

# 低温 Yb:YAG 放大器放大特性理论研究

蒋新颖<sup>1</sup> 郑建刚<sup>1</sup> 严雄伟<sup>1</sup> 李明中<sup>1\*</sup> 段文涛<sup>1</sup> 王振国<sup>1</sup> 张永亮<sup>1</sup>  
单小童<sup>1</sup> 王明哲<sup>1,2</sup> 於海武<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)  
<sup>2</sup>国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 为了分析低温 Yb:YAG 放大器的放大特性, 基于 Yb 离子抽运动力学及脉冲放大特性, 对低温下 Yb:YAG 激光放大器的放大性能进行了理论研究, 计算了不同晶体尺寸、不同掺杂浓度、不同温度以及不同抽运功率密度下的放大性能, 建立了低温下热分析三维模型, 对低温热管理效果进行了数值模拟。结果表明抽运功率密度、激光晶体尺寸、工作温度等参数对激光器效率均有显著影响, 在 100~300 K 的温度范围内随着抽运功率的增大, 最佳工作温度逐渐上升, 不同尺寸的晶体在相同抽运功率密度下, 最佳工作温度也不同。在低温强抽运条件下, 较厚晶体的热管理效果优于较薄晶体。

**关键词** 激光; 放大特性; 光光效率; 低温

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100211

## Theoretical Research on Amplification Properties of Cryogenic Yb:YAG Amplifier

Jiang Xinying<sup>1</sup> Zheng Jiangan<sup>1</sup> Yan Xiongwei<sup>1</sup> Li Mingzhong<sup>1</sup> Duan Wentao<sup>1</sup>  
Wang Zhenguo<sup>1</sup> Zhang Yongliang<sup>1</sup> Shan xiaotong<sup>1</sup> Wang Mingzhe<sup>1,2</sup> Yu Haiwu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)  
<sup>2</sup>College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** In order to analyze the amplification properties of cryogenic Yb:YAG amplifier, based on pumping dynamics and pulse amplification performance, the amplification properties of cryogenic Yb:YAG amplifier is researched in simulation. The amplification performance on different size and concentration of crystal and different temperature and pumping power density is calculated. 3D thermal analysis model is used to simulate the thermal management effect. The results demonstrate that the pump power density, the size of laser medium and the temperature all have distinct effect on the optical to optical efficiency. In the temperature range of 100 K to 300 K, the optimal working temperature increase with the pump power density. With the same pump power density, the medium with different size have different optimal working temperature. In the condition of low temperature and strong pump, the thicker crystal has a better thermal management effect than a thinner crystal.

**Key words** laser; amplification properties; optical to optical efficiency; cryogenic

**OCIS codes** 140.3280; 140.3615; 140.4480; 140.6810

## 1 引言

大能量、短脉冲、高平均功率的固体激光器在激光加工、惯性聚变能、激光与材料相互作用的研究等领域有着重要的应用价值, 而热致波前畸变、热应力

断裂等热效应严重影响了固体激光器向高平均功率、高光束质量发展。20 世纪 90 年代以来, 随着高功率、高性能 InGaAs 激光二极管(发射波段 0.9~1 μm)的发展以及价格日益降低, 掺 Yb 离子的激光

**收稿日期**: 2011-03-01; **收到修改稿日期**: 2011-03-23

**作者简介**: 蒋新颖(1979—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事高功率固体激光技术方面的研究。

E-mail: noveltymm@126.com

\* **通信联系人**。E-mail: limingzhong@sina.com

材料得到了广泛研究<sup>[1]</sup>,其中低温下Yb:YAG 介质由于具有较低的热效应和良好的激光特性,成为国际上的研究热点之一。

Jun Dong 等<sup>[2]</sup>对于不同温度、不同掺杂浓度的Yb:YAG 的激光特性进行了详细研究。随温度降低,Yb:YAG 的受激发射截面增大,这使得饱和通量降低,从而降低了对元件膜层损伤阈值的要求。材料本身的热导率是导致高平均功率固体激光器热光效应的重要因素,随着温度的降低,Yb:YAG 的热导率将显著提高,同时折射率温度系数、热膨胀系数随温度降低而降低,因此,低温对降低热效应应具有显著的优势。

然而,低温情况下,随着材料发射截面的增大,放大自发辐射(ASE)效应将变得更为显著,影响介质的储能效率,因此需要对放大器工作温度及增益系数进行优化设计。国际上对重复频率高功率固体激光器的研究在近几年呈现广泛化,深入化的趋势,在热管理设计上,采用了不同的技术方案。例如法国 LULI 实验室<sup>[3]</sup>的 LUCIA 采用水冷方式对Yb:YAG进行冷却,日本大阪大学<sup>[4]</sup>报道了采用液氮冷却的技术方案,欧洲<sup>[5]</sup>计划建设的 Hiper 装置

也对热管理进行了设计,采用低温氦气作为冷却介质,温度为 150 K<sup>[5]</sup>。

激光介质的温度选取对激光器的效率有很大影响,而温度并不是独立的影响因素,而是和抽运功率,激光介质尺寸等参数共同作用,互相制约,所以在不同的情况下选取不同的温度是提高激光器效率的一个关键问题。并且,低温的获得和保持也是需要成本的,因此需要综合考虑。本文对 Yb:YAG 放大器在低温条件下的放大特性进行研究,计算了在不同温度、不同抽运功率密度、不同介质参数下的激光效率,并分析了激光介质的热分布以及热应力分布。

## 2 理论研究

### 2.1 低温下 Yb:YAG 的材料属性

Yb:YAG 的热导率随温度的变化可由

$$\begin{cases} 30\text{K} < T < 160\text{K}; K_1(T, C_{\text{Yb}}) = \frac{W_1^2}{T^2} \\ 160\text{K} < T < 500\text{K}; K_2(T, C_{\text{Yb}}) = \frac{W_2}{T} \end{cases}, \quad (1)$$

拟合,式中的拟合系数如表 1 所示。

表 1 热导率拟合系数

Table 1 Fitting coefficient of thermal conductivity

Atoms fraction /%	$K(300\text{K}, C_{\text{Yb}}) / [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	$W_2 / (\text{W}/\text{m})$	$K(150\text{K}, C_{\text{Yb}}) / [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	$W_1 / \sqrt{(\text{WK}/\text{m})}$
0	11	3360	20.63	683
10	6.5	1960	12.2	521

Yb:YAG 材料的受激吸收截面以及受激发射截面会随温度改变,其拟合公式如下:受激发射截面  $\sigma_1 = 15.67386 - 0.07609T + 1.06911 \times 10^{-4} T^2$ , 受激吸收截面  $\sigma_p = 1.0105 - 0.0009T$ 。

### 2.2 温度对 Yb:YAG 激光放大性能的影响

Yb 的能级图非常简单,只有间距约为  $10^4 \text{ cm}^{-1}$  的  $^2F_{7/2}$  基态和  $^2F_{5/2}$  受激多重态,抽运和激光跃迁发生在 Stark 分裂的子能级之间;由于激光下能级固有的热布居(百分之几)以及受热后激光下能级布居数进一步增加,因此具有准三能级特点。

首先定义参与抽运和激光跃迁的 Stark 子能级的波尔兹曼热分布因子:  $f_{Li}, f_{Lm}, f_{Un}, f_{Uj}$ , 式中下标 U 和 L 分别表示 Yb 离子的上下两个能级,下标  $i, j$  表示抽运跃迁子能级,  $m, n$  表示激光跃迁子能级,根据 Yb 的能级结构,可以计算 Yb 离子的上述分布系数。

因此,抽运和激光过程对应的粒子数差为

$$\Delta N_p = f_{Li} N_L - f_{Uj} N_U = N_{\text{Yb}} (f_{Li} + f_{Uj}) (f_p - X_U), \quad (2)$$

$$\Delta N_l = f_{Un} N_U - f_{Lm} N_L = N_{\text{Yb}} (f_{Lm} + f_{Un}) (X_U - f_l), \quad (3)$$

式中下标 p 和 l 分别表示抽运和激光过程,  $N_{\text{Yb}}$  表示 Yb 粒子数密度 ( $\text{cm}^{-3}$ ),  $N_U$  与  $N_L$  分别表示处于上能级和下能级的 Yb 粒子数密度,并定义了

$$f_p = f_{Li} / (f_{Li} + f_{Uj}), \quad f_l = f_{Lm} / (f_{Lm} + f_{Un}), \\ X_U = N_U / N_{\text{Yb}}. \quad (4)$$

因此表征激光上能级粒子数密度的速率方程为

$$\frac{dN_U}{dt} = \sigma_p c \phi_p \Delta N_p - \frac{N_U}{\tau_U} - \sigma_l c \phi_l \Delta N_l, \quad (5)$$

式中右边的三项分别表示抽运吸收、自发辐射、受激辐射。利用  $X_U = N_U / N_{\text{Yb}}$ , (5) 式变为

$$\frac{dX_U}{dt} = \sigma_p c \phi_p (f_{Li} + f_{Uj}) (f_p - X_U) - \frac{X_U}{\tau_U} - \sigma_l c \phi_l (f_{Lm} + f_{Un}) (X_U - f_l), \quad (6)$$

式中  $\phi_p, \phi_l$  分别是抽运和激光的光子数密度。考虑到激光饱和强度和抽运饱和强度 ( $\text{W}/\text{cm}^2$ ) 分别为

$$I_{ls} = \frac{h\nu_l}{(f_{Lm} + f_{Um})\sigma_l\tau_U}, I_{ps} = \frac{h\nu_p}{(f_{Li} + f_{Uj})\sigma_p\tau_U}. \quad (7)$$

进一步定义:  $I_l = I^l/I_{ls}, I_p = I^p/I_{ps}$ , ( $I^p, I^l$  分别是物理上的激光强度和抽运光强), 而  $I^p (\text{W}/\text{cm}^2) = c\phi_p h\nu_p, I^l (\text{W}/\text{cm}^2) = c\phi_l h\nu_l$ , 则(5)式变为

$$\tau_U \frac{dX_U(t)}{dt} = I_p(t)[f_p - X_U(t)] - X_U(t) - I_l(t)[X_U(t) - f_l]. \quad (8)$$

另一方面, 抽运吸收和激光放大过程可表示为

$$\frac{dI_p(t)}{I_p(t)} = -\alpha_0(t)dz, \quad (9)$$

$$\frac{dI_l(t)}{I_l(t)} = g_0(t)dz, \quad (10)$$

式中, 随空间和时间变化的吸收系数和增益系数分别为

$$\alpha_0(t) = \sigma_p N_{Yb}(f_{Li} + f_{Uj})[f_p - X_U(t)], \quad (11)$$

$$g_0(t) = \sigma_l N_{Yb}(f_{Lm} + f_{Um})[X_U(t) - f_l]. \quad (12)$$

如果待放大激光是在粒子反转数最大时注入(脉冲储能器件的常规运行方式), 此前只有抽运过程, 并且忽略放大过程期间纳秒脉冲的抽运贡献, 则抽运过程中反转粒子数和抽运光可表示为

$$\tau_U \frac{dX_U(t)}{dt} = I_p(t)[f_p - X_U(t)] - X_U(t), \quad (13)$$

$$\frac{dI_p(t)}{I_p(t)} = -\alpha_0(t)dz. \quad (14)$$

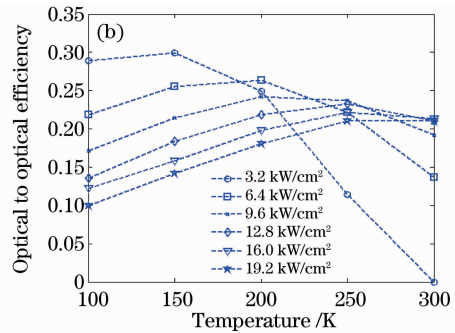
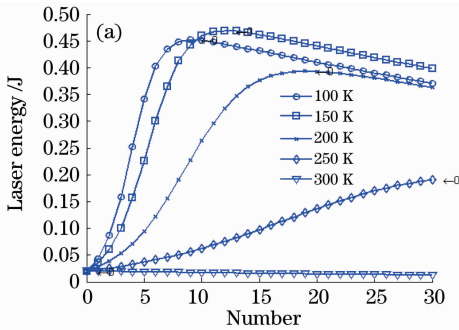


图 1 不同抽运功率密度下激光的输出情况随温度的变化。(a)不同温度下的输出能量;(b)不同抽运功率密度不同温度下的光光效率

Fig. 1 Output in different condition. (a) Output energy with different temperature; (b) optical to optical efficiency with different pump power density and different temperature

从图 1 可以看出, 当介质的温度较低时, 由于受激发射截面的增大, 激光提取过程较快, 提取最大能量所需放大程数随温度升高而增大, 对于不同的抽运功率, 最大光光效率对应的温度随着抽运功率密

由上述公式可知, 在片中的储能  $E_{st} = X_U N_{Yb} h\nu_p$ 。在(13)式左右同时乘以  $N_{Yb} h\nu_p$ , 除以  $\tau_U$ , 得到关于片中的储能  $E_{st}$  的抽运速率方程:

$$\frac{dE_{st}(t)}{dt} = I_p(t) f_p N_{Yb} h\nu_p / \tau_U - [I_p(t) / \tau_U + 1 / \tau_U] E_{st}(t). \quad (15)$$

根据  $\text{Yb}^{3+}$  离子抽运动力学, 温度对放大过程的影响主要包括以下几个方面: 1) 储能过程的粒子数反转, 由于激光发射发生在 Stark 子能级之间, 激光下能级距离基态非常近, 因此温度对激光下能级的布居数影响较大, 进而影响储能效率; 2) 由于受激发射截面是温度的函数, 因此增益系数会随温度发生变化, 影响 ASE 的强度, 进而影响储能; 3) 放大过程的再吸收, 由于激光下能级布居会引起激光的再吸收, 因此会影响提取效率。总的来说, 低温对于 Yb:YAG 激光器的高效运转既有有利的一面, 也有不利的一面, 因此需要在两者之间找到一个最佳的匹配点, 使激光器的效率达到最高。

### 2.3 放大过程计算结果与讨论

对不同温度、不同抽运强度、不同介质掺杂浓度以及口径下的激光放大性能进行了计算。激光波长 1030 nm, 抽运光波长 940 nm。图 1 给出了抽运面积  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ , 晶体厚度 5 mm 时, 不同抽运功率密度下激光的输出情况随温度的变化。其中, 图 1(a) 为抽运功率密度  $3.2 \text{ kW}/\text{cm}^2$  时, 输出激光能量随温度和放大次数的变化, 图 1(b) 为不同抽运强度下光光效率随温度的变化。

度的升高而增大, 在该抽运尺寸以及介质构型下, 最大光光效率随温度升高而降低。当增大介质抽运面积或者增加掺杂浓度减小介质厚度时, 由于 ASE 的影响, 光光效率均会有一定程度的减小, 图 2 给出了

这两种情况下的光光效率随温度的变化情况。

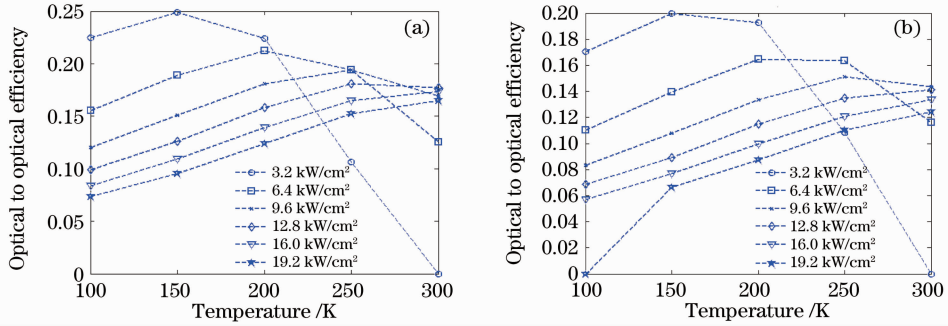


图 2 不同晶体尺寸后的光光效率。(a)抽运面积 10 mm×10 mm,晶体厚度 5 mm;(b)抽运面积 5 mm×5 mm,晶体厚度 1.5 mm

Fig. 2 Optical to optical efficiency with different crystal size. (a) Pump area 10 mm×10 mm, crystal thickness 5 mm; (b) pump area 5 mm×5 mm, crystal thickness 1.5 mm

由图 2 可见,当增大抽运面积和增大介质浓度缩小介质厚度时,ASE 的影响导致光光效率下降,最大光光效率对应的温度亦有所改变。随着 ASE 效应的增强,最大光光效率出现的温度往高温方向移动。

对于设计激光放大器来说,既要考虑光光效率,又要考虑抽运耦合,环境可维护性,激光通量密度,介质口径等因素,因此需要综合权衡。

### 2.4 低温热管理数值模拟

虽然低温下 Yb:YAG 的热特性大幅度提高,但

是高抽运功率带来的散热问题仍然不能忽略,在激光器设计上,需要评估热管理效果,防止热效应对介质的破坏。模拟了抽运功率密度 20 kW/cm<sup>2</sup>,端面换热系数 5000 W/(m<sup>2</sup>·K),参考温度 93 K 时的介质的温度、形变与应力。介质尺寸为 Φ20 mm,厚度分别为 1.5 mm 和 5 mm,激光离子的原子百分比分别为 10% 和 3%。介质温度如图 3 所示,热致形变如图 4 所示,热应力如图 5 所示。

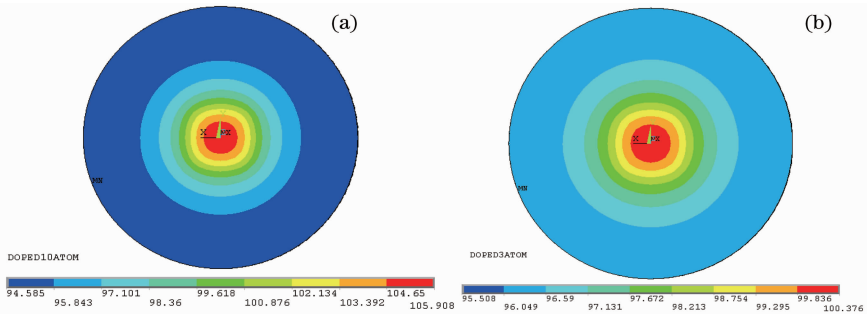


图 3 不同厚度晶体低温冷却温度分布。(a)厚度 1.5 mm;(b)厚度 5 mm

Fig. 3 Temperature distribution in different crystal thickness with a low cooling temperature. (a) Thickness 1.5 mm; (b) thickness 5 mm

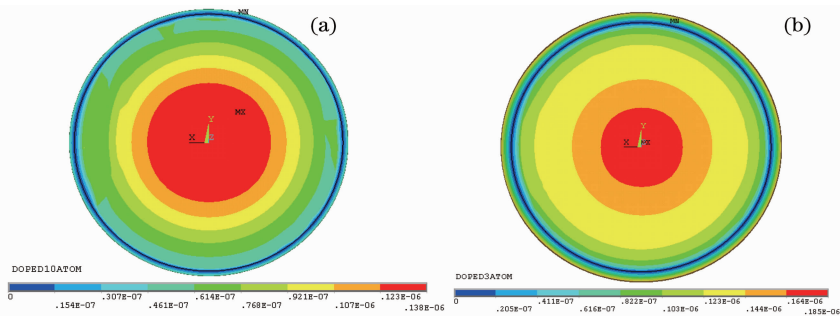


图 4 不同厚度晶体低温冷却热形变。(a)厚度 1.5 mm;(b)厚度 5 mm

Fig. 4 Thermal distortion in different crystal thickness with a low cooling temperature. (a) Thickness 1.5 mm; (b) thickness 5 mm

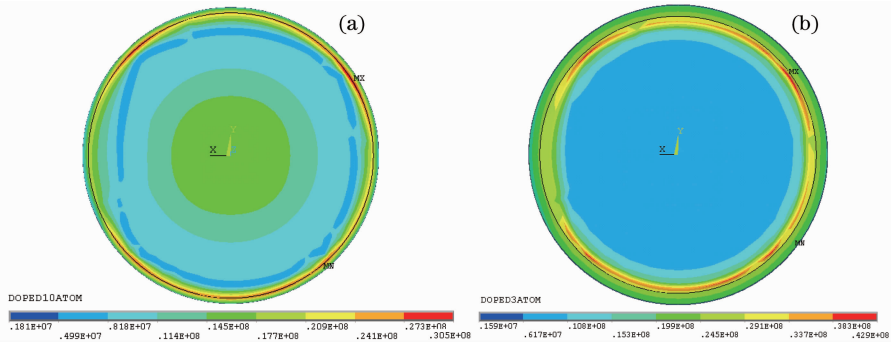


图 5 不同厚度晶体低温冷却热应力。(a)厚度 1.5 mm;(b)厚度 5 mm

Fig. 5 Thermal stress in different crystal thickness with a low cooling temperature. (a) Thickness 1.5 mm; (b) thickness 5 mm

由计算结果可见,较厚晶体的前后表面温差较小,这是因为在低温下晶体热导率较高,较厚晶体的抽运功率密度较低。从热应力的分布来看,较厚晶体的热应力在抽运区域较低,因此 5 mm 厚度晶体的热管理效果总体优于 1.5 mm 厚度晶体。

### 3 结 论

本文对低温下 Yb:YAG 激光放大器的放大性能进行了理论研究,计算了不同介质尺寸、不同晶体浓度、不同温度下的放大效果,对低温热管理效果进行了数值模拟。结果表明抽运功率密度、激光晶体尺寸、工作温度等参数对激光器效率均有显著影响,在 100~300 K 的温度范围内随着抽运功率的增大,最佳工作温度逐渐上升,不同尺寸的晶体在相同抽运功率密度下,最佳工作温度也不同。在低温强抽运条件

下,较厚晶体的热管理效果优于较薄晶体。在具体的设计中,需要综合考虑以上因素,对激光器的设计参数进行优化,并考虑条件的可获得性和运行成本。

### 参 考 文 献

- 1 Dong J., Bass M., Mao Y. *et al.*. Dependence of the Yb<sup>3+</sup> emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet[J]. *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.*, 2003, **20**(9): 1975~1979
- 2 Bourdet G. L., Yu H.. Longitudinal temperature distribution in an end-pumped solid-state amplifier medium; application to a high average power diode pumped Yb:YAG thin disk amplifier[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(23): 6033~6041
- 3 D. Albach. Lucia status[C]. Dresden: 5th High Energy Class Diode Pumped Solid State Laser Workshop, 2009
- 4 J. Kawanaka. Recent Status of “玄武(GENBU)”-laser[C]. Dresden: 5th High Energy Class Diode Pumped Solid State Laser Workshop, 2009
- 5 John Collier. Hiper[C]. Dresden: 5th High Energy Class Diode Pumped Solid State Laser Workshop, 2009