

文章编号: 1001-3806(2006)05-0536-03

LD 抽运 Nd:KGW 薄片激光器的研究

叶毅聪^{1,2}, 林文雄^{1*}, 王国富^{1*}, 李锦辉¹

(1. 中国科学院 福建物质结构研究所, 福州 350002; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了解决 Nd:KGW 的热效应问题, 提出了端面冷却方法, 并研究了 LD 面抽运 Nd:KGW 薄片激光器的性能。针对 LD 端面抽运 Nd:KGW 激光器, 计算了激光介质表面的温度分布。计算结果表明, Nd:KGW 晶体的热效应相当严重。该激光器外推抽运阈值为 300mW。虽然谐振腔损耗高达 4.06%, 激光器的最大斜效率仍达到 30.49%。输入功率为 3.2W 时晶体被打裂, 比类似文献中报道的数值高出大约 1W。

关键词: 激光器; 热效应; LD 抽运; Nd:KGW**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

Study on LD-pumped Nd:KGW thin-disk laser

YE Yi-cong^{1,2}, LIN Wen-xiong¹, WANG Guo-fu¹, LI Jin-hui¹

(1. Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, the Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China; 2. School of Graduated, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: For the case of LD end-pumped Nd:KGW laser, the temperature distribution on the surface of laser medium is calculated. The calculating results show that the thermal effect of Nd:KGW crystal is very severe. End-cooling method is used to alleviate the thermal effect of Nd:KGW thin-disk laser face-pumped by a diode. An extrapolated threshold pumping power of 300mW is obtained for the thin-disk laser. A maximum slope efficiency of 30.49% is obtained even with high optical loss of 4.06% in the cavity. Laser crystal is damaged when the pumping power reaches 3.2W, which is approximately 1W higher than the number reported in the relevant reference.

Key words: lasers; thermal effect; LD-pumped; Nd:KGW

引言

LD 抽运固体激光器具有高效率、紧凑、长寿命、高可靠性等特点, 已在军事、工业、医学、娱乐等领域得到广泛应用。近年来, 围绕应用要求掀起了研究 LD 抽运固体激光器的热潮。探索适用于 LD 抽运的激光晶体是 LD 抽运固体激光器的主要研究工作之一。与传统激光晶体 Nd:YAG 相比, Nd:KGW 具有以下几个优点^[1-3]: 在吸收峰值波长 810nm 处拥有更大的吸收截面和更宽的吸收线宽, 有利于高效吸收 LD 抽运辐射和降低严格控制 LD 温度的要求; 晶体掺杂原子数分数高, 到 8% 时仍未发现明显的浓度猝灭效应; 荧光 linewidth 为 Nd:YAG 的 6 倍多, 适用于产生亚皮秒脉冲; 极高的偏振度输出 (1:4000), 几乎接近于分析用的偏振器; 除此之外, Nd:KGW 还是一种自喇曼晶体, 适合于产生对人眼安全或多波长输出的激光器。LD 抽运固体激

光器的抽运光通常被聚焦到几百微米左右, 局部热效应大大高于灯抽运系统。Nd:KGW 晶体的热传导系数小, 仅为 Nd:YAG 晶体的 1/3, 因此, 可以预料到 LD 抽运 Nd:KGW 激光器的热效应将严重影响其激光性能。

作者针对 LD 端面抽运 Nd:KGW 激光器模型, 计算了增益介质表面的温度分布。为解决 Nd:KGW 晶体热传导性能差的难题, 提出了用薄片设计和端面冷却方式解决其热效应问题, 并进行了激光实验。

1 Nd:KGW 晶体的热效应

LD 端面抽运各向同性晶体激光器的热透镜模型已有诸多报道^[4-6], LD 端面抽运各向异性晶体激光器的热透镜模型在国内也已有报道^[7,8]。以文献[2]中的 LD 端面抽运 Nd:KGW 激光器为模型, 利用文献[7]中的数学公式计算相同尺寸的 Nd:KGW 和 Nd:YAG 晶体表面的温度分布。

图 1 为 LD 端面抽运 Nd:KGW 激光器结构示意图。晶体被包在铜箔片内, 放入一个用紫铜做的槽内, 四周通过冷却水。假设晶体四周表面温度为 25℃。计算两晶体表面的温度分布时分别用到以下参数: $\alpha = 2.4 \text{ cm}^{-1}$, $w_p = 350 \mu\text{m}$, $\kappa_x = 2.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\kappa_y =$

作者简介: 叶毅聪 (1979-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光材料与激光器件的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wxlin@ms.fjirsm.ac.cn; wgf@ms.fjirsm.ac.cn

收稿日期: 2005-08-03; 收到修改稿日期: 2006-03-23

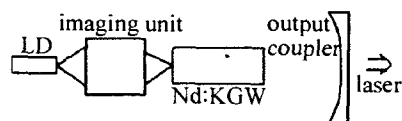
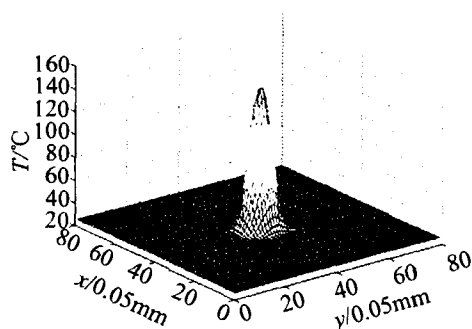
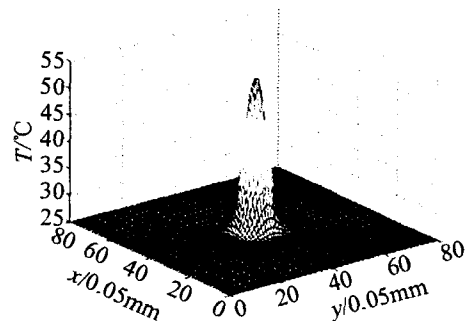


Fig. 1 Experiment set-up of LD end-pumped Nd:KGW laser

$3.4\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (Nd:KGW) 和 $\alpha = 4.1\text{cm}^{-1}$, $w_p = 350\mu\text{m}$, $\kappa_x = \kappa_y = 13\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (Nd:YAG), 两晶体的尺寸均为 $\varnothing 4\text{mm} \times 4\text{mm}$ 。其中, α 为激光晶体的吸收系数, w_p 为抽运光斑的半径, κ_x, κ_y 分别为 x 和 y 方向上的导热系数。抽运光尺寸比晶体尺寸小得多, 为计算方便将晶体端面看成方形尺寸。图2和图3分别为 Nd:KGW 和 Nd:YAG 晶体距晶体前端面 0.05mm 处横截面上的三维温度分布。

Fig. 2 The thermal distribution of a Nd:KGW crystal x-y section in $z = 0.05\text{mm}$ Fig. 3 The thermal distribution of a Nd:YAG crystal x-y section in $z = 0.05\text{mm}$

比较图2和图3可以发现, 在同样的抽运条件下 (假设晶体中的总热耗均为 3W), Nd:KGW 晶体中心的温度高于边界温度 147°C , 且高出 Nd:YAG 晶体中心温度 117°C 。因此, 可以定性地得出结论: LD 端面抽运 Nd:KGW 激光器的热效应相当严重。激光晶体的应力裂纹是与热有关的。在激光晶体中, 当温度梯度导致的应力超过了它的抗张强度时, 就会出现应力裂纹。故在较高抽运功率下, 冷却水如果不及时地将热量带走就可能损坏激光晶体。设计高效的冷却方式成为 LD 抽运 Nd:KGW 激光器的重点。

2 LD 面抽运 Nd:KGW 薄片激光器

近年来兴起的薄片构型设计能有效地提高抽运功率水平并保持较好的光束质量输出, 且较好地解决了固体激光器热效应问题^[9,10]。薄片激光器晶体的一个

端面钎焊固定在高效冷却器上, 有效地提高激光晶体的散热能力, 从而大大地减少激光晶体的温升。

对 LD 端面抽运固体激光器, 激光晶体沿轴向按指数规律吸收抽运辐射, 晶体轴向温度分布沿轴向按指数规律下降, 晶体中的热耗一般主要沉积在距离晶体抽运端面 $1\text{mm} \sim 2\text{mm}$ 处。考虑到 Nd:KGW 的导热系数小、散热能力差的因素, 将 Nd:KGW 激光器设计成面抽运、端面冷却的薄片激光器, 谐振腔结构如图4所示。LD 为最大输出功率 10W 、带尾纤输出的激光

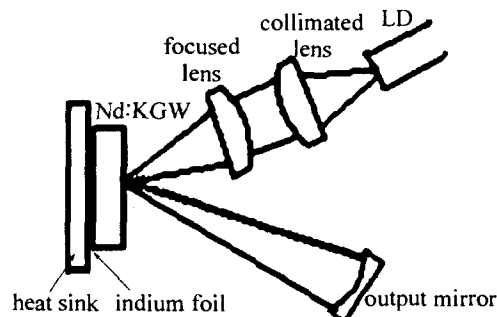


Fig. 4 V-shaped LD-pumped Nd:KGW thin disk laser

二极管 (光纤芯径为 $400\mu\text{m}$, 数值孔径为 0.22), 室温 25°C 时的输出波长为 808nm ; 准直透镜和聚焦透镜均为焦距 15mm 的平凸透镜, 聚焦后的抽运光斑直径大约为 $400\mu\text{m}$; Nd:KGW 晶体掺杂原子数分数为 5% , 沿 b 轴切割, 厚度为 2mm , 入射端面镀 806.5nm 和 1067.2nm 高透膜, 背面镀 806.5nm 和 1067.2nm 高反膜, 晶体被包在铝箔片内, 然后紧贴于一个紫铜做的热沉, 热沉四周通冷却水; 输出镜曲率半径为 250mm , 在 1067.2nm 处的透过率为 2.75% 。为减少输入损耗和紧凑激光器结构, 直接在聚焦透镜的平面上镀 1067.2nm 全反膜作为激光器的后镜。Nd:KGW 晶体的吸收峰值为 810nm , 考虑到其热效应的严重性, 一般不采用该波长来抽运, 而采用 LD 波长为 806.5nm 的“翼抽运”^[2,3]。实验时将 LD 温度调节到 20°C 以获得 806.5nm 波长输出。

3 实验结果

使用 LPE-1A 功率计测量激光输出功率, 图5为 LD 面抽运 Nd:KGW 薄片激光器连续输出的实验结

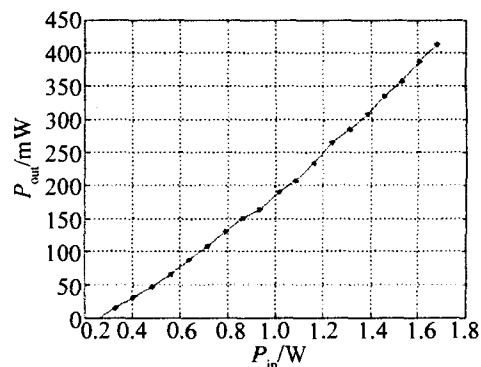


Fig. 5 Output power versus incident power of Nd:KGW thin disk laser

果。激光器斜效率的表达式^[11]为:

$$\rho = \eta_p \frac{h\nu_l}{h\nu_p} \frac{T}{T+L} \quad (1)$$

式中, η_p 为抽运效率, 这里取为 1; h 为普朗克常数, ν_l 和 ν_p 分别为激光和抽运光频率; T 为输出镜的透过率; L 为谐振腔内未包括输出损耗在内的往返损耗。激光器的斜效率为 30.49%, 代入(1)式计算出 LD 面抽运 Nd:KGW 薄片激光器谐振腔的往返损耗 L 为 4.06%, 这个数字相对于 LD 端面抽运激光器来说是比较大的。

激光二极管端面抽运固体激光器的阈值为^[11]:

$$P_{th} = \frac{\pi h \nu_p}{4 \sigma \tau \eta_p} (w_p^2 + w_c^2) (T + L) \quad (2)$$

式中, σ 为受激发射截面, τ 为激光晶体的荧光寿命, w_p 和 w_c 分别为抽运光斑半径和腔模在激光晶体处的光斑半径。假设在晶体上的抽运光斑半径和腔模半径相等, 将 $L=4.06\%$ 代入(2)式计算 Nd:KGW 激光器的阈值为 275mW。由图 5 可知, 激光器外推抽运阈值为 300mW, 比理论抽运阈值稍微高出 25mW。

在 V 型腔中, 为避免折叠镜的像散作用影响, 通常采用较小的折叠角。在本激光器中, 折叠腔的两光路之间的折叠角为 44° , 这势必增加了激光器的像散。另外, 较大的折叠角也为激光器带来了更大的人射损耗。因此, 为减少谐振腔的光学损耗并提高激光器的效率, 建议使用焦距较长的准直聚焦透镜以减小折叠腔两光路间的折叠角。

在 806.5nm 处, Nd:KGW 晶体的非偏振和偏振吸收系数分别为 3.3cm^{-1} 和 4.9cm^{-1} ^[3], 2mm 厚的 Nd:KGW 晶体的双程吸收效率分别为 74% 和 86%。本实验中所用的 LD 为非偏振抽运源, 因此, 降低了 Nd:KGW 晶体的吸收效率, 从而限制了 Nd:KGW 激光器效率的提高。为了提高 Nd:KGW 激光器效率, 建议使用偏振输出的 LD 或采用稍厚的 Nd:KGW 晶体。

尽管激光器的光学损耗高达 4.06%, 但仍获得了 30.49% 较高的斜效率, 这说明了 Nd:KGW 晶体的性能还是很好的。当入射抽运功率为 3.2W 时, 晶体被打裂, 该数字比 LD 端面准连续抽运 Nd:KGW 薄片 (1.7mm) 激光器^[12] 的抽运破坏阈值高出 1W。

BOULON 等人^[12] 报道的 LD 端面准连续抽运 Nd:KGW 薄片激光器中, 虽然使用了准连续抽运源, 提高了激光器的效率, 但仍然无法提高 Nd:KGW 晶体的抽运破坏阈值。从图 2 可以发现, 晶体中的废热主要集中在抽运光斑周围, 而文献[12]中的激光器冷却方式只对抽运光斑以外的区域进行冷却, 并未对抽运光

斑周围的区域进行冷却。本文中使用了背端面冷却的方式, 行之有效地将沉积在晶体 1mm ~ 2mm 内的主要废热及时地排除掉, 因此, 大大地提高了激光晶体的抽运破坏阈值。

4 结 论

对 LD 端面抽运 Nd:KGW 激光器的激光介质表面的温度分布进行了计算, 计算结果表明, Nd:KGW 晶体的热效应相当严重。针对这一问题, 提出了用薄片设计和端面冷却方式解决 LD 抽运 Nd:KGW 激光器的热效应问题。在激光实验中, 激光器的最大斜效率为 30.49%, 外推抽运阈值为 300mW。由于采用端面冷却方法, 有效地减少了 Nd:KGW 晶体的温升和降低了 LD 抽运 Nd:KGW 激光器的热效应, 并大大地提高了激光晶体的抽运破坏阈值。输入功率为 3.2W 时晶体被打裂, 比类似文献中报道的数值高出大约 1W。

参 考 文 献

- [1] KARLITSCHKE P, HILLRICHS G. Active and passive Q-switching of a diode pumped Nd:KGW-laser [J]. Appl Phys, 1997, B64(1): 21 ~ 24.
- [2] GRAF T, BALMER J E. Lasing properties of diode-laser-pumped Nd:KGW [J]. Opt Engng, 1995, 34(8): 2349 ~ 2352.
- [3] KALISKY Y, KRAVCHIK L, LABBE C. Repetitive modulation and passively Q-switching of diode-pumped Nd-KGW laser [J]. Opt Commun, 2001, 189: 113 ~ 125.
- [4] SHI P, LI L, GAN A Sh *et al.* Thermal effect research of Nd³⁺ doped laser crystals in end-pumped all-solid-state lasers [J]. Laser Technology, 2004, 28(2): 177 ~ 180 (in Chinese).
- [5] WEBER R, NEUENSCHWANDER B, MacDONALD M *et al.* Cooling schemes for longitudinally diode laser-pumped Nd:YAG rods [J]. IEEE J Q E, 1998, QE34(6): 1046 ~ 1053.
- [6] COUSINS A K. Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods [J]. IEEE J Q E, 1992, QE28(4): 1057 ~ 1069.
- [7] CAO M Y, ZHENG Y. Numerical calculation of thermal effect on laser-diode end-pumped Nd:YVO₄ laser [J]. Laser Journal, 2000, 24(2): 11 ~ 13 (in Chinese).
- [8] ZHENG Y, CAO M Y, YAO J Q. Study on thermal effect of anisotropic laser medium by LD end-pumped [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2003, 14(10): 1094 ~ 1098 (in Chinese).
- [9] GISEN A, HUGEL H, VOSS A *et al.* Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers [J]. Appl Phys, 1994, B58(5): 365 ~ 372.
- [10] ROTHACHER T, LUTHY W, WEBER H P. Diode pumping and laser properties of Yb:Ho:YAG [J]. Opt Commun, 1998, 155: 68 ~ 72.
- [11] FAN T Y, BYER R L. Diode laser-pumped solid-state lasers [J]. IEEE J Q E, 1988, QE24(6): 895 ~ 912.
- [12] BOULON G, METRAT G, MUHLSTEIN N *et al.* Efficient diode-pumped Nd:KGd(WO₄)₂ laser grown by top nucleated floating crystal method [J]. Optics Materials, 2003, 24(2): 377 ~ 383.