

Oral presentation | CS Code-sharing session : 【CS.5】 Code-sharing Session of 3.10 & 3.12

📅 Wed. Sep 18, 2024 9:30 AM - 12:00 PM JST | Wed. Sep 18, 2024 12:30 AM - 3:00 AM UTC 🏢 A34 (TOKI MESSE 3F)

[18a-A34-1~9] CS.5 Code-sharing Session of 3.10 & 3.12

Yasutomo Ota(Keio Univ.), Haisong Jiang(Kyushu University)

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[18a-A34-1]

Fabrication and room-temperature continuous-wave lasing of circular defect in two-dimensional photonic crystal laser with convex edge structure

○Rubing Zuo¹, Yuki Adachi¹, Yuto Kudo¹, Hanqiao Ye¹, Tetsuya Yagi¹, Masato Morifuji¹, Hirotake Kajii¹, Akihiro Maruta¹, Masahiko Kondow¹ (1.Osaka Univ.)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[18a-A34-2]

Demonstration of injection locking of photonic-crystal lasers

○Takuya Inoue¹, Ryohei Morita^{1,2}, Masahiro Yoshida¹, Kenji Ishizaki¹, Menaka De Zoysa¹, Susumu Noda¹ (1.Kyoto Univ., 2.Tohoku Univ.)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[18a-A34-3]

Investigation of power scalability in InP-based photonic-crystal surface-emitting lasers

○Yuhki Itoh^{1,2}, Takeshi Aoki^{1,2}, Kosuke Fujii^{1,2}, Rei Tanaka¹, Makoto Ogasawara¹, Yusuke Sawada¹, Kenichi Machinaga¹, Shun Kimura¹, Hiroyuki Yoshinaga^{1,2}, Naoki Fujiwara^{1,2}, Hideki Yagi¹, Masaki Yanagisawa¹, Masahiro Yoshida², Takuya Inoue², Menaka De Zoysa², Kenji Ishizaki², Susumu Noda² (1.Sumitomo Electric Industries, 2.Kyoto Univ.)

📌 English Presentation

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[18a-A34-4]

First emission of active nano-pixel waveguide using InGaAsP-MQW membrane

○(M2)ZHESHENG LEI¹, Islam Mohammad Shafiqul¹, Haisong Jing¹, Ryota kuwahata¹, Eisaku Kato², Kiichi Hamamoto¹ (1.I-Eggs, Kyushu Univ., 2.The Univ. of Tokyo.)

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[18a-A34-5]

Lasing Characteristics of GaInAsP SCH-MQW Laser Diodes Grown on Hydrophilic Bonded InP-Silicon Substrate

○(DC)Liang Zhao¹, Yada Ryosuke¹, Zhang Junyu¹, Kazuhiko Shimomura¹ (1.Sophia Univ.)

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

[18a-A34-6]

Investigation of device length dependence of 1.55- μ m-band QD-RSOA in threshold current of SiPh-based heterogeneous tunable laser

○(M2)Taisuke Matsuki¹, Atsushi Matsumoto², Shinya Nakajima², Toshimasa Umezawa², Chih-Hsien Cheng², Kouichi Akahane², Naokatsu Yamamoto², Tetsuya Kawanishi¹ (1.Waseda Univ., 2.NICT)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[18a-A34-7]

Lasing operation of etched nanowire integrated III-V silicon hybrid photonic crystals cavities

○Masato Takiguchi^{1,2}, Takuro Fujii^{1,3}, Hisashi Sumikura^{1,2}, Akihiko Shinya^{1,2}, Shinji Matsuo^{1,3}, Masaya Notomi^{1,2,4} (1.NTT NPC, 2.NTT BRL, 3.NTT DTL, 4.Tokyo Tech)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[18a-A34-8]

Enhancement of frequency modulation of multi-section photonic-crystal lasers

○Ryouhei Morita^{1,2}, Takuya Inoue¹, Shuei Nakano¹, Menaka De Zoysa¹, Kenji Ishizaki¹, Shota Ishimura³, Hidenori Takahashi³, Takehiro Tsuritani³, Masatoshi Suzuki⁴, Susumu Noda¹ (1.Kyoto Univ., 2.Tohoku Univ., 3.KDDI Reserch, Inc., 4.Waseda Univ.)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[18a-A34-9]

Proposal of high-speed modulation of high-peak-power short-pulse photonic-crystal surface-emitting lasers via the introduction of global band-edge frequency distribution and split electrodes

○(M1)Yuuki Shibata¹, Takuya Inoue¹, Ryohei Morita^{1,2}, Susumu Noda¹ (1.Kyoto Univ., 2.Tohoku Univ.)

凸型端面構造を有する円形欠陥

2次元フォトリック結晶レーザの作製と室温連続発振

Fabrication and room-temperature continuous-wave lasing of circular defect in two-dimensional photonic crystal laser with convex edge structure

阪大院工,[○]左 如氷, 足立 雄紀, 工藤 悠人, 葉 漢嶠, 八木 哲哉,

森藤 正人, 梶井 博武, 丸田 章博, 近藤 正彦

Osaka Univ., [○]Rubing Zuo, Yuki Adachi, Yuto Kudo, Hanqiao Ye, Tetsuya Yagi,

Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta and Masahiko Kondow

E-mail: zuo@e3.eei.eng.osaka-u.ac.jp

[序] チップ内の光通信を実現するために、我々は円形欠陥を有する電流注入型 2 次元フォトリック結晶 (CirD) レーザを提案し、研究と開発を行っている[1]。直交格子導波路 (OLW) は 20 nm の帯域幅を持ち、クロストーク干渉の少ない波長多重通信が可能である。しかし、試料を劈開して出射光を測定すると、劈開位置によって出射光強度が変化する。シミュレーションにより、出力端面に凸型端面構造を設置することで、この影響を排除でき、より高い光出力が得られる可能性が示された[2]。本研究では、この構造の作製技術を開発・確立し、実際に試料を作製し光学測定を行った。その結果、この構造を用いた室温連続レーザ発振を初めて観測した。

[実験方法と結果] GaAs コンタクト層、InAs QD 層を含む GaAs コア層、コア層を挟む上下 AlGaAs クラッド層の厚さは、それぞれ 180 nm、220 nm、550 nm である。作製手順は以下に示す。①電子線 (EB) リソグラフィーを用いて、基板上にフォトリック結晶パターンと凸型端面パターンを描画し、ドライエッチングによってパターンをエッチングした。三角格子の格子定数、空孔半径、端面の位置、半円形ポートの半径は先行研究の計算によって得られた最適値を採用した[2]。②H₂O/N₂ 蒸気中、395 °C で 45 分間、AlGaAs を AlGaO_x に酸化した。③凸型端面構造付近のコンタクト層を除去するために、劈開許容範囲である幅 10 μm の矩形パターンの重ね EB リソグラフィーとドライエッチングを行った。④BHF ウェットエッチングにより、凸型端面構造付近の AlGaAs/AlGaO_x クラッド層を除去し、Air クラッド層を形成した。⑤凸型部分が存在する矩形パターン内で試料を劈開した。劈開後の試料の上面 SEM 像を図 1 に示す。この手順で作製した試料の出力は劈開位置による影響がない。785 nm のレーザ光をポンプ光として光学測定を行った。出力パワーと入力パワーの関係を図 2 に示す。閾値パワーは 50 μW であり、通常の劈開端面を持つレーザ化した試料で得られた結果に近い[3]。入力パワー 210 μW のスペクトルを図 3 に示す。ピーク波長と半値幅はそれぞれ 1296.1 nm、0.09 nm であり、CirD レーザとして妥当な値である。これらの結果は、より高い出力を得るための端面形状の改良など、今後の研究に貢献するものと考えている。

[参考文献] [1] Y. Xiong, et al., *Photonics*, 6, 54 (2019)

[2] Y. Adachi, et al., *physica status solidi (a)*, 2300579 (2024)

[3] Y. Adachi, et al., *IEICE Electronics Express*, 20, 20230054 (2023)

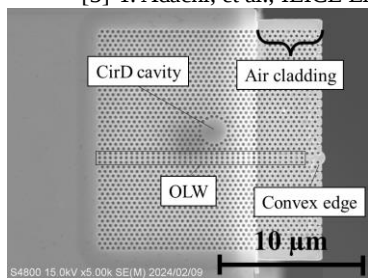


Fig. 1 Top-view SEM image of fabricated sample

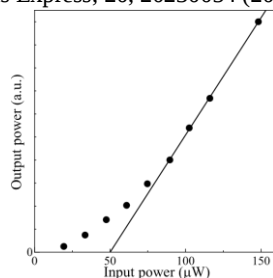


Fig. 2 Relationship between input power and output power

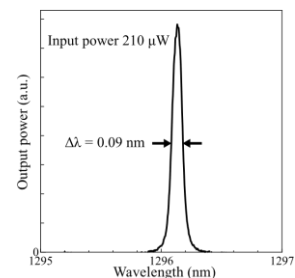


Fig. 3 Spectrum of the sample. Input power is 210 μW.

フォトニック結晶レーザーの光注入同期動作の実証

Demonstration of injection locking of photonic-crystal lasers

京大院工¹, 東北大院工², [○]T. Inoue¹, 森田遼平^{1,2}, 吉田昌宏¹, 石崎賢司¹, De Zoysa Menaka¹, 野田進¹

Kyoto Univ.¹, Tohoku Univ.², [○]T. Inoue¹, R. Morita^{1,2}, M. Yoshida¹, K. Ishizaki¹, M. De Zoysa¹, S. Noda¹

E-mail: t_inoue@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

【序】 我々は、フォトニック結晶レーザー(PCSEL)の高出力・高輝度化の実現に向けて、二重格子フォトニック結晶¹⁾の格子点設計の深化・最適化を進めており、これまでに、超大面积($\geq 3\text{mm}\Phi$)単一モード発振を実現するための設計指針の確立とともに²⁾, $3\text{mm}\Phi$ PCSEL を実際に作製し、 $1\text{GW}/\text{cm}^2/\text{sr}$ という大型レーザーにも匹敵する高輝度連続動作に成功している³⁾。また、前回、複数の PCSEL のコヒーレント結合動作の実現に向けて、PCSEL に外部光を注入した際の過渡応答解析を行い、出力光の $1/1000$ 程度のパワーの光注入による位相同期動作が実現可能であることを報告した⁴⁾。今回、実験的にも、光注入同期動作の実証に成功したので報告する。

【実験結果】 PCSEL の光注入同期に用いた光学系を Fig. 1(a)に示す。直径 1mm の単一モード二重格子 PCSEL (共振波長 λ_{pc}) に対して、面垂直方向から同じ偏光をもつ波長可変レーザー光 (入射波長 λ_{in} 、入射直径約 1mm 、入射パワー $P_{\text{in}} \sim 0.5\text{mW}$) をシード光として入射した。また、PCSEL の出射光を Fabry-Perot 共振器 (FSR: 10GHz 、波長分解能 $\Delta\lambda = 0.2\text{pm}$) に結合させ、その透過波長を走査することで、PCSEL の発振スペクトルの高分解測定を行った。まず、PCSEL の出力を $P_{\text{out}} = 0.33\text{W}$ に設定し、入射波長を約 1pm 刻みで変化させた際に得られた発振スペクトルを Fig. 1(b)に示す。入射波長が共振波長から十分離れている場合[領域(I)および(V)]には、注入電流揺らぎ等に起因する若干の波長変化を除いて、概ね元の共振波長での独立した発振が見られる。一方、入射波長が共振波長に近づいた場合 [領域(II)および(IV)]には、入射光が発振モードと相互作用するようになり、スペクトルに複数の発振ピークが現れた。さらに、入射波長と共振波長の差が約 1pm 以下になると[領域(III)]、入射光に一致した波長での単一モード発振が得られた。続いて、上記の領域(III)において、PCSEL の出力を $P_{\text{out}} = 0.62\text{W}$ に増加させ、バランスドディテクタを用いて PCSEL の出力光とシード光のヘテロダイン干渉波形 ($40\mu\text{s}$ 間) を測定した。得られた干渉波形を、光入射を行わない場合の結果と合わせて Fig. 1(c)に示す。光を入射しない場合 (灰線) は、PCSEL の注入電流や光源温度の時間的な揺らぎに起因して、ビート周波数にも $\pm 10\text{MHz}$ 程度の変動が生じたのに対し、光入射時 (赤線) には、PCSEL の発振波長と入射波長が一致し、一定の位相差で干渉が生じていることがわかる。詳細は当日報告する。

【謝辞】 本研究の一部は科研費 (24H00430, 22H04915) および BRIDGE のもとで行われた。**【文献】**

1) Yoshida *et al.*, Nat. Mater. **18**, 121 (2019). 2) Inoue *et al.*, Nat. Commun. **13**, 3262 (2022). 3) Yoshida *et al.*, Nature **618**, 727 (2023). 4) 井上他, 2024 年春季応物 23a-11E-8.

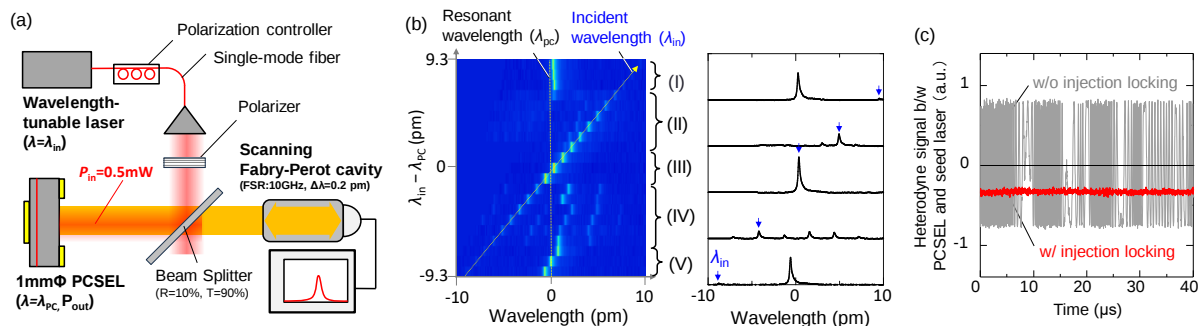


Fig. 1. (a) Experimental setup for injection locking of PCSELs. (b) Measured lasing spectra when $\lambda_{\text{in}} - \lambda_{\text{pc}}$ is varied. (c) Heterodyne beat note signals between the PCSEL and seed laser with and without injection locking.

InP 系フォトニック結晶レーザーの光出力のスケラビリティの検討

Investigation of power scalability in InP-based photonic-crystal surface-emitting lasers

住友電工¹, 京大院工², 伊藤 友樹^{1,2}, 青木 健志^{1,2}, 藤井 康祐^{1,2}, 田中 礼¹, 小笠原 誠¹,
澤田 祐甫¹, 町長 賢一¹, 木村 峻¹, 吉永 弘幸^{1,2}, 藤原 直樹^{1,2}, 八木 英樹¹, 柳沢 昌輝¹,
吉田 昌宏², 井上 卓也², メーナカデゾイサ², 石崎 賢司², 野田 進²

Sumitomo Electric Industries¹, Kyoto Univ.², Y. Itoh^{1,2}, T. Aoki^{1,2}, K. Fujii^{1,2}, R. Tanaka¹, M. Ogasawara¹,
Y. Sawada¹, K. Machinaga¹, S. Kimura¹, H. Yoshinaga^{1,2}, N. Fujiwara^{1,2}, H. Yagi¹, M. Yanagisawa¹,
M. Yoshida², T. Inoue², M. D. Zoysa², K. Ishizaki² and S. Noda²

E-mail: itoh-yuhki@sei.co.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

【はじめに】フォトニック結晶レーザー (PCSEL) は、活性層近傍に設けた 2 次元フォトニック結晶 (PC) の特異点 (Γ 点) における 2 次元共振作用を利用した面発光型の半導体レーザーであり、原理的に、高出力・高ビーム品質なレーザー発振が可能である^[1]。我々は、この特徴を活かした通信およびセンシング用光源として、InP 材料系の PCSEL を検討している^[2]。これまでに、1.3~1.5 μm 帯の InP 系 PCSEL において、二重格子 PC と金属ミラー電極の採用により室温 CW 駆動における高出力 (>330 mW)かつ単一モード動作を実証してきた^[2,3]。今回、PCSEL の特徴のひとつである出力のスケラビリティについて、1.5 μm 帯 InP 系 PCSEL で検討した。

【構造と特性】我々の PCSEL は、ドライエッチングにより PC を形成した後に、その上部に活性層を再成長することで、活性層へのエッチングダメージを回避している。また、100 nm 以下の InP スペーサー層を PC 上に再成長し、空孔深さを維持した状態で平坦化を行うことにより高アスペクト比(>5)の深い空孔を活性層近傍に形成できる。その結果、活性層と PC 層内の光閉じ込めを高めることが可能となっている。PC には楕円/円の二重格子 PC を採用し、垂直方向の発光効率を高めるとともに、出射面に対し反対方向へ放射される光を、出射面へ戻すための金属ミラー電極を導入している。今回、p 電極直径(L) 100~300 μm のデバイスを作製した。複数の異なるバンドの特異点での多モード発振や、同じバンドにおける高次モード発振の抑制のため、各デバイスサイズに対して、PC 構造を最適化し、光結合係数と放射係数を調整した。作製した PCSEL の 25°C、CW 駆動時の電流-光出力特性を Fig. 1 に、デバイス面積(S)としきい値電流 (I_{th})・最大光出力 (P_{max}) の関係を Fig. 2 に示す。すべてのデバイスサイズで発振が得られ、デバイス面積に対して、しきい値電流と最大光出力が線形に増加した。 $L = 300 \mu\text{m}$ のしきい値電流は 490 mA、光出力は 511 mW であった。また、Fig. 1 の図中に示すように、0.58°の狭小な円形ビームを観測した ($L = 300 \mu\text{m}$)。各デバイスの最大出力時の光スペクトルを Fig. 3 に示す。すべてのデバイスで安定的な単一モード発振が得られており、60 dB 以上の高い副モード抑圧比を観測した。

【謝辞】本研究の一部は、内閣府 SIP プログラム・BRIDGE プログラム、科研費(22H04915)の支援を受けた。

【参考文献】[1] S. Noda et al., Adv. Opt. Photonics 15 (2023) 977. [2] Y. Itoh et al., Optics Express 32 (2024) 12520.

[3] T. Aoki et al., Appl. Phys. Express 17 (2024) 042004.

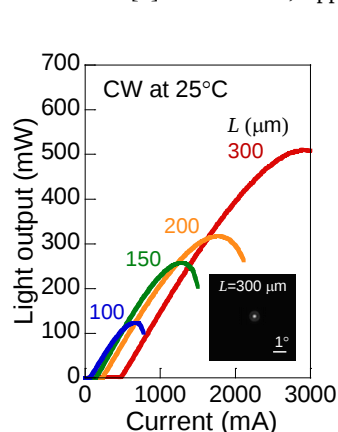


Fig. 1. Light output – current characteristics under CW condition at 25°C with far-field pattern for $L = 300 \mu\text{m}$.

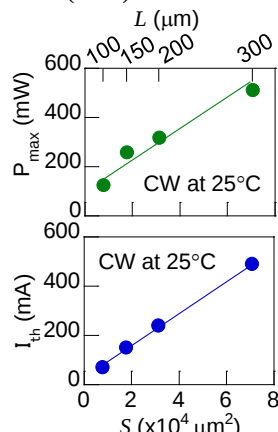


Fig. 2. Dependences of I_{th} and P_{max} on device area (S) at 25°C

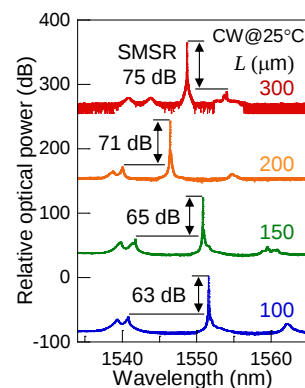


Fig. 3. Lasing spectra under CW conditions at 25°C.

First emission of active nano-pixel waveguide using InGaAsP-MQW membrane

I-Eggs, Kyushu Univ. ¹, The Univ. of Tokyo. ²,

Zhesheng Lei ¹, Islam Mohammad Shafiqul ¹, Haisong Jing ¹, Ryota kuwahata ¹, Eisaku Kato ²,
and Kiichi Hamamoto ¹ E-mail: lei.zhesheng.022@s.kyushu-u.ac.jp

1. Introduction

Direct modulation laser diode is one of the promising devices for data communication [1, 2]. One possible scheme for Tbps class modulation is to utilize photon-photon resonance (PPR) [3, 4]. We have proposed and demonstrated plural PPRs might lead to higher modulation frequency [5]; however, a restricting factor toward Tbps modulation is the cavity length because photon round-trip time limits the maximum modulation speeds. In this work, we carried fundamental research on active nano-pixel waveguide using InGaAsP-MQW membrane structure. Optically pumped active nano-pixel waveguide exhibits spontaneous light emission with Fabry-Perot resonance of 40 nm, 36 nm, and 31 nm spacing respectively that corresponds to the cavity length of approximately 20 μm , 24 μm , and 26 μm , respectively which implies plural interference paths whereas securing a few ten μm total cavity length.

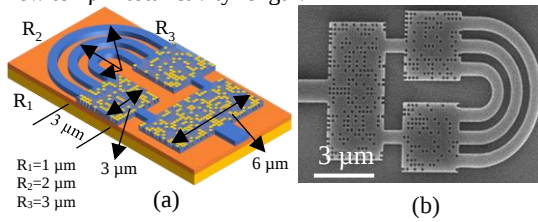


Fig. 1 Active nano-pixel waveguide. (a) Schematic, and (b) implemented device.

2. Device design and fabrication

Figure 1 shows the designed active nano-pixel waveguide. Three nano-pixel waveguide, and three bending waveguides are integrated with single input/output waveguide. 1×2 nano-pixel waveguide is designed with $3 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ footprint which incorporates 190 of $180 \text{ nm} \times 180 \text{ nm}$ nano-pixels. 1×3 nano-pixel waveguide is designed with $3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ footprint which incorporates 90 sections of $180 \text{ nm} \times 180 \text{ nm}$ nano-pixel. Three different bending waveguides are designed with the path lengths 23 μm , 26 μm and 29 μm , respectively. This will realize two PPRs in case of laser. As indicated in Fig. 1, input/output is with the common single waveguide where the facet is cleaved. InGaAsP-MQW membrane structure was realized using wafer-bonding on top Si via 300 nm thick SiO_2 . EB (Electron Beam) lithography and ICP (Inductively Coupled Plasma) dry-etching were used for the waveguide fabrication.

3. Results and discussion

Optical Pumping light of 1.3 μm DFB-LD was injected through the input waveguide. Thermo-electric cooler was used to control the device temperature under 25 $^\circ\text{C}$. For comparison, single bending waveguide integrated with 1×2 nano-pixel waveguide devices were also fabricated and evaluated simultaneously. Figure 2 shows the achieved spectrum of the single bending waveguide device. The designed path lengths are: (a) 23 μm , (b) 26 μm , and (c) 29 μm , respectively. As indicated in

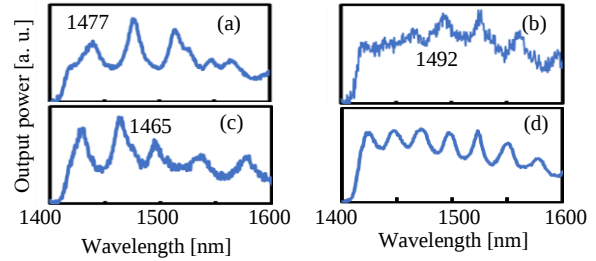


Fig. 2. Emission spectrum single bending waveguide. (a) Path length = 23 μm , (b) 26 μm , (c) 29 μm and (d) fully integrated device shown in Fig. 1.

the figure, each spectrum from (a) to (c) exhibits different Fabry-Perot resonance spacing of approximately 40 nm, 36 nm, and 31 nm that correspond to the path length of approximately 20 μm , 24 μm , and 26 μm , respectively. In addition, the peaks for (a) to (c) are slightly different each other. As indicated in the figure, the peaks are 1477 nm(a), 1492 nm(b), and 1465 nm(c), respectively. This fact leads to the possibility of interference each other, and we may design the peaks of PPR based on these results in the future. Figure 2 (d) shows the spectrum of fully integrated device (see Fig. 1). As indicated here, the resonance spacings were different and narrower than the case of Fig. 2 (a) to (c). Presently we think that the achieved spectrum was due to the plural interference of three different optical paths; however, further investigation is needed in the future.

4. Summary

We have confirmed the spontaneous light emission with Fabry-Perot resonance of approximately 40 nm, 36 nm, and 31 nm spacing that correspond to the path length of approximately 20 μm , 24 μm , and 26 μm , respectively spacing respectively in case of single bending waveguide cases. Moreover, different resonance spacing and peaks were confirmed in fully integrated device. The achieved results show the potential of plural photon-photon resonances when the device output reaches to the lasing threshold.

Acknowledgment

A part of this was supported by Kakenhi #22H01556. The authors thank Prof. Yoshiyasu Ueno (UEC) for his suggestion, and Prof. Takuo Tanemura and Prof. Yoshiaki Nakano (The Univ. Tokyo) for their technical support. A part of This work was supported by MEXT Grant Number JPMXP1223UT1113, the University of Tokyo, Japan.

References

- [1] S. Yamaoka, et al., Nat. Photon., **15**, 28 (2021)
- [2] R.I Woodward, et al., Nat. npj. Quan. Inf., **7**, 58 (2021)
- [3] K.Y. Lau, et al., J. Quan. Elect., **26**, 250 (1990)
- [4] D. D. Marcenac, et al., Photon. Tech. Lett., **6**, 1309 (1994)
- [5] X. He, et al., Photonics, **10**, 1298 (2023)

親水性直接貼付 InP/Si 基板上 GaInAsP SCH-MQW レーザの発振特性 Lasing Characteristics of GaInAsP SCH-MQW Laser Diodes Grown on Hydrophilic Bonded InP-Silicon Substrate

上智大学 理工学部, 趙亮, 矢田涼介, Zhang Junyu, 下村和彦
Sophia University, L. Zhao, R. Yada, JY. Zhang, K. Shimomura

E-mail: kshimom@sophia.ac.jp

はじめに

大規模集積回路の高速大容量通信を低消費電力で実現すべく、Si 基板上への InP 系光デバイスの集積が盛んに研究されている。これに対し、我々は、薄膜の InP と Si 基板を直接貼付法によって貼り合せ、この InP/Si 基板上に InP 系結晶の成長をすることで光デバイスの集積および作製を行う手法を提案してきた[1,2]。

今回、親水性直接貼付を用いて InP/Si 基板上に成長させた GaInAsP SCH-MQW LD 発振特性について報告する。親水性直接貼付けによるボイドパラメータとレーザのしきい値電流との関係を明らかにした。そして Si 基板上レーザにおいて、InP 基板上レーザと同等のしきい値電流値を得た。

実験方法

Si 基板上レーザの作製方法は以下の通りである。MOVPE 法で InP 基板上に GaInAs/InP/GaInAs 層を成長させ、厚さ 1-2 μm の薄膜 InP を得る。薄膜 InP と Si 基板を親水性直接貼付法で接合し、400°C、窒素雰囲気下で 1 時間アニーリングを行った。この InP-Si 基板上に MOVPE 法で図 1 に示す GaInAsP SCH-MQW レーザ構造を成長させた。接合の際に InP と Si の界面にボイドが生じ、これが光伝搬やキャリア注入に影響を与え、しきい値電流を増加させる。ボイドとレーザしきい値電流の関係を調べるため、ボイドの大きさと密度を観察した。直径と高さは Keyence VF-7510 で測定し、密度と占有面積はノマルスキ顕微鏡で測定した。それぞれウエハ面内で 15 か所測定し平均値を得た。

実験結果

図 2 はボイドの占有面積と Si 基板上レーザの発振しきい値電流密度の関係である。ボイドのパラメータの中で、ボイドの占有面積はシリコン基板上レーザのしきい値電流を低減するための重要なパラメータであることが分かった。Si

基板上の SCH-MQW LD のしきい値電流密度は、ボイド占有面積が 5%未満の場合、20°C で 1.03kA/cm² が得られた。この値は InP 基板上レーザと同等な値である。

参考文献

- [1] K. Matsumoto, J. Kishikawa, T. Nishiyama, Y. Onuki, and K. Shimomura, Jpn. J. Appl. Phys., vol.55, no.11, p.112201, 2016.
- [2] L. Zhao, G.K. Periyannayagam, R. Yada, J. Zhang, M. Kuroi, K. Shimomura, CSW2024, June 3-6, 2024, Paper No. 104650-D-2451.

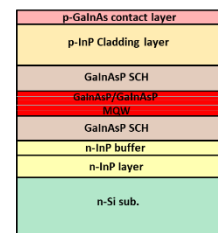


Fig. 1 Structure of SCH-MQW laser

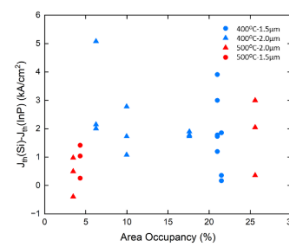


Fig. 2 Relationship between void area and threshold value

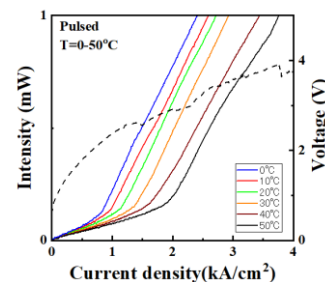


Fig.3 Laser Characteristics Curve of GaInAsP SCH-MQW
LD on InP/Si Substrate

異種材料集積波長可変レーザのしきい値電流における 1.55 μm 帯 QD-RSOA の素子長依存性の検討

Investigation of device length dependence of 1.55- μm -band QD-RSOA in threshold current of SiPh-based heterogeneous tunable laser

早大理工¹, 情通機構² ○(M2) 松木 太翼¹, 松本 敦², 中島 慎也², 梅沢 俊匡², Chih-Hsien Cheng², 赤羽 浩一², 山本 直克², 川西 哲也¹

Waseda Univ.¹, NICT², °T. Matsuki¹, A. Matsumoto², S. Nakajima², T. Umezawa², C. H. Cheng², K. Akahane², N. Yamamoto², and T. Kawanishi¹

E-mail: libra-tree70@akane.waseda.jp

情報トラフィックが急増する近年, 6G に向けてテラヘルツ波などの高周波利用を可能にするため, 我々は現在 RoF (radio over fiber) [1] による高周波信号生成用の低しきい値, 高出力, 波長可変, 2 波長同時発振型送信デバイスの実現を目指している。本研究では, その前段階として, 1.55 μm 帯における量子ドット反射型半導体光増幅器 (QD-RSOA) のデバイス長依存性に関する報告がほとんどないことから, 2 重リング共振器構造の Si フォトニクス (SiPh) と QD-RSOA を用いた異種材料集積レーザのしきい値電流と, QD-RSOA のデバイス長の関係性を評価したので報告する。

作製した QD-RSOA は, InP(311)B 基板上に成長した InAlAs クラッド層, 15 対の InAs QD 層と InGaAlAs 中間層, p+型 InGaAs コンタクト層から構成され, QD は高さ 3ML, リッジ構造幅 3.5 μm で, RSOA の片端面は AR コートされている。SiPh は, マイクロヒーターの熱光学効果で共振波長を可変できる直列 2 重リング共振器を備え, 波長フィルタおよび外部レーザ共振器として機能する。実験にはデバイス長 1.5mm から 3.5mm までの QD-RSOA を用い, それらの端面を SiPh チップに結合した。

Fig.1 に示すこのレーザの I-L 特性は, QD-RSOA のデバイス長が短いほど, しきい値電流が減少することを示唆している。これはデバイス長が短くなることで, 活性領域における注入電流の均一性やエネルギー効率が向上し, 利得特性が向上したことによると考えられる。Fig.2 に示す出力スペクトルでは, マイクロヒ

ーターで発振波長を調整することで, 全てのデバイス長において約 40nm の波長可変範囲を実現している。

本研究では, QD-RSOA のデバイス長によるしきい値電流の変化や波長可変性を実験的に評価し, QD-RSOA のデバイス長依存性を観測した。デバイス長の短縮による特性向上が見込まれ, 今後は最適長を検討していく。

- [1] A. Matsumoto, et al., CLEO2017, SW4C.6 (2017).
- [2] K. Akahane, et al., Phys. Status Solidi A, Vol. 208, No. 2, pp. 425–428 (2010).

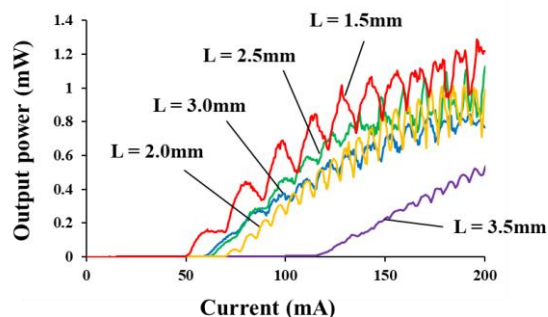


Fig.1 I-L curve of this heterogeneous QD tunable laser for each QD-RSOA device length

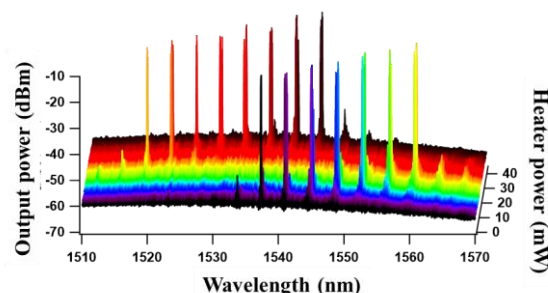


Fig.2 Output lasing characteristics when heater power of one of the ring was controlled (L = 1.5mm)

化合物エッチングナノワイヤ集積 Si フォトニック結晶共振器のレーザ発振

Lasing operation of etched nanowire integrated III-V silicon hybrid photonic crystals cavities

NTT ナノフォトニクス¹, NTT 物性研², NTT 先デ研³, 東工大理⁴

○滝口雅人^{1,2}, 藤井拓郎^{1,3}, 角倉久史^{1,2}, 新家昭彦^{1,2}, 松尾慎治^{1,3}, 納富雅也^{1,2,4}

NTT NPC¹, NTT BRL², Tokyo Tech.³

○M. Takiguchi^{1,2}, T. Fujii^{1,3}, H. Sumikura^{1,2}, A. Shinya^{1,2}, S. Matsuo^{1,3}, and M. Notomi^{1,2,4}

E-mail: masato.takiguchi@ntt.com

必要最小限の化合物半導体材料を Si チップに集積することは、光電融合素子や高性能な光デバイスを実現するのに重要である。我々はこれまで自己成長型の化合物半導体ナノワイヤを Si フォトニック結晶中のトレンチ構造に導入することで、レーザ・光スイッチ・受光器を実現してきた[1-3]。しかし、ナノワイヤの構造不均一性やトレンチ-ナノワイヤ間の意図しないエアギャップは、ナノワイヤへの光閉じ込め低下の原因となり、素子性能を制限してしまう。そこで、我々は化合物半導体ナノワイヤをエッチングプロセスで作製することで断面を矩形形状にし、Si フォトニック結晶のトレンチに隙間なく集積させることで、光閉じ込めの高いハイブリッドフォトニック結晶共振器の実現を提案した。前回の報告[4]では、ナノワイヤとトレンチ間にわずかな隙間が生じていたため、光閉じ込めが改善されずレーザ発振にいたらなかった。そこで今回は、ナノワイヤの太さとトレンチ幅をより精密に設計し、エアギャップのない構造を実現した。図1(a)は実際のナノワイヤ導入 Si フォトニック結晶素子である。ナノワイヤは活性層(InGaAsP 5MQW)をもつ InP ウェハをドライエッチングで加工し、それを転写プリント法と原子間力顕微鏡を用いて、L3 共振器内のトレンチに導入した。図1(b)はエアギャップと光閉じ込めの依存性である。図から 25nm 以上の隙間は光閉じ込めを大幅に低減させることが分かる。比較のために、ナノワイヤの太さとトレンチの幅が、(300 nm, 300 nm)、(300 nm, 400 nm)の 2 種類の共振器を作製した。図1(b)は、それぞれのサンプルの PL 測定 (pulse 励起) を行い、L-L 特性をまとめたものである。図からわかるように、前回同様エアギャップのあるサンプルは発振動作を示さなかったが、ギャップレスの素子は明瞭なレーザ発振を示した。さらに、CW 励起の場合についても、レーザ発振を示す線幅の狭窄化 (図 1(c))、波長のブルーシフト、光子相関による g2 の減少が確認できた。このことから、本構造により光閉じ込めと熱伝導の改善に成功したといえる。本研究は JSPS 科研費 23H01888 の助成を受けたものである。

[1] M. Takiguchi, et.al., APL Photonics, 2, 046106 (2017)

[2] M. Takiguchi, et.al., ACS Photonics, 7, 1016 (2020)

[3] M. Takiguchi, et.al., ACS Photonics, 7, 3467 (2020)

[4] 滝口他, 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 21a-A308-3

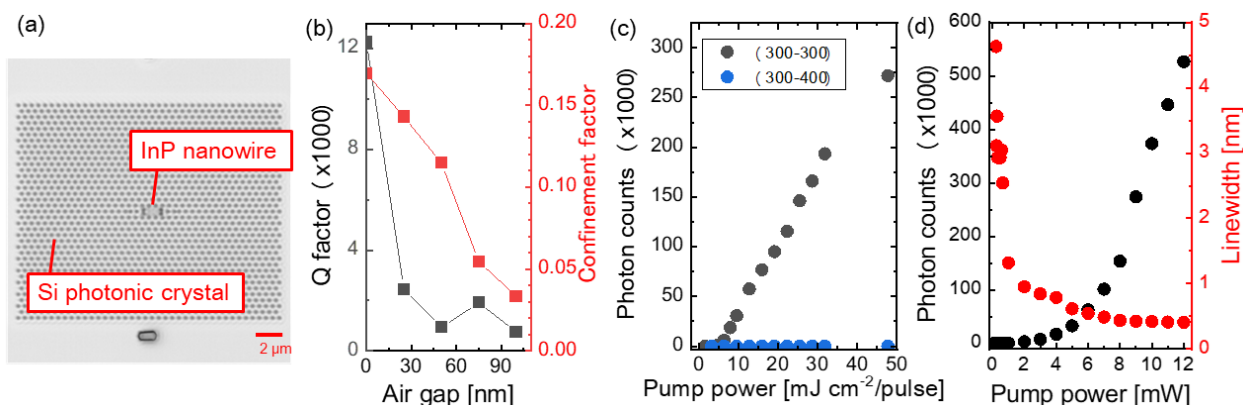


Fig. 1 (a) Optical microscope image of Si photonic crystal cavity with etching nanowire (b) Airgap vs Q factor and optical confinement factor. (c) L-L curve for different samples under pulse excitation. (d) L-L curve under CW excitation.

分割領域フォトリック結晶レーザーの周波数変調増大の検討

Enhancement of frequency modulation of multi-section photonic-crystal lasers

京大院工¹, 東北大院工², KDDI 総合研究所³, 早大理工⁴, ◦森田遼平^{1,2}, 井上卓也¹, 仲野秀栄¹,

De Zoysa Menaka¹, 石崎賢司¹, 石村昇太³, 高橋英憲³, 釣谷剛宏³, 鈴木正敏⁴, 野田進¹

Kyoto Univ.¹, Tohoku Univ.², KDDI Research, Inc.³, Waseda Univ.⁴, ◦R. Morita^{1,2}, T. Inoue¹, S. Nakano¹,

M. De Zoysa¹, K. Ishizaki¹, S. Ishimura³, H. Takahashi³, T. Tsuritani³, M. Suzuki⁴, S. Noda¹

E-mail: ryohei.morita.c1@tohoku.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

[序] 高出力(>W)・高ビーム品質動作可能なフォトリック結晶レーザー (PCSEL)¹⁾において, 高速(>GHz) な直接変調動作が可能となれば, 衛星間通信をはじめとした自由空間光通信への展開が期待される²⁾. 我々はこれまで, 周波数(FM)変調動作を可能とする分割領域 PCSEL 構造を提案するとともに³⁾, 実際に作製した素子においてワット級 FM 変調動作の初期実証に成功している⁴⁾. 今回, FM 変調動作の変調増大に向けて, 素子構造の改良設計を行ったので報告する.

[解析結果] 分割領域 PCSEL の基本構造の模式図を Fig. 1 (a)に示す. フォトリック結晶共振器は, Fig. 1(b)に示すように, 僅かな格子定数差 Δa を有する 2 領域に分割されており, 発振領域 (直径 $D = 500 \mu\text{m}$) 全体において単一モード発振を維持しつつ, 発振領域内部にバンド端周波数差が導入される. ここで, この格子定数の異なる 2 領域に一定のバイアス電流を注入しつつ, 互いに逆相の高周波変調電流を重畳することで, 2 領域の注入電流の差とバンド端周波数差に比例して, 瞬時発振周波数を高速に変化させることが可能になる³⁾. ここで, 逆相の変調電流注入を実現するための電極構造として, 前回の報告では, Fig. 2(a)に示すように出射面側の n 型電極を分割した構造を作製した⁴⁾. 各分割電極の注入電流割合を変化させた際の, 活性層の注入電流密度分布の計算結果を Fig. 2(b)に示すが, 分割電極から基板を介して活性層に到達するまでに電流が拡散し, 電流密度の変化量が比較的小さいことがわかる. そこで, Fig. 2(c)に示すように, 活性層に近い裏面の p 型電極を分割した構造を新たに検討した. 同構造における活性層の注入電流密度分布は Fig. 2(d)となり, 前回構造と比較して, 5~10 倍程度の大きな電流密度変化が得られることが期待される. 両構造について, 格子定数差を $\Delta a = 1.0 \times 10^{-4}a$ ($a = 276 \text{ nm}$) とし, 直流電流 1.25 A に振幅 0.15 A の逆相正弦波信号を重畳した際の周波数変調量の変化を Fig. 3 に示す. なお, 比較のため, 電極や共振器を分割していない通常の PCSEL の結果も示している. 同図より, p 側電極を分割した PCSEL は, n 側電極を分割した PCSEL よりも, 周波数変化量を 1 桁程度増大可能であることが期待される. 設計構造の作製結果を含め, 詳細は当日報告する.

[謝辞] 本研究の一部は科研費 (22H04915, 24H00430, 24K17622) および BRIDGE の支援を受けた.

[文献] 1) M. Yoshida et al., *Nat. Mater.* **18**, 121 (2019). 2) S. Ishimura et al., *J. Lightw. Technol.* **41**, 3688 (2023). 3) 井上 他, 2023 年春応物, 17p-A303-3 (2023). 4) 仲野 他, 2024 年春応物, 23p-11E-7 (2024).

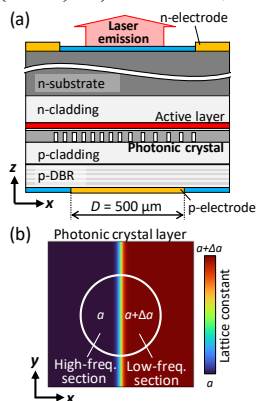


Fig. 1. (a) Schematic of a two-section PCSEL. (b) Lattice constant distribution.

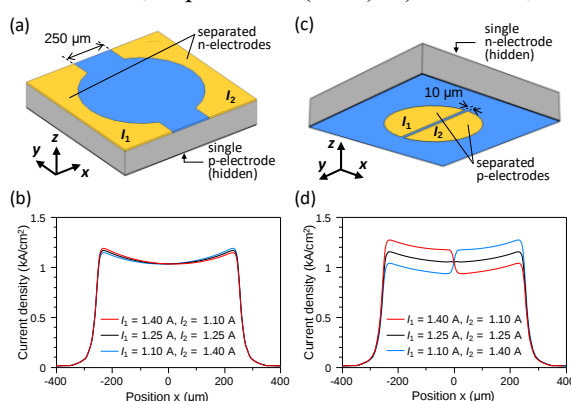


Fig. 2. (a) Schematic structure and (b) calculated current density distribution with separated n-electrodes. (c) Schematic structure and (d) calculated current density distribution with separated p-electrodes.

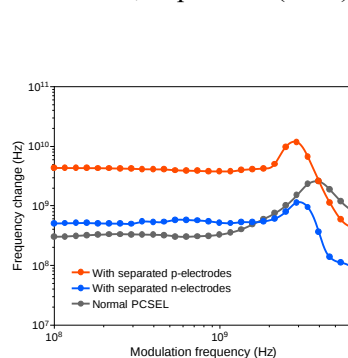


Fig. 3. Calculated frequency change as a function of modulation frequency.

大域的バンド端周波数分布と分割電極導入による短パルス・高出力 フォトニック結晶レーザーの高速変調動作の提案

Proposal of high-speed modulation of high-peak-power short-pulse photonic-crystal surface-emitting lasers via the introduction of global band-edge frequency distribution and split electrodes

京大院工¹, 東北大院工², [○]柴田悠樹¹, 井上卓也¹, 森田遼平^{1,2}, 野田進¹

Kyoto Univ.¹, Tohoku Univ.² [○]Y. Shibata¹, T. Inoue¹, R. Morita^{1,2}, S. Noda¹

E-mail: shibata.y@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

[序] フォトニック結晶レーザー(PCSEL)¹⁾は、2次元フォトニック結晶の特異点(Γ 点等)での共振作用を用いた高輝度面発光レーザーである。我々は、これまで、大域的バンド端周波数分布を導入した短パルス PCSEL を提案し²⁾、60A の電流注入でピーク出力 500W 級の高出力・短パルス動作の実証に成功している³⁾。上記の短パルス PCSEL において、任意信号による高速(>GHz)変調動作が可能となれば、月-地球間等の超長距離衛星間光通信への展開が期待される。今回、大域的バンド端周波数分布を導入した PCSEL に分割電極構造を導入し、直流電流と変調電流信号を分けて注入することで、高出力かつ高速変調動作を実現する手法を見出したので報告する。

[原理および解析結果] 提案する PCSEL の分割電極構造の模式図を Fig.1(a)に示す。電流注入領域の外径は 1000 μm であり、Fig. 1(c)に示す直流電流 (振幅 I_1) を注入するドーナツ状の領域 A と、Fig. 1(d)に示すパルス電流 (振幅 I_2 、パルス幅 Δt 、クロック周波数 f) を注入する中央領域 B (直径 d) に分割している。また、フォトニック結晶層には、中央が高周波数となるバンド端周波数分布 [Fig. 1(b)]を導入しており、禁制帯の効果により光を中央に局在させる働きを有する。同構造において、パルス電流注入前 ($t=t_1$) および注入時 ($t=t_2$) のデバイス内部のキャリア分布および光子密度分布の計算結果の一例を Fig.1(f)(g)に示す。 $t=t_1$ においては、領域 A のみにキャリアが蓄積された状態となり、光が局在する中央部の吸収損失が大きいと、発振が抑制される。一方 $t=t_2$ では、領域 B へのキャリア注入により吸収損失が減少して発振が開始されるが、その後、Fig.1(g)に示すように領域 A に蓄積されたキャリアをも消費しながら光が全体に広がるため、Fig.1(e)に示すような高出力な短パルス発振が得られることが期待される。具体的に $d=200 \mu\text{m}$ 、 $I_1=18 \text{ A}$ 、 $I_2=0.4 \text{ A}$ 、 $f=0.5 \text{ GHz}$ 、 $\Delta t=1 \text{ ns}$ として、Fig.2(a)に示す任意電流信号を領域 B に注入した際の、光出力の時間変化を解析した結果を Fig.2(b)に示す。入力信号に応じた 300W 級の高出力・短パルス信号が得られた。本研究の一部は科研費の支援を受けた。[文献] 1) Noda *et al.*, Adv. Opt. Photon. **15**, 977 (2023). 2) Inoue *et al.*, Nat. Commun. **14**, 50 (2023). 3) 上田他, 2024 春季応物 22p-11E-7.

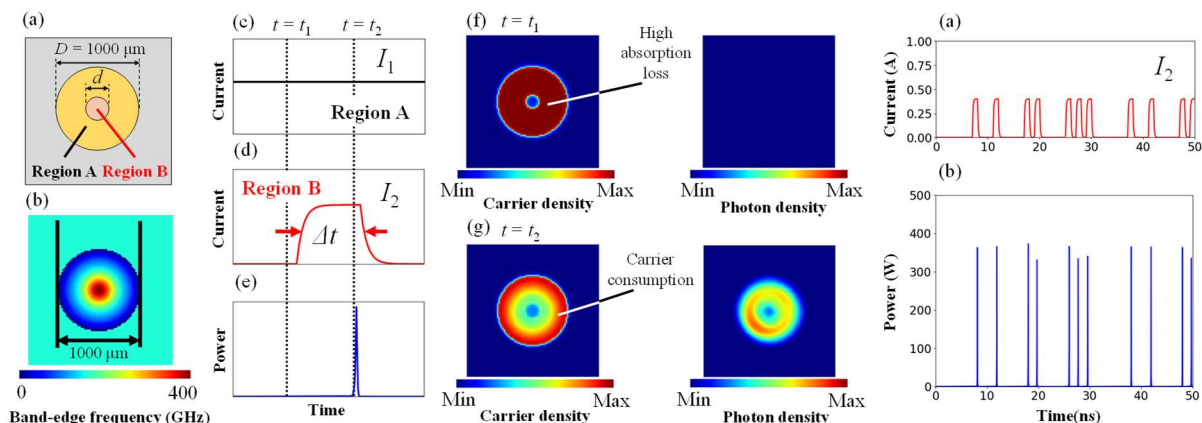


Fig. 1 (a)(b) Schematic of the split electrodes and the band-edge frequency distribution of the proposed PCSEL. (c)(d) Injection current waveform for each electrode. (e) Temporal change of the output power. (f)(g) Carrier and photon density before and after lasing oscillation.

Fig. 2. (a) Pulse injection current in Region B. (b) Calculated output power of the proposed PCSEL.