

レーザーガイド星適応光学用 1180nm 発光の 72W 垂直外部共振器面発光レーザー

E. Kantola[✉], J.-P. Penttinen, S. Ranta and M. Guina

当社は、約 1180nm で発光する高出力光ポンピング垂直外部共振器面発光レーザーを報告します。この自励レーザーは、ヒートシンク温度 0°C で 72W、室温(20°C)近くで 53W の出力を生成しました。高出力動作のために効率的な熱抽出を可能にするため、GaAs ベースのゲインミラーは、TEC 冷却銅マウントに取り付けられた 2mm 厚のダイヤモンドに接着されました。さらに、共振器内に複屈折フィルターとエタロンを組み合わせて使用することでレーザーのスペクトルを 0.06nm に絞り込み、ヒートシンク温度 20°C で最大 19W を生成しました。この実証は、1180nm 放射の周波数倍増を使用するナトリウムレーザーガイド星適応光学の実現に新たな展望を開くものです。

はじめに：1160～1200nm の赤外線範囲で発光する高出力垂直外部共振器面発光レーザー (VECSEL) は、第二高調波発生 (SHG) によって黄橙色の放射を生成できるため、注目を集めています[1]。一般的に、VECSEL は、その出力スケール能力と優れたビーム品質、および材料工学によって可能になった広い波長範囲で知られています。VECSEL から測定された最高出力は、発光波長 1028nm で 100W を超え[2]、波長範囲は紫外線 (SHG 経由) から 5μm まで広がっていますが、材料の課題によるギャップがないわけではではありません[3]。たとえば、1100～1200nm の範囲では、GaInAs 量子井戸と GaAs の間の大きな格子不整合から生じる歪みのために課題が生じます。この歪みは、結晶に少量の窒素を追加して、いわゆる希釈窒化物構造を作ることによって緩和できます[4]。1200nm 未満では、歪みは成長パラメータの慎重な最適化、すなわち歪み補償層の使用によっても補償されることが可能です[5]。さらに、外部共振器は、狭線幅放射 (MHz 範囲未満) [6]と非線形結晶による高出力周波数倍増[1, 7]を可能にする波長選択性共振器内コンポーネントの組み込みを可能にします。20W を超える出力での単一周波数動作は、Zhang らによって 1013nm の基本波長で既の実証されています[8]。これらの機能により、VECSEL は、標準的な技術では容易に対応できない特定の波長で高出力および高ビーム品質を必要とする用途に適しています。

適応光学は、大気の流れによる空気の屈折率の変化によって引き起こされる画像の歪みを補正するために、地上の望遠鏡でよく使用されます。適応光学システムの一部として、参照オブジェクト、いわゆるガイド星が必要です[9]。残念ながら、空に自然に発生するガイド星は多くありませんが、大気中のナトリウム原子をレーザーで励起することで人工的に作成できます。このプロセスでは、励起レーザーに厳しい仕様が設定されます。波長はナトリウム D2 線と一致し、高出力を放射する必要があります。これは、線幅 <250MHz で 589nm の難しい黄色の波長で 20W を超える連続波放射に変換されます[10]。

この論文では、ヒートシンク温度 0°C で約 1180nm で 72W の連続波を放射する VECSEL を実証します。これは、この波長範囲でこれまで報告された最高出力です。レーザーは、5.5nm の半値全幅(FWHM)でマルチ横モードおよびマルチ縦モードで動作しました。レーザーガイド星ターゲットを念頭に置いて、単一横モード動作にキャビティを変更し、利用可能な複屈折フィルター (BRF) とエタロンを使用してスペクトルを 0.06nm に狭めました。この構成では、室温(20°C)近くで最大出力 19W が実証されました。機械的振動と音響振動からの適切なシールドとキャビティ内要素の熱安定化により、同様の出力で高出力の単一周波数動作が達成できると考えています。さらに、所望の 589nm 黄色波長への周波数変換は、内部[1, 7]または外部共振器倍増[11]のいずれかによって達成することができます。

実験セットアップ:VECSEL は、半導体ゲインミラーと部分的に透過する誘電体ミラー(つまり出力カプラー)で構成されます。上部発光ゲインミラーは分子線エピタキシーによって成長し、26 対の AlAs/GaAs 分布ブラッグ反射器とアクティブ領域で構成されます。アクティブ領域には、光定在波の腹に位置する 10 個の GaInAs 量

子井戸が組み込まれています。圧縮歪み量子井戸は、GaAs バリア層と GaAsP 歪み補償層の間に埋め込まれています。アクティブ領域は、表面再結合を防ぐために GaInP ウィンドウ層で終端され、アクティブ領域の厚さは、ゲインミラーのマイクロキャビティが信号波長で共鳴するように調整されています。

高出力 VECSEL には、効率的な熱抽出が不可欠です。この目的のため、ゲインミラーは前面から 2mm 厚のダイヤモンドヒートスプレッダーに毛細管接合され、さらにインジウムを含む大きな温度安定化銅ヒートシンクに接合されました。銅ヒートシンクの配置には、低温でもヒートシンクの温度を安定に保つために 4 つの 200W 熱電冷却器が採用されました。信号とポンプ波長の損失を最小限に抑えるために、ダイヤモンドヒートスプレッダーに反射防止コーティングが施されました。

図 1 に示すように、ゲインミラーと出力カプラーの間に I 字型のレーザーキャビティが形成されました。フリーランニングのデモンストレーションでは、長さ 109mm のキャビティと、曲率半径 150mm の 3%透過率の出力カプラーを使用しました。ゲインミラーは、市販の 808nm ダイオードレーザーで励起されました。励起光は、200μm コアファイバーを介して伝送され、レンズ配置を介して約 30°の角度で表面に焦点を合わせました。この実験では、横方向のパワースケールングを提供するために、直径 950μm(4σ 値)の比較的大きなトップハットスポットサイズが使用されました。

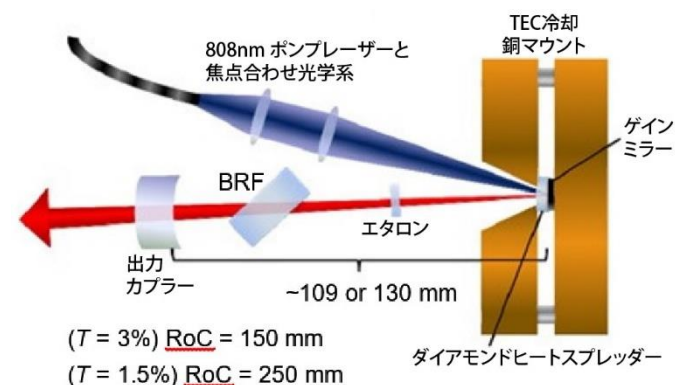


図 1 1180nm VECSEL のキャビティの図。BRF とエタロンは、スペクトルを狭めるために長いキャビティ($L=130\text{mm}$, $\text{RoC}=250\text{mm}$)にのみ使用されました。

高出力のフリーランニングのデモンストレーションに加えて、狭線幅動作でのレーザーの実現可能性を実証するために、2 番目のキャビティを使用しました。このセットアップでは、スペクトルを狭くするために、5mm 厚の石英 BRF と 250μm 厚の YAG エタロンがキャビティに挿入されました。BRF とエタロンのためのスペースを確保するために、キャビティの長さは 130mm に増加されました。同時に、出力結合ミラーは、新しいキャビティ内コンポーネントによって生じる損失を補償するために低結合(1.5%)に変更され、曲率半径は 250mm に増加され、ゲインミラーのモードサイズが大きくなりました。さらに、基本横モード(TEM00)動作をサポートするために、より小さなスポット径(550μm)を生成するようにポンプレズ配置が調整されました。

結果:図 2 は、ヒートシンク温度が 0、10、20°C のときの、フリーランニング VECSEL の出力を入射ポンプ出力の関数として示しています。入射ポンプ出力は、ダイヤモンドヒートスプレッダーに入射する総出力として定義され、ダイヤモンド表面からの反射(反射防止コーティングで 5%と推定)は考慮されません。最高出力 72W は、ヒートシンク温度が 0°C のときに測定されました。これは、入射ポンプ出力 257W、光から光への変換効率 29%、スロープ効率 38%に相当します。私たちの知る限り、これはこの波長範囲で報告された最高出力です。72W 動作中、レーザーのスペクトルは 1185.5nm を中心と

し、FWHMは5.5nmと測定されました(図2の挿入図を参照)。ヒートシンク温度が10°Cと20°Cのとき、最大出力はそれぞれ62Wと53Wでした。

参考までに、最初に波長選択素子なしで3%透過出力カプラーを備えた長いキャビティの出力パワーを測定しました。ヒートシンク温度20°Cで最大25Wが測定されました。出力カプラーを1.5%結合に変更した後、BRFとエタロンをキャビティ内に配置し、レーザー波長を約1178nmに固定しました。20°Cで最大19Wの出力パワーが測定され、カバーされていないテーブルトップレーザーのFWHM線幅は0.06nmでした(図3)。スペクトルアナライザーの解像度は0.01nmでした。ビームプロファイルは電荷結合素子カメラで測定され、単一横モード動作を示しました(図3の挿入図として表示)。

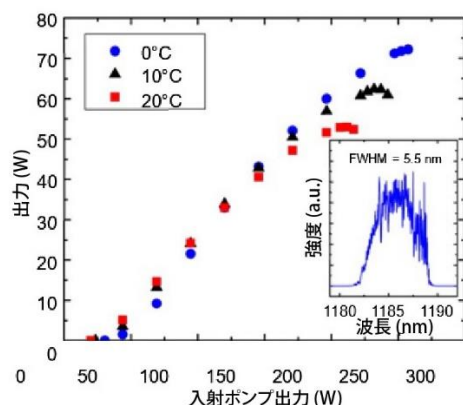


図2 ヒートシンク温度0、10、20°Cでの出力曲線。挿入図:出力72Wで記録されたレーザースペクトル

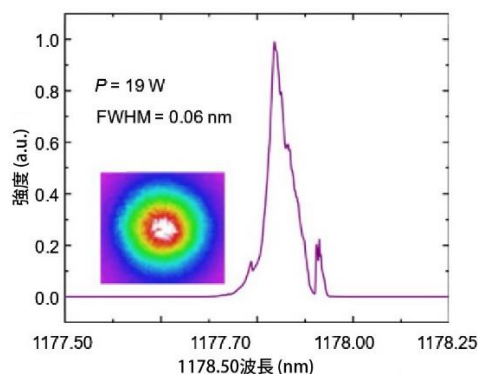


図35mm厚のBRFと250μm厚のYAGエタロンを含む共振器からの最大出力(19W)での正規化されたレーザースペクトル。挿入図:出力19Wで測定されたビームプロファイル

この波長狭窄の目的は、適切な機械設計により、将来的に単一周波数での高出力動作が可能になることを実証することであった。今後の研究では、より厚いBRFが不要なキャビティモードをさらに減衰させるのに有益となるかもしれません。Zhangらによる以前の実証では、単一周波数動作を達成するために厚さ10mmのBRFが使用されたが[8]、この論文では、研究室にある既存のBRFストックに限定されました。

結論:ヒートシンク温度0°Cで約1180nmで発光するフリーランニングVECSELから72Wの出力を実証しました。室温(20°C)付近では、同じ構成で出力は53Wに達しました。追加の共振器内要素(BRFとエタロン)を備えた別の共振器配置を採用し、室温付近で19Wの出力を放射しながら、レーザー

ペクトルを0.06nmまで狭めました。スペクトルを狭めたのは、より要求の厳しいスペクトル特性でも高出力動作が達成可能であることを示すためです。共振器の安定化、線幅の狭小化、およびSHGをさらに改善することで、レーザーガイド星適応光学のニーズを満たすスペクトル特性を備えた589nmでの狭線幅動作を実証することを目指しています。

Acknowledgments: This work was supported by the Finnish Funding Agency for Technology and Innovation (Tekes) project Photolase (40152/14), TUTLi project ReLase (619/31/2014), Academy of Finland project QUBIT (278388), and Jenny and Antti Wihuri Foundation.

© The Institution of Engineering and Technology 2018 Submitted: 11 July 2018 E-first: 14 August 2018

doi: 10.1049/el.2018.6225

One or more of the Figures in this Letter are available in colour online.

E. Kantola, J.-P. Penttinen, S. Ranta and M. Guina (Optoelectronics Research Centre, Tampere University of Technology, Korkeakoulunkatu 3, FIN-33720 Tampere, Finland)

✉ E-mail: emmi.kantola@tut.fi

J.-P. Penttinen and M. Guina (Vexlum Ltd, Korkeakoulunkatu 3, FIN-33720 Tampere, Finland)

References

- Kantola, E., Leinonen, T., Ranta, S., et al.: 'High-efficiency 20 W yellow VECSEL', *Opt. Express*, 2014, 22, (6), pp. 6372–6380, doi: 10.1364/OE.22.006372
- Heinen, B., Wang, T.-L., Sparenberg, M., et al.: '106 w continuouswave output power from vertical-external-cavity surface-emitting laser', *Electron. Lett.*, 2012, 48, (9), pp. 516–517, doi: 10.1049/el.2012.0531
- Guina, M., Rantamäki, A., and Härkönen, A.: 'Optically pumped VECSELs: review of technology and progress', *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2017, 50, (38), pp. 1–37, doi: 10.1088/1361-6463/aa7bdf
- Guina, M., Leinonen, T., Härkönen, A., et al.: 'High-power disk lasers based on dilute nitride heterostructures', *New J. Phys.*, 2009, 11, 125019, doi: 10.1088/1367-2630/11/12/125019
- Ranta, S., Tavast, M., Leinonen, T., et al.: '1180 nm VECSEL with output power beyond 20 W', *Electron. Lett.*, 2013, 49, (1), pp. 59–60, doi: 10.1049/el.2012.3450
- Burd, S.C., Allcock, D.T.C., Leinonen, T., et al.: 'VECSEL systems for the generation and manipulation of trapped magnesium ions', *Optica*, 2016, 3, (12), pp. 1294–1299, doi: 10.1364/OPTICA.3.001294
- Berger, J.D., Anthon, D.W., Caprara, A., et al.: '20 Watt CW TEM00 intracavity doubled optically pumped semiconductor laser at 532 nm', *Proc. SPIE*, 2012, 8242, 824206, doi: 10.1117/12.907511
- Zhang, F., Heinen, B., Wichmann, M., et al.: 'A 23-watt single-frequency vertical-external-cavity surface-emitting laser', *Opt. Express*, 2014, 22, (11), pp. 12817–12822, doi: 10.1364/OE.22.012817
- Max, C.E., Olivier, S.S., Friedman, H.W., et al.: 'Image improvement from a sodium-layer Laser guide star adaptive optics system', *Science*, 1997, 277, (5332), pp. 1649–1652, doi: 10.1126/science.277.5332.1649
- Enderlein, M., and Kaenders, W.G.: 'Sodium guide star (r)evolution', *Opt. Photon.*, 2016, 11, (5), pp. 31–35, doi: 10.1002/opph.201600038
- Wilson, A. C., Ospelkaus, C., VanDevender, A.P., et al.: 'A 750-mW, continuous-wave, solid-state laser source at 313 nm for cooling and manipulating trapped $^9\text{Be}^+$ ions', *Appl. Phys.*, 2011, 105, (4), pp. 741–748, doi: 10.1007/s00340-011-4771-1