

レーザー点火向け808 nm帯高出力VCSELファイバー結合型 モジュールの開発

808nm Range High-power Fiber-coupled VCSEL Module for Laser Ignition

泉谷 一磨* Kazuma IZUMIYA	大倉 佑介* Yusuke OHKURA	沼田 雅之* Masayuki NUMATA	新井 伸幸** Nobuyuki ARAI	池田 圭介** Keisuke IKEDA
佐々木 譲* Yuzuru SASAKI	萩田 健太郎* Kentaro HAGITA	軸谷 直人* Naoto JIKUTANI	鈴木 剛*** Tsuyoshi SUZUDO	

要 旨

レーザー点火における励起光源用として、808 nm帯の高出力VCSELモジュールの開発を行った。高効率活性層の開発、放熱性を高める接合技術の開発、ファイバーカップリングを考慮した設計と光学部材実装技術への取り組みにより、従来よりも高出力化を実現した。製作したモジュールは非常にコンパクトかつアレイ出力311 W、ファイバーアウト出力204 Wという高出力を実現し、これまでに報告されたファイバー結合型VCSELモジュールの中で最大となる出力を確認した。また、このVCSELモジュールを用いてYAGレーザーを励起し受動Qスイッチ動作をさせて、レーザー点火の実用上必要な出力とされる2.5 mJ × 4パルスの出力を得た。

ABSTRACT

We developed an 808nm range fiber-coupled high-power VCSEL module as a pump source for laser ignition. In this module, array output of 311W and fiber output of 204W were obtained (coupling efficiency was 65%). We realized this module by improvement of external quantum efficiency, reduction of thermal resistance, and optimization of fiber-coupled design. The module has the highest power as fiber-coupled VCSEL module as far as we know. By using this VCSEL module, a passively Q-switched laser output with 2.5mJ × 4 pulses was achieved. This pulse energy is enough to operate an engine stably.

* リコー未来技術研究所 光エレクトロニクス研究センター
Opto-electronics R&D Center, Ricoh Institute of Future Technology

** 画像エンジン開発本部 ICT開発センター
Imaging Core Technology Center, Imaging Engine Development Division

*** リコーインダストリアルソリューションズ株式会社 オプトデバイスセンター
RICOH Industrial Solutions Inc., Opto Device Center

1. 背景と目的

1-1 背景

近年、低消費エネルギー、低環境負荷社会への関心はますます高いものとなってきている。クリーンなエネルギー源である天然ガスを燃料としたガスエンジンと、これを用いたコージェネレーションシステムは今後急速な普及が進むことが見込まれており、更なる高効率化が強く求められている。

内燃機関であるガスエンジンの高効率な動作を実現するための新点火手法として、レーザーによる点火技術の有用性は1970年代から指摘されており、近年のマイクロチップレーザーに代表される高輝度短パルスレーザー光源の小型化²⁾と相まって、ここ数年間非常に注目を浴びる技術となっている。

レーザー点火の実用化にあたり、最も有力視されているのが固体レーザー結晶であるNd:YAG/Cr:YAG (YAG:Yttrium Aluminium Garnet) を受動Qスイッチ動作させることによって発生させた高輝度短パルスレーザーを点火源として用いる構成である³⁾。この構成では、固体レーザー結晶であるYAGを励起するための励起光源が必要となり、またこの励起光源こそが高輝度短パルスのエネルギーを決定するキーデバイスとなる。

本稿では、この励起光源として我々が開発した808 nm帯の高出力VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser: 垂直共振器型面発光レーザー) モジュールについて報告する。

1-2 VCSELとは

VCSELは、1977年に東京工業大学の伊賀健一教授によって提案された日本発のレーザーデバイスである。従来の端面発光型半導体レーザーが基板面に水平方向にレーザービームを出射するのに対し、VCSELは基板面に垂直方向にレーザービームを出射する。

VCSELは書き込み光源として好適なデバイスとされ、我々はFig. 1に示すレーザープリンタ用の

40chVCSELアレイを開発し、製品化に成功している⁴⁾。

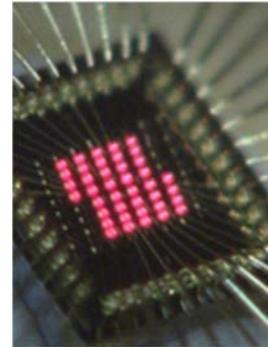


Fig. 1 40ch VCSEL array for laser printer of RICOH.

1-3 レーザー点火におけるVCSELの優位性

VCSELは、端面型レーザーには無い新しい特長を備えており、主に以下に挙げる3つの理由から、レーザー点火における励起源として非常に期待されている。

1つ目は、温度に対する波長の安定性が非常に高いことである。YAG結晶はFig. 2に示されるように吸収係数の波長依存性が大きく、励起光源の波長範囲は803~810 nm程度に限定される。このため、励起光源の波長が安定していることは非常に重要である。VCSELの共振器は、共振器長が波長オーダーと同程度の長さのため、単一縦モード動作が可能であり、温度が変化しても縦モード間のモードホップが無い。これに対し、端面型レーザーは一般的に共振器長が長いいため複数の縦モードが存在し、そのモード間隔も狭い。このため、温度変化による隣接したモードへのモードホップが生じ、波長が大きく変動する現象が起こりやすい。以上のような共振器構造の違いから、VCSELの温度に対する波長変化は端面型レーザーに対して1/10程度と非常に小さい⁵⁾。

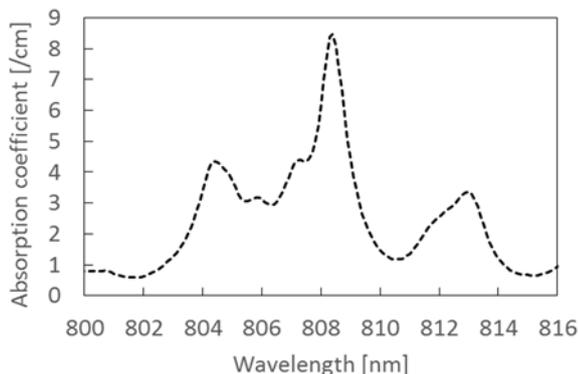


Fig. 2 Absorption coefficient of YAG.

2つ目の理由は、高出力動作に対する高い信頼性である。端面レーザーでは共振器端面において光強度の高い活性領域が晒されているのに対し、VCSELでは電流の注入される活性領域が素子中央部に限定されており、露出していない。このため、端面損傷による故障モードが存在せず、高出力化しても高い信頼性を保つことができる。

3つ目の理由は、モノリシックな二次元アレイを容易に実現できることである。これにより、後述するMLA (Micro Lens Array) 集光光学系を用いることで端面レーザーと比較して非常に小型で安価なモジュール化を実現することが可能となる。

1-4 レーザー点火の概要

Fig. 3は、従来の点火方式である火花点火(a)と、レーザー点火(b)の概念図を示したものである。電極間に高電圧を掛けることで放電による火花を生じさせる火花点火に対し、レーザー点火では高ピークパワーのレーザー光を集光することで混合気中に存在する分子を電離させ、ブレイクダウンと呼ばれるプラズマ状態を発生させる。火花点火と異なり、非接触で、空間に着火点を発生させることから、電極による熱損失が無い、空間での点火位置の自由度が高い等、燃焼工学上のメリットが得られ、燃費向上が期待できると言われている³⁾。また、火花点火における電極のような磨耗部品が無いため長寿命であることも大きな特長である。

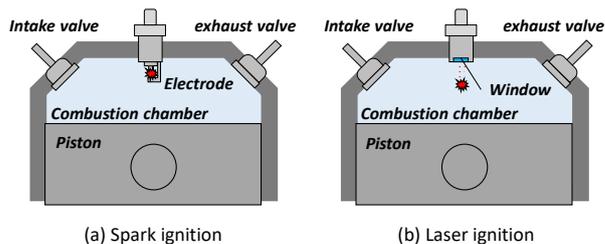


Fig. 3 Schematics of each ignition method; (a) Spark ignition, (b) Laser ignition.

VCSELを用いたレーザー点火プラグシステムの構成としては2種類の方式が提案されており^{6,7)}、Fig. 4はそれぞれの方式を図示したものである。Fig. 4(a)で示されている直接励起方式では、VCSELアレイから出射されたレーザー光のエネルギーを有効に活用しやすいという利点があるが、半導体デバイスであるVCSELがエンジンの近傍に配置されるため、エンジンから生じる熱や振動に晒されてしまう。一方、Fig.4 (b)で示したファイバー伝送方式では、VCSELをエンジンから遠方に配置できるため、熱や振動の影響から分離することが可能である。従って、ファイバー伝送方式はデバイスの信頼性の点で優位性を持っている。このことから我々は、レーザー点火の実用化を考えた際にはファイバー伝送方式が望ましいと考え、この方式を採用した。

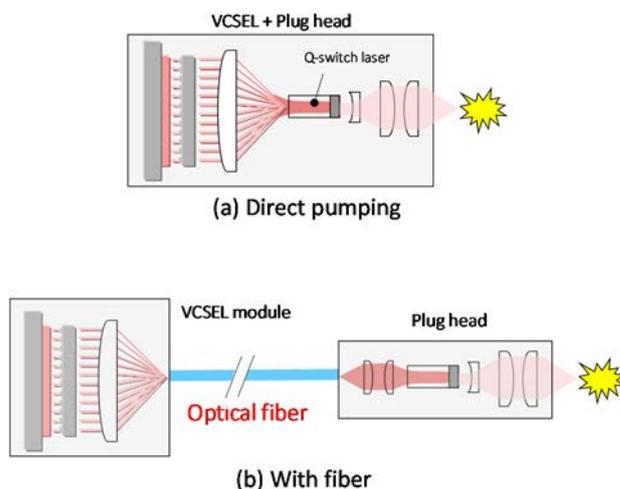


Fig. 4 Schematics of each pumping method; (a) Direct pumping, (b) With fiber.

1-5 目的

以上のように、レーザー点火プラグの実用化のためには、励起光源にVCSELを用い、ファイバー伝送方式を採用することが望ましい。そのためには、VCSELアレイから出射された高出力のレーザー光をファイバーを通じて取り出すことのできる、ファイバー結合型VCSELモジュールが求められる。

一方、固体レーザーの出力目標として、500 μ sの時間内に2.5 mJ \times 4パルスのレーザーエネルギーが得られれば、安定なエンジンの運転が可能であることがガソリンエンジンを用いた点火実験で報告されている⁸⁾。しかし、ファイバー結合型VCSELモジュールにおいてこれまで報告されている最大の出力は約110 Wであり⁹⁾、その励起出力では2.5 mJ \times 4パルスのレーザーエネルギーを出力するには不十分であった。

本研究の目的は、レーザー点火プラグの実用化に向けて、2.5 mJ \times 4パルスのQスイッチ出力を達成できるVCSELモジュールを実現することである。

2. 高出力化のための取り組み

レーザー点火用の光源としてVCSELモジュールに求められる出力は、Dutyが1%程度のQCW (Quasi Continuous Wave: 擬似連続発振) においてファイバーアウトで200 W程度であり、我々がプリンタ用として開発したVCSEL (1chあたり数mW) と比較して格段に高出力化を行う必要がある。

このため、我々はVCSELモジュールの高出力化に向けた様々な検討を行った。この章では、我々が行った取り組みの中から、重要課題と位置付けた項目について説明する。

2-1 外部量子効率の改善

Fig. 5はVCSEL単素子の断面構造を示したものである。屈折率の異なる半導体材料を組み合わせたp型とn型のDBR (Distributed Bragg Reflector: 分布型ブラッグ反射鏡) によって、発光層である量子井戸

活性層を上下方向に挟んだ構造をしている。各電極間にバイアスを与え、ホールと電子を活性層に注入することで、活性層で再結合によって発生した光が基板に垂直方向に共振しレーザー発振を生じさせる。この活性層が、半導体レーザーのしきい値や出力特性を決める非常に重要な領域となっている。我々は外部量子効率の向上のために、これまで書き込みVCSELの活性層材料として開発してきたGaInPAsよりも更に高利得である新規材料を開発した。更に、組成や歪量、成長温度をパラメータとして出力特性を比較し、条件の適正化を図った。

Fig. 6に、改善前後の活性層におけるPL (Photo Luminescence) の評価結果を示す。PLとは、活性層に光を照射し、光励起による発光スペクトルを観測する結晶の評価手法であり、活性層単体の効率を評価することができる。Fig. 6において改善後の活性層を比較すると、PLスペクトルのピーク強度が向上すると共に半値幅も狭くなっており、活性層の高利得化、高品質化を実現できていることが分かる。改善前後でピーク波長も異なっているが、これは組成の微調整により簡単に合わせ込みが可能であり、強度への影響は無いと考えられる。

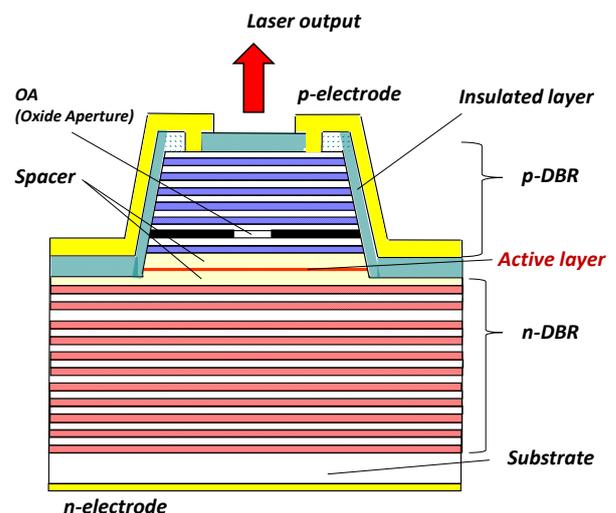


Fig. 5 Cross section of single channel VCSEL.

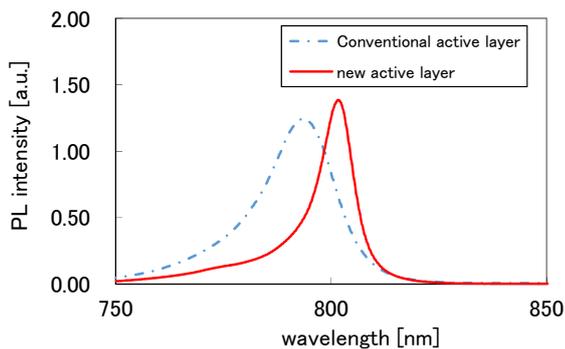


Fig. 6 PL spectra of each active layers.

活性層の改善に伴い、共振器構造も活性層の特性に対して最適化することで更なる高効率化を期待することができる。

VCSELは多層膜反射鏡であるDBRを採用しており、Fig. 7のように、DBRのペア数等を変更することにより容易に反射率を調整可能である。レーザー出射側のDBRの反射率を低く（すなわち、透過率を高く）することで、レーザー光の取り出し効率を向上させることができる。しかし同時に、しきい値電流が増大してしまうというトレードオフの関係があるため、デバイスの動作点を考慮した上で、最適な反射率を選択することが重要である。

Fig. 8に、ペア数を減らすことによる共振器構造の最適化を施したVCSELアレイの出力特性を示す。Fig. 8より、発振しきい値電流は反射率を低下させているのにも関わらず最適化前後ともに80 A程度と大きく変わらず、スロープ効率（dP/dI）が向上していることが分かる。これは、改善した活性層がこれまで用いていた活性層よりも高利得であるためである。

以上のように、新規活性層の開発と共振器構造の最適化により、VCSELの外部量子効率の向上を実現した。

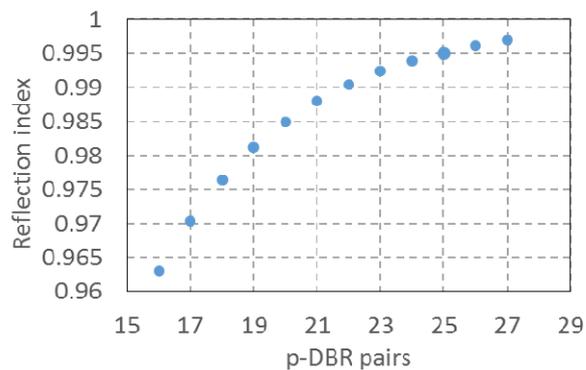


Fig. 7 Reflection index to p-DBR pairs.

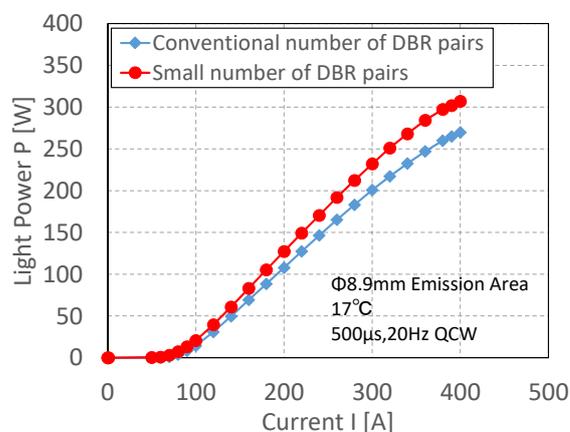


Fig. 8 Comparison of IL characteristics before and after improvement about cavity structure.

2-2 放熱性の改善

VCSELアレイから数百Wの出力を取り出すためには、注入する電流値も数百Aレベルの大電流が必要となり、ジュール熱による発熱の影響も大きなものとなる。一般にレーザーデバイスは温度によって出力が制限されてしまうため、発生した熱を如何にデバイスから取り除くかは高出力化における重要課題である。

我々が開発したVCSELモジュールの構成をFig. 9に示す。VCSELアレイは発光領域φ 8.9 mm、チップサイズ約10 mm□であり、VCSELチップの裏面側には絶縁性の放熱基板で出来たヒートシンク、ペルチェ素子、放熱用フィン、ファン、がこれらの順で配置されている。これらの冷却機構を有効に作用さ

せるためには、良好な部材間の接合が必要となる。中でも最も重要なのは、VCSELアレイとヒートシンクとの接合である。高い放熱性を得るには、接合部に空隙や酸化膜が生じにくいように金属系のはんだ接合を用いるのが望ましい。はんだ接合においては、接合時にAu原子が必要以上にはんだ材料へ拡散し、共晶化されずに剥がれてしまうという不具合が起こりうる。また、高出力VCSELではチップサイズが大きくなるため、大面積で均一に接合するプロセスが求められる。そこで我々は、接合材やヒートシンク材料の選定に加え、接合時の昇温および降温プロファイルの最適化と、デバイスに均一に荷重を掛けられる治具の設計を行った。

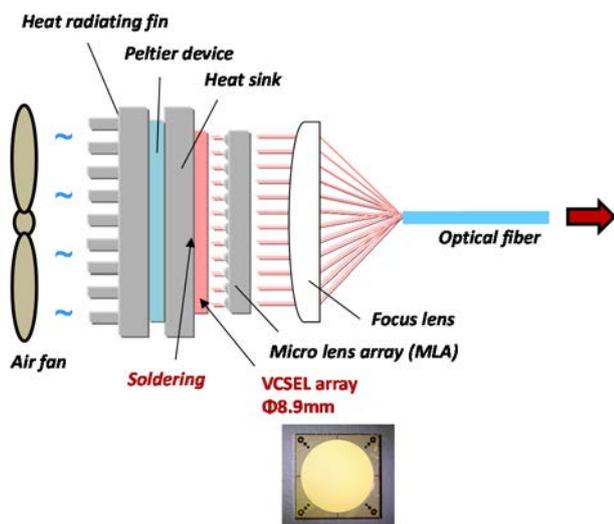


Fig. 9 Construction of our VCSEL module.

2-3 ファイバーカップリング効率

ファイバー結合型のモジュールにおいては、VCSELアレイから出射されたレーザー光を有効に利用するために、ファイバーへのカップリング効率を考慮した設計が必要である。

VCSELはモノリシック2次元アレイの作製が容易であることから、Fig. 9にも示したように一般的な端面レーザーと比較して光学系を単純にすることができる。しかし、一方で、高出力化にはある程度大きなVCSELアレイの面積が必要となるため、ファ

イバー入射面における収束ビームスポット径は大きくなりやすい傾向がある。従って、VCSELアレイから出射されるレーザー光を有効に利用するためには、一般的なファイバー（コア径φ 0.6~0.9 mm）よりも大コア径のファイバーを用いるのが望ましい。そこで、ファイバーの仕様はコア径がφ 1.5 mm、およびNAが0.39とした。

VCSELアレイの設計について考えると、VCSELアレイの発光領域径を大きくすることでアレイを高出力化することができるが、ファイバー入射面へのビーム収束は困難になる。また、高出力化のためにはアレイを構成する単素子の発光面積も大きいことが望ましいが、この場合も同様にアレイ全体の収束ビームスポット径を大きくする要因となる。このように、一般にアレイの高出力化とカップリング効率との間にはトレードオフの関係がある。そこで、これらをパラメータとした光学シミュレーションおよび実験的なVCSELアレイ評価を行い、アレイ出力およびカップリング効率のバランスが最適となるような光学設計を行った。その結果として、VCSELの発光領域径をφ 8.9 mmと定めた。

また、MLAとVCSELとの実装には高い位置精度が要求される。この実装方式としては、VCSELデバイスを発光させながらMLAの位置を調整し、最適となる位置で紫外線硬化樹脂を用いてVCSELに接着させるアクティブアライメントの方式が考えられる。我々は、このアクティブアライメントにおけるMLA実装装置の設計および製作を行い、数μm以下という非常に位置精度の高いMLA実装工程を立ち上げることができた。これにより、高いカップリング効率を有するVCSELモジュールが安定して得られるプロセスを実現した。

3. 結果

製作したVCSELモジュールの外観写真をFig. 10に示す。Fig. 10 (a)はファイバーと冷却機構を取り付けたもの、Fig. 10 (b)はVCSELモジュールのみを示している。

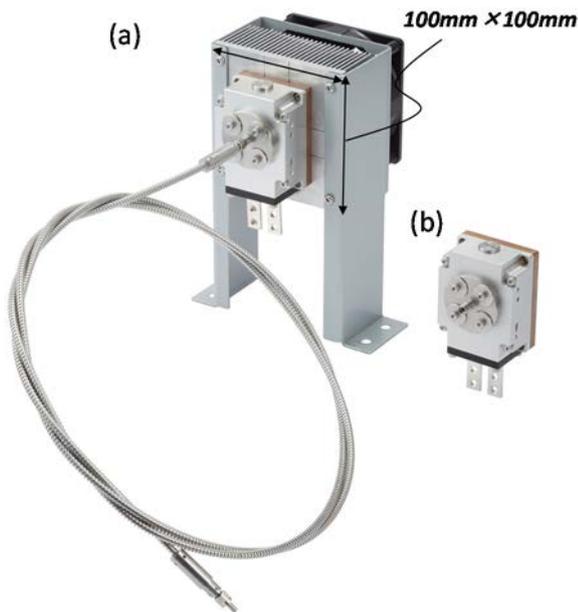


Fig. 10 The view of our VCSEL module: (a) with an optical fiber and cooling system, (b) only VCSEL module.

製作したVCSELモジュールは冷却機構（ペルチェ素子，放熱フィン，ファン）を含めても100 mm × 100 mm程度の大きさである。従来の同程度の出力の端面発光型レーザーモジュールと比較して，体積で約1/5～1/8程度の大きさを実現した。

このモジュールの入出力特性をFig. 11に示す。測定は電子冷却機構を用いてVCSELチップ裏面の温度を17°Cに制御し，パルス幅500 μs，繰り返し20 Hzの駆動条件下で行った。冷却機構を付けた状態であれば，40°Cまでの環境温度下において同様の特性を実現できることを確認している。20 Hzの繰り返しは，コージェネレーション用ガスエンジンの回転数に十分対応できる値である。

Fig. 11より，アレイ出力で311 W，ファイバーアウト出力で204 Wの最大出力を確認することができた。この出力はファイバー結合型のVCSELモジュールとしてこれまで報告されている最大の出力110 Wを大きく上回り，目標の200 Wをクリアした。電流注入が大きくなることに伴い，各VCSEL素子から出射されるレーザー光の放射角が広がることに由来するカップリング効率の低下が見られているが，最大出力時でも65%以上のカップリング効率を確認した。

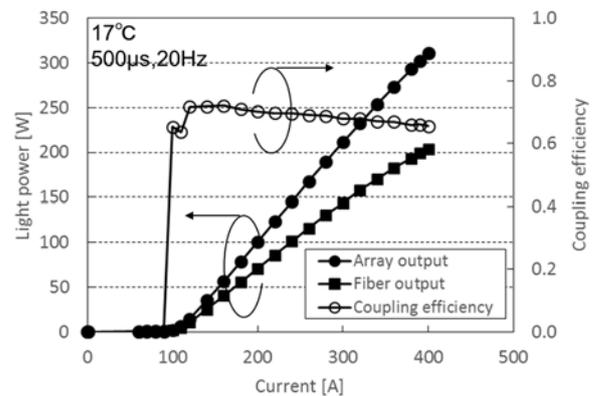


Fig. 11 I-L characteristics and coupling efficiency of VCSEL module.

次に，モジュールの波長特性について説明する。Fig. 12にVCSEL裏面温度17°C時における波長スペクトルを示す。本モジュールでは，半値全幅で1.7 nmと細いスペクトル幅が得られていることが分かる。

Fig. 13に本モジュールと，市販の端面レーザーモジュールとのピーク波長の温度依存性を示す。我々のVCSELモジュールは温度に対して非常に安定した温度特性を持っていることが分かる。波長の温度安定度は約0.05 nm/Kであり，これまでに報告されている文献と同等の値を示した⁵⁾。

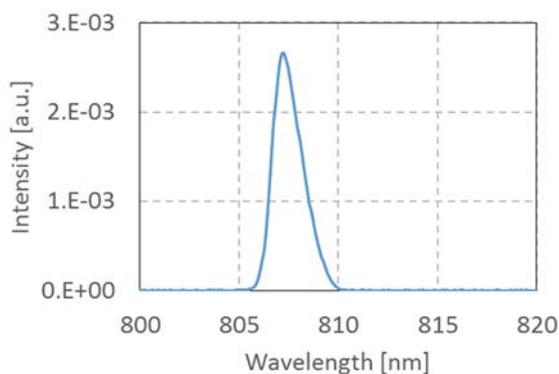


Fig. 12 Lasing spectrum of our VCSEL module.

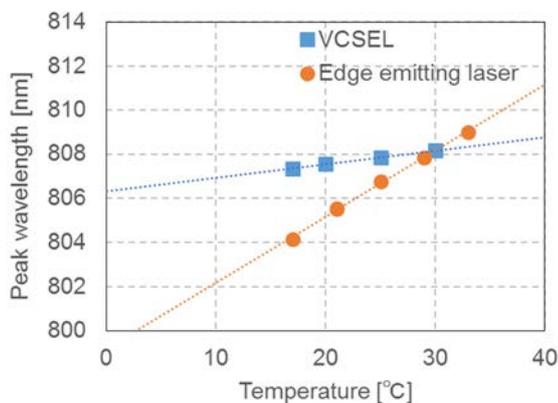


Fig. 13 Temperature dependence of peak wavelength.

最後に、本VCSELモジュールを励起光源として固体レーザー結晶（Nd:YAG/Cr:YAG）を励起した際の受動Qスイッチ発振特性について説明する。

Fig. 14 (a)にYAGの励起実験光学系、Fig. 14 (b)にQスイッチレーザーの評価結果を示す。Fig. 14 (b)より、500 μ sの励起時間において、2.5 mJ \times 4パルスのQスイッチ出力を確認することができた。すなわち、レーザー点火において実用上必要とされるレーザーエネルギーを得ることができた。

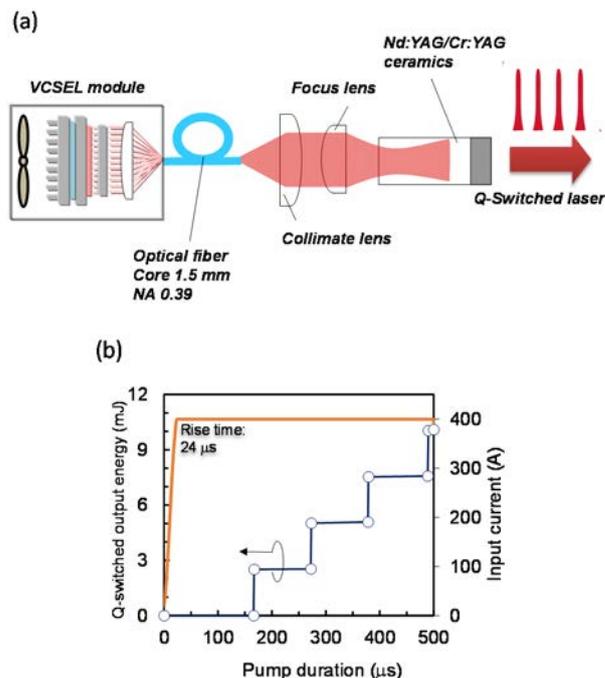


Fig. 14 Q-switch experiment pumped by our VCSEL module: (a) experimental setup, (b) Q-switch laser characteristics.

4. まとめ

VCSELの高出力化開発とモジュール化開発を行い、レーザー点火用の励起光源として実用的な808 nm帯の高出力VCSELモジュールを開発した。

製作したVCSELモジュールは、冷却機構を含めても100 mm \times 100 mm程度の非常にコンパクトな大きさで、40°Cまでの環境温度で安定して動作することができる。パルス幅500 μ s、繰り返し20 Hzの駆動条件においてアレイ出力311 W、ファイバーアウト出力204 Wを確認することができた。この出力は、ファイバー結合方式のVCSELモジュールとしてはこれまでに報告されている中で最大の出力である。このVCSELモジュールを用いてNd:YAG/Cr:YAGの固体レーザー結晶を励起することにより、エンジン運転に必要なQスイッチ動作出力である2.5 mJ \times 4パルスを得ることができた。

謝辞

本活動にあたり，開発助成金の援助を頂きましたNEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) に謝辞申し上げます。

また，本研究においてVCSELの接合技術等に関してご協力とご助言を賜りました分子科学研究所平等研究室に謝辞申し上げます^{10,11)}。

参考文献

- 1) R. Hickling, W. Smith: Combustion Bomb Tests of Laser Ignition, *SAE Technical Paper* 740114, doi:10.4271/740114 (1974).
- 2) H. Sakai, H. Kan, T. Taira: >1 MW Peak Power Single-Mode High-Brightness Passively Q-Switched Nd³⁺:YAG Microchip Laser, *Opt. Express*, vol. 16, pp. 19891-19899 (2008).
- 3) M. Tsunekane et al.: High Peak Power, Passively Q-Switched Microlaser for Ignition of Engines, *IEEE J. Quantum Electron*, vol. 46, pp. 277-284 (2010).
- 4) 軸谷直人ほか: プリンタ用780nm帯40ch光書き込みVCSELアレイの開発, *Ricoh Technical Report*, No. 37, pp. 74-80 (2011).
- 5) M. Tsunekane, T. Taira: Ignition lasers operating for wide temperature range, Laser Ignition Conference'13, LIC2-3 (2013).
- 6) J. Schwarz et al.: Pumping concepts for laser spark plugs – Requirements, options, solutions, Laser Ignition Conference'14, LIC3-3 (2014).
- 7) 常包正樹, 平等拓範: レーザー点火のための実用的な固体レーザー, *レーザー研究*, 第42巻, 第5号, pp. 394-399 (2014).
- 8) M. Tsunekane et al: Micro-Solid-State Laser for Ignition of Automobile Engines, INTECH Open Access Publisher, <http://www.intechopen.com/books/advances-in-solid-state-lasers-development-and-applications/micro-solid-state-laser-for-ignition-of-automobile-engines> (2010).
- 9) 常包正樹, 平等拓範: 動作温度領域の拡大を目指したエンジン点火用VCSEL励起マイクロレーザー(2), *レーザー学会学術講演会 第33回年次大会*, B328pIX09 (2013).
- 10) M. Tsunekane, T. Taira: 300W continuous-wave operation of a diode edge-pumped, hybrid composite Yb:YAG microchip laser, *Optics Lett.*, vol. 31, pp. 2003-2005 (2006).
- 11) M. Tsunekane, T. Taira: Design and Performance of Compact Heatsink for High-Power Diode Edge-Pumped, Microchip Lasers, *IEEE J.Sel. Topics Quantum Electron*, Vol. 13, No. 3, pp. 619-625 (2007).