

高功率双掺杂浓度板条激光技术研究

李 密^{1,2,3} 胡 浩^{2,3} 唐 淳^{2,3} 雷 军^{2,3} 汪 丹^{2,3}
陈小明^{2,3} 周唐建^{2,3} 李建民^{2,3} 吕文强^{2,3} 赵 娜^{2,3} 邬映臣^{2,3}

¹中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088

²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

³中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 开展了高功率双掺杂浓度板条激光技术的理论与实验研究,通过分段掺杂有效降低了板条长度方向上的吸收抽运功率密度的不均匀性,显著提高了单个激光板条的平均储能密度,总储能提高了 39%。当二极管总抽运功率为 15 kW 时,3 kW 的种子光源通过双掺杂板条可提取 5.16 kW 的功率,这个数值相比单掺杂板条增加了 36%,且光光转换效率为 34.4%,与理论预期基本相符。

关键词 激光技术; 板条激光器; 光光转换效率; 分段掺杂; 储能密度

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0914004

Research on High Power Slab Laser Technology with Dual Doped Concentration

Li Mi^{1,2,3} Hu Hao^{2,3} Tang Chun^{2,3} Lei Jun^{2,3} Wang Dan^{2,3} Chen Xiaoming^{2,3}
Zhou Tangjian^{2,3} Li Jianmin^{2,3} Lü Wenqiang^{2,3} Zhao Na^{2,3} Wu Yingchen^{2,3}

¹Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

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

³Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract The theoretical and experimental research on high power slab laser with dual doped concentration are conducted. By means of segmented doping, the non-uniformity in absorption pumping power density along the length of laser slab is effectively reduced, the average energy-storage density of single laser slab is obviously enhanced, and the total energy-storage increases by 39%. When the total pumping power of the diode is 15 kW, after passing through the dual doped laser slab, the 3 kW seed light source can extract a power of 5.16 kW, which increases by 36% if compared with that for single doped laser slab. The optical-to-optical conversion efficiency is 34.4%, which is basically consistent with the theoretical prediction.

Key words laser technology; slab laser; optical-to-optical conversion efficiency; segmented doping; energy-storage density

OCIS codes 140.3460; 140.2010; 140.3410; 140.3480; 140.3530; 140.3580

1 引 言

基于端面抽运的主振荡功率放大(MOPA)板条激光技术是实现高平均功率二极管抽运固体激光器的有效途径之一,近年来受到广泛关注。2005年,美国诺格公司通过相干合成获得了 27 kW 的平均输出功率,工作时间达 350 s,光束质量优于两倍衍射极限^[1]。2009年,美国诺格公司采用 7 路相干合成获得了平均输出功率为 105 kW、光束质量约三倍衍射极限的高功率激光输出^[2-3]。该相干合成激光器的放大器链路是由

收稿日期: 2016-05-04; **收到修改稿日期:** 2016-05-23

作者简介: 李 密(1981—),男,博士研究生,主要从事固体激光技术及应用方面的研究。E-mail: limi@tsinghua.org.cn

导师简介: 唐 淳(1967—),男,研究员,博士生导师,主要从事固体激光技术及应用方面的研究。

E-mail: tangchun21@gmail.com

Nd:YAG 激光板条组成,在稳腔提取条件下,单个激光板条的输出功率大约为 4 kW。

单掺杂浓度板条在长度方向上的吸收抽运功率密度呈指数衰减,两端键合区域的热沉积功率密度和热应力最大,最可能达到断裂极限,而中间区域的吸收抽运功率密度较小,热应力远低于断裂极限。若能实现浓度渐变掺杂,使得在板条长度方向上每个位置的吸收抽运功率密度一致,则在保证板条安全的情况下可以获得最大限度的储能,极大提高单个激光板条的输出功率^[4-5]。受晶体生长机制和键合工艺等影响,渐变掺杂或多掺杂浓度的板条加工难度太大,因此本文选择双掺杂浓度激光板条作为研究对象,研究方法同样适用于多浓度掺杂或渐变掺杂的激光板条。

本文建立了双掺杂浓度激光板条的理论分析模型,分析了其内部的抽运功率密度、温差和总抽运功率等关键参数,并通过实验测量了双掺杂浓度激光板条的输出功率。

2 双掺杂浓度激光板条理论设计

单掺杂浓度激光板条在长度方向上的温度分布曲线如图 1 所示,其中 A、C 区域为键合区,B 区域为板条长度方向中间区。由图可知,键合区与板条长度中间区的温差通常大于 20 °C,中间区域未能实现充分抽运,这会限制激光板条的最大储能和可提取功率。在不影响板条安全的情况下,渐变掺杂和分段掺杂可以有效地提高中间区域的抽运功率密度,从而提高整个激光板条的总储能。

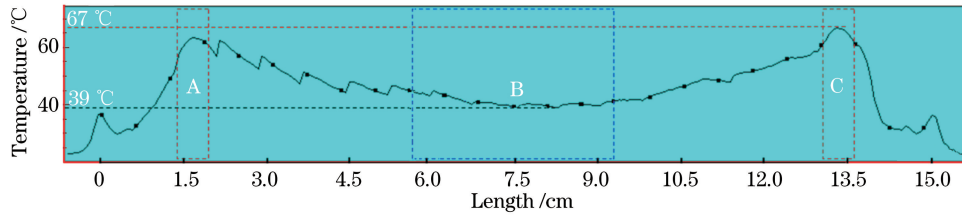


图 1 单掺杂浓度激光板条长度方向上的温度分布

Fig. 1 Temperature distribution along length direction of laser slab with single doped concentration

对于渐变掺杂浓度激光板条,对双端进行对称抽运,长度方向上的吸收功率密度为

$$\rho(z) = I_0 \beta(z) \left\{ \exp \left[- \int_0^z \beta(u) du \right] + \exp \left[- \int_z^L \beta(v) dv \right] \right\}, \quad (1)$$

式中 I_0 为单端抽运功率密度, $\beta(z)$ 、 $\beta(u)$ 和 $\beta(v)$ 分别为板条长度方向上位置 z 、 u 和 v 处对抽运光的吸收系数, L 为板条掺杂区的总长度。由(1)式可知,由两端向中间逐渐升高的掺杂方式可使板条长度方向不同位置的吸收抽运功率密度完全一致,但受晶体生长和键合工艺等因素的影响,双掺杂浓度板条是相对合适的选择。

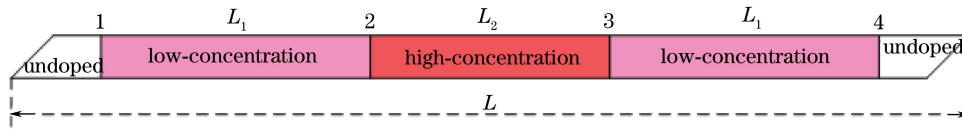


图 2 双掺杂浓度激光板条结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of laser slab with dual doped concentration

双掺杂浓度板条结构如图 2 所示,其中 L_1 为两个低掺杂区域的长度, L_2 为高掺杂区域的长度,1,2,3,4 分别为 4 个键合面。对于双掺杂浓度键合板条,板条内部的抽运功率密度沿长度方向的分布为

$$I(z) = I_0 \times \begin{cases} \exp(-\beta_1 z) + \exp[-\beta_1 L_1 - \beta_2 L_2 - \beta_1 (L_1 - z)], & 0 < z < L_1 \\ \exp[-\beta_1 L_1 - \beta_2 (z - L_1)] + \exp[-\beta_1 L_1 - \beta_2 (L_1 + L_2 - z)], & L_1 < z < L_1 + L_2 \\ \exp(-\beta_1 L_2 - \beta_2 L_2 - \beta_1 z) + \exp[-\beta_1 (2L_1 + L_2 - z)], & L_1 + L_2 < z < 2L_1 + L_2 \end{cases}, \quad (2)$$

式中 β_1 为低掺杂区的吸收系数, β_2 为高掺杂区的吸收系数。为了实现抽运光吸收效率不小于 95%, 需要满足

$$1 - \exp(-2\beta_1 L_1 - \beta_2 L_2) \geq 95\%。 \quad (3)$$

由(2)、(3)式可知,4个键合面位置的吸收抽运功率密度为极大值,为保证板条安全并尽可能获得更多的储能,4个键合面处的吸收抽运功率密度应当基本一致并接近安全极限:

$$\beta_1 I_0 [1 + \exp(-2\beta_1 L_1 - \beta_2 L_2)] = \beta_2 I_0 [\exp(-\beta_1 L_1) + \exp(-\beta_1 L_1 - \beta_2 L_2)]。 \quad (4)$$

在忽略宽度方向和长度方向热传导的近似处理下,板条厚度方向温度分布基本上是一维梯度分布,板条表面与中心之间的最大温差为^[6]

$$\Delta T = \frac{Qt^2}{8K}, \quad (5)$$

式中 t 为板条厚度, Q 为板条热沉积功率密度, K 为板条的热导率。在板条内部出现裂纹之前,板条表面与中心之间能够容许的最大温差为^[6]

$$\Delta T_{\max} = \frac{3R}{2K}, \quad (6)$$

式中 R 为热冲击波参量。当安全系数不超过 0.5 时,最大热沉积功率密度应满足

$$\frac{Q_{\max} t^2}{8K} \leq 0.5 \times \frac{3R}{2K}。 \quad (7)$$

双掺板条内部的热沉积功率密度最大位置为 4 个键合面,由(4)、(7)式可知

$$\beta_1 I_0 [1 + \exp(-2\beta_1 L_1 - \beta_2 L_2)] \eta_h \leq \frac{6R}{t^2}, \quad (8)$$

式中 η_h 为产热比(非提取条件下的产热比约为 43%,充分提取条件下的产热比约为 32%)。设双端总抽运功率为 P_0 ,抽运耦合效率为 η_c ,板条宽度和厚度分别为 w 和 t ,由(8)式可得

$$\beta_1 \frac{P_0 \eta_c}{2wt} \eta_h [1 + \exp(-2\beta_1 L_1 - \beta_2 L_2)] \leq \frac{6R}{t^2}, \quad (9)$$

由(9)式可得双端对称抽运时的最大总抽运功率

$$P_{\max} = \frac{12Rw}{[1 + \exp(-2\beta_1 L_1 - \beta_2 L_2)] \beta_1 \eta_h \eta_c t}。 \quad (10)$$

由(10)式可知,最大抽运功率与宽度 w 成正比,与厚度 t 成反比。减小板条厚度可以实现更高功率抽运,但同时可能会导致抽运耦合效率下降、激光传输衍射损耗增大等。对于激光板条而言,激光传输时的菲涅耳数由下式决定^[7]

$$N = \frac{a^2}{\lambda L_e}, \quad (11)$$

式中 N 为菲涅耳数, a 为激光光束的半厚度, λ 为激光波长, L_e 为激光束在板条内按照“之”形光路传输的实际路径长度。为了避免传输时有较大的衍射损耗,菲涅耳数通常不小于 10。当 $L_e \geq 160$ mm 时,计算出 $a \geq 1.25$ mm,因此板条厚度应不小于 2.5 mm。

根据 Nd:YAG 晶体吸收系数与掺杂浓度和激光二极管阵列(LDA)发射波长的对应关系,设计两个低掺杂区和高掺杂区的长度均为 43.3 mm(掺杂区总长度为 130 mm)。根据(3)、(4)式可以推算出,当低掺杂区和高掺杂区的吸收系数分别为 $\beta_1 = 0.18 \text{ cm}^{-1}$ 和 $\beta_2 = 0.34 \text{ cm}^{-1}$ 时,可以保证 95% 以上的吸收效率,并且板条内 4 个键合面的热沉积功率密度的差异在 2% 以内。

图 3 为单掺杂和双掺杂激光板条在长度方向上不同位置吸收的抽运功率密度的归一化分布曲线。由图可知,双掺杂浓度设计显著提高了板条长度方向上中间区域吸收的抽运功率密度,整个掺杂区吸收抽运功率密度的平均值达到最大值的 76.4%,而单掺杂板条整个掺杂区吸收的抽运功率密度的平均值还不到其最大值的 60%,可见双掺杂设计大大提高了平均储能密度。当 $L_1 = L_2 = 43.3$ mm、 $\beta_1 = 0.18 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\beta_2 = 0.34 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\eta_c = 96\%$ 、 $w = 30$ mm、 $t = 2.5$ mm 时,由(10)式可知,在非提取条件下双端总抽运功率可以达到 15 kW。

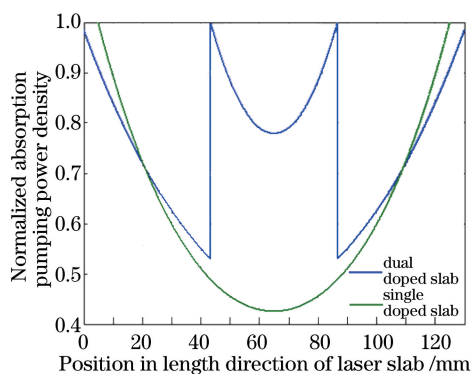


图 3 单、双掺杂浓度板条长度方向上归一化的吸收抽运功率密度
Fig. 3 Normalized absorption pumping power density along the length direction of slabs with single and dual doped concentrations

3 实验结果及分析

根据上面的设计参数制作了双掺杂的激光板条,并测量了实际可提取功率。图 4 所示为双掺激光板条实物图,采用双端对称抽运结构,抽运传输效率(即入射到板条端面的抽运功率与 LDA 的发射功率的比值)大约为 96%,双端 LDA 的最大总抽运功率为 15 kW。



图 4 双掺杂激光板条实物
Fig. 4 Real object of laser slab with dual doped concentration

为了测量双掺杂激光板条的可提取功率,将一束功率大约为 3 kW、口径为 26 mm×2.5 mm 的 1064 nm 种子光按照不同的选通角两次通过双掺杂激光板条^[8],经过双通放大之后,由激光束功率的增加量可得到从激光板条中实际提取出的激光功率。

图 5 所示为双掺杂浓度激光板条的功率提取光路示意图,其中 M_1 、 M_2 和 M_3 为平面反射镜, F_1 和 F_2 为焦距为 f 的球透镜,种子光入射角分别为 45° 和 31.2° (对应的“之”形路径长度分别为 162 mm 和 170 mm)。

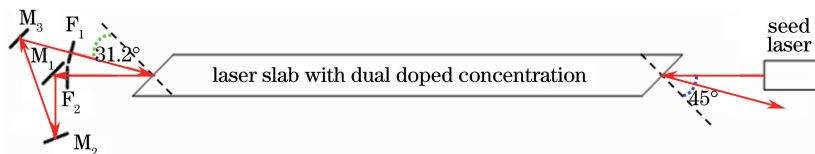


图 5 双掺杂浓度板条功率提取光路示意图
Fig. 5 Schematic diagram of power-extracting optical path of laser slab with dual doped concentration

实验中测得种子光在入射到板条之前的功率为 3140 W,而双通传输之后的功率为 2620 W,双通总传输效率大约为 83.4%,对应的双通传输损耗大约为 16.6%、单通传输损耗大约为 8.7%。双掺杂浓度板条在 10.1 kW 和 15.0 kW 抽运功率下的可提取功率见表 1。

表 1 双掺杂浓度激光板条的实际提取功率

Table 1 Actual extracted power of laser slab with dual doped concentration

| Pumping power /kW | Output laser power without pumping /W | Output laser power with pumping /W | Actual extracted laser power /W | Optical-to-optical conversion efficiency /% |
|-------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---|
| 10.1 | 2620 | 6082 | 3462 | 34.3 |
| 15.0 | 2620 | 7778 | 5158 | 34.4 |

由表 1 可知,当抽运功率为 10.1 kW 和 15.0 kW 时,双掺杂浓度激光板条的光光转换效率均在 34% 左右,该数据略低于之前单掺杂板条 35% 的光光转换效率,主要是键合面的增加导致了板条内部激光传输效率有所下降。因此,激光晶体板条多段键合的掺杂浓度种类不宜过多。

由(10) 式可知,在双端对称抽运下,单掺杂板条($\beta_1 = \beta_2 = 0.25 \text{ cm}^{-1}$)的最大总抽运功率为 10.8 kW,实际提取功率为 3.8 kW。双掺杂板条与单掺杂板条相比,总的抽运功率由 10.8 kW 提高到 15 kW(提升比例为 39%),而实际可提取功率则由 3.8 kW 提高到 5.16 kW(提升比例为 36%),因此双掺杂明显提高了板条的储能和可提取功率。

当注入激光口径为 26 mm×2.5 mm、总功率为 3140 W 时,相应的种子光功率密度 $I_1 = 4830 \text{ W/cm}^2$ 。当双端总抽运功率为 15 kW、抽运光经过抽运耦合系统的传输效率为 96%、抽运光在板条端面的耦合效率为 98%时,相应的单端注入抽运功率密度 $I_0 = 9400 \text{ W/cm}^2$ 。在不考虑放大自发辐射(ASE)效应的情况下,根据四能级系统的粒子数速率方程,可以推导出激光增益介质内长度方向上不同位置的小信号增益系数 $g_0(z)$ 为

$$g_0(z) = \frac{\sigma\eta\tau}{h\nu_0}\beta(z)I(z), \quad (12)$$

式中受激发射截面 $\sigma = 2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 、量子效率 $\eta = 95\%$ 、激光上能级的荧光寿命 $\tau = 230 \mu\text{s}$, h 为普朗克常数, ν_0 为抽运光中心频率,且 $h\nu_0 = 2.46 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。

为简便起见,理论估算时将有效增益长度视为掺杂区长度 130 mm,且激光传输损耗均匀分布在掺杂区,于是得到增益区的等效传输损耗系数 $\delta = 0.0067 \text{ cm}^{-1}$ 。

以 $I_1(z)$ 表示第一通激光束(以第一个选通角入射并在板条内传输的激光束)沿板条长度方向的光强分布, $I_2(z)$ 表示第二通激光束(以第二个选通角入射并在板条内传输的激光束)沿板条长度方向的光强分布,则激光增益介质内的总光强为 $I_1(z) + I_2(z)$ 。对于双通放大过程,激光增益介质内任意位置的光强与小信号增益系数 $g_0(z)$ 以及等效传输损耗系数 δ 之间有如下关系式

$$\begin{cases} \frac{dI_1(z)}{I_1(z)dz} = \frac{g_0(z)}{1 + [I_1(z) + I_2(z)]/I_s} - \delta \\ \frac{dI_2(z)}{I_2(z)dz} = \frac{-g_0(z)}{1 + [I_1(z) + I_2(z)]/I_s} + \delta \end{cases}, \quad (13)$$

式中 I_s 为激光增益介质的饱和光强。当 $I_s = 2890 \text{ W/cm}^2$ 时,小信号增益系数分布曲线如图 6 所示。

结合边界条件 $I_1(0) = 4830 \text{ W/cm}^2$ 和 $I_1(L) = I_2(L)$,由(13) 式可知, $I_1(z)I_2(z) = C$,其中 C 为设定常数。任意设定常数 C ,采用逐次迭代的方法,最终得到同时满足边界条件和(13)式的常数 C 以及输出光强 $I_2(0)$,即 $C = 6.94 \times 10^7 \text{ W}^2/\text{cm}^4$, $I_2(0) = 14370 \text{ W/cm}^2$ 。

图 7 所示为板条内第一通和第二通的光强分布曲线,由图可知,激光增益介质内总光强 $I_1(z) + I_2(z)$ 的最小值为 16660 W/cm^2 ,大约为饱和激光光强 I_s 的 6 倍,因此通过双通放大可实现较充分的激光功率提取。

当 $I_2(0) = 14370 \text{ W/cm}^2$ 时,第二通放大出口的激光总功率 $P_2 = 9340 \text{ W}$ 。当注入的种子光功率 $P_1 = 3140 \text{ W}$ 时,理论上可以提取的激光功率 $\Delta P = P_2 - P_1 = 6200 \text{ W}$ 。实验中提取出的激光功率为 5158 W,比上述理论估算值约小 17%,实验结果与理论计算值是比较相符的。实际提取的激光功率小于理论计算值的可能原因主要有三个。

1) 实际的“之”形光路存在一定的未提取区域,在理论计算时采取的近似处理认为该部分的储能也得到提取。根据几何光路分析,可以得到光束填充因子 f 与板条端面切角 α 的关系^[9]

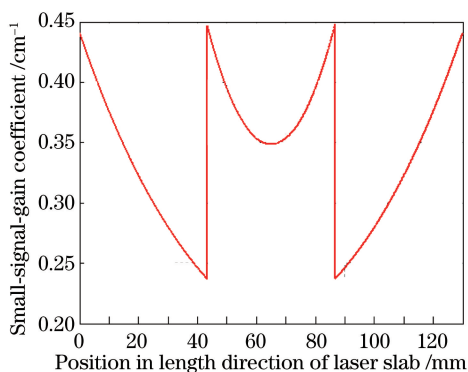


图6 双掺杂浓度激光板条长度方向的小信号增益系数分布
Fig. 6 Small-signal-gain coefficient distribution along the length direction of laser slab with dual doped concentration

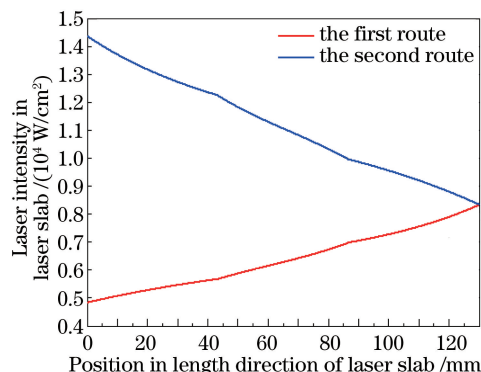


图7 激光板条内第一通和第二通的光强分布
Fig. 7 Laser intensity distribution of the first and the second routes in laser slab

$$f = \frac{\cos \gamma}{2 \sin \alpha \sin(\alpha + \gamma)}, \quad (14)$$

式中 γ 为折射角。当板条端面切角为 45° 、入射角为 45° 时,此时的折射角为 22.9° ,由(14)式可得填充因子 $f=0.7$,因而未提取的区域面积比例为 $(1-f)^2=9\%$,这一部分的储能实际上无法提取。

2) 未考虑 ASE 效应对上能级粒子数的消耗,因此估算时使用的小信号增益系数高于实际值。在大多数块状固体激光介质中,当 $g_0 l_c > 3.5$ 时就会出现很强的 ASE 效应。在该实验中,小信号增益系数与实际“之”形路径长度的乘积 $g_0 L_c$ 超过 5,因此 ASE 效应很强。另外,注入激光使得 ASE 得到抑制,但由于未提取区域的存在,ASE 效应无法完全消除,因此也会消耗部分上能级反转粒子数,导致储能减少。

3) 在加载条件下,热效应导致实际传输损耗大于双掺板条未抽运时的传输损耗。

4 结 论

开展了双掺杂浓度激光板条的理论及实验研究。在不增大板条宽度的情况下,通过双浓度掺杂可以显著提高单个激光板条的储能和实际可提取功率。当双端对称抽运功率为 15 kW 时,通过双通放大提取了 5.16 kW 的激光功率,光光转换效率达到 34.4%,与理论预期相符。实验结果表明,双浓度掺杂设计对提高单个激光板条的总储能和实际可提取功率有明显效果,进而对提高板条 MOPA 放大器的总输出功率有着较大的作用。

参 考 文 献

- Marmo J, Injeyan H, Komine H, *et al.* Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman [C]. SPIE, 2009, 7195: 719507.
- Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1605-1618.
周寿桓, 赵 鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器 [J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1605-1618.
- Feng Hanliang, Liu Yansheng, Han Feng, *et al.* Progress on development of US naval shipborne laser weapons [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 020004.
冯寒亮, 刘彦升, 韩 锋, 等. 美国海军舰载激光武器研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 020004.
- Wang Jianlei, Li Lei, Qiao Liang, *et al.* Theoretical analysis of temperature and stress distribution in end-pumped composite ceramic Nd:YAG laser slab [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1777-1783.
王建磊, 李 磊, 乔 亮, 等. 端面抽运复合 Nd:YAG 陶瓷板条激光介质温度和应力分布的理论分析 [J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1777-1783.
- Lei Chengqiang, Wang Yuefeng, Yin Zhiyong, *et al.* Theoretical analysis of pumping homogeneity in gradient dopant concentration composite slab [J]. Laser Technology, 2012, 36(3): 428-432.
雷呈强, 汪岳峰, 殷智勇, 等. 梯度浓度掺杂复合板条抽运分布均匀性的分析 [J]. 激光技术, 2012, 36(3): 428-432.
- Koechner W. Solid-state laser engineering [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang, Transl. Beijing: Science Press,

2002: 391-397.

克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙 文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 391-397.

7 Injeyan H, Goodno G D. High-power laser handbook[M]. New York: Mcgraw-Hill Professional, 2011: 187-194.

8 Wang Dan, Zhou Tangjian, Li Mi, *et al.* Measurement system of characteristic factors of end-pumped slab amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(10): 1002004.

汪 丹, 周唐建, 李 密, 等. 端抽运板条放大器特性参数测试系统[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1002004.

9 Li Mi, Hu Hao, Li Jianmin, *et al.* Technology research on high power slab laser end-pumped with laser diode arrays[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0514004.

李 密, 胡 浩, 李建民, 等. 二极管阵列端面抽运高功率板条激光器技术研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0514004.