

40 mm 孔径 Nd:YAG 片状器件的 激光特性研究*

曹渭楼 张梅珍 华雪蕾
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文首次报道了 40 mm 孔径 Nd:YAG 片状激光器的激光特性。理论分析表明这类器件可望获得千瓦级激光平均功率。

关键词: 片状激光器; 高平均激光功率。

一、寄生振荡对激光输出特性的影响

在我们所研究的系统中, Nd:YAG 片状器件的功率受限面积比厚片状和棒状器件^[1,2]高出 1 个量级。因此它是最有希望发展成高重复率万兆瓦及连续千瓦的固体激光器件。然而,如片中激光的传播方向沿片的短轴方向,则于增益达到一定水平时,长轴方向的寄生振荡往往会耗尽片中的储能^[3],严重影响器件的激光输出特性。因此控制寄生振荡是研制高功率片状器件的核心问题之一。其方法一般是控制片中的激光增益和尽量消除片的侧面反射与散射。片中产生寄生振荡的条件是:

$$R \cdot \exp[n(g_0 - \tau)l] \geq 1. \quad (1)$$

其中 R 为侧面的反射或散射; l 为 Nd:YAG 片的长轴长度, n 为折射率, τ 为动态吸收系数, g_0 为激光增益系数。

在激光片的形状与尺寸确定之后,寄生振荡就只与激光介质的增益及其侧面的反射与散射特性有关。由(1)式,产生寄生振荡的阈值增益为

$$g_{\text{oth}} - \tau = \frac{-\ln R}{nl}, \quad (2)$$

当片的侧面磨毛,这时可取

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2.$$

所以净增益系数为

$$g_{\text{oth}} - \tau = \frac{2 \ln \left(\frac{n+1}{n-1} \right)}{nl}. \quad (3)$$

收稿日期: 1987年9月15日; 收到修改稿日期: 1987年12月23日

* 国家自然科学基金课题: 6878001。

在我们的条件下, $g_{\text{oth}} - r$ 为 0.17 cm^{-1} 。这就是说, 当激光净增益系数达到 0.17 cm^{-1} 时, 激光输出将受到寄生振荡的影响, 增益将明显饱和, 激光效率开始下降。

二、最大激光平均功率输出的计算

获得最大的激光平均功率是设计本器件的宗旨, 有必要对所设计的器件的激光输出潜力进行讨论与计算。本系统采用均匀面泵浦, 面冷却的方式, 因此构成了轴向温度梯度, 消除了激光系统的热透镜效应和热双折射效应。本器件的功率受限由 Nd:YAG 的热炸应力决定的, 其值为 2000 W/cm^2 。

由片的热应力分析^[4], 有:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{2\alpha E}{3(1-\nu)} \Delta T, \quad (4)$$

$$\Delta T = \frac{Qt^2}{8K}. \quad (5)$$

其中 σ_{xx} , σ_{yy} 为片表面的应力, ΔT 为片中心与表面的温差, Q 为片吸收的热功率密度, t 为片的厚度, K 为 Nd:YAG 的热传导系数, α 为线膨胀系数, E 为杨氏模量, ν 为泊松比。

定义 M_s 的材料的热品质因数,

$$M_s = \frac{(1-\nu)K}{\alpha E}. \quad (6)$$

则有:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{Qt^2}{12} \cdot \frac{1}{M_s},$$

定义 R_s 为材料的热应力承受参数, 则有

$$R_s = \sigma_s M_s = \frac{Q_s t^2}{12}. \quad (7)$$

其中 σ_s 为热炸应力, Q_s 为极限热功率密度。

这时, 极限泵浦热平均功率密度与极限承受平均热功率为:

$$Q_s = \frac{12R_s}{t^2}, \quad (8)$$

Table 1 Thermal Properties of The Laser Material & Maximum Laser Output

	n	ν	k W/m°C	α $10^{-6}/^\circ\text{C}$	E kg/mm ²	σ_s kg/mm ²	R_s (80×40×6 mm slab) W/m	P_a W	$P_{\text{avg laser}}$ W
N ₂₃₀ Q-100	1.54	0.24	0.82	9.60	7150	6.5	59	378	94
Quartz	1.45	0.17	1.38	0.55	7190	5.0	1450		
YAG	1.81	0.30	13.0	7.80	31725	20.0	790	4990	1247
GSGG	1.92	0.15	8.0	7.80	21000	17.0	700	4410	1102
LiYF ₃	1.45	0.33	6.0	10.0	7650	3.4	180	1150	287

$$P_o = Q_s \cdot V = 12R_s \left(\frac{\omega L}{t} \right). \quad (9)$$

其中, V 为片的体积, ω 及 L 为片的宽度与长度。对于掺钕四能级激光系统, 激光材料中的热能一般为储能的 2 倍, 而储能的提取效率一般为 0.5 左右。所以最大激光平均功率为:

$$P_{\text{max}} = 3R_s \left(\frac{\omega L}{t} \right). \quad (10)$$

对于 Nd:YAG, 其品质因数 M , 近似为 4×10^{-5} WM/kg, $\sigma_s = 2000$ kg/cm³, $R_s = 800$ W/m, 因此对 $80 \times 40 \times 6$ mm³ 的片, $Q_s = 267$ W/cm³, $P_o = 5070$ W, $P_{\text{max}} = 1267$ W。对两片 Nd:YAG 的激光器件, 其最大激光输出的 2500 W。实验中, 若取安全系数为 5, 可望获得 500 W 的激光平均功率输出, 而掺钕磷玻璃激光器件要比 Nd:YAG 低一个量级(见表 1)。

三、激光特性的实验研究

激光实验装置如图 1 所示, 两片尺寸为 $6 \times 40 \times 80$ mm³ 的 Nd:YAG 片以布儒斯特角放置, 除两个大的通光表面外, 片的四侧磨毛。用 PT-1 型激光能量计测量激光的输出能量。实验结果如下。

1. 激光谐振腔的比较

我们对 Nd:YAG 片状激光器分别采用本行平面腔和稳定球面腔, 比较了它们的激光输出效率。由于 Nd:YAG 片是以布氏角放置, 而且平行平面腔的模体积也最大, 似乎用平行平面腔结构为宜。但稳定球面腔的失调灵敏度不高, 易于获得稳定的激光输出。图 2 是两种谐振腔激光效率的实验曲线, 球面腔结构明显地优于平行平面腔结构。

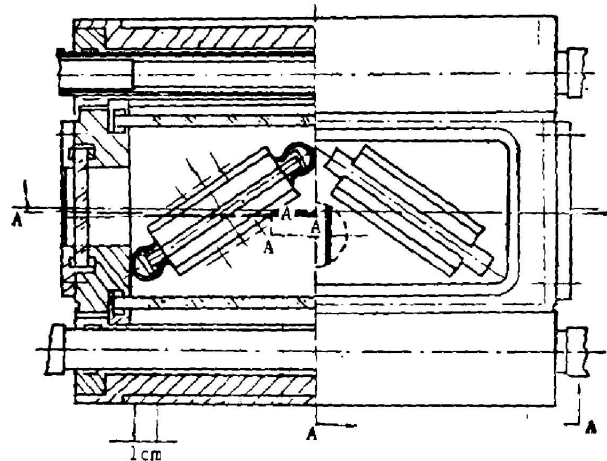


Fig. 1 Diagram of The Nd:YAG Disk Laser

2. 最佳耦合输出的实验研究

我们采用了不同反射率的输出腔镜, 测量了器件的激光能量输出和计算了激光效率, 结果示于图 3。图 3 表明当输出镜的反射率为 91% 时, 激光效率最高。同时, 我们还利用了激光阈值法测得了 Nd:YAG 片的动态吸收系数 γ 的值小于 $0.8\% \text{ cm}^{-1}$, 单位光泵能量的增益系数 β 的值为 $22\% \text{ kJ}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, 结果示于图 4。

3. 各种聚光结构的研究

为了获得最佳的光泵效率, 我们对各种类型的聚光腔进行了实验比较。实验发现, 平面反射聚光腔结构最佳, 它的最高效率为 0.6%, 单脉冲激光输出的能量超过 6J(见图 5)。

4. 寄生振荡阈值的测量

从以上所有的激光效率曲线发现, 当泵浦能量密度超过 27 J/cm^2 时, 效率开始下降, 这说明 Nd:YAG 片长轴方向的寄生振荡已经严重地影响激光系统, 这时小信号增益系数为

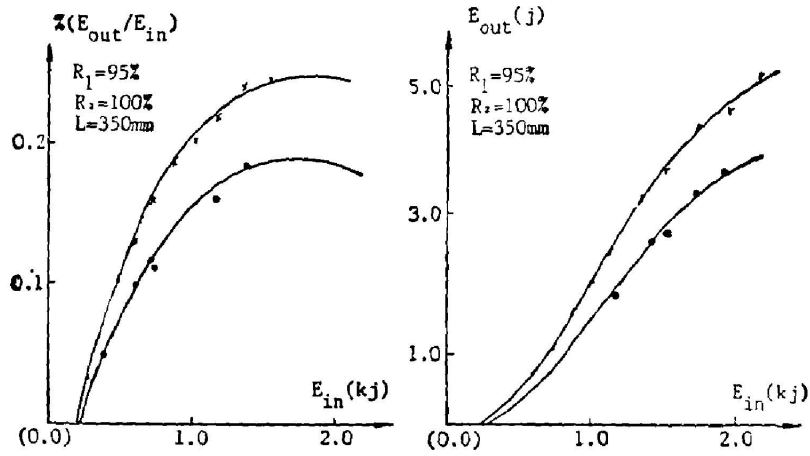


Fig. 2 The dependance of the laser energy and laser efficiency on the pumping power for different resonator structures
(capacity 300 μf)
(•) parallel F-P resonator; (x) stable resonator

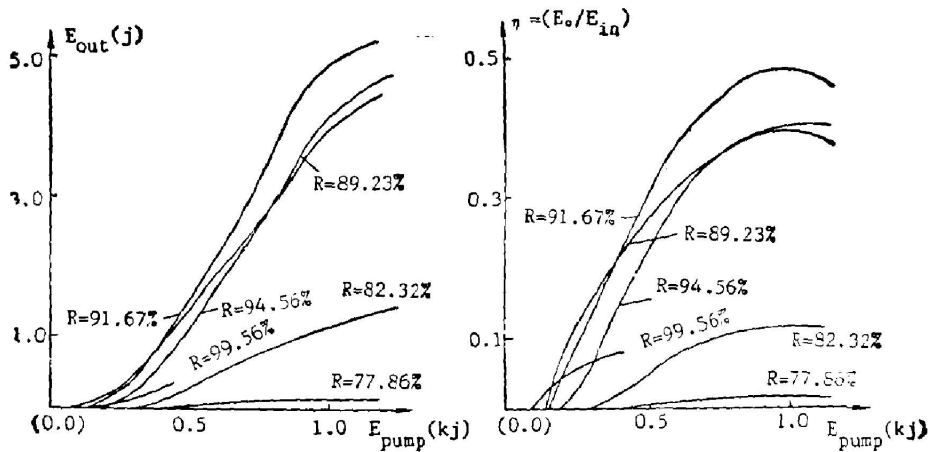


Fig. 3 Laser output energy and laser efficiency vs pumping power density
(R—reflectivity of coupling mirror)

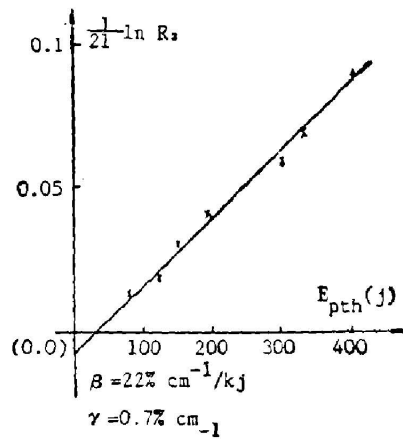


Fig. 4 Small signal gain coefficient vs pumping power density for the Nd:YAG disk oscillator

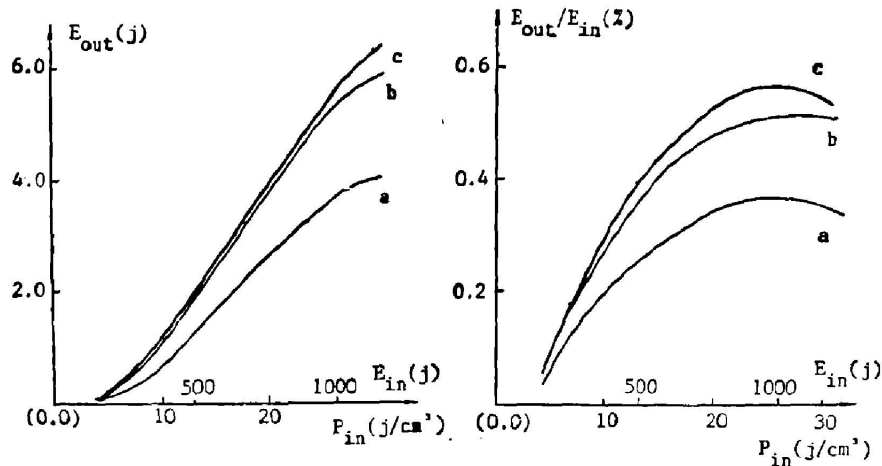


Fig. 5 Laser output vs pumping power for different pumping cavities
a) Paraboloid b) sawtooth c) close coupling

22 cm^{-1} , 它与片的长轴长度的乘积约为 1.8, 与上面的理论估算是非常一致的。如果对晶体的边缘包上一层红外吸收材料, 降低和消除了寄生振荡, 就可以获得更高的激光能量和激光效率。

5. 泵浦均匀性的测量

我们还利用了激光阈值法对镜片状激光器的泵浦均匀性进行了测量, 在 80% 的输出面积内, $\Delta\beta/\beta < 10\%$ 。这说明片状激光器的照明均匀性很好。

6. 激光放大特性的测量

我们将片状 Nd:YAG 系统做为激光放大器, 对它的激光增益特性进行了测量, 其增益特性曲线(见图 6) 与用振荡阈值法所测得的完全一致。从图中也可发现当泵浦功率密度达到 22 J/cm^2 时, 出现寄生振荡, 增益系数曲线趋向饱和。

7. 强激光与 Nd:YAG 片中缺陷的相互作用及紫外滤光材料的研究

我们对 Nd:YAG 片使用前后的特性进行了检验测试, 特别是在强激光与晶体缺陷相互作用方面进行了观察, 发现使用半年后的晶体特性并无明显变化。为了防止 Nd:YAG 片因光泵引起色心, 我们选用了我所研制的滤光玻璃。使用了半年的 Nd:YAG 片的光谱测试结果表明, 片中没有色心产生, 滤光玻璃的效果令人十分满意。

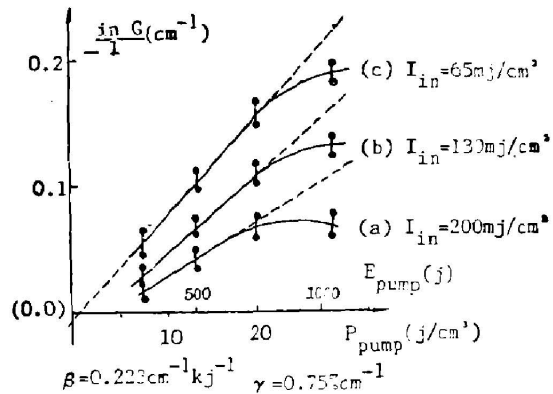


Fig. 6 Small signal gain coefficient vs pumping power density for the Nd:YAG disk amplifier

四、结 论

采用温梯法生长的大尺寸 Nd:YAG 片状晶体^[4,5] 做成的激光器件, 在片侧面磨毛的条件下, 实验获得了 0.17 cm^{-1} 的非饱和增益, 口径为 $\phi 40$ 的光束的每个激光脉冲的能量达 6J。理论分析表明, 用 4 至 6 片 Nd:YAG 晶体所组成的激光系统, 预期可获得 1000 W 以

上的激光平均功率。

感谢邓佩珍、乔景文同志对本实验的支持与帮助,感谢周永宗同志提供了大尺寸的Nd:YAG晶体,感谢宋从善同志提供了特种滤光玻璃。

参 考 文 献

- [1] Wei-lou Cao, *et al.*; *Optics News*, 1986, 12, No. 9, 208.
- [2] T. J. Kane, *et al.*; *Digest of CLEO*, (Washington, 1982).
- [3] 郑玉霞等;《光学学报》,1986, 6, No. 4 (Apr), 381。
- [4] J. M. Eggleston; *Opt. Lett.*, 1982, 7, 405.
- [5] 周永宗等;《硅酸盐学报》,1983, 11, 375.
- [6] 张梅珍等;《中国激光》,1984, 11, No. 11 (Nov), 665, 《应用激光》,1986, 6, No. 6 (Dec), 256。

Output characteristics of large aperture Nd:YAG disk laser

CAO WEILOU, ZHANG MEIZHEN AND HUA XUELEI

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

(Received 15 September 1987; revised 23 December 1987)

Abstract

This is the first report on the laser performances of the large aperture Nd:YAG disk laser which demonstrated the potentiality of producing laser average power of 10^3 watts.

Key words: disk laser; high average laser power.