

不同基质掺 Yb³⁺ 光纤的单频极限输出功率

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 综合分析了不同基质掺 Yb³⁺ 光纤的材料特性,在改进的极限输出功率理论模型的基础上,对 Yb³⁺ 掺杂的硅光纤、磷酸盐光纤、YAG 晶体(或陶瓷)光纤以及蓝宝石光纤的单频极限输出功率特性进行了详细分析。计算结果表明,YAG 晶体(或陶瓷)光纤和蓝宝石光纤单频极限输出功率可以达到 10 kW 以上。分析了单模情况下的极限输出功率,结果表明 YAG 晶体(或陶瓷)光纤和蓝宝石光纤在单模情况下也有较大优势,目前的单频激光功率还有很大的提升空间。对于单频激光光纤材料而言,降低受激布里渊散射(SBS)增益系数、提高导热性能是提高极限输出功率的有效途径。

关键词 激光器;单频光纤激光;极限输出功率;硅光纤;磷酸盐光纤;YAG 光纤;蓝宝石光纤

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0114003

Power Limit of Different Single-Frequency Yb³⁺-Doped Fibers

Zhang Hanwei Zhou Pu Wang Xiaolin Xu Xiaojun

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

Abstract The characters of different Yb³⁺-doped fiber materials are integratedly studied and the single-frequency power limits of Yb³⁺-doped silica fiber, phosphate fiber, YAG crystal (or ceramic) fiber and sapphire fiber are carefully analyzed. The numerical result shows that the extractable power of YAG crystal (or ceramic) fiber and sapphire fiber can be more than 10 kW. The further study of the power limit shows that YAG crystal (or ceramic) fiber and sapphire fiber also have an advantage in single-mode working condition, indicating that these two kinds of fibers still have potentials to power scaling. For the fiber material of single-frequency fiber laser, the effective ways to boost the power limit are to reduce the stimulated Brillouin scattering (SBS) gain coefficient and improve the performance of heat conducting.

Key words lasers; single-frequency fiber laser; limit output power; silica fiber; phosphate fiber; YAG fiber; sapphire fiber

OCIS codes 060.3510; 060.4370; 140.3538

1 引 言

对多束单频光纤激光相干合成是获得高平均功率输出的一个有效的解决方案,但是随着合成路数的增加,其系统复杂度也迅速增大,因此研究如何提高单频光纤激光极限输出功率,分析其功率提升的限制因素具有十分重要的意义^[1]。受限于受激布里渊散射(SBS)效应,目前单路空间结构单频掺镱光纤激光最高输出功率约为 500 W^[2-3],全光纤结构

单路单频掺镱光纤激光最高输出功率为 310 W^[4]。Dawson 等^[5-6]分析了镱掺杂的硅光纤和 YAG 晶体(或陶瓷)光纤的单频极限输出功率,认为 Yb³⁺ 掺杂的硅光纤单频极限输出功率约为 1.86 kW、YAG 晶体(或陶瓷)光纤的单频极限输出功率约为 17 kW。Zhu 等^[7]对磷酸盐光纤也进行了类似分析,结果表明,在现有技术条件下磷酸盐光纤的极限输出功率约为 2.02 kW。在文献[5]的模型中,热转

收稿日期:2013-07-30;收到修改稿日期:2013-09-01

作者简介:张汉伟(1987—),男,博士研究生,主要从事高能光纤技术方面的研究。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技术方面的研究。E-mail: xuxj@21cn.com

(通信联系人)

移系数的估计较为粗糙,实际上由于光纤背景损耗的存在,光纤中的热效应要严重得多。另外,以往的分析假设纤芯可以任意改变,然而实际应用中为了保证较好的光束质量,芯径不可能无限增大,因此对单模运行下的极限输出功率分析是很有必要的。除此之外,近年来报道的蓝宝石光纤由于SBS的增益系数比普通硅光纤低近两个量级^[8],也是一种十分有潜力的大功率单频光纤材料。因此,本文改进了已有文献理论模型的不足之处,全面分析了现有几类光纤材料在单频输出功率上的定标放大能力,针对Yb³⁺掺杂的磷酸盐光纤、硅光纤、YAG晶体(或陶瓷)光纤以及蓝宝石光纤的功率提升限制和特点进行了详细分析,最后根据实际需要,对严格单模的光纤极限输出功率进行了计算分析。通过分析发现YAG晶体(或陶瓷)光纤以及蓝宝石光纤具有较好的单频大功率输出潜力,在光纤材料方面,寻找较低SBS增益系数和较好的材料导热性能光纤是单频光纤激光器向大功率发展的重要方向。

2 理 论

对于高能单频光纤激光系统,热破裂、纤芯的热熔化、热透镜效应、SBS效应、光学损伤、抽运源的亮度等因素都会对其功率提升产生限制,其具体阈值公式为^[5,7,9]

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

$$P_{MC} = \frac{4\eta_{laser}\pi k_1(T_m - T_c)L}{\eta_{heat}\left[1 + \frac{2k_1}{ch} + 2\ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{2k_1}{k_2}\ln\left(\frac{c}{b}\right)\right]}, \quad (2)$$

$$P_{TL} = \frac{\eta_{laser}\pi k_1\lambda^2 L}{2\eta_{heat}\frac{dn}{dT}a^2}, \quad (3)$$

$$P_{SBS} \approx \frac{21\pi\Gamma^2 a^2}{g_B L} \ln G, \quad (4)$$

$$P_{OD} = \Gamma^2 I_{damage} \pi a^2, \quad (5)$$

$$P_{PB} = \eta_{laser} I_{pump} (\pi b^2) (\pi R_{NA}^2), \quad (6)$$

$$b = a \sqrt{\frac{\alpha_{core} L}{A}}, \quad (7)$$

式中 P_{TF} 、 P_{MC} 、 P_{TL} 、 P_{SBS} 、 P_{OD} 、 P_{PB} 分别表示热破裂、纤芯的热熔化、热透镜效应、SBS效应、光学损伤、抽运源的亮度限制的输出阈值功率。 R_{NA} 为数值孔径, L 为光纤长度, a 为光纤纤芯半径, b 为内包层半

径, c 为涂覆层半径,其他各个量的物理意义和典型数值参数如表1所示。其中(2)式比已有模型^[5]纤芯的热熔化阈值公式更准确^[9],因为这里考虑了涂覆层的效果,而文献^[5]在公式推导中忽略了涂覆层的作用。(4)式中SBS阈值公式使用的是系数21,因为系数21在高功率下与实际情况更接近^[7]。文中忽略了受激拉曼散射(SRS)的影响,这是由于有些光纤材料的SBS增益系数虽然比较小,但仍大于SRS增益系数,因此在单频光纤激光中SRS阈值要高于SBS。对于平均功率较高的单频激光器当掺杂光纤较长时会由于自相位调制(SPM)而使激光频谱展宽,从而降低了激光的相干性,然而一般情况下单频激光器的功率水平在千瓦量级^[6],而光纤长度约为几米,其产生的频谱展宽因子约为几到十几^[10],这对单频激光器(约100 kHz)来说其相干性的减少是可以接受的,同时激光的谱宽仍小于光纤的SBS增益谱宽,因此(4)式仍然适用。

3 参数选取

Yb³⁺掺杂的磷酸盐光纤、硅光纤、YAG晶体(或陶瓷)光纤以及蓝宝石光纤的相关参数列于表1。

由于目前还没有蓝宝石光纤作为基质的掺杂光纤的报道,因此这里假设其纤芯的吸收系数(α_{core})和断裂模数(R_m)与硅光纤相同、激光波长为1064 nm,根据其折射率计算其包层数值孔径为0.75^[6]。在(2)式中假设涂覆层的直径是外包层的1.5倍,即 $c/b=1.5$ 。

这里需要特别强调的是光纤的热转换系数(η_{heat})。文献^[6]中热转换系数只是大概的估计(都取0.1),但是由计算结果可知^[6],光纤的极限输出功率最终受限于热透镜效应,热转换系数对计算结果影响很大,因此尽量获得精确的热转换系数是十分必要的。假设抽运光转换为激光的效率为 η_{laser} ,量子亏损为 η_q ,传输损耗为 η_p ,忽略其他损耗则有^[7]

$$\eta_{laser} + \eta_q + \eta_p = 1. \quad (8)$$

而量子损耗为

$$\eta_q = \frac{\lambda_L - \lambda_P}{\lambda_L}, \quad (9)$$

式中 λ_L 和 λ_P 分别表示激光和抽运光波长(抽运光波长取976 nm)。

表 1 4 种光纤的特征参数

Table 1 Character parameters of the four kinds of fibers

Parameter	Symbol	Yb ³⁺ -doped phosphate	Yb ³⁺ -doped silica	Yb ³⁺ :YAG single crystal or ceramic	Yb ³⁺ -doped sapphire
Rupture	$R_m / (\text{W}/\text{m})$	70 ^[6]	2640 ^[6]	1100 ^[6]	2640 ^[6]
Thermal conductive	$k / [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	0.49 ^[6]	1.38 ^[6]	10.7 ^[6]	1.38 ^[6]
Convective film coefficient	$h / [\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$	10 ^[6]	10 ^[6]	10 ^[6]	10 ^[6]
Melt temperature	T_m / K	723 ^[6]	1983 ^[6]	1940 ^[6]	2323 ^[8]
Change in index with temperature	$(dn/dT) / \text{K}^{-1}$	-5.1×10^{-6} ^[6]	1.2×10^{-5} ^[6]	7.8×10^{-6} ^[6]	1.25×10^{-5} ^[8]
Brillion gain coefficient	$g_B / (\text{m}/\text{W})$	2.5×10^{-11} ^[6]	5×10^{-11} ^[6]	0.5×10^{-11} ^[11]	3.1×10^{-13} ^[8]
Small signal pump absorption	A / dB	20 ^[6]	20 ^[6]	20 ^[6]	20 ^[6]
Assumed laser gain	G	10 ^[6]	10 ^[6]	10 ^[6]	10 ^[6]
Ratio of mode field radius and core radius	Γ	0.8 ^[6]	0.8 ^[6]	0.8 ^[6]	0.8 ^[6]
Optical damage limit	$I_{\text{damage}} / (\text{W}/\mu\text{m}^2)$	6.5 ^[6]	35 ^[6]	18 ^[6]	35 ^[6]
Coolant temperature	T_c / K	300 ^[6]	300 ^[6]	300 ^[6]	300 ^[6]
Pump brightness limit	$I_{\text{pump}} / [\text{W}/(\mu\text{m}^2\cdot\text{Sr})]$	0.1 ^[6]	0.1 ^[6]	0.1 ^[6]	0.1 ^[6]
Core absorption	$\alpha_{\text{core}} / (\text{dB}/\text{m})$	3750 ^[7]	250 ^[6]	3250 ^[6]	250 ^[6]
Laser efficiency	η_{laser}	0.86 ^[7]	0.85 ^[6]	0.67 ^[11]	0.67
Heat fraction	η_{heat}	0.13	0.14	0.267	0.276
Cladding NA	R_{NA}	0.64 ^[6]	0.45 ^[6]	1.18 ^[6]	0.75
Wavelength of laser	$\lambda / \mu\text{m}$	1.03 ^[6]	1.078 ^[6]	1.03 ^[6]	1.064

根据现有的最高激光效率和量子效率就可以估算出传输损耗。同时,光纤的热转换系数与量子损耗和传输损耗关系为^[12]

$$\eta_{\text{heat}} = \eta_{\text{q}} + 0.77\eta_{\text{p}}. \quad (10)$$

虽然(10)式中系数 0.77 是在磷酸盐光纤中测得的,但为了方便起见认为对其他光纤也适用。通过(8)~(10)式和对应的激光器效率计算得到各类光纤的热转换系数如表 1 所示。从表 1 中可以看出,其结果都大于 0.1。

蓝宝石光纤激光的效率和热转换系数的计算稍有不同。因为目前还没有这类激光的实验研究,所以根据测得的蓝宝石光纤的损耗系数计算出其传输损耗,再根据(8)式和(10)式进行计算。其中蓝宝石光纤在 1 μm 附近的损耗约为 0.4 dB/m^[8],由公式

$$\eta_{\text{p}} = 1 - 10^{-\alpha L / 10}, \quad (11)$$

计算得 $\eta_{\text{p}} \approx 0.241$,取光纤长度 $L = 3 \text{ m}$ 。所以 $\eta_{\text{laser}} = 0.67$, $\eta_{\text{heat}} = 0.276$ 。

4 计算结果与讨论

根据表 1 中的数据计算在不同纤芯直径和光纤长度条件下,以上 6 种限制因素的阈值功率,以最小功率对应的物理机制作为其限制因素作图分析。

4.1 Yb³⁺ 掺杂硅玻璃光纤

由图 1(a)可以看出,硅玻璃光纤极限输出功率受限的因素主要是抽运光亮度、热透镜效应和 SBS 效应。但是由于热转换系数变大使热透镜效应的影响范围加大,当纤芯直径大于 58 μm 时,增大纤芯直径无法再提高输出功率,最终极限输出为 1.58 kW[图 1(b)]。比较文献[6]的计算结果可知,对于硅光纤,热转移系数增大 4%,其极限输出功率由 1.86 kW 变为 1.58 kW,减少了 15%。

4.2 Yb³⁺ 掺杂磷酸盐光纤

图 2 表明,由于磷酸盐光纤在热性能和机械性能上效果较差,虽然其 SBS 增益系数比硅光纤小一半,但在极限输出功率提升上效果不是非常明显,极限输出功率为 2.03 kW。另外,与硅玻璃光纤相比多了光学损伤和纤芯熔化两个限制,特别是芯径在 14~45 μm 之间,若要获得功率提升,必须处理好废热的问题。磷酸盐光纤的热学和机械性能差也导致了其在实际应用的切割、熔接中存在困难。目前来说,磷酸盐光纤的背景损耗也比较大,较长的磷酸盐光纤会使系统效率较低。不过,磷酸盐光纤的热光系数是负值,即温度升高折射率降低,这在高功率情况下有利于提高光束质量^[6]。

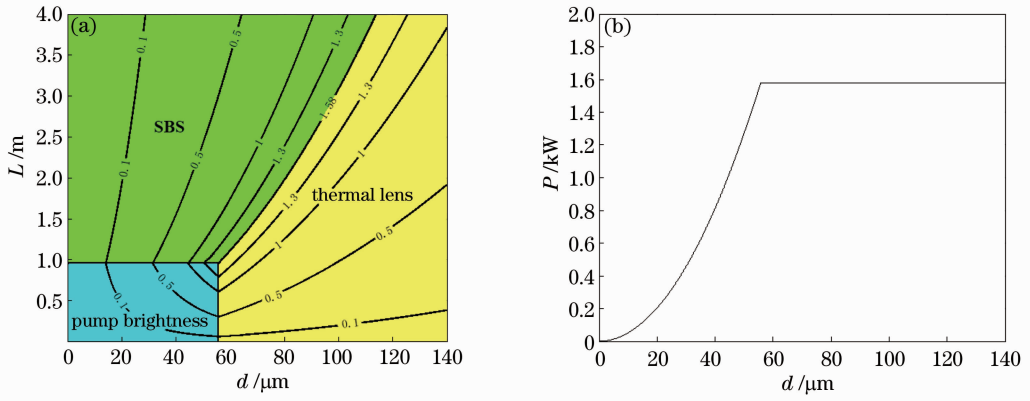


图 1 (a) Yb^{3+} 掺杂硅玻璃光纤单频极限输出功率受限因素(功率等高线单位 kW); (b) 极限输出功率与纤芯直径关系
 Fig. 1 (a) Limitations of extractable single-mode power of Yb^{3+} -doped silicon fiber (the unit of the contour is kW); (b) relationship between the maximal output power and diameter of fiber core

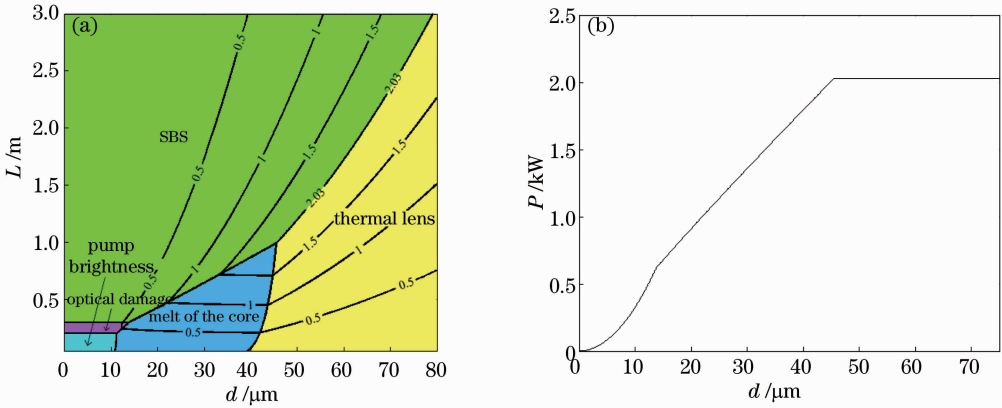


图 2 (a) Yb^{3+} 掺杂磷酸盐光纤单频极限输出功率受限因素(功率等高线单位 kW); (b) 极限输出功率与纤芯直径关系
 Fig. 2 (a) Limitations of extractable single-mode power of Yb^{3+} -doped phosphate fiber (the unit of the contour is kW); (b) relationship between maximal output power and diameter of fiber core

4.3 Yb^{3+} :YAG 晶体(或陶瓷)光纤

YAG 晶体(或陶瓷)有良好的导热性能,同时其 SBS 增益系数也比硅光纤要低一个量级,因此是一

种很有潜力的光纤基质。从图 3 的结果可以看出,虽然其功率提升受限因素与磷酸盐光纤相同,但极限输出功率可以达到 10.5 kW,是磷酸盐光纤的近

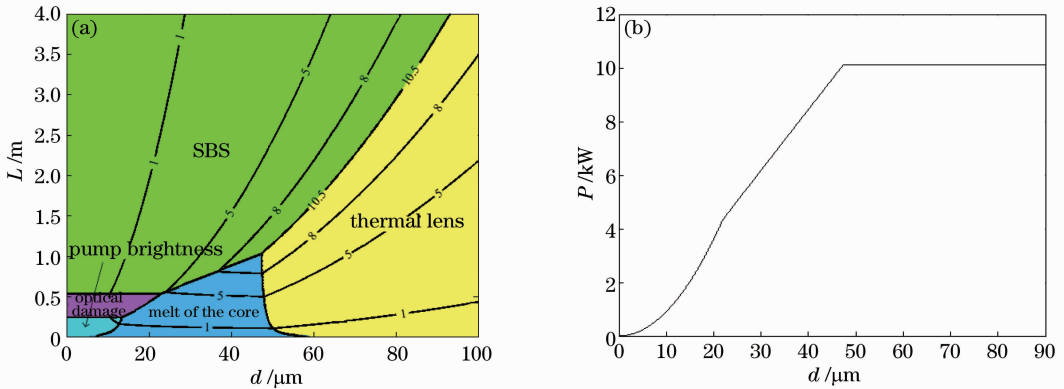


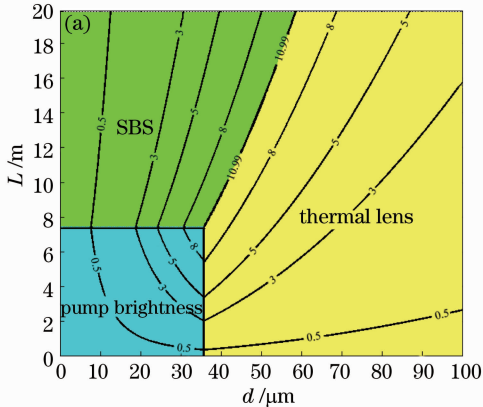
图 3 (a) Yb^{3+} :YAG 晶体(或陶瓷)光纤单频极限输出功率受限因素(功率等高线单位 kW); (b) 极限输出功率与纤芯直径关系

Fig. 3 (a) Limitations of extractable single-mode power of Yb^{3+} :YAG crystal (or ceramic) fiber (the unit of the contour is kW); (b) relationship between the maximal output power and diameter of fiber core

5 倍。目前此种光纤还处于初始研究阶段,其难点在于无法很好地制造出较长、直径均匀的光纤,并且材料的损耗相对较大^[13]。当前该种光纤现有报道的最高峰值功率约为 590 W^[14],YAG 晶体(或陶瓷)光纤还具有很大的功率提升空间。

4.4 蓝宝石光纤

由图 4 可以看出,蓝宝石光纤极限输出功率只受限于抽运亮度、SBS 效应和热透镜效应。通过增加光纤长度就能较容易地实现几千瓦的功率输出,



而且最终的极限输出功率可高达 10.99 kW,此时对应的最小芯径只有 36 μm,这极好地保证了输出激光的光束质量,同时由于较低的 SBS 增益系数,光纤长度可以取得较长,具有较好的散热和降低掺杂浓度从而抑制光子暗化潜力。蓝宝石光纤由于采用了新的制造工艺,可以获得较长的光纤,但目前芯径还比较大^[8],若能制造出芯径小于 40 μm,并且能实现有效掺杂的蓝宝石光纤,无疑对单频激光功率的提升具有重要意义。

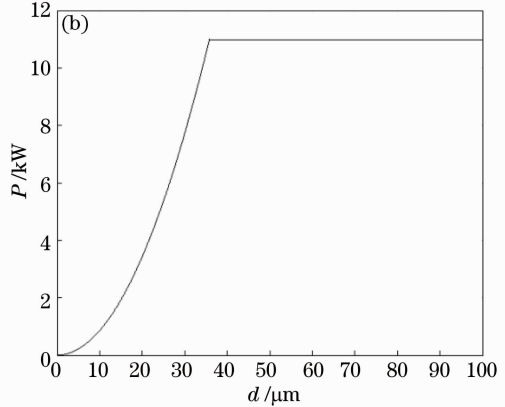


图 4 (a) 蓝宝石光纤单频极限输出功率受限因素(功率等高线单位 kW); (b) 极限输出功率与纤芯直径关系

Fig. 4 (a) Limitations of extractable single-mode power of sapphire fiber (the unit of the contour is kW); (b) relationship between the maximal output power and diameter of fiber core

4.5 不同光纤材料单模极限输出功率

在实际应用中,为了获得较好的光束质量、实现有效的远距离传播,要保证光纤输出的激光是单模或者少模^[15]。光纤中严格单模条件可以表示为

$$V = \frac{2\pi a R_{NA}}{\lambda} < 2.405, \quad (12)$$

改变纤芯的数值孔径 R_{NA} , 计算各类光纤的极限输出功率如图 5 所示。

由图 5 可知,随着纤芯数值孔径的增大,单模极限输出功率不断减小,这是因为极限输出功率随纤芯增大而增大,为了保证单模条件,由(12)式可知,当数值孔径增大时,芯径减小,因此极限输出功率降低。从数值上看,硅光纤的单模极限输出功率最小,YAG 光纤和蓝宝石光纤的单模极限输出功率与数值孔径关系基本一致,这是由于单模情况下芯径较小,此时限制极限输出功率的因素为抽运光亮度和 SBS 效应,这两种光纤的相关参数比较接近,所以其单模极限输出能力相同。假设 4 种光纤的纤芯数值孔径最小都可到达 0.04,则此时它们的极限输出功率分别为:硅光纤 210 W、磷酸盐光纤 890 W、YAG 光纤和蓝宝石光纤 3500 W。可以看出,对于 YAG 光纤和蓝宝石光纤其单模输出极限输出功率比硅光

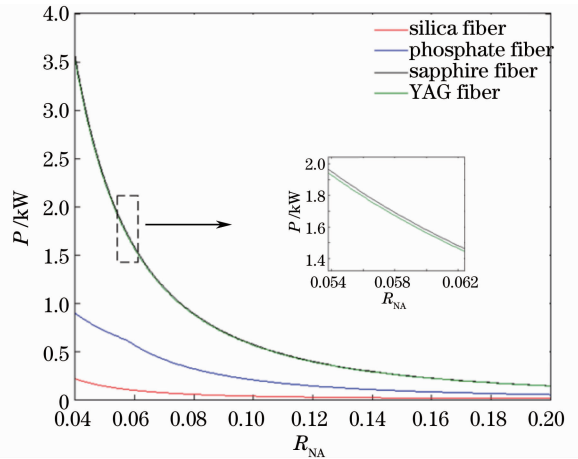


图 5 不同数值孔径时四种光纤单模极限输出功率

Fig. 5 Extractable single-mode power of the four kinds of fibers under different numerical apertures

纤和磷酸盐光纤的极限输出功率要分别高出 16.7 倍和 3.9 倍。

4 结 论

在改进的极限输出功率理论模型的基础上对现有的几类光纤材料如 Yb³⁺ 掺杂的磷酸盐光纤、硅光纤、YAG 晶体(或陶瓷)光纤以及蓝宝石光纤进行了

全面分析,得到了不同光纤功率提升限制因素和极限输出功率。结果表明 YAG 晶体(或陶瓷)光纤和蓝宝石光纤具有较好的单频极限输出功率性能,其极限输出功率可达 10 kW 以上,其缺点是目前还很难制造出长度较长、芯径较小且均匀的光纤。对于光纤材料,降低 SBS 阈值和提高热学性能,可以有效地提高光纤的单频极限输出功率。另外还对严格单模情况下的极限输出功率进行了分析,结果表明,随着纤芯数值孔径增大,极限输出功率减小,YAG 晶体(或陶瓷)光纤和蓝宝石光纤的单模极限输出功率与数值孔径的关系几乎相同,当数值孔径都为 0.04 时,其单模极限输出功率比硅光纤和磷酸盐光纤要分别高出 16.7 倍和 3.9 倍。

参 考 文 献

- 1 Zhou Pu. Study on Coherent Beam Combination Technology of Fiber Lasers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. 1—15.
周 朴. 光纤激光相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009. 1—15.
- 2 Y Jeong, J Nilsson, J K Sahu, *et al.*. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W [J]. *J Sel Top Quantum Electron*, 2007, 13(3): 546—551.
- 3 S Gray, A Liu, D T Walton, *et al.*. 502 Watt, single transverse mode, narrow linewidth, bidirectionally pumped Yb-doped fiber amplifier [J]. *Opt Express*, 2007, 15(25): 17044—17050.
- 4 X L Wang, P Zhou, H Xiao, *et al.*. 310 W single-frequency all-fiber laser in master oscillator power amplification configuration [J]. *Laser Phys Lett*, 2012, 9(8): 591—595.
- 5 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.
- 6 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, 7886: 788611.
- 7 J J Zhu, P Zhou, X L Wang, *et al.*. Analysis of maximum extractable power of single-frequency Yb³⁺-doped phosphate fiber sources [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2012, 48(4): 480—484.
- 8 P Dragic, T Hawkins, P Foy, *et al.*. Sapphire-derived all-glass optical fibres [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 627—633.
- 9 Y Fan, B He, J Zhou, *et al.*. Thermal effects in kilowatt all-fiber MOPA [J]. *Opt Express*, 2011, 19(16): 15162—15172.
- 10 G P Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 4th ed., San Diego: Academic Press, 2007. 79—83.
- 11 P D Dragic, Y Liua, J Ballatob, *et al.*. YAG-derived fiber for high-power narrow-linewidth fiber lasers [C]. SPIE, 2012, 8237: 82371E.
- 12 Y Lee, M J F Digonnet, S Sinha, *et al.*. High-power Yb³⁺-doped phosphate fiber amplifier [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2009, 15(1): 93—102.
- 13 X S Zhu, J A Harrington, B T Laustsena, *et al.*. Single-crystal YAG fiber optics for the transmission of high energy laser energy [C]. SPIE, 2011, 7894: 789415.
- 14 S Yoo, A S Webb, R J Standish, *et al.*. Q-switched neodymium-doped Y₃Al₅O₁₂-based silica fiber laser [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(12): 2181—2183.
- 15 Zhu Jiajian, Du Wenbo, Zhou Pu, *et al.*. Numerical study on power limit of single-mode fiber lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(6): 259—265.
朱家健, 杜文博, 周 朴, 等. 单模光纤激光极限功率的数值研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(6): 259—265.

栏目编辑: 宋梅梅