

オンチップビーム偏向レーザー

黒坂 剛孝*・野田 進

On-Chip Beam-Steering Photonic-Crystal Lasers

Yoshitaka KUROSAKA and Susumu NODA

The development of semiconductor lasers with on-chip controllability of the beam direction is important for a wide range of applications. Here, we report on a novel concept to realize such beam-steering lasers using photonic crystals. Our idea is based on the generation of artificial lasing band edges in the photonic band structure, which determine the resonant condition and output beam direction. We demonstrate that lasers based on the composite photonic-crystal structures are able to emit beams in a range of directions that can be dynamically controlled by on-chip integration.

Key words: photonic-crystal surface-emitting lasers, beam direction control, on-chip integration, composite photonic-crystal structure, lasing band edge

レーザーディスプレイ、プリンター、スキャナーなど、レーザーのビーム出射方向を制御することではじめて実現できる応用例は数多く存在する。これらは現代社会を支える重要な技術であり、今後ますます発展していくと期待されるが、オンチップサイズのビーム偏向レーザーは長年の夢であった。通常、ビーム出射方向はガルバノミラーやポリゴンといった外付けの機械的手段によって制御されており、高速化、小形化、寿命には限界がある。これまでにも、小型の半導体レーザー自身にビーム偏向機能を付加する試みとして、2本の隣接させたレーザーの相対位相を変化させながら干渉させてビーム出射方向を変化させる「ツイinstライプレーザー」¹⁻³⁾が提案されたが、ビーム広がり角が大きいため実効的なビーム偏向角度が小さいという課題があった。ここで実効的なビーム出射方向変化量を評価するパラメーターとしてビーム偏向角 $\delta\theta$ とビーム広がり角 θ_{div} の比 $\delta\theta/\theta_{\text{div}}$ を定義すると、 $\delta\theta/\theta_{\text{div}}$ は従来2から3程度にとどまっていた。本稿では、二次元フォトリック結晶レーザー⁴⁻⁹⁾を応用した全く新しいアプローチによるオンチップビーム偏向レーザー¹⁰⁾について紹介する。最初に、二次元フォトリック結晶のフォトリックバンド構造およびビーム偏向に必要な条件につい

て説明を加える。次に、作製したデバイス構造と実験結果について説明する。本手法によれば、ビーム出射方向は $\pm 30^\circ$ の範囲で変化するとともに、 $\delta\theta/\theta_{\text{div}}$ は最大30程度となる。

1. ビーム偏向を実現するためのフォトリックバンド構造

二次元フォトリック結晶とは、屈折率が光の波長程度の周期で二次元的に変化する構造であり、電子に対してバンド構造が形成されるのと同様に、光に対してフォトリックバンド構造（以下バンド構造とよぶ）が形成される。バンド構造の中で傾きがゼロの点をバンド端とよび、ここでは光の群速度がゼロとなり複数の方向へ進行する光同士が結合して二次元的な大面積共振モードを形成する⁶⁾。したがって、二次元フォトリック結晶を共振器として用いることで大面積単一モード発振するレーザーが実現でき、適切なバンド端を選ぶことでフォトリック結晶面と垂直方向へのレーザー出力が得られる。二次元フォトリック結晶レーザーからは、大面積コヒーレント発振を反映して約 1° と非常に小さいビーム広がり角が得られる。

図1(a)に示すように孔形状が正三角形で格子定数が

京都大学工学研究科（〒615-8510 京都市西京区京都大学桂） E-mail: snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

*現所属：浜松ホトニクス(株)

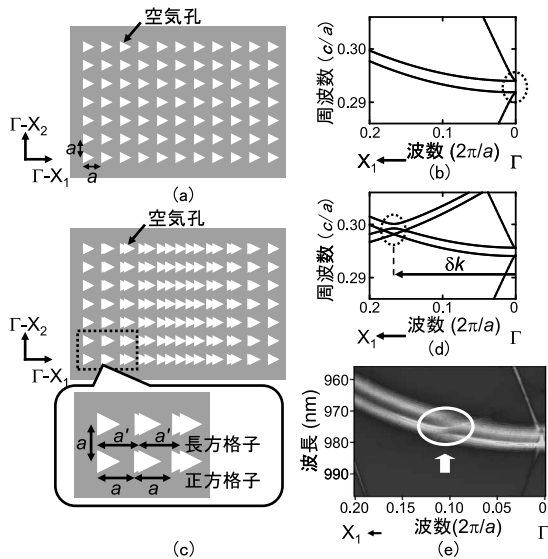


図1 (a) 正方格子フォトニック結晶の模式図, (b) 正方格子フォトニック結晶のバンド構造 (計算), (c) 複合フォトニック結晶の模式図, (d) 複合フォトニック結晶のバンド構造 (計算), (e) 複合フォトニック結晶のバンド構造 (実測).

a である正方格子二次元フォトニック結晶⁸⁾のバンド構造を図1 (b)に示す. 孔形状が回転非対称であるため直交する2つの Γ -X方向は区別する必要がある, 本稿ではこれらを Γ -X₁方向, Γ -X₂方向とよぶ. 点線丸で示した Γ 点上のバンド端からは二次元的な面発光レーザー出力が得られる. バンド構造の横軸は面内方向の波数を表しており, ビーム出射方向に対応する. したがって, ビーム偏向を実現するためにはゼロでない任意の波数にバンド端を形成する必要がある. これを実現可能な構造として, われわれは正方格子に加え, 周期の異なる長方格子を重ねた「複合フォトニック結晶」を提案¹⁰⁾した. 図1 (c)に複合フォトニック結晶の模式図を示す. Γ -X₁方向の格子定数は a および a' , Γ -X₂方向の格子定数は a である. 複合フォトニック結晶のバンド構造の例を図1 (d)に示す. 図中, 点線丸で示した部分に新たにバンド端が形成されている. この新たに形成されたバンド端の波数を δk とすると, $\delta k = \pi(1/a - 1/a')$ の関係がある¹⁰⁾. つまり, 複合フォトニック結晶では, 2つの格子定数 a と a' の差分を変化させることによって任意の δk にバンド端を作ることが可能であり, 任意のビーム出射方向に対応する発振モードをつくり出すことができる. なお, フォトニック結晶レーザーでは, 活性層からの自然放出光スペクトルはフォトニック結晶構造を反映して方向依存性をもつため, サンプルに対して角度を変化させながら分光特性をマッピングすることによりバンド構造が実測される¹¹⁾. 図1 (e)に複合フォトニック結晶について実測したバンド構造の例を示す. 丸の部分に確かに新しくバンド端が形成されていることがわかる.

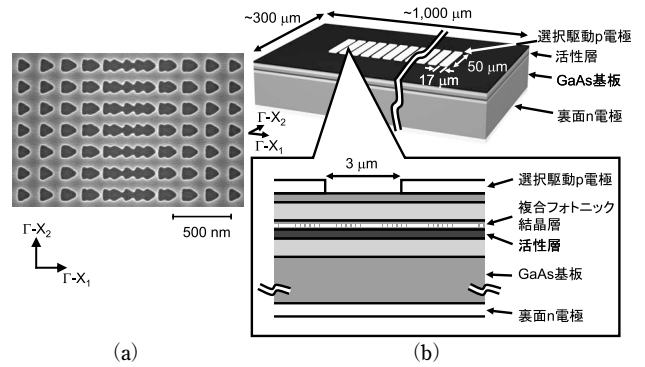


図2 (a) 作製した複合フォトニック結晶の一部 (電子顕微鏡写真), (b) 作製したデバイスの構造.

2. デバイス構造

次に, デバイスの作製を行った. 図2 (a)に, 格子定数 a' が場所により連続的に変化している複合フォトニック結晶のうち, $a = 294$ nm, $a' = 328$ nmの領域の電子顕微鏡写真を示す. 複合フォトニック結晶が良好に作製できている. 活性層の近傍に複合フォトニック結晶を設け, クラッド層, 電極で挟まれた図2 (b)のデバイス構造を作製した. 上面のp電極は $17 \times 50 \mu\text{m}^2$ の電極が互いに $3 \mu\text{m}$ 離れて30枚程度並んだ多電極構造となっており, 裏面には1枚のn電極がある. デバイスの正味の長さは Γ -X₁方向には約 $1000 \mu\text{m}$, Γ -X₂方向には約 $300 \mu\text{m}$ である.

ビーム出射方向を変化させるための戦略は2段階に分けられる. 第1段階では, 隣接する2つのp電極を同時に駆動し, 駆動するp電極のペアを順次変化させる. 複合フォトニック結晶では δk が場所により連続的に変化しているので, 駆動するp電極を変化させることで δk を不連続に変化させることができる. 第2段階では, 隣接する3つの電極間に注入する電流のバランスを変化させることによって δk を連続的に変化させ, ビーム出射方向を連続的に変化させる.

3. 実験結果

2章で示した2段階の戦略に沿ってビーム偏向動作を示す. 第1段階では隣接する2つのp電極を同時に駆動し, 駆動場所を順番に変化させることでデバイス全体にわたって Γ -X₁方向の δk を0から $0.15 [2\pi/a]$ まで変化させる. 結果を図3 (a)に示す. 約 1° ごとにビーム出射方向が変化している. 図3 (b), (c)に代表的な電流-光出力特性と発振スペクトルを示す. レーザー発振に必要な駆動電流は角度により異なるものの, およそ 100 mAである. また, 発振波長はビーム出射角度にかかわらず約 970 nmで一定であり, スペクトル幅は 0.2 nm (測定限界)である. どの角度においても左右へのツインビームが得られているが, これはデバイス構造の対称性に起因しており, 非対称に駆

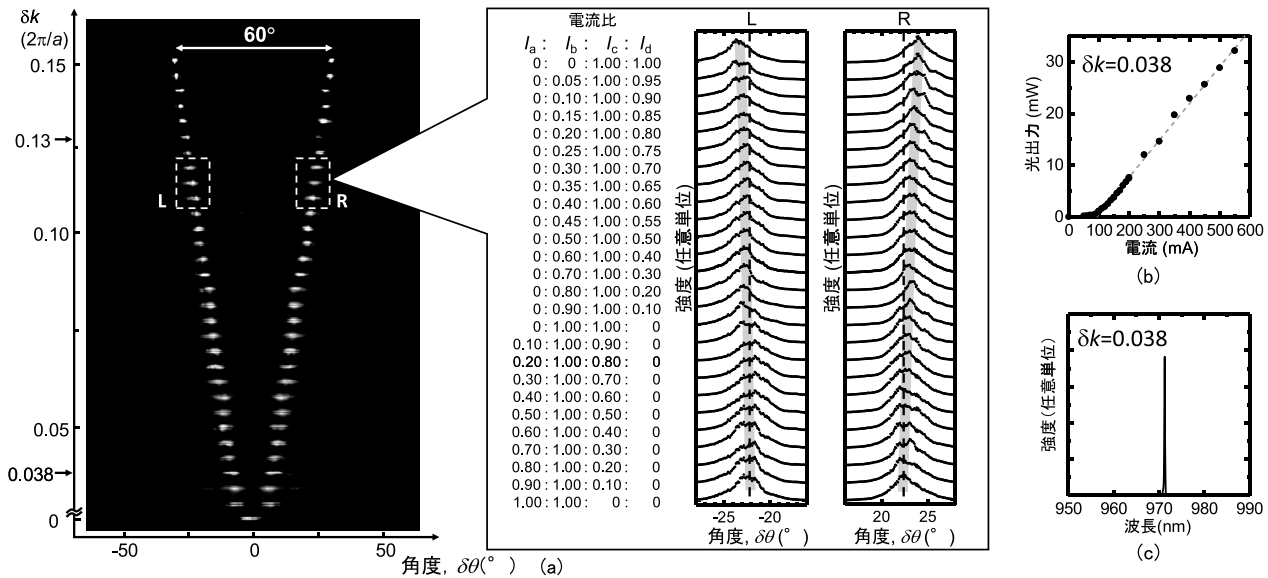


図3 (a) ビームパターン測定結果, (b) 代表的な電流-光出力特性, (c) 代表的な発振スペクトル.

動することにより、ビームを片方のみにも可能と考えている。例えば、図中 $\delta k = 0.13 [2\pi/a]$ と示した部分では左右のビーム強度が異なっているが、これは偶然非対称に駆動されたためと考えられる。なお最大のビーム出射角度は $\pm 30^\circ$ であり、 $\delta\theta/\theta_{\text{div}}$ の値は最大約 30 となる。これは、従来例¹⁻³⁾ に比べて 1 桁大きい。

第 2 段階は連続的なビーム偏向である。図 3 (a) 挿入図は、図 3 (a) で L, R と示した破線枠内において隣接する 4 つの電極への電流比 $I_a \sim I_d$ を変化させた場合の、光出力の角度依存性である。電流比を変化させることにより、連続的にビーム出射方向が変化している。他の電極においても同様にビーム出射方向は連続的に変化する。以上 2 つの段階を組み合わせることにより、 $\pm 30^\circ$ という広い範囲にわたって連続的なビーム偏向動作に成功した。

なお、駆動場所を変化させることによるビーム出射方向の変化は、例えば 10 cm 離れたスクリーンに対して約 0.01° と小さく、電流比の制御等により十分補正可能である。スクリーンがさらに離れた場合にはこの値はさらに小さくなるため、実際の応用上は問題ないと考えている。

本報告では、フォトニック結晶を用いることによりオンチップサイズでのビーム偏向レーザーを実現した例について解説を加えた。本稿では紹介できなかったが、フォトニック結晶を用いることにより、半導体レーザーの偏光⁵⁾、ビームパターン⁸⁾なども制御することが可能となる。今後も、フォトニック結晶技術を応用することにより、従来は実現不可能であった新しい機能性を有する半導体レーザーが創出され、新たな産業分野を形成していくものと期

待される。

本論で紹介した研究は、岩橋清太氏、梁 永氏 (京都大学)、酒井恭輔氏 (北海道大学)、宮井英次氏、國師渡氏、大西大氏 (ローム (株)) との共同研究の成果であり、ここに深謝の意を表す。

文 献

- 1) D. R. Scifres *et al.*: "Beam scanning with twin-stripe injection lasers," *Appl. Phys. Lett.*, **33** (1978) 702-704.
- 2) S. Mukai *et al.*: "Beam scanning and switching characteristics of twin-stripped lasers with a reduced stripe spacing," *Opt. Quantum Electron.*, **17** (1985) 431-434.
- 3) T. Ide *et al.*: "Continuous output beam steering in vertical-cavity surface-emitting lasers with two p-type electrodes by controlling injection current profile," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) 1966-1970.
- 4) M. Imada *et al.*: "Coherent two-dimensional lasing action in surface-emitting laser with triangular-lattice photonic crystal structure," *Appl. Phys. Lett.*, **75** (1999) 316-318.
- 5) S. Noda *et al.*: "Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser having a square lattice structure," *Science*, **293** (2001) 1123-1125.
- 6) M. Imada *et al.*: "Multidirectionally distributed feedback photonic crystal lasers," *Phys. Rev. B*, **65** (2002) 195306.
- 7) D. Ohnishi *et al.*: "Room temperature continuous wave operation of a surface-emitting two-dimensional photonic crystal diode laser," *Opt. Express*, **12** (2004) 1562-1568.
- 8) E. Miyai *et al.*: "Lasers producing tailored beams," *Nature*, **441** (2006) 946.
- 9) H. Matsubara *et al.*: "GaN photonic-crystal surface-emitting laser at blue-violet wavelengths," *Science*, **319** (2008) 445-447.
- 10) Y. Kurosaka *et al.*: "On-chip beam-steering photonic-crystal lasers," *Nature Photon.*, **4** (2010) 447-450.
- 11) K. Sakai *et al.*: "Lasing band-edge identification for a surface-emitting photonic crystal laser," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, **23** (2005) 1335-1340.

(2011 年 4 月 15 日受理)