

超高伝送密度光インターネットの実現に向けたフォトニック 結晶レーザーの光出射に関する研究

大阪大学 大学院工学研究科 近藤正彦

Light Extraction from a CirD (Circular Defect in 2D Photonic Crystal) Laser for Realizing
Ultra-High Density Optical Internet

Masahiko Kondow

Graduate School of Engineering, Osaka University

超高伝送密度光インターコネクタへの適用を目指して、英語の略称から CirD レーザと呼ぶ円形欠陥を有する 2 次元フォトニック結晶レーザーの研究開発を行っている。本研究のシミュレーション結果は、CirD レーザの光取り出し効率が光出射面の劈開位置誤差に大きく影響されることを示している。劈開位置誤差は、CirD レーザの研究開発において大きな問題となる。光出射面位置をナノメートルの精度で制御するために、電子線リソグラフィとドライエッチングで作製した光出射面を有する CirD レーザを試作・評価する。劈開位置誤差の問題を解決できるので、CirD レーザの光学特性を再現性良く評価することが可能になる。

CirD (Circular Defect in 2D photonic crystal) lasers have been proposed and developed for realizing ultra-high density optical interconnects. Simulation results in this work reveal that output power of the laser is sensitively affected by the position of light extraction facet made by cleaving. Therefore, in this work, we have developed a way to make light extraction facet made not by cleaving but by using electron beam lithography and dry-etching. The position of light extraction facet can be controlled with an accuracy of nano-meter scale. Thus, it is possible to evaluate the optical performances of the devices with excellent reproducibility. This way will accelerate the development of CirD lasers.

1. 背景

人類にとってインターネットはもはや生活に欠かすことができなく、インターネット上を流通する情報(トラフィック)が年々増加している。IoT やクラウド・コンピューティングが原因である。クラウドの実態であるデータセンタでは、サーバー間でのインターコネクタにより、トラフィックが発生する。電子機器のサーバーが、信号処理や情報保存を担う。データセンタでは、多数のサーバーがラックに収まり、そのラックが無数にある。いくら高性能なサーバーでも、インターコネクタが無ければ、インターネットを実現できない。

インターコネクタでは、必要な伝送容量を達成することが重要であり、大容量な光インターコネクタの比重が年々増している。光は高速で無限の可能性を有するイメージを与えるが、その光インターコネクタが、物理的限界に近づいている。

データセンタでは、インターコネクットの通信規格に Ethernet が用いられている。光インターコネクットは、1G (ギガ) Ether 以降で使用されている。しかし、2002 年に 10G Ether の規格が決まった後は、進展が非常に遅い。送信源のレーザダイオード(LD)の動作速度が物理限界に達したからである。社会・産業ニーズに応えるために、2010 年に 100G Ether の規格が決まった。光源の速度を 25Gbps に上げて、4 チャンネルの波長多重で 100Gbps に対応する。しかし、その技術開発は困難を極めた。極近年になってようやく市場に出てきている。次の規格としては、1T(テラ) Ether が順当だが、技術的困難さにより現在は 400G Ether が検討されている。

2. 超高伝送密度光インターネットの実現に向けた光モジュール

筆者が主宰する研究室では、革新的・独創的なブレークスルーとなる 2 次元フォトニック結晶を用いた究極の光モジュールを作製し、そこから光インターコネクットへ展開することを目指している [1-3]。

図1に光モジュールで使用される光源の2次元フォトニック結晶レーザダイオード(LD)の構造図を示す。

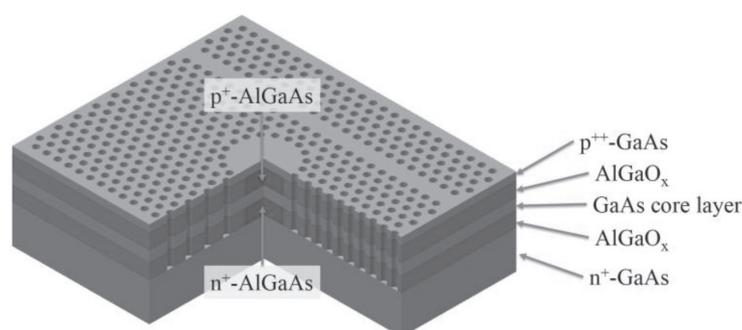


図1 CirD-LD の構造図 [1]

同図において濃い灰色部分はドライエッチングにより作製される空孔である。半導体層の屈折率は 3 程度、空孔の屈折率は空気の 1 である。空孔が周期的に作製された場所が 2 次元フォトニック結晶であり、特定の波長、この場合レーザ波長の光が存在できない。同図の直線欠陥は LD の光出力導波路として、円形欠陥はレーザ共振器として機能する。この円形欠陥の英語名称 Circular Defect in 2 dimensional photonic crystal を略して CirD 共振器とよび、CirD 共振器を有する 2 次元フォトニック結晶レーザを CirD レーザと呼んでいる。CirD 共振器内で発生した光は、直進したい性質を持っている。光は、フォトニック結晶部内に侵入することができないので、CirD 共振器内の外周を周回し、whispering gallery mode (WGM) として存在する。極低閾電流の micro-disk レーザと同様にミラー損失が無いので低閾値でレーザ発振する。CirD 共振器は 18 個の空孔で囲まれているので、9 波長の WGM 光が幾何学的に安定で、単一モードレーザを実現する。レーザ波長は、共振器の円周長、従って、共振器の直径を変えることで、ある程度の範囲で任意に設計できる。図1において赤色で示されるドーピングした導電性の AlGaAs 層をファネルと呼ぶ。活性層(コア層)上下のファネルを通して、GaAs コア層内の InAs 量子ドット(Quantum Dot: QD)へ電流(キャリア)が注入され 1.3 ミクロン帯で発光する。他方、PhC 部分のクラッド層には、AlGaAs を選択酸化させた絶縁体の Al (Ga) O_x を用いる。AlO_x の屈折率は 1.6 と十分低い。屈折率が 1 の空気ではなく AlO_x をクラッド層に用いても CirD 共振器

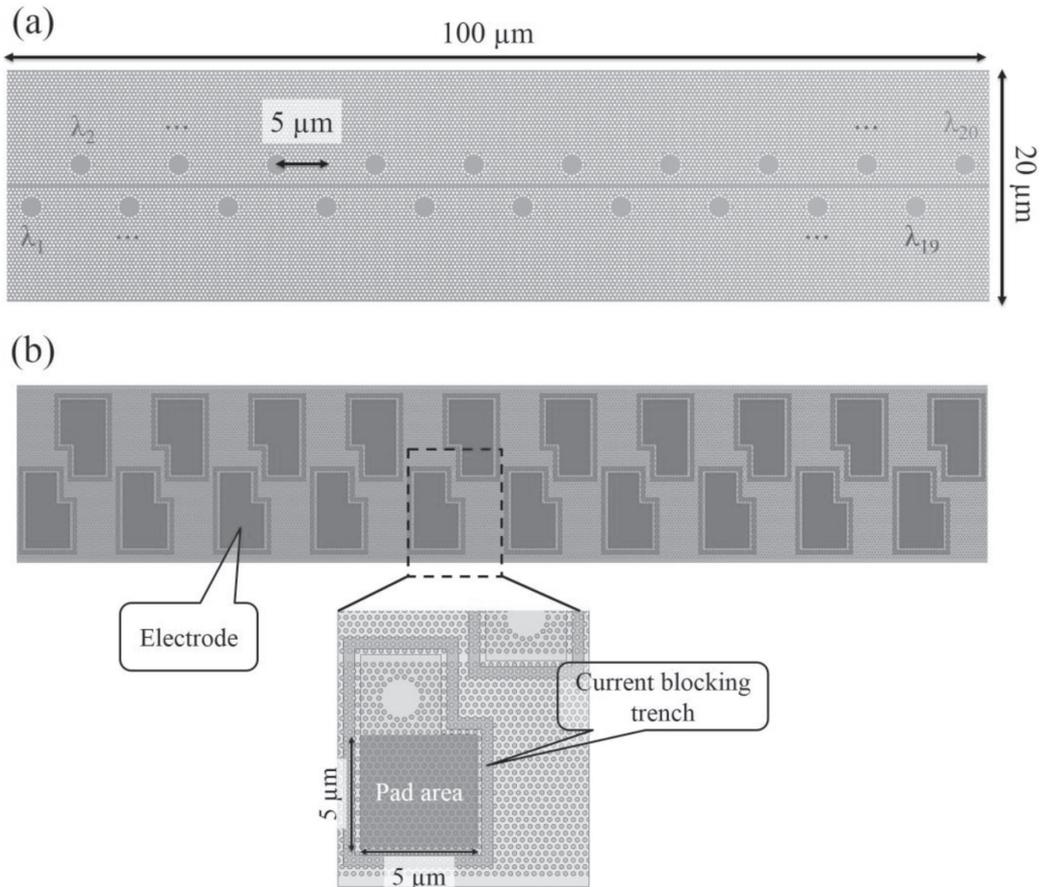


図2 提案する光源モジュールの構造図 [1]

(a) CirD レーザアレイ

(b) 独立駆動可能な電流分離溝と電極形成後のレーザアレイ

がレーザ動作するのに十分な光閉じ込め、つまり十分高い Q 値を持つことをシミュレーションで確認し、実験的にもレーザ動作を確認している [2]。

図 2 に、提案する光モジュールの送信側の概念図を示す。

光源モジュールのサイズは、2次元フォトニック結晶を用いることで光集積回路として極めて微小な $100\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ となる。図 1 と同様に光導波路の直近に CirD 共振器を上下各 10 個、合計 20 個配置する。共振器のサイズは直径が約 $2\ \mu\text{m}$ とモジュールサイズの $100\ \mu\text{m}$ に比べて十分に小さい。各共振器のレーザ波長は CirD の直径に応じて変化させることができ、光合波器を不要にする波長多重が可能となる。CirD 共振器は極微小体積なので 50 Gbps で直接変調でき [3]、20 個の共振器を波長多重すれば、1 Tbps の伝送容量を達成できる [1]。各 CirD 共振器の直上に電流駆動のため、図 2 (b) で橙色で示される数 μm 角の電極を形成して出射光側の光源モジュールを完成させる。各 CirD-LD を独立駆動するために、アイソレーション用の電流分離溝を形成する。極微小の CirD-LD を直接変調することで高速変調を可能としているため、極省エネルギーの光源モジュールが実現される。

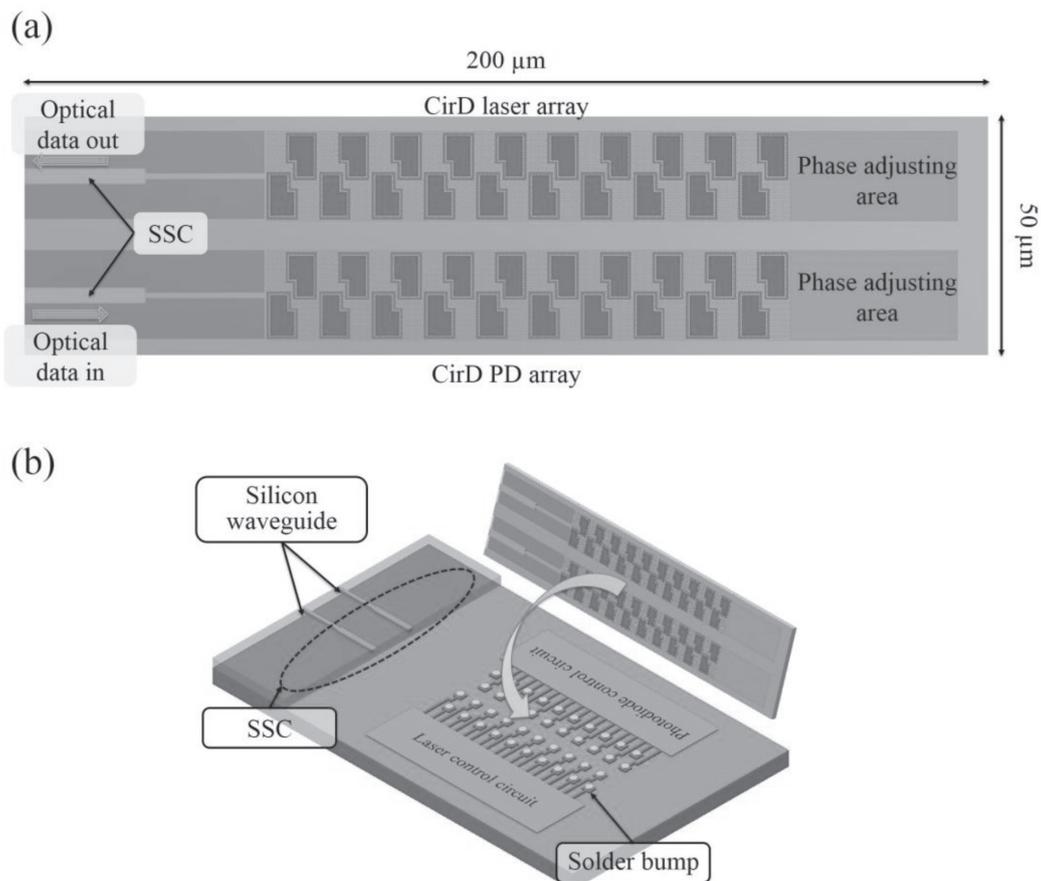


図3 提案する送受信光モジュールの構造図 [1]

- (a) 集積された CirD-LD アレイ送信モジュールと CirD-PD アレイ受信モジュール
 (b) シリコン IC チップへの実装の様子

図3に、提案する送受信光モジュールと Si チップへの実装の概念図を示す。

光入力側に関しても、光出力側と同じ原理でフォト・ダイオード(PD)モジュールを作製できる。図3(a)に示す様に提案モジュールサイズは、 $200\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ で $100\ \mu\text{m}$ 角と同等となる。本モジュールは、プレーナ構造であるので、フリップチップ実装で電子機器の電気配線と接続できる。40か所の電気配線と2本の光配線を1度の実施でき、実装のコストに勝る利点を生む。極めて単純な構造である。6インチのGaAsウエハから $100\ \mu\text{m}$ 角のモジュールが百万個程度と大量生産できるので、非常に厳しい低コスト要求にも対応可能である。

3. CirD-LDの光出射に関する理論的検討

将来的には CirD レーザアレイを開発するが、直近の課題は単独の CirD レーザの特性改善である。出力導波路の端部も、将来的には図3(a)に示す様に Spot Size Converter (SSC) を設けるが、直近の CirD レーザ開発では、図1に示す様に、共振器の近くに光出射面を設ける。当研究室では、光出射面の作製に結晶の劈開技術を用いてきた。劈開技術は、端面出射型 LD の作製では広く用いられていて、光散乱がない原子レベルで平坦な面の作製を容易にする。劈開面の位置の作製精度は、 $\pm 5\ \mu\text{m}$ が限界である。この値は、2次元フォトリソニック結晶の周期、格子定数 $a \approx 370\ \text{nm}$ に比べて1桁以上大きい。つまり、格子定数

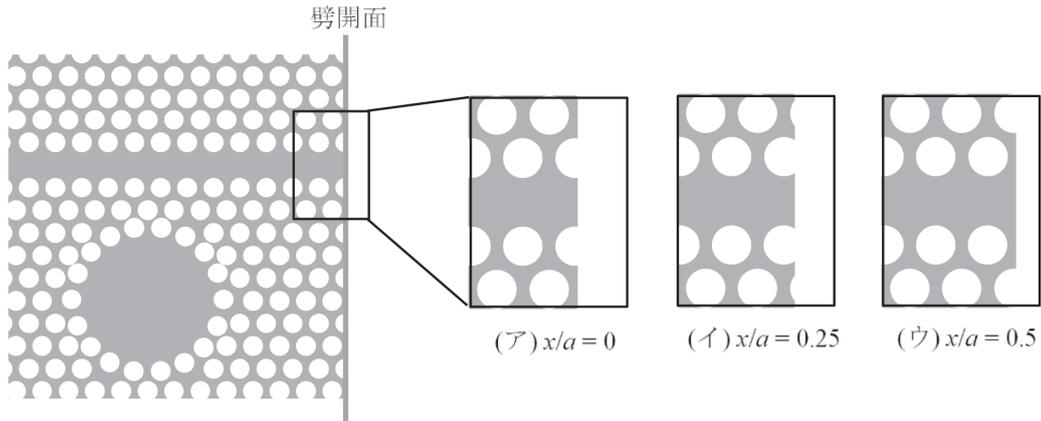


図4 劈開位置による端面構造の変化

a の位置精度で、劈開面を作製することは技術的に不可能である。

図4に、劈開位置による端面構造の変化を示す。導波路方向を x 軸とし同図(ア)の位置を原点としている。端面構造は、格子定数 a の周期で繰り返す。

そこで、本研究では、端面構造の変化が光射出量に及ぼす影響を、時間領域差分 (Finite-difference time-domain : FDTD) 法を用いてシミュレーションした。図5にその結果を示す。縦軸の最大値が1となる様にシミュレーションしたが、シミュレーションの空間的・時間的領域サイズの影響で計算結果には多少の誤差がある。同図より、導波路を伝搬する光の波長に多少依存するが、光取り出し効率は、おおむね周期 a で変動し、その値は位置 x により大きく変動する、つまり x に最適値があることが分かる。最大の光取り出し効率は、 $x/a = 0.6$ 付近で得られると考えられる。

この結果は、CirD レーザの設計や作製工程(プロセス)を改善しても、上述の様に光射出面を劈開で作製しては、その評価を正しく行えない事を意味しており、CirD レーザの研究開発において重大な問題である。

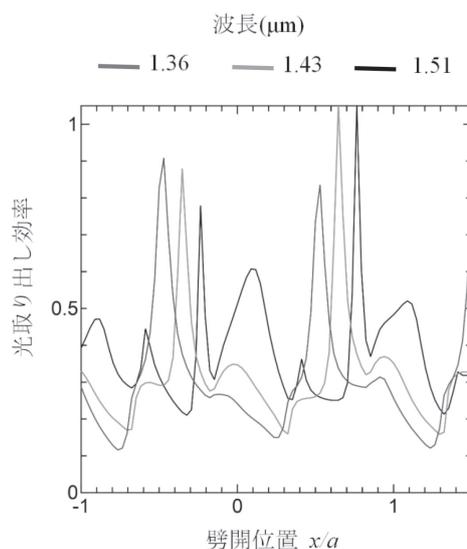


図5 劈開位置と光取り出し効率の関係

4. ドライエッチングによる光出射面の作製

電子線 (Electron Beam : EB) リソグラフィーとドライエッチング (Dry Etching : DE) で光出射面を作製できれば、EB リソグラフィーによるナノメートルの精度で光出射面位置を制御でき、取り出し効率が劈開位置誤差に影響される問題を解決できる。そこで、本研究では、CirD レーザの光出射面をドライエッチングで作製して光学評価を行った。[4]

図 6 左図の黒色の部分を、EB リソグラフィーと DE で掘って取り除く、取り除いた部分から緩衝フッ酸液を注入して AlGaAs 層あるいは AlO_x 層を選択的に取り除けば、入れ替わった空気がクラッド層として機能する。その後、図 6 右図の赤線のようにウエハを劈開すれば、光出射面が大気中に凸出した状態となり、再現性が高い光学特性評価が可能になる。

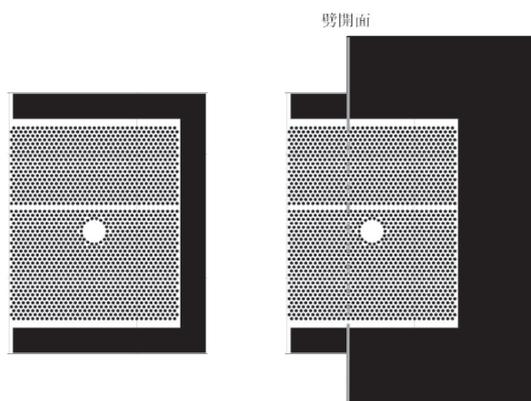


図 6 ドライエッチング端面形成(左図)と凸型端面形成(右図)

図 1 に示す層構造で、AlGaAs 層あるいは AlO_x 層を選択的に取り除くと、最表面の p-GaAs 電極コンタクト層が、光が伝搬する GaAs コア層 (InAs-QD 発光層を含む) に覆いかぶさる様に残る。そのため、凸型光出射面を作製するには、プロセスの初期に p-GaAs 電極コンタクト層をエッチングで部分的に取り除く必要がある。本研究では、凸型光出射面の特性評価を行うことを目標としたため、GaAs コア層及びその下部に AlGaAs 犠牲層を有するヘテロエピ基板(図 7(a))を用いて原理実証実験を行った。

図 7 に、プロセスフローを示す。同図において、灰色、赤、水色が、それぞれ、GaAs、InAs-QD、AlGaAs を示す。

- (b) エピ基板にレジスト塗布し、EB 描画・現像を行い、図 6 左図のパターンを有するドライエッチングマスクを作製する。
- (c) ドライエッチングで、AlGaAs 層を貫通する様に垂直に深堀する。その後、マスクのレジストを取り除く。

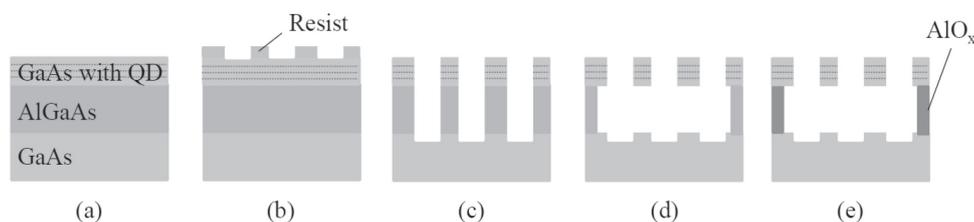


図 7 プロセスフロー [4]

- (d) 緩衝フッ酸液を用いるウエットエッチングで、AlGaAs 犠牲層を選択的に除去し、空気クラッド層とする。
- (e) 露出した AlGaAs の自然酸化を防ぐために、水蒸気酸化で AlGaAs を AlO_x に変換させる。特に、図 6 のフォトニック結晶部分とエピ基板部分との接続部分が重要で、試料の安定性が高まる。

図 8 に、作製した試料の SEM 像を示す。概ね設計通りに作製できた。図 6 右図では共振器が劈開面の右にあり、図 8 では共振器が劈開面の左にある。これは劈開位置の誤差(約 $10\ \mu\text{m}$)に因るものである。従って、作製した試料は設計範囲内にある。共振器の下には、空気クラッドがあり、その位置が光学特性に与える影響は小さいと考えられる。

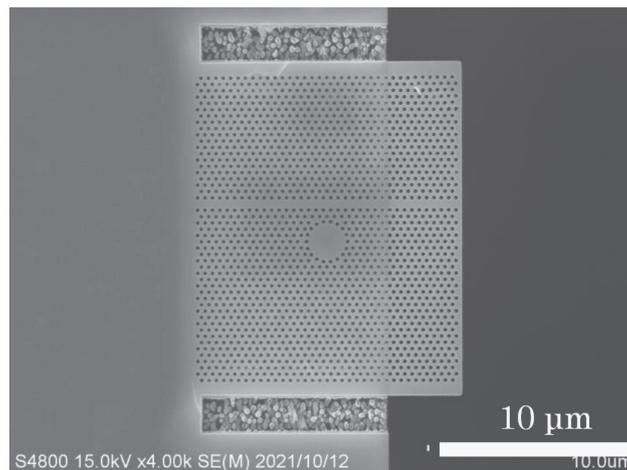


図 8 凸型光出射面を有する試料の SEM 像

5. ドライエッチングで作製した光出射面有するCirDレーザの光学特性

波長 780nm の AlGaAs 半導体レーザ光を励起光源として用い、対物レンズで集光して CirD 共振器の上方より照射した。図 9 に示す様に、対物レンズの焦点を故意にずらせて励起光のスポットサイズを CirD 共振器より大きくした。これにより、励起光の位置依存性が小さくなり再現性が高い測定が可能になる。

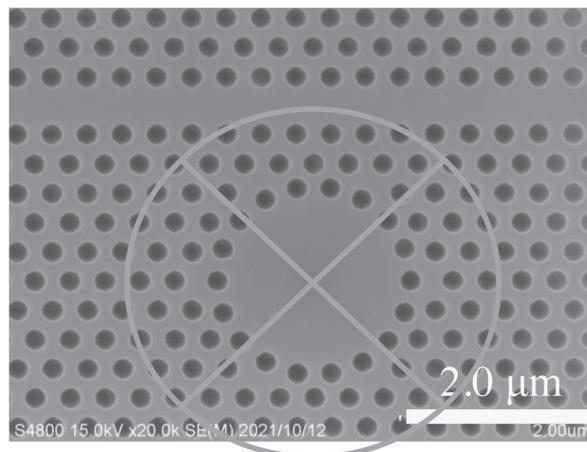


図 9 励起光の位置と大きさ

導波路端部から出射された光を、先球ファイバで集光して光スペクトラムアナライザ(アンリツ(株)MS9710B)に入力して計測した。

図 10 に、レーザ発振スペクトルを示す。ピーク波長は、1303.6nm で WGM の設計値と合致する。サイドモード抑圧比は、レーザ動作を示す 27dB と十分に大きな値であった。半値幅は、光スペクトラムアナライザの分解能と同じ 0.06nm であった。実際の半値幅は、0.06nm 以下だと考えられる。

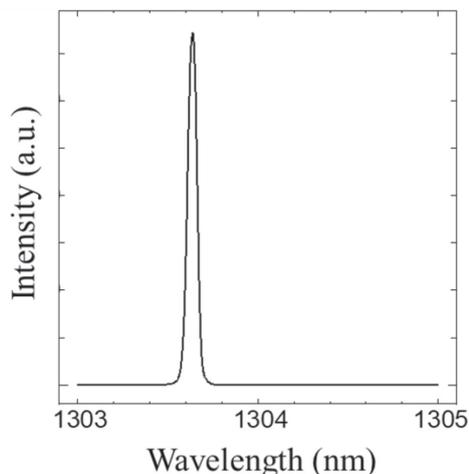


図 10 レーザ スペクトル

図 11 に、光出力の励起光強度依存性を示す。60 μ W 付近に閾値 (P_{th})が見られる。既報告 [2] に比べると大きな値であるが、励起光を集光する対物レンズの焦点位置にも依存するので、差異に大きな意味はないと考えている。

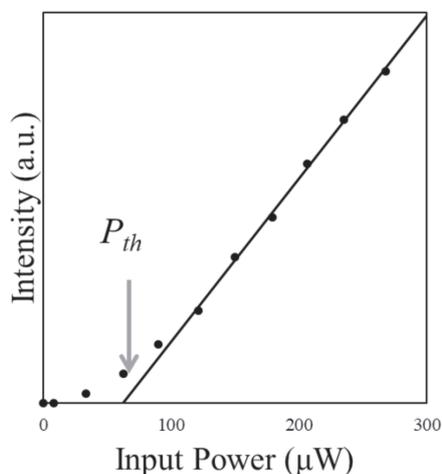


図 11 光出力の励起光強度依存性

以上の結果は、CirD 共振器内で WGM のレーザ光が発生し、導波路より出力されることを示している。このように、ドライエッチングで光出射面を作製することにより、CirD レーザの光学特性を再現性良く評価することが可能になった。

6. まとめと今後の展望

次世代の光インターコネクタへの適用を目指して、円形欠陥を有する 2 次元フォトニック結晶レーザの研究開発を行っている。このレーザを英語の略称から CirD レーザと呼んでいる。

本研究のシミュレーション結果で、CirD レーザの光取り出し効率が光出射面の劈開位置誤差に大きく影響されることが判明した。劈開位置誤差は、CirD レーザの研究開発において大きな問題となる。

本研究では、電子線リソグラフィとドライエッチングで光出射面を作製して、ナノメートルの精度で光出射面位置を制御することが可能であることを実証した。劈開位置誤差の問題が解決されるので、CirD レーザの光学特性を再現性良く評価することが可能になる。

本研究でドライエッチングによる光出射面作製の有効性を光学励起実験により確認したが、次の課題は電流注入構造への展開である。単独の CirD LD の特性改善が加速されるであろう。その後はアレイ化を行い、提案する光モジュールの社会実装を是非とも実現したい。

7. 謝辞

本研究の一部は、日本板硝子材料工学助成会の 2019 年度研究助成、科研費 JP19H02198 の支援を受けた。また、本報告書の多くのデータは、筆者が主宰する研究室の学生によって得られた。本研究の遂行に関係して頂いた多くの方々に感謝します。

8. 参考文献

- 1) Yifan Xiong, Hanqiao Ye, Takuma Umeda, Shun Mizoguchi, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta and Masahiko Kondow: "Photonic Crystal Circular Defect (CirD) Laser" *Photonics*, Vol. 6, p. 54, 2019.
- 2) Xiuyu Zhang, Takafumi Hino, Satoshi Kasamatsu, Shobu Suga, Elbert He, Yifan Xiong, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta, and Masahiko Kondow: "1.3 μm lasing of circular defect cavity photonic crystal laser with an AlOx cladding layer" *IEICE Electronics Express* Vol. 14, p. 1, 2017.
- 3) Hanqiao Ye, Tomoya Nishimura, Yifan Xiong, Takuya Yamaguchi, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, and Masahiko Kondow: "Theoretical Analysis on Operation Speed of the Circular Defect in 2D Photonic Crystal (CirD) Laser" *Phys. Status Solidi A*, Vol. 218, p. 2000411, 2021.
- 4) Shota Aomori, Kenta Kaichi, Issei Sada, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta and Masahiko Kondow: "Light Extraction Structure of CirD (Circular Defect in 2D photonic crystal) Laser" 40th Electronic Materials Symposium (EMS-40), P1-B012, Oct. 11, 2021.