

文章编号: 1001-3806(2012)03-0428-05

梯度浓度掺杂复合板条抽运分布均匀性的分析

雷呈强 汪岳峰* 殷智勇 贾文武 黄 峰 靳笑晗
(军械工程学院 光学与电子工程系 石家庄 050003)

摘要: 为了提高板条介质内抽运分布的均匀性, 基于 LD 双端抽运 Nd:YAG 陶瓷板条放大器设计方案, 理论分析了端面抽运条件下, 单一浓度掺杂和梯度浓度掺杂板条介质吸收的抽运功率密度分布情况。通过分析可知, 对于单一浓度掺杂板条, 会产生抽运效率与抽运吸收功率均匀性之间的相互制约问题, 而采用梯度浓度掺杂板条介质, 在较高的抽收效率情况下, 抽运吸收功率分布更加均匀。结果表明, 采用梯度浓度掺杂结构可以提高板条介质内抽运分布的均匀性。

关键词: 激光器; 复合 Nd:YAG 陶瓷板条介质; 梯度浓度掺杂; 抽运分布均匀性

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.037

Theoretical analysis of pumping homogeneity in gradient dopant concentration composite slab

LEI Cheng-qiang, WANG Yue-feng, YIN Zhi-yong, JIA Wen-wei, HUANG Feng, JIN Xiao-han
(Department of Optics and Electron, Ordnance Engineer College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to improve the homogeneity of pumping power in the slab, based on the designing scheme of LD dual-end-pumped Nd:YAG ceramic slab laser, the absorbed pump power density distribution of constant concentration dopant slab and gradient concentration dopant slab were theoretically analyzed respectively. After analysis, it is found that the pump absorption intensity distribution becomes non-uniform for constant concentration dopant slab when the pump absorption efficiency is improved. However, for gradient concentration dopant slab, high pumping efficiency and uniform pump absorption intensity distribution can be separately achieved, which can improve the homogeneity of pumping power absorbed in the slab.

Key words: lasers; composite Nd:YAG ceramic slab; gradient concentration doping; pumping homogeneity

引言

激光二极管抽运的全固态激光器 (diode pumped solid-state laser, DPSSL) 因具有转换效率高、稳定性好、结构紧凑、使用寿命长等优点使其成为当今固体激光技术研究的热点之一, 其中板条激光器由于抽运效率高、散热效果好而受到广泛重视^[1-3]。端面抽运是目前二极管抽运固体板条激光器常用的抽运方式之一, 具有模式匹配好、效率高以及输出光束质量好等优点^[4]。双端面抽运板条结构中, 抽运光束从板条的两个端面进入增益介质并且沿着板条的长度方向进行传播。对于传统的单一浓度掺杂的板条介质, 由于板条中任意位置的吸收率都相同, 随着抽运光沿着板条长度方向传播, 抽运光量将逐渐减小, 故而靠近两端面附近吸收的抽运光要多于板条中心, 即此时板条介质内

部吸收抽运分布的均匀性较差。如此一来, 在抽运方向上会产生较大的温度梯度, 导致一系列热效应问题, 从而限制了激光器的输出功率, 降低了输出激光的光束质量^[5-6]。

基于传导冷却双端面抽运复合 Nd:YAG 陶瓷板条放大器的设计方案, 在其抽运功率吸收模型数理分析的基础之上, 根据梯度浓度掺杂思想^[7], 理论分析了梯度浓度掺杂板条介质中吸收抽运功率密度分布情况。研究表明, 采用梯度浓度掺杂板条介质可以提高板条介质内抽运分布的均匀性。

1 端面抽运板条介质结构

双端面抽运板条介质的结构如图 1 所示。采用 Nd:YAG / YAG 复合结构陶瓷板条介质, 中间是掺杂区域, 掺杂部分的长、宽和厚度分别为 l 、 w 和 t 。掺杂介质两端各键合一段非掺杂的晶体帽, 且加工成 45° 角结构, 以消除工作介质的端面效应。设坐标原点在几何中心。采用两个全内反射 (total internal reflection, TIR) 面作为冷却面, 板条上下两个大面通过铟层与热

作者简介: 雷呈强(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事固体激光器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yfwang_OEC@163.com

收稿日期: 2011-09-27; 收到修改稿日期: 2011-10-31

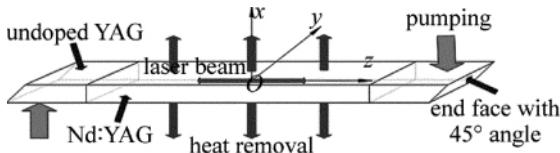


Fig. 1 Sketch of dual-end-pumped composite slab

沉接触进行传导冷却。

在该复合板条介质的抽运中,抽运光束由切割成45°角端面下方非掺杂介质YAG端面(端面A)入射进入板条介质,经由45°角端面后转折90°沿非掺杂介质区域传播至掺杂介质Nd:YAG实际工作端面(端面B)进行抽运。介质内激光束沿“之”字形路径传输并被放大输出,如图2所示。

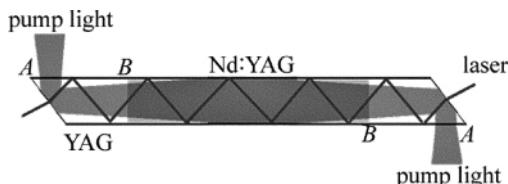


Fig. 2 Sketch of dual-end-pumped composite slab pumping

2 理论分析

2.1 单一浓度掺杂分析

双端面抽运板条激光器中间掺杂区为板条实际工作区。若采用单一浓度掺杂,假设抽运光为单一波长的均匀平面波,RUTHERFORD等人给出了板条掺杂区沿z轴方向的吸收功率密度方程如下(z=0为板条的中心位置)^[8]:

$$\rho_{\text{abs}}(z) = \frac{\alpha P_p (1 - R_p)}{tw} \frac{\exp(-\frac{\alpha l}{2})}{1 - R_p \exp(-\alpha l)} \times \cosh(\alpha z) \quad (-l/2 \leq z \leq l/2) \quad (1)$$

式中 ρ_{abs} 为工作介质吸收抽运功率密度; P_p 为耦合进板条介质的总抽运功率; R_p 为抽运光在晶体上的反射率; $\alpha = n_d \sigma_{\text{abs}}$ 为吸收系数; n_d 为工作介质浓度掺杂; σ_{abs} 为掺杂 Nd³⁺ 有效吸收截面; t 为板条厚度; w 为板条宽度; l 为板条介质掺杂部分长度。

工作介质对抽运光的吸收效率为:

$$\eta_{\text{abs}} = \frac{tw \int_{-l/2}^{l/2} \rho_{\text{abs}}(z) dz}{P_p} = \frac{1 - \exp(-\alpha l)}{1 - R_p \exp(-\alpha l)} \quad (2)$$

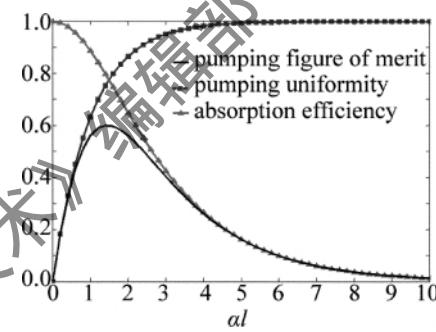
抽运均匀性^[9]:

$$U = \frac{\rho_{\text{abs}}(0)}{\rho_{\text{abs}}(l/2)} = \text{sech}\left(\frac{\alpha l}{2}\right) \quad (3)$$

为了描述抽运吸收效率和抽运均匀性的关系,定义抽运品质因数 F 为^[9]:

$$F = U \eta_{\text{abs}} = \frac{1 - \exp(-\alpha l)}{1 - R_p \exp(-\alpha l)} \text{sech}\left(\frac{\alpha l}{2}\right) \quad (4)$$

从(2)式~(4)式可以看出,抽运吸收效率、抽运均匀性以及抽运品质因数均和吸收系数 α 与工作介质长度 l 的乘积 αl 值有关,三者关系曲线如图3所示(对于端面抽运结构,抽运光在晶体上的反射率很小,这里假设反射率 $R_p = 0$)。由图3可知,抽运吸收效率和抽运均匀性存在制约关系,在 $\alpha l = 1.5$ 时有最优结果,此时吸收效率和抽运均匀性均为 78%。对于给定的反射率,很难同时获得较高的抽运吸收效率和抽运均匀性。如果要提高吸收效率,则必须以降低抽运吸收功率分布均匀性为代价,这在大功率激光放大器中,将会导致大的温度梯度,进而产生大的热应力,甚至于高出板条介质的应力极限,导致板条断裂。

Fig. 3 Pump absorption efficiency, pump absorption uniformity and pumping figure of merit as a function of αl for the case $R_p = 0$

2.2 梯度浓度掺杂分析

板条介质进行梯度浓度掺杂为抽运吸收效率与抽运吸收均匀性的矛盾问题提供了解决的可能,下面进行梯度浓度掺杂情况的分析。对于端面抽运梯度浓度掺杂板条介质,沿 z 方向吸收系数不再是恒定常量,而是关于 z 的函数。同单一浓度掺杂情况一样,假设抽运光为单一波长的均匀平面波,此时沿板条长度方向吸收的抽运功率密度为^[9]:

$$\rho_{\text{abs}}(z) = (1 - R_p) \frac{\alpha(z) P_p}{tw} \frac{\exp\left[-\frac{1}{2} \int_{-0.5l}^{0.5l} \alpha(z) dz\right]}{1 - R_p \exp\left[-\int_{-0.5l}^{0.5l} \alpha(z) dz\right]} \times \cosh\left[\int_0^z \alpha(z) dz\right] \quad (-l/2 \leq z \leq l/2) \quad (5)$$

式中 $\alpha(z) = n_d(z) \sigma_{\text{abs}}$ 为板条长度方向上每个位置点 z 处的吸收系数。

可以看出,梯度浓度掺杂板条介质中吸收抽运功率密度分布是沿着板条长度方向 z 的函数且由抽运吸收系数 $\alpha(z)$ 决定。为了确保吸收的抽运功率沿着板条长度方向均匀分布,则沿着板条长度方向任意一点处的吸收抽运功率密度都相同,即:

$$\rho_{\text{abs}}(z) = \rho_{\text{abs}}(0) \quad (6)$$

则由(5)式和(6)式可得出:

$$\alpha(z) = \frac{\alpha(0)}{\cosh \left[\int_0^z \alpha(z) dz \right]} \quad (7)$$

进一步求解得:

$$\alpha(z) = \frac{1}{\sqrt{z^2 + \alpha(0)^2}} \quad (8)$$

式中 $\alpha(0)$ 是掺杂板条介质中心处的吸收系数。因此,为了获得沿抽运路径均匀的吸收抽运功率分布,吸收系数与位置的关系如图 4 所示。

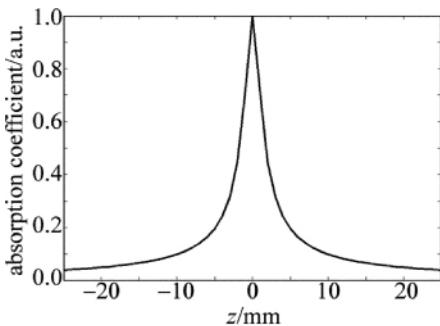


Fig. 4 Absorption coefficient profile for uniform distribution of absorbed power density

由于 $\alpha(z) = n_d(z) \sigma_{abs}$,由(8)式可得梯度浓度为:

$$\left[\frac{1}{n_d(z) \sigma_{abs}} \right]^2 = z^2 + \left[\frac{1}{n_d(0) \sigma_{abs}} \right]^2 \quad (9)$$

吸收截面与浓度掺杂有关,因此在板条介质中,有效吸收截面会随着浓度掺杂的变化而变化,故(9)式通常写为:

$$\left[\frac{1}{n_d(z)} \right]^2 = (\sigma_{abs} z)^2 + \left[\frac{1}{n_d(0)} \right]^2 \quad (10)$$

由(8)式~(10)式分析可知,工作介质中浓度掺杂的变化最终导致了吸收系数的变化,故图 4 所示,吸收系数变化曲线实质上反映出工作介质浓度掺杂沿长度方向的梯度变化情况。

由(5)式可求得梯度浓度掺杂情况下板条工作介质对抽运光的吸收效率为:

$$\eta_{abs} = \frac{tw \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \rho_{abs}(z) dz}{P_p} = \frac{tw \rho_{abs}(0)}{P_p} \quad (11)$$

可求解得:

$$\eta_{abs} = \alpha(0) l \left\{ \sqrt{[\alpha(0) l/2]^2 + 1} - \alpha(0) l/2 \right\} \quad (12)$$

从(12)式可以看出,工作介质对抽运光吸收效率仅与板条中心处吸收系数 $\alpha(0)$ 和工作介质长度 l 的乘积 $\alpha(0) l$ 值有关,即此时抽运吸收效率可以独立地被提高而不用牺牲抽运均匀性。吸收效率与板条介质中心处吸收系数 $\alpha(0)$ 的关系曲线如图 5 所示。

目前为止还少有梯度浓度掺杂板条介质的实际应

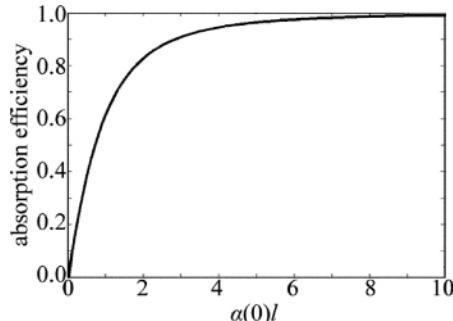


Fig. 5 Pump absorption efficiency as a function of absorption coefficient in the center $\alpha(0)$

用报道,所使用的板条均为掺杂量为常数的单一掺杂。一种近似梯度浓度掺杂板条介质的方法为把板条沿长度方向按 N 阶阶变梯度浓度掺杂等分成 $(2N-1)$ 段,然后将不同浓度掺杂的板条键合在一起,使得每段的抽运吸收功率近似相同,若 N 足够大,则可近似看作是连续梯度浓度掺杂,相应地抽运吸收功率密度分布就可以趋近于理想情况。

对于 N 阶阶变梯度浓度掺杂,由上述理论分析及对称抽运结构可知,板条中心处浓度掺杂最高,对应吸收系数取为 $\alpha(0)$,沿 z 轴从中心分别向正反方向进行 N 阶阶变梯度浓度掺杂,且浓度掺杂等值阶变降低,即 $\pm i$ 段浓度掺杂相同,对应吸收系数取为 $\alpha(i)$ ($1 \leq i \leq N$)。由(5)式可知,第 $\pm i$ 段分段板条吸收的抽运功率密度为:

$$\rho_{abs,0}(z) = \frac{\alpha_0 P_p}{wt} \exp \left[- \frac{l \left(\alpha_0 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_i \right)}{2(2N-1)} \right] \times \cosh(\alpha_0 z) \quad \left(\frac{-l}{2(2N-1)} \leq z \leq \frac{l}{2(2N-1)} \right) \quad (13)$$

$$\rho_{abs,\pm i}(z) = \frac{\alpha_i P_p}{wt} \exp \left[- \frac{l \left(\alpha_0 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_i \right)}{2(2N-1)} \right] \times \cosh \left\{ \pm \frac{l [\alpha_0 + 2\alpha_1 + 2\alpha_2 + \cdots + 2\alpha_{i-1} - (2i-1)\alpha_i]}{2(2N-1)} + \alpha_i z \right\} \quad \left((2i-1)l/[2(2N-1)] \leq \pm z \leq (2i+1)l/[2(2N-1)] \right) \quad (14)$$

(13) 式为阶变梯度浓度掺杂板条中心段吸收的抽运功率密度,(14) 式为阶变梯度浓度掺杂板条第 $\pm i$ ($1 \leq i \leq N-1$) 段分段板条吸收的抽运功率密度。

3 数值计算

采用 Nd:YAG/YAG 复合结构陶瓷板条介质,尺寸为 $67\text{mm} \times 5.6\text{mm} \times 1.7\text{mm}$ 。复合板条中间是掺杂区域,掺杂介质长度为 49mm ,工作介质两端各键合一段

非掺杂的晶体帽,两端未掺杂 YAG 介质长度均为 9mm,且加工成 45°角结构,以减小板条介质的热效应^[10]。考虑 4 种掺杂情况:(1) 单一浓度掺杂;(2) 2 阶阶变梯度浓度掺杂;(3) 4 阶阶变梯度浓度掺杂;(4) 理想梯度浓度掺杂。假设以上 4 种结构采用相同的抽运结构和抽运源,抽运结构如图 1 所示,总抽运功率为 1700W,增益介质的吸收效率为 0.95,分别对以上 4 种情况下工作板条吸收抽运光功率密度进行分析。

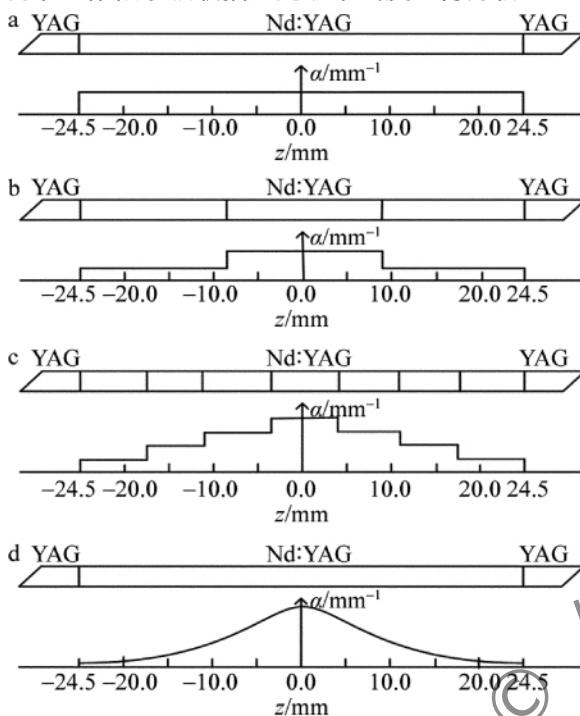


Fig. 6 Sketch of the concentration doping slab

a—constant doping b—two stepwise gradient doping c—four stepwise gradient doping d—ideal gradient doping

对于单一浓度掺杂(如图 6a 所示),由(2)式,取 $\eta_{abs} = 0.95$,可得此时吸收系数 $\alpha = 0.0611\text{mm}^{-1}$ 。由(1)式可知单一浓度掺杂板条介质吸收抽运功率密度为:

$$\rho_{abs}(z) = 1.1593 \cosh(0.06z), \quad (-24.5\text{mm} \leq z \leq 24.5\text{mm}) \quad (15)$$

目前还少有梯度浓度掺杂板条介质的实际应用的相关报道,在工艺上很难实现板条浓度掺杂的连续梯度变化。为此,首先进行了 2 阶阶变梯度浓度掺杂板条介质的仿真分析,即沿 z 轴从中心分别向正反方向进行 2 阶阶变梯度浓度掺杂,如图 6b 所示。

对于阶变梯度浓度掺杂,各分段板条进行不同浓度掺杂,然后键合在一起组成工作介质。由上述各分段板条吸收抽运功率近似相等分析可知 2 阶阶变吸收系数分别为: $\alpha(0) = 0.0897\text{mm}^{-1}$, $\alpha(1) = 0.0591\text{mm}^{-1}$ 。由(13)式、(14)式可知 2 阶阶变梯度浓度掺杂板条中各分段板条吸收的抽运功率密度为:

$$\rho_{abs,\beta}(z) = 1.3799 \cosh(0.0897z),$$

$$(-8\text{mm} \leq z \leq 8\text{mm}) \quad (16)$$

$$\rho_{abs,\pm 1}(z) = 0.9094 \cosh(\pm 0.2286 + 0.0617z), \quad (8\text{mm} \leq \pm z \leq 24.5\text{mm}) \quad (17)$$

在上述单一浓度掺杂和 2 阶阶变梯度浓度掺杂分析的基础上,进一步进行 4 阶阶变梯度浓度掺杂的分析(如图 6c 所示)。则各阶分段板条的吸收系数分别为: $\alpha(0) = 0.0912\text{mm}^{-1}$, $\alpha(1) = 0.0757\text{mm}^{-1}$, $\alpha(2) = 0.0648\text{mm}^{-1}$, $\alpha(3) = 0.0539\text{mm}^{-1}$ 。由(13)式、(14)式可知 4 阶阶变梯度浓度掺杂板条中各分段板条吸收的抽运功率密度为:

$$\rho_{abs,\beta}(z) = 1.4283 \cosh(0.0912z), \quad (-3.5\text{mm} \leq z \leq 3.5\text{mm}) \quad (18)$$

$$\rho_{abs,\pm 1}(z) = 1.1856 \cosh(\pm 0.0542 + 0.0757z), \quad (3.5\text{mm} \leq \pm z \leq 10.5\text{mm}) \quad (19)$$

$$\rho_{abs,\pm 2}(z) = 1.0148 \cosh(\pm 0.1687 + 0.0648z), \quad (10.5\text{mm} \leq \pm z \leq 17.5\text{mm}) \quad (20)$$

$$\rho_{abs,\pm 3}(z) = 0.8442 \cosh(\pm 0.3594 + 0.0539z), \quad (17.5\text{mm} \leq \pm z \leq 24.5\text{mm}) \quad (21)$$

最后进行理想梯度浓度掺杂板条介质吸收抽运功率密度的分析,其结构如图 6d 所示。由(5)式、(6)式和(11)式可得理想梯度掺杂情况下,工作板条介质吸收抽运光功率密度为:

$$\rho_{abs,ideal}(z) = \rho_{abs,ideal}(0) = \frac{\eta P_p}{lwt} \quad (22)$$

将 $\eta_{abs} = 0.95$ 代入上式可得:

$$\rho_{abs,ideal}(z) = \rho_{abs,ideal}(0) = 1.6292\text{W/mm}^3, \quad (-24.5\text{mm} \leq z \leq 24.5\text{mm}) \quad (23)$$

端面抽运中,工作板条对抽运光的吸收呈指数规律,可得上述 4 种掺杂情况板条中抽运功率密度沿长度方向变化曲线,如图 7 所示。由图中 4 种不同掺杂结构板条沿长度方向的抽运功率密度分布对比分析可以看出,当总吸收效率相同时,采用 N 阶阶变梯度浓度掺杂结构,工作板条介质吸收抽运功率分布比单一掺杂结构时更加均匀,并随着分段数目($2N - 1$)的增加,均匀性越来越好,当 N 足够大即理想梯度掺杂时,板条介质吸收抽运功率分布趋近于理想的均匀分布。

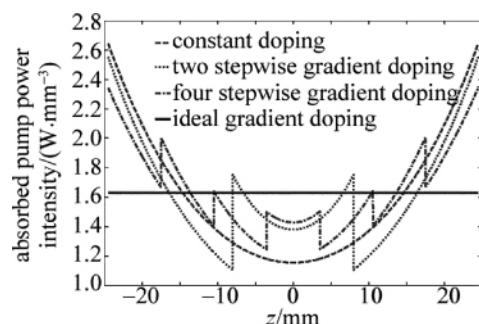


Fig. 7 Comparision of pump power density distribution along the length direction of four different doping structures

4 结 论

基于 LD 双端抽运陶瓷板条放大器设计方案, 对端面抽运条件下, 单一浓度掺杂和梯度浓度掺杂板条介质吸收抽运功率密度情况进行了理论分析。分析表明, 对于单一浓度掺杂板条, 在提高抽运光吸收效率的同时, 会产生激光介质内抽运功率密度不均匀问题, 而采用梯度浓度掺杂板条介质则可以很好地解决这一矛盾。通过计算和比较单一掺杂、2 阶阶变梯度掺杂、4 阶阶变梯度掺杂以及理想梯度掺杂等 4 种掺杂情况在相同抽运条件、相同的吸收效率情况下复合 Nd:YAG 陶瓷板条介质吸收抽运功率分布, 可知采用梯度浓度掺杂结构, 板条介质吸收抽运功率分布更加均匀。从理论上证明采用梯度浓度掺杂激光介质, 可以有效解决抽运效率与抽运功率均匀性之间的制约, 在较高的抽运效率情况下, 大大提高激光介质内抽运光分布的均匀性, 为以后的实际工程应用提供指导作用。

参 考 文 献

- [1] FAN T Y, BYER R L. Diode laser-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, 24(6): 895-912.
- [2] COMASKEY B J, BEACH R, ALLBRECHT G, et al. High average power diode pumped slab laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, 28(4): 992-996.
- [3] SRIDHARAN A K, SARAF S, SINHA S, et al. Zigzag slabs for solid-state laser amplifiers: batch fabrication and parasitic oscillation suppression [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(14): 3340-3351.
- [4] HOU J Y, WANG Y F, ZHU X P, et al. Numerical simulation of pumping uniformity and thermal effects of LD end-pumped slab amplifier [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(6): 802-805 (in Chinese).
- [5] YAN Y, ZHANG H L, LIU Y, et al. Thermal effects of laser diode end-pumped multi-segmented slab Laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(9): 2174-2178 (in Chinese).
- [6] WANG J L, LI L, QIAO L, et al. Theoretical analysis of temperature and stress distribution in end-pumped composite ceramic Nd:YAG laser slab [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1777-1783 (in Chinese).
- [7] KRACHT D, WILHELM R, FREDE M. 407W end-pumped multi-segmented Nd:YAG laser [J]. *Optical Express*, 2005, 13(25): 10140-10144.
- [8] RUTHERFORD T S, TULLIOCH W M, GUSTAFSON E K, et al. Edge pumped quasi-three-level slab lasers: design and power scaling [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, 36(2): 205-219.
- [9] CHEN B, CHEN Y, BASS M. Edge- and end-pumped slab lasers with both efficient and uniform pumping [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, 42(5): 483-489.
- [10] LEI Ch Q, WANG Y F, HOU J Y, et al. Thermal effect analysis of LD end-pumped composite slab [J]. *Applied Laser*, 2011, 31(2): 164-167 (in Chinese).

(上接第 317 页)

- Congress of High Speed Photography. San Diego, USA: International Congress on High Speed Photography, 1982: 201-203.
- [4] STRADLING G L, ATTWOOD D T, KAUFMAN R L. A soft X-ray streak camera [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1983, 19(4): 604-615.
- [5] LIU T F, ZHANG B X. Calibration of picosecond streak cameras [J]. *Physics*, 1999, 28(4): 241-243 (in Chinese).
- [6] WANG L, LI G H, KONG Ch, et al. Phase retardation measurement with two $\lambda/4$ wave-plates [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(6): 663-664 (in Chinese).
- [7] GUO B P, CUNIN B, NIU H B. High repetition rate trigger mode

- streak camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(3): 442-444 (in Chinese).
- [8] WANG W, CHANG L H, LIU N W, et al. Calibration of scanning time and scanning velocity for high speed image converter camera [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(6): 827-830 (in Chinese).
- [9] TIAN J Sh, ZHAO B Sh, WEN W L, et al. A multiple-slit streak tube [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(17): 1979-1982 (in Chinese).
- [10] HUANG Y X, JIANG Sh E, LI W H, et al. Emporal characteristics calibration for an X-ray streak camera [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(5): 829-833 (in Chinese).