

## 固体レーザー励起用高出力半導体レーザーアレイ

菅 博文・宮島 博文・神崎 武司・宮本 昌浩・晝馬 輝夫

これまで、固体レーザーの励起光源には高輝度フラッシュランプが使用されてきた。フラッシュランプは70%以上という高い電気光変換効率をもっているが、図1に示すように発光スペクトルが紫外域から赤外域の広範囲にわたっているため、固体レーザー材料の吸収スペクトルとの整合性が悪く、レーザー光への変換効率は低い。このため、固体レーザーへの熱負荷が大きくなる。そのため、高繰り返し高平均出力を得ることが困難であり、固体レーザー材料媒質の歪みが発生するため、熱対策が大きな問題であった。

これらの問題点を解決するために高出力半導体レーザー(LD)を励起光源とする固体レーザーが提案され、最近では次世代の固体レーザーとして活発に研究、開発がおこなわれ、製品化が進んでいる。高出力半導体レーザーを固体レーザーの励起光源として使用する特長は、従来のランプ励起方式と比べて高効率、高信頼性、小型化、高品質化、高繰り返し化、高出力連続動作可能などが考えられる。さらにこれまでランプ励起方式では熱伝導率が悪い、あるいは大型結晶を得ることが難しいなどの理由によって、顧みられなかった固体レーザー結晶が再検討されつつあり、またセラミック材料などの新材料の開発も活発である。

一方、この固体レーザー励起用の高出力半導体レーザーの高出力化、高効率化の研究開発もさかんにおこなわれている。その結果、最近ではアメリカ、フランス、ドイツなどの各国から高出力半導体レーザーが市販されるようになり、製品の低価格化も進んでいる。

日本では数十 mW クラスの量産型半導体レーザー、高性能半導体レーザーの研究開発、実用化が進み、世界をり

ードしている。しかし、固体レーザー励起用高出力半導体レーザーの研究開発製品化は数社を除いてほとんどおこなわれなかった。その結果、現在はほとんど輸入品に頼っている。

今回、固体レーザー励起用光源として高出力 LD の試作をおこない、励起用光源に適した LD を開発したので、それらの結果と最近の進展について報告する。

### 1. 半導体レーザーの高出力化

現在、よく用いられている固体レーザー材料の一覧を表1に示す。種々の材料が使用されている。これらの材料に適する高出力半導体レーザーも併せて表1に示す。種々の波長の半導体レーザーが必要になる。これらの半導体レーザーに用いられる材料は通常図2に示すIII-V族化合物半導体である。この中で GaAs/AlGaAs 系の材料、GaAs/InGaAsP/GaInP 系材料、InP/InGaAs 系材料が多く用いられている。これらの材料を用いてまず、単一素子半導体レーザーの高出力化を達成する。そのために結晶構造、素子構造の最適化を図り、有機金属成長法または、分子線エピタキシャル成長法にて、レーザー構造用多層膜成長をおこなう。半導体レーザーの高出力化のために素子構造として、ブロードエリアタイプの構造を用いる。このタイプの半導体レーザーは発光部が100~400  $\mu\text{m}$  あり、CD用などの半導体レーザーの発光部が5  $\mu\text{m}$  程度の素子と比較すると発光部は1~2桁以上広い。その結果、図3に示すように単一素子の半導体レーザーでも数 W のレーザー出力が得られる。

単一素子の高出力に成功すると、この素子のアレイ化をおこない高出力化を図る。一般的には図4に示す1次元アレイを基本単位として製作する。アレイの長さは1 cm である。この1 cm バーの中にブロードエリア型 LD をアレ

浜松ホトニクス株式会社中央研究所 (〒434-8601 浜北市平口5000)

E-mail: kan@crl.hpk.co.jp

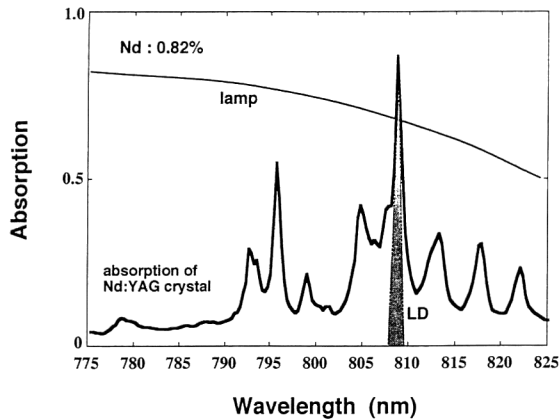


図1 固体レーザー材料 (Nd:YAG) の吸収スペクトルと励起用光源の関係。

表1 代表的な個体レーザー材料と励起用半導体レーザー。

半導体レーザー		個体レーザー	
材料	波長 (nm)	材料	波長 (nm)
InGaAs	900~1000	Yb: YAG	1031
		Yb: FAP	1043
		Yb: YLF	1020
		Yb, Er: glass	1545±12
		Er: Fiber	1530
		Er: YAG	2937
		Nd: YAG	1064
AlGaAs	780~810	Nd: YVO	1064
		Nd: YLF	1047
		Nd: glass	1054
		Tm: YAG	2021
		Tm, Ho: YAG	2090
		Tm, Ho: YLF	2067
		Tm: YLF	1500
AlGaInP	615~690	Er: YLF	2800
		Cr: LiSAF	750~1000
		Cr: LiCAF	700~900
		Cr: LiSGAF	700~1100
		Cr: LiSCAF	750~950

イ状に配列する。さらに高出力化を達成するために図5に示すように2次元にスタック化する。このように1次元, 2次元にアレイ化して大出力化を達成する。

## 2. 高出力半導体レーザーアレイの試作

半導体レーザー素子の特長は量産化, 集積化が可能な点である。単一素子半導体レーザーの出力が数Wでも, この半導体の特長を生かして素子を100個1000個と集積すれば, 小型, 軽量で100W~1kW級のレーザーが容易に製作できる。

発光形状も, 励起する固体レーザー材料に合わせて点状に集光したり, 線状にしたり, 面状にすることが可能である。

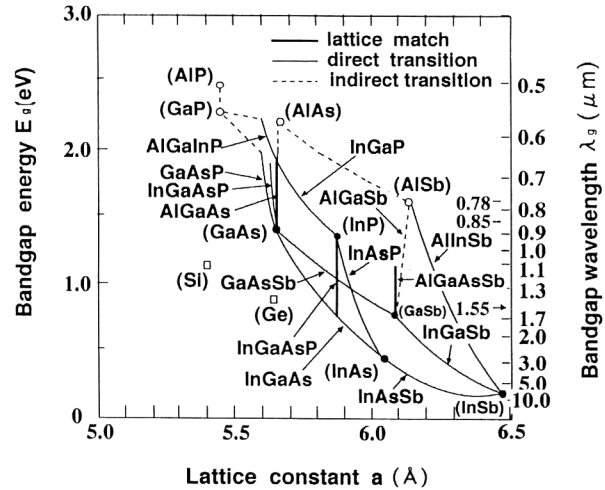


図2 III-V族化合物半導体材料のバンドギャップエネルギーと格子定数の関係。

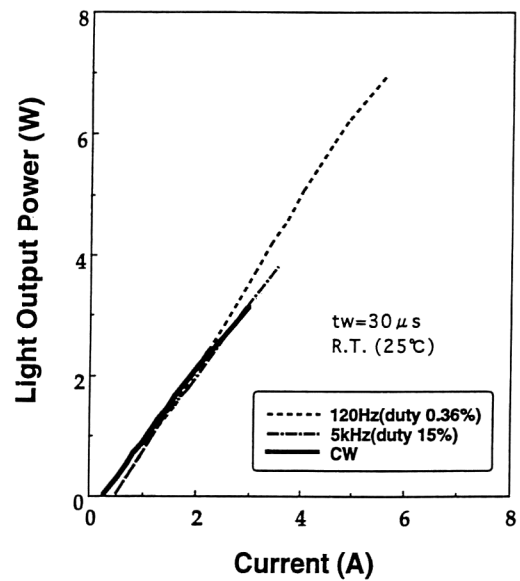


図3 単一素子高出力半導体レーザーのレーザー出力と動作電流との関係。

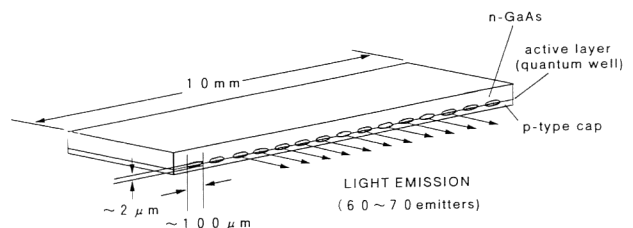


図4 1 cm バー高出力半導体アレイ。

まず, パルチエクーラーで冷却可能な4層スタック, 発光部1.2 mm×10 mm, 擬連続動作 (QCW動作, パルス幅200 μs, 繰り返し50 Hz, デューティー1%) 高出力半導体レーザーを試作した。この4層スタック高出力レーザ

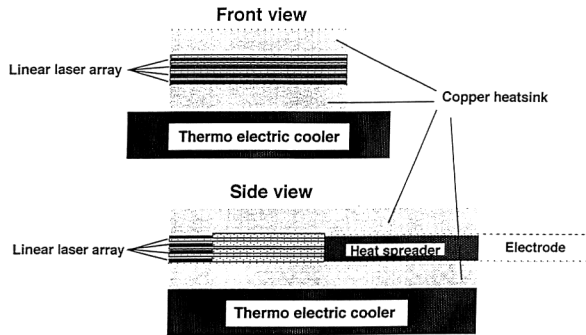


図5 2次元高出力半導体アレイ（電子冷却型）。

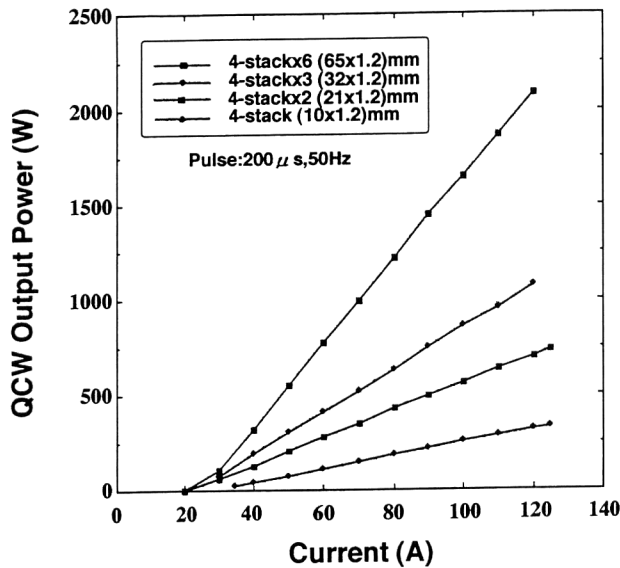


図6 4層スタック型2次元高出力半導体レーザーアレイのレーザー出力と動作電流の関係（電子冷却型）。

ーを使用して固体レーザー材料を横方向から励起する場合、できるだけ継目のない高密度な光で励起したい。そのために4層スタックを2アレイ、3アレイ、6アレイとして固体結晶の軸方向に合わせて細長い励起のビーム形状で発振させることができる。発光部はそれぞれ1.2 mm×21 mm, 1.2 mm×32 mm, 1.2 mm×65 mmになる。このアレイの電流-光パワーの特性を図6に示す。図からわかるように、光出力はアレイの数にほぼ比例して、2アレイ、3アレイ、6アレイでそれぞれ約700 W, 約1 kW, 約2 kW以上のピーク光出力を得ることができた。図7に4層スタック6アレイ高出力レーザーの近視野像の写真を示す。均一に発光している。いずれも下部をペルチェクーラーで冷却している。さらに高いピーク光出力は4層以上のスタックにしなければならない。スタックの数が増えると上部のレーザーバーからの放熱が悪くなる。このため擬CW動作の場合でも裏面を水冷する組立方式が用いられる。図8に1 cmバーを12層重ねた12スタックおよび12

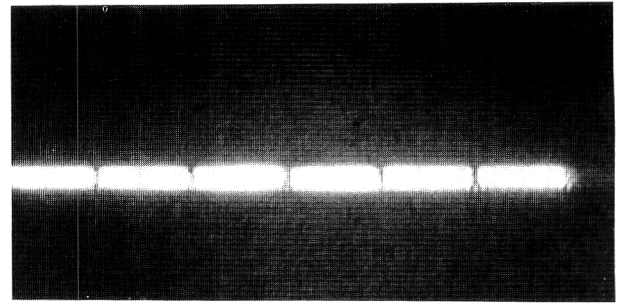


図7 4層スタック×6アレイ、高出力半導体アレイの発光パターン（ピークのレーザー出力：2 kW、動作条件：200 μs, 50 Hz, 発光部1.2 mm×65 mm）。

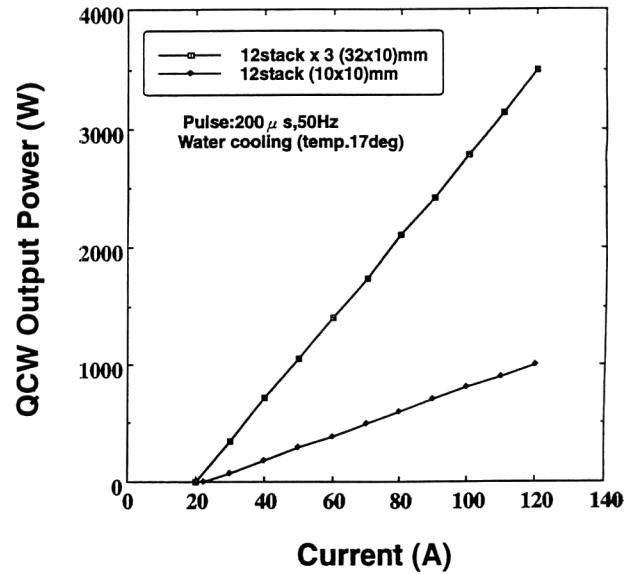


図8 12スタック、2次元半導体アレイの光出力と動作電流の関係。

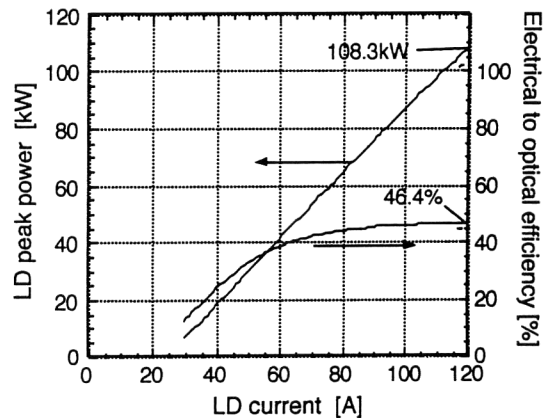


図9 1000スタック、2次元高出力半導体レーザーのレーザー出力と動作電流の関係（擬CW、背面水冷型）。

スタックの3アレイ型の2次元半導体レーザーの電流-光出力の特性を示す。12スタック1個でピーク光出力1 kW以上、12スタック、3アレイ（発光部面板10 mm×32

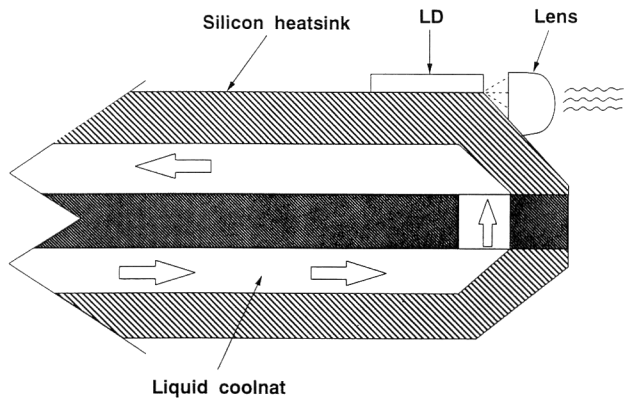


図10 Siを使用したマイクロチャンネル方式のヒートシンクの例。

mm) でピーク光出力3 kW以上を達成した。このように半導体レーザーを使用して擬連続動作で、ピーク光出力、kW級のレーザー出力を得ることが可能になってきた。さらに高いピーク出力はアレイの数を単に増加し、集積化することによって、可能である。図9に示すように1000本の1 cmバーを集積し、100 kW以上のピーク出力を得ることができた。

ところで、半導体レーザーの電気-光変換効率は現在のところ、およそ50%位である。投入した電力の半分が熱となる。高繰り返し動作～連続動作を必要とする産業応用の固体レーザーの励起光源として用いる場合は、この熱の除去が重要な課題となる。

この熱除去の方式として世界的には図10に示したSi(シリコン)や銅材を用いたマイクロチャンネル方式が主流である<sup>1)</sup>。Siまたは銅中の細管を流れる冷却水により、LDバーの直下を効率よく冷却する方式である。この方式では連続動作(CW)で1 cmバー当たり100 W以上の出力が得られている。

マイクロチャンネル方式の場合、水の粘性のためにマイクロチャンネル壁の傍の流速が遅くなる。このためにある程度加圧して流速を大きくしなければならない。そこで、構造が簡単でローコスト化が可能な噴流冷却方式を開発した。図11に概念図を示す<sup>2)</sup>。冷却水は下部、横方向から流入し、半導体チップの直下に設けられた穴から噴き上がる噴水によって冷却される。この方式は水路がマイクロチャンネル方式の水路と比較して2桁以上大きく、水圧もマイクロチャンネル方式と比較して1/3以下の良好な結果を得た。

図12に開発した噴流水型ヒートシンクを用いた高出力半導体レーザーの代表的な特性を示す。擬CW動作(デューティー比1%, 20%), および連続動作条件での試作結果を示す。デューティー比1%と20%と連続動作でほとんど差がなく、噴流冷却方式の高い冷却効率のよさが表れて

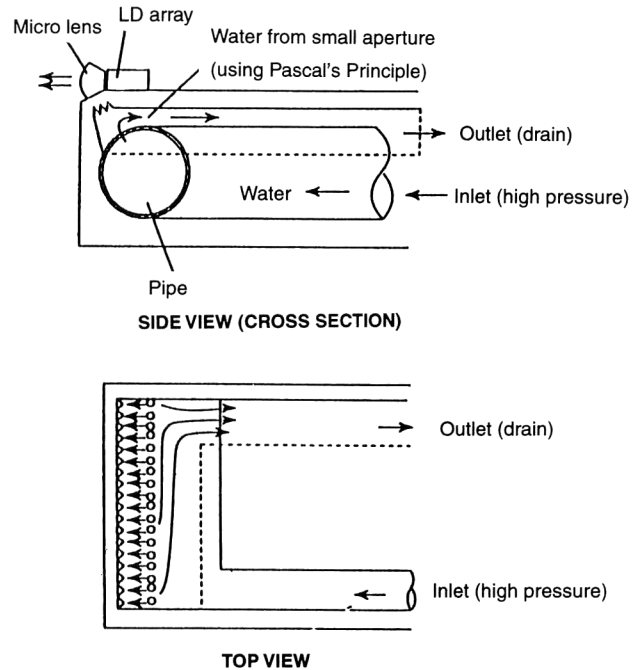


図11 噴流水による冷却方式のヒートシンクを用いた高出力半導体レーザーの説明図。

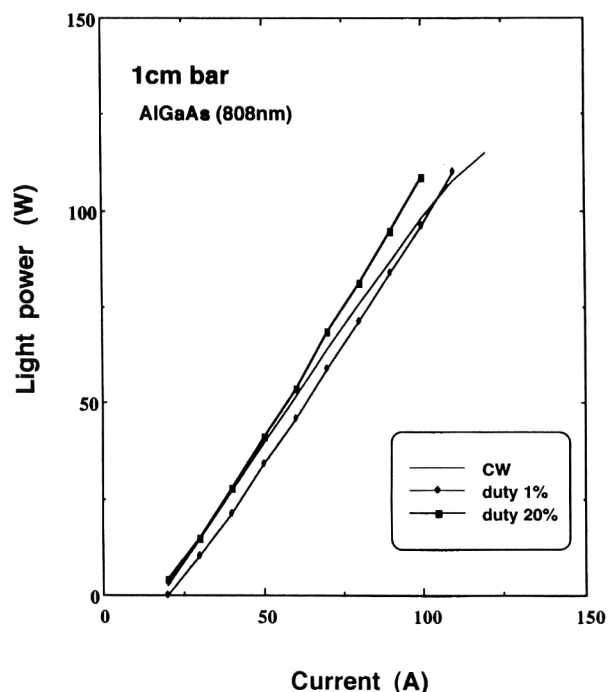


図12 噴流冷却方式で冷却した1 cmバー半導体レーザーのレーザー光出力-動作電流特性(擬連続動作と連続動作の比較)。

いる。

冷却効率が良い理由のひとつに、LD直下においてパイプ壁に水が衝突するため、水の流速が速くなり熱交換が効率よくおこなわれていると考えられる。このように新しい噴流冷却方式によって連続動作でも1 cmバー当たり100 W以上のレーザー出力が得られるようになった。このと

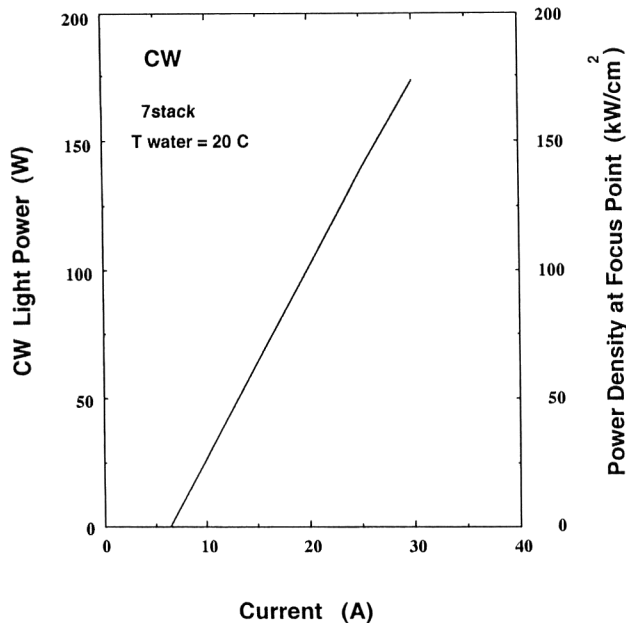


図13 噴流冷却方式を用いた7層スタックの高出力半導体レーザーの光出力-動作電流特性。

きの電気-光変換効率は51%であった。

最近大出力半導体レーザーを直接集光して産業応用に用いようとする研究がおこなわれている。そこで、7層にスタック化（発光部10mm×9mm）した連続動作100W以上の出力が得られる半導体レーザーをマイクロレンズを使って集光した。その結果を図13に示す。出力100Wの7層スタックの2次元LDアレイの出力を約1000倍以上に相当する100kW/cm<sup>2</sup>以上の集光強度にすることができた。

固体レーザー励起用の高出力半導体レーザーについて説明した。高出力半導体レーザーの電気-光変換効率は約50%程度であり、残りは熱となる。この熱を除去する方式は高出力半導体レーザーの駆動条件によって異なり、電子冷却方式、背面冷却方式、マイクロチャネル方式がこれまで使われてきた。今回新しく噴流冷却方式を提案し、試作をおこなったところ、マイクロチャネル方式の冷却効果と同程度か、それ以上の効果が得られた。この方式はマイクロチャネル方式と比較して製作が容易なため、低価格には有利であり、それほど高圧の冷却水も必要でなく、使いやすい。今後、さらに研究を重ね、最適条件を見いだすとともに量産化、低価格化を図り、固体レーザー励起用、高出力半導体レーザーの市場の拡大を図りたい。

現在、半導体レーザー励起固体レーザーは、比較的低いレーザー出力で微細加工用として応用されるようになってきている。今後高出力半導体レーザーの開発により高出力全固体レーザーが出現し、高出力を必要とする産業分野へも応用が拡大していくものと考えられる。さらに高出力半導体レーザーを直接産業に応用しようとする技術が進展するものと考えられる。

## 文 献

- 1) J. G. Endriz, M. Vakili, G. S. Browder, M. Devito, J. M. Haden, G. L. Harnagel, W. E. Plano, M. Sakamoto, D. F. Welch, S. Willing, D. P. Worland and H. C. Yao: "High power diode laser arrays," IEEE J. Quantum Electron., 28 (1992) 952-965.
- 2) 中井貞雄, 山中正宣, 宮島博文, 神崎武司, 菅 博文: 特開平 8-139479.

(1999年4月30日受理)