

# 边缘抽运复合 Yb :YAG/YAG 薄片激光器 设计与功率扩展\*

柳 强<sup>†</sup> 巩马理 潘圆圆 李 晨

(清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

(2003 年 6 月 10 日收到, 2003 年 10 月 13 日收到修改稿)

设计了边缘抽运复合 Yb :YAG/YAG 薄片激光器. 薄片激光器的显著优点是热梯度和激光传输方向相同, 减小了横向的温度梯度, 解决了高功率激光器冷却和高功率抽运的矛盾, 避免了放大的自发辐射. 与高功率棒状和板条激光器相比, 一维空间冷却理论和边缘抽运理论可以获得更高的功率输出, 列举了两种高功率 Yb :YAG/YAG 薄片激光器设计实例.

关键词: 固体激光器, 薄片激光, 边缘抽运, 功率扩展

PACC: 4260, 4260D

## 1. 引 言

近年来, 随着半导体工艺的不断进步和成本的降低, 二极管抽运的固体激光器得到了飞速的发展, 无论是传统圆棒状还是 Z 形板条激光器连续输出都达到了  $10^3$  W. 但在高功率抽运的同时, 在增益介质中产生了大量热量, 由于固体激光工作介质的热导率低, 在冷却面和晶体内部就会产生热梯度, 热梯度的存在引起折射率改变, 产生机械压力、退偏、失谐和其他效应, 降低了输出功率, 使得光束质量变差, 应用领域受到限制<sup>[1, 2]</sup>.

薄片激光器的设计优点是热梯度和激光传输方向平行, 减小了横向的温度梯度, 解决了高功率激光器冷却和高功率抽运的矛盾, 避免了放大的自发辐射<sup>[3, 4]</sup>. 与高功率棒状和板条激光器相比, 可以获得更高的功率输出, 同时保持很好的光束质量. Stuttgart 大学采用面抽运薄片激光器结构, 在单晶体上获得的最大输出功率达到 647 W, 光光转换效率为 51%, 在 4 个晶体上获得的最大输出功率达到 1070 W, 光光转换效率为 48%<sup>[5]</sup>. 边缘抽运的概念首先被 Stanford 大学应用在 zig-zag 板条激光器结构上, 抽运光被约束在板条介质的两个大面之间, 并通

过这两个大面来冷却晶体. 这种结构在一维方向上解决了高功率下圆柱形激光介质的热透镜效应, 以及由于热致双折射导致的退偏效应引起的功率下降<sup>[6]</sup>.

本文综合了 Stuttgart 大学的薄片激光器结构和 Stanford 大学的边缘抽运理论, 对边缘抽运复合 Yb :YAG/YAG 薄片激光器进行了优化设计, 分析了抽运光在晶体中分布和晶体的吸收情况, 据此给出了两种高功率输出激光器的晶体外形、尺寸、掺杂浓度等设计参数, 并对输出情况进行了数值模拟, 说明了边缘抽运薄片激光器的功率扩展性.

## 2. 边缘抽运复合 Yb :YAG/YAG 薄片激光器理论

边缘抽运的薄片激光器的吸收路径为薄片的直径, 为了提高抽运均匀性, 并不是所有的增益介质都适合边缘抽运, 必须选择吸收截面小的激光晶体, 同时晶体的掺杂浓度还要适当, 保证一定的吸收效率. 传统的 Nd :YAG 吸收截面大, 自猝灭现象很大程度影响掺 Nd 的百分比, 而 Yb :YAG 中 Yb<sup>3+</sup> 粒子没有固有的路径发生自猝灭, 可以高浓度掺杂. 图 1 为 Yb :YAG 晶体中 Yb<sup>3+</sup> 的能级结构, 仅有一个基态

\* 国防科技重点实验室基金(批准号 51438010403JW01)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: liuq@pim.tsinghua.edu.cn

$^2F_{7/2}$  和一个激发态  $^2F_{5/2}$ ，两者的能量间隔约为  $10000\text{cm}^{-1}$ ，在晶场作用下，能级产生斯塔克分裂，形成准三能级的激光运行机理，Yb:YAG 晶体具有吸收截面小、量子缺陷小、上能级寿命长等优点<sup>[7,8]</sup>，非常适合边缘抽运的薄片激光器运转。针对 Yb:YAG 晶体的特点，文献[9]设计了漫反射腔棒状 Yb:YAG 激光器，输出功率为 126W，但吸收效率只有 66.3%，不能发挥 Yb:YAG 晶体的优点<sup>[9]</sup>。

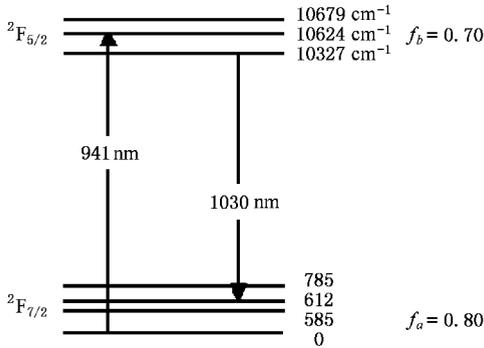


图 1 Yb:YAG 晶体的能级结构图

薄片增益介质的几何外形如图 2 所示，Yb:YAG 面为散热面，并镀有对抽运光(940nm)和振荡激光(1030nm)的高反膜，作为谐振腔全反镜，非掺杂 YAG 晶体面镀 1030nm 的增透膜，抽运光从薄片的边缘进入晶体，抽运面切割成 45°角，使得抽运光在晶体中沿 Z 形传播，多次经过增益介质，类似于双包层光纤激光器和平面波导激光器的抽运结构，并且晶体被切割成正六边形结构，提高了抽运均匀性，散热方向与激光振荡方向平行，减小了在激光轴向上的热梯度，避免了热透镜效应和激光产生相位畸变，同时薄片的通光口径较大，避免了圆棒状和板条介质由于口径限制而引起的衍射损耗。另外，复合 Yb:YAG/YAG 晶体避免了在高功率情况下单一介质引起的放大自发辐射<sup>[10]</sup>。

薄片激光器的优化设计原则是在保证抽运均匀性的同时具有较高的吸收效率，另外为了保证有较好的散热，掺杂的晶体要尽量薄。首先设计 2.88kW 抽运功率的薄片激光器，根据一些文献的实验结果(转换效率、晶体掺杂浓度等参数)和传导冷却的散热能力，我们选择了晶体的散热面外接圆直径为 8mm，Yb:YAG 晶体的掺杂浓度为 10at%，Yb:YAG/YAG 的总厚度为 1.5mm，共 6 个 LD 阵列块对称分布于晶体的周围，每个抽运 LD 阵列块为 480W，单条功率为 40W，共 12 条，条与条的间距为 2.4mm，首先

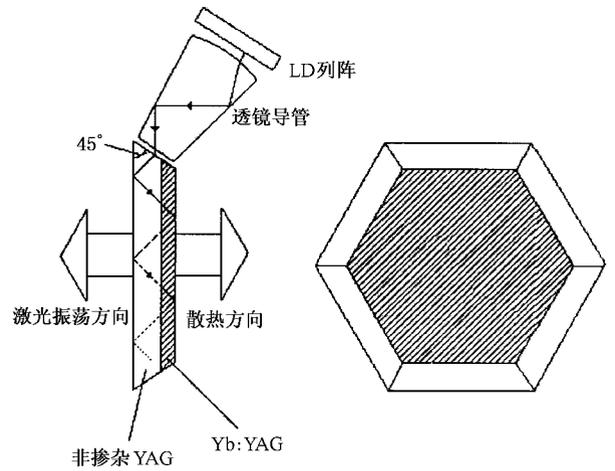


图 2 六边形 YAG/Yb:YAG 晶体薄片模型

经过微透镜对快轴准直后(发散角减小为 3°)，再经过透镜导管入射到抽运面上。利用光线追迹的方法可以分析抽运光经过透镜导管的传输和在晶体中的分布及晶体的吸收情况，透镜导管输入口径和输出口径分别与 LD 阵列的发光面和晶体的 45°斜面口径相匹配，经过透镜导管后抽运功率变为 2.55kW，由于抽运光经过透镜导管传输后，发散角变得很大，这样有一部分光将被 45°斜面反射而不能进入晶体，进入晶体的总功率为 2.39kW。

图 3 为吸收效率随 Yb:YAG 晶体厚度的变化关系(Yb:YAG/YAG 总厚度 1.5mm 不变)。随 Yb:YAG 晶体厚度的增加，晶体的吸收效率在初期增长很快，当 Yb:YAG 晶体厚度大于 0.4mm 后，晶体的吸收效率已经大于 90%，并呈现饱和趋势。固定 Yb:YAG 晶体的厚度(0.4mm)，改变 Yb:YAG 晶体的掺杂浓度，吸收效率的变化如图 4 所示，随掺杂浓度的增加，吸收效率增加较快，掺杂浓度大于 10 at% 后，吸收效率趋于饱和。图 5 为晶体中的抽运光分布情况。可以看出 10at% 掺杂，0.4mm 厚的 Yb:YAG 晶体内抽运光分布较均匀，呈现平顶分布。根据晶体的吸收和抽运光的分布情况，最后选定晶体的掺杂浓度为 10at%，Yb:YAG/YAG 的总厚度为 1.5mm，其中 Yb:YAG 的厚度为 0.4mm。

为了说明边缘抽运薄片激光器在更高功率方面的扩展性，将抽运功率增加到 25.92kW，在 2.88kW 抽运功率设计结果基础上，选择晶体的散热面外接圆直径为 24mm，Yb:YAG/YAG 的总厚度为 4.5mm。每个抽运 LD 阵列块为 4.32kW，共 108 条，分三排排布，排与排之间的距离为 2mm，条与条的间距为

2.4mm 经过透镜导管后抽运功率变为 23.07kW ,进入晶体的总功率为 22.52kW . 图 6 和图 7 分别为吸收效率随 Yb :YAG 晶体厚度和掺杂浓度的变化关系 . 图 8 为不同厚度 Yb :YAG 晶体的吸收分布情

况 .Yb :YAG 厚度大于 0.6mm ,掺杂浓度大于 4at% ,晶体的吸收效率都大于 85% ,在后面的数值模拟计算中 取晶体的掺杂浓度为 6at% ,Yb :YAG/YAG 的总厚度为 4.5mm ,其中 Yb :YAG 的厚度为 1mm .

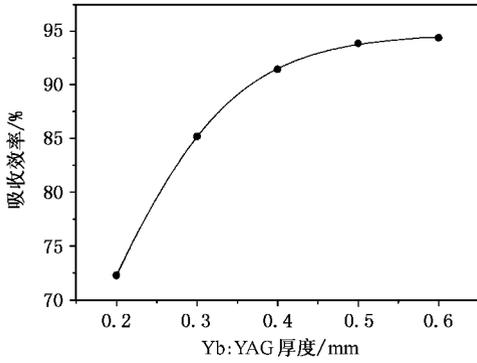


图 3 Yb :YAG 晶体的厚度与吸收效率的关系曲线( 掺杂浓度为 10at% ,保持 Yb :YAG/YAG 总厚度 1.5mm 不变) ●为理论计算结果 ,—为拟合曲线

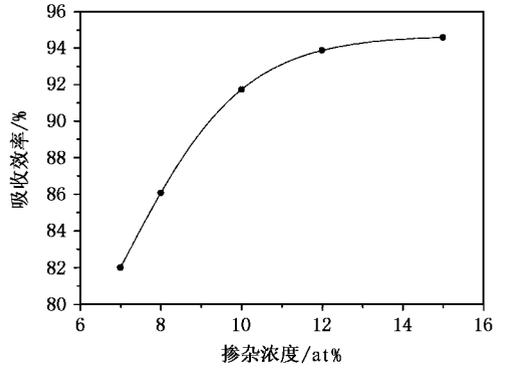


图 4 Yb :YAG 晶体的掺杂浓度与吸收效率的关系曲线 (保持 Yb :YAG 厚度 0.4mm 不变) 图注同图 3

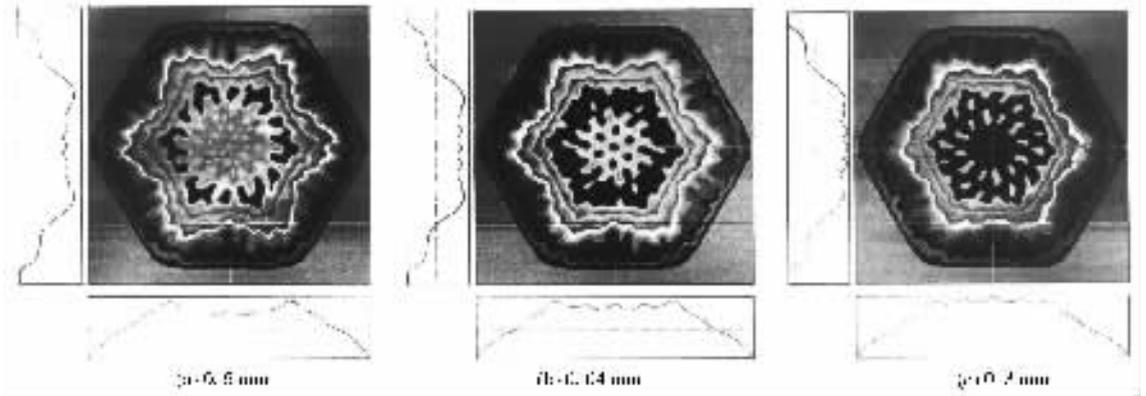


图 5 不同厚度 Yb :YAG 晶体的抽运光分布情况( 掺杂浓度为 10at% 时 ,保持总厚度 1.5mm 不变)

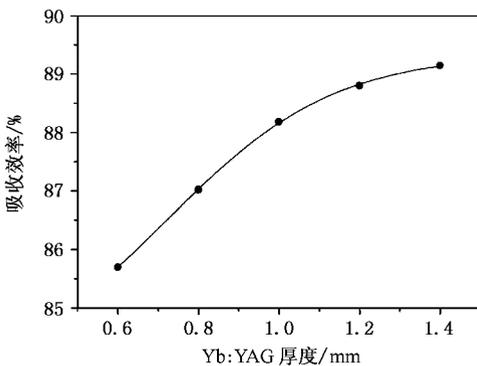


图 6 Yb :YAG 晶体的厚度与吸收效率的关系曲线( 掺杂浓度为 6at% ,保持 Yb :YAG/YAG 总厚度 4.5mm 不变) 图注同图 3

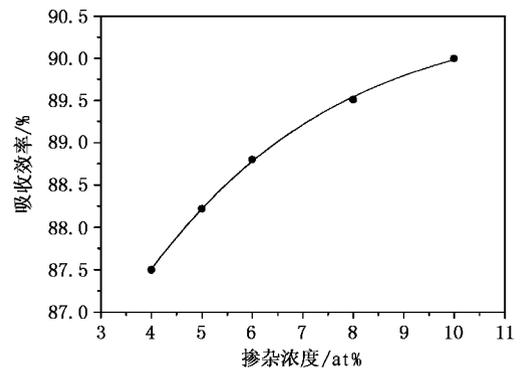


图 7 Yb :YAG 晶体的掺杂浓度与吸收效率的关系曲线( 保持 Yb :YAG/YAG 总厚度 4.5mm 不变 ,其中 Yb :YAG 厚度为 1mm ) 图注同图 3

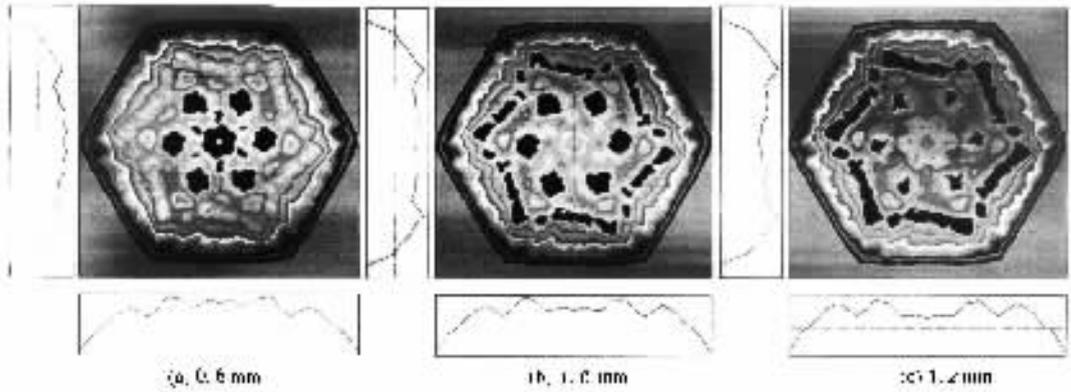


图 8 不同厚度 Yb:YAG 晶体的吸收分布情况(掺杂浓度为 6at% 时,保持总厚度 15mm 不变)

### 3. 激光输出功率模型

根据 Rutherford 的边缘抽运板条激光振荡模型,从低能级向高能级跃迁原子的总激发率和总的辐射率(包括受激辐射和自发辐射)<sup>[6]</sup>为

$$\mathcal{R}_{\text{ex}} = \eta_{\text{abs}} \frac{P_p}{h\nu_p}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_{\text{de-ex}} = & \frac{P_{\text{out}}}{h\nu_L} \frac{R_{\text{oc}}}{1 - R_{\text{oc}}} [ (e^{\beta\sigma\Delta n l_{\text{eff}}} - 1) \\ & + (1 - \delta)^2 (e^{2\beta\sigma\Delta n l_{\text{eff}}} - e^{\beta\sigma\Delta n l_{\text{eff}}}) ] + \frac{n_U V}{\tau}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $\eta_{\text{abs}}$  为抽运吸收系数,  $V$  为激光有效工作介质的体积,  $P_p$  为抽运功率,  $P_{\text{out}}$  为输出功率,  $\nu_p$  为抽运光频率,  $\nu_L$  为激光频率,  $R_{\text{oc}}$  为输出耦合反射率,  $\Delta n$  为跃迁时的粒子数反转密度,  $\delta$  为单程腔损耗,  $\beta$  为重叠因数,  $\sigma$  为激光发射峰值界面,  $l_{\text{eff}}$  为激光输出的有效长度.

在稳态情况下,激发率和辐射率必须相等,联立(1)(2)两式,则可以推导出输出功率为

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} = & \frac{\nu_L}{\nu_p} \frac{1 - R_{\text{oc}}}{R_{\text{oc}} ((1 - \delta)^2 e^{\beta\sigma\Delta n l_{\text{eff}}} + 1) (e^{\beta\sigma\Delta n l_{\text{eff}}} - 1)} \\ & \times \left( \eta_{\text{abs}} P_p - \frac{h\nu_p V n_U}{\tau} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

设激光谐振腔的循环增益为

$$R_{\text{oc}}(1 - \delta)^2 e^{2\beta\sigma\Delta n l_{\text{eff}}} = 1, \quad (4)$$

$$\Delta n = f_b n_U - f_a n_L, \quad (5)$$

$$n_U + n_L = n_d, \quad (6)$$

式中  $n_U$ ,  $n_L$  为激光上能级和下能级粒子数,  $n_d$  为晶体中掺杂 Yb 的粒子数. 联立(4)–(6)式,解出

$$n_U = \frac{1}{2\beta\sigma l_{\text{eff}}} \ln \left[ \frac{1}{R_{\text{oc}}(1 - \delta)^2} \right] + \frac{f_a}{f} n_d, \quad (7)$$

$$f = f_a + f_b, \quad (8)$$

式中

$$f_a = \frac{e^{-\Delta E_a/k_B T_a}}{\sum_{i=1}^{m_L} e^{-\Delta E_i^L/k_B T_a}},$$

$$f_b = \frac{e^{-\Delta E_b/k_B T_a}}{\sum_{i=1}^{m_U} e^{-\Delta E_i^U/k_B T_a}}$$

分别为激光下能级和上能级玻尔兹曼因子,  $T_a$  为晶体的平均温度.

最后得到激光的输出功率为

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} = & \eta_{\text{mod e}} \frac{\nu_L}{\nu_p} \frac{1 - R_{\text{oc}}}{1 - R_{\text{oc}} + \sqrt{R_{\text{oc}} \left( \frac{1}{1 - \delta} \right) + \delta} - 1} \\ & \times \left( \eta_{\text{abs}} P_p - \frac{h\nu_p V}{2\beta\sigma l_{\text{eff}}} \ln \left[ \frac{1}{R_{\text{oc}}(1 - \delta)^2} \right] \right. \\ & \left. - \frac{h\nu_p}{\tau} \frac{f_a}{f} n_d V \right). \end{aligned} \quad (9)$$

假设在多模振荡情况下  $\eta_{\text{mod e}} = 1$ ,  $\beta = 2$ , 在单横模振荡情况下  $\eta_{\text{mod e}} = 0.5$ ,  $\beta = 1.5$ , 数值计算中参数和输出功率结果见表 1.

对于不同的抽运功率,存在最佳的输出耦合反射率  $R_{\text{oc}}$ . 表 1 中所取得  $R_{\text{oc}}$  值就是可以得到最大功率的最优值. 图 9 为厚度为 0.4mm, 掺杂浓度为 10at% 的 Yb:YAG 激光器性能的理论曲线, 激光振荡阈值为 0.75kW, 在 2.88kW 抽运功率条件下,最佳的输出耦合反射率为 83%, 最大单模输出为 0.55kW, 光光转换效率为 23%; 多模输出为 1.15kW, 光光转换效率为 48%. 图 10 为厚度为 1mm, 掺杂浓度为 6at% 的 Yb:YAG 激光器性能的理论

表 1 参数和输出功率的计算结果

参数名称	抽运功率	抽运功率
	2.81kW	25.92kW
抽运波长 $\lambda_p/\text{nm}$		941
激光波长 $\lambda_l/\text{nm}$		1030
受激发射截面 $\sigma/10^{-20}\text{cm}^2$		2.1
Yb :YAG 厚度 $t/\text{cm}$	0.04	0.1
激光有效工作介质的体积 $V/\text{cm}^3$	0.42 $t$	3.82 $t$
冷却剂温度 $T_c/\text{K}$	300	300
平均升高温度 $T_a - T_c/\text{K}$	100	90
单程损失 $\delta/\%$	1.3	2.1
抽运功率密度 $(\text{kW}/\text{cm}^3)$	76.7	112.9
掺杂浓度/at%	10	6
抽运吸收系数 $\eta_{\text{abs}}/\%$	91.44	88.18
输出耦合反射率 $R_{\text{oc}}/\%$	83	81
输出功率 $P_{\text{out}}/\text{kW}$	1.15(多模)	8.06(多模)
	0.55(单模)	3.77(单模)
总效率 $\eta/\%$	48(多模)	36(多模)
	23(单模)	17(单模)

论曲线,在 25.92kW 抽运功率条件下,最佳的输出耦合反射率为 81%,激光振荡阈值为 9.5kW,最大单模输出为 3.77kW,光光转换效率为 17%,多模输出为 8.06kW,光光转换效率为 36%,采用多个这样的激光头串接谐振,可以实现向更高功率扩展,获得  $10^4\text{W}$  激光输出。

在脉冲运转条件下,小信号增益系数  $\sigma\Delta n_{\text{eff}}$  只要保持小于 2.5,放大的自发辐射产生自激振荡和增益饱和就会由于受到小信号增益系数的限制,从而抑制激光上能级储能的损失,在连续运转条件下,这种条件被放宽,小信号增益系数只要保持小于  $3.5^{[5]}$ 。在本文的设计结果中,由于 Yb :YAG 小的受激发射截面,即使是在 25.92kW 的抽运功率条件下,小信号增益系数也远没有达到这个限制,所以放大自发辐射受到了很好的限制。

## 4. 结 论

本文设计了新型的边缘抽运复合 Yb :YAG/YAG 薄片激光器,针对两种输出功率的激光器,确定了最佳的 Yb :YAG/YAG 薄片激光器参数,计算了吸收抽

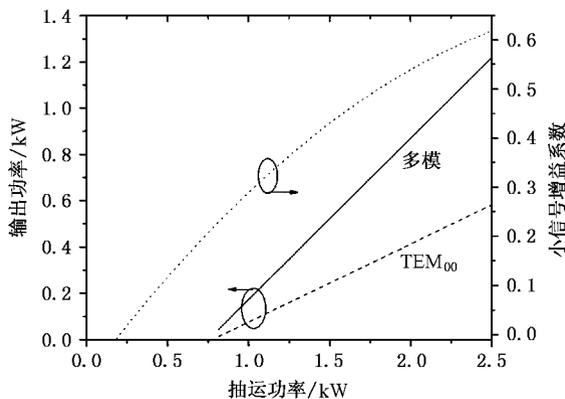


图 9 厚度 0.4mm 掺杂浓度 10at% 的 Yb :YAG 激光器性能的理论曲线(2.88 kW 的抽运功率设计)

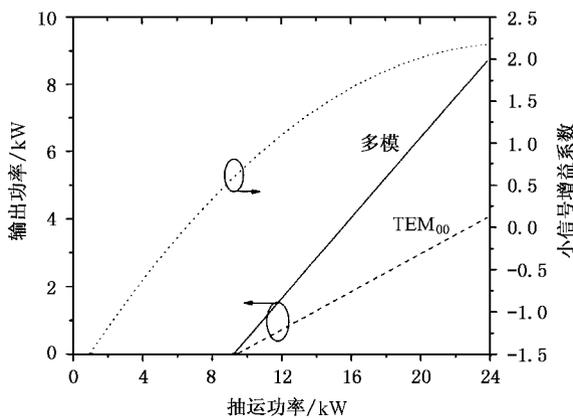


图 10 厚度 1mm 掺杂浓度 6at% 的 Yb :YAG 激光器性能的理论曲线(25.92kW 的抽运功率设计)

运功率和抽运光的分布,对于 2.88 kW 的抽运功率,选择 10at% 掺杂,0.4mm 厚的 Yb :YAG 晶体,复合 Yb :YAG/YAG 晶体的厚度为 1.5mm,理论计算吸收效率为 91.44%,单模输出为 0.55kW,多模输出为 1.15kW,光光转换效率为 48%。对于 25.92kW 的抽运功率,选择 6at% 掺杂,1mm 厚的 Yb :YAG 晶体,复合 Yb :YAG/YAG 晶体的厚度为 4.5mm,理论计算吸收效率为 88.18%,单模输出为 3.77kW,多模输出为 8.06kW,光光转换效率为 36%。

边缘抽运复合薄片激光器与圆棒状和板条激光器相比,已经展示了高功率输出的潜力,但复合薄片激光介质的加工工艺要求较高,不但所有表面要抛光,而且还涉及了激光晶体的热键合技术,同时复合薄片激光器功率高、散热面积小,这样高效的散热技术也将是其所面临的难题。

- [ 1 ] Koechner W 1999 *Solid State Laser Engineering* ( New York : Springer ) p447
- [ 2 ] Wang S Y , Guo Z , Fu J M , Cai D F , Wen J G , Xue H Z and Tang Y D 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 355 ( in Chinese ) [ 王石语、过振、傅君眉、蔡德芳、文建国、薛海中、唐映德 2003 物理学报 **52** 355 ]
- [ 3 ] Liu Q , Gong M L , Yan P , Jia W P , Chui R Z and Wang D S 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2756 ( in Chinese ) [ 柳强、巩马理、闫平、贾维溥、崔瑞祯、王东生 2002 物理学报 **51** 2756 ]
- [ 4 ] Vetrovec J 2002 *Proc. SPIE* **4632** 104
- [ 5 ] Zhang H and Fan D Y 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2375 ( in Chinese ) [ 张华、范滇元 2001 物理学报 **50** 2375 ]
- [ 6 ] Stewen C , Contag K , Larionov M , Giesen A and Hugel H 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 650
- [ 7 ] Rutherford T S , Tulloch W M , Gustafson E K and Byer R L 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 205
- [ 8 ] Fan T Y 1992 *IEEE J. Quantum Electron.* **28** 2692
- [ 9 ] Huang L L and Fang D W 2001 *Chin. Phys.* **9** 827
- [ 10 ] Liu Q , Wu H S , Gong M L , Yan P , Shi B and Wang D S 2003 *Opt. Commun.* **222** 355
- [ 11 ] Yun M , Lee S , Kim S K and Cha B H 2002 *Japan. J. Appl. Phys.* **41** 4547
- [ 12 ] Beach R J , Honea E C , Sutton S B , Bibeau C M , Skidmore J A , Emanuel M A , Payne S A , Avizonis P V , Monroe R S and Harris D G 2000 *Proc. SPIE* **3889** 246

## Edge-pumped composite thin-disc Yb :YAG/YAG laser : design and power scaling \*

Liu Qiang<sup>†</sup> Gong Ma-Li Pan Yuan-Yuan Li Chen

( Department of Precision Instruments and Mechanology , Tsinghua University , Beijing 100084 , China )

( Received 10 June 2003 ; revised manuscript received 13 October 2003 )

### Abstract

The design uses a composite Yb :YAG/YAG disc laser configuration with the pump light incident from the disc edge. The crucial advantages of the thin-disc design is that the thermal gradients are aligned with the beam propagation direction , the transverse temperature gradients are reduced , previous difficulties with high average power pumping/cooling and the rejection of amplified spontaneous emission are resolved. In contrast to high power rods or slabs , the one-dimensional nature of the cooling geometry and the edge-pump geometry scale gracefully to very high average power. Two point designs illustrating power scaling are also given as examples.

**Keywords** : solid-state laser , thin-disc laser , edge pumping , power scaling

**PACC** : 4260 , 4260D

\* Project supported by the Foundation of the Key Laboratory of National Defence Science and Technology ( Grant No. 51438010403JW01 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : liuq@pim. tsinghua. edu. cn