

# 直接液体冷却薄片激光器设计

叶志斌<sup>1</sup>, 涂波<sup>3</sup>, 王柯<sup>3</sup>, 尚建力<sup>3</sup>, 于益<sup>3</sup>, 邓小雷<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>衢州学院电气与信息工程学院, 浙江 衢州 324000;

<sup>2</sup>衢州学院机械工程学院, 浙江 衢州 324000;

<sup>3</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621000

**摘要** 详细讨论了直接液体冷却薄片激光器的设计。包括增益模块中晶体和冷却液的选取, 以及流道结构的设计, 分析了增益模块中两类组合方式各自的优缺点。组合方式一中, 需要严格控制激光的入射角以及晶体的切割角, 给出了具体的计算和分析。组合方式二无需特别选取角度, 然而所选的冷却液的折射率要与晶体的折射率尽可能一致。在抽运方式选取方面, 分析了采用端面抽运和侧面抽运对激光器储能以及像差等方面的影响。最终, 理论分析了采用 10 片 Nd:YLF 作为增益介质, 折射率匹配液作为冷却液, 在抽运功率为 5 kW 时, 激光器输出功率大于 1 kW, 光-光效率大于 20%, 理论分析和实验结果基本一致。

**关键词** 激光器; 薄片; 直接液体冷却; 冷却液

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0101012

## Design of Direct-Liquid-Cooled Thin-Disk Laser

Ye Zhibin<sup>1</sup>, Tu Bo<sup>3</sup>, Wang Ke<sup>3</sup>, Shang Jianli<sup>3</sup>, Yu Yi<sup>3</sup>, Deng Xiaolei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Electrical and Information Engineering, Quzhou University, Quzhou, Zhejiang 324000, China;

<sup>2</sup>College of Mechanical Engineering, Quzhou University, Quzhou, Zhejiang 324000, China;

<sup>3</sup>Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621000, China

**Abstract** The design of the direct-liquid-cooled thin-disk laser is detailedly discussed. It includes the choosing of crystal and coolant in the gain module as well as the design of the channel structure. Moreover, the advantages and disadvantages of two kinds of combination modes are analyzed. In the first mode, the incident angle of the beam and the cutting angle of the crystal should be controlled strictly. The theory calculations and analysis are given. In the second mode, the angles do not need to be specially selected, while the refractive index of the coolant should be close to that of the crystal. In the aspect of pump mode selection, the energy storage and aberration effects both in end-pumped and side-pumped lasers are analyzed. Theoretically, with the use of 10 pieces of Nd:YLF thin-disks as the gain media and the refractive index matched liquid as the coolant, an average output power larger than 1 kW is achieved at the pump power of 5 kW, corresponding to an optical-optical efficiency larger than 20%. The theoretical analysis is basically consistent with the experimental results.

**Key words** lasers; thin-disk; direct-liquid-cooled; coolant

**OCIS codes** 140.3410; 140.3480; 140.3580

## 1 引 言

直接液体冷却薄片激光器是一种将多片激光增益介质浸入在液体冷却液中, 冷却液直接流过增益

介质表面实现对增益介质换热的新型固体激光器。该类激光器通过减小增益介质厚度并增加介质数目在大幅降低固体材料所受到的热应力影响的同时能够保证高功率激光输出, 因此美国通用原子公司

收稿日期: 2017-08-31; 收到修改稿日期: 2017-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(51605253)、浙江省自然科学基金(LY16E050011)、衢州市科技计划项目(2016Y012)、衢州学院师资队伍专项经费资助(BSYJ201705)

作者简介: 叶志斌(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事高亮度固体激光器方面的研究。E-mail: nibihzey@zju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: dxl@qzu.zj.cn

(GA-ASI)又称其为分布式增益激光器<sup>[1]</sup>。该类激光器最主要的特点是一个冷却器就能实现对多片增益介质的有效散热,可以大大减小激光器系统的体积,同时激光器内部采用强制对流换热方式冷却,能实现很好的热管理。

在国外,对该类激光器有过报道的研究单位是GA-ASI,然而他们仅仅公布了激光器的一些最终数据指标和实验结果,具体的关于激光器的实验细节以及实验方案设计基本未涉及到<sup>[1-2]</sup>。在国内,涉及到该类激光器的主要研究单位是清华大学。2013年,清华大学研究组将单片Nd:YAG薄片作为激光增益介质,以去离子水作为增益介质的冷却液,采用直接液冷方式,最终获得17.1 W的激光输出<sup>[3]</sup>。2014年,他们又报道了一套3 kW的直接液体冷却薄片激光器系统<sup>[4]</sup>。在抽运功率为19960 W时,获得输出功率大于3 kW的激光输出,光-光效率为15.1%,斜效率为21.2%。2015年,他们从理论上证明了将两个增益模块串接在腔中,实现腔内高增益,从而有望获得31 kW的功率激光输出<sup>[2]</sup>。上述结果侧重于指标的报道,对激光器的设计,特别是增益模块的内部结构分析设计等涉及非常少。

本文详细讨论了直接液体冷却薄片激光器的设计,在增益模块中,详细分析介绍了薄片和冷却液的选择以及内部流道结构的设计。抽运方式的选择中,着重分析了端面抽运和侧面抽运需要注意的事项。最终从理论上分析了采用稳定腔实现1 kW的激光输出的可行性,理论分析和实验结果基本一致。

## 2 直接液体冷却薄片激光器增益模块的设计

增益模块的设计主要涉及到薄片和冷却液的选择以及流道内部结构的设计。在薄片的选择中,直接液体冷却薄片激光器目前最常用的两种晶体是Nd:YAG和Nd:YLF;在冷却液的选择中,最常用的为重水和折射率匹配液。下面将详细分析Nd:YAG薄片和重水(或四氯化碳等)组合(组合一)与Nd:YLF薄片和匹配液组合(组合二)所组成的增益模块的设计。最后详细分析直接液体冷却薄片激光器增益模块中流道内部结构的设计。

### 2.1 增益模块中薄片和冷却液的选择

将增益模块中固体薄片浸没在液体冷却液中,在实施有效热管理的同时实现对多片增益介质插入损耗的有效抑制是此类激光器的核心问题之一。因

为将数片增益介质浸没在冷却液中,固液界面的数量通常高达数个甚至数十个,微小的固液界面损耗(菲涅耳反射损耗),都将给谐振腔带来巨大的损耗。而传统的高透膜层大都是针对空气和增益介质所设计的,对于液体和增益介质的高透膜层则需要重新设计,并且高透膜层在液体长时间的流动冲击下容易脱落。为解决上述问题,需要对薄片和冷却液进行特殊的选择,光路进行有效的设计,从而使得增益介质不镀膜时腔内损耗仍然尽可能的小。以下两种组合为典型的设计方案:组合一,偏振光布儒斯特角入射的Nd:YAG薄片和重水(或四氯化碳等);组合二,激光直接垂直入射的Nd:YLF薄片和匹配液。

组合一是现有报道中所普遍采用的装置方案,下面首先分析采用组合一的光路设计。以单个增益模块,每个增益模块含10片Nd:YAG薄片和11个冷却流道为例说明,由于薄片Nd:YAG的折射率为1.82,而重水的折射率仅为1.33,因此要避免薄片和冷却液间的界面损耗,就必须要求激光以布儒斯特角入射。如图1所示,显然,当入射激光与系统光轴平行时,必然会产生光瞳偏移现象,使部分薄片两端没有得到充分利用。为消除光瞳偏移现象,要求入射激光与系统光轴有一定的夹角,并配以相应的薄片切割角保证激光以布儒斯特角入射,使激光光束在薄片中的位移量与其在冷却液中的位移量相互补偿抵消。激光光束在薄片和冷却液中位移量关系如图2所示,设薄片厚度 $d_1=2$  mm,薄片切割角为 $\alpha$ ,两薄片间液体流道厚度 $d_2=0.5$  mm,入射角(在冷却液中的入射角) $\theta_B=\arctan(1.82/1.33)$ ,入射光线与系统光轴夹角为 $\gamma$ ,可以计算光线在薄片中的位移量 $h_1=d_1\sin(\theta_B-\alpha)/\sin\theta_B$ ,相应地,光线在液体中的位移量可表示为 $h_2=d_2\sin(\theta_B+\alpha-\pi/2)/\cos\theta_B$ ,因此,薄片、液体一个周期内的光轴位移量为 $h=h_1-h_2$ 。由此,薄片切割角 $\alpha$ 与一个周期位移量 $h$ 、激光入射角 $\gamma$ 的关系如图3所示。为使单周期位移量为零,即恰好消除光瞳偏移量,由图可知存在唯一的薄片切割角为 $49.36^\circ$ ,此时对应的激光入射角 $\gamma$ 为 $13.2^\circ$ 。因此采用组合一时,为确保界面损耗尽可能的小,需要严格的控制激光的入射角以及晶体的切割角,这为后续增益模块中晶体的装夹带来了一定的难度。

组合二中采用的是Nd:YLF薄片和匹配液。关于Nd:YLF晶体的特性,在文献[5-6]中可以查阅,此处不再详细描述。这里重点要说明选择Nd:YLF薄片的几个原因。首先,通常液体的折射率要远小于

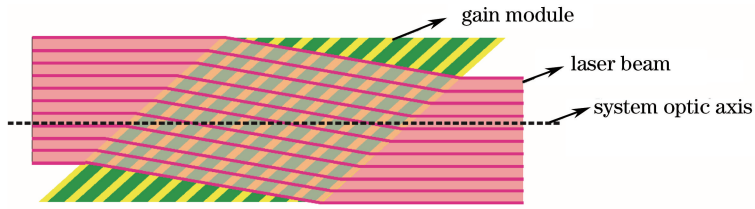


图 1 激光平行于光轴入射时光线偏移光瞳现象

Fig. 1 Pupil shift phenomenon when the incident laser is parallel to the optic axis

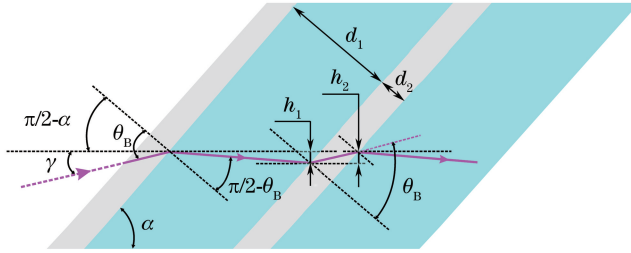


图 2 入射光束在薄片和冷却液中的位移量

Fig. 2 Displacement of the incident laser beam in the thin-disks and coolants

固体的,所以要达到折射率匹配就要求晶体的折射率尽量小,而  $a$  轴切割的 Nd:YLF 晶体输出波长在  $1.047 \mu\text{m}$  ( $\pi$  偏振) 时,其折射率为 1.47,远小于 Nd:YAG 晶体的 1.82,这对后续匹配液的选择降低了要求。需要指出的是,组合二是无法选用 Nd:YAG 晶体作为激光增益介质的,因为 Nd:YAG 晶体折射率过高,无法找到与其折射率匹配的冷却液。同时, Nd:YLF 为各向异性晶体,它的自然双折射远大于其应力双折射<sup>[7-8]</sup>,在低增益系统中,其退偏效应往往可以忽略。当然,与 Nd:YAG 晶体相比较, Nd:YLF 晶体的热负载能力较差<sup>[9-10]</sup>,使得在连续模式工作时系统的增益往往不能很高,因此对系统的插入损耗有更加苛刻的要求。在设计时,需要综合考虑光学谐振腔(稳定腔或非稳定腔)和激光器工作模式(连续或准连续)。折射率匹配液在组合二方案中主要承担以下两方面的作用:1)降低增益介质界面反射损耗,实现多介质串接功率定标放大,同时由于液体和固体折射率的匹配也很好抑制了自发辐射放大(ASE)对系统储能的影响,有利于激光器效率的提高;2)作为激光增益介质的冷却液体,实现介质的良好散热。如表 1 所示的几种液体参数都是针对  $1 \mu\text{m}$  波长激光而言的,3421 和 5610 分别指的是激光冷却液的代号,由美国的 Cargille-Sacher Laboratories Inc. 查阅获得。在选取液体时:1)要满足液体尽量无毒无腐蚀性;2)对激光的吸收要足够小,吸收系数低于  $0.01 \text{ cm}^{-1}$ ;3)折射率要充分地与激光增益介质相匹配,即接近 Nd:YLF 的折射率 1.47;4)热光系数尽量小,以减小液体的波

前畸变量,热导率尽量高,以提高激光器换热能力,粘性系数尽量小,以降低模块所承受的液体流动带来的压力。综上所述,后续的实验选择了 5610-1 液体作为匹配液。

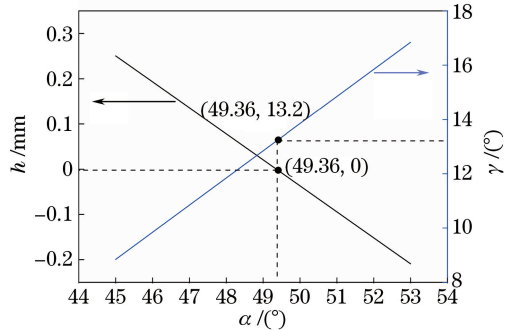


图 3 薄片切割角与位移量、激光入射角的关系

Fig. 3 Relationship among the cutting angle of the disk, the displacement and the incident angle of the laser

## 2.2 流道结构的设计

增益模块是整个激光器系统的核心部件,图 4(a) 是所设计的增益模块的三维结构简图(可参看文献[11]),冷却液在流道内沿  $x$  轴方向流动,激光通光方向沿  $z$  轴。图 4(b) 是增益模块内部结构俯视示意图,整个增益模块主要由 10 片 Nd:YLF 晶体薄片、11 个流道、2 个石英窗口组成。10 片薄片以及 2 个石英窗口固定在 12 个独立的不锈钢金属框架内。冷却液为上文所述的 5610-1 匹配液,从入口流入增益模块,对薄片表面进行冷却,然后从出口流出,液体通过外循环系统(图中未画出)冷却即可使得入口处温度保持恒定。液体在进入 11 个流

表 1 不同冷却液的物性参数

Table 1 Physical properties of different coolants

Coolant	3421	Heavy water	5610-1	5610-2	5610-3
Refractive index	1.394	1.327	1.45	1.478	1.482
Absorption coefficient / $\text{m}^{-1}$	0.997	0.998	0.990	0.990	0.990
Thermo-optical coefficient / $\text{K}^{-1}$	-0.000346	-0.0001	-0.000412	-0.0004	-0.00039
Density / $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.903	1.000	0.992	1.040	1.053
Thermal conductivity / $(\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.00176	0.00600	0.00147	0.00147	0.00147
Heat capacity / $(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	—	4.20	1.16	1.16	1.16
Viscosity / $(\text{mPa}\cdot\text{s})$	18	1	28	97	137

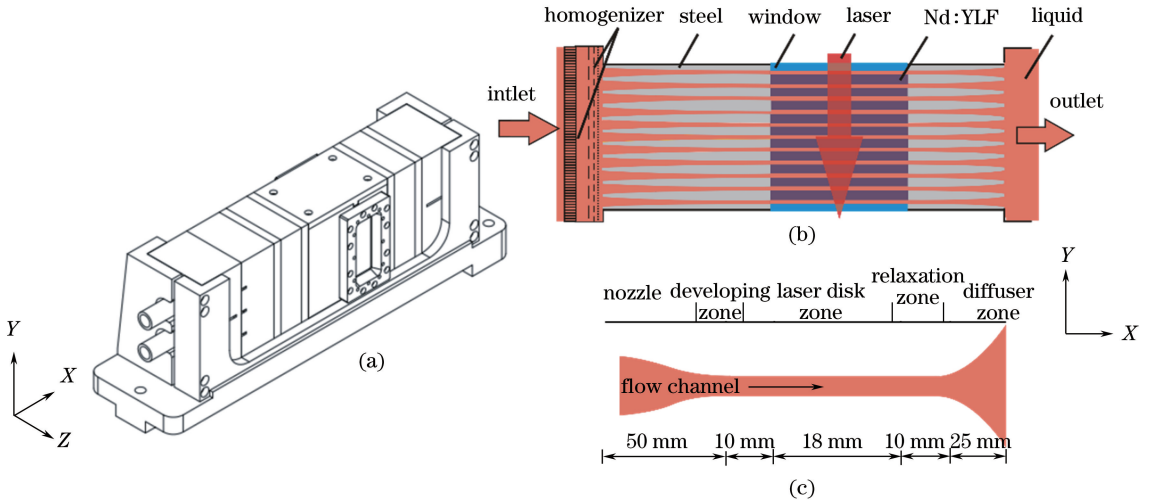


图 4 (a)增益模块简图;(b)增益模块俯视图;(c)单个流道

Fig. 4 (a) Schematic of the gain module; (b) top view of the gain module; (c) single flow channel

道前首先通过了匀化器,匀化器由蜂窝器和三层网  
格大小不一的尼龙网组成。蜂窝器的主要作用是分割  
流体中的大漩涡,加速漩涡衰减,同时由于蜂窝器  
管道对流体的摩擦作用,也有利于改善流体的速度  
分布,在一定程度上降低流体的湍流度。蜂窝器截  
面一般为方形、圆形和六角形,考虑到加工以及折射  
率匹配液粘性比较大,湍流度并不高,实验中选用了  
截面为方形的蜂窝器。冷却液流过蜂窝器后再流经  
三层阻尼网。液体流过阻尼网时,在其流动方向上  
会产生较大的压降,速度越快其对应的压降也越大,  
从而使得流体经多层阻尼网后,垂流方向上的  
速度分布均匀性得到明显改善。液体匀化后进入  
11个冷却流道,这11个冷却流道相互独立,互不干  
扰,流道的具体结构及参数如图4(c)所示。整个流  
道主要分成三部分:收缩段(也称喷嘴)、平直段(也  
称测试段)、扩散段。

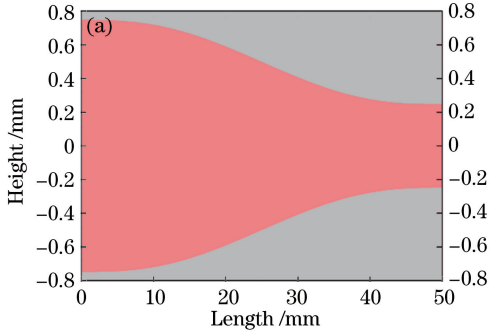
收缩段曲线的主要功能在于对流体产生加速作  
用,在设计时,应考虑到避免流场的边界层产生分  
离,形成液体回流对平直段产生不利影响。因此收  
缩段通常设计为平滑过渡的曲线型面,为了在薄片

增益段获得良好的流动品质,收缩段曲线通常采用  
维托辛斯基公式、双三次曲线或五次方曲线公式设  
计。在这些曲线中,维氏曲线在入口部分收缩较快,  
出口部分则收缩较慢,可以获得均匀的出口速度,而  
双三次曲线与维氏曲线正好相反,在入口部分收缩  
较慢,出口部分则收缩较快,五次方曲线介于两者之  
间,实验中选择了五次方曲线作为收缩段曲线设计,  
五次方曲线公式表示为

$$D = \left[ 1 - 10 \left( \frac{l}{L} \right)^3 + 15 \left( \frac{l}{L} \right)^4 - 6 \left( \frac{l}{L} \right)^5 \right] \times (D_1 - D_2) + D_2, \quad (1)$$

式中  $D, D_1 = 1.5 \text{ mm}, D_2 = 0.5 \text{ mm}$  分别为收缩段截  
面纵向直径、入口直径、出口直径;  $l$  和  $L = 50 \text{ mm}$  分  
别为流道收缩段截面横向长度和总长度,收缩段曲线  
如图5(a)所示。扩张段主要起到降低液体流速,恢  
复流道内压力的作用<sup>[12-13]</sup>。通常采用圆形曲线,扩  
张段由它的横向长度和张角来唯一确定。如图5(b)  
所示,其横向长度为  $25 \text{ mm}$ ,张角为  $1.5^\circ$ 。平直段可  
分成三部分:发展段、薄片增益段、松弛段。因为考  
虑到收缩段与发展段之间不可能做到理想的曲线加  
工,所

以在两者间液体会产生一定的湍流成分,加入发展段起到过渡作用,使液体流动状态充分发展。薄片增益段要求液体充分的层流,防止湍流场造成激光光束波



前发生畸变。松弛段是为了防止下游的流场(扩张段流场)对增益段产生不必要的影响<sup>[12,14-15]</sup>。流道的设计主要参考了风洞的设计方法<sup>[12,16-17]</sup>。

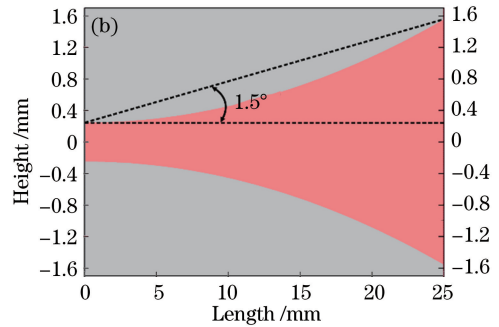


图 5 (a)收缩段曲线;(b)扩张段曲线

Fig. 5 (a) Contraction section curve; (b) diffuser section curve

流体的流动状态分为两种:层流和湍流,通常由雷诺数来决定。管道流的雷诺数定义为

$$Re = \frac{uL}{\nu}, \quad (2)$$

式中  $L$  为当量直径; $\nu$  为粘性系数;平均速度  $u$  由流量决定,在管道中可以认为是常数。对于 5610-1 匹配液,粘性系数  $\nu = 28 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,对于矩形流道

$$L = \frac{4S}{\chi}, \quad (3)$$

式中  $S = 24 \text{ mm}^2$  为流道增益段界面积, $\chi = 97 \text{ mm}$  为湿周长度。当平均流速为  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、管道厚度小于  $7 \text{ mm}$  时,或者当流道厚度为  $0.5 \text{ mm}$ 、流速理论上小于  $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,雷诺数都小于 2300(通常 2300 认为是层流和湍流的分界点),都可以认为是层流,层流达到稳定流动状态的入口段长度可估算为

$$L_{ent,1} \approx 0.05LRe = \frac{0.8uS^2}{\nu\chi^2}. \quad (4)$$

粘性非常大的液体层流入口段非常短,对于 5610-1 匹配液,流速为  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、流道厚度为  $0.5 \text{ mm}$  时,层流入口段长度仅为  $7 \text{ mm}$ ,这也是流道中加入  $10 \text{ mm}$  发展段[图 4(c)]的原因。层流的实现有效缓解了流场因湍流而引入的像差(因为湍流场具有时间和空间的随机性,所引起的像差不易矫正)。

关于流道内流体的流动状态的测量以及流道的换热能力的测量是直接液体冷却激光器设计中至关重要的一部分,由于在之前的研究中已经详细说明<sup>[11]</sup>,文中不再累述。

### 3 直接液体冷却薄片激光器中两种抽运方式的分析

对于直接液体冷却薄片激光器,抽运方式主要

采用端面抽运和侧面抽运两种。抽运方式不仅决定了激光系统的储能特性,还会影响其热致光学畸变特性。

#### 3.1 侧面抽运结构

图 6 是直接液体冷却薄片激光器的侧面抽运结构示意图,抽运光从薄片的上下两侧面( $X-Z$  平面)进入,抽运吸收方向为薄片长度方向( $Y$  轴方向),激光振荡方向、抽运光抽运方向以及冷却液流动方向两两相互垂直。各薄片吸收的抽运光功率相同,最大允许抽运加载受限于薄片端面处的热应力。抽运光被吸收的长度仅由每个薄片的长度决定,与薄片厚度和片数均无关,单薄片的储能密度保持一定,易于通过增加薄片数实现定标。但是,在薄片均匀掺杂时,由于端面处的热应力以及冷却液温升限制,会导致薄片中心处储能不足,整体平均储能低于端抽运结构。从波前畸变的角度来看,侧面抽运中抽运光沿长度方向指数吸收,激光波面沿  $X$  轴(由冷却不均匀引起)、 $Y$  轴(吸收抽运光不均匀引起)两个方向均存在温度梯度。因此,侧面抽运时的热致光学畸变相对更大一些。

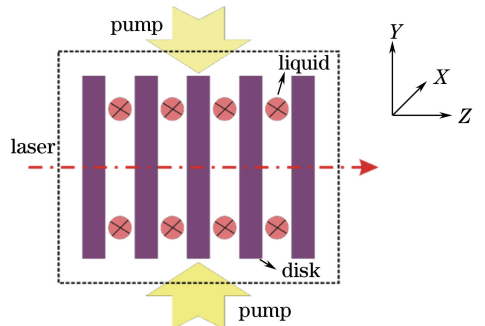


图 6 直接液体冷却薄片激光器侧面抽运结构

Fig. 6 Side-pumped structure in the direct-liquid-cooled thin-disk laser

对于如图 7(a)所示这样的侧面抽运结构中,是无法实现均匀抽运的。显然吸收抽运光最多的一块薄片决定了最高的抽运功率,这使得整个增益模块最大容许抽运功率相对降低。同时,薄片交叠放置将导致薄片上吸收的抽运加载出现高阶的起伏量,进而产生高阶的、难以校正的热致相差分布,使光束质量恶化。因此需要考虑如图 7(b)这样的均匀加载方式,保证无抽运光泄露和抽运光不穿过多薄片(最多穿过两块薄片)。此时薄片厚度  $d_1$ 、流场厚度  $d_2$ 、薄片长度  $l$  和倾斜角  $\theta$  需要满足

$$d_1 + d_2 = l \sin \theta \cos \theta. \quad (5)$$

对于 5610-1 液体,如果要防止抽运光在薄片内

的全反射,需要薄片倾斜角度大于  $9.5^\circ$ ,这样当薄片厚度  $d_1=2\text{ mm}$ 、流道厚度  $d_2=0.5\text{ mm}$  时,要求薄片长度小于  $15.4\text{ mm}$ ,抽运光在薄片内的吸收光程则会小于  $12.1\text{ mm}$ 。对波长  $805\text{ nm}$  的抽运光,需要 Nd:YLF 薄片掺杂原子数分数达到  $1\%$  左右,才能初步满足要求。

### 3.2 端面抽运结构

端面抽运直接液体冷却薄片激光器结构如图 8 所示,薄片竖直放置,冷却流道垂直于纸面( $X$  轴方向),抽运光通过薄片的大面( $X$ - $Y$  平面)进入,且与激光同光路,抽运吸收长度为薄片厚度  $d_1$  与数目  $N$  的乘积  $N \times d_1$ 。

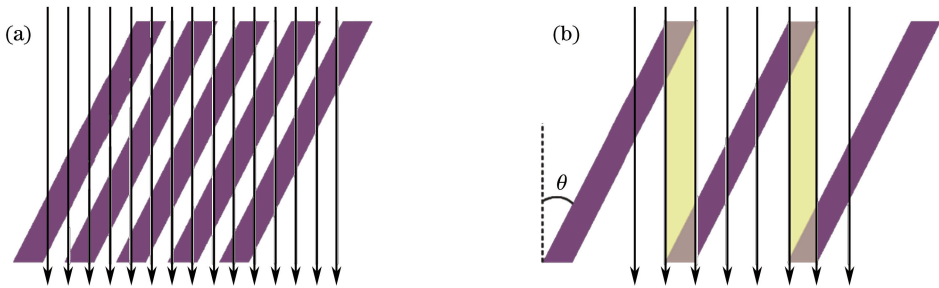


图 7 两种侧面抽运方式。(a)非均匀抽运;(b)均匀抽运

Fig. 7 Two side-pumped methods. (a) Non-uniform pump; (b) uniform pump

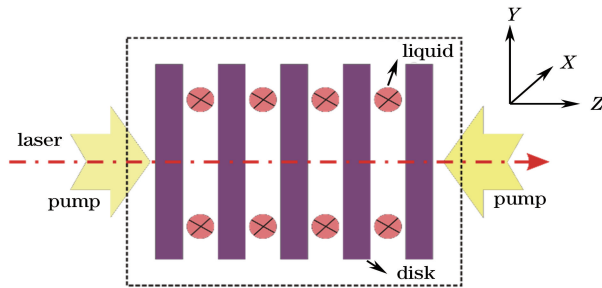


图 8 直接液体冷却薄片激光器端面抽运结构

Fig. 8 End-pumped structure in the direct-liquid-cooled thin-disk laser

从储能角度来看,当所有 Nd:YLF 薄片掺杂浓度相同时,各薄片吸收的抽运光功率不同,中间薄片吸收最少,两侧最多,最大允许抽运加载受限于两侧薄片中的热应力。若要各个薄片储能相同,需采取变掺杂设计,即中心处薄片的掺杂浓度最高,向两侧逐片递减。抽运吸收长度的增加只能通过增加薄片厚度或片数来实现。从热致光学畸变角度来看,端面抽运的优势是抽运光吸收方向与激光光轴方向平行。若薄片采用全口径抽运,且不考虑抽运光的非均匀性,那么激光波面  $X$ - $Y$  平面内仅有沿冷却方向  $X$  的温度梯度,即只产生沿  $X$  轴方向的波前畸变。这也是实验中选用端面抽运结构的原因。当然,随

着激光器功率的进一步提升,需要多种不同掺杂浓度的 Nd:YLF 晶体,对不同薄片掺杂浓度的要求会变得很苛刻,这给晶体的生长工艺提出了较大难题,所以必须采用侧面抽运的方案解决。

## 4 直接液体冷却薄片激光器稳定腔实现 1 kW 输出

目标是从理论和实验上构建一个稳定腔能够连续输出千瓦量级的直接液体冷却薄片激光器,其光-光效率大于  $20\%$ 。对于多模稳定谐振腔的激光输出功率可以采用下式估算:

$$P_{\text{out}} = A \left( \frac{1-R}{1+R} \right) I_s \left( \frac{2Ng_0d_1}{L - \ln R} - 1 \right), \quad (6)$$

式中  $A = 1.8 \text{ cm} \times 4.5 \text{ cm}$  为实验中所选用薄片抽运区截面积,  $R$  为耦合输出腔镜反射率,  $N = 10$  为薄片数目,  $d_1 = 0.2 \text{ cm}$  为单个薄片的厚度,  $L$  为激光在腔内来回振荡一周总的损耗。考虑到介质的折射率为 1.47, 而匹配液的折射率为 1.45, 因此单个薄片的界面菲涅耳损耗大约为 0.01%。考虑到热光效应引起的折射率变化, 不妨设菲涅耳损耗为 0.02%, 考虑匹配液的吸收系数为  $1.0\% \text{ cm}^{-1}$ , 晶体散射吸收损耗为  $0.15\% \text{ cm}^{-1}$ 。那么对于 2 mm 厚薄片, 0.5 mm 厚流场, 每片薄片的插入损耗约为 0.1%。如果再考虑到实际使用时激光入射角度的控制误差, 损耗可能会上升到 0.15%。进一步考虑到流动状态下流体的散射损耗以及其他光学元件的插入损耗, 损耗可能会达到 0.20%, 10 个流道总的单程插入损耗就为 2%, 则双程损耗为 4%。 $g_0$  为小信号增益系数, 可以表示如下

$$g_0 = \eta_c \eta_a \eta_Q \eta_s \eta_B P_p / I_s N d_1 A, \quad (7)$$

$$I_s = \frac{h\gamma}{\sigma\tau}, \quad (8)$$

式中  $\eta_c = 0.85$ 、 $\eta_a = 0.94$ 、 $\eta_Q = 0.9$ 、 $\eta_s = 0.77$  和  $\eta_B = 1$  分别为耦合效率、吸收效率、量子效率、Stokes 效

率和模式交叠效率,  $I_s$  为饱和光强,  $h\gamma = 1.9 \times 10^{-19} \text{ J}$  为  $1.047 \text{ }\mu\text{m}$  输出激光单光子能量,  $\sigma = 1.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$  为发射截面,  $\tau = 480 \text{ }\mu\text{s}$  为荧光寿命,  $\eta_c P_p = 5 \text{ kW}$  为抽运功率(文中所有的抽运功率都指的是经过耦合系统后的功率)。将(7)式和(8)式代入(6)式中, 可得

$$P_{\text{out}} = A \left( \frac{1-R}{1+R} \right) \frac{h\gamma}{\sigma\tau} \left[ \frac{2\eta_c \eta_a \eta_Q \eta_s \eta_B P_p}{(L - \ln R) I_s A} - 1 \right]. \quad (9)$$

图 9(a) 所示为不同反射率下所对应的激光输出功率, 在反射率为 92% 时输出功率达到最大。当然, 由(6)式也可以直接获得最佳反射输出率:

$$R_{\text{opt}} = 1 - L(\sqrt{2Ng_0d_1/L} - 1), \quad (10)$$

经计算为 92%, 与图 9(a) 中的结果一致。在此输出镜下, 光-光效率可表示为

$$\eta_{\text{opt}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_p} = \frac{A}{P_p} \left( \frac{1-R}{1+R} \right) \frac{h\gamma}{\sigma\tau} \left( \frac{2\eta_c \eta_a \eta_Q \eta_s \eta_B P_p}{(L - \ln R) I_s A} - 1 \right), \quad (11)$$

经计算为 26%, 此时, 输出激光功率随抽运光功率的变化关系如图 9(b) 所示, 由图可知, 激光器斜率效率高达 46%。在抽运功率为 5 kW 时, 激光输出功率为 1580 W, 满足千瓦量级输出要求, 同时光-光效率大于 20%。

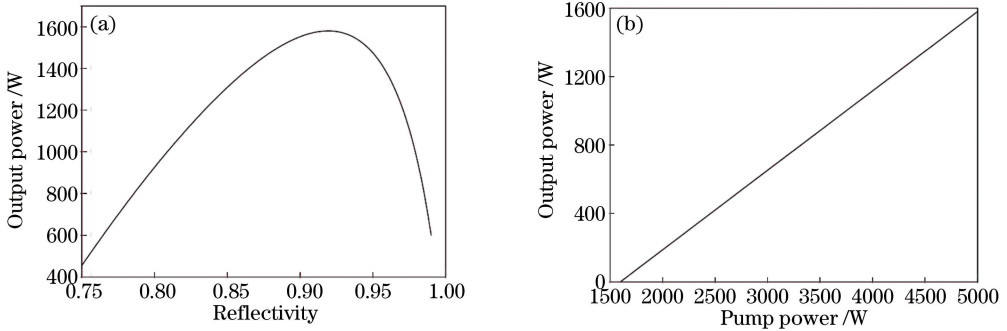


图 9 (a) 不同反射率下的输出功率; (b) 在最佳反射率时输出功率随抽运功率的变化

Fig. 9 (a) Output power varying with different reflectivities; (b) output power varying with pump power at the optimum reflectivity

实验中, 搭建了一台直接液体冷却薄片激光器, 如图 10 所示。整个系统包括 4 部分, 分别为抽运源、耦合系统、增益模块和谐振腔。关于实验的详细报道可以参看前期的研究成果<sup>[11]</sup>, 文中不再累述。采用端面抽运的方式, 在耦合系统中加入波导, 实现了抽运光的均匀化, 均匀性达到了 92%、采用组合方式二, 即以不同掺杂浓度的 Nd:YLF 晶体作为增益介质, 5610-1 折射率匹配液作为冷却液。研究了

不同流速和输出反射率腔镜对激光器输出功率的影响。最终, 在耦合输出镜反射率为 90%, 流场平均流速为  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、抽运功率为 5202 W 时, 获得  $1.047 \text{ }\mu\text{m}$  线偏振多模激光输出 1120 W, 光-光转换效率为 21.5%, 斜效率为 30.8%。实验结果和理论分析存在微小偏差, 主要原因在于理论分析时, 对腔内损耗的估算与激光腔内实际损耗存在偏差, 导致输出功率理论值和实验值存在偏差。

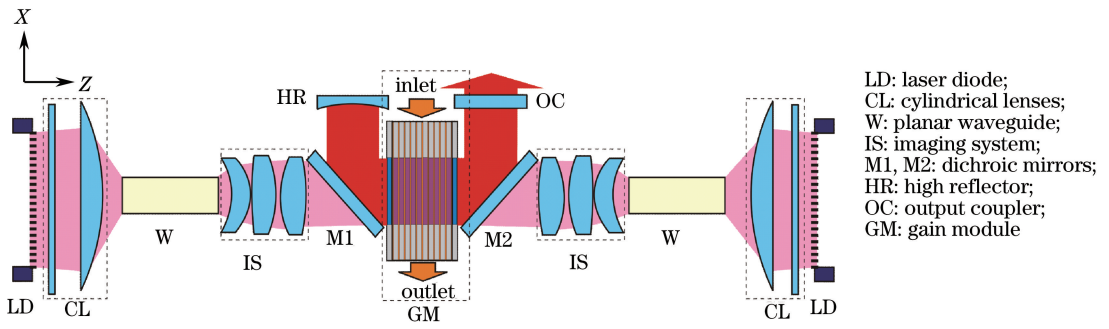


图 10 千瓦量级直接液体冷却 Nd:YLF 薄片激光器实验装置

Fig. 10 Experimental setup of the kilowatt-level direct-liquid-cooled Nd:YLF thin disk resonator

## 5 结 论

报道了直接液体冷却薄片激光器的设计,系统阐述了增益模块中冷却液及增益介质的选择。分析了两种组合方式组成增益模块的利弊,组合方式一中角度需要特殊的设计,给装夹带来了难度,组合方式二则无需特殊的角度设计,但是冷却液的折射率需要尽可能的与晶体的一致。在流道设计中,需要使得流场为层流,从而避免湍流场引起的激光波前畸变。最后,理论分析了采用反射率为 92% 的耦合输出镜,直接液体冷却薄片激光器稳腔能够实现 1 kW 输出,光-光转换效率大于 20%,理论分析和实验结果基本一致。

## 参 考 文 献

[1] Perry M D, Banks P S, Zweiback J, *et al.* Laser containing a distributed gain medium: U. S. 6, 937, 629[P]. 2005-8-30.

[2] Fu X, Liu Q, Li P, *et al.* Numerical simulation of 30-kW class liquid-cooled Nd:YAG multi-slab resonator[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18458-18470.

[3] Fu X, Liu Q, Li P, *et al.* Direct-liquid-cooled Nd:YAG thin disk laser oscillator[J]. *Applied Physics B*, 2013, 111(3): 517-521.

[4] Fu X, Li P, Liu Q, *et al.* 3 kW liquid-cooled elastically-supported Nd:YAG multi-slab CW laser resonator[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18421-18432.

[5] Zhang Z, Liu Q, Nie M, *et al.* Experimental and theoretical study of the weak and asymmetrical thermal lens effect of Nd:YLF crystal for  $\sigma$  and  $\pi$  polarizations[J]. *Applied Physics B*, 2015, 120(4): 689-696.

[6] Zheng D, Xu J, Liu W, *et al.* Spectral Analysis and Growth of Nd:YLF Crystal[C]//Asia-Pacific Energy Equipment Engineering Research Conference, 2015.

[7] Pollak T M, Wing W F, Grasso R J, *et al.* CW laser operation of Nd:YLF[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, 18(2): 159-163.

[8] Murray J E. Pulsed gain and thermal lensing of Nd:LiYF<sub>4</sub> [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1983, 19: 488-491.

[9] Ma Z, Gao J, Li D, *et al.* Thermal stress effects of the diode-end-pumped Nd:YLF slab [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(13): 3522-3526.

[10] Pollnau M, Hardman P J, Kern M A, *et al.* Upconversion-induced heat generation and thermal lensing in Nd:YLF and Nd:YAG [J]. *Physical Review B*, 1998, 58(24): 16076-16092.

[11] Ye Z, Liu C, Tu B, *et al.* Kilowatt-level direct-liquid-cooled Nd:YLF thin disk laser resonator [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1758-1772.

[12] Ligrani P M, Niver R D. Flow visualization of Dean vortices in a curved channel with 40 to 1 aspect ratio [J]. *Physics of Fluids*, 1988, 31(12): 3605-3617.

[13] Mehta R D. The aerodynamic design of blower tunnels with wide-angle diffusers [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 1979, 18: 59-120.

[14] Han L S. Hydrodynamic entrance lengths for incompressible laminar flow in rectangular ducts [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1960, 27(3): 403-409.

[15] Moonen P, Blocken B, Carmeliet J. Indicators for the evaluation of wind tunnel test section flow quality and application to a numerical closed-circuit wind tunnel [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(9-11): 1289-1314.

[16] Moonen P, Blocken B, Roels S, *et al.* Numerical modeling of the flow conditions in a closed-circuit low-speed wind tunnel [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, 94(10): 699-723.

[17] Mehta R D, Bradshaw P. Design rules for small low-speed wind tunnels [J]. *Aeronautical Journal*, 1979, 83(827): 443-449.