

「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。

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°C という低温であるが初めて連続発振に成功した。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、3000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。また、これらの基礎技術として線欠陥導波路そのものの導波特性の詳細な検討を行っており、H12年度は、2次元フォトニック結晶線欠陥導波路の伝播損失の評価を行い、11dB/mmを切る導波損失を得た、H13年度は、様々なフォトニック結晶のパラメータに対し、導波損失を評価するとともに、穴径の揺らぎの影響等を深く検討した。H14年度は、引き続き、導波損失の原因として、構造揺らぎが導波路の伝播損失に与える影響についても深く検討し、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、フォトニ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、H15年度は以下のような成果を得ることが出来た。4.3次元フォトニック結晶においては、(1)欠陥からの発光を様々な方向から測定し、欠陥からの発光のスペクトルのピーク波長・半値幅が角度によらずに一定であることを示した。(2)フォトニックバンドギャップによる自然放出光制御をより直接的に評価できる時間分解測定の基礎として、まずフォトニック結晶に導入する前の発光体のキャリア寿命評価を行い、低温条件下で測定することで、非発光再結合の影響を避けられることを明らかにした。(3)さらに、前年度試作に成功した3次元フォトニック結晶光導波路のより

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、点欠陥と線欠陥導波路の結合・非結合に関する検討をも行った。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において、(1)昨年度得られた知見を踏まえてウエハ構造の最適化を行った結果、室温連続発振に世界で初めて成功した。(2)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の開発に成功した。具体的には、デバイスのバンド構造を直接的に測定すると同時に、測定されたバンド構造において、どのバンド端で発振しているのかも、同定することが出来た。この成果は、今後、結晶構造の変化や、位相シフトの導入により、デバイス特性がどのように改善しうるかを直接把握する上でも極めて重要な結果と言える。また、(3)結晶構造と発振モードに関する理論計算も積極的に進めた。具体的には、格子点構造を円形から3角形へ、さらに位相シフトの導入により、発振モードがどのように変化するかを検討した。その結果、遠視野におけるビーム形状が、ドーナツ形状から単方性へと変化すること、各バンド端での発振のしやすさ等、様々な知見を得ることが出来た。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)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光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。(2)昨年度、面内ヘテロ・フォトリック結晶という新しい概念を提唱し、これを応用することで多波長動作を実現したが、それ以外の応用として、ヘテロ界面における光の反射現象を利用することで光の操作効率を大幅に向上できることを理論的に明らかにした。(3)ドナー型欠陥を用いた高Q共振器の実現に伴い、新たに面内型のデバイスの実現にも世界で初めて成功した。従来は、点欠陥に光が捕獲されるとQ値が十分に高くないことから、上下に漏れてしまうという現象が生じた。我々は、この現象を積極的に利用し、面出力型の波長合分波デバイスを提案・実現してきたが、これまでの研究によって点欠陥のQが大幅に増加したことから、点欠陥から光を上下に漏らすことなく、高効率に面内に別に設けた出力光導波路へと導く面内型デバイスの実現が可能となった。この結果は、2次元フォトリック結晶を用いたデバイスの応用範囲を拡げることにつながり、極めて重要な成果と言える。また(4)導波路伝播損失に関する詳細な検討を行い、SiO₂上のSiスラブ構造の場合、SiO₂を除去しないと、大幅な伝播損失が存在することを指摘した。さらに(5)チャープ構造の提案と実証、ならびにこれを利用した分散制御・群遅延素子の理論計算を行った。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、デバイスを実現する際に重要である、入出力効率を改善する入出射端の最適化、および計算と実験による光偏向機能の実証を行った。

以上により、2003-2004 IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS) Distinguished Lecturer Award, 第14回応用物理学会講演奨励賞受賞, 日本光学会光設計研究グループ光設計奨励賞等を受賞した。また、”2次元フォトリ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2003年6月6日号に、“高いQ値をもつ2次元フォトニック結晶点欠陥共振器に関する研究”が英科学誌ネイチャー2003年10月30日号に掲載された。また、研究代表者を議長として、フォトニック結晶に関する国際シンポジウム(PECS-V)を2003年3月7～11日に京都国際会議場で開催し、本研究の成果を世界に向けて強くアピールした。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)フォトニック結晶による自然放出制御効果をより直接的に評価できる、発光寿命の評価を実際にフォトニック結晶中に導入した発光体に対して行っていく。またこれまで検討してきた結晶作製技術を深め、さらにフォトニック結晶効果を強めた結晶を作製し、フォトニック結晶効果による発光寿命の変化を明らかにする。(ii)様々な大きさの点欠陥共振器の理論解析を進めるとともに、欠陥による発光の増強、言い換えれば発光寿命の高速化についても深く検討し、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たい。(iii)また、3次元結晶導波路に関しては比較的少ない積層数においても幅広い波長域で単一モード動作可能な線欠陥導波路について理論設計を行うとともに、その試作を進め、3次元フォトニック結晶による光伝搬制御技術を築く。さらに、これらの成果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、安定して、低しきい値連続発振が可能な条件を検討するとともに、デバイス出力の高出力化を図る。さらにフォトニック結晶のもつ大面積・コヒーレント発振に加えた新たな機能の付加を目指す。また、今年度確立したデバイスのバンド構造を直接測定する手法を用いることで、格子構造の制御により、実際にバンド構造がどのような変化をし、それが発振特性にどのような効果をもたらすかについて、実験的な面からも系統的な評価を進めていく。(ii)一方、2次元結晶欠陥デバイスにおいては、今年度得られた知見をもとに10万を超える高いQ値の実現、さらには、複数の点欠陥の結合を利用して、フラットトップ等のドロップ特性のさらなる制御を目指していく。面内ヘテロ・フォトニック結晶のより詳細な検討を行い、ヘテロ界面を2つ設けたダブルヘテロ構造による究極の光ナノ共振器の実現や、面内型デバイスへのヘテロ構造の導入による光子操作効率の向上を目指していく。また、2次元バンドエンジニアリング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15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に導入された点欠陥共振器の発光特性評価：

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、図1に示すように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、図2に示すように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

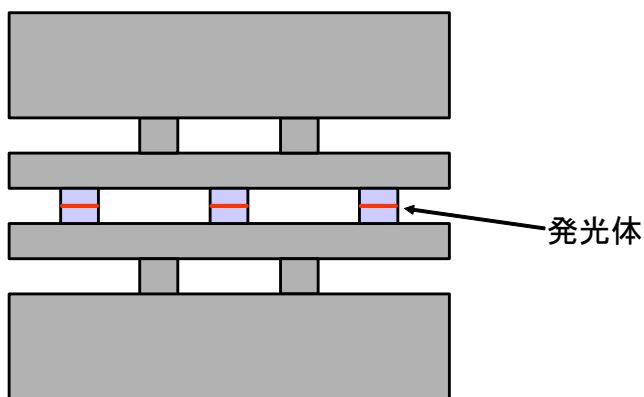


図1. 3次元フォトニック結晶への発光体の導入法。フォトニック結晶の周期性を乱さないように、ストライプ形状に加工した発光体を導入する。

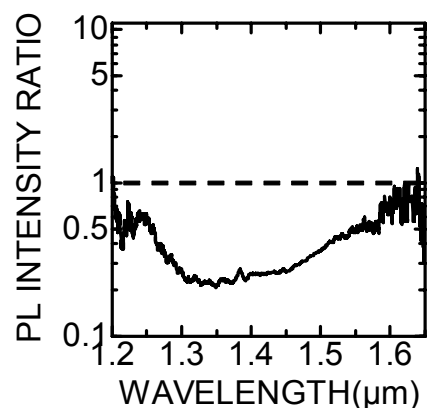


図2. 作製した試料からのPLスペクトルの測定結果。参照用試料（フォトニック結晶をもたない発光部だけの試料）のPLスペクトルで規格化している。

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）に増強した構造（図3参照）を完成させ、図4(b)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。それと同時に、点欠陥を導入し、欠陥のない部分と欠陥部分の発光スペクトルの評価を行った。測定した試料の構造を図5に示す。9層積層構造のフォトニック結晶の発光部に様々な大きさの欠陥(i)～(vii)を導入している。このような様々

な欠陥を含む試料に対し、顕微PL(フォトルミネッセンス)測定を行った。各欠陥部分の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((iiv)→(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、発光に参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。

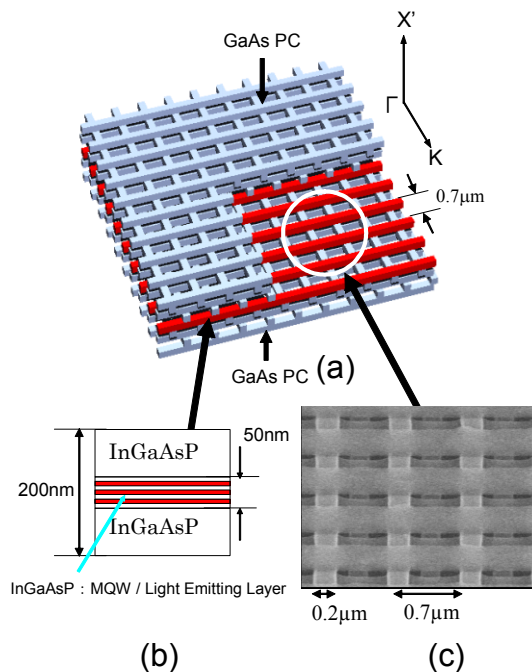


図3. (a)9層積層試料の模式図、(b)発光層の模式図、(c)5層積層時のSEM写真。

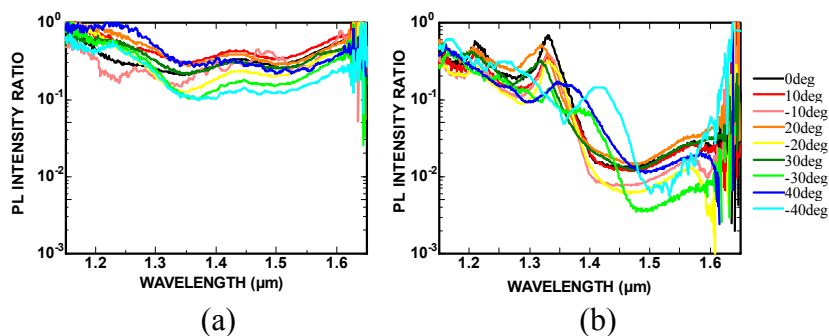


図4. (a)5層(2+1+2)構造、および(b)9層(4+1+4)構造における様々な測定方向に対する発光スペクトル。9層積層構造では最大20dBの減衰が得られていることが分かる。

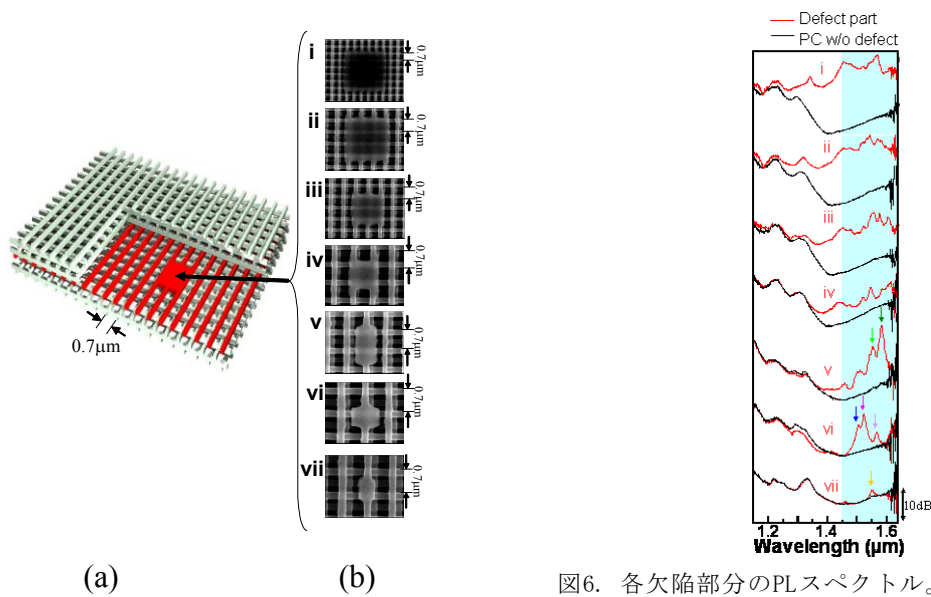


図5. (a)内部に導入した点欠陥の模式図、(b)各点欠陥のSEM観察像。様々な大きさの欠陥が導入されていることが分かる。

図6. 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。

これらの結果を踏まえて、今年度は点欠陥共振器の詳細な発光特性評価として、従来行ってきた垂直方向[100]方向以外についても評価を行った。評価した方向の模式図、および点欠陥のSEM写真を図7に示す。この図に示すように、垂直方向以外に Γ -K方向に ± 40 度傾けて測定を行った。その結果、図8に示すように

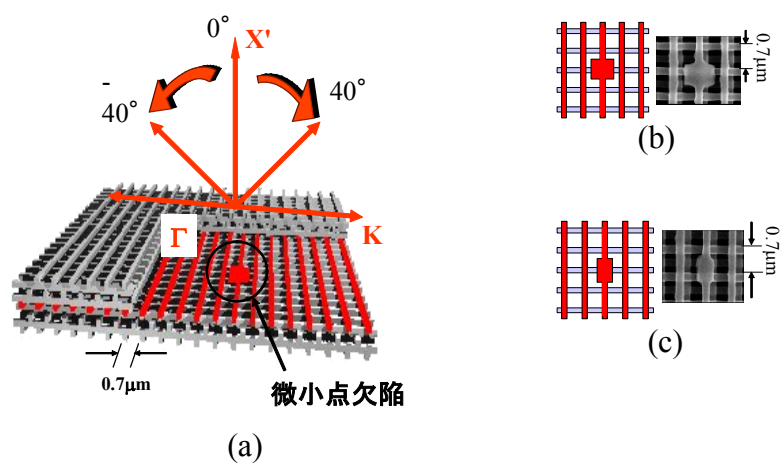


図7. (a)PLスペクトルの角度依存性を測定した方向を模式的に表した図、(b)正方1周期欠陥 ($0.6 \times 0.6 \mu\text{m}$)の模式図とSEM像、(c)縦長1周期欠陥 ($0.6 \times 0.45 \mu\text{m}$)の模式図およびSEM観察像。

正方1周期欠陥においては、欠陥モードの共振波長は測定角度を変えても一定であり、また共振ピークのQ値も変化しないことが確認できた。それに対して、図9に示すように縦長1周期欠陥の場合は、測定角度を0度から40度方向に変化させたときにピークの波長が変化しない、またQ値が一定であるということは先の欠陥と同様であるが、30度、40度に傾けたときは欠陥ピークが観測されない、つまり縦長1周期欠陥では欠陥モードに放射角依存性があることが分かった。そこで、この原因について検討するために、3次元FDTD法を用

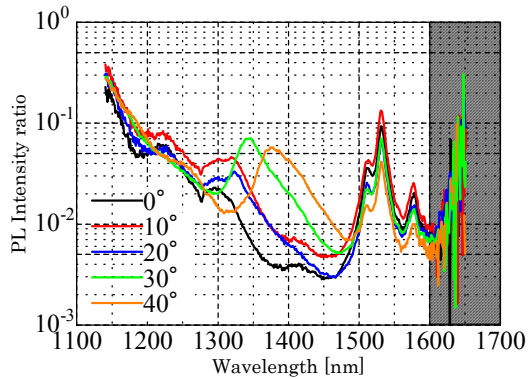


図8. 正方1周期点欠陥共振器のPLスペクトルの角度依存性。参照用試料（フォトニック結晶をもたない発光部のみの試料）のPLスペクトルで規格化している。斜線で塗りつぶした、波長1600nmより長波長側は、検出器の感度がないため、測定できない。角度を0° から40° に変えるに従って、バンド端(波長1350nm付近)は移動しているのに対して、欠陥モード(波長1550nm付近)の波長は変化していないことが分かる。

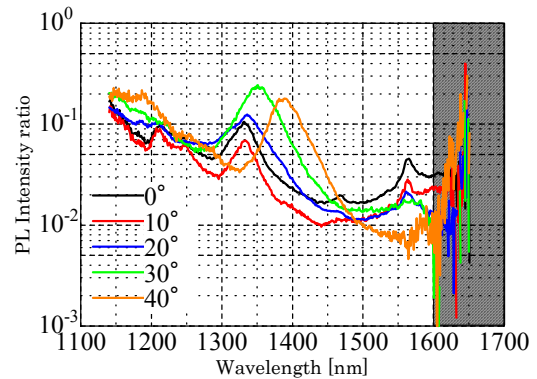


図9. 縦長1周期点欠陥共振器のPLスペクトルの角度依存性。参照用試料（フォトニック結晶をもたない発光部のみの試料）のPLスペクトルで規格化している。30° と40° の場合には、欠陥モードが観測されておらず、欠陥モードに放射角依存性があることが分かる。

いて点欠陥から放射される光の放射角依存性を計算した。計算モデルの模式図、および計算結果を図10に示す。この図から分かるように、縦長1周期欠陥の場合、0度方向に弱く放射されているが、40度方向にはほとんど放射されておらず、またメインの放射はさらに広角側に存在することが分かった。以上の結果より、観測されているピークは点欠陥における共振モードを反映した放射角依存性をもつことが明らかになった。

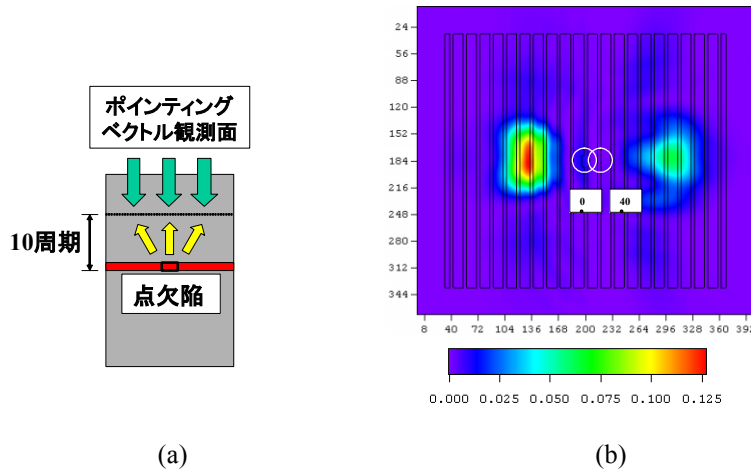


図10. 縦長1周期点欠陥共振器から光が放射される方向の(a)計算モデル、および(b)計算結果。計算結果より、0° 方向には弱く放射されるが、40° 方向には放射されないことが分かる。

(2) 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中のキャリア寿命が長くなり、後者の場合は短くなる

と考えられる。つまり、キャリア寿命の測定を行うことで、フォトニックバンドギャップの効果により直接的に評価できると考えられる。この際、重要な点として、非発光再結合寿命 τ_{nr} の影響があげられる。フォトニックバンドギャップ効果によって変化を受ける、つまり我々が評価したいのは発光再結合寿命 τ_r であり、一方、時分解測定で評価される寿命 τ は発光再結合寿命 τ_r 、非発光再結合寿命 τ_{nr} と $1/\tau = 1/\tau_r + 1/\tau_{nr}$ という式で関係づけられる。すなわち、フォトニックバンドギャップ効果によって発光再結合寿命 τ_r が変化したとしても、非発光再結合寿命 τ_{nr} が支配的な場合、時分解測定でフォトニックバンドギャップ効果を評価することができないということを意味する。非発光再結合寿命には、表面再結合や、オージェ再結合などが考えられるが、特に本研究の場合、発光層をストライプ上に加工しているため、表面再結合の影響が懸念される。そこで、今年度はまずその基礎評価として、発光層単体におけるキャリア寿命の測定を行い、表面再結合の影響について検討を行った。

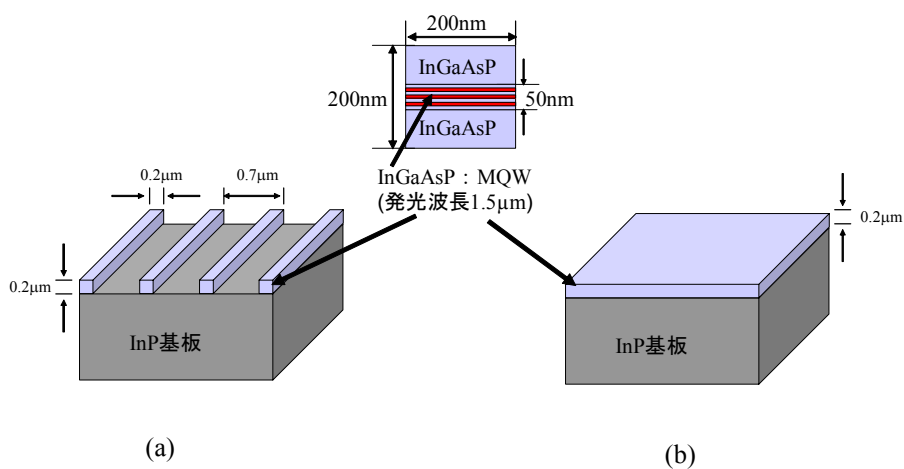


図11. 時間分解測定を行った試料の模式図。(a)フォトニック結晶パターンを形成したストライプ領域と、(b)形成していない平坦領域。

図11に測定に用いた試料の模式図を示す。InP基板上に発光波長1.5μmのInGaAsP多重量子井戸が成長されている。実際にフォトニック結晶を導入する発光層と同様に0.7μm周期のストライプ構造を形成した部分と、

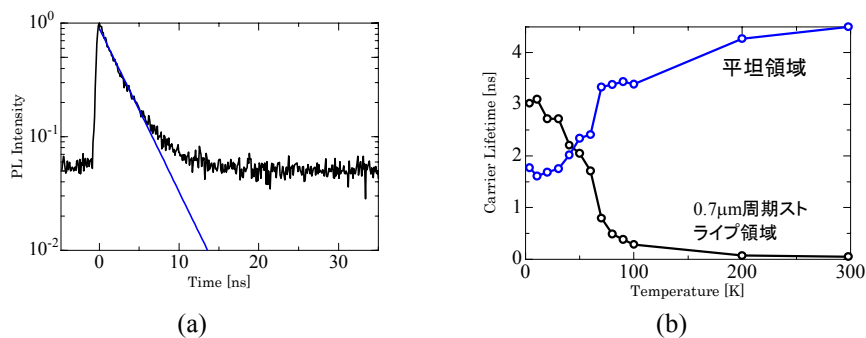


図12 (a)時間分解測定結果の一例と、(b)キャリア寿命の温度依存性の測定結果。

ストライプを形成してない部分(平坦部)を同一ウエハ上に形成し、それぞれの領域からの自然放射光をストリークカメラを用いて測定した。試料の温度を室温から4Kまで変化させて測定したときの、ストライプ領域と平坦領域のキャリア寿命の変化を図12に示す。まず平坦領域を見てみると温度が下がるにつれてキャリア寿命が減少していることが分かる。これは、温度が低下したことで電子・正孔のエネルギー空間における分布範囲が狭くなり

再結合確率が増大したためである。一方、ストライプ領域を見てみると、温度が下がるにつれて、平坦領域とは逆に寿命が長くなっていることが分かる。これは、再結合確率増大の効果よりも、温度が下がることで非発光再結合が抑制されて効果の方が支配的であることを意味している。発光層での内部量子効率(励起によって生じたキャリアに対して、発光再結合したキャリアの割合) η を考えると、発光再結合寿命、非発光再結合寿命はそれぞれ $\tau_r = \tau / \eta$ 、 $\tau_{nr} = \tau / (1 - \eta)$ と表すことができるため、内部量子効率とキャリア寿命を測定することで、発光再結合寿命、非発光再結合寿命をそれぞれ評価することができる。そこで、4Kでは非発光再結合は生じていない、つまり内部量子効率 $\eta = 1$ と仮定した上でPLスペクトルの積分強度より得られる内部量子効率 η を用いて発光再結合寿命 τ_r 、非発光再結合寿命 τ_{nr} の温度依存性を求めた結果を図13に示す。この図から分かるように、ストライプ領域においても50K以下では発光再結合寿命の方が早くなっていることが分かる。すなわち、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られることが分かった。

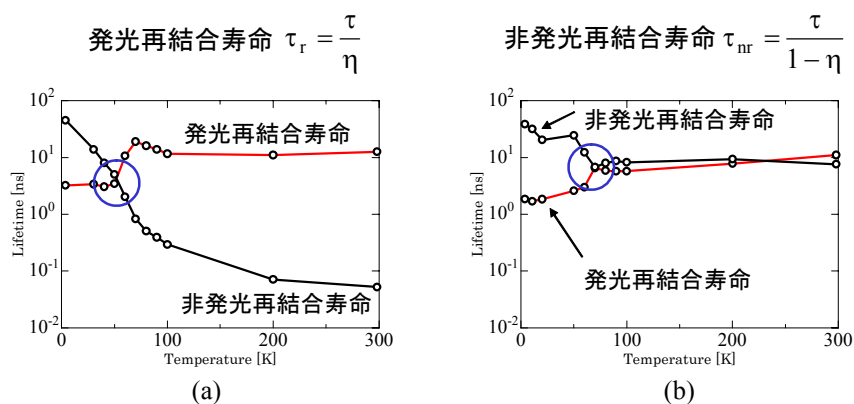


図13 (a)ストライプ領域と、(b)平坦領域における、発光再結合寿命と非発光再結合寿命の評価結果。

また、ごく最近、3次元フォトニック結晶

中に導入した発光体におけるキャリア寿命の評価にも取り組んでおり、フォトニックバンドギャップによる自然放出光制御について、明らかになりつつあるところである。

(3) 3次元フォトニック結晶導波路の評価

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。昨年度、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

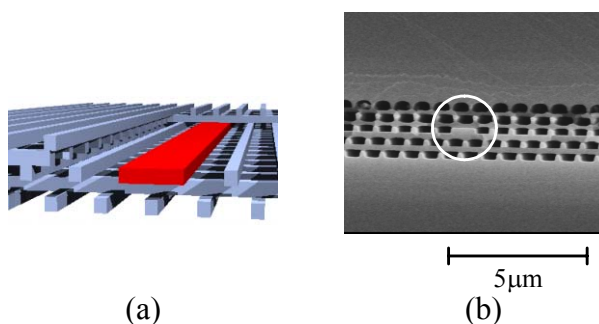


図14 (a) 作製した導波路の模式図。(b) 完成後の結晶の断面SEM観察像。

の観測に成功した。今年度は、この導波現象についてより詳細な検討を行った。

図14(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14(b)は、完成後の結晶の断面SEM写真を示す。

この試料の端面から、様々な波長の光を入射させて、そのときに導波路を伝搬する様子を試料上側から観測した様子を図15に示す。この図より分かるように、波長によって導波路を伝搬する長さが異なっていることが分かる。波長に対する伝搬距離をグラフにしたものが図16である。この理由について、作製した導波路のバンド図との対応を検討した。図17は導波路のバンド構造を計算した結果であり、多数の伝搬モードが存在することが分かる。今回、試料垂直方向から伝搬の様子を観測しているため、図17において影の領域の

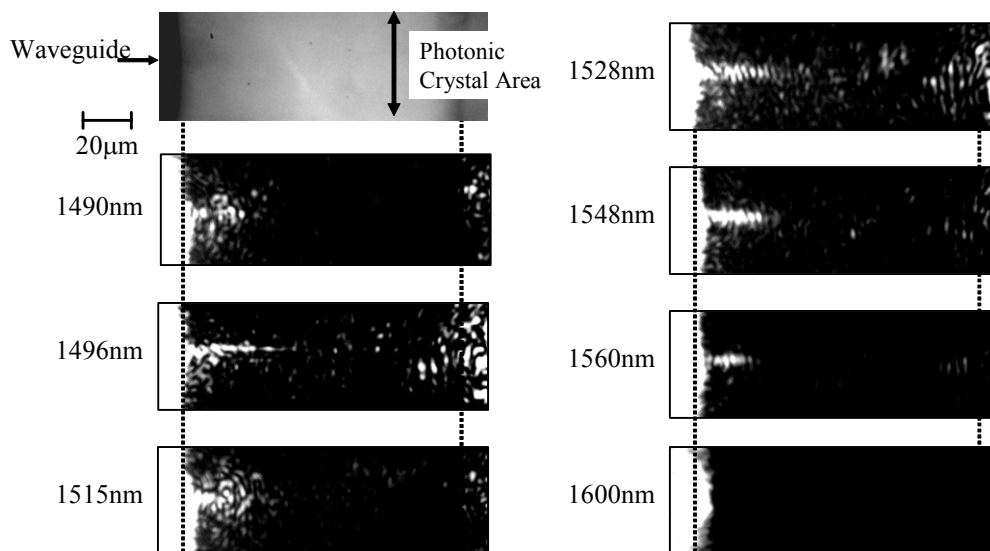


図15 様々な波長の光を導波路端から入射させ、導波路を伝搬する様子を試料上方より赤外カメラで観察した結果。

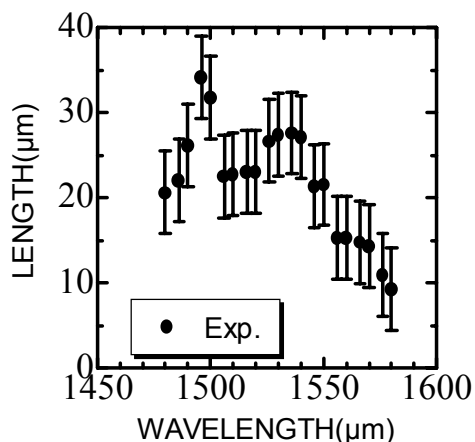


図16 伝搬距離の波長依存性の測定結果。

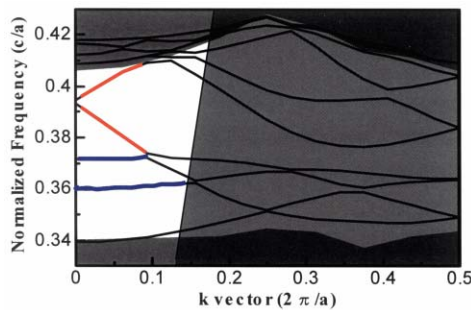


図17 評価した導波路のバンド構造の計算結果。図中、影の領域は、今回の測定では観測できない領域を表す。また青線で示した傾きの小さいバンドは、群速度が遅く伝搬が観測しにくい。一方、赤線で示した傾きの大きいバンドは群速度が速く、伝搬が観測しやすい。

光はGaAsと空気の界面で全反射されて観測できない。つまり、今回観測された導波は、図17で左側のバンドに対応することになる。ここで導波路を伝搬する長さLは、 $L = -Qv_g / \omega \ln T$ で表される。ただしQは導波モードのQ値(閉じ込めの強さ)、 v_g は群速度、 ω は周波数、Tは透過率である。すなわち、伝搬距離Lは群速度 v_g に比例することが分かる。このことから考えると、バンド図において、傾きの小さいバンドは群速度が小さいため、伝搬は観測されにくく、一方傾きの大きいバンドは群速度が速く伝搬距離が長くなると考えられる。このことから考えると、今回観測された導波は図17において赤線で示したバンドに対応すると考えられる。そこで3次元FDTD法を用いて、このバンドにおける伝搬距離の波長依存性を計算した結果を図18に示す。この図より分かるように計算結果と実験結果では傾向が一致しており、このことから、観測された光は、導波路モードに対応していることが確認

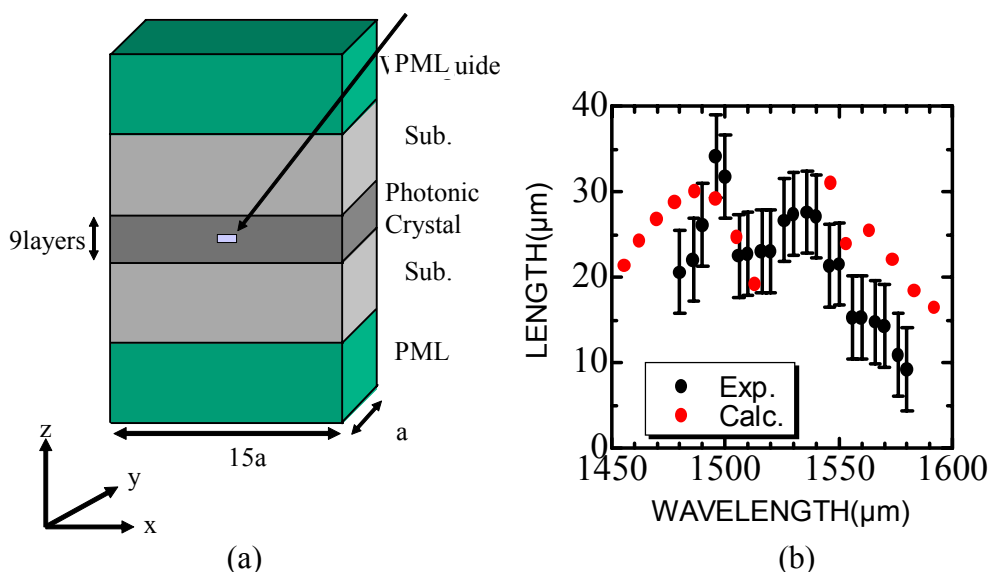


図18 伝搬距離の理論計算結果。(a) 仮定した構造の模式図。(b) 計算結果と実験結果を同一のグラフ上にプロットしたもの。

できた。図19は、積層数を増やした場合に伝搬距離がどのように変化するかを計算した結果である。この図より分かるように、今回評価した9層積層構造では、計算的にも100μm以下の伝搬しか期待できないが、積層数を増やすに従って指数関数的に伝搬損失が減少し、25層積層した場合には無損失で数百μm伝搬することが分かる。今後は、実際に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。

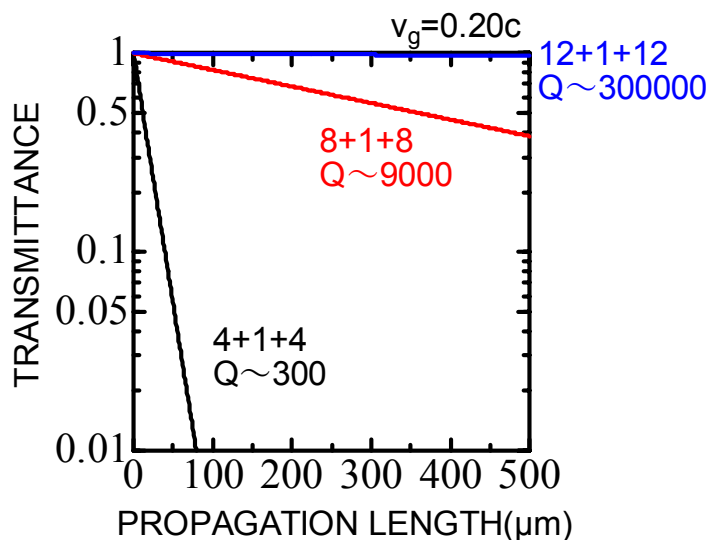


図19 伝搬損失の積層数依存性の計算結果。25層積層することでほぼ無損失伝搬が可能であることが分かる。

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20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

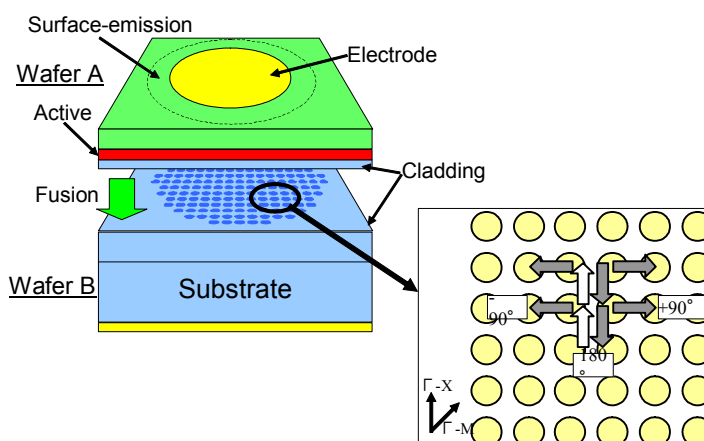


図20 2次元フォトニック結晶レーザの構造の一例とバンド端における定在波の形成メカニズム。

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°Cという低温であるが初めて連続発振に成功した。

本年度は、まず、-20°Cでは連続発振するが、室温で連続発振しない原因について検討するために、パルス条件下において閾値の温度依存性を評価した。図21の●印がその結果であり、デバイスの温度が上がるにつれて、閾値が急激に上昇していることが分かる。閾値の温度依存性を表す指標である特性温度 T_0 は約50Kと見積もられ、これは本デバイスでInGaAs活性層を用いていることを考えるとかなり低い値であると言える。この原因として、温度が高くなるにつれて、キャリアが量子井戸からあふれて光学利得に寄与するキャリア

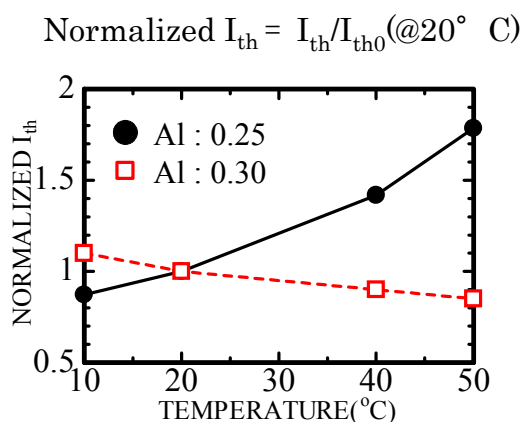


図21 発振閾値の温度依存性の測定結果。20°Cにおける閾値で規格化している。

の割合が減少している可能性がある。図22は本デバイスで用いている活性層における電子のバンド構造の模式図である。キャリアのオーバーフローを抑えるために、多重量子井戸近傍にAl組成0.25のAlGaAs層を導入しているが、この層の障壁高さがわずかに不足していると考えられる。そこで、キャリアのオーバーフローをより確実に抑えるために、Al組成を0.30まで増やした活性層を用いて同様のデバイス構造を作製し温度特性の評価を行った。同様にパルス駆動条件下で閾値の温度特性を評価した

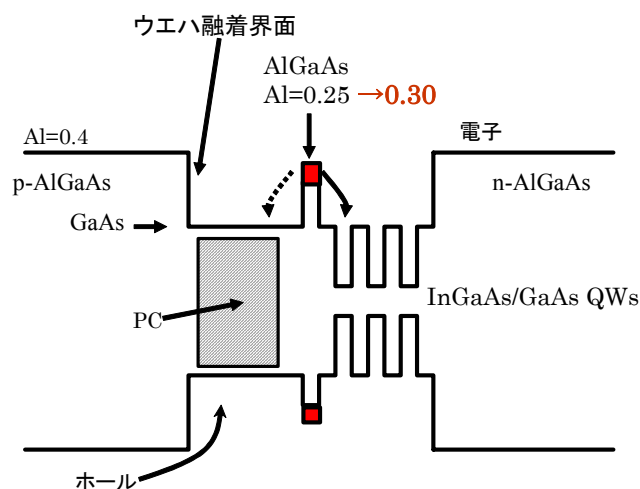


図22 量子井戸活性層における電子・正孔に対するバンド構造の模式図。

結果、図21の□で示すように、閾値は温度が上昇しても増加せず、温度特性を大幅に改善することができた。なお、閾値が温度とともに減少しているのは、本デバイスでは2次元フォトニック結晶の周期によって決まる発振波長を、活性層の発光ピーク波長よりもやや長波長側になるように設計しているためである。活性層の発光ピーク波長は温度上昇とともに長波長側に移動するため、温度上昇とともに発振波長での光学利得が大きくなり閾値が減少するのである。以上の結果より、Al組成を0.3まで上昇させることで、デバイスの温度が上昇した際のキャリアのあふれ出しを抑制することができた。以上の検討をもとに、このデバイスにおいて室温連続発振を観測することに成功した。これにより、デバイス実用化に向けての大きな課題を克服することに成功した。現在、デバイスの詳細な特性評価を行っているところである。

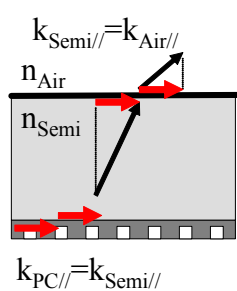
本デバイスについては、2002年に引き続いて2003年も秋に幕張メッセで開催された、日本のメジャーなエレクトロニクス関連の展示会であるシーテック2003において参考出品され大きな注目を集めた。

(2) デバイスのバンド構造の測定と発振バンド端の同定

これまで、デバイスの発振波長とバンド構造との対応関係は、偏光特性等から間接的に検討を行っていた。しかし、今後格子構造を様々に制御することで発振モードを意図的に制御していくことを考えると、発振波長とバンド構造の対応関係をより直接的に把握することが必要である。そこで、今年度、新たな測定系を用いて、デバイスのバンド構造を直接的に測定し、発振波長とバンド端との対応関係を同定することを行った。

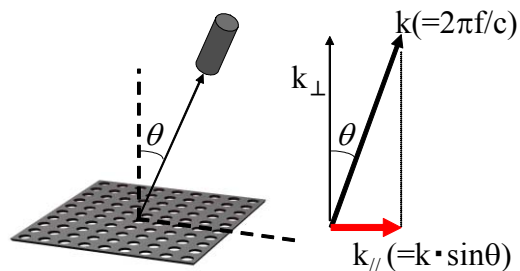
図23に測定の原理を示す。フォトニック結晶中を伝搬する光は、結晶と半導体、および半導体と空気の界面においてスネルの法則に従って屈折を受ける。この際、面内方向の波数は常に保存される、つまり図23において $k_{pc//} = k_{semi//} = k_{air//}$ の関係が成り立つこと、また空気中において波数の絶対値 k とデバイス面内方向の波数の関係が図23に示すように

$k_{air//} = k \sin \theta$ で表されること、を用いると、図23に示すように試料に対してある角度 θ 傾けた際のスペクトルを測定することで、フォトニック結晶中を伝搬する光の波数 $k_{pc//}$ を測定することができる。



$$k = 2\pi n \cdot c \cdot f$$

(a)

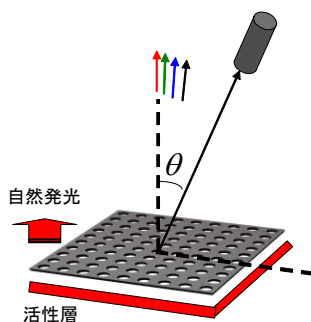


$$k_{PC//} = 2\pi f / c \cdot \sin \theta$$

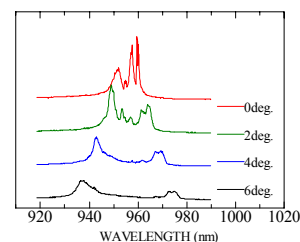
(b)

図23 (a)フォトニック結晶を伝搬する光が上方に放射される時の波数の関係を模式的に示したもの。(b)試料に対して斜め方向から測定することで、フォトニック結晶内部を伝搬する光の波数を測定できることを模式的に示した図。

バンド構造を直接的に測定するものである。図24は、発振閾値以下のLED動作の状態、実際に角度を傾けてデバイスの発光スペクトルを測定した結果であり、角度に対応してピークがシフトしていることが分かる。このピークが各バンドに対応していることになる。図25は実際に測定で得られたバンド図と、平面波展開法で計算したバンド図を比較したものであり、測定結果と計算結果が良く対応していることが分かる。

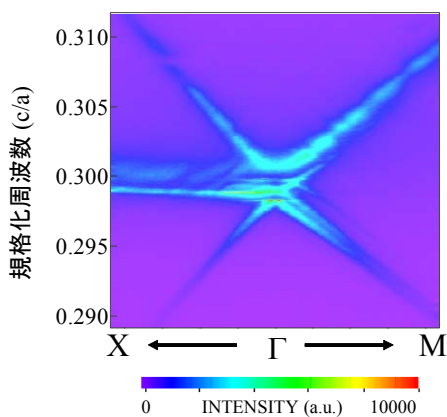


(a)

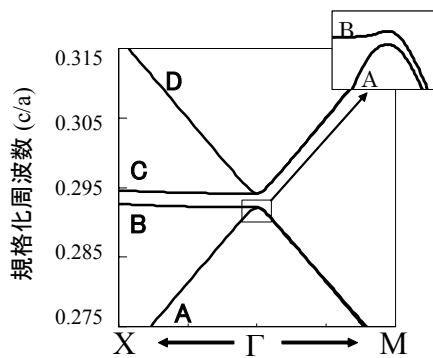


(b)

図24 (a)斜め方向からの測定の模式図、(b)測定したスペクトルの例。



(a)



(b)

図25 (a)バンド構造の測定結果と(b)計算結果。

次に発振バンド端との対応関係を調べるために、閾値以上で測定を行い、それをバンド図と比較した結果、図26(a)に示すように発振波長はバンド端Aに対応していることが分かった。これを確認するために、バンド端Aの遠視野像の測定結果と計算結果を比較した結果、図26(b)に示すように両者が一致しており、実際にバンド端Aで発振していることが確認できた。

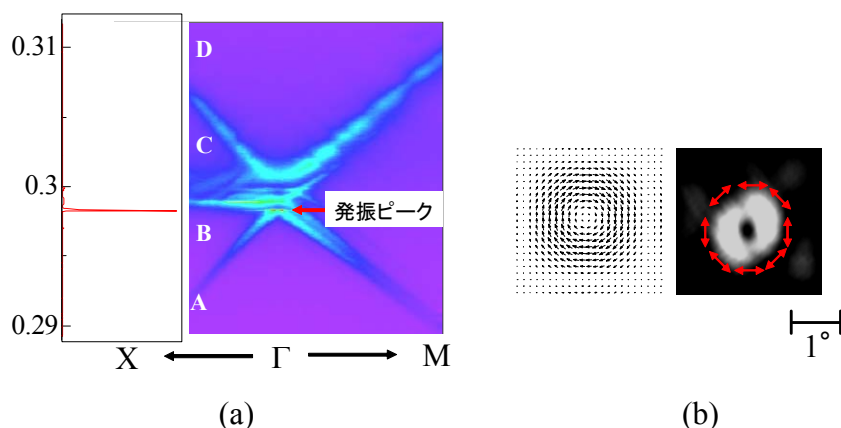


図26 (a)バンド構造と発振波長の関係、(b)バンド端Aにおける遠視野像の計算結果と測定結果。

今後は、様々なデバイスにおいてバンド構造を測定し、その特性を計算結果と比較することでより発振モードを詳しく検討していく。また、意図的に格子構造等を制御してバンド構造を制御したデバイスを作製し、実際にバンド構造が変化していることを実験的に評価していく予定である。

(3) 結晶構造と発振モードに関する理論検討

図26で示したように、現在作製している全面均一なデバイスでは、バンド端Aで発信した場合、遠視野像がドーナツ形状であることが理論的・実験的に確認されている。このようなリング状ビームは、光ピンセットなどへの応用が考えられるが、光ファイバー等に結合させることを考えると、単峰性のビーム形状であるものも望ましい。そこで、結晶構造を変化させることで発振モードを意図的に変化させて、単峰性の遠視野像を得る方法を理論的に検討した。まずドーナツ形状になる原因、つまり中央で光強度が減少する原因について検討を行い、これはバンド端Aの発振モードが反対称モードであるため、中央部分では打ち消しあって面発光成分が減少していることが分かった。図27(a)が面内での電界分布の模式図であり、偏光方向を制御するため、格子点としては楕円形状を導入している。この図から分かるように、y軸に対して左右で電界の向きが逆向きになっており、反対称モードであることが分かる。その結果、電界成分をフーリエ変換した結果(遠視野像に対応する)も図27(b)に示すように双峰形状になっている。そこで、中央に半周期の位相シフトを導入することで、発振モードが対称な電界分布をもつようにした。図27(c)が位相シフトを導入した際の面内の電界分布の模式図であり、y軸に対して電界は左右対称で対称なモードとなっていることが分かる。その結果、(d)に示すように単峰形状の遠視野像が得られることを明らかにした。また、円孔の形状を従来の円形・楕円形状から三角形に変

化させることで、偏光制御を行いつつ、各バンド端での発振のしやすさに差をつけることができることを見出した。これらの結果は、結晶構造を意図的に変化させることで、発振モードを様々に制御できることを意味しており、今後実験的な検討を進めて行く予定である。

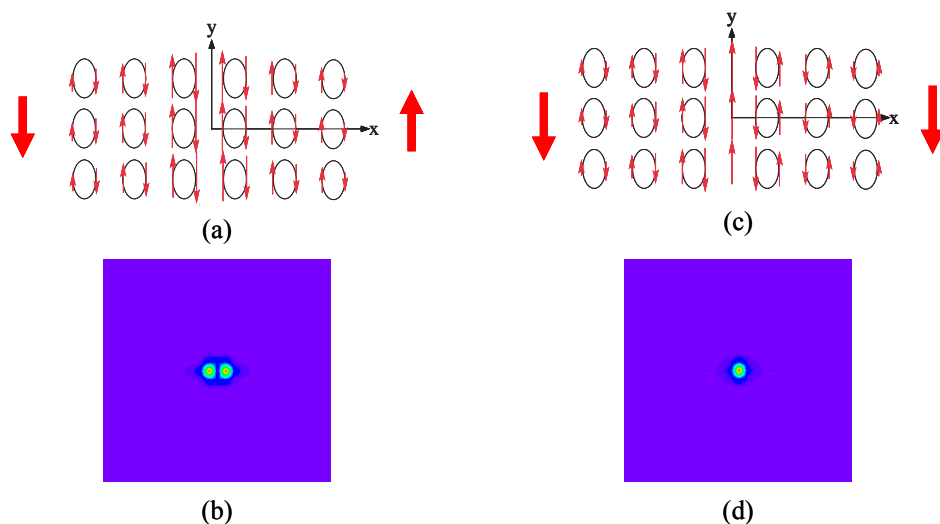


図27 楕円格子点2次元フォトニック結晶に(a)位相シフトをいれない場合の面内の電界の模式図、(b)遠視野像の計算結果、(c)位相シフトを導入した場合の面内の電界の模式図、(d)遠視野像の計算結果。位相シフトによって遠視野像が単峰化していることが分かる。

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）

(1) 高Q値微小点欠陥共振器の実現

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、3800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。今年度は、まず、さらに高いQ値をもつ光ナノ共振器の実現を目指した。

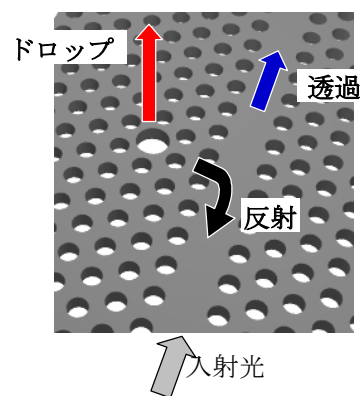


図28 デバイスの原理図。

これまで、極微小領域に光を閉じ込めようとして、共振器の大きさを小さくしていくと、その大きさに逆比例して、光の漏れが大きくなり、強い光閉じ込めを達成することは、困難であると考えられてきた。そこで我々は、光共振器から光が漏れ出す理由について詳

細な理論検討を行った。まず単純なモデルとして図30(a)に示すように両端に反射率100%のミラーを配置した共振器について検討した。この共振器では、x方向についてはミラーによって閉じ込められ、z方向については、スラブと空気の屈折率差による反射によって閉じ込められる。図30(b)は、共振器長が波長の2.5倍という非常に短い場合の共振モードの電界分布である。また図30(c)は、電界分布をフーリエ変換して波数空間で表示したものである。中央の薄く塗りつぶされた領域では、スラブと空気の界面において全反射条件を満足しないため、一部の光が上下方向に漏れ出す。この図より分かるように、電界の大部分は全反射条件を満足する波数域に存在しているが、一部が満足しない領域内に存在し、これが共振器の閉じ込めの強さ、いわゆるQ値を下げていていることが分かる。この漏れ成分を減少させる方法について検討を行った結果、共振器端部の電界分布の包絡関数の急激な変化が漏れの原因であることに気がついた。そこで、急激な変化をもたず、かつ微小な領域に局在した関数を包絡線としてもつ共振モードを仮定して漏れ成分の検討を行った。

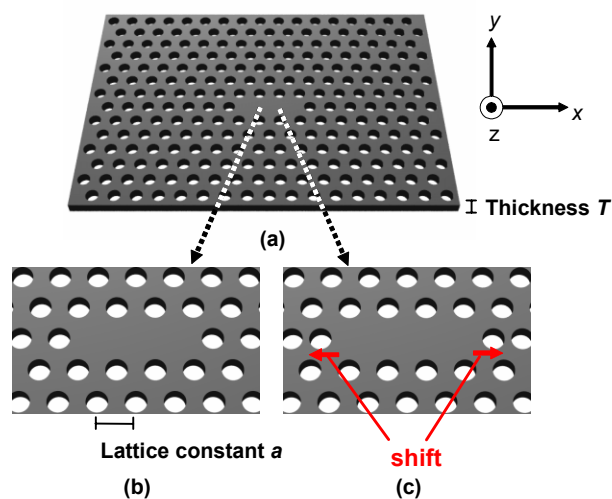


図29 (a) ドナー型点欠陥共振器の模式図および、(b) (c) 共振器部分の拡大図。

その結果、図30(d)、(e)に示すように例えばガウス型の包絡関数を用いることによって、漏れ成分が

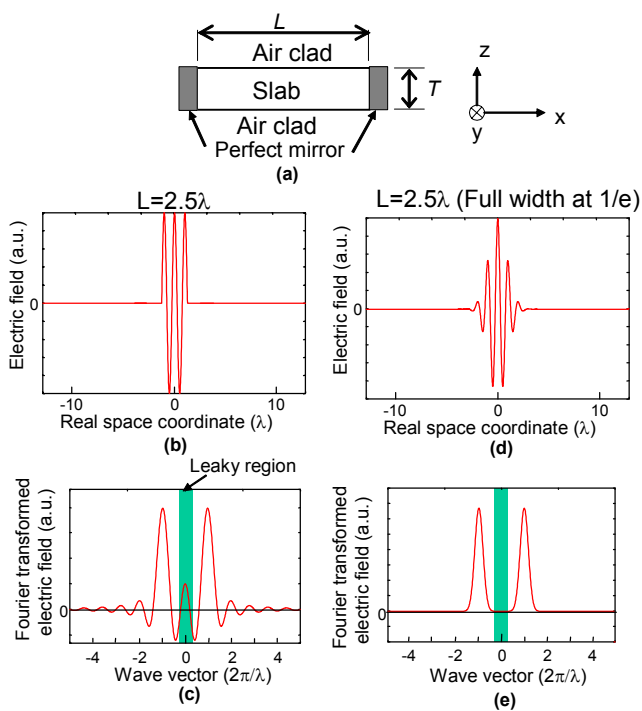


図30 (a) 仮定した微小共振器の模式図と、(b) 内部に閉じ込められた光の電界分布および、(c) フーリエ変換結果。(d) 共振器における電界分布の包絡線をなめらかにしたときの電界分布、(e) フーリエ変換結果

ほとんど存在しない共振モードを作り出せることが分かった。つまり極微小高Q共振器の実現には共振モードの電界分布の設計が非常に重要であり、緩やかでかつ空間的に局在した包絡関数をもつ共振モードが非常に有効であることが分かった。

この結果を受けて、実際の2次元フォトニック結晶中に導入した点欠陥共振器で高いQ

値をもつ構造の設計を行った。基本的な構造としては、図29(a)に示すように厚さ250nmのSiスラブに、420nm間隔で三角格子状に規則正しく空気穴を設けた2次元フォトニック結晶の一部に、直線上に3つ空気穴を埋めた極微小点欠陥を用いた。この構造では、光は、2次元面内方向(x, y方向)はフォトニックバンドギャップによって、上下方向(z方向)はSiと空気の界面における反射によって閉じ込められる。図31(a)は図29(b)に示す共振器における共振モードの電界分布を3次元FDTD法によって計算した結果である。空気穴を埋めた部分に電界が集中しており、共振器に光が閉じ込められている様子が分かる。この電界分布を2次元フーリエ変換した結果が図31(b)であり、この図において、光が全反射条件を満足しない領域、つまり光が漏れ出す領域は中央のグレーの円内に相当する。この図から分かるように、大部分は円外の漏れ出さない領域に存在しているが、一部が円内の漏れ出す領域に存在することが分かる。そこで、図30の場合と同様に、光をより緩やかに閉じ込めることで、全反射条件を満足しない領域に存在する電界成分を減少させることを試みた。具体的には、図29(c)に示すように共振器端部に位置する空気穴をほんのわずかに、通常位置よりも外側にシフトさせることで、端部での急峻な光の反射・散乱を押さえ、より緩やかに反射されるような構造を設計した。シフトさせた場合の電界分布を図31(c)に、その2次元フーリエ変換

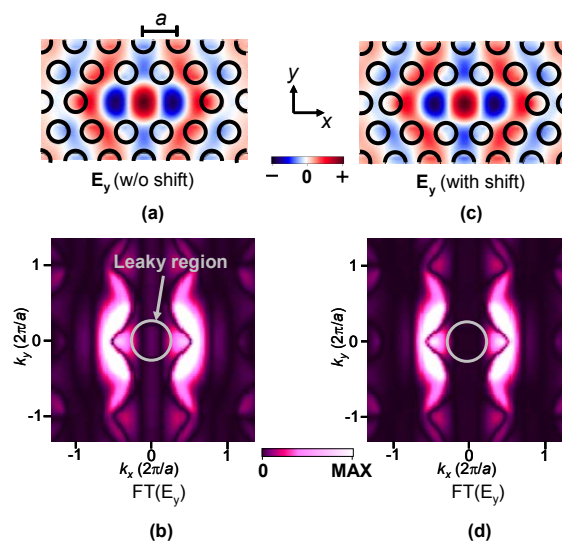


図31 3個埋めドナー型欠陥における電界分布。(a) 何もしない場合、(b)共振器端部の円孔を微妙にシフトさせた場合。

結果を図31(d)に示す。図31(b)と(d)を比較すると、円孔をシフトさせることで円内に存在する、上下に漏れ出す成分が減少していることが分かる。これは、円孔をシフトさせることで、共振モードがよりガウス分布に近くなったためである。以上の結果より、円孔をシフトさせることで光の漏れ出しが抑えられ、高いQ値をもつ共振器が実現できることが理論計算より明らかになった。

上記の計算結果を、実験的に実証するために、実際に最近接円孔を少しずつシフトさせたデバイスを作製し、共振器のQ値を測定した。図32は、作製した共振器のSEM観察像と共振スペクトルの測定結果である。円孔をナノメートル単位でシフトさせることで共振スペクトルの半値幅が大幅に変化し、円孔を63nmシフトさせた場合に共振スペクトルの半値幅が最小(0.045nm)になることが分かる。この共振器のQ値は、約45,000であり、シフトさせない場合のQ値~3,800に比べて1桁以上高いQ値を実現することに成功した。また共振器の体積Vは3次元FDTD法による電界分布の計算結果より $6\sim 7 \times 10^{-14} \text{cm}^3$ と極めて小さく、単位体積あたりのQ値は $6.4 \times 10^{17} \text{cm}^{-3} (=120,000/\lambda^3)$ と、これまでに報告されていた値に比べて

1~2桁大きい、世界最高の値を実現することに成功した。この結果は英科学誌ネイチャー2003年10月30日号に掲載された。今後、さらに上記の概念に基づき、端部の設計をさらに工夫することで、より強い光閉じ込め効果をもつ光ナノ共振器の実現も可能である。

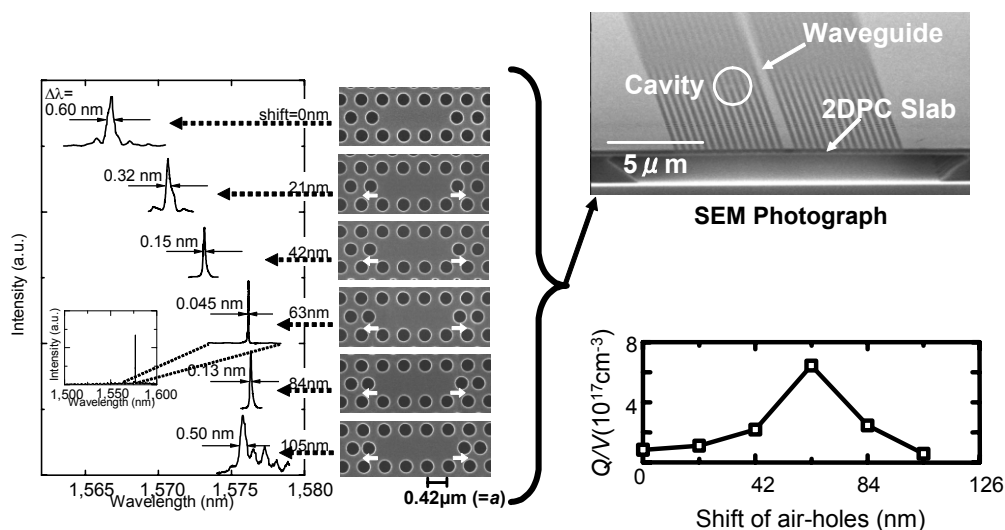


図32 共振器端部の円孔を少しずつシフトさせた試料のSEM観察像と共振スペクトル、単位体積あたりのQ値のシフト量依存性。

(2) 面内ヘテロ・フォトニック結晶による光取り出し効率の向上

昨年度、我々は実際に周期が1.25nmずつ異なるフォトニック結晶を7つ(PC₁~PC₇)接続した「面内ヘテロ構造」を作製し、作製したデバイスの各点欠陥からのドロップ光強度を詳しく調べた結果、図33に示すようにQ値は~3800と一定であるが、PC₅、PC₆からのドロップ光強度が、他のPC₁~PC₄からのドロップ光強度に比べて、かなり大きくなっていることが分かった。また、透過スペクトルより、PC₅、PC₆のドロップ波長において、透過光強度がほぼ零に近づいている様子が見られた。これは、PC₅、PC₆でドロップされきれなかった光が、ヘテロ界面(PC₁とPC₂の界面)で反射され、再び、PC₅、PC₆へ戻り、再度ドロップされ、結果として、ドロップ光強度が大幅に増大したものと考えられる。そこで、ヘテロ界面で光が反射された場合の光取り出し効率について、モード結合理論を用いて解析を行った。図34に仮定した構造の模式図を示す。光は左側の端面から入射し(強度S₊)、一部は点欠陥に結合(Q_{in}:導波路と点欠陥の結合係数)し、点欠陥で共振し(光強度a)、その一部が自由空間に放射される(Q_vは

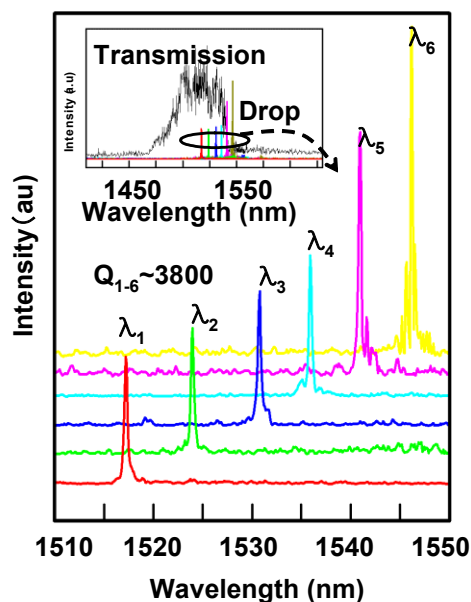


図33 試作した面内ヘテロフォトニック結晶のドロップスペクトルの測定結果。

垂直方向の閉じ込めの強さを表す)。点欠陥に結合しなかった光はヘテロ界面に到達(強度 S_{-2})し反射される(反射光強度 S_{+2})。この光は再度点欠陥に結合し自由空間に取り出されるが、点欠陥に結合し

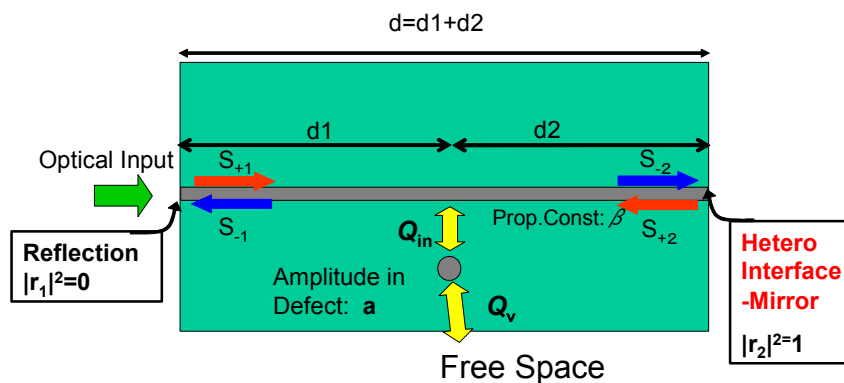


図34 フォトニック結晶導波路と点欠陥共振器、ヘテロ界面反射鏡をもつ構造の模式図。

なかった光が入射端に戻ってくる。また入射した光の一部は点欠陥で反射されるため、入射端に戻ってくる光強度 S_{-1} はこれら2つの和となる。ヘテロ界面で反射されて入射端に戻ってきた光と、点欠陥で反射されて入射端に戻ってきた光は位相差 θ をもつ。モード結合理論を用いて光取り出し効率 η を求めた結果、図35に示すような式で表され、特定の条件を満足した場合に $\eta=1$ となることが分かった。図35は取り出し効率 η と θ の関係を計算した結果であり、ヘテロ界面を利用することで、かなり広い範囲の θ において約90%以上の取り出し効率が期待できることが分かる。より詳細な検討として、図36(a)に示すように $\eta=1$ が期待される構造を仮定して3次元FDTD計算を行った結果、図36(b)に示すように100%の取り出し効率が得られることが確認できた。このことより、面内ヘテロ・フォトニック結晶を用いることで、多波長動作が実現可能できるだけでなく、取り出し効率も大幅に向上可能であることが示された。これらの結果は、我々が提案した面内ヘテロ・フォトニック結晶構造がデバイスの高性能化に非常に有効であることを示す結果である。

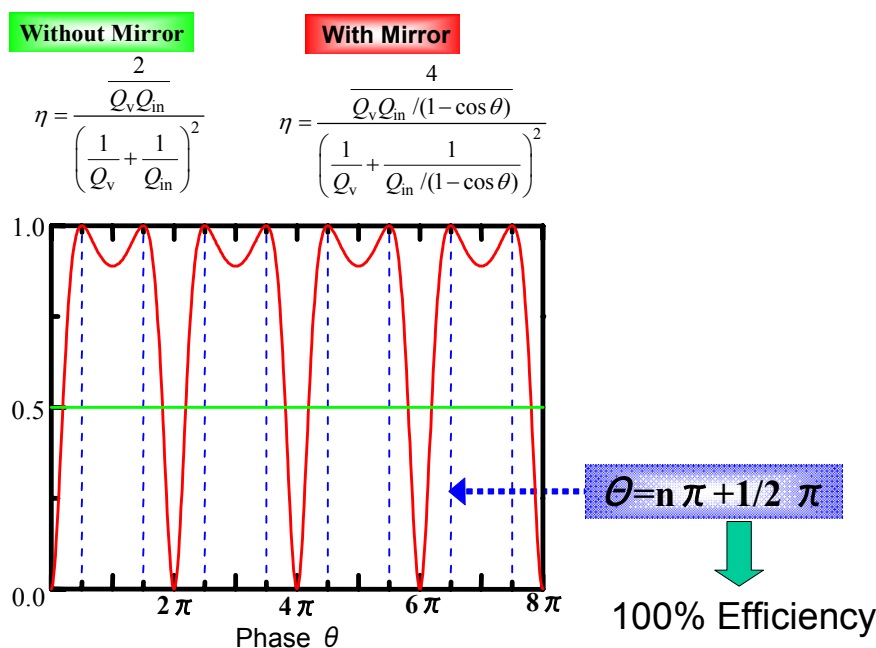


図35 ヘテロ界面反射鏡のある場合と無い場合の光取り出し効率の計算結果。

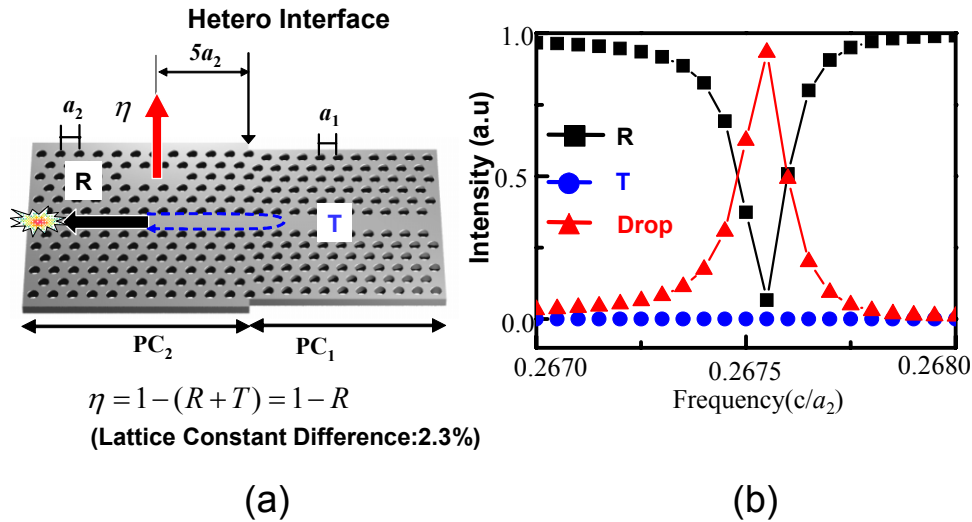


図36 (a)理論計算で想定した構造の模式図。(b)反射率・透過率・光取り出し効率の計算結果。

(3) 面内型デバイスの実現

また昨年度ドナー型欠陥を導入することで約4,000というこれまでよりも1桁高いQ値を実現したことに伴い、新たに面内型のデバイスの実現にも世界で初めて成功した。図37は面内型デバイスの模式図であり、図中のINPUTより入射した光は点欠陥で捕獲される。この際、これまでの数百程度の低いQ値の共振器の場合、Qが十分に高くないことから、上下に漏れてしまうという現象が生じた。我々は、この現象を積極的に利用し、面出力型の波長分合波デバイスを実現してきたが、昨年度実現した、高いQ値をもつ点欠陥を採用することで、点欠陥から光を外部へ漏らすことなく、高効率に面内に別に設けた出力導波路へと導く面内型デバイスの実現が可能となった。図38は実際に試作した試料のSEM写真であり、2本の線欠陥導波路の間にドナー型点欠陥共振器が導入されている。またドナー型共振器では、高いQ値を得るために、先の(1)で述べた、共振器端部の円孔を0.15aほどシフトさせている。この試料に対して波長可変レーザー光を導入した際の近視野像が図39であり、図39(a)に示すように共

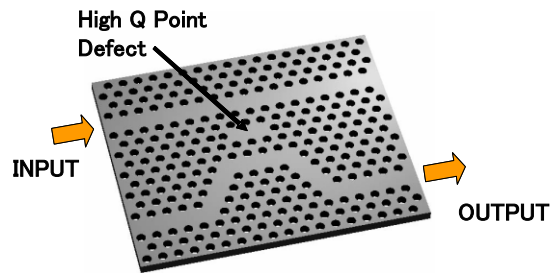


図37 面内光取り出し型波長分合波デバイスの模式図。

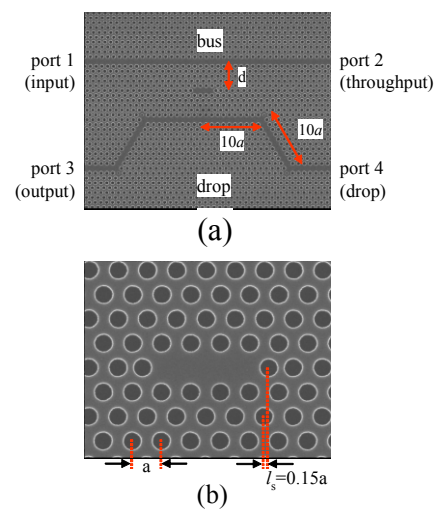


図38 試作した面内光取り出し型波長分合波デバイスの(a)全体のSEM写真、(b)共振器部のSEM写真。

共振器の共振波長に対応する光をINPUTポートから入射した場合は、光がDROP PORTに取り出されている様子が見て取れる。また、この図から分かるように点欠陥共振器部分は光っておらず、共振器の高いQ値によって垂直方向への漏れが大幅に減少していることが分かる。一方、共振波長と異なる波長の光を入射した場合は、図39(b)に示すようにDROP PORTには光は取り出されず、すべてTHROUGH PORTに出力されている。この結果は、2次元フォトニック結晶を用いたデバイスの応用範囲を広げることにつながり、極めて重要な成果と言える。今後は、光取り出し効率についての詳細な検討、さらには、上で述べた面内ヘテロフォトニック結晶と組み合わせることで多波長動作への展開を行っていきたいと考えている。

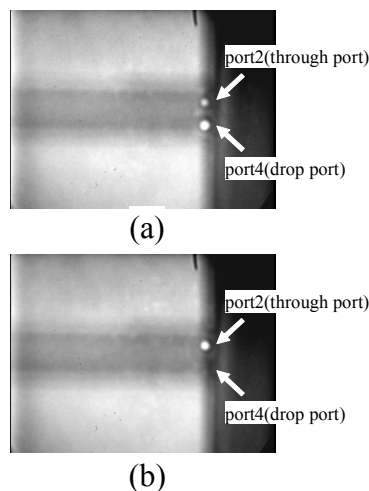


図39 面内光取り出し型波長分合波デバイスに波長可変レーザー光を入射させたときの様子。(a)入射光の波長が点欠陥共振器の共振波長と等しい場合。光が共振器によってDropポートに取り出されている。(b)入射光の波長が点欠陥共振器の共振波長と等しくない場合。全ての光がThroughポートに取り出されていることが分かる。

(4) 導波路伝搬損失に関する詳細な検討

昨年度、導波路構造が上下非対称である場合は、TEモードとTMモードの結合が生じること、また $1.5\mu\text{m}$ 帯にはTEモードに対するフォトニックバンドギャップのみが存在し、TMモードに対するバンドギャップが無いため損失が生じることを明らかにした。このTE-TM結合による損失は、昨年度検討した、円孔の断面が垂直からわずかに傾斜している場合だけでなく、Siスラブの上下で構造が異なる構造、例えばSOIウエハ上に2次元フォトニック結晶を形成したあと、 SiO_2 層をアンダーカットしないSOI構造でも生じると考えられる。このSOI構造は、我々が用いているエアブリッジ構造に比べて物理的な強度に勝るため、2次元フォトニック結晶で多く用いられている。そこで、このSOI構造における伝搬損失について詳細な検討を行った。図40(a)は、SOI構造のバンド図であり、実線が導波路モード、点線は SiO_2 のライトライン、灰色はTM-likeスラブモードが存在する領域を表している。図40(b)は導波モードの伝搬損失と周波数の関係であり、この図を見ると分かるように、導波路モードとTM-likeスラブモードが重なっていない周波数領域(0.26~0.2625)では伝搬損失がほぼゼロであるが、導波

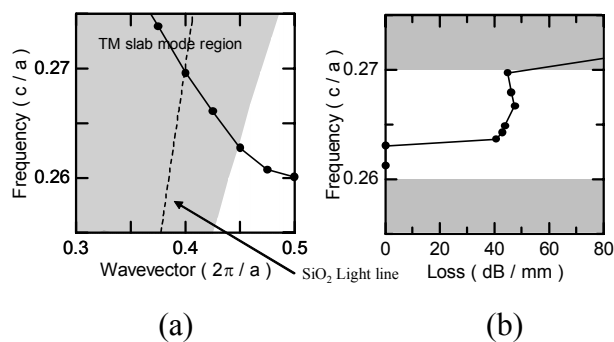


図40 SOI型2次元フォトニック結晶導波路の(a)バンド図と(b)伝搬損失の計算結果。

路モードとTM-likeスラブモードが重なった周波数領域(0.2625~0.27)において40dB/mmと損失が桁違いに大きくなっていることが分かる。このようにTM-likeスラブモードの存在する領域で損失が増大していることから、SOI構造では導波路として使用できる周波数域が大きく制限されることが分かる。一方、我々が用いているエアブリッジ構造では、上下対称であるため、TM-likeスラブモードへの漏れは非常に小さい。具体的には、空気孔の側壁が 1° 傾いた場合で0.5dB/mm、 5° 傾いた場合で5dB/mmと、SOI構造における40dB/mmに比べて1桁小さく、 SiO_2 上のSiスラブ構造の場合、 SiO_2 を除去しないと大幅な伝播損失が存在することを明らかにした。また、併せて、フォトニック結晶と外部との接続に関する詳細な研究を行い、フォトニック結晶導波路と細線導波路との接続のための指針(接続部の結晶終端条件やテーパ構造導入の重要性)を示した。

(5) チャープ構造の提案・検討

線欠陥導波路は超高密度光集積回路をもたらすと期待されている。しかし単なる光配線であれば、Si細線などの高屈折率差光素子でも超高密度を実現できるため、線欠陥導波路にはより高度な機能が求められる。その候補が、フォトニックバンド端における超低群速度である。これはブリュアンゾーン端のフォトニックバンドの折り返しによって生じる現象であり、既に真空中の光速の1/100の群速度が実証されている。したがって、光遅延デバイスや光バッファメモリの期待が生まれている。ただし一般にその帯域は群速度に比例して狭くなるため、超低群速度が必要ならば超狭帯域となり、広いスペクトルをもつ高速変調された光信号には対応できない。本研究で提案するチャープ構造は、可能な限り滑らかなフォトニックバンドシフトを実現することで、あらゆる波長において低群速度を生み出すことを主なテーマとしている。まず円孔直径チャープ付き線欠陥導波路に単一波長の連続光を入射させると、図41のように光が局在する様子がFDTDシミュレーションされる。この現象を検証するため、SOI基板上に同構造を作製し、様々な波長の連続光を入射して光伝搬を観測した。その結果、図42のように波長に応じた特徴的な光スポットの移動が観測された。これはフォトニックバンド計算より予測されるバンド端の移動とよく一致した。すなわち、チャープ構造に期待されるバンドシ

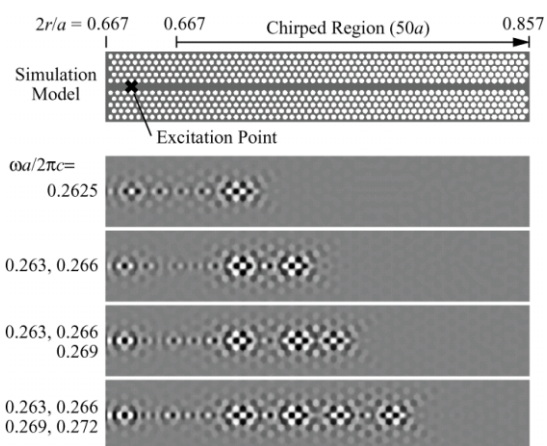


図41 円孔チャープ構造での光局在の計算結果

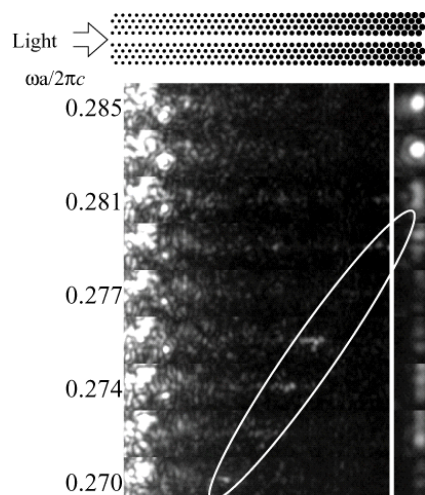


図42 作製した円孔チャープ構造における光局在点の移動の様子。

フトが確かに存在することを確認した。ただしこのような単純なチャープ構造では、光エネルギーを遅延させる、もしくは停滞させることには必ずしもつながらず、光は結果的に反射されてしまう。そこで本研究では、正と負という逆の分散特性をもつ二つの線欠陥導波路の方向性結合器と屈折率チャープを組み合わせることを考えた。この際、二つの導波路のバンド端はいかなる位置でも一致しているように設計する。こうすることで、あらゆる波長の光が対応する位置で局在を起こす。このとき二つの導波路は周波数と波数が一致しているのはじめて方向性結合が起り、もう一方の導波路に移行する。そして透過方向に進行する。この際、二つの導波路が逆分散をもっているため、全ての波長において分散が相殺され、結果的に入射された光パルスが出射端で再生されることになる。FDTDシミュレーションでは、これによって真空中の光速の数100分の1の平均群速度が実現されること、屈折率チャープの傾斜を変えることで群遅延時間を変えられることが明らかになった。このような屈折率チャープの実現には、パッシブ的な方法とアクティブ的な方法が考えられる。前者では、フォトニック結晶スラブの膜厚をテーパ状に変化させる、あるいは屈折率を変化させるドーパントを不均一に注入するといった方法がある。一方、後者では、温度勾配を設ける、あるいは勾配をもった電界を印加する、という方法がある。特に後者によって群遅延時間が高速に制御できれば、光信号を蓄積、放出することができる光バッファメモリや光ラッチ素子の実現でき、光ルーターなど高度な光信号処理に大きく貢献するものとする。

B-3. 2次元バンドエンジニアリングデバイス

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。しかし分解能と偏光角度に排他的な関係があり、実際上記の機能は実証されてこなかった。これは通常のスーパープリズムがポインティングベクトルの偏向を利用しているために、フォトニック結晶と外との境界面での屈折を有効活用できないことに一因があった。そこで昨年度の研究では、波数ベクトル k の偏向を利用することを考え、 k ベクトルプリズムと名付けた。そして従来のスーパープリズムよりも高分解能を得られる条件を見いだした。ただし光が入射端と出射端という二つの境界面を通過するため、それぞれにおける反射損失が非常に大きく、透過効率が10%以下と低かった。そこでFDTDシミュレーションを用いて様々な構造を調べ、反射を抑制するための最適構造を探索した。その結果、以前、自らが提案した三角突起構造を利用すれば大幅な反射抑制が実現できることを見いだした。当初は光の進行方向に突起の先端を向けるのが最適ではないかと予想されたが、実は先端をある程度の角度で傾けることが低反射のキーポイントになることがわかった。最適化された突起構造を有するフォトニック結晶に光を入射させたと

きの光伝搬の計算結果を図43に示す。スーパープリズムに特有の負の方向への光回折が見られ、出射された光が明快に確認できる。透過効率は94%程度と見積もられた。 k ベクトルプリズムでは斜めの出射端を設けて光を出射させる。これには幾何学上、突起を設けることが難しい。そこでここでは半円を設けることを考え、最適化を行った。そして図44に示すようなスーパープリズムの動作を理論的に確認した。ここでは透過効率が約75%であり、通常の回折格子と比較しても同等以上の高効率である。また分散面解析に一致する偏向角の変化が確認された。これらの

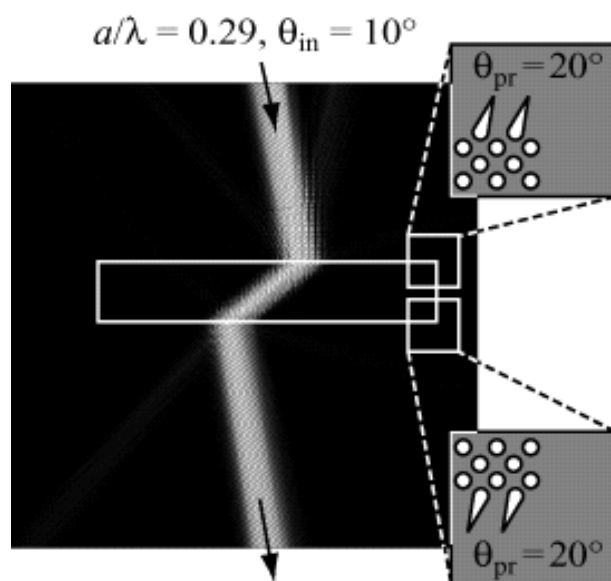


図43 突起構造を有するフォトニック結晶の光伝搬の計算結果。

理論的な結果を確認するため、次に実際の製作と測定を行った。ここでは既にプロセスを確立しているSOI基板上フォトニック結晶スラブを採用したが、計算で最適とされた幅10 μ mのガウシアンビームを実現するため、Si細線導波路、ならびに新規提案した楕円型スポットサイズ拡大器をフォトニック結晶スラブに集積化した。ライトコーンの放射モード条件を避けるため、このスラブはエアブリッジ化する必要がある。その場合、Si細線導波路もエアブリッジ化する必要が出てくる。これに対処するため、楕円型交差支持部を最適設計し、損失0.1dB/支持という低損失のエアブリッジ導波路を実現した。その結果、出射波長が分離されるフィルタ機能が波長1.3~1.6 μ m帯で初めて確認された。今後は波長感度と分解能の向上を図るための最適化を進め、回折型フィルタとしての完成度を高めたい。

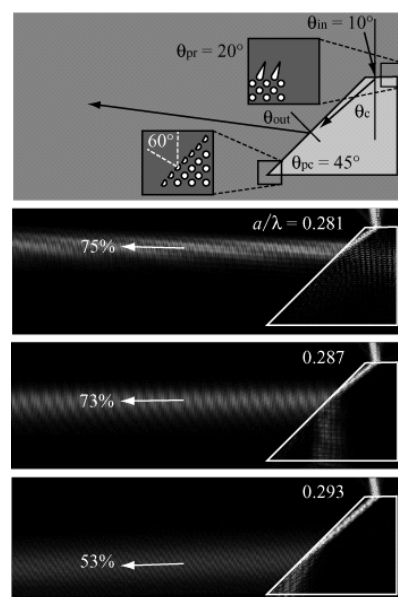


図44 k ベクトルスーパープリズム中の光伝搬の計算結果

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（京都大学大学院工学研究科・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次元フォトリ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次元結晶導波路の特性評価に関して、特に理論面で貢献した。

2次元フォトリ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 (6)**で述べたチャープ構造の提案・検討および、**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：

- B. S. Song, S. Noda, and T. Asano: “Photonic Devices Based on In-Plane Hetero Photonic Crystals”, Science, Vol.300, No.5625, pp.1537 (2003).
- Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, and S. Noda: “High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal”, Nature, Vol.425, No.6961, pp.944-947 (2003).
- D. Ohnishi, K. Sakai, M. Imada, S. Noda: “Continuous Wave Operation of Surface Emitting Two-Dimensional Photonic Crystal Laser”, Electronics Letters, Vol.39, No.7, pp.612-614 (2003).
- S. Ogawa, M. Imada, and S. Noda: “Analysis of Thermal Stress on Wafer Bonding of Dissimilar Materials for the Introduction of InP-Based Light-Emitter into GaAs-Based Three Dimensional Photonic Crystals”, Applied Physics Letters, Vol.82, No.20, pp.3406-3408 (2003).
- T. Asano, M. Mochizuki, S. Noda, M. Okano, and M. Imada: “A Channel Drop-Filter Using a Single Defect in a 2D Photonic Crystal Slab - Defect Engineering with respect to Polarization Mode and Ratio of Emissions from

Upper and Lower Sides -” , IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol.21, No.5, pp.1370-1376 (2003).

- T. Asano, B.-S. Song, Y. Tanaka, and S. Noda: “Investigation of a channel-add/drop-filtering device using acceptor type point defects in a two-dimensional photonic crystal slab” , Applied Physics Letters, Vol.83, No.3, pp.407-409 (2003).
- Y. Akahane, T. Asano, B.-S. Song, and S. Noda: “Investigation of high-Q channel drop filters using donor-type defects in two-dimensional photonic crystal slabs” , Applied Physics Letters, Vol.83, No.8, pp.1512-1514 (2003).
- M. Yokoyama and S. Noda: “Polarization Mode Control of Two-Dimensional Photonic Crystal Laser having a Square Lattice Structure” , IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.39, No.9, pp.1074-1080 (2003).
- M. Fujita, T. Ueno, T. Asano, S. Noda, H. Ohhata, T. Tsuji, H. Nakada, and N. Shimoji: “Organic light-emitting diode with ITO/organic photonic crystal” , Electronics Letters, Vol.39, No.24, pp.1750-1752 (2003).
- M. Okano, S. Kako and S. Noda: “Coupling between a point-defect cavity and a line-defect waveguide in three-dimensional photonic crystal” , Physical Review B, Vol.68, No.23, pp.235110-1-235110-10 (2003).
- M. Okano, S. Kako and S. Noda: “Coupling between a point-defect cavity and a line-defect waveguide in three-dimensional photonic crystal” , Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology, Vol.8, No.26 (2003).
- Sugitatsu and S. Noda: “Room temperature operation of a two dimensional photonic crystal slab defect-waveguide-laser with optical pump” , Electronics Letters, Vol.39, pp.123-125 (2003).
- D. Ohnishi, K. Sakai, M. Imada, and S. Noda: “Continuous Wave Operation of Surface Emitting Two Dimensional Photonic Crystal Laser” , Electronics Letters, Vol.39, pp.612-613 (2003).
- E. Miyai and S. Noda: “Structural Dependence of Coupling Between a Two-Dimensional Photonic Crystal Waveguide and a Wire Waveguide” , Journal of Optical Society of America B, Vol.21, No.1, pp.67-72 (2004).
- S. Noda and T. Baba: “Special Issue on Photonic Crystals and Their Device Applications” , IEICE Transactions on Electronics, Vol.E87C, No.3, pp.257-257 (2004).
- M. Yokoyama, S. Noda: “Finite-Difference Time-Domain Simulation of Two-Dimensional Photonic Crystal Surface-Emitting Laser having a Square-Lattice Slab Structure” , The IEICE Transactions, Special Issue on

Photonic Crystals and Their Device Applications, Vol.E87C, No.3, pp.386-392 (2004).

- H. Takano, Y. Akahane, T. Asano, and S. Noda: “In-plane-type channel drop filter in a two-dimensional photonic crystal slab”, Applied Physics Letters, Vol.84, No.13, pp.2226-2228 (2004).
- T. Baba and T. Iwai: “Enhancement of third order nonlinearity calculated for 2-D photonic crystals”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.42, pp.1603-1608 (2003).
- K. Inoshita and T. Baba: “Lasing at bend, branch and intersection of photonic crystal waveguides”, Electronics Letters, Vol.39, pp.844-846 (2003).
- T. Baba, M. Shiga and K. Inoshita: “Carrier plasma shift in GaInAsP photonic crystal point defect cavity”, Electronics Letters, Vol.39, No.21, pp.1516-1518 (2003).
- K. Inoshita and T. Baba: “Room temperature lasing characteristics of bend and branch in photonic crystal waveguides”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.42, No.11, pp.6887-6891 (2003).
- T. Baba and D. Sano: “Low threshold lasing and Purcell effect in microdisk lasers at room temperature”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.9 No.5, pp.1340-1346 (2003).
- K. Inoshita and T. Baba: “Fabrication of GaInAsP/InP photonic crystal lasers by ICP etching and control of resonant mode in point and line composite defects”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.9, No.5, pp.1347-1354 (2003).
- K. Nozaki, A. Nakagawa, D. Sano and T. Baba: “Ultralow threshold and singlemode lasing in microgear lasers and its fusion with quasiperiodic photonic crystals”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.9, No.5, pp.1355-1360 (2003).
- H. Ichikawa and T. Baba: “Efficiency enhancement in surface grating type two-dimensional photonic crystal light emitting diode”, Applied Physics Letters, Vol.84, No.2, pp.457-459 (2004).
- T. Fukazawa, T. Hirano, F. Ohno and T. Baba: “Low loss intersection of Si photonic wire waveguides”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.43 No.2, pp.646-647 (2004).
- A. Sakai, T. Fukazawa and T. Baba: “Estimation of polarization crosstalk at a micro-bend in Si photonic wire waveguide”, Journal of Lightwave Technology, Vol.22 No.2, pp.520-525 (2004).

- T. Matsumoto and T. Baba, “Photonic crystal k-vector superprism”, Journal of Lightwave Technology, Vol. 22, No. 3, pp. 917-922 (2004).
- T. Matsumoto and T. Baba: “Design and FDTD simulation of photonic crystal k-vector superprism”, IEICE Transactions on Electronics, Vol. E87-C, No. 3, pp. 393-397 (2004).

和文論文・解説

- 野田進: “フォトニック結晶デバイスの最近の進展”, オプトロニクス: 特集「光とナノテクノロジー」, Vol. 22, No. 260, 2003年8月.
- 浅野卓、野田進: “フォトニック結晶”, 工業材料, Vol. 51, No. 8, pp. 51-55, 2003年8月.
- 野田進: “巻頭言「周期構造の美しさ」”, 光学, Vol. 32, No. 8, 2003年8月.
- 浅野卓, 野田進: “フォトニック結晶”, 工業材料: 特集「高速・大容量化に対応する光学材料」, Vol. 51, No. 8, pp. 51-55, 2003年8月.
- 野田進: “フォトニック結晶デバイスの最近の進展”, オプトロニクス: 特集「光とナノテクノロジー」, Vol. 22, No. 260, pp. 100-105, 2003年8月.
- 野田進: “新しいナノ構造: フォトニック結晶”, 「大学と科学」光でナノテク・ナノサイエンス(クバプロ出版), 2003年10月.
- 野田進: “新しい光ナノ構造—フォトニック結晶—”, 電子情報通信学会誌: 特別小特集「ブレイクスルー—そして独創的な技術は生まれた」, Vol. 87, No. 1, pp. 26-32, 2004年1月.
- 野田進: “研究最先端: フォトニック結晶”, New Glass (社団法人ニューガラスフォーラム), Vol. 19, No. 1, pp. 51-59, 2004年3月.
- 馬場俊彦: “フォトニック結晶”, 応用物理学会応用電子物性分科会誌 Vol. 9, No. 3, pp. 156-157, 2003年7月.
- 馬場俊彦: “フォトニック結晶 --- その原理と応用”, 日本学術振興会学術月報 Vol. 56, No. 9, pp. 915-919 2003年9月.

(2) 特許出願

H15年度特許出願件数: 11件(2件: JST出願人、9件: JST非出願人)

(CREST研究期間累積件数: 27件(9件の非JST出願人を含む))