

文章编号: 1001-3806(2005)01-0082-05

LD 边抽运 Yb YAG 激光器性能的数值计算

张庆礼, 江海河, 殷绍唐

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要: 以准三能级固体激光理论为基础, 用数值方法研究了 LD 边抽运 Yb YAG 板条激光器的激光输出特性、温度效应、光学畸变和摩尔分数优化等性能。计算表明, Yb YAG 可实现 100kW 的激光输出, 板条的尺寸在 130mm × 60mm × 3mm 左右, Yb³⁺ 的摩尔分数小于 1%。从晶体的生长的角度看, 生长出满足 130mm × 60mm × 3mm 晶体元件加工需求的 Yb YAG 晶体是可行的。所以, Yb YAG 是未来激光战术武器中的候选材料。

关键词: Yb YAG; 数值计算; LD 边抽运; 板条激光器; 激光热性能

中图分类号: TN248.1⁺3; O434.14 **文献标识码:** A

Properties of LD edge-pumped Yb YAG laser

ZHANG Qing-li, JIANG Hai-he, YIN Shao-tang

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Based on the theory of quasi-three-level solid-state laser, the laser properties of LD edge-pumped Yb YAG slab laser are studied with numerical calculation method. The laser output properties, temperature effect, optical distortion and doped concentration optimization are studied. The calculation results indicate that 100kW laser output can be achieved with Yb YAG medium, whose size is about 130mm × 60mm × 3mm and Yb³⁺ concentration should be less than 1%. It is feasible to grow the crystal with size of 130mm × 60mm × 3mm, so Yb YAG is a promising material used in the tactical laser weapons.

Key words: Yb YAG; numerical computation; LD edge pump; slab laser; laser thermal properties

引 言

激光二极管 (LD) 抽运的高功率、超短脉冲 Yb YAG 激光器可广泛应用于远程精确定位及跟踪、靶子照明、防空武器、医疗、工业加工、非线性频率变换等领域。Yb YAG 在高功率、超短脉冲方面有着比 Nd YAG 优异得多的特性。除了基质本身的热性能、机械性能好的优点外, Yb YAG 还有掺 Yb³⁺ 所带来的优点^[1]: (1) Yb YAG 有着比 Nd YAG 更好的热特性, 储能特性和高的内效率, Yb YAG 的量子亏损仅为 8.6%, 无激发态吸收和上转换, 这使得它具有高的内效率, 在热特性方面比相应的 Nd YAG 激光器系统所产生的热量要少 3 倍多, 上能级寿命长达 951μs, 有利于能量储存; (2) 具有更宽的适合于二极管抽运的吸收带, Yb YAG 在 940nm 吸收带宽是 Nd YAG 的 808nm 吸收带宽的 5 倍多, 适合于 InGaAs 激光二极管抽运; (3) 具有比 Nd YAG 宽的发射带, Yb YAG 在 1.03μm, 1.05μm 的发射带宽 $\Delta\lambda = 6.3\text{nm}$, $\Delta\lambda = 5.6\text{nm}$; Nd YAG 的 $\Delta\lambda = 0.6\text{nm}$, 这有利于从 Yb YAG

中获得超短脉冲激光; (4) 在发射波段的自吸收比 Nd YAG 小, 具有小的发射截面, 从而它的抽运饱和度和增益饱和和能量通量高, 有利于高功率、调 Q、锁模运转。高亮度 LD 抽运源的出现, 使不适于灯抽运的 Yb YAG 获得了新的快速发展, 引起了人们的极大兴趣, 成为近年来的研究热点。

由三能级边抽运激光理论, 对 Yb YAG 的激光性能进行了数值模拟研究。采用数值迭代求解了 LD 边抽运 Yb YAG 激光器的平均温度, 对其摩尔分数进行了优化, 给出了 100kW 输出时 Yb YAG 所应达到的尺寸, 研究了它的热学和光学性能, 这对于研制 100kW Yb YAG 激光器提供了理论依据。

1 准三能级边抽运板条激光器理论^[2]

板条激光器的坐标选取如图 1 所示。坐标原点位于板条中心处, x, y, z 方向分别沿板条的宽度、厚度和长度方向, 板条的长、宽、厚分别为 l, w, t, 从而, $-w/2 < x < w/2$, $-t/2 < y < t/2$, $-l/2 < z < l/2$ 。

板条激光器的边抽运几何配置如图 1 所示。抽运光从板条的两个侧面 (x 方向) 对称抽运, 冷却在板条的两个大面上, 这样板条的热梯度是关于 xOz 平面对称的。激光通过多次全反射在激光介质里以 Z 字形传播, 可平均冷却在激光介质里产生的热梯度。

作者简介: 张庆礼 (1973-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事激光晶体的生长及其物性研究。

E-mail: zql@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2004-01-19; 收到修改稿日期: 2004-06-04

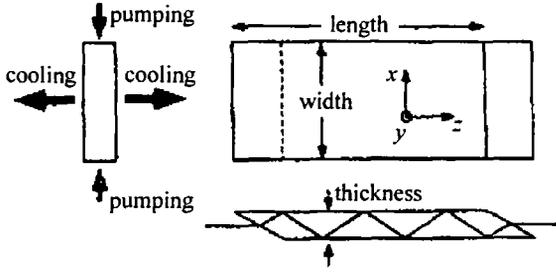


Fig 1 Coordinate setting of LD edge-pumped slab laser

1.1 板条对抽运光的吸收

设入射光为一平面波。在实际的应用中,所有的光不是都在单程通过板条时全部被吸收。定义抽运反射率 R_p 为抽运光与在 $x = \pm w/2$ 处反射出板条的抽运光比值。采用整个边面上的平均抽运反射率作为 R_p 。设反射率为 R_p 的抽运光通过板条无限次。定义抽运效率 η_a 为总吸收功率除以总抽运功率,其表达式为:

$$\eta_a = \frac{1 - e^{-\alpha w}}{1 - R_p e^{-\alpha w}} \quad (1)$$

式中, $\alpha = n_d \sigma_a$ 为抽运吸收系数, n_d 为掺杂浓度, σ_a 为有效吸收截面。

1.2 温度效应

板条温度 $T(x, y)$ 为:

$$T(x, y) = T_a + T'(x, y) \quad (2)$$

T_a 为板条平均温度,可表示为:

$$T_a = T_c + \frac{Q_0 t}{2\lambda_h} + \frac{Q_0 l^2}{12k} \quad (3)$$

式中, λ_h 为板条和冷却剂间的热导率, T_c 为冷却剂温度, k 为板条热导率, Q_0 为每单位体积的平均发热量:

$$Q_0 = \frac{\eta_h \eta_a P_p}{w l} \quad (4)$$

式中, P_p 为入射到板条上的抽运功率, η_h 为板条的热分支比,即入射激光变为热量值与入射激光能量的比值。

$T'(x, y)$ 为位置依赖项,在整个截面上平均为 0,可表示为:

$$T'(x, y) = \frac{2\eta_h \eta_a P_p / l}{a_r k} \left\{ \frac{1}{16} \left[\frac{1}{3} - \left(\frac{2y}{t} \right)^2 \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n a_r^2}{4n^2 \pi^2} \frac{(\alpha w)^2}{(\alpha w)^2 + 4n^2 \pi^2} \times \left[1 - \frac{\frac{\lambda_h}{\lambda_s} \cosh\left(\frac{2n\pi}{a_r} \frac{y}{l}\right)}{\frac{n\pi}{3a_r} \sinh\left(\frac{n\pi}{a_r} \frac{y}{l}\right) + \frac{\lambda_h}{\lambda_s} \cosh\left(\frac{n\pi}{a_r} \frac{y}{l}\right)} \right] \cos\left\{ \frac{2n\pi}{w} x \right\} \right\} \quad (5)$$

式中, $a_r = w/t$, $\lambda_s = t/6k$, 为板条的有效热导率。

1.3 应力效应

y 平均应力为:

$$\bar{\sigma}_{xx} = \frac{1}{t} \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{xx} dy = 0 \quad (6)$$

$$\bar{\sigma}_{yy} = \frac{1}{t} \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{yy} dy = \frac{\eta_h \eta_a P_p / l}{M_s} \times \frac{(\alpha w)^3}{a_r^3 \sinh(\alpha w / 2)} \frac{\cosh(\alpha x)}{1440} \quad (7)$$

$M_s = (1 - \nu) k / \alpha_t E$ 为热负载品质因素,其中 ν 为泊松比, α_t 是热膨胀系数, E 为弹性模量。

1.4 光学畸变

光学路径长度变化可分为比例于温度变化部分和比例于应力变化部分,忽略 x 方向热流,板条中心的热透镜的光焦距写为:

$$F = \frac{\eta_h \eta_a (\alpha w)^3 P_p / l}{w^2 a_r \sinh(\alpha w / 2)} l_{\text{eff}} \times \left[\frac{dn}{dT_s} \frac{1 + \lambda_s / \lambda_h}{24k} - B_s \frac{(\alpha w)^2}{1440 M_s a_r^2} \right] \quad (8)$$

此处 $l_{\text{eff}} = l / \sin\theta$ 是 Z 字形路径的几何长度。 dn/dT_s 和 B_s 分别为板条的折射率温度系数、光应力系数,它们的值依赖于极化、TR 边界反射角和材料参数, B_s 的值依赖于光的极化方向,它们的计算公式见文献 [3]。

1.5 板条断裂应力

Z 字形板条几何可获得大功率激光输出而没有大的光学畸变和热开裂。考虑在体积 V 被均匀抽运的激光介质,其要达到透明的吸收功率为:

$$P_t = \frac{h\nu_p n_d V}{\tau} \frac{f_a}{f_a + f_b} \quad (9)$$

式中, f_a, f_b 分别为在激光上能级和下能级的比例, ν_p 为抽运光子频率, τ 为激光上能级寿命。从此式可看到透明抽运功率直接依赖于掺杂粒子总数。对吸收抽运功率的一个限制是激光介质的应力断裂。在应力断裂点的吸收抽运功率 P_t 依赖于材料参数和介质形状。对均匀抽运和冷却的板条,在断裂极限的吸收功率为:

$$P_t = \frac{12R_s}{\eta_h} (w/t) l \quad (10)$$

式中, $R_s = M_s \sigma_{\text{max}}$ 为热应力阻抗参数, σ_{max} 是断裂应力,其依赖于材料的机械特性和表面处理。要求激光器达到抽运透明但同时要求其在小于应力断裂抽运功率值下工作,即: $P_t \leq P < P_t$ 。

1.6 功率输出

对多横模振荡,此时激光模完全充满板条。在稳态, Yb^{3+} 激发速率和退激发速率相匹配,输出功率 P_o 为:

$$P_o = \frac{\nu_p}{\nu_l} \times$$

$$\frac{1 - R_o}{R_o [(1 - \delta)^2 e^{\beta \sigma \Delta n l_{\text{eff}}} + 1] (e^{\beta \sigma \Delta n l_{\text{eff}}} - 1)} \times$$

$$\left[\eta_a P_p - \frac{h\nu_p n_u w tl}{\tau} \right] \quad (11)$$

式中, ν_l 为激光频率, R_o 为输出镜反射率, Δn 为在激光跃迁的离子数反转密度, δ 为单程腔损耗, β 为 Z 字形重叠因子, 用其测量在 Z 字形路径上的光束重叠数。 β 取值从 1 (在边界点没有重叠, 无限小光束) 到 2 (完全重叠, 光束全部填满了板条)。

下面找出上能级离子聚居数 n_u 。使谐振腔的往返增益为 1, 即 $R_o (1 - \delta)^2 \exp(2\beta\sigma\Delta n l_{eff}) = 1$, 解出 Δn 并利用 $\Delta n = f_b n_u - f_a n_l$, 有:

$$n_u = \frac{1}{2\beta\sigma l_{eff}} \ln \frac{1}{R_o (1 - \delta)^2} + \frac{f_a}{f} n_d \quad (12)$$

式中, $f = f_a + f_b$ 。(11)式中需要知道其值的另外一项是 η_a 。(1)式中包含下抽运能级的离子数损耗, $\alpha = \sigma_a (f_a' n_l - f_b' n_u)$, 式中, f_a' 是激光下能级的抽运能级的离子比例, f_b' 是激光上能级的抽运能级所占的离子比例。由 α 关系式、(12)式和原子数守恒得:

$$\eta_a = \frac{1 - \exp(-\sigma_a \Delta n_{eff} w)}{1 - R_p \exp(-\sigma_a \Delta n_{eff} w)} \quad (13)$$

式中,

$$\Delta n_{eff} = \frac{f_a' f - f_a f'}{f} n_d - \frac{f'}{f} \frac{1}{2\beta\sigma l_{eff}} \ln \left[\frac{1}{R_o (1 - \delta)^2} \right] \quad (14)$$

表面上, (11)式 ~ (14)式提供了输出功率的显式解。但是, 由于板条的自加热效应, 所有的波耳兹曼离子聚居数比例依赖于吸收抽运功率 $\eta_a P_p$ 。由 P_p 计算 T_a 时, 需知道 η_a ; 但计算 η_a 需要知道 T_a 。这样, (13)式是一个隐式方程, 需要用数值方法求解。

对于 TEM₀₀ 模输出激光器, 简单地在总效率中加入一个模式重叠项 η_{mode} , 结果为:

$$P_o = \eta_{mode} \frac{\nu_l}{\nu_p} \frac{1 - R_o}{1 - R_o + \sqrt{R_o} \left(\frac{1}{1 - \delta} + \delta - 1 \right)} \times \left\{ \eta_a P_p - \frac{h\nu_p w tl}{2\beta\sigma\tau l_{eff}} \ln \left[\frac{1}{R_o (1 - \delta)^2} \right] - \frac{h\nu_p}{\tau} \frac{f_a}{f} n_d w tl \right\} \quad (15)$$

由 (15)式即可分析边抽运板条激光器的输出。

2 边抽运 Yb YAG 激光器激光输出性能数值计算

2.1 平均温度的数值计算

求出板条平均温度是计算边抽运 Yb YAG 激光器输出性能的重要参数。由 (3)式和 (4)式, 以及 (11)式和 (14)式, 可知温度的 T_a 的函数是一个关于 T_a 非线性方程: $T_a = T_c + f(T_a)$ (16) 可采用数值迭代解法求 T_a 。计算结果表明, 此迭代方

法的收敛很好, 且收敛很快。迭代程序如图 2 所示。

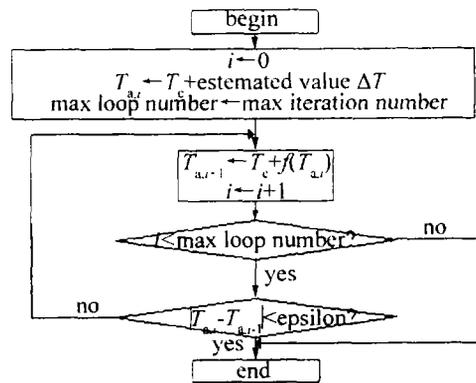


Fig 2 Iteration solution conceptus of the slab average temperature, i is the iteration number, $T_{a,i}$ is the average temperature obtained by the iteration of number i

2.2 抽运反射率 R_p 的实际考虑

940nm 抽运光和 1030nm 输出激光波长相隔很近, 而另外一个实际困难是大面积的 LD 抽运光源很难获得。实际中板条边上的一些区域对抽运光是高反射的, 另外的一些区域对抽运光具有高透过率。因此, 抽运反射率可取为抽运区域 (此处对抽运光具有高透过率) 与总的抽运侧面区域 (此处对 1030nm 输出激光具有高反射率) 面积之比。设 LD 的最大抽运功率为 P_{max} , 亮度为 I_p , 则 R_p 可取为:

$$R_p = \frac{P_{max} / I_p}{2tl} \quad (18)$$

现商品化的 50W 的 940nm LD, 其直径为 440μm 光纤, 给出抽运亮度为 32.9kW/cm²。

在计算中, Yb : YAG 有关的能级参数如下^[4]: $^4F_{5/2}$: 10679cm⁻¹, 10624cm⁻¹, 10327cm⁻¹ (激光上能级为 10327cm⁻¹); $^4F_{7/2}$: 785cm⁻¹, 612cm⁻¹, 565cm⁻¹, 0cm⁻¹ (激光下能级为 612cm⁻¹)。

Yb YAG 的基质参数采用 Nd YAG 的参数, 如表 1 所示。

Table 1 Physical properties of YAG^[3,5]

name/unit	symbol	value
melt point/°C		1970
temperature coefficient of index /10 ⁻⁶ K ⁻¹	dn/dT	7.3
conductivity/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	K	13.0
perpendicular stress-optic coefficient /TPa ⁻¹	B _⊥	0.34
thermal expansion coefficient/K ⁻¹	α _t	6.9
parallel stress-optic coefficient/TPa ⁻¹	B _∥	-0.91
specific heat/(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)		590@300K, 30@200K, 130@100K
M _s /(10 ⁻⁶ m ² · s ⁻¹)		5.1
young's modulus/TPa	E	0.277

continue			
name/unit	symbol	value	
fracture stress/ ($10^6 \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)	σ_{\max}	127~255	
Poisson's ratio	ν	0.25	
density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)		4.56	

2.3 LD边抽运 100kW Yb YAG激光设计

板条的尺寸为 $l = 160\text{mm}$, $w = 75\text{mm}$, $t = 5\text{mm}$, Yb^{3+} 的摩尔分数为 0.20%, 断裂功率为 169620W, 其余参数为: $n_d = 3.70 \times 10^{26} \text{m}^{-3}$, $\eta_h = 0.11$, $dn/dT = 7.3 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $\sigma = 2.120 \times 10^{-20} \text{cm}^2$, $\tau = 922\text{ms}$, $\lambda_1 = 1.03\mu\text{m}$, $\lambda_p = 941\text{nm}$, $T_c = 300\text{K}$, $\eta_{\text{mode}} = 1$, $\delta = 0.013$, $\beta = 2$, $\theta = 33.3^\circ$, $R_o = 0.8$, $R_p = 0.66$, $l_{\text{eff}} = 0.237\text{m}$, $\lambda_h = 2 \times 10^4 \text{K} \cdot \text{m}^{-2}$.

摩尔分数为 0.20%的 Yb YAG的输出功率、透明功率、吸收功率和吸收效率随抽运功率的变化如图 3 所示 (在计算中假定板条的平均温度不能高于 400K)。

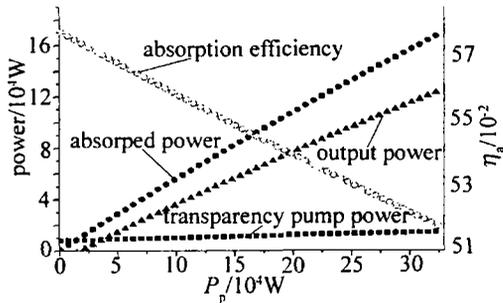


Fig 3 Transparent power, output power and absorption power curves of LD edge-pumped (0.20%) Yb : YAG laser vs input power, the size of Yb YAG medium is 160mm ×75mm ×5mm

在 328060W 抽运功率下, 板条的吸收功率为 169620W, 已经达到板条的吸收断裂功率, 可见板条的热效应导致的应力开裂是限制边抽运 Yb YAG板条激光器输出功率的重要原因。在 328040W 功率抽运下, 板条的吸收功率为 169615W, 输出功率为 125281W。由此, 此板条的理论输出功率可达到 100kW 以上。

随着抽运功率的增加, 板条的透明抽运功率 P_t 随抽运功率的增加略有增加, 这时因为板条温度的升高引起 Yb^{3+} 激光下、上能级的热集居粒子数比例 f_a, f_b 的比值 $f_a / (f_a + f_b)$ 增加 (见图 4), 因 P_t 正比于 $f_a / (f_a + f_b)$, 故抽运激光引起的板条温度升高导致了透明抽运功率的增加。

板条平均吸收效率随抽运功率的变化如图 3 所示。可见, 随着抽运功率的升高, 板条的吸收效率线性下降, 可表示为: $\eta_a = 0.58 - 1.9 \times 10^{-7} P_p$ 。

板条平均温度随抽运功率的增加而升高, 二者近似呈线性关系变化 (见图 4), 斜率为 5.4×10^{-4} , 即

$T_a = 302 + 2.7 \times 10^{-4} P_p$, 而吸收效率随着抽运功率的

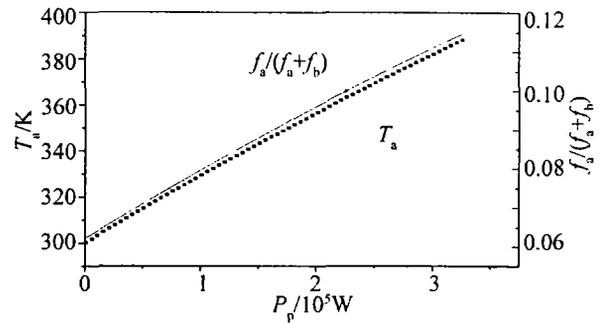


Fig 4 Average temperature and $f_a / (f_a + f_b)$ curves of Yb :YAG of 160mm ×75mm ×5mm vs pump power

升高逐渐降低。斜率与板条的尺寸和摩尔分数有关。

300kW 抽运功率下 Yb YAG板条的温度分布如图 5所示。温度的分布关于 $y = 0$ 轴对称呈马鞍形分布, 在 x 坐标相等情形下, 板条中心 ($y = 0$) 的温度最高, 中心两侧的温度相对较低。在 $y = 0, x = 0.375$ 处的温度高, 为 406K; 在 $x = 0, y = 0$ 处的温度最低, 为 336K。

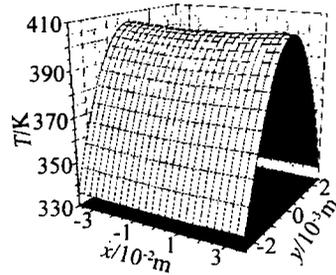


Fig 5 Temperature of Yb YAG of 160mm ×75mm ×5mm with pump power 300kW

在高功率下, 优化 Yb^{3+} 的摩尔分数是很重要的。过高的摩尔分数会使 Yb YAG的热效应特别大, 使 Yb YAG的工作失效。

现设抽运功率 P_p 为 200kW, 260kW, 300kW, 340kW, 板条的尺寸为 160mm ×75mm ×5mm, 其输出功率、吸收效率、温度、焦距随摩尔分数的变化如图 6、图 7所示。

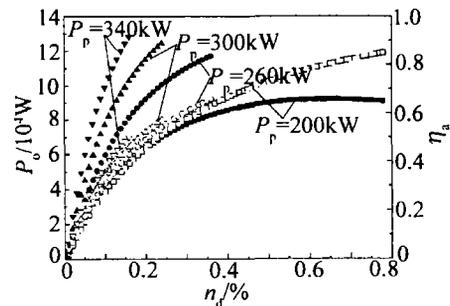


Fig 6 Output power, absorption efficiency curves of Yb YAG slab vs Yb^{3+} concentration, the close and open symbols stand for the output power and absorption efficiency respectively

由图 5 可以看到, 随着 Yb^{3+} 的摩尔分数增加, 板条的吸收效率近似呈指数增加, 以致使板条的吸收功

率很快超过断裂功率极限,使 Yb:YAG的工作失效。在 200kW, 260kW, 300kW, 340kW 抽运功率下, Yb³⁺的

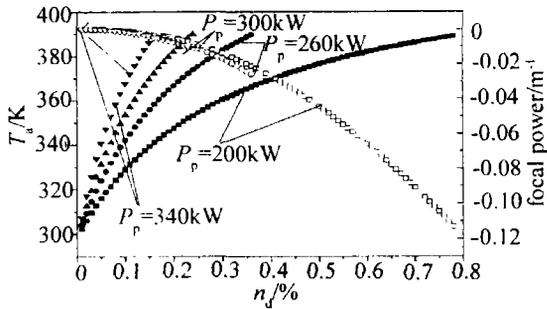


Fig 7 Average temperature and focal power vary of the slab with different pump power, the close and open symbols stand for the temperature and focal power curves respectively

最大摩尔分数分别为 0.78%, 0.36%, 0.24%, 0.16%, 最高输出功率为 90743W, 117135W, 124584W, 128190W。超过最大摩尔分数,应力开裂将使 Yb:YAG的工作失效。可以看到,抽运功率越高,相应的最高摩尔分数也就越小。总的说来,在 100kW 的工作条件下, Yb³⁺的摩尔分数应小于 1%。

在 200kW, 260kW, 300kW, 340kW 抽运功率下,板条的平均温度和焦度随摩尔分数的变化如图 6 所示。可以看到,随摩尔分数的增加,板条温度上升很快,而焦度的绝对值则增加。板条的温度和焦度随摩尔分数的变化可用如下关系式拟合:

$$y = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{e^{(x-x_0)/dx}} \quad (19)$$

如在 200kW 抽运下,板条平均温度与摩尔分数的关系为:

$$T_a = 394 + \frac{-1361}{e^{(n_d+0.746)/0.284}} \quad (20)$$

式中, n_d 的单位为摩尔分数 (%)。

实际中总希望板条的焦度平均值尽可能的小,在满足输出功率的情形下平均温度最低。由此也可以看出, Yb³⁺的摩尔分数应小于 1%。

3 结论

计算表明, Yb:YAG 可实现 100kW 的激光输出,此时,板条的尺寸在 160mm × 75mm × 6mm 左右, Yb³⁺的摩尔分数应小于 1%。从晶体的生长的角度看,生长出满足此尺寸晶体元件加工的 Yb:YAG 是可行的。所以, Yb:YAG 是未来激光战术武器中的候选材料。但 LD 抽运 Yb:YAG 激光器为战略武器尚依赖 940nm LD 的发展。以 34% 的实验光-光效率计算,要发展 100kW 的 LD 抽运 Yb:YAG 激光器,至少需要 294kW 的 940nm LD 抽运源。

参考文献

- [1] HÖNNIGER C, PASCHOTTA R, GRAFM *et al* Ultrafast ytterbium-doped bulk lasers and laser amplifiers [J]. *Appl Phys*, 1999, B69: 3~17.
- [2] RUTHERFORD T S, TULLOCH W M, GUSTAFSON E K *et al* Edge-pumped quasi-three-level slab lasers: design and power scaling [J]. *IEEE J Q E*, 2000, 36(2): 205~219.
- [3] KANE T J, EGGLESTON J M, BYER R L. The slab geometry laser: thermal effects in a finite slab [J]. *IEEE J Q E*, 1985, QE21(8): 1195~1210.
- [4] TAIRA T, TULLOCH W M, BYER R L *et al* Modeling of quasi-three-level lasers and operation of CW Yb:YAG lasers [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(9): 1867~1874.
- [5] 克希耐尔 W. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 40.

(上接第 45 页)

参考文献

- [1] 王景泉. 跟踪与数据中继卫星系统及其技术的新发展(上) [J]. *中国航天*, 1997(5): 31~34.
- [2] 王景泉. 跟踪与数据中继卫星系统及其技术的新发展(下) [J]. *中国航天*, 1997(6): 19~21.
- [3] 刘晓川. 激光卫星通信的现状和发展趋势 [J]. *航天国际动态与研究*, 1997(26): 1~4.
- [4] JACKSON A H, GUDIN W S, CHANG R W. A TDRSS program overview [A]. *IEEE Global Telecommunications Conference [C]*. New York: IEEE, 1991. 188~194.
- [5] 陈明章, 赵恩惠, 冯达武. 我国跟踪与数据中继卫星间链路通信频段选择研究 [J]. *空间电子技术*, 2000, 7(2): 15~19.
- [6] 陈福深. 集成电光调制器理论与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995. 139~150.
- [7] 张兵, 吴伯瑜, 周伟勤 *et al* 40GHz 铌酸锂电光调制器 [J]. *光电子·激光*, 2001, 12(11): 1199~1201.
- [8] NOGUCHI K, MIYAZAWA H, MIYAZAWA H. Millimeter-wave Ti:LNbO₃ optical modulators [J]. *J Lightwave Technol*, 1998, 16(4): 615~619.
- [9] NOGUCHI K, MIYAZAWA H, MIYAZAWA H. 75 GHz broadband Ti:LNbO₃ optical modulator with ridge structure [J]. *Electron Lett*, 1994, 30(12): 949~950.
- [10] 周仲林, 杨建军. 通信卫星 Ka 波段转发器技术的研究 [J]. *电讯技术*, 1997, 37(2): 43~55.