

光センシング用広帯域半導体光源

大郷 育*, 森島 嘉克*, 向井 厚史*, 矢口 純也*, 浅野 英樹*

Broadband Semiconductor Light Source for Optical Sensing

Tsuyoshi OHGOH*, Yoshikatsu MORISHIMA*, Atsushi MUKAI*, Junya YAGUCHI*, and Hideki ASANO*

Abstract

Semiconductor light emitting devices with a high-power output and a broadband spectrum characteristic are accepted as a promising light source for the optical sensing system. However, the characteristics of a high-power and a broadband spectrum are in a trade-off relationship. We have successfully fabricated a broadband emitting diode by multiplying emission areas. This device has the performance of 1.9 times of spectrum width compared with the conventional devices of identical outputs. This result shows the device performance exceeds that of the conventional trade-off.

1. はじめに

光センシングとは、光を対象物に照射することで生じる相互作用を観測し、対象物の構造・特性を非破壊的に調べる技術である。最近では医療診断分野において積極的に応用され、OCT (Optical Coherence Tomography)¹⁾ や血糖値計測²⁾、血液中の酸素濃度測定などが研究されている。これらは、波長 $0.6\mu\text{m} \sim 1.2\mu\text{m}$ 前後の近赤外領域の光がもつ生体透過性を利用して、生体内部の様子、または特定物質の状態を画像化することを目的としている。

光センシングでは、対象物からの情報量を増やすため、波長の異なる光を放出できる広帯域光源が用いられる。広帯域光源にはさまざまなものがあるが、医療診断用として要求される波長帯域、輝度、集光特性、コストを満たす光源を考えた場合、光半導体素子が最も有望である。このような広い波長帯域を持つ光半導体素子はスーパールミネッセントダイオード (SLD) と呼ばれ、半導体レーザの高輝度性と発光ダイオードが持つ低コヒーレンス性を備えた素子として知られている。

光半導体を用いた際の問題点は、広帯域特性と高出力特性の両立がむずかしいことにある。Fig. 1は、1つの発光層から成るSLDを電流 $0 \sim 400\text{mA}$ にて駆動さ

せ、最大出力値における波長帯域幅を素子長違いで示したものである。この図から、素子長が長くなるとともに出力は向上するものの、波長帯域幅は狭くなることがわかる。これはSLDの発光原理と関係がある。反転分布の大きな半導体利得媒質中でランダムに発生した自然放出光は、素子中を通過する間に誘導放出過程で增幅され、增幅自然放出光として放出される。Fig. 1において、素子長を長くすることは誘導放出過程を増やすことに相当する。しかし、誘導放出は外部から入射された光と同じ波長、位相、偏光の光を放出する（増幅する）ものであるため、誘導放出の機会を増やすほど高出力化されるものの、同一波長光の成分が増えるため波長帯域は狭くなる。このことは、広帯域化と高出力化がトレードオフの関係にあることを示している。

われわれは、この課題に対して新たな素子構造を採用し、トレードオフを超える特性を実現するに至った。本稿では、その素子特性と広帯域化・高出力化を実現させた技術について述べる。

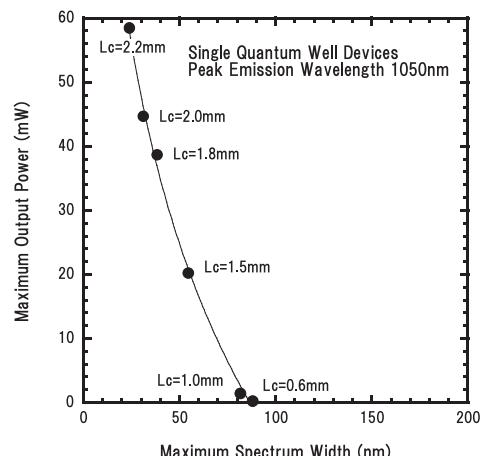


Fig. 1 Change in the spectrum width as a function of output power.

本誌投稿論文（受理2008年10月14日）

* 富士フイルム（株）R&D統括本部

先端コア技術研究所

〒258-8577 神奈川県足柄上郡開成町牛島577

* Frontier Core-Technology Laboratories

Research & Development Management Headquarters

FUJIFILM Corporation

Ushijima, Kaisei-machi, Ashigarakami-gun, Kanagawa

258-8577, Japan

2. 素子構造

光半導体素子の結晶成長はGaAs基板上へ減圧MOVPE法にて行なった。発光層は波長1.0～1.1μm帯での発光が可能なInGaAs量子井戸層を用いた。これは、医療応用を考えた場合、生体内における被測定部を覆う水の分散、吸収の影響を小さくすることが望ましいが、波長1.0μm帯の光にてその影響が最も小さくできるためである³⁾。

われわれは、広帯域化と高出力化を両立させる方法として、異なる波長で発光する領域を素子の縦方向および素子長方向に複数設けた構造(Fig. 2)を用いた。これは、発光スペクトルが異なる領域からの光を合波することにより、広帯域化および高出力化させようとするものである。この構造における複数の発光部は、それぞれの利得スペクトルが重ならず、互いの光で誘導放出が生じないように設計されている。

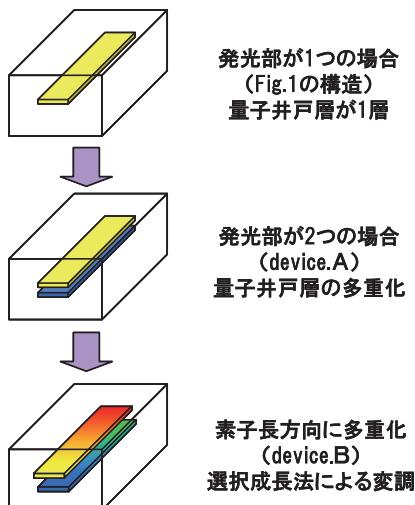


Fig. 2 Schematic structure of SLD devices.

素子長方向に複数の発光部を形成する手段には選択成長方法を用いた。これは、Fig. 3に示すように絶縁膜マスクを基板上に部分的に形成し、絶縁マスク上の領域から絶縁マスクで被覆されていない領域へ原料を移動させて所望の領域へ原料を集中させる結晶成長方法である。

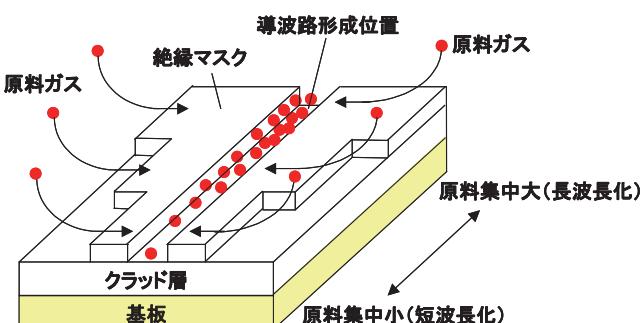


Fig. 3 Crystal growth method of device B.

これにより、素子長方向における量子井戸層の膜厚と組成を制御することができる。

広帯域光半導体素子に特徴的な構造として斜め光導波路構造がある。これは、光導波路を端面の垂直方向に数度傾斜させ、かつ反射防止膜を設けることで素子端面反射による共振器形成を抑え、発振を抑制するものである。ここでは、3.0μm幅の導波路を6度傾斜させている。素子はチップ化した後、放熱特性を高めるためにAlNサブマウントにジャンクションアップ形態で融着してキャリアに実装を行なった(Photo 1-(a))。

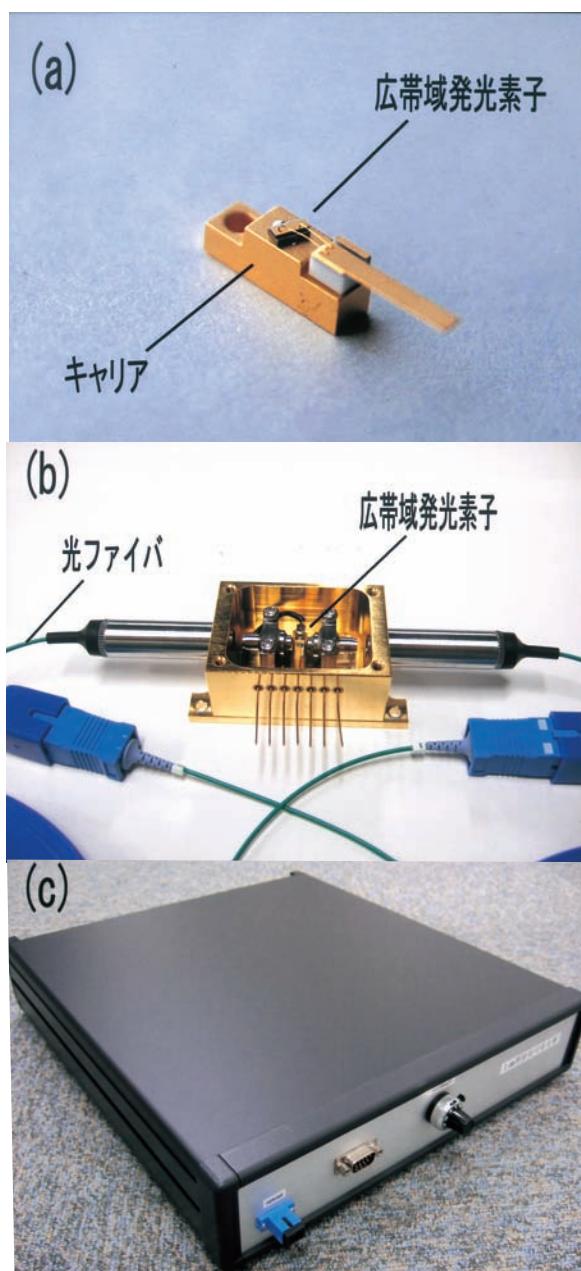


Photo 1 Photograph of light source.
 (a) Broadband emitting device
 (b) Broadband emitting module
 (c) Wavelength swept laser unit

3. 広帯域特性

発光領域の多重化が波長帯域と出力特性に与える効果を明らかにするため、Fig. 2のdevice.Aおよびdevice.Bの素子を作製した。評価は、Fig. 1と同様に素子を0～400mAにて駆動させ、最大出力値における発光波長幅を測定することを行なった。各素子の発光スペクトルをFig. 4に示す。素子長が同じ場合(1.5mm)、device.AはFig. 1で示した特性と比較して波長帯域で1.4倍、出力で1.65倍の値が得られた。また、device.B(素子長1.0mm×3領域)では、素子長1.0mmと比較して出力は1mW程度と変わらないものの、波長帯域が1.9倍の155nmを得ることができた。

この結果をFig. 1と比較した図をFig. 5に示す。この図から、発光部が1つである素子では得られなかった「波長帯域と出力特性のトレードオフ」を超えた特性が、発光部の多重化により得られていることがわかる。

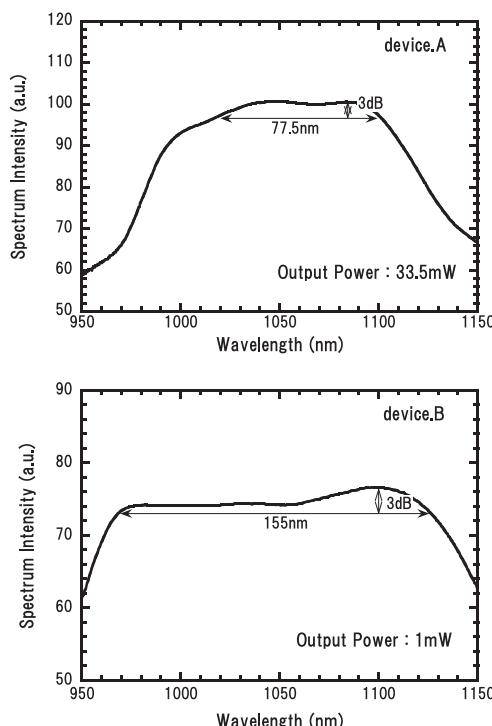


Fig. 4 Spontaneous emission spectra.

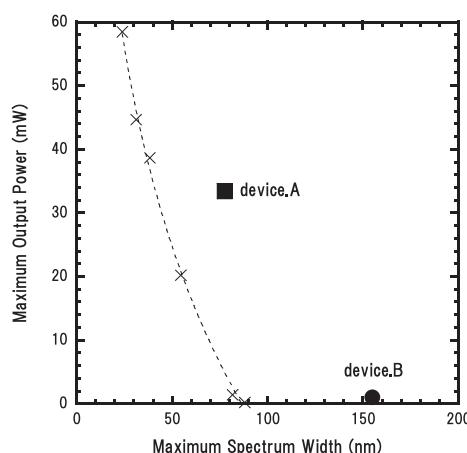


Fig. 5 Output power versus spectrum widths for devices with multi-emission areas.

4. 波長可変特性

光センシング用広帯域光源には、これまで述べてきた「広帯域な波長の光を一度に放射する光源」とは別に、「レーザ光の波長を広帯域に変化できる波長可変光源」が用いられることが多い。そこで、われわれはdevice.A構造素子を用いて波長可変光源の試作を行なった。

波長可変の方式にはFig. 6に示すリングレーザ型外部共振器構造を採用した。その動作原理は次の通りである。光半導体素子から放出された広帯域な光は、波長フィルタによって特定の波長光だけが透過し、リングを周回することで再び光半導体素子へと戻される。戻ってきた光は光半導体素子により增幅され、再びリングレーザ内を周回する。これを繰り返し、共振器内の損失と光半導体素子の利得がつりあつた時点でレーザ発振が生じる。

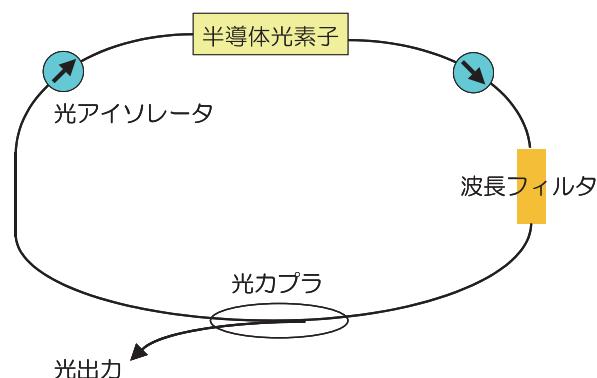


Fig. 6 Configuration of the wavelength swept laser.

このレーザ光は光カプラにより取り出すことができる。そして、波長フィルタの透過波長を変えることでレーザ光の波長を変えることができる。

リングレーザを構成している各部品は光ファイバにより接続し、振動や環境変化が、レーザ特性に与える影響を少なくしている。光半導体素子もPhoto 1に示すように素子と光ファイバとを一体化させたパッケージング化をすることで、素子と光ファイバとの光路を安定化させている(Photo1-(b))。

Fig. 7に波長可変特性を示す。波長フィルタには手動

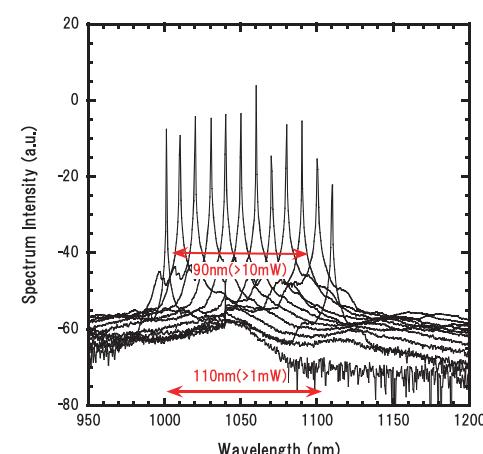


Fig. 7 Laser spectra at different wavelengths.

にて透過波長が変えられる誘電体多層膜フィルタを用い、素子の駆動条件は25°C, 400mAとした。1mW出力以上を可変幅とした場合で、110nm, 10mW出力以上を可変幅とした場合でも90nmの可変幅が得られた。また、ファブリペロー型波長フィルタを用いて高速波長可変性の評価を行ない、スキャン速度2kHzにおいても、ほぼ手動による波長可変時と同様の出力および波長可変特性を得ることを確認した。

5. 波長可変特性

スーパールミネセントダイオードは、半導体レーザと比較して駆動電流値が高く、また、発振を伴わないとめ電力-光変換効率が低い。そのため、寿命性能は半導体レーザよりも劣るとされている。また、今回作製した波長1.0～1.1μm帯で発光するInGaAs活性層は格子不整合による歪みを内在しており、その点からも寿命性能が危惧される。

そこで、まず、今回作製したdevice.A素子の劣化モード解析を行なった。Fig. 8は、素子を30mW, 25°C, APC（出力一定）駆動にて動作させた時の電流-光出力特性の経時変化を示したものである。この図から、経時とともに最大光出力値が低下し、駆動出力と一致したときに素子が故障することがわかる。この結果は、本素子の劣化要因が、同波長帯の半導体レーザにみられる端面破壊による急速劣化ではなく、素子内部での緩慢劣化であることを示している。

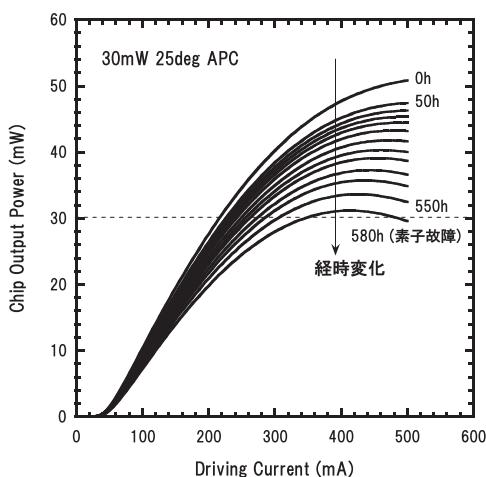


Fig. 8 Light output versus current characteristics of SLD devices with various aging times.

この結果をもとに、素子構造の最適化を行なった素子の寿命試験の結果をFig. 9に示す。駆動条件は30mW, 25°C, APC駆動である。現時点4,500時間が経過しているが、駆動電流値が400mA程度と大きいにもかかわらず、大きな劣化もなく安定に動作している。

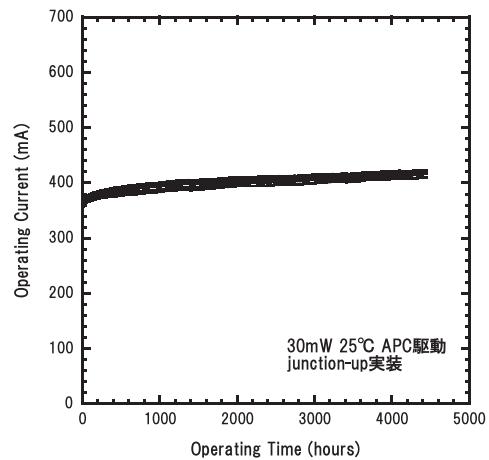


Fig. 9 Lifetime test results for 1050nm band SLD devices.

6. 波長可変特性

光センシング光源として波長1.0μm帯広帯域光半導体素子を開発した。広帯域化と高出力化はトレードオフの関係にあるが、新たな素子設計を導入することでトレードオフを上回る性能を得ることができた。

参考文献

- 1) D.Huang; E.A.Swanson; C.P.Lin; J.S.Schuman; W.G.Stinson; W.Chang; M.R.Hee; T.Flotte; K.Gregory; C.A.Puliafito; J.G.Fujimoto. Science. **254**, 1178 (1991).
- 2) K.Maruo; T.Oota; M.Tsurugi; T.Nakagawa; H.Arimoto; M.Hayakawa; M.Tamura; Y.Ozaki; Y.Yamada. Appl. Spectrosc.. **60**, 1423 (2006).
- 3) Y.Wang; J.Nelson; Z.Chen; B.Reiser; R.Chuck; R.Windeler. Opt. Exp.. **11**, 1411 (2003).