

斬新なレーザと高効率のLEDの実現を可能にするフォトニック結晶

野田 進

2次元(2D)フォトニック結晶は完全な単一モードレーザの実現を可能にする。また、2Dフォトニック結晶のバンドギャップは自然放光を制御して光エネルギーを垂直方向へ集光放射を可能とするため、LEDへの応用可能性も構築されている。

屈折率が周期的に変化するフォトニック結晶は、光子マニピュレーションの新しい手段を生える画期的な材料だ。2Dフォトニック結晶は2次元でも完全な単一モードで動作する全く新しい半導体レーザの基盤になる^{1,2)}。レーザ発振の原理は2Dフォトニック結晶を種々の方向に放射する光波のコヒーレント光結合に基づいている。

一方、面内で2D方向に放射される自然放光は2Dバンドギャップ効果によって抑制される。同時に、蓄積されたエネルギーはバンドギャップ効果が存在しない垂直方向に再配分する。その結果、2Dフォトニック結晶の内部では自然放光の抑制と再配分が同時に可能になり、非常に高い外部量子効率をもつ発光ダイオード(LED)への応用という魅力的な可能性が生まれる。

レーザ発振の制御

一般に、半導体レーザの面積が広くないと単モードは多モードになり、その動作は非常に不安定になる。しかし、大面積半導体レーザの場合でも安定な単一モードおよび準モードの発振を達成できれば、まったく新しいレーザを実現できる。現在では、このようなレーザの作製が2Dフォトニック結晶を用いることで可能になりつつある。

2Dフォトニックレーザの場合、結晶構造は利得媒質となる活性層の上部

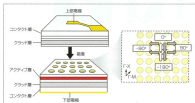


図1 2Dフォトニック結晶レーザは、フォトニック結晶層の上部にもアクティブ層と上部コンタクト層、クラッド層とを積層して構成する。光は四つの方向に放射して2D帯状発光を実現する。

に形成され、デバイスの内部に埋め込まれる(図1)。フォトニック結晶は正方格子構造であり、一つの工の格子間隔は活性層の発光波長と一致するように設計されている。この場合、この方向に放射する光は、他方(±90°)ばかりでなく二つの直交方向(±90°)にも放射され、四つの等価な直交方向に放射する光波間の光結合を引き起こして、2D帯状波(または2D共振モード)を生成する。このレーザのバンド面での共振モードは光の群速度がゼロになるバンド端で生じる^{3,4)}。2Dフォトニック結晶はウエハに対して垂直方向の放射光動作する。このデバイスは面発光動作する。作製した900~1000nmの発光波長を

もつInGaAs/GeAsフォトニック結晶レーザで理論計算したバンド図は測定により得られたバンド図とよく一致した。レーザ発振の領域は150×150μmの広い面積だったが、パワー自方、レーザ発振スペクトル、近視野と遠視野のパターンは、いずれも安定な単一モード発振が良好に実現されたことを示した(図2)。デバイスに垂直な方向の遠視野パターンはユニークなリング形状のビームパターンになった。このパターンは上述したバンド面のレーザ発振モードの電場分布によって生じる。このパターンは不透明物体のマニピュレーションを行なう光ピンセットの開発にとって重要になると考えられる。最近の研究では、結晶中の半導格子および電子

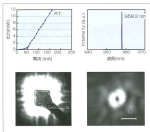


図5 単光子発光特性(上方)、発光スペクトル(右上)および励起パワー依存性(右下)を示す。2Dフォトニック結晶に一体化された発光層は大きいが発光効率も大きい。左下の画像はモード動作していることを示している。デバイスに対して垂直方向の励起光(下方)はビームが1μm程度の径をもち、このユニークなリング形状には光子セットへの応用の可能性がある。

発光のマニピュレーションによって、ビームパターンの形状制御が可能になりつつある。

自然放光の制御

自然放光はフォトニックデバイスの性能を制限する基本的な要因(ボトルネック)だ。例えばLEDの場合、デバイスから取り逃さない自然放光は損失の原因になる。同様に、レーザーの場合も、レーザー発振モードに結合しない自然放光は損失と雑音の原因をもたらす。従って、望ましくない自然放光の抑制と利用可能な形へのエネルギーの再配分が非常に重要になる。われわれは、2Dフォトニック結晶を使用すると、結晶内部に埋め込まれた発光体からの2D面内方向への自然放光が抑制されることを実証した。同時に、発光体に供給されるエネルギーが垂直方向に再配分されることも確認した²⁴。

自然放光は高空間の揺らぎから発生する。自然放光割合(R_{sp})はフェルミの黄金則で与えられ、発光モードの側面によって決まる。この発光モードを側面から抑制することにより、自

然放光の制御が可能になる。

この物理を実証するために、GaInAsP半導体スラブの三角格子2Dフォトニック結晶を作製した(図6)。この単一量子井戸(QW)を発光材料にした構造は、発振子モードの方向がスラブ面に平行なTE偏光の光を発生する。薄いスラブ中の光学モードは二つのモード、すなわち、垂直方向への全内反射(TIR)の条件が満足されて2D面内に閉じ込められる「スラブモード」と、

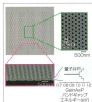


図6 自然放光は単一量子井戸光エミッターを有する2Dフォトニック結晶スラブによって制御される。

TE条件が満足されずにスラブ外に発光する「垂直モード」とに分断できる。QWに閉じ込められた励起キャリアはスラブモードと垂直モードの両方に結合する自然放光光を発生する。このときの自然放光割合は $R_{sp} = R_{sp,slab} + R_{sp,vert}$ の式で表わすことができる。ここで、 R_{sp} と $R_{sp,vert}$ はそれぞれスラブモードと垂直モードの自然放光割合を示している。低い励起率の空乏クワッドで囲まれた大きな励起率をもつ半導体スラブの場合、又はスラブ内に強く閉じ込められて $R_{sp} > R_{sp,vert}$ の条件が満足される。このことはQWからのほとんど自然放光光がスラブモードに結合することを意味している。しかし、2Dフォトニック結晶構造がスラブの内部に形成されると、 R_{sp} は抑制されるが、 $R_{sp,vert}$ には基本的に変化が生かない。その結果、 R_{sp} の抑制によって、 $R_{sp,vert}$ の著しい減少が可能になる。

スラブモードへの発光は2Dフォトニック結晶のバンドギャップによって抑制されるため、QWから放射される光子は垂直モードのみと結合し、垂直方向への自然放光の量子条件は増加する。これらの両側効果、すなわち、2Dスラブモードへの自然放光の抑制による R_{sp} の減少と垂直モードの発光効率の増加は、2D面内から垂直方向への光エネルギーの再配分において、2Dフォトニック結晶が重要な役割を果たしていることを示す。

この垂直方向への再配分効果は詳細な実験によって実証された。実験では周期が300~600nm、間隔が150nmのフォトニック結晶格子の同一ケース上に試作された一連の試料が使用された。これらの試料の発光パルスがTE1₀のレーザからの波長280nm、パルス幅2ps、繰り返し周期2MHzのパルスを使用して強度4Kで行なわれた。発

光波長がフォトニックバンドギャップの範囲内にあるときの自然放射の寿命 ($1/\lambda_{sp}$ に対応する)は、フォトニック結晶を使わないときの真空中に比べて6倍に増加した(図4)。一方、発光波長がフォトニックバンドギャップの範囲外にあると、垂直方向への自然放射の寿命と発光効率はいずれもフォトニック結晶のない構造での観測と同等であった。これらの結果は理論計算の結果とよく一致し、自然放射の抑制と再配分が2Dフォトニック結晶によって同時に可能になることを十分に実証している。

この実験は非放射再結合過程を防ぐために真空中で行われたが、例えば量子ドット構造による2Dキャリア閉じ込め効果を利用すれば、この観測は室温でも観測可能だ。2Dフォトニック結晶で実現された自然放射の制御はフォトニックデバイスの発展において重要なステップになる。特に、次世代の全周像形成システムとして非常に重要なLEDの外部量子効率が大いに向上するだろう。

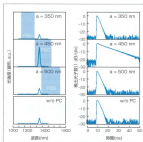


図4 レーが発光波長が2D結晶的フォトニックバンドギャップ領域の内側にあると(結晶の電子定数 n が4.60 n のとき)、波長を調整した光強度(左)および対応する時間分解発光強度(右)は、フォトニック結晶を使わない構造で観測される値の6倍になる。

参考文献

- (1) M. Inada et al., Appl. Phys. Lett., 75, 318 (1999).
- (2) Y. Noda et al., Science 293, 1120 (2001).
- (3) D. Ohtsuki et al., Optics Express 12, 1562 (2004).
- (4) H. Sakai et al., IEEE J. Selected Areas in Communications 22, 1038 (2004).
- (5) M. Fujita et al., Science 308, 1566 (2005).

著者紹介

野村直也は京都大学電子工学研究所の教授。

E-mail: noda@kumk.kyoto-u.ac.jp

本記事は Laser Focus World 誌 2005年12月号に掲載された英文記事の翻訳版です。

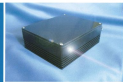
194

MEGAOPTO

Creating lasers for the application of their technology

連続波紫外レーザー

Series 120



株式会社メガオプト

〒201-0114 東京都文京区湯島 71-54
 phone: 03-49-469 0177 fax: 03-49-469 0132
 www.megaopto.co.jp goda@me@megaopto.co.jp

現代的な検査器に「組み込み」可能な初めてのUVレーザー、できました

安定な355nmの連続波紫外光をフットプリントサイズから出力します。基本構造を改良し、出力の安定性、寿命の向上を実現しました。

最大出力0.02W連続波170mW出力も。

■特徴(2005)

レーザーは140nm程度の短波長特性を有するが、170nmの紫外レーザーは400nm程度に比べて、レーザー駆動に10倍の電力を必要とするため、レーザー駆動に必要となる電力は10倍程度増加して170W。

■メリット

従来の紫外レーザーと異なりこのレーザーは、他の駆動部と一体化してコンパクトな構造を実現し、検査器に組み込み可能なレーザーを実現しました。従来のコンパクトレーザーと比べて、10倍程度の電力を必要とするため、レーザー駆動に必要となる電力は10倍程度増加して170W。

用途

- フォトマスク
- MEMSデバイス
- 半導体検査
- 紫外線レーザー駆動装置
- 医療
- 紫外線レーザー駆動装置
- 検査器

製品仕様

- 波長 355nm
- 最大出力 0.02W
- 連続波出力 170mW
- 出力 100mW
- ポンプ電源 150W、100V
- 出力安定性 1%
- 寿命 100,000時間
- 駆動電圧 単相100V、50/60Hz