

# 高平均功率固体激光器抽运结构发展

尹宪华 侯立群 董玥 刘志刚 张涛 顾亚龙 祖继锋 朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理实验室, 上海 201800)

**摘要** 总结了实现高平均功率固体激光器的抽运结构, 包括 Nd:GGG 热容激光器、掺 Yb 激光器及薄片激光器等, 为设计高平均功率激光器及抽运方式选择提供了参考依据。

**关键词** 面抽运; 边抽运; 固体热容激光器; 薄片激光器

**中图分类号**: TN248.1

## Development of Pumping Configurations for High Average Power Solid State Lasers

YIN Xianhua HOU Liqun DONG Yue LIU Zhigang ZHANG Tao GU Yalong

ZU Jifeng ZHU Jianqiang

(Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** The pumping configurations for realizing high average power solid state laser are summarized, including Nd:GGG crystal slab laser in heat capacity operating mode, Yb-doped slab lasers and thin-disk lasers etc., which provide a reference for designing high average power solid state lasers pumping modes.

**Key words** face-pumping; edge-pumping; solid state heat-capacity laser; thin-disk laser

### 1 引言

自从第一台红宝石激光器问世以来, 固体激光器在新型激光材料的选用、材料性能改进以及抽运方式都有了飞速发展, 一直占据了激光器发展的主导地位。尤其是在 20 世纪 80 年代出现的半导体激光器, 以及在此基础上发展的半导体激光器阵列和近几年方兴未艾的光纤激光器, 因为体积小、重量轻、效率高、性能稳定、可靠性高和寿命长等优点, 促进了整个固体激光技术领域的不断发展。

但是在高功率固体激光器发展过程中仍存在许多技术难题: 例如传统的固体激光器, 通常由掺钕的钇铝石榴石(YAG)晶体(或玻璃

棒)、抽运灯、聚光腔、光学谐振腔、电源及制冷系统等组成, 其转换效率为 1%~3%。由于惰性气体灯发出的抽运光分布在空间  $4\pi$  立体角内, 需要使用聚光腔来提高光转换效率和抽运光辐照均匀性(在半导体激光抽运情况下, 为了提高光转换效率, 有时也需要聚光腔)。一般灯抽运聚光腔有椭圆、双椭圆和多灯共轴等结构<sup>[1]</sup>, 抽运方式多为侧面抽运。随着高功率固体激光器的发展, 尤其是棒状激光器的热透镜效应和热损伤现象限制了激光器的大功率输出。面对这一技术难题, 为消除激光介质热畸变人们提出了以下三种方法<sup>[2-3]</sup>: 1) 均匀抽运; 2) 在热扩散前产生激光(时间 <

1ms); 3) 移去热介质, 引进冷介质(增益介质交换概念)。

除此之外, 20 世纪 90 年代激光二极管(LD)得到了迅猛发展, 使得基于 LD 抽运技术的全固态激光器(DPSSL, diode pumped solid laser)成为目前激光技术领域一个重要发展方向。与传统的灯抽运相比, DPSSL 具有体积小、废热少、重量轻、寿命长、稳定性好等特点, DPSSL 为发展高功率固体激光器提供了强大动力。为了提高激光功率输出和改善光束质量, 主要做了如下几方面的研究工作: 1) 由于导致激光介质热透镜效应的原因是介质横向温度梯度不均匀。选用板状介质, 与光轴平行的面抽运、面

收稿日期: 2005-11-11; 收到修改稿日期: 2005-12-06

作者简介: 尹宪华(1954~), 男, 江苏宜兴人, 高级工程师, 现从事大能量固体激光技术研究。E-mail: jifengzu@siom.ac.cn

冷却方式; 或采用 zig-zag 路径的边抽运方式; 2) 采用热容工作方式, 避免实时冷却引起大的温度梯度; 3) 采用掺 Yb 准三能级激活离子激光介质, 减少在光子转换过程中介质内废热产生量; 4) 由于介质的应力与介质板的厚度成反比, 故采用薄片介质。

## 2 抽运技术的发展

### 2.1 面抽运和边抽运

大面积半导体激光器阵列技术的不断发展, 极大促进了大功率固体板状激光器面抽运技术的应用。这不仅使抽运光耦合系统简化, 更重要的是板状激光器在厚度方向由于对抽运光吸收不均匀(假设抽运光辐照是均匀的)所造成的纵向温度梯度不会形成透镜效应; 而在横向方向的不均匀是由于半导体激光阵列表面发光不均匀性引起的, 其不均匀度小于 10%, 这数值大大低于棒状激光器侧面抽运由于介质对光的指数吸收而造成的不均匀度。由于板条激光器面抽运所产生的横向温度梯度较小(取决于抽运光辐照的均匀性), 介质透镜效应也较小, 这种抽运方式很适合于作为大功率固体激光器抽运结构(见图 1)。

图 2 给出的板条几何结构, 要求抽运光入射到晶体的表面有一定的几何角度, 使抽运光进入介质后, 在介质的两个表面作多次反射, 直至被晶体充分吸收, 期望在晶体的横截面上形成均匀的增益分布。其中要求抽运光入射到晶体的  $\pm Y$  或  $\pm X$  表面对抽运光波长高透, 板条相对应的  $\pm X$  或  $\pm Y$  面对抽运光波长高反。激光在垂直于温度梯度方向作“之”字形传播, 可消除一阶热聚焦<sup>[4]</sup>、应力双折射<sup>[5]</sup>和退偏等效应。清华大学发明了一项专利<sup>[6]</sup>, 对上述边抽运方式作如下改进: 把

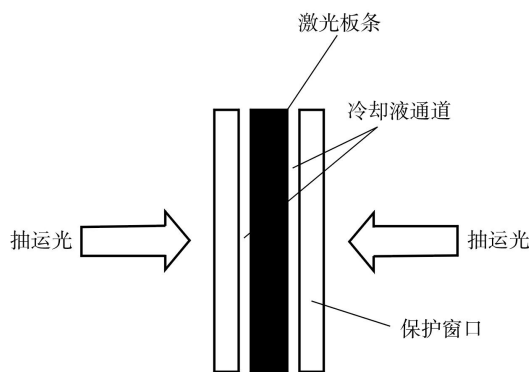


图 1 面抽运、冷却结构示意图

抽运光源放在板条角部位置, 抽运光从板条的角部入射到板条内部, 要求板条角平面对抽运光波长高透, 板条的侧平面对抽运光波长高反。其特征是激光束在板条内作“之”字形传播, 匀化了板条厚度方向的光学不均匀, 降低了由此引起的热透镜效应。但是边抽运模式的覆盖程度差, 激光阈值高, 优点是其光学耦合结构简单、紧凑、热致效应小, 适合于使用大功率半导体激光器阵列和面阵抽运结构。

### 2.2 热容激光器的抽运技术

在 高能脉冲工作下的固体激光器输出功率一直受到工作时产生废热的限制, 因此大多数固体激光系统在工作时都要进行连续冷却。由于冷却是与激光产生过程同时进行的, 因而在激光介质较冷的表面和较热的内部之间产生较大的温差, 温差梯度将产生应力, 使得增益介质变形, 导致光束波面畸

变, 最终使光束质量变差。

针对上述问题, 美国里弗莫尔实验室(LLNL) 首先提出了一个固体热容激光器(SSHCL) 概念<sup>[7]</sup>: 即在激光发射过程中, 产生废热保留在激光介质内, 造成介质温度的上升量由激光介质单位体积产生的废热量和介质的热容量来确定。在激光发射结束后, 激光介质将在 30s 至数十分钟内被冷却(根据不同的应用), 于是避免了光束波面因冷却过程产生较大应力而发生较大的畸变。SSHCL 工作模式见图 3 所示。由于 SSHCL 的运行模式是激光发射与激光介质冷却功能在时间上分开, 具有光束质量好、系统结构简单、紧凑等特点。SSHCL 的抽运和冷却结构如图 4 所示。其中图 4(a) 是用大面积半导体激光阵列抽运 Nd:GGG 激光介质板的 SSHCL 示意图。图 4(b) 是 LLNL 用于 SSHCL 验证实验的钹玻璃激光

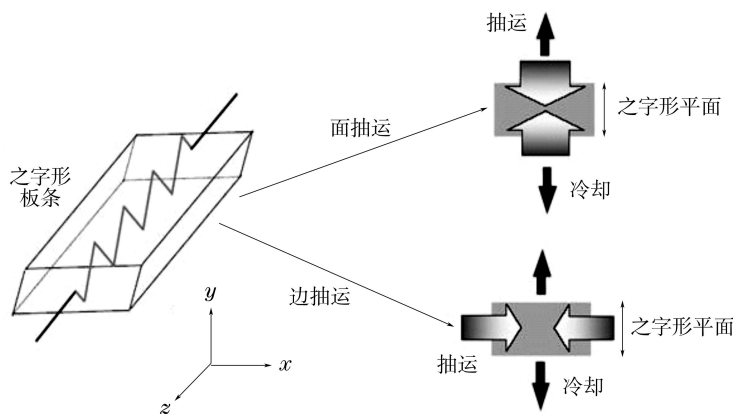


图 2 斯坦福大学发明的 Zig-Zag 板抽运结构示意图

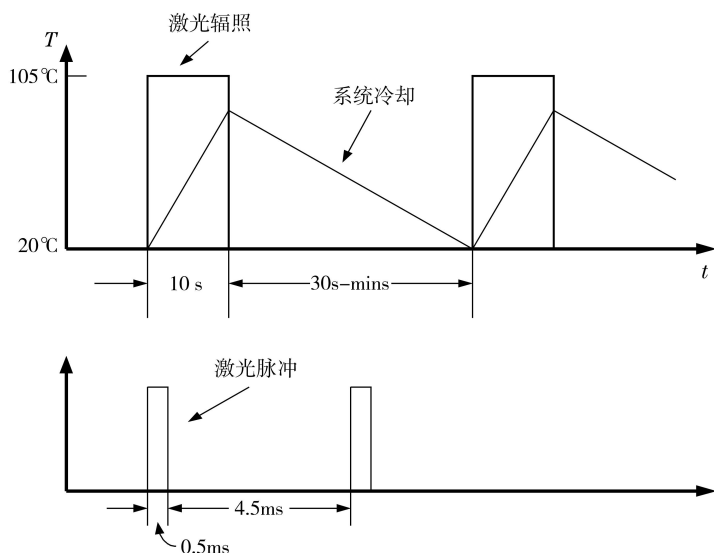


图 3 热容激光器工作模式

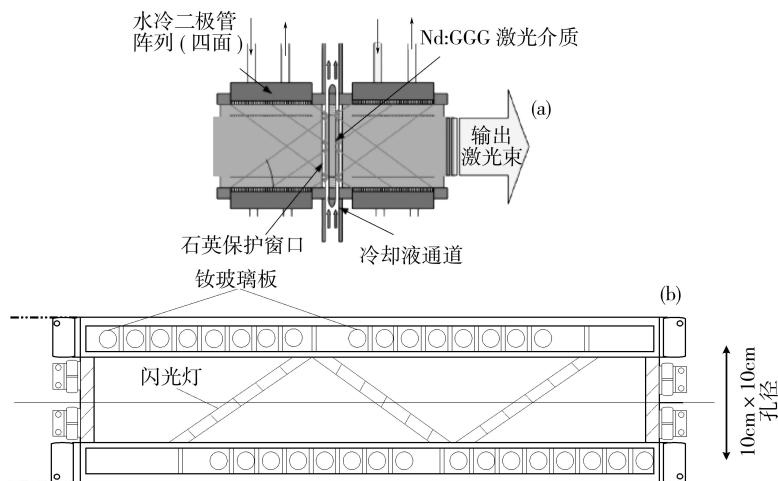


图 4 (a) SSACL 的抽运和冷却结构(LDA 抽运); (b) 钨玻璃 SSACL 装置示意图

器。由 32 根闪光灯作抽运源, 输出脉冲能量为 140J, 重复频率 10Hz, 输出功率 1.4kW。

另外理论计算表明: 以热容方式运行的激光介质的热效应与单脉冲发射的热光效应相似, 温度梯度较小, 并且板中心温度低于表面温度, 板中心附近是张应力, 板表面附近是压应力。而通常激光介质在压应力下的表面损伤阈值比张应力的表面损伤阈值大 5 倍, 因此在热容方式运行下可以比实时冷却方式运行允许更高的抽运功率, 从而也允许更高的平均功率输出。

SSHCL 运行方式一般要求发射时间为 10s, 冷却时间为 30s 到

数十分钟。为了弥补由于冷却过程中无激光发射, LLNL 提出了增益介质交换概念<sup>[9]</sup>: 即整个激光系统包含若干组增益介质, 当一组完成激光发射后迅速移出光路进行冷却, 另一组迅速移进光路进行激光发射, 整个交换过程仅需 1s 时间。这样既提高了出光时间, 又保证了光束质量。

### 2.3 掺 Yb 准三能级激光介质抽运结构

在固体激光器发展过程中, 人们一直在为减少抽运源和抽运介质产生的废热而不断努力。在认识到激光介质产生废热的主要根源是激光上能级的斯托克斯位移后,

人们曾试图改变激活离子(如  $\text{Nd}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ ), 改变光学抽运波长途径(如  $\text{Nd}^{3+} 808\text{nm} \rightarrow \text{Nd}^{3+} 885\text{nm}$ ), 或改变基质材料( $\text{Nd:YAG} \rightarrow \text{Nd:GGG}$ ), 做了许多有意义的研究工作。同时实验结果表明: 不存在哪一种掺杂激活离子和基质材料能结合成一种完全理想的激光介质。例如 Nd 和 Yb 都可以掺入 YAG 或 GGG 的基质中, 成为激光介质, 并具有可接受的光谱、导热和机械性质。但工艺上 Nd 掺杂浓度被限制在 1.5%, 而 Yb 可以更高些, 但要以降低材料的热导率为代价。同样 Yb 比 Nd 有较小的斯托克斯位移, 但 Yb 对抽运光的吸收截面减小了, 见表 1<sup>[8]</sup>。另外相对于 Nd, Yb 工作时对温度变化比较灵敏。

Yb:YAG 激光器用的是掺 Yb 的 YAG 晶体, 现已证明在所有固体激光介质中它产生的热量较少, 把有害的热效应降到了较低程度。与 Nd:YAG 相比, 它的吸收带和发射峰比较接近, 因而在相同输入功率下, Yb:YAG 产生热量的百分比大概是 Nd:YAG 的 1/3。

2002 年美国 Raytheon 公司发展的高功率 Yb:YAG 激光器采用了主振荡器能量放大(MOPA)结构, 同时用相位共轭技术(PC)来校正波面畸变, 获得近衍射极限光束质量, 其输出功率为 2.65 kW。2002 年 12 月该公司对外宣布, 它获得了一份 1690 万美元合同, 为美国空军提供一台输出功率为 25kW 武器级 Yb:YAG 激光器。分三个阶段执行: 第一阶段为期 14 个月, 在实验室内完成 10kW 量级, 光束质量为 1.5 倍衍射极限的器件可行性论证; 第二阶段为期 10 个月, 完成 25kW 量级、光束质量为 1.5 倍衍射极限器件实用性论证; 第三阶段为期 12 个月, 交付使用。Raytheon 公司的目标是开发 100kW 级 Yb:

表 1 几种材料抽运特性<sup>[8]</sup>

	Nd <sup>3+</sup>						Yb <sup>3+</sup>		
	YAG		GGG		ED-2 玻璃		YAG	GGG	s-FAP
抽运波长/nm	808	885	808	885	808	880	941	941	905
吸收截面/(10 <sup>-20</sup> cm <sup>2</sup> )	6.2	1.2	1.9	≈0.5	2.2	≈1	0.8	≈0.4	9.9
适合面抽运	√		√		√	√			√
适合端抽运		√	√	√	√	√	√	√	

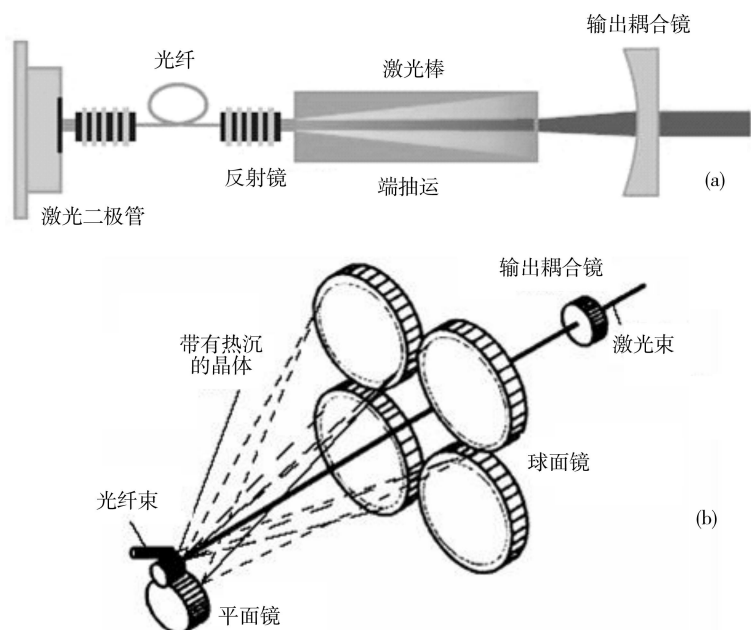


图 5 掺 Yb<sup>3+</sup> 介质棒端抽运(a)与薄片面抽运结构(b)

YAG 激光器<sup>[9]</sup>。

由于掺 Yb 激光介质属于准三能级激光系统,抽运光吸收截面较小,比较适合于棒状介质的端抽运结构。如果针对薄片介质采用面抽运结构,需要在抽运光系统中增加一个非球面反射镜,增大抽运光在激光介质内的行程,从而提高介质对抽运光的吸收率。图 5 给出了掺 Yb 激光介质端抽运和面抽运结构的示意图。其中端面抽运方式最大的优点是容易获得好的激光光束质量,便于实现 TEM<sub>00</sub> 模式输出,从而获得高亮度的固体激光器。它非常适用于某些功率要求不高并需要准直的应用场合,如激光测距、电子元器件的标记等方面。

## 2.4 薄片激光器

薄片激光器是近年来激光技

术发展史上一项重要的发明,它由德国航空航天研究院技术物理所的研究人员首次提出<sup>[10]</sup>。它的基本思路是用光纤耦合输出的半导体激光器作抽运源,对非常薄(小于 300μm)的晶片进行端面抽运,使抽运光在晶体薄片多次经过,同时使热梯度的分布方向与激光束的传播方向相同。在一个新的抽运设计方案中用一个抛物面成像反射镜代替了原来的 4 个球面成像反射镜,使得抽运光在晶体中经过的

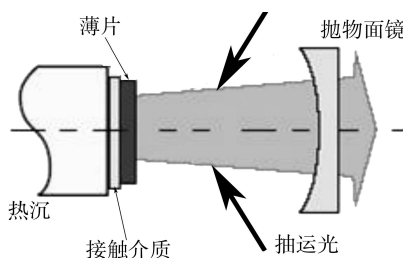


图 6 薄片激光器工作示意图

次数由原来的 8 次增加到 32 次,见图 5(b)及图 6 所示。这种薄片激光器具有按比例功率放大的特性,将多个薄片晶体级联在同一个热沉上,有望得到近衍射极限的光束,光-光效率大于 30%。薄片激光器比其它棒状或板状激光器能提供更大的输出功率密度,这是因为介质板的应力反比于板的厚度,在同样应力破坏阈值条件下,薄片激光器比其它激光器能承受更大的抽运功率密度,因此一般薄片激光器的介质掺杂浓度高于其它激光器。

作为薄片激光器的一个应用是能动镜激光器(AMIL)<sup>[8]</sup>。在早期发展固体激光器历程中,人们已认识到由于抽运光在介质内发热引起光学畸变的主要原因是介质内横向温度梯度分布,这个梯度分布可通过与激光轴平行的方向排出热量来减小。对于薄片介质,其废热排除的方向与激光束同轴,故温度梯度很小,并且是一维的热流,因此薄片激光器很少受热变形影响。另外大的圆径可以减少光束衍射损耗,具有良好的光束质量。Boeing 公司<sup>[11,12]</sup>在 1992 年首先研制出 LD 抽运 Nd:GGG 能动镜激光器。经过多年的发展,这种结构激光器演变成小型能动镜激光器(CAMIL)。它是一个集二极管抽运激光、微通道热交换器致冷、水压夹紧光学元件等高技术于一体的紧凑结构。用于 CAMIL 的增益介质是一个厚度为 1~3mm,直径为 3~15mm 的圆盘,安装在一个具有冷却功能的刚性底盘上。这种结构可以选择的增益介质为 Nd:YAG、Nd:GGG、Nd:Glass、Yb:YAG、Yb:GGG 等材料。通过在刚性底盘上装有一个微通道热交换器,直接面对激光介质背面喷洒冷却液,与周围大气形成压力差来实现激光增益介质的固定(夹紧在底盘上),因此底盘的作用是“脊

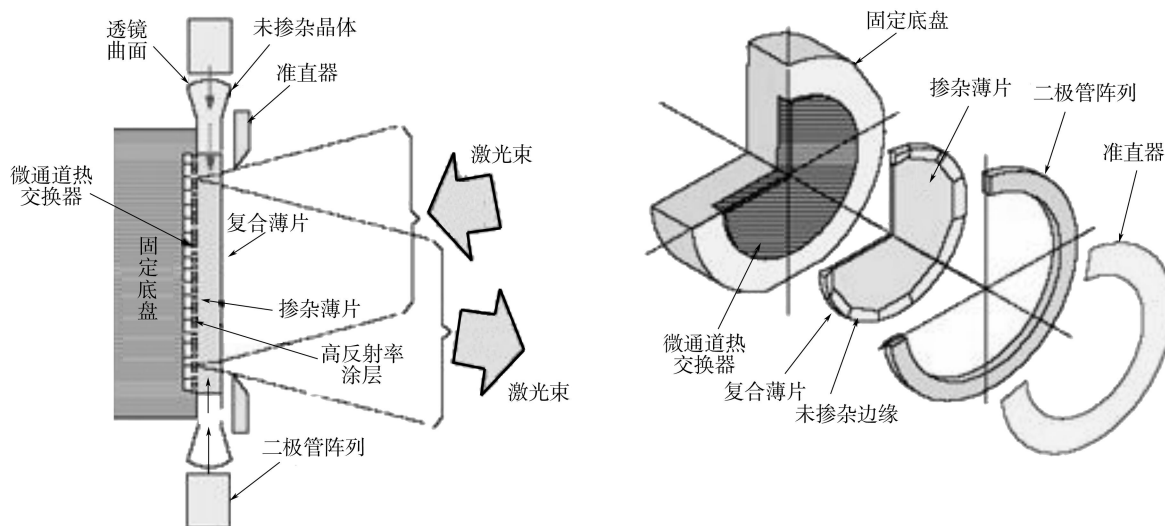


图 7 薄片介质边抽运示意图

骨”, 它保证了激光增益介质处在光学平滑状态。这项技术保证了高热流密度条件下的冷却, 有效抑制了增益盘的变形。

目前 CAMIL 的抽运方式分为二类: 面抽运和边抽运。其中面抽运是让抽运光直接入射到盘的背面或者前面。对于前者, 底盘是由相对抽运光而言的光学透明材料制成, 如熔融石英。在介质薄片的两侧镀双色膜, 经准直后的二极管阵列抽运光则通过底盘和热交换器, 再进入薄片增益介质中。由于

面抽运不太适合于低吸收截面的薄片介质, 因为很短的吸收路径(两倍薄片厚度), 迫使介质掺杂离子的浓度很高。在这种情况下采用边抽运结构无疑是一种最佳选择。抽运光从薄片边缘注入, 加大了吸收路径的长度, 介质掺杂离子浓度可以适当降低, 因此针对一些低吸收截面的准三能级增益介质, 可以选择这个方案。图 7 为边抽运的示意图。

### 3 结论

综上所述, 热容激光器、薄片激

光器是发展高平均功率激光器较好的技术途径。不仅输出功率大、光束质量好, 而且能定标放大, 做成模块化器件。例如一台输出功率为 5 kW 的热容激光器, 用半导体激光器作面抽运光源, 面抽运方式, 当光-光效率为 20%, 只需两块尺寸为 11cm×11cm×1cm 的 Nd:GGG 材料。上述两类激光器的输出功率都与激光介质横向面积成正比, 但为防止 ASE 寄生振荡的产生, 需要约束横向尺寸作为一个边界条件, 在设计激光器时应该引起注意。

### 参考文献

- 1 吕百达. 固体激光器件[M]. 北京:北京邮电大学出版社. 2002
- 2 Subrat Biswal, John Nees. Moving Laser. <http://www.eecs.umich.edu/USL/posters/pdf/Biswal-MovingLaser.pdf>
- 3 Basu Santanu, Sridharan Arun. Disk motion—a new control element in high brightness solid state laser design [J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(14):3114~3124
- 4 Kane T J, Eckardt R, Byer R. Reduced thermal focusing and birefringence in zig-zag slab geometry crystalline laser [J]. *IEEE J. Quantum. Electron.*, 1983, **19**(9):1351~1354
- 5 Kazuki Kuba, Takashi Yamamoto, Shigenori Yagi. Improvement of slab-laser beam divergence by using an off-axis unstable-state resonator[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(2):121~123
- 6 巩马理, 李晨, 柳强 等. 一种用于板条的角抽运方法及其固体激光增益模块[P]. 中国专利, 02129485, 2002
- 7 Albrecht G F, Suttow S B. Solid state heat capacity disk laser[J]. *Laser and Particle Beams*. 1998, **16**(4):645
- 8 John Vetrovec. Ultrahigh-average power solid-state laser[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4760**:491~505
- 9 <http://www.Raytheon.com>
- 10 Contag K, Karszewski, Stewen C et al.. Theoretical modeling and experimental investigations of the diode-pumped thin-disk Yb:YAG laser[M]. *Quantum. Electron.*, 1999, **29**(8):697~703
- 11 John Vetrovec. Progress in the development of solid-state disk laser[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5332**:235~243
- 12 Zapata L, Beach R. Composite thin-disk laser scaleable to 100kW average power output and beyond [J]. *Solid State Laser Technology Review*. Albuquerque N.M, 2000