

文章编号: 0253-2239(2010)08-2278-06

高效率大功率脉冲 Yb:YAG 片状激光器 优化设计与模拟

王建磊 施翔春 朱小磊

(中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

摘要 从放大器能量储存和提取效率出发,通过理论分析激光介质增益性能和热效应等,系统地讨论和分析了激光二极管(LD)端面抽运高功率高效率脉冲 Yb:YAG 片状激光放大器激光介质设计及优化过程。根据分析结果,设计脉冲激光放大器,在保证高功率高效率工作的同时,能够充分抑制寄生振荡和热效应问题。

关键词 激光器;片状激光器;设计优化;热效应

中图分类号 TN242 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2278

Optimization Design and Modeling of High Peak Power Yb:YAG Pulsed Lasers with High Efficiency

Wang Jianlei Shi Xiangchun Zhu Xiaolei

(Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800 China)

Abstract A reliable design and optimization of laser diode end-pumped Yb:YAG disk pulsed laser with high peak power and high efficiency is investigated. Based on discussion of the energy storage and extraction in the gain medium firstly, and theoretical analysis and modeling the gain performance and thermal effects of gain medium, the process of the amplifier gain medium design and optimization is discussed and analyzed systematically. According to the analysis, a resultant laser amplifier with high peak pulse power and high efficiency is obtained, which is able to suppress sufficiently the parasitic oscillation and thermal effects.

Key words lasers; disk laser; design optimization; thermal effect

1 引言

激光二极管(LD)抽运固态激光器(DPSSL)具有结构紧凑、效率高、可靠性好及使用寿命长等优点,目前已成为激光技术研究的热点之一。随着近年来 InGaAs 系列 LD 的突破性进展,基于 Yb 离子的 DPSSL 受到越来越多的重视^[1]。

Yb:YAG 材料具有量子效率高(0.91)、热负荷小(小于 0.11)、吸收带宽(接近 9 nm)、储能寿命长(接近 1.2 ms)及在高掺杂浓度条件下不出现猝灭等优点^[2,3],因此非常适用于 LD 抽运的高功率特别是储能型高功率脉冲激光器。尤其是 Yb:YAG 在

低温条件下所展现的优异特性^[4~6],使其成为大能量脉冲激光器特别是惯性聚变能源(IFE)激光驱动器的理想激光增益介质^[5]。目前,世界各大实验室^[7~9]都在开展重复频率 10 Hz 左右高功率脉冲 Yb:YAG 激光系统的研究工作,旨在发展用于 IFE 的激光驱动器,或脉冲波系统的抽运源。

效率和热管理一直是科研人员在研究设计激光器时要考虑的两大关键点,两者在很大程度上决定了激光器的技术指标和运行安全可靠;对于端面抽运片状脉冲激光放大器,高效率要求激光增益介质要有足够高的增益,而脉冲储能工作方式又要求

收稿日期: 2009-09-16; 收到修改稿日期: 2009-10-26

作者简介: 王建磊(1983—),男,博士研究生,主要从事全固态激光器等方面的研究。E-mail: wangjl@siom.ac.cn

导师简介: 朱小磊(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事固体激光器技术及激光器应用系统等方面的研究。

E-mail: xlzhu@siom.ac.cn(通信联系人)

小信号增益不能太高以减少有害的放大自发辐射 (ASE), 为此需要片状激光介质有足够厚度, 但重复频率工作条件下激光介质的热效应问题又对其厚度提出了限制。因此, 为设计出高效率 and 低热管理要求的激光器, 激光介质优化设计工作显得很必要和很重要。

基于传导冷却 LD 端面抽运 Yb:YAG 片状脉冲激光放大器结构, 以有效提高放大器能量储存和提取效率为出发点, 理论分析并数值计算了放大器增益性能及其影响因素, 结合放大器热效应模拟分析结果, 优化设计了激光介质外形尺寸及掺杂浓度, 展示了高功率高效率脉冲片状激光放大器的设计及优化过程。

2 理论分析

2.1 放大器结构

图 1 为整个脉冲激光放大器结构图。放大器采用端面抽运微通道传导冷却结构, 激光介质采用 Yb:YAG 晶体, 抽运源为 940 nm InGaAs LD 列阵, 由于 LD 列阵发光面通常为矩形结构, 故采用两柱透镜分别对 x, y 方向整形很容易把 LD 列阵压缩成超高斯光斑, 晶体冷却面镀 940 nm 高反膜以提高抽运效率, 晶体内部抽运吸收能量密度分布可表示为

$$\rho_{\text{absorb}}(x, y, z) = \frac{2\alpha\eta_c P_p}{\pi ab} \exp\left[-2\left(\frac{x^6}{\omega_x^6} + \frac{y^6}{\omega_y^6}\right)\right] \times \{\exp(-\alpha z) + \exp[-\alpha(2t - z)]\}, \quad (1)$$

式中 $\alpha = n_d \sigma_a$ 为晶体吸收系数, n_d 为掺杂浓度, σ_a 为有效抽运吸收截面, η_c 为抽运光耦合效率, P_p 为总抽运能量, a, b 和 t 分别为晶体长、宽和厚度, ω_x, ω_y 分别为抽运光在晶体宽度、长度方向上光斑半径。

为保证晶体内部能量被充分提取, 信号光入射角 θ 应尽可能小 ($\leq 20^\circ$), 并尽量充满晶体, 为方便计

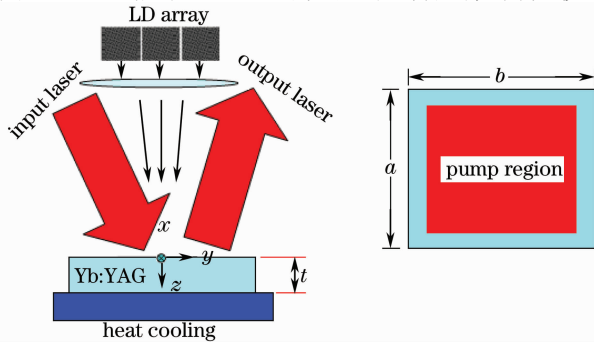


图 1 激光放大器结构示意图

Fig. 1 Configuration of laser amplifier

算, 近似认为入射信号光经增益介质实现双程放大。

2.2 能量储存与提取

作为激光放大器的关键因素之一, 效率包括两方面内容: 放大器的储能能力及储能被提取能力。放大器所储存能量可表示为^[10]

$$E_{\text{st}} = \Delta n h\nu V, \quad (2)$$

式中 Δn 为激光介质中平均粒子反转数密度, $h\nu$ 为激光光子能量, V 为激光介质体积。(2)式可以表示成另一种形式

$$E_{\text{st}} = g_0 F_{\text{sat}} V, \quad (3)$$

式中 $g_0 = \Delta n \sigma$ 为激光介质小信号增益系数, $F_{\text{sat}} = h\nu/\sigma$ 为饱和能量通量, σ 为有效受激发射截面。

放大器输出能量可通过速率方程进行理论估算。对于脉宽为 τ 的信号激光脉冲, 若 τ ($\tau \approx 10$ ns) 远小于抽运速率 W_p 及激光介质的自发辐射时间 τ_t , 则可忽略荧光和抽运在激光脉冲持续时间内的影响。为方便讨论, 考虑脉宽为 τ 的矩形激光脉冲, 其经放大器单程放大后输出能量通量 F_1 可表示为^[10,11]

$$F_1 = \eta_{\text{overlap}} F_{\text{sat}} \ln\{1 + [\exp(F_{\text{in}}/F_{\text{sat}}) - 1] \exp(g_0 l)\}, \quad (4)$$

式中 η_{overlap} 为模式匹配因子, $l = t/\cos\theta$ 为信号光光程, $F_{\text{in}} = c\tau n_0 h\nu$ 为输入信号光能量通量, n_0 为信号脉冲被放大前的光子通量。一般而言, n_0 一定时, τ 较宽时对应的 F_{in} 较大, 从而会产生大的能量通量输出, 但 τ 较宽时, 由于脉冲各部位获得增益不同 (前沿增益大, 后沿增益小), 会导致脉冲形状变尖, 宽度变窄^[11,12]。

定义储能提取效率为

$$\eta_l = \frac{F_1 - F_{\text{in}}}{F_{\text{sat}} g_0 l}. \quad (5)$$

图 2(a) 给出了 $\eta_{\text{overlap}} = 1, g_0 l = 1.25$ 时, η_l 与 $F_{\text{in}}/F_{\text{sat}}$ 的关系曲线, 可知若想使 $\eta_l \geq 60\%$, 需保证 $F_{\text{in}} \geq 0.58 F_{\text{sat}}$, 显然, 这对入射信号光提出了很高的要求。

采用双程放大, 其输出能量通量 F_{out} 可表为

$$F_{\text{out}} = \eta_{\text{overlap}} F_{\text{sat}} \times \ln\{1 + [\exp(F_{\text{in}}/F_{\text{sat}}) - 1] \exp(g'_0 l)\}, \quad (6)$$

式中 $g'_0 = (1 - \eta_l) g_0$ 。可得双程放大提取效率

$$\eta = \frac{F_{\text{out}} - F_{\text{in}}}{g_0 l F_{\text{sat}}}. \quad (7)$$

双程放大结构情况下, 当 $\eta_{\text{overlap}} = 0.93, g_0 l = 1.2$ 时, 只需 $F_{\text{in}} \geq 0.22 F_{\text{sat}}$, 就可以达到 $\eta \geq 0.6$ [如图 2(b) 所示]。

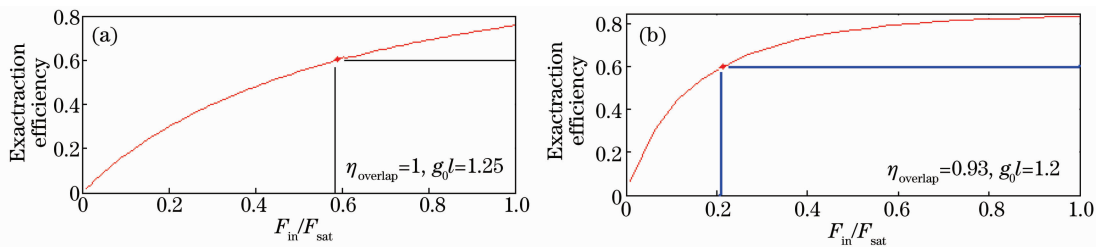


图 2 放大器提取效率 η_1 与 F_{in}/F_{sat} 的关系曲线。(a)单程放大器;(b)双程放大器

Fig. 2 Exactraction efficiency η_1 as a function of F_{in}/F_{sat} for amplifier. (a)single-pass amplifier; (b)two-pass amplifier

常温下 Yb:YAG 属于准三能级结构,此时其 σ 值较低(表 1),亦即对应很高的饱和能量通量($F_{sat} = h\nu/\sigma$),若想得到比较高的提取效率, F_{in} 要足够大,同时小信号增益 $g_0 l$ 要足够高。由于片状放大器光程长度 l 一般比较短,所以为达到高的提取效率,需增大小信号增益因子 g_0 ,根据 $g_0 = \Delta n \sigma$,对应高掺杂的激光介质和大的抽运能量以提高粒子反转数密度,这将导致 ASE

的发生并对抽运源提出了很高的要求。但在低温($T \approx 150$ K)条件下,Yb:YAG 呈现出四能级结构特征,此时其 σ 值显著增大($\sigma \approx 4.5 \times 10^{-20}$ cm²),对应 F_{sat} 降低了将近一倍,大大降低了对信号光及 LD 抽运源的要求,在工程上有重要意义,同时 Yb:YAG 的热-光学属性也有明显改善^[6],很好地降低了热管理要求,更容易实现高峰值功率重复频率脉冲激光输出。

表 1 不同温度条件下 Yb:YAG 物理性质比较

Table 1 Comparison of physical property for Yb:YAG at different temperature

Parameters	Yb:YAG(150 K)	Yb:YAG(298 K)
Fluorescence life time τ /ms	1.3	1.3
Stimulated emission cross section σ /(10^{-20} cm ²)	~ 4.5	2.1
Thermal conductivity κ /[W/(m · k)]	20	10
Specific heat c /[J/(kg · k)]	300	590
Thermal expansion coefficient α_e /(10^{-6} K ⁻¹)	3.2	7.5
(dn/dt) /(10^{-6} K ⁻¹)	3.1	7.3

2.3 影响放大器性能的因素

影响片状放大器输出脉冲能量的关键因素有两个: ASE 和热效应。ASE 在激光介质内形成环路导致寄生振荡,限制了 g_0 ,从而限制了放大器的储能能力,因此在设计放大器时,应采用合理的方法尽可能抑制寄生振荡^[10,13,14]。ASE 与激光介质的几何形状、荧光寿命及抽运方式等有关,通常,影响放大器性能的寄生振荡主要有两种,一种为横向寄生振荡^[10],其阈值条件为 $R \exp(g_0 D n) = 1$,其中 D 为

激光介质的最大纵向尺寸, R 为介质侧面总的有效反射率, n 为折射率。

图 3(a)给出了阈值条件下 g_0 与 D 在不同 R 值时的关系曲线,可以看出,若想很好地抑制该横向寄生振荡,在合理选取增益介质掺杂浓度和横向尺寸的同时,应对其侧面进行处理,使 R 尽可能小。目前经过侧边处理后激光介质的 R 值可以很小,如美国国家点火装置(NIF)主放大器激光介质经过侧边技术处理后对应的 $g_0 D$ 值可以达到 4.7。

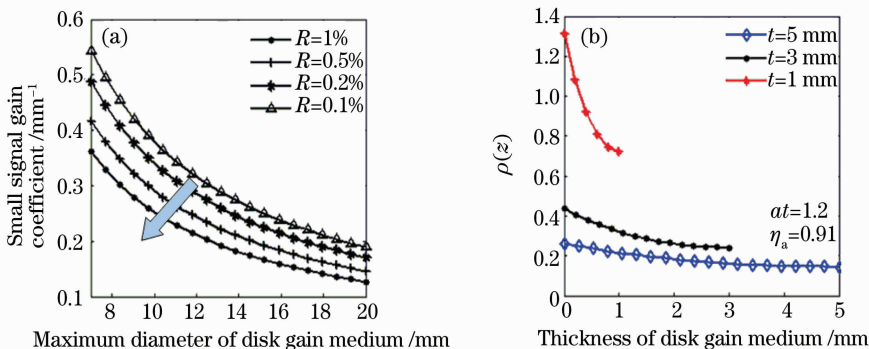


图 3 (a)阈值条件下小信号增益因子与薄片最大尺寸关系曲线;(b) $\rho(z)$ 沿 z 方向的变化

Fig. 3 (a)Small signal gain coefficient as a function of maximum diameter of disk gain medium; (b) $\rho(z)$ as a function of z

另一种重要的寄生振荡是光抽运不均匀引起的表面寄生振荡^[10,13],抑制该寄生振荡的方法是提高抽运均匀性。对于图 1 所示的端面抽运片状放大器,其内部抽运吸收能量沿厚度方向的分布可表示为

$$\rho(z) = \frac{\pi ab \rho_{\text{absorb}}(x, y, z)}{2P_0 \exp[-2(\frac{x^6}{w_x^6} + \frac{y^6}{w_y^6})]} = \alpha \{ \exp(-\alpha z) + \exp[-\alpha(2t - z)] \}. \quad (8)$$

抽运吸收效率 η_a 为

$$\eta_a = \frac{\int_V \rho_{\text{absorb}}(x, y, z) dV}{P_0} = 1 - \exp(-2at). \quad (9)$$

可知 η_a 与抽运吸收系数 a 和激光介质厚度 t 之积密切相关, $\rho(z)$ 分别与 a 和 t 有关,在相同 η_a 情况下(对应 at 为定值),通过改变 a 和 t 的大小,可以得到不同厚度激光介质的 $\rho(z)$ 沿厚度方向分布如图 3(b) 示,给定效率(图中取 $\eta_a = 0.91$, 对应 $at = 1.2$) 条件下随着 t 的增加(对应掺杂浓度降低), $\rho(z)$ 沿 z 方向的均匀性变得越来越好,这将很好的抑制表面寄生振荡,然而厚的激光介质将导致更严重的热效应。

热效应主要是由于淀积在激光介质内的无用热引起的,导致激光介质内温度分布不均,产生热致应力及热机械形变等一系列问题,进而使激光输出能量降低、光束质量下降、甚至可能导致激光介质受损。减小片状放大器热效应的最有效方法之一就是尽可能减小其厚度。

由以上分析可知,放大器的效率、增益性能与激光介质的材料选取、尺寸及其内部的 ASE 和热效应等因素有很大关系,并且相互影响和制约,因此,设计激光器时应权衡这些因素,通过优化最终确定激光介质合理工作环境、最优尺寸和掺杂浓度。

3 放大器设计及模拟

根据以上讨论分析,立足于国际上新一代 IFE 脉冲激光驱动器发展方向^[5],探讨高效率重复频率 10 Hz 脉冲 Yb:YAG 片状放大器。考虑 Yb:YAG 在低温条件下的优异特性(表 1),选取 150 K 低温乙醇作为微通道冷却液对放大器进行冷却,此时 Yb:YAG 对应 $F_{\text{sat}} = 4.04 \text{ J/cm}^2$, 为得到高的储能提取效率,确定 $g_0 l = 1.2$, 入射信号光通量 $F_{\text{in}} \geq 0.88 \text{ J/cm}^2$ 。对于功率 0.5 J 脉宽 10 ns 的信号脉冲,光束横截面积应小于 0.625 cm^2 ,为达到最好光束匹配,设计抽运光抽运截面 0.64 cm^2 ,在晶体表面抽运光斑尺寸为 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,考虑边界衍射效

应和信号光非垂直入射的影响,选取晶体横向尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,如图 1 所示。

由(4)式,考虑有效抽运区域,信号光脉冲经单程放大后能量 E_1 为

$$E_1 = \eta_l F_{\text{sat}} A_{\text{active}} \times \ln\{1 + [\exp(E_{\text{in}}/F_{\text{sat}} A_{\text{active}}) - 1] \exp(g_0 t)\}, \quad (10)$$

式中 η_l 为激光单程传输效率, A_{active} 为激光束有效横截面积(近似等于抽运截面), E_{in} 为入射信号光脉冲能量。经双程放大,可得放大器最终输出能量 E_{out} :

$$E_{\text{out}} = \eta_l F_{\text{sat}} A_{\text{active}} \times \ln\{1 + [\exp(E_1/F_{\text{sat}} A_{\text{active}}) - 1] \exp(g'_0 t)\}, \quad (11)$$

由(1)式

$$g_0 t = \frac{E_{\text{st}}}{F_{\text{sat}} A_{\text{active}}} = \frac{\eta_c \eta_a \eta_q \eta_s P_P}{F_{\text{sat}} A_{\text{active}}}, \quad (12)$$

式中 A_{active} 为激光介质抽运区的横截面积。 η_a 为抽运吸收效率, η_q 为激光介质的量子效率, η_s 为上能级荧光损耗效率(与抽运光脉宽和激光介质荧光寿命有关)^[10]。放大器的最终储能提取效率为

$$\eta = \frac{E_{\text{out}} - E_{\text{in}}}{g_0 l F_{\text{sat}} A} = \frac{E_{\text{out}} - E_{\text{in}}}{\eta_c \eta_a \eta_q \eta_s P_P}. \quad (13)$$

由(11)、(13)式,给定功率 0.5 J。脉宽 10 ns 入射信号脉冲,可得到输出能量与抽运能量关系曲线如图 4 所示,可以看出,输出能量随着抽运能量的增加近似线性增加,当抽运能量为 8 J 时,放大器输出能量可以达到 3.1 J,整个放大器光-光转换效率达到 38.7%,考虑到 $\eta_c = 0.85$, $\eta_a = 0.91$, $\eta_q = 0.91$, $\eta_s = 0.7$,可以得到放大器储能为 4.23 J,被提取能量为 2.6 J,储能提取效率 $\eta = 61.4\%$,同时随着抽运光能量的增加输出能量会进一步增加。

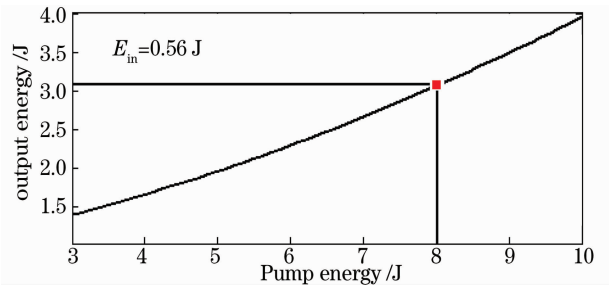


图 4 片状放大器输出能量与抽运能量关系曲线

Fig. 4 Predicated output energy as a function of pump energy for disk power amplifier

为减小热效应,激光介质的厚度应越薄越好,而薄的介质厚度意味着增益光程短,这需要高掺杂介质以达到高的抽运吸收效率,但过高掺杂很容易导致 ASE,进而限制小信号增益系数 g_0 ,因此激光介质厚度应有个最优值。

为优化激光介质厚度及其掺杂浓度,采用有限元分析(FEA)方法讨论不同厚度激光介质在相同抽运吸收效率条件下($\eta_a=0.91$,对应 $at=1.2$)的热

效应。整个分析过程借助 FEA 软件 ANSYS 采用多载荷步瞬态分析,为方便计算,假定增益介质的物性不随温度改变,计算中所用具体参数如表 2 所示。

表 2 计算用到的参量表

Table 2 List of parameters for computing

Parameters	Disk 1	Disk 2	Disk 3	Disk 4	Disk 5
Disk thickness t /mm	1	2	3	4	5
Absorption coefficient a / mm^{-1}	1.2	0.6	0.4	0.3	0.24
Young modulus E / 10^{11} Pa			3×10^{11}		
Poisson ratio ν			0.3		
Heat load ratio			0.11		
Cooling temperature /K			150		
Pump peak power /kw			7.1		
Pump pulse width /ms			1		
Pump repetition rate /Hz			10		

图 5 给出 3 mm 厚激光介质在抽运峰值功率为 7 kw、冷却面换热系数 10 kw/(m^2K)时介质原点($x=0, y=0, z=0$)处瞬态温度分布情况,在开始阶段,激光介质吸收抽运脉冲能量温度迅速上升,而在抽运间隙,冷却作用使温度降低,经过一段时间后(4~5 s 后),介质的温度达到动态平衡,呈周期性分布,即抽运脉冲到来时升高,抽运脉冲经过后降低。

示,可以看出随着激光介质厚度的增加,热效应将越来越明显。

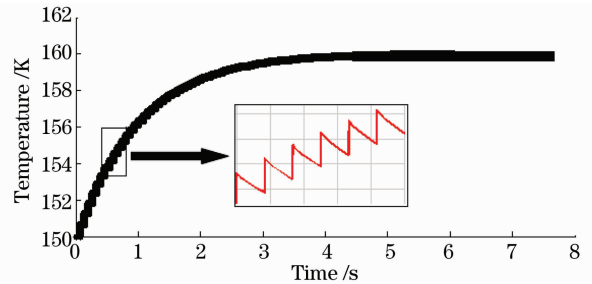


图 5 中心原点处节点温度随时间的变化
Fig. 5 Temperature as a function of time for coordinate-system origin

图 6 给出了 $t=10$ s 时刻,3 mm 厚度激光介质的温度、形变及应力分布云图,不同厚度激光介质有类似的云图分布。得到激光介质最高温度、最大形变量及最大热致应力与厚度的关系曲线如图 7 所

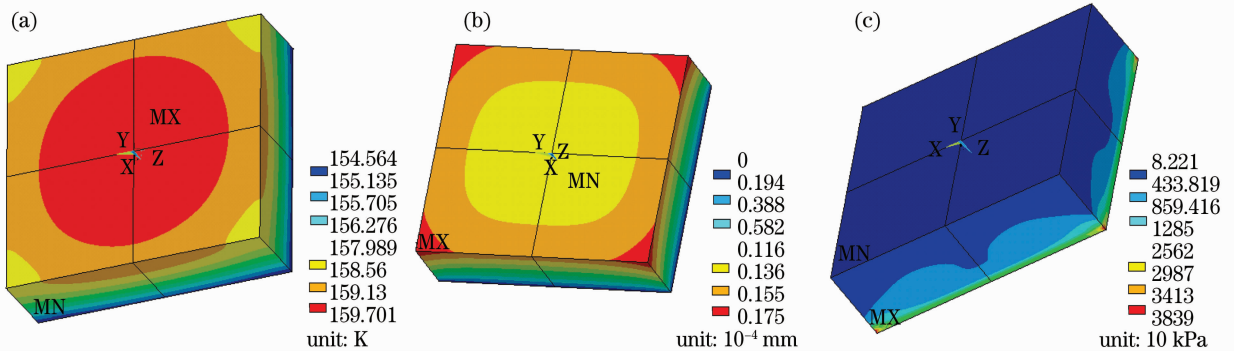


图 6 3 mm 厚度激光介质温度(a)、形变(b)和应力(c)分布云图

Fig. 6 Temperature (a), deformation (b) and stress (c) distributions of gain medium with 3 mm thickness

为很好抑制放大器 ASE 及寄生振荡,应保证 $g_0 D$ 不能太大,在此采用 NIF 放大器的 $g_0 D=4.7$ 作为判据,对于图 1 对应激光介质,由于抽运区域 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,则其所对应的 D 值应为 11.3 mm(对应增益区域的最长对角线长度),则需满足 $g_0 \leq 0.42 \text{ mm}^{-1}$,由小信号增益 $g_0 l \approx g_0 t=1.2$,同时兼顾抽

运均匀性以消除由于抽运不均匀导致的寄生振荡。

结合不同厚度激光介质热效应模拟及抑制 ASE 和寄生振荡分析结果,得到放大器采用 3 mm 厚度激光介质会得到比较理想的激光输出,其激光介质具体尺寸、掺杂浓度参数及激光输出特性如表 3 所列。

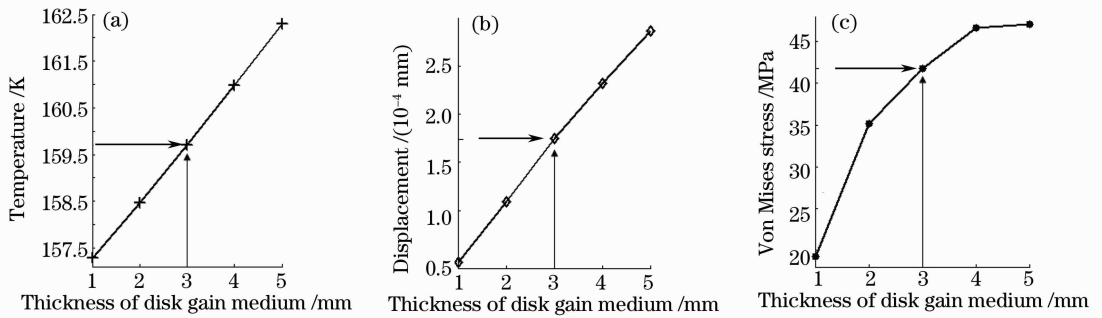


图 7 温度(a)、形变(b)和应力(c)与增益介质厚度关系曲线

Fig. 7 Temperature (a), deformation (b) and stress (c) as a function of disk thickness

表 3 片状脉冲放大器设计及激光输出特性

Table 3 Design of disk laser amplifier and characteristics of laser output

Parametr	Value
Dimension /mm ³	10×10×3
Yb ³⁺ atomic doping concentration /%	1.5
Pump energy /J	8
Pump pulse width /ms	1
Input signal energy /J	0.5
Laser pulse width /ns	10
Logarithmic gain, g ₀ l	1.2
Predicated output pulse energy /J	3.1
Repetition rate /Hz	10
Exactraction efficiency /%	61.4

5 结 论

新一代 IFE 激光驱动器的发展趋势是高效率、大能量、高可靠性和宽光谱带等,结合国外 IFE 激光驱动器发展状况,探讨了 LD 端面抽运高峰值功率高效率脉冲 Yb:YAG 片状激光放大器激光介质尺寸和掺杂浓度选取及优化过程。根据分析结果,通过模拟计算和分析,设计了一高效率脉冲重复频率 10 Hz Yb:YAG 片状激光放大器,放大器采用 150 K 低温传导冷却,激光介质尺寸 10 mm×10 mm×3 mm,掺杂浓度 1.5%,理论上得到在抽运能量 8 J 时,对于功率 0.5 J、脉宽 10 ns 入射信号脉冲经激光介质放大后输出能量达到 3.1 J,整个放大器的效率接近 34%,光-光转换效率 38.7%,储能提取效率达到 61.4%,放大器能够很好地抑制 ASE 及寄生振荡,处于安全工作状态,热效应并不明显,同时放大器随着抽运能量的增加,可以输出更高的激光能量。

参 考 文 献

1 Zhou Shouheng, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1605~1618
周寿桓, 赵 鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1605~1618

2 Qiu Hongwei, Yang Peizhi, Zhong Heyu *et al.*. Influence of annealing and doping on Yb:YAG [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(5): 439~443
邱宏伟, 杨培志, 钟鹤裕 等. Yb:YAG 激光晶体的高温退火和高浓度掺杂效应 [J]. *中国激光*, 2002, **29**(5): 439~443
3 Zhang Zhiqun, Huang Zhiyun, Qiu Yishen *et al.*. Theoretical analysis of LD end-pumped Yb³⁺:YAG Laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s2): 94~99
张智群, 黄志云, 邱怡申 等. LD 端面抽运 Yb³⁺:YAG 激光器输出功率的理论分析 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(s2): 94~99
4 J. Dong, M. Bass, Y. Mao *et al.*. Dependence of the Yb³⁺ emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(9): 1975~1979
5 Yu Haiwu, Xu Meijian, Duan Wentao *et al.*. Research progress of laser drivers for inertial fusion energy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(9): 55~62
於海武, 徐美健, 段文涛 等. 惯性聚变能源激光驱动器研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(9): 55~62
6 R. L. Aggarwal, D. J. Ripin, J. R. Ochoa *et al.*. Measurement of thermo-optic properties of Y₃Al₅O₁₂, Lu₃Al₅O₁₂, YAlO₃, LiYF₄, LiLuF₄, BaY₂F₈, KGd(WO₄)₂, and KY(WO₄)₂ laser crystals in the 80-300 K temperature range [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(10): 103514
7 J. C. Chanteloup, H. W. Yu, G. Bourdet. Overview of the Lucia laser program; towards 100 Joules, nanosecond pulses, kW averaged power, based on ytterbium diode pumped solid state laser [C]. *SPIE*, 2005, **5707**:105~116
8 T. Kawashima, T. Ikegawa, J. Kawanaka *et al.*. The HALNA project: diode-pumped solid-state laser for inertial fusion energy [J]. *J. Phys. IV*, 2006, **133**: 615~620
9 A. J. Bayramian. Growth and scaling of high-quality Yb:S-FAP for the mercury laser [C]. A cryo-cooled ytterbium-doped laser materials for IFE driver [C]. Second International Workshop on High Energy Class Diode Pumped Solid State Lasers (HECDPSSL), Germany, 2005
10 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Belin Heidelberg, Springer-Verlag 1999
11 L. M. Frantz, J. S. Nodvik. Theory of pulse propagation in a laser amplifier [J]. *J. Appl. Phys.*, 1963, **34**(8): 2346~2349
12 Lan Xinju *et al.*. *Laser Technologies* [M]. Beijing: Science Press. 2005:182~191
蓝信钜 等. *激光技术* [M]. 北京: 科学出版社. 2005: 182~191
13 Zheng Yuxia, Zhu Jian, Qian Liejia *et al.*. Investigation of parasitic oscillation in main amplifier of the facility "SHENGUANG II" [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(10): 1367~1370
郑玉霞, 朱 俭, 钱列加 等. "神光-Ⅱ" 实验装置主放大器中寄生振荡的研究 [J]. *光学学报*, 1996, **16**(10): 1367~1370
14 Zhang Hua, Fan Dianyuan. Investigation of the amplified spontaneous emission in Nd: glass disk amplifier [J]. *Acta Physics Sinica*, 2000, **49**(6):1047~1051
张 华, 范滇元. 钕玻璃片状放大器自发辐射放大特性的研究 [J]. *物理学报*, 2000, **49**(6): 1047~1051