. on Laser and Electro-Optics Pacific Rim, no.MA1-5, 2001.
- [136] H. Ichikawa, K. Inoshita, T. Baba and Y. Aizawa, "SIMS analysis of CH₄-plasma-irradiated GaInAsP surface for reduction in surface recombination of micro light emitters," Conf. on Laser and Electro-Optics Pacific Rim, no.P12-61, 2001.
- [137] T. Baba, "Photonic crystals and microlasers," Asia-Pacific Radio Science Conf., Tokyo, no.D1-1-1, 2001 (Invited Paper).
- [138] T. Baba, "Photonic lasers and waveguides," Korean Photon. Conf., Taejeon, 2001 (Invited Paper).
- [139] T. Baba, A. Sakai and A. Motegi, "Photonic waveguides on SOI substrate," Fall Meet. Mat. Res. Sys, Boston, no.K6-2, 2001 (Invited Paper).
- [140] T. Baba, "Photonic micro/nanostructures for PBG and index confinements," Int. Sympo. Contemporary Photon. Technol., Tokyo, no.K-3, 2002 (Invited Paper).
- [141] T. Baba and H. Ichikawa, "Photonic crystal light extractor in light emitting devices," Optoelectronic and Commun. Conf., Yokohama, no.9C2-1, 2002 (Invited Paper).
- [142] T. Baba and T. Iwai, "Enhancement of third order nonlinearity calculated for 2-D photonic crystal," Integrated Photon. Res. Conf., Vancouver, no.IthF3, 2002.

- [143] A. Sakai, T. Fukazawa and T. Baba, "Micro-branch in silicon photonic wire waveguides," Integrated Photon. Res. Conf., Vancouver, no.IthI12, 2002.
- [144] M. Fujita, R. Ushigome and T. Baba, "Effective carrier confinement in microdisk lasers by strain relaxation in quantum wells," Integrated Photon. Res. Conf., Vancouver, no.IthI15, 2002.
- [145] A. Sakai, T. Fukazawa and T. Baba, "Polarization conversion at micro-bend in Si photonic wire waveguide," Integrated Photon. Res. Conf., Vancouver, no.IFB4, 2002.
- [146] H. Ichikawa and T. Baba, "High efficiency light emitting diode with 2-D surface grating photonic crystal," Integrated Photon. Res. Conf., Vancouver, no.IFF3, 2002.
- [147] R. Ushigome, M. Fujita, A. Sakai and T. Baba, "GaInAsP microdisk injection laser with Benzocyclobutene polymer cladding and its athermal effect," Integrated Photon. Res. Conf., Vancouver, no.IFF4, 2002.
- [148] M. Fujita and T. Baba, "Microgear laser --- a fusion of whispering gallery mode cavity and photonic crystal," Integrated Photon. Res. Conf., Vancouver, no.IFF5, 2002.
- [149] T. Baba, "Light transmission in photonic bandgap waveguides and photonic band crystals," SPIE "Active and Passive Optical Components for WDM Communication II," Boston, no.4870-43, 2002 (Invited Paper).
- [150] T. Matsumoto and T. Baba, "Resolution of photonic crystal superprism filter," Int. Workshop on Photon. and Electromagnetic Crystal Structures, Los Angeles, no.K-4, 2002.
- [151] K. Inoshita, T. Izumi and T. Baba, "Fabrication of airhole-type GaInAsP/InP photonic crystal by ICP etching," Int. Microprocess and Nanotechnology Conf., Tokyo, no.7P-7-24, 2002.
- [152] T. Baba, "Photonic crystals and microlasers," IEEE/LEOS Annual Meet., Glasgow, no.WS-1, 2002 (Invited Paper).
- [153] T. Baba, K. Inoshita, D. Sano, A. Nakagawa and K. Nozaki, "Microlasers based on photonic crystal concept," SPIE "Photonic Crystal Materials and Devices," San Jose, no.5000-05, 2003 (Invited Paper).
- [154] T. Baba, "Progress in microdisk and related lasers," Int. Sympo. Nanotechnology for Photonics and Opto-Electronics, Tokyo, no.12, 2003 (Invited Paper).
- [155] T. Baba, "Photonic crystals and micro-/nano-lasers," JSPS-Sweden Colloquium, Stockholm, no.2-2, 2003 (Invited Paper).
- [156] T. Baba, K. Inoshita, T. Matsumoto, H. Ichikawa and T. Iwai, "Device applications of semiconductor photonic crystal," Int. Sympo. Femto-Second Technol., Makuhari, no.TD-3, 2003 (Invited Paper).
- [157] T. Baba, K. Inoshita, T. Matsumoto, D. Mori, H. Ichikawa and T. Iwai, "Semiconductor photonic crystal and nanostructure devices," IEEE/LEOS Opt. MEMS, Hawaii, no.WA-1, 2003 (Invited Paper).
- [158] T. Baba, "Semiconductor photonic crystal devices," Int. Conf. Solid State Devices and Mat., Tokyo, no.F-7, 2003 (Invited Paper).
- [159] T. Baba, "Light propagation and localization in photonic crystals," Progress in Electromagnetic Res. Sympo., Hawaii, no.2003-10-14-2-10, 2003 (Invited Paper).
- [160] T. Baba, "Photonic crystals and high index contrast devices," IEEE/LEOS Annual Meet., Arizona, no.S102, 2003 (Short Course Lecture).
- [161] T. Baba, K. Inoshita and Y. Kuroki, "Photonic crystal nanolasers utilizing cutoff condition of line defect," Int. Sympo. Quantum Dots and Photonic Crystals, 2003.
- [162] T. Baba, E. Mizuta, M. Shiga and K. Inoshita, "Control of light propagation in line defect waveguide by photopumping," Int. Sympo. Quantum Dots and Photonic Crystals, 2003.
- [163] T. Baba, "Ultra-small light emitting devices," Fall Meet. Material Res. Soc., Boston, no.W6.4, 2003 (Invited Paper).

- [164] T. Baba, "Photonic crystals, an introduction," Japanese-American Frontiers of Science, Shonan, no.7-1, 2003 (Invited Paper).
- [165] T. Matsumoto and T. Baba, "Photonic crystal k-vector superprism," Pacific Rim Conf. Laser and Electro-Optics, Taipei, no.TU4C-(16)-6, 2003.
- [166] D. Sano and T. Baba, "Purcell effect in microdisk laser at room temperature," Pacific Rim Conf. Laser and Electro-Optics, Taipei, no.W1C-(16)-2, 2003.
- [167] K. Inoshita and T. Baba, "Lasing characteristics and mode control of photonic crystal lasers with point and line composite defect," Pacific Rim Conf. Laser and Electro-Optics, Taipei, no.W2C-(16)-4, 2003.
- [168] K. Nozaki, A. Nakagawa, D. Sano and T. Baba, "Ultralow threshold microgear lasers and their fusion with quasiperiodic photonic crystals," Pacific Rim Conf. Laser and Electro-Optics, Taipei, no.W2C-(16)-5, 2003.
- [169] A. Nakagawa and T. Baba, "Photonic molecule by coupled microdisk lasers," Pacific Rim Conf. Laser and Electro-Optics, Taipei, no.W2C-(16)-6, 2003.
- [170] T. Fukazawa, T. Hirano and T. Baba, "Ultrasmall filters and low loss intersection by Si photonic wire waveguides," Pacific Rim Conf. Laser and Electro-Optics, Taipei, no.TH2C-(16)-5, 2003.
- [171] T. Baba, A. Nakagawa, D. Sano, K. Nozaki and S. Ishii, "Recent progress on microdisk lasers," Int. Semicon. Laser Conf. 2004 Pre-Conf., Kobe, no.OPE2003-222, 2003 (Invited Paper).
- [172] T. Baba and T. Matsumoto, "Light propagation in photonic crystal superprisms," SPIE "Photonic Crystal Materials and Devices", San Jose, no.5360-57, 2004 (Invited Paper).
- [173] T. Fukazawa, F. Ohno and T. Baba, "Si photonic wire components and micro-filters on SOI substrate," SPIE "Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XII", San Jose, no.5349-14, 2004.
- [174] T. Baba, "Photonic crystal applications to optoelectronic devices," Int. Sympo. Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, Kyoto, no.Mo-A6, 2004 (Invited paper).
- [175] D. Mori and T. Baba, "Proposal and light propagation of chirped photonic crystal waveguide," Int. Sympo. Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, Kyoto, no.Tu-E7, 2004.
- [176] A. Nakagawa, S. Ishii and T. Baba, "Photonic molecule laser composed of GaInAsP microdisks," Int. Sympo. Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, Kyoto, no.We-J6, 2004.
- [177] K. Nozaki and T. Baba, "Quasiperiodic photonic crystal microlaser with defect," Int. Sympo. Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, Kyoto, no.Th-K2, 2004.
- [178] E. Mizuta and T. Baba, "Proposal of multilayer structure photonic crystal waveguide," Int. Sympo. Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, Kyoto, no.Th-P9, 2004.
- [179] T. Matsumoto, M. Echizen and T. Baba, "Preliminary demonstration of photonic crystal k-vector superprism," Int. Sympo. Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, Kyoto, no.Th-P13, 2004.
- [180] K. Nozaki and T. Baba, "Carrier and photon analysis of photonic microcavities by 2D rate equations," Int. Sympo. Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, Kyoto, no.Th-P45, 2004.
- [181] D. Sano and T. Baba, "Spontaneous emission dynamics in photonic crystal microcavity," Int. Sympo. Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, Kyoto, no.Th-P46, 2004.
- [182] K. Inoshita, Y. Kuroki and T. Baba, "Threshold characteristics of photonic crystal microlasers with various defects," Int. Sympo. Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, Kyoto, no.Th-P48, 2004.
- [183] M. Shiga K. Inoshita, and T. Baba, "Tuning of photonic crystal cavity by carrier plasma effect," Int. Sympo. Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, Kyoto, no.Th-L6, 2004.
- [184] K. Nozaki and T. Baba, "Quasiperiodic photonic crystal laser with defect," Conf. Laser and

Electro-Optics, San Francisco, no.CWP5, 2004.

- [185] D. Mori and T. Baba, "Chirped photonic crystal waveguides," Conf. Laser and Electro-Optics, San Francisco, no.CWA52, 2004.
- [186] T. Ide, T. Baba, J. Tatebayashi, T. Iwamoto, T. Nakaoka and Y. Arakawa, "InAs quantum dot microdisk laser at room temperature," Conf. Laser and Electro-Optics, San Francisco, no.CThB3, 2004.
- [187] A. Furukawa, S. Sasaki, M. Hoshi, A. Matsuzono, K. Moritoh and T. Baba, "High-power single-mode VCSELs with triangular holey structure," Conf. Laser and Electro-Optics, San Francisco, no.CPDB1, 2004.
- [188] T. Baba, D. Sano, K. Nozaki, K. Inoshita, Y. Kuroki and F. Koyama, "Observation of Purcell effect in photonic crystal nanocavity at room temperature," Conf. Laser and Electro-Optics, San Francisco, no.CPDB3, 2004.
- [189] T. Baba, "Photonic crystals and related photonic nanodevices," IEEE Int. Top. Meet. Indium Phosphide and Related Mat., Kagoshima, no.TuA-3-1, 2004 (Invited Paper).
- [190] T. Baba, "Si photonic wire waveguides," Optoelectronic and Commun. Conf. Workshop on Micro/Nano Waveguides and Resonators for VLSI Photonics, Yokohama, no.D-3, 2004 (Invited Paper).
- [191] T. Baba, D. Sano, K. Nozaki, K. Inoshita, Y. Kuroki and F. Koyama, "Purcell effect in photonic crystal nanocavity," Optoelectronic and Commun. Conf., Yokohama, no.14E3-2, 2004 (Invited Paper).
- [192] T. Baba, "Recent progress on semiconductor photonic crystal devices," Conf. Emerging Technol. Opt. Sci., Ireland, no.Th3-1, 2004 (Invited Paper).
- [193] T. Baba, "Silicon photonic wire waveguides," SPIE "Nano-Engineering: Fabrication, Properties, Optics, and Devices", Denver, no.5515-24, 2004 (Invited Paper).
- [194] T. Baba, "Active and passive photonic crystal functional devices," European Conf. Opt. Commun., Stockholm, no.We-1.1.2, 2004 (Invited Paper).
- [195] S. Ishii, A. Nakagawa and T. Baba, "Bistable lasing in twin microdisk photonic molecules," IEEE Int. Semicon. Laser Conf., Matsue, no.FB6, 2004.
- [196] T. Baba, "Novel optoelectronic devices based on photonic crystals," Int. Workshop on Photonic Crystals, Taipei, 2004 (Invited Paper).
- [197] T. Baba, "Photonic crystals and high index contrast structures," IEEE/LEOS Annual Meet., Puerto Rico, no.SC102, 2004 (Short Course Lecture).
- [198] T. Baba, K. Nozaki and D. Mori, "Photonic crystal devices with quasi-periodicity," IEEE/LEOS Annual Meet., Puerto Rico, no.MO2, 2004 (Invited Paper).
- [199] A. Sakai, I. Kato, D. Mori and T. Baba, "Anomalous low group velocity and low dispersion in simple photonic crystal line defect waveguides," IEEE/LEOS Annual Meet., Puerto Rico, no.ThQ5, 2004.
- [200] T. Baba, "Photonic crystals and high index contrast structures," Photonics Forum of IEICE Distinguished Lecturer, Taipei, 2004 (Invited Paper).
- [201] T. Baba, T. Ide and S. Ishii, "Microdisk lasers --- quantum-dot lasing and bistability," SPIE Photonic West "Novel In-Plane Semiconductor Lasers IV", San Jose, no.5738-35, 2005 (Invited Paper).
- [202] K. Nozaki and T. Baba, "Carrier and photon analyses of photonic crystal microlasers," SPIE Photonic West "Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XIII", San Jose, no.5722-17, 2005.
- [203] A. Furukawa and S. Sasaki, M. Hoshi, A. Matsuzono, K. Moritoh and T. Baba, "High-power single-transverse-mode holey VCSELs," SPIE Photonic West "Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XIII", no.5722-23, San Jose, 2005 (Invited Paper).

- [204] K. Moritoh, D. Mori, E. Mizuta and T. Baba, "Full 3D FDTD analysis of modal characteristics in VCSELs with holey structure," SPIE Photonic West "Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XIII", San Jose, no.5722-24, 2005.
- [205] T. Baba, "Photonic crystal based VCSEL and SOA," Int. Sympo. Quantum-Dot and Photonic Crystals, no.E-3, 2005.
- [206] T. Ide, T. Baba, J. Tatebayashi, T. Iwamoto, T. Nakaoka and Y. Arakawa, "Fabrication of InAs quantum-dot microdisk injection laser," Int. Sympo. Quantum-Dot and Photonic Crystals, no.P-45, 2005.
- [207] T. Baba, "Fast spontaneous emission and slow light propagation in photonic crystals," Quantum Electron. and Laser Sci. Conf., Baltimore, no.QWD-1, 2005 (Invited Paper).
- [208] T. Baba, "Slow light engineering by chirped photonic crystal waveguides," Int. Sympo. Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, Crete, no.F-1, 2005 (Invited Paper).
- [209] T. Baba, "Photonic crystal devices," Int. Conf. Mat. Advanced Technol., Singapore, no.J-2-IN5, 2005 (Invited Paper).
- [210] T. Ide, J. Hashimoto, K. Nozaki and T. Baba, "Point shift photonic crystal nanolasers with smallest modal volumes," Pacific Rim Conf. Laser and Electro-Optics, Tokyo, no.CTuE2-3, 2005.
- [211] T. Matsumoto, S. Fujita and T. Baba, "Wavelength demultiplexer composed of photonic crystal superprism and superlens," Pacific Rim Conf. Laser and Electro-Optics, Tokyo, no.CTuE3-2, 2005.
- [212] N. Inoue and T. Baba, "Anomalous polarization rotation in photonic crystal slab with liquid crystal," Pacific Rim Conf. Laser and Electro-Optics, Tokyo, no.CWE4-6, 2005.
- [213] K. Nozaki, Y. Kuroki and T. Baba, "Lasing characteristics of single defect nanocavity in 12-fold symmetric quasiperiodic photonic crystal," Pacific Rim Conf. Laser and Electro-Optics, Tokyo, no.CTuE2-5, 2005.
- [214] D. Mori, Y. Kawakami and T. Baba, "Light propagation characteristics of photonic crystal directional coupler for optical buffer memory," Pacific Rim Conf. Laser and Electro-Optics, Tokyo, no.CWE4-4, 2005.
- [215] K. Morito and T. Baba, "Estimation of light extraction efficiency in various surface grating photonic crystal LEDs," Pacific Rim Conf. Laser and Electro-Optics, Tokyo, no.CThE2-3, 2005.
- [216] E. Mizuta, T. Ide, J. Hashimoto, K. Nozaki, T. Baba, T. Kise, K. Kiyota, and N. Yokouchi, "Characterization of photonic crystal waveguide for SOA operation," Pacific Rim Conf. Laser and Electro-Optics, Tokyo, no.CThE1-4, 2005.
- [217] S. Ishii and T. Baba, "Bistability and mode switching in microdisk photonic molecules," Pacific Rim Conf. Laser and Electro-Optics, Tokyo, no.CTuE4-2, 2005.
- [218] K. Sasaki, A. Motegi, F. Ohno and T. Baba, "Si photonic wire AWG of $70 \times 60 \mu\text{m}^2$ size," Pacific Rim Conf. Laser and Electro-Optics, Tokyo, no.CWE1-1, 2005.
- [219] T. Baba, "Photonic nanostructure optoelectronic devices," Int. Mini-Conf. "System Construction of Global-Network-Oriented information Electronics," Sendai, 2005.
- [220] T. Baba, "Photonic crystals and high index contrast structure devices," IEEE/LEOS Annual Meet., Sydney, no.SC102, 2005 (Short Course Lecture).
- [221] K. Nozaki, W-H. Zheng and T. Baba, "Modal characteristics of point shift photonic crystal nanolaser," IEEE/LEOS Annual Meet., Sydney, no.TuJ4, 2005.
- [222] K. Kiyota, T. Kise, N. Yokouchi, T. Ide and T. Baba, "Demonstration of various low group velocity effects in photonic crystal line defect waveguides by laser oscillation," IEEE/LEOS Annual Meet., Sydney, no.TuR3, 2005.
- [223] T. Baba, T. Ide, S. Ishii, J. Tatebayashi, T. Iwamoto, T. Nakaoka and Y. Arakawa, "Quantum-dot lasing and photonic molecule behavior in microdisk lasers," IEEE/LEOS Annual Meet., Sydney, no.ThZ1, 2005 (Invited Paper).

[224] T. Baba, "Photonic crystals," Micro-Optic Conf., Tokyo, 2005 (Tutorial Talk).

(2) 国内学会

- [1] 野田進, "フォトニッククリスタル技術の研究開発動向," 電子情報通信学会ソサエティ大会パネルディスカッション「光スイッチング・システム用フォトニック・サブシステム／デバイスの動向」, 北見工業大学, 2000.10.(招待講演)
- [2] 野田進, "フォトニック結晶の現状と将来展望," 日本光学会オプティクスジャパン, 名古屋工業大学, 2000年10月(招待講演).
- [3] 野田進, "究極の光制御材料: フォトニック結晶," 第38回茅コンファレンス「光科学の新しい展開とその応用」, 裏磐梯ロイヤルホテル, 福島県耶麻郡, 2000年11月5-8日(招待講演).
- [4] 野田進, "超精密3次元プロセス技術とフォトニック結晶," 超精密第42回研究会, 大阪, 2000年11月(招待講演).
- [5] 野田進, "半導体光エレクトロニクスの最近の動向," 電子情報通信学会東海支部講演会, 大阪, 2000年11月(招待講演).
- [6] 野田進, "フォトニック結晶レーザー," 第78回微小光学研究会「21世紀をひらくレーザー技術」, 大阪大学コンベンションセンター, 吹田市, 2000年12月1日(招待講演).
- [7] 野田進, "フォトニック結晶レーザ," 第78回微小光学研究会, りんどう湖, 2000年12月(招待講演).
- [8] 野田進, "フォトニッククリスタルの現状と展望," 第38回有機デバイス研究会, 2000年(招待講演).
- [9] 野田進, "フォトニック結晶の現状と将来展望," 日本光学会サマースクール, 2000年(招待講演).
- [10] 野田進, "半導体2次元、3次元フォトニック結晶," 第26回結晶成長討論会, 2000年(招待講演).
- [11] 野田進, 今田昌宏, チュティナン・アロンカーン, 望月理光, 田中智子, "半導体2次元フォトニック結晶を用いた光機能デバイス," 文科省科研費補助金特定領域研究(B)「フォトニック結晶の開発と輻射場の制御」第5回公開シンポジウム, 主婦会館プラザエフ, 2001年1月31日-2月1日.
- [12] 野田進, 今田昌宏, 岡野誠, 小川新平, 山本宗継, "光波長域にバンドギャップをもつ半導体3次元フォトニクス結晶の開発," 文科省科研費補助金特定領域研究(B)「フォトニック結晶の開発と輻射場の制御」第5回公開シンポジウム, 主婦会館プラザエフ, 2001年1月31日-2月1日.
- [13] 野田進, "フォトニック結晶," JST異分野交流フォーラム, 2001年1月(招待講演).
- [14] 野田進, 今田昌宏, "フォトニック結晶の最近の進展," レーザ学会年次大会, 東京, 2001年1月(招待講演).
- [15] 野田進, "2次元vs3次元結晶 -それぞれの狙いは/どこまで来たか-, " 2001年第48回応用物理学関係連合講演会シンポジウム, 28p-A-3, 明治大学駿河台キャンパス, 東京都千代田区, 2001年3月28-31日(招待講演).
- [16] 横山光, 今田昌宏, 野田進, "2次元正方格子フォトニック結晶面発光レーザの作製," 2001年第48回応用物理学関係連合講演会, 29a-ZH-10, 明治大学駿河台キャンパス, 東京都千代田区, 2001年3月28-31日.

- [17] チュティナン・アロンカーン, 岡野誠, 野田進, “2次元フォトニック結晶スラブにおける導波路の解析(II),” 2001年第48回応用物理学関係連合講演会, 30a-YK-9, 明治大学駿河台キャンパス, 東京都千代田区, 2001年3月28-31日.
- [18] 田中智子, 今田昌宏, 平井裕磨, 望月理光, チュティナン・アロンカーン, 野田進, “2次元フォトニック結晶の単一欠陥を用いた面出力型波長分波器の光学特性,” 2001年第48回応用物理学関係連合講演会, 30a-YK-10, 明治大学駿河台キャンパス, 東京都千代田区, 2001年3月28-31日.
- [19] 岡野誠, チュティナン・アロンカーン, 野田進, “3次元フォトニック結晶における単一欠陥微小光共振器の解析(II),” 2001年第48回応用物理学関係連合講演会, 30p-YK-4, 明治大学駿河台キャンパス, 東京都千代田区, 2001年3月28-31日.
- [20] 秋元克弥, 横山光, 今田昌宏, 野田進, “InGaP/InGaPウェハ融着条件の検討ー2次元フォトニック結晶レーザの短波長化に向けてー,” 2001年第48回応用物理学関係連合講演会, 31a-ZX-9, 明治大学駿河台キャンパス, 東京都千代田区, 2001年3月28-31日.
- [21] 今田昌宏, 野田進, “半導体3次元, 2次元フォトニック結晶,” 第2回超高速光エレクトロニクス研究会, 東京大学先端科学技術研究センター, 2001年4月16日(招待講演).
- [22] 今田昌宏, 野田進, “フォトニッククリスタル技術の最近の動向,” 第2回集積光デバイス技術研究会, 京大会館, 2001年4月20日(招待講演).
- [23] 野田進, “半導体フォトニック結晶,” 日本学術振興会薄膜第131委員会第205回研究会, アジュール竹芝, 2001年4月26日(招待講演).
- [24] 野田進, “フォトニック結晶の最新動向,” 光産業技術マンスリーセミナー, 光産業技術振興協会, 2001年6月19日(招待講演).
- [25] M. Okano, A. Chutinan, and S. Noda, “Design of single-defect cavities in 3D photonic crystal,” 20th Electronic Materials Symposium, Nara, 2001年6月20-22日.
- [26] 野田進, “フォトニック結晶と光集積回路の構築,” 第3回分子ダイナミック分光ワークショップ, ホテルコンコルド浜松, 静岡, 2001年7月5-6日(招待講演).
- [27] 野田進, “フォトニック結晶,” 有機エレクトロニクス材料研究会(JOEM) Workshop '01 「21世紀の情報技術産業を支える有機エレクトロニクス材料」, 上牧温泉辰巳館, 群馬県利根郡, 2001年7月5-7日(招待講演).
- [28] 野田進, “新しいナノ光材料: フォトニック結晶,” 日刊工業新聞-京大共同企画産学協同セミナー「京大工学部の挑戦」, 大阪産業創造館, 大阪, 2001年7月13日(招待講演).
- [29] 望月理光, 田中智子, 岡野誠, 野田進, “2次元フォトニック結晶スラブにおける単一欠陥を用いた面出力型波長分波器の理論解析(III)ー欠陥エンジニアリングによる偏光および波長長の制御ー,” 2001年秋季第62回応用物理学会学術講演会, 13p-ZK-9, 愛知工業大学, 愛知県豊田市, 2001年9月11-14日.
- [30] 望月理光, 岡野誠, 野田進, “2次元フォトニック結晶スラブにおける単一欠陥を用いた面出力型波長分波器の理論解析(IV)ー欠陥エンジニアリングによる上下出力割合の制御ー,” 2001年秋季第62回応用物理学会学術講演会, 13p-ZK-10, 愛知工業大学, 愛知県豊田市, 2001年9月11-14日.
- [31] 浅野卓, 田中智子, 望月理光, 今田昌宏, 清田和明, 田中良典, 赤羽良啓, 宋奉植, 野田進, “2次元フォトニック結晶スラブの単一欠陥を用いた面入力型波長分波器,” 2001年秋季第62回応用物理学会学術講演会, 13p-ZK-12, 愛知工業大学, 愛知県豊田市, 2001年9月11-14日.
- [32] 浅野卓, 野田進, “フォトニック結晶の欠陥における光波干渉を利用したデバイス,” 2001年秋季第62回応用物理学会学術講演会, 13p-ZK-13, 愛知工業大学, 愛知県豊田市, 2001年9月

11-14日.

- [33] 横山光, 今田昌宏, 野田進, “2次元フォトニック結晶面発光レーザの偏光制御(I),” 2001年秋季第62回応用物理学会学術講演会, 14a-ZK-5, 愛知工業大学, 愛知県豊田市, 2001年9月11-14日.
- [34] 横山光, 今田昌宏, 野田進, “2次元フォトニック結晶面発光レーザの偏光制御(II),” 2001年秋季第62回応用物理学会学術講演会, 14a-ZK-6, 愛知工業大学, 愛知県豊田市, 2001年9月11-14日.
- [35] 小川新平, 今田昌宏, 清田和明, 岡野誠, 野田進, “3次元フォトニック結晶への発光体の導入(I)ー超薄膜発光層の導入と光学特性ー,” 2001年秋季第62回応用物理学会学術講演会, 14p-ZK-2, 愛知工業大学, 愛知県豊田市, 2001年9月11-14日.
- [36] 今田昌宏, 小川新平, 野田進, “3次元フォトニック結晶への発光体の導入(II)ーストライプ型発光層の導入ー,” 2001年秋季第62回応用物理学会学術講演会, 14p-ZK-3, 愛知工業大学, 愛知県豊田市, 2001年9月11-14日.
- [37] 山本宗継, 野田 進, “3次元フォトニック結晶導波路 ー積層誤差と伝播特性ー,” 2001年秋季第62回応用物理学会学術講演会, 14p-ZK-7, 愛知工業大学, 愛知県豊田市, 2001年9月11-14日.
- [38] 横山光, 今田昌宏, 野田進, “偏光制御された2次元正方格子フォトニック結晶面発光レーザの作製,” 2001年秋季第62回応用物理学会学術講演会, 14a-ZK-7, 愛知工業大学, 愛知県豊田市, 2001年9月11-14日.
- [39] 野田進, “2次元フォトニック結晶レーザ,” 日本物理学会, 19pTB-9, 徳島文理大学, 徳島, 2001年9月17-20日(招待講演).
- [40] 横山光, 野田進, “フォトニック結晶レーザ,” (財)光産業技術振興協会 第2回 光材料・応用技術研究会, 東京, 2001年9月21日(招待講演).
- [41] M. Imada, S. Noda, and M. Mochizuki, “Surface-emitting-type channel-drop-filter using single defects in two-dimensional photonic crystal slab,” The Second CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2001年10月25日.
- [42] M. Yokoyama, S. Noda, and M. Imada, “Two-dimensional photonic crystal lasers -Polarization mode control-,” The Second CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2001年10月25日.
- [43] S. Noda, “Ultimate control of light by photonic bandgap crystals and its application to novel functional devices,” The Second CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2001年10月25日.
- [44] S. Noda, M. Imada, M. Okano, and S. Ogawa, “Ultimate control of light by three-dimensional photonic bandgap crystals -Introduction of light emitter into 3D crystal-,” The Second CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2001年10月25日.
- [45] N. Yamamoto and S. Noda, “Waveguide in three-dimensional photonic bandgap crystals - Effect of structural fluctuation-,” The Second CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2001年10月25日.
- [46] 野田進, “新しいナノ光材料: フォトニック結晶,” 日刊工業新聞-京大共同企画産学協同セミナー「京大工学部の挑戦」, パレスホテル, 東京, 2001年10月26日(招待講演).
- [47] 野田進, “フォトニック結晶およびそのデバイス応用: 一次世代超高速・大容量通信に向け

た新しい光ナノ材料ー,” 神奈川科学アカデミー教育講座, 川崎市, 2001年11月21日(招待講演).

- [48] 横山光, 野田進, “半導体フォトリック結晶レーザ,” 応用物理学会関西支部ナノフォトリックセミナー, 大阪, 2001年12月6日(招待講演).
- [49] 今田昌宏, 野田進, 望月理光, “2次元フォトリック結晶スラブを用いた光子の捕獲とデバイス応用,” 戦略的基礎研究推進事業 研究料域「電子・光子等の機能制御」関連プロジェクト合同シンポジウム「光子機能制御研究のフロンティア」, 名古屋大学ベンチャービジネスラボラトリー, 名古屋市, 2001年12月7-8日.
- [50] 横山光, 今田昌宏, 野田進, “2次元フォトリック結晶レーザ,” 戦略的基礎研究推進事業 研究料域「電子・光子等の機能制御」関連プロジェクト合同シンポジウム「光子機能制御研究のフロンティア」, 名古屋大学ベンチャービジネスラボラトリー, 名古屋市, 2001年12月7-8日.
- [51] 野田進, 今田昌宏, 岡野誠, 小川新平, 山本宗継, “3次元フォトリック結晶と光制御,” 戦略的基礎研究推進事業 研究料域「電子・光子等の機能制御」関連プロジェクト合同シンポジウム「光子機能制御研究のフロンティア」, 名古屋大学ベンチャービジネスラボラトリー, 名古屋市, 2001年12月7-8日.
- [52] 野田進, “新しい光ナノ材料: フォトリック結晶とその応用ー究極の光制御を目指してー,” 第二回ファイバーオプティクスEXPO専門技術セミナー「次世代ネットワークを担うキーテクノロジー」, 東京ビッグサイト, 2002年1月16-18日(招待講演).
- [53] 野田進, “新しい光ナノ材料: フォトリック結晶とその応用ー究極の光制御を目指してー,” 第29回ニューセラミックスセミナー, 新大阪シティプラザ, 2002年2月27-28日(招待講演).
- [54] 野田進, “新しい光ナノ材料: フォトリック結晶,” 第60回ニューガラスセミナー「次世代光通信用デバイスの課題とナノテクノロジーへの期待」, (社)ニューガラスフォーラム, 東京都港区, 2002年3月8日(招待講演).
- [55] 野田進, “応用可能性の広がるフォトリッククリスタル,” 理学・工学連携によるシナジー効果を求めてー技術革新をもたらす特異物性ー(NEDO技術革新研究所企画), こまばエミナース, 東京都目黒区, 2002年3月11-12日(招待講演).
- [56] 大西大, 野田進, “2次元フォトリック結晶レーザの低しきい値発振,” 2002年春季第49回応用物理学関係連合講演会, 28p-ZF-12, 東海大学湘南校舎, 神奈川県平塚市, 2002年3月27-30日.
- [57] 横山光, 平野兼史, 松本卓也, 今田昌宏, 野田進, “2次元フォトリック結晶面発光レーザの偏光制御(IV),” 2002年春季第49回応用物理学関係連合講演会, 28p-ZF-11, 東海大学湘南校舎, 神奈川県平塚市, 2002年3月27-30日.
- [58] 岡野誠, 加古伸一, 野田進, “3次元フォトリック結晶における点欠陥共振器と線欠陥導波路の結合,” 2002年春季第49回応用物理学関係連合講演会, 28p-ZF-3, 東海大学湘南校舎, 神奈川県平塚市, 2002年3月27-30日.
- [59] 今田昌宏, 小川新平, 吉本晋, 李来和, 岡野誠, 鴻池一暁, 野田進, “3次元フォトリック結晶による自然放出制御ー点欠陥をもつ発光体の導入とPL特性ー,” 2002年春季第49回応用物理学関係連合講演会, 28p-ZF-2, 東海大学湘南校舎, 神奈川県平塚市, 2002年3月27-30日.
- [60] 小川新平, 今田昌宏, 李来和, 吉本晋, 岡野誠, 野田進, “3次元フォトリック結晶による自然放出制御ー無欠陥発光体の導入とPL特性ー,” 2002年春季第49回応用物理学関係連合講演会, 28p-ZF-1, 東海大学湘南校舎, 神奈川県平塚市, 2002年3月27-30日.
- [61] 宮井英次, 岡野誠, 望月理光, 野田進, “2次元フォトリック結晶導波路と外部導波路との結合解析,” 2002年春季第49回応用物理学関係連合講演会, 29a-ZF-5, 東海大学湘南校舎, 神奈川県平塚市, 2002年3月27-30日.

- [62] 清田和明, 赤羽良啓, 浅野卓, 望月理光, 田中良典, 井本純平, 野田進, “2次元フォトニック結晶による波長分合波デバイス—単一格子点を埋めたドナー型欠陥の導入,” 2002年春季第49回応用物理学関係連合講演会, 29a-ZF-6, 東海大学湘南校舎, 神奈川県平塚市, 2002年3月27-30日.
- [63] 浅野卓, 清田和明, 井本純平, 赤羽良啓, 野田進, “2次元フォトニック結晶による波長分合波デバイス—点欠陥間の干渉—,” 2002年春季第49回応用物理学関係連合講演会, 29a-ZF-7, 東海大学湘南校舎, 神奈川県平塚市, 2002年3月27-30日.
- [64] 望月理光, 赤羽良啓, 浅野卓, 田中良典, 野田進, “2次元フォトニック結晶による波長分合波デバイス—ドナー型欠陥によるQ値の向上,” 2002年春季第49回応用物理学関係連合講演会, 29a-ZF-8, 東海大学湘南校舎, 神奈川県平塚市, 2002年3月27-30日.
- [65] 浅野卓, 望月理光, 宋奉植, 野田進, “2次元フォトニック結晶による波長分合波デバイス—面内ヘテロ構造の提案—,” 2002年春季第49回応用物理学関係連合講演会, 29a-ZF-9, 東海大学湘南校舎, 神奈川県平塚市, 2002年3月27-30日.
- [66] 野田進, “フォトニック結晶における光設計—欠陥およびバンド端エンジニアリング—,” 2002年春季第49回応用物理学関係連合講演会シンポジウム「光設計の最前線」, 29p-W-6, 東海大学湘南校舎, 神奈川県平塚市, 2002年3月27-30日(招待講演).
- [67] 野田進, “半導体フォトニック結晶とデバイス展開,” フォトニック結晶シンポジウム「基礎・基盤研究から産業応用へ」, 虎ノ門パストラル, 2002年3月30日(招待講演).
- [68] 野田進, “フォトニック結晶とその応用,” 日本学術振興会161委員会研究会「次世代材料の展望」, 千里ライフサイエンスセンター, 豊中市, 2002年4月26日(招待講演).
- [69] 野田進, “新しいナノ光材料: フォトニック結晶,” 第11回センサテクノスクール「センサ・アクチュエータの基礎から最先端技術まで」, キャンパスプラザ京都, 京都市, 2002年5月29日(招待講演).
- [70] 野田進, “新しい光ナノ構造: フォトニック結晶,” 第167回分子工学コロキウム, 京都大学, 京都市左京区, 2002年6月7日(招待講演).
- [71] K. Kiyota, T. Asano, Y. Akahane, and S. Noda, “Donor type defect with one filled air rod in a two-dimensional photonic crystal slab for the possible application to optical add/drop filters,” The 21st Electronic Materials Symposium, Hotel Fujimi Haitzu, Izu-Nagaoka, 2002年6月19-21日.
- [72] Y. Tanaka, T. Asano, Y. Akahane, and S. Noda, “Theoretical investigation of a two-dimensional photonic crystal slab with tapered air holes,” The 21st Electronic Materials Symposium, Hotel Fujimi Haitzu, Izu-Nagaoka, 2002年6月19-21日.
- [73] 野田進, “フォトニック結晶—ナノ加工から産業展開,” 応用電子物性研究例会, 機械振興会館, 東京, 2002年6月28日(招待講演).
- [74] 野田進, “半導体フォトニック結晶とデバイス,” 2002年秋季電子情報通信学会ソサイエティ大会, 宮崎大学, 2002年9月10-13日(招待講演).
- [75] 清田和明, 浅野卓, 宮井英次, 田中良典, 野田進, “2次元フォトニック結晶スラブ導波路の光入射出射特性の端面形状依存性,” 2002年秋季第63回応用物理学会学術講演会, 25p-YA-6, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟市, 2002年9月24-27日.
- [76] 宮井英次, 初田蘭子, 野田進, “2次元フォトニック結晶導波路と外部導波路との結合解析(2),” 2002年秋季第63回応用物理学会学術講演会, 25p-YA-5, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟市, 2002年9月24-27日.
- [77] 浅野卓, 宋奉植, 野田進, “2次元フォトニック結晶導波路による波長分合波デバイス—アクセプタ型およびドナー型欠陥における合波動作—,” 2002年秋季第63回応用物理学会学術講演会, 25p-YA-18, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟市, 2002年9月24-27日.

- [78] 赤羽良啓, 浅野卓, 宋奉植, 田中良典, 清田和明, 野田進, “2次元フォトニック結晶による波長分合波デバイス—複数の格子点を埋めたドナー型欠陥によるQ値の向上(2),” 2002年秋季第63回応用物理学会学術講演会, 25p-YA-16, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟市, 2002年9月24-27日.
- [79] 岡野誠, 野田進, “3次元フォトニック結晶マルチモード欠陥共振器の理論解析,” 2002年秋季第63回応用物理学会学術講演会, 25a-YA-4, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟市, 2002年9月24-27日.
- [80] 小川新平, 今田昌宏, 吉本晋, 李来和, 岡野誠, 野田進, “3次元フォトニック結晶内における点欠陥発光体のPL特性,” 2002年秋季第63回応用物理学会学術講演会, 25a-YA-3, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟市, 2002年9月24-27日.
- [81] 李来和, 岡野誠, 野田進, “ストライプ積層型3次元フォトニック結晶における誘電体導波路の理論解析,” 2002年秋季第63回応用物理学会学術講演会, 25a-YA-11, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟市, 2002年9月24-27日.
- [82] 宋奉植, 浅野卓, 赤羽良啓, 野田進, “面内ヘテロフォトニック結晶による波長分合波デバイス,” 2002年秋季第63回応用物理学会学術講演会, 25p-YA-17, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟市, 2002年9月24-27日.
- [83] 今田昌宏, 小川新平, 野田進, “異種材料における融着条件の検討,” 2002年秋季第63回応用物理学会学術講演会, 25a-YA-2, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟市, 2002年9月24-27日.
- [84] 初田蘭子, 田中良典, 宋奉植, 浅野卓, 野田進, “2次元フォトニック結晶スラブにおける点欠陥のQ値—エアーブリッジ構造と低屈折率クラッドを残した構造との比較—,” 2002年秋季第63回応用物理学会学術講演会, 26a-YA-5, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟市, 2002年9月24-27日.
- [85] 酒井恭輔, 大西大, 横山光, 野田進, “2次元フォトニック結晶面発光レーザの発光特性,” 2002年秋季第63回応用物理学会学術講演会, 26a-YA-10, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟市, 2002年9月24-27日.
- [86] 大西大, 酒井恭輔, チュティナン・アロンカーン, 野田進, “2次元フォトニック結晶面発光レーザの連続発振,” 2002年秋季第63回応用物理学会学術講演会, 26a-YA-9, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟市, 2002年9月24-27日.
- [87] 横山光, 野田進, “FDTD法による2次元正方格子フォトニック結晶面発光レーザの発光パターンの解析,” 2002年秋季第63回応用物理学会学術講演会, 26a-YA-11, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟市, 2002年9月24-27日.
- [88] 田中良典, 浅野卓, 清田和明, 野田進, “上下非対称構造をもつ2次元フォトニック結晶スラブ導波路の導波損失,” 2002年秋季第63回応用物理学会学術講演会, 26a-YA-4, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟市, 2002年9月24-27日.
- [89] 富士田誠之, 平野兼史, チュティナン・アロンカーン, 横山光, 野田進, “長波長帯2次元フォトニック結晶面発光レーザの微小化の検討,” 2002年秋季第63回応用物理学会学術講演会, 26p-YA-2, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟市, 2002年9月24-27日.
- [90] S. Noda, “Ultimate control of light by photonic bandgap crystals and its application to novel functional devices,” The Third CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2002年10月25日.
- [91] M. Okano, S. Kako, L. H. Lee, N. Yamamoto, and S. Noda, “Analysis of coupling between point-defect cavity and line-defect waveguide in 3D photonic crystal,” The Third CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2002年10月25日.
- [92] T. Asano, B. S. Song, Y. Akahane, Y. Tanaka, K. Kiyota, E. Miyai, and S. Noda, “Manipulation of

photons by defects in 2D photonic crystal slab and its application to ultrasmall functional devices,” The Third CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2002年10月25日.

- [93] M. Imada, S. Ogawa, S. Yoshimoto, and S. Noda, “Simultaneous introduction of light-emitter and artificial point-defects into 3D photonic crystals,” The Third CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2002年10月25日.
- [94] M. Yokoyama, D. Ohnishi, K. Hirano, K. Sakai, M. Fujita, A. Chutinan, and S. Noda, “Surface-emitting two-dimensional photonic crystal laser,” The Third CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2002年10月25日.
- [95] 横山光, 野田進, “二次元フォトニック結晶面発光レーザと今後の展望,” 面発光レーザとその応用・例および今後の展望((株)日本テクノセンター企画), 日本テクノセンター, 東京市ヶ谷, 2002年11月5-6日(招待講演).
- [96] 横山光, 野田進, “フォトニック結晶面発光レーザ,” 日本分光学会 秋季講演会・シンポジウム, 大阪, 2002年11月21-22日(招待講演).
- [97] 野田進, “フォトニック結晶デバイスの展望,” ナノテクノロジーが開く次世代情報通信新素子技術基盤, こまばエミナース, 東京, 2002年11月26日(招待講演).
- [98] 野田進, “新しいナノ構造: フォトニック結晶,” 電子情報通信学会東京支部「ナノテクノロジー最前線」シンポジウム, 機械振興会館, 東京都港区, 2002年11月27日(招待講演).
- [99] 野田進, “フォトニック結晶およびそのデバイス応用—次世代超高速・大容量通信に向けた新しい光ナノ材料—,” 神奈川科学アカデミー教育講座, 川崎市, 2002年11月27日(招待講演).
- [100] 野田進, “新しい光ナノ材料: フォトニック結晶,” 「最新光学系の現状Part2—極端紫外〜遠赤外域の光応用技術—」セミナー, 機械振興会館, 東京都港区, 2002年11月29日(招待講演).
- [101] 野田進, “究極の光制御ナノ構造: フォトニック結晶,” 第7回物理学会大阪支部公開シンポジウム: 「光とナノサイエンス」, 大阪科学技術会館, 大阪市西区, 2002年11月30日(招待講演).
- [102] 野田進, “新しい光ナノ構造「フォトニック結晶」の展望,” 第22回光産業技術シンポジウム「激動の時代を展望する」, 虎ノ門パストラス, 2002年12月5日(招待講演).
- [103] 野田進, “フォトニック結晶による光子制御の現状と展望,” 電子情報通信学会第16回光通信システムシンポジウム「ユビキタスネットワーク社会を支えるフォトニックネットワーク技術」, 箱根, 2002年12月12-13日(招待講演).
- [104] 野田進, “フォトニック結晶: ナノ光デバイスへの展開,” 光でナノテク・サイエンスシンポジウム, 神戸国際会議場, 神戸市, 2002年12月14-15日(招待講演).
- [105] 野田進, “「フォトニック結晶」開発の現状と将来展望,” トップダウン型ナノテクノロジーシンポジウム, 三田NNホール, 2003年1月29日(招待講演).
- [106] 大西大, 赤羽良啓, 野田進, “2次元フォトニック結晶を用いた高性能デバイス,” 第2回つくばテクノロジー・ショーケース, つくば国際会議場, 2003年1月30日.
- [107] 横山光, 野田進, “フォトニック結晶を用いた新型半導体レーザー,” レーザー学会学術講演会第23回年次大会, アクトシティ浜松コンgresセンター, 浜松市, 2003年1月30-31日(招待講演).
- [108] 野田進, “新しい光ナノ構造「フォトニック結晶」の進展,” 第1回ナノテクノロジー総合シンポジウム(JAPAN NANO 2003), ファッションタウン, 有明, 2003年2月2-3日(招待講演).

- [109] 野田進, “新しい光ナノ構造: フォトニック結晶,” 京都大学 21世紀COEプログラム「電気電子基盤技術の研究教育拠点形成」シンポジウム(第1回), キャンパスプラザ京都, 京都市下京区, 2003年3月4日.
- [110] 野田進, 浅野卓, 杉立厚志, “二次元フォトニック結晶スラブへのアクティブ媒質の導入と機能デバイス,” 合同成果報告シンポジウム”フォトニック結晶と量子ドット”, 主婦会館プラザエフ, 2003年3月17-18日.
- [111] チュティナン・アロンカーン, 富士田誠之, 石原邦亮, 国師渡, 上野哲也, 浅野卓, 野田進, “FDTD法による有機EL素子の光取り出し効率の理論的検討,” 2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 27p-A-16, 神奈川大学, 横浜市, 2003年3月27-30日.
- [112] 北川均, チュティナン・アロンカーン, 浅野卓, 野田進, “2次元フォトニック結晶スラブにおける完全フォトニックバンドギャップ,” 2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 28a-YN-10, 神奈川大学, 横浜市, 2003年3月27-30日.
- [113] 清田和明, 隈元大介, 浅野卓, 宋奉植, 野田進, “2次元フォトニック結晶スラブ導波路の短パルス光による特性評価,” 2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 28p-YN-5, 神奈川大学, 横浜市, 2003年3月27-30日.
- [114] 高野仁路, 浅野卓, 田中良典, 野田進, “2次元フォトニック結晶曲がり線欠陥導波路における透過周波数帯のシフト,” 2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 28p-YN-14, 神奈川大学, 横浜市, 2003年3月27-30日.
- [115] 田中良典, 浅野卓, 初田蘭子, 野田進, “2次元フォトニック結晶導波路に与えるTM-likeスラブモードの影響,” 2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 28a-YN-9, 神奈川大学, 横浜市, 2003年3月27-30日.
- [116] 李来和, 今田昌宏, 岡野誠, 野田進, “3次元フォトニック結晶導波路の作製,” 2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 28p-YN-9, 神奈川大学, 横浜市, 2003年3月27-30日.
- [117] 初田蘭子, 宮井英次, 浅野卓, 野田進, “外部導波路付き2次元フォトニック結晶導波路の光透過率の測定—フォトニック結晶導波路と外部導波路の結合部構造の透過率への影響—,” 2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 28p-YN-11, 神奈川大学, 横浜市, 2003年3月27-30日.
- [118] 赤羽良啓, 浅野卓, 宋奉植, 野田進, “2次元フォトニック結晶スラブ点欠陥共振器の格子点シフトによるQ値の大幅な向上,” 2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 29a-YN-9, 神奈川大学, 横浜市, 2003年3月27-30日.
- [119] 赤羽良啓, 浅野卓, 宋奉植, 野田進, “2次元フォトニック結晶による波長分合波デバイス—複数の格子点を埋めたドナー型欠陥によるQ値の向上(3)—,” 2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 29a-YN-8, 神奈川大学, 横浜市, 2003年3月27-30日.
- [120] 浅野卓, 赤羽良啓, 宋奉植, 野田進, “2次元フォトニック結晶分合波デバイスにおける導波モード端での特異現象,” 2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 29a-YN-6, 神奈川大学, 横浜市, 2003年3月27-30日.
- [121] 横山光, 野田進, “FDTD法による2次元正方格子フォトニック結晶レーザの解析,” 2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 29p-YN-17, 神奈川大学, 横浜市, 2003年3月27-30日.
- [122] 宋奉植, 浅野卓, 赤羽良啓, 野田進, “ナノスケール面内ヘテロフォトニック結晶による波長分合波デバイス,” 2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 29a-YN-3, 神奈川大学, 横浜市, 2003年3月27-30日.
- [123] 平野兼史, 富士田誠之, 岡野誉之, 横山光, チュティナン・アロンカーン, 野田進, “井桁構造による2次元フォトニック結晶レーザ,” 2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 29p-YN-13, 神奈川大学, 横浜市, 2003年3月27-30日.

- [124] 小川新平, 今田昌宏, 吉本晋, 岡野誠, 鴻池一暁, 古川哲也, 野田進, “多層化3次元フォトリニク結晶への発光体導入とPL特性,” 2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 29p-YN-4, 神奈川大学, 横浜市, 2003年3月27-30日.
- [125] 吉本晋, 小川新平, 今田昌宏, 岡野誠, 鴻池一暁, 古川哲也, 野田進, “多層化3次元フォトリニク結晶中の点欠陥発光体のPL特性,” 2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 29p-YN-5, 神奈川大学, 横浜市, 2003年3月27-30日.
- [126] 大西大, 酒井恭輔, 今田昌宏, 野田進, “低しきい値2次元フォトリニク結晶レーザの偏光制御,” 2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 29p-YN-18, 神奈川大学, 横浜市, 2003年3月27-30日.
- [127] 宋奉植, 浅野卓, 赤羽良啓, 野田進, “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,” 2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 29a-YN-4, 神奈川大学, 横浜市, 2003年3月27-30日.
- [128] 野田進, “2次元フォトリニク結晶レーザー,” 第88回微小光学研究会「光ナノテクノロジーと微小光学」, 慶應義塾大学日吉キャンパス, 横浜市, 2003年5月22日(招待講演).
- [129] 赤羽良啓, 野田進, “フォトリニク結晶とその応用,” 輻射科学研究会「光集積・機能デバイス」特集, 住友電工(株)本社, 2003年5月28日(招待講演).
- [130] 赤羽良啓, 野田進, “フォトリニク結晶とその応用,” 新無機膜研究会 第40回研究会, 神戸大学, 2003年6月4日(招待講演).
- [131] 浅野卓, 野田進, “フォトリニク結晶導波路の超短パルス光伝搬と群速度の評価,” 第2回超高速光エレクトロニクス研究会, 午前の部4, 東京大学先端科学技術センター, 東京都目黒区, 2003年7月28日(招待講演).
- [132] 大西大, 酒井恭輔, 宮井英次, 富士田誠之, 今田昌宏, 野田進, “2次元フォトリニク結晶レーザの特性改善,” 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 31p-ZM-11, 福岡大学七隈キャンパス, 福岡市, 2003年8月30日-9月2日.
- [133] 赤羽良啓, 浅野卓, 宋奉植, 野田進, “2次元フォトリニク結晶スラブ点欠陥共振器の格子点シフトによるQ値の大幅な向上(2),” 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 31a-ZM-10, 福岡大学七隈キャンパス, 福岡市, 2003年8月30日-9月2日.
- [134] 加古伸一, 小川新平, 吉本晋, 今田昌宏, 岡野誠, 鴻池一暁, 古川哲也, 野田進, “3次元フォトリニク結晶中に導入された点欠陥からの発光スペクトルの放射角依存性,” 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 31p-ZM-1, 福岡大学七隈キャンパス, 福岡市, 2003年8月30日-9月2日.
- [135] 横山光, 野田進, “FDTD法による2次元正方格子フォトリニク結晶レーザの解析(II),” 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 31p-ZM-7, 福岡大学七隈キャンパス, 福岡市, 2003年8月30日-9月2日.
- [136] 横山光, 野田進, “回転対称性を持たない2次元正方格子フォトリニク結晶を用いた面発光レーザの偏光制御,” 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 31p-ZM-8, 福岡大学七隈キャンパス, 福岡市, 2003年8月30日-9月2日.
- [137] 浅野卓, 赤羽良啓, 宋奉植, 野田進, “2次元フォトリニク結晶スラブに導入された2個の点欠陥共振器の結合特性,” 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 1p-ZM-4, 福岡大学七隈キャンパス, 福岡市, 2003年9月30日-9月2日.
- [138] 浅野卓, 宋奉植, 赤羽良啓, 野田進, “2次元フォトリニク結晶スラブの微小ダブルヘテロ接合を用いた高Q欠陥共振器,” 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 1p-ZM-11, 福岡大学七隈キャンパス, 福岡市, 2003年9月30日-9月2日.
- [139] 田中良典, 浅野卓, 野田進, “2次元フォトリニク結晶スラブ点欠陥共振器への3次元加工の

効果の検討－理論解析－,” 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 1a-ZM-10, 福岡大学七隈キャンパス, 福岡市, 2003年9月30日-9月2日.

- [140] 國師渡, 浅野卓, 宋奉植, 野田進, “2次元フォトニック結晶点欠陥共振器における光子トラップ現象の時間領域測定,” 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 1p-ZM-17, 福岡大学七隈キャンパス, 福岡市, 2003年9月30日-9月2日.
- [141] 赤羽良啓, 浅野卓, 宋奉植, 田中良典, 野田進, “2次元フォトニック結晶による波長分合波デバイス -分波スペクトルのフラットトップ化設計-,” 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 1p-ZM-3, 福岡大学七隈キャンパス, 福岡市, 2003年9月30日-9月2日.
- [142] 北川均, 田中良典, 浅野卓, 野田進, “2次元完全バンドギャップをもつフォトニック結晶スラブ導波路の理論解析,” 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 1a-ZM-2, 福岡大学七隈キャンパス, 福岡市, 2003年9月30日-9月2日.
- [143] 田中良典, 浅野卓, 野田進, “SOI 型2次元フォトニック結晶点欠陥共振器のQ値の改善－理論解析－,” 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 1a-ZM-12, 福岡大学七隈キャンパス, 福岡市, 2003年9月30日-9月2日.
- [144] 初田蘭子, 田中良典, 浅野卓, 野田進, “SOI型2次元フォトニック結晶点欠陥共振器のQ値の改善－実験－,” 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 1a-ZM-13, 福岡大学七隈キャンパス, 福岡市, 2003年9月30日-9月2日.
- [145] 宋奉植, 浅野卓, 赤羽良啓, 野田進, “面内ヘテロ・フォトニック結晶を用いた波長分合波デバイスの合波動作,” 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 1p-ZM-9, 福岡大学七隈キャンパス, 福岡市, 2003年9月30日-9月2日.
- [146] 宋奉植, 浅野卓, 赤羽良啓, 野田進, “面内ヘテロ・フォトニック結晶を用いた微小障壁構造における光子のトンネル現象,” 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 1p-ZM-10, 福岡大学七隈キャンパス, 福岡市, 2003年9月30日-9月2日.
- [147] 高野仁路, 宋奉植, 浅野卓, 野田進, “ヘテロ界面反射を利用した高効率面内2Dフォトニック結晶波長分合波デバイス,” 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 2a-ZM-9, 福岡大学七隈キャンパス, 福岡市, 2003年9月30日-9月2日.
- [148] 高野仁路, 赤羽良啓, 浅野卓, 田中良典, 野田進, “高Q値欠陥共振器と曲がり導波路による面内2Dフォトニック結晶波長分合波デバイス,” 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 2a-ZM-8, 福岡大学七隈キャンパス, 福岡市, 2003年9月30日-9月2日.
- [149] 浅野卓, 野田進, “面内ヘテロ構造によるフォトニック結晶デバイス,” 2003年電子情報通信学会ソサイエティ大会, SC-1-8, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟市, 2003年9月23日(招待講演).
- [150] 野田進, “PCの最前線と今後の展開招待講演,” 第3回集積光デバイス研究会, IPD02-19, 登別温泉ホテルまほろば, 登別市, 2003年10月2-3日(招待講演).
- [151] 今田昌宏, 野田進, “半導体フォトニック結晶光デバイスの現状と展望,” 第187回電気材料技術懇談会, 中央電気倶楽部, 大阪市, 2003年10月23日(招待講演).
- [152] S. Noda, “Ultimate control of light by photonic bandgap crystals and its application to novel functional devices,” The Fourth CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2003年10月30-31日.
- [153] T. Asano, B. S. Song, Y. Akahane, H. Takano, Y. Tanka, and S. Noda, “2D photonic crystal and its application to ultrasmall functional devices -Proposal of in-plane hetero photonic crystals-,” The Fourth CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2003年10月30-31日.
- [154] S. Ogawa, M. Imada, S. Yoshimoto, S. Kako, T. Furukawa, M. Okano, and S. Noda,

- “Light-emission control by 3D photonic crystals -Effect of increase of stacking number of striped layers-,” The Fourth CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2003年10月30-31日.
- [155] M. Imada, L. H. Lee, M. Okano, N. Yamamoto, and S. Noda, “Light-propagation control by 3D photonic crystals -Fabrication of line-defect waveguide-,” The Fourth CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2003年10月30-31日.
- [156] M. Yokoyama, D. Ohnishi, K. Sakai, M. Fujita, and S. Noda, “Surface-emitting 2D photonic crystal laser,” The Fourth CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2003年10月30-31日.
- [157] 野田進, フォトニックネットワーク技術シンポジウム, ホテルグランドパレス, 東京都千代田区, 2003年11月7日(招待講演).
- [158] 野田進, “光ナノ(フォトニクス結晶)機能デバイスとその応用展開,” 平成15年度第1回光技術交流会「光機能デバイスの工業的利用の可能性を求めて」, 京都府中小企業総合センター, 京都市, 2003年11月28日(招待講演).
- [159] 横山光, 野田進, “二次元フォトニック結晶面発光レーザーの偏光制御(光設計特別賞受賞記念講演),” 日本光学会年次学術講演会Optics Japan 2003, アクティシティ浜松, 浜松市, 2003年12月8-9日(招待講演).
- [160] 野田進, “光ナノ構造: フォトニック結晶とその応用,” 京大産学交流セミナー'03『21世紀の科学技術』, 京都大学桂キャンパス, 京都市西京区, 2004年1月9日.
- [161] 野田進, “フォトニック結晶の研究動向,” 光機能化学講演会03-12, 東京工業大学すずかけホール, 横浜市, 2004年3月15日(招待講演).
- [162] 富士田誠之, 今田昌宏, 浅野卓, 野田進, “フォトニック結晶LD/LEDの有用性,” 2004年春季第51回応用物理学関係連合講演会シンポジウム「フォトニック結晶- 実用化のきっかけはどこに?」, 28a-ZM-2, 東京工科大学, 八王子市, 2004年3月28-31日(招待講演).
- [163] 浅野卓, 野田進, “通信・センサー・バイオ分野への産業展開に向けた高Q共振器活用フォトニック結晶デバイス,” 2004年春季第51回応用物理学関係連合講演会シンポジウム「フォトニック結晶- 実用化のきっかけはどこに?」, 28p-ZM-1, 東京工科大学, 八王子市, 2004年3月28-31日(招待講演).
- [164] 國師渡, 中村誠宏, 浅野卓, 宋奉植, 野田進, “2次元フォトニック結晶点欠陥共振器の共振波長制御とスイッチング動作,” 2004年春季第51回応用物理学関係連合講演会, 29p-M-16, 東京工科大学, 八王子市, 2004年3月28-31日.
- [165] 赤羽良啓, 浅野卓, 宋奉植, 野田進, “2つの点欠陥共振器を縦続配置した面内2次元フォトニック結晶波長分合波デバイス,” 2004年春季第51回応用物理学関係連合講演会, 29p-M-2, 東京工科大学, 八王子市, 2004年3月28-31日.
- [166] 宋奉植, 浅野卓, 赤羽良啓, 野田進, “2次元フォトニック結晶スラブの微小ダブルヘテロ接合を用いた高Q共振器(2),” 2004年春季第51回応用物理学関係連合講演会, 29p-M-4, 東京工科大学, 八王子市, 2004年3月28-31日.
- [167] 赤羽良啓, 浅野卓, 宋奉植, 野田進, “2次元フォトニック結晶スラブ点欠陥共振器の格子点シフトによるQ値の大幅な向上(3),” 2004年春季第51回応用物理学関係連合講演会, 29p-M-1, 東京工科大学, 八王子市, 2004年3月28-31日.
- [168] 岡野誠, 田中良典, 野田進, “3次元フォトニック結晶埋め込み型Berenger PML吸収境界条件,” 2004年春季第51回応用物理学関係連合講演会, 29a-M-2, 東京工科大学, 八王子市, 2004年3月28-31日.
- [169] 田中良典, Michal Tymczenko, 浅野卓, 宋奉植, 野田進, “FIBによる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,” 2004年春季第51回応用物理学関係連合講演会, 29a-M-11, 東京工科大学, 八王子市, 2004年3月28-31日.
- [170] 宮井英次, 大西 大, 野田進, “2次元フォトニック結晶面発光レーザーにおける位相シフト効果,” 2004年春季第51回応用物理学関係連合講演会, 30p-M-4, 東京工科大学, 八王子市, 2004年3月28-31日.
- [171] 大西 大, 岡野誉之, 宮井英次, 酒井恭輔, 今田昌宏, 野田進, “2次元フォトニック結晶レーザーの室温連続発振,” 2004年春季第51回応用物理学関係連合講演会, 30p-M-2, 東京工科大学, 八王子市, 2004年3月28-31日.
- [172] 酒井恭輔, 大西 大, 坂口拓生, 宮井英次, 野田 進, “2次元フォトニック結晶レーザーの発振バンド端の同定,” 2004年春季第51回応用物理学関係連合講演会, 30p-M-3, 東京工科大学, 八王子市, 2004年3月28-31日.
- [173] 横山光, 野田進, “FDTD 法による2次元正方格子フォトニック結晶レーザーの解析(III),” 2004年春季第51回応用物理学関係連合講演会, 30p-P18-14, 東京工科大学, 八王子市, 2004年3月28-31日.
- [174] 加古伸一, 高橋重樹, 小川新平, 今田昌宏, 岡野誠, 古川哲也, 野田進, “ストライプ型発光体のキャリア寿命に与える3次元フォトニック結晶作製プロセスの影響,” 2004年春季第51回応用物理学関係連合講演会, 30a-M-10, 東京工科大学, 八王子市, 2004年3月28-31日.
- [175] 高野仁路, 宋奉植, 浅野卓, 野田進, “面内ヘテロ構造を持つ2Dフォトニック結晶導波路におけるヘテロ界面での軸ずれの影響,” 2004年春季第51回応用物理学関係連合講演会, 30p-P18-12, 東京工科大学, 八王子市, 2004年3月28-31日.
- [176] 高山清市, 北川均, 浅野卓, 野田進, “完全バンドギャップをもつ2次元フォトニック結晶スラブの作製と評価,” 2004年春季第51回応用物理学関係連合講演会, 31a-M-4, 東京工科大学, 八王子市, 2004年3月28-31日.
- [177] 北川均, 浅野卓, 野田進, “三角格子 C_{3v} 対称孔フォトニック結晶の理論解析,” 2004年春季第51回応用物理学関係連合講演会, 31a-M-3, 東京工科大学, 八王子市, 2004年3月28-31日.
- [178] 野田進, 浅野卓, 杉立厚志, 赤羽良啓, “2次元フォトニック結晶のアクティブ化とその基盤技術開発,” 合同成果報告シンポジウム”フォトニック結晶と量子ドット”, 主婦会館プラザエフ, 東京都千代田区, 2004年4月19日(招待講演).
- [179] 浅野卓, 野田進, “2次元フォトニック結晶デバイス,” 誘電体研究委員会(第76回), コープイン京都, 京都市, 2004年5月25日(招待講演).
- [180] 野田進, “フォトニック結晶,” 電気学会研究会, オムロン京阪奈イノベーションセンタ, 木津町, 2004年6月4日(招待講演).
- [181] 野田進, “フォトニックナノ構造とデバイス,” 科学技術振興機構「光と制御」領域アドバイザ委員会, 千歳市, 2004年6月19日(招待講演).
- [182] S. Kawashima, L. H. Lee, M. Imada, M. Okano, and S. Noda, “Design of line-defect waveguides with large single-mode bandwidth for ultra-small optical integrated devices based on three-dimensional photonic crystals,” 第23回電子材料シンポジウム, H10, ホテルサンバレー富士見, 伊豆長岡町, 2004年7月7-9日.
- [183] S. Noda, “Recent progress of semiconductor photonic crystals,” 第23回電子材料シンポジウム, J2, ホテルサンバレー富士見, 伊豆長岡町, 2004年7月7-9日(招待講演).
- [184] 野田進, “フォトニック結晶とその応用,” 平成16年度精密科学専攻集中講義, 大阪大学吹田キャンパス, 2004年7月23日(招待講演).
- [185] 野田進, “フォトニック結晶の国内外における研究動向,” 光・光量子科学技術の推進方策に関する検討会, 2004年8月5日(招待講演).

- [186] 野田進, “フォトニック結晶デバイスの動向,” 日本学術振興会光ネットワークシステム技術第171委員, J Rタワーホテル日航札幌, 札幌市, 2004年8月18-19日(招待講演).
- [187] 富士田誠之, 杉立厚志, 上杉利次, 大西大, 岡野誉之, 野田進, “ヨウ化水素プラズマエッチングによるフォトニック結晶の作製,” 2004年秋季第65回応用物理学会学術講演会, 2p-ZC-6, 東北学院大学 泉キャンパス, 仙台市, 2004年9月1-4日.
- [188] 宋奉植, 浅野卓, 赤羽良啓, 野田進, “2次元フォトニック結晶スラブにおけるダブルヘテロ構造を用いた高Q微小共振器,” 2004年秋季第65回応用物理学会学術講演会, 3a-ZC-5, 東北学院大学 泉キャンパス, 仙台市, 2004年9月1-4日.
- [189] 田中良典, 浅野卓, 野田進, “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,” 2004年秋季第65回応用物理学会学術講演会, 3p-ZC-2, 東北学院大学 泉キャンパス, 仙台市, 2004年9月1-4日.
- [190] 川島祥一, 今田昌宏, 岡野誠, 野田進, “3次元フォトニック結晶を利用した広帯域完全単一モード導波路の設計と理論解析,” 2004年秋季第65回応用物理学会学術講演会, 3p-ZC-12, 東北学院大学 泉キャンパス, 仙台市, 2004年9月1-4日.
- [191] 高山清市, 北川均, 浅野卓, 野田進, “ C_{3v} 対称性をもつ2次元フォトニック結晶スラブにおける欠陥の導入と評価,” 2004年秋季第65回応用物理学会学術講演会, 3p-ZC-7, 東北学院大学 泉キャンパス, 仙台市, 2004年9月1-4日.
- [192] R. Fenollosa, Y. Tanaka, T. Asano, B. S. Song, S. Noda, M. Kitano, T. Nakanishi, and K. Sugiyama, “Enhancement of spontaneous decay of atoms in gas phase by photonic crystal cavities,” 2004年秋季第65回応用物理学会学術講演会, 3a-ZC-7, 東北学院大学 泉キャンパス, 仙台市, 2004年9月1-4日.
- [193] 高野仁路, 宋奉植, 浅野卓, 野田進, “ヘテロ界面反射を利用した面内型2Dフォトニック結晶波長分合波デバイスの実験検証,” 2004年秋季第65回応用物理学会学術講演会, 3p-ZC-4, 東北学院大学 泉キャンパス, 仙台市, 2004年9月1-4日.
- [194] 岡野誠, 野田進, “群論を用いた周波数および時間領域電磁界解析,” 2004年秋季第65回応用物理学会学術講演会, 3p-ZC-10, 東北学院大学 泉キャンパス, 仙台市, 2004年9月1-4日.
- [195] 田中良典, 浅野卓, 赤羽良啓, 野田進, “光ナノ共振器のQ値増大に関する考察,” 2004年秋季第65回応用物理学会学術講演会, 3a-ZC-3, 東北学院大学 泉キャンパス, 仙台市, 2004年9月1-4日.
- [196] 北川均, 高山清市, 浅野卓, 野田進, “三角格子 C_{3v} 対称孔2次元フォトニック結晶スラブの理論解析(3),” 2004年秋季第65回応用物理学会学術講演会, 3p-ZC-8, 東北学院大学 泉キャンパス, 仙台市, 2004年9月1-4日.
- [197] 高橋重樹, 富士田誠之, 野田進, “時間分解フォトルミネッセンス測定による2次元フォトニック結晶の発光特性評価,” 2004年秋季第65回応用物理学会学術講演会, 3a-ZC-8, 東北学院大学 泉キャンパス, 仙台市, 2004年9月1-4日.
- [198] 田中良典, 浅野卓, 赤羽良啓, 野田進, “点欠陥共振器における電磁界分布の包絡線関数に関する検討,” 2004年秋季第65回応用物理学会学術講演会, 3a-ZC-4, 東北学院大学 泉キャンパス, 仙台市, 2004年9月1-4日.
- [199] 赤羽良啓, 浅野卓, 高野仁路, 宋奉植, 野田進, “点欠陥縦続配置型面内2Dフォトニック結晶波長フィルタの高効率化,” 2004年秋季第65回応用物理学会学術講演会, 3p-ZC-6, 東北学院大学 泉キャンパス, 仙台市, 2004年9月1-4日.
- [200] 浅野卓, 國師渡, 中村誠宏, 宋奉植, 野田進, “2次元フォトニック結晶スラブ点欠陥共振器における光非線形現象,” 2004年秋季第65回応用物理学会学術講演会, 4p-ZC-1, 東北学院大学 泉キャンパス, 仙台市, 2004年9月1-4日.
- [201] 大西大, 岡野誉之, 酒井恭輔, 宮井英次, 富士田誠之, 今田昌宏, 野田進, “2次元フォトニ

ック結晶レーザにおける低温融着プロセスの導入,” 2004年秋季第65回応用物理学会学術講演会, 4a-ZC-3, 東北学院大学 泉キャンパス, 仙台市, 2004年9月1-4日.

- [202] 酒井恭輔, 大西大, 岡野誉之, 宮井英次, 野田進, “2次元フォトリック結晶レーザのバンド構造に関する検討,” 2004年秋季第65回応用物理学会学術講演会, 4a-ZC-4, 東北学院大学 泉キャンパス, 仙台市, 2004年9月1-4日.
- [203] 中村誠宏, 浅野卓, 國師渡, 宋奉植, 野田進, “2次元フォトリック結晶点欠陥共振器の共振波長制御-2-,” 2004年秋季第65回応用物理学会学術講演会, 4a-ZC-11, 東北学院大学 泉キャンパス, 仙台市, 2004年9月1-4日.
- [204] 宮井英次, 大西大, 野田進, “2次元フォトリック結晶面発光レーザにおける位相シフト効果(2),” 2004年秋季第65回応用物理学会学術講演会, 4a-ZC-5, 東北学院大学 泉キャンパス, 仙台市, 2004年9月1-4日.
- [205] S. Noda, “Ultimate control of light by photonic bandgap crystals and its application to novel functional devices,” The Fifth CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2004年9月29-30日.
- [206] T. Asano, Y. Akahane, B. S. Song, and S. Noda, “2D photonic crystal and its application to ultrasmall functional devices (I) -High Q photonic nanocavity-,” The Fifth CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2004年9月29-30日.
- [207] H. Takano, T. Asano, Y. Akahane, B. S. Song, and S. Noda, “2D photonic crystal and its application to ultrasmall functional devices (II) -In-plane type channel add/drop filter-,” The Fifth CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2004年9月29-30日.
- [208] S. Ogawa, S. Kako, S. Takahashi, T. Furukawa, M. Imada, and S. Noda, “Light-emission control by 3D photonic crystal (I) -Introduction of point defects with quantum wells-,” The Fifth CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2004年9月29-30日.
- [209] S. Takahashi, S. Kako, S. Ogawa, T. Furukawa, M. Imada, and S. Noda, “Light-emission control by 3D photonic crystal (II) -Effect of photonic bandgap on carrier lifetime-,” The Fifth CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2004年9月29-30日.
- [210] S. Kawashima, M. Imada, M. Okano, and S. Noda, “Light-propagation control by 3D photonic crystal (I) -In-plane waveguide with wide bandwidth-,” The Fifth CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2004年9月29-30日.
- [211] D. Ohnishi, K. Sakai, E. Miyai, T. Okano, M. Fujita, and S. Noda, “Surface-emitting 2D photonic crystal laser (I) -Realization of RT CW oscillation-,” The Fifth CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2004年9月29-30日.
- [212] K. Sakai, E. Miyai, D. Ohnishi, T. Okano, M. Fujita, and S. Noda, “Surface-emitting 2D photonic crystal laser (II) -Identification of lasing band edge-,” The Fifth CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2004年9月29-30日.
- [213] 野田進, “周期構造の光エレクトロニクス -フォトリック結晶の最近の進展-,” 光エレクトロニクス第130委員会第240回研究会, 森戸記念館, 東京都新宿区, 2004年10月18日(招待講演).
- [214] 赤羽良啓, 浅野卓, 宋奉植, 野田進, “フォトリック結晶高Q共振器の設計と作製,” 電子情報通信学会 電子デバイス/電子部品・材料/レーザ・量子エレクトロニクス研究会, 京都

大学吉田キャンパス, 京都, 2004年10月21-22日.

- [215] 野田進, “次世代通信・情報・センシング分野を支えるフォトニック結晶,” 「ナノテクノロジーから何がでてきているか? ~ナノデバイスの実用化に向けて~ 科学技術振興機構 2004第2回基礎研究報告会一, JA国際会議室, 東京都千代田区, 2004年11月19日(招待講演).
- [216] 野田進, “フォトニック結晶、ナノ構造の行方,” 第1回KYO-NANOフォトニックセミナー, 京都大学桂キャンパス桂ホール, 京都市, 2004年12月2日(招待講演).
- [217] 野田進, “フォトニック結晶技術の課題と今後の展開,” 微細構造光デバイス・シンポジウムーフォトニック結晶: 真のブレークスルーには何が必要かー, 湘南国際村センター, 神奈川県葉山町, 2004年12月3-4日(招待講演).
- [218] 野田進, “フォトニック結晶の研究動向,” 第二回ナノITネットワークキンググループ, 総務省, 東京都, 2004年12月27日(招待講演).
- [219] 野田進, “フォトニック結晶の応用,” 量子エレクトロニクス研究会「フォトニック結晶の物理と応用」, 明治大学清里セミナーハウス, 山梨県, 2005年1月12-14日(招待講演).
- [220] 野田進, “光ナノ構造「フォトニック結晶」の最近の進展,” 名古屋大学量子工学専攻特別講義, 名古屋大学, 名古屋市, 2005年1月26日(招待講演).
- [221] 高野仁路, 宋奉植, 浅野卓, 野田進, “ヘテロ界面反射を利用した面内型2Dフォトニック結晶波長分合波デバイス,” 電子情報通信学会研究会: PN/OFT/OPE/LQE研究会, 大阪大学, 大阪府吹田市, 2005年1月26-28日.
- [222] 野田進, “光ナノ構造: フォトニック結晶の現状と将来展望,” 「先端フォトンテクノロジー研究センター・第6回 シンポジウム」, 豊田工業大学, 名古屋市, 2005年3月3日(招待講演).
- [223] 野田進, “フォトニック結晶技術の現状と将来展望,” 電子情報通信学会, 大阪大学豊中キャンパス, 豊中市, 2005年3月21-24日(招待講演, Plenary).
- [224] 川島祥一, 今田昌宏, 山本宗継, 岡野 誠, 野田進, “高精度3次元フォトニックナノ構造形成装置の開発,” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 29a-YV-4, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.
- [225] 赤羽良啓, 浅野卓, 宋奉植, 野田進, “2次元フォトニック結晶スラブにおける欠陥モード間の結合強さの制御,” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 30p-YV-8, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.
- [226] 高山清市, 田中良典, 浅野卓, 野田進, “2次元フォトニック結晶スラブ偏波モード変換器の提案,” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 30a-YV-11, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.
- [227] 田中良典, 浅野卓, 野田進, “2次元フォトニック結晶点欠陥共振器への3次元ナノ加工の現状と展望,” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 30a-YV-7, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.
- [228] 永島拓志, 宋奉植, 浅野卓, 野田進, “面内ヘテロフォトニック結晶による広帯域超小型波長分合波デバイス,” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 30p-YV-4, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.
- [229] 高野仁路, 宋奉植, 浅野卓, 野田進, “面内型2D フォトニック結晶波長分合波デバイスの多波長動作,” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 30p-YV-5, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.
- [230] 北川均, 田中良典, 浅野卓, 野田進, “三角格子 C_{3v} 対称孔2次元フォトニック結晶スラブの理論解析(IV),” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 30a-YV-8, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.

- [231] 野田進, “第6回光・量子エレクトロニクス業績賞受賞記念講演「フォトリック結晶による究極の光制御と機能デバイス」,” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 30p-YV-1, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日(招待講演).
- [232] 高橋重樹, 富士田誠之, 田中良典, 浅野卓, 野田進, “2次元フォトリック結晶による自然放出の抑制・再分配,” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 31a-YV-11, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.
- [233] 岡野誉之, 大西大, 酒井恭輔, 宮井英次, 今田昌宏, 野田進, “2次元フォトリック結晶面発光レーザのビーム形状制御(I),” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 31a-YV-6, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.
- [234] 宮井英次, 大西大, 酒井恭輔, 岡野誉之, 野田進, “2次元フォトリック結晶面発光レーザのビーム形状制御(II),” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 31a-YV-7, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.
- [235] 岡野誠, 石崎賢司, 野田進, “3次元フォトリック結晶における結合共振器の理論解析,” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 31p-YV-7, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.
- [236] 宋奉植, 上杉利次, 浅野卓, 赤羽良啓, 野田進, “ダブルヘテロ構造を用いた高Q値光ナノ共振器の実現,” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 31p-YV-8, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.
- [237] 宋奉植, 上杉利次, 浅野卓, 赤羽良啓, 野田進, “ダブルヘテロ構造を用いた高Q微小共振器におけるモードの局在についての考察,” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 31p-YV-9, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.
- [238] 上杉利次, 宋奉植, 浅野卓, 野田進, “高Q値光ナノ共振器における共振器特性の入力光パワー依存性,” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 31p-YV-12, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.
- [239] 田中良典, 浅野卓, 野田進, “高Q値光ナノ共振器への超短パルス光の導入に関する検討,” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 31p-YV-14, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.
- [240] 酒井恭輔, 宮井英次, 大西大, 岡野誉之, 野田進, “2次元フォトリック結晶レーザにおける内部光結合の検討,” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 31a-YV-9, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.
- [241] 富士田誠之, 田中良典, 高橋重樹, 浅野卓, 野田進, “2次元フォトリック結晶の自然放出レータの解析,” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 31a-YV-12, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.
- [242] 浅野卓, 田中良典, 宋奉植, 野田進, “2次元フォトリック結晶スラブ点欠陥共振器における付加的損失要因の検討,” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 31p-YV-10, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.
- [243] 横山光, 野田進, “FDTD 法による2次元正方格子フォトリック結晶レーザの解析(V),” 2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会, 31a-YV-4, 埼玉大学, さいたま市, 2005年3月29日-4月1日.
- [244] 野田進, 国際コミュニケーション基金優秀研究賞受賞記念講演, 京王プラザホテル, 東京都, 2005年4月26日.
- [245] S. Noda, “光ナノ構造: フォトリック結晶とそのデバイス応用,” SEMI FORUM JAPAN 2005, グランキューブ大阪 (大阪国際会議場), 大阪, 2005年6月7日(Invited).
- [246] S. Takahashi, S. Kako, S. Ogawa, M. Imada, M. Okano, and S. Noda, “Inhibition of spontaneous

emission by 3D photonic crystal,” 24th Electronic Materials Symposium, メルパルク松山, 愛媛県, 2005年7月4-6日.

- [247] M. Fujita, Y. Akahane, S. Takahashi, T. Asano, and S. Noda, “Photonic crystal GaInAsP lasers with high-Q nanocavity,” 24th Electronic Materials Symposium, メルパルク松山, 愛媛県, 2005年7月4-6日.
- [248] 永島拓志, 宋奉植, 浅野卓, 野田進, “サブナノメートル加工技術による2次元フォトニック結晶点欠陥の共振波長精密制御,” 2005年秋季第66回応用物理学会学術講演会, 8p-H-14, 徳島大学, 徳島市, 2005年9月7-11日.
- [249] 宋奉植, 今田昌宏, 永島拓志, 浅野卓, 野田進, “極低温ICP-Siエッチングを用いた2次元フォトニック結晶の作製,” 2005年秋季第66回応用物理学会学術講演会, 8p-H-2, 徳島大学, 徳島市, 2005年9月7-11日.
- [250] 田中良典, 浅野卓, 高山清市, 野田進, “2次元フォトニック結晶スラブ偏波変換器の作製,” 2005年秋季第66回応用物理学会学術講演会, 8p-H-5, 徳島大学, 徳島市, 2005年9月7-11日.
- [251] 北川均, 田中良典, 浅野卓, 野田進, “三角格子 C_{3v} 対称孔2次元フォトニック結晶スラブの理論解析 (V),” 2005年秋季第66回応用物理学会学術講演会, 8p-H-19, 徳島大学, 徳島市, 2005年9月7-11日.
- [252] 高橋重樹, 今田昌宏, 岡野誠, 野田進, “斜め45度エッチングによるストライプ積層型3次元フォトニック結晶の提案と作製,” 2005年秋季第66回応用物理学会学術講演会, 8a-H-8, 徳島大学, 徳島市, 2005年9月7-11日.
- [253] 岡野誠, 高橋重樹, 今田昌宏, 野田進, “斜め45度エッチングによるストライプ積層型3次元フォトニック結晶の理論解析,” 2005年秋季第66回応用物理学会学術講演会, 8a-H-9, 徳島大学, 徳島市, 2005年9月7-11日.
- [254] 岡野誠, 石崎賢司, 今田昌宏, 野田進, “3次元フォトニック結晶における多原子光分子のLCAO解析,” 2005年秋季第66回応用物理学会学術講演会, 8a-H-5, 徳島大学, 徳島市, 2005年9月7-11日.
- [255] 小川新平, 石崎賢司, 古川哲也, 野田進, “ストライプ積層型17層3次元フォトニック結晶の作製,” 2005年秋季第66回応用物理学会学術講演会, 8a-H-6, 徳島大学, 徳島市, 2005年9月7-11日.
- [256] 田中良典, 浅野卓, 野田進, “高Q値光ナノ共振器への超短パルス光の導入に関する検討 (2),” 2005年秋季第66回応用物理学会学術講演会, 9p-H-9, 徳島大学, 徳島市, 2005年9月7-11日.
- [257] 上杉利次, 宋奉植, 浅野卓, 田中良典, 野田進, “2次元フォトニック結晶共振器における面内Q値の動的制御,” 2005年秋季第66回応用物理学会学術講演会, 9p-H-10, 徳島大学, 徳島市, 2005年9月7-11日.
- [258] 山口真, 鴻池一暁, 富士田誠之, 中西純弥, Wolfgang Stumpf, 高橋重樹, 田中良典, 浅野卓, 野田進, “2次元フォトニック結晶による自然放出の抑制・再分配 (2) ー量子ドット発光体の導入ー,” 2005年秋季第66回応用物理学会学術講演会, 9a-H-9, 徳島大学, 徳島市, 2005年9月7-11日.
- [259] 中西純弥, 富士田誠之, 山口真, Wolfgang Stumpf, 鴻池一暁, 浅野卓, 野田進, “2次元フォトニック結晶による自然放出の抑制・再分配 (3) ー励起条件依存性ー,” 2005年秋季第66回応用物理学会学術講演会, 9a-H-10, 徳島大学, 徳島市, 2005年9月7-11日.
- [260] 富士田誠之, 山口真, 鴻池一暁, 中西純弥, Wolfgang Stumpf, 田中良典, 浅野卓, 野田進, “2次元フォトニック結晶による自然放出の抑制・再分配 (4) ー一点欠陥共振器の導入ー,” 2005年秋季第66回応用物理学会学術講演会, 9a-H-11, 徳島大学, 徳島市, 2005年9月7-11日.

- [261] 國師渡, 大西大, 宮井英次, 酒井恭輔, 今田昌宏, 野田進, “2次元フォトニック結晶面発光レーザの電極構造および実装方法の改善,” 2005年秋季第66回応用物理学会学術講演会, 9p-H-4, 徳島大学, 徳島市, 2005年9月7-11日.
- [262] 宮井英次, 大西大, 酒井恭輔, 國師渡, 野田進, “2次元フォトニック結晶面発光レーザの面外結合効率制御,” 2005年秋季第66回応用物理学会学術講演会, 9p-H-5, 徳島大学, 徳島市, 2005年9月7-11日.
- [263] 酒井恭輔, 宮井英次, 大西 大, 國師渡, 野田 進, “2次元フォトニック結晶レーザの結合波理論による解析 -結合波方程式-,” 2005年秋季第66回応用物理学会学術講演会, 9p-H-8, 徳島大学, 徳島市, 2005年9月7-11日.
- [264] S. Noda, “Ultimate Control of Light by Photonic Bandgap Crystals and Its Application to Novel Functional Devices— Objective of this Project and Overview of our Presentation in this Symposium —,” The 2005 CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2005年10月18-19日.
- [265] S. Takahashi, S. Ogawa, K. Ishizaki, M. Okano, M. Imada and S. Noda, “Light-Emission Control by 3D Photonic Crystal,” The 2005 CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2005年10月18-19日.
- [266] M. Fujita, S. Takahashi, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda, “Light-Emission Control by 2D Photonic Crystal Slab,” The 2005 CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2005年10月18-19日.
- [267] N. Yamamoto, K. Komori, M. Imada, S. Kawashima, M. Okano, and S. Noda, “Light-Propagation Control by 3D Photonic Crystals,” The 2005 CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2005年10月18-19日.
- [268] M. Okano, K. Ishizaki, S. Kawashima, M. Imada, and S. Noda, “Interaction of Point-Defect Cavities in 3D Photonic Crystal,” The 2005 CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2005年10月18-19日.
- [269] S. Kawashima, M. Imada, and S. Noda, “Development of Precise Alignment and Stacking System for Advanced 3D Photonic Crystals,” The 2005 CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2005年10月18-19日.
- [270] E. Miyai, D. Onishi, T. Okano, K. Sakai, W. Kunishi, and S. Noda, “Surface-Emitting 2D Photonic Crystal Laser,” The 2005 CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2005年10月18-19日.
- [271] K. Sakai, E. Miyai, D. Onishi, W. Kunishi, and S. Noda, “Coupled Mode Theory for 2D Photonic Crystal Laser,” The 2005 CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2005年10月18-19日.
- [272] B. S. Song, T. Asano, Y. Akahane, and S. Noda, “Ultra-high Q Photonic Double Heterostructure Nanocavity in 2D Photonic Crystal Slab,” The 2005 CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2005年10月18-19日.
- [273] H. Takano, T. Asano, B. S. Song and S. Noda, “In-plane Type Channel Add/Drop Filter based on 2D Photonic Crystal Slab,” The 2005 CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena”, Kokuyo Hall, Shinagawa, 2005年10月18-19日.

- [274] Y. Tanaka, S. Takayama, T. Asano, and S. Noda, "Polarization Mode Converter Based on Two-dimensional Photonic Crystal Slab," The 2005 CREST Symposium on "Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena", Kokuyo Hall, Shinagawa, 2005年10月18-19日.
- [275] H. Kitagawa, S. Takayama, Y. Tanaka, T. Asano and S. Noda, "Complete Photonic Bandgap Structure for 2D Photonic Crystal Slab," The 2005 CREST Symposium on "Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena", Kokuyo Hall, Shinagawa, 2005年10月18-19日.
- [276] 渡辺慶規, 山本宗継, 小森和弘, "3次元フォトニック結晶導波路の伝搬損失シミュレーション," 2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 神奈川大学, 2003年3月27-30日.
- [277] 渡辺慶規, 山本宗継, 小森和弘, "3次元フォトニック結晶における空気導波路の解析," 2004年春季第51回応用物理学関係連合学術講演会, 東京工科大学, 2004年3月28-31日.
- [278] 山本宗継, 渡辺慶規, 小森和弘, "フォトニック結晶方向性結合器の結合長短縮と消光比の改善," 電子情報通信学会 光エレクトロニクス/レーザ・量子エレクトロニクス研究会, 東京, 2004年7月2日.
- [279] 山本宗継, 渡辺慶規, 小森和弘, "フォトニック結晶方向性結合器ー完全結合長短縮と高消光比の両立ー," 2004年秋季第65回応用物理学学会学術講演会, 東北学院大学 泉キャンパス, 2004年9月1-4日.
- [280] 小川徹, 山本宗継, 渡辺慶規, 小森和弘, 伊藤雅英, 谷田貝豊彦, "フォトニック結晶方向性結合器スイッチスイッチ長の短縮と帯域幅の改善ー," 第65回応用物理学学会学術講演会, 東北学院大学 泉キャンパス, 2004年9月1-4日.
- [281] 山本宗継, 小森和弘, "レジストレーション描画機構を用いた3次元フォトニック結晶作製法," 第52回応用物理学関係連合講演会, 2005年03月29日
- [282] 小川徹, 山本宗継, 小森和弘, 伊藤雅英, 谷田貝豊彦, "フォトニック結晶方向性結合器スイッチ(II)-構造試作へ向けた詳細検討-, " 第52回応用物理学関係連合講演会, 2005年03月30日
- [283] 山本宗継, 杉坂純一郎, 小森和弘, "フォトニック結晶方向性結合器スイッチ(III) 帯域幅の考察," 第66回応用物理学学会学術講演会, 2005年9月9日
- [284] 馬場俊彦, "フォトニック結晶と微小フォトニクスの世界," 日本光学会第27回冬期講習会, no.2-1, 2001 (招待講演).
- [285] 馬場俊彦, "微小フォトニクスの現状と今後の展望," レーザー学会学術講演会, no.F-3-2, 2001 (招待講演).
- [286] 馬場俊彦, "フォトニックレーザ," 光産業技術振興協会光材料・応用技術研究会, no.2, 2001 (招待講演).
- [287] 馬場俊彦, "フォトニック結晶の作製・評価の基礎とその応用," 技術情報協会セミナー, 2001 (招待講演).
- [288] 馬場俊彦, 富士田誠之, 坂井篤, 深谷尚志, 市川弘之, 茂木歩, "ディスク型光集積素子," 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, vol.101, no.92/OPE2001-1, pp.1-6, 2001 (招待講演).
- [289] 馬場俊彦, "フォトニック結晶とマイクロレーザ," 神奈川科学技術アカデミーフォトニクスの基礎と新展開コース, 2001 (招待講演).
- [290] 馬場俊彦, "フォトニック結晶の展開," オプトメカトロニクス協会フォトニックテクノロジーシンポジウム, no.6, 2001 (招待講演).
- [291] 馬場俊彦, "フォトニック結晶と関連技術," 日本学術振興会光エレクトロニクス第130委員

会, 2001 (招待講演).

- [292] 馬場俊彦, “フォトニック結晶と高屈折率差微小光学素子,” 光産業技術振興協会ナノフォトニクス懇談会, 2001 (招待講演).
- [293] T. Baba, A. Motegi and T. Iwai, “Waveguide in two-dimensional photonic crystal slab and its optical property, 戦略的基礎研究「電子・光子等の機能制御」第二回公開シンポジウム, 2001.
- [294] 馬場俊彦, “フォトニック・ナノ構造,” よこはま大学ベンチャークラブ最先端技術セミナー, no.4, 2001.
- [295] 馬場俊彦, “光エレクトロニクス --- 大学新時代における研究と教育,” 日本大学歯学部松戸支部市原支部研究会, 2001 (招待講演)
- [296] 馬場俊彦, “フォトニック結晶中の光伝搬,” 応用物理学会関西支部ナノフォトニクスセミナー, 2001 (招待講演).
- [297] 馬場俊彦, “2次元フォトニック結晶光導波路の伝搬特性,” 戦略的基礎研究CREST合同シンポジウム「光子機能制御研究のフロンティア」, 2001.
- [298] 馬場俊彦, “高精度リソグラフィ技術を用いたフォトニックナノ構造デバイス,” 日本工業技術振興協会次世代リソグラフィ技術研究会, 2001 (招待講演).
- [299] 馬場俊彦, “導波, 発光制御: 何が見えてきたか?,” 応用物理学会春季講演会, no.SC-4, 2001 (招待講演).
- [300] 馬場俊彦, “Closing remarks,” 応用物理学会春季講演会, no.SC-10, 2001 (招待講演).
- [301] 深谷尚志, 茂木歩, 馬場俊彦, “フォトニック結晶導波路の光伝搬特性 --- SOIとエアブリッジの比較,” 応用物理学会春季講演会, no.30a-YK-2, 2001.
- [302] 神原浩平, 坂井篤, 馬場俊彦, “ウエハ融着を用いたSOI基板上III-V族微小光素子,” 応用物理学会春季講演会, no.28a-YF-11, 2001.
- [303] 牛込礼生奈, 富士田誠之, 馬場俊彦, “マイクロディスクレーザの電極パッド集積による熱抵抗低減,” 応用物理学会春季講演会, no.29a-ZT-10, 2001.
- [304] 富士田誠之, 馬場俊彦, “マイクロギア共振器のグレーティング深さ依存性,” 応用物理学会春季講演会, no.29a-ZH-11, 2001.
- [305] 富士田誠之, 手島浩惣, 馬場俊彦, “光励起型GaInAsPマイクロディスクレーザの室温連続動作,” 応用物理学会春季講演会, no.29a-ZT-11, 2001.
- [306] 岩井剛, 大崎大輔, 馬場俊彦, “突起構造をもつ2次元フォトニック結晶中の低群速度バンドにおける非線形増大,” 応用物理学会春季講演会, no.30p-YK-7, 2001.
- [307] 中村公紀, 大崎大輔, 馬場俊彦, “フォトニック結晶偏向素子のFDTD解析,” 応用物理学会春季講演会, no.30p-YK-5, 2001.
- [308] 大崎大輔, 馬場俊彦, “高い光透過率を示す突起つきフォトニック結晶構造 --- 構造の最適化,” 応用物理学会春季講演会, no.30p-YK-6, 2001.
- [309] 井下京治, 馬場俊彦, “ICPによるサブミクロン円孔配列の加工,” 応用物理学会春季講演会, no.31a-ZX-7, 2001.
- [310] 市川弘之, 井下京治, 馬場俊彦, 會澤康治, “CH₄-ECRプラズマ照射されたGaInAsP/InPのSIMS分析,” 応用物理学会春季講演会, no.31a-ZX-8, 2001.
- [311] 坂井篤, 原剛, 馬場俊彦, “SOI高密度光導波路の曲がり損失評価,” 応用物理学会春季講演会, no.31p-H-4, 2001.
- [312] 坂井篤, 深沢竜也, 馬場俊彦, “SOI 光導波路の分岐構造の検討,” 応用物理学会秋季講演会, no.12p-Y-14, 2001.

- [313] 富士田誠之, 馬場俊彦, “マイクロギア共振器の試作と評価,” 応用物理学会秋季講演会, no.13a-ZK-2, 2001.
- [314] 茂木歩, 馬場俊彦, “フォトニック結晶導波路の光伝搬評価(2) -- 1列欠陥での伝搬,” 応用物理学会秋季講演会, no.13p-ZK-3, 2001.
- [315] 岩井剛, 茂木歩, 深谷尚之, 馬場俊彦, “フォトニック結晶導波路の光伝搬評価(3) -実験と理論の対応,” 応用物理学会秋季講演会, no.13p-ZK-4, 2001.
- [316] 市川弘之, 馬場俊彦, “表面回折格子型2次元フォトニック結晶LEDの提案,” 応用物理学会秋季講演会, no.14a-ZK-8, 2001.
- [317] 富士田誠之, 馬場俊彦, “圧縮歪量子井戸ディスクレーザの歪緩和効果に関する考察,” 応用物理学会秋季講演会, no.14a-B-9, 2001.
- [318] 牛込礼生奈, 富士田誠之, 馬場俊彦, “ポリマー埋め込みディスクレーザのアサーマル効果,” 応用物理学会秋季講演会, no.14a-B-10, 2001.
- [319] 牛込礼生奈, 富士田誠之, 馬場俊彦, “BCBポリマー埋め込みディスクレーザの発振特性,” 応用物理学会秋季講演会, no.14a-B-11, 2001.
- [320] 馬場俊彦, “フォトニック結晶による光伝搬・発光制御,” 日本物理学会秋季講演会, no.19a-RF-7, 2001 (招待講演).
- [321] 馬場俊彦, “フォトニック結晶における各種光伝搬とデバイス応用,” 光産業技術振興協会フォトニック結晶シンポジウム「基礎基盤研究から産業応用へ」, no.3, 2002 (招待講演).
- [322] 馬場俊彦, “フォトニック結晶と光通信デバイスへの応用,” レーザ学会レーザエキスポ2002特別セミナー, no.O-2, 2002 (招待講演).
- [323] 深澤達彦, 坂井篤, 馬場俊彦, “高密度光集積用Si細線導波路,” 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, vol.102, no.88, pp.11-14 (OPE2002-12), 2002.
- [324] 松本崇, 馬場俊彦, “フォトニック結晶スーパープリズムフィルタの分解能,” 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, vol.102, no.88, pp.15-18 (OPE2002-13), 2002.
- [325] 馬場俊彦, “光波シミュレーション---フォトニック結晶を例にして,” 微小光学特別セミナー, no.5, 2002 (招待講演).
- [326] 馬場俊彦, “フォトニック結晶とマイクロレーザ,” 神奈川科学技術アカデミーフォトニクスの基礎と新展開コース, 2002 (招待講演).
- [327] 馬場俊彦, 井下京治, 茂木歩, 和泉哲郎, “ICPエッチング技術とフォトニック結晶,” 応用電子物性研究会, no.3, 2002 (招待講演).
- [328] 馬場俊彦, “フォトニック結晶研究の現状と将来展望,” 特許庁技術研修セミナー, 2002 (招待講演).
- [329] 佐野大介, 富士田誠之, 馬場俊彦, “直径2 μ mマイクロディスクレーザの光励起室温連続動作,” 応用物理学会春季講演会, no.28a-YQ-11, 2002.
- [330] 富士田誠之, 馬場俊彦, “マイクロギアレーザの室温連続発振,” 応用物理学会春季講演会, no.28a-YQ-12, 2002.
- [331] 牛込礼生奈, 中川敦生, 富士田誠之, 馬場俊彦, “BCBポリマー埋め込みディスクレーザの温度特性,” 応用物理学会春季講演会, no.28a-YQ-13, 2002.
- [332] 深澤竜彦, 坂井篤, 馬場俊彦, “Si細線導波路によるH-Tree型光信号分配回路,” 応用物理学会春季講演会, no.28p-ZS-5, 2002.
- [333] 坂井篤, 深澤竜彦, 馬場俊彦, “Si細線導波路の急激曲げにおける偏光回転,” 応用物理学会春季講演会, no.28p-ZS-6, 2002.

- [334] 井下京治, 和泉哲郎, 馬場俊彦, “形状が異なるフォトニック結晶欠陥共振器の共振モード観測,” 応用物理学会春季講演会, no.28p-ZF-6, 2002.
- [335] 市川弘之, 馬場俊彦, “表面回折格子型2次元フォトニック結晶LED (II) 効率の向上,” 応用物理学会春季講演会, no.28p-ZF-8, 2002.
- [336] 馬場俊彦, 松本崇, “フォトニック結晶スーパープリズムの分解能,” 応用物理学会春季講演会, no.28p-ZF-17, 2002.
- [337] 茂木歩, 馬場俊彦, “フォトニック結晶線欠陥導波路の60°曲げにおける透過特性計算,” 応用物理学会春季講演会, no.29p-L-4, 2002.
- [338] 井下京治, 和泉哲郎, 馬場俊彦, “フォトニック結晶導波路のカットオフ帯を利用する単一モード共振器,” 応用物理学会春季講演会, no.29p-L-12, 2002.
- [339] 岩井剛, 馬場俊彦, “2次元フォトニック結晶の Γ 点における非線形増大,” 応用物理学会春季講演会, no.29p-L-17, 2002.
- [340] 井下京治, 馬場俊彦, “ICPエッチングによるサブミクロン円孔配列の加工(II) エッチング機構の考察,” 応用物理学会秋季講演会, no.25a-ZB-1, 2002.
- [341] 野崎謙悟, 中川敦生, 佐野大介, 馬場俊彦, “様々な形状のマイクロギアレザの製作,” 応用物理学会秋季講演会, no.26p-YA-3, 2002.
- [342] 中川敦生, 馬場俊彦, “2重ディスクレザの製作と光結合の観測,” 応用物理学会秋季講演会, no.26p-YA-5, 2002.
- [343] 佐野大介, 馬場俊彦, “マイクロディスクレザのパースル効果,” 応用物理学会秋季講演会, no.26p-YA-6, 2002.
- [344] 深澤竜彦, 馬場俊彦, “Si細線導波路によるH-Tree回路の分岐比ばらつきの検証,” 応用物理学会秋季講演会, no.25p-YA-11, 2002.
- [345] 深澤竜彦, 平野智久, 馬場俊彦, “Si細線導波路における低損失交差の検討,” 応用物理学会秋季講演会, no.25p-YA-13, 2002.
- [346] 松本崇, 馬場俊彦, “波数ベクトルの特異性を利用するフォトニック結晶スーパープリズムの検討,” 応用物理学会秋季講演会, no.26a-YA-7, 2002.
- [347] 馬場俊彦, “フォトニック結晶とマイクロレザ,” 神奈川科学技術アカデミーフォトニクスの基礎と新展開コース, 2003 (招待講演).
- [348] 馬場俊彦, “半導体フォトニック結晶の物理と光デバイス応用及びSi光導波路,” 早稲田大ナノテクフォーラムマイクロ・ナノフォトニクス研究会, no.1, 2003 (招待講演).
- [349] 馬場俊彦, “フォトニック結晶によるレザ発振と光制御,” 電子情報通信学会超高速エレクトロニクス研究会, no.3, 2003 (招待講演).
- [350] 馬場俊彦, “ナノテクノロジーを用いたフォトニック結晶作製,” 高分子学会ナノ高分子ワークショップ, no.2, 2003 (招待講演).
- [351] 馬場俊彦, “フォトニック結晶の原理と応用,” 電子情報通信学会アンテナ・伝搬研究会, no.13, 2003 (招待講演).
- [352] 馬場俊彦, “PCとHICの狙いと棲み分け,” 電子情報通信学会集積光デバイス技術研究会, no.11, 2003 (招待講演).
- [353] 馬場俊彦, 深澤竜彦, “Si細線光導波路の現状と将来展望,” 光産業技術振興協会OEIC・光インターコネクション技術懇談会, no.1, 2003 (招待講演).
- [354] 馬場俊彦, “フォトニック結晶と細線光導波路の研究動向と展望,” 電子情報技術産業協会フォトニックネットワークデバイス技術専門委員会, no.1, 2003 (招待講演).

- [355] 馬場俊彦, “フォトニック結晶とマイクロレーザの世界,” (財) 東電記念科学技術研究所記念講演会, no.1, 2003.
- [356] 馬場俊彦, “フォトニック結晶とナノ構造フォトニクスの世界,” 電子情報通信学会東京支部学生会, no.2, 2003 (招待講演).
- [357] 松本崇, 馬場俊彦, “波数ベクトルの特異性を利用するフォトニック結晶スーパープリズムの検討(II) -- 高分解能条件の探索,” 応用物理学会春季講演会, no.28a-YN-3, 2003.
- [358] 森大祐, 馬場俊彦, “チャープ構造をもつフォトニック結晶導波路の検討,” 応用物理学会春季講演会, no.28p-YN-1, 2003.
- [359] 深澤竜彦, 平野智久, 馬場俊彦, “Si細線導波路を用いた様々な微小光素子の製作,” 応用物理学会春季講演会, no.28p-YN-13, 2003.
- [360] 井下京治, 馬場俊彦, “GaInAsPフォトニック結晶点欠陥レーザの発振特性,” 応用物理学会春季講演会, no.29p-YN-8, 2003.
- [361] 井下京治, 馬場俊彦, “点と線の複合欠陥共振器をもつフォトニック結晶レーザの発振/共振特性,” 応用物理学会春季講演会, no.29p-YN-9, 2003.
- [362] 野崎謙悟, 馬場俊彦, “フォトニック準結晶点欠陥レーザの検討,” 応用物理学会春季講演会, no.29p-YN-11, 2003.
- [363] 中川敦生, 野崎謙悟, 馬場俊彦, “2重ディスクレーザの製作と光結合の観測(II) -- 結合モードの評価,” 応用物理学会春季講演会, no.29p-YN-14, 2003.
- [364] 佐野大介, 馬場俊彦, “マイクロディスクレーザのパーセル効果(II) -- バンド内緩和と非発光効果の考慮,” 応用物理学会春季講演会, no.29p-YN-15, 2003.
- [365] 野崎謙悟, 中川敦生, 佐野大介, 馬場俊彦, “マイクロギアレーザの極低しきい値発振と単一モード化,” 応用物理学会春季講演会, no.29p-YN-16, 2003.
- [366] 井下京治, 黒木雄介, 馬場俊彦, “スリット構造や支柱構造によるフォトニック結晶点欠陥レーザの高性能化の検討,” 応用物理学会秋季講演会, no.31a-ZM-12, 2003.
- [367] 井下京治, 馬場俊彦, “線欠陥の曲げや分岐を微小共振器とするフォトニック結晶レーザ,” 応用物理学会秋季講演会, no.31a-ZM-8, 2003.
- [368] 水田栄一, 志賀正浩, 井下京治, 馬場俊彦, “GaInAsPフォトニック結晶線欠陥導波路の光励起に対する光入出力特性,” 応用物理学会秋季講演会, no.31a-ZM-13, 2003.
- [369] 井手利英, 馬場俊彦, 館林潤, 岩本敏, 中岡俊裕, 荒川泰彦, “InAs量子ドットウエハへのマイクロディスクレーザの形成,” 応用物理学会秋季講演会, no.31p-ZM-3, 2003.
- [370] 佐野大介, 馬場俊彦, “マイクロディスクレーザのパーセル効果(III) --- 時間応答特性の観測,” 応用物理学会秋季講演会, no.31p-ZM-5, 2003.
- [371] 野崎謙悟, 馬場俊彦, “12回対称フォトニック準結晶レーザの試作と評価,” 応用物理学会秋季講演会, no.31p-ZM-6, 2003.
- [372] 森藤康輔, 馬場俊彦, “ホーリーVCSELの安定単一横モード条件解析,” 応用物理学会秋季講演会, no.31p-ZM-10, 2003.
- [373] 中川敦生, 石井理, 馬場俊彦, “2重ディスクレーザによるフォトニック分子の光結合,” 応用物理学会秋季講演会, no.31p-ZM-12, 2003.
- [374] 中川敦生, 石井理, 馬場俊彦, “多重マイクロディスクによるフォトニック分子レーザの発振特性,” 応用物理学会秋季講演会, no.31p-ZM-13, 2003.
- [375] 志賀正浩, 井下京治, 馬場俊彦, 小山二三夫, “キャリアプラズマ効果によるフォトニック結晶共振器の共振波長シフト,” 応用物理学会秋季講演会, no.1p-ZM-7, 2003.

- [376] 深澤竜彦, 大野文彰, 馬場俊彦, “楯田交差型支持をもつエアブリッジ型Si細線導波路,” 応用物理学会秋季講演会, no.1a-ZM-8, 2003.
- [377] 深澤竜彦, 大野文彰, 馬場俊彦, “Si細線導波路による微小アレイ導波路回折格子,” 応用物理学会秋季講演会, no.1p-ZM-2, 2003.
- [378] 森大祐, 馬場俊彦, “チャープ構造フォトニック結晶導波路による光停止の考察,” 応用物理学会秋季講演会, no.1p-ZM-14, 2003.
- [379] 松本崇, 馬場俊彦, “kベクトルスーパープリズムのFDTD光伝搬方向解析,” 応用物理学会秋季講演会, no.2a-ZM-3, 2003.
- [380] 井上尚子, 馬場俊彦, “異方性を含むフォトニック結晶のFDTD解析,” 応用物理学会秋季講演会, no.2a-ZM-5, 2003.
- [381] 馬場俊彦, “フォトニック結晶デバイスの新しい試み,” 電子情報通信学会ソサイアティ大会, no.SC-1-11, 2003 (招待講演).
- [382] 馬場俊彦, “フォトニック結晶,” 日本オプトメカトロニクス協会2004フォトニクス技術研修会 ---先端光技術の基礎と応用---, no.I-8, 2004 (招待講演).
- [383] 馬場俊彦, “フォトニック結晶とフォトニックナノ構造の新たなデバイス応用,” 電子情報通信学会・東京支部「フォトニッククリスタル・基礎から製品まで」シンポジウム, no.5, 2004 (招待講演).
- [384] 馬場俊彦, “フォトニック結晶と高屈折率差光デバイス,” 東京工業大学精研セミナー, 2004 (招待講演).
- [385] 馬場俊彦, “フォトニック結晶光デバイス,” 東京工業大学精研シンポジウム「フォトニックネットワークデバイスの新展開(3)」, no.3, 2004 (招待講演).
- [386] 馬場俊彦, “フォトニック結晶のデバイス技術への応用,” 日本総合研究所ナノデバイス技術調査委員会, no.1, 2004 (招待講演).
- [387] 馬場俊彦, “フォトニック結晶とマイクロレーザ,” 神奈川科学技術アカデミー「先端フォトニクス」コース, 2004 (招待講演).
- [388] 馬場俊彦, “フォトニック結晶デバイス,” 日本学術振興会第130委員会研究会, no.2, 2004 (招待講演).
- [389] 馬場俊彦, “光波シミュレーション---フォトニック結晶を例にして,” 微小光学特別セミナー, no.2-1, 2004 (招待講演).
- [390] 馬場俊彦, “フォトニック結晶の基礎,” 旭硝子応用物理学講座, 2004 (招待講演).
- [391] 馬場俊彦, “フォトニック結晶デバイスの現状と課題,” フロンティアプロセス研究会, no.2-1, 2004 (招待講演).
- [392] 馬場俊彦, “フォトニック結晶デバイスの現状と将来展望,” ニューガラスフォーラム懇談会, 2004 (招待講演).
- [393] 馬場俊彦, “半導体微細構造フォトニック結晶とその応用,” サムコ薄膜技術セミナー, 2004 (招待講演).
- [394] 馬場俊彦, “フォトニック結晶研究と応用の最新動向,” 光産業技術振興協会マンスリーセミナー, 2004 (招待講演).
- [395] 野崎謙悟, 馬場俊彦, “フォトニック準結晶レーザの実証とレート方程式解析,” 電子情報通信学会レーザ量子エレクトロニクス研究会, vol.104, no.484, LQE2004-119, 2004.
- [396] 井手利英, 馬場俊彦, 館林潤, 岩本敏, 中岡俊裕, 荒川泰彦, “InAs 量子ドットマイクロディスプレイレーザの室温発振特性,” 電子情報通信学会レーザ量子エレクトロニクス研究会,

vol.104, no.484, LQE2004-120, 2004.

- [397] 古川昭夫, 佐々木智, 星光成, 松園淳史, 森藤康輔, 馬場俊彦, “三角孔を有する高出力単一横モード面発光レーザ,” 電子情報通信学会レーザ量子エレクトロニクス研究会, vol.104, no.484, LQE2004-124, 2004 (招待講演).
- [398] 馬場俊彦, “フォトニック結晶バッファーとアンプ,” 光産業技術振興協会ブレイクスルーフォーラム, no.12, 2004.
- [399] 馬場俊彦, “フォトニック結晶応用の現状と展望,” 応用物理学会春季講演会, no.28a-ZM-1, 2004 (招待講演).
- [400] 馬場俊彦, “スーパープリズムの応用と将来展望,” 応用物理学会春季講演会, no.28p-ZM-6, 2004 (招待講演).
- [401] 水田栄一, 馬場俊彦, “多層構造フォトニック結晶線欠陥導波路の提案,” 春季応用物理学会講演会, no.29a-M-3, 2004.
- [402] 森大祐, 馬場俊彦, “屈折率チャープ構造フォトニック結晶導波路方向性結合器による分散制御群遅延素子,” 春季応用物理学会講演会, no.29a-M-9, 2004.
- [403] 馬場俊彦, “Si細線による1.5 μ m帯光導波路,” 応用物理学会春季講演会, no.29p-ZZ-6, 2004 (招待講演).
- [404] 志賀正浩, 馬場俊彦, “フォトニック結晶共振器の高Q値化と光励起による共振波長シフトの詳細測定,” 春季応用物理学会講演会, no.29p-M-15, 2004.
- [405] 深澤竜彦, 大野文彰, 馬場俊彦, “Si細線導波路によるアレイ導波路回折格子の構造最適化,” 春季応用物理学会講演会, no.29p-M-21, 2004.
- [406] 黒木雄介, 井下京治, 馬場俊彦, “小円孔を配置したフォトニック結晶点欠陥レーザの発振特性,” 春季応用物理学会講演会, no.30a-M-4, 2004.
- [407] 野崎謙悟, 馬場俊彦, “12回対称フォトニック準結晶レーザの発振特性(1) 欠陥モード,” 春季応用物理学会講演会, no.30a-M-6, 2004.
- [408] 井手利英, 馬場俊彦, 館林潤, 岩本敏, 中岡俊裕, 荒川泰彦, “InAs量子ドットマイクロディスクの温度依存性測定,” 春季応用物理学会講演会, no.30a-M-8, 2004.
- [409] 野崎謙悟, 馬場俊彦, “2次元レート方程式による様々な微小レーザでのキャリアと光子の解析,” 春季応用物理学会講演会, no.30a-M-9, 2004.
- [410] 佐野大介, 野崎謙吾, 黒木雄介, 井下京治, 馬場俊彦, “フォトニック結晶点欠陥レーザにおけるパーセル効果の観測,” 春季応用物理学会講演会, no.30a-M-11, 2004.
- [411] 森藤康輔, 馬場俊彦, “ホーリーVCSELの完全3次元モデル化による安定単一横モード条件解析,” 春季応用物理学会講演会, no.30p-M-5, 2004.
- [412] 石井理, 中川敦生, 馬場俊彦, “2重ディスクから成るフォトニック分子レーザの双安定特性調査,” 春季応用物理学会講演会, no.30p-M-1, 2004.
- [413] 水田栄一, 馬場俊彦, “低 Δ スラブフォトニック結晶線欠陥導波路の伝搬損失解析,” 春季応用物理学会講演会, no.30p-P18-7, 2004.
- [414] 森大祐, 馬場俊彦, “屈折率チャープ構造フォトニック結晶導波路による反射型分散制御素子,” 春季応用物理学会講演会, no.30p-P18-8, 2004.
- [415] 大野文彰, 深澤竜彦, 馬場俊彦, “Si細線導波路の微小分岐を用いたマッハ-ツェンダー干渉計の評価,” 春季応用物理学会講演会, no.30p-P18-9, 2004.
- [416] 越前学, 松本崇, 馬場俊彦, “フォトニック結晶スーパープリズムの反射低減構造の探索,” 春季応用物理学会講演会, no.30p-P18-10, 2004.

- [417] 井下京治, 黒木雄介, 馬場俊彦, “支柱構造をもつフォトニック結晶欠陥レーザの室温連続動作の検討,” 春季応用物理学会講演会, no.30p-P18-15, 2004.
- [418] 野崎謙悟, 馬場俊彦, “12回対称フォトニック準結晶レーザの発振特性(2) 無欠陥モード,” 春季応用物理学会講演会, no.30p-P18-16, 2004.
- [419] 松本崇, 越前学, 馬場俊彦, “kベクトルスーパープリズムの初期的なフィルタ特性観測,” 春季応用物理学会講演会, no.31a-M-9, 2004.
- [420] 井上尚子, 馬場俊彦, “異方性媒質を含むフォトニック結晶スラブの偏光回転効果,” 春季応用物理学会講演会, no.31a-M-10, 2004.
- [421] 森大祐, 馬場俊彦, “チャープ構造フォトニック結晶導波路光群遅延素子の遅延時間評価,” 秋季応用物理学会講演会, no.2a-ZC-4, 2004.
- [422] 松本崇, 馬場俊彦, “kベクトルプリズムへの集光レンズ集積の検討,” 秋季応用物理学会講演会, no.2a-ZC-7, 2004.
- [423] 井上尚子, 馬場俊彦, “異方性フォトニック結晶スラブの偏光回転効果の広帯域化,” 秋季応用物理学会講演会, no.2a-ZC-10, 2004.
- [424] 橋本惇一, 井手利英, 馬場俊彦, “EBレジストとCl₂/HI/Xe-ICPエッチングを用いたInP系フォトニック結晶の形成,” 秋季応用物理学会講演会, no.2p-ZC-7, 2004.
- [425] 大野文彰, 深澤竜彦, 馬場俊彦, “Si細線導波路の微小分岐と結合器を用いたマッハ-ツェンダー干渉計の評価,” 秋季応用物理学会講演会, no.2p-ZC-13, 2004.
- [426] 茂木歩, 深澤竜彦, 大野文彰, 馬場俊彦, “Si細線導波路AWGの波長分波特性の改善,” 秋季応用物理学会講演会, no.2p-ZC-16, 2004.
- [427] 野崎謙悟, 馬場俊彦, “12回対称フォトニック準結晶レーザのフーリエ空間解析,” 秋季応用物理学会講演会, no.3a-ZC-1, 2004.
- [428] 野崎謙悟, 馬場俊彦, “2次元レート方程式解析を用いたフォトニック準結晶レーザの実効的な表面再結合速度の見積もり,” 秋季応用物理学会講演会, no.3a-ZC-2, 2004.
- [429] 黒木雄介, 馬場俊彦, “GaInAsPバルク円孔配列フォトニック結晶の表面再結合速度測定,” 秋季応用物理学会講演会, no.3a-ZC-9, 2004.
- [430] 井手利英, 馬場俊彦, 館林潤, 岩本敏, 中岡俊裕, 荒川泰彦, “InAs量子ドットマイクロディスクレーザの室温連続発振,” 秋季応用物理学会講演会, no.3a-ZC-12, 2004.
- [431] 石井理, 馬場俊彦, “2重ディスクから成るフォトニック分子レーザの双安定特性調査(II) 強結合と弱結合の違い,” 秋季応用物理学会講演会, no.3a-ZC-13, 2004.
- [432] 水田栄一, 馬場俊彦, “フォトニック結晶線欠陥導波路の光増幅器実現のための考察,” 秋季応用物理学会講演会, no.3p-ZC-18, 2004.
- [433] 森藤康輔, 馬場俊彦, “表面回折格子型QPC-LEDによる光取り出し効率の3次元FDTD解析,” 秋季応用物理学会講演会, no.3p-ZC-18, 2004.
- [434] 古川昭夫, 佐々木智, 星光成, 松園淳史, 森藤康輔, 馬場俊彦, “三角孔を有する高出力単一横モード面発光レーザ,” 秋季応用物理学会講演会, no.4a-ZC-1, 2004.
- [435] 森藤康輔, 馬場俊彦, “ホーリーVCSELの完全3次元モデル化による安定単一横モード条件解析(II) -実験結果との対応,” 秋季応用物理学会講演会, no.4a-ZC-2, 2004.
- [436] 馬場俊彦, “フォトニック結晶における低群速度の利用,” 量子エレクトロニクス研究会「フォトニック結晶の物理と応用」, no.8, 2005 (招待講演).
- [437] 馬場俊彦, “フォトニック結晶,” 日本オプトメカトロニクス協会2004フォトンクス技術研修会 ---先端光技術の基礎と応用---, no.I-8, 2005 (招待講演).

- [438] 森大祐, 馬場俊彦, “チャープ構造フォトニック結晶導波路による光群遅延素子の伝搬特性解析,” 電子情報通信学会レーザ量子エレクトロニクス研究会, vol.104, no.601, LQE2004-143 (2005-1), 2005.
- [439] 馬場俊彦, “フォトニック結晶による発光制御と伝搬速度制御,” 日本学術振興会第130委員会研究会, p.13, 2005.
- [440] 馬場俊彦, “ここまで進んだフォトニック結晶デバイス研究,” レーザエキシポ2005, no.I-1, 2005 (招待講演).
- [441] 馬場俊彦, 茂木歩, 大野文彰, 佐々木康輔, 深澤達彦, “シリコン細線導波路光デバイス,” 電子情報通信学会シリコン・フォトニクス研究会, no.SIPH2004-18, 2005 (招待講演).
- [442] 馬場俊彦, “フォトニック結晶 - その原理と性質 -,” 神奈川科学技術アカデミー「先端フォトニクス」コース, 2005 (招待講演).
- [443] 松本崇, 藤田晋司, 馬場俊彦, “スーパーレンズを組み合わせたフォトニック結晶スーパープリズムフィルタのFDTD解析,” 電子情報通信学会レーザ量子エレクトロニクス研究会/光エレクトロニクス研究会, 2005.
- [444] 野崎謙悟, 橋本惇一, 井手利英, 水田栄一, 志賀正浩, 馬場俊彦, “ヨウ化水素系ICPエッチングを用いたInP系半導体フォトニック結晶の製作,” 電子情報通信学会レーザ量子エレクトロニクス研究会/光エレクトロニクス研究会, 2005.
- [445] 石井理, 馬場俊彦, “2重マイクロディスクによるフォトニック分子と双安定動作,” 電子情報通信学会レーザ量子エレクトロニクス研究会/光エレクトロニクス研究会, 2005.
- [446] 馬場俊彦, “フォトニック結晶とシリコンフォトニクスの最近の進展,” 電子情報通信学会超高速光エレクトロニクス研究会, no.2, 2005 (招待講演).
- [447] 馬場俊彦, “フォトニックナノ構造光デバイス,” YUVECナノテクノロジーシンポジウム, no.24M, 2005.
- [448] 馬場俊彦, “フォトニック結晶光バッファーの可能性,” 情報通信研究機構光バッファーマナー, 2005 (招待講演).
- [449] 馬場俊彦, 松本崇, “Light propagation control by 2D photonic crystals --- superprism effect ---,” 科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 (CREST) 「電子・光子等の機能制御」シンポジウム, no.87, 2005.
- [450] 馬場俊彦, 森大祐, “Light propagation control by 2D photonic crystals --- slow light effect ---,” 科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 (CREST) 「電子・光子等の機能制御」シンポジウム, no.88, 2005.
- [451] 馬場俊彦, “Novel light propagation phenomena of 2D photonic crystals,” 科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 (CREST) 「電子・光子等の機能制御」シンポジウム, no.3-2, 2005.
- [452] 馬場俊彦, “フォトニック結晶光バッファーの可能性,” 光バッファーマニシンポジウム, 2005.
- [453] 馬場俊彦, “High Index Contrast光機能デバイス,” 電子情報通信学会光通信システムシンポジウム, 2005 (招待講演).
- [454] 馬場俊彦, “次世代光通信へのフォトニック結晶技術,” 春季応用物理学会講演会, no.30a-ZH-4, 2005 (招待講演).
- [455] 橋本惇一, 井手利英, 野崎謙悟, 馬場俊彦, “EBレジストとHI/Xe-ICPを用いたInP系フォトニック結晶高アスペクト比エッチング,” 春季応用物理学会講演会, no.29a-YV-8, 2005.
- [456] 茂木歩, 大野文彰, 佐々木孝輔, 馬場俊彦, “Si細線導波路を用いたCWDM用超小型アレイ導波路回折格子,” 春季応用物理学会講演会, no.29a-YV-11, 2005.

- [457] 松本崇, 藤田晋司, 馬場俊彦, “フォトニック結晶スーパープリズムとスーパーレンズを用いた波長フィルタ,” 春季応用物理学会講演会, no.29p-YV-3, 2005.
- [458] 松本崇, 藤田晋司, 馬場俊彦, “フォトニック結晶スーパーレンズの集光能力,” 春季応用物理学会講演会, no.29p-YV-4, 2005.
- [459] 松本崇, 馬場俊彦, “スーパーレンズのための位置無依存なアパチャーの検討,” 春季応用物理学会講演会, no.29p-YV-5, 2005.
- [460] 森大祐, 川上泰宏, 馬場俊彦, “チャープ構造フォトニック結晶導波路光群遅延素子の基礎特性,” 春季応用物理学会講演会, no.29p-YV-9, 2005.
- [461] 森大祐, 馬場俊彦, “フォトニック結晶結合導波路の偶モードを利用した光群遅延素子,” 春季応用物理学会講演会, no.29p-YV-10, 2005.
- [462] 坂井篤, 加藤幾雄, 滝口康之, 森大祐, 馬場俊彦, “低群速度・低分散を有する1列線欠陥導波路,” 春季応用物理学会講演会, no.29p-YV-14, 2005.
- [463] 水田栄一, 井手利英, 橋本惇一, 野崎謙悟, 馬場俊彦, “フォトニック結晶光増幅器のための低スラブ線欠陥導波路の光伝搬特性,” 春季応用物理学会講演会, no.30a-YV-6, 2005.
- [464] 森藤康輔, 馬場俊彦, “インコヒーレント励振を用いたフォトニック結晶LEDのFDTD解析,” 春季応用物理学会講演会, no.31a-YV-5, 2005.
- [465] 井手利英, 馬場俊彦, 館林潤, 岩本敏, 中岡俊裕, 荒川泰彦, “電流注入型InAs量子ドットマイクロディスクレーザの製作,” 応用物理学会春季講演会, no.31a-YV-1, 2005.
- [466] 石井理, 馬場俊彦, “2重ディスクから成るフォトニック分子レーザの双安定特性調査(II) 急峻なヒステリシス,” 春季応用物理学会講演会, no.31a-YV-3, 2005.
- [467] 野崎謙悟, 黒木雄介, 馬場俊彦, “12回対称フォトニック準結晶単一欠陥レーザの発振特性評価,” 春季応用物理学会講演会, no.31a-YV-8, 2005.
- [468] 馬場俊彦, 森大祐, “フォトニック結晶光バッファ・メモリの可能性,” 応用物理学会秋季講演会, no.8a-ZE-4, 2005 (招待講演).
- [469] 森大祐, 川崎俊史, 久保将策, 馬場俊彦, “チャープ構造フォトニック結晶導波路光群遅延素子の基礎特性(II) 群速度の評価,” 応用物理学会秋季講演会, no.8p-H-6, 2005.
- [470] 大野文彰, 佐々木孝輔, 馬場俊彦, “Si細線AWGのサイドローブ低減 (I) 理論的考察,” 応用物理学会秋季講演会, no.8p-H-8, 2005.
- [471] 佐々木孝輔, 大野文彰, 馬場俊彦, “Si細線AWGのサイドローブ低減 (II) 構造の改善,” 応用物理学会秋季講演会, no.8p-H-9, 2005.
- [472] 井上尚子, 馬場俊彦, “液晶フォトニック結晶スラブの面内伝搬共振特性観測,” 応用物理学会秋季講演会, no.8p-H-20, 2005.
- [473] 黒木雄介, 森藤康輔, 馬場俊彦, “層構造を最適化したフォトニック結晶LEDの光取り出し増大,” 応用物理学会秋季講演会, no.9a-H-3, 2005.
- [474] 松本崇, 嚴謹宣, 馬場俊彦, “フォトニック結晶スーパーレンズの光伝搬特性観測,” 応用物理学会秋季講演会, no.9a-H-1, 2005.
- [475] 野崎謙悟, 井手利英, 橋本惇一, W-H. Zheng, 馬場俊彦, “極微小共振モードをもつ格子シフトフォトニック結晶ナノレーザ,” 応用物理学会秋季講演会, no.9p-H-1, 2005.
- [476] 野崎謙悟, 黒木雄介, 馬場俊彦, “格子シフトナノ共振器レーザのキャリア寿命測定,” 応用物理学会秋季講演会, no.9p-H-2, 2005.
- [477] 水田栄一, 井手利英, 橋本惇一, 馬場俊彦, 喜瀬智文, 清田和明, 横内則之, “全半導体フォトニック結晶アクティブ導波路の光励起入出力特性,” 応用物理学会秋季講演会,

no.9p-H-3, 2005.

- [478] 石井理, 野崎謙悟, 馬場俊彦, “フォトニック結晶点欠陥共振器からなるフォトニック分子レーザー,” 応用物理学会秋季講演会, no.9p-H-6, 2005.
- [479] 清田和明, 喜瀬智文, 横内則之, 井手利英, 馬場俊彦, “フォトニック結晶線欠陥導波路における様々な低群速度効果のレーザー発振による検証,” 応用物理学会秋季講演会, no.9p-H-7, 2005.

5.3 特許出願

- [1] 野田 進, 横山 光, 波多野 卓史:「二次元フォトニック結晶面発光レーザー」, 科学技術振興事業団, ミノルタ株式会社, 特願2001-204315 (A112P21, 2001.7.5), 特開2003-023193 (2003.1.24), 日本国特許第3561244号(04.6.4), PCT出願(PCT/JP02/06764) (A112-23PCT, 2002.7.3), 米国, EP(独・仏・英), カナダ, 中国へ移行.
- [2] 野田 進, 横山 光, 関根 孝二郎:「2次元フォトニック結晶面発光レーザー及びその製造方法」, 科学技術振興事業団, ミノルタ株式会社, 特願2002-71084(A112P47, 2002.3.14), 特開2003-273453 (2003.9.26).
- [3] 野田 進, 横山 光, 関根 孝二郎:「2次元フォトニック結晶面発光レーザー」, 科学技術振興事業団, ミノルタ株式会社, 特願2002-71085 (A112P48, 2002.3.14), 特開2003-273454 (2003.9.26).
- [4] 野田 進, 横山 光, 関根 孝二郎:「2次元フォトニック結晶面発光レーザー及びその製造方法」, 科学技術振興事業団, ミノルタ株式会社, 特願2002-71086 (A112P49, 2002.3.14), 特開2003-273455 (2003.9.26).
- [5] 野田 進, 横山 光, 関根 孝二郎:「2次元フォトニック結晶面発光レーザー」, 科学技術振興事業団, ミノルタ株式会社, 特願2002-71087 (A112P50, 2002.3.14), 特開2003-273456 (2003.9.26).
- [6] 野田 進, 横山 光, 関根 孝二郎:「2次元フォトニック結晶面発光レーザーアレイ及び2次元フォトニック結晶面発光レーザー」, 科学技術振興事業団, ミノルタ株式会社, 特願2002-71083 (A112P46, 2002.3.14), 特開2003-273460 (2003.9.26).
- [7] 野田 進, 望月 理光, 浅野 卓:「2次元フォトニック結晶光分合波器」, 科学技術振興事業団, 特願2002-86221(A112P43, 2002.3.26), 特開2003-279764 (2003.10.2), 日本国特許第3458827号 (03.8.8), PCT出願(PCT/JP03/03762, 2003.3.26) (A112-27PCT), 米, EP(独, 仏, 英), 中国へ移行.
- [8] 野田 進, 浅野 卓:「2次元フォトニック結晶点欠陥干渉光共振器及び光反射器」, 科学技術振興事業団, 特願2002-86222 (A112P44, 2002.3.26), 特開2003-279765 (2003.10.2), PCT出願(PCT/JP03/03763, 2003.3.26) (A112-28PCT), 米, EP(独, 仏, 英), 中国へ移行.
- [9] 野田 進, 岡野 誠:「導波路を備えた3次元フォトニック結晶光共振器」, 科学技術振興事業団, 特願2002-207727 (2002.7.17), 特開2004-004419 (2004.1.8), 優先権主張出願: 特願2002-86220 (A112P42)(2002.3.26).
- [10] 野田 進, 岡野 誠:「点欠陥3次元フォトニック結晶光共振器」, 科学技術振興事業団, 特願2002-207726 (A112P57, 2002.7.17), 特開2004-006567 (2004.1.8)優先権主張出願: 特願2002-86219 (A112P41) (2002.3.26), PCT出願(PCT/JP03/03764, 2003.3.26)(A112-26PCT).
- [11] 野田 進, 浅野 卓, 田中 良典:「局所的3次元構造を有する2次元フォトニック結晶スラブ」, 独立行政法人 科学技術振興機構, 特願2002-355631 (A112P60, 2002.12.6), 特開2004-191408 (2004.7.8), 日本国特許第3568943号 (04.6.25), PCT出願(PCT/JP03/15635, 2003.12.5) (A112-31PCT), 米, EP(独, 仏, 英), 中国, 韓国へ移行.
- [12] 野田 進, 浅野 卓, 高野 仁路:「電磁波周波数フィルタ」, 独立行政法人 科学技術振興機

構, 松下電工株式会社, 特願2002-378438(A112P62, 2002.12.26), 特開2004-212416 (2004.7.29), 日本国特許第3692354号 (05.6.24), PCT出願(PCT/JP03/16515, 2003.12.24)(A112-33PCT), 米, EP(独, 仏, 英), 中国, 韓国, 台湾へ移行.

- [13] 野田 進, 今田 昌宏, 小川 新平:「異種部材の熱圧着方法」, 独立行政法人 科学技術振興機構, 特願2003-006678 (A112P71, 2003.1.15), 特開2004-219688 (2004.8.5)30条適用出願.
- [14] 野田 進, 浅野 卓:「境界反射を利用した2次元フォトリック結晶光分合波器」, 独立行政法人 科学技術振興機構, 特願2003-57245 (A112P75, 2003.3.4), 特開2004-233941 (2004.8.19), 日本国特許第3682289号 (05.5.27), 優先権主張出願: 特願2002-355632 (A112P61) (2002.12.6), PCT出願(PCT/JP03/15636, 2003.12.5) (A112-32PCT), 米, EP(独, 仏, 英), 中国, 韓国へ移行.
- [15] 野田 進, 横山 光, 関根 孝二郎, 宮井 英次:「2次元フォトリック結晶面発光レーザ」, 独立行政法人 科学技術振興機構, コニカミノルタホールディングス株式会社, 特願2003-83706 (2003.3.25), 特開2004-296538 (2004.10.21), PCT出願(PCT/JP2004/003987, 2004.3.23) (A112-36PCT), 米, EP(独, 仏, 英), カナダ, 中国, 韓国へ移行.
- [16] 野田 進, 浅野 卓, 宋 奉植, 高野 仁路:「電磁波周波数フィルタ」, 独立行政法人科学技術振興機構, 松下電器工業株式会社, 特願2003-307266 (A112P88, 2003.8.29), 特開2005-077673 (2005.3.24), PCT出願(PCT/JP2004/012287, 2004.8.26) (A112-40PCT).
- [17] 野田 進, 赤羽 良啓, 浅野 卓:「2次元フォトリック結晶分合波器」, 独立行政法人科学技術振興機構, 住友電気工業株式会社, 特願2003-307654 (A112P87, 2003.8.29), 特開2005-077709 (2005.3.24), PCT出願(PCT/JP2004/012114, 2004.8.24)(A112-39PCT).
- [18] 北川 均, 野田 進, 浅野 卓:「2次元フォトリック結晶スラブ及びこれを用いた光デバイス」, アルプス電気株式会社, 独立行政法人 科学技術振興機構, 特願2003-083235 (2004.3.25), 特開2004-294517 (2004.10.21).

※委託契約に基づく研究機関からの出願

特願2003-32473(2003.2.10), 特願2003-71834 (2003.3.17), 特願2003-71947 (2003.3.17), 特願2003-307656 (2003.8.29), 特願2003-307657 (2003.8.29), 特願2003-307655 (2003.8.29), 特願2003-409208 (2003.12.8), 特願2003-409209 (2003.12.8), 特願2004-058981 (2004.3.3), 特願2004-061147 (2004.3.4), 特願2004-061737 (2004.3.5), 特願2004-063110 (2004.3.5), 特願2004-090407 (2004.3.25), 特願2004-090412 (2004.3.25), 特願2004-215648 (2004.7.23), 特願2004-249582 (2004.8.30), 特願2004-251313 (2004.8.31), 特願2004-257591 (2004.9.3), 特願2004-261617 (2004.9.8), 特願2004-378706 (2004.12.28), 特願2004-378707 (2004.12.28), 特願2005-022724 (2005.1.31), 特願2005-106729 (2005.3.5), 特願2005-080361 (2005.3.18), 特願2005-084806 (2005.3.23), 特願2005-094385 (2005.3.29), 特願2005-255638 (2005.9.2), 特願2005-255878 (2005.9.5).

5.4 受賞等

(1) 受賞

- [1] 2002年12月5日: 野田進, 光協会櫻井健二郎氏記念賞, 業績:「完全3次元フォトリック結晶および2次元フォトリック結晶レーザーの実現」
- [2] 2003年8月30日: 宋奉植, 応用物理学会講演奨励賞受賞, 業績:「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] 2003年12月8日: 横山光、野田進, 日本光学会光設計奨励賞受賞, 業績:「2次元フォトリック結晶面発光レーザーの偏光制御」

- [4] 2004年9月22日: 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, 業績: 「フォトニック結晶に関する先駆的・独創的研究」
- [5] 2004年11月1日: 野田進, 大阪科学賞, 業績: 「フォトニック結晶に関する先駆的・独創的研究」
- [6] 2005年3月29日: 野田進, 応用物理学会光量子エレクトロニクス業績賞, 業績: 「半導体フォトニック結晶に関する研究」
- [7] 2005年3月29日: 田中良典, 応用物理学会講演奨励賞 業績: 「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] 2005年4月25日: 野田進, 国際コミュニケーション基金優秀研究賞, 業績: 「半導体フォトニック結晶を用いた超小型光回路の研究」
- [9] 2005年10月24日: Susumu Noda, IEEE/LEOS Distinguished Lecture Award (2003-2005).

(2) 新聞報道

[1]	英科学誌Nature	2003年10月30日	Defective quality (Ed Gerstner)
[2]	米科学誌サイエンス	2004年7月9日	Woodpiles for Photons (U. Goesele)
[3]	英科学誌Nature Materials	2003年12月号	Cavities without leaks (Thomas F. Krauss)
[4]	〃	2005年3月号	表紙、Cover Story
[5]	米国AN MIT ENTERPRISE TECHNOLOGY REVIEW	2004年8月6日	3D Designs Advanced Light Chips
[6]	米国EE Times	2004年7月26日	3D optical chip process yields high-Q for telecom
[7]	米国Laser Focus World	2001年1月号	Defects select individual wavelengths
[8]	米国Light Reading	2000年11月2日	The Hole Thing
[9]	米国Materials Research Society (MRS) Materials Connections	2003年11月11日	High-Q Photonic Nanocavities in a 2D Photonic Crystal Demonstrated
[10]	米国 IU MRS Facets	2003年1月号	Semiconductor-based Photonic Crystals
[11]	米国optics.org-- The Online Photonics Resource	2001年10月	ECOC showcases photonic crystals
[12]	米国Photonics Spectra	2000年11月号	Semiconductors Stack Up as Photonic Crystals
[13]	〃	2001年2月号	Defects Pave the Way for New Optical Devices
[14]	〃	2002年1月号	Photonic Crystal Lattice Control Laser Polarization
[15]	〃	2003年8月号	Photonic Crystal Device Demonstrates Design Rules

[16]	米国Physics web	2000年10月	Defects boost optical communications
[17]	〃	2005年5月26日	Spontaneous improvements on the horizon
[18]	米国Scientific American	2004年6月7日	Crystal shows promise for optical communication
[19]	米国SPIE OE Magazine	2001年10月 号	Teaching Light New Tricks
[20]	〃	2004年9月 号	Photonic Crystal Emitter Controls Light in Three Dimension
[21]	米国Technical Insights (John Wiley & Sons, Inc.)	2000年10月6日	One Defect Is Enough To Manipulate Photons
[22]	米国IEEE LEOS Newsletter	2004年6月 号	Focus on LEOS 2003-04 Distinguished Lecturers
[23]	米国Technology Research News	2000年11月22日	Holey chips channel light
[24]	〃	2003年6月18日	Chip sorts colors
[25]	〃	2004年7月28日	Photonic chips go 3D
[26]	〃	2005年6月29日	Crystal promises more light
[27]	英国 Materials Today	2004年9月 号	Designer defects show light touch
[28]	仏国Science & Vie	2000年10月1日	En route pour Photoniqueville
[29]	米国Scientific American	2004年6月7日	Crystal shows promise for optical communication
[30]	NHKニュース	2005年5月27日	フォトニック結晶で高効率光制御に成功
[31]	讀賣新聞	2000年7月28日	超小型光チップへ一歩-新半導体結晶京大など開発
[32]	〃	2000年10月5日	光自在に曲げる通信新素材
[33]	〃	2001年10月17日	世界最先端の高精度光結晶
[34]	〃	2003年11月3日	極薄の板に光閉じ込め--世界最高率のナノテク
[35]	〃	2004年9月18日	大阪科学賞に西田、野田教授
[36]	〃	2005年5月27日	LED明るさ5倍 京大など実験成功
[37]	毎日新聞	2003年6月6日	波長の違う光をより分け

[38]	〃	2003年11月19日	「フォトニック結晶」使い、光の自在な制御を目指す
[39]	〃	2004年6月10日	次世代光通信材料フォトニック結晶ー物質の発光現象制御、京大・野田教授ら成功
[40]	〃	2004年9月18日	大阪科学賞決まる
[41]	〃	2005年2月19日	光制御：10倍長く閉じ込めた 京大チームが確立、約1ナノ秒ー次世代通信へ一歩ー
[42]	〃	2005年5月27日	穴が導く 実用化の光 京大などチーム発見 効率の悪さ解消
[43]	朝日新聞	2004年3月24日	「フォトニック結晶」光閉じ込め操作自在
[44]	〃	2004年6月4日	光操る半導体結晶ー方向・増幅自在「通信革新」に道ー京大グループ開発、世界初
[45]	〃	2004年9月18日	大阪科学賞決まる
[46]	〃	2005年6月21日	微小の穴で光を自在に操縦 京大グループ
[47]	産経新聞	2004年6月21日	技術立国 日本の逆襲 第4部①光産業立国「光を自在に扱う物質開発」
[48]	〃	2004年9月18日	大阪科学賞に西田、野田の両氏
[49]	〃	2005年5月27日	発光ダイオード数倍明るく 京大教授ら実証
[50]	日本経済新聞	2001年8月10日	まっすぐな光発振面発光レーザー開発
[51]	〃	2003年6月6日	光信号を波長で分ける素子開発
[52]	〃	2003年10月17日	半導体レーザー発光面積1000倍
[53]	〃	2004年3月5日	光通信向け素子 より小さく大容量にー京大など：サイズ10万分の1、NTT：通信情報量56倍にー
[54]	〃	2004年6月4日	フォトニック結晶利用 発光現象の制御 京大教授ら成功
[55]	〃	2004年9月18日	大阪科学賞に大学2教授
[56]	〃	2005年5月27日	LED 発光効率大幅に向上 京大など研究グループ 理論上は100%にも
[57]	京都新聞	2000年10月5日	波長に合わせて自由自在「光結晶」を開発 - 超小型、光通信活用へ

[58]	〃	2001年8月10日	大出力で単一波長発振半導体レーザー
[59]	〃	2003年6月6日	世界最小「光素子」を開発
[60]	〃	2003年6月11日	面発光レーザー産学連携で開発
[61]	〃	2003年10月30日	光閉じ込める極小の共振器--次世代通信へ応用期待
[62]	〃	2004年6月4日	半導体の結晶で光を自由制御ー世界初、京大教授ら
[63]	〃	2004年9月18日	野田京大教授ら大阪科学賞 科学技術の発展に貢献
[64]	〃	2005年2月14日	京大 光閉じ込め最長更新ーメモリー実用化へ道ー
[65]	〃	2005年5月27日	発光ダイオード効率グンとアップ 京大教授らグループ
[66]	科学新聞	2000年10月13日	光子をコントロール超微小型光学素子に利用も
[67]	〃	2001年8月24日	フォトリソ結晶で新型レーザーを開発
[68]	〃	2003年6月20日	フォトリソ結晶で光ナノデバイス実現
[69]	〃	2003年11月7日	世界最大：光閉じ込め効果--フォトリソ結晶を用いて光ナノ共振器実現
[70]	〃	2004年6月4日	「光集積回路」特許 日本が欧米を圧倒ーPLCとフォトリソ結晶ー
[71]	〃	2004年6月11日	3次元フォトリソ結晶で究極の光制御に成功ー京大の研究グループが世界初ー
[72]	〃	2005年2月18日	野田・京大教授ら 光ダブル・ヘテロ構造開発 閉じ込め記録を大幅更新
[73]	半導体産業新聞	2003年11月5日	フォトリソ結晶半導体レーザーで低しきい値実現
[74]	日本工業新聞	2003年6月6日	光を高効率に制御-光分波器1万分の1に小型化
[75]	〃	2003年10月30日	光閉じ込め世界最大--2次元フォトリソ結晶利用 小型光ナノ共振器
[76]	日経産業新聞	2000年10月5日	光信号を分離・合流 - 京大、高速通信用に新材料

[77]	〃	2001年8月10日	まっすぐ強い光出す
[78]	〃	2003年6月6日	ナノ関連の結晶使い新素子
[79]	〃	2003年10月30日	光分離素子、精度10倍に
[80]	〃	2004年6月4日	次世代材料で発光現象制御ー京大が実験ー
[81]	〃	2004年11月18日	21世紀の気鋭 光を操る結晶実現
[82]	〃	2005年2月15日	光を1ナノ秒蓄える構造 京大と住友電工シリコン薄膜内に
[83]	〃	2005年5月27日	LED 発光効率4-5倍 京大・JST 半導体に周期構造
[84]	日刊工業新聞	2000年7月21日	3次元フォトリック結晶作製 - 光通信帯で完全特性
[85]	〃	2000年10月5日	フォトリック結晶に単一欠陥作製 異なる波長の光を捕獲
[86]	〃	2001年8月10日	そろった直線偏光を実現--2次元のフォトリック結晶で制御
[87]	〃	2002年10月10日	次世代光通信用フォトリック結晶--住友電工, 実用化にめど
[88]	〃	2003年6月6日	「面内ヘテロ構造」導入-光ナノデバイス実用化に道拓く
[89]	〃	2003年10月30日	光閉じ込め効果100倍--京大と住友電工が成功
[90]	〃	2004年6月4日	3次元フォトリック結晶、究極の発光制御に成功ー京大、異種発光層を挿入
[91]	〃	2004年9月21日	大阪科学賞 西田氏(阪大教授)・野田氏(京大教授)に
[92]	〃	2005年2月15日	1ナノ秒間光を密閉 京大と住友電工が成功 フォトリック結晶 ダブルヘテロ構造導入
[93]	〃	2005年5月27日	発光効率5倍に フォトリック結晶を導入 京大、基本原理を実証
[94]	電波新聞	2002年10月8日	ロームが新デバイスや新材料の研究開発を加速--国内外の大学との連携
[95]	〃	2003年10月17日	二次元フォトリック結晶面発光レーザー 世界で初めて連続発振に成功

[96]	化学工業日報	2003年10月30日	光ナノ共振器：閉じ込め力10倍超に
[97]	〃	2005年2月14日	光閉じ込め 世界記録を大幅更新 「光ダブル・ヘテロ構造」開発 情報通信デバイス応用へ
[98]	〃	2005年5月27日	固体撮像素子 発光効率を大幅向上 京大が新構造開発 フォトニック結晶で
[99]	日本物理学会	2002年1月1日	日本物理学会誌 カバー(vol.57 no.1)
[100]	日経先端技術	2003年12月8日	京大の野田教授G 高精度のフォトニック結晶素子を開発 量子暗号通信用光デバイスにめど
[101]	日経先端技術	2004年6月28日	京大の野田教授G フォトニック結晶でQ値10万を達成、自身の記録4万5000を更新 量子暗号光学素子などに応用にはずみ
[102]	日経ナノテクノロジー(ウェブ版)	2003年9月25日	フォトニック結晶が、ついに光通信に利用できるレベルに達した ― 京大 野田教授
[103]	〃	2003年11月4日	京大と住電、フォトニック結晶で過去最高の光閉じ込め効果持つ光共振器開発
[104]	日経ナノテクノロジー(PDFニューズレター版)	2003年10月13日	フォトニック結晶の分合波特性、WDMでの活用レベルに近づく
[105]	〃	2003年11月24日	京大と住電、フォトニック結晶で過去最高の光閉じ込め効果持つ光共振器開発
[106]	〃	2003年12月22日	フォトン産業を展望―先端技術セミナーから
[107]	日経サイエンス	2002年12月1日	ひらめきの瞬間 21世紀の担い手たち
[108]	週刊ナノテク	2003年12月1日	10万分の1分光器を実現する・野田進教授―独自のフォトニック結晶を提唱―
[109]	〃	2004年6月28日	ブレーク目前！次世代ナノオプトデバイス<フォトニック結晶>表紙
[110]	〃	2004年6月28日	京都大・野田教授ら、完全3次元フォトニック結晶を用いて究極の発光制御に成功―”光の発生”そのものを根本的に制御可能に―
[111]	〃	2004年7月12日	ブレーク目前！次世代ナノオプトデバイス<完結編> ―日本のものづくり産業を担うコア技術に!― 「3次元、2次元フォトニック結晶で様々な光制御を目指す」

[112]	日経エレクトロニクスNE ONLINE	2004年6月4日	JSTと京都大学、3次元フォトニック結晶を用いた発光制御技術を開発
[113]	// Tech On	2005年5月31日	京都大学とJST、2次元フォトニック結晶構造を用いて発光ダイオードの発光効率向上
[114]	オプトロニクス	2001年7月号	オプトロニクス カバー
[115]	//	2001年10月号	偏光の揃ったフォトニック結晶面発光レーザー発振に成功
[116]	//	2002年11月号	HUMAN INTERVIEW
[117]	O plus E	2000年11月号	フォトニック結晶による光子の捕獲の観察に成功
[118]	//	2001年9月号	フォトニック結晶で面発光レーザーを実現----京大とミノルタ
[119]	//	2001年12月号	完全フォトニック結晶の実現と新しい機能の実証
[120]	//	2003年1月号	第18回櫻井健二郎氏記念賞を受賞
[121]	//	2003年7月号	多波長分合波可能なフォトニック結晶を開発
[122]	//	2003年12月号	世界最大の光閉じ込め効果をもつ光ナノ共振器の実現に成功 --京都大学, 住友電工
[123]	//	2004年7月号	完全3次元フォトニック結晶を用いて究極の発光制御に成功ー京都大学
[124]	Laser Focus World JAPAN	2005年2月18日	世界最大の光閉じ込め効果をもつ新しい光ナノ構造「光ダブル・ヘテロ構造」の開発

その他、10件以上

(3) その他

国際会議の主催

2004年3月7日～11日の間、研究代表者が議長となって第5回フォトニック結晶に関する国際シンポジウム(世界のフォトニック結晶研究者 310人以上が参加)を開催した。なお、この会議は、米・アジア・欧の順に毎年開催される。

5.5 その他特記事項

成果の技術移転等に関しても、積極的に努めた。特に、本研究プロジェクトには、多くの企業(ローム、ミノルタ、住友、TDK、松下電工、アルプス等)が参加しているため、研究を進めることは同時に、企業への技術移転を行っていることに他ならないと言える。(i)まず、3次元結晶と光制御に関するものは、むしろ究極的な光の制御を目指す学術面を重視して研究を進めたため、事業移転・企業化を意図しなかったが、その研究から派生的に生じた2次元結晶による自然放出の抑制と再分配効果の発見は、次世代の固体照明として期待されるLEDの高効率化にもつながるため、成果の発表後、多くの企業・機関からの訪問を受け、技術移転の打診を受けている。(ii)2次元フォトニック結晶レーザに関する研究では、ロームと共同で、2002年から2005年の4年間連続して、本研究の成果をシーテック(エレクトロニクスショー)に出展している。特に、2005年は、初めて、レーザチップを展示し、その場で動作させるというデモンストレーションを行い、多くの企業から購入したいという多数の引き合いが来るに至っている。(iii)2次元フォトニック結晶スラブを用いた欠陥活用デバイスの研究に関しても、もともと、住友、TDK、松下電工、アルプス等が研究チームに入っているため、研究プロジェクトを行っていること自体がそのまま事業移転を行っていることになる。特に、Q値100万に迫る高Q値ナノ共振器の実現は、光通信応用のみならず、環境やバイオセンサーを含む様々な新しい応用の道を与えるため、上記の企業が様々な事業化の可能性を検討するに至っている。

6 研究期間中の主な活動

6.1 ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2000年12月21日	フォトニック結晶ブレークスルーフォーラム(1回目)	(財)光産業技術振興協会	10名	フォトニック結晶の特に応用面等の打ち合わせを行った。
2001年3月28日	平成13年春季応用物理学会	明治大学	300名	フォトニック結晶に関するシンポジウム
2001年3月31日	フォトニック結晶ブレークスルーフォーラム(2回目)	虎ノ門パストラル	10名	フォトニック結晶の特に応用面等の打ち合わせを行った。
2001年10月19日	戦略的基礎研究推進事業研究領域「電子・光子等の機能制御」関連プロジェクト合同シンポジウム「光子機能制御研究のフロンティア」	名古屋大学ベンチャービジネスラボラトリー	50名程度	電子・光子等の機能制御の複数のグループで合同シンポジウムを開催。各グループの最新の成果を報告。
2002年3月30日	フォトニック結晶シンポジウム 「基礎・基盤研究から産業応用へ」	虎ノ門パストラル	100名以上	このシンポジウムは、野田、馬場が中心に、光産業技術振興協会の協力を得つつ、推進しているフォトニック結晶ブレークスルーフォーラムの一環として開いたものである。多くの産業界からの参加を得て、フォトニック結晶を基礎研究のみならず、産業展開可能性を議論することが出来、非常に有意義なものであった。
2002年6月28日	フォトニック結晶 - ナノ加工から産業展開 -	東京都機械振興会館	72人	応用物理学会応用電子物性分科会より、研究代表者の野田が依頼を受け、最近のフォトニック結晶の研究現状とナノテクとの関連、さらには産業展開への可能性を見通せるようなシンポジウムを開催した。最初に代表者の野田が、シンポジウムの趣旨説明を行い、その後、国内のフォトニック結晶を行っている、横国大馬場、日立、理研、住友電工、東北大のグループから講演を行った。
2003年3月4日	京都大学21COE「電気電子基盤技術の研究教育拠点形成」シンポジウム	京都市キャンパスプラザ	160人	研究代表者の野田は、本CRESTを中心課題として、京都大学21COE「電気電子基盤技術の研究教育拠点形成」の幹事を務める。本CREST成果を始め、京都大学の電子材料関係の成果をアピールするために、シンポジウムを開催した。フォトニック結晶を始めとする各種の電子材料・ナノテク・デバイス関係を中心とした関連技術を、本CREST研究代表者の野田を始め、他の7名の講師とともに参加者に分かりやすく説明した。

2003年3月17-18日	シンポジウム「フォトニック結晶と量子ドットシンポジウム」	東京都主婦会館	200人	フォトニック結晶および関連技術の状況を世の中にアピールするため、シンポジウム「フォトニック結晶と量子ドットシンポジウム」を開催した。このシンポジウムは、田、馬場が中心に、光産業技術振興協会の協力を得つつ、推進しているフォトニック結晶ブレークスルーフォーラムの一環として開いたものである。今回は、東大の荒川先生、東北大の川上先生のプロジェクトとの共催の形式とした。 研究代表者の野田、分担者の馬場を始め、国内で、フォトニック結晶研究に従事している産官学の研究者が一同に集まって、最新のフォトニック結晶研究の報告を行った。さらに、関連技術として、東大のグループを中心に、量子ドットの報告がなされた。
2004年3月7-11日	International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V (PECS V)	国立京都国際会館	310人	フォトニック結晶の研究を行っている世界中の研究者が一同に会して、最新の研究成果について報告すると同時に議論を行った。 200件以上の投稿があり、47件の口頭講演と約180件のポスター発表が行われた。
2004年3月28日	2004年春季応用物理学会シンポジウム「フォトニック結晶--実用化のきっかけはどこに？」	東京工科大学	約200人	第51回応用物理学関係連合講演会のシンポジウムとして、フォトニック結晶をテーマに企画し、本研究の成果をアピールした。
2004年12月3, 4日	微細構造光デバイス・シンポジウム-フォトニック結晶: 真のブレークスルーには何が必要か-	湘南国際村センター	30人	光協会と共催で開催。チームメンバーの馬場助教授をはじめとして、国内のフォトニック結晶研究者が集まった

6.2 招聘した研究者等

招聘という形で受け入れた研究者は特にはいないが、本研究推進中、オーストラリア、スウェーデン、ドイツ、スペインからの研究員を受け入れ、研究推進に加わってもらった。また、多数の国内外からの研究員の研究室訪問を受けた。

7 結び

7.1 研究の目標等から見た達成度、得られた成果の意義等の自己評価

本研究を通じて、幸いにも、3次元結晶、2次元結晶の分野で世界のトップを走る研究成果を挙げることが出来たと自負している。主たる成果を列挙すると

- (a) 完全3次元結晶を用いて「物質における発光現象を根本から抑えたり逆に強めたりする、究極の発光制御の可能性」の世界で初めての実証、
- (b) 2次元フォトニック結晶による極めてユニークな自然放出制御現象の発見、
- (c) 2次元フォトニック結晶のバンド端における定在波状態を利用した大面積コヒーレントレーザの実現と高性能化、
- (d) 2次元フォトニック結晶へ導入した点・線欠陥による光ナノデバイスの初めての実現、
- (e) フォトニック結晶におけるヘテロ構造の概念の提唱、
- (f) 世界最大の閉じ込め効果をもつナノ共振器の実現、

等が挙げられる。これらは、米科学誌サイエンス、英科学誌ネイチャー、さらには、英科学誌ネイチャーマテリアルズなどの雑誌にも数多く掲載されるとともに、国内外の新聞・雑誌等でも数多く報道され、世界的に大きな注目を集めることが出来た。これらの成果はいずれも、光の自在な制御技術の基本概念を示すもので、極めて科学的・技術的意義が高いと位置づけることが出来る。

7.2 今後の研究の展開

本研究で得られた成果は、今後、より究極的な光制御を目指す研究へと展開され、様々な分野(量子通信・情報、照明、加工、光ピンセット、マイクロフレイディクス、バイオフィotonics、超高密度光記憶、大規模通信網、光バッファメモリー、超高感度センサー等の様々な分野)への波及効果をもたら、次世代の光技術の核となっていくものと確信する。以下、より具体的に今後の展開、波及効果を述べる。

まず、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スラブ)による発光制御に関する研究により、フォトニック結晶を用いた自然放出の根本制御の可能性を実証すること成功したが、この成果は、場の制御により、不要な発光を一切許さず、真に必要な発光のみにエネルギーを集中させるという極めて理想的な状況が達成されたことを意味する。今後、この成果を発展させることにより、極めて高効率な発光デバイス(LED等含む)の実現が可能となると期待される。さらに、単一光子発生技術や強結合状態の形成など、量子通信・量子情報等の次世代の通信・情報処理のための基盤技術開発にも、貢献出来るものと考えられる。一方、2次元フォトニック結晶レーザの研究は、日本発の新型レーザの開発に成功したと位置づけることが出来る。このレーザは大面積単一モード動作が可能であるため、今後、単一デバイスで1Wを遙かに超える大出力レーザの実現に資すると考えられる。また、格子点制御を始め、様々なフォトニック結晶構造の人為的制御により、様々なビーム形状をもったレーザが誕生するものと期待される。これらは、フォトニクス分野のみならず、光ピンセット、マイクロフレイディクス、バイオフィotonics、超高密度光記憶、等々様々な分野への波及効果が期待出来る。さらに、2次元フォトニック結晶点欠陥活用光機能デバイスおよび光伝搬制御の研究においては、2次元フォトニック結晶スラブを舞台に、自在な光子制御技術が確立し、超小型光合分波デバイスの実現の基礎が確立された。今後、この成果は、より多彩な光機能をもった超小型デバイスの実現へとつながり、将来の大規模通信網のキーデバイスとしての展開が期待される。さらに、高Q値ナノ共振器の実現は、2次元結晶をベースとした光チップ、単一光子光源、電子光子強結合状態形成、光メモリー、超高感度センサーや新しいバイオセンサー応用等への様々な波及効果をもつと期待され、今後、益々、発展していくものと確信する。

7.3 研究代表者としてのプロジェクト運営について

研究は、京都大学を拠点とし、ここに、産総研からの頻繁な訪問、さらには参画企業の人材の派遣を受け研究を推進する体制をとった。また、横浜国大をサブ拠点と位置づけた。研究代表者のリーダーシップのもとに、フォトニック結晶研究を、体系的に、無駄なくかつ漏れなく推進出来る体制をとり、強力に研究を推進した。本研究を通じて、若手研究者の育成にも積極的に努めた。本研究推進により、8名の博士号の取得者(社会人博士含む)を生み出したことは特筆に値する。また、海外で活躍する研究員も育てることが出来た。

7.4 戦略的創造研究推進事業に対する意見、要望

最近のフォトニック結晶研究の世界的な広がりは、油断を全く許さない状況にあり、日本がこの分野において、今後もリーダーシップをとり続けるためには、一層の努力を続けていかなければならないと考えている。特に、この戦略的創造研究推進事業のような集中的かつ柔軟な研究補助システムは、研究を進める上で、非常に有効であり、これまでの成果が得られたのも、この研究推進事業のおかげであると考えている。例えば、高精度な電子ビーム露光装置、ドライエッチングシステムの購入により、ナノメートル制御の結晶作製が実際に可能となり、完成度の相当高いデバイスが得られるようになった。また、走査型超音波顕微鏡は、結晶の積層条件の確実な把握を可能とし、研究の推進スピードが非常に効率良いものとしてくれた。今後も、是非、このような柔軟で、かつ集中的な補助事業を続けてほしいと思う。



研究代表者が議長となって開催した第5回フォトニック結晶に関する国際シンポジウム(PECS-V)の写真(1): 京都国際会議場正面玄関のパネル。



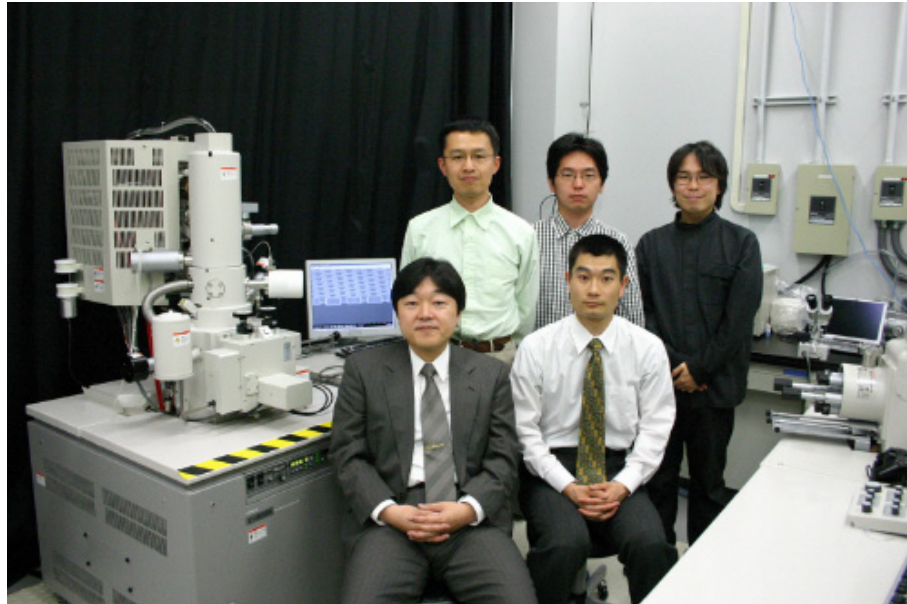
PECS-Vの写真(2): 開会挨拶をする野田研究代表者と、馬場研究分担者。



PECS-Vの写真(3): 口頭発表会場の風景。世界中から300名以上の研究者が参加した。



PECS-Vの写真(4): 懇親会にて来賓挨拶をするJST野崎技術参事。手前に座っているのはYablonoivitch UCLA教授と荒木 京都大学工学研究科長。



2005年5月に本研究の成果が米科学誌サイエンスに掲載された時にPhysics Web(<http://physicsweb.org/articles/news/9/5/18/1>)に掲載された写真。手前に座っているのが野田研究代表者(左)と浅野講師(右)。



研究室メンバーの集合写真