

# 5 kW Nd:YAG 端面抽运板条激光器及其 光束质量提升

王君涛<sup>1,2</sup>, 童立新<sup>1,2</sup>, 徐浏<sup>1,2</sup>, 吴振海<sup>1,2</sup>, 李密<sup>1,2</sup>, 陈小明<sup>1,2</sup>,  
陈月健<sup>1,2</sup>, 汪丹<sup>1,2</sup>, 周唐建<sup>1,2\*</sup>, 胡浩<sup>1,2</sup>, 高清松<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

<sup>2</sup>中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

**摘要** 理论分析了影响二极管端面抽运 Nd:YAG 板条激光放大器放大效率的因素, 设计了主振荡功率放大板条连续激光器。使用 1064 nm 窄线宽光纤激光器作为种子源, 采用两个 Nd:YAG 板条激光放大器先串接再双程放大的技术路线。两个 Nd:YAG 板条激光放大器的尺寸结构完全相同, Nd:YAG 板条的尺寸均为 150.2 mm×2.5 mm×30 mm, 每个板条都是半导体激光器阵列双端抽运。放大器抽运源总功率为 21.6 kW 时, 实现了 5.4 kW 连续激光的输出, 光-光转换效率为 24.8%, 光束质量  $\beta$  为 3.5。在输出光路位置使用狭缝空间滤波器, 光束质量  $\beta$  可以提升为 2.5。

**关键词** 激光器; 固体激光器; 激光放大器; 板条; 空间滤波器

中图分类号 T248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0101003

## 5 kW End-Pumped Nd:YAG Slab Lasers and Beam Quality Improvement

Wang Juntao<sup>1,2</sup>, Tong Lixin<sup>1,2</sup>, Xu Liu<sup>1,2</sup>, Wu Zhenhai<sup>1,2</sup>, Li Mi<sup>1,2</sup>, Chen Xiaoming<sup>1,2</sup>,  
Chen Yuejian<sup>1,2</sup>, Wang Dan<sup>1,2</sup>, Zhou Tangjian<sup>1,2</sup>, Hu Hao<sup>1,2</sup>, Gao Qingsong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics,  
Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** The factors that influence the amplification efficiency of diode end-pumped Nd:YAG slab laser amplifier are theoretically analyzed, and a master oscillator power amplifier continuous wave laser system is designed. A narrow linewidth 1064 nm fiber laser is used as the seeder, and series and then double pass on two Nd:YAG slab laser amplifier is followed. The two Nd:YAG slab laser amplifiers have the same configuration, with the slab of 150.2 mm×2.5 mm×30 mm, which are pumped in double end by diode laser array (DLA). The continuous laser is output when the amplifier is pumped at 21.6 kW, with output power of 5.4 kW, optical to optical efficiency of 24.8%, and beam quality  $\beta$  of 3.5. Furthermore, the beam quality could be improved to 2.5 with the help of spatial filter.

**Key words** lasers; solid-state laser; laser amplifier; slab; spacial filter

**OCIS codes** 140.3580; 140.3280; 140.3530

## 1 引言

二极管抽运的全固态激光器具有性能稳定、结构紧凑、光束质量好等特点, 在工业加工、激光医疗、

军事国防和科学研究等方面有着广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。高功率时传统的棒状固体激光器在介质中的热效应十分严重, 而之字形(zigzag)板条固体激光器在厚度方向上(温度梯度方向)沿 zigzag 路径传播, 热效

收稿日期: 2017-07-12; 收到修改稿日期: 2017-07-18

作者简介: 王君涛(1984—), 男, 博士, 主要从事二极管抽运固体激光器技术等方面的研究。E-mail: wjt\_caep@126.com

\* 通信联系人。E-mail: zt\_jian@sina.com

应的影响被极大地降低,其光束质量较好,输出功率较高,因此近 20 年来 zigzag 板条激光器一直是研究热点<sup>[6-11]</sup>。

美国诺格公司代表着高功率板条激光器研发技术的最高水平。2006 年,诺格公司通过将两路激光相干合成获得了 19 kW 的功率,光-光转换效率为 30%,光束质量优于两倍衍射极限<sup>[7]</sup>。每路激光为主振荡功率放大结构,光纤激光器作为种子源,经板条多级放大,输出功率为 10 kW。2009 年,在美国联合固体高功率计划(JHPSSL)第 3 阶段的支持下,诺格公司采用相干合成 7 路板条激光实现了 105 kW 的高功率输出,光束质量(BQ, $\beta$ )优于 3 倍衍射极限<sup>[8]</sup>。每条激光链路采用完全相同的结构,单路输出功率为 15 kW。采用 1 W 的单频连续 1064 nm 光纤激光器作为种子源,种子光分束后分别进入掺镱光纤激光放大器获得 200 W 的连续激光输出,之后进入由 4 个模块组成的双程放大链路中,实现了每路 15 kW 的激光输出。

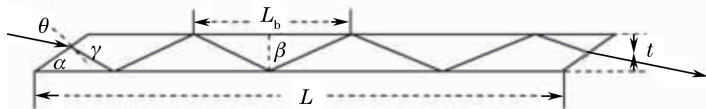


图 1 板条中 zigzag 光路示意图

Fig. 1 Schematic of zigzag light path in slab

激光在板条内部传输光路需满足两个条件:大面全反射和整数个传播周期,只有满足这两条件才能保证激光在板条内部传输和出射板条端面时损耗最小。根据光线的折射定律、反射定律和在板条中传输的特点,不考虑掺杂区和非掺杂区的折射率差异,满足

$$L = N \times L_b = N \times 2 \times t \times \tan \beta, \quad (1)$$

$$\sin \gamma = \sin \theta / n, \quad (2)$$

$$\beta = \alpha + \gamma, \quad (3)$$

式中  $L$  为板条长度,  $L_b$  为板条内光线一个传播周期的长度,  $N$  为光路在板条内部反射的周期数,  $t$  为板条的厚度,  $\beta$  为板条内部光线在大面上的入射角,  $n$  为板条的折射率,  $\theta$  为光线在板条端面的入射角,  $\gamma$  为光线进入板条端面的折射角,  $\alpha$  为板条端面与大面的夹角。根据各参数可以计算得到光线在板条端面的入射角  $\theta$ , 如表 1 所示。因此对板条的无损

表 1 不同传播周期数对应的端面入射角度

Table 1 Incident angle for different  $N$

| $N$                   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\theta / (^{\circ})$ | 45.1 | 41.3 | 37.7 | 34.4 | 31.2 | 28.2 | 25.4 |

本文以高功率窄线宽线偏振 1064 nm 光纤激光器作为种子源,以双端抽运大面传导冷却的键合 Nd:YAG 晶体板条作为激光放大器,通过理论分析计算优化放大器链路结构,研究激光输出性能。采用两个放大器先串接再双程放大的结构,在放大器抽运光总功率 21.6 kW 时,实现了 5.4 kW 连续激光输出,光-光转换效率为 24.8%,光束质量  $\beta$  为 3.5。并简单说明了一维空间滤波器对激光光束的净化效果的影响,光束质量  $\beta$  可以提升到 2.5。

## 2 激光链路设计

激光放大板条晶体 Nd:YAG 尺寸为 150.2 mm × 30 mm × 2.5 mm (长 × 宽 × 厚),端面与大面的夹角为 45°。长度方向上中间 120 mm 为掺杂区,掺杂浓度为 0.1% (指原子数分数,下同),两端各 15 mm 为非掺杂的 YAG 晶体。在板条大面镀有 SiO<sub>2</sub> 倏逝膜,为大面的反射光线提供全反射条件,激光在板条中宽度方向上走 zigzag 光路,如图 1 所示。

耗传输光路而言,有多个路径可供选择,可以使用不同的角度实现多程放大。

放大器增益模块光路示意图如图 2 所示。抽运源为 808 nm 的半导体激光器阵列(DLA),抽运光经过光束整形后从大面进入板条内部,在 45° 切角的端面上全反射进入掺杂区被吸收。两个微通道冷却器分别焊接在板条的两个大面上,以实现高效率的散热冷却。

两个抽运源的最高抽运功率都是 5.4 kW,耦合系统的效率为 90%,因此进入板条内部的总抽运光功率约 9.7 kW。考虑到材料的吸收效率,实际吸收抽运光约为 9.2 kW。图 3 给出了全功率抽运时板条内部的理论小信号增益系数分布。

使用两个板条激光放大器,考虑两种光路排布。一种是先串接再双程放大,即将两个放大器模块串接在一起走双程放大;另一种是先双程放大再串接,即先在一个板条上走双程放大,输出光束进入另一个板条后再双程放大。假如进入板条的种子光功率为 150 W,两种光路的板条内部功率分布分别如图 4 和图 5 所示,模拟计算过程中没有考虑放大自发辐射(ASE)的影响。

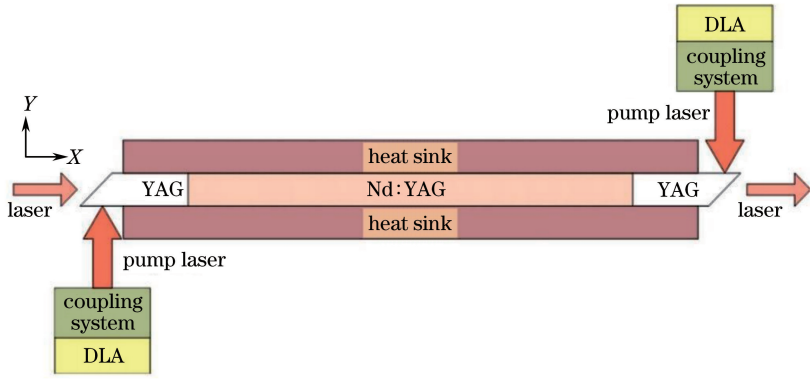


图 2 放大器增益模块示意图

Fig. 2 Schematic of amplifier gain unit

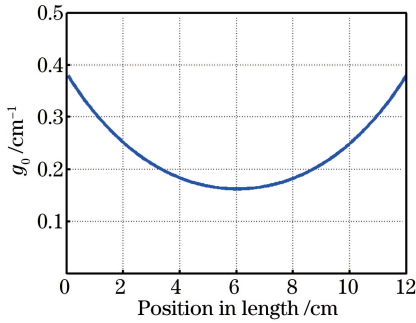


图 3 小信号增益系数分布理论计算结果

Fig. 3 Theoretical result of small signal gain coefficient distribution

图 4 是先串接再双程放大光路中两个板条内不同位置的功率分布。图 4(a) 是第 1 个板条放大器两个方向的激光功率, 第 1 通放大后的输出功率为 313 W, 第 2 通放大后的输出功率为 6293 W。图 4(b) 是第 2 个板条放大器两个方向的激光功率, 第 1 通放大后的输出功率为 981 W, 第 2 通放大后的输出功率为 3074 W。

图 5 是先双程放大再串接光路中两个板条内不同位置的功率分布。图 5(a) 是第 1 个板条放大器双程放大时的功率, 第 1 通放大后的输出功率为 617 W, 第 2 通放大后的输出功率为 2485 W。

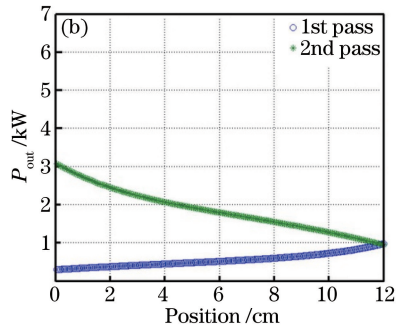
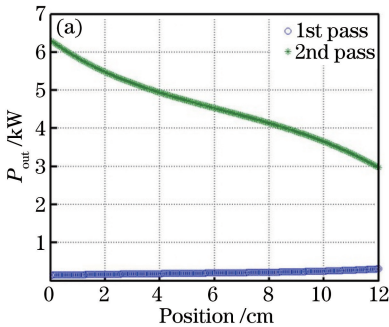


图 4 先串接再双程放大光路中两个板条内不同位置的功率分布。(a) 板条 1; (b) 板条 2

Fig. 4 Power distribution of different positions within two slabs for "series and then 2-pass". (a) Slab 1; (b) slab 2

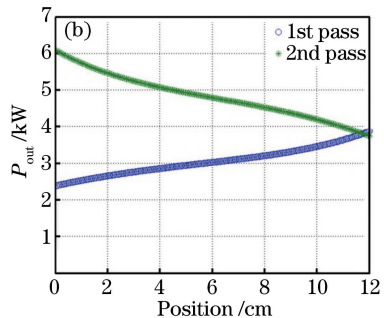
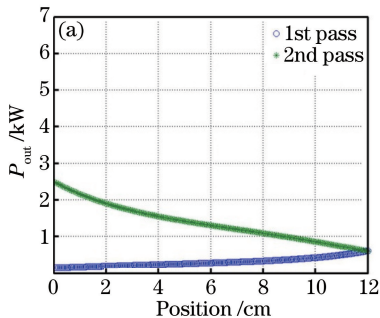


图 5 先双程放大再串接光路中两个板条内不同位置的功率分布。(a) 板条 1; (b) 板条 2

Fig. 5 Power distribution of different positions within two slabs for "2-pass and then series". (a) Slab 1; (b) slab 2

图 5(b)是第 2 个板条放大器双程放大时的功率,第 1 通放大后的输出功率为 3493 W,第 2 通放大后的输出功率为 6130 W。

对比两种光路的放大输出功率,在相同的抽运条件下,先串接再双程放大的功率更有优势。此外,在先双程放大再串接的第 1 个板条中,即图 5(a)中,由于提取效率低,ASE 严重,实际的提取效率和输出功率会更低,相应地也会影响到第 2 个放大器的效率和输出功率。

根据上述计算和分析,最终选用先串接再双程放大的放大器方案,整个主振荡功率放大(MOPA)系统的光路示意图如图 6 所示。种子源为线偏振的 1064 nm 光纤激光器,输出功率为 350 W,此时线宽小于 0.4 nm,光束质量  $M^2$  小于 1.5(此处的光束质量仅适用于高斯光束)。法拉第隔离器用来保护种子源免受后向回光的影响,保持系统稳定。用于光纤激光器输出的是圆形近高斯光斑,而板条的入口为矩形,因此需要对两个方向的光斑作不同比例的扩束,整形为椭圆形光斑。板条入口相当于一个光阑,取中心相对均匀的部分进入板条,种子光在这一步的功率损耗较大。为了实现尽量小的级间损耗,从板条出口到入口之间的光路采用  $4f$  成像光路。

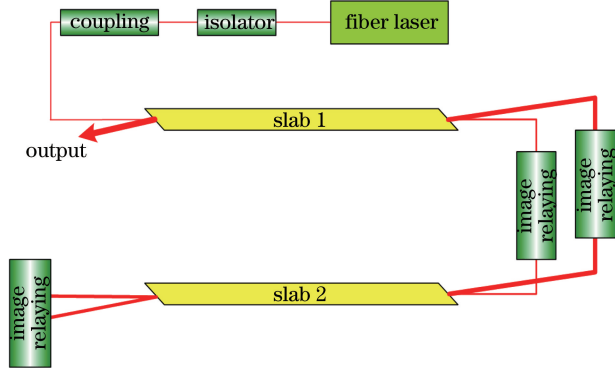


图 6 激光器系统光路原理示意图

Fig. 6 Opticalpath schematic of laser system

### 3 实验结果与分析

测试 MOPA 系统输出功率之前,对放大器增益模块的性能进行表征。板条激光放大器的增益介质透光截面荧光如图 7(a)所示,可见在宽度方向(图中竖直方向)有着均匀的强度分布。图 7(b)是以特定角度通过板条后的透射波前,中间 27 mm 宽度范围内的波前畸变峰谷值(PV)小于  $0.4 \mu\text{m}$ 。

激光放大器的输出功率与抽运功率之间的关系曲线如图 8 所示。经过整形耦合和板条放大链路损

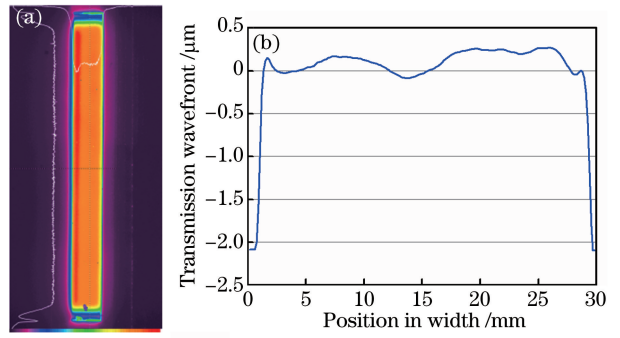


图 7 (a) 板条透光截面荧光分布;(b) 传输透射波前  
Fig. 7 (a) Fluorescence distribution of slab light cross section; (b) transmission wavefront

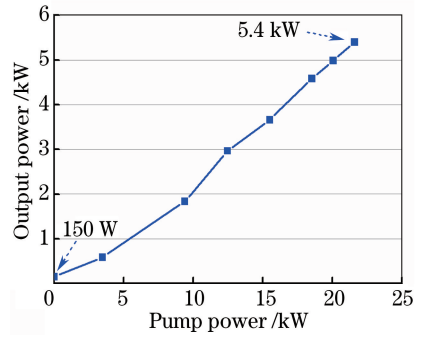


图 8 输出功率曲线测试结果

Fig. 8 Output power as a function of pump power

耗后的种子光功率为 150 W,放大后最高输出功率为 5400 W。在低功率抽运时斜率效率不断提高,高功率后斜率效率基本保持稳定。在最高输出功率下,相对于抽运源功率的光-光转换效率为 24.8%,相对于进入板条增益介质的光-光转换效率为 27.5%。

将板条输出的矩形光斑在水平和垂直方向上分别进行扩束,整形成为正方形光斑,最高输出功率时的光束波前如图 9(a)所示,远场光斑如图 9(b)所示,对应的光束质量  $\beta$  为 3.5。

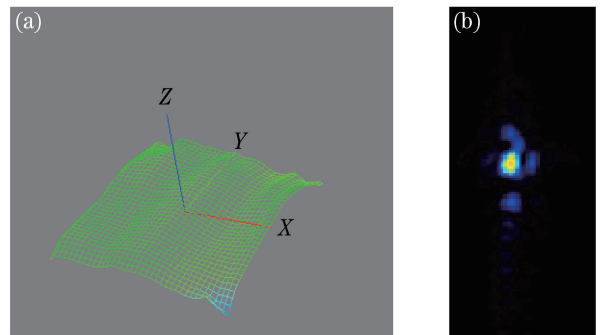


图 9 (a) 5.4 kW 输出时的波前;  
(b) 5.4 kW 输出时的远场光斑

Fig. 9 (a) Wavefront at output power 5.4 kW;  
(b) far field spot at output power 5.4 kW

将实测数据与理论计算结果对比,同样的抽运功率下,理论输出功率为 6293 W,实际输出功率却只有5400 W。其差别主要来自 ASE。小信号注入放大,注入光强为 200 W/cm<sup>2</sup>,远小于饱和光强。相对于进入板条的光-光转换效率只有 27.5%,提取功率与理论上可形成的总储能的比例(即提取效率)只有约 40%,有 60%的储能以荧光形式消耗掉。在种子光放大利用储能的同时,ASE 也在消耗储能,使实际输出功率与理论计算有一定偏差。通过理论计算,如果将注入种子光功率提高到 1 kW,不考虑 ASE 时,理论输出功率可以提高到 7969 W,因此提取效率越高,ASE 的影响越小,实际输出功率更加接近理论计算数值。

为了研究激光光束净化,将板条输出的光束用楔镜分光,反射光束经过相同的扩束整形系统,进入光束质量测试系统。在扩束光路的焦点位置,在板条宽度方向使用一维的狭缝空间滤波器,得到了光束的远场光斑分布。图 10 给出了使用狭缝滤波器前后的光束远场光斑,图 10(a)中红色方框中的光斑被滤波器净化掉。板条宽度方向光束质量  $\beta$  由之前的 6.0 倍衍射极限改善到 3.7 倍衍射极限,整体光束质量  $\beta$  由之前的 3.5 倍衍射极限改善到 2.5 倍衍射极限。

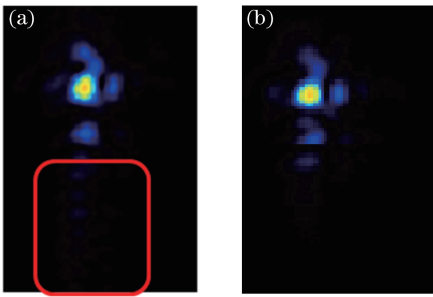


图 10 光束远场光斑。(a)使用空间滤波器前;  
(b)使用空间滤波器后

Fig. 10 Far-field spot of the beam. (a) Without spacial filter; (b) with spacial filter

## 4 结 论

理论分析对比了两种放大光路中板条激光放大器效率和输出功率,设计了主振荡功率放大板条激光器。使用窄线宽 1064 nm 光纤激光器作为种子源,采用两个 Nd:YAG 板条激光放大器先串联再双程放大的技术路线。放大器抽运源总功率为 21.6 kW 时,实现了 5.4 kW 连续激光输出,光-光转换效率 24.8%,光束质量  $\beta$  为 3.5。在此基础上增加

放大级数,实现高通量激光提取放大,可进一步显著提高输出功率和效率。该系统作为后续板条激光放大器的注入光源,为后续放大器提供了长期稳定的种子激光输出。

## 参 考 文 献

- [1] Ma G L, Li L Q, Chen Y B. Effect of energy ratio on dual beam laser welding characteristics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0302003.  
马国龙, 李俐群, 陈彦宾. 能量比对双光束激光焊接特性的影响 [J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0302003.
- [2] George R, Walsh L J. Performance assessment of novel side firing safe tips for endodontic applications [J]. Journal of Biomedical Optics, 2011, 16(4): 048004.
- [3] Yi H Y, Qi Y, Huang J J. Development of ship-based laser weapons system [J]. Laser Technology, 2015, 39(6): 834-839.  
易亨瑜, 齐予, 黄吉金. 舰载激光武器的研制进展 [J]. 激光技术, 2015, 39(6): 834-839.
- [4] Yin L, Ma X H, Lu T T, *et al.* Conductively-cooled and bounce-pumped all-solid-state double-stage slab laser amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2340-2345.  
尹亮, 马秀华, 陆婷婷, 等. 传导冷却反弹抽运结构的板条激光放大器 [J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2340-2345.
- [5] Chen J B, Guo S F. Review on technical approaches of high energy solid-state lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0602006.  
陈金宝, 郭少锋. 高能固态激光器技术路线分析 [J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602006.
- [6] Sridharan A K, Saraf S, Sinha S, *et al.* Zigzag slabs for solid-state laser amplifiers: batch fabrication and parasitic oscillation suppression [J]. Applied Optics, 2006, 45(14): 3340-3351.
- [7] Goodno G D, Komine H, McNaught S J, *et al.* Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers [J]. Optics Letters, 2006, 31(9): 1247-1249.
- [8] McNaught S J, Asman P, Charles H, *et al.* 100-kW coherently combined Nd:YAG MOPA laser array [C]. Frontiers in Optics, 2009: FT4D.2.
- [9] Li M, Hu H, Gao Q S, *et al.* Dual concentration doped Nd:YAG composite ceramic slab laser with high power [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0514003.  
李密, 胡浩, 高清松, 等. 高功率双浓度掺杂的 Nd:YAG 复合陶瓷板条激光器 [J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0514003.
- [10] Wu Z H, Xu L, Wang J T, *et al.* Depolarization

feature and polarization control in end-pumped Nd:YAG slab lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0114001.

吴振海, 徐浏, 王君涛, 等. 端抽运 Nd:YAG 板条激光器的退偏特性及偏振控制 [J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0114001.

[11] Liu Y, Tang X J, Wang Z, *et al.* Laser diode end pumped Nd:YAG surface gain slab lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1001004.

刘洋, 唐晓军, 王喆, 等. 激光二极管端面抽运 Nd:YAG表层增益板条激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1001004.