

文章编号: 1001-3806(2018)01-0043-05

半导体双端抽运三程折叠谐振腔板条激光器

邓溯平, 陈培峰*, 王英, 龚磊

(华中科技大学 光学与电子信息学院, 武汉 430074)

摘要: 为了获得简单紧凑的固体激光器, 采用半导体端面抽运三程折叠谐振腔板条激光器, 建立了热透镜等效腔模型, 进行了等效腔稳定性及腔内基模光斑半径的仿真分析, 将新型结构与平-平腔结构进行了对比性实验研究。结果表明, 在三程折叠腔长为 170mm 时, 获得了 21W 的 1064nm 激光功率输出, 光光转换效率为 16.4%, 斜效率为 25%, 水平和垂直方向上的 M^2 因子分别为 10.8 和 2.76。同等条件下, 水平方向上 M^2 因子从平-平腔的 152.7 优化到三程折叠腔的 10.8; 输出光斑水平方向尺寸由平-平腔的 10.8mm 压缩到三程折叠腔的 4.1mm, 验证了结构简单紧凑的端面抽运三程折叠谐振腔激光器光束的输出能力。该研究对获得腔内调 Q 和腔内倍频 532nm 激光器有实际意义。

关键词: 激光器; 谐振腔; 双端抽运; 谐振腔稳定性; 基模

中图分类号: TN242; TN243; TN248.1

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.01.009

Dual-end LD-pumped slab lasers with folded three-pass resonators

DENG Suping, CHEN Peifeng, WANG Ying, GONG Lei

(School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to obtain simple and compact solid-state lasers, a LD end-pumped slab laser with a folded three-pass resonator was used and its thermal lens equivalent cavity model was established. The equivalent cavity stability and cavity mode radius were simulated and analyzed. The new structure and flat cavity structure were studied comparatively based on experiments. The results show that, when the length of the folded three-pass cavity is 170mm, the power output of 1064nm laser is 21W, light-light efficiency is 16.4%, slope efficiency is 25%, and M^2 factors in horizontal and vertical directions are 10.8 and 2.76 respectively. Under the same conditions, M^2 factor in horizontal direction is improved from 152.7 of the parallel-plane resonator to 10.8 of the folded three-pass cavity. The horizontal direction of output spot is compressed from 10.8mm of the parallel-flat cavity to 4.1mm of the folded three-pass cavity. Beam output capability of the simple and compact end-pumped laser with a folded three-pass resonator is verified. The study is of practical significance for obtaining intracavity Q -switched and intracavity frequency-doubled 532nm lasers.

Key words: lasers; resonator; dual-end pump; stability of resonator; fundamental mode

引言

半导体抽运固体激光器相比于灯抽运的固体激光器具有明显的优势。半导体抽运激光器具有更高电光效率、更高光束质量、更高稳定性、更长工作寿命以及结构更紧凑, 广泛应用于激光打标、切割和打孔等领域^[1]。

由于激光跃迁过程中量子效率小于 1 及量子亏损的存在, 固体激光器运行的过程中会产生废热, 随着抽运功率逐渐增加, 增益介质内热效应会越来越严重, 最终会直接影响激光器的输出特性^[1]。1998 年, 德国夫

琅禾费激光技术研究所 DU 等人提出部分端面抽运固体激光器, 获得了水平方向和垂直方向光束质量分别为 1.3 和 1.7 的 31W 激光输出^[2]。2012 年, 北京理工大学 MAO 等人采用同样结构获得 202W 激光输出^[3], M^2 因子在晶体水平方向和垂直方向分别为 1.72 和 2.25, 光光转换效率 47.5%。

作者旨在采用更简单的单透镜抽运耦合结构以及更紧凑的三程折叠谐振腔结构^[4] 获得较高转换效率和较好光束质量输出, 验证端面抽运折叠腔输出能力, 为实现短波长脉冲输出端面抽运激光器做准备。

1 双端部分端面抽运 Nd:YVO₄ 三程折叠腔结构

传统的固体激光器增益介质一般采用棒状结构, 但是中心轴处的热效应严重, 导致输出的光束质量差。板条激光器的增益介质是板条形状的, 通过大面与热

作者简介: 邓溯平(1992-), 男, 硕士研究生, 现主要从事半导体抽运固体激光器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: pfchen@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2017-02-13; 收到修改稿日期: 2017-04-13

沉^[5]或者特制的冷却液接触^[6-8]大大增加了散热的面积、提高散热效率,有效地削弱了热效应。同时可以将2维的热效应简化成为1维的热效应,便于热管理,是获得高光束质量、高功率输出的常用途径。

目前半导体抽运固体激光器抽运方式主要有端面抽运^[2]和侧面抽运^[1]等方式。端面抽运方式相比于侧面抽运,增益区与腔内谐振模式有更好的空间重叠率,能获得更高的转换效率和更低的抽运阈值。部分端面抽运混合腔采用稳-非稳混合腔结构^[2,5],晶体端面上抽运光能量水平方向上均匀分布,相比于普通端面抽运激光器,竖直方向上尺寸接近基模尺寸,与稳腔的基模体积有更高的空间重叠率。在板条竖直方向稳腔基模输出,在板条水平方向非稳腔近似平行光输出;可以更容易实现高效率、高光束质量激光功率输出。

实验中分别采用平-平腔结构(如图1a所示)和三程折叠腔结构(如图1b所示)验证部分端面抽运激光器的光束输出能力。采用多程折叠腔的主要目的是为了减小谐振光束截面,提高光束质量,为进一步实现腔内调Q和倍频提供依据。平-平腔输出则主要作为对比。平-平腔结构由M₁, M₂, M₅和M₆反射平镜组成,腔长约170mm,其中M₁和M₂镀有入射角为45°的1064nm高反膜和入射角为45°的808nm增透膜, M₅是镀有1064nm高反膜的全反尾镜, M₆是镀有1064nm部分透过膜的输出镜。三程折叠腔结构是在平-平腔内插入两片镀有1064nm全反膜平面反射镜M₃和M₄,计算M₃和M₄摆放角度对光束偏转以实现光束在腔内折叠,最终实现谐振光在谐振腔内单程3次通过晶体往返有6次通过晶体,等效获得更长增益长度,使激光器结构更紧凑。图中, f_c为耦合透镜焦距。

实验用的Nd:YVO₄晶体掺杂体积分数为0.003, a轴切割,尺寸为2mm × 12mm × 8mm,两个2mm × 12mm通光面镀有1064nm和808nm增透膜。晶体两个12mm × 8mm大面与热沉之间通过0.2mm厚铜片接触传热^[9],热沉采用黄铜通水冷却控制温度在25℃附近。

由于a轴切割的Nd:YVO₄晶体对c偏振的抽运光吸收系数峰值要远高于e偏振的抽运光,且该晶体对c偏振抽运光具有最大的发射截面能提高发射效率,同时获得偏振输出^[10],因此选用输出带有c偏振808nm波长的板条,单条功率为100W。每个板条的输出带有快轴发散角压缩,小于0.5°,慢轴发散角为8°左右。

目前国内外研究多采用平板波导和透镜组整形耦合系统,将抽运光斑整形成竖直方向上高斯分布水平方向均匀分布的细线^[2]。本实验中为使激光器结构简单紧凑,采用镀有808nm增透膜的单个圆透镜对抽运光进行聚焦耦合到晶体,将根据晶体内部基模光斑尺寸确定耦合透镜焦距。

2 理论分析

为获得高光束质量的激光输出,应使激光近基模运转,同时为了高效率、高功率输出,则需要使在增益介质内的模体积尽量大且使抽运光尺寸与模体积匹配^[11-12]。由于固有的量子亏损及激光跃迁过程中小于1的量子效率^[1],固体激光器运行过程中不可避免会产生废热,且Nd:YVO₄晶体的导热性差;竖直方向上抽运光聚焦在晶体中央小尺寸区域,导致晶体内部竖直方向上抽运光功率密度分布极不均匀,因此,晶体竖直方向上比水平方向具有更明显的温度梯度,由此产生热应力双折射、折射率改变和晶体端面形变综合为晶体热透镜效应^[1],必须考虑热透镜效应对腔内各处的模参量和谐振腔稳定性的影响。

由于竖直方向更严重的热透镜效应,三程折叠谐振腔稳定性取决于竖直方向热焦距。抽运光在竖直方向的分布尺寸会影响温度梯度进而影响热焦距的值,而热焦距的值会影响腔内模体积大小,抽运光与模式空间重叠率决定了光光转换效率^[13],因此热焦距反过来又影响了抽运光斑的尺寸分布,计算腔内基模尺寸及稳定性之前需要先确定热焦距的范围。根据目前已有的研究成果,抽运功率在30W ~ 180W抽运时,平-平腔内晶体热透镜焦距在50mm ~ 100mm之间^[14-19]。

三程折叠谐振腔热效应等效腔模型如图2所示。图中f₁, f₂和f₃分别是3次通过增益介质时热效应带来的热焦距。设三程折叠腔内晶体热焦距为f,当抽运光在水平方向非常均匀时,取f₁ = f₂ = f₃ = f。实验中

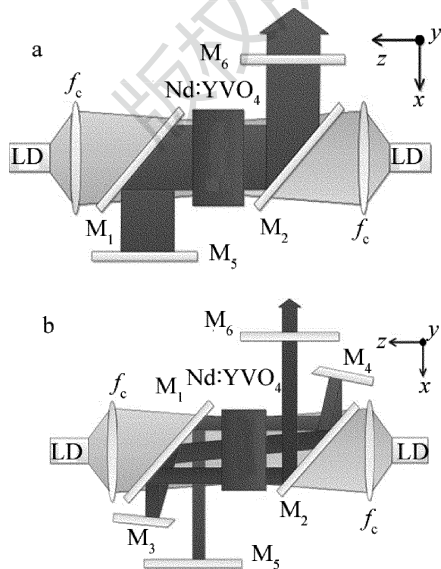


Fig. 1 Schematic setup of a dual-end LD-pumped Nd:YVO₄ laser
a—with a parallel-plane resonator b—with a folded three-pass resonator

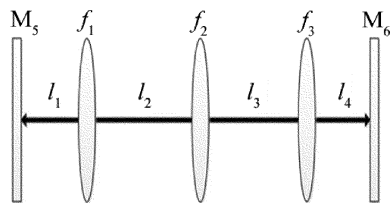


Fig. 2 Equivalent model of thermal effect for a folded three-pass resonator
仅采用单个耦合透镜整形耦合时,抽运条在水平方向输出并不均匀,用 ZEMAX 软件对抽运光进行非序列性光线追迹模拟,以晶体中心为原点,得到晶体表面水平方向功率相对分布如图 3 所示。由图可估算光功率 $P_1 = P_3 = 0.9P_2$,根据热焦距公式与入射光功率反比关系^[9,14-15],取 $f_1 = f_3 = 1.1f, f_2 = f$ 。

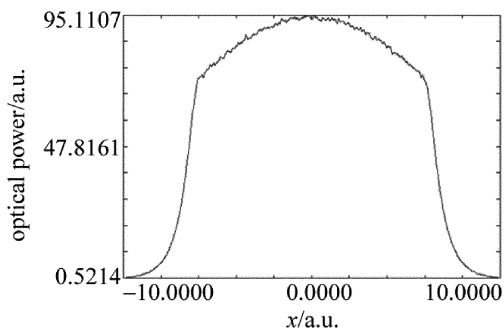


Fig. 3 Distribution of relative pump power in x direction

利用 Q 参量法计算不同热焦距 f 时谐振腔内不同位置基模光斑尺寸及谐振腔的稳定性^[18]。计算三程折叠谐振腔结构时应考虑几点:使基模在晶体内部尺寸应尽量大以获取大的模体积;同时使输出镜表面的束腰尺寸与晶体内部光斑尺寸接近;最后应考虑使腔体积尽量紧凑。画出不同热焦距情况下腔内不同位置基模光斑尺寸,比较计算结果得出热效应等效腔在 $l_1 = l_4 = 85\text{mm}, l_2 = l_3 = 120\text{mm}$ 时可以获得较理想基模尺寸。取 $f_1 = f_3 = 1.1f, f_2 = f = 60\text{mm}$,此时腔内不同位置基模光斑垂直方向上的半径如图 4 所示。

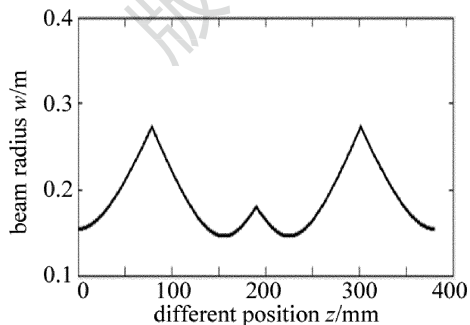


Fig. 4 Beam radius of the fundamental mode at different positions of the resonator starting from M_3

结果显示,晶体内部基模光斑垂直方向上的直径约为 0.4mm ,则要求晶体内部抽运光斑垂直方向尺寸约为 0.4mm 厚、水平方向尺寸为 12mm 宽,从而计算出耦合透镜的焦距 $f_c = 36\text{mm}$,抽运条到透镜距离为 73mm ,

透镜到晶体表面距离为 88mm 。经测量,单边抽运聚焦透镜和偏折镜 M_1 或 M_2 对抽运光的传输效率约为 90% 。

根据腔的稳定条件,计算折叠腔热焦距等效腔 $l_1 = l_4 = 85\text{mm}, l_2 = l_3 = 120\text{mm}$ 时三程折叠腔稳定性。取热焦距 $f_1 = f_3 = 1.1f, f_2 = f$,计算出结果如图 5a 所示;同时计算平-平腔热效应等效腔稳定性作为对比,如图 5b 所示。

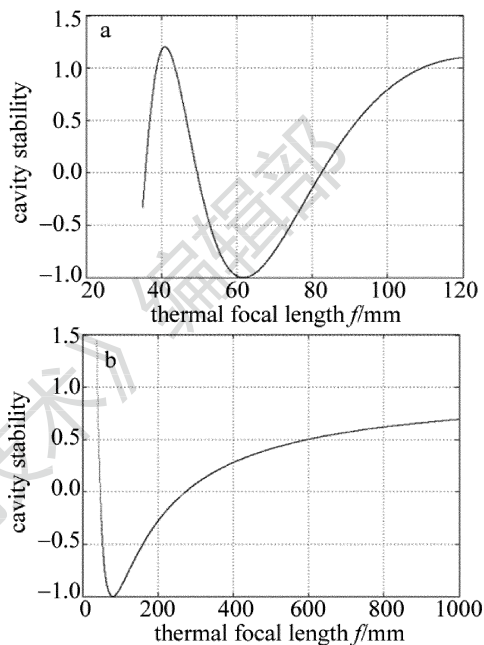


Fig. 5 Influence of three identical thermal focal lengths on resonator stability
a—folded three-pass resonator b—parallel-plane resonator

结果表明,热焦距 f 在 $38\text{mm} \sim 44\text{mm}$ 范围和 $109\text{mm} \sim 120\text{mm}$ 范围内时折叠谐振腔处于非稳腔状态, $f = 62\text{mm}$ 左右折叠腔处于临界腔状态;相比于平-平腔结构,三程折叠腔稳定性范围在长热焦距范围明显缩小,但两种腔型在短热焦距 40mm 左右均处于非稳腔状态。总之,三程折叠腔在抽运为 $30\text{W} \sim 180\text{W}$ 时属于稳定腔,在更高抽运功率或者晶体散热效果不理想时,会因为严重的热效应进入非稳腔状态。

3 实验结果及分析

选用前述晶体和腔镜选型,根据理论分析结果,选择焦距 $f_c = 36\text{mm}$ 的耦合圆透镜及调整好谐振腔的腔镜位置;设置实验循环冷却水温度为 25°C ,使用 Ocean Optics 公司的 USB4000 光谱仪测得半导体抽运源中心波长分别为 805.3nm 和 807.2nm 。

在腔长为 170mm 平-平谐振腔中,使用 20% 透过率输出镜时输出效果最优,功率输出曲线如图 6 所示。在抽运功率 $P_{in} = 157\text{W}$ 时,可以获得最大输出功率 $P_{out} = 58.3\text{W}$ (因为光传输系统对光源有损耗,传输

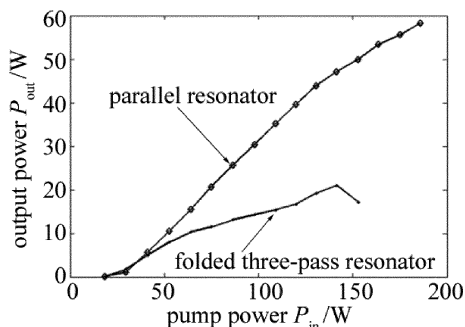


Fig. 6 Relationship between output power and pump power of the parallel-plane resonator and folded three-pass resonator

效率只有 90%，所以获得最大输出功率时，实际抽运功率为 142W 左右)。此时光光转换效率为 37.1%，斜效率约为 47.6%；测量输出镜后不同位置光斑尺寸，计算得水平方向和垂直方向 M^2 因子分别为 152.7 和 2.5。

在平-平谐振腔中加入平面反射镜 M_3 和 M_4 ，计算实现腔内谐振光束三程折叠偏转角度，调节反射镜角度和位置。三程折叠腔在实际腔长为 170mm、热效应等效腔长为 390mm 时，使用 20% 透过率输出镜时输出效果最优，输出曲线如图 6 所示。在抽运功率为 128W 时获得最大输出功率为 21W（同样因为传输效率损耗，最大输出功率对应的抽运功率为 180W 左右）。此时光光转换效率为 16.4%，斜效率为 25% 左右；测量计算得水平方向和垂直方向的 M^2 因子分别为 10.8 和 2.76。距离输出镜 70mm 位置处，测得输出光斑水平方向尺寸由平-平腔的 10.8mm 压缩到折叠腔的 4.1mm。

由输出功率曲线可以看到，三程折叠腔斜效率低于平-平腔，原因是折叠腔内增加了两片平面反射镜带来了损耗；另外热效应等效腔长比平-平腔更长也是损耗的一部分原因。总抽运功率大于 148W 后，进一步增加抽运功率，输出功率明显降低。分析认为，在高功率抽运时，首先由于抽运光中心波长并不在晶体最佳吸收峰 808nm 处，转换效率不高，产生废热多；其次晶体和散热铜片厚度尺寸都过大，散热效率不高，使得热焦距减小，谐振腔进入非稳腔状态，最终导致输出下降。

下一步着重改善晶体热效应问题和抽运整形：将晶体厚度和传热铜片厚度减小，提高散热效率；设计平板波导透镜组减小抽运细线厚度，提高系统耦合效率，提高水平方向抽运均匀性；最终提高光光转换效率、输出功率和光束质量。

4 结 论

提出了一种新型紧凑的双端抽运三程折叠谐振腔

板条激光器，理论分析了谐振腔的稳定性和腔内基模尺寸，并根据分析结果进行实验研究，获得三程折叠谐振腔最大输出功率 21W，斜效率 25%，光光转换效率 16.4%。三程折叠谐振腔输出相比于平-平腔输出结果，水平方向 M^2 因子由 152.7 显著减小为 10.8，输出光斑水平方向尺寸由 10.8mm 压缩到折叠腔的 4.1mm，这表明 LD 端面抽运多程折叠谐振腔激光器的相比于平-平腔结构具有更好的光束输出能力。改进激光器现有冷却和抽运结构，在腔内两片尾镜前分别加入调 Q 器件和倍频器件^[19-21]，可以获得短波长脉冲输出，可应用于印制电路板钻孔切割等激光微加工^[22]领域。

参 考 文 献

- [1] XIE H M. Study of LD side pumped all-solid-state 532nm,355nm lasers[D]. Xi'an: Northwest University, 2005:86-101 (in Chinese).
- [2] DU K M, WU N L, XU J D, et al. Partially end-pumped Nd:YAG slab laser with a hybrid resonator[J]. Optic Letters, 1998, 23(5): 370-372.
- [3] MAO Y F, ZHANG H L, XU L, et al. Research and development of 200W high beam quality all-solid-state Nd:YVO₄ slab laser[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(11): 1162-1164 (in Chinese).
- [4] CHEN P F, DENG S P, ZHANG Z H, et al. Semiconductor double end pumped slab multipass folded cavity laser: China, 201620355798.6[P]. 2016-09-14(in Chinese).
- [5] XU L. LD-pumped innoslab laser oscillators and amplifiers[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015:1-22 (in Chinese).
- [6] ZHANG L L, MENG J Q, HUANG Y, et al. Recent advances in high-power solid-state slab lasers [J]. Laser & Optoelectronics Process, 2005, 42(4): 33-36 (in Chinese).
- [7] JIA Ch Y, WANG Ch, LIU W F, et al. Cooling liquid for liquid immersed solid-state laser[J]. Modern Chemical Industry, 2015, 35(10): 95-97 (in Chinese).
- [8] SHAO N, ZHU X, ZHU G Z, et al. Study on jet array impingement cooling for crystal module of thin disk laser[J]. Laser Technology, 2016, 40(5):695-698 (in Chinese).
- [9] FENG Zh, WAN Y F. Thermal effect of LD end-pumped Nd:GdG laser[J]. Laser Technology, 2014, 38(3): 360-362(in Chinese).
- [10] WANG Ch Q, CHOW Y T, MENG X L, et al. Fluorescence spectra and laser characteristics of Nd:YVO₄ crystal excited by the polarized emission from a laser diode[J]. Chinese Journal of Lasers, 1998, 25(12):1129-1131(in Chinese).
- [11] HOU J Y, WANG Y F. Research on stability of LD dual-end-pumped folded resonator Nd:YVO₄ master oscillator[J]. Infrared, 2009, 30(1): 36-40 (in Chinese).
- [12] LIU J H, LÜ J H, LU J R, et al. Mode matching in high-power laser-diode-array end-pumped Nd:YVO₄ solid-state lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(2):186-189 (in Chinese).
- [13] ZHENG J A, ZHAO Sh Z, WANG Q P, et al. Influence of thermal effect in gain-media on optimum design of LD-end pumped solid state laser[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 30(6):724-729 (in Chinese).
- [14] WANG D Sh, LI G, CHEN M, et al. Measurement of thermal focal length of LD-end-pumped crystal under stable-cavity-condition [J].

- Laser Technology, 2003, 27(6): 534-537 (in Chinese).
- [15] ZOU J, ZHAO Sh Z, YANG K J, *et al.* Determining the thermal lens focus of LD end-pumped Nd:GdVO₄ solid-state laser with CCD detecting method[J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 422-424 (in Chinese).
- [16] YU Zh Sh, LIU J, LIU J, *et al.* Study of the distributed thermal lens of LD end pumped rectangular gain[J]. Optics Express, 2013, 21(20): 23197-23205.
- [17] YANG Y M, WEN J G, WANG Sh Y, *et al.* The thermal lens focus of the end-pumped Nd:YAG laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(12): 1769-1772 (in Chinese).
- [18] LÜ B D. Laser optics: laser beam propagation and beam quality control[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992: 168-188 (in Chinese).
- [19] LI L, TIAN F, ZHAO Z M, *et al.* LD end-pumped folded cavity Nd:YVO₄/LBO laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(4): 396-399 (in Chinese).
- [20] HE J L, WANG J M, HOU W, *et al.* LD pumped Nd:YVO₄/LBO intracavity frequency doubling over 1W green output laser[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(7): 862-865 (in Chinese).
- [21] YANG Ch L, CAI B W, ZHANG R Zh. Output characteristics of diode-pumped, Q-switched Nd:YVO₄ laser [J]. Laser Technology, 2001, 25(6): 473-476 (in Chinese).
- [22] LIU Z Y, WEI X, XIE X Zh, *et al.* Experimental study about micro texture on ceramic tool surface processed by UV laser [J]. Laser Technology, 2016, 40(4): 550-553 (in Chinese).

版权所有 © 《激光技术》编辑部