

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04349

研究課題名(和文) 2次元フォトリック結晶を用いた円形光共振器半導体レーザの研究開発

研究課題名(英文) Circular Defect in 2 dimensional photonic crystal (CirD) Laser

研究代表者

近藤 正彦 (Kondow, Masahiko)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：90403170

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：チップ内光インターコネクで使用する極微小光モジュールにおいて光源となるフォトリック結晶円形欠陥(Circular Defect in 2 dimensional photonic crystal: CirD)レーザを提案し、設計した。波長多重により、100 μ m角の設置面積で、1 Tbpsの超高伝送容量を達成できる。伝送密度に換算すると、10 Pbps/cm²になる。その実現性を、シミュレーションにより確認した。作製プロセス技術を開発して、実際に、単一波長モードでの動作と20 nm以上の変調帯域を確認した。また、1 Tbps実現のために必要な技術課題を明らかにし、その打開方法を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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いインフラである。クラウド・コンピューティングの実態であるデータセンターでは、サーバー間でのインターコネクにより、トラフィックが発生する。トラフィックの増加により、年々光インターコネクの比重が増している。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が、物理限界に近づいている。本研究では、現状のフォトリック技術の延長とは全く異なる革新的な2次元フォトリック結晶を用いた極微小半導体レーザの研究・開発に取り組む。

研究成果の概要(英文)：We designed Circular Defect in 2 dimensional photonic crystal (CirD) lasers to construct a compact optical module with a wavelength division multiplexing (WDM) function for the applications of intra-chip optical interconnects. Ultra-high transmission capacity of 1 Tbps can be realized in an optical module with a footprint of 100 μ m square by using the WDM function without a conventional optical multiplexer, that requires big footprint and high cost. Thus, ultra-high the transmission capacity density of 10 Pbps/cm² can be expected. Subsequently, we simulated the characteristics of CirD lasers on lasing threshold, the modulation speed and etc. Then, we fabricated and evaluated CirD lasers that operate with a single wavelength mode under room-temperature continuous-wave conditions. Finally, we figured out the issues to realize the transmission capacity of 1 Tbps.

研究分野：工学

キーワード：光インターコネク フォトリック結晶レーザ

1. 研究開始当初の背景

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い。インターネット上を流通する情報(トラフィック)が、年々増加していることは誰もが実感している。増加の原因を、ユーザーの多くがトラフィックを大量に使用するためと考えるなら、事実と多少異なる。ユーザーが直接使用しているのは僅か17%、全体の80%強が、データセンタでの通信である。特に、同一データセンタ内での通信が全体の3/4を占めている。いわゆるクラウドが原因である。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トにより、トラフィックが発生する。信号処理や情報保存は、電子機器のサーバーが担う。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、インターコネクトが無ければ、インターネットは実現できない。インターコネクトでは、必要な伝送容量を達成することが重要で、媒体は金属でも光でもかまわない。トラフィックの増加により、年々光インターコネクトの比重が増している。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トが、物理限界に近づいている。

データセンタでは、インターコネクトにEthernetを用いている。フォトニクスを用いる光インターコネクトは、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、技術的進展が殆どない。送信源のLD(Laser Diode)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25 Gbpsに上げて、4チャンネルの波長多重(wavelength division multiplexing: WDM)で100 Gbpsに対応する。しかし、技術開発は困難を極めた。極近年、ようやくLDを25 Gbpsで直接変調するモジュールが出てきて、市場で受け入れられている。現在、次の規格として400G Etherが検討されている。現状のフォトニクスの延長では、1T(テラ)bpsの光モジュールは全く不可能なので、400 Gbpsと言う中途半端な値になっている。光インターコネクトは、1組の光モジュールと2本の光ファイバで構成される。サーバーには、この光モジュールが多数組み込まれる。本来ただ同然の金属配線で済むものに、わざわざ高価な光インターコネクトを用いるのは、大容量伝送が可能だからである。故に、光モジュールへの要求仕様は非常に厳しい。

他方、フォトニック結晶(PhC)は、数十年前前からあり、従来材料では実現しえない魔法の材料のイメージがあるが、未だ実用化には至っていない。光インターコネクトへの応用に向けた2次元PhC-LDの研究例として、Matsuo *et al.*による電流駆動室温連続動作を紹介する[1]。横方向電流注入により、世界で初めて電流駆動による室温連続動作を実現した。非常に先駆的な研究である。同グループは、後の論文で、世界最小の閾電流 $4.8\mu\text{A}$ を報告した。これは、PhC-LDの理論値と一致する。つまり、理想的な光共振器の作製に成功している。また、直接変調駆動により 4.4 fJ/bit の省エネルギー性も実証した。つまり、PhC-LDの採用で消費エネルギーの壁を突破できることを証明した。彼等の光共振器の設置面積は、 $2.6 \times 0.3\ \mu\text{m}^2$ と極小であるが、横方向電流注入の採用によりLD素子の設置面積は $10 \times 10\ \mu\text{m}^2$ と光共振器に比べて巨大である。また、論文では示されていない電極パッドの設置面積($80 \times 80\ \mu\text{m}^2$ が、業界標準)も考慮すると、 10 Pbps/cm^2 の超高密度実現は非常に困難であると思われる。もう一つの問題は、横方向電流注入構造の採用により素子抵抗が数kと非常に大きいことである。電流駆動時に活性(発光)層の温度が大きく上昇して、レーザ動作に必要な光学利得が十分得られず、レーザの出力が小さな値に制限される。彼らは、クラッド層に熱伝導率が著しく低い空気を使用している。これが、活性層の温度上昇の主原因と考えられる。

光インターコネクト用PhC-LDの実用化では、ア)電気抵抗を下げ発熱を抑制すること、イ)発生した熱を効率よく放熱できること、が重要である。因ってPhC-LDの構造の革新が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、現状のフォトニクス技術の延長とは全く異なる革新的なLDの開発に取り組む。我々は、縦方向電流注入型2次元PhC-LDを研究・開発し、そこから光インターコネクトへ展開する[2]。目標値は、1 Tbpsの光モジュールで、価格：100円/個、サイズ(設置面積)：髪の毛の断面と同等の $100\ \mu\text{m}^2$ 角(伝送密度に換算すると、 10 Pbps/cm^2)、消費エネルギー： 10 fJ/bit である。最新技術のシリコン・フォトニクスでも、全く不可能な値ばかりである。シリコン・フォトニクスでの目標伝送密度は 10 Tbps/cm^2 であり、本研究はその3桁上の 10 Pbps/cm^2 を目指す。伝送密度は、サイズのみならず、価格と直結する非常に重要な因子である。

現在商用にあるLDは、大きく2種類に分けられる。第1世代の端面発光LD、第2世代の面発光レーザ(VCSEL)である。100G Ether以降の大容量光インターコネクトでは、WDMが必須である。既存のWDM光源では光合波器が必須なので、第1世代の端面発光LDが使用されている。最新技術のシリコン・フォトニクスを用いても光合波器のサイズは5 mm角程度なので、 0.1mm 角= $100\ \mu\text{m}$ 角のモジュールの実現は絶望的である。従って、何とかして、光合波器が不要なWDM技

術を生み出す必要がある。

我々が提案し開発する LD では、光合波器を不要として、数 10 チャンネルの WDM を行う。LD の利得スペクトル幅を 20 nm とすると波長（チャンネル）間隔が 1 nm 程度となる。PhC-LD のスペクトル半値幅は十分小さいので、光クロストークが生じず、WDM が可能である。

3 . 研究の方法

本研究では、究極の光モジュールの送信側の LD を実際に作製して、特性を実証する。具体的には、PhC-LD の具体的な構図を提案し、シミュレーションにより 10 Pbps/cm² の超高密度の実現性を確認する。提案する PhC-LD の作製プロセス技術を開発し、実際に PhC-LD を動作させる。また、1 Tbps 実現のために必要な技術課題を明らかにし、その打開方法を検討する。

4 . 研究成果

図 1 に、本研究で提案開発する縦方向電流注入型 2 次元 PhC-LD 単体の構造図を示す。垂直方向の p-i-n ヘテロ構造によって構成されている。最上層から順に、p-GaAs コンタクト層、p-AlGaAs / AlO_x クラッド層、GaAs コア層、n-AlGaAs / AlO_x クラッド層、n-GaAs 基板となる。AlO_x クラッド層は PhC の空孔を通して AlGaAs を選択的に酸化することによって作製する。共振器中心部分の AlGaAs は未酸化のままで伝導性が維持されるので電流注入ファネルとして機能する。本 LD は、GaAs 系材料を用いるので、レーザの利得媒質として、GaAs コア層内に埋め込まれる GaInNAs 量子井戸または InAs 量子ドットを利用する。1.3 μm の波長帯でレーザ動作する。この波長帯は、Si に対して透明であり、シリコン・フォトンクスと親和性が高い。

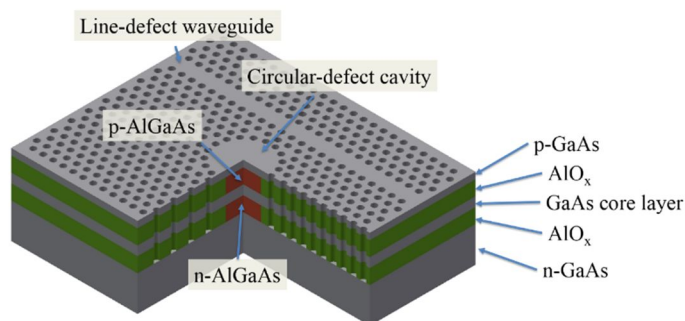


図 1 本研究で提案開発する縦方向電流注入型 2 次元 PhC-LD の構造図

図 2 に、レーザ共振器と出力光導波路内の光強度（正確には磁界の z 成分の大きさ）のシミュレーション結果を示す。

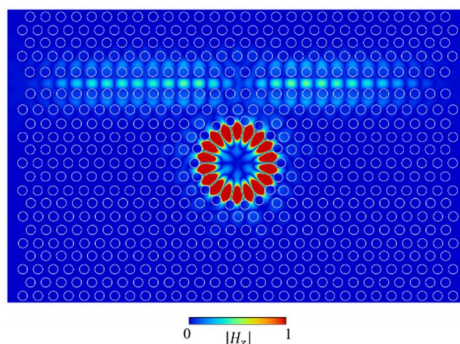


図 2 レーザ共振器と出力光導波路内の光強度の計算結果 [2]

円形欠陥（Circular Defect in 2 dimensional photonic crystal: CirD）共振器を採用することで、光は共振器外周のみに存在し whispering gallery mode (WGM) と呼ばれるモードを形成する。CirD 共振器は 18 個の空孔で囲まれるので、9 波長の WGM モードのみが安定的に発生し、波長が単一のレーザとして動作する。CirD 共振器は、ミラーを有さないのでミラー損失が発生

せず、非常に効率の良いレーザとして働く。CirD レーザは、共振器の半径を変えるだけで発振波長を調整できるので、WDM 光源に適する。

図3に、WDMを実現するCirDレーザアレイの構成を示す。発振波長の異なる20個のCirDレーザが配置されている。個々のCirDレーザは、50 Gbpsでの動作が期待できるので、伝送容量は1 Tbpsとなる。

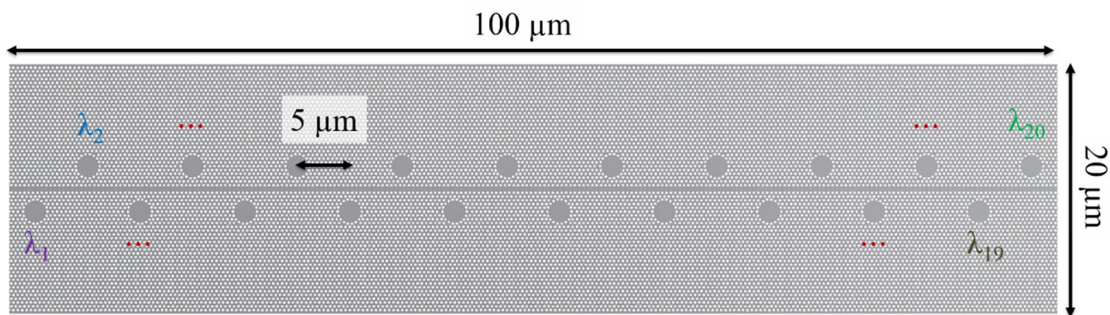


図3 WDMを実現するCirDレーザアレイの構成 [2]

図4には、CirDレーザアレイとCirD-フォトダイオード(Photo-Diode: PD)アレイを組み合わせた光モジュールの構成を示す。モジュールのサイズは、10,000 μm²である。従って、10 Pbps/cm²の超高密度の実現が期待できる。

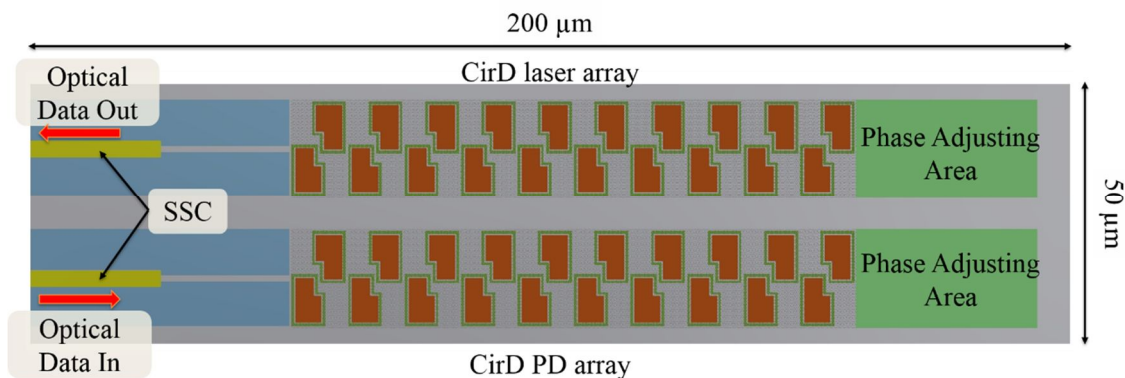


図4 CirDレーザアレイとCirD-PDアレイを組み合わせた光モジュールの構成 [2]
(橙色の部分、CirD共振器の上部電極)

図5に、フリップチップ接合により光モジュールをシリコン基板へ実装する概略図を示す。開発する光モジュールは、Siの電子回路や光回路との親和性が非常に高く、実現性が高い。

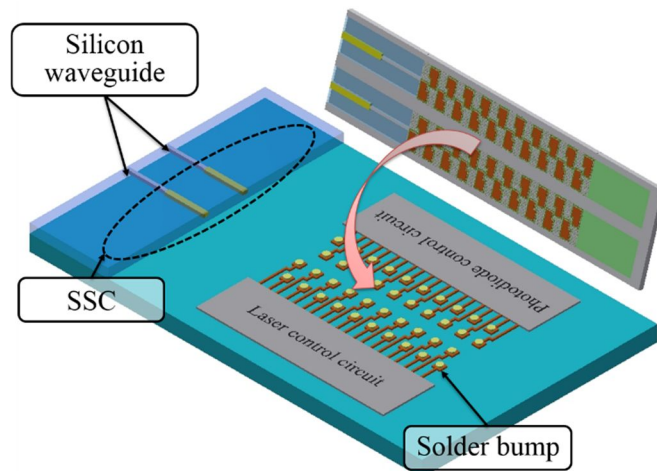


図5 フリップチップ接合により光モジュールをシリコン基板へ実装する概略図 [2]

シミュレーションにより、CirD レーザの特性を予測した。シミュレーションに用いるパラメータは、使用する材料や素子構造を考慮して適切と思われる値を採用した。CirD-LD の閾値電流は、5 μ A 程度と計算された。この値は、CirD レーザの光励起の実験値から推定したものと整合し、Matsuo *et al.* の PhC-LD の値とも一致している。従って、用いたパラメータが妥当だと考えられる。このシミュレーションにより、単体の CirD レーザの高速動作特性を検討した。高速動作の指標となる、緩和振動周波数 f_r 、小信号伝送周波数 f_{-3dB} から、50 Gbps での直接変調動作が可能との結果を得た。また、シミュレーションは、共振器の半径を変えることにより、発振波長が 20 nm 以上の帯域で調整できることも示した。

2次元 PhC を用いる CirD レーザのプロセス技術を開発した。主な開発技術は、高精度電子線リソグラフィと深堀ドライエッチングである。

開発したプロセス技術を用いて、CirD レーザの光学特性を光励起実験で調べた。スペクトル線幅が測定装置の限界値 0.07 nm 以下であり、サイドモード抑制比が約 30 dB で単一モードのレーザ動作を確認した。また、共振器の半径を変えることにより、発振波長が 20 nm 以上変化することも確認した。CirD レーザの構造パラメータと発振波長との相関より、CirD レーザはシミュレーションどおりに WGM モードで動作するとの結論を得た。

電流駆動 CirD レーザの実現を目指して、2次元 PhC 上の電極形成技術を開発した。これにより、電流駆動型 CirD 共振器が WGM モードで動作することを確認した。素子抵抗は 1k Ω 以下であり、Matsuo *et al.* による PhC-LD の値より優れている。これは、クラッド層に熱伝導率が優れる固体の AlGaAs/AlO_x を用いたからである。AlGaAs/AlO_x クラッド層の採用は、素子の機械的強度を増加させる。その結果、素子の長期的寿命の保証が可能になると考えられる。

高速動作測定に関しては、50 Gbps までの伝送特性を測定できる評価システムを構築した。一般に、高速動作評価が可能なフォトダイオードは、感度が良くない。高速測定では、LD に十分大きな光出力が求められる。しかし、極微小サイズの PhC-LD には困難な要求である。Matsuo *et al.* は、自社で開発した光増幅機能を有するアバラシェ・フォトダイオードを用いて高速評価を行った。このアバラシェ・フォトダイオードは、市販されていないので我々は使用することができなかった。現在は、CirD-LD の光出力を増幅するために、高速動作が可能な半導体光増幅器 (SOA) を用いて、高速測定を試みている。1 Tbps 実現のために必要な技術課題は、PhC-LD の光出力を増加させることである。その為には、出力光導波路ならびに PhC 外のメサ導波路の設計を含めた総合的な光モジュールの設計とその最適化が必要なことが判った。

引用文献

- [1] Matsuo *et al.* Optics Express, Vol. 20, p. 3773 (2012)
- [2] Kondow *et al.* Collaborative Conference on 3D & Materials Research 2015 Tu-212-1 (2015) 【招待講演】 , Xiong, Kondow *et al.* Photonics, Vol. 6, p. 54 (2019) 【招待論文】 .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yifan Xiong, Hanqiao Ye, Takuma Umeda, Shun Mizoguchi, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta and Masahiko Kondow	4. 巻 6
2. 論文標題 Photonic Crystal Circular Defect (CirD) Laser	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Photonics	6. 最初と最後の頁 54-1-54-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/photonics6020054	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yuji Miyamoto, Yifan Xiong, Tomoyuki Okada, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, and Masahiko Kondow	4. 巻 31
2. 論文標題 Optical coupling characteristics between a circular defect resonator and a waveguide in a two-dimensional photonic crystal slab	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications	6. 最初と最後の頁 168-172
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.photonics.2018.06.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yifan Xiong, Takuma Umeda, Xiuyu Zhang, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta, and Masahiko Kondow	4. 巻 24
2. 論文標題 Photonic Crystal Circular-Defect Microcavity Laser Designed for Wavelength Division Multiplexing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics	6. 最初と最後の頁 4900207-1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JSTQE.2018.2846053	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Xiuyu Zhang, Takafumi Hino, Satoshi Kasamatsu, Shobu Suga, Elbert He, Yifan Xiong, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta, and Masahiko Kondow	4. 巻 14
2. 論文標題 1.3 μm lasing of circular defect cavity photonic crystal laser with an AlO _x cladding layer	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/elex.14.20170664	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Xiuyu Zhang, Kento Takeuchi, Xiaolong Cong, Yifan Xiong, Masato Morifuji, Akihiro Maruta, Hirotake Kajii, and Masahiko Kondow	4. 巻 56
2. 論文標題 Dry etching of deep air holes in GaAs/AlGaAs-based epi-wafer having InAs quantum dots for fabrication of photonic crystal laser	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 126501-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.56.126501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計40件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 Takuya Yamaguchi, Takahiro Horiba, Masato Morifuji, and Masahiko Kondow
2. 発表標題 Transmission Characteristics of a Novel Waveguide Structure for Wavelength Division Multiplexing
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Kondow, T. Yamaguchi, Y. Xiong, T. Umeda, M. Morifuji, H. Kajii, and A. Maruta
2. 発表標題 CirD photonic crystal laser with high mesa waveguide for light output
3. 学会等名 2019 Collaborative Conference on Materials Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shun Mizoguchi, Yifan Xiong, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta, and Masahiko Kondow
2. 発表標題 Fabrication of Circular Defect Photonic Crystal Laser by Dry Etching
3. 学会等名 Asia Pacific Society for Materials Research 2019 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名	Hanqiao Ye, Tomoya Nishimura, Takuya Yamaguchi, Yifan Xiong, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Masahiko Kondow
2. 発表標題	High frequency characteristics analysis of photonic crystal circular defect laser
3. 学会等名	Asia Pacific Society for Materials Research 2019 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Masahiko Kondow, Yifan Xiong, Hanqiao Ye, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, and Akihiro Maruta
2. 発表標題	Photonic Crystal Circular Defect (CirD) Laser for Intra-chip Optical Interconnections
3. 学会等名	International Conference on Advanced Nanotechnology and Nanomaterials 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Y. Xiong, Y. Tani, X. Cong, M. Morifuji, M. Uemukai, H. Kajii, A. Maruta and M. Kondow
2. 発表標題	Selective dry etching of GaAs/AlO _x with photonic crystal structure for wavelength division multiplexing
3. 学会等名	The 38th Electronic Materials Symposium
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Masahiko Kondow, Yifan Xiong, Xiuyu Zhang, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, and Akihiro Maruta
2. 発表標題	Suitable quality (Q) factor for photonic crystal laser grown by MBE
3. 学会等名	Energy Materials Nanotechnology (EMN) Europe Meetings on Epitaxy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名 Y. Xiong, Y. Tani, X. Cong, M. Morifuji, H. Kajii, A. Maruta and M. Kondow
2. 発表標題 Electrical Isolation for Monolithic Photonic Crystal Laser Array Realized by Selective Dry Etching of GaAs/AlO _x Films
3. 学会等名 Collaborative Conference on Materials Research (CCMR) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuma Umeda, Yifan Xiong, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta, and Masahiko Kondow
2. 発表標題 1.3 um range single mode operation of photonic crystal circular-defect microcavity laser with InAs quantum dots
3. 学会等名 20th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (ICMBE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kento Takeuchi, Xiuyu Zhang, Shun Mizoguchi, Hirotake Kajii, Morifuji Masato, Maruta Akihiro, and Masahiko Kondow
2. 発表標題 Dry etching for fabricating air holes with depth of 1.5 μm in photonic crystal structure on epiwafer grown by MBE
3. 学会等名 20th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (ICMBE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masahiko Kondow, Yifan Xiong, Li Zeng, Masato Morifuji, Hirotake. Kajii, and Akihiro Maruta
2. 発表標題 Photonic Crystal Circular Defect (CirD) Laser
3. 学会等名 the 26th International Conference on Advanced Nanotechnology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masahiko Kondow, Xiuyu Zhang, Yifan Xiong, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, and Akihiro Maruta
2. 発表標題 Photonic crystal laser with quantum dots as active material grown by MBE
3. 学会等名 Energy Materials Nanotechnology (EMN) Europe Meetings on Epitaxy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masahiko Kondow, Xiuyu Zhang, Yifan Xiong, Masato Morifuji, Hirotake. Kajii, and Akihiro Maruta
2. 発表標題 Single mode lasing operation of Photonic Crystal Circular Defect (CirD) Laser
3. 学会等名 Collaborative Conference on Materials Research (CCMR) 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Kondow, T. Hino, S. Kasamatsu, S. Suga, X. Zhang, Y. Xiong, H. Kajii, A. Maruta, and M. Morifuji
2. 発表標題 Photonic Crystal Circular Defect Laser for Intra-chip Optical Interconnections
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week (CSW) 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masahiko Kondow, Xiuyu Zhang, Yifan Xiong, and Masato Morifuji
2. 発表標題 Stimulated emission from photonic crystal cavity with AlO _x cladding layer
3. 学会等名 2016 Collaborative Conference on 3D & Materials Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yifan Xiong, Tomoyuki Okada, Xiuyu Zhang, Masato Morifuji, and Masahiko Kondow
2. 発表標題 Numerical Demonstration of the Feasibility of the Current Driven Photonic Crystal Laser Diode Used for Wavelength Division Multiplexing
3. 学会等名 the 43rd International Symposium on Compound Semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Xiuyu Zhang, Kentaro Hashimura, Yuta Imada, Takahumi Hino, Tomoyuki Okada, Masato Morifuji, and Masahiko Kondow
2. 発表標題 GaAs-based 2-dimensional photonic crystal slab with large r/a used for wavelength-division multiplexing
3. 学会等名 the 43rd International Symposium on Compound Semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yifan Xiong, Xiuyu Zhang, Elbert He, Ryo Tezuka, Takafumi Hino, Satoshi Kasamatsu, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, and Masahiko Kondow
2. 発表標題 Photonic Crystal Laser with Low-Quality Factor
3. 学会等名 the 25th International Semiconductor Laser Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 光集積回路及び集積回路	発明者 近藤正彦、宮本雄次、森藤正人	権利者 大阪大学
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2019/019997	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 光集積回路及び集積回路	発明者 近藤正彦、宮本雄次、森藤正人	権利者 大阪大学
産業財産権の種類、番号 特許、2018-099926	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	梶井 博武 (Kajii Hirotake) (00324814)	大阪大学・工学研究科 ・准教授 (14401)	
研究分担者	森藤 正人 (Morifuji Masato) (00230144)	大阪大学・工学研究科 ・助教 (14401)	
研究分担者	丸田 章博 (Maruta Akihiro) (40252613)	大阪大学・工学研究科 ・教授 (14401)	
研究分担者	村上 博成 (Murakami Hironaru) (30219901)	大阪大学・レーザー科学研究所・准教授 (14401)	追加：平成29年7月4日
研究分担者	上向井 正裕 (Uemukai Masahiro) (80362672)	大阪大学・工学研究科 ・助教 (14401)	