

Advances in semiconductor laser bars and arrays

R.M. Lammert, S.W. Oh, M.L. Osowski, C. Panja, D. Qian, P.T. Rudy, T. Stakelon and
J.E. Ungar
Quintessence Photonics Corporation, 15632 Roxford Street, Sylmar, CA 91342

ABSTRACT

近赤外からアイセーフの波長領域において、スペクトル輝度、空間的輝度を増加させ、費用構造を減少させるような新たな大出力半導体レーザ技術の進展は、ダイオード励起のシステムを劇的に改良し、また、ダイオード直接利用のアプリケーションの新たな展開をもたらす可能性があります。スペクトルを狭帯化し、かつ、安定化させるための内部グレーティングを持つ、端面発光デバイス、および、高出力表面発光 2 次元アレイの、双方の性能を示すデータを紹介します。また、808 と 976nm の波長帯における、マルチモード高空間的輝度 LD、高出力シングルモード LD について記述します。さらに、アイセーフ波長における高出力アレイの新たな進展について紹介します。

Keywords:

Diode, laser, semiconductor, bar, stack, array

ダイオード、レーザ、半導体、バー、スタック、アレイ

1. 緒言

従来型の端面発光高出力ダイオードレーザは、コンパクト性、ワットあたりの低コスト性、電気から光への卓越した変換効率、の理由で、印刷、防衛、医療、素材加工の分野に用いられてきました。これらの高出力ダイオードレーザは低輝度の応用に幅広く受け入れられる一方、低い空間的、スペクトル的輝度性能の低さ、高価なパワースケーリング則、限定的な発光波長のため、実際の使用は制限されてきました。特に、高出力ダイオードレーザからの空間的なビーム品質は、対抗する、ガスレーザ、固体レーザやファイバーレーザの非ダイオードレーザより 10-20 倍も低い係数です。そのうえ、従来のダイオードレーザのスペクトル出力は、これらの非ダイオードシステムより通常 1 桁広く、狭い線幅を必要とする、効率的な波長変換や、その他の励起のアプリケーションに不十分です。パワースケーリングは、個別に取り付けられたバーの出力を結合することによって、達成されます。それらのコストはパワーに比例するか、パワーに対して、より高価になるかです。最終的に、従来型の高出力ダイオードレーザの商業的に利用可能な波長範囲は、800nm から 980nm の近赤外線領域における広帯域のエミッションに限定されてきました。

私たちは、狭帯化した線幅を持ち、高い空間的輝度、高出力および高い製造ボリュームへの低費用スケラビリティを持ち、800nm からアイセーフまでの波長をカバーする、半導体レーザを報告します。私たちの目的は、従来のダイオードレーザの利点、デバイスコンパクト性、ワットあたりの低費用性、電気から光への卓越した変換効率を維持しながら、ワーキングディスタンスの向上、射程の拡大、スポットサイズの縮小、照射時間の短縮、広い波長カバー域、および、システムスループットの改善を行うことで、新たな段階の励起への応用と直接利用のアプリケーションを可能にすることです。

2. スペクトル輝度の進歩

半導体レーザの最も一般的な応用は固体レーザおよびファイバーレーザの媒質を励起することです。固体レーザは、より高い空間的輝度と、より狭帯化したスペクトルを生みだします。励起ダイオードの空間的輝度とスペクトル精度を向上させることは、レーザ設計者がレーザシステムのコンパクト性、効率、パワー及びビーム品質を改善することを可能にすると同時に、システムの熱管理コストを減少させることができます。また、さらに、ラマン分光や高機能 MRI などの科学、医療の励起アプリケーションは、操作し、あるいは調べる原子や分子から要求される、中心波長、スペクトル幅、および出力パワーに慎重にチューニングした、狭帯域の半導体レーザ照射を必要とします。適切な波長のレーザでサンプルを照射することにより、成分を決定し、化学反応を引き起こし、または制御するためのエネルギーをサンプルに導入することができ、サンプルを加熱、冷却でき、はたまた、物理的に操作しさえすることができます。

2.1. スペクトル輝度の進歩：内部グレーティングを持つシングルエミッター

内部グレーティングをもつシングルモードダイオードレーザの、比較的lowパワー域でのスペクトル狭帯化もしくは波長固定は既の実証されています¹。ハイパワーについては、MOPA へのシード光を用いる方式²、外部レンズ及びバルクグレーティング³、または VBG を用いる方式⁴、などの、外部型方式が実証されています。これらの、外部的アプローチにより狭帯域化した出力を達成するには、精密なアライメント技術、高価な外部レーザや光学部品、特別にデザインされたコーティングなどが要求されます。

内部グレーティングを持つモノリシックなダイオードレーザによるスペクトル制御の実現により、外部的光学部品の必要性を無くすることで、コストを抑え、デバイスの総合的な信頼性を向上させることができます。図 1、図 2 に、内部グレーティングを持つ、980nm、100 μm のシングルエミッターの結果を示します。レーザ出力 vs 駆動電流特性は、3.5W 時で 45% の変換効率を示しています。また、この時の出力スペクトルは FWHM \sim 0.2nm です。内部グレーティングは分散型ブラッグ反射鏡(DBR)として機能します。これはレーザの後方から発振周波数を決定するフィードバックを供給し、要求される励起波長でエミッターを確実に作動させます。

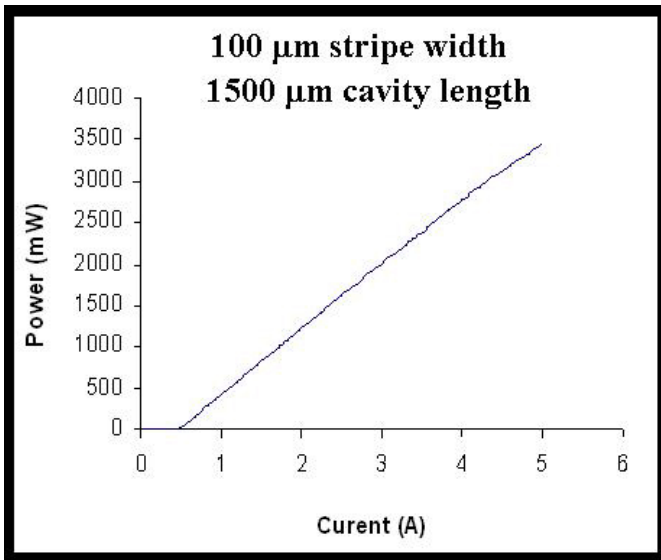


図1

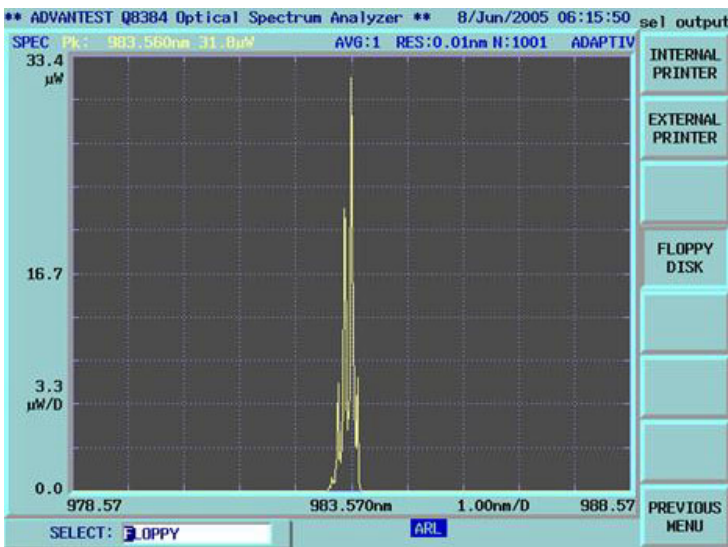


図2

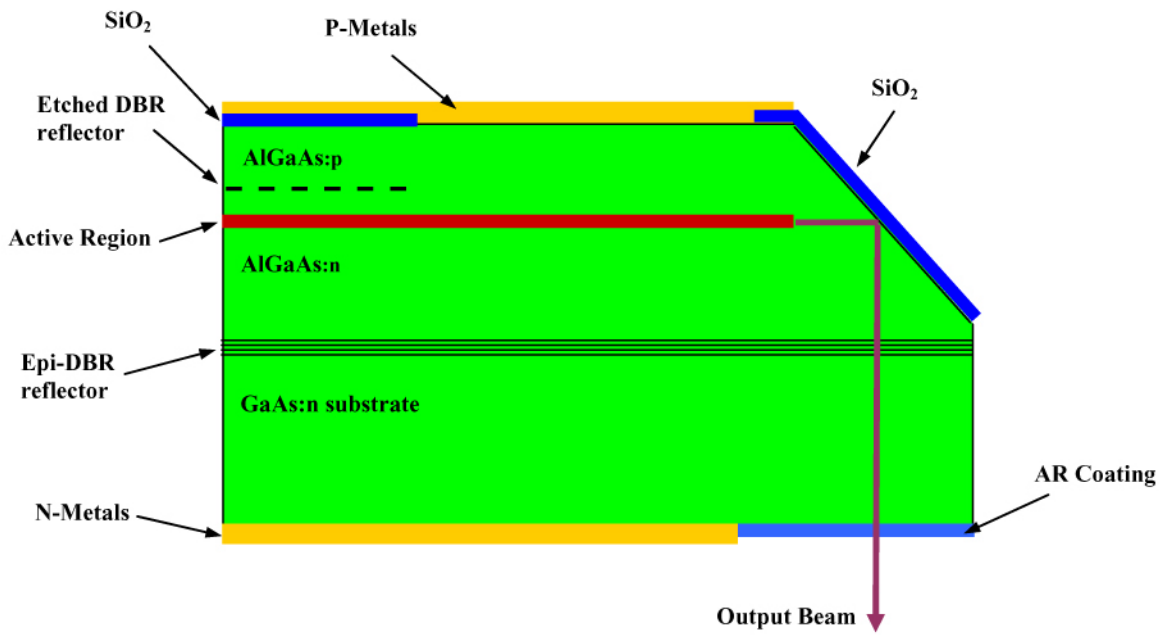
内部グレーティングを持つ半導体レーザーの性能は、内部グレーティングを持たない、従来型の高出力ダイオードや、外部グレーティング型の従来型ダイオードとは根本的に異なります。まず、0.2nm の FWHM スペクトルは、グレーティングのない従来型のハイパワーダイオードレーザーにおいて典型的な 1.5–4.5nm の FWHM に対して、顕著に狭帯化された値です。狭帯域のスペクトルは狭い吸収ピークを持つ媒質の励起効率を高めると同時に、スペクトルの再現性の良さは、レーザー設計者にシステム構造の、より多くの柔軟性を可能にします。内部グレーティング型デバイスと従来型ダイオードレーザーのもう一点の大きな違いは、波長の温度依存性係数の低さです。従来型ダイオードレーザーの波長–温度依存性係数は 0.3nm/°C ですが、一方、内部グレーティング型デバイスでは、0.08 nm/°C です。温度感受性の低減は温度安定化への要求を緩和させ、システムのサイズ、重量を低減させることが可能になります。3つめの大きな違いは、製造工程で達成される中心波長精度の顕かな改善です。従来型の励起レーザーは典型的に、 ± 3 nm の中心波長公差を有しています。これは、成長プロセス制御、均一性ファクター、さらには、ボンディングストレスによるものです。より高いコストで、わずかに狭い波長範囲(± 2 nm)を選抜することは可能です。一方、内部グレーティングがあるデバイスの波長は、グレーティングの間隔で決定されます。グレーティング間隔は正確に制御され、成長の均一性には影響されません。これにより、成長–成長、ウエハー–ウエハー間での中心波長精度を、 ± 0.5 nm に抑えることができます。製造プロセスにより改善された中心波長精度は、システムの熱管理要求を軽減し、結果的にシステムをよりコンパクトに、さらに重量を低減させます。しかも、ダイオードレーザーが、より狭い温度の変動幅にわたって操作されるので、与えられたレーザーデザインでのダイオードの寿命が、より一定であると予想されます。

2.2. 高いスペクトル輝度出力のパワースケーリングにおける進歩: 内部グレーティングを持つ 2D 表面発光アレイ

高出力ダイオードアレイは、通常、レーザーを2次元に配列するために、マイクロ・チャンネルで冷却されたリニアバーを積み重ねることで構成されます。携帯性、小型性、低コストまたは高い信頼性を必要とするシステムにおいては、個別にマウントされたバーを積み重ねる形の大規模なスタックは、解決すべきかなり挑戦的な課題を有します。各バーはそれぞれクリーブ、コーティング、テストし、個別の(そして高価な)クーラーにマウントされる必要があるため、法外に高価になります。マイクロクーラーのスタックには、他にも、侵食や詰まりによる頻繁なクーラーの故障や、隣接する層間の Oリングの不具合による冷却材のリークや、エッジマウント形状による高い熱抵抗と言った、重大な実用上の難点があります。

表面発光型ダイオードのモノリシックな 2 次元アレイは概念的にはるかに魅力的です: 完全な2次元アレイはウエハースケールで平行に処理し、はるかに低い製造コスト、劇的に少ない部品数と低い熱抵抗で、信頼性の高いマイクロチャンネルクーラーにマウントできます。例えば VCSEL やグレーティング型表面エミッターのような、表面発光レーザーやアレイのために今までに示されてきた技術は、高い熱/電気インピーダンス、大きなビームアスペクト比あるいは不安定性問題によりハイパワーアレイに対しては現実的ではありませんでした。より実際的なアプローチとしては、基板内のレーザーをドライエッチングによる 45 度ターニングミラーにモノリシックに結合させることです^{5,6};しかしながら、これらのミラーは光学的に粗く、平らでなく、アライメントが不正確になると言う傾向にあります。ドライエッチングプロセスはまた、半導体材料の正面ファセットに本質的に悪い影響を与え、したがって、これらの装置の信頼性を下げる可能性があります。

我々はドライエッチングなしで製造された 45 度ターニングミラーを使った 2 次元発光アレイをデモンストレーションしました。このプロセスは、新しいウエットエッチング技術により、 0.1° 以上の精度の光学的に滑らかなミラーを作り出します。図 3 は正面ファセットウインド形状と 45 度の内部全反射 (TIR) ターニングミラーを使用した垂直発光レーザーエレメントの概略図です。DBR (Distributed Bragg Reflector) がレーザー後部からフィードバックを供給し、光は TIR ミラーで反射した後、基板を通過するよう誘導されます。発振周波数は DBR によって決定され、アレイ全体を要求された励起波長で確実に作動させます。



< 図 3 >

図 4 に、22 個の元素から成る 10 列の 2D アレイの CW L-I の性質を示します。このアレイのパッケージは素子の各列が電氣的に直列になるように設計されており、駆動電流 60A で約 300W の最大出力が得られています。図 5 は 50A での発光スペクトルです。スペクトルの FWHM は約 0.9nm で、DBR リアミラーからの周波数選択フィードバックにより、類似のファブリペローアレイと比べてかなり狭くなっています。さらに、発振周波数の温度依存性は、 $\sim 0.08\text{nm}/^\circ\text{C}$ と、ファブリペローに比べ非常に低い値になっています。最大出力の主たる制限要因は、熱の除去です。従って、パッケージの熱設計の更なる最適化により、アレイの最大出力をさらに引き上げることが期待できます。図 6 はアレイのパッケージ全体の写真です。全 10 列のアレイが非常に信頼性の高いひとつのマクロチャンネルクーラーで冷却されていると言うことを述べておかなければなりません。従来の端面発光アレイは、10 台の個々のマイクロチャンネルクーラー（各列に 1）と少なくとも 20 の十分な弾性を有する O-リングシールを必要とします。

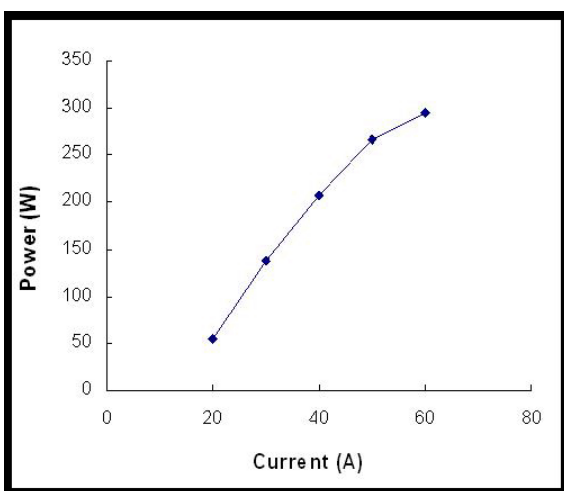


図4

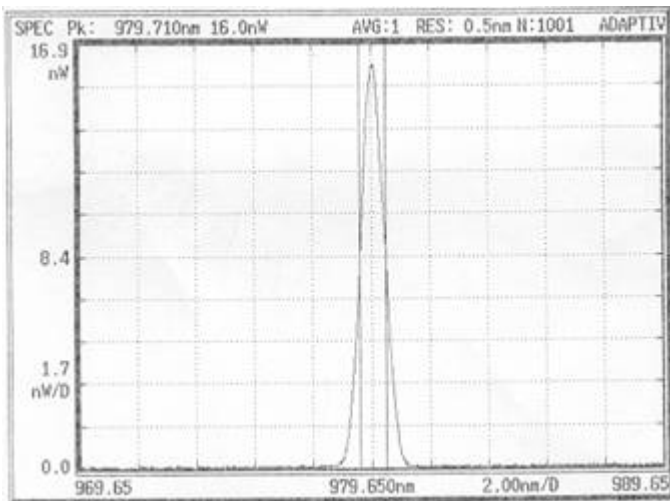


図 5



図6

3. 空間的な輝度における進歩

直接使用の場合でも、他のレーザーのための励起源として使用される場合においても、また、光学的エネルギーをターゲットに導いたり、ターゲットの物理的特性を非接触で測定する目的でターゲットからの一部の反射を受光するなどのさまざまな応用を含めて、高輝度でハイパワーの半導体レーザーは理想的光源です。また、その高効率性、コンパクトなサイズ、軽量性、頑丈さ、及び、運転費用の低さの点で、従来のガスやソリッドステートのレーザー方式と比較しても、加工応用に理想的な光源であると言えます。その結果、プラスチック溶接、はんだ付け、表面硬化や、粗いマークなどのダイレクトダイオード加工での応用は非常に成功してきました。高輝度ダイオードとアレイが利用可能になるのに応じて、マーキング、非金属、金属の切断、および金属の溶接を含む、多くのアプリケーションがますます広範囲になると予想しています。

3.1. 回折限界にほぼ近いレーザーの進歩:3W テーパーエミッターによる 980nm パー

これまでに、テーパー素子により、回折限界の高いビーム品質を保ちながら 1W 以上の高出力が達成できると示されてきました。テーパーレーザーは通常ふたつの部分から成ります。狭導波路部とテーパーゲイン部です。狭導波路部では、レーザービームはシングルモード導波路によって横方向に制限され、適度な強度を持つ安定したビームを発生します。このビームがモードフリーなテーパーゲイン部分に導入され、テーパー状のゲインエリアにより増幅されます。モリシックテーパーの構造では、回折限界近くのパワーレベルは通常比較的低パワーでのフィラメント化で制限され、ビームの質がハイパワーにおいて劣化するため生産性は比較的低くなります。⁷⁻¹¹

我々は $>3\text{W}/\text{エミッター}$ の 980nm ハイパワー、高輝度 InAlGaAs テーパレーザアレイをデモンストレーションしました。各テーパエレメントは効果的にモードフィルタのように働く、埋め込みヘテロ構造(BH)シングルモード導波路と結合しています。アレイはCWテストのためにCSタイプの伝導性冷却ヒートシンク上にジャンクション側を下にしてマウントされました。図7は 980nm 高輝度 InAlGaAs テーパレーザアレイの概略図です。アレイは $900\mu\text{m}$ の間隔で配置された12のテーパオシレーターでできています。BHシングルモード導波路は $\sim 1.5\mu\text{m}$ 幅、 $750\mu\text{m}$ 長です。テーパのゲイン領域は出力ファセットにおいて $1200\mu\text{m}$ 長および $250\mu\text{m}$ 幅です。

図8は 980nm ハイパワー、高輝度 InAlGaAs テーパレーザアレイのCWパワーに対する電流とウォールプラグ変換効率のカーブです。アレイは、 7A のしきい値電流と、そのしきい値以上で $0.86\text{W}/\text{A}$ のスロープ効率を持っています。バイアス 50A において 35W の出力($\sim 3\text{W}/\text{エレメント}$)とウォールプラグ効率 45% が達成されました。

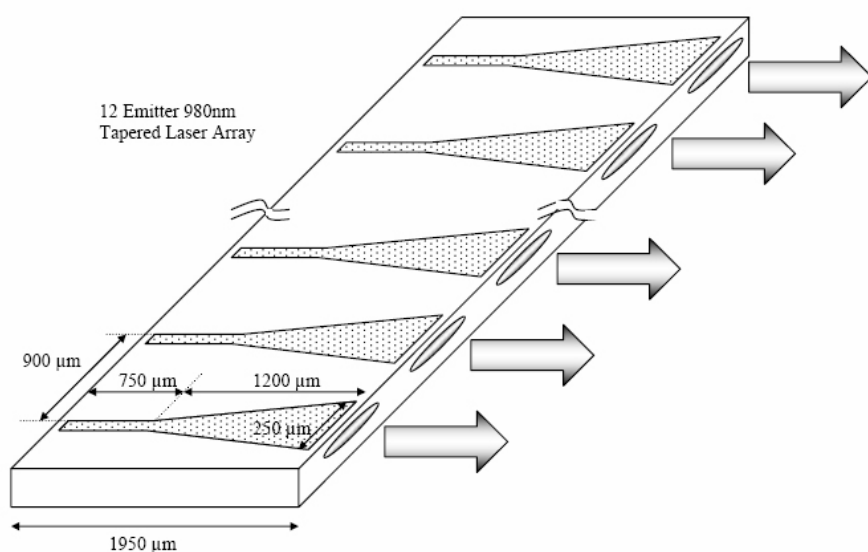


図7

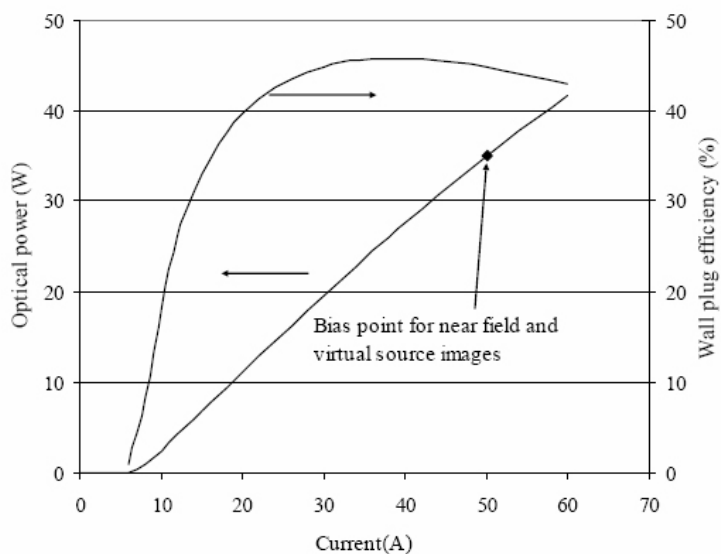


図8

3.2. マルチモードの輝度における進歩: COD に対して高しきい値をもつ 808nm エミッター

800nm の領域における、レーザダイオードの最大の光学出力パワーは壊滅的光学損傷 (catastrophic optical damage: COD) によって制限されます。COD は、ファセット温度が半導体の材料の融点に達すると、発生します。ファセット加熱の 2 つの最前の要因は、レーザ光のファセット近傍での吸収と、クリーブしたファセットの表面状態における、電子-ホールペアによる非放射的再結合です。従って、高いバンドギャップ、すなわち電流ブロック領域をファセットに挿入することにより、ファセットにおける光吸収、漏洩電流を抑制することが期待されます。

12, 13

私たちは、非吸収鏡(NAMs)をもつ、808nm で動作するシングルストライプの InAlGaAs レーザダイオードを実証しました。NAM は、エピタキシャル再成長プロセスにより、ファセットの近傍に、光学的に非吸収で、かつ電氣的に絶縁性の領域を生成することで、作成されます。NAM により、COD パワーは2倍以上に上昇し、レーザダイオードの信頼性は大きく改善されます。

808nm の典型的な再成長 NAMレーザと標準的な 808nmレーザの、光学出力パワー-電流特性カーブを図9に示します。両デバイスともに、出力アパチャーは $50\ \mu\text{m}$ 幅です。非 NAM808nm の COD パワーは 2.3W で、パワー密度は $46\ \text{mW}/\mu\text{m}$ です。他方、NAMレーザは、ファセット破壊の前に、出力パワー6W以上に達しています。この時のパワー密度は、 $125\ \text{mW}/\mu\text{m}$ です。再成長 NAMs を持つ 808nm の InAlGaAs レーザの、2.5A 動作時の縦モードスペクトルは、 $\sim 2\text{nm}$ のスペクトル幅をもつシングルピークです。

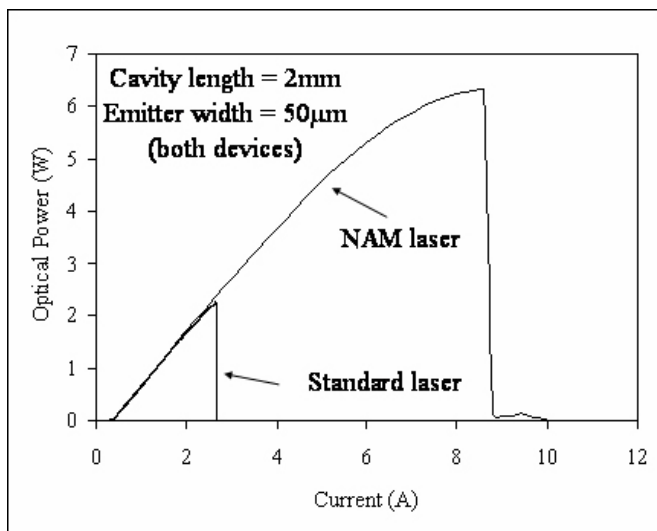


図 9

再成長 NAM によって低減されたファセット温度は、COD レベルを上昇させるだけでなく、レーザダイオードの信頼性をも大いに改善します。図 10 は 2.9A のドライブ電流の 808nm の NAM レーザからのライフテストデータを示します。光学パワーは 2.5W で、マウント温度は 20°C です。デバイスは AuSn ボンディング材を使用し、熱膨張係数 (CTE) を整合させたサブマウントに、ジャンクションを下にマウントしてあります。プレスクリーニングは行っていません。2.9A ($50\ \text{mW}/\mu\text{m}$) のオペレーションで、出力低下率は、測定の雑音ノイズレベルより小さい値を示しています。2.9A の電流での 808nm NAM チップのライフテストは、NAMS のない 808nm デバイスでの COD 限界に近いパワー密度であることに注目してください。

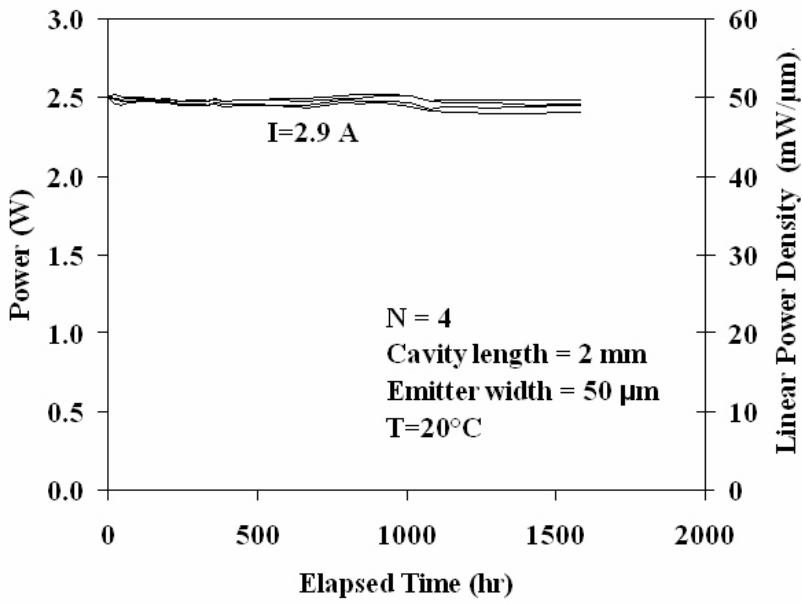


図 10

4. アイセーフな波長領域における性能の進歩

1.2 μ m~2 μ m 領域におけるダイオードレーザは Er:YAG レーザ励起システム、材料プロセス、美容医療トリートメント用直接ダイオード光源などの様々なアプリケーションに使用されています。コンパクト、高効率、低コストなどの利点をもつ、従来のダイオードレーザに加えて、アイセーフ波長の高出力半導体レーザが、レーザ光源、伝送システムまたはターゲットそのものからの、潜在的に危険な散乱光の故意でない影響を最小化する為に、広く使われるようになって来ています。

QPC 独自の InGaAsP/InGaAs/InP デザインにより、図 11 で示されるように $\sim 0.7^{\circ}$ C/W の熱抵抗の伝導性冷却ヒートシンク上で、 20° Cにおいて1470nmの20Wの信頼できる動作をデモンストレーションしました。この時の変換効率は、ほぼ40%です。図 12 で示すように、5000 時間以上低電流モードで動作している3本のバーのライフテストでは、出力低下は3%です。

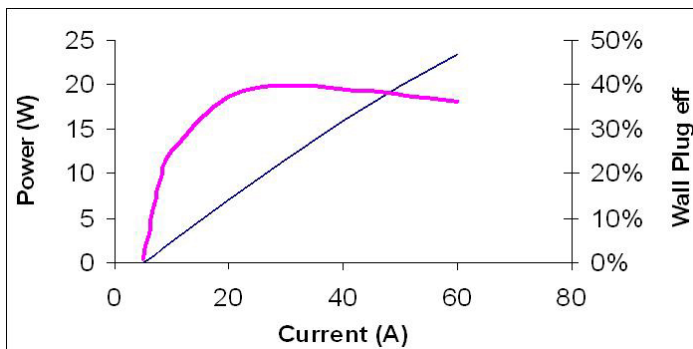


図 11

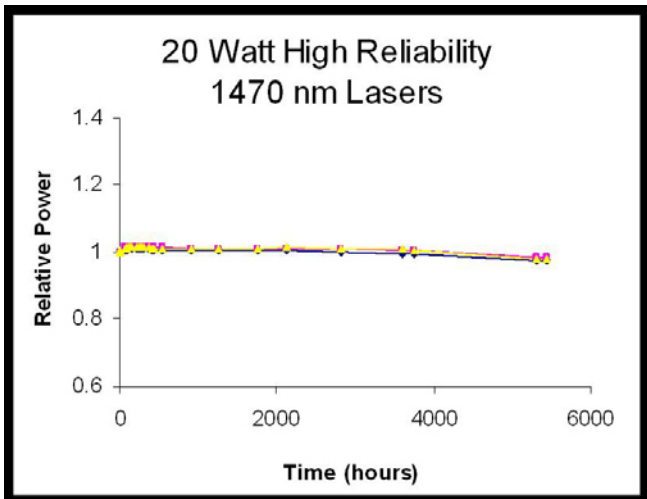


図 12

さらに我々は、 $\sim 0.4^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 熱抵抗の水冷マウントで、1.5mm キャビティ長、50% Fill Factor 形式のこれらのデバイスをテストし、 $\sim 160\text{A}$ だけで 65W を達成しました。これは今までに報告された結果よりかなり効率的です。これらのデザインは、単純に励起されるエリアを増やすことにより、かなりの高いパワーにまで、スケールアップ可能です。

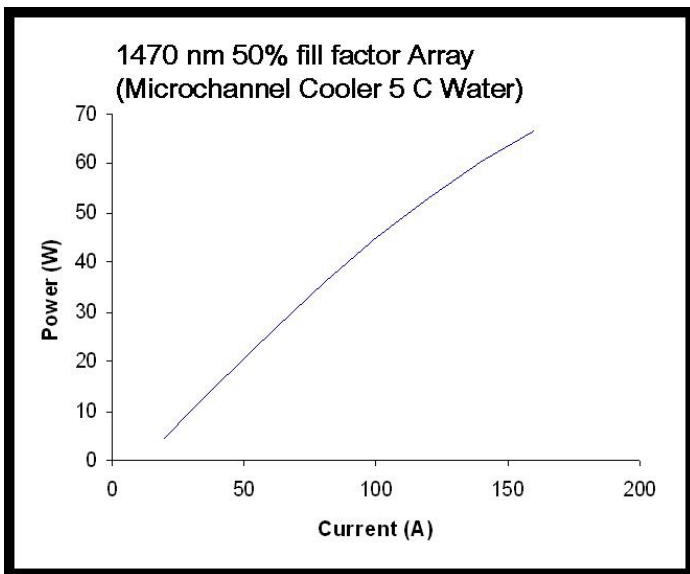


図 12

アイセーフ Er:YAG レーザ (1645nm) の励起波長として魅力的な 1532nm にも、同様のレーザデザインが適用できます。図 13 は 25% のフィルファクターでの性能です。1mm キャビティ長のアレイが伝導性冷却マウントに固定されています。性能は 1470nm と同等です。

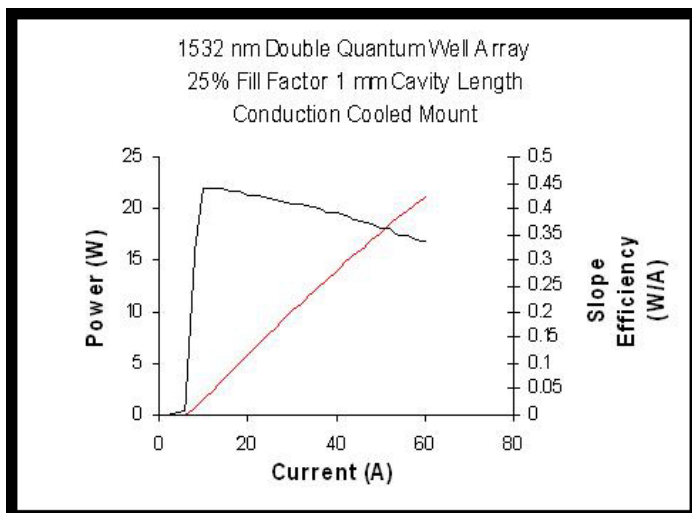


図 13

5. 結論

最近の高輝度、ハイパワー半導体レーザー技術の進展: 内部グレーティングを持つシングルエミッターからの 0.2nm FWHM スペクトル幅、内部グレーティングを持つスケーラブルハイパワー 2 次元表面発光アレイからの <1nm FWHM、NAMs での >125mW/um808nm マルチモード発振、980nm テーパー素子からの >3W シングルモード/エミッター発振、効率的で信頼性の高いアイセーフ赤外波長の高出力レーザーアレイ発振について、報告しました。

ACKNOWLEDGEMENTS

Part of this work was supported by the Naval Air Warfare Center Weapons Division under Contract Number N68936040C-0028 and by the US Army CECOM under contract DAAB07-03-C-L415.

REFERENCES

1. "High Reliability, High Power InGaAs/AlGaAs 980 nm Distributed Feedback Lasers with Nonabsorbing Mirrors", Lammert, R.M., Ungar, J.E., Oh, S.W., Osowski, M.L., Bar Chaim, N., LEOS '99, IEEE Lasers and Electro-Optics Society 1999 12th Annual Meeting vol .1 p194
2. Wolfring, B.J.;Kaenders, W.G.;
Quantum Electronics and Laser Science Conference, 1999. 23-28 May 1999 Page(s):63 - 64, "Injection-locked diode laser system delivering up to 200 mW tunable single-mode output at 685 nm"
3. Yiou, S.;Balembois, F.;Georges, P.;Huignard, J.-P.;
Lasers and Electro-Optics Europe, 2003.CLEO/Europe2003 Conference on 22-27 June 2003 Page(s):157, "Narrow beam divergence of laser diodes with a Bragg grating in external cavity"
4. Ciapurin, I.;Smirnov, V.;Venus, G.;Glebova, L.;Rotari, E.;Glebov, L.;
Lasers and Electro-Optics, 2004.(CLEO).Conference on Volume 1, 16-21 May 2004 Page(s):3 pp. vol.1, "High-power laser beam control by PTR Bragg gratings"
5. D.W. Nam et al., IEEE Photon.Tech.Lett., 5, 281 (1993).
6. J.P. Donnelly et al., IEEE Photon.Tech.Lett., 5, 747 (1993).
7. P.Chazan, S. Morgott, M. Mikulla, R. Kiefer, G. Bihlman, R. Moritz, J. Daleiden, J. Braunstein, and G. Weimann, "Influence of the epitaxial layer structure on the beam quality factor of tapered semiconductor amplifiers," presented at 10th IEEE LEOS Annu. Meet., San Francisco, CA Nov. 10-13, 1997, Paper ThP4.
8. S.H. Cho, S. Fox, F.G. Johnson, V. Vusirikala, D. Stone, and M. Dagenais, "1.9W Quasi-CW from a near-diffraction limited 1.55 μ m InGaAsP-InP Tapered Laser," IEEE Photon.Technol.Lett., vol. 10, pp.1091-1093, 1998.
9. M.Mikulla, A. Schmitt, M. Walther, R. Kiefer, W. Pletschen, J. Braunstein, and G. Weimann, "25W CW HighBrightness Tapered Semiconductor Laser-Array," IEEE Photon.Technol.Lett., vol. 11, pp.412-414,

1999.

10.E.S. Kintzer, J.N. Walpole, S.R. Chinn, C.A. Wang, and L.J. Missaggia, "Highpower, strained-layer amplifiers and lasers with tapered gain regions," IEEE Photon.Technol.Lett., vol. 5, pp.605-608, 1993.

11.S.Delephine F. Gerard, A. Pinquier, T. Fillion, J. Pasquier, D. Locatelli, J.P. Chardon, H.K. Bissessur, N. Bouche, F.R. Boubal, and P. Salet, "How to launch 1W into single-mode fiber from a single 1.48 μm flared resonator," IEEE J. Select, Quantum Electron., vol. 7, pp.111-123, 2001.

12.J.Hashimoto, N. Ikoma, M. Murata, and T. Katsuyama, "A highly reliable GaInAs-GaInP 0.98- μm window laser," IEEE Quantum Electron., vol. 36, pp.971-977, 2000.

13.T.Yagi, Y. Tashihisa, Y. Ohkura, S. Abe, H. Nishiguchi, and Y. Mitsui, "Thermal rollover around 460 mW observation in single-lateral mode 780 nm laser diodes with window-mirror structure," Jpn.J.Appl.Phys., vol. 42, pp.2316-2319, 2003



光技術をサポートする

株式会社オプトサイエンス

<http://www.optoscience.com>

東京本社 〒160-0014 東京都新宿区内藤町1番地 内藤町ビルディング
TEL:03(3356)1064 FAX:03(3356)3466 E-mail:info@optoscience.com
大阪支店 〒532-0011 大阪市淀川区西中島7-7-2 新大阪ビル西館
TEL:06(6305)2064 FAX:06(6305)1030 E-mail:osk@optoscience.com
名古屋営業所 〒450-0002 名古屋市中村区名駅2-37-21 東海ソフトビル
TEL:052(569)6064 FAX:052(569)8064 E-mail:ngo@optoscience.com