

# 高出力レーザダイオードの高輝度化

ジェフ・ヘクト

高出力レーザダイオードは、発光効率の高さにおいて抜きん出ているが、多くの用途に必要とされる高品質ビームの発生には至っていない。新しいレーザ設計と新しいビーム結合方式が、高出力ダイオードビームの輝度を改善しつつある。

レーザダイオードは電力の光への変換に優れ、70%に近い効率が得られている。しかし、出力の向上は一般にビーム品質の犠牲を伴う。多モードビームにおいてワットクラスの出力を放射する大面積レーザダイオードは、単一横モードでかなり低い出力を放射する狭幅ストライプダイオードのビーム品質には対抗できない。ダイオードアレイのスタックはキロワットの出力を発生することができるが、ビーム品質はさらに悪く、それらの用途は高輝度を必要としない熱処理やバルク固体レーザのポンピングなどに制限される。

現在、開発技術者たちは、高輝度ビームを必要とする金属シートの切断や溶接などの高出力用途で動作させるために、高効率ダイオードのビーム品質の改善を推し進めている。

## 発散、ビーム品質、輝度

レーザダイオードはビーム発散が大きいことで知られているが、それは小さな放射開口の回折限界を反映している。ビーム品質は、発散の量ではなく、それがレーザの出力開口によって決まる回折限界にいかにか一致するかに依存する。単一のラテラル（または横）モードを発振する狭幅ストライプレーザダイオードは、放射面積が小さいがゆえに起きる大きな発散にもかかわらず、優れたビーム品質を持ち、その広く発散するビームは厳密に集束させること

ができる。非常に大きな開口から放射するダイオードスタックは発散が少ないとはいえ、ビーム品質はかなり悪い。

ビーム品質の測度の一つはビームパラメータ積（BPP、時にQと表示）であり、これはビームウエストでのビーム径と遠方場ビーム発散の積である。別の測度には輝度Bがある。これは単位面積あたりの出力をビーム発散角で割った値であり、単位は $W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-2}$ になる。輝度は、出力Pを $\pi^2$ とビームパラメータ積Qの二乗との積で割ることによって得られる。

$$B = \frac{P}{\pi^2 Q^2}$$

（非点収差ビームの場合は異なる式が必要である）。輝度が高いということはそれだけビーム品質が優れていることを意味する。

もう一つの広く使用されている測度は $M^2$ である。これは測定されたBPPを理想的なガウスビームのBPPで割った値である。この結果は正規化された値であり、1.0は理想的なガウスビームであることを示し、高い数値は低品質ビームであることを示す。

## シングルエミッタレーザダイオード

輝度は出力に依存し、レーザダイオードストライプから得られる出力はその体積と内部出力密度によって制限される。出力密度が増加するにしたがって、レーザは内部とファセット損傷の影響を受けやすくなり、抵抗加熱はそれらの出力変換効率を低下させる。

広幅ストライプレーザは活性層内の導波路容積を大きくして出力を増大させることができるが、ビーム品質が劣化してマルチモード動作になりやすい。約100 $\mu m$ の幅と数ミリメートルの長さのストライプを持つダイオードは10W以上を放射するが、ビーム品質は制限される。研究者たちは、ビーム品質は図1に示すようにレーザストライプの

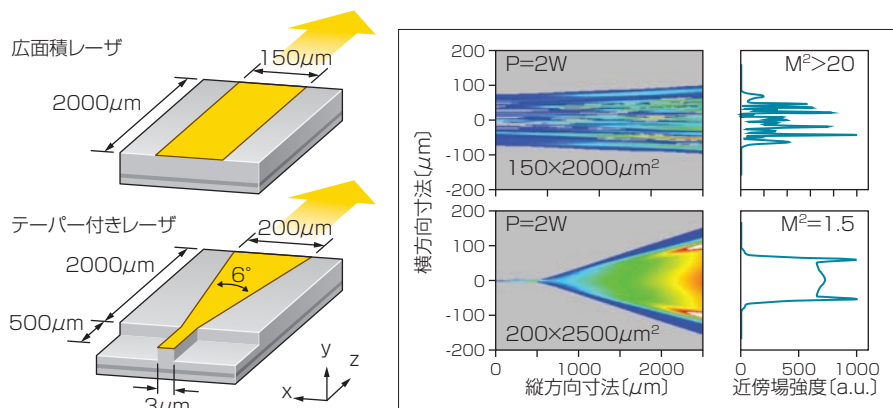


図1 広面積利得領域とテーパ付き利得領域を持つレーザダイオードはほぼ同じ出力を放出する。しかし、左図に示されるように、テーパ付き構造はレーザ内のより均一な利得と放出ファセット上のより均一な出力を生み出す。(資料提供:R.オステンルフ、フラウンホーファー研究所)

幅にテーパーを付けると向上することに気づいた。

独m2k レーザ社と独DILAS社による最近の実験は、976nmを放射するInGaAs レーザの輝度が、5mmの長さで広い面積のものとテーパー付けしたものとで著しく異なることを示した。均一な90 $\mu$ m幅のストライプを持つレーザは10Wを放射し、スロープ効率は1.1 W/A、ピーク電気-光学効率は65%であった。4°のテーパーを持つ同様なレーザは、1.05W/Aの低いスロープ効率を反映して、56%のピーク効率で10Wを放射した。テーパー付きレーザの大きな利点は広幅レーザに比べて6倍も高い600mm-mradに達する輝度であった<sup>(1)</sup>。残念なことに著者らはPhotonics West 2010出席者に、「テーパー付きレーザのパッケージングは非常に挑戦的な仕事であり、テーパー付きレーザにおける既存の非点収差もモジュール用の光学系の設計をより複雑にする」と語った。

## ダイオードアレイとビーム結合

個々のレーザダイオードの出力は限定されるが、多数のレーザダイオードを単一基板上に組み立て、より高い出力が発生するようにそれらの出力を結合させることができる。米プリンストン・

オプトエレクトロニクス社で、高密度VCSELアレイが200Wを越える出力を発生した<sup>(2)</sup>。各々が多数のエッジ発光レーザストライプをもつ多数のバーのスタックは2、3キロワットを発生したものの、ビーム品質は低かった。反射ミラーとレンズの単純な組み合わせでは、2本のビームを加え合わせて、より高い輝度のビームを発生させることはできないと、グラスゴー大学のジョン・マーシュ氏(John Marsh)は語っている。それどころか、こうした組み合わせは照射面積を拡大させるか、光を減衰させる。

より高輝度で、より高品質のビームは、より精巧なビーム結合方式を要求する。一つは、入射ビームの位相を整合させて、それらを構成的に加え合わせるコヒーレント結合である。もう一つは、光ファイバ内の波長分割多重と同様に、異なる波長のビームと一緒に加え合わせるスペクトルビーム結合である。両者はいずれもファイバレーザならびにダイオードアレイですでに研究されてきた。

## コヒーレントビーム結合

ダイオードアレイでは、コヒーレントビーム結合における主要な挑戦は、レーザストライプ間のコヒーレンスを

維持することだ。隣接するストライプのエバネッセント結合が単一のコヒーレント「スーパーモード」を作り出すのに十分なほど接近させてストライプを作製することが正攻法に思えるであろう。残念ながら、マルシュ氏はレビュー論文において、「その特性は安定ではなく、最も安定なスーパーモードは隣接ストライプ間の位相が180°シフトしている場合であり」、この結合ビームでは不適切なデュアルローブが発生すると記している<sup>(3)</sup>。

これに代わる方式は、いくつかの並列ダイオード増幅器を単一のマスタ発振器の出力で駆動させ、次いでそれらのビームをそれぞれ一致させた位相が保持されるように再結合させることである。各種の配置が試みられたが、効果的なコヒーレントビーム結合は、非常に厳しい光学系の制御が必要になり、単純な光学系では困難であると分かった<sup>(4)</sup>。

最近、MIT リンカーン研究所は、アクティブエレクトロニクス制御系がマスタ発振器/パワー増幅器配置におけるビーム結合を大いに改善することを明らかにした。図2に示したように、彼らは1台の狭線幅マスタ発振器レーザで開始し、その出力を1つの回折素子によって多数の別々の要素に分割して方向づけた。その出力は光アイソレータを通過後、各要素は21個のスラブ結合光導波路半導体増幅器(SCOWA)のうちの1つに集光された。その入射光は増幅器を通して二重経路をとり、一部は測定系に導かれ、他はフィードバックループへと導かれた。

各導波路増幅器に備わる個々の電流ドライバがフィードバックを受け取り、それを使ってすべての増幅器出力のコヒーレンスが保持されるように増幅器の位相を調整した。リンカーン研究所は最初にこのアプローチを単一の21素

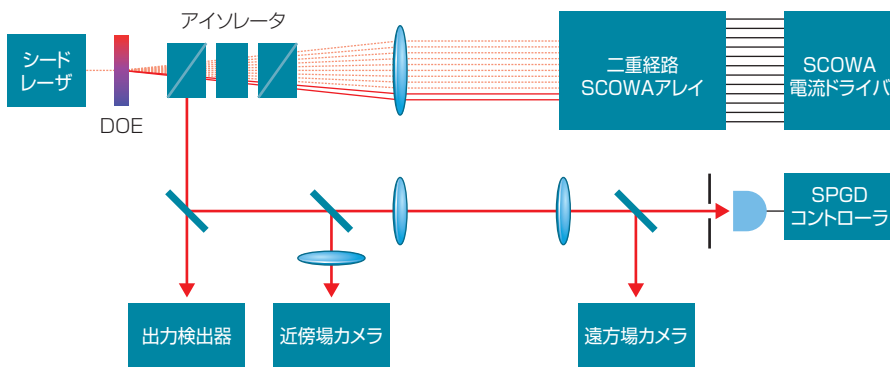


図2 アクティブコヒーレントビーム結合は電子フィードバック回路を使って二重経路導波路増幅器アレイにおいて増幅された光の位相を制御する。この図式はMIT リンカーン研究所において21チャンネル線形アレイ増幅器で使われた配置を単純化して表したものである。(資料提供: S.レドモンドら<sup>(5)</sup>; アメリカ光学学会(OSA)2011年の許可を得て再掲載)

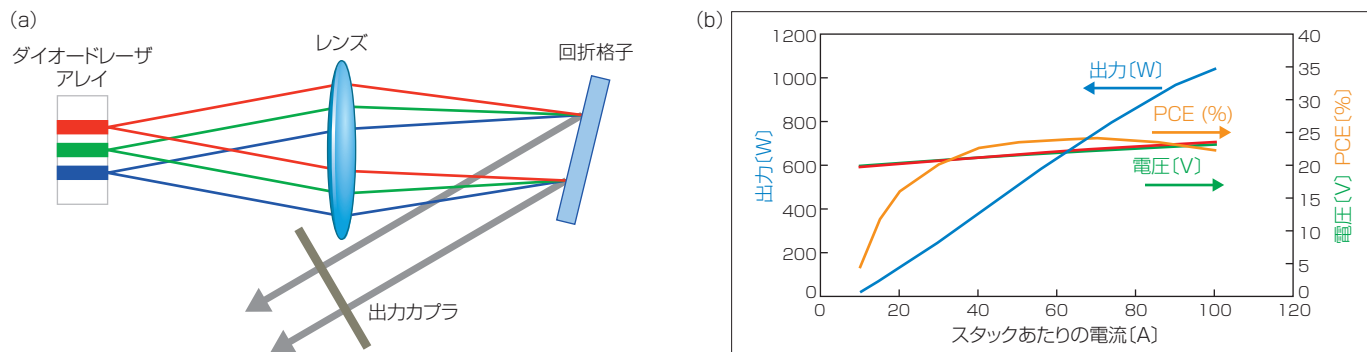


図3 (a)スペクトルビーム結合は、多数の波長のビームを加え合わせて複合高輝度ビームを自由空間内に生成するか、ファイバへと導く。実際のところ、使用される波長の数が増すと、それだけ間隔が密になる。(b)テラダイオード社のデモンストレーションでの全出力、変換効率、および駆動電圧を示した。(資料提供; R.S. ファンら<sup>(6)</sup>)

子線形アレイに対して適用した。彼らは、マスタ発振器出力を2個の21素子増幅器アレイ間に分割することによって、8.2Wの結合出力を生み出した。11個の21素子アレイでは、連続波出力の合計は38.5Wに達した。彼らは、「高いコヒーレンスコントラストを持つ、アクティブにコヒーレント結合されたダイオードにおける最高出力」と呼んだ<sup>(5)</sup>。これこそが、マーシュ氏が「非常に興味深い」と呼んだアプローチである。

### スペクトルビーム結合

今までのところ、スペクトルビーム結合の方がコヒーレントビーム結合よりも容易であることが分かっている。全出力と輝度はそのビームに加え合わされた波長の数に対応する。その大きな利点はその波長で光を操作する容易さにある。図3aに示したように、回折格子または他の分散光学素子は、異なる波長を放射する個別の光源からの光を、1つの導波路またはファイバに導くことができる。同様に、光学フィルタは単一の光ファイバに単一の波長を入射させることができる。

スペクトルビーム結合はそれ自身の限界を持っている。1つは、信号が増幅されなければならないというほど厳しい要求ではないが、光学系または伝

送媒体において広い帯域幅が必要なことだ。適切な波長範囲にわたってスペーシングされたレーザ光源も必要である。結果として生じた信号が広帯域であったとすれば、ホログラフィなどの単色光を必要とする用途には適さない。

しかし、報告された結果は実に素晴らしいものであった。2011年4月のSPIEの防衛・セキュリティ・センシングの会合において、米テラダイオード社(TeraDiode)のロビン・ファン氏のチームは、図3bに示したように、商業用ダイオードアレイからのビームを200 $\mu$ mのコアファイバを通してスペクトル結合させることによって、1040Wの全出力を得たと報告した。そのビームパラメータ積は、キロワットの直接ダイオード源で報告された中で最も低い値に相当する18mm $\cdot$ mradであった。報告論文は

そのシステムの光学配置を詳しく説明してはいないが、注目すべきは、この光源が6.65mm厚みのスチールシートを切斷することができるということだ<sup>(6)</sup>。

### 将来展望

このような研究所のデモンストレーションは喜ばしいニュースだ。高輝度と高出力の組み合わせは、直接的なダイオード応用のレベルを大いに引き上げるであろう。明るい高出力ダイオードは有用性の低いレーザ光源を置換すること以上の価値がある。それらは、新しいレーザ応用を実用的にし、全エネルギー効率の改善にもわずかながら寄与するであろう。

現在の挑戦は、素晴らしい研究室での検証を実用的な技術へと移転させることだ。

### 参考文献

- (1) J. Gilly et al., "Comparison of concepts for high-brightness diode lasers at 976nm," High-Power Diode Laser Technology and Applications VIII, Proc. SPIE, M.S. Zediker, ed., 7583, 75830S-1 (2010); doi:10.1117/12.840698.
- (2) J.-F. Seurin et al., "High-power high-efficiency 2D VCSEL arrays," Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XII, Proc. SPIE, C. Lei, J.K. Guenter, eds., 6908, 690808, (2008); doi:10.1117/12.774126
- (3) J.H. Marsh, "Emerging technologies for high-power diode lasers," IEEE Photon. Soc. Newsletter, 4 (December 2010).
- (4) T.Y. Fan, "Laser beam combining for high-power, high-radiance sources," IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron. V, 11, 567 (May/June 2005).
- (5) S.M. Redmond et al., "Active coherent beam combining of diode lasers," Opt. Lett., 36 999-1001 (Mar. 15, 2011).
- (6) R.S. Huang, B. Chann, and J.D. Glenn, "Ultra-high brightness, wavelength-stabilized, kW-class fiber coupled diode laser," Proc. SPIE, 8039, 80390N (2011); doi:10.1117/12.887332.