レーザー装置の基礎：II —全固体化レーザー—

山中 正宣, 中井 貞雄

大阪大学レーザー核融合研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

The Technical Basis of Lasers: II - All Solid-State Lasers -

Masanobu YAMANAKA and Sadao NAKAI

Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

(Received August 31, 1998)

1. はじめに

高出力の固体レーザーには、ランプ励起と半導体レーザー(LD: Laser Diode)励起の2方式があり¹⁻⁴⁾,それぞれ出力が6kW⁵⁾と5kW⁶⁾に達している。技術の動向(高効率化, 高ビーム品質)やコスト低減の可能性から,今後の進展はほぼ後者に特化されることになろう。LD励起固体レーザーは励起光源としてLDを用いることより,全固体化されたレーザー(ホロスティックレーザー)とも呼ばれている。またDiode-Pumped-Solid-State-Laserの頭文字をとってDPSSLともいわれている。本講では,DPSSLの原理から現状までを概観することにする。

2. LD 励起固体レーザーの動作原理

良く知られているように,レーザーは1)レーザー媒質,2)励起源及び3)共振器より構成されている。2)の励起源にLDを,1)のレーザー媒質に固体を用いるのがLD励起固体レーザー(DPSSL)である。室温動作する高出力・高効率・長寿命のLDの開発が1980年代後半より急速に進み,低価格化も進んだことによりLD励起固体レーザーが最近非常に注目されるようになった¹⁻⁴⁾。

固体レーザー材料の励起に用いられている主要なLD(波長域)はInGaAsP(1300-1500nm), InGaAs(900-1000nm), AlGaAs(780-810nm), AlGaInP(615-690nm)である。これらLDの動作波長域に強い吸収線を有する固体レーザー材料を用いて,アイセイフレーザー(波長1450nm以上),波長可変レーザー,色中心レーザーを含む波長1~3μm LD励起固体レーザーが実現された。Table 1に主要なLD励起固体レーザーをまとめて示す⁷⁾。Fig.1にはエネルギー準位図によるLD励起固体レーザーの動作原理を示す⁷⁾。この図に

従ってこのレーザーの特徴をながめてみる。従来,固体レーザーの励起光源としてランプ光源が用いられたが, Fig.1に示されるように固体レーザー媒質の吸収線との整合性は悪く,ランプ光エネルギーのほとんどが熱に変換される。従って,熱効果(熱レンズ,熱複屈折,熱変形)のためにレーザー出力のビーム品質が悪く,レンズを用いてもレーザービームを良く絞り込めない欠点があった。一方,LDは例えば1054-nm Nd:ガラスレーザーの強い吸収線に一致した波長803nmで発振させることができるので,熱に変換される割合は小さく,従って熱効果も小さいので高繰り返し動作が可能である。この例の場合,量子ディフェクト(量子効率)は $803\text{nm}/1054\text{nm} = 76\%$ であるから,残りの $1 - 0.76 = 0.24$ が熱に変換されるのみである。しかし,ここで注意すべきことは,この24%による熱によって固体レーザー媒質にやはり熱効果が現れることである。このために,熱レンズ,熱複屈折や熱変形の熱効果を補償することが不可欠となる。

もしLD励起されたレーザー上準位の蛍光寿命が長ければ(例えば, Nd:ガラス(LHG8)では0.32ms),その蛍光寿命程度の間上準位にエネルギーが蓄積され,Qスイッチ等により大きなパルス出力を取り出すことが可能となる。このために長蛍光寿命のレーザー材料が望ましいことになる。

LDの波長をレーザー媒質の吸収線に合致させなければ光励起は行われず,固体レーザーは発振しないので,LDの選択によりおおまかな中心波長を選び,次に必要とするLDの精密な波長を入手時に指定するのが一般的である。使用に際しては,ペルティエ素子や水によって冷却したヒートシンクの温度調整により,レーザー媒質の吸収線にLD波長を合致させる必要がある。パルス動作のLDでは,例えば200μsのパルス動作中に加熱のために波長チャージング

Table 1 Major LD pumped solid-state lasers.⁷⁾

Pump LD		LD pumped solid-state laser			
Material	Wavelength range (nm)	Lasant	Lasing wavelength or range (nm)	Fluorescence lifetime (ms)	Pump wavelength (nm)
InGaAs	900 ~ 1,000	Yb:YAG	1030	0.95	940 ± 9
		Yb:S-FAP	1040	1.1	900
		Yb:YLF	1020	2.16	962
		Yb:Er:glass	1545 ± 12	7	970
		Er:Fiber	1530	9	980
		Er:YAG	2937	0.1	960
AlGaAs	780 ~ 810	Nd:YAG	1064	0.23	807 ± 2
		Nd:YVO ₄	1064	0.080	807 ± 4
		Nd:YLF	1047	0.520	798
		Nd:glass	1054	0.320	803 ± 6.5
		Tm:YAG	2021	12	780 ~ 785
		Tm, Ho:YAG	2090	8	780 ~ 785
		Tm, Ho:YLF	2067	12	792
		Tm:YLF	1500	1.0	780
		Er:YLF	2800	4.2	797
AlGaInP	615 ~ 690	Cr:LiSAF	750 ~ 1,000	0.067	650 ± 100
		Cr:LiCAF	700 ~ 900	0.170	630 ± 100
		Cr:LiSGAF	700 ~ 1,100	0.088	650 ± 100
		Cr:LiSCAF	750 ~ 950	0.080	670

Fig.1 Energy levels and laser transition in the 803-nm LD pumped 1054-nm Nd:glass laser.⁷⁾

(0.3nm/°C)が起り、発振波長が2nm程度長波長側にシフトする。これに対する対策として、予め波長チャープング量に応じて短波長側に中心波長をシフトさせたりして、励起効率を上げることが行われている。

もし、レーザー媒質の吸収帯が広ければ、波長チャープングの影響が少なく、LD製造の歩留まりも向上することになる。例えば、広い吸収帯を有するレーザー材料を励起波長とともに列挙すると、Nd:YVO₄(807±4nm)、Nd:ガラス(803±6.5nm)、Nd:CNGG(808±4.5nm)、Yb:YAG(940±9nm)、Fe, Ho:YAG(950±50nm)、Ti:サファイア(500±100nm)等がある。

なお、LDの発光領域が狭いため出力光は回折によりFig.2に示すようにファーストアクシス方向($\theta_{\perp}$)で30~40度(全角)、スローアクシス方向($\theta_{\parallel}$)で10度(全角)も広がるので、これをプリズム等により整形し、レンズ系でレーザー媒質に絞り込むことが不可欠となる。レーザー材料に近接してLD励起する場合には問題は少ないが、特に2次元LDアレイ光を絞り込むことは容易ではない。このために、レンズ

Fig.2 Radiation pattern from a laser diode.²⁾

系、ファイバ、バイナリーオブティクス、導波路(シートガラス板)、レンズダクト等が用いられている。今後はLD出力光の集光効率を向上させることが課題となっている。

3. 高出力半導体レーザーの現状

高出力の半導体レーザー(LD)が最近急速に進展し、高出力(400μsパルスピークパワー420kW)・高効率(>60%)・長寿命(CW動作で数万時間、パルス動作で100億ショット以上)の2次元LDアレイの開発には目を見張るものがある。これは量子井戸型LDを多数1次元バー状に並べ、そのバーを積層し2次元アレイとしたものであり、ピークパワーとして420kWのLDアレイ(803-nm AlGaAs, 10cm×38cm, 9100本バー, 100-400μsパルス, 10Hz繰り返し率, \$4/W)がNd:ガラススラブの励起用として1993年に米国で開発された⁷⁾。LDアレイのパルス幅はレーザー材料の蛍光寿命と

ほぼ同じに設定され、例えば、Nd:YAG(蛍光寿命230 μ s)の励起用として807nm AlGaAs LDのパルス幅として200 μ sのものが米、独、仏、日より市販されている。

固体レーザー材料励起用の高出力LDとして、Table 1に掲げたように900-nm帯InGaAs, 800-nm帯AlGaAs, 600-nm帯AlGaInPが開発、市販されている。

2次元高出力LDアレイを構成する際に問題となるのは、各バー当たり約2kW/cm²(=20MW/m²)の熱をいかに効率よく除去するかである。充分熱を除去しなければLDが溶けたり、温度上昇に伴って発振波長が長波長側にシフトしたりするためである。Fig.3 (a)はLDアレイの電極近傍をシリコンや銅製のマイクロチャンネルに水を流し、高効率に水冷する方法である²⁾。この方法によりLDの直下を水冷しながら1cm長のバーの厚さを1mmまで薄くすることができている⁷⁾。また、円筒状のマイクロレンズをLDバーの直前に接着し、ほぼ平行光束のLD光を出力することも可能であり、遠隔よりレーザー材料をLD励起することができるようになった。

Fig.3 (b)はヒートスプレッダーとしての銅板にLDバーを取り付け、それらを2次元的に積層しヒートシンク上に取り付け冷却する方法を示している。市販されているLDバーの間隔は0.4mmから2mmである。0.4-mm間隔のとき出力密度は1.5kW/cm²であるが、デューティーサイクル(LD

動作時間を動作周期で割った値)は3%と低い。しかし間隔を0.8mm(2mm)と広くすると、出力密度は800W/cm²(300W/cm²)と低くなるが、デューティーサイクルは6%(20%)と大きくなる²⁾。

Fig.3 (c)は、熱伝導が良く電氣的に絶縁体である、例えばBeOに1次元バーが埋め込まれて2次元LDアレイとし、BeOを水冷しつつ効率良く熱除去を行うものである。これはCW動作の2次元アレイとして入手可能である²⁾。この他にピーク出力1~3kW(1 $\times$ 1cm², 200 μ sパルス、繰り返し率50Hz)の45°反射鏡を用い面発光型としたAlGaAsレーザーが仏で試作されている⁷⁾。

高出力LDアレイ光をレンズ系及びレンズダクトで直接高強度に集光したり、LDアレイ光をマイクロレンズでファイバに結合し、その出力端光をレンズ系で高強度に集光して、直接LD光がレーザープロセッシングやレーザー医療等に応用され出している²⁾。

4. 熱効果制御の基礎技術

LD励起固体レーザーはランプ励起固体レーザーに替わる全固体レーザーとして注目されているが、既に触れたように、固体レーザーの宿命である熱効果(熱レンズ効果、熱複屈折効果、熱変形)より完全に解放されるものではない。従って、ランプ励起で用いられてきた熱効果の制御技術がDPSSLにも応用されている²⁾。

4.1 ダブルパス増幅器における熱複屈折の補償

多重パス増幅方式において、直線偏光を増幅するため増幅器部の固体レーザー材料に熱複屈折が生じると直線偏光が楕円偏光になり、必要とされる直線偏光成分以外は損失となって、エネルギー抽出効率が著しく低下することになる。

Fig.4 (a)にダブルパス増幅方式が示されている⁸⁾。入射光(P偏光)は偏光ビームスプリッターを透過後、複屈折物質(相対位相差 δ 、主軸方向 θ)と45度ファラデー旋光子F.R.を通り反射鏡Mで折り返され、もう一度F.R.を通過し、45度+45度=90度旋回され、再び複屈折物質を通過し、その出口で補償されS偏光した直線偏光となり、偏光ビームスプリッターPでS偏光成分として出力される。つまり任意の δ と θ を有する熱複屈折が往復光路で用いる45度ファラデー旋光子によって完全に補償されて、熱複屈折を全く受けていない直線偏光(S偏光)出力が得られる。このことはジョーンズ行列で証明できる⁸⁾。但し、ここで注意すべきことは、理論的に完全に補償されるのは幾何光学的にレーザー光が反射鏡Mによって折り返される場合であり、複屈折物質に熱レンズや熱変形が生じるとこの補償が完全には成り立たなくなることである。熱レンズ効果や熱変形の補償のためには、望遠鏡、位相共役鏡、可変形鏡等が用いられている。

4.2 90度石英旋光子を用いた熱複屈折の補償

同一の複屈折物質の間に90度石英旋光子を置くと熱複屈折が補償されることがジョーンズ行列を使って示さ

Fig.3 Cooling techniques for multi-bar LD arrays. (a) Microchannel cooling of each bar. (b) Bars preassembled and mounted on a common heat sink. (c) Bars directly mounted onto a common heat sink.²⁾

Fig.4 Thermal birefringence compensation using (a) a 45-degree Faraday rotator (F. R.) behind the birefringent material, and (b) a 90-degree quartz rotator between identical birefringent materials.⁸⁾

れる⁸⁾。つまり左側よりP偏光したレーザー光が入射すると、90度石英旋光子により熱複屈折が補償されて、熱複屈折の影響を全く受けない直線偏光(S偏光)S出力が得られる。つまり熱レンズや熱変形によるビームのずれを無視すると完全に補償されることになる。なお、S偏光を入射させた場合には同じく熱複屈折が完全に補償されP偏光P出力が得られる。この系での熱レンズ効果の補償のために、凹レンズ、望遠鏡、像転送が用いられる。

4.3 位相共役鏡による熱レンズ効果の補償

Fig.4 (a)の反射鏡部Mに誘導ブリュアン散乱(SBS)に基づく位相共役鏡を用い、45度ファラデー旋光子を用いた熱複屈折補償系(a)におけるLD励起されたレーザー媒質中に発生した熱レンズ効果等による波面の乱れが、SBS回折格子によってそのままの反射波つまり位相共役波によって補償されるのである⁸⁾。

また、熱レンズ効果の補償のために、凹レンズや望遠鏡を共振器内に挿入したり、レーザー発振器内の折り返し凹面鏡の焦点距離を短く選び、熱レンズに対して補償したりすることも行われている¹⁾。

4.4 像転送技術の応用

レーザー核融合用大型レーザーで多用されているケプラー式(2枚の凸レンズで構成されている)望遠鏡の像転送技術が、LD励起大出力固体レーザーにも応用されて、ビーム品質向上に寄与している。これは発振器からの出力ビームの断面のプロファイルをアパチャー等で整形し、その像を増幅器後段に向かって次々この望遠鏡で転送してゆくものである。最初の像より熱レンズ効果のためにある広がりをもって出射された光束でも、像転送された所では元の像が結像されるので、熱レンズ効果の抑制に利用されている⁹⁾。

5. LD 励起固体レーザーの現状

LD励起大出力固体レーザーの出力として、パルス当たり20J, 平均出力5kW, CW出力1.6kWが達成され、ランプ励起大出力固体レーザーと同等となり、パワー固体レーザーとしてその地位が確立されつつある^{1,7)}。

Fig.5には、主要なLD励起大出力固体レーザーのLD励起方式を示した。各方式について、それぞれの特徴と、主だった例をながめてみることにする。

(a) LD端面励起のロッドとディスク

Fig.5 (a)は、LD光をレンズで横モード体積に一致するように絞り、高効率のDPSSLが実現された典型的な配置を示している²⁾。ロッドの代わりに薄いディスク状固体レーザー材料を用いた小出力の小型DPSSLはライダー用や

Fig.5 Major pump configurations employing laser-diode in end pumping (a), side pumping (b), (c), and surface pumping (d), (e).

シードレーザーとしても用いられている¹⁰⁾。また、ロッドをファイバ状にしたファイバレーザーは高効率DPSSLとして注目されている¹¹⁾。(a)の配置は、Nd:YAGレーザーのような4準位レーザーのみならず、Yb:YAGレーザーのような準3準位レーザーにも採用されている。準3準位の1030-nm Yb:YAGレーザーや1040-nm Yb:S-FAPレーザーには強端面LD励起($10\text{kW}/\text{cm}^2$ 以上)が不可欠であり、そのために端面LD励起が用いられる。

Fig.6はCW1.75kW 940-nm LD光を、先ずマイクロレンズでファーストアクシス方向を平行光束とし、次にレンズダクトによってYb:YAGロッド端面に $10\text{kW}/\text{cm}^2$ 以上の強度で集光し、 $2\text{mm}\phi \times 60\text{mm}$ のコンポジットYb:YAGロッド(Yb:0.5%)を端面軸励起して、1030nmのCW出力として434W(光-光変換効率25%)、Q-SW出力として226W(26ns, 10kHz)が得られ、KTP結晶による第2高調波光に波長変換し515nmでの平均出力として76W(10kHz, 変換効率40%)が報告されている¹²⁾。なお、端面LD強励起のときの端面破壊を防止するために、YbをドーピングしていないYAGのエンドキャップ(長さはロッドの直径程度)が不可欠である。つまり、エンドキャップにより端面の伸びが抑えられて圧縮応力となり端面破壊を防いでいる¹³⁾。

900-nm LD励起の1040-nm Yb:S-FAPレーザードライバの模式図がFig.7に示されている¹⁴⁾。米国のローレンスリバモア国立研究所(LLNL)では蛍光寿命が1.1msと長いYb:S-FAP結晶を $10.2\text{kW}/\text{cm}^2$ の強度で端面LD励起し、347-nm 3.7-MJ DPSSLドライバー(ヘリオス)を2030年頃には建設する計画を持っている¹⁴⁾。現在、LLNLでは平均出力1kW = $100\text{J} \times 10\text{Hz}$ (効率10%)の“マーキュリー”LD励起1040-nm Yb:S-FAPレーザーが1997~2000年の4年計画で開発および建設が進められている¹⁵⁾。Fig.7に示したようにKD*Pポッ

Fig.6 940-nm InGaAs LD end-pumped CW 434-W 1030-nm Yb:YAG laser.¹²⁾

Fig.7 One beam of the 900-nm InGaAs LD end-pumped 1040-nm Yb:S-FAP multipass laser amplifier configuration.¹⁴⁾ A total of 345 such beams are required to provide 3.7 MJ of 347-nm light into a target.

ケルセルと347-nm光を発生させるKDP波長変換素子もHeガスで冷却される¹⁴⁾。

(b) LD側面励起のロッド

Fig.5 (b)は水冷されたロッド型レーザー材料の周りより、LD光用反射鏡のスリット開口、または孔よりレンズ、シート導波路やファイバを用いてLD光を導入し閉じ込め、均一なLD励起を得る方式を示している。この方式では高出力が高効率で達成されている。

Fig.8では、銅製のマイクロチャンネル水冷のCWLDアレイからの出力光で $5\text{mm}\phi \times 177\text{mm}$ Nd:YAGロッドを励起するために、コンパクトなセラミックス製反射鏡がLD光を閉じ込めるために用いられた¹⁶⁾。このセラミックス製反射鏡を2本のNd:YAGロッドに用いて、CWLD全入力7.2kWに対して1064nmのCW出力として世界最大の1.6kW(光-光変換効率22%)が多モードで達成されている¹⁶⁾。なお、我国でもLD励起ロッド型Nd:YAGレーザーでCW出力1.2kWが光-光変換効率30%、電気-光変換効率12%で得られている¹⁷⁾。

LD側面励起ロッド型の1064-nm Nd:YAGレーザーにおいて、90度石英旋光子と凹面レンズを用い、熱複屈折と熱レンズを制御し、平均出力208Wを高ビーム品質($M^2 < 1.1$, TEM₀₀モード)で得たのがFig.9である。固体レーザーにおいて208Wの平均出力がTEM₀₀モードで達成されたのはこれが初めてである¹⁸⁾。

側面LD励起の1030-nm Yb:YAGレーザーでも、Fig.10に示したようにLD励起光と蛍光を閉じ込め、エンドキャップ付の $2\text{mm}\phi \times 20\text{mm}$ ロッド(Yb:1 at. %)によく吸収させ、1030-nm Q-CW出力として600W(光-光変換効率17%)が得られ

Fig.8 Cu-microchannel water-cooled LD side-pumped CW 1.6-kW 1064-nm Nd:YAG rod laser.¹⁶⁾

Fig.9 LD pumped 208-W average power TEM₀₀ mode 1064-nm Nd:YAG rod laser.¹⁸⁾

Fig.10 Schematic of one third of the pump head for 940-nm InGaAs LD pumped Q-CW 600-W 1030-nm Yb:YAG rod laser.¹⁹⁾

ている¹⁹⁾。Yb:YAGロッドはジェット水で冷却されている。さらに、エンドキャップ付の3mm ϕ ×30mmのYb:YAGロッドを側面励起し、1030-nm CW出力として950W(光-光変換効率20%)が達成されている²⁰⁾。

(c) LD側面励起のジグザグスラブ

レーザー媒質がスラブ(平板)状の固体レーザーをスラブレーザーという。このスラブレーザーの特長は、理想的には(a)矩形構造であるので、応力誘起複屈折と(b)ジグザグ伝搬によって熱的と応力誘起の熱レンズ効果とを取り除けることである。しかし、実際の有限の寸法のスラブレーザーでは縁や端の効果が現れ、熱レンズ、熱複屈折や熱変形による波面乱れが無視できなくなるのでそれらの補償を行う必要がある^{2,21)}。

ビーム品質の点からは、約100W以上の高平均出力時には一般にロッドレーザーよりもスラブレーザーの方が優れていることが実験的に示されている¹⁾。

LD励起1064-nm Nd:YAGジグザグスラブを3板Fig.11に示したように直列に使い、平行平面鏡より構成された共振器より平均出力5kW(パルス幅500 μ s。繰り返し率500Hzの世界最大出力DPSSLが1996年に達成された⁶⁾。Nd:YAGジグザグスラブ1枚当たり平均出力約1.7kWを出力できるので、2枚用いた場合、平均出力3kWが3.5×DLのビーム品質で得られている。ここで、DLは回折限界のことである。

我が国においても、ジグザグスラブ型Nd:YAG結晶の一方側面にLDアレイを配置し、もう一方側面に金コートによる高反射面を配置した片面LD励起方式を開発することによって、平均出力1.642kW、光-光変換効率40.3%の世界最高水準の効率が実現されている²²⁾。

Fig.11 LD side-pumped average output 5-kW 1064-nm Nd:YAG zig-zag slab laser.⁶⁾

一方、LD励起1054-nm Nd:ガラススラブ水冷方式による核融合用レーザードライバの概念設計がなされ、この概念設計に用いたジグザグスラブ型水冷方式を実証するため、LD励起10J×10Hz Nd:ガラススラブレーザーの開発が行われている²³⁾。このテストモジュールには、Fig.4 (a)に示した45度ファラデー旋光子による熱複屈折補償法と像伝送が用いられている。なお、Nd:ガラススラブはピーク出力200kWの803-nm AlGaAs LDアレイ²⁴⁾で側面励起されている。

(d) LD表面励起のディスク

レーザー核融合用ドライバは、波長350nmで出力4MJを総合効率10%以上で且つ10Hz以上の繰り返し率で実現する必要があり、そのためにLD励起固体レーザードライバが有望視されている¹⁾。Fig.12は、提案されたHeガス冷却のLD励起1054-nm Nd:ガラスレーザー再生増幅器モジュール(0.2MJ出力)を示しており、LDによって表面よりガラスディスクが励起される構成となっている²⁵⁾。

(e) LD表面励起のアクティブミラー型薄ディスク

アクティブミラー方式のYb:YAGレーザーの高出力化も進展しており、Fig.13に示したLD励起薄ディスク(0.32mm $\times$ 4.7mm ϕ 、-78 $^{\circ}$ C)のYb:YAGを、CW出力700Wのファイバ結合940-nm InGaAsLDで励起し、1030-nm出力としてCW346W(光-光変換効率49%、電気-光変換効率16.8%)が得られている²⁶⁾。さらに、薄ディスクを用いたLD励起多重アクティブミラージグザグYb:YAGレーザーによってCW出力1kWを達成する計画もある。

6. LDアレイの低価格化

LDアレイ励起パワー固体レーザーを実用化する際の最

Fig.12 803-nm LD surface-pumped 0.2-MJ 1054-nm Nd:glass laser driver module using He-gas cooled disks.²⁵⁾

Fig.13 940-nm LD surface-pumped CW 346-W 1030-nm Yb:YAG thin disk laser with eight passes of the pump LD light through the cooled Yb:YAG crystal.²⁶⁾

大の課題はLDアレイの低価格化である。Fig.14には、LDの価格が次第に安くなり、2009年頃にはCD用LDの価格に近づこうとしていることが示されている²⁷⁾。ところが、ランブ励起Nd:YAGレーザーのコストは横這いを示しており、LD励起YAGレーザーシステムのコストがこの線を横切るのは2003年頃と予想されている。このコストの年次低下は大量の需要によって支えられて初めて実現されるので、今後LD自体およびDPSSLの産業界への普及を期待したい。

7. おわりに

LD励起の全固体化レーザーの基礎技術および現状について述べた。平均出力10kW程度までは、高ビーム品質でかつ高効率のレーザーが実現しうる見通しはついた。さらに大出力になるに従って、レーザー材料中に生じる熱効果(熱レンズ、熱複屈折と熱変形)の制御が最大の課題となろう。レーザー励起に伴ういろいろな熱効果のシミュレーションコード開発も急ピッチで進められている。これによりレーザーの光学設計とともに熱設計、熱効果制御技術の定量性、精度が向上しつつある。

今後LDの直接利用も含め、LD励起パワーレーザーが各分野に実用化され継続的にLDアレイが大量に使われるようになれば、LDの価格は次第に下降すると予想されている。

Fig.14 Cost trends for LD arrays (thin sloped line) and full LD pumped solid-state lasers (thick sloped line).²⁷⁾

る。さらに、LDアレイを安価に大量生産する技術改革も今後必要である。

全固体レーザーの高効率、高ビーム品質に加え、動作の安定性、低メンテナンス、強靱性等がその特徴として備えられると、産業技術、科学技術の広範な分野にレーザーが活用されることになろう。21世紀は光の世紀であると言われているが、その基礎技術がDPSSLにより確立されつつあると言えよう。

参考文献

- 1) 中井 貞雄, 井澤 靖和, 山中 正宣: OPTRONICS No.1 (1997) 81.
- 2) W. Koehner: "Solid-State Laser Engineering", 4th ed., Springer (1996).
- 3) P. Peuser und N. P. Schmitt: "Dioden-Gepumpte Festkoerper-Laser", Springer (1995).
- 4) 小林 喬郎(編):「固体レーザー」, 学会出版センター (1997).
- 5) G. B. Bostanjolo and K. Richter: SPIE **3097** (1997) 129.
- 6) R. Moyer, J. Machan, M. Valley, G. Holleman, J. Zamel, M. Mitchell, R. Tinti, D. Burchman, G. Harpole, M. Wickham, H. Injeya, and L. Marabella: LEOS '96 (18-21, Nov. 1996) Boston, USA, No. WT3.
- 7) 山中 正宣:「LD励起固体レーザーとその応用」, 関大工研「資源エネルギー講演XIII」(1995)15.
- 8) 桐山 博光, 山中 正宣: レーザー研究 **24** (1996) 343.
- 9) Q. Lue, N. Kugler, H. Weber, S. Dong, N. Mueller, and U. Wittrock: Opt. Quantum Electron. **28** (1996) 57.
- 10) T. Taira, J. Saikawa, T. Kobayashi, and R. L. Byer: IEEE J. Selected Topics Quantum Electron. **3** (1997) 100.
- 11) 植田 憲一, 劉 安平: MICROOPTICS NEWS **16** (1998) 25.
- 12) C. Bibeau, R. Beach, C. Ebberts, M. Emanuel, and J. Skidmore: Trends in Optics and Photonics **10** Advanced Solid State Lasers (1997) 276.
- 13) S. A. Payne, R. J. Beach, C. Bibeau, C. A. Ebberts, M. A. Emanuel, E. C. Honea, C. D. Marshall, R. H. Page, K. I. Schaffers, J. A. Skidmore, S. B. Sutton, and W. F. Krupke: Trends in Optics and Photonics **10** Advanced Solid State Lasers (1997) 71.
- 14) C. D. Orth, S. A. Payne, and W. F. Krupke: Nuclear Fusion **36** (1996) 75.
- 15) C. D. Marshall, R. J. Beach, C. Bibeau, C. A. Ebberts, M. A. Emanuel, E. C. Honea, W. F. Krupke, S. A. Payne, H. T. Powell, K. I. Schaffers, J. A. Skidmore, and S. B. Sutton: Advanced Solid State Lasers, Technical Digest, 2-4 Feb., 1998, Idaho, USA, p.76, No. AMCI-1.
- 16) T. Brand, B. Ozygus, and H. Weber: Laser Phys. **8** (1998) 1.
- 17) 秋山 靖裕, 高瀬 智裕, 高田 淳, 湯浅 広士, 小野 明: レーザー学会研究会報告 **RTM-98-31** (1998) 1.
- 18) Y. Hirano, K. Koyata, S. Yamamoto, and K. Kasahara: CLEO '98, Postdeadline Papers, 3-8, May 1998, San Francisco, USA, No. CPD1-1.
- 19) H. W. Bruesselbach, D. S. Sumida, R. A. Reeder, and R. W. Byer: IEEE J. Selected Topics Quantum Electron. **3** (1997) 105.
- 20) 平等 拓範: レーザー学会研究会報告 **RTM-97-50** (1997) 19.
- 21) 望月 孝晏:「スラブレレーザー研究開発の現状と展望」レーザー技術総合研究所 (1994).
- 22) 佐藤 雅夫, 内藤 真哉, 町田 久忠, 吉田 宏之, 家久 信明, 軽部 規夫: レーザー学会研究会報告 **RTM-98-32** (1998) 7.
- 23) 松井 宏記, 江口 武芳, 日浦 規光, 古河 裕之, 金辺 忠, 山中 正宣, 中塚 正大, 井澤 靖和, 中井 貞雄, 神崎 武司, 宮島 博文, 宮本 昌浩, 菅 博文: レーザー学会研究会報告 **RTM-98-34** (1998) 19.
- 24) 菅 博文, 神崎 武司, 宮島 博文, 曾根 明弘, 伊藤 之弘, 松井 謙, 森田 剛徳, 宮本 昌浩, 晝馬 輝夫: MICROOPTICS NEWS **16** (1998) 31.
- 25) S. Nakai, M. André, W. K. Krupke, A. A. Mak, J. M. Soures, and M. Yamanaka: "Solid State Laser Drivers", in Energy from Inertial Fusion, IAEA (1995) 79.
- 26) U. Brauch, K. Contag, A. Giesen, I. Johannsen, M. Karszewski, C. Stewen, and A. Voss: CLEO '97, Technical Digest **11** (1997) 478 (No. CFE1).
- 27) K. L. Schepler: Optics and Photonics News **8** (1997) 38.