

# 百纳秒级单频脉冲光纤激光极限功率的数值分析

张汉伟 周 朴\* 王小林 许晓军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 建立了百纳秒级单频脉冲光纤激光极限输出功率的理论模型,分析了影响  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂的硅玻璃光纤和磷酸盐光纤最大输出功率的影响因素,计算结果表明影响硅玻璃光纤极限输出功率的因素有抽运光亮度、透镜效应和受激布里渊散射(SBS)效应,而对于磷酸盐光纤除了上述三种因素外还包括纤芯的熔化。在单频脉冲极限输出功率方面磷酸盐光纤的性能要优于硅玻璃光纤。

**关键词** 激光光学;单频脉冲光纤激光;极限功率;受激布里渊散射;透镜效应

**中图分类号** O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1214002

## Numerical Study on Power Limit of Hundred-Nanosecond Single-Frequency Pulsed Fiber Lasers

Zhang Hanwei Zhou Pu Wang Xiaolin Xu Xiaojun

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** A model of power limit of hundred-nanosecond single-frequency pulsed fiber lasers established, by which the maximum extractable power of ytterbium-doped silica fiber and phosphate fiber are analysed. Numerical results show that the power of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped silica fiber sources is limited by pump brightness, lens effect and stimulated Brillouin scattering (SBS), while, for  $\text{Yb}^{3+}$ -doped phosphate fiber sources, melt of the core is also included. On the aspect of maximum extractable power of single-frequency pulsed laser, phosphate fiber is better than silica fiber.

**Key words** laser optics; single-frequency pulsed fiber laser; power limit; SBS; lens effect

**OCIS codes** 060.3510; 060.4370; 140.3538

## 1 引 言

纳秒级单频脉冲光纤激光被广泛应用于频率转换、远距离探测、激光雷达和相干合成等领域,脉冲的产生一般通过信号调制和调 Q 等方式实现<sup>[1~8]</sup>,目前纳秒级单频脉冲激光平均功率输出水平在百瓦左右<sup>[2,7]</sup>。然而受限于非线性效应、热效应和光学损伤等因素,其输出功率不可能无限提升,文献<sup>[9~11]</sup>分析了连续输出时的功率极限,采用的方法是利用各个限制因素的阈值公式,获得最小阈值功率与光纤直径和长度两个参数的关系。但是已有文献中的模型只考虑了受激布里渊散射(SBS)这一种非线

性效应,实际上,对于脉冲光纤激光而言,由于其峰值功率很高,其他非线性效应也将产生较大影响,如自聚焦效应等。

目前,还没有脉冲激光器极限功率方面的详细报道,本文建立了脉宽大于 100 ns 的单频脉冲光纤激光极限输出功率的理论模型,结合推导的考虑自聚焦的阈值功率表达式,计算了各种情况下的最大提取功率及其对应的最佳光纤长度和芯径,讨论了脉冲占空比对输出功率的影响。对于脉宽小于 100 ns 的情况,因为涉及到 SBS 的动力学过程<sup>[8]</sup>,其阈值与脉冲实际形状、宽度等因素都有关系,情况比较复

收稿日期: 2012-06-11; 收到修改稿日期: 2012-07-30

作者简介: 张汉伟(1987—),男,博士研究生,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: zhanghanwei100@163.com

导师简介: 许晓军(1973—),男,博士,研究员,主要从事大功率激光器方面的研究。E-mail: xuxj@21cn.com

\* 通信联系人。E-mail: zhoupu203@163.com

杂,将另外考虑。

## 2 理论模型

对于脉宽大于 10 ns 以上的脉冲光纤激光,限制其功率提升的因素有热破裂、纤芯的热熔化、热透镜效应、SBS 效应、光学损伤、抽运源的亮度以及自聚焦效应。脉冲光纤激光的热破裂、纤芯的热熔化、抽运源的亮度的阈值公式分别为<sup>[9~11]</sup>

$$P_{TF} = \frac{4\eta_{laser}\pi R_m L}{\eta_{heat}\left(1 - \frac{a^2}{2b^2}\right)}, \quad (1)$$

$$P_{MC} = \frac{4\eta_{laser}\pi k(T_m - T_c)L}{\eta_{heat}\left[1 + \frac{2k}{bh} + 2\ln\left(\frac{a}{b}\right)\right]}, \quad (2)$$

$$P_{PB} = \frac{\eta_{laser} I_{pump} \pi^2 (NA)^2 \alpha_{core} La^2}{A}, \quad (3)$$

式中  $P_{TF}$ 、 $P_{MC}$ 、 $P_{PB}$  分别表示光纤在热破裂、热熔化和抽运亮度限制下的极限平均功率,  $\eta_{laser}$  是激光的光-光转换效率,  $\eta_{heat}$  表示抽运光转换为热的百分比,  $L$  为光纤长度,  $a$  为光纤纤芯半径,  $b$  为光纤内包层半径,  $R_m$  为材料的断裂模数,  $k$  为导热系数,  $h$  为换热系数,  $T_m$ 、 $T_c$  分别表示光纤的熔化温度和冷却温度,  $I_{pump}$  为抽运光亮度,  $NA$  为内包层的数值孔径,  $\alpha_{core}$  为在抽运波长处纤芯的峰值吸收系数,  $A$  为抽运光的小信号吸收率。

脉冲光纤激光的光学损伤阈值只与峰值光强有关,因此在计算平均损伤阈值时要考虑脉冲占空比  $\eta_{pulse}$  的影响,即

$$P_{OD} = \eta_{pulse} I_{damage} \Gamma^2 \pi a^2, \quad (4)$$

式中  $P_{OD}$  为光学损伤限制下的极限输出平均功率,  $I_{damage}$  为光纤的损伤阈值,  $\eta_{pulse} \propto \tau f$ , 对于矩形脉冲  $\eta_{pulse} = \tau f$ , 其中  $\tau$  为脉冲脉宽,  $f$  为脉冲的重复频率, 几十纳秒以上的脉冲其占空比一般取值在 0.001~0.1 左右。

虽然自聚焦效应和热透镜效应分别来源于非线性效应和热效应,但是它们效果上相似,都是使光纤中的光束发生会聚,产生类似透镜的效应,因此可以考虑把这两种效应统一起来,称为透镜效应,其阈值公式为(推导见附录)

$$P_{Lens} = \frac{\lambda^2}{\left(\frac{dn}{dT}\right) \pi k L \frac{\eta_{heat}}{\eta_{laser}} + \frac{n_2 n_0}{0.148 \eta_{pulse}}}, \quad (5)$$

式中  $dn/dT$  为纤芯的热光系数,  $n_0$  和  $n_2$  分别为纤

芯的折射率和非线性系数。

从(5)式可以看出透镜效应阈值比单纯的热透镜效应阈值变小了,说明在高峰值功率情况下由于自聚焦效应的影响,光纤中的光束会聚得更严重,因此其对应的阈值也就降低了。

对于脉宽大于 100 ns 以上的单频脉冲,其 SBS 阈值可以用连续情况下的公式进行估算<sup>[8,12]</sup>。由于自聚焦效应的作用,光纤入射端中心处光强会增强,即变为原来的  $1/(1 - P/P_{SF})^{0.46}$  倍<sup>[13]</sup>,其中  $P$  为激光的峰值功率,  $P_{SF} = \frac{0.148\lambda^2}{n_0 n_2}$  为自聚焦的阈值功率,约为 5 MW<sup>[15]</sup>,因此估算 SBS 的平均输出阈值功率可以用以下公式:

$$P_{SBS} = \left(1 - \frac{P_{SBS}}{\eta_{pulse} P_{SF}}\right)^{0.46} B \frac{a^2}{L}, \quad (6)$$

$$B = \frac{21\pi\Gamma^2 \ln G}{g_B(\Delta\nu)} \eta_{pulse}, \quad (7)$$

式中  $P_{SBS}$  表示受限于 SBS 效应光纤输出的极限平均功率,  $\Gamma$  为模式半径与纤芯半径之比,  $G$  为光纤的放大倍数,  $g_B(\Delta\nu)$  为光纤的 SBS 增益系数,由于一般情况下  $\frac{P_{SBS}}{\eta_{pulse} P_{SF}} \ll 1$ ,所以在光纤输出端可获得的极限功率为

$$P_{SBS} \approx \frac{Ba^2}{L + \frac{0.46Ba^2}{\eta_{pulse} P_{SF}}}. \quad (8)$$

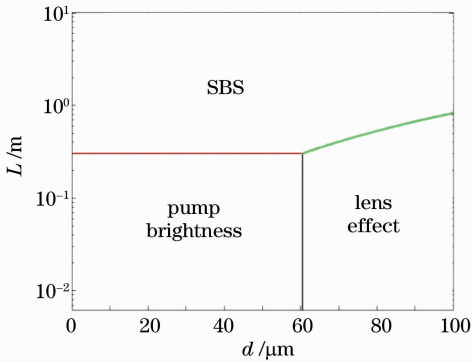
以上就是限制百纳秒级单频脉冲光纤激光最大输出平均功率的 6 个因素,为了具体分析这些因素对光纤激光性能的影响,下面分别计算  $Yb^{3+}$  掺杂硅玻璃光纤和磷酸盐光纤的极限输出功率。相关参数来自参考文献<sup>[10,11]</sup>,假设脉冲激光器或者放大器的效率与连续情况下相同。考虑到脉冲激光对材料的损伤阈值比较高,约为连续情况下的 100 倍以上,即对于硅玻璃光纤,脉宽为纳秒级的脉冲其损伤阈值几乎为一常数,约为 4.75 kW/ $\mu m^2$ <sup>[13]</sup>,而对于磷酸盐光纤这里取 0.8 kW/ $\mu m^2$ ,具体如表 1 所示。

## 3 模拟结果与分析

为了确保激光器和放大器安全工作,其输出极限受制于所有限制因素中最小的阈值功率。图 1 是纤芯直径范围为 0~100  $\mu m$ ,光纤长度范围为 0~10 m 时,占空比为 0.1 时单频脉冲  $Yb^{3+}$  掺杂硅玻璃光纤激光输出功率限制图。

表 1 Yb<sup>3+</sup> 掺杂磷酸盐/硅玻璃光纤激光典型参数Table 1 Typical parameters of Yb<sup>3+</sup>-doped phosphate/silica fiber laser

Parameter	Symbol	Yb <sup>3+</sup> -doped phosphate	Yb <sup>3+</sup> -doped silica
Rupture / (W/m)	$R_m$	70	4300 <sup>[14]</sup>
Thermal conductive / [W/(mK)]	$k$	0.49	1.38
Convective film coefficient / [W/(m <sup>2</sup> K)]	$h$	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>
Melt temperature / K	$T_m$	723	1983
Change in index with temperature / (1/K)	$dn/dT$	$-5.1 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-5}$
Brillion gain coefficient / (m/W)	$g_B$	$2.5 \times 10^{-11}$	$5 \times 10^{-11}$
Small signal pump absorption / dB	$A$	20	20
Assumed laser gain	$G$	10	10
Ratio of mode field radius and core radius	$\Gamma$	0.8	0.8
Optical damage limit / [W/ $\mu\text{m}^2$ ]	$I_{\text{damage}}$	800	4750
Coolant temperature / K	$T_c$	300	300
Pump brightness limit / [W/( $\mu\text{m}^2\text{Sr}$ )]	$I_{\text{pump}}$	0.1	0.1
Core absorption / (dB/m)	$\alpha_{\text{core}}$	3750	250
Laser efficiency	$\eta_{\text{laser}}$	0.86	0.85
Heat fraction	$\eta_{\text{heat}}$	0.1	0.1
Cladding NA	NA	0.64	0.45
Wavelength of laser / $\mu\text{m}$	$\lambda$	1.03	1.078
Refractive index	$n_0$	1.5606 <sup>[16]</sup>	1.45
Nonlinear refractive index / (m <sup>2</sup> /W)	$n_2$	$3.2 \times 10^{-20}$ <sup>[17]</sup>	$3.2 \times 10^{-20}$

图 1 单频 Yb<sup>3+</sup> 掺杂脉冲硅玻璃光纤激光器输出功率限制图Fig. 1 Limit of extractable power of Yb<sup>3+</sup>-doped single-frequency pulsed silica fiber laser

从图 1 中可以看出,对于单频 Yb<sup>3+</sup> 掺杂硅玻璃光纤激光,限制其极限输出功率的因素主要是 SBS 效应、抽运亮度和透镜效应,而光学损伤、热破裂和纤芯的热熔融在这里不是主要影响。其中最佳的纤芯直径和光纤长度组合为 (60.6  $\mu\text{m}$ , 0.30 m)。对于占空比为 0.1 时的极限输出功率与纤芯直径的关系如图 2 所示,其最大输出平均功率极限为 588 W,这与连续情况下的 1.863 kW<sup>[9]</sup> 差别较大。这是因为受限于 SBS 效应,脉冲激光器和放大器的峰值功率与连续情况下相同,但由于脉冲激光的占空比较小,使得极限输出的平均阈值功率降低。若不考虑

自聚焦作用的影响,即令(5)式和(8)式中的  $n_2 = 0$ ,则最大输出平均功率为 589 W,与考虑自聚焦情况下的极限功率相近,由(6)式可知,这是因为自聚焦作用与峰值强度有关,峰值强度高自聚焦影响就大,但因为这里计算时 SBS 本身阈值较低,限制了峰值功率,所以对结果影响不大。但是如果采用一定的措施抑制 SBS 效应,使 SBS 阈值增大,则自聚焦作用就比较明显。

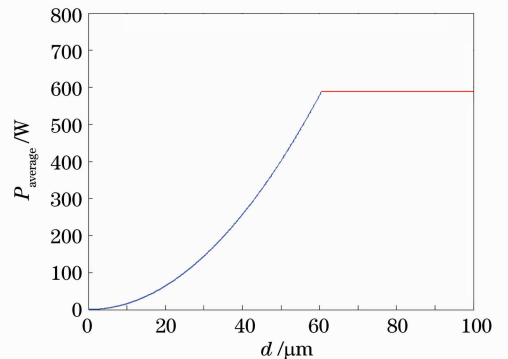
图 2 Yb<sup>3+</sup> 掺杂单频脉冲硅玻璃光纤激光输出平均功率与纤芯半径关系Fig. 2 Relation between average output power of Yb<sup>3+</sup>-doped single-frequency pulsed silica fiber laser and radius of core

图 3(a) 和 (b) 分别为不同脉冲占空比情况下 Yb<sup>3+</sup> 掺杂单频硅玻璃光纤极限输出平均功率和峰值功率。由图 3 可知,随着脉冲占空比的降低,极限

输出平均功率不断下降,极限峰值功率不断增加。这是由于硅玻璃光纤的极限输出平均功率受限于SBS效应和透镜效应,当脉冲占空比减小时,对于特定的纤芯半径和光纤长度,一方面SBS效应的阈值峰值功率不变,而平均功率减小,另一方面透镜效应的平均阈值功率几乎不变,为了使两者的平均功率相同则必须增大纤芯半径  $a$  或者减小光纤长度  $L$ ,即增大SBS效应的峰值功率、减小透镜效应的平均阈值功率,导致最终的平均阈值功率降低而峰值功率增加。因此在具体应用时要根据需求选取脉冲占空比,以满足合适的脉冲峰值功率和平均功率。由

(5)式和(8)式亦可得极限输出平均功率与脉冲占空比的关系:

$$P_{\text{SBS-Lens}} = \frac{B}{Y + \sqrt{Y^2 + \frac{dn}{dT} \frac{8\lambda^2 B}{\pi k} \frac{\eta_{\text{heat}}}{\eta_{\text{laser}}}} + \frac{0.46B}{\eta_{\text{pulse}} P_{\text{SF}}}} \quad (9)$$

$$Y = \frac{3.65Bn_2 n_0}{\eta_{\text{pulse}}}, \quad (10)$$

式中  $B$  见(7)式,对应的峰值功率为

$$P_{\text{SBS-lens}}^{\text{peak}} = \frac{P_{\text{SBS-lens}}}{\eta_{\text{pulse}}}. \quad (11)$$

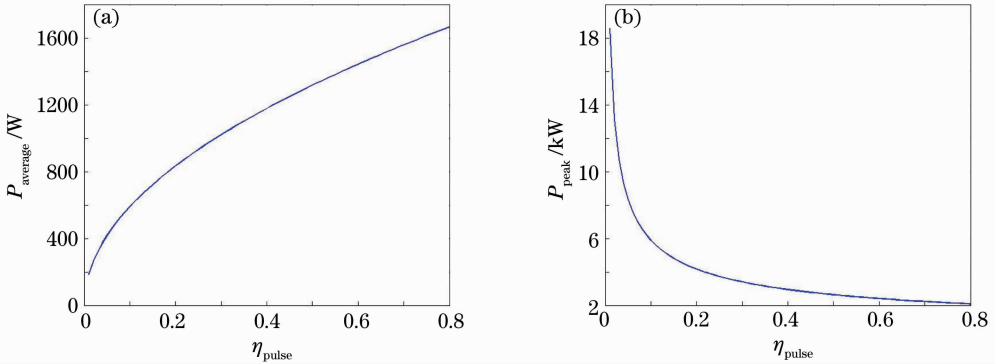


图 3 不同占空比时  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂单频脉冲硅玻璃光纤激光极限输出平均功率(a)和峰值功率(b)

Fig. 3 (a) Maximum output average power and (b) peak power of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped single-frequency pulsed silica fiber laser under different pulse duty cycles

由(9)式和(11)式可见,输出的平均极限功率随脉冲占空比增大而增大,输出的峰值极限功率随占空比增大而减小。

图 4 是掺  $\text{Yb}^{3+}$  磷酸盐玻璃脉冲光纤激光的输出功率极限的限制因素图。与  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂的硅玻璃光纤相比,磷酸盐光纤的脉冲极限输出功率受限于抽运光亮度、纤芯的熔化、SBS 效应以及透镜效应。这是因为磷酸盐光纤的熔点非常低,由阈值(2)式和(3)式可知,当光纤芯径较小,且长度较短时,抽运亮度和纤芯的熔化成为主要限制因素,但是,随着纤芯直径和光纤长度增大,其限制就变得次要。

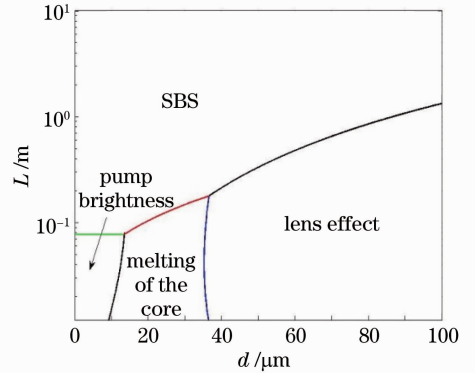


图 4  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂磷酸盐光纤单频脉冲激光输出功率限制因素

Fig. 4 Limit factors of extractable power of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped single-frequency pulsed phosphate fiber laser

芯的熔化受限而很小,因此对于磷酸盐光纤在芯径较小时很难获得大平均功率的脉冲输出。

需要注意的是,对于磷酸盐光纤,其热光系数为负值,因此当温度升高时在很大程度上能够抑制自聚焦作用,同时当温度升高时,其数值孔径将会降低,有利于提高光束质量<sup>[10]</sup>。

尽管脉冲运行情况下的损伤阈值比连续的大两

由图 4,5 可知,脉冲占空比为 0.1 时,  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂磷酸盐光纤的单频脉冲极限输出功率最终由 SBS 效应和透镜效应限制,其输出极限功率为 731 W,比硅玻璃光纤有较大提高,与此对应的最优纤芯直径和抽运长度为(36.5  $\mu\text{m}$ , 0.18 m),也比硅玻璃光纤要小,这是因为磷酸盐光纤的吸收系数比硅玻璃光纤大一个量级,而且 SBS 增益系数只有硅玻璃光纤的一半<sup>[9]</sup>。同时注意到图 5 中磷酸盐光纤在芯径较小时(小于 10  $\mu\text{m}$ ),其输出的极限平均功率由于纤

个量级<sup>[13]</sup>。但是,对于高功率光纤激光来说,光学损伤是其输出功率受限的最根本原因。这是因为在SBS效应被有效抑制的情况下或者对皮秒、飞秒脉冲而言,透镜效应就成为大功率输出的最大限制因素,当光束被透镜效应聚焦后,纤芯光强不断增大,最终到达光纤的光学损伤阈值,从而永久性地损坏光纤<sup>[13,15]</sup>。

图6(a)和(b)分别为不同脉冲占空比时Yb<sup>3+</sup>掺杂磷酸盐/硅玻璃光纤单频脉冲输出的极限平均功率和极限峰值功率。其趋势也是随着占空比的减小,极限输出平均功率下降、峰值功率增加,但输出功率整体比硅玻璃光纤高,说明磷酸盐光纤在输出功率提高上更有潜力。

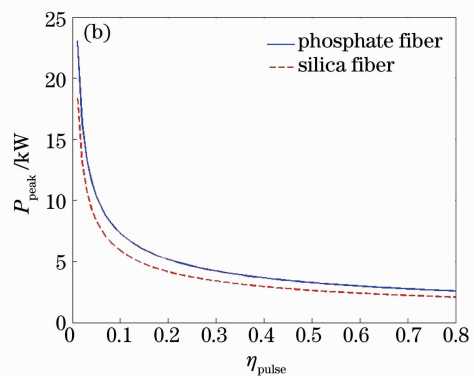
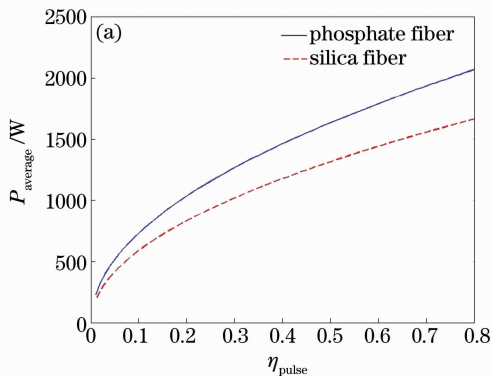


图6 不同占空比时Yb<sup>3+</sup>掺杂单频脉冲磷酸盐/硅玻璃光纤激光极限输出平均功率(a)和峰值功率(b)

Fig. 6 (a) Maximum output average power and (b) peak power of Yb<sup>3+</sup>-doped single-frequency pulsed silica fiber laser under different pulse duty cycles

在许多实际应用场合,激光输出不仅需要单频还需要保证单模,以获得较好的光束质量。为了确保单模输出则光纤的归一化频率必须满足 $V < 2.405$ ,假设对于两种光纤,其数值孔径最小都为0.04<sup>[11]</sup>,则对应的磷酸盐光纤和硅玻璃光纤的最大芯径分别为19.7  $\mu\text{m}$ 和20.6  $\mu\text{m}$ 。图7为不同芯径下Yb<sup>3+</sup>掺杂的磷酸盐光纤和硅玻璃光纤单模单频脉冲输出平均功率极限(脉冲占空比为0.1),从图7中可以看出磷酸盐光纤最大可达到369 W的平均功率输出,而硅玻璃光纤为68 W,因此在处理好散热问题的前提下磷酸盐光纤单模极限输出功率性能是优于硅玻璃光纤的。

假设使用调制连续波的方法产生脉冲输出,调制的脉冲重复频率(PRF)为10 kHz,调制形式为矩形波,则可以获得激光脉冲极限输出峰值功率、平均功率与脉宽的关系。如图8(a)和(b)分别为10 kHz,不同脉宽下极限输出峰值功率和平均功率。从图8可以看出受限于SBS效应和透镜效应,

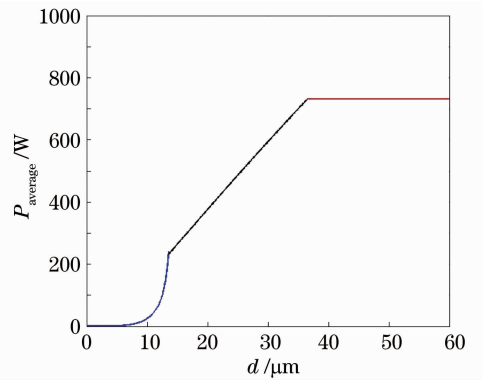


图5 Yb<sup>3+</sup>掺杂磷酸盐光纤激光器单频脉冲极限输出平均功率与纤芯半径关系

Fig. 5 Relationship between Yb<sup>3+</sup>-doped single-frequency pulsed phosphate fiber laser and radius of core

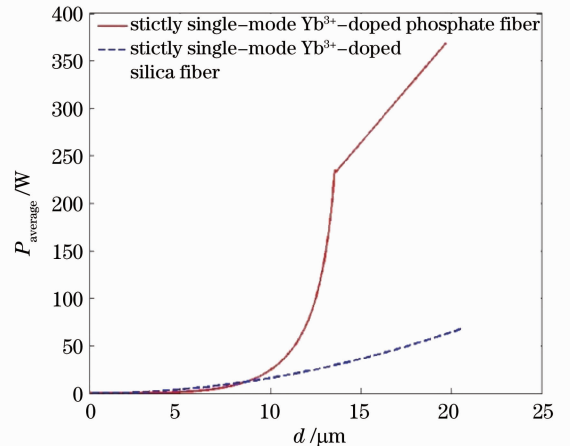


图7 不同芯径下Yb<sup>3+</sup>掺杂的磷酸盐光纤和硅玻璃光纤单模单频脉冲输出平均功率极限

Fig. 7 Limit of average output power of single-mode, single-frequency Yb<sup>3+</sup>-doped phosphate/silica fiber with different radii of core

磷酸盐和硅玻璃光纤脉冲输出的极限峰值功率在一定重复频率下,随着脉宽的增加不断降低,表明短脉

宽具有更高的极限峰值功率阈值,但其对应的平均输出功率较小。整体而言磷酸盐光纤的极限输出功率比硅玻璃光纤更高。需要指出的是,虽然磷酸盐光纤可以实现高掺杂从而减短光纤长度抑制 SBS

效应<sup>[18]</sup>,但从表 1 中可以看出它的断裂模数和损伤阈值远小于硅玻璃光纤,另外目前磷酸盐光纤在切割和熔接方面需要专门的技术,这也是限制磷酸盐光纤发展的重要因素。

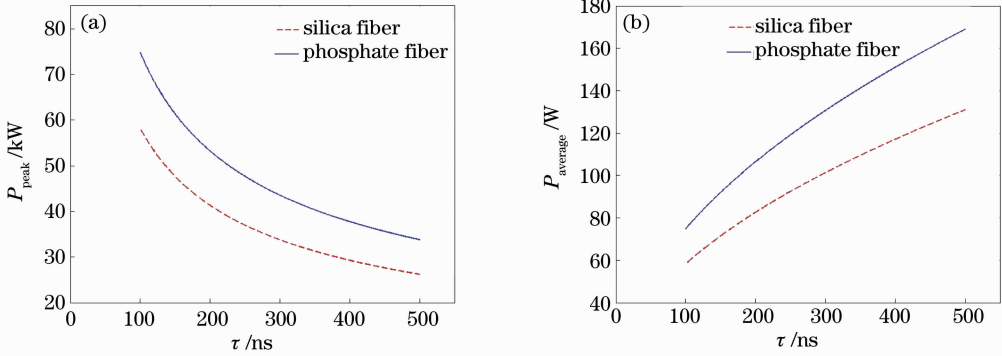


图 8 脉冲重复频率为 10 kHz 时激光输出的极限峰值功率(a)和平均功率(b)与脉宽的关系

Fig. 8 Dependence of (a) output peak power and (b) average power on pulse width with repetition rate of 10 kHz

## 4 结 论

本文分析了百纳秒级单频脉冲光纤激光输出功率极限的限制因素,考虑了自聚焦效应对透镜效应和 SBS 效应的影响,并推导了理论阈值近似公式,通过这些公式可以方便地估计实验系统的性能和影响其输出功率的限制因素。在此基础上计算了  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂硅玻璃和磷酸盐两种光纤的具体限制因素,分析了各个因素的影响范围,得到其理论输出极限功率和最佳光纤芯径和长度。得到了在单频脉冲极限输出功率方面,磷酸盐光纤的性能要优于硅玻璃光纤的结论。对于这两类光纤,可以通过增大纤芯半径提高其极限输出功率,但最终限制单频脉冲输出功率的因素是 SBS 效应和透镜效应,因此若想提高极限输出功率必须有效地抑制 SBS 效应、减少热沉积和提高激光器效率等。

### 附录 A

以下推导由于热透镜和自聚焦效应导致的透镜效应的阈值功率。首先假设在光纤中传输的是腰斑半径为  $w$  的高斯光束,假设光纤均匀吸收热量,同时是各向同性的,此时由于热吸收和非线性效应,光纤轴向附近的的折射率变为

$$n(r) = n_0 - \frac{1}{2}n_2^{\text{th}}r^2 + n_2^{\text{nl}}I(r) \approx n_0 - \frac{1}{2}n_2^{\text{th}}r^2 + n_2^{\text{nl}}I_0 \left(1 - \frac{2r^2}{w^2}\right) = n_0 + n_2^{\text{nl}}I_0 - \frac{1}{2}r^2 \left(n_2^{\text{th}} + \frac{4n_2^{\text{nl}}I_0}{w^2}\right). \quad (\text{A1})$$

式中  $n_0$  为纤芯的折射率,  $n_2^{\text{th}} = \frac{dn}{dT} \frac{P_{\text{th}}}{2kLA_0} \frac{\eta_{\text{heat}}}{\eta_{\text{laser}}}$  为由

于热吸收引起的折射率变化系数<sup>[9]</sup>,  $P_{\text{th}}$  为阈值平均功率,  $n_2^{\text{nl}}$  为非线性折射率系数,  $I_0$  为纤芯中心处光强,  $L$  为光纤的长度,  $A_0$  为纤芯的面积。

对于具有形式  $n(r) = N_0 - \frac{1}{2}N_2r^2$  的折射率分布的高斯光束,其 ABCD 传输矩阵为<sup>[19]</sup>

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma z) & \sin(\gamma z)/(\gamma n_0) \\ -\sin(\gamma z)(\gamma n_0) & \cos(\gamma z) \end{bmatrix}. \quad (\text{A2})$$

式中  $\gamma = \sqrt{N_2/N_0}$ , 由于  $n_2^{\text{nl}}I_0 \ll n_0$ , 所以  $N_0 \approx n_0$ ,  $N_2 = n_2^{\text{th}} + \frac{4n_2^{\text{nl}}I_0}{w^2}$ 。

高斯光束的  $q$  参数定义为

$$\frac{1}{q} = \frac{n_0}{R} - j \frac{\lambda}{\pi w^2}. \quad (\text{A3})$$

则透镜效应的临界条件为

$$q = \frac{Aq + B}{Cq + D}. \quad (\text{A4})$$

联立(A2)~(A4)式求解得:

$$\begin{cases} w^2 = \frac{\lambda}{\pi} \frac{1}{\sqrt{N_2 N_0}} \\ R = \infty \end{cases} \quad (\text{A5})$$

把  $N_2, N_0$  的表达式代入(A5)式,并考虑到  $I_0 = \frac{P_{\text{th}}}{\eta_{\text{pulse}} \pi w^2 x}$ , 其中  $x$  是修正系数, 整理得:

$$P_{\text{th}} = \frac{\lambda^2}{n_0 \pi^2 w^4} \frac{1}{\left(\frac{dn}{dT}\right) \frac{1}{2kLA_0} \frac{\eta_{\text{heat}}}{\eta_{\text{laser}}} + \frac{4n_2^{\text{nl}}}{x\pi w^4 \eta_{\text{pulse}}}}. \quad (\text{A6})$$



注意到一般纤芯中光束的腰斑是纤芯半径  $a$  的  $0.7 \sim 0.8$  倍<sup>[9]</sup>, 化简得:

$$P_{\text{th}} \approx \frac{\lambda^2}{\left(\frac{dn}{dT}\right) \frac{2a^2}{\pi k L} \frac{\eta_{\text{heat}}}{\eta_{\text{laser}}} + \frac{4\pi n_2^{\text{nl}} n_0}{\eta_{\text{pulse}} x}}. \quad (\text{A7})$$

若  $n_2^{\text{nl}} = 0$  则(18)式简化为

$$P_{\text{th}} = \frac{\eta_{\text{heat}} \pi k \lambda^2 L}{2\eta_{\text{laser}} \frac{dn}{dT} a^2}. \quad (\text{A8})$$

与文献[9]中相同。若  $\frac{dn}{dT} = 0$ , 则(A7)式简化为

$$P_{\text{th}} \approx \frac{x\lambda^2}{4\pi n_0 n_2^{\text{nl}}} \eta_{\text{pulse}}. \quad (\text{A9})$$

这与文献[13]中的结果形式上一致, 说明所推导结果在物理意义上是正确的。为了保证数值上一致, 令  $x = 1.86$ , 则  $P_{\text{th}} = \frac{0.148\lambda^2}{n_0 n_2^{\text{nl}}} \eta_{\text{pulse}}$ 。正文中(5)式与(A7)式一致, 式中的  $n_2$  与(A7)式中的  $n_2^{\text{nl}}$  相同, 其他符号意义不变。

### 参 考 文 献

- 1 P. P. Jiang, D. Z. Yang, Y. X. Wang *et al.*. All-fiberized MOPA structured single-mode pulse Yb-fiber laser with a linearly polarized output power of 30 W[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, **6**(5): 384~387
- 2 R. Su, P. Zhou, X. Wang *et al.*. Active coherent beam combination of two high-power single-frequency nanosecond fiber amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(4): 497~499
- 3 W. Shi, E. B. Petersen, M. Leigh *et al.*. High SBS-threshold single-mode single-frequency monolithic pulsed fiber laser in the C-band [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(10): 8237~8245
- 4 Su Rongtao, Zhou Pu, Xiao Hu *et al.*. MOPA structured single-frequency nanosecond pulsed laser in all fiber format[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1102013  
粟荣涛, 周朴, 肖虎等. MOPA结构的单频纳秒脉冲全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1102013
- 5 Wang Xiaolin, Xu Xiaojun, Zhou Pu *et al.*. Adjustable all fiber pulse laser based on coherent combination[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 87~91  
王小林, 许晓军, 周朴等. 基于相干合成的可调全光纤脉冲激

- 光源[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 87~91
- 6 Feng Yutong, Wang Xiongfei, Zhu Chen *et al.*. Experiment research of 100 W, all-fiber acousto-optic Q-switched fiber laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(6): 1444~1448  
冯宇彤, 王雄飞, 朱辰等. 100 W全光纤声光调Q光纤激光器实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(6): 1444~1448
- 7 F. Stutzki, F. Jansen, A. Liem *et al.*. 26 mJ, 130 W Q-switched fiber-laser system with near-diffraction-limited beam quality[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(6): 1073~1075
- 8 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. 4th Edition, San Diego: Academic Press, 2007
- 9 J. W. Dawson, M. J. Messerly, R. J. Beach *et al.*. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 13240~13266
- 10 J. W. Dawson, M. J. Messerly, J. E. Heebner *et al.*. Power scaling analysis of fiber lasers and amplifiers based on non-silica materials [C]. *SPIE*, 2010, **7686**: 768611
- 11 Z. Jiajian, P. Zhou, Y. Ma *et al.*. Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(19): 18645~18654
- 12 D. J. Richardson, J. Nilsson, W. A. Clarkson. High power fiber lasers; current status and future perspectives [Invited][J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(11): B63~B92
- 13 A. V. Smith, B. T. Do, G. R. Hadley *et al.*. Optical damage limits to pulse energy from fibers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(1): 153~158
- 14 W. Krupke, M. D. Shinn, J. E. Marion *et al.*. Spectroscopic, optical, and thermomechanical properties of neodymium- and chromium-doped gadolinium scandium gallium garnet[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**: 102~114
- 15 G. Fibich, A. L. Gaeta. Critical power for self-focusing in bulk media and in hollow waveguides[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(5): 335~337
- 16 M. Leigh, W. Shi, J. Zong *et al.*. High peak power single frequency pulses using a short polarization-maintaining phosphate glass fiber with a large core[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**: 181101~181108
- 17 P. Polynkin, A. Polynkin, D. Panasencko *et al.*. All-fiber picosecond laser system at 1.5  $\mu\text{m}$  based on amplification in short and heavily doped phosphate-glass fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(21): 2194~2196
- 18 Y. W. Lee, M. J. F. Digonet, S. Sinha *et al.*. High-power Yb<sup>3+</sup>-doped phosphate fiber amplifier[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2010, **15**(1): 93~102
- 19 A. E. Siegman. *Lasers* [M]. California: University Science Books, 1986

栏目编辑: 宋梅梅