

「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族半導体を用いた完全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、点欠陥共振器の設計を行い、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）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。H14年度は、結晶の層数をH13年度の5層積層構造から、9層積層構造へと倍増させることに成功し、フォトニ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。H15年度は、フォトニック結晶の発光抑制効果を発光寿命の観点から評価し、フォトニック結晶が発光寿命の増大をもたらすことを示唆する結果を得た。併せて、点欠陥からの発光を詳細に評価し、発光スペクトルのピーク波長・半値幅が、測定角度によらずに一定であることを示すと同時に、これまで、観測不可能であった $440 \times 600 \text{nm}^2$ という極微小欠陥からの発光の観察に初めて成功した。

また並行して、3次元フォトニック結晶による光伝搬制御にも取り組んでおり、H12～13年度は、光通信域3次元結晶中への欠陥導波路の導入を目指し、その積層条件の詳細な検討を行った。特に、走査型超音波顕微鏡の導入により、結晶の多層積層条件をかなり明確

にすることが出来た。H14年度は、上記の非破壊界面測定技術の確立により、3次元フォトニック結晶導波路を光通信域で初めて試作することに成功した。H15年度は、前年度、試作に成功した導波路のより詳細な評価・解析を行い、バンド構造における導波モードとの対応を詳細に調べた。さらに、理論計算も積極的に進め、より広い波長域での単一モード動作可能な導波路の設計にも成功した。

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よる新しいデバイス：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。またこれら2つのデバイスとは別の原理を利用したものとして、2次元結晶バンドエンジニアリングデバイスの可能性をさぐることもH14年度より開始した。

まず、2次元フォトニック結晶レーザでは、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が実現可能であることを実証することに成功した。H14年度は、FDTD法を用いて発振モードの本格的な解析を行い、楕円形状のユニットセル構造レーザのより詳細なモード解析や発振のためのQ値の検討等を行うと同時に閾値を従来の1/25と大幅に低減することに成功し、 $-20^{\circ}\text{C}$ という低温であるが初めて連続発振に成功した。H15年度は前年度の結果を踏まえ、室温連続動作の可能性を検討した。その結果、活性層と融着界面の間に存在するキャリアブロック層のバンドギャップの大きさが不十分であることを見出し、ブロック層(AIGaAs)のAl組成を0.25から0.3へと増大させることにより、室温連続発振に世界で初めて成功した。また一方で結晶(あるいは格子点)構造とバンド構造の関係を直接的に把握するための手法、すなわちバンド構造の直接測定法の開発に成功し、さらに結晶構造と発振モードに関する理論計算をも積極的に進め、ビームパターン制御のための基礎を築いた。

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、欠陥形状を変化させることで、上下に取り出される光の上下比や、取り出される光の偏光を制御できることを明らかにした。H14年度は、波長分解能の向上にとって、極めて重要な点欠陥のQ値を増大させることを目指して、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

精度で設計通りの試料を作製する技術を確立した。この結果を基に、これまでのアクセプタ型の欠陥からドナー型の欠陥にすることで、それまでの数100というQ値から、3,000を越える高いQ値をもつ点欠陥共振器の実現に成功した。H15年度は、さらに高度な欠陥エンジニアリングとナノデバイス作製技術を駆使することにより、Q値として、45,000という世界最大の値をもつナノ共振器の実現に成功した。そのポイントは、光を強く閉じこめるためには、逆に光を緩やかに閉じこめるための機構が必要であるという逆説的かつ重要な概念を見いだしたことにある。併せて、この高Q値共振器の実現により、面内型波長合成分波デバイスを始め、新たなデバイス展開の道をも開くことにも成功した。一方で、H14年度より新しい概念である「面内ヘテロ・フォトリック結晶」を提案し、その可能性について検討を行っている。H14年度は、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、フォトリ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。H15年度は、上記の概念を用いて、わずか1.25nmの格子定数差をもつ7つの結晶からなる面内ヘテロ構造を作製し、世界で初めてフォトリック結晶を用いて7波の合成分波動作の実証に成功した。また、ヘテロ構造における界面での反射を利用することに光子の操作効率が~100%としうることをも理論的、実験的に実証することに成功した。またH14年度より開始した2次元バンドエンジニアリングデバイスについては、フォトリック結晶の分散面の特異性を利用したスーパープリズムについて検討を行い、波数ベクトル $k$ の偏向を利用する、 $k$ ベクトルプリズムと名付けた方法によって従来のスーパープリズムよりも高分解能が得られる条件を見いだすことに成功した。

以上のようなこれまでの研究経緯を受け、H16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、まずバンドギャップによる自然放出光制御をより直接的に測定する手法として、フォトリック結晶中に導入した発光層からの自然放出光強度の時間分解測定を行った。その結果、フォトリックバンドギャップ波長域に近づく程、キャリアの緩和時間が遅くなることを明らかにした。これは、フォトリック結晶によって光の状態密度が減少したために、キャリアの発光再結合が抑制されていることを示唆する結果である。また、微小点欠陥への光の局在現象に関する詳細な評価を行い、顕微測定により、フォトリックバンドギャップ外の波長では、欠陥部分と完全結晶部における差は見られないが、フォトリックバンドギャップ波長においては、欠陥部分に明確に発光が局在する様子が観察された。この結果は、フォトリック結晶において、これまで、世界的にその実証が待たれた発光現象の完全制御に初めて成功したことを意味する。幸いにも、この成果は、2004年7月号（On-lineでは6月号）の米科学誌サイエンスに掲載され、国内外の大きな関心を集めた。理論面においても、群論を取り入れた欠陥解析を精力的に行い、上記実験結果の理論的な裏付けを行った。さらに昨年度導入された新しい位置合わせ装置の立ち上げを行い、より大きなフォトリックバンドギャップ効果を得るための試料作製の基礎を築いた。一方、光伝搬制御においては、フォトリック結晶導波路についてより進ん

だ理論検討を行い、モードフィールドが小さく、かつ空気導波モードと誘電体導波モードの極めて整合性のよい導波路構造を見つけ出すことに成功した。従来と比べ、垂直方向へのモード広がり、数分の1程度に低減出来、結晶の積層数の低減を図れる可能性があることを示した。

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、レーザ構造のより深い理論的・実験的検討を行った。ブロック層のさらなる改善を行い、40°Cを超える温度での発振の実現と、閾値も従来の約半分の30mA程度まで低減可能なことを実験的に示すことに成功し、実用化へのさらなる一步を踏み出すことが出来た。また並行して、前年度の理論計算結果を踏まえて、結晶構造の制御に実験的に取り組んだ。まず、フォトニック結晶構造が、デバイス作製時に(すなわちウエハ融着時に)にマストラנסポート現象等により崩れることがないように、融着温度の最適化を行った。具体的には、従来の520°Cから450°Cまで融着温度を下げることで、空気孔形状の変化が十分に抑制されることを見出した。この条件のもと、結晶構造に $\pi/2$ の位相シフトを導入することを試みた。その結果、これまでのリング状の遠視野像から、リングが2つ並んだ非常に興味深い遠視野像へと変化することを見出した。この結果は、結晶構造の制御により、ビームパターンの制御が可能になることを実証したものと見え、今後のレーザのさらなる高機能化へ向けた重要なステップと位置づけることが出来る。

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、H16年度は、上記の高Q共振器を達成するための電界分布として、具体的には、どのような分布が適切に関し、各種分布関数(ガウス関数、ローレンツ関数、指数関数等)について検討を行った。その結果、電界分布として、ガウス関数が、モード体積を小さく保ったまま、Q値を増大させるために最も適切であることを見出した。この成果の一部は、2004年5月号の、英科学誌ネイチャーのブリーフコミュニケーションにおいて、フランスのグループとのディベート形式で掲載され、高Q値共振器実現のための、さらに深い知見を世界に発信することが出来たと考えている。また、この結果を踏まえて、昨年度実現した高Q値光ナノ共振器の電磁界分布を、よりガウス関数に近づけてさらに高いQ値を実現することに取り組み、昨年度の記録45,000の2倍の100,000という高いQ値を実現した。一方、面内ヘテロ構造についても理論・実験的検討を行い、これが高Q値共振器実現の鍵を握ることを発見した。具体的には、2つの異なる格子定数をもつフォトニック結晶A、B(それぞれ線欠陥導波路を含む)を交互にならべ、A-B-Aのようなダブルヘテロ構造を形成する。ここで、Bの格子定数をAに比べわずかに長くすると、Bの導波路には光は存在出来るが、Aの導波路にはモードギャップ効果により存在できないように調整可能となる。この場合、Bに局在する光は、Aの領域へ、高Q共振器実現にとって最も理想的であるガウス関数に従って減衰しながら閉じ込められることが判明した。その結果、実験的にも、昨年度に比べ一桁以上高い、600,000という世界最大のQ値をもつ共振器の実現に成功した。この成果は、幸いにも、2005年3月号(2月にon-line)の英科学誌ネイチャーマテリアルズに掲載された。さらにチャープ構造面内ヘテロの概念を展開し、チャープ構造を

詳細に調べ、光遅延の可能性についての詳細な検討を行った。

また(B-3)2次元バンドエンジニアリングデバイスについては、①フォトニック結晶線欠陥導波路の基礎特性の解明、②スーパープリズムなどの高分散性効果の利用を目指している。本年度は特に前者に関して、昨年度までに提案し、実験または計算によって実証してきたチャープ構造と分散補償構造の最適化と実験を進めた。

チャープ構造は、伝搬特性を連続的に変化させ低群速度帯域を拡大する。実際に、円孔直径チャープ構造では、バンド端シフトが観測されている。また分散補償構造とは、逆分散をもつ二種類の導波路の方向性結合器である。昨年度、時間領域有限差分(FDTD)計算で、遅延が与えられつつ、入射パルス波形が再生されることが確認されたが、反射損失が生じることが問題となっていた。そこでまず本年度は、構造全体を考慮に入れたバンド計算を行い、反射の原因がバンド端での結合ギャップであること、大きな遅延と低反射には適度なチャープ傾斜と比較的大きな導波路間隔が必要となることを明らかにした。また様々なバンド計算の結果、円孔直径や線欠陥幅を調整した単純な線欠陥や、同種類の導波路を組み合わせた結合導波路でも零分散遅延が得られること、この場合は無反射での動作が可能であることを示した。

実験では、SOI基板上に作製された円孔直径チャープ構造をもつ正負分散導波路の光伝搬特性の詳細な測定、バンド端のシフト、群速度に対応するファブリーペロー共振間隔の変化、方向性結合器における伝搬帯域のスイッチングの観測を目指した。まず通常の線欠陥導波路の他に、中央に位相シフトさせた小円孔を有する逆分散導波路においても、理論通りの透過帯域のシフトが観測された。そしてファブリーペロー共振間隔から、バンド端近くでは真空中の光速の1/300の低群速度が見積もられた。さらにチャープを含むこれら導波路の方向性結合器を作製したところ、二本の導波路からの出力がFDTD計算結果と一致するスペクトルを示したことから、理論通りの動作が確認された。

現在、さらに短パルスでの遅延測定を目指しており、光学系を構築中である。数ピコ秒以下の短パルスでの群速度低下については、本領域代表を含むいくつかの機関で測定が行われているが、最も遅いものでも光速の1/20程度である。これは分散によるパルス広がりによって伝搬強度が低下し、観測が困難になることが主原因と思われる。本研究で提案している分散補償構造を利用すれば、1/100以下の速度までの評価が行えるものと期待している。

以上により、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)、大阪科学賞(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)、第14回応用物理学会講演奨励賞受賞を受賞した。また、”3次元フォトニック結晶による発光制御”が2004年7月号(On-lineでは6月号)の米科学誌サイエンスに、”2次元フォトニック結晶光ナノ共振器における電磁界分布の形状とQ値の関係に関する研究”が2004年5月号の、英科学誌ネイチャーのブリーフコミュニケーションに、”面内ヘテロフォトニック結晶による高Q値共振器に関する研究”が2005年3月号(2月にon-line)の英科学誌ネイチャーマテリアルズに掲載された。また、昨年度と同様、国内外の学会・雑誌での数多くの

基調講演・招待講演・解説記事執筆を行った。特に、IEEE/LEOS学会では、500人を超える聴衆の前で基調講演を行い、大きな関心を集めることが出来た。それ以外にも多くのメディアでの報道を受け、社会への成果の認知図ることができた。

今後については、3次元フォトニック結晶については、(i)H16年度に立ち上げた新しい3次元結晶作製装置を用いて、フォトニックバンドギャップ効果がより強く発現する結晶作製を押し進めるとともに、(ii)発光寿命の評価をさらに推し進め、バンドギャップ効果に基づく発光ダイナミクスを明らかにすることを旨とする。(iii)さらに今後の発展研究へ向けて、電流注入可能な構造の実現のための基礎的課題にも着手していきたいと思っている。以上をもとに、3次元フォトニック結晶による究極の光制御の基盤技術を確立していく。また(iv)光伝搬制御については、H16年度に設計に成功した各種の新しい3次元導波路構造の試作を、新しく立ち上げた装置を用いて行い、その特性を明らかにしていくことを旨とする。

一方、2次元結晶を用いた新機能デバイス開発については、以下のように研究を進めていく。まず2次元フォトニック結晶レーザについては、(i)より出力の高いデバイス実現を目指し、デバイス構造のさらなる詳細な検討を行い、キャリアの漏れの完全防止、さらには、面内ヘテロ構造の概念の導入等を図り、不要部への光放射を禁止させるような工夫を図っていく。(ii)併せて、ユニットセル構造の制御を積極的に推し進め、従来の概念を超えた様々な出力ビームパターンをもつレーザの実現を目指していく。2次元結晶欠陥デバイスについては、(i)さらなる高性能化として、波長合分波機能における波長数の増大に取り組む。具体的には、これまでの7波から、その2倍以上の波長処理を目指す。この際、ヘテロ構造の多段化をより高精度に実現していくことになる。(ii)また、外部の光ファイバとの接続との接続にも是非取り組んでいきたい。(iii)また、2次元フォトニック結晶高Q値共振器については、構造揺らぎなどの損失要因の影響とその低減などについてさらに深く検討を行い、さらに強い光閉じ込め効果をもつナノ共振器の実現に取り組んでいく。2次元分散制御デバイスについては、チャープ構造による光遅延機能の実証を目指す。また、これまでに取り組んできたスーパープリズム機能の詳細な検討を引き続き進めていく。

これらの取り組みを通じて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たい、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

1. の研究実施の概要でも述べたように、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くと考え、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

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16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

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した場合、フォトニックバンドギャップによって、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。さらに、結晶中に意図的に周期を乱した欠陥を導入すると、バンドギャップ中に欠陥準位が形成され、この準位でのみ発光が許容されることが期待される。H12～H13年度の研究を通じて、3次元フォトニック結晶の周期性を乱すことなくストライプ状に加工した発光材料を導入する技術を確認し、ストライプ型発光層の上下を2層フォトニック結晶で挟み込んだ5層積層構造を実現した。この試料の発光スペクトルを測定した結果、1.3～1.55 $\mu\text{m}$ 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）。H15年度は、さらにフォトニックバンドギャップ効果を強くするために、積層数を5層から9層（発光層1層の上下を4層フォトニック結晶で挟み込んだ構造）に倍増した構造（図1参照）を完成させ、図2に示すように-20dB以上、発光層からの発光が減衰していることを明らかにした。これらを踏まえて、H16年度は以下の研究を行った。

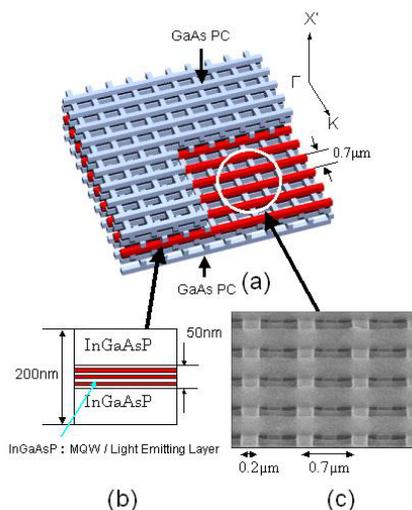


図1 (a)9層積層試料の模式図、  
(b)発光層の模式図、(c)5層積層  
時のSEM写真。

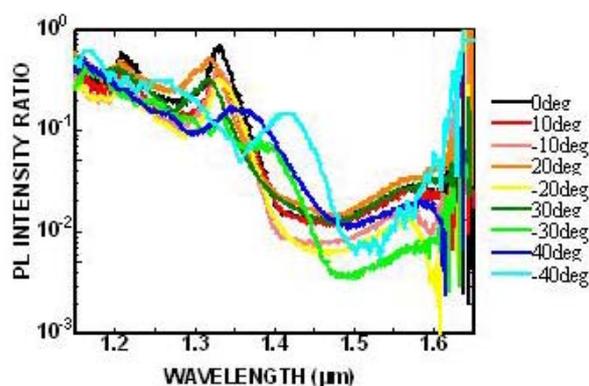


図2 様々な測定方向に対する発光ス  
ペクトル。最大20dBの減衰が得られて  
いることが分かる。

#### (1) フォトニック結晶中に導入した発光体におけるキャリア寿命の測定

フォトニックバンドギャップによって自然放出が抑制、あるいは欠陥準位によって増強された場合、前者の場合は発光体の発光寿命が遅くなり、後者の場合は早くなると考えられる。つまり、発光寿命を直接測定することで、従来のCW光による評価よりも、フォトニックバンドギャップの効果をより直接的に評価できると考えられる。昨年度、まずフォトニック結晶に導入する前の発光層の発光寿命について評価を行い、寿命測定の際に重要な

点である非発光再結合寿命  $\tau_{nr}$  について評価・検討を行った。その結果、50K以下で測定することで、非発光再結合寿命の影響を避け、フォトリックバンドギャップ効果を評価することが可能であることを明らかにした。今年度は、それを踏まえて、実際にフォトリック結晶中に導入された発光層におけるキャリア寿命の測定を行った。

測定した試料は、図1に示すようにストライプ状の多重量子井戸発光層を上下から4層フォトリック結晶で挟み込んだ9層積層構造である。図1(b)に示すように、発光層には、波長1.5 $\mu\text{m}$ にピークをもつInGaAsP量子井戸が形成されている。図1(c)は、4層フォトリック結晶の上にストライプ状発光層を積層した構造の電子顕微鏡写真であり、図1(a)の模式図に示したような3次元周期構造が、周期0.7 $\mu\text{m}$ 、ストライプ幅0.2 $\mu\text{m}$ で形成されていることが分かる。図3(a)はこの試料の透過スペクトルを様々な角度から測定した結果であり、1450nmより長波長側に、全ての方向に対して透過率が減衰する完全フォトリックバンドギャップが存在していることが分かる。上述の非発光再結合の影響を避けるために、この試料を4Kに冷却し、発光寿命測定を行った。励起にはパルス幅2psの波長可変Ti:Sapphireレーザー光源を用い、励起波長はフォトリックバンドギャップ波長外の950nmを用いた。測定には顕微分光システムを用い、単一光子計数法で時間分解スペクトルを測定した。時間分解能は $\sim 200\text{ps}$ 程度である。図3(b)は、3次元フォトリック結晶に導入していない状態での発光層の4Kでの発光スペクトルである。図3(a)と図3(b)を比較すると、発光ピークの大部分は完全フォトリックバンドギャップより短波長側に位置しているが、長波長側のその部分が完全バンドギャップと重なっていることが分かる。これは、今回評価に用いた試料では、室温における発光ピークが完全フォトリックバンドギャップ波長1.5 $\mu\text{m}$ と一致するように発光層を設計したが、実際に測定を行った4Kでは発光ピークが短波長側にシフトしているためである。この発光ピークの中での様々な波長における時間分解測定結果が図3(c)～(f)である。フォトリックバンドギャップの効果を調べるために、発光層の上下にフォトリック結晶を形成した領域(フォトリック結晶領域)と、形成していない領域(参照領域)の両方で時間分解波形を測定した。

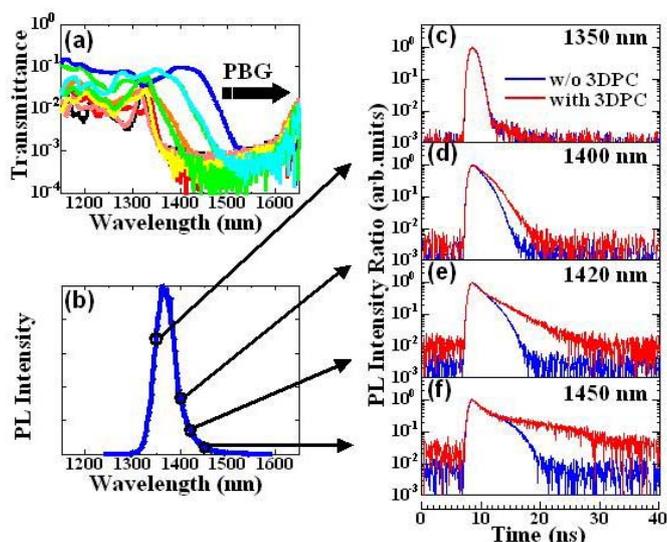


図3 (a)9層積層試料の透過スペクトルを様々な方向から測定した結果。(b)フォトリック結晶中に導入する前の、発光層の4Kにおける発光スペクトル。(c)-(f)発光層をフォトリック結晶で挟み込んだフォトリック結晶領域と、平坦なGaAsで挟み込んだ参照領域の、それぞれの波長における発光強度の時間分解測定結果。

まず完全バンドギャップ波長より短波長側の1200-1370nmにおいては、フォトニック結晶領域と参照領域の発光寿命を比較すると図3(c)に示すように、両者は重なっており差は見られないことが分かる。しかしながら図3(d)～(f)をみると分かるように1370nmより長波長側においては、参照領域に比べてフォトニック結晶領域では減衰が遅くなっている。さらに図3(d)～(f)を比較すると、測定波長が完全バンドギャップ波長に近づく程、参照領域とフォトニック結晶領域での差は大きくなっている様子が分かる。これは、完全バンドギャップ波長に近づくに従って、フォトニック結晶の効果により発光を許容する光の状態密度が減少し、そのために励起されたキャリアが発光再結合する確率が減少し、結果的に発光寿命が遅くなっていることを示唆している。これは、バンドギャップ効果によって発光が抑制されていることを示唆する結果である。

## (2) 多層化された3次元フォトニック結晶に導入された点欠陥共振器の発光特性評価：

昨年度に引き続き、発光体および点欠陥共振器を内部にもつ9層積層構造(図1参照)において、点欠陥共振器が発光に与える効果をより詳細に検討した。図4(b)は結晶中に導入した点欠陥共振器の模式図であり、様々な大きさの点欠陥を3次元フォトニック結晶内部の発光層に導入した。このような様々な欠陥を含む試料をCWレーザー光で励起し、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4(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((iv)→(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ものと考えられる。

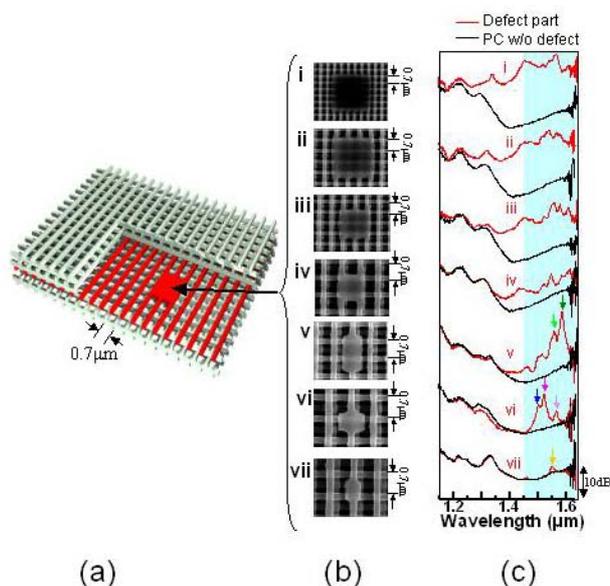


図4 (a)内部に導入した点欠陥の模式図、(b)各点欠陥のSEM観察像。様々な大きさの欠陥が導入されていることが分かる。(c)各欠陥部分のPLスペクトル。参照用試料(フォトニック結晶をもたない発光部のみの試料)のPLスペクトルで規格化している。また比較のため、それぞれのスペクトルにおいて、欠陥のないフォトニック結晶領域(完全結晶部分)を上述の比較領域で規格化したものも合わせて示している。

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5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5(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発光強度には差は見ら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5(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、これは顕微分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、バンドギャップによって抑制、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。

これらの成果は世界的にその実証が待たれた発光現象の完全制御に初めて成功したことを意味する。幸いにも、この成果は、2004年7月号（On-lineでは6月号）の米科学誌サイエンスに掲載され、国内外の大きな関心を集めた。また、さらに強いフォトニックバンドギャップを実現するためにさらなる積層数の増加についても検討を行い、目処がつつある所である。

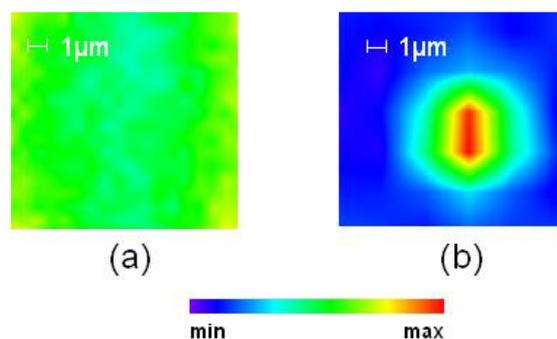


図5 (a)フォトニックバンドギャップ外の波長、(b)フォトニックバンドギャップ内で、かつ欠陥準位に対応する波長、におけるPL発光強度の空間分解測定結果。欠陥準位に対応する波長では、強い発光が欠陥部に局在しており、その周囲はバンドギャップ効果によって発光が抑制されていることが分かる。

### (3) 3次元フォトニック結晶導波路の設計

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。昨年度までの研究により、我々は3次元フォトニック結晶光導波路の試作を行い、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。今年度は、この3次元結晶導波路について、新たな構造の設計を行った。

従来、我々は3次元フォトニック結晶導波路として、図6(a)に示すように誘電体を付加した場合と、図6(b)の誘電体を除去した場合について検討を行ってきた。図6(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6(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。そこで今回、さらに進んだ構造として、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7(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。

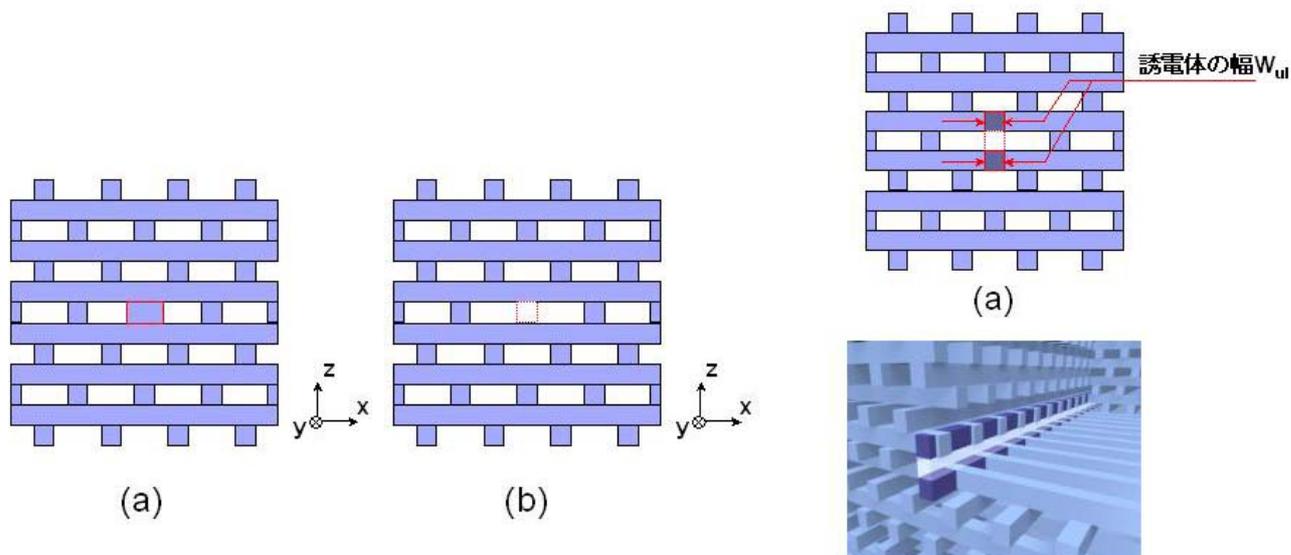


図6 3次元フォトニック結晶への線欠陥導波路導入方法の模式図。(a)誘電体を付加する方法、(b)誘電体を除去する方法。

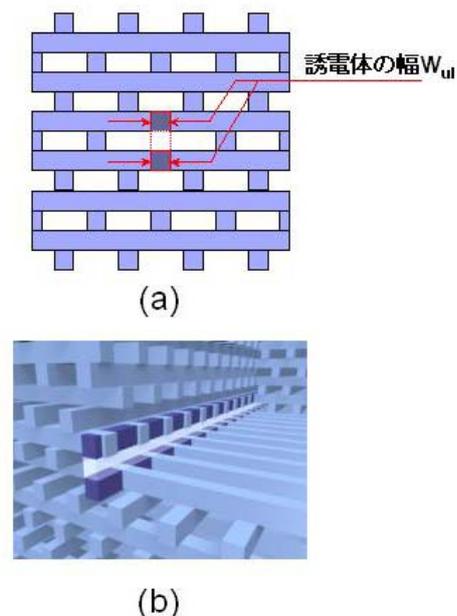


図7 (a)今回新たに設計した導波路構造の模式図。中央の誘電体を除去しつつ、その上下に誘電体を追加している。(b)導波路構造を斜め方向から見た模式図。

図8(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ときの導波モード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8(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。

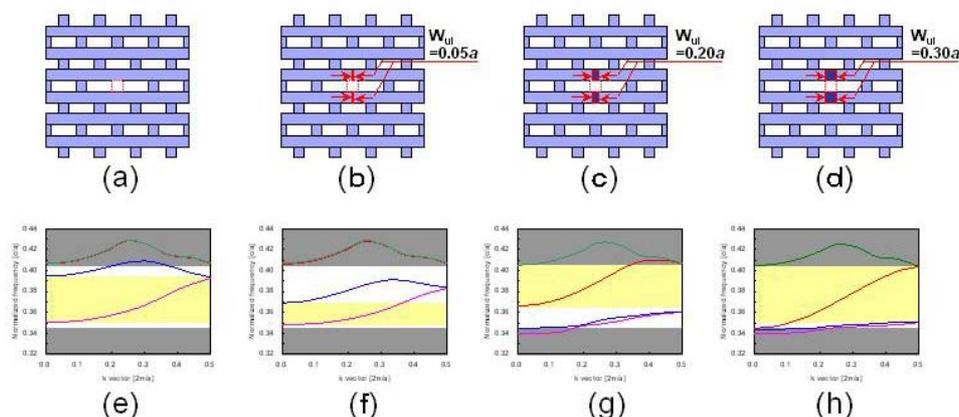


図8 (a)～(d)上下に追加する誘電体幅を変えた際の模式図、(e)～(h)それぞれの誘電体幅における導波モードの計算結果。薄黄色で塗りつぶした領域はシングルモード帯域を表す。誘電体幅を変化させることで、導波モードがシフトしている様子が分かる。

この導波モードの電磁界分布を計算した結果が図9(c), (d)であり、従来の空気導波路の計算結果図9(a), (b)と比較すると、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、モードフィールドを小さくすることができた。

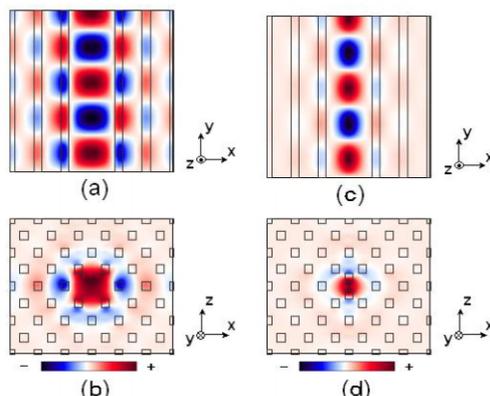


図9 従来の空気導波路の電磁界分布の計算結果(a)XY面内、(b)XZ面内、および今回新たに設計した導波路の電磁界分布の計算結果(c)XY面内、(d)XZ面内。従来の導波路に比べて、新しい導波路ではモードフィールドが小さく、電界が中央に閉じこもっていることが分かる。

次にさらに進んだバンドエンジニアリングとして、図10(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11(a)~(h)は、先の空気導波路の中央部分に導入する誘電体の幅を変化させたときの導波モードの計算結果である。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11(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12(c), (d)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。

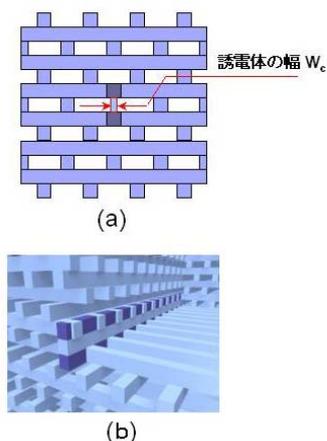


図10 (a)図7の導波路において、中央に誘電体を追加した構造の模式図。(b)導波路構造を斜め方向から見た模式図。

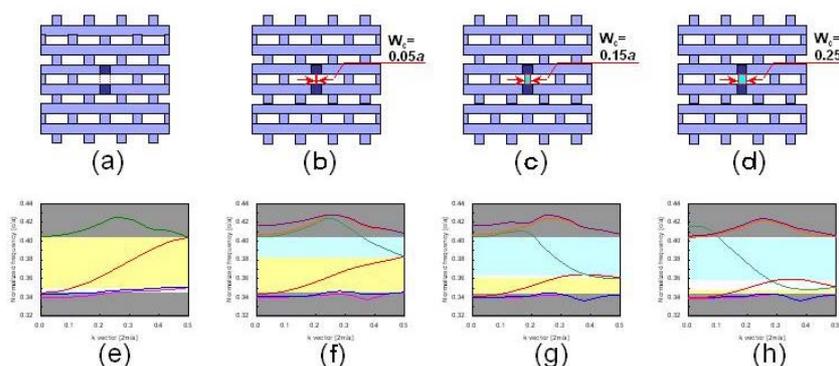


図11 (a)~(d)中央に追加する誘電体幅を変えた際の模式図、(e)~(f)それぞれの誘電体幅における導波モードの計算結果。薄黄色・水色で塗りつぶした領域はシングルモード帯域を表す。誘電体幅を変化させることで、導波モードがシフトしている様子が分かる。

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できた。またこの構造において、注目に値するのは、(i)導波路を構成する3層の内、中心の1層に誘電体を入れるか入れないか、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、(ii)図12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ことから、これら空気導波路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、(iii)より狭い領域に光が閉じ込められていることから、より少ない積層数で低損失伝搬が期待できる、などである。今後はこれら導波路構造を実際に試作し、その特性評価を目指していく。

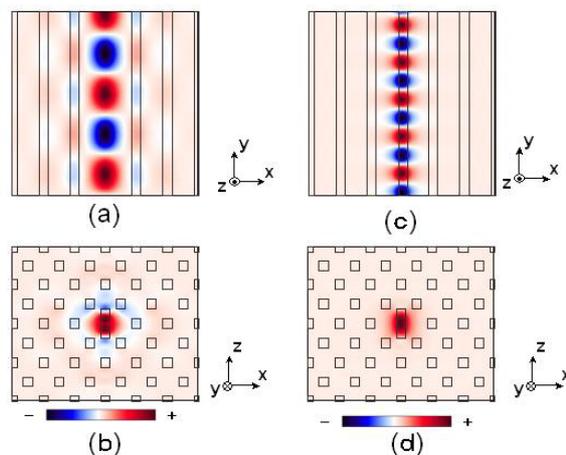


図12 今回新たに設計したの空気導波路の電磁界分布の計算結果(a)XY面内、(b)XZ面内、および今回新たに設計した誘電体導波路の電磁界分布の計算結果(c)XY面内、(d)XZ面内。両者ともにモードフィールドが小さいことが分かる。

#### (4) 新しい精密位置合わせ装置の立ち上げ

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いる。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にH15年度に新しい精密位置合わせ装置を導入した。本年度はこの装置の立ち上げを行うとともに、並行していくつか位置合わせ方法の改善を試みた。

図13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 $\mu\text{m}$ 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13(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ー光を入射させ、回折パターンを観測すると、図13(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 $\theta$ 方向に微調整し、位置合わせ終了後にZ方向に基板を持ち上げて2枚のウエハを接触させるという物である。ここで本研究で目指す位置あわせの精度は、通常のマスキアライメントの精度1~2 $\mu\text{m}$ の1/10の0.1 $\mu\text{m}$ 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言うことである。通常のマスキ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 $\theta$ 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、極力2枚の基板を接近させて、かつ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。

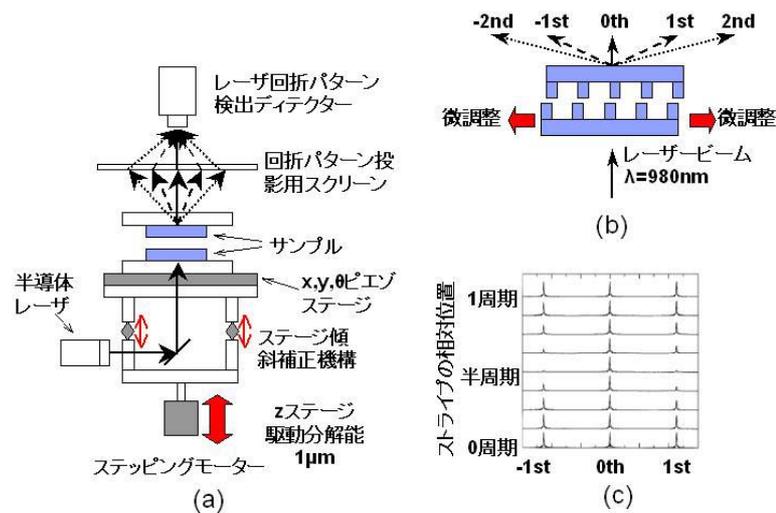


図13 (a)これまで使用してきたウエハアライメント装置の模式図、(b)レーザー回折を用いたアライメント方法の模式図、(c)上下のストライプパターンの相対位置を変化させたときの回折スポット強度の計算結果。

図14は、今年度立ち上げた位置合わせ装置の模式図であり、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、画面のコントラスト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。

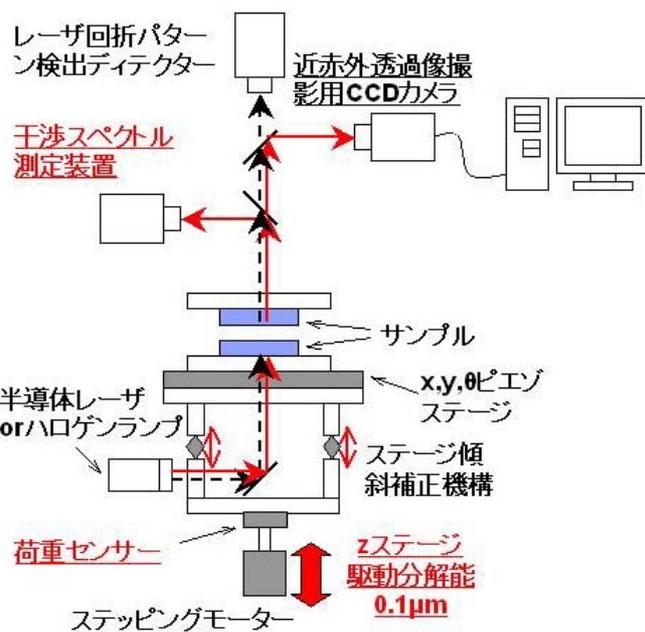


図14 今回新たに立ち上げたウエハアライメント装置の模式図。

図15(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15(b)は干渉測定によって2枚のウエハの間隔の面内分布を測定した結果である。約6mm角の領域において間隔のばらつきは0.6 $\mu\text{m}$ 程度と1 $\mu\text{m}$ 以下であることが分かる。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。

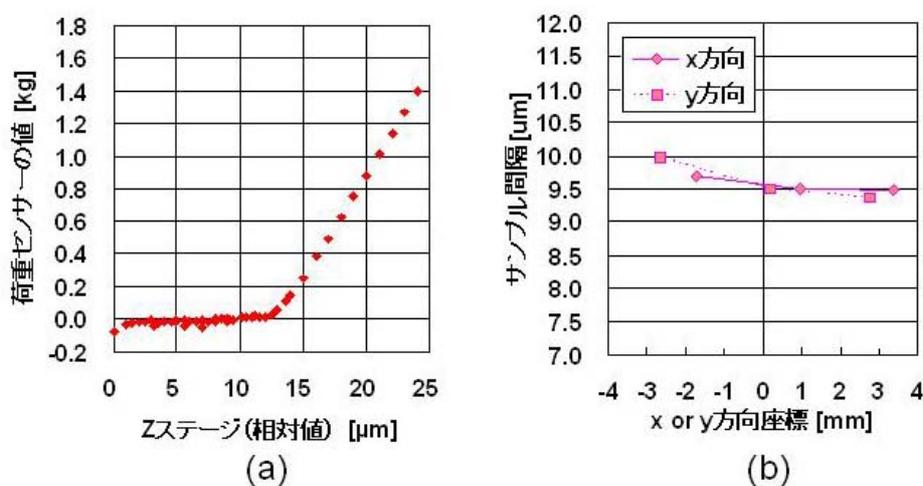


図15 (a) ウエハ同士の間隔を狭くしていったときの荷重センサーの測定結果。12.5 $\mu\text{m}$ を境に荷重が増加しており、この点でウエハ同士が接触したことが分かる。(b) ウエハ同士の間隔の面内分布を測定した結果。6mm角において約600nmの範囲に収まっていることが分かる。

図16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枚のウエハに、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、ウエ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17は、実際のアライメントマークのCCD観察像であり、まず図17(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、ウエ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、50nm x 2=100nm程度であることが判断できる。図17(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17(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の100nm程度の精度で位置あわせが可能であることを意味している。

今後はこの結果を踏まえて実際にフォトニック結晶パターンの位置合わせを行っていく予定である。またこの方法は、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。

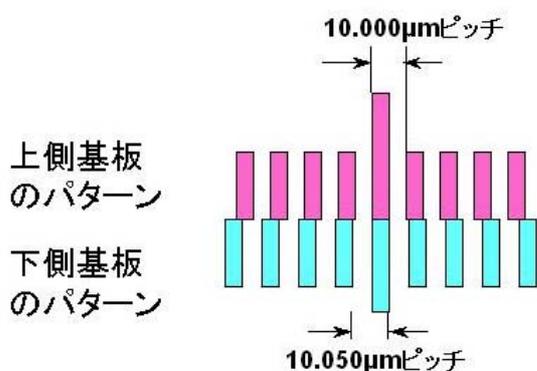


図16 主尺・副尺を用いたアライメントマークの模式図。

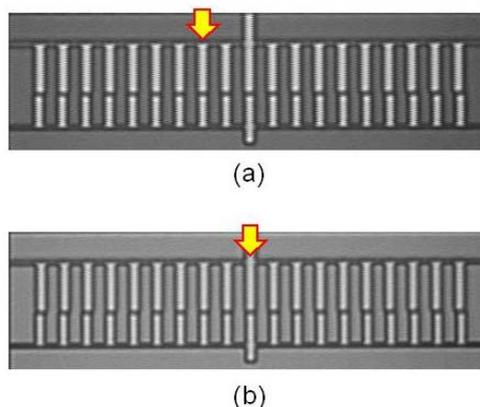


図17 実際のアライメントマークの透過像をCCDカメラで観察した結果。(a)上下のウエハで約100nmずれている場合、(b)上下のウエハをアライメントした場合

## 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温度特性の改善とそれによる室温連続発振

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18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。H14年度はFDTD法を用いて発振モードの本格的な解析を行い、楕円形状のユニットセル構造レーザのより詳細なモード解析や発振のためのQ値の検討等を行うと同時に閾値を従来の1/25と大幅に低減することに成功し、 $-20^{\circ}\text{C}$ という低温であるが初めて連続発振に成功した。H15年度は室温連続動作の障害となる原因を深く追及し、活性層と融着界面の間に存在するキャリアブロック層のバンドギャップの大きさが不十分であることを見出し、ブロック層 (AlGaAs) のAl組成を0.25から0.3へと増大させることにより、室温連続発振に、世界で初めて成功した。また結晶（あるいは格子点）構造とバンド構造の関係を直接的に把握するための手法、すなわちバンド構造の直接測定法の開発と同時に、結晶構造と発振モードに関する理論計算をも積極的に進め、ビームパターン制御のための基礎を築いた。

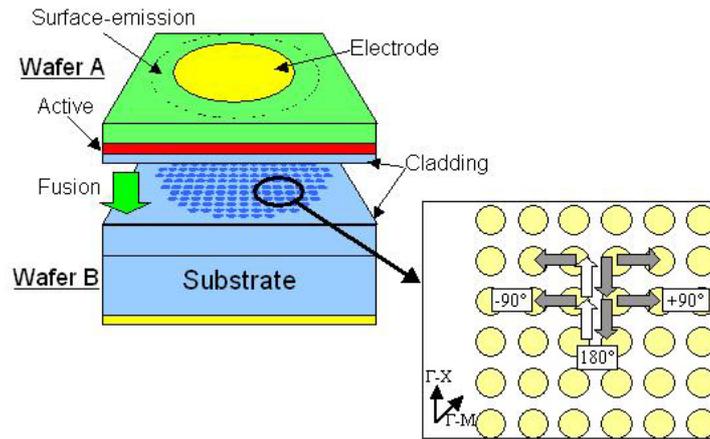


図18 2次元フォトニック結晶レーザの構造の一例とバンド端における定在波の形成メカニズムの模式図。

本年度は、まず、キャリアブロッック層の組成を0.3に増大させた試料について詳細な特性評価を行った。図19は室温におけるI-L特性であり、閾値40mA以下と、昨年度よりもさらに低い閾値で室温連続発振していることが分かる。I-L特性の温度依存性を測定した結果が図20であり、40℃においても連続発振していることが分かる。

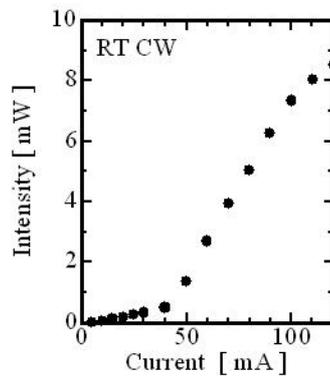


図19 デバイスのI-L特性。40mA以下とこれまでより低い閾値で発振していることが分かる。

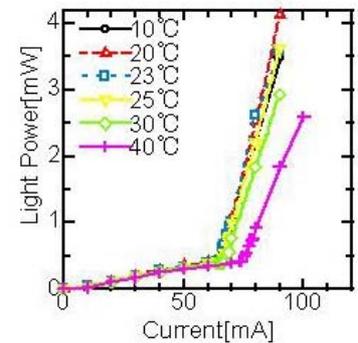


図20 I-L特性の温度依存性の測定結果。40℃においても連続発振していることが分かる。

これは、Al組成を0.3と高くしたキャリアブロッ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21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で同一波長で発振していることが分かる。図22はデバイスの遠視野像であり、ドーナツ形であることがわかる。

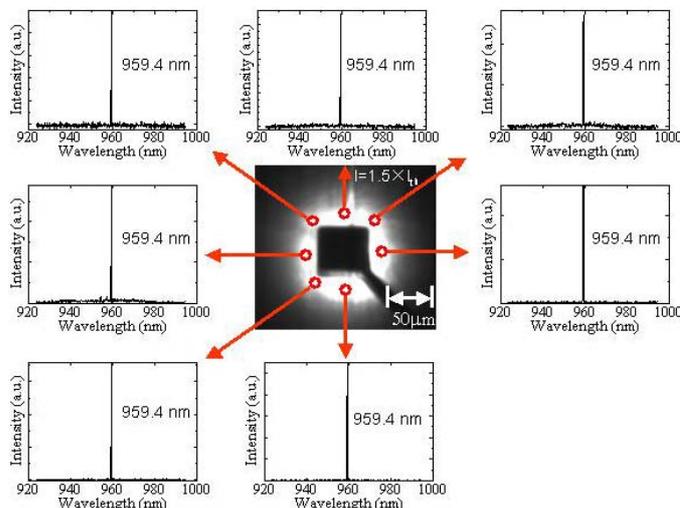


図21 デバイスの近視野像と、各点における発振スペクトルの測定結果。2次元的な光の結合によって全ての測定点で同一波長で発振していることが分かる。

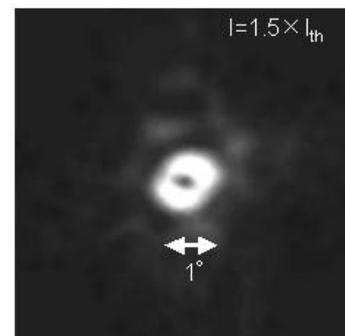


図22 遠視野像の測定結果。約1°と狭く、ドーナツ形状であることが分かる。

次に、前年度に得られた理論計算結果を踏まえて、結晶構造の制御を実験的に検討した。この際、重要な点として、試料作製過程におけるパターンの変形が挙げられる。以下に電子線描画時に正確なパターンを設計しても、その後のエッチング・ウエハ融着などのプロセスによってパターンが変形してしまうと、所望の特性を得ることが難しくなる。そこで、プロセス過程でのパターンの均一性について検討を行った。図23は、電子線描画後、およびICPエッチング後のパターン形状のばらつきを調べた結果である。いずれにおいても、直径のばらつきは±数nm程度であり、かなり均一なパターンが形成できていることがわかる。一方、ウエハ融着後の断面形状の分布を同様に調べてみると、図24(a), (b)に示すように従来の条件である520°Cで加熱した場合は、分布が±30nmと非常に大きくなっていることがわかった。これは、加熱時に、原子が再配列されるマストラנסポート現象によるものと考えられる。このマストラנסポートを抑制するために、加熱温度を450°Cに下げた結果が図24(c), (d)であり、520°Cで加熱した場合に比べて非常にばらつきが狭くなっていることがわかる。その値は、±6nmと加熱前の値とほぼ同一であり、これによって、描画時の格子点形状を保った状態で、ウエハ融着することを可能とした。

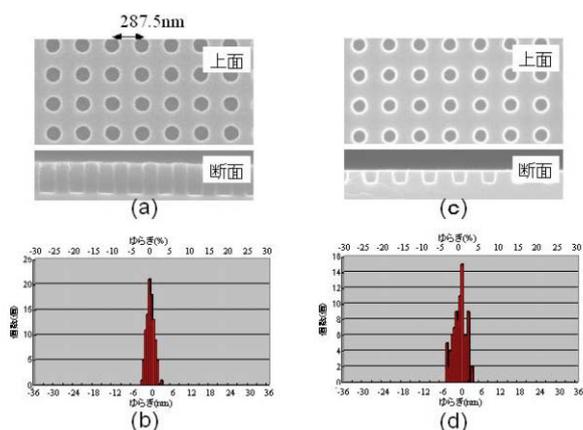


図23 (a) 電子線描画後のレジストパターンの電子顕微鏡写真と、(b)直径のばらつきを測定した結果。(c) ICPエッチング後の電子顕微鏡写真と、(d)直径のばらつきを測定した結果。

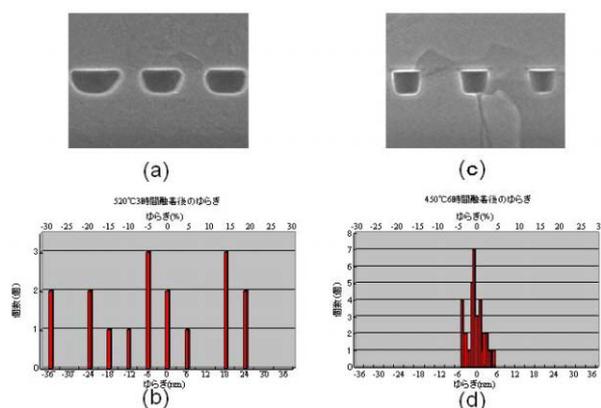


図24 (a) 520°Cで融着した後の断面形状の電子顕微鏡写真と、(b)大きさのばらつきを測定した結果。(c) 450°Cで融着した後の断面形状の電子顕微鏡写真と、(d)大きさのばらつきを測定した結果。融着温度を下げることで、形状のばらつきが大幅に改善していることが分かる。

次に実際の結晶構造制御として、まず真円格子点形状に対して、位相シフトを導入したデバイスを試作した。図25はICPエッチング後の位相シフト部の電子顕微鏡写真であり、 $\pi/2$ の位相シフトが導入されていることがわかる。このデバイスの遠視野像が図26であり、位相シフトを入れない場合と異なり、ドーナツが2つ重なり合った、非常に興味深い遠視野像を持つことが分かる。このような位相シフトを導入した場合の遠視野像の理論計算結果が図27であり、実験結果と比較するとよく対応していることがわかる。

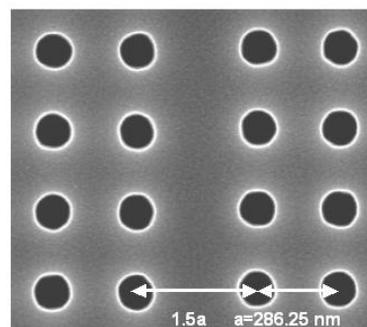


図25 真円格子点形状に対して位相シフトを導入した試料の電子顕微鏡写真。

この結果は、結晶構造制御によって、ビームパターンが制御できることを実証した物であり、今後の高機能化に向けての重要なステップである。今後は、H15年度の理論計算結果に基づき、楕円格子点形状に対して位相シフトを導入することで、ビーム形状の単峰化をはかると同時に、それ以外の格子構造制御についても検討を行い、さらなる高機能化を目指していく。

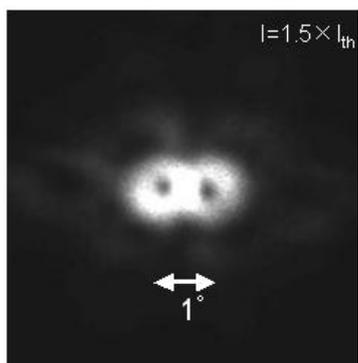


図26 位相シフトを導入した場合の遠視野像の測定結果。ドーナツが2つ重なり合った特徴的な遠視野像であることが分かる。

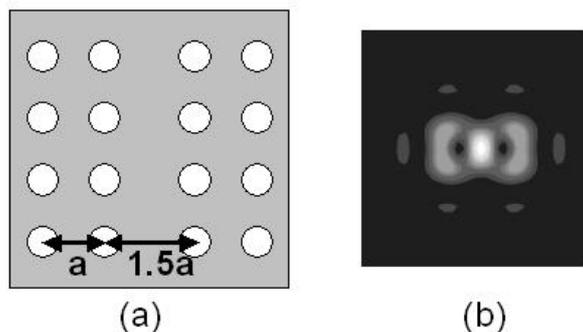


図27 (a)位相シフトを導入した構造の模式図と(b)遠視野像の計算結果結果。ドーナツが2つ重なり合っており、実験結果と対応していることが分かる。

## 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）

本デバイスの原理図を図28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、H14年度には加工精度の向上と、図29に示すようなドナー型欠陥を採用することで、3,800と従来のアクセプタ型欠陥に比べて1桁大きなQ値を実現した。さらに面内ヘテロ・フォトニック結晶という新しい概念を提唱し、それによる世界最初の光ナノデバイスを実現した。H15年度は、さらに高度な欠陥エンジニアリングとナノデバイス作製技術を駆使することにより、Q値として、45,000という世界最大の値をもつナノ共振器の実現に成功した。そのポイントは、光を強く閉じこめるためには、逆に光を緩やかに閉じこめるための機構が必要であるという逆説的かつ重要な概念を見いだしたことにある。併せて、こ

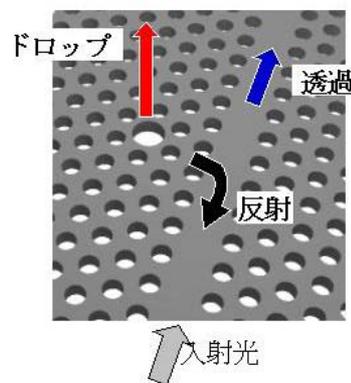


図28 超小型波長分合波デバイスの原理図。

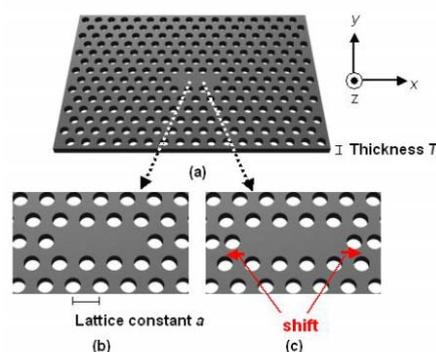


図29 (a)ドナー型点欠陥共振器の模式図および、(b)円孔をシフトしない場合と、(c)円孔をシフトさせた場合、の共振器部分の拡大図。

の高Q値共振器の実現により、面内型波長合分波デバイスを始め、新たなデバイス展開の道をも開くことにも成功した。これらの結果を踏まえてH16年度は以下の検討を行った。

### (1) 高Q値微小点欠陥共振器の実現

まずさらに高い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、ということについて理論的に検討を行った。まず最初に、損失の要因である、ライトコーンの内側に存在する電磁界成分が何によって決定されているのかを検討した。共振器内の電界分布を、波長 $\lambda$ （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てみる。基本波は、 $k=\pm 2\pi/\lambda$ にピークをもつデルタ関数のフーリエ変換スペクトルを与え、一方、包絡関数はそのスペクトルを変調する。これは、実空間での積が、フーリエ空間での畳み込みに相当するためである。図30に示すように、包絡線関数として、箱型関数を考えた場合、基本波はライトコーン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ライトコーン内の電磁界成分を生み出している。つまり、同共振器のQ値に対しては、この包絡関数が支配的であることがわかる。一方、ガウス関数のような、緩やかに変化する包絡線の場合は、波数空間ではサイドローブが小さく、ライトコーン内の成分は小さくなるため、高いQ値を得ることができる。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関数であることが重要となる。このような包絡線関数としては、図32に示すようにガウス関数以外にローレンツ関数が考えられる。

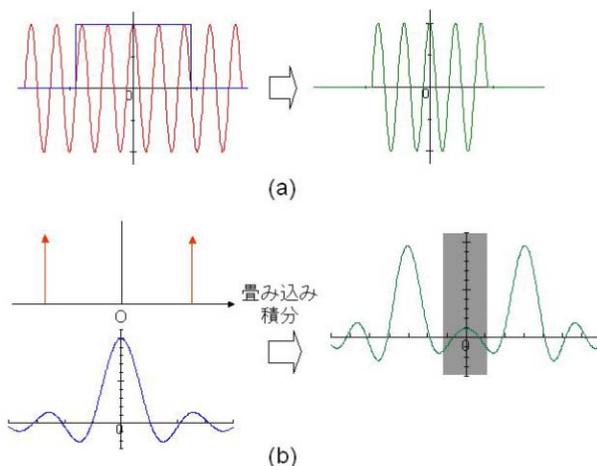


図30 (a)共振モードの電界を矩形の包絡線関数で切り出した場合の模式図、および(b)そのフーリエ変換後の模式図。ライトコーン(灰色の領域)内に電界が存在していることが分かる。

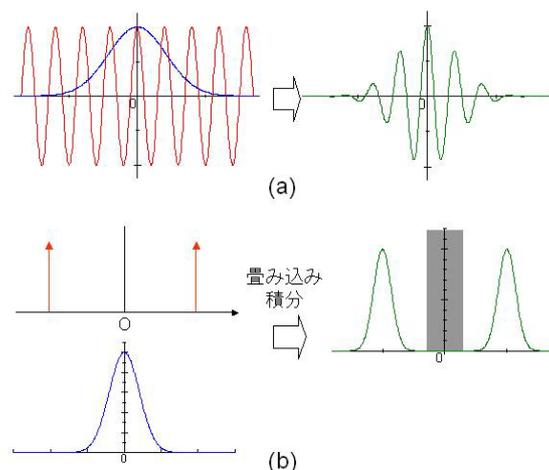


図31 (a)共振モードの電界をなめらかな包絡線関数で切り出した場合の模式図、および(b)そのフーリエ変換後の模式図。ライトコーン(灰色の領域)内の電界が小さいことが分かる。

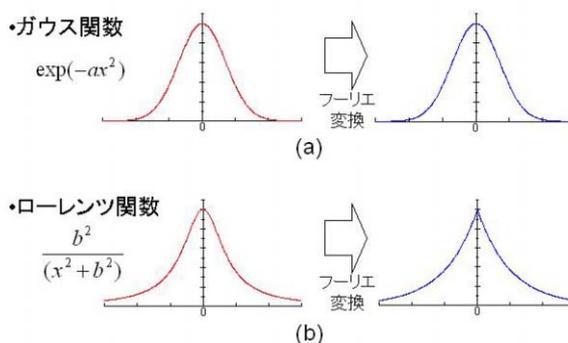


図32 なめらかに減衰する包絡線関数の実空間とフーリエ変換後の模式図 (a)ガウス関数、(b)ローレンツ関数。

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。計算には図33(a)に示すように1次元周期構造を形成したスラブを仮定し、2次元FDTD法で行った。まず、図33(b)は包絡線関数がガウス関数よりもローレンツ関数に近い場合の電磁界分布であり、この場合はQ値として5,200程度であることがわかった。一方、図34(a)に示すように一部のストライプをシフトさせて、包絡線関数がガウス関数に近くした場合には、Q値として8,000程度という高い値が得られることがわかった。これらの結果を比較すると、包絡線関数として、ローレンツ関数よりもガウス関数が望ましいと考えられるが、より定量的な検討として、包絡線が完全にガウス関数・ローレンツ関数になった場合の、ライトコーン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35であり、灰色の領域がライトコーンである。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、ライトコーン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。以上の成果の一部は、2004年5月号の、英科学誌ネイチャーのブリーフコミュニケーションにおいて、フランスのグループとのディベート形式で掲載され、高Q値共振器実現のための、さらに深い知見を世界に発信することが出来たと考えている。

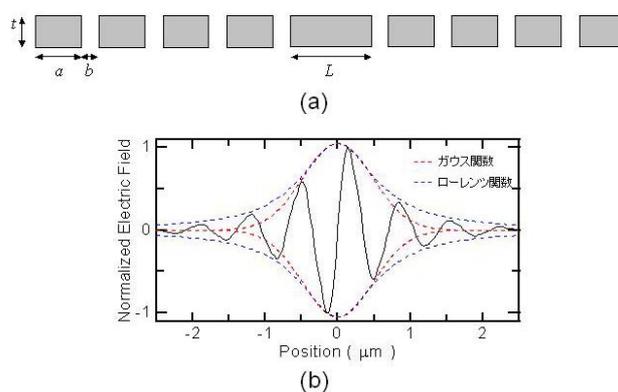


図33 (a) 計算の際に仮定した共振器の模式図、(b) 共振モードの電界分布の計算結果。包絡線関数はローレンツ関数に近いことが分かる。

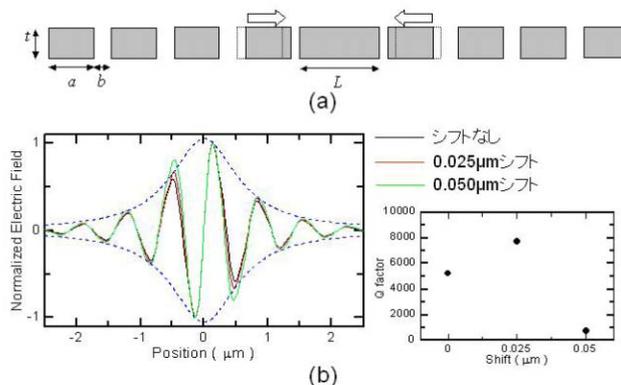


図34 (a) 計算の際に仮定した共振器の模式図、(b) 共振モードの電界分布およびQ値の計算結果。包絡線関数はガウス関数に近いことが分かる。

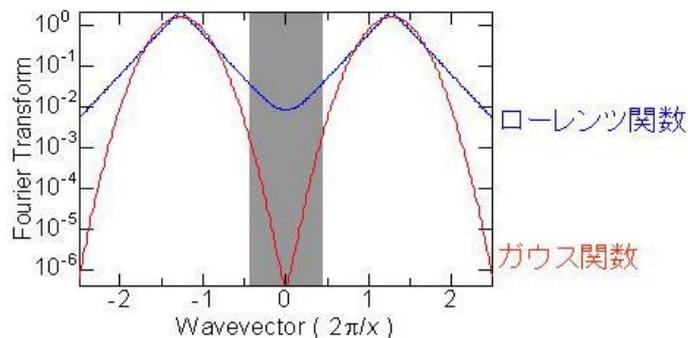


図35 包絡線関数として、ローレンツ関数とガウス関数を仮定した場合の、電界成分の波数依存性の計算結果。ローレンツ関数に比べてガウス関数の方がライトコーン(灰色の領域)内に存在する電界強度が4桁以上小さいことが分かる。

## (2) さらなる格子点シフトによるQ値の向上

H15年度に、図36 (b)に示すように、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、 $Q=45,000$ 、 $V=7.0 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 (= 0.69 (\lambda_0/n)^3)$  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36 (e)をもう一度良く見てみると、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。そこで今年度は、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36 (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。本研究で

用いたフォトニック結晶構造は、格子定数 $a$ の三角格子状に空気孔を配列したSiからなり、その2次元フォトニック結晶スラブ中に、図36 (a)に示すように点欠陥共振器を設けた。なお、スラブ厚を $0.6a$ 、空気孔半径を $0.29a$ 、スラブの屈折率を3.4、空気クラッドの屈折率を1とした。共振モードのQ値は、共振モードの電磁界の時間変化つまり減衰率から計算導出し、また、共振器のモード体積については、共振器の電界分布から計算した。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37 (a)に示す。この図から分かるように、Q値は昨年度の実験結果同様、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

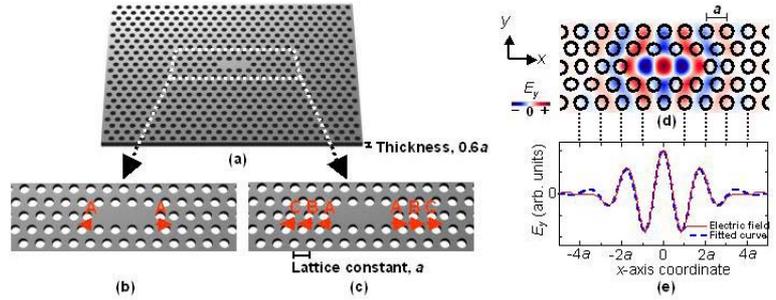


図36 (a)ドナー型点欠陥の模式図、(b)昨年度検討した、両端の円孔をシフトした点欠陥の模式図、(c)今年度新たに検討した、さらに外側の円孔もシフトさせる点欠陥の模式図、(d)昨年度の両端の円孔をシフトした点欠陥の電界分布と、(e)包絡線が理想的なガウス関数の場合との比較結果。

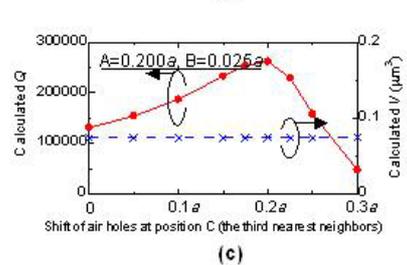
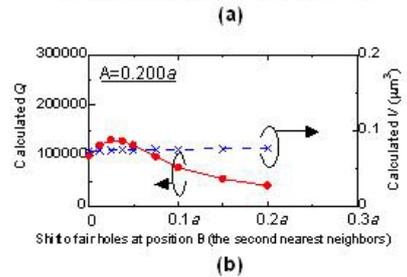
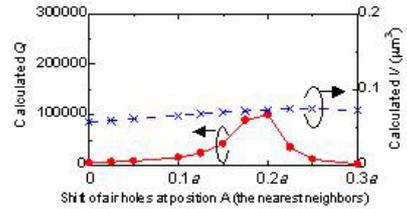


図37 (a)第一近接円孔をシフトさせた場合のQ値および共振器体積の計算結果、(b)第一近接円孔を最もQ値が高くなる位置に固定して第二近接円孔をシフトさせた場合のQ値および共振器体積の計算結果、(c)第一、第二近接円孔を最もQ値が高くなる位置に固定して第三近接円孔をシフトさせた場合のQ値および共振器体積の計算結果。

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値が最も高かった位置(=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37(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。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37(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37(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値最大するときでも $7.4 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 (= 0.73(\lambda_0/n)^3)$ 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。

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38(a)および(b)に示す。図38(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39(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、昨年度同様、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37(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。一方、絶対値は計算よりも実験の方が低いことが分かるが、この理由は、作製精度ゆらぎに起因する損失(微小な摂動による散乱損失、空気孔傾斜に起因するTM-likeスラブモードとの結合損失、等)によるものと思われる。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

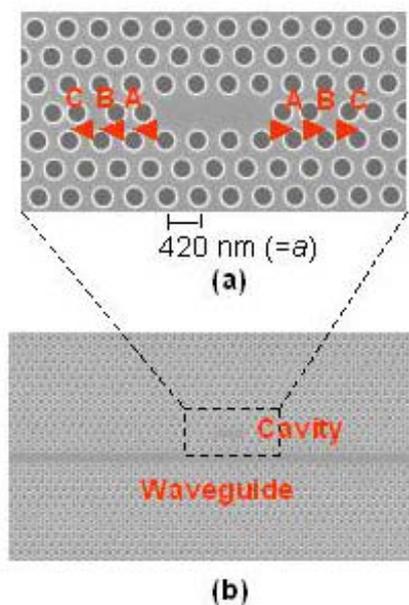


図38 第三近接まで格子点をシフトした点欠陥共振器の電子顕微鏡写真(a)拡大図、(b)全体図

フトさせたときの実験結果を図39(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39(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、100,000近い値が得られた。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39(b)、(c)をそれぞれの計算結果に相当する図37(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( $Q_v=100,000$ )が得られたときの点欠陥からの放射スペクトルを図40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、今回得られた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、昨年度得られた結果からさらに2倍以上向上させることに成功した。ここで得られた $Q/V$ の値は、他の研究機関が報告している結果に比べても大きく、世界最大の光閉じ込め効果をもつといえる。

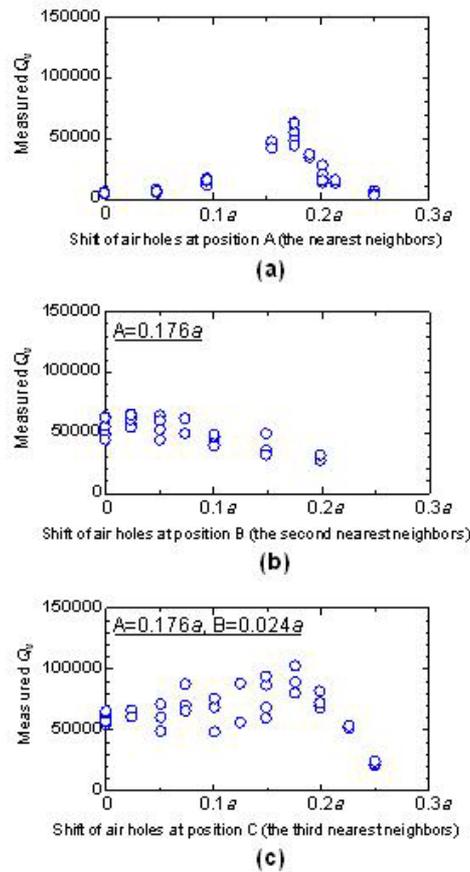


図39 (a) 第一近接円孔をシフトさせた場合のQ値の測定結果、(b) 第一近接円孔を最もQ値が高くなる位置に固定して第二近接円孔をシフトさせた場合のQ値の測定結果、(c) 第一、第二近接円孔を最もQ値が高くなる位置に固定して第三近接円孔をシフトさせた場合のQ値の測定結果。

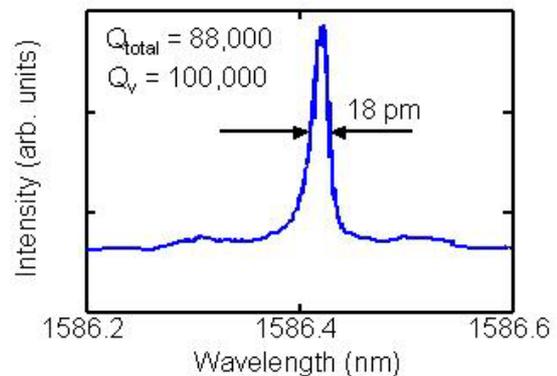


図40 最も高いQ値をもつ共振器の共振のスペクトル。Q値として100,000が得られている。

### (3) 面内ヘテロ・フォトニック結晶による高Q値光共振器

H14年度に我々は面内ヘテロ・フォトニック結晶という新しい概念を提案し、超小型波長分合波デバイスの多波長動作や、光取り出し効率の向上が可能であることを示してきた。今年度は、別の応用として、ヘテロ界面で光を閉じ込めたダブルヘテロ共振器の検討を行った。図41(a)はダブルヘテロ共振器の模式図であり、周期 $a_2$ のフォトニック結晶の両側に、周期 $a_1$ の結晶で挟み込んだ構造である。この場合、図41(b)に示すように、周期 $a_2$ の領域でのみ光が許容される周波数が存在し、これを共振モードとして利用するというものである。この場合、先に述べてきた、点欠陥共振器とは異なり、光はフォトニックバンドギャップによって直接的に閉じ込められるのではなく、格子定数の違いから生じる導波モードのギャップによって閉じ込められるということである。このため、共振器外への電磁界の漏れだし(エバネッセント成分)は格子定数の差によって決まることになる。すなわち、高いQ値を実現する際に重要な設計指針として我々が見出した、「いかに緩やかに光を閉じ込めるか」をより細かく制御できることが期待できる。そこで、ダブルヘテロ共振器を用いて、さらに高いQ値を実現することを目指して、理論的・実験的に検討した。

まず共振器構造として、単純に周期を変えてしまうと、導波路を導入した際に図42(a)に示すように軸ずれが生じ、導波路のヘテロ界面において意図せざる反射が起こってしまう。そこで今回我々は図42(b)に示すように、導波路と平行な方向にだけ周期を変え、垂直な方向は同一周期にする歪みヘテロ構造について検討を行った。図43は、昨年度実現した、両端の円孔位置をシフトさせた場合と、今回のダブルヘテロ共振器の電磁界分布の計算結果およびその包絡線関数を示している。図43(b)から分かるように従来のシフトさせた共振器では共振器端部において、ガウス関数とのズレが大きいことが分かる。一方、ダブルヘテロ

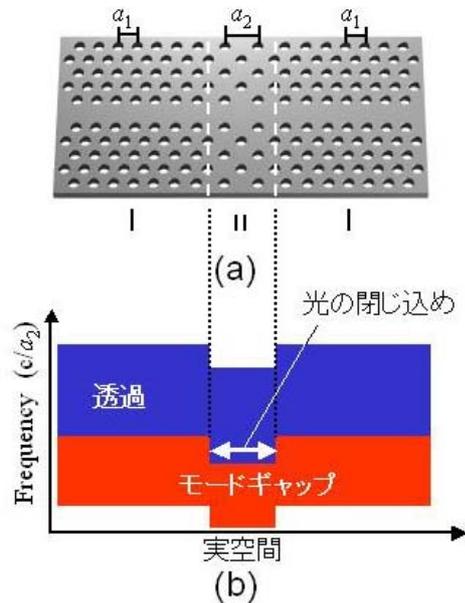


図41 (a)ダブルヘテロ共振器の模式図、(b)共振モードが形成されるメカニズムの模式図

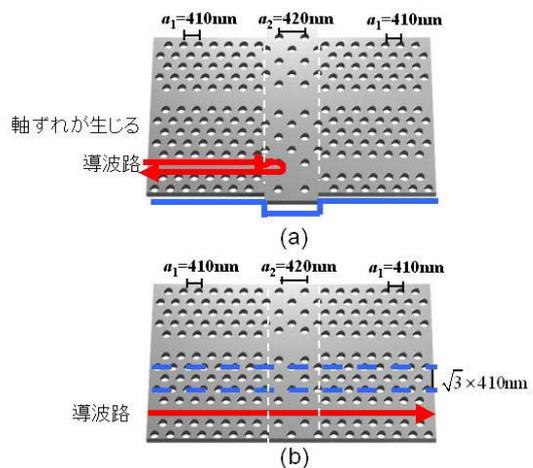


図42 (a)XY両方向に周期を変えた場合の模式図。共振器部分を中心とした場合、導波路部分で軸ズレが生じる。(b)導波路部での軸ズレを避けるために、導波路と平行な方向にだけ周期を変えた歪みヘテロ構造の模式図。

共振器では図43(d)に示すように同じ場所でよりガウス関数に近い包絡線が得られており、これは先に(1)で述べた結果から考えると非常に有望であることが分かる。実際理論計算からは、2,000,000という非常に高いQ値が期待できることが分かった。

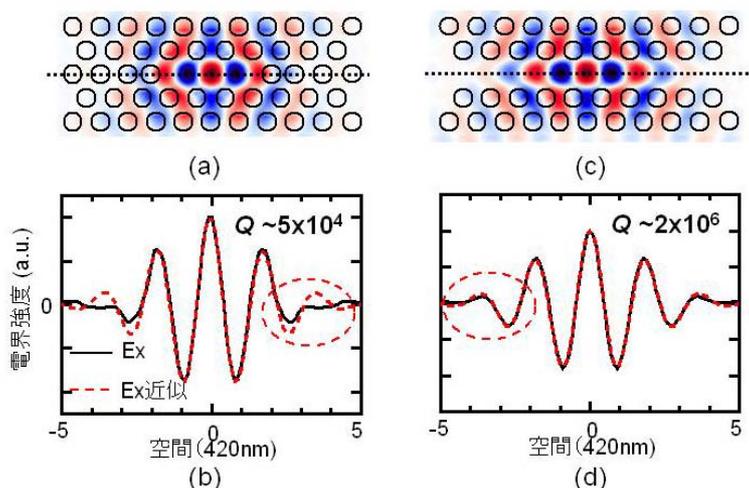


図43 (a) (b)昨年度設計した、両端の円孔をシフトさせた共振器における共振モードの電界分布と、理想的なガウス型包絡線関数を仮定した場合との比較結果。(c) (d)ダブルヘテロ共振器における共振モードの電界分布と、理想的なガウス型包絡線関数を仮定した場合との比較結果。円孔シフト型に比べて、ガウス関数により近い電界分布を持つことが分かる。

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44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。この試料のドロップスペクトルを測定した結果が図45であり、Q値として240,000と、(2)の円孔シフト共振器の2倍以上のQ値を得ることができた。しかしながら理論計算結果と比較すると実験で得られたQ値は1/10と小さい。そこで、作製方法を見直してさらに高いQ値の実現を試みた。図46は作製した試料の表面を電子顕微鏡および原子間力顕微鏡で測定した結果であり、図46(a), (b)をよく見ると、試料表面にうっすらと六角形の模様があり、原子間力顕微鏡より1.5~2.5nmという非常に微細な凹凸が存在していることが分かった。このような凹凸は散乱損失の要因となる可能性がある。そこでプロセス条件を再検討した結果、レジスト除去の工程を見直すことで、図46(d)に示す

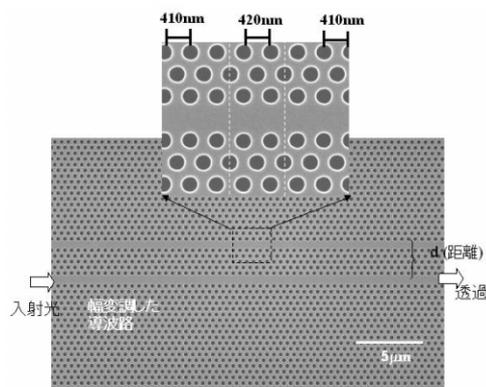


図44 試作したダブルヘテロ共振器の電子顕微鏡写真。

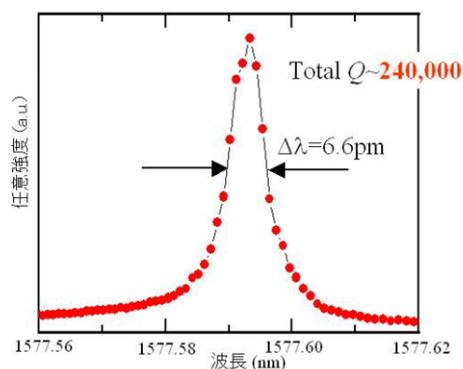


図45 共振スペクトルの測定結果。Q値として、240,000が得られている。

ように表面の凹凸が0.5nm以下と非常になめらかな表面を得ることができた。この試料のQ値を測定した結果が図47であり、先程の3倍近い、600,000という高い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、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。またそれと同時に、我々が提唱した面内ヘテロ・フォトリック結晶の有効性を一段と強く示す結果であり、これらの成果の一部は2005年3月号(2月にon-line)の英科学誌*ネイチャーマテリアルズ*に掲載され、国内外の注目を集めた。

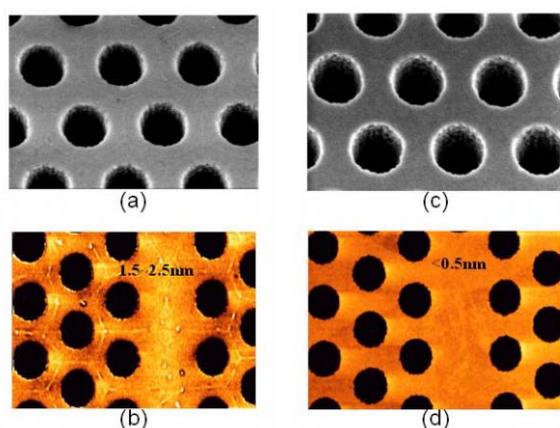


図46 試作した試料表面の(a)電子顕微鏡写真、および(b)原子間力顕微鏡での測定結果。表面に微妙に六角形の模様があることが分かる。作製プロセスを見直した後の試料表面の(c)電子顕微鏡写真、(d)原子間力顕微鏡での測定結果。表面ラフネスが減少していることが分かる。

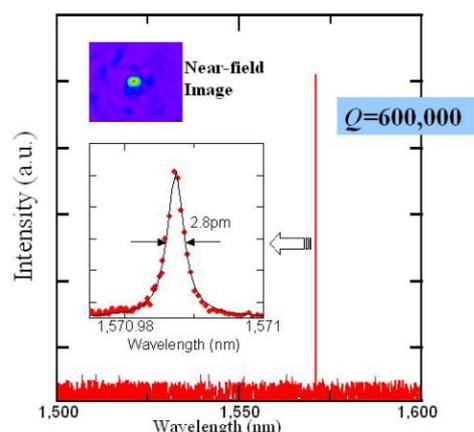


図47 作製プロセスを改善した試料の共振スペクトル。600,000という非常に高いQ値が得られた。

### B-3. 2次元バンドエンジニアリングデバイス

Si細線など、単純な構造で急激曲げを含む高密度光配線を容易に実現する導波路と比較したとき、フォトリック結晶線欠陥導波路の大きな特長はフォトリックバンド端における超低群速度である。2001年にNTTのグループによって真空中の光速 $c$ の1/100に迫る低群速度が観測されて以来、この導波路はコンパクトな遅延線や光バッファメモリーになると期待されてきた。しかし一般に低群速度帯域は群速度に比例して狭くなるため、超低群速度は超狭帯域でしか実現されない。さらにバンド端では大きな群速度分散が生じるため、高速な光信号を遅延させる場合には問題となる。本研究ではこれまでに帯域を拡大させるための手段としてチャープ構造を、分散をなくす手段として逆分散をもつ二種類の方向性結合器による分散補償構造をそれぞれ提案してきた。そしてFDTD計算結果では、例えば100GHz信号に対して平均群速度 $c/300$ が実現できることが示唆されている。ただしこの計算では、多くの場合、方向性結合器部分で結合光以外に反射光が観測され、これを低減するには極めて注意深いパラメータ設定が必要なのことがわかってきた。これらの状況を受けて、本年度の研究では、まずこの反射の原因を究明し、それを原理的になくすことができる最適構造を探索した。

これまで方向性結合器の設計では、各フォトニック結晶導波路のバンドを計算し、そのバンド端を一致させる構造パラメータを設定してきた。しかしより厳密には、方向性結合器全体をモデル化したときのバンドを求める必要がある。その計算結果を図48に示す。ここでは上向きと下向きのバンドが現れているが、これは通常の線欠陥導波路のバンドと、線欠陥の中央に位相シフトさせた小円孔を配置した導波路のバンドに由来している。ただしバンド端では結合のために反交差が起きている。この場合、端部はほとんど一致しているように見えるが、わずかなギャップが生じている。厳格な対称性をもたないチャープ構造ではこのようなバンドがややぼけつつシフトするため、伝搬光はギャップをトンネルして進む。この際に反射が生じる。よって反射を抑えるには適度に急なチャープを設け、さらに導波路間隔を広くして結合を弱くし、ギャップを抑えることが必要となる。

現実的に上のような設計は可能であるが、素子長やチャープの幅に様々な制約が生まれる。そこで次の段階として、零群速度と分散補償を同時に満たすバンドをあらかじめ有している導波路構造をバンド計算により探索した。その結果、まず単純な線欠陥導波路の構造を微調整するだけでこのようなバンドが現れることを発見した。円孔直径や線欠陥幅を調整すると、導波バンドとフォトニックバンドギャップの帯域はおおよそ別々に移動する。このため、フォトニックバンドギャップ端に位置するスラブ端モードが導波バンドと反交差し、バンドの歪みを表す。これが零群速度・零分散の原理である。図49には円孔直径を変えたときのバンドと群速度の計算結果を示す。さらに産総研のグループが研究している方向性結合器にも着目した。図50(a)にはそれと近い構造をもつ結合器のバンドを示す。ここでは偶モードが零群速度・零分散を示している。すなわち、これを方向性結合器としてではなく、偶モードを導波させる結合導波路として用いれば、同様の機能を実現できる。図50(b)はFDTD計算された光伝搬の様子で

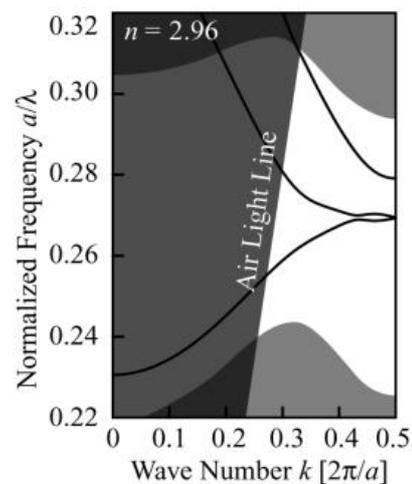


図48 提案した方向性結合器のフォトニックバンド

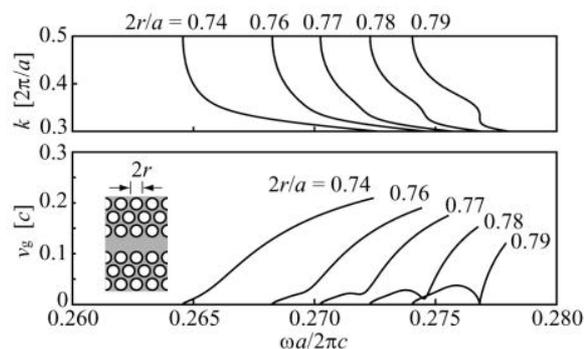


図49 線欠陥導波路の円孔直径変化に対するバンドと群速度の変化

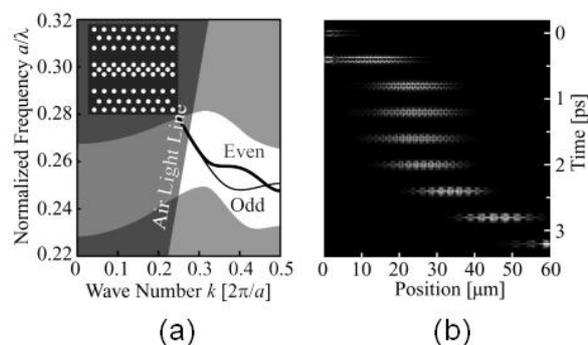


図50 結合導波路構造と対応するフォトニックバンド(a)ならびにFDTD計算された時系列光パルス

図50(b)はFDTD計算された光伝搬の様子で

ある。反射を伴うことなく、パルスが停止している様子がわかる。この構造でさらに興味深いのは、結合導波路の屈折率を部分的に変えることで変曲点でのバンドの傾斜、すなわち群速度を変えることができる点である。つまりもし外部制御によって屈折率を可変にできれば、停止時間を制御できるバッファメモリーとなる。

昨年度までの実験では、エアブリッジ型のフォトニック結晶スラブでの線欠陥導波路についてSOI基板上への作製ならびに低損失光伝搬の確認を行った。さらに円孔直径を徐々に変化させるチャープ構造において、バンド端の特長となる光局在スポットが波長によって徐々に移動すること、その移動位置がバンド計算とよく一致することを確認した。本年度はまず上記の方向性結合器の二つの導波路の伝搬帯域やバンド端を個別の評価した。その結果、いずれもバンド端と空気のリトラインで挟まれた領域での光伝搬、および円孔直径を変えたときの帯域のシフトを確認した。

通常の見積もった結果も併せて示している。バンド端では急激に群屈折率がおおきくなり、300以上に達した。これは群速度が真空中の光速の1/300以下になっていることを表している。これら基礎特性の確認の後、図52のような方向性結合器を作製した。また通常の見積もった結果も併せて示している。バンド端では急激に群屈折率がおおきくなり、300以上に達した。これは群速度が真空中の光速の1/300以下になっていることを表している。これら基礎特性の確認の後、図52のような方向性結合器を作製した。また通常の見積もった結果も併せて示している。バンド端では急激に群屈折率がおおきくなり、300以上に達した。これは群速度が真空中の光速の1/300以下になっていることを表している。

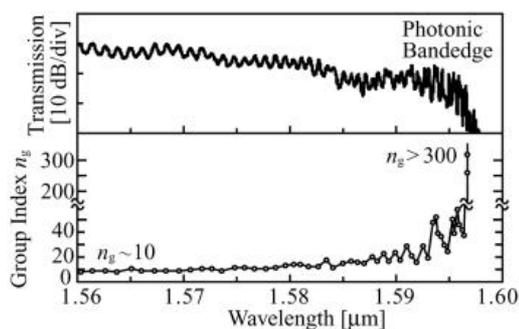


図51 通常の線欠陥導波路の透過スペクトル(上)と群屈折率の波長依存性

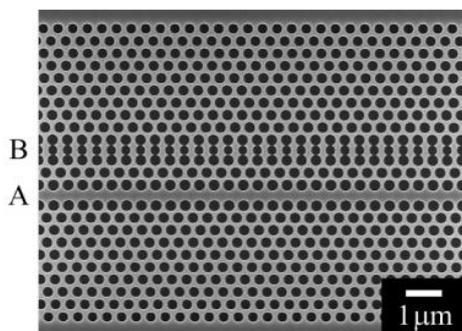


図52 SOI基板上に作製した導波路AとBから成る方向性結合器の電子顕微鏡写真

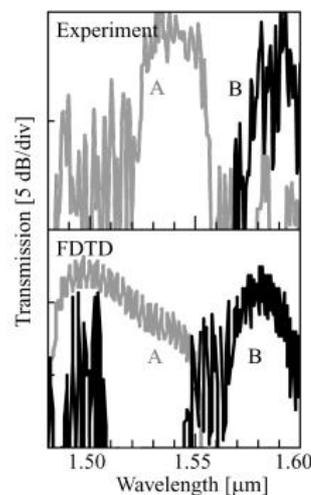


図53 方向性結合器の導波路AとBからの出射光スペクトルの実験値と計算値

### 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（産総研グループ）

- 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(4)**新しい位置合わせ装置の立ち上げに貢献した。

#### 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、**B-3**で述べた2次元バンドエンジニアリング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

- 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).
- T. Asano and S. Noda: “Tuning holes in photonic-crystal nanocavities”, *Nature*, Vol.429, doi:10.1038, No.6988, (2004).
- 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)).
- 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).

- A. Sugitatsu, T. Asano, and S. Noda: “Characterization of line-defect-waveguide lasers in two-dimensional photonic-crystal slabs” , Applied Physics Letters, Vol.84, No.26, pp.5395-5397 (2004).
- 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).
- 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).
- 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).
- Y. Tanaka, T. Asano, R. Hatsuta, and S. Noda: “Analysis of line defect waveguide on Silicon-on-Insulator two-dimensional photonic crystal slab” , IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol.22, No.12, pp.2787-2792 (2004).
- M. Fujita, T. Ueno, K. Ishihara, T. Asano, S. Noda, H. Ohata, T. Tsuji, H. Nakada, and N. Shimoji: “Reduction of operating voltage in organic light-emitting diode by corrugated photonic crystal structure” , Applied Physics Letters, Vol.85, No.23, pp.5769-5771 (2004).
- 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).
- A. Chutinan, K. Ishihara, T. Asano, M. Fujita, and S. Noda: “Theoretical Analysis on Light-Extraction Efficiency of Organic Light-Emitting Diodes using FDTD and Mode-Expansion Methods” , Organic Electronics, Vol.6, pp.3-9 (2005).
- 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).
- B.S. Song, S. Noda, T. Asano and Y. Akahane: “Ultra-high-Q photonic double-heterostructure nanocavity” , Nature Materials, Vol.4, pp.207-210 (2005).

- 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).
- E. Miyai and S. Noda: “Phase-shift effect on a two-dimensional surface-emitting photonic-crystal laser”, Applied Physics Letters, Vol.86, pp.111113-1-111113-3 (2005).
- 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).
- M. Fujita, K. Ishihara, T. Ueno, T. Asano, S. Noda, H. Ohata, T. Tsuji, H. Nakada, and N. Shimoji: “Optical and electrical characteristics of organic light-emitting diodes with two-dimensional photonic crystals in organic/electrode layers”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.44, No.5A (2005)(in press).
- 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 (2005)(in press).
- B. S. Song, T. Asano, Y. Akahane, and S. Noda: “Role of interfaces in heterophotonic crystals for manipulation of photons”, Physical Review B (2005)(in press).
- 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, 2015-2018 (2004).
- 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).
- 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).
- K. Nozaki and T. Baba, “Quasiperiodic photonic crystal microcavity lasers”, Appl. Phys. Lett., Vol.84, No.24, pp.4875-4877 (2004).
- 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).
- 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).

- 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).
- 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).
- 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).
- A. Nakagawa, S. Ishii and T. Baba, “Photonic molecule lasers composed of GaInAsP microdisks”, Appl. Phys. Lett., Vol.86, No.4, pp.041112 (2005).
- 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).

#### 和文論文・解説など

- 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年4月.
- 野田進: “光を自在に制御する「光ナノデバイス」 発光制御や光共振、分波・合波を実現へ 次世代通信や量子計算の基幹部品に”, 日経先端技術, 2004年9月.
- 野田進: “3.4.2フォトリック結晶”, 光産業の将来ビジョンーボーダレス化の中の進化と展開ー(光産業技術振興協会), pp.207-209, 2004年11月.
- 野田進: “ フォトリ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リックバンドギャップを実現へ”, Japan Nanonet Bulletin, No. 1, pp.11-12, 2005年1月.
- 野田進: “2次元・3次元フォトリ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年2月.
- S Noda: “Focus on LEOS 2003-04 Distinguished Lecturers”, LEOS Newsletter, Vol.18, No.3, 2004年6月. 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リック分子レーザー --- 新しい光機能素子への期待---”, 電子情報通信学会誌88 (2), 105-109 (2004).
- 馬場俊彦, “フォトリック結晶光機能素子の優位性”, 応用物理23 (2), 167-172 (2005).
- 馬場俊彦, “フォトリック結晶”, 現代化学 408, 55-59 (Feb., 2005).

(2) 特許出願

H16年度出願件数：12件（CREST研究期間累積：39件）