レーザー解説

スラブレーザーの高輝度化

久 場 - 樹*

(1993年 6月14日 受理)

Recent Developments of High-Brightness Slab Geometry Solid State Lasers

Kazuki KUBA*

(Received June 13, 1993)

Recent developments of high brightness solid state slab-geometry lasers are reviewed. Firstly the definitions of a brightness and a parameter of focusability : Q are described. Secondary, methods to realize the high brightness solid-state lasers are summarized. These methods are classified into the three categories : (1) reduction of thermal distortion, (2) the compensation of thermal distortion and (3) a resonator for high beam quality. In these methods, a zigzag slab geometry laser with an unstable-stable hybrid-resonator is a promising candidate for a high brightness solid state laser. Finally, a list of the performances of high power slab geometry solid-state lasers is presented.

Key Words : High brightness solid-state laser, Zigzag slab geometry solid-state laser, One-sided negative branch unstable stable resonator.

1. はじめに

加工用固体レーザーの性能は、出力、効率、集束性の3つに大きく分かれる。加工性能を左右する集光点の光強度を考えると高出力を前提とした高集束化、すなわち“高輝度化”が重要であり、ここ数年スラブレーザーの高輝度化の研究開発が盛んになって来ている。

本解説では、まず輝度 B と、これを基本とする新しい集束性の指標 Q について簡単に述べた後、固体レーザーの最大の課題である“出力増大に伴う集束性劣化の改善”すなわち高輝度化の技術について広く展望する。そして、スラブレ型レーザーと、高輝度化のための高集束共振器

について不安定-安定型ハイブリッド共振器を中心に解説する。最後に、高出力スラブレーザーの性能をまとめる。

2. 輝度と集束性パラメータ

レーザーの輝度は、単位光源面積当りのレーザー放射強度(レーザー出力/放射立体角)と定義される((1)式参照)。ここでは、一般の加工用レーザーを対象に、平均出力 P による平均輝度 B を考え、核融合用など短パルス・高ピーク化による高輝度化とは区別する。

$$B = P / (\Omega \cdot S) \quad (1)$$

* 三菱電機(株)中央研究所 (〒661 尼崎市塚口本町8-1-1)

* Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corp. (8-8-1 Tsukaguchi-honmachi Amagasaki, Hyogo 661)

P : 平均レーザー出力

Ω : 放射立体角

S : 光源面積

ロッド型レーザーのように、ビーム断面が円形で、伝搬特性が完全に軸対称な場合、輝度： B は次式で表わされる¹⁾。(Fig.1(a))

$$B = P / (\pi/4 \cdot \theta \cdot d)^2 \quad (\text{W/cm}^2\text{sr}) \quad (2)$$

P : 平均レーザー出力 (W)

θ : 全頂ビーム発散角 (rad)

d : ビームウエスト直径 (cm)

次に非等方性ビームの輝度を示す。軸対称性

$$S = \pi(d/2)^2 \quad \Omega = \pi(\theta/2)^2$$

$$B = \frac{P}{(\pi/4 \cdot \theta \cdot d)^2} = \frac{P}{\lambda^2 M^2}$$

(a) Isotropic Beam (circular)

$$S = \pi(dx dy/4) \quad \Omega = \pi(\theta_x \theta_y/4)$$

$$B = \frac{P}{(\pi/4)^2 \theta_x \theta_y dx dy} = \frac{P}{\lambda^2 M_x^2 M_y^2}$$

(b) Anisotropic Beam (elliptical)

$$S = dx dy \quad \Omega = \theta_x \theta_y$$

$$B = \frac{P}{\theta_x \theta_y dx dy} = \frac{P}{(4/\pi)^2 \lambda^2 M_x^2 M_y^2}$$

(c) Anisotropic Beam (rectangular)

$$B = \frac{P}{\Omega \cdot S} = P \cdot Q \quad Q = \frac{1}{\Omega \cdot S}$$

Fig. 1 Definitions of brightness for (a) an isotropic laser beam (circular cross-section), (b) an anisotropic laser beam (elliptical cross-section) and (c) an anisotropic laser beam (rectangular cross-section).

を有するビームをシリンダカルレンズやプリズムなどで絞った場合に発生する断面が楕円形であるビーム (Fig.1(b)) の場合を (3) 式に、そして、スラブ型レーザー等、断面が矩形であるビーム (Fig.1(c)) の場合を (4) 式に示す。

$$B = P / ((\pi/4)^2 \theta_x d_x \theta_y d_y) \quad (\text{W/cm}^2\text{sr}) \quad (3)$$

$$B = P / (\theta_x d_x \theta_y d_y) \quad (\text{W/cm}^2\text{sr}) \quad (4)$$

P : 平均レーザー出力 (W)

θ_x : x 方向全頂ビーム発散角 (rad)

d_x : x 方向ビームウエスト径 (cm)

θ_y : y 方向全頂ビーム発散角 (rad)

d_y : y 方向ビームウエスト径 (cm)

なお、歪のない理想的な光学系をレーザービームが伝搬するとき $\theta \cdot d$ は保存され、従って輝度 B も保存される。

$$Q = B/P = 1/\Omega S \quad (5)$$

さて、(5) 式で定義されるビーム集束性の指標 Q をもちいれば、異方性ビームを含めるあらゆるビームの集束性が輝度を基準とする 1 つのパラメータ Q で比較することができる。

(5) の定義式および (2) - (4) 式より各ビームに対する集束性 Q は、以下ようになる。

$$\begin{aligned} \text{軸対称ビーム} \quad Q &= 1/(\pi/4 \cdot \theta \cdot d)^2 \\ &= 1/(\lambda^2 M^2) \quad (1/\text{cm}^2\text{sr}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{楕円ビーム} \quad Q &= 1/((\pi/4)^2 \theta_x d_x \theta_y d_y) \\ &= 1/(\lambda^2 M_x^2 M_y^2) \quad (1/\text{cm}^2\text{sr}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{矩形ビーム} \quad Q &= 1/(\theta_x d_x \theta_y d_y) \quad (1/\text{cm}^2\text{sr}) \\ &= 1/(4/\pi \cdot \lambda^2 M_x^2 M_y^2) \end{aligned} \quad (8)$$

λ : レーザー光の波長 (cm)

M^2 : 軸対称ビームの M^2 乗値

M_x^2 : x 方向の M^2 値

M_y^2 : y 方向の M^2 値

なお、 M^2 , M_x^2 , M_y^2 は、 M^2 値 (M^2 乗値) と呼ばれるパラメータで

$$M^2 = \frac{\pi}{4\lambda} \cdot \theta \cdot d = \frac{\theta \cdot d}{\theta \cdot d_{\text{TEM00}}} \quad (9)$$

により定義され¹⁾対象とするビームの θd が回折限界の

$$\theta \cdot d_{\text{TEM00}} = \frac{4\lambda}{\pi}$$

の何倍であるかを示す無次元のパラメータである。

レーザー加工の性能は、集光点の光強度に強く依存する。ここでは集光強度と輝度の関係について述べる。レーザービームを開口径 d 、焦点距離 f のレンズで集光した場合、集光強度 I は

$$I = (\pi/4) \times B \cdot F^2 \quad (F = d/f: F\text{ナンバー}) \quad (10)$$

与えられる。従って、集光強度 I を高めるためには、輝度 B を高める必要がある。

Fig. 2に市販されている固体レーザーとCO₂レーザー²⁾のビーム品質の平均出力依存性を対数表示で示す。図中右下がり45°の直線は輝度 $B = P \times Q = \text{一定}$ の特性を示す。

固体レーザーは、シングルモード(●)と高次モード(○)の2つのグループに大きく分かれる。シングルモードは回折限界に近い集束性を示しているが、最大出力は30W程度である。一方、高次モードのグループは平均出力の増大とともに集束性は劣化し、出力が増加しても輝度が上がっていない。これに対し、CO₂レーザー(■)は3kW程度の高出力領域まで回折限界に近い集束性を保っており、最高1GW/cm²srの輝度を實現している。YAGに代表される固体レーザーは波長が1μmであり、加工材料への吸収率が高く、ファイバー伝送が可能であるなど、優れた特長を有している。しかし、出力増大にともない集束性が劣化するため、板金加工など平均出力と集束性がともに要求される分野ではCO₂レーザーに比べ、適用が遅れている。従って逆に、100W以上の高出力領域においてYAGレーザーの集束性をCO₂レーザー以上(YAGの回折限界の10倍以下)にできれば、YAGレーザーの適用は大幅に進むと考えられる。

Fig. 2 Beam qualities of a solid-state and a CO₂ lasers as a function of average laser power²⁾.

3. 固体レーザーの高輝度化の手法

レーザービームの輝度 B が平均出力 P と集束性 Q の積で与えられることを考えると、高輝度化の技術は、高出力化と高集束化の2つに大きく分かれる。

ここでは、固体レーザーの高輝度化において特に重要な高集束化の技術について展望する。

高集束化の技術は1)光学歪低減、2)光学歪補償、3)高集束共振器に大別される。

3.1 光学歪低減

固体レーザーの光学歪は、励起・発熱・冷却にともなう、温度分布・応力・歪の発生に起因する³⁾。ここでは、この光学歪発生のメカニズムを念頭に5つの対策に分けて述べる。

1) 媒質の物性改善

固体レーザーの動作において発熱・冷却の過程は不可避であるので、温度分布・応力・歪の発生の少ない媒質を適用することが重要となる。例えば、熱伝導率は高く、

線膨張係数は小さく、屈折率の温度依存性は少ない方がよい。

2) 発熱の低減

LD励起⁴⁾など、発熱を小さくするような、高効率光源を用いる。

3) 発熱の分散

GGGのようなコアフリーの大型結晶⁵⁾や、超大型ガラススラブ(ムービングスラブ)⁶⁾など大型媒質を用いる。

カスケードロッドの発振器^{7,8)}や、MOPA⁹⁾など複数媒質を用いる。

4) 高効率冷却

スラブ型¹⁰⁻¹²⁾やチューブ型¹³⁾など、表面積の大きな媒質を用いて冷却の高効率化を図る。

3.2 光学歪の補償

光学歪の発生自体を抑える方法に加え、光学歪を補償し、等価的にその低減を行なうのも有効な方法である。

1) 光路の工夫による光学歪の相殺

代表的なものにジグザグスラブ方式による1次元熱レンズの相殺がある¹⁰⁻¹²⁾。詳細は、4.1述べる。

また、スラブ型媒質の幅方向にビームを折返し、幅方向の光学歪を補償する方式もある¹⁴⁾。

2) 固定光学素子による補償

共振器内部にレンズを配置したり、ロッド端面に曲率をつけるなどして、ある出力範囲内で、熱レンズを補償する^{15,16)}。

3) 能動光学素子による補償

媒質による波面歪を補正するように、ミラー曲率をPZTなどを用いて制御する方式があり、このような光学系をアダプティブオプティクスと呼ぶ¹⁷⁾。原理的に有効な方法だが、工学的にはまだ困難な面がある。

高圧ガスの誘導ブリュリアン散乱(SBS)や非線形結晶を用いた位相共役鏡(PCM)により、媒質通過後の歪んだ波面を逆方向に進行させ、再度、媒質に通過させ、波面

歪を補償する方式がある¹⁸⁾。高ピークパルスのレーザーにとっては大変有効な方法であるが、CW動作など、光強度が低い場合には反射率が低く、また、高平均出力の動作では媒質が劣化するなど問題もある。

3.3 高集束共振器

固体レーザー用の高集束共振器には大きく分けて3つの課題がある。

1) 大断面積のレーザー媒質からの高効率なビームの取り出し

2) 共振器の光学歪に対する許容度の向上

3) 異方性媒質からの等方性ビームの取り出し
これらの技術課題に対する主な解決策としては、

a) 不安定型共振器の適用^{19,20)}

b) ハイブリッド共振器の適用^{21,22)}

c) 共振器内にテレスコープ・プリズムなどビームの圧縮・拡大機能を設ける²³⁾

d) 反射率分布ミラー(VRM)の適用²⁴⁾

e) 光路を折り返し、ビーム断面を小さくする¹⁴⁾

f) 光学薄膜などを用いた位相調整素子を設ける

などがある。レーザー媒質の断面形状、光学歪のレベル、必要とされるビームの集束性によって、いずれの手法またはその組み合わせをとるかは異なる。

筆者らは、金属加工への適用を目的に、平均出力:500W、集束性:回折限界の10倍以下、偏光度:90%以上を目標スペックとする高輝度固体レーザーの開発を行なっている。これらの目標に対しては、スラブ型媒質と不安定-安定型ハイブリッド共振器の組み合わせが1つの有力候補である。次章でその詳細を述べる。

4. 高輝度スラブ型レーザー

4.1 スラブ型媒質の特徴^{10,11,12)}

スラブ型固体レーザーの特徴は

1) 熱レンズ効果を原理的に補償できる。

2) 厚みまたは幅方向の直線偏光は、偏光解消を受けない。

- 3) 破壊限界入力が、アスペクト比(スラブ幅/スラブ厚み)に比例する。

が上げられる。

1) 熱レンズ補償

スラブ型媒質が均一に発熱し、その両表面より均一に冷却され、側面が完全に断熱された理想的な状況下では、Fig.3に示すように、中心が高温で厚み方向に1次元の2乗温度分布が形成される。そしてこの温度分布により、スラブの幅および長手方向の端部を除く領域に、厚み方向に1次元の中心対称な応力-歪分布が形成される¹²⁾。(Fig.4参照)

最大応力はスラブ表面に等方的に作用する引っ張り応力である。そして、これらの温度・応力・歪分布により、スラブはシリンドリカルなレンズ作用を示す。しかし、Fig.3に示すように、内部全反射を用いたジグザグ光路を適用し、1次元の異方性を斜めに横切る形で光路をとれば、ビーム断面内のすべての光線は、ほぼ同様の周期的な異方性を通過するためその影響は相殺され、波面が歪む事はない。この熱レンズの補償効果により、スラブ型媒質では高出力時にもビームの集束性劣化が少なく、スラブ型媒質を用いる最大の利点である。

2) 偏光の保存性

偏光の保存性は、共振器損失の低減および加工性能の等方化にとって重要な特性で

Fig. 3 Temperature distribution and the zigzag optical path of a slab medium.

Fig. 4 Stress distribution for a pumped slab in the x-y plane¹²⁾.

ある。スラブ型媒質では、薄板を表面から均一に励起・冷却しているので、応力分布は厚み方向に1次元となり、その成分は表面に平行となる。(Fig.4参照)

従って、これらの応力方向と平行または垂直な方向、すなわち厚みまたは幅方向の直線偏光は、偏光解消を受けず保存される。一般的にはビームの入出射端面をブリュースターカットし、厚み方向にP偏光発振をすることが多い。

3) 限界入力の向上

スラブへの入力限界はアスペクト比(w/t)に比例するので、これを大きくすれば断面積を広げることなく高出力化が可能で、単一ヘッドで1kW以上の出力を実現することができる^{4,9,25)}。

4.2 スラブ型媒質の熱レンズ特性^{22,26,27)}

スラブ型媒質の熱レンズ特性の一例を示す。スラブ媒質は、Nd濃度2 at.%のGGGを用い、厚さ7 mm、幅35 mm、長さ131.7 mmで頂角は35°である。全反射回数は10回で、レーザービームはスラブに対してブリュースター角で入出射する。動作モードはノーマルパルスで、繰り返し100pps、パルス幅(半値全幅)300 μsec 、最大投入エネルギーは120 Jである。

Fig. 5にGGGスラブの厚み(x)および幅(y)方

向の熱レンズの空間分布を示し、Fig. 6に電気入力依存性を示す。熱レンズは厚み(x)方向と幅(y)方向で異なった振舞いを示す。厚み(x)方向の熱レンズは、凹レンズで、その屈折力は、電気入力に比例し、12kWの入力で -0.24m^{-1} ある。これは、ビーム入出射端面近傍のend effect¹²⁾によるものである。一方、幅(y)方向の熱レンズは非常に弱い凸レンズで、12kWの入力においてもその屈折力は 0.03m^{-1} 以下である。また、その分布はスラブの両端2.5 mmを除く30 mmの領域でほぼ均一である。

一般的なロッド型媒質の熱レンズのジオプター

Fig. 5 Distribution of the thermally induced focal power of a GGG slab in the x and y directions.

Fig. 6 Thermally induced focal power of a GGG slab in the x and y directions as a function of electrical input power.

は、10 kWの入力レベルでは 2m^{-1} 程度³⁾であり、これに較べ、スラブ媒質の熱レンズは $1/8$ 以下になっている。

4.3 高輝度化のための共振器技術

スラブ型レーザー媒質は、断面がアスペクト比の大きな矩形であり、従来の等方的な安定型共振器を適用すると、開口の大きな幅方向には極めて高次の横モードが立ち、集束性能は低く、厚み方向との異方性も大きくなる²²⁾。

筆者らは高集束化、等方化を実現するために、スラブ型固体レーザーの共振器として、片だし負枝不安定-安定型ハイブリッド共振器を選び、その開発を行なっている。Fig. 7にその共振器構成を示す。開口の大きな幅(y)方向には2枚のシリンドリカル凹面鏡と出力鏡により、片だし負枝不安定共振器を形成し、開口の小さな厚み(x)方向には、シリンドリカル凸レンズにより安定型共振器を形成する。不安定型方向を片だしとする事で、ビームは中詰まりとなり、出射幅も小さくなり、通常の対称不安定型共振器より集束性が向上する。

このハイブリッド共振器を4.1で述べたGGGスラブ媒質に適用し、高輝度化を行なった^{26,27)}。共振器パラメータは、 $R_1=934\text{ mm}$ 、 $R_2=778\text{ mm}$ 、 $L=856\text{ mm}$ 、 $f=1000\text{ mm}$ で、拡大率： $M=1.20$ 、幾何学的結合率： $\delta=0.167$ で、幅方向に間隔30 mmのアパーチャを設けている。レー

Fig. 7 One-sided negative branch unstable-stable hybrid-resonator for a solid-state slab laser.

レーザー出力および発散角の電気入力依存性をFig. 8, Fig. 9に示し、ビームパターンをFig. 10に示す。出力鏡でのビーム寸法は電気入力に依らずほぼ一定で $3.2\text{mm} \times 5.3\text{mm}$ (厚み方向 $\times$ 幅方向)であり、 150W の最大出力時、 M^2 は 3.6×2.4 (厚み方向 $\times$ 幅方向)で、輝度は $980\text{ MW/cm}^2\text{sr}$ 、微分効率は 1.7% であった。なお、安定型(厚み)方向の発散角減少は4.2で述べたビーム入出射端近傍の凹レンズ化によりモードが低次化したためであると考えられる。

Fig. 8 Output power of a slab laser as a function of electrical input power.

Fig. 9 Beam divergence of a slab laser in the unstable (y) and stable (x) directions as a function of electrical input power.

Fig. 10 Beam patterns of a slab laser equipped with an unstable-stable hybrid resonator.

また、同じタイプの共振器を小型のYAGスラブ(Nd濃度: $0.8\text{at}\%$, サイズ: $5 \times 15 \times 133\text{mm}$)に適用した。この結果、出力 120W の準CW動作で、輝度 $1090\text{ MW/cm}^2\text{sr}$ を達成した²⁸⁾。また、励起・冷却・支持方式に改善を加えたCW動作では、出力 250W 、輝度 $620\text{ MW/cm}^2\text{sr}$ の高輝度ビームを、 3.2% の高い微分効率で達成した²⁹⁾。この時の、 M^2 と平均輝度のレーザー出力依存性をFig. 11に示す。不安定型、安定型の両方向とも、集束性はレーザー出力によらずほぼ一定であり、特に、不安定型方向の M^2 は 1.24 と回折限界に非常に近い特性を保っている。なお、安

Fig. 11 Brightness and M^2 of a slab laser as a function of laser power.

Table I Beam parameter of high average power solid-state slab laser.

Institute	Medium	t/ w/ 1 mm	Configuration	P _{max} W	Eff %	Q 10 ⁶ /cm ² sr	B MW/cm ² sr	Ref.
FLI	NdYAG	6/25/i63	Hybrid	420	2.2	0.78	330	CLEO'92
	*	*	Stable	600	3.2	0.0019	1.2	L&O 23(1991)82
	NdYAG	7/26/191	Stable	1220	4.3	0.0078	9.5	CLEO'93
	*	*	Stable+2Amp	3090	4.3	0.0078	24	*
	*	*	VRM/ Ust+2Amp	1980	—	0.39	771	*
	CrNdGGG	6/25/163	Stable	295	3.1	0.0019	0.55	L&O 23(1991)82
GE	NdYAG	6/25/210	—	1180	6.6	—	—	ICALEO'90
	*	*	—	500	—	6.5	3200	*
	NdYAG	6/15/126	Stable	300	1.5	—	—	AFTAL-TR-75-93
Lasag AG	NdYAG	6/15/100	St TEM03	90	—	0.55	49	SPIE1021(1988)24
	*	*	St Multi	300	3.3	—	—	*
	*	*	*	210	2.7	0.036	7.5	L&O 23(1991)82
LLNL	NdYAG	4/16/90	LD-Pump St	1050	0.28	—	—	CLEO'93
	NdGGG	5/70/180	VortexLamp	490	0.53	—	—	SPIE1223(1990)259
Lumonics			SlabLaser500	500	—	2.8	1400	LFW 9/1(1991)82
	*	*	—	350	1.8	6.6	2300	*
	*	P500	—	500	—	0.0089	4.4	Catalog Data
Fuji E	NdYAG	5.6/18.4/154	Stable	500	2.0	0.0061	3.0	0QD88-8'etc
	*	*	Anisotropic St	340	1.5	0.035	11.8	*
	*	—	Hole Couple St	444	—	0.095/2	21	JSAP AP931107-03
HOYA	NdYAG	L731 2-SLAB		1000	3.6	0.0091	9.1	Catalog Data
	*	L741 2-SLAB		600	2.1	1.2	690	*
	LHG5	8/340/370	*	1100	5.0	0.0083	9.2	CLEO'90 etc
ILE	NdGGG	10/18/167	Stable	440	2.2	—	—	JAP 58 (1989) 1495
	*	6/10/100	Stable	95	0.95	0.98	93	*
ILT. SMM	NdYAG	10/25/150	Stable	740	2.4	0.0029	2.2	ILT Rep. 90-91 etc
MELCO	NdGGG	7/35/132	Us-St Hybrid	150	1.3	6.6	980	CLEO'90 etc
	NdYAG	5/15/133	*	150	—	7.3	1090	11th AMLSJ
	NdYAG	5/15/140	Stable	440	4.5	—	—	13th AMLSJ
	*	*	Us-St Hybrid	250	2.2	2.6	620	*
SMM	NdGGG	9.5/55/201	Stable	560	—	0.0011	0.64	CLEO'88 ect
	*	*	*	830	1.9	—	—	*
	NdGGG	9/35/177	Stable	230	1.9	—	—	L&O 23 (1991) 82
Toshiba	NdYAG	4.5/12/118	Stable	80	1.1	1.3	103	JSAP AP8711* *
	*	*	*	67	—	7.4	496	*
	NdYAG	6/8/137	Stable	130	1.2	0.061	8.0	RLE 21 (1991) 966

定型方向の M^2 は約18とかなり大きくなっているが、光学系の最適化によって低次化を行なえば5程度までは高集束化でき、 $2\text{ GW/cm}^2\text{sr}$ 以上の輝度を充分達成できる。

以上のように、Nd濃度、サイズ、母材、動作モードの異なるスラブレザーにハイブリッド共振器を適用し、いずれの媒質でも100W出力を越える約 $1\text{ GW/cm}^2\text{sr}$ の高い輝度を達成し、スラブ媒質とハイブリッド共振器の組み合わせが、固体レーザーの高輝度化に有効であることが示された。

ドイツの固体レーザー研究所 (FLI) でもハイブリッド共振器の研究が盛んに行なわれている。Nd濃度1.1at%のYAGスラブ ($6 \times 25 \times 163\text{mm}$) にFig. 12に示すような幅方向に不安定型であることを特徴とする3種の共振器を適用し、(C)の片だし正枝不安定-安定型共振器で $\theta d/4$ が $2\text{mmrad} \times 4\text{mmrad}$ (厚み方向 $\times$ 幅方向)、平均出力420W、輝度 $328\text{MW/cm}^2\text{sr}$ を達成してい

る³⁰⁾。

最後に、これまで国内外で開発された高出力スラブレザーの性能をまとめTable Iに示し、集束性 Q と平均出力 P の関係をFig. 2に(□)で示す。

5. おわりに

スラブレザーの高輝度化は急速に進み、出力はシングルヘッドで1kW以上、集束性は CO_2 レーザーの回折限界を越え、輝度も $1\text{ GW/cm}^2\text{sr}$ を越える領域が舞台となっている。今後数年のうちに、これら高輝度固体レーザーは加工分野での応用研究が進み、本格的な実用化が進むものと思われる。

参考文献

- 1) K. D. Hachfeld et al. : CLEO'88, WL3 (1988).
- 2) 1992 BUYERS GUIDE, Laser Focus World 27 (1992) Chap. 1.
- 3) W. Koechner : *Solid-State laser Engineering* 3rd edition (Springer Series in Optical Sciences, Springer-Verlag, Berlin, 1992).
- 4) B. Comaskey et al. : CLEO'93, CW15 (1993) 276.
- 5) 藤井義正 : 昭和63年電気・情報関連学会連合大会予稿集 (1988) 3-25.
- 6) H. Sekiguchi et al. : CLEO'90, CTUJ3 (1990) 86.
- 7) S. Yoshida et al. : CLEO'90, CTUJ4 (1990) 188.
- 8) 沖野圭司 他 : NEC技報 42 (1989) 69.
- 9) N. Hodgson et al. : CLEO'93, CW16 (1993) 276.
- 10) W. S. Martin et al., U. S. Patent 3, 633, 126 (Jan. 4 1972).
- 11) J. M. Eggleston et al. : IEEE J. Quantum Electron. QE-20 (1984) 289.
- 12) T. J. Kane et al. : IEEE J. Quantum Electron. QE-21 (1985) 1195.
- 13) U. Wittrock et al. : CLEO'93, CW17 (1993) 278.
- 14) T. Yamada : レーザー研究 19 (1991) 40.
- 15) L. M. Osternik et al. : Appl. Phys. Lett. 12 (1986) 128.
- 16) F. A. Levine : IEEE J. Quantum Electron. QE-17 (1991) 170.
- 17) C. D. Swift : SPIE 1543 (1991) 107.
- 18) D. A. Rockwell et al. : SPIE 1627 (1992) 56.
- 19) T. F. Ewanizky et al. : Appl. Opt. 15 (1976) 1465.

Fig. 12 Unstable resonators used for an Nd:YAG laser : (a) on-axis unstable, (b) on-axis plane unstable, and (c) off-axis plane unstable³⁰⁾.

- 20) R. L. Herbst et al. : Opt. Commun. 21 (1977) 5.
- 21) Yu. A. Anan'ev et al. : Sov. J. Quant. Electron. 1 (1972) 403.
- 22) K. Kuba et al. : Opt. Lett. 15 (1990) 121.
- 23) D. C. Hanna et al. : Opt. Quant. Electron. 13 (1981) 493.
- 24) V. Magni et al. : CLEO'91, CThD1 (1991) 366.
- 25) J. P. Chernoch : Laser Materials Processing Symposium, ICALEO 90.
- 26) 久場一樹 他 : 第23回レーザー熱加工研究会論文集, (1990) 7.
- 27) K. Kuba et al. : CLEO'90, JWA3, (1990) 298.
- 28) 久場一樹 他 : レーザ学会第11回年次大会予稿集, (1991年1月) p. 78.
- 29) 久場一樹 他 : レーザ学会第13回年次大会予稿集, (1993年1月) p. 43.
- 30) N. Hodgson et al. : CLEO'92, CTuE4 (1992) 92.