

# 高增益 Nd:YAG 板条中的放大自发辐射抑制技术

李密<sup>1,2,3</sup>, 焦宏飞<sup>4</sup>, 邬映臣<sup>1,2</sup>, 胡浩<sup>1,2</sup>, 雷军<sup>1,2</sup>, 吕文强<sup>1,2</sup>,  
周唐建<sup>1,2</sup>, 李建民<sup>1,2</sup>, 徐浏<sup>1,2</sup>, 唐淳<sup>1,2</sup>, 赵娜<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 621999;

<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 621999;

<sup>3</sup>中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088;

<sup>4</sup>同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092

**摘要** 分析了 Nd:YAG 板条中产生强烈放大自发辐射(ASE)的原因,开展了抑制高增益激光板条中 ASE 的理论和实验研究。抽运光占空比为 8%,峰值抽运功率为 21.38 kW,波长为 1064 nm 连续探测光的注入光强为 4 W/cm<sup>2</sup>,在 Nd:YAG 板条上、下表面镀制普通倏逝膜和多层复合膜时探测光功率的放大倍率分别为 1.82 和 1.92,Nd:YAG 板条总储能增大了 4.6%。实验结果表明:通过对 Nd:YAG 板条上、下表面镀制多层复合膜,可在一定程度上抑制板条内的 ASE 效应,增大激光板条的总储能。

**关键词** 激光光学;放大自发辐射;小信号增益系数;全内反射;多层复合膜

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.1214003

## Technology of Amplified Spontaneous Emission Suppression in High Gain Nd:YAG Slab

Li Mi<sup>1,2,3</sup>, Jiao Hongfei<sup>4</sup>, Wu Yingchen<sup>1,2</sup>, Hu Hao<sup>1,2</sup>, Lei Jun<sup>1,2</sup>, Lü Wenqiang<sup>1,2</sup>,  
Zhou Tangjian<sup>1,2</sup>, Li Jianmin<sup>1,2</sup>, Xu Liu<sup>1,2</sup>, Tang Chun<sup>1,2</sup>, Zhao Na<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China;*

<sup>2</sup>*Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China;*

<sup>3</sup>*Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China;*

<sup>4</sup>*School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*

**Abstract** The causation of the generation of strong amplified spontaneous emission (ASE) in the Nd:YAG slab is analyzed, and the academic and experimental researches on suppressing ASE in high gain laser slab are developed. The pumping duty ratio is 8%, the peak pumping power is 21.38 kW and the injecting intensity of 1064 nm continuous detecting laser is 4 W/cm<sup>2</sup>. The output power amplifying ratios of the detecting laser are 1.82 and 1.92 respectively with common evanescent coating and multilayer coating. The total stored energy in the slab increases by 4.6%. The experimental results show that ASE effect can be suppressed and the total stored energy in the laser slab can increase to a certain extent when special multilayer coating is coated on the top and bottom surfaces of the slab.

**Key words** laser optics; amplified spontaneous emission; small signal gain coefficient; total internal reflection; multi-layer film

**OCIS codes** 140.2010; 140.3410; 140.3460; 140.3480

## 1 引 言

在高功率固体激光器,尤其是以准连续模式运行的高功率固体激光器中,放大自发辐射(ASE)随着激光增益介质的尺寸和抽运功率密度的增大变得严重,从而消耗并限制了激光介质中的储能<sup>[1-3]</sup>。Zig-Zag 板条

**收稿日期:** 2017-06-22; **收到修改稿日期:** 2017-07-05

**作者简介:** 李密(1981—),男,博士研究生,副研究员,主要从事固体激光方面的研究。E-mail: limi@tsinghua.org.cn

**导师简介:** 唐淳(1967—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事固体激光方面的研究。E-mail: tangchun21@gmail.com

在长度方向通常有很大的增益长度,因此在高增益条件下容易出现极强的 ASE 效应,导致输出功率降低<sup>[4]</sup>。

本文主要研究高增益 Nd:YAG 板条中 ASE 的抑制方法,通过对 Nd:YAG 板条上、下表面镀制多层复合膜以抑制 ASE 效应,在一定程度上提高了 Nd:YAG 板条的总储能。

## 2 板条内 ASE 抑制的技术途径

ASE 形成的有利条件是在激光增益介质中存在高增益和长路径,或者激光增益介质的几何尺寸并不大,但由于增益介质的某些表面具有高反射率,从而有效地增加了荧光放大的实际路径长度,在某些情况下还有可能出现寄生振荡<sup>[4]</sup>。因此,将板条的侧面打磨为粗糙的表面以减小板条侧面的反射率,可在一定程度上抑制板条内部的 ASE 效应。

激光束从 Zig-Zag 板条的一端入射,经板条的上、下表面多次反射形成 Zig-Zag 传输路径,再从板条的另一端出射。Zig-Zag 板条的上、下表面通常会镀一层厚约  $3\ \mu\text{m}$  的倏逝膜以确保主激光在其上、下表面进行全内反射<sup>[5]</sup>。减小以小于临界角入射的荧光再次进入板条内部的比例的措施主要有:1)在倏逝膜外侧设计一种针对激光波长的增透膜,当荧光入射角小于临界角的  $90\%$  时,可保证焊接层能吸收超过  $99\%$  的荧光<sup>[6]</sup>;2)将板条的侧边抛光并进行小角度倾斜,同时在侧边上黏接一种导光材料以提高板条内部荧光向外界散射逸出的几率<sup>[6]</sup>;3)将板条边缘打磨粗糙,采用一种对荧光和抽运光均透明、折射率与激光介质相匹配的黏合剂将一种荧光吸收体黏接到板条的边缘<sup>[7]</sup>;4)采用高折射率的薄膜以消除板条边缘的内反射,在板条边缘上设计一种大角度范围内对 ASE 有强吸收特性的吸收层<sup>[8]</sup>。

通过在 Nd:YAG 板条上、下表面的二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )倏逝膜(对荧光无吸收)外侧镀制一种特殊的铬(Cr)和  $\text{SiO}_2$  多层复合膜(厚度约  $1\ \mu\text{m}$ ),可有效减小以小于临界角入射到板条上、下表面的荧光再次进入 Nd:YAG 板条的比例,从而抑制板条内的 ASE 效应并提高储能。实验精确地测量了多层复合膜对于以小于临界角入射的  $1064\ \text{nm}$  荧光的吸收率等参数,测量结果如图 1 所示。

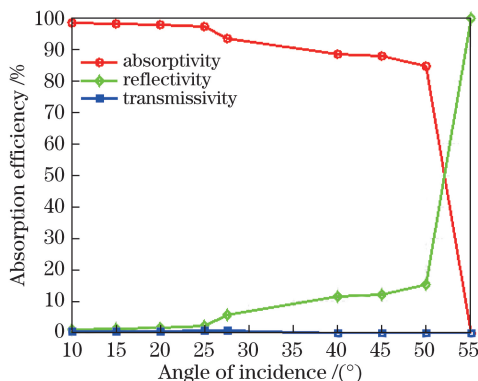


图 1 多层复合膜对波长为  $1064\ \text{nm}$  荧光的吸收效率

Fig. 1 Absorption efficiency of multi-layer film for  $1064\ \text{nm}$  fluorescence

根据图 1 的实验测量结果得到多层复合膜对于以小于板条上、下表面临界角入射的  $1064\ \text{nm}$  波长的荧光具有很高的吸收率。波长为  $1064\ \text{nm}$  的荧光按照  $0^\circ\sim 50^\circ$  入射时被多层复合膜吸收的比例超过  $85\%$ ,占整个角度范围的  $55\%$ ,这意味着 ASE 路径减少了  $55\%$ ,因而可以在一定程度上抑制板条内的 ASE 效应,提高 Nd:YAG 板条的储能。

## 3 板条内 ASE 抑制的实验结果与分析

Nd:YAG 板条端面镀波长为  $1064\ \text{nm}$  的增透膜,并采用激光二极管阵列(LDA)进行双端对称抽运,一束波长为  $1064\ \text{nm}$  的探测光按某个选通角从板条的一端入射,并从另一端出射。当板条端面切角为  $45^\circ$  时, Nd:YAG 板条的规格为  $150.2\ \text{mm}\times 30\ \text{mm}\times 2.5\ \text{mm}$ ,掺杂区长度为  $120\ \text{mm}$ ,掺杂浓度为  $0.1\%$ (原子数分数),该规格板条中激光传输的选通角(激光束出射时不分裂的入射角)的取值如表 1 所示<sup>[9]</sup>。表 1 中  $N$  为激光束在板条中传输的周期数(正整数), $\theta$  和  $\gamma$  分别为激光束在板条端面上的入射角和折射角, $\beta$  为激光束在板条上、下表面的反射角(图 2)。

表 1 不同周期数对应的入射角

Table 1 Angle of incidence with different periods

N	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\theta / (^{\circ})$	45.0	41.2	37.7	34.3	31.2	28.2	25.4	22.7	20.1
$\gamma / (^{\circ})$	22.9	21.2	19.6	18.1	16.6	15.1	13.6	12.2	10.9
$\beta / (^{\circ})$	67.9	66.2	64.6	63.1	61.6	60.1	58.6	57.2	55.9

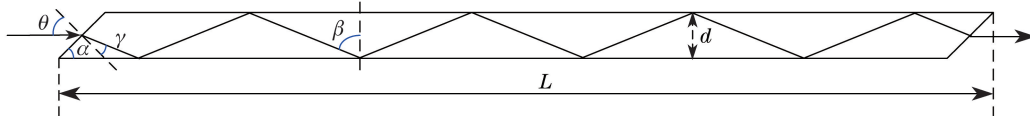


图 2 激光束在板条中的传输路径

Fig. 2 Transmission path of laser beam in slab

实验中测得抽运耦合系统的耦合传输效率约为 88%，抽运光的谱线宽度为 2.6 nm，抽运光束的口径大小为 30 mm×2.5 mm，抽运光的中心波长与抽运功率的对应关系如表 2 所示。

表 2 不同峰值抽运功率下的中心波长

Table 2 Central wavelength with different peak pumping powers

Peak pumping power /W	Central wavelength /nm	Peak pumping power /W	Central wavelength /nm	Peak pumping power /W	Central wavelength /nm
367	803.10	7790	803.73	15343	804.36
1571	803.21	9036	803.84	16500	804.47
2736	803.31	10325	803.94	17777	804.57
4060	803.42	11524	804.05	18988	804.68
5234	803.52	12845	804.15	20196	804.78
6548	803.63	14012	804.26	21384	804.89

根据 Nd:YAG 的吸收光谱、抽运光中心波长和谱线宽度，得到掺杂区长度为 120 mm、掺杂浓度为 0.1% 的 Nd:YAG 板条对不同中心波长抽运光的等效吸收系数和吸收效率，如图 3 所示。

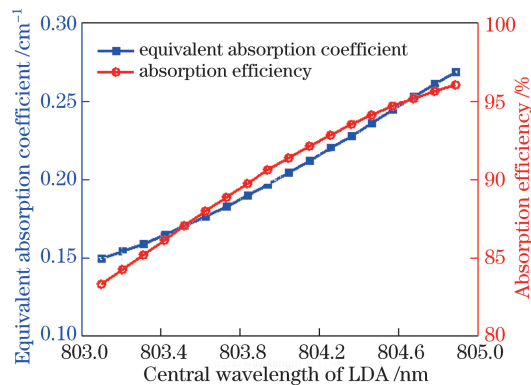


图 3 不同中心波长时的等效吸收系数和吸收效率

Fig. 3 Equivalent absorption coefficient and absorption efficiency at different central wavelengths

由图 3 可知：当抽运光中心波长为 804.68 nm 时，可以实现对抽运光功率不小于 95% 的吸收效率。将实验中二极管高功率输出时的中心波长设为 804 nm 左右主要基于以下两点考虑：

1) 由于 Nd:YAG 板条的掺杂浓度为 0.1%，掺杂长度为 120 mm，要实现 Nd:YAG 板条对抽运光的吸收效率达到 95%，要求二极管输出的中心波长在 804.6 nm 附近。如果中心波长小于 804 nm，则 Nd:YAG 板条对抽运光的吸收效率不到 90%。

2) Nd:YAG 的吸收光谱峰值在 808 nm 附近,二极管输出光的中心波长由 804 nm 向 808 nm 漂移将进一步提高对抽运光的吸收效率,但是吸收效率由 804.6 nm 时的 95% 继续提高的空间很有限,同时会导致掺杂区两端的热沉积功率密度迅速增大,带来较大的安全风险。

现在从理论上计算探测光的放大倍率。因为 Nd:YAG 为四能级系统,在小信号注入和不考虑 ASE 的情况下,Nd:YAG 上能级的反转粒子数速率方程可简化为<sup>[9]</sup>

$$\frac{\partial n(t)}{\partial t} = \frac{\rho\eta}{h\nu_0} - \frac{n(t)}{\tau}, \quad (1)$$

式中  $n(t)$  为  $t$  时刻的反转粒子数,  $\rho$  为材料吸收的抽运光功率密度,  $\eta = 0.95$  为上能级量子效率,  $h\nu_0 = 2.47 \times 10^{-19}$  J 为单个抽运光光子的能量,  $\tau = 230 \mu\text{s}$  为上能级荧光寿命。

若总抽运功率为  $P$ 、抽运耦合效率为  $\eta_{oc}$ 、有效吸收系数为  $\alpha$ 、板条的宽度与厚度分别为  $\omega$  和  $d$ 、掺杂区长度为  $l$ ,则可以求得 Nd:YAG 板条掺杂区位置  $z$  处吸收的抽运功率密度为

$$\rho(z) = \frac{\alpha P \eta_{oc} [\exp(-\alpha z) + \exp(\alpha z - \alpha l)]}{2\omega d}. \quad (2)$$

实验中抽运光为矩形脉冲输出,脉冲宽度  $H = 400 \mu\text{s}$ ,脉冲周期  $T = 5 \text{ ms}$ 。求解(1)式可得到反转粒子数密度  $n(z, t)$  在抽运脉冲内随抽运时间的变化规律为

$$n(z, t) = \frac{\rho(z)\eta\tau}{h\nu_0} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad 0 \leq t \leq H. \quad (3)$$

当抽运脉冲结束,上能级反转粒子数密度将随时间按指数规律减少,即

$$n(z, t) = \frac{\rho(z)\eta}{h\nu_0} \tau \left[ 1 - \exp\left(-\frac{H}{\tau}\right) \right] \exp\left(\frac{H-t}{\tau}\right), \quad H \leq t \leq T. \quad (4)$$

根据反转粒子数密度的变化规律,得到不同位置的小信号增益系数随时间变化的规律为

$$g_0(z, t) = \begin{cases} \sigma\tau \frac{\rho(z)\eta}{h\nu_0} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], & 0 \leq t \leq H \\ \sigma\tau \frac{\rho(z)\eta}{h\nu_0} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{H}{\tau}\right) \right] \exp\left(\frac{H-t}{\tau}\right), & H \leq t \leq T \end{cases}. \quad (5)$$

探测光在板条端面的入射角  $\theta = 31.2^\circ$ , 于是  $\beta = 61.6^\circ$ 。由于掺杂区的长度  $l = 12 \text{ cm}$ ,探测光在板条内实际的增益长度  $L = l/\sin\beta$ ,由此可知探测光的实际增益长度  $L = 13.64 \text{ cm}$ 。

实验中注入的探测光口径大小为  $30.0 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ ,功率为  $3 \text{ W}$ ,可知注入光强  $I_0 = 4 \text{ W/cm}^2$ ,远小于 Nd:YAG 的饱和光强  $2890 \text{ W/cm}^2$ ,因此在初始阶段符合小信号放大条件。随着探测光在板条内传输探测光的光强持续增强,有可能不再符合小信号放大条件,此时的放大方程为

$$\frac{dI(z, t)}{I(z, t) dz} = \frac{g_0(z, t)}{1 + I_{\text{total}}(z, t)/I_s}, \quad (6)$$

式中  $I(z, t)$  和  $g_0(z, t)$  分别为时刻  $t$ 、位置  $z$  处的探测光强度和小信号增益系数,  $I_s$  为 Nd:YAG 的饱和光强,  $I_{\text{total}}(z, t)$  为时刻  $t$ 、位置  $z$  处的总光强,对于光束交叠区域,  $I_{\text{total}}(z, t) = 2I(z, t)$ ;对于光束非交叠区域,  $I_{\text{total}}(z, t) = I(z, t)$ 。

当探测光的注入光强不随时间变化,探测光的放大倍率为

$$A = \frac{1}{I_0 T} \int_0^T I(L, t) dt. \quad (7)$$

根据 Nd:YAG 板条对抽运光的吸收效率、抽运光的总功率、抽运耦合效率,计算出当抽运脉宽为  $400 \mu\text{s}$ 、总峰值抽运功率为  $21.38 \text{ kW}$  时平均小信号增益系数的时间变化曲线(理论计算时未考虑 ASE 效应和寄生振荡),如图 4 所示。由图 4 可知,在抽运阶段 Nd:YAG 板条的小信号增益系数逐渐增加至  $0.41 \text{ cm}^{-1}$ ,在抽运阶段结束后小信号增益系数逐渐减小。

探测光放大倍率定义为有抽运时的输出功率与无抽运时的输出功率之比。在抽运条件下测量探测光功率时采取了过滤的方法:首先读取有探测光注入时功率计的读数,再读取无探测光注入时功率计的读数(该

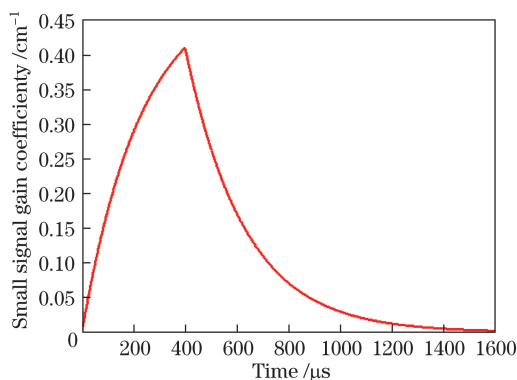


图 4 小信号增益系数的时间变化曲线

Fig. 4 Curve of small signal gain coefficient versus time

读数就是 ASE 和抽运光进入功率计的功率),两者之差就是探测光的真实输出功率。实验中将一束口径大小为 30.0 mm×2.5 mm、输出功率为 3 W 的 1064 nm 连续激光单次通过 Nd:YAG 板条,分别测量普通倏逝膜和多层复合膜时探测光的放大倍率(图 5)。

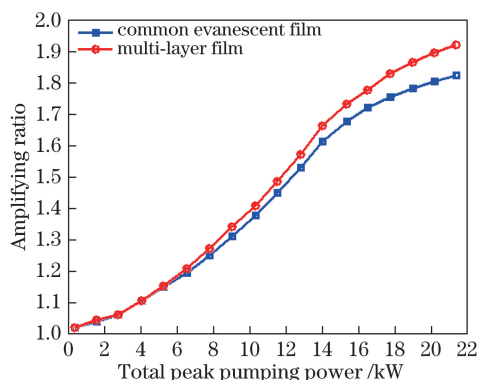


图 5 不同峰值抽运功率下探测光的放大倍率

Fig. 5 Amplifying ratio of detecting laser under different peak pumping powers

由图 5 可知,当二极管总峰值抽运功率为 21.38 kW 时,Nd:YAG 板条上、下表面镀制多层复合膜和普通倏逝膜的探测光放大倍率分别为 1.82 和 1.92,多层复合膜在一定程度上可以抑制 ASE 效应。根据(5)~(7)式数值模拟,可求得在不考虑 ASE 和寄生振荡时探测光的放大倍率约为 8,因此实际测得的探测光放大倍率与理论计算结果相差很大。这是由于多层复合膜只吸收以小于临界角入射到板条上、下表面的荧光,其余以大于临界角入射到板条上、下表面的荧光将不能进入多层复合膜,从而再次进入 Nd:YAG 板条并被继续放大。尤其是沿板条长度方向传输且在板条大面满足全反射条件的荧光将获得十分明显的放大,因而即便 55%角度范围的荧光被多层复合膜吸收,在高增益的激光板条内依然存在着不容忽视的 ASE 甚至寄生振荡,从而导致板条内总储能提升不太明显。

由于实验中探测光为连续输出激光,而抽运光的占空比仅为 8%,探测光被有效放大的时间占比小,大部分时间不能得到放大,因此探测光的放大倍率不大,多层复合膜对探测光放大倍率的提升效果不太明显。通过理论分析可以预期:探测光以脉冲方式输出并且与抽运脉冲之间有适当的时间延迟,放大倍率将显著变大。例如,1064 nm 探测光为矩形脉冲,输出脉宽为 400 μs,脉冲上升沿比抽运光脉冲的上升沿延迟约 150 μs,则根据 1064 nm 连续输出探测光的放大倍率 1.82 和 1.92,可以估算出 1064 nm 探测光脉冲宽度为 400 μs 时放大倍率分别增大到 10.75 和 12.00。由于探测光的初始光强仅为 4 W/cm<sup>2</sup>,因此放大之后的激光光强不超过 50 W/cm<sup>2</sup>,远小于 Nd:YAG 的饱和激光光强,可以认为探测光始终满足小信号放大条件。

对于小信号激光放大,探测光的放大倍率与小信号增益系数的关系为

$$A = \exp(g_0 l_{\text{eff}}), \quad (8)$$



式中  $l_{\text{eff}}$  为有效增益长度。板条内总储能与小信号增益系数的关系为

$$E = VI_S g_0, \quad (9)$$

式中  $V$  为板条掺杂区的体积,  $I_S$  为 Nd:YAG 饱和激光光强。根据 (8)~(9) 式可以求得 Nd:YAG 板条内总储能  $E$  与探测光放大倍率  $A$  的关系为

$$E = VI_S \ln A / l_{\text{eff}}. \quad (10)$$

Nd:YAG 板条大面镀制多层复合膜和普通倏逝膜时探测光的放大倍率分别为 12.00 和 10.75, 据此可计算出多层复合膜板条总储能比普通倏逝膜提高了约 4.6%。

Nd:YAG 板条大面镀制多层复合膜时总储能比镀制普通倏逝膜仅提高 4.6%, 这是由于板条与冷却器焊接前需要进行金属化处理, 而金属化层对以小于临界角入射的 1064 nm 荧光也有不少吸收(吸收率约为 70%), 此时即使板条表面镀制普通倏逝膜也会因为金属化层的存在而对 ASE 有一定的抑制效果, 在这种情况下多层复合膜的效果变得不明显。激光介质采取非焊接冷却的工作方式时不需要对激光介质表面进行金属化处理, 此时在激光介质表面镀制多层复合膜将会明显提高激光介质的总储能。

## 4 结 论

分析了板条内形成 ASE 的原因, 开展了抑制高增益的 Nd:YAG 板条中 ASE 的理论和实验研究。在 Nd:YAG 板条上、下表面镀制多层复合膜, 一定程度上抑制了板条内的 ASE。当二极管总抽运峰值功率为 21.38 kW、占空比为 8% 时, 1064 nm 连续探测光的放大倍率由 1.82 提高到 1.92, 板条内总储能提高了 4.6%。实验结果表明: 与镀制普通倏逝膜相比, 通过 Nd:YAG 板条的上、下表面镀制多层复合膜可以在一定程度上抑制板条内的 ASE 效应, 提高 Nd:YAG 板条的储能、激光输出功率和光-光转换效率。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Xiaojun, Su Hua, Cai Zhen. Amplified spontaneous emission in disk lasers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(8): 1998-2004.  
王小军, 苏华, 蔡震. 圆片激光器中放大的自发辐射现象[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(8): 1998-2004.
- [2] Cao Zhaodong, Wang Li, Zhang Zhixiang, *et al.* Experimental study on amplified spontaneous emission in large aperture slab amplifiers[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(6): 0601006.  
曹兆栋, 王利, 张志祥, 等. 大口径片状放大器放大自发辐射效应的实验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0601006.
- [3] He Shaobo, Yu Haiwu, Zheng Wanguo, *et al.* Research of amplified spontaneous emission in high power slab laser amplifier[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2004, 16(5): 603-606.  
贺少勃, 於海武, 郑万国, 等. 高功率激光片状放大器中自发辐射放大研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(5): 603-606.
- [4] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang, Transl. 2<sup>nd</sup> ed. Beijing: Science Press, 2002: 74-77.  
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 2 版. 北京: 科学出版社, 2002: 74-77.
- [5] Goodno G D, Palese S, Harkenrider J, *et al.* Yb:YAG power oscillator with high brightness and linear polarization[J]. Optics Letters, 2001, 26(21): 1672-1674.
- [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] Hackel L A, Soules T F, Fochs S N, *et al.* Gain media edge treatment to suppress amplified spontaneous emission in a high power laser: US007463660B2[P]. 2011-02-22.
- [8] Zapata L E. Parasitic oscillation suppression in solid state lasers using absorbing thin coatings: US005335237A[P]. 1994-08-02.
- [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. 激光二极管阵列抽运高功率板条激光器技术研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0514004.