

「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。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。H13年度は、フォトニック結晶の周期性を乱さない発光層の導入（ストライプ状発光層の導入、2+1+2構造の実現）に成功し、より理想的な条件で、自然放出制御に関するフォトニック結晶効果を調べ、完全フォトニックバンドギャップ域で自然放出が抑制されていることを示す明確な結果を得た。また、その結果に基づき、3次元結晶へ比較的大きな欠陥（発光機能をもつ）の導入を試み、欠陥のみに、光が強く局在することを、初めて示した。また、以上の基礎技術として、走査型超音波顕微鏡の導入により、3次元結晶の多層積層条件をかなり明確にすることに成功した。

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。まず、前者の2次元フォトリック結晶レーザーでは、H12年度の研究において、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。H13年度は、楕円形状のユニットセル構造をもつレーザーを試作し、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成功した。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、H12年度は、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以上という比較的高い値をもつこと、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を実験的に明らかにすることに成功した。H13年度は、それに引き続き、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うになるかについて明らかにすることに成功した。また、欠陥に対し外部から入射された光子を、欠陥自身により捕獲し、導波路に導く、所謂、アッド動作の実証に成功した。

以上のようなこれまでの研究経緯を受け、H14年度は以下のような成果を得ることが出来た。A. 3次元フォトリック結晶においては、(1) 3次元結晶の層数を前年度の2+1+2構造から、4+1+4と倍増させることに成功し、フォトリックバンドギャップによる発光の抑制が、-20dBを超えることを実証した。また、結晶に対して、様々な方向からの発光特性を調べ、発光抑制効果が完全バンドギャップ効果に基づくことを実証することに成功した。(2) さらに、4+1+4構造をもつ3次元結晶中に、様々な大きさの人為欠陥を導入し、極めて小さな欠陥においても欠陥モードが観測出来ることを初めて示した。(3) さらに、これまでの3次元結晶多層化技術をもとに、3次元フォトリック結晶導波路を光通信域で初めて試作することにも成功した。また、B. 2次元フォトリック結晶に関しては、まず、(B-1) 2次元フォトリック結晶レーザーにおいて、(1) 前年度に引き続き、レーザー発振の共振器の振る舞い(バンド端でのQ値)の検討等を行い、レーザー動作に対する議論を深めた。(2) さらに、本レーザーの産業展開をも意識し、本レーザーの低しきい値電流動作を目指し、従来の2アンペアという発振しきい値から、40~50mA以下という、1/20~1/25という劇的なしきい値の低減を実現に成功した。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) これまでにCRESTプログラムにより導入された電子ビーム露光、ICPエッチング装置を駆使して、ナノメートルの精度で制御された試料の作製に成功した。その結果、設計どおりの試料の作製が可能となった。この技術を用いて、本デバイスの波長分解能の向上にとって、極めて重要な点欠陥のQ値の増大を目指して、新たにドナー型の欠陥の導入に取り組み、これまでの400という値から、3000を超えるQ値の実現に初めて成功した。(2) さらに欠陥からの光取り出し効率の定量的評価にも取り組み、欠陥による光の取り出し効率が理論値に近い50%程度あることを初めて実証することに成功した。(3) さらに、新しい概念である「面内ヘテロ構造」の概念を提案した。この概念は、Q値やドロップ効率を一定に保ったまま、多波長動作を可

能とするもので、フォトニック結晶の広く一般の重要な概念となるものと確信している。(4)さらには、これらの基礎技術として、構造揺らぎが導波路の伝播損失に与える影響に関しても深く検討し、上下非対称性が、導波路モードとスラブモードの結合を誘起し、伝播損失に寄与することを見出した。また、上記デバイスの外部との光結合に関しても検討を行い損失の少ない結合方式を見出した。さらに本年度より、上記のような欠陥エンジニアリングのみならず、フォトニック結晶の応用範囲を広げるために、フォトニック結晶の高分散性を利用した新しい機能デバイスの開拓の取り組みをスタートした。分散性を利用したものの一つとして、超小型プリズムを挙げることが出来る。このプリズム効果は当初、小型高分解能フィルタへの応用が期待されたが、光伝搬に不明な点が多く、近年、発展がなかった。本研究ではフォトニックバンドから得られる分散面に対して2種類の微分パラメータを定義し、その値から波長分解能と素子寸法を割り出した。その結果、通常のプリズムでは素子がcmオーダーに達し、小型化が達成できないことがわかった。そこで k ベクトルプリズムと名付けた新しい超小型プリズムを提案し、同様の計算から高分解能と小型化が両立されることを示した。さらにフォトニック結晶の出射角を様々に設定し、上記プリズムを組み合わせることで、広角度な光偏向デバイスが可能になることも示した。また超小型プリズムとは異なる後者の研究として、3次非線形媒質からなるフォトニック結晶の伝搬特性を時間領域有限差分解析した。その結果、バンド端付近で光透過率の急峻な非線形飽和が見いだされ、パルス波形整形素子や全光スイッチへの応用が可能になると予想された。

以上により、幸いにも、研究代表者が、光産業技術振興協会櫻井賞(<http://www.oitda.or.jp/sakurai02-j.html>)を受賞した。また、“2次元フォトニック結晶点欠陥活用デバイスにおける面内ヘテロ構造に関する研究”が米国科学誌サイエンスに掲載されることが決定した。さらに、多数の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、(i)より多層化(16層以上)された3次元結晶を作製し、その中に発光体を導入することで、これまで以上の強い光の抑制と欠陥による発光の増強を目指す。この際、発光寿命の測定を通じて、自然放出現象が制御可能なことを実証していく。(ii)さらに多層化フォトニック結晶への線欠陥導入による光の導波制御をさらに推し進める。さらに、A、Bの組み合わせにより、超小型光集積デバイス・回路の基礎を固めていく。一方、2次元結晶を用いた新機能デバイス開発においては以下のように研究を展開する。(i)まず、2次元フォトニック結晶レーザに関しては、1/25に低減したしきい値により、 -20°C における連続発振が可能となったが、本年度は、さらに高い温度での連続発振が可能となるようデバイス設計と、作製を行っていく。さらにユニットセル構造の制御等により、自在な遠視野パターンが得られるよう、設計と試作を行っていく。(ii)一方、2次元結晶欠陥デバイスにおいては、面内ヘテロ構造等の新しい概念のさらなる深い追求を行う。また、複数の点欠陥の結合を利用して、ドロップ特性のさらなる制御を目指して

いく。また、本デバイスの実用化に向け、外部との接続をより深く検討していきたいと思う。また、分散性利用デバイスにおいては、本年度の理論計算の結果を受け、実験的な検討を進めていきたい。以上により、フォトニック結晶による究極の光制御をより深く追求していき、世界のますますトップを走れるような成果を出していきたいと思っている。

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14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) 多層化された3次元フォトニック結晶への発光体の導入(4+1+4構造の作製)と発光抑制効果の検討:

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現象の大幅な抑制ができるものと期待される。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、バンドギャップ波長域は、発光体を導入しない場合と同じ幅をもつ。H12年度の研究では、発光層導入の第一段階として、同図(b)の方

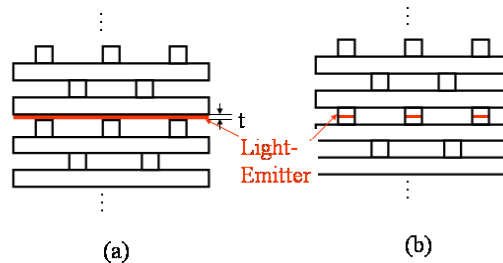


図1

法に先立ち、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、厚さが50nmと非常に薄い発光層を導入した場合、わずかではあるが完全バンドギャップ域が存在し、その波長域において発光が抑制されることを見出し、フォトニック結晶による発光抑制効果の初めての観察に成功した。H13年度は、図1(b)の理想的な条件での発光層の導入を試みた。上下にGaAsフォトニック結晶ストライプ層2層ずつをもち、中央部に、InP/InGaAsP量子井戸発光層をもつストライプ層を導入した2+1+2構造となっている。この構造に対し、発光特性を測定したところ、1.3~1.55 μm において、5-10dB程度の発光抑制効果の観測に成功した(なお、測定は試料の[100]方向においてのみ行っていた)。

本年度は、以上の結果を受け、さらに積層数を増加させ、発光抑制効果の増大と同時に、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を目的に研究を進めた。図2に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

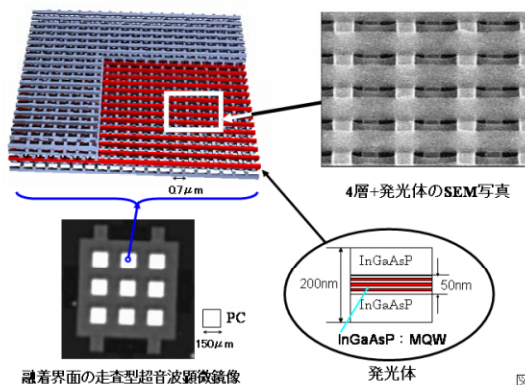


図2

構造となっており、前年度と比べて総数は倍増されている。SEM観察および走査型超音波顕微鏡観察から、作製した試料は、ストライプ崩れもなく、また、良好な融着がなされていることが分かる。得られた試料に対し、図3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4(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、1.45~1.6μm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察を行い、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

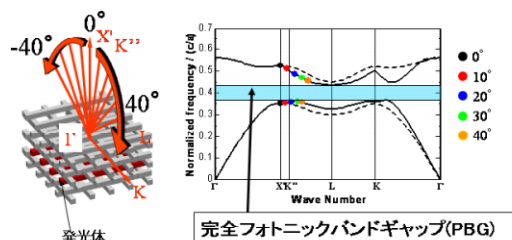


図3

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、昨年度作製した、2+1+2構造に対する様々な方向に対する発光スペクトルを図4(b)に示すが、同図(a)と比較すると明らかなように、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。

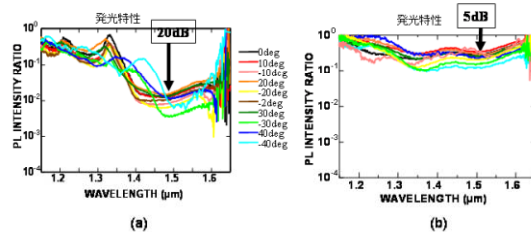


図4

(2) 多層化3次元結晶への点欠陥と発光体の同時導入とその効果：

前項(1)では完全結晶に対し、そ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、様々な観点から自然放出光が抑制されていることを強く示唆する結果を得たことを述べた。次のステップは、発光体に加え点欠陥を同時導入し、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。昨年度は、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、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。ただ、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ため、フォトニック結晶の効果を十分に出しているとは言えない状況であった。本年度は、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に変化させたものとし、その効果を詳細に調べることを目的として研究を進めた。

作製した試料の構造を図5に示す。図に示すように、昨年度と比べて層数を倍増した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A-Eを導入した。このような様々な欠陥を含む試料に対し、まず顕微PL(フォトルミネッセンス)測定を行った。その結果、欠陥部のみに発光が局在し、欠陥のない完全結晶部分では前項で述べたのと同様に発光が抑制されることが明確に観測された。続いて、各欠陥部分のPLスペクトルを、参照用試料(フォトニック結晶をもたない発光部のみの試料)のPLスペクトルで規格化したスペクトルを図6に示す。また比較のため、それぞれのスペクトルにおいて、欠陥のないフォトニック結晶領域(完全結晶部分)を上述の比較領域で規格化したものも合わせて示している。同図より、まず、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、欠陥の大きさが大きくなる(E→A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、

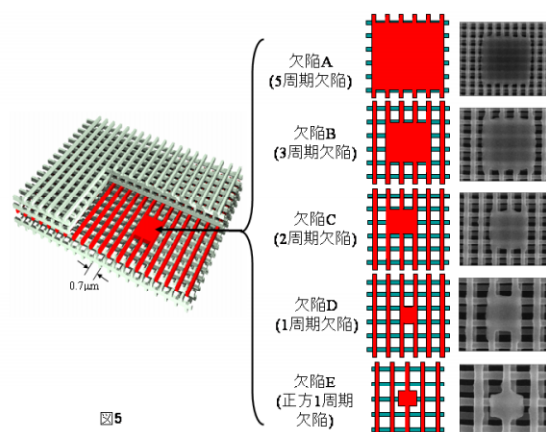


図5

発光に関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ものと考えられる。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A, B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、前項で述べた完全バンドギャップ部分に相当し、それ以外の完全バンドギャップ外の部分に比べて、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欠陥D, E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、昨年度の2+1+2構造では、

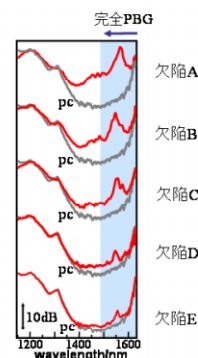


図6

発光スペクトルが観測出来なかった。今回、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ためと考えられる。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7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。

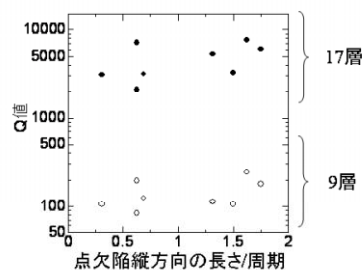


図7

(3) 3次元フォトニック結晶導波路の作製（光通信波長域での初めての作製と評価）

上記、(1)，(2)においては、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次元結晶を用いた光チップの発光部の実現にとって、極めて重要である。一方、光チップにおいては、光を伝播させるための導波路は欠くことの出来ない光エレメントである。本年度は、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8(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、(1)，(2)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。

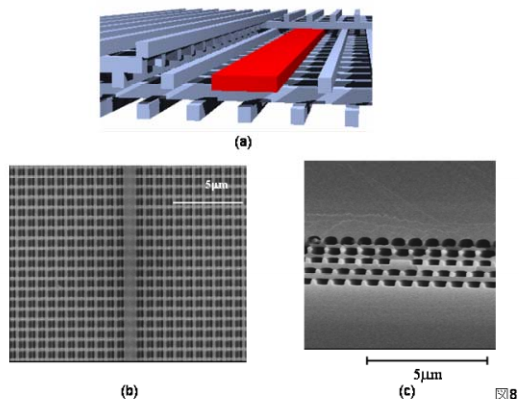


図8

図8(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、同(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。

作製した試料に対し、まず、垂直入射における透過スペクトル特性を測定した結果を図9(a)に示す。同図から、バンドギャップの中の、波長1.4μmおよび1.46μmに明確な透過ピークが見られることが分かる。これは、ストライプ幅を増加させることによ

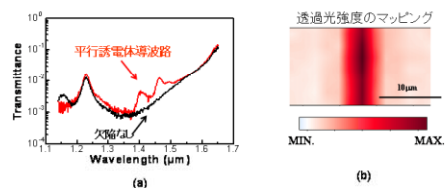


図9

り、欠陥モードが形成されていることを明確に示す結果である。同図(b)は、プローブ波長を上記の透過ピークに合わせて、サンプルの透過像を観察したものである。同図から、導波路部分のみが明確に見て取れ、上記の透過ピークは、ストライプ幅を増加させてことにより、現れた導波路の効果であることが分かる。

以上の準備ののち、試料の端部から光を入射させ、導波の様子を調べた結果が、図10に示されている。同図(a)は、試料の表面写真で、(b)は、1.5 μm 帯の光を入射させた場合の導波の様子を試料表面から観察したものである。図より、確かに導波路を光が伝搬している様子が見て取れる。まだ、層数が、9層であるため、伝搬損失が大きく、光が上部へ放射されている様子が見られるが、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。今後は、より詳細に導波モードを調べ、かつまた積層数を増加させて、導波路損失を減少させていく予定である。

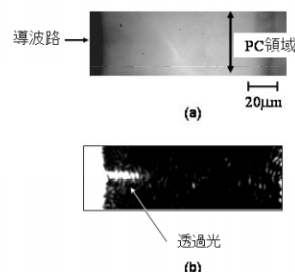


図10

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発振可能なモードの解析

研究代表者等は、これまで、大面積コヒーレント発振可能な全く新しいレーザを実現するため、2次元フォトニック結晶のバンド端での定在波状態を用いるというアイデア(図11にデバイス構造の一例と定在波の形成メカニズムを示す)に基づいた「2次元フォトニック結晶レーザ」を提案し研究を進めてきた。H12年度の研究では、実際に作製したレーザにおいて、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・横モードコヒーレント動作可能なことを実証した。H13年度の研究では、さらに偏光までも制御した、単一縦・横・偏光モードをもつ面発光レーザという究極のレーザ実現のための理論、および実験的な検討を行い、格子点構造として楕円構造を導入することにより、偏光制御が可能であることを示すことに成功した。

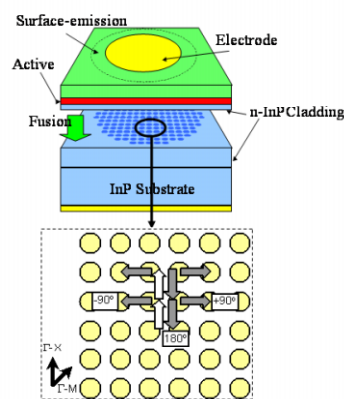


図11

本年度は、まず、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。本デバイスは、フォトニック結晶による面内のフィードバック効果でレーザ発振した光を、同じくフォトニック結晶を用いて共振面に対して垂直方向に光を取り出すことで、面発光を実現しているレーザである。従って、デバイス設計にあたり、共振器面内におけるQ値($Q_{//}$)や、共振面に垂直方向に閉じ込められる光

のQ値(Q_{\perp})が、どのような値、比率をもっているか等が非常に重要なパラメータとなる。

そこで、これらを検討するために、3次元時間領域差分(3D-FDTD)法を用いて解析を行った。なお、解析モデルとしては、計算量を減らすために、図12に示すような上下を空気層で挟み込んだフォトニック結晶スラブを用いた。同図添付図は、格子構造が真円形状をもつ正方格子の場合の発振点付近のバンド構造を、3D-FDTDで求めたものである。図から、1つの2重縮退点C,Dを含む3つの発振可能なバンド端が存在することがわかるが、バンド端A、Bについて、 $Q_{//}$ と Q_{\perp} を計算したものを図13に示す。図13はフォトニック結晶の周期数を横軸に、 $Q_{//}$ 及び Q_{\perp} を縦軸にとったものである。これよりBand端A、Bともに周期数が増えるにしたがって、 $Q_{//}$ と Q_{\perp} ともに増大することが分かる。Band端AとBを比べると、発振に寄与する $Q_{//}$

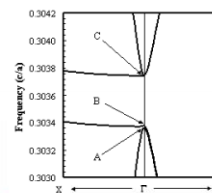


図12

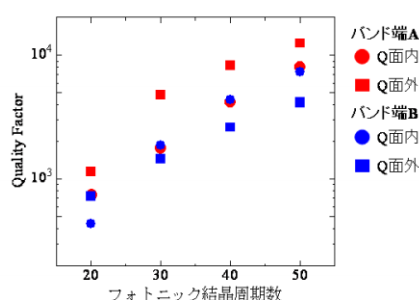


図13

は両者に大きな違いはないが、光の取り出しに寄与する Q_{\perp} は、バンド端Aが $Q_{//}$ より大きいものに対して、バンド端Bは $Q_{//}$ より小さいという特徴がある。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、真円形状の場合には、バンド端Aがより発振しやすいことを示唆している。なお、バンド端C、Dは縮対しているため、計算から除外しているが、これらのモードは、外部への光の結合がより強いと予測されるため、 Q_{\perp} はより小さくなるものと考えられる。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、 $Q_{//}$ と Q_{\perp} の差はより大きくなっているものと考えられる。今後は同様の計算を楕円形状や、より高度に結晶構造を制御したレーザに対して行い、発振可能なモードのQ値の制御に関して、より踏み込んだ議論をしていきたいと考えている。

(2) 2次元フォトニック結晶レーザの閾値の低減

これまで、主に、フォトニック結晶レーザのもつ特長を様々に引き出すこと、さらに、単一縦・横モード発振等の理想的なレーザの実現可能性の実証を目指して、研究を進めてきた。サイエンス面では、これまで順調に成果を挙げることが出来たが、このレーザを産業へと展開させるためには、閾値がこれまで2A程度と高く、この閾値を大幅に減少させることが極めて重要である。本年度は、閾値の低減をもう一つの重要な目的に挙げて、研究を進めた。

これまで、我々が研究してきたデバイス構造では、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、フォトニック結晶部に分布する光の割合を1.3%程度

としていた。この250nmに設定した理由は2つあり、1つは、350 μm 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、250 μm 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70-100 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50~80nm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、従来はフォトニック結晶は、図11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14に示すように、活性層側(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、1000 cm^{-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 μm □から、30~50 μm Yと大幅に減少させることが可能となると期待される。

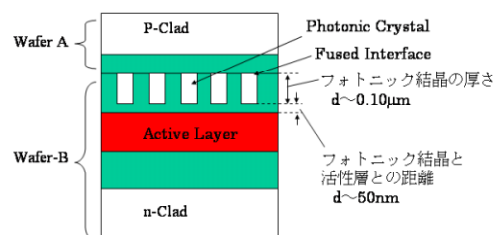


図14

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。その表面写真を図15に示す。電極サイズは、50 μm □とした。本デバイスに対する光出力-電流特性の一例を図16に示す。同図より、閾値、40~50mA程度と、従来の2Aから1/20~1/25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 $^{\circ}\text{C}$ 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17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

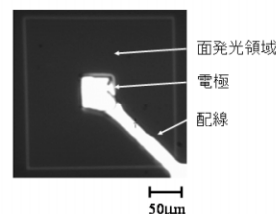


図15

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。以上の結果は、図18に示すように、日本のメジャーなエレクトロニクス関連の展示会シーテック2002において、発表し、大きな注目を集めた。

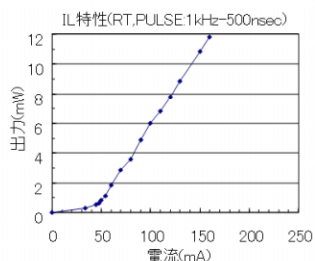


図16

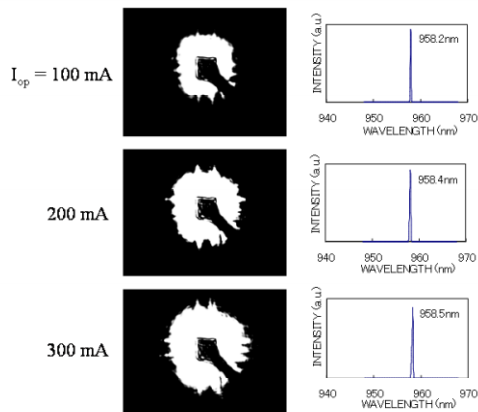


図17



CTEATEC'02(旧エレクトロニクスショー)にて展示 図18

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) ナノメートル精度で制御された試料作製と点欠陥による光取り出し効率の定量的評価

本デバイスの原理図を図19に示す。この図に示すように、本デバイスは、2次元フォトニック結晶スラブに、線欠陥および点欠陥を導入し、線欠陥導波路を伝搬する様々な波長の光のうち、点欠陥共振器に共鳴する光を点欠陥によりトラップし、自由空間に放射するという原理 (あるいは、その逆) により、超小型波長分合波動作を得ようとするもので、研究代表者独自のアイデアに基づくものである。すでに、H13年度までの研究において、基本動作の実証に成功しているが、様々に解決すべき課題が残されていたその一つが加工精度である。これまで、材料系として 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

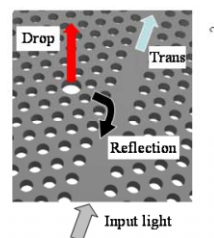
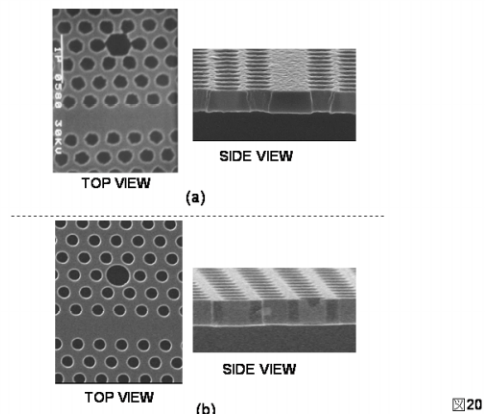


図19

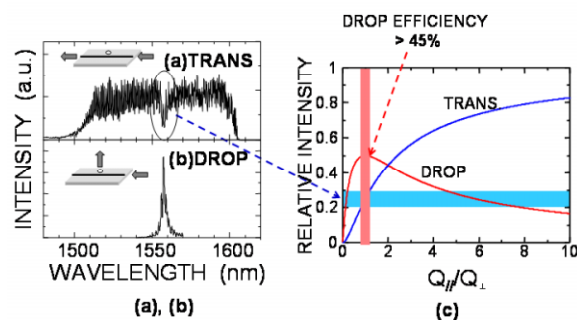
料は、図20(a)に示すように、大きな揺らぎをもったものであった。本年度は、まず、十分に揺らぎの少ない試料を作製する技術を確立するとともに、得られた試料をもとに、より定量的な評価（特に本項では、点欠陥からの光の取り出し効率の定量的な評価）を行うことを目的に研究を進めた。

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20(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21(a), (b)に示す。同図(a)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フリンジ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(a)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(b)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。（注：H12年度の報告では、非常に簡便な方法として、導波路端部からの散乱光の明るさが、点欠陥からのドロップの有無により、どのように変わるかという方法を用いていたため定量的な評価が出来なかったが、今回初めて、定量的な評価が可能となった。）図21(c)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($Q_{//}$)と、垂直方向の(Q_{\perp})の比がとられている。ここに、 $Q_{//}$ は、点欠陥と導波路との距離で決まり、距離が大きいほど、 $Q_{//}$ が大きくなり、逆に、距離が小さいほど、 $Q_{//}$ 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

図20

図21

決まると、導波路との距離にはほぼ関係なく一定値をとることになる。図21(c)の意味するところは、横軸 $Q_{//} / Q_{\perp}$ が大きいとき（すなわち、相対的に $Q_{//}$ 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、 $Q_{//} / Q_{\perp}$ が小さい（すなわち $Q_{//}$ 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、 $Q_{//} / Q_{\perp}=1$ の時となる。同図の透過率と、図21(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(c)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していると判断出来る。（光取り出し効率は、さらに大きくすることは可能である。これについては、後述することにする。）

(2) ドナー型欠陥の導入によるQ値の大幅な増大

前項の結果から、ほぼ理想的な構造の試料が作製出来、かつまた、図21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21(b)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22(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、所謂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_{\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22(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。

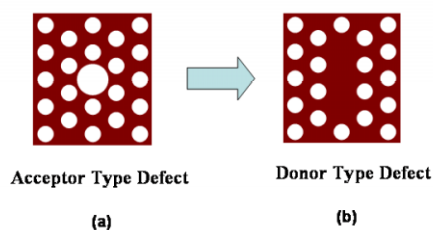
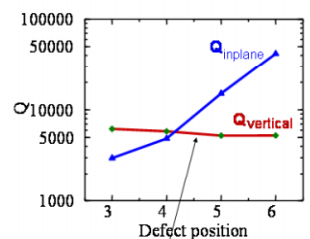


図22



~10 times for Acceptor Type

図23

まず、理論計算を行った。その結果を図23に示す。横軸は、点欠陥と導波路との距離である。

縦軸は、(1)で議論を行った、 $Q_{//}$ 、 Q_{\perp} の値である。同図から、点欠陥と導波路の距離が離れるにつれ、 $Q_{//}$ が増大していくことが分かる。この理由は、(1)で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、

$$1/Q = 1/Q_{//} + 1/Q_{\perp}$$

の関係から決まるため、(1)で議論したように、最大効率が得られる $Q_{//} / Q_{\perp} = 1$ 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24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25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。わずか、1 μ m程度の大きさで、このように高いQが得られるのは、フォトニック結晶の特長を十分に引き出した結果と言える。

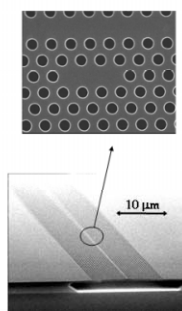


図24

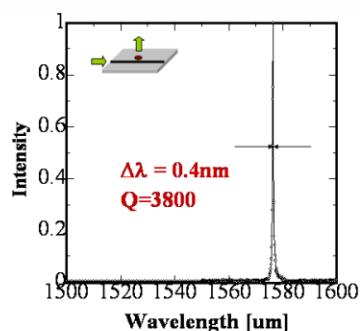


図25

(3) 新しい概念「面内ヘテロ構造」の概念の提唱

上記(2)により、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24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としても、その際に次のような問題が生じる。それは、(1)および(2)でも述べたように、欠陥のQ値は、面内方向の $Q_{//}$ 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、 $Q_{//} = Q_{\perp}$ 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、 $Q_{//}$ 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、 $Q_{//} = Q_{\perp}$ 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。本年度は、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26にその概念を図示して示す。以上が、「面内ヘテロ構造」の原理である。

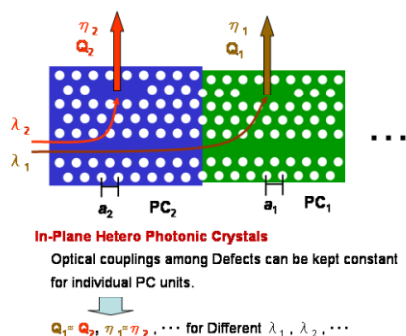


図26

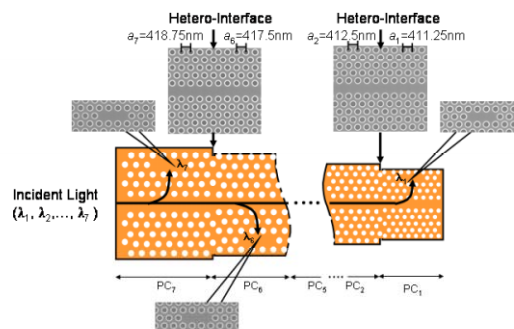


図27

以上の考えに基づき、実際に図27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、線欠陥が一系列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27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28(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

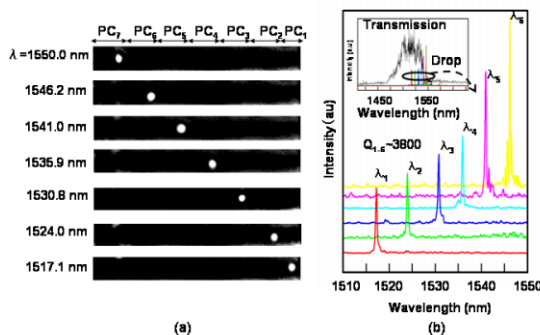


図28

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28から、5~7nm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、~3800で、前項(2)で1つの波長に対して得られた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28(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~3800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と考えられる。現在、ヘテロ界面の反射によるドロップ効率の大幅に増加の可能性を、より詳細に検討しているところである。このヘテロ界面での反射の利用は、本デバイスに限らず、様々なデバイス特性の向上に寄与することが出来るものと考えている。以上の成果は、幸いなことに、2003年5月号(あるいは6月号)に米科学誌サイエンスに掲載される予定である。

(4) その他、基礎的重要事項の検討

その他、本年度は、さらに構造揺らぎが導波路の伝播損失に与える影響に関しても深く検討し、上下非対称性が、導波路モードとスラブモードの結合を誘起し、伝播損失に寄与することを見出した。図29(a)には、フォトニック結晶形成時に、格子点が上下に非対称(傾き θ)をもつ場合の計算モデルを示している。図29(b)は格子点の傾き θ に対する導波損失をプロットしたものである。これより、 1° 程度の傾きがある場合にも、0.4-0.5dB/mm程度の損失が生じることが分かり、出来る限り上下の非対称を除去する必要があることが分かった。その他、本研究では、本デバイスと外部との光結合に関しても検討を進めているところである。

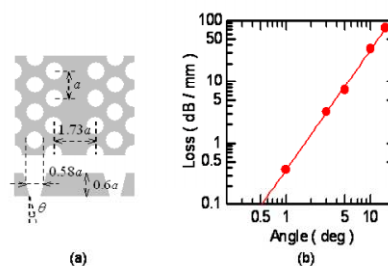


図29

B-3. フォトニック結晶の高分散性を利用した新しい機能デバイス

フォトニック結晶には、フォトニックバンドギャップと欠陥による強い光閉じ込めを利用する応用と、欠陥をもたないフォトニック結晶の光透過波長域での応用が存在する。本項では、後者の重要なデバイスである超小型プリズムと3次非線形デバイスに取り組んだ結果について述べる。

超小型プリズムは、1998年にフォトニックバンドの分散面を用いた原理説明がなされ、

大きな角度分散が実証されて以来、フォトニック結晶の分野では小型高分解能フィルタの実現が待望されてきた。しかしその後、光ビーム伝搬の様子が複雑かつ光の入射条件に非常に敏感なことがFDTDシミュレーションから分かった。このようなことは、当初の原理説明からは簡単には説明できない。しかも角度分散の大きさばかりが注目されたために、フィルタ本来の重要な性能である分解能に関して、ほとんど具体的な議論がなされなかった。本研究では、従来の説明で用いられてきた平面波的な光の取り扱いをやめ、現実的な有限幅の光ビームに対する解析を行った。有限幅のビームは角度広がりをもつため、入射角度に対する光伝搬特性の急激な変化がビーム品質を大きく劣化させ、大きな角度分散効果を相殺する可能性がある。フィルタ分解能は、これら2つの効果を総合的に考慮して見積もるべきである。そこで本研究では、まずビームコリメートパラメータと波長感度パラメータという2つの微分パラメータを定義し、光ビームに対する分解能を定式化した。そしてその値をフォトニックバンドの分散面に対応させてマッピングした。また入射波長を変化させたとき、ビームの主要な入射角に対する連続的な特性の変化を表す等入射角線を定義し、ある等入射角線上の分解能が実際にフィルタとして利用できる分解能であることを示した。分散面と等入射角線の間を関図30に、2つのパラメータと分解能をマッピングした結果を図31に示す。様々な2次元フォトニック結晶に対して同様の計算を行った結果、従

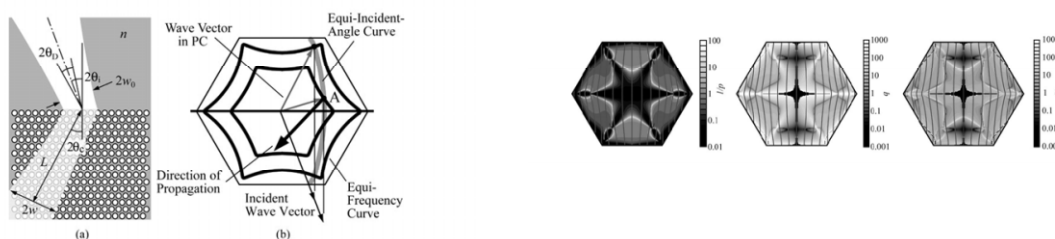


図30

図31

来のスーパープリズムでは高分解能が得られる波長範囲が比較的狭く、しかも要求されるフォトニック結晶の長さが10cm前後に及ぶことがわかった。このままでは当初、期待されたフィルタは実現できない。ただし従来のスーパープリズムが原理としていたポインティングベクトル S の角度分散以外にも、波数ベクトル k も S とは異なる大きな角度分散を示すことを新たに見いだした。本研究ではこれを k ベクトルプリズムと名付け、同様の分解能計算を行った。その結果、従来のプリズムの2倍以上の広帯域で同程度の高分解能が得られることがわかった。このプリズムが従来のプリズムと決定的に異なるのは、斜めの出射面での屈折を利用して異なる波長の光ビームを空間分解できる点にある。すなわちフォトニック結晶を100 μm 角以下と劇的に小さくすることができ、小型高分解能フィルタへの期待が改めて生まれてくる。現在、SOI系フォトニック結晶スラブを用いて同フィルタを製作中であり、次年度以降、その実証を目指す予定である。

3次元非線形とフォトニック結晶を関連づける具体的な研究は世界的にも乏しかった。本

研究では、磁界から直接、電界を導かず、磁界から電束密度、そして電界という順番に計算を行う非線形FDTD法を採用し、光伝搬特性をシミュレートした。モデルには点欠陥や線欠陥も考えられるが、本年度は手始めとして、欠陥をもたない均一なフォトニック結晶を採り上げた。3次非線形感受率を適当に設定して計算を行った結果、高次のフォトニックバンドにおいて急峻な透過率の非線形飽和が起こることがわかった。これはフォトニック結晶内の光の局在により誘起される屈折率変化によりフォトニック結晶の透過スペクトルがシフトし、高透過帯が低透過帯に重なるためである。この現象は特に第2バンドの Γ 点付近で顕著なことがわかり、群速度の低下による光局在が非線形を増大させていることが明確になった。この非線形性は、光パルスの波形再生や全光スイッチ動作等に利用可能である。この Γ 点付近は、フォトニック結晶スラブにおいてライトラインの上にあるにもかかわらず放射損失が小さいので、短パルス光源などを準備することで現象の確認も可能と考えられる。また線欠陥や点欠陥ではより直接的な光局在が起こるので、今後は様々なモデルに議論を拡大し、多機能を探求する。

3. 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2、3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3で述べた**A(3)** 3次元結晶導波路の初めての実現に関して、特に理論面で貢献した。

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野田グループに協力しつつ進めた。具体的には、上記の3で述べた**B-2 (4)** で述べた導波路の導波特性の詳細な検討および、**B-3**で述べたフォトニック結晶中での特異な分散特性を利用した新しいデバイスに関する研究において大きな貢献をした。

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文発表

英文論文：

- S. Noda and M. Imada: IEICE Transactions C E85-C (2002) 45-51 “2D Photonic Crystal Surface-Emitting Laser Using Triangular-Lattice Structure” (Invited).
- M. Imada, A. Chutinan, S. Noda, and M. Mochizuki: Phys. Rev. B 65 (2002) 195306-1-8 “Multi-directionally distributed feedback photonic crystal lasers”
- M. Imada, A. Chutinan, S. Noda, and M. Mochizuki, Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology 5 (2002) Issue 18 “Multi-directionally distributed feedback photonic crystal lasers” .
- S. Noda, M. Imada, and M. Okano: Proceedings of SPIE “Photonic bandgap materials and devices”, 4655 (2002) 160-172 “Semiconductor photonic crystals and functional devices” .
- 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” .
- M. Imada, S. Noda, A. Chutinan, M. Mochizuki, and T. Tanaka: IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology 20 (2002) 873-878 “Channel drop filter using a single defect in a 2D photonic crystal slab waveguide” .
- M. Yokoyama, M. Imada, and S. Noda: Proceedings of SPIE “Novel in-plane semiconductor lasers”, 4651 (2002) 222-232 “Two dimensional photonic crystal lasers” .
- 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” .
- S. Noda: J. Optical and Quantum Electronics, 34 (2002) 723-736, “III-V semiconductor-based photonic crystals” .
- N. Yamamoto and S. Noda: J. Appl. Phys. 92 (2002) 2256-2259 “Accurate identification of the band gap of photonic crystals from transmission spectra” .
- M. Imada, S. Noda, T. Asano, and M. Yokoyama: Proceedings of SPIE “Active and passive optical components for WDM communications II” 4870 (2002) 348-356 “Optical functional devices based on photonic crystals -Laser and add-drop devices” .
- S. Noda, M. Imada, M. Okano, S. Ogawa, M. Mochizuki, and A. Chutinan: IEEE J.

- Quantum Electron. 38 (2002) 726-735 "Semiconductor three-dimensional and two-dimensional photonic crystals and devices" (invited paper).
- M. Okano, A. Chutinan, and S. Noda: Phys. Rev. B 66 (2002) pp.art. no. - ar165211 "Analysis and design of single-defect cavities in a three-dimensional photonic crystal".
 - E. Miyai, M. Okano, M. Mochizuki, and S. Noda: Appl. Phys. Lett. 81 (2002) 3729-3731 "Analysis on coupling between 2D photonic crystal slab and external waveguide" .
 - Y. Akahane, M. Mochizuki, T. Asano, Y. Tanaka, and S. Noda: Appl. Phys. Lett., 82 (2003) 1341-1343 "High quality channel drop filters by using donor type cavities in two-dimensional photonic crystal slabs" .
 - A. Sugitatsu and S. Noda: Electron. Lett., 39 (2003) 123-125 "Room temperature operation of a two dimensional photonic crystal slab defect-waveguide-laser with optical pump" .
 - Y. Tanaka, T. Asano, Y. Akahane and S. Noda: Appl. Phys. Lett., 82 (2003) 1661-1663 "Theoretical investigation of propagation loss of a line defect waveguide in a two-dimensional photonic crystal slab with tapered air holes" .
 - A. Sakai, T. Fukazawa and T. Baba: IEICE Trans. Electron. E85-C (2002) 1033-1038 "Low loss ultra-small branches in Si photonic wire waveguides".
 - T. Baba, A. Motegi, T. Iwai, N. Fukaya, Y. Watanabe and A. Sakai: IEEE J. Quantum Electron. 38 (2002) 743-752 "Light propagation characteristics of straight single line defect optical waveguides in a photonic crystal slab fabricated into a silicon-on-insulator substrate".
 - T. Baba and M. Nakamura: IEEE J. Quantum Electron. 38 (2002) 909-914 "Photonic crystal light deflection devices using the superprism effect".
 - T. Baba and T. Matsumoto: Appl. Phys. Lett 81 (2002) 2325-2327 "Resolution of photonic crystal superprism".
 - K. Aoki, H. Miyazaki, H. Hirayama, K. Inoshita, T. Baba, N. Shinya and Y. Aoyagi: Appl. Phys. Lett. 81 (2002) 3122-3124 "Three-dimensional photonic crystals for optical wavelengths assembled by micromanipulation"
 - R. Ushigome, M. Fujita and T. Baba: Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) 6364-6369 "GaInAsP microdisk Injection laser with Benzocyclobutene polymer cladding and its athermal effect".
 - T. Fukazawa, A. Sakai and T. Baba: Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) L1461-L1463 "H-tree-type optical clock signal distribution circuit by a Si photonic wire waveguide".

日本語論文

- 山本宗継、野田進：レーザー研究 30, 59-64 (2002) “ウエハ融着を用いた3次元フォトニック結晶”.
- 横山光, 今田昌宏, 野田進：MATERIAL STAGE 1 (2002) 23-29 “二次元フォトニック結晶面発光レーザー”.
- 野田進：化学同人 (2002年)、 “フォトニック結晶”
- 野田進, 馬場俊彦, 納富雅也, 小野雄一編：光産業技術振興協会, 2002年、“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)”
- 野田進：固体物理、2002年5月号、 “究極の光制御材料：フォトニック結晶”
- 横山光, 野田進：月刊化学工業 化学工業社刊 “二次元フォトニック結晶レーザー”
- 野田進, 横山光：続・図解ナノテクノロジーのすべて 工業調査会刊 “フォトニック結晶を使った半導体レーザー”
- 野田進：電子情報通信学会誌2002年11月号「ナノテクノロジーの光とエレクトロニクスへの応用」特集、 “フォトニック結晶”.
- 野田進、浅野卓、山本宗継：応用物理学会誌2002年11月号、“フォトニック結晶による光子制御”
- 野田進：権田編、「薄膜ハンドブック」 2編 6章 3節、 “フォトニック結晶”
- 野田進：日本オプトメカトロニクス協会編、光技術コンタクト (2002), “新しい光ナノ材料：フォトニック結晶”
- 野田進、今田昌宏、小川新平、岡野誠、吉本晋：O plus E vol. 25 (2003) 169-174 “3次元フォトニック結晶と光制御”
- 馬場俊彦, “フォトニック結晶の現状と将来”, 日経先端技術6, 12-15 (2002年4月).
- 馬場俊彦, “オプトエレクトロニクス・光デバイス”, 光学31 (5), 237-238 (2002年5月).
- 野田進, 馬場俊彦, 納富雅也, 小野雄一編集, 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), 光産業技術振興協会, (2002年5月).
- 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40(8), 463-472 (2002年8月).

(2) 特許出願

H14年度特許出願件数：8件 (研究期間累積件数：16件)