

# 高转换效率二极管激光器泵浦固体激光器

何慧娟 廖 严 陈冰瑶

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

**提要** 用两种泵浦光学系统对激光二极管输出光束的空间分布整形,研究了不同椭圆度和准直度的泵浦光束对 Nd:YAG 激光特性的影响。当椭圆度和准直度明显改善时,使泵浦光束在激光棒的整个长度上与激光腔模空间重叠度增大,泵浦功率密度提高,激光阈值下降,激光转换效率大幅度提高。泵浦功率为 2.42 W 时,1064 nm 输出功率为 1.13 W,斜率效率为 50%。并比较了两种不同浓度晶体的效率。

**关键词** 二极管泵浦固体激光器,对称光斑,椭圆度

## 1 引言

激光器件获得广泛应用的根本原因是光束亮度高。半导体激光二极管泵浦的固体激光器已得到广泛的发展,提高亮度仍是研究者的重要任务<sup>[1,2]</sup>,改善泵浦光束的空间特性依然是其重要关键之一。激光二极管的输出光束呈现窄长条形,是多模和椭圆形截面,为提高转换效率必须使泵浦光束在激光介质中的激活体积最大限度地与激光腔的模式体积相重叠。设计泵浦光学系统,对泵浦光束的空间分布进行整形,以提高转换效率。本文用两种泵浦光学系统对激光二极管输出光束空间分布整形,研究了不同椭圆度泵浦光束对 Nd:YAG 激光特性的影响。当椭圆度改善时,在激光棒的整个长度上使泵浦光束与激光腔膜空间重叠度增大,激光转换效率大大提高。此外,还比较了两种不同浓度晶体的激光特性。泵浦功率为 2.42 W 时,1064 nm 输出功率为 1.13 W,斜率效率为 50%。

## 2 实验装置

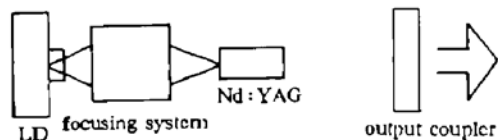


图1 二极管激光器泵浦 Nd:YAG 激光器示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the diode-pumped Nd:YAG laser

本文采用的激光器示意图如图 1 所示。泵浦源是一只连续输出功率为 3 W 的激光二极管,其发光结尺寸为  $1 \times 500$  ( $\mu\text{m}$ )。采用半外腔型激光腔。Nd:YAG 晶体的一端作为激光谐振腔的反射镜和泵浦光的入射面,镀有对泵浦波长 808 nm 高透和对振荡光波长 1064 nm 高反的双色膜,晶体的另一端镀有 1064 nm 的减反膜,两块 Nd:YAG

晶体的尺寸和掺杂浓度分别是  $4 \times 4 \times 10$  (mm), 1%;  $4 \times 4 \times 7$  (mm), 1.8%。

### 3 两种泵浦光学系统和激光特性

选取两种泵浦光学系统用于收集和会聚激光二极管的发射光。

#### 3.1 梯度折射率透镜

普通透镜依赖于不同折射率的均匀介质边界上的分离式折射而成像。梯度折射率透镜是利用其可变折射率的材料而以连续折射而成像。其优点是: 无需复杂的多个元件或非球面系统而校正像差; 结构简单; 透镜面上形成实像。

所用材料的折射率变化可采用轴向、径向或二者的混合。我们采用的是径向梯度折射率变化的材料, 圆棒状透镜适合于二极管激光器输出光的耦合。材料的折射率变化表示为

$$n_r = n_{00} \cdot \left( 1 - \frac{A}{2} r^2 \right) \tag{1}$$

是半径的抛物线函数, 见图 2。其中,  $n_r$  为离光轴  $r$  处的折射率;  $n_{00}$  为光轴上的折射率;  $A$  为常数。

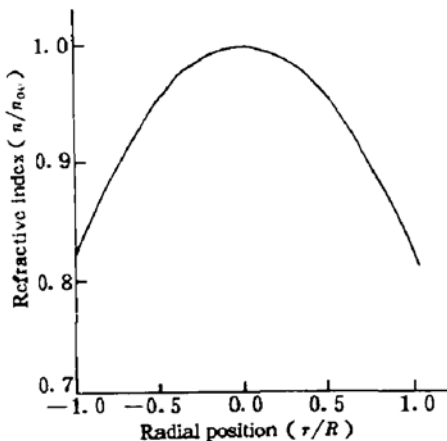


图 2 梯度折射率材料中折射率分布曲线  
Fig. 2 Refractive index profile in a gradient index material

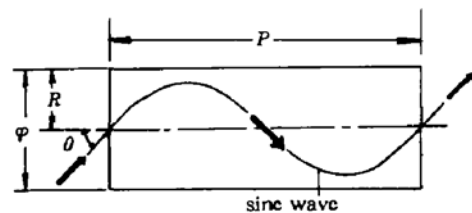


图 3 梯度折射率棒透镜中的光线行程  
Fig. 3 Ray path in gradient index rod lenses

由于式(1)的变化, 入射到棒透镜前表面的一条光线以正弦函数形光路沿透镜棒传输(见图 3)。正弦光路的一个周期称为“节距”。这是梯度折射率透镜的一个重要参数

$$P = 2\pi / \sqrt{A} \tag{2}$$

最大接受角

$$\theta = \sin^{-1}(n_{00} R \sqrt{A}) \tag{3}$$

其中  $R = \phi/2$ ,  $\phi$  为棒透镜的直径。

设  $d_1$  为物距, 即物体到透镜入射面的距离, 则像距为  $d_2$ , 即像到透镜出射面的距离, 可表示为

$$d_2 = \frac{1}{n_0 \sqrt{A}} \cdot \frac{n_0 \sqrt{A} d_1 \cos(L \sqrt{A}) + \sin(L \sqrt{A})}{n_0 \sqrt{A} d_1 \sin(L \sqrt{A}) - \cos(L \sqrt{A})} \tag{4}$$

放大率

$$M = \left\{ n_0 \sqrt{A} \sin(L \sqrt{A}) \left[ d_1 - \frac{\cot(L \sqrt{A})}{n_0 \sqrt{A}} \right] \right\}^{-1} \quad (5)$$

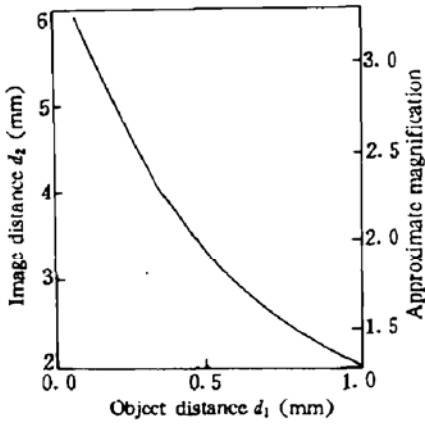


图 4 梯度折射率透镜中像距与物距关系曲线  
Fig. 4 Object and image distances for gradient index lenses

图 4 给出  $d_1-d_2$  曲线及像的放大率。梯度折射率棒透镜使泵浦光学系统结构简单,体积小,光耦合效率高,调整精度要求不高,且价格便宜。

该透镜直接把激光二极管发出的光以成像的方式入射在 Nd:YAG 晶体中,如图 5 所示,随物距  $d_1$  的不同,有不同的放大率,在晶体棒中激活的体积不同,因此调整  $d_1$  和  $d_2$  值,使激光棒中泵浦光与激光谐振腔模达到最佳匹配。

经实验研究,测量了两种不同浓度、不同长度 Nd:YAG 棒的激光输出特性,图 6 给出了泵浦功率与输出功率的关系曲线。两种晶体的曲线几乎重合。根据  $I_1 = I_0 e^{-\alpha_1 L_1}$ ,在同等条件下测量了两块晶体吸收系数  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ,  $\alpha_1 = 4.1 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\alpha_2 = 6.2 \text{ cm}^{-1}$ 。设  $L_1 = 10 \text{ mm}$ ,当  $I_1 = I_2$  时,  $L_2 \approx 7 \text{ mm}$ ,说明两块晶体吸

收的泵浦光相等,其光-光转换效率也几乎相等,约为 31%。

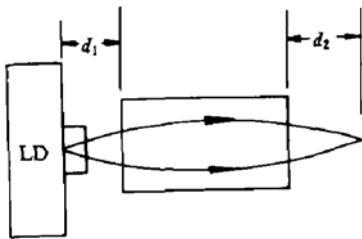


图 5 梯度折射率棒透镜示意图  
Fig. 5 Gradient index rod lens

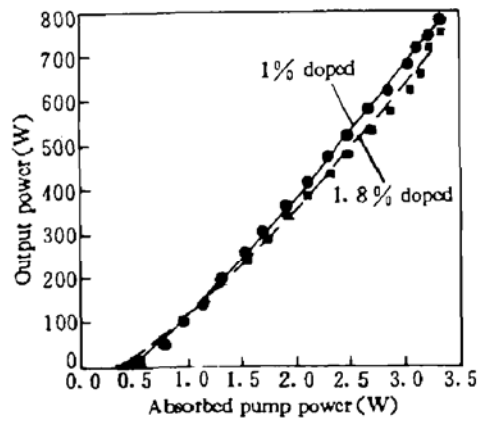


图 6 用梯度折射率棒透镜作为泵浦光学系统情况下激光器输出功率随泵浦吸收功率的变化

Fig. 6 Output power vs absorbed pump power using a gradient index rod lens pumping optics

由于激光二极管的发光面为长方形,发射光束呈椭圆形,而梯度折射率棒透镜的简单物像关系,对泵浦光束的椭圆度未有任何改进,与谐振腔高斯模的匹配度较差,光-光转换效率不理想,使输出激光束形状在平行和垂直于激光二极管发光结的两个方向不对称,在平行于结的方向,输出激光的模阶次较高,发散角较大。激光谐振腔用  $R = 50 \text{ mm}$  的平凹球面镜作为输出镜,并处于半共焦腔状态,在  $500 \text{ mW}$  输出激光功率时,最大发散角约为  $20 \text{ mrad}$ ,当输出功率增大时,发散角也随之增大。

梯度折射率透镜具有上述优点,但由于激光二极管发光面积为矩形,其激光腔的衍射产生反对称的辐射光斑,用一个透镜准直后,光束截面呈扁椭圆形,经梯度折射率棒透镜后,尽管泵浦光功率转换效率可达 0.92,但由于在激光棒的整个长度上与激光腔模体积严重不匹配,加之其发散度大,使激活体积中功率密度下降,导致阈值提高,输出功率下降。

### 3.2 准直透镜-棱镜对-聚焦透镜

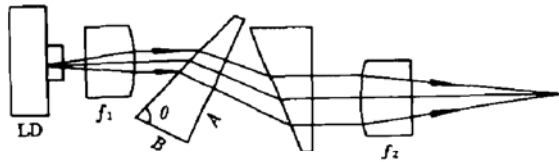


图 7 准直透镜-棱镜对-聚焦透镜系统的示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the collimating lens-prism pairs-focusing lens pumping optics

该结构示于图 7,它由准直透镜、棱镜对和聚焦透镜组成。棱镜对用来把准直透镜出射的严重非对称光束扩束,光束变成近圆形的椭圆形截面,其椭圆度 $\sim 0.85$ ,经聚焦透镜聚焦后入射到激光晶体中。该耦合光学系统具有很好的光束整形能力,光耦合效率可达 0.8。准直透镜  $f_1 = 8 \text{ mm}$ ,数值孔径  $N.A. = 0.5$ 。聚焦透镜  $f_2 = 25 \text{ mm}$ ,数值孔径  $N.A. = 0.16$ 。扩束棱镜对由两个相同的棱镜组成,棱镜的顶角是  $\theta_1$ ,并假设出射光束垂直于出射面,扩束倍数

$$m = \frac{\cos\theta_1}{\sqrt{1 - n^2\sin^2\theta_1}} \quad (6)$$

$n$  为所用材料 SF11 的折射率,棱镜对总的扩束倍数为  $m^2$ 。实验装置中采用的  $\theta = 90 - \theta_1 = 52^\circ 24'$ ,  $A = 12 \text{ mm}$ ,  $B = 8.5 \text{ mm}$ ,  $n = 1.763$ ,光束以布儒斯特角入射。激光二极管在发光条的宽度方向线偏振,反射损耗最小,因此入射面不需要镀膜,光束从棱镜的另一个面垂直出射,该面镀  $808 \text{ nm}$  增透膜。每一个棱镜的扩束倍数  $m = 2$ ,总扩束倍数等于 4。在激光谐振腔相同于第一种泵浦光学系统的情况下,其输入输出曲线示于图 8,图中给出了低浓度晶体的结果,高浓度晶体具有类似曲线,从图 7 可见,进入 YAG 晶体内的泵浦光功率减少了,但输出功率增加了许多。当输入泵浦功率是  $2.42 \text{ W}$  时,  $1064 \text{ nm}$  激光输出功率达到  $1.13 \text{ W}$ ,光-光转换效率为  $47\%$ ,斜率效率为  $50\%$ 。这是由于泵浦光学系统改善了泵浦光束的椭圆度和准直度,使得泵浦光的空间分布与激光腔模重叠程度增加,激光棒中泵浦功率密度上升导致激光阈值功率下降输出功率增大,效率提高,发散角明显下降。两泵浦光学系统的对比列入表 1。表中  $T$  为泵浦光学系统的总透过率。

根据以上对比,说明二极管激光器泵浦的固体激光器中的关键之一是泵浦光学系统,它的影响以泵浦光束在激光介质中的空间分布和激光腔模间的重叠度为标志,必须选择泵浦光束的椭圆度(短轴/长轴)尽可能大,激光腔模半径大于泵浦光束半径,激光阈值下降,输出功率上升,斜率效率提高,光束模式易于达到  $\text{TEM}_{00}$  模,发散角可达  $1 \text{ mrad}$ 。

该结构示于图 7,它由准直透镜、棱镜对和聚焦透镜组成。棱镜对用来把准直透镜出射的严重非对称光束扩束,光束变成近圆形的椭圆形截面,其椭圆度 $\sim 0.85$ ,经聚焦透镜聚焦后入射到激光晶体中。该耦合光学系统具有很好的光束整形能力,光耦合效率可达 0.8。准直透镜  $f_1 = 8 \text{ mm}$ ,数值孔径  $N.A. = 0.5$ 。聚焦透镜  $f_2 = 25 \text{ mm}$ ,数值孔径  $N.A. = 0.16$ 。扩束棱镜对由两个相同的棱镜组成,棱镜的顶角是  $\theta_1$ ,并假设出射光束垂直于出射面,扩束倍数

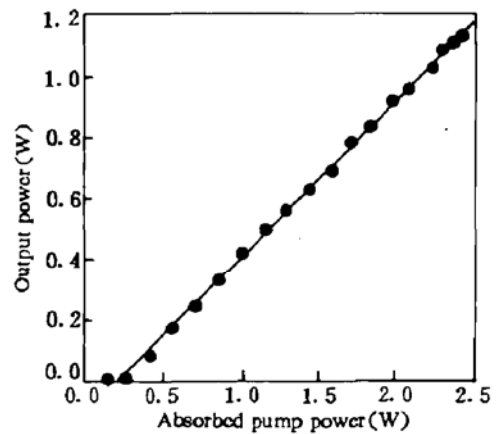


图 8 用准直透镜-棱镜对-聚焦透镜作为泵浦光学系统情况下激光器输出功率随泵浦吸收功率的变化

Fig. 8 Output laser power vs absorbed pump power using the collimating lens-prism pairs-focusing lens pumping optics

表 1 激光参数对比表

Table 1 Comparison of laser parameters

Laser parameters	$T$ (%)	$P_{in}$ (mW)	$P_p$ (W)	$P_{out}$ (W)	$\eta_s$ (%)
First type; gradient index lens	0.92	408	3.22	0.74	31
Second type; collimating lens- prism pair-focusing lens	0.80	144	2.42	1.13	50

## 参 考 文 献

- 1 D. G. Hall, R. J. Smith. Pump size effects in Nd:YAG laser. *Appl. Opt.*, 1980, 19 : 3041~3043
- 2 T. Y. Fan, A. Sanchez. Pump source requirements for end pumped lasers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1990, QE-26 : 311~316

## A Diode-pumped Solid-state Laser with High Efficiency

He Huijuan Liao Yan Chen Bingyao

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** Shaping the beam space distribution of a laser diode using two types pumping optics is reported. The dependence of the output characteristics of a Nd:YAG laser on different ellipticities and collimation of the pumping beam is analyzed. The efficiency is strongly increased when the ellipticity goes to 1. The output power is 1.13 W with the pumping power 2.42 W, and the slope efficiency is 50%. In addition, the comparison of slope efficiency between two YAG crystals of different Nd concentrations is performed.

**Key words** diode-pumped solid-state laser, asymmetrical pattern, ellipticity