

文章编号: 0258-7025(2008)10-1473-04

角抽运优化及辐射平衡激光器增益介质设计

周 沐¹ 王晓峰² 谭吉春²

(国防科技大学¹ 光电科学与工程学院光信息科学与技术系,² 理学院技术物理研究所, 湖南 长沙 410073)

摘要 角抽运能够避免使用抽运光高透激光高反的双色镜,并且对于低掺杂浓度的激光晶体仍然具有可以接受的吸收效率,因此该抽运方案适合辐射平衡激光器(RBL)较为苛刻的抽运要求。为确保抽运光不会从增益介质的角边泄漏,对角抽运方案中的晶体宽度给出了进一步的优化公式。在992.8 nm抽运光波长下,针对用于辐射平衡激光器的掺杂原子数分数为5%的Yb:KGW激光晶体,利用光线追迹法分别对不使用和使用高温熔合技术的两种角抽运设计方案进行了数值模拟计算。根据抽运吸收效率和均匀性等设计要求,两种角抽运方案中最佳入射角度均为45°,最佳抽运全反射次数值均为1,但是使用高温熔合技术比不使用该技术会使抽运效率提高约20%。

关键词 激光器;辐射平衡激光器;角抽运;光线追迹

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083510.1473

Corner-Pumped Configuration Optimization and the Gain Medium Design of Radiation-Balanced Laser

Zhou Mu¹ Wang Xiaofeng² Tan Jichun²

¹College of Opto-Electric Science and Engineering, Department of Optical Information Science and Technology,
²College of Science, Institute of Technique Physics,
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract In corner-pumped configuration, dichroic mirror of high transparency for pump light and high reflection for laser light can be avoided, and with laser crystal of low doping concentration the pump absorption efficiency is still acceptable, so this pump configuration is suitable for demanding pumping requirements of radiation-balanced laser (RBL). The formula for the laser crystal width is optimized in corner-pumped configuration to avoid the leakage of the pump light from the crystal pumping corner. When the pumping wavelength is 992.8 nm and the laser crystal of RBL is Yb:KGW with 5% doping concentration, ray trace method is applied to simulate corner-pumped configurations both with and without diffusion technique numerically. According to efficiency and uniformity of pumping light absorption, in the design of both configurations the best pump incident angle is 45° and the best pump total reflection number is 1, but the corner-pumped configuration with diffusion technique is about 20% more efficient than the that without it.

Key words lasers; radiation-balanced laser; corner-pumped configuration; ray tracing

1 引 言

辐射平衡激光器(RBL)是利用反斯托克斯荧光效应制冷来抵消激光器中不可避免的量子亏损而产生的热量^[1],从而实现只有较少的内热甚至没有内热的激光器。S. R. Bowman 等^[2,3]通过各种实验比较多种激光晶体,认为 Yb:KGW 晶体综合性能

指标最适合作辐射平衡激光器的激光晶体,由于目前广泛采用激光二极管(LD)抽运,掺 Yb 固体激光器的研究也越来越多^[4,5]。但是辐射平衡激光器要求抽运光的波长应当大于激光晶体的平均荧光波长^[1],导致抽运光波长与激光波长十分接近,由于端面抽运方式中抽运光入射镜既要保持对抽运光波长保持

收稿日期:2007-11-30;收到修改稿日期:2008-02-29

基金项目:国家自然科学基金(10576038)资助项目。

作者简介:周 沐(1975—),女,吉林人,博士研究生,目前从事无热固体激光器的研究。E-mail:spark99@263.net

导师简介:谭吉春(1946—),男,四川人,教授,博士生导师,目前研究方向为激光光学与光信息技术。

E-mail:nudt2004@126.com

高透又要对激光波长保持高反,使得辐射平衡激光器难以采用端面抽运方式来实现。为尽量减少杂质吸收,提高量子效率,辐射平衡激光器的激光晶体还应当具有较低的掺杂浓度^[6],于是导致抽运光的吸收系数较小,使得侧面抽运和侧边抽运等方式的效率很低,也不宜在辐射平衡激光器中应用。Mali Gong 等^[7]提出了一种新型的角抽运方式,十分适合在辐射平衡激光器中应用,这主要是因为这种抽运方式避免使用能同时满足抽运光增透而激光高反的双色镜,这在辐射平衡激光器中抽运光波长与激光波长相差只有几十个纳米的情况下优势尤其明显;其次角抽运通过抽运光在激光晶体内的多次全反射,大大增加了抽运光的吸收长度,在辐射平衡激光器中激光晶体吸收系数偏小的情况下,有效地提高了抽运光的吸收效率。

本文首先进一步优化了角抽运中激光晶体的宽度,并将角抽运的设计应用到辐射平衡激光器中。利用光线追迹法^[8~10]分别对不使用和使用高温熔合技术的两种角抽运设计方案的抽运反射次数、抽运入射角等主要参数进行了抽运吸收效果的数值模拟计算。根据抽运吸收效率和均匀性等要求,给出了对于特定的 Yb:KGW 激光晶体在用于辐射平衡激光器时两种角抽运方案的最佳设计参数。

2 角抽运设计方案的优化

角抽运方式通常让抽运光从激光晶体的四个边角入射,再利用抽运光在晶体中多次全反射增加吸收长度,提高吸收效率。图 1 给出了角抽运方式中抽运光在激光晶体内传播的俯视图,为简明起见,图 1 只画了抽运光从左上角入射的情形,并将抽运光假设为平行光。图中 L 为晶体的总长度, W 为晶体的总宽度,四个被削掉的角的宽度都为 a ,端面的实际宽度在角被削掉以后变为 W_a ,抽运光与水平长度 L 之间的夹角为 α ,另外设晶体的厚度为 t 。角抽运方式中的激光晶体与板条激光器比较类似,通常厚度较薄,上下表面的四个角被削掉,为了提高抽运光利用率,角边 a 处一般镀抽运波长的增透膜,抽运光从这四个边角入射,在晶体的两个边上进行多次全反射直到最后一次在边上的全反射后,一般在端面 W_a 长度范围内还可以利用部分反射使剩下的抽运光继续保留在晶体里被传播吸收。激光则沿着长度 L 方向传播,对激光而言端面的有效宽度不会超过 W_a ,因此激光晶体中有可能转化为激光能量的抽运光有效分布在晶体中间的灰色区域,而灰色区域外的两

边白色条状区域虽然也会吸收抽运光储存能量,却不能被提取出来转化成激光能量。对此 Mali Gong 等^[7]使用的是合成激光晶体,这种合成晶体是把中间灰色矩形晶体掺杂适量激活离子,两边白色条状晶体为无掺杂晶体,然后利用高温熔合技术把它们合成一体,最后去掉边角进行镀膜等加工。分析表明这种高温熔合技术(Diffusion bonding technique under high temperature, 简记为 Diffusion)能够大幅度提高抽运效率和抽运均匀性,文献[11]报道这项技术还可以被用来减少热透镜效应。本文对不采用和采用高温熔合技术这两种情况进行了数值模拟,给出在这两种条件下的角抽运最佳方案,并对它们的抽运效率和抽运分布等进行了对比。

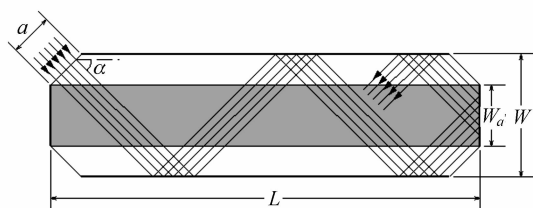


图 1 角抽运方案中抽运光在激光晶体里传播的俯视图
Fig. 1 Planform of pump propagation in the laser crystal of the corner-pumped configuration

文献[5]给出了长度 L 与抽运光入射角度 α , 边角抽运区域宽度 a , 晶体总宽度 W 及抽运光到达端面时在两个边上的全反射次数 N_r 之间的数学公式

$$L = \frac{(N_r + 1/2)W - (a/2)\cos\alpha}{\tan\alpha} + \frac{a}{2}\sin\alpha, \quad (1)$$

这样能够保证从边上入射的抽运中心光线在多次全反射后到达端面的中心点。

(1)式中利用了图 1 所示的 $W = W_a + 2a\cos\alpha$ 这个几何关系,但是它并不能确保全部抽运光都能在晶体端面被全部反射。边角抽运区域宽度 a 通常是事先给定的,一般在工艺条件准许的范围内 a 都尽可能取最小值,来增加在侧边上的全反射次数。对于一定的抽运光入射角度,晶体总宽度 W 并不是随意选择的,否则即使晶体的外形参数满足(1)式,仍然会出现图 2 所示的两种情况。图 2(a)为最后一次侧边全反射中有一部分抽运光从角边泄漏;图 2(b)为抽运光端面反射时,有抽运光从两侧的角边泄漏。这种泄漏不仅会降低抽运光的吸收效率,最主要的还是泄漏的抽运光如果通过抽运耦合系统射入抽运激光二极管内的话,有可能造成激光二极管的损坏。通过简单的三角几何运算可以得到,为避免图 2(a)的情形发生,晶体总宽度 W 和抽运光入射角度 α , 边角抽运区域宽度 a 应满足公式

$$W \geq a \frac{1 + 2\sin^2 \alpha}{\cos \alpha}, \quad (2a)$$

为避免图 2(b) 的情形发生, 晶体总宽度 W 和抽运光入射角度 α , 边角抽运区域宽度 a 应满足公式

$$W \geq a \frac{1 + 2\cos^2 \alpha}{\cos \alpha}, \quad (2b)$$

也就是说, 晶体总宽度 W 应该大于公式(2a)和(2b)右侧的最大值。这样在平行光的近似下, 就能保证抽运光的主要部分不会从角边泄漏, 避免对抽运激光二极管造成损坏。

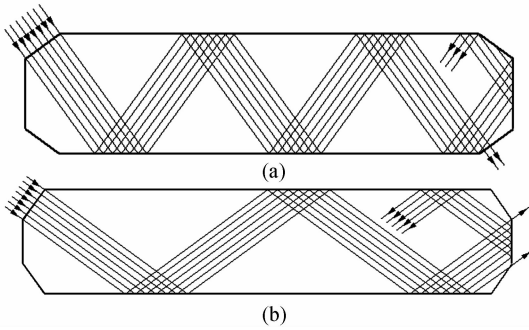


图 2 (a) 最后一次侧边全反射中有一部分抽运光从角边泄漏;(b) 抽运光端面反射时, 有抽运光从两侧的角边泄漏

Fig. 2 (a) Some pump light leaks from the last total reflection of the edge; (b) when pumping light is reflected on the end, some pump light leaks from both sides of the chamfers

3 抽运参数的选择

由于角抽运的分布比较复杂, 很难采用解析的方法进行分析, 因此采用光线追迹法对实际晶体的角抽运参数进行设计和分析。在辐射平衡激光器中使用的激光晶体是 Yb:KGW 晶体, 根据文献[1]比较理想的抽运光波长为 1001 nm, 我们使用的是中国科学院半导体所的激光二极管, 其光波长为 992.8 nm^[12], 从中国科学院福建物构所购买的掺杂原子数分数为 5% 的 Yb:KGW 晶体测量得到该波长的吸收系数为 4.728 cm⁻¹ (m 偏振), 这里所有的抽运吸收都是在非饱和吸收情况下进行计算的。边角抽运区域宽度 a 是由抽运耦合系统确定的, 这里预先假设为 1 mm。在辐射平衡激光器中为方便荧光逸出, 晶体厚度越薄越好, 但兼顾抽运耦合系统的工艺条件, 设晶体厚度为 1 mm。由文献[7], 为保证抽运光在侧边和端面都能够实现全反射, 抽运光入射角度 α 的范围应当在 $\arcsin(1/n)$ 和 $\pi/2 - \arcsin(1/n)$ 之间, 这里 n 为晶体对抽运光的折射率,

计算中采用 Yb:KGW 晶体 m 偏振的折射率为 2.02^[12], 因此 α 的范围约在 30° 和 60° 之间。不过晶体的两个端面通常镀有激光增透膜, 因此与激光波长较为接近的抽运光在端面很难实现全反射, 这里假设抽运光在端面的反射率为 0.1。令 α 的值分别为 30°, 45° 和 60°, N_r 的值分别取 1 和 2, 这样根据(1)和(2)式, 晶体的结构完全确定。采用文献[8]的光线追迹法, 以 0.01 mm 作为单位间隔, 计算机中每个数值都使用 64 位来保存, 用以保证结果的精度。无论使不使用高温熔合技术, 被吸收的抽运能量有效分布为图 1 中的灰色区域, 因此抽运光的有效吸收效率 η 是指图 1 中灰色区域的吸收功率与总输入抽运功率之比。另外, 对于非端面抽运的其他抽运方式, 抽运的均匀性也是衡量抽运效果的重要参数之一, 定义抽运均匀度 U 为^[13]

$$U = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}, \quad (3)$$

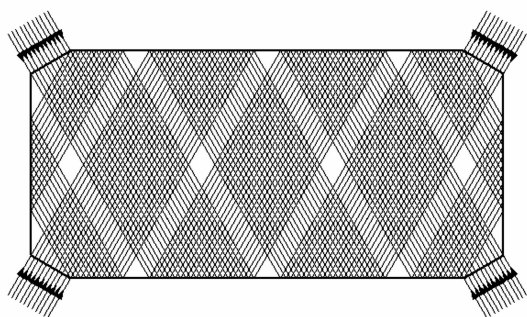
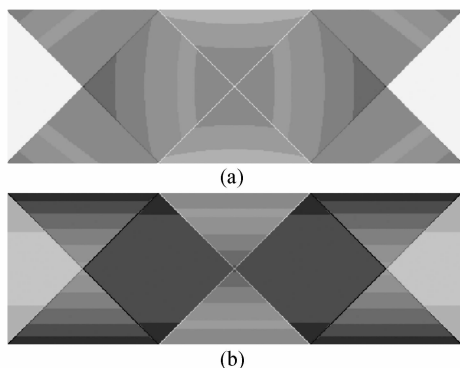
式中, 分子为有效吸收区域的抽运光吸收功率最小值, 分母为有效吸收区域的抽运光吸收功率最大值。

针对 Yb:KGW 辐射平衡激光器, 分别对不使用和使用高温熔合技术的两类角抽运设计方案进行模拟, 结果如表 1 所示。尽管 α 角为 60° 时, 吸收效率 η 的值非常高, 但是因为这种角度的抽运均匀性很差, 如图 3 所示晶体中心区域存在几块几乎没有抽运光通过的小棱形抽运盲区, 这些抽运盲区不但不能为激光提供增益, 还会对激光产生强烈吸收, 造成非常大的损耗, 此外由于这些盲区处于晶体中心, 因此这种抽运分布与激光基模的匹配也是比较差的。虽然这些角度的抽运均匀性为零, 与本文中

表 1 不使用和使用高温熔合技术的角抽运设计方案模拟结果

Table 1 Numerical simulation of corner-pumped laser configurations with and without diffusion technique

Type	$\alpha / (^\circ)$	N_r	$\eta / \%$	W / mm	L / mm	U
No diffusion	30	1	47.7	2.88	7	0
	30	2	48.7	2.88	12	0
	45	1	54	2.82	4.24	0.12
	45	2	57.2	2.82	7.06	0.02
	60	1	81.2	5	4.6	0
	60	2	83	5	7.5	0
Diffusion	30	1	81.5	2.88	7	0
	30	2	93.9	2.88	12	0
	45	1	77.1	2.82	4.24	0.24
	45	2	91.3	2.82	7.06	0.11
	60	1	96.3	5	4.6	0
	60	2	99.6	5	7.5	0

图3 α 角为 60° 时抽运吸收功率的分布Fig. 3 Distribution of the absorbed pump power when $\alpha = 60^\circ$ 图4 $\alpha = 45^\circ$, $N_r = 1$ 时,两种角抽运设计方案的有效吸收抽运功率分布二维图,颜色越深表明吸收效率越高。(a) 不使用高温熔合技术;(b) 使用高温熔合技术Fig. 4 Two-dimensional distribution of two corner-pumped configurations when $\alpha = 45^\circ$, $N_r = 1$. Deeper color represents more pump absorption.
(a) no diffusion; (b) diffusion

抽运光简化为平行光给计算结果带来误差有关,但是总体趋势应该是大体相同的。综合考虑,就本文所用的Yb:KGW晶体而言,不使用和使用高温熔合技术的角抽运设计方案基本相同,都是 $\alpha = 45^\circ$, $N_r = 1$ 。图4给出了两种角抽运设计方案在上述参数下的有效吸收抽运功率分布二维图。这种参数选择牺牲了一定的抽运效率,却大幅度提高了抽运均匀度。不过在相同设计方案下,使用高温熔合技术的角抽运效率为77.1%,不使用该技术的抽运效率为54%,前者比后者效率提高了23%,抽运均匀性也提高了一倍,可见在角抽运设计中使用高温熔合技术是非常必要的。

4 结 论

针对辐射平衡激光器的特点,使用角抽运方式对Yb:KGW激光晶体进行设计。首先优化角抽运设计中的晶体宽度,使其更好地满足不泄漏抽运光

以免造成抽运激光二极管的损坏。然后利用光线追迹法,对不使用和使用高温熔合技术的两种角抽运设计方案的主要参数进行数值模拟,综合比较得到了 $\alpha = 45^\circ$, $N_r = 1$ 为最佳设计方案。从模拟结果明显看出,在角抽运设计中使用高温熔合技术能提高抽运吸收效率几十个百分点,均匀性也有显著提高。

要想进一步提高角抽运的均匀性分布,从根本上需要降低中心晶体的掺杂浓度,增加晶体长度,进而增加抽运光在晶体中的全反射次数,这样不仅使抽运光的分布更加均匀,还能有效降低抽运阈值。对于无热激光器,低掺杂还意味着减少杂质的各方面不利影响,非常适合角抽运设计方案在无热激光器上的应用。

参 考 文 献

- 1 S. R. Bowman. Lasers without internal heat generation [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(1):115~122
- 2 S. R. Bowman, C. E. Mungan. New materials for optical cooling [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **71**:807~811
- 3 S. R. Bowman, N. W. Jenkins, S. P. O'Connor *et al.*. Sensitivity and stability of a radiation-balanced laser system [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(10):1339~1348
- 4 W. F. Krupke. Ytterbium solid-state lasers — the first decade [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(6):1287~1296
- 5 Juan Du, Xiaoyan Liang, Yi Xu *et al.*. Diode-pumped efficient laser action of Yb³⁺:LYSO crystal [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3):172~174
- 6 S. Biswal, S. P. O'Connor, S. R. Bowman. Nonradiative losses in Yb:KGd(WO₄)₂ and Yb:Y₃Al₅O₁₂ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**:091911
- 7 Mali Gong, Fuyuan Lu, Qiang Liu *et al.*. Efficient corner-pumped Yb:YAG/YAG composite slab laser [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(16):3806~3810
- 8 Ning Jiping, Cai Zhiqiang, Chen Zhiqiang *et al.*. Study on uniform of pump distributivity in a LD side-pumped Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):390~394
宁继平,蔡志强,陈志强等. LD侧面抽运的Nd:YAG激光器抽运均匀性研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4):390~394
- 9 Liu Yuanyuan, Fang Gaozhan, Liu Bin *et al.*. Laser diode side-pumped CW Nd:YAG lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7):577~580
刘媛媛,方高瞻,刘斌等. 侧面抽运Nd:YAG连续激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7):577~580
- 10 Liu Yuanyuan, Fang Gaozhan, Ma Xiaoyu *et al.*. Application of pump cavity in LD side-pumped laser head [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8):907~910
刘媛媛,方高瞻,马晓宇等. 抽运腔在LD侧面抽运激光头中的应用[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8):907~910
- 11 Tao Li, Zhuang Zhuo, Xiaomin Li *et al.*. Study on optical characteristics of Nd:YVO₄/YVO₄ composite crystal laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3):175~177
- 12 S. R. Bowman, S. P. O'Connor, S. Biswal. Ytterbium laser with reduced thermal loading [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(12):1510~1517
- 13 T. S. Rutherford, W. M. Tulloch, E. K. Gustafson *et al.*. Edge-pumped quasi-three-level slab lasers: design and power scaling [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(2):205~219