

## 2 $\mu\text{m}$ 硅基掺钬光纤激光器极限功率分析

朱亚东 周 朴 张汉伟 王小林 郭少锋

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 研究了掺钬光纤激光极限输出功率, 综合考虑热效应、光纤损伤、抽运亮度以及非线性效应的影响, 计算了硅基掺钬光纤激光两种常规的抽运方式(掺镱激光抽运和掺铥激光抽运)在连续运转情况下的极限功率。计算结果表明, 在现有工艺条件下, 两种抽运方式的极限功率分别是 29.9 kW 和 70.2 kW。功率的受限因素主要包括抽运亮度、热透镜效应和受激拉曼散射(SRS), 其中进一步提高抽运亮度是当前实现掺钬光纤激光高功率输出的主要有效途径。考虑了相应的单频激光输出以及受单模条件限制时的极限功率和受限因素。对两种抽运方案比较可得, 掺铥激光抽运方案更具高功率输出优势。

**关键词** 激光器; 掺钬光纤; 功率提升; 级联抽运

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0614004

### Analysis of Maximum Extractable Power of 2 $\mu\text{m}$ Holmium-Doped Silica Fiber Lasers

Zhu Yadong Zhou Pu Zhang Hanwei Wang Xiaolin Guo Shaofeng

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

**Abstract** We study the power limit of holmium-doped fiber lasers with the consideration of thermal effects, optical damage effect, brightness of pump source and nonlinear effects. Power limits and physical limits of holmium-doped silica fiber lasers in both pump regions (pumped with ytterbium-doped or thulium-doped laser source) are calculated. It is found that using both of the two pump regions, separately, based on current technical conditions, power limits of broad bandwidth holmium-doped fiber lasers are 29.9 kW and 70.2 kW, respectively. Limits to power now are, in fact, brightness of the pump sources, thermal lens effect and stimulated Raman scattering (SRS), and thus to improve the brightness of the pump sources is an effective method to promote high output power of holmium-doped fiber lasers. The situations of fiber lasers with single-frequency and strict single-mode operation are considered. At the same time, fiber laser pumped with a thulium-doped laser source has an advantage for achieving higher output power.

**Key words** lasers; Ho-doped fiber; power scaling; cascade pump

**OCIS codes** 140.3430; 060.3510; 140.3070

## 1 引 言

光纤激光器因具有转换效率高、散热好、光束质量高、易于系统集成等显著特点而受到人们的广泛关注<sup>[1~12]</sup>。其中 2  $\mu\text{m}$  波段激光可广泛应用于激光医学、雷达遥感、激光切割以及作为中红外 3~5  $\mu\text{m}$

的高效抽运源, 近年来得到了广泛的关注<sup>[1~8]</sup>。实现该波段激光输出的主要形式有掺铥激光器、掺钬激光器以及拉曼激光器<sup>[1~5]</sup>。其中, 掺铥、掺钬激光器在短波处存在较强的抽运吸收带, 容易实现高功率激光输出<sup>[2~5]</sup>。与此同时, 掺钬激光器是所有硅基掺杂

收稿日期: 2013-02-01; 收到修改稿日期: 2013-03-06

作者简介: 朱亚东(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光和放大器及其相干合成技术等方面的研究。

E-mail: zhuyadong\_2011@163.com

导师简介: 周 朴(1984—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光纤激光和放大器及其相干合成技术等方面的研究。

E-mail: zhoup203@163.com(通信联系人)

光纤激光输出波段最长的(2~2.15  $\mu\text{m}$ ,由 $^5\text{I}_7 \rightarrow ^5\text{I}_8$  能级跃迁而定),其发射谱对应着大气传输窗口。相比掺铥激光而言,由于抽运机制的限制,大功率掺铥光纤激光器的研究起步较晚。这是因为  $\text{Ho}^{3+}$  的强吸收带处在可见光波段,首例掺铥光纤激光器就是利用中心波长在 457.9 nm 的氩激光抽运而得<sup>[13]</sup>,而对于 0.79~0.8  $\mu\text{m}$ 的半导体激光波段, $\text{Ho}^{3+}$  的吸收非常弱。近年来,抽运机制的改善使得掺铥激光的功率得到迅速提升,利用  $\text{Ho}^{3+}$  在 1150 nm 和 1950 nm 两处较强的抽运吸收带对掺铥激光进行激光级联抽运,这两个波段激光可分别通过掺镱和掺铥光纤激光(YDFL 和 TDFL)实现。Hemming 等<sup>[4]</sup> 利用中心波长为 1950 nm 的掺铥激光抽运掺铥激光器,实现波长在 2.125~2.135  $\mu\text{m}$  处 140 W 的高功率输出,斜率效率为 57%。2010 年,Kurkov 等<sup>[5]</sup> 实现 10 W 全光纤掺铥激光输出,采用输出中心波长为 1.15  $\mu\text{m}$  掺镱激光抽运方案。然而,同其他掺杂光纤激光器一样,掺铥光纤激光器受到热效应、光纤损伤、抽运源亮度和非线性效应等因素的限制,功率不可能无限提升。因此对掺铥光纤激光的极限功率以及受限因素分析就显得尤为重要。国内外对光纤激光极限功率的理论分析主要针对掺镱、掺铒以及掺铥光纤激光<sup>[14,15]</sup>。然而,目前尚未见对掺铥激光极限功率进行全面定量分析的报道。

本文综合考虑光纤激光相关受限因素,对硅基掺铥光纤激光在连续运转的各种方式下(宽谱、单频以及单模)两种常规抽运机制的极限功率以及受限因素进行了数值计算,得到相应极限功率数值并对相应的受限因素进行相关分析。计算结果充分论证硅基掺铥光纤激光具有高功率输出潜力。

## 2 理论模型

### 2.1 基本方程

连续波运转的掺铥激光输出功率,均受到热效应、光纤损伤以及抽运亮度等因素的影响,其中热效应还包括热破裂、热透镜效应和纤芯融化。各项因素对应的极限功率表达式如下<sup>[14]</sup>:

$$P_{\text{TF}} = 4\eta_{\text{laser}} \pi R_m L / [\eta_{\text{heat}} (1 - a^2/2b^2)], \quad (1)$$

$$P_{\text{TL}} = \eta_{\text{laser}} \pi k \lambda^2 L / [2\eta_{\text{heat}} (dn/dT) a^2], \quad (2)$$

$$P_{\text{MC}} = 4\eta_{\text{laser}} \pi k (T_m - T_c) L / \{ \eta_{\text{heat}} [1 + 2k/bh + 2\ln(b/a)] \}, \quad (3)$$

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

$$P_{\text{PB}} = \eta_{\text{laser}} I_{\text{pump}} (\pi b^2) (\pi NA^2), \quad (5)$$

式中下标 TF, TL, MC, OD 和 PB 分别代表热破裂、热透镜效应、纤芯融化、光纤损伤以及抽运亮度。 $a$  为纤芯半径, $b$  为包层半径,两者关系可表示为  $b = a(\alpha_{\text{core}} L/A)^{1/2}$ ,  $L$  为光纤长度,其余参量如表 1 所示。

表 1 模型中所用参数名称、符号、取值、单位和参考文献

Table 1 List of parameters, symbols used in text, values and units used in calculation as well as their references

Parameters	Symbol	Pump with YDFL	Pump with TDFL	Units
Rupture modulus	$R_m$	2640 <sup>[25]</sup>	2640 <sup>[25]</sup>	W/m
Thermal conductive coefficient	$k$	1.38 <sup>[25]</sup>	1.38 <sup>[25]</sup>	W/(m·K)
Convective film coefficient	$h$	10 <sup>4[25]</sup>	10 <sup>4[25]</sup>	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Melt temperature	$T_m$	1983 <sup>[25]</sup>	1983 <sup>[25]</sup>	K
Change in index with temperature	$dn/dT$	11.8×10 <sup>-6[25]</sup>	11.8×10 <sup>-6[25]</sup>	1/K
Brillouin gain coefficient	$g_B$	5×10 <sup>-11[25]</sup>	5×10 <sup>-11[25]</sup>	m/W
Raman gain coefficient	$g_R$	10 <sup>-13[25]</sup>	10 <sup>-13[25]</sup>	m/W
Power ratio between Ramam and signal	$\beta$	0.01 <sup>[16]</sup>	0.01 <sup>[16]</sup>	—
Small signal pump absorption	$A$	20	20	dB
Assumed laser gain	$G$	10	10	—
Ratio of mode field radius to core radius	$\Gamma$	0.8	0.8	—
Optical damage limit	$I_{\text{damage}}$	35 <sup>[14]</sup>	35 <sup>[14]</sup>	W/ $\mu\text{m}^2$
Coolant temperature	$T_c$	300	300	K
Pump brightness limit	$I_{\text{pump}}$	0.15	0.3	W/( $\mu\text{m}^2 \cdot \text{Sr}$ )
Core absorption	$\alpha_{\text{core}}$	55 <sup>[8]</sup>	125 <sup>[8]</sup>	dB/m
Cladding numerical aperture	$NA$	0.46	0.46	—
Core numerical aperture	$NA_{\text{core}}$	0.08	0.08	—
Laser efficiency	$\eta_{\text{laser}}$	0.46 <sup>[18]</sup>	0.82 <sup>[19]</sup>	—
Heat fraction	$\eta_{\text{heat}}$	0.54	0.18	—
Wavelength of laser	$\lambda$	2050	2050	$\mu\text{m}$

非线性效应主要分为受激拉曼散射(SRS)和受激布里渊散射(SBS),对于宽谱光纤激光非线性效应主要来自SRS,然而对于单频激光,SBS对于功率提升的限制超过SRS的影响。相应的功率受限公式如下<sup>[16,17]</sup>:

$$P_{\text{SRS}} = \frac{[20.3 - \ln \beta + \ln(A_{\text{eff}}/g_{\text{R}}L_{\text{eff}})]A_{\text{eff}}}{g_{\text{R}}L_{\text{eff}}}, \quad (6)$$

$$P_{\text{SBS}} = \frac{21A_{\text{eff}}}{g_{\text{B}}L_{\text{eff}}}, \quad (7)$$

式中  $g_{\text{R}}$  和  $g_{\text{B}}$  分别为受激拉曼系数和受激布里渊系数。 $\beta$  为功率输出端阈值功率时拉曼功率与信号功率的比值(典型值为 0.01)。定义有效光纤长度  $L_{\text{eff}} = GL/\ln G$  和有效模式场  $A_{\text{eff}} = \Gamma^e \pi a^2$ , 相关参量参见表 1。

考虑到常规光纤制造工艺水平,以及单模光纤在实际应用中的重要意义,因此对宽谱和单频激光条件下的单模情况进行分析。文献[15]即在上述相应情况的基础上结合单模输出条件的限制

$$V = \frac{2\pi a(\text{NA}_{\text{core}})}{\lambda} < 2.405, \quad (8)$$

式中  $\text{NA}_{\text{core}}$  为纤芯的数值孔径,2 μm 波段的典型值

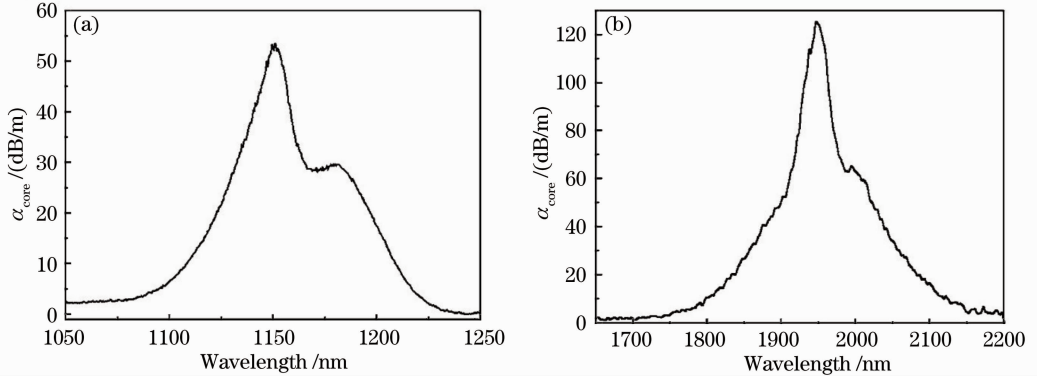


图 1 硅基掺铥光纤纤芯吸收系数。(a) 1050~1250 nm; (b) 1650~2200 nm

Fig. 1 Absorption bands of Ho-doped silica fiber. (a) 1050~1250 nm; (b) 1650~2200 nm

根据基本方程在不同运转模式下分别计算( $2a, L$ )区域内受限于单一因素(热破裂、热透镜效应、纤芯融化、光纤损伤、抽运亮度和非线性效应)的功率  $P_{\text{TF}}, P_{\text{TL}}, P_{\text{MC}}, P_{\text{OD}}, P_{\text{PB}}, P_{\text{SRS}}$  (或  $P_{\text{SBS}}$ ), 并比较任意( $2a, L$ )区域内各功率的大小,选取最小的一个作为该点处的极限功率,同时确定了该点的功率受限因素。最后,结合单模条件,计算不同纤芯数值孔径( $\text{NA}_{\text{core}}$ )下,能满足单模条件的纤芯直径  $2a$ ,并通过比较不同光纤长度  $L$  所取得的极限功率,选取极限功率中的最大值作为相应纤芯数值孔径下的极限功率。基于上述方法可对掺铥光纤激光进行全面定量分析。

为 0.08。

## 2.2 基本思路和步骤

结合当前光纤制造和激光二极管工艺水平以及文献[14],设定掺铥激光特性参数,详见表 1 和图 1。其中,抽运光转化激光效率比  $\eta_{\text{aser}}$  分别取 0.46 和 0.82 这两个实验中获得最高值<sup>[18,19]</sup>。常规 1.15 μm 激光二极管包层直径和数值孔径分别为 400 μm 和 0.22,功率可达 30 W<sup>[20]</sup>,根据亮度公式计算得抽运亮度为 0.0015 W/(μm<sup>2</sup>·Sr)。1150 nm 处激光二极管发射谱宽在 10 nm 左右,采用光纤激光级联抽运方式,抽运亮度可假定提升两个量级<sup>[21~23]</sup>,因此掺铥激光抽运方式的抽运亮度可设定为 0.15 W/(μm<sup>2</sup>·Sr)。与此同时产品化的掺铥激光器<sup>[24]</sup>的亮度要高于 1 μm 波段的掺铥激光器<sup>[5]</sup>,估算相应参数,1950 nm 波段数值孔径为 1150 nm 波段的 2 倍,输出产品化最高功率前者是后者的 4~5 倍,激光器效率前者约为后者的一半,纤芯直径均可取到 10 μm,因此由(5)式估算可假定掺铥激光抽运亮度为掺铥激光抽运亮度的两倍,即 0.3 W/(μm<sup>2</sup>·Sr)。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 宽谱掺铥光纤激光的极限功率和受限因素

根据 2.1 中光纤激光器功率极限因素的(1)~(6)式,运用 2.2 中的基本思路和步骤,进一步计算和分析在任意( $2a, L$ )组合下两种不同系统掺铥光纤激光宽谱输出的极限功率和受限因素。图 2 为不同长度和纤芯直径下硅基掺铥光纤激光在两种抽运方式下宽谱激光输出的受限因素以及极限功率。选取光纤的长度在 0~70 m 而光纤的纤芯直径在 0~80 μm 之间变化。图 2(a)表示掺铥激光抽运方式而图 2(b)代表掺铥激光抽运方式,图 2(c)为两种抽运方式下的极限功率随纤芯直径的变化趋势。从

图 2(a)和(b)可以看出两种抽运方式下,掺铽光纤激光主要受限于抽运亮度、热透镜效应和 SRS 效应,对于目前光纤工艺而言,纤芯尺寸主要在  $60\ \mu\text{m}$  以下,对短光纤长度(掺铽激光抽运方案约小于  $55\ \text{m}$ ,掺铕激光抽运方案约小于  $20\ \text{m}$ )的掺铽光纤,激光输出的极限功率主要受限于抽运亮度。并且由图可知,随着光纤工艺的进步,纤芯直径进一步增加,限制激光极限功率的因素将转向热效应,而当使用更长的光纤时,极限功率将主要受限于 SRS 效

应。图中还标出了极限功率的等功率曲线,对于常规的纤芯直径  $40\ \mu\text{m}$ 、光纤长度在  $10\ \text{m}$  左右的掺铽光纤而言,掺铽激光抽运方案的极限输出功率在  $1.6\ \text{kW}$  左右,而掺铕激光抽运方案的极限功率输出则在  $10\ \text{kW}$  左右,两者都受限于抽运亮度。该结果表明掺铽光纤激光具有高功率输出的能力,且采用掺铕激光抽运方案的极限功率高于目前任意一种常规硅基掺杂光纤激光的宽谱极限功率输出。

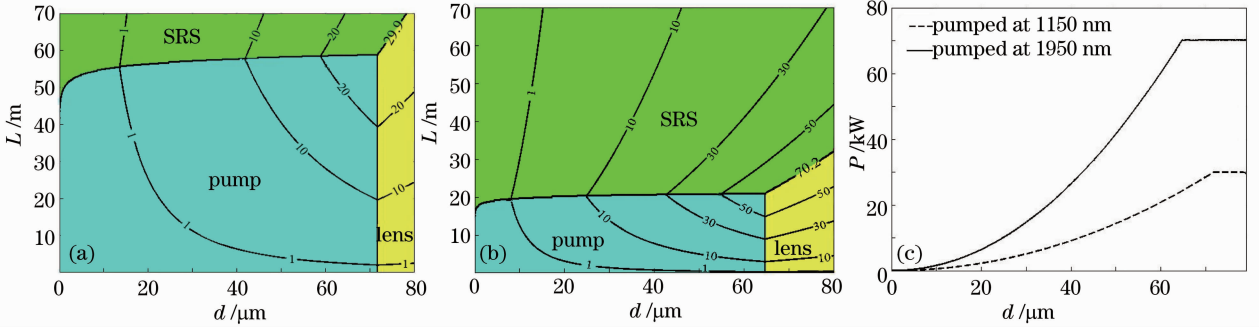


图 2 (a)掺铽光纤激光和(b)掺铕光纤激光抽运硅基掺铽光纤激光宽谱运转情况的等值曲线图;

(c)不同抽运机制下宽谱运转条件最大极限功率随纤芯直径的变化曲线

Fig. 2 Contour plots of scalability of a Ho-doped silica fiber laser (a) with an Yb-doped fiber laser source and (b) with a Tm-doped fiber laser source in broad bandwidth case; (c) maximum extractable power of the broad bandwidth case in both of two pump regimes as the core diameter varies

根据图 2(a)、(b)中的受限因素和受限区域,计算不同纤芯直径下掺铽光纤激光两种抽运方式下的激光输出极限功率,如图 2(c)所示。由图 2(c)可知,在一定范围内,两种抽运方式下掺铽激光极限输出功率均随芯径的增加而增加,当超过某一芯径时极限功率达到最大,并且在仍增加芯径时保持不变。在掺铽激光抽运条件下,当掺铽光纤的纤芯直径达到  $71.6\ \mu\text{m}$  时,激光输出的极限功率为  $29.9\ \text{kW}$ ;同样地,在掺铕激光抽运条件下,掺铕光纤在  $64.8\ \mu\text{m}$  处是一个转折点,此时最大极限功率达到  $70.2\ \text{kW}$ 。

### 3.2 单频掺铽光纤激光的极限功率和受限因素

单频情况下,所满足的方程中非线性效应一项主要是 SBS 效应而非 SRS 效应,因此,根据(1)~(5)式及(7)式,计算和分析在任意  $(2a, L)$  组合下两种不同系统掺铽光纤激光单频输出的极限功率和受限因素。针对光纤长度在  $0\sim 3\ \text{m}$  范围内、光纤芯径在  $0\sim 80\ \mu\text{m}$  范围内变化组合,经计算得出如图 3(a)和(b)所示结果,单频输出掺铽激光的主要受限因素依然是抽运亮度、热透镜效应以及非线性效应(SBS),且相对受限区域类似。需要注意的是,图中下部橙

色区域代表受限因素为热破裂效应,但该区域没有实际指导意义,因此可以忽略。从图 3(a)和(b)中可以看出,尽量选取较短的掺铽光纤长度,极限功率将只受限于抽运亮度和热透镜效应。此外,注意到三个受限区域的交点处代表此处为取得最大极限输出功率时的最小光纤参数。在掺铽激光抽运条件下,掺铽光纤长度  $2.2\ \text{m}$  时,能够输出的极限功率为  $1.13\ \text{kW}$ ;而在掺铕激光抽运的条件下,掺铕光纤长度  $0.78\ \text{m}$  时可获得极限功率  $2.61\ \text{kW}$ 。这一结论表明在掺铕激光抽运方式下,更易获得高功率单频掺铽激光输出。

图 3(c)所示,当掺铽光纤纤芯直径增加时,单频掺铽光纤激光的输出功率起初随之增长,之后在热透镜以及 SBS 效应的共同作用下保持稳定。因此功率极限存在一个上限,而不能期望通过增加芯径而无限量地提高极限功率输出。掺铽激光抽运和掺铕激光抽运在转折点处的芯径分别为  $71.6\ \mu\text{m}$  和  $64.8\ \mu\text{m}$ ,这个转折点同宽谱激光输出情况是一致的。且由图 3(c)同样可以到两种抽运方式下的最大极限功率分别是  $2.61\ \text{kW}$  和  $1.13\ \text{kW}$ 。

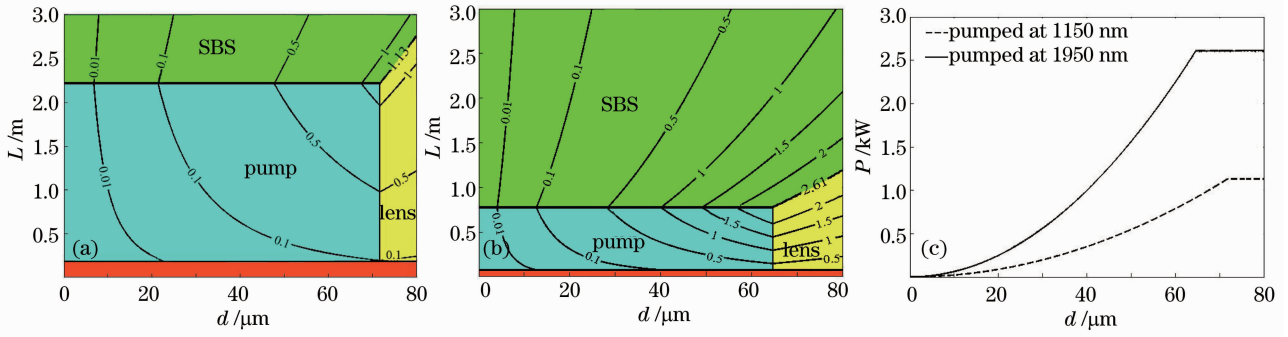


图 3 (a)掺铥光纤激光和(b)掺铥光纤激光抽运硅基掺铥光纤激光单频运转情况的等值曲线图;(c)不同抽运机制下单频运转条件最大极限功率随纤芯直径的变化曲线

Fig.3 Contour plots of scalability of a Ho-doped silica fiber laser (a) with an Yb-doped fiber laser source and (b) with a Tm-doped fiber laser source in single-frequency case; (c) maximum extractable power of single-frequency case in both of two pump regimes as the core diameter varies

### 3.3 单模掺铥光纤激光的极限功率和受限因素

由(8)式可知,对于激光输出波长为 2050 nm 的掺铥光纤,单模条件由纤芯直径和纤芯的数值孔径决定。因此,对应一个给定的芯径,由(8)式限制可得到一个最大芯径,即存在一个相应的最大极限功率。图 4 表示宽谱和单频两种激光输出方式下不同抽运条件时,掺铥光纤激光输出的极限功率随数值孔径的变化趋势。目前报道的常规光纤纤芯的数值孔径最小为 0.04,但主要是 1 μm 波段的,因此假定 2 μm 的  $NA_{\text{core}}$  从 0.06 开始到 0.20 之间对两种

抽运方式下的极限功率输出进行对比。可见所有情况下的极限输出功率均随数值孔径的减小而增加。图 4(a)代表宽谱输出,掺铥激光抽运条件和掺铥光纤抽运条件下的掺铥光纤激光输出的极限功率分别为 6.64 kW 和 11.09 kW (此时  $NA_{\text{core}} = 0.06$ );而图 4(b)则表示相应条件下的单频激光输出的极限功率,分别为 149.8 W 和 426.4 W (此时  $NA_{\text{core}} = 0.06$ )。当纤芯的数值孔径进一步降低时,极限功率有望进一步提高。

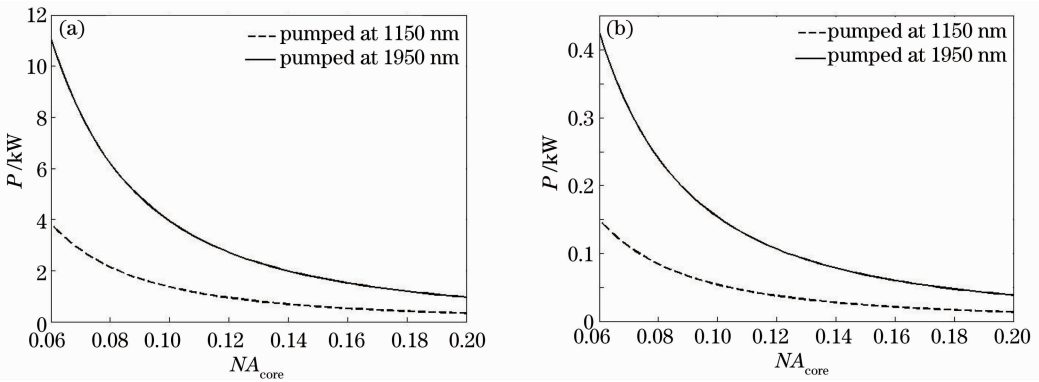


图 4 单模情况掺铥光纤激光极限功率随数值孔径变化规律。(a)宽谱输出情况;(b)单频输出情况

Fig.4 Dependence of strict single-mode scaling of Ho-doped fiber sources on core numerical aperture. (a) Case of broad bandwidth; (b) case of single frequency

## 4 结 论

综合考虑热效应、光学损伤、抽运亮度以及非线性效应等因素的影响,并结合光纤制造以及半导体激光器工艺现状,对掺铥光纤激光的极限功率和受限因素进行了理论计算和分析。分析结果显示,掺铥光纤激光的宽谱输出极限功率随光纤纤芯直径的增加而提高,当芯径分别为 71.6 μm 和 64.8 μm 时,两种抽

运条件下的最大极限功率分别为 29.9 kW 和 70.2 kW,两者功率的提升主要受限于抽运亮度、热透镜效应和 SRS。同样地,在单频激光输出方面,掺铥光纤激光极限功率分别是 1.13 kW 和 2.61 kW,受限因素主要是抽运亮度、热透镜效应和 SRS。在此基础上,分析计算了上述各种情形的掺铥光纤激光单模输出的极限功率,可见单模极限功



率随着纤芯数值孔径的减少而增加,且呈现指数增长趋势,因此减少纤芯数值孔径是提高单模掺铥激光极限功率输出的有效方法。对比两种不同激光抽运方案,掺铥激光抽运掺铥光纤激光更具高功率激光输出优势。

## 参 考 文 献

- Samuli Kivistö, Tommi Hakulinen, Mircea Guina *et al.*. Tunable Raman soliton source using mode-locked Tm-Ho fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(12): 934~936
- T. Ehrenreich, R. Leveile, I. Majid *et al.*. 1 kW, all-glass Tm: fiber laser [C]. *SPIE*, 2010, **7850**: 785016
- G. D. Goodno, L. D. Book, J. E. Rothenberg. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1204~1206
- Alexander Hemming, Shayne Bennetts, Nikita Simakov *et al.*. Development of resonantly cladding-pumped holmium-doped fibre lasers [C]. *SPIE*, 2012, **8237**: 82371J
- A. S. Kurkov, V. V. Dvoyrin, A. V. Marakulin. All-fiber 10 W holmium lasers pumped at  $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$  [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(4): 490~492
- P. A. Budni, L. A. Pomeranz, M. L. Lemons *et al.*. Efficient mid-infrared laser using 1.9- $\mu\text{m}$ -pumped Ho: YAG and ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillators [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**(5): 723~728
- Yang Kun, Ren Qiushi, Wei Shigang *et al.*. Application of 2  $\mu\text{m}$  Tm laser on biomedicine [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(9): 52~56  
杨 昆, 任秋实, 魏石刚 等. 2  $\mu\text{m}$  铥(Tm)激光器在生物医学中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(9): 52~56
- Li Dajun, Du Geguo. The recent research progress of Tm<sup>3+</sup> doped fiber lasers[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(5): 540~543  
黎大军, 杜戈果. 掺铥光纤激光器研究进展[J]. *激光技术*, 2007, **31**(5): 540~543
- J. Nilsson, J. K. Sahu, Y. Jeong *et al.*. High power fiber lasers; new developments[C]. *SPIE*, 2003, **4974**: 50~59
- Zhou Jun. Study on Continuous-Wave Ytterbium-Doped Double-Clad Fiber Lasers [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004  
周 军. 连续波掺镱双包层光纤激光器研究 [D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2004
- Liu Songhao. New development of fiber laser [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2003, **16**(1): 1~8  
刘颂豪. 光纤激光器的新进展 [J]. *光电子技术与信息*, 2003, **16**(1): 1~8
- Qi Yunfeng, Liu Chi, Zhou Jun *et al.*. High power narrow linewidth single-frequency line-polarized fiber amplifier based on master-oscillator power amplifier technology [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(6): 3942~3947  
漆云凤, 刘 驰, 周 军 等. 128 W 单频线偏光光纤放大器特性研究 [J]. *物理学报*, 2010, **59**(6): 3942~3947
- D. C. Hanna, R. M. Percival, R. G. Smart *et al.*. Continuous-wave oscillation of holmium-doped silica fiber laser [J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(9): 593~594
- 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
- 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): 064209  
朱家健, 杜文博, 周 朴 等. 单模光纤极限功率的数值研究[J]. *物理学报*, 2012, **61**(6): 064209
- Cesar Jauregui, Jens Limpert, Andreas Tünnermann. On the Raman threshold of passive large mode area fibers [C]. *SPIE*, 2011, **7914**: 791408
- R. Andrew Motes, Richard W. Berdine. Introduction to High-Power Fiber Lasers [M]. Albuquerque: Directed Energy Professional Society, 2009. 130
- A. S. Kurkov, E. M. Sholokhov, V. B. Tsvetkov *et al.*. Holmium fibre laser with record quantum efficiency [J]. *Quantum Electronics*, 2011, **41**(6): 492~494
- Stuart D. Jackson. Midinfrared holmium fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2006, **42**(2): 187~191
- Typical Dilas LD data sheet. (www.dilas.com.cn)
- D. J. Richardson, J. Nilsson, W. A. Clarkson. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(11): B63~B92
- F. Röser, C. Jauregui, J. Limpert. Power scaling of high brightness 980 nm Yb-doped fiber laser: detailed study and experiment [C]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2009. TuA2
- Xiao Hu, Leng Jinyong, Wu Wuming *et al.*. High efficiency tandem-pumped fiber amplifier [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(12): 124207  
肖 虎, 冷进勇, 吴武明 等. 同带抽运高效率光纤放大器 [J]. *物理学报*, 2011, **60**(12): 124207
- Typical Nufern fiber laser data sheet. (www.nufern.com)
- 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

栏目编辑: 张 腾