

「電子・光子等の機能制御」

平成 12 年度採択研究代表者

野田 進

(京都大学大学院工学研究科 教授)

## 「フォトニック結晶による究極の光制御と新機能デバイス」

### 1. 研究実施の概要

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ち、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新しい光材料である。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できるものと、近年大きな注目を集めている。研究代表者は、独自のマイクロマシーニング技術を用いて、光デバイスに最適な III-V 族半導体を用いて、完全3次元フォトニック結晶を世界に先駆けて実現した。本研究の第一の目的は、開発に成功した結晶内部に発光体や欠陥を人為的に導入することで、完全フォトニック結晶による発光や光伝播制御の様子を系統的に調べるとともに、様々な光部品を備えた革新的な極微小光デバイス・回路の実現を目指していくことにある。初年度(H12 年度)の研究において、3次元結晶への極薄膜(200nm および 50nm)型発光層の導入を初めて試み、フォトニック結晶が発光に与える効果の知見を得るとともに、単一欠陥共振器の設計を初めて行い、単一モードかつ広いチューニング性、さらに高い Q 値をもつ欠陥の設計に成功した。

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次元フォトニック結晶は、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。本研究プロジェクトの第2の目的は、研究代表者自身の提案になる新しいデバイス：2次元フォトニック結晶レーザおよび2次元結晶の欠陥による光子の捕獲と放出現象に基づく機能デバイスをより詳細に検討し、原理のさらなる実証を行うとともに、デバイスとして十分な特性をもつところまで展開することにある。初年度(H12 年度)の研究において、2次元フォトニック結晶レーザでは、その発振モードの同定を行い、2次元大面積で単一縦・横モードで動作可能であることを実証した。一方、2次元結晶の単一欠陥を利用した超小型面出力型光分波デバイスにおいては、単一欠陥における光子の閉じ込め状態を明らかにし、空気欠陥でありながらも、Q 値として、400 以上という非常に高い値をもつこと、欠陥の大きさに応じて、捕獲される光子エネルギーがチューニング可能であること、さらに線状欠陥を導波する光子のうち、数 10%以上が欠陥により捕獲され、自由空間へ放出されることを実験的に明らかにすることに

成功した。

以上のようなこれまでの研究経緯を受け、H13年度は以下のような成果を得ることが出来た。A.3次元フォトニック結晶においては、(1)前年度の研究を一段発展させ、周期性を乱さない理想的な条件での発光層の導入(ストライプ状発光層の導入)を行い、完全フォトニックバンドギャップ全域で自然放出が抑制されることを示す明確な結果を得ることともに、(2)欠陥および発光体の同時導入を初めて試み、欠陥以外では、発光が抑制され、欠陥部のみで強い発光が生じるという非常に興味深い現象の観察に成功した。(3)以上と平行して、導入した走査型超音波顕微鏡を用いて、融着界面を観測し、融着条件の詳細な検討を行い、より理想的な作製法に関する知見を得ることが出来た。また、B.2次元フォトニック結晶に関しては、まず、(B-1) 2次元フォトニック結晶レーザにおいて、(1)大面積で単一縦横モード動作可能であるだけでなく、偏光までも制御可能な究極的な面発光レーザの実現を目指して、これまでの三角格子型2次元フォトニック結晶から、正方格子型フォトニック結晶構造へ変更し、さらにユニットセルの形状を楕円形状にすることが極めて有効であることを理論的に突き止めると共に、(2)実験的にも、確かに大面積で、単一縦・横モードかつ、偏光までも揃った発振が得られることを示すことに成功した。また、(B-2) 2次元スラブの線欠陥と点欠陥を用いた光子の捕獲と放出、およびそのデバイス応用に関しては、(1)欠陥形状の変化により、上下取り出し効率がどのように制御できるか、また偏光制御等はどのようになるかについて明らかにするとともに、(2)これまでの欠陥から光子を自由空間へ放出するのとは逆に、外部から欠陥へ光子を入射し、欠陥によりフォトン捕獲し導波路に導く、所謂、アッド動作の実証にも成功した。(3)さらに、これらの基礎として、線欠陥導波路そのものの導波特性の詳細な検討などにおいて、顕著な成果を挙げることが出来た。

以上により、幸いにも、2001年8月にはその成果の一部(2次元フォトニック結晶レーザの偏光制御)が米国科学誌サイエンスに掲載され、それに伴い多くのメディアでその成果が取り上げられた。また2001年4月以降、現在までに、67件を越える国内外での会議での招待講演や、各種学会誌における解説、講義等の執筆を行ない、国内外において我々のアクティビティがこれまで以上に強く認知されるに至っている。

今後は、3次元結晶においては、欠陥と発光体の同時導入の効果を、より詳細かつ定量的に調べるとともに、欠陥の有無、結晶の層数とともに、発光現象等がどのように変化するかを系統的に調べ、零しきい値発振という究極のレーザ実現の基礎を固めていく。また、併せて点欠陥近傍に線状欠陥の導入をも試み、極微小光回路への展開の基礎を築いていく。一方、2次元結晶レーザでは、楕円形状のユニットセル構造をもつレーザのより詳細なモード解析(例えば、楕円率がモードにどのような影響を与えるか等)を行うとともに、位相シフト構造等の導入を試み、動作特性の更なる向上を図る。また、これまでは物理的な理解に重きを置いてきたが、応用上は、連続発振可能なレベルまでしきい値電流を下げる必要があり、低しきい値動作のための基礎研究も行っていく。さらに、2次元結晶スラブの欠陥を利用したデバイスにおいては、波長分解能を向上させるため、Q値のさらなる向上(2000以上)を目指し、点欠陥の構造エンジニアリングを推進する。さらに、フォトニック結晶と外部との接続に関する検討も行っていく。

## 2. 研究実施内容

2でも述べたように、本研究プロジェクトでは、研究代表者が初めて実現に成功した完全3次元結晶に様々な発光体や欠陥を導入して、発光や光伝播の制御を実証するとともに、究極的には光チップと呼べる超小型光集積デバイス・回路の実現を目指している。さらに、このような完全な結晶を目指しつつ、一方で、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ついても深く研究を行っていきたいと考え、研究代表者の提案になる2次元フォトニック結晶レーザおよび2次元フォトニック結晶欠陥活用デバイスに関して積極的に研究を進めている。以下、平成13年度の具体的な研究実施内容と、その成果を述べる。

### A) 3次元フォトニック結晶に関して

(1) 完全3次元フォトニック結晶の周期性を乱さない理想的な条件での発光体の導入と結晶が発光に与える効果の検討:

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。3次元結晶への発光体の導入法には、例えば、図1(a), (b)に示す2つの方法が存在する。(b)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体を導入することを意図している。この場合、バンドギャップ

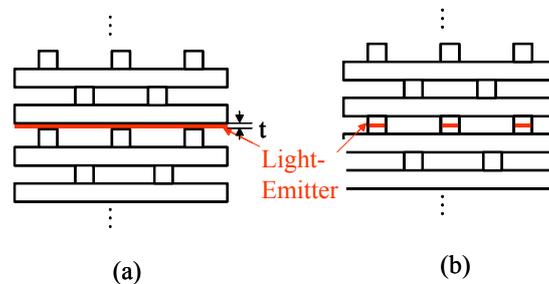


図1. 3次元フォトニック結晶への発光体の導入法。(a)は極薄発光層を導入、(b)は、ストライプ形状の発光体の導入を意味する。(b)が理想的な導入法と言える。

波長域は、発光体を導入しない場合と同じ幅をもつ。初年度(H12年度)の研究では、発光層導入の第一段階として、同図(a)に示すように、結晶の中央部に超薄膜状(150~200nm および 50nm)の発光層を導入する方法を採用し、その効果を調べた。その結果を簡潔に述べると以下ようになる。まず 150~200nm の厚さの発光層を導入した場合は、フォトニック結晶部分からは、フォトニック結晶をもたない参照領域に比べて、10倍以上強い発光が得られた。一方、50nm 厚の超薄膜発光層を導入した場合は、フォトニック結晶による発光がわずかに増強される波長域(短波長域)と、発光がわずかに抑制される波長域(長波長域)が観測された。これらは以下のように説明された。まず 150~200nm と厚い場合は、完全にバンドギャップが消失し、逆に、欠陥準位が形成され、それに結合して、より強い発光が生じたものと考えた。一方、50nm と発光層の厚さが極めて薄い場合は、短波長側では、バンドギャップが消失し、代わりに生成され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た。本年度は、上記の結果を受け、図1(b)の理想的な条件での発光層の導入を試みた。図2に作製した試料の模式図と、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 $\mu\text{m}$

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いた結果をも示している。同図から分かるように、完全バンドギャップの全波長域(1.3~1.55  $\mu\text{m}$ )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3に前年度の結果と今年度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

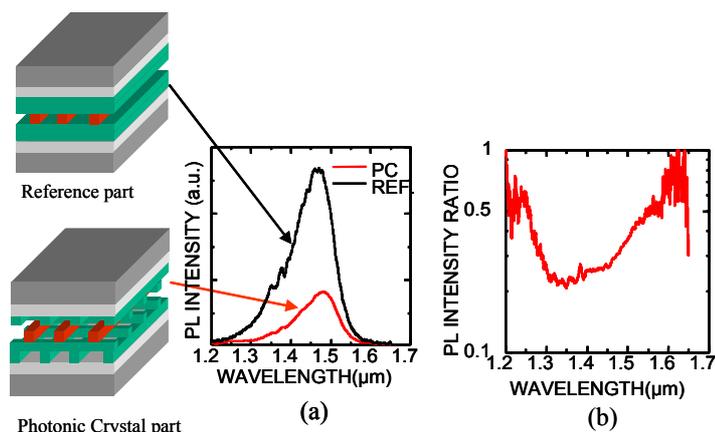


図2. 図1(b)の方法で、発光体を導入した場合の結果。(a)は、フォトニック結晶部と参照領域の発光スペクトル。(b)は両者の比をとったもの。完全バンドギャップ域で発光が抑制されているのが明確に分かる。

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3(a)]→非常に薄い発光層[図3(b)]→ストライプ型発光層[図3(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。

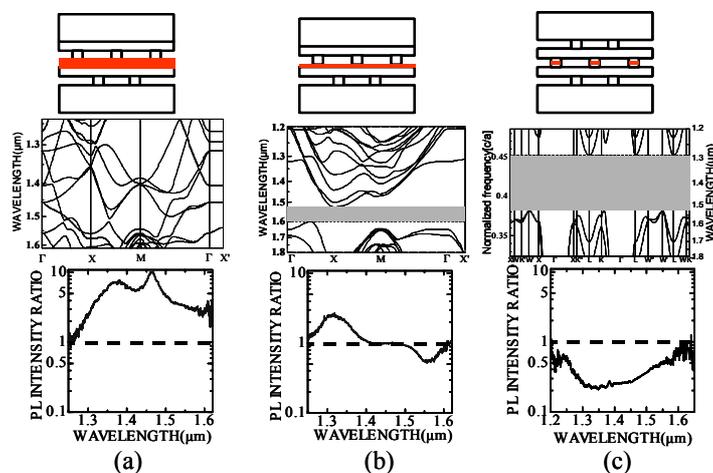


図3. 発光層の導入の仕方が、屈折率分布を乱さない理想的な導入に近づくにつれて[(a)→(c)], より広い波長域で、かつより大きく発光が抑制されるようになる様子がよく分かる

## (2) 完全3次元結晶への点欠陥と発光体の同時導入とその効果

- 3次元結晶による究極の発光制御に向けて -

前項(1)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、自然放出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。本年度は、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4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 $\mu\text{m}$ )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 $\mu\text{m}$ (欠陥 A)および 2.3x3.6 $\mu\text{m}$ (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2(あるいは、図3(c))に既に示されており、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5に示されている。同図と図3(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ため、少なくとも2つの発光ピークが現れたと言える。図6(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6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6(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。

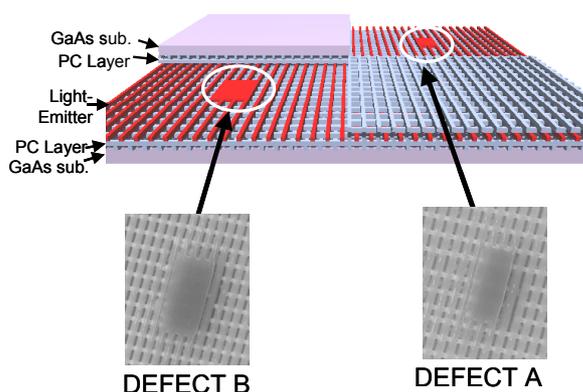


図4. 3次元フォトニック結晶への点欠陥と発光体の同時導入。発光体を入れて全部で5層のストライプ積層構造フォトニック結晶を形成し、一部に欠陥A, Bの2つの欠陥を導入した。

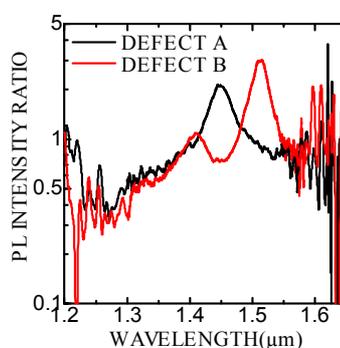


図5. 点欠陥A, BにおけるPLスペクトル。同じ発光体をもつが、上下がGaAsフラット層の参照領域で、規格化したスペクトルを示す。欠陥に応じた明確なスペクトルが観察された。ちなみに欠陥のない場合は、図3(c)に示すように、1.3~1.55  $\mu\text{m}$ において発光が抑制される。

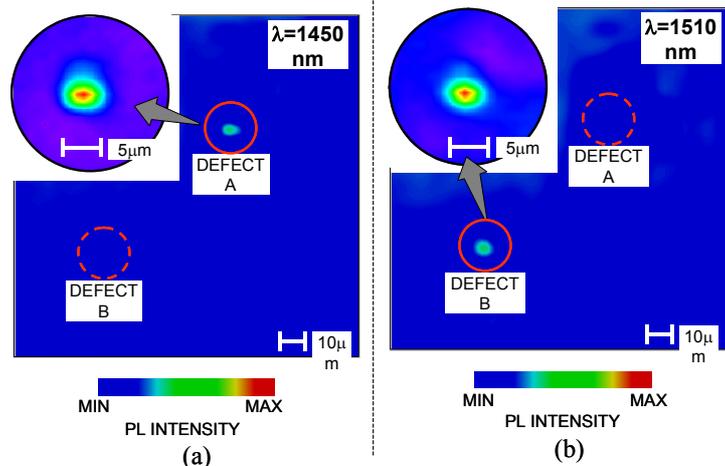


図6. 顕微PLマッピング結果。(a)は、プローブ波長を1450nmにした場合で、欠陥Aのみが強く発光し、(b)はプローブ波長を1510nmとした場合で、欠陥Bのみが強く発光することが分かる。

### (3) 走査型超音波顕微鏡による融着界面の評価と融着条件の検討

上記、(1)、(2)のように、完全3次元結晶中に発光体や、欠陥を自在に導入するためには、プロセス技術の向上は不可欠の課題である。特に、ウエハ融着プロセスは、3次元結晶作製の要となる技術であり、その詳細な検討を行っておくことは、非常に重要である。今年度も前年度に引き続き、融着条件の詳細な検討を行った。特に、今年度は、発光体の本格的な導入に伴い、GaAs系(ベースとなるフォトニック結晶)とInP系(発光体)のウエハ融着技術が重要となった。この際の、課題は、両者の熱膨張係数の違いを考慮して、最適の融着条件を見出すことである。ノウハウ的な事柄になり詳細は割愛するが、今年度のポイントは、新しく購入した超音波顕微鏡を用いて非破壊で、界面の観察を行ったことである。GaAs系とInP系ウエハの融着を様々な温度で行い、超音波顕微鏡を用いて融着界面の様子を非破壊で観察した。その結果、室温接合ののち、まず、熱膨張の違いの影響があまり生じない200~300℃の比較的低温で、従来よりも長時間で加熱処理を行い、一段階の接合を行う。その後、一方の基板(InP系の基板InP)を除去する。その後、より強固な接合を得るために、500~550℃の温度で本格的な融着を行うのがよいのではないかという見通しを得た。このプロセスにより、熱膨張係数の違いの影響がかなり押さえられ、融着の成功率がかなり高くなった。現在、さらに詳細な検討を行っている。

#### B) 2次元フォトニック結晶に関して

##### B-1 2次元フォトニック結晶レーザ

###### (1) 2次元フォトニック結晶レーザの偏光制御

###### ー 理論的検討 ー

研究代表者は、すでに図7に示すような、三角格子構造をもつ2次元フォトニック結晶レーザを提案し、これまでに2次元大面積に渡るコヒーレント面発光発振の実証に成功している。前年度は、各部の偏光状態の測定と理論計算の結果を比較することにより、発振モードの同定を行い、確か

に大面積で単一縦・横モード動作可能なことを実証した。その際、各部の偏光が様々な成分をもち、全体としては無偏光状態となっていることが判明した。このような偏光状態は、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った。

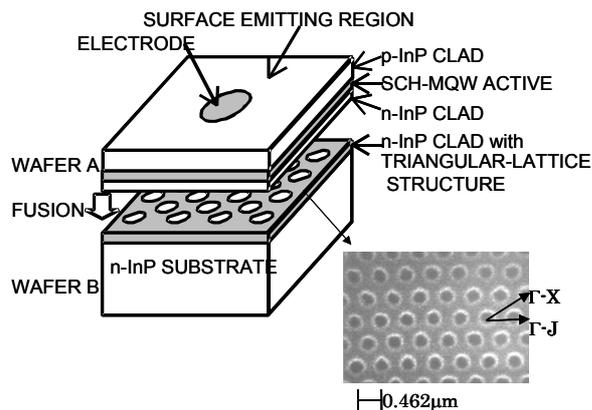


図7. 三角格子二次元フォトニック結晶を内蔵した面発光レーザの模式図。これは、これまでに既に提案した構造である。

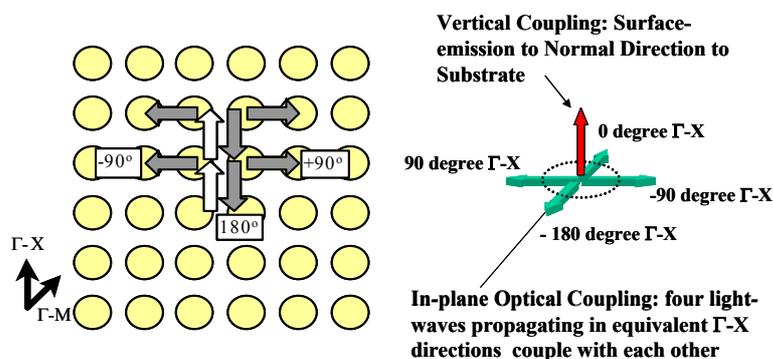


図8. 正方格子二次元フォトニック結晶における光回折およびその結果生じる4波の結合を示す模式図。

2次元フォトニック結晶の構造としては、従来の三角格子構造から図8に示すような正方格子構造を採用することとした。格子定数は、発振波長と一致するように設計されている。この場合、同図に示すように、ある $\Gamma$ -X方向( $0^\circ$ )に進む光波は、ブラッグの反射条件を考慮すると、反対方向( $180^\circ$ )に回折されるだけでなく、他の $\pm 90^\circ$ に回折されることになる。その結果、左右上下に進む4つの光波が互いに結合し、2次元共振器を形成することになる。結果としてバンド構造は、図9(a)に示すようになる。同図の $\Gamma$ 点におけるバンド端 I, II, III, および IV は、定在波状態、すなわち、共振状態を与えることになる。(なお、従来の三角格子の場合は、バンド端の数が6であったのに対し、正方格子になると4に減少し、よりシンプルなバンド構造が得られ、モード制御には有利となる。)同図(b)は、同図(a)における $\Gamma$ 点におけるバンド端 A, B における電磁界分布を示す。同図から分かるように、A, B においては、矢印で表される電界分布が、様々な方向成分をもち、これらが面垂直方向に放射されると、やはり、様々な偏光成分をもつことが予想され、このままでは不十分である。(一方、バンド端 C, D は縮帯しているため、電磁界分布は一意に定まらない。)これらは、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、次のステップとして、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 10 に示す。同図(a)から分かるように、楕円形状を採用することにより、まず、バンド端 C, D の縮帯が解けると共に、各バンド端のエネルギー間隔が開いてくる。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、上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、こちらの期待する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。

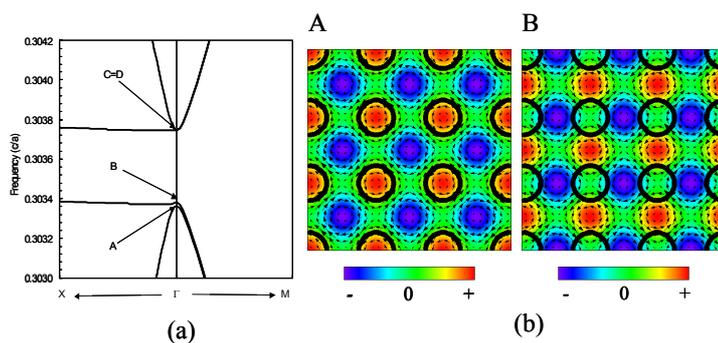


図9. (a)真円形状の格子点をもつ正方形格子2次元フォトニック結晶の $\Gamma$ 点付近のバンド図。(b)バンド端A, Bにおける電磁界分布。濃淡により、面垂直方向の磁界分布が、矢印により面内の電界分布が表されている。

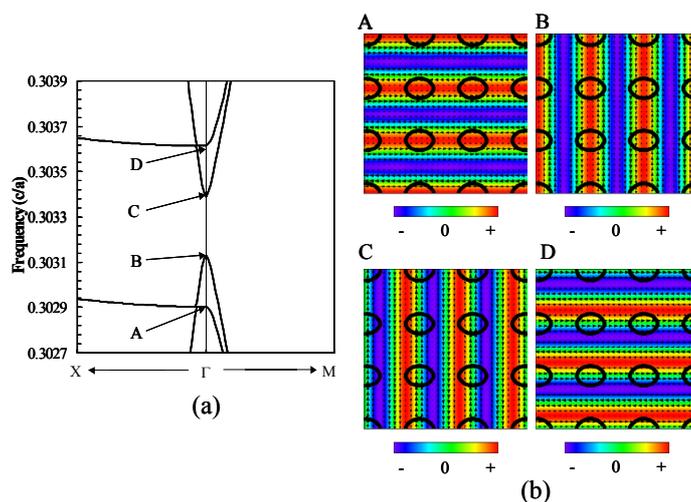


図10. (a)楕円形状の格子点をもつ正方形格子2次元フォトニック結晶の $\Gamma$ 点付近のバンド図。(b)バンド端A-Dにおける電磁界分布。

## (2) 2次元フォトニック結晶レーザの偏光制御 — 実験的検討 —

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 11 に示すように、楕円形状をもつ2次元正方形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。(上記、(1)項では述べなかったが、本フォトニック結晶においては、格子定数が、発振波長と一致するように選ばれているため、回折条件は上方向にも満たされるため、上方向への出力、すなわち面発光が得られることになる。)作製したデバイスの面光出力-電流特性を図 12 に示す。同図より、室温で確かに動作可能なことが分かる。得

られ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 13(a)に示す。また、対応する遠視野像を図 13(b)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かかわらず、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。さらに、遠視野像からビーム拡がりも  $2^\circ$  以下と相当狭く、面内の発振がコヒーレントに行われ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ーが実現可能であることが実証されたと言える。

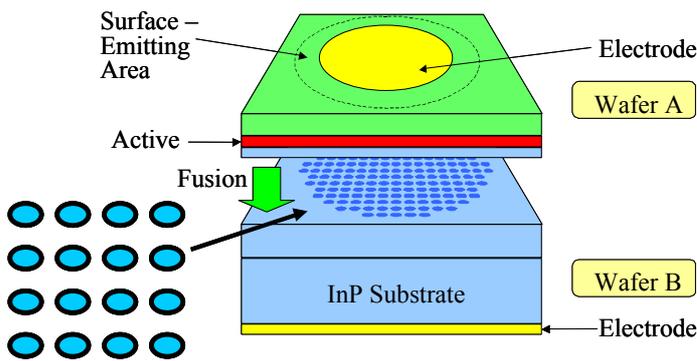


図 11. 楕円形状の格子点をもつ正方形格子2次元フォトニック結晶面発光レーザーの模式図。

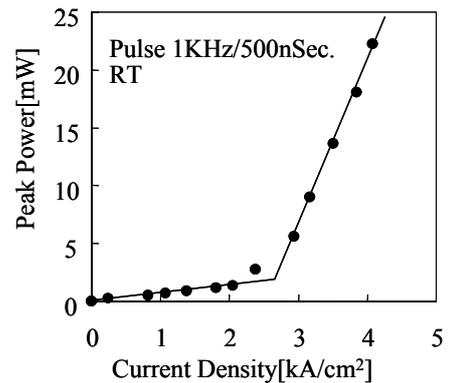


図 12. 光出力-電流特性

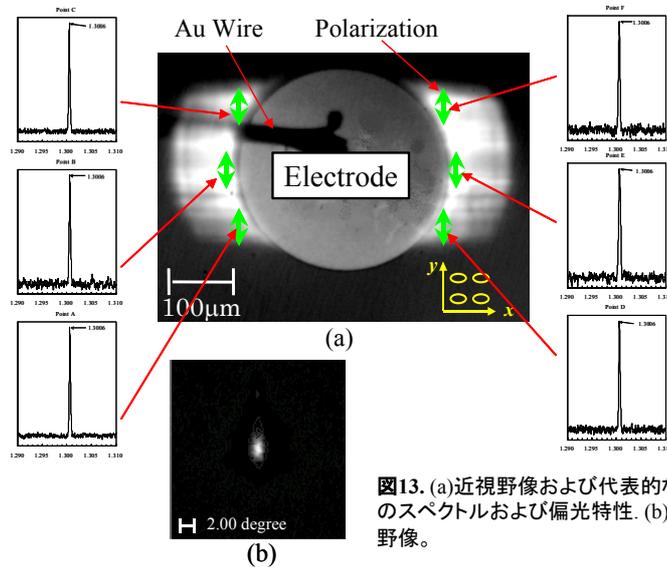


図 13. (a)近視野像および代表的な箇所のスペクトルおよび偏光特性. (b)遠視野像。

B-2 2次元結晶スラブ欠陥活用デバイス(光子の捕獲・放出現象とそのデバイス応用)

(1) 欠陥エンジニアリング – 上下取り出し効率の制御と偏光状態制御 –

研究代表者は、図 14 に示すような2次元フォトニック結晶スラブ(薄板)を用いた新しい機能デバイスを提案している。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で動作するものである。様々な大きさをもつ欠陥を複数個、導波路の近傍に設けるだけで、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

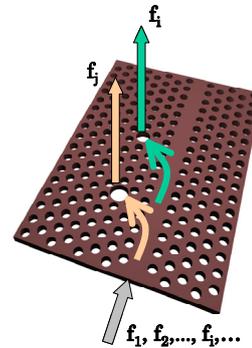


図14. 研究代表者の提案する2次元フォトニック結晶スラブを用いた面出力型超小型光ドロップデバイスの構造。

デバイスの実現等に繋がるものと期待される。前年度は、点欠陥の大きさとドロップされる波長の関係、Q値の見積もり、さらには、欠陥によるドロップ効率に関する検討を行った。その結果、(a)ドロップ波長が欠陥の大きさを変えることで十分にチューニング可能であること、(b)Q値は、(空気部分の多いアクセプタ型としては)450程度とかなり大きな値であること、(c)取り出し効率は、数10%以上とかなり高いことが示された。

本年度は、さらに欠陥の形状をコントロールすること(欠陥エンジニアリング)により、(i)ドロップ光の上下の出力比をコントロールできないか、さらに(ii)ドロップ光の偏光状態がコントロールできないかという観点から研究を進めた。以下にそれらの結果を示す。

(i) ドロップ光の上下出力比の制御: これまでは、欠陥の形状を上下対称形状の設計を行ってきたが、この場合は、上下に均等に出力が生じるため、上方向に出力を集中させと、さらに取り出し効率の向上が期待出来る。そこで、まず、本年度は、欠陥の形状を上下で非対称にすることにより、取り出し効率が変化

できないの検討を行った。非対称の与え方を様々な検討した結果、図 15(a)に示すように、上下にステップ的な変化をする屈折率分布を与えることが、最も効果的であり、同図(b)に示すように、最大10倍以上の、上下の出力比が得られうるということが分かった。

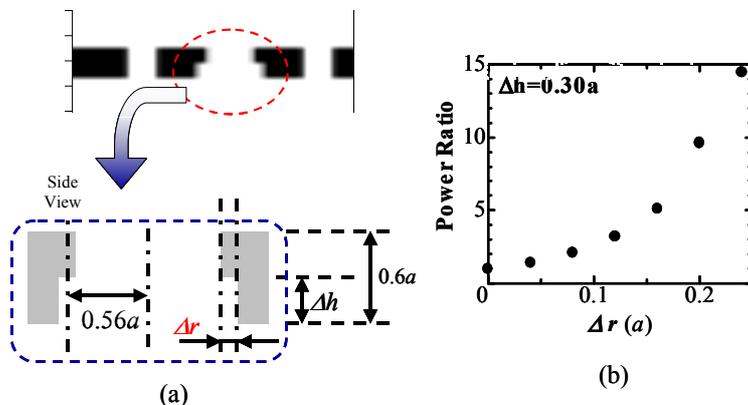


図15. (a)上下の光取り出し効率を制御するための上下非対称欠陥の模式図。ステップ状に屈折率を変化させている。(b)ステップ上下の半径差と上下出力比の関係を示す図。

(ii) ドロップ光の偏光状態の把握と制御: 欠陥からドロップされる光の偏光状態の把握も極めて重要な課題である。またこの偏光状態をコントロールすることも応用上極めて重要である。これまで研究を行ってきた欠陥は、形状が円形の空気欠陥である。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 16 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、同図(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 17(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、同図(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示された。

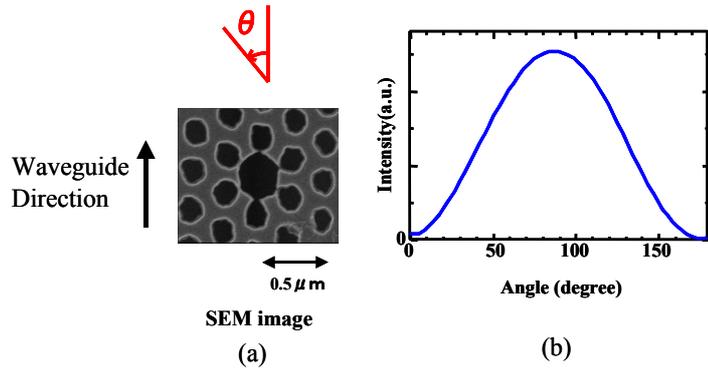


図16. 点欠陥から放出される光の偏光状態に関する実験結果。(a)は欠陥のSEM写真。(b)は偏光の測定結果で、導波路に垂直方向に偏光することが分かった。

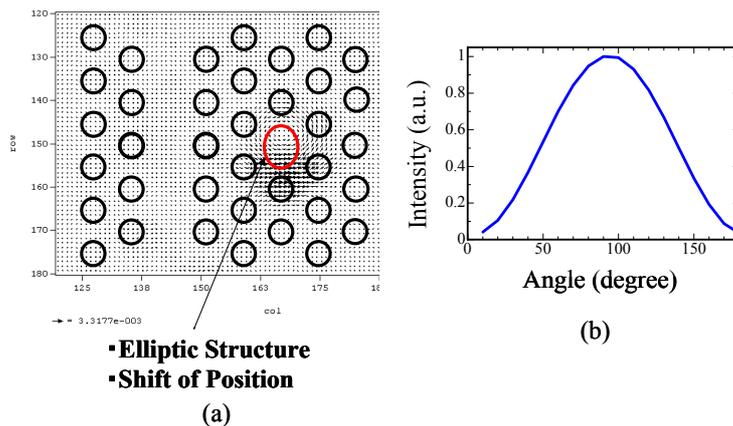


図17. 点欠陥から放出される光の偏光状態に関する理論計算結果。(a)は図16(a)のSEM写真から欠陥形状、位置を考慮して計算した電磁界分布。(b)は偏光の理論計算結果。実験結果と一致することが分かった。

## (2) 光アッド動作の実証

これまでの議論は、導波路を伝播する光子のうち、点欠陥周波数に共鳴する光子を点欠陥により捕獲し、自由空間へ放出する現象、すなわち光ドロップ動作に関して議論を進めてきたが、実際には、図 18 に示すように、その逆の動作、すなわち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光アッド動作も可能であるはずである。この現象を実証することにより、初めて光アッド・ドロップデバイスとして動作可能であるということが可能となる。本年度は、この光アッド動作の実証研究をも行った。図 19 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、丁度、点欠陥の共振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。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。

現在は、光ドロップ・アッド動作共に重要と考えられる Q 値の向上に関する理論・実験的検討を進めている。

## (3) 線欠陥導波路そのものの導波特性の詳細な検討

### － フォトニック結晶光導波路の設計と極限低損失 －

以上の議論は、主に、超小型欠陥活用デバイスの点欠陥部分における光子状態について検討してきたが、もう一つの基本要素である線欠陥光導波路の理解をより詳細に行うことも極めて重要である。すでに研究代表者等の研究により、2次元フォトニック結晶スラブ構造において、空気格子やスラブ厚さ等に対し、適当なパラメータを採用することにより、 $1.5\mu\text{m}$  波長域において、無損失導波が可能であることを示したが、さらに、深く理解を深めておくことが全体のデバイス動作特性の向上にとって極めて重要である。

本研究プロジェクトでは、Si の2次元フォトニック結晶スラブ構造を昨年度に引き続き、SOI 基板を用いることにより作製し、その導波特性を詳細に調べ、理論に予測される波長において伝播が可能であり、その伝搬損失  $11\sim 15\text{dB/mm}$  を評価した。本年度はまずこの導波路の基本的な設計法

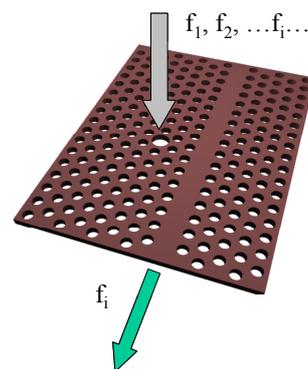


図18. 光アッド動作の模式図。

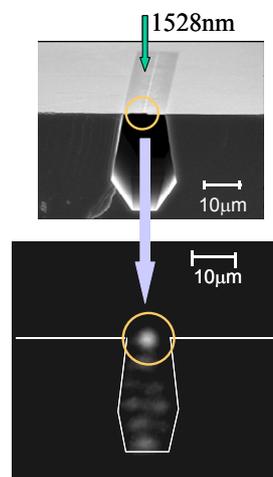


図19. 光アッド動作の実験結果。波長1528nmの光を外部から点欠陥へ入射した際のみ、導波路端面から光出射が観測された。

を確立した。図 20 はフォトニック結晶の円孔の大きさ、あるいは背景屈折率を変化させたときの導波路の 2 次元フォトニックバンドを表す。一般にフォトニックバンドギャップ (PBG) は円孔が大きいが広がるが、高周波数側へシフトするため、放射モード帯を表すライトコーンの影響を受けやすくなる。一方、円孔が大きくなってもチャネル幅はそれほど変化しないため、伝搬モードのシフト量は小さい。太線で表される有効な伝搬帯  $\Delta(a/\lambda)/(a/\lambda)$  は、直径とピッチの比  $2r/a$  が  $0.5 \sim 0.6$  で最大値である  $0.1$  をとる。一方、背景屈折率が小さくなると、PBG と伝搬モードが共に高周波数側へシフトする。ただし有効な伝搬帯は背景屈折率が大きいほど広がる。したがって 3 次元的なスラブ構造では、単一モード条件が満たされる範囲で膜厚を厚く設定するのが好ましいことが分かった。以上の結果は FDTD 法を用いた 3 次元バンド計算でも同じ結論になることが確認された。

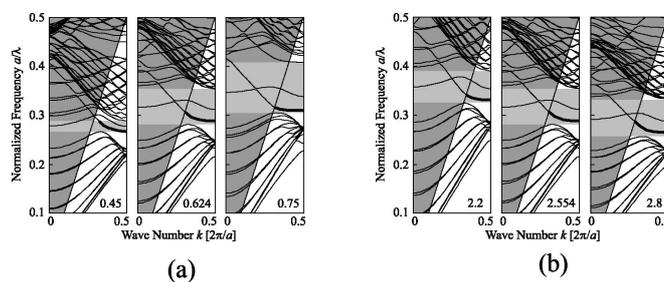


図20.円孔三角格子配列フォトニック結晶に導入した単一線欠陥導波路のバンド図。(a)円孔の規格直径 $2r/a$ を変化させたときのバンドの変化、背景屈折率を変化させたときのバンドの変化。

従って、理想的には、フォトニック結晶導波路には伝搬損失が存在しない設計が可能と言える。しかしながら実際は先に述べたような損失が観測される。この原因は製作の不完全性による散乱損失が原因である。散乱損失は、境界面の凹凸を介して伝搬光と自由空間の放射モードが結合する現象であり、通常の屈折率光閉じ込め型光導波路では、摂動法によって計算できる。その結果、通常の導波路では、Si と空気の境界面の大きな屈折率差に影響され、境界面に  $20\text{nm}$  の凹凸があるとおよそ  $10\text{dB/mm}$  オーダーの損失が生じることがわかった。これは本研究で別途、製作した Si 細線導波路の伝搬損失とよく一致している。これに対してフォトニック結晶導波路は今のところ同程度の凹凸に加え、 $\pm 4\%$ 程度の円孔直径のばらつきがある。それにも関わらず、損失は Si 細線導波路と同程度である。この原因は PBG 効果にあるのではないかと考えられる。すなわち PBG が自由空間の放射モードを抑制し、伝搬光との結合を禁止する効果である。上記の摂動法によれば、完全に結合が禁止された場合、同じ境界面の凹凸に対する伝搬損失は約  $1/10$  に小さくなる。つまり導波路製作プロセスが改善され、究極的には Si 細線導波路よりも 1 桁程度、フォトニック結晶導波路の方が低損失になる可能性があることが予測され、これは、フォトニック結晶デバイスにとって極めて明るい結果と言える。

なお、その他にも、現在、フォトニック結晶への光入出力のマッチングを良くするための方法についての検討も積極的に進めている。

### 3. 研究実施体制

#### 2、3次元フォトニック結晶総合機能制御グループ(京大グループ)

① 研究グループ長:野田 進(京都大学工学研究科・教授)

② 研究項目:

上記の項目 1, 2 で述べた全ての研究をこのグループが中心になって進めた。すなわち、3次元結晶の作製、発光体、欠陥導入と新機能デバイスへの展開、2次元結晶を用いた新しいレーザ、欠陥活用デバイスに関するほぼ全ての研究を中心になって推進した。

#### 3次元フォトニック結晶機能制御グループ(電総研グループ)

① 研究分担グループ長:山本宗継(産業技術総合研究所光技術研究部門・研究員)

② 研究項目:

研究代表者を中心に研究される3次元結晶の研究に積極的に協力し研究を進めた。特に、今年度は、上記の 2 で述べた **A (3)** 3次元結晶作製プロセス(特にウエハ融着プロセス)の詳細な検討において貢献した。また、3次元導波路作製の際の揺らぎが、導波特性にどのような特性を与えうるかに関しても理論的な検討を行った。

#### 2次元フォトニック結晶機能制御グループ(横浜国大グループ)

① 研究分担グループ長:馬場俊彦(横浜国大・助教授)

② 研究項目:

2次元結晶の特性を活かした新しい機能デバイスの開発を進めた。特に、研究代表者、野田の独自のデバイスである欠陥活用デバイスの開発に協力した。具体的には、上記の2で述べた **B-2 (2)** 線状欠陥導波路の導波特性の詳細な検討に大きな貢献をした。その他、フォトニック結晶中での特異な伝播現象:例えばスーパプリズム現象の分解能の解明、微小光デバイス等についての研究も精力的に行った。

### 4. 研究成果の発表

#### (1) 論文発表

- S. Noda, M. Yokoyama, M. Imada, A. Chutinan, and M. Mochizuki: *Science*, 293 (2001) 1123-1125 “Polarization Mode Control in Two-Dimensional Photonic Crystal Laser by Unit Cell Structure Design”.
- S. Noda, M.Imada, A.Chutinan, and N.Yamamoto : (Ed. M. Soukoulis) Kluwer Academic (2001) 105-116, “Semiconductor photonic crystals”.
- S. Noda: MRS Bulletin, 26 (2001) 618-621 “3D and 2D Photonic Crystals in III-V Semiconductors” (Invited paper).
- M. Yokoyama, K. Akimoto, M. Imada and S. Noda: Jpn. J. Appl. Phys. 40 (2001) L847-L849 “Wafer Fusion Condition for GaAs/AlGaAs System and Its Application to Laser Diode”
- S. Noda: SPIE OE-Magazine, October 2001 issue. “Photonic Crystals” (Invited Paper).

- S. Noda and M. Imada: IEICE Transactions C, E85-C (2002) 45-51, "2D Photonic Crystal Surface-Emitting Laser Using Triangular-Lattice Structure" (Invited).
- T. Tanaka, S.Noda, A.Chutinan, T.Asano, and N.Yamamoto: J. Optical and Quantum Electronics, 34 (2002) 37-42, "Ultra-short Pulse propagation in 3D GaAs Photonic Crystal".
- A. Chutinan, M. Mochizuki, M. Imada, and S. Noda: Appl. Phys. Lett. 79 (2001) 2690-2692, "Surface-Emitting Channel Drop Filters Using Single Defects in Two-Dimensional Photonic Crystal Slabs".
- N. Yamamoto, K. Tomoda and S. Noda, Proceedings of 2001 MRS Spring Meetings, vol. 681E, (2001) I6.4, "Fabrication of Three-Dimensional Photonic Crystal by Wafer Fusion Approach"
- N. Yamamoto, S. Ogawa, M. Imada and S. Noda, Proc. of Optoelectronics and Microelectronics 2001, Nov. (2001), "PHOTONIC CRYSTAL PPEPARATION BY A WAFER BONDING APPROACH".
- S. Ogawa, K. Tomoda, and S. Noda: J. Appl. Phys. 91 (2002) 513-515, "Effects of Structural Fluctuations on Three Dimensional Photonic Crystal Operating at Near-Infrared Wavelengths".
- A. Chutinan, M. Okano, and S. Noda: Appl. Phys. Lett. 80 (2002) 1698-1700, "Wider Bandwidth with High Transmission Through Waveguide Bends in Two-Dimensional Photonic Crystal Slabs".
- A. Sakai, G. Hara and T. Baba: Jpn. J. Appl. Phys., vol. 40, no. 4B, pp. L383-L385, (2001) "Propagation characteristics of ultra-high D optical waveguide on silicon-on-insulator substrate".
- M. Fujita, R. Ushigome and T. Baba, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 13, no. 5, pp. 403-405, (2001) "Large spontaneous emission factor of 0.1 in a microdisk injection laser".
- T. Baba, N. Fukaya and A. Motegi: Electron. Lett., vol. 37, no. 12, pp. 761-762, (2001) "Clear correspondence between theoretical and experimental light propagation characteristics in photonic crystal waveguides".
- M. Fujita, K. Teshima and T. Baba: Jpn. J. Appl. Phys., vol. 40, no.8B, pp. L875 - L877, (2001) "Low threshold continuous wave lasing in photo-pumped GaInAsP microdisk lasers".
- M. Fujita, R. Ushigome, T. Baba, A. Matsutani, F. Koyama and K. Iga: Jpn. J. Appl. Phys., vol. 40, no. 9A, pp. 5338-5339, (2001) "GaInAsP microcylinder (microdisk) injection laser with AlInAs(Ox) claddings".
- T. Baba and D. Ohsaki, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 40, no. 10, pp. 5920-5924, (2001) "Interfaces of photonic crystals for high efficiency light transmission".
- M. Fujita and T. Baba: IEEE J. Quantum Electron., vol. 37, no. 10, pp. 1253-1258, (2001)

“Proposal and FDTD simulation of whispering gallery mode microgear cavity”.

- M. Fujita, R. Ushigome and T. Baba: Appl. Phys. Lett., vol. 80, no. 9, pp. 1511-1513, (2002) “Strain relaxation effect in microdisk lasers with compressively-strained quantum wells”.
- M. Fujita and T. Baba, Appl. Phys. Lett., vol. 80, no. 12, pp. 2051-2053, (2002) “Microgear laser”.
- A. Sakai, T. Fukazawa and T. Baba: IEICE Trans. Electron., vol. E85-C, no. 4, pp. 1033-1038, (2002) “Low loss ultra-small branches in Si photonic wire waveguides”.
- T. Baba and N. Fukaya: Photonic Crystals and Light Localization (Ed. M. Soukoulis), pp. 105-116, Kluwer Academic, (2001) “Light propagation characteristics of defect waveguides in a photonic crystal slab”.
- 野田 進: オプトロニクス, No.235 (2001・7) 表紙、および 179-186, “注目のフォトニック結晶、総論: フォトニック結晶とその狙い” (Invited).
- 野田 進: レーザ学会誌「レーザ研究」、29 (2001) 547-548, “CLEO/QELS 2001「フォトニック結晶」報告” (Invited).
- 野田 進: KEC 情報誌, No.178 (2001・7), “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 —”(Invited).
- 野田 進: 光産業技術振興協会編光産業技術動向調査、2001 年度、2.5 節, “フォトニック結晶” (Invited).
- 野田 進: 21 世紀の情報技術産業を支える有機エレクトロニクス (有機エレクトロニクス材料研究会 編)、6.2 項 (2001) 185-194, “フォトニック結晶” (Invited).
- 野田 進: 物理学会誌、57 (2002) 46-49, “フォトニック結晶と欠陥エンジニアリング” (Invited).
- 野田 進: CMC「フォトニック結晶の基礎と光デバイスへの応用」、第 2 章、2-1 項および 2-2 項、(2001) “II-1 総説 — 2次元フォトニック結晶を例として—” 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” (Invited).
- 野田 進: 江差編集「マイクロマシーニング」、 “フォトニック結晶”
- 今田昌宏, 野田進: 表面科学、第 22 巻, 第 11 号, (2001) 715-722, “半導体フォトニック結晶とその応用” (Invited).
- 山本宗継, 野田進: レーザ研究、vol. 30, no. 2, pp. 59-64, (2002) “ウエハ融着を用いた 3次元フォトニック結晶” (Invited).
- 横山光, 今田昌宏, 野田進: 月刊マテリアルステージ 2002 年 3 月号 (第 1 巻 第 12 号) 23-29, “ 2次元フォトニック結晶面発光レーザー” (Invited)
- 馬場俊彦: オプトロニクス, vol. 20, no. 7, pp. 192-196, (2001) “フォトニック結晶発光素子の現状” (Invited).
- 馬場俊彦, 井下京治, 市川弘之: 表面科学, vol. 22, no. 11, pp. 710-714, (2001) “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” (Invited).

- 馬場俊彦: レーザー研究, vol. 30, no. 2, p. 58, (2002) “「フォトニック結晶の最新トレンド」解説小特集によせて” (Invited).
  - 馬場俊彦: 日経先端技術, no. 6, pp. 12-15, (2002), “フォトニック結晶の現状と将来” (Invited).
  - 馬場俊彦: CMC「フォトニック結晶の基礎と光デバイスへの応用」, pp. 185-205, (2002) “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ー” (Invited).
- (2) 特許出願  
国内 10件, 外国 なし