

フォトニック結晶線欠陥導波路の 低群速度効果を用いたレーザと光増幅器

Lasers and Optical Amplifiers Using Low Group Velocities in Photonic Crystal Line Defect Waveguides

清田和明* 喜瀬智文* 丸山一臣* 山中信光* 中崎竜介*
Kazuaki Kiyota Tomofumi Kise Kazuomi Maruyama Nobumitsu Yamanaka Ryusuke Nakasaki
横内則之* 馬場俊彦*² 水田栄一*² 渡邊秀輝*²
Noriyuki Yokouchi Toshihiko Baba Eiichi Mizuta Hideki Watanabe

概要 フォトニック結晶とは屈折率が周期的に配置された構造体のことで、その中に周期を乱す欠陥を意図的に導入することにより導波路などの機能を付与することができる。フォトニック結晶の線欠陥導波路の特徴的な特性の1つとして、導波路中で光が進む速度が遅くなる低群速度効果が注目されている。低群速度効果を利用すると、ある距離を光が進むために要する時間が長くなるため、その間に受ける利得を増大させることができるとされている。本報告では低群速度効果による利得増大を利用したレーザ及び光増幅器を紹介する。

1. はじめに

近年、フォトニック結晶という新しい光材料が注目を集めている^{1)~3)}。フォトニック結晶とは屈折率が周期的に配置された構造体のことである。このような構造中では、ある周波数の光の存在が禁止されるフォトニックバンドギャップを形成することができる。その上で意図的に局所的な周期性の欠陥を導入すると、欠陥の近傍のみに光が存在できるようになる。欠陥が線状であれば光がそれに沿って伝搬する光導波路となり、欠陥が点状であれば光がそこに閉じ込められる微小光共振器になる。

フォトニック結晶が最初に提案された時には、フォトニックバンドギャップを用いて発光現象を制御するという概念が示され脚光を浴びた⁴⁾。しかしその後の研究によって、必ずしもそのような発光現象の制御にとどまらずに、フォトニック結晶が特有の興味深い性質を示すことが分かってきた。フォトニック結晶中では多数の光が非常に強く結合するために、従来の物質や光導波路とは大きく異なる分散関係が現れる。またそれはフォトニック結晶中の線欠陥導波路においても同様である。このような分散関係を積極的に利用することで、様々な機能を有する光デバイスが実現できると期待されている⁵⁾。

フォトニック結晶導波路中の特異な分散関係の1つとして、光の波束の伝搬速度である群速度が非常に遅く、理想的には0になるということが挙げられる^{6), 7)}。このような低群速度を動的に制御することができれば、光遅延素子などに応用できると期待されている。一方、群速度が遅いということはエネルギー

の伝搬速度が遅いことに等しい。このため、ある距離を伝搬するために要する時間が長くなり、その間に受ける物質との相互作用が増大すると言われている⁸⁾。

フォトニック結晶導波路中の光の利得は、次の式(1)で与えられる。

$$G(N) = G_0(N - N_0) \cdot n_{\text{gpc}}/n_{\text{g0}} \quad (1)$$

ここで、 G_0 は線形利得係数であり、 N はキャリア密度、 N_0 は透明キャリア密度である。 n_{g0} と n_{gpc} はそれぞれバルク媒質中の群屈折率及びフォトニック結晶導波路中の群屈折率である。ただし群屈折率 n_{g} は真空中の光速を c_0 として、群速度 v_{g} と式(2)の関係がある。

$$n_{\text{g}} = c_0/v_{\text{g}} \quad (2)$$

式(1)は、利得が群速度の逆数に比例して大きくなることを意味している。

このような特性を利用すると、超小型で特徴的な機能を有するレーザや光増幅器が実現できる可能性がある。本報告ではこのような観点から、フォトニック結晶線欠陥導波路中の低群速度による利得増大を利用したデバイスについて述べる。

2. フォトニック結晶線欠陥導波路を用いたレーザ

フォトニック結晶の線欠陥導波路における低群速度を利用したデバイスとして、まず利得増大を利用したファブリペローレーザの作製を行った⁹⁾。

2.1 設計

フォトニック結晶の形態としては図1に示すような空気クラッドを有する2次元フォトニック結晶スラブを用いた。この

* 研究開発本部 横浜研究所

*² 横浜国立大学 工学研究院

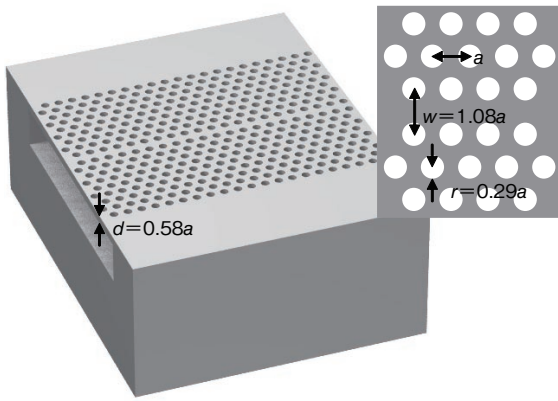


図1 2次元フォトニック結晶スラブの模式図
Schematic image of two-dimensional photonic crystal slab.

2次元フォトニック結晶スラブは2次元的な空孔配列によってフォトニック結晶が形成された半導体のスラブ(薄板)を空気クラッドで挟み込んだ構造であり、光は面内では2次元フォトニックバンドギャップによって制御され、垂直方向には半導体と空気の非常に大きい屈折率差による全反射閉じ込めによって制御される。フォトニック結晶の格子は三角格子であり、構造パラメータはフォトニック結晶の格子定数を a として、空気円孔の半径が $0.29a$ 、スラブの厚さが $0.58a$ であり、線欠陥の両側に位置する空気円孔の中心間で定義される導波路幅が $1.08a$ である。

図2にこの導波路構造のTE-like偏波に関する分散関係の計算結果を示す。分散関係の計算にはマクスウェル方程式を時間領域で直接計算する3次元FDTD (finite difference time domain) 法を用いた。分散関係はモードの波数と角周波数の関係であるが、図2では両者ともフォトニック結晶の格子定数で規格化された値で示されている。さらに線欠陥導波路はその長さ方向に周期的な構造を有しているため、その分散関係は回折格子を有する導波路と同様にブリルアンダイアグラムで表され、図2に示されている規格化波数0から0.5までが冗長性の無い領域となる。図2で灰色に塗りつぶされた領域は、線欠陥の無い2次元フォトニック結晶スラブ中を伝搬する光(スラブモードと呼ばれる)の分散関係を導波路方向に投影したもので

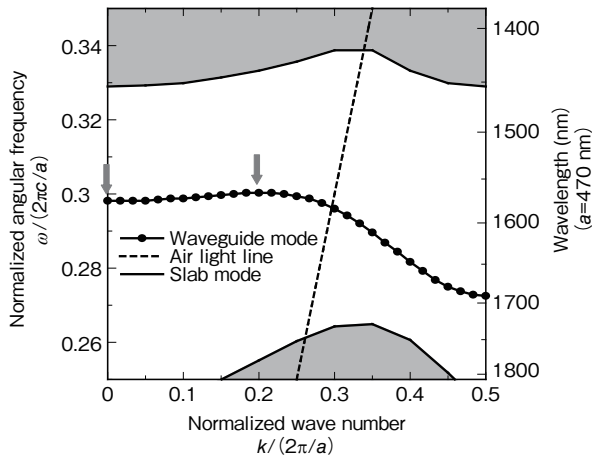


図2 2次元フォトニック結晶スラブ線欠陥導波路の分散関係
Calculated dispersion relation of the line defect waveguide in the two-dimensional photonic crystal slab.

ある。逆に塗りつぶされていない部分に関しては線欠陥が無い場合にはモードが存在しないことを示しており、どの波数についてもモードが存在しない角周波数領域がフォトニックバンドギャップに対応する。図2から、線欠陥の存在によってフォトニックバンドギャップ中に一連の導波モードが形成されていることが分かる。なお、図2の破線で示されている直線はライトラインとよばれ、クラッド(ここでは空気)を伝搬する光の分散関係を示すものである。図2でライトラインよりも右側、つまり波数の大きいモードはクラッドの全反射条件を完全に満たしており、放射損失は起こらない。一方でライトラインよりも左側のモードは、全反射条件を不完全にしか満たさず、伝搬しながら回折損を受けて面外に放射する。このようなモードはリーキー波と呼ばれる。リーキー波は不完全ではあるが全反射によってエネルギーがスラブ内に閉じ込められており、全反射条件を全く満たさない反導波の放射モードとは定性的に区別される。

さて、群速度 v_g は角周波数 ω と波数 k を用いて式(3)で表されるから、図2において分散関係の傾きが群速度を示すことになる。

$$v_g = d\omega/dk \tag{3}$$

これに注意すると、図2の分散関係には3つの群速度が零となる点があることが分かる。1つは規格化波数0、もう1つは規格化波数0.2の付近、さらに規格化波数0.5である。今回の実験では、規格化波数0の付近及び0.2の付近における低群速度を波長1550 nm帯で利用することを念頭に、フォトニック結晶の格子定数を470 nmとした。この格子定数を用いて規格化角周波数を波長に直したものが図2の右軸に示されている値である。

2.2 作製及び評価

設計に基づいて、2次元フォトニック結晶スラブの作製を行った。スラブの材料としては多重量子井戸活性層を含むGaInAsPを採用し、InP基板上にMOCVD (metal organic chemical vapor deposition) を用いて結晶成長を行った。活性層の利得ピーク波長は1530 nmである。この基板上にエッチングマスクとしてSiN_xを成膜し、電子線リソグラフィを用いて形成したフォトニック結晶の円孔のパターンを転写した後にICP-RIE (inductively coupled plasma-reactive ion etching) を用いて半導体のエッチングを行った。導波路の端面はフォトニック結晶の円孔と同時にエッチングによって形成した。その後、塩酸による選択ウェットエッチングによってスラブ下のInP基板を部分的に除去することで、空気クラッドを実現した。作製した素子のSEM (scanning electron microscopy) 写真を図3に示す。フォトニック結晶中に線欠陥導波路が良好に形成されていることが分かる。

作製した素子を、光励起法を用いて測定した。励起光源としては波長980 nmの半導体レーザを用い、パルス駆動で励起を行った。励起光のスポットサイズはおおよそ20 μmである。スラブに垂直な方向から励起を行い、同じ方向から観測を行った結果、大別して図4に示す2種類の発光の様子が観察された。一方の(a)はフォトニック結晶導波路全体からの発光であり、他方の(b)はフォトニック結晶導波路の端面のみからの発光で

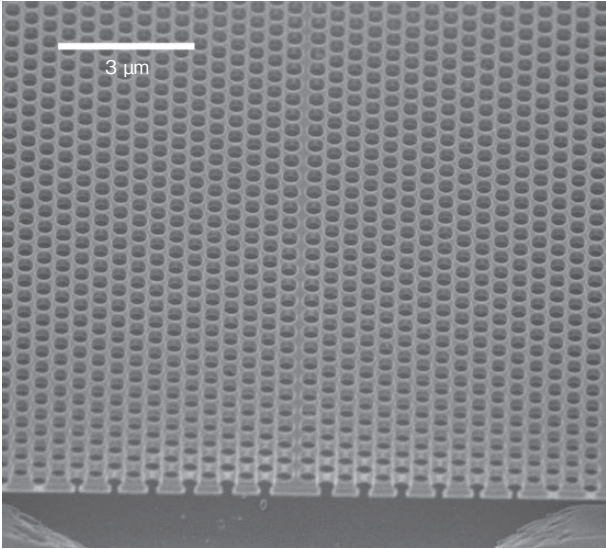


図3 作製した2次元フォトニック結晶スラブのSEM写真
SEM image of a fabricated waveguide in the two-dimensional photonic crystal slab.

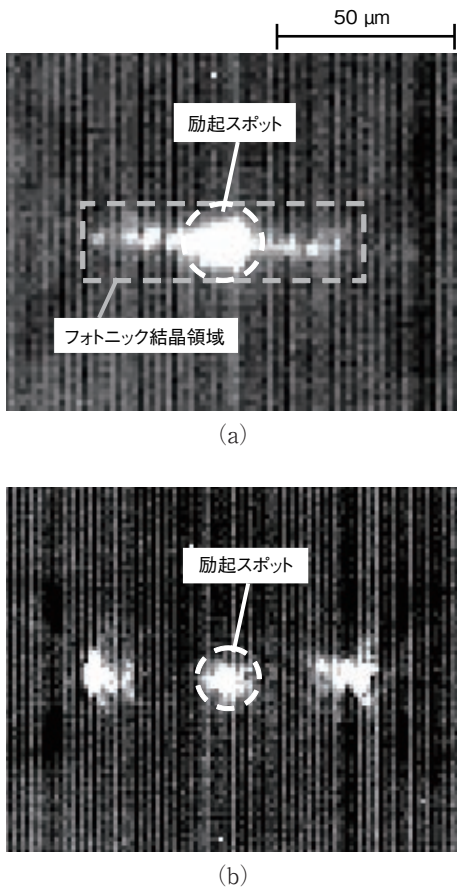


図4 作製した素子からの2種類の発光
Two kinds of light emission from fabricated devices.

ある。

図5は各々の発光に関する代表的なスペクトルである。図5(a)は導波路長70 μm、図5(b)は導波路長50 μmの素子に対する結果である。図5(a)及び(b)中の挿入図は光励起-光出力特性を示しており、両者とも明確なしきい値特性を示していることから、レーザ発振が起きていることが示唆される。両者の発光波長を比較すると、(a)は(b)よりも長波長である。

このことから、(a)が図2における規格化波数0付近、(b)が規格化波数0.2付近に対応するものと考えられる。両者は共にライトラインよりも左に位置し、リーキー波となっている。このため両者とも面外への放射が起こるが、特に波数が0付近の場合にはスラブに垂直な方向へ放射が起こるため、(a)では明確に導波路全体からの発光が観察されたと考えられる。二次元フォトニック結晶スラブ中の線欠陥導波路を用いた光励起レーザは既に報告されている¹⁰⁾が、このようにリーキー波となっているモードでレーザ発振が観測された例は従来報告が無い。このような不完全な全反射によるモードでレーザ発振が起り得るという知見は貴重なものであると言える。

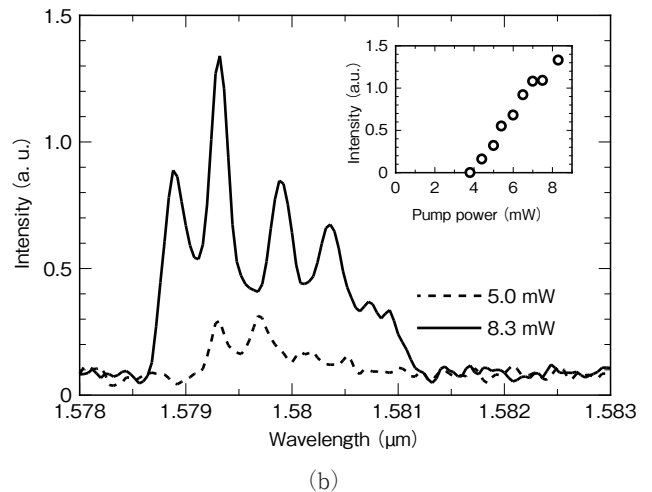
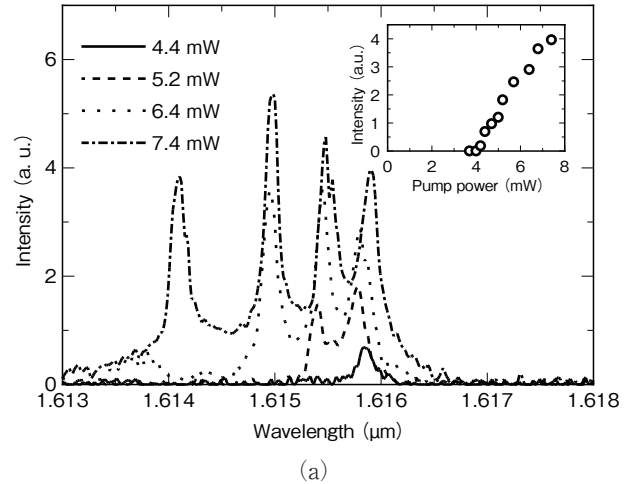


図5 2種類の発光のスペクトル
Spectra of two kinds of light emission.

図5から、それぞれのレーザ発振は多モードであることが分かる。これらの発振を端面での反射によるファブリペロー共振であると考え、各共振ピーク間の波長間隔から群屈折率 n_g を次の式を用いて求めることができる。

$$n_g \approx \frac{\Delta k}{\Delta \omega} c = \frac{2\pi/2l}{\omega_2 - \omega_1} c = \frac{1}{2l(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)} \quad (4)$$

この式(4)からも分かるように、波長間隔が狭いほど群屈折率は大きく、群速度は小さい。図5(a)では長波長側ほど波長間隔が狭いため群屈折率が大きく、その値は最大で40を超えている。長波長側ほど群屈折率が大きいことは図2の規格化波

数0付近で長波長側に零群速度点があることに対応している。更に利得ピーク波長が1530 nmと短波側で有るにも関わらず長波側ほどしきい値が低いのは、得られる利得が群屈折率と共に大きくなるために群屈折率が大きい長波ほど発振が起こりやすくなっているためであると考えられる。一方図5(b)では(a)ほど明確な群屈折率の波長依存性は見られないが、これは図2の規格化波数0.2付近で導波モードが多モードになっている、つまり同一角周波数の複数のモードが存在することに起因すると考えられる。この場合には一般の横多モード導波路と同様に、ファブリペロー共振の波長間隔から群屈折率を正しく見積もることはできない。しかしながら図5(b)においても、図2の規格化波数0.2付近の分散関係から高い群屈折率が予想される短波長側において支配的な発振が起こっていることが見て取れる。これらの発振は作製した最小の素子である導波路長20 μm においても観測された。低群速度による利得の増大がこのような非常に短い導波路長でのレーザ発振を可能にしたと考えられる。

3. フォトニック結晶線欠陥導波路を用いた光増幅器

空気クラッドを有する2次元フォトニック結晶スラブは、その大きい屈折率差により非常に強いスラブ内への光閉じ込め効果を有している。このため、受動動作の光子子に用いる構造としては非常に性能が高く、盛んに研究が行われている。しかし電気制御による能動素子を念頭に置いた場合には、電流注入が非常に困難で、熱抵抗が非常に高いという難点があり、必ずしも有利ではない。この観点からは、従来の半導体レーザなどに用いられている構造に近い半導体クラッド型の構造が有望である。

そのような半導体クラッド型2次元フォトニック結晶スラブ構造を有するデバイスとして、半導体光増幅器に着目し、研究を行っている¹⁴⁾。その概要を図6に示す。

光増幅器部はGaInAsP活性層をInPクラッドで挟み込んだ3層スラブ構造にクラッドから活性層を貫くように円孔を配置してフォトニック結晶としており、ここでは低群速度による利得の増大が期待できる。このような光増幅器に高効率に入出力を行うために、スポットサイズ変換部を有する受動ハイメサリッ

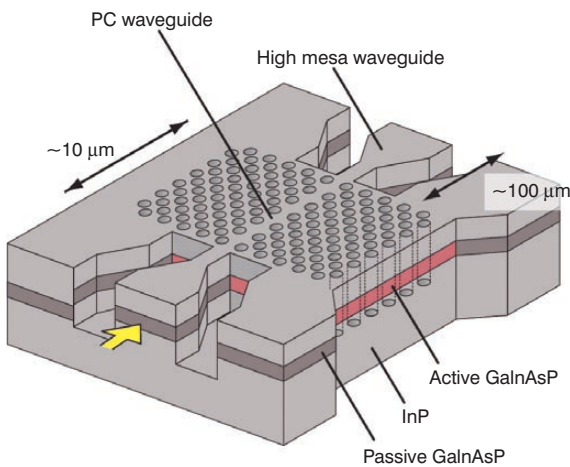


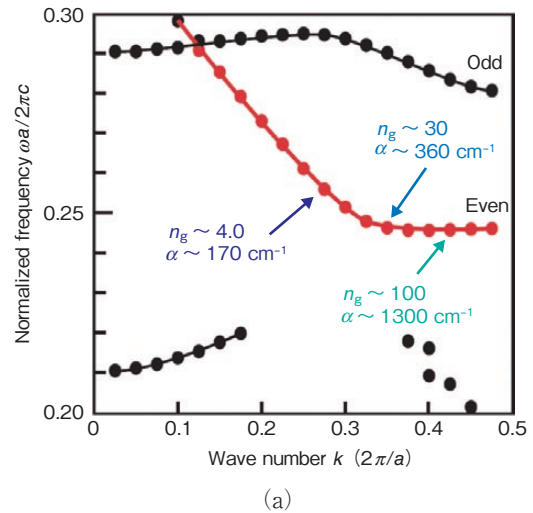
図6 半導体クラッドを有するフォトニック結晶半導体光増幅器の模式図
Schematic image of photonic crystal semiconductor optical amplifier with semiconductor clad.

ジ導波路を入出力導波路として集積している。

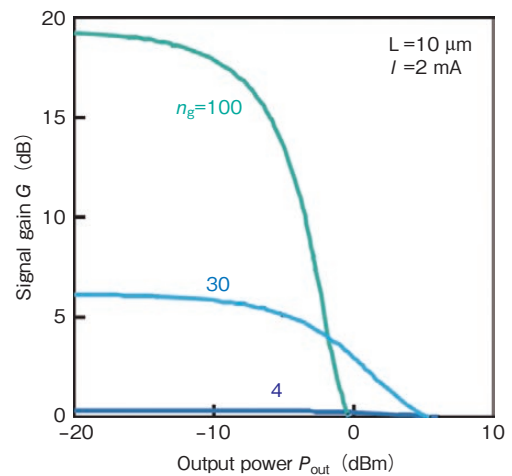
3.1 理論特性

半導体クラッド型2次元フォトニック結晶スラブ線欠陥導波路の分散関係を図7(a)に示す。フォトニック結晶は三角格子である。線欠陥導波路の導入により、フォトニックバンドギャップ中に偶モードと奇モードが一つずつ形成される。このうち導波路中央に強い電磁界を有する偶モードが外部との結合の面で有利であり、ここでは偶モードを利用することを検討する。半導体クラッドの場合にはクラッドの屈折率が大きいために、クラッドのライトラインの傾きが大きくなり、図中に書かれた全ての領域でモードはリーキーとなる。それに伴う放射損失が図7(a)中では α として示されている。規格化波数0.5に近づくと群屈折率 n_g は非常に大きくなり、100程度の値が期待できる。

この導波モードのいくつかの点を動作点に想定して、半導体光増幅器の利得特性を計算した。利得特性の計算には、進行波レート方程式を用いた¹²⁾。素子長及び注入電流値はそれぞれ10 μm 及び2 mAとした。図7(b)にその結果を示す。この図から、群速度が遅い場合には特に低光出力領域において大きい



(a)



(b)

図7 フォトニック結晶半導体光増幅器の(a)分散関係と(b)利得特性
(a) Dispersion relation and (b) gain characteristics of photonic crystal semiconductor optical amplifier.

利得が得られることが分かる。一方で高出力時には飽和のために利得が低下している。このことから、フォトニック結晶光増幅器は超小型で小さな入力に対してわずかな電流で大きい利得を得るという用途に向いていると言える。例えば光集積回路中の局所的な増幅などに利用できると思われる。

3.2 作製及び評価

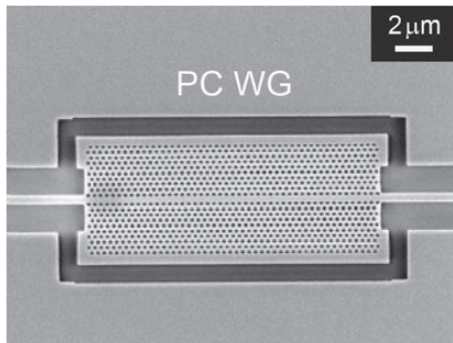
以上の知見を基に、半導体クラッドを有するフォトニック結晶半導体光増幅器を作製した。最終的には電流注入を視野に入れているが、ここでは初期的な検討として光励起によって動作を検証した。

まず、InP基板上に増幅器部となる発光ピーク波長1580 nmのGaInAsP層を有する導波路層をMOCVDにより結晶成長させた。その後受動導波路部となる領域の導波路層をエッチングにより除去したうえで、突合せ接合成長により発光ピーク波長1300 nmのGaInAsP層を有する導波路層を結晶成長させた。GaInAsP層の厚さは両者とも500 nmである。以上によって、波長1580 nm付近の光に対してそれぞれが能動領域及び受動領域として働くことになる。この基板上に電子線描画を行ってフォトニック結晶の円孔及びハイメサリッジ導波路のパターンを形成し、レジストをマスクとしてICP-RIEによってエッチングを行った。作製したフォトニック結晶光増幅器のSEM写真を図8に示す。半導体クラッド型の場合にはクラッドとコアの両方を貫くように円孔のエッチングを行う必要があるため、小さい直径で深いエッチングが要求される。今回の作製においては、図8から深さおよそ2.6 μmと良好にエッチングが行われていることが分かる。

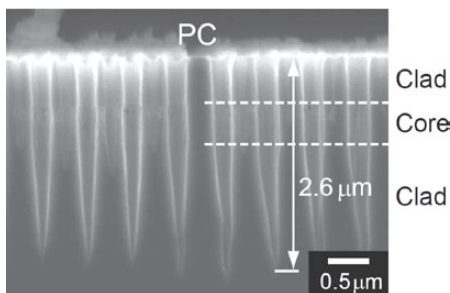
作製したフォトニック結晶光増幅器に光励起を行い、入出力特性の評価を行った。その評価結果を図9に示す。非励起時に

は活性層は1580 nmより長波長側で透明になっている一方、図9(a)の構造では導波モードのカットオフによって出力が低下している。励起を行うとそれより短波長側で出力が増加している。図9(b)において励起光強度37.4 mWの場合には透明波長の強度を1 dB程度上回っており、光が増幅されていることが確認された。

しかしながら、理論的に予測される特性とはまだ隔たりがあり、またフォトニック結晶の挿入損失を上回る利得は得られていない。この原因としては、導波路の損失が理想的なものよりも大きいこと、及びフォトニック結晶導波路と入出力導波路の間の結合が十分によくないことなどが考えられる。このような点を解決し、更に電流注入を行うことで、理論予測に近い特性で動作する電流注入型フォトニック結晶光増幅器が実現できるものと考えられる。



(a)



(b)

図8 作製したフォトニック結晶光増幅器のSEM写真
SEM image of a fabricated photonic crystal semiconductor optical amplifier.

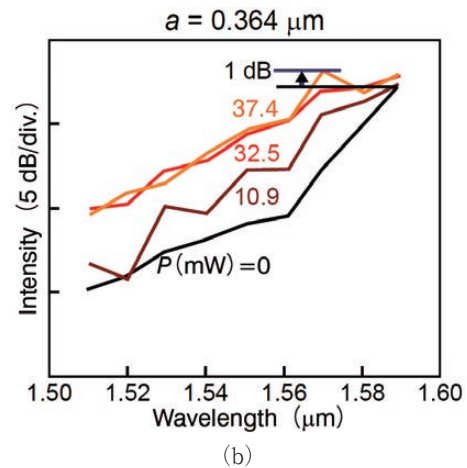
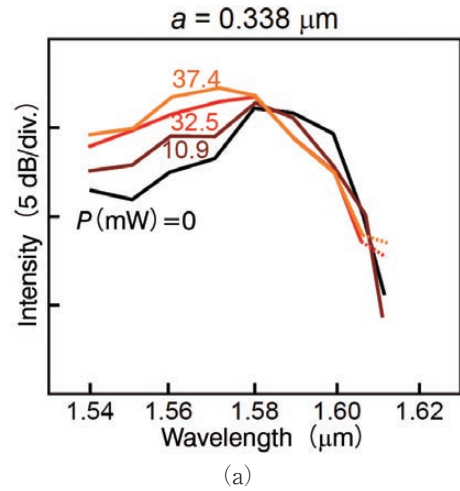


図9 フォトニック結晶光増幅器の増幅特性
Amplification property of photonic crystal semiconductor optical amplifiers.

4. おわりに

フォトニック結晶線欠陥導波路の低群速度による利得増大を利用したレーザ及び光増幅器を作製した。空気クラッド構造を有するレーザは利得増大により20 μmと短い導波路長で発振が確認された。半導体クラッドを有する光増幅器は初期的な検討の結果わずかな増幅が確認された。今後更に検討を進めることで、特徴的な機能を有するデバイスの実現が期待される。

参考文献

- 1) 特集「フォトニック結晶の新展開」, 応用物理, **74** (2005), 139.
- 2) 川上彰二郎監修: フォトニック結晶技術の新展開-産業化への動向, シーエムシー出版, (2005).
- 3) Selected Topics in Applied physics V "Photonic crystals and Related Photonic Nanostructures," Jpn. J. Appl. Phys. Part 1, **45** (2006), No. 8 (to be published).
- 4) E. Yablonovitch: "Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics," Phys. Rev. Lett., **58** (1987), 2059.
- 5) H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita, M. Notomi, T. Tamamura, T. Sato, and S. Kawakami: "Superprism phenomena in photonic crystals," Phys. Rev. B, **58** (1998), 10096.
- 6) M. Notomi, K. Yamada, A. Shinya, J. Takahashi, C. Takahashi, and I. Yokohama: "Extremely Large Group-Velocity Dispersion of Line-Defect Waveguides in Photonic Crystal Slabs," Phys. Rev. Lett., **87** (2001), 253902.
- 7) 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 waveguides," Appl. Phys. Lett., **84** (2004), 4690.
- 8) S. Nojima: "Enhancement of Optical Gain in Two-Dimensional Photonic Crystal with Active Lattice Points," Jpn. J. Appl. Phys. Part 2, **37** (1998), L565.
- 9) K. Kiyota, T. Kise, N. Yokouchi, T. Ide, and T. Baba: "Various low group velocity effects in photonic crystal line defect waveguides and their demonstration by laser oscillation," Appl. Phys. Lett., **88** (2006), 201904.
- 10) A. Sugitatsu and S. Noda: "Room temperature operation of 2D photonic crystal slab defect-waveguide laser with optical pump," Electron. Lett., **39** (2003), 132.
- 11) E. Mizuta, T. Ide, J. Hashimoto, K. Nozaki, T. Baba, T. Kise, K. Kiyota, and N. Yokouchi: "Characterization of Photonic Crystal Waveguide for SOA Operation," the Pacific Rim Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR), Tokyo, Japan, (2005), 1134.
- 12) T. Saitoh and T. Mukai: "1.5 μm GaInAsP Traveling-Wave Semiconductor Laser Amplifier," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., QE-23 (1987), 1010.