

半导体激光泵浦掺钕铍酸镧固体激光器*

胡文涛 周复正 陈有明 张秀荣 吴光照 姜中宏

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 报道了用国产二极管激光端面泵浦自行研制的掺钕铍酸镧(Nd:BEL)晶体得到1.07 μm线偏振激光输出的研究结果。分别用非球面透镜成像、加棱镜对扩束、加光纤传输三种方式将泵浦光耦合到增益介质中,由此得到不同的斜效率,并对此作了分析。

关键词 二极管激光泵浦, 固体激光器, 晶体的光谱特性

1 引言

大功率半导体激光器的发展并用作固体激光器的泵浦源,使固体激光技术领域发生了一场革命。激光二极管泵浦已被用来发展高效、紧凑、可靠和全固态的激光器件。迄今,诸如调Q、锁模、单频、频率转换、波长调谐等激光技术都已在这种器件上实现。二极管泵浦固体激光器(DPL)的早期工作主要集中在Nd:YAG上,现在YAG仍然是一种被广泛应用的激光介质,然而LD泵浦已推广到其它基质材料和激活离子,DPL的激光输出波长从可见光一直延伸到中红外^[1,2],单就掺Nd³⁺离子的介质而言,继YAG之后又出现了GSGG、GGG、YLF、YVO₄、LMA和Phosphate glass等^[3,4]。

LD泵浦Nd:BEL激光输出在国际上曾有过报道,Richard Scheps用两只Sony公司出品的连续输出1W(发光源尺寸为100 μm×1 μm)的二极管激光器经偏振耦合泵浦Nd:BEL,得到635 mW的连续输出,微分斜效率为46%^[5,6]。

本文将报道用国产1W的二极管激光器泵浦自行研制的Nd:BEL晶体,获得1.07 μm激光输出的实验研究结果。

2 Nd:BEL特性

掺钕铍酸镧(La₂Be₂O₅:Nd³⁺,简称为Nd:BEL)是一种具有中等增益的激光晶体。Nd:BEL在晶体结构上属单斜晶系,空间群为C_{2h} - C_{2/c},在光学上为双轴晶,在三个晶轴方向的折射率(1.07 μm)分别为n_x = 1.964, n_y = 1.997, n_z = 2.035。当掺杂浓度为1.0 at-%时,Nd³⁺离子的浓度为1.94×10²⁰ cm⁻³,室温下的吸收光谱如图1所示,吸收峰的中心位于809.5 nm,相应的吸收系数为10 cm⁻¹,谱宽为10 nm,十分适合用LD泵浦。Nd:BEL的主要荧光线有两

* 本文研究工作得到上海市自然科学基金资助。

条,一条中心在 $1.07 \mu\text{m}$,偏振方向沿折射率椭球的 x 轴,发射截面为 $2.1 \times 10^{-19} \text{cm}^2$,另一条中心在 $1.079 \mu\text{m}$,偏振方向沿折射率椭球的 y 轴,发射截面为 $1.5 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ 。两条荧光线的宽度均为 3nm ,荧光寿命为 $150 \mu\text{s}$ 。

Nd : BEL 的 $\sigma\tau$ 比 Nd : YAG 小,导热性能也比 YAG 稍差,但它也有其独到的优点:吸收带宽,对 LD 的波长漂移不敏感,且允许 LD 的发射谱较宽;吸收系数大有利于器件的小型化;荧光线条比 YAG 大 $4 \sim 5$ 倍,用于锁模时可获得更窄的脉冲;Nd : BEL 输出的激光总是偏振的,这使得某些需要偏振光的场合(如电光调 Q)无需另加起偏元件,可以减少损耗且提高器件的紧凑性。另外,BEL 的抗激光损伤能力强,损伤阈值比 YAG 高 50% ,而且 BEL 较易长出大块的晶体,因此不失为一种有前途的激光介质。

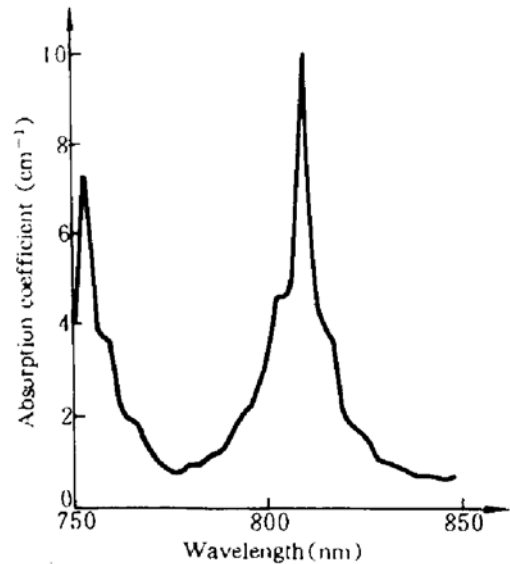


Fig. 1 Room temperature absorption spectrum of a 1.0 at-% doped Nd : BEL crystal

3 实验设计

LD 端面泵浦 Nd : BEL 激光器的结构如图 2 所示。其中的泵浦源为中国科学院半导体研究所研制的二极管激光器,标称功率为连续 1W ,为了延长其使用寿命,使之在准连续方式下运行。二极管的发光元尺寸为 $280 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$,平行于发射结方向的发散角为 10° ,垂直于发射结方向的发散角为 40° 。在室温 15°C 时,二极管发射光谱的中心波长为 806nm ,谱宽为 3nm 。固体激光介质是上海光机所研制的 Nd : BEL 晶体,制作尺寸为 $\phi 5 \text{mm} \times 10 \text{mm}$,晶体沿 y 轴切割,使激光的偏振方向沿 x 轴,从而有较大的受激发射截面,激光波长为 $1.07 \mu\text{m}$ 。晶体的两端面均加工为平面,向着 LD 的一面镀双色膜:对激光波长 $1.07 \mu\text{m}$ 高反 ($R > 99.7\%$),对泵浦波段高透 ($T > 70\%$);另一端面镀 $1.07 \mu\text{m}$ 的增透膜 ($T > 99.7\%$)。输出腔镜用透过率为 2% 的平凹镜,凹面曲率半径为 50mm ,输出镜与晶体的内端面相距 20mm ,成半球结构,这种结构使得基模体积最大且模式结构对输出镜的偏移不敏感。经计算 TEM_{00} 模的半径为 $93 \mu\text{m}$ 。

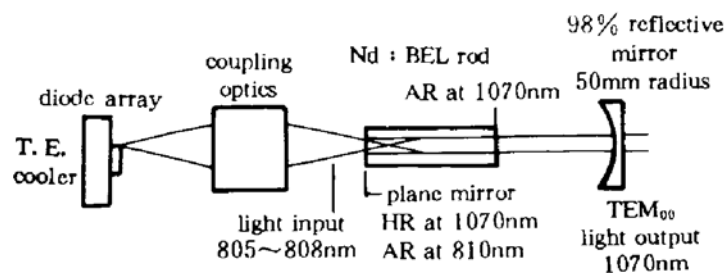


Fig. 2 Schematic of the diode-end-pumped Nd : BEL laser

我们分别采用了三种泵浦耦合系统,用以比较泵浦光斑的质量(大小、发散度和圆度)对激光效率的影响。图 3(a)所示是由一块焦距为 65mm ,通光孔径为 50mm 的非球面透镜收集 LD

发出的光,再由一块具有同样孔径的焦距为 115 mm 的非球面透镜聚焦,焦斑尺寸(经 CCD 测量)大约为 $470 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$,发散角为 $24^\circ \times 6^\circ$,在晶体中考虑到折射率 $n = 2$,则发散角为 $12^\circ \times 3^\circ$;图 3(b)所示是先用一块焦距为 8 mm,孔径为 8 mm 的非球面镜集光,然后经一棱镜对使平行于发射结的一维扩束,放大倍率为 4 倍,另一维则无变化地通过,最后经一焦距为 32 mm 的非球面镜聚焦,这时焦斑尺寸约为 $280 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$,发散角为 $10^\circ \times 10^\circ$,在晶体中的发散角为 $5^\circ \times 5^\circ$;图 3(c)所示是在图 3(b)的基础上再加一段 1 m 长的传导光纤,光纤的芯径为 $250 \mu\text{m}$,数值孔径为 0.23,经光纤传导后,泵浦光斑被完全圆化,光纤出射的泵浦光再用一对焦距为 32 mm 的非球面镜按 1:1 的比例成像到晶体,焦斑尺寸大约为 $250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$,发散角为 $5^\circ \times 5^\circ$,遗憾的是,加光纤传导后泵浦光的总耦合效率大幅度下降。测试了三种系统的耦合效率,分别为 80%、80%和 40%。

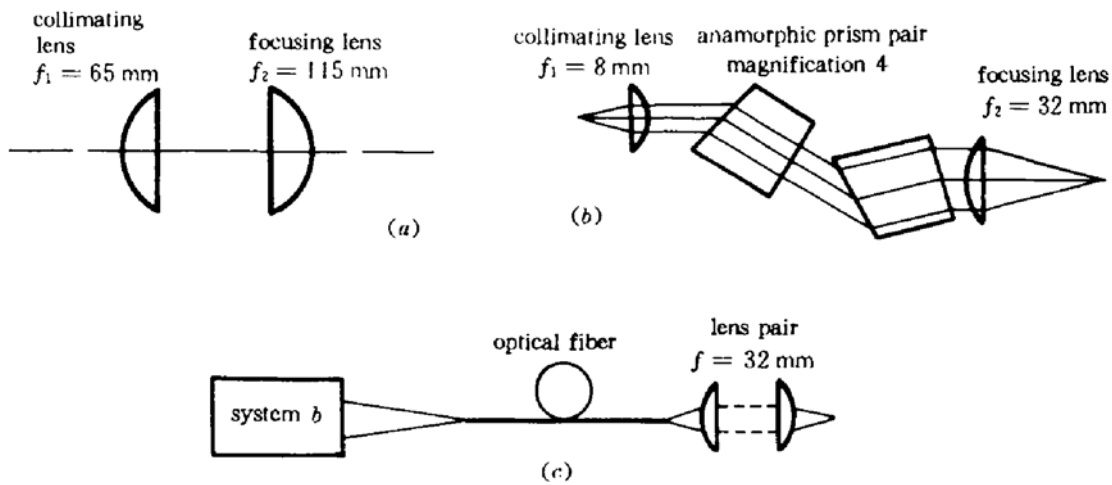


Fig. 3 Schematic of the pumping laser's optical couplers

(a) a nonspherical lens pair; (b) a plus an anamorphic prism; (c) b plus an optical fiber

激光实验中,LD 工作在准连续状态,重复率为 10 Hz,脉宽为 $400 \mu\text{s}$ 。在数据处理中,输入能量按晶体吸收能量计算,这里取吸收效率 $\eta_a = 1$,而泵浦光在晶体前表面的透过率为 $\eta_r = 0.7$,这样从 LD 发射的功率就可以知道晶体吸收的能量。

4 实验结果和分析

实验中分别采用图 3 所示的三种系统来耦合泵浦光,测得阈值泵浦能量(按吸收能量计)分别为 $78.4 \mu\text{J}$, $65 \mu\text{J}$ 和 $60 \mu\text{J}$,输入输出关系分别对应于图 4 中的 (a), (b), (c) 三条曲线,相应的斜效率分别为 18.5%, 24.6% 和 27%。

从以上结果可以清楚看到:从系统(a)到(c),泵浦阈值呈降低趋势,斜效率则呈提高趋势,三种系统的斜效率比值为 1:1.4:1.54,这是由于光斑尺寸变小,发散角减小,圆化程度提高的结果。另外,由于光纤传导效率低,使系统(c)的最大泵浦能量超阈值不高,这在一定程度上影响了斜效率,可以推测在远离阈值的区域,斜效率还有所增加。斜效率在理论上可由下式估算

$$\eta = \eta_s \eta_a \eta_c \eta_L$$

其中, η_s 为斯托克斯效率, $\eta_s = 0.755$; η_a 为激光量子效率,根据文献[6],取 $\eta_a = 0.75$; η_c 为几何

效率因子,它表明腔内激光束与泵浦光所产生的反转粒子数的空间分布区域的重叠程度; η_L 是表示谐振腔损耗的因子, $\eta_L = T/(T + \delta)$, T 是输出镜透过率, δ 为谐振腔的内损耗。从这些参量可以看出,不同耦合系统下斜效率不同,是由于光斑尺寸、发散度和圆化程度不同使 η_c 不同所致。为了估计 η_c 的大致数值,先计算 η_L ,为此又必需确定谐振腔的内损耗 δ 。

采用 Findly-Clay 法则来推导 δ ^[7]。采用耦合系统 b ,改变输出透过率 T ,使 T 分别为 2%, 1% 和 0.3%,测得相应的阈值泵浦能量(晶体吸收)分别为 65 μJ , 46 μJ 和 31 μJ 。然后以 $\ln(1/R)$ 为横坐标,以阈值能量为纵坐标给出实验值,并用一次曲线拟合得到如下方程(见图 5)

$$y = 1993.15x + 25.41$$

上述法则相应的公式为

$$E_{th} = E_{th0} + E_{th0} \ln(1/R) / \delta$$

其中, E_{th} 为随 R 变化的阈值能量, E_{th0} 为 $R = 1$ 时的阈值能量。对比上两式,得 $E_{th0} = 25.41$, $\delta = 1.3\%$ 。在 1.3% 的内损耗中,由薄膜引起的有 0.9%,而晶体的本征损耗为 0.4%。

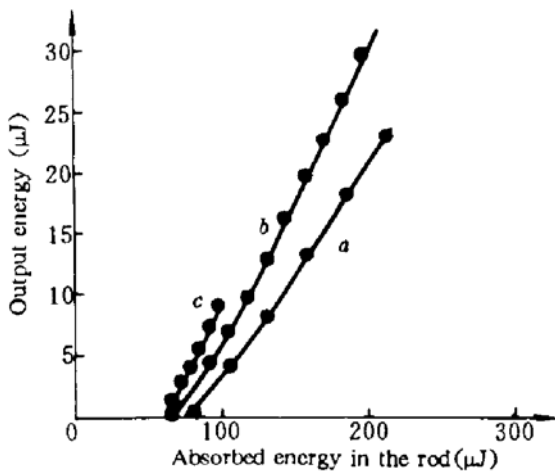


Fig. 4 Output laser energy versus absorbing energy

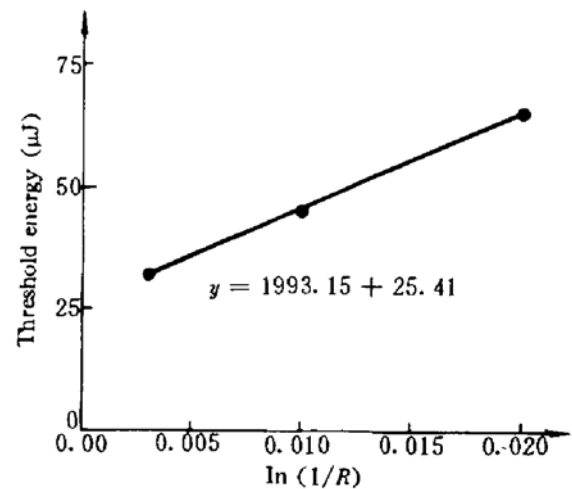


Fig. 5 Threshold pumping energy versus $-\ln R$

现在可以得到 $\eta_L = 0.606$,对系统(a), $\eta = 18.5\% = \eta_s \eta_o \eta_c \eta_L$,则 $\eta_c = 54\%$;同理可得 $\eta_{c2} = 76\%$; $\eta_{c3} = 83\%$ 。

实验用 CCD 检测了输出激光的模式,确定为 TEM_{00} 模。用高重复频率快响应的能量计监视输出激光能量,发现波动小于 $\pm 1\%$ 。对激光的偏振特性也进行了检测,在探测器和输出腔镜之间插入一块检偏器,并使之绕光轴转动,记录激光能量随转角的变化,结果表明它为完全线偏振光。

当 LD 输出达最大值时,耦合输出的最佳透过率可由下式确定

$$R_{opt} = 1 - \frac{(\eta \cdot E_{max} \cdot L)^{1/2} - L}{1 + L}$$

其中, R_{opt} 为最佳透过率, L 是腔的单程损耗,对耦合系统(b)得 $R_{opt} = 98\%$,即实验中用 $T = 2\%$ 的输出镜是合理的。

在本器件中,由于泵浦源的发光尺寸大,功率密度低,使得激光阈值较高,而泵浦功率的最大值仅有 1 W,故整个器件的全光-光转化效率较低,当采用耦合系统(b)时,最大输出能量为 30 μJ ,此时 LD 输出的能量为 348 μJ ,相应的全光-光效率为 8.6%。用 Nd:YAG 晶体在相同的条件下获得 12% 的全光-光效率,这是由于 Nd:YAG 的 $\sigma\tau$ 比 Nd:BEL 大,激光的量子效

率也稍高所致。如果把 BEL 用在 LD 侧面泵浦的固体激光器中,它的吸收峰宽、吸收系数大等优点将会充分地体现出来。

参 考 文 献

- 1 R. Scheps. Cr : LiCaAlF₆ laser pumped by visible laser diode. *IEEE J. Quant. Electr.* , 1991, **QE-27** : 1968
- 2 L. Esterowitz. Diode-pumped holmium, thulium, and erbium lasers between 2 and 3 μm operating CW at room temperature. *Opt. Eng.* , 1990, **29** : 676
- 3 D. W. Hughes, J. R. M. Barr. Laser diode pumped solid state lasers. *J. Phys. D: Appl. Phys.* , 1992, **25** : 563
- 4 T. Y. Fan, R. L. Byer. Diode laser-pumped solid-state lasers. *IEEE J. Quant. Electr.* , 1988, **QE-24** : 895
- 5 R. Scheps, J. Myers, E. J. Schimits *et al.* . End-pumped Nd : BEL laser performance. *Opt. Eng.* , 1988, **27** : 830
- 6 R. Scheps. Efficient laser diode pumped Nd lasers. *Appl. Opt.* , 1989, **28** : 89
- 7 D. Findly, R. A. Clay. The measurement of internal losses in 4-level lasers. *Phys. Lett.* , 1966, **20** : 277

A Laser Diode End-pumped Nd : BEL Laser

Hu Wentao Zhou Fuzheng Chen Youming Zhang Xiurong
Wu Guangzhao Jiang Zhonghong

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

Abstract A Nd : BEL laser pumped by a homemade laser diode is reported for the first time in China. An output of 1.07 μm linear polarization laser has been observed. Using two nonspherical lenses or plus an additional anamorphic prism or plus an additional optical fiber as the couplers of the pumping laser, three different slope efficiencies were obtained, and an analysis about it is presented.

Key words laser-diode pumping, solid-state lasers