

# 单模光纤激光极限功率的数值研究

朱家健 杜文博 周朴<sup>†</sup> 许晓军 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(2011年4月26日收到; 2011年6月18日收到修改稿)

对光纤激光极限功率的探索和其受限因素的分析, 有利于为大功率光纤激光器的发展提供理论依据和实验指导. 本文考虑热效应、光效应、非线性效应和抽运亮度等因素对光纤激光极限功率的影响, 分析了掺镱和掺铥光纤的极限功率和受限因素. 在此基础上, 结合激光在光纤中单模传输的条件, 计算了单模掺镱和掺铥光纤激光的极限功率. 计算结果表明, 在现有技术条件下, 使用常规的 976 nm 和 793 nm 激光二极管抽运, 单模掺镱和掺铥光纤激光的极限功率分别为 4.2 kW 和 7.8 kW, 其中单模掺铥光纤激光的功率水平还远低于它的极限功率的原因是受抽运亮度的限制. 最后分析指出减小纤芯的数值孔径和改进少模光束的光束质量是提升单模光纤激光极限功率的重要途径.

**关键词:** 单模光纤激光, 极限功率, 掺镱光纤激光, 掺铥光纤激光

**PACS:** 42.55.Wd, 42.60.Lh

## 1 引言

光纤激光器具有光束质量好、效率高、散热容易、体积小等优点, 在工业加工、国防、医疗、通信和传感等领域拥有广阔的应用前景. 近年来随着大模场面积双包层光纤的问世和高亮度激光二极管抽运技术的发展, 光纤激光器的输出功率不断提高<sup>[1-12]</sup>. 光纤激光根据光谱特性可划分为单频和宽谱光纤激光两大类. 单频光纤激光由于受到受激布里渊散射 (SBS) 效应的影响, 输出功率始终禁锢在千瓦以内<sup>[5,6]</sup>. 而宽谱光纤激光可以克服 SBS 效应对功率提升的限制, 易于实现更高功率的激光输出. 单根掺镱和掺铥光纤都已经实现了千瓦以上的宽谱输出<sup>[7,8]</sup>, 美国 IPG 公司的掺镱光纤激光器更是在使用同带抽运的方法后实现了 10 kW 的单模连续输出<sup>[13]</sup>. 但是, 由于热效应、光功率损伤、受激拉曼散射 (SRS) 效应和抽运亮度等因素的影响和限制<sup>[14]</sup>, 宽谱光纤激光的输出功率也不可能无限制地增长下去, 而只能趋近于它的极限功率. 对光纤激光极限功率的探索和其受限因素的分析, 有利于为大功率光纤激光器的发展提供理论依据和实验指导.

目前, 国内外已经初步开展了对光纤激光极限功率的理论分析. 2008 年, 美国利弗莫尔实验

室 Dawson 等根据当时光纤制造工艺的水平和二极管抽运的亮度极限, 通过分析热破裂、纤芯融化、热透镜效应、光功率损伤、抽运亮度和非线性效应等因素对掺镱光纤激光功率提升的限制, 得出单根光纤在衍射受限条件下宽谱输出的极限功率为 36.6 kW<sup>[14]</sup>, 这一结果受到广泛的引用<sup>[15-19]</sup>. 2010 年, Dawson 等根据光纤承受光功率损伤能力的增加和二极管抽运亮度的提升, 更新了模型中的参数, 通过进一步的分析计算, 得出掺镱和掺铥光纤激光宽谱输出的极限功率分别为 36.85 kW 和 36.2 kW<sup>[19]</sup>. 国内枣庄学院薛冬等在分析光纤激光的热效应和非线性效应的基础上, 提出常规光纤在采用大功率制冷条件下, 能够得到 10 kW 级的极限功率<sup>[20]</sup>. 除此之外, 国内尚未见对光纤激光极限功率进行全面定量分析的报道.

然而, Dawson 等人的分析是建立在光纤的模场直径能够任意增加这一假设上<sup>[14]</sup>, 没有充分考虑在光纤制造工艺上实现这一假设的难度. 而且 36.6 kW 的极限功率是在光纤纤芯直径大于 90  $\mu\text{m}$  时获得的<sup>[14]</sup>, 若按照常规光纤的制造工艺水平, 取纤芯数值孔径为 0.05, 则归一化截止频率为 12.9, 此时光纤内的模式有 80 多个. 由此可见, 他们的分析没有涉及到单模条件下光纤激光的极限功率. 而单模光纤激光在国防、远距离传输等实际应用中

<sup>†</sup> E-mail: Zhoupu203@163.com

具有重要意义,其功率极限值得深入研究.但是,文献 [14] 并没有分析单模光纤激光的极限功率,文献 [20] 则只侧重于对高功率条件下光纤内热效应的分析,因此单模光纤激光的极限功率亟待精确的分析和计算.

本文全面分析和计算了单模宽谱光纤激光的极限功率.首先考虑热效应、光效应、非线性效应、抽运亮度等因素对光纤激光功率提升的限制,以掺镱和掺铥光纤激光为例,分析光纤激光的极限功率和受限因素,然后在单模条件下,计算了单模掺镱和掺铥光纤激光的极限功率,最后分析了单模光纤激光极限功率提升的途径.

## 2 理论模型

### 2.1 基本方程

大功率的光纤激光主要受限于热效应、光效应、非线性效应和抽运亮度.热效应主要包括热破裂、纤芯融化、热透镜效应 [14].热破裂是指激光功率转化为热之后造成光纤表面材料的受热损伤和破裂;纤芯融化是指光纤内热量储存起来,导致光纤纤芯的融化受损;热透镜效应是由于光纤内的折射率随温度变化,使光沿折射率高的方向传播而形成的,其作用效果相当于在光纤内部产生了一个“透镜”.光效应主要是指光功率对光纤端面的损伤;非线性效应主要包括受激拉曼散射 (SRS) 和 SBS,对于宽谱光纤激光,非线性效应主要来自 SRS,单频光纤激光则主要受限于 SBS,本文主要考虑宽谱激光的极限功率,因此非线性效应主要考虑 SRS;抽运亮度的限制是指抽运的功率不够高或者光束质量不够好.抽运亮度直接关系到抽运光耦合进入光纤的多少,是决定光纤激光极限功率的重要因素.目前的掺镱和掺铥光纤激光通常使用 976 nm 和 793 nm 激光二极管作为泵源.在热破裂、纤芯融化、热透镜效应、SRS,光效应和抽运亮度等因素限制下光纤可输出的最大功率分别为 [14]

$$P_1 = \frac{4\eta_{\text{laser}}\pi R_m L}{\eta_{\text{heat}}\left(1 - \frac{a^2}{2b^2}\right)}, \quad (1)$$

$$P_2 = \frac{4\eta_{\text{laser}}\pi k(T_m - T_c)L}{\eta_{\text{heat}}\left(1 + \frac{2k}{b \cdot h} + 2\ln\left(\frac{b}{a}\right)\right)}, \quad (2)$$

$$P_3 = \frac{\eta_{\text{laser}}\pi k\lambda^2 L}{2\eta_{\text{heat}}\frac{dn}{dT}a^2}, \quad (3)$$

$$P_4 \approx \frac{16\pi a^2 \Gamma^2 \ln(G)}{g_R L}, \quad (4)$$

$$P_5 = \Gamma^2 \pi a^2 I_{\text{damage}}, \quad (5)$$

$$P_6 = \eta_{\text{laser}} I_{\text{pump}} \pi^2 (NA)^2 \frac{\alpha_{\text{core}}}{A} La^2, \quad (6)$$

其中  $a$  为纤芯半径,  $b$  为包层半径,  $L$  为光纤的长度,其余各参数的含义及其取值见表 1.

### 2.2 基本思路和步骤

在上述基本方程的基础上,考虑光纤的单模条件

$$V = \frac{2\pi a NA}{\lambda} < 2.405, \quad (7)$$

其中  $NA$  为纤芯的数值孔径.以 (7) 式为限定条件,结合基本方程 (1)—(6) 式,计算光纤激光的极限功率.在实际计算中,以激光二极管抽运的石英基掺镱和石英基掺铥光纤为研究对象,结合当前光纤制造和激光二极管工艺的水平,综合考虑热破裂、纤芯融化、热透镜效应、光效应、非线性效应(宽谱主要考虑 SRS 效应)和抽运亮度等对激光极限功率的影响,分别计算在不同光纤长度 ( $L$ ) 和纤芯直径 ( $2a$ ) 下,掺镱和掺铥光纤单模输出的极限功率.具体步骤如下:

1) 根据当前光纤制造和激光二极管工艺的水平以及文献 [14, 19],选定石英基掺镱和掺铥光纤的特性参数,如表 1 所示;

2) 根据基本方程分别计算在 ( $2a, L$ ) 区域内受限于单一因素(热破裂、纤芯融化、热透镜效应、光效应、SRS 效应)的功率  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ ,比较任意 ( $2a, L$ ) 区域内  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$  的大小,选取其中最小的一个作为该区域内激光的极限功率,与极限功率对应的因素为受限因素,相应的 ( $2a, L$ ) 区域为该因素的受限区域;

3) 结合单模条件,计算不同纤芯数值孔径 ( $NA$ ) 下,能够满足单模条件的光纤纤芯直径 ( $2a$ ),分析不同光纤长度 ( $L$ ) 下激光极限功率的受限因素,找到不同受限因素下的受限区域 ( $2a, L$ ),在受限区域 ( $2a, L$ ) 内选取最优长度,计算单模条件下掺镱和掺铥光纤激光的极限功率.

表 1 模型中所用参数的含义和取值 [14,19]

参数名称	符号	掺铊石英玻璃	掺铈石英玻璃	单位
石英断裂模数	$R_m$	2640	2640	W/m
石英导热系数	$k$	1.38	1.38	W/(mK)
光纤冷却对流系数	$h$	$10^4$	$10^4$	W/(m <sup>2</sup> K)
石英融化温度	$T_m$	1983	1983	K
石英中折射率随温度的变化	$dn/dT$	$11.8 \times 10^{-6}$	$11.8 \times 10^{-6}$	1/K
峰值拉曼增益系数	$g_R$	$10^{-13}$	$10^{-13}$	m/W
激光的小信号抽运吸收	$A$	20	20	dB
假定的激光增益	$G$	10	10	—
模场半径与纤芯半径之比	$\Gamma$	0.8	0.8	—
光损伤极限	$I_{\text{damage}}$	35	35	W/ $\mu\text{m}^2$
冷却温度	$T_c$	300	300	K
抽运亮度极限	$I_{\text{pump}}$	0.1	0.018	W/( $\mu\text{m}^2 \times \text{Sr}$ )
在抽运波长处纤芯的峰值吸收	$\alpha_{\text{core}}$	250	450	dB/m
抽运光转换为激光的比例	$\eta_{\text{laser}}$	0.84	0.7	—
纤芯中抽运光转换为热的比例	$\eta_{\text{heat}}$	0.1	0.3	—
包层数值孔径	$Na$	0.45	0.45	—
激光波长	$\lambda$	1.078	2.040	$\mu\text{m}$

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 掺铊和掺铈光纤激光的极限功率和受限因素

根据 2.1 中光纤激光受限因素的基本方程, 运用 2.2 中的基本思路和步骤, 进一步计算和分析在任意  $(2a, L)$  组合下掺铊和掺铈光纤激光的极限功率和受限因素. 图 1 给出了在不同长度和芯径下掺铊和掺铈光纤激光输出的受限因素 [14,19]. 从图中可以看出, 对于掺铊和掺铈光纤激光器, 当光纤纤芯直径在 0—160  $\mu\text{m}$ , 长度在 0—80 m 范围内时, 两者的极限功率主要受限于抽运亮度、热透镜效应和 SRS 效应. 对于芯径小 (掺铊光纤芯径小于 60  $\mu\text{m}$ , 掺铈光纤芯径小于 90  $\mu\text{m}$ ), 长度短 (掺铊光纤长度小于 20 m, 掺铈光纤长度小于 40 m) 的掺铈光纤, 激光输出的极限功率主要受限于抽运亮度; 当光纤向更大芯径发展时, 极限功率主要受限于热透镜效应; 而当使用更长的光纤时, 极限功率主要受限于 SRS 效应. 图 1 还给出了极限功率为 1 kW, 10 kW, 20 kW 和 30 kW 时, 对应的掺铊和掺铈光纤的长度、纤芯直径和此时的受限因素. 由图可见, 对于长度在 10 m 左右, 纤芯直径在 40  $\mu\text{m}$  上下的掺铊和掺铈光纤, 前者的极限功率约为 10 kW, 后者的极限功率约为 1 kW, 两者都受限于抽运亮度. Jeong 等的研究表明, 掺铊光纤在纤芯直径为 40  $\mu\text{m}$ , 长度为 12 m 时能够实现 1.36 kW 的激光输出, 增加抽运亮度后激光输出功率有望进一步提高 [7]; Moulton 等使用纤芯直径为 35  $\mu\text{m}$ , 长度为 7 m 的

掺铈光纤实现 885 W 的激光输出, 最大输出功率仅受限于抽运亮度 [21]. 这些实验结果与我们的理论分析完全符合.

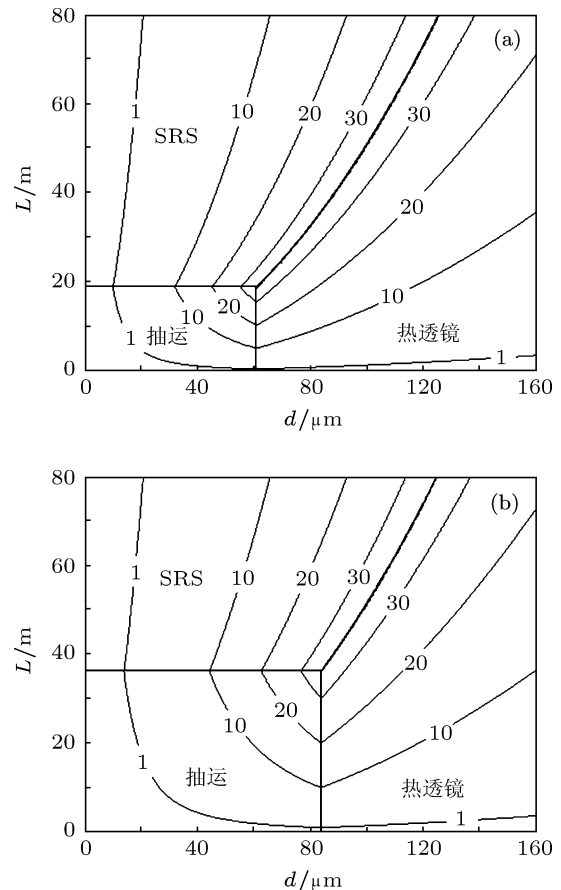


图 1 不同纤芯直径下掺铊和掺铈光纤激光受限因素 粗实线为受限因素的边界线, 细实线等功率线; (a) 掺铊光纤激光; (b) 掺铈光纤激光

根据图 1 中的受限因素和受限区域, 计算不同纤芯直径下掺铥和掺镱光纤激光输出的极限功率, 如图 2 所示. 由图 2 可知, 在一定范围内, 无论是掺镱还是掺铥光纤, 纤芯的直径越大, 它们的极限功率都越高; 当掺镱光纤纤芯的直径达  $61 \mu\text{m}$  时, 激光输出的极限功率为  $36.4 \text{ kW}$ , 再增加纤芯直径时, 极限功率保持不变; 同样地, 当掺铥光纤纤芯直径达  $84 \mu\text{m}$  时, 激光输出的极限功率为  $36.1 \text{ kW}$ , 再增加纤芯直径时, 极限功率保持不变.

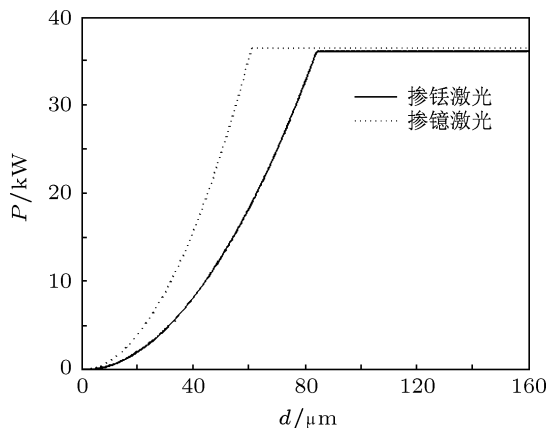


图 2 不同纤芯直径下掺镱和掺铥光纤激光极限功率

然而, 当纤芯直径达到  $61 \mu\text{m}$  或者  $84 \mu\text{m}$  时, 若要保证激光的单模传输, 则必须要求纤芯的数值孔径分别为  $0.014$  和  $0.019$ , 以目前的制造工艺, 这对常规光纤是难以实现的, 目前公开报道的常规光纤纤芯数值孔径最小只能到  $0.04$ <sup>[22]</sup>.

### 3.2 单模掺镱光纤激光极限功率

由 (7) 式可知, 对于波长已经确定的  $1.078 \mu\text{m}$  掺镱光纤, 单模条件由纤芯直径和纤芯的数值孔径决定. 因此, 单模光纤激光的极限功率与纤芯的数值孔径和纤芯直径有关. 目前报道的常规光纤纤芯数值孔径最小只到  $0.04$ <sup>[22]</sup>, 对于  $1.078 \mu\text{m}$  的掺镱光纤激光, 为了满足光纤激光的单模条件, 光纤的纤芯直径必须小于  $20.6 \mu\text{m}$ . 这在本质上限制了单模掺镱光纤激光极限功率的提升. 图 3 为单模掺镱光纤激光在不同纤芯数值孔径下的极限功率. 由图可知, 随着纤芯数值孔径的减少, 单模光纤激光的极限功率迅速增加. 当纤芯数值孔径增加到  $0.04$  时, 它的极限功率为  $4.2 \text{ kW}$ . 当采用特殊结构的光纤, 进一步降低纤芯的数值孔径时, 单模光纤激光的极限功率还有望进一步提高. 2009 年, Jeong 等人利用纤芯数值孔径低于  $0.06$  的掺镱光纤成功实

现功率大于  $2.1 \text{ kW}$  的  $1.1 \mu\text{m}$  激光单模输出<sup>[23]</sup>, 从图 3 可以看出, 此时已经比较接近单模掺镱光纤的极限功率. 虽然 Jeong 等在分析热管理、受激拉曼散射和材料损伤的基础上指出, 这种光纤的最终输出功率有望达到  $10 \text{ kW}$ <sup>[23]</sup>, 但是此后并没有更高功率的相关报道, 这也进一步说明其已经接近极限功率, 输出功率很难往上提升. 需要特别指出的是, 虽然美国 IPG 公司利用掺镱光纤实现了  $10 \text{ kW}$  的单模输出, 但是他们采用的不是本文所述的常规二极管抽运方式, 因此与本文的计算结果并不矛盾.

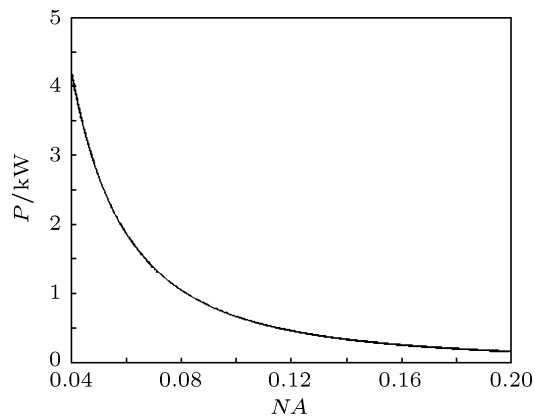


图 3 单模掺镱光纤激光在不同纤芯数值孔径下的极限功率

### 3.3 单模掺铥光纤激光极限功率

对于波长为  $2.040 \mu\text{m}$  的掺铥光纤激光, 为了满足激光的单模传输条件, 在现有技术条件下 ( $NA \geq 0.04$ ), 光纤的纤芯直径可达  $39 \mu\text{m}$ . 这意味着与单模掺镱光纤激光相比, 单模掺铥光纤激光的极限功率会更大. 图 4 为单模掺铥光纤激光在不同纤芯数值孔径下的极限功率. 由图可知, 当纤芯数值孔径为  $0.04$  时, 单模掺铥光纤激光的极限功率为  $7.8 \text{ kW}$ .

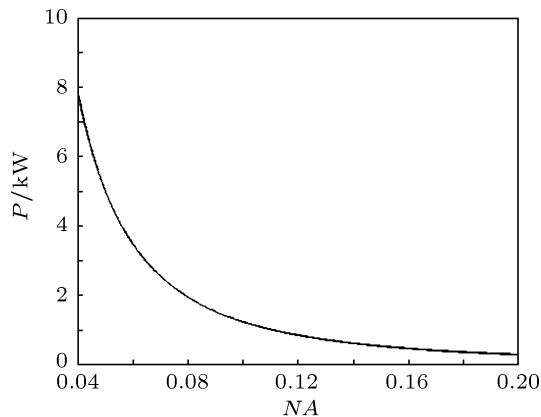


图 4 单模掺铥光纤激光在不同纤芯数值孔径下的极限功率

2008年,美国IPG光子技术公司的掺铈光纤激光实现415W的单模输出,这是当时掺铈光纤激光单模输出的最高水平<sup>[24]</sup>.可见,单模掺铈光纤激光的功率水平还比较低,远没有到达其极限功率,其输出的功率还有巨大的上升潜力等待挖掘.从图1(b)看,限制单模掺铈光纤激光功率水平提升最主要的原因是抽运亮度.因此,研究高功率高光束质量的泵源是提高单模掺铈光纤激光功率的关键.

### 3.4 单模光纤激光极限功率的提升途径

目前虽然单模光纤激光的功率水平还没有达到其极限功率,但是随着高亮度抽运技术的发展,单模光纤激光必然能够达到其极限功率.此时,若要进一步提升单模光纤激光的输出功率,则需要设法突破其极限功率的瓶颈.这可以通过减少光纤纤芯的数值孔径和改进少模光束的光束质量两种途径来实现.

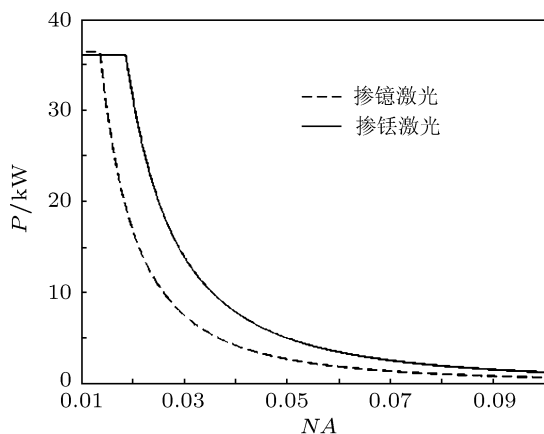


图5 纤芯数值孔径减小时单模光纤激光的极限功率

#### 3.4.1 减小光纤纤芯的数值孔径

单模光纤激光的极限功率与光纤纤芯的数值孔径密切相关.本文主要是讨论基于常规双层光纤制备工艺的掺杂光纤,由于目前掺杂工艺和材料选择的限制,常规双层光纤纤芯数值孔径最小为0.04<sup>[22]</sup>,这制约了其单模输出极限功率的提升.但实际上若采用光子晶体光纤等特殊结构,纤芯的数值孔径还可以更小.减小光纤纤芯的数值孔径,有利于在满足单模条件的基础上,增加光纤纤芯的直径,纤芯直径的增加,不仅有利于掺杂光纤充分吸收抽运光,而且减少了纤芯内的功率密度,提高了SRS效应的阈值,同时也分散了纤芯内的热量,有助于克服热效应

的影响.图5给出了纤芯数值孔径减小时,单模掺铈和掺铈光纤激光的极限功率.由图可知,当纤芯的数值孔径减少为0.02时,单模掺铈和掺铈光纤激光的极限功率就可以达到36kW左右.从图5还可以看出,在相同的纤芯数值孔径下,掺铈光纤激光能够具有更高的极限功率,这也再次证明掺铈光纤在实现大功率激光输出时具有自身独特的优势<sup>[25]</sup>.

#### 3.4.2 改进少模光束的光束质量

上述分析的极限功率是建立在单模条件下,即归一化频率 $V < 2.405$ ,此时光纤内只能单模传输.实际上,适当地放宽归一化频率的范围,即使光纤内存在少数几个模式,也能通过模式控制的方法,改进输出激光的光束质量,得到基膜或接近基膜的激光输出.模式控制方法包括特殊腔结构设计、光纤缠绕弯曲和光纤拉锥等<sup>[26]</sup>.图6给出了在少模条件下掺铈和掺铈光纤激光的极限功率,可以看到,即使光纤纤芯的数值孔径保持现有水平( $NA \geq 0.04$ ),随着归一化频率 $V$ 的增加,掺铈和掺铈光纤的极限功率也会显著提高.当纤芯数值孔径为0.04时,掺铈光纤激光在 $V = 8.654$ 时能

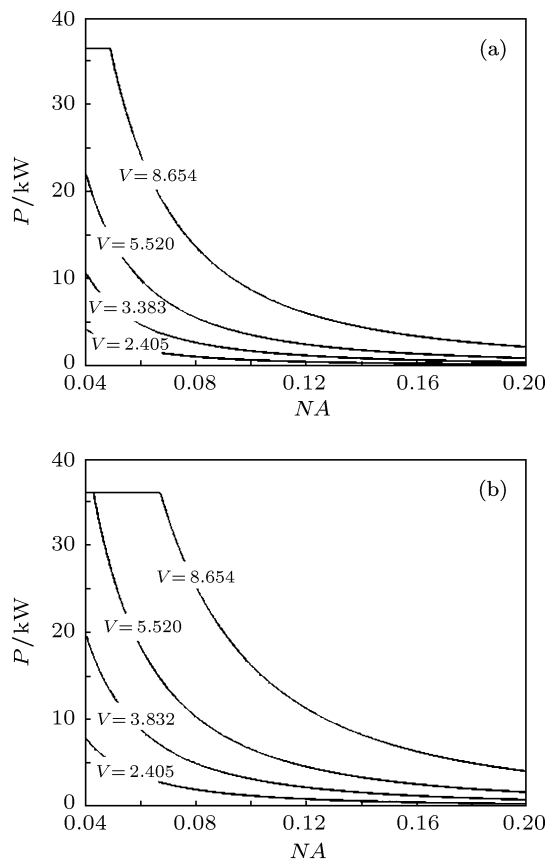


图6 在少模条件下掺铈和掺铈光纤激光的极限功率 (a) 掺铈光纤激光; (b) 掺铈光纤激光

够实现 36.4 kW 的极限输出, 而掺铋光纤激光在  $V = 5.520$  时就能得到 36.1 kW 的极限功率. 但是, 在进行模式控制时, 由于抑制了高阶模的振荡, 会在一定程度上造成激光输出功率的损失, 同时, 对功率为千瓦和十千瓦量级的光纤激光进行模式控制, 对各种光学器件的功率可承受能力也是一种考验.

## 4 结论

本文在研究热效应、光效应、抽运亮度和 SRS 效应等因素对光纤激光极限功率影响的基础上, 对掺镱和掺铋光纤激光的极限功率和受限因素进行了分析. 分析结果表明, 掺镱和掺铋光纤激光的极限功率随光纤纤芯直径的增加而

提高, 当芯径分别为 61 和 84  $\mu\text{m}$  时, 两者的最大极限功率分别为 36.4 和 36.1 kW, 两者功率的提升都主要受限于抽运亮度、SRS 和热透镜效应, 不同纤芯直径和光纤长度下受限因素不同. 在此基础上, 结合激光在光纤中传输的单模条件, 对单模掺镱和掺铋光纤激光的极限功率进行了数值计算. 计算结果表明, 在现有技术条件下 ( $NA \geq 0.04$ ), 使用常规的 976 和 793 nm 激光二极管抽运, 单模掺镱和掺铋光纤激光的极限功率分别为 4.2 和 7.8 kW, 其中单模掺铋光纤激光的功率水平还远低于它的极限功率的原因是受抽运亮度的限制. 最后分析指出减小纤芯的数值孔径和改进少模光束的光束质量是提升单模光纤激光极限功率的重要途径.

- 
- [1] Hayward R A, Clarkson W A, Turner P W, Nilsson J, Grudinin A B, Hanna D C 2000 *Electronics Letters* **36** 711
- [2] Limpert J, Liem A, Zellmer H, Tünnermann A 2003 *Electronics Letters* **39** 645
- [3] Zhou J, Lou Q H, Kong L F, Wu Z L, Xue D, Dong J X, Wei Y R, Ye Z H, Zhu J Q, Wang Z J 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1083
- [4] Zhou J, Lou Q H, Zhu J Q, He B, Dong J X, Wei Y R, Zhang F P, Li J Y, Li S Y, Zhao H M, Wang Z J 2006 *Acta Optica Sinica* **26** 1119 (in Chinese) [周军, 楼祺洪, 朱健强, 何兵, 董景星, 魏运荣, 张芳沛, 李进延, 李诗愈, 赵宏明, 王之江 2006 光学学报 **26** 1119]
- [5] Jeong Y, Nilsson J, Sahu J K, Payne D N, Horley R, Hickey L M B, Turner P W 2007 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron* **13** 546
- [6] Gregory D, Goodno, Lewis D, Book, Joshua E, Rothenberg 2009 *Opt. Lett.* **34** 1204
- [7] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, Nilsson J 2004 *Opt. Express* **12** 6088
- [8] Ehrenreich T, Leveille R, Majid I, Tankala K 2010 *SPIE Photonics West* 2010 January **28** 2010
- [9] Zhu H T, Lou Qi H, Zhou J, Qi Y F, Dong J X, Wei Y R 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4966 (in Chinese) [朱洪涛, 楼祺洪, 周军, 漆云凤, 董景星, 魏运荣 2008 物理学报 **57** 4966]
- [10] Qi Y F, Liu C, Zhou J, Chen W B, Dong J X, Wei Y R, Lou Q H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3942 (in Chinese) [漆云凤, 刘驰, 周军, 陈卫标, 董景星, 魏运荣, 楼祺洪 2010 物理学报 **59** 3942]
- [11] Wang X L, Zhou P, Ma Y X, Ma H T, Xu X J, Liu Z J, Zhao Y J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 973 (in Chinese) [王小林, 周朴, 马阎星, 马浩统, 许晓军, 刘泽金, 赵伊君 2010 物理学报 **59** 973]
- [12] Ma Y X, Wang X L, Leng J Y, Xiao H, Dong X L, Zhu J J, Du W B, Zhou P, Xu X J, Si L, Liu Z J, Zhao Y J 2011 *Opt. Lett.* **36** 951
- [13] Fomin V, Abramov M, Ferin A, Abramov A, Mochalov I D, Platonov N, Gapontsev V 2010 *5th International Symposium on High-Power Fiber Lasers and Their Applications* St. Petersburg June 28–July 1, 2010
- [14] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, Shverdin M Y, Stappaerts E A, Sridharan A K, Pax P H, Heebner J E, Siders C W, Barty C P J 2008 *Opt. Express* **16** 13240
- [15] Zhou P, Ma Y X, Wang X L, Ma H T, Xu X J, Liu Z J 2009 *Opt. Lett.* **34** 2939
- [16] Codemard C A, Sahu J K, Nilsson J 2010 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **46** 1860
- [17] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 65
- [18] Zhou P, Wang X, Ma Y, Tao R, Liu Z 2011 *Appl. Phys. B* DOI 10.1007/s00340-011-4491-6
- [19] Dawson J W, Messerly M J, Heebner J E, Pax P H, Sridharana A K, Bullington A L, Beach R J, Siders C W, Barty C P J, Dubinskiib M 2010 *Proc. of SPIE Laser Technology for Defense and Security* Orlando, Florida April 5 2010 p788611-2
- [20] Xue D, Zhou J, Lou Q H, Shuai M D 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 1013 (in Chinese) [薛冬, 周军, 楼祺洪, 胡敏东 2009 强激光与粒子束 **21** 1013]
- [21] Moulton P F, Rines G A, Slobodtchikov E V, Wall K F, Gavin F, Bryce S, Carter A L G 2009 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron* **15** 85
- [22] Liu A P 2007 *Opt. Express* **15** 978
- [23] Jeong Y, Boyland A J, Sahu J K, Chung S, Nilsson J, Payne D H 2009 *Journal of the Optical Society of Korea* **13** 416
- [24] Meleshkevich M, Platonov N, Gapontsev D, Drozhzhin A 2007 *Lasers and Electro-Optics, and the International Quantum Electronics Conference* Munich, June 17–22, 2007 p1
- [25] Han K, Ma Y X, Wang X L, Zhou P, Xu X J, Liu Z J 2010 *Laser & Optoelectronics Progress* **47** 101406-1 (in Chinese) [韩凯, 马阎星, 王小林, 周朴, 许晓军, 刘泽金 2010 激光与光电子进展 **47** 101406-1]
- [26] Lou Q H, Zhou J, Zhang H B, Yuan Z J 2010 *Chinese Journal of Lasers* **37** 2235 (in Chinese) [楼祺洪, 周军, 张海波, 袁志军 2010 中国激光 **37** 2235]

# Numerical study on power limit of single-mode fiber lasers

Zhu Jia-Jian Du Wen-Bo Zhou Pu<sup>†</sup> Xu Xiao-Jun Liu Ze-Jin

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

(Received 26 April 2011; revised manuscript received 18 June 2011)

## Abstract

Study on power limit of fiber lasers and analysis of their physical limits are helpful to develop high power fiber lasers both in theory and in experiment. In this paper, power limits and physical limits of ytterbium-doped and thulium-doped fiber lasers are analyzed by considering several limits to the power scalability of fiber laser, including thermal effect, optical effect, nonlinear effect and the brightness of pump source. Then combining these considerations with the basic requirement for single-mode fiber, the power limits of single-mode ytterbium-doped and thulium-doped fiber lasers are calculated. It is found that using traditional 976 nm and 793 nm laser diodes, separately, as a pump source, based on current technical conditions, power limits of single-mode ytterbium-doped and thulium-doped fiber lasers are 4.2 kW and 7.8 kW, respectively. It is concluded that the fact that the actual power presented by the single-mode thulium-doped fiber laser is much lower than its limit power is due to the pump brightness limitation. Finally the principal approaches to enhancing power limits of single-mode fiber lasers are summarized, including reducing numerical aperture of fiber core and improving beam quality of few-mode fiber lasers.

**Keywords:** single-mode fiber laser, power limit, ytterbium-doped fiber laser, thulium-doped fiber laser

**PACS:** 42.55.Wd, 42.60.Lh

---

<sup>†</sup> E-mail: Zhoupu203@163.com