

特殊波长掺镱光纤激光器研究

肖虎 张汉伟 王小林* 周朴 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 对特殊波长掺镱光纤激光器进行了理论和实验研究。根据镱离子的吸收发射特性, 对此类激光器中的增益竞争进行了理论分析, 指出了抑制寄生振荡的方法。以 1018、980、1173 nm 光纤激光器为例进行了实验研究。分别获得了 309、1.05、15.7 W 的激光输出。

关键词 激光器; 光纤激光器; 特殊波长; 放大自发辐射; 增益竞争

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0902008

Study on Ytterbium-Doped Fiber Lasers of Special Wavelength

Xiao Hu Zhang Hanwei Wang Xiaolin Zhou Pu Xu Xiaojun

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

Abstract Ytterbium doped fiber lasers of special wavelength are investigated in theory and experiment. The gain competition between signal and amplified spontaneous emission is theoretically investigated based on the absorption and emission characteristics of Yb^{3+} . Available approaches to suppress parasitic oscillation are analyzed. In experiments, 1018, 980, 1173 nm fiber lasers are established, and the maximum output power of the three fiber lasers are 309, 1.05, 15.7 W, respectively.

Key words lasers; fiber laser; special wavelength; amplified spontaneous emission; gain competition

OCIS codes 140.3480; 140.3510

1 引言

光纤激光器以光纤为增益介质, 通过在光纤基质材料中掺杂不同元素的稀土离子, 如镱、铒、铥、钕等获得相应波段的激光输出^[1-8]。由于镱离子在石英玻璃基质中具有溶解度高、能级结构简单、吸收和发射带较宽等特性, 使掺镱光纤激光器相对于其他掺稀土离子光纤激光器更易实现高功率、高效率的激光输出^[5]。镱离子的发射谱可覆盖 980~1200 nm 的波长范围, 但由于其在 1030~1100 nm (C 波段) 具有较高的增益系数, 因此目前掺镱光纤激光器的输出波长主要集中在该波段^[5]。而由于镱离子的吸收发射特性, 980~1020 nm (S 波段) 和 1100~1200 nm (L 波段) 的增益系数较小, S 或 L 波段的信号光在与 C 波段放大自发辐射 (ASE) 的增益竞争中处于劣势, 实现高功率、高效率的激光输

出较为困难^[9-10]。目前已公开报道的文献中有关 S 或 L 波段高功率光纤激光的研究较少。但近年来, 由于这两个波段掺镱光纤激光在一些特殊领域的应用而逐渐引起了国内外的关注。如 L 波段的 1150 nm 激光器和 S 波段的 980、1018 nm 激光器等。1150 nm 光纤激光可用于抽运掺铥光纤产生 2~3 μm 激光^[11-12]。高亮度的 980 nm 光纤激光可用于抽运掺铒或掺镱光纤, 或倍频产生 490 nm 蓝光用于水下通信或探测等^[13-16]。1018 nm 激光则可用于掺镱光纤激光的级联抽运, 实现数千瓦甚至万瓦量级的光纤激光输出^[17]。相关资料表明, 目前 3 kW 以上的光纤激光器均采用 1018 nm 光纤激光抽运^[5]。但因偏离镱离子的增益峰, 利用常规光纤搭建的 S 或 L 波段光纤激光器通常存在易产生寄生振荡、激光器效率偏低等问题, 而且激光器波长越短(或越长), 谱线增益竞

收稿日期: 2013-03-01; 收到修改稿日期: 2013-04-22

基金项目: 国防科学技术大学科研计划项目 (JC12-07-03)

作者简介: 肖虎 (1986—), 男, 博士, 讲师, 主要从事高功率光纤激光方面的研究。E-mail: xhwise@163.com

* 通信联系人。E-mail: chinawxllin@163.com

争越严重,实现高功率输出越困难^[18]。本文对常规掺镱双包层光纤中的增益竞争机制进行了理论分析,以 1018、980、1173 nm 三种特殊波长的掺镱光纤激光为例,进行了理论和实验研究,通过合理设计激光器参数,实现了高功率输出。

2 基本原理

图 1 所示为镱离子在玻璃基质中的典型吸收和发射截面曲线。从图中可以看出,镱离子的两个发射峰分别位于 976 nm 和 1030 nm 附近。

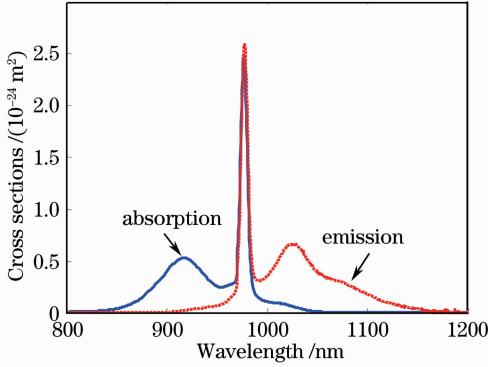


图 1 铝硅酸盐玻璃中镱离子的吸收发射截面
Fig.1 Absorption and emission cross sections of Yb³⁺ in aluminosilicate glass

由于掺镱光纤为均匀加宽增益介质,信号光的小信号增益系数可以表示为^[19-20]

$$G(\lambda) = k_0 N \Gamma_s L \{ [\sigma_e(\lambda) + \sigma_a(\lambda)] \} \left[n - \frac{\sigma_a(\lambda)}{\sigma_e(\lambda) + \sigma_a(\lambda)} \right], \quad (1)$$

式中 $k_0 = 4.343$, N 为镱离子掺杂浓度, Γ_s 表示信

号光模场与掺杂区域的重叠度, $\sigma_e(\lambda)$ 和 $\sigma_a(\lambda)$ 分别表示镱离子在波长 λ 处的发射和吸收截面, L 为掺镱光纤长度, n 表示掺镱光纤内激光上能级平均粒子反转数, 定义为

$$n = \int_0^L \frac{N_2(z)}{NL} dz, \quad (2)$$

式中 z 为沿增益光纤轴向某点的坐标, $N_2(z)$ 表示激光上能级粒子数密度沿轴向的分布。不同 n 值时的小信号增益系数随波长变化如图 2 所示。仿真时设 $N = 7 \times 10^{25} / \text{m}^3$, $\Gamma_s = 0.8$, $L = 3 \text{ m}$ 。从图中可以看出,当 n 值较大时(对应短波长光纤激光器),小信号增益的峰值位于 1030 nm 附近。而随着 n 值的减小,小信号增益峰值对应的波长逐渐趋于长波方向。对于 L 波段光纤激光器,增益峰值波长通常位于 1060~1080 nm。

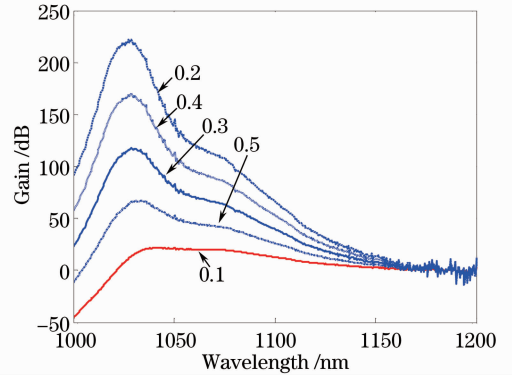


图 2 不同 n 值时的小信号增益曲线

根据(1)式,可以将某一波长 λ_A 处的增益 G_A 用另外两个波长 λ_B 、 λ_C 处的增益 G_B 和 G_C 表示为^[19]

$$G_A = \frac{G_B (\Gamma_{s,A} / \Gamma_{s,B}) (\sigma_{e,A} / \sigma_{e,C} - \sigma_{a,A} / \sigma_{a,C})}{(\sigma_{e,B} / \sigma_{e,C} - \sigma_{a,B} / \sigma_{a,C})} + \frac{G_C (\Gamma_{s,A} / \Gamma_{s,C}) (\sigma_{e,A} / \sigma_{e,B} - \sigma_{a,A} / \sigma_{a,B})}{(\sigma_{e,C} / \sigma_{e,B} - \sigma_{a,C} / \sigma_{a,B})}, \quad (3)$$

式中, σ_e 和 σ_a 的上标 A、B、C 分别对应三个波长 λ_A 、 λ_B 和 λ_C 。

利用(3)式可对掺镱双包层光纤激光器中的增益竞争进行定量分析。设 λ_C 对应抽运光, 波长为 976 nm。 λ_A 为 ASE 增益峰值波长, 此处以 S 波段光纤激光器为例, 设 $\lambda_A = 1030 \text{ nm}$, 则任一波长 λ 处的增益与 1030 nm 信号增益之间的关系可表示为

$$G_{1030} = c_1 G_\lambda + c_2 G_{976} = c_1 G_\lambda - c_2 \alpha_{976}, \quad (4)$$

$$c_1 = \frac{\Gamma_{s,1030}}{\Gamma_{s,\lambda}} \frac{(\sigma_{e,1030} / \sigma_{e,976} - \sigma_{a,1030} / \sigma_{a,976})}{(\sigma_{e,\lambda} / \sigma_{e,976} - \sigma_{a,\lambda} / \sigma_{a,976})}, \quad (5)$$

$$c_2 = \frac{\Gamma_{s,1030}}{\Gamma_{s,976}} \frac{(\sigma_{e,1030} / \sigma_{e,\lambda} - \sigma_{a,1030} / \sigma_{a,\lambda})}{(\sigma_{e,976} / \sigma_{e,\lambda} - \sigma_{a,976} / \sigma_{a,\lambda})}, \quad (6)$$

式中 $\alpha_{976} = -G_{976}$, 表示抽运光的吸收, 单位为 dB。为确保抽运光被增益光纤充分吸收, 取 $\alpha_{976} = 20 \text{ dB}$ 。设信号在纤芯中均为基模分布, 则 $\Gamma_{s,\lambda} = \Gamma_{s,1030}$ 。设 976 nm 抽运光强度在内包层横向均匀分布, 则

$$\frac{\Gamma_{s,1030}}{\Gamma_{s,976}} \approx \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2, \quad (7)$$

式中 d_1 和 d_2 分别为双包层光纤的纤芯和内包层直径。此时(4)式可进一步简化为

$$G_{1030} = \frac{(\sigma_{e,1030}/\sigma_{e,976} - \sigma_{a,1030}/\sigma_{a,976})}{(\sigma_{e,\lambda}/\sigma_{e,976} - \sigma_{a,\lambda}/\sigma_{a,976})} G_{\lambda} - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \frac{(\sigma_{e,1030}/\sigma_{e,\lambda} - \sigma_{a,1030}/\sigma_{a,\lambda})}{(\sigma_{e,976}/\sigma_{e,\lambda} - \sigma_{a,976}/\sigma_{a,\lambda})} \alpha_{976}. \quad (8)$$

设激光器两腔镜的中心波长 λ 为 1018 nm, 反射率分别为 99% 和 10%, 则波长为 1018 nm 的信号光在腔内往返一次的输出损耗约为 10 dB。为获得稳定的激光输出, 信号光在激光器谐振腔内往返一次获得的增益 ($2G_{\lambda}$) 应不小于 10 dB, 即单程增益 G_{λ} 不小于 5 dB。根据图 1 所示的镱离子吸收发射截面数据, 此时 1030 nm 的 ASE 在腔内可获得的小信号增益为

$$G_{1030} = 1.48G_{1018} + 0.012 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \alpha_{976}, \quad (9)$$

设激光器的腔镜最高可对 ASE 产生 50 dB 的抑制效果^[19], 为抑制 1030 nm 附近寄生振荡的产生, 应使其增益小于损耗, 即 1030 nm 附近 ASE 在谐振腔内获得的平均单程增益应小于 25 dB。由(9)式可知, 为降低 ASE 的增益, 应减小抽运光吸收效率, 或增加双包层掺镱光纤的纤芯包层比。当激光器增益光纤参数一定时, 为抑制 ASE 建立寄生振荡, 应适当缩短光纤长度以减小抽运光的吸收效率。如当增益光纤的纤芯和内包层直径分别为 10 μm 和 125 μm 时, 则为抑制寄生振荡, 增益光纤对抽运光的吸收应小于 9.4 dB。此时由于抽运光吸收效率较低, 将影响激光器的整体效率。根据(9)式, 为提高抽运光的吸收效率, 应使用纤芯包层比较大的光纤。

对于 L 波段的光纤激光器, 设 $\lambda_{\lambda} = 1064 \text{ nm}$, 激光器腔镜的中心波长 λ 为 1173 nm, 将对应的吸收发射截面数据代入(8)式可得

$$G_{1064} = 8.83G_{1173} - 0.002 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \alpha_{976}, \quad (10)$$

由(10)式可知, 对于 L 波段光纤激光器, 为抑制 ASE, 应使用纤芯包层比较小的光纤。此外, 增加增益光纤的长度(提高抽运光吸收效率)也有利于

ASE 的抑制。

需要说明的是, (9)式和(10)式中的系数与掺镱光纤的吸收发射截面相关。在实际中, 镱离子的吸收发射截面数据与基质材料、制作工艺等诸多因素有关, 因此采用不同的光纤时, 各系数的取值可能存在明显差异。但上述分析方法和相关结论仍具有普适性。

3 实验研究

在上述理论分析的基础上, 以 1018、980、1173 nm 光纤激光器为例进行了实验研究。实验中各激光器具体参数依据(8)式和激光器速率方程确定。

3.1 1018 nm 光纤激光器

1018 nm 光纤激光器结构如图 3 所示, 激光器为法布里-珀罗(F-P)腔结构。采用正向抽运方式。抽运光经一个抽运合束器注入激光器谐振腔。激光器的腔镜由一对中心波长为 1018 nm 的光纤光栅组成。高反(HR)和低反(HT)光纤布拉格光栅(FBG)的反射率分别为 99% 和 10%, 3 dB 反射带宽分别为 1.2 和 0.7 nm。用于刻写 FBG 的光纤为掺锗双包层光纤(GDF), 其纤芯和内包层直径分别为 30 和 250 μm 。增益光纤为掺镱双包层光纤(YDF), 其几何参数与光栅的光纤参数相同。光纤在 976 nm 的包层吸收系数约 4 dB/m, 在考虑了 ASE 和抽运光吸收效率等因素的情况下, 对增益光纤长度进行了优化, 最终确定光纤长度为 4 m。YDF 与 OC 光纤的熔接点涂有高折射率胶, 用于滤除残余抽运光(Stripper)。激光器的输出端切斜角以抑制端面反馈, 整个激光器置于水冷却板上进行冷却。

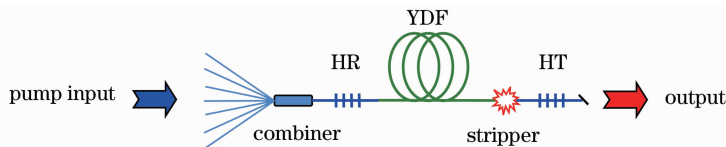


图 3 高功率 1018 nm 光纤激光器结构示意图

Fig. 3 Experimental setup of high power 1018 nm fiber laser

激光器的输出功率曲线如图 4(a)所示。实验中所用 LD 的输出波长随驱动电流的增加向长波方向漂移。在低电流(低功率)下, 抽运光中心波长位于 970 nm 附近, 导致吸收效率较低, 因此在低功率下功

率曲线的斜率较小。随着抽运光波长向 976 nm 漂移, 激光器的效率逐渐增加。当注入抽运光功率为 435 W 时, 获得了 309 W 的输出功率, 激光器的效率为 71%, 309 W 为目前已知的 1018 nm 光纤激光器的

最高功率。激光器稳定工作在 309 W 时的光谱如图 4(b)所示,从光谱中可以看出 ASE 得到了有效抑制,

残余抽运光也得到充分滤除。本实验受限于抽运光功率,输出激光功率未能进一步提升。

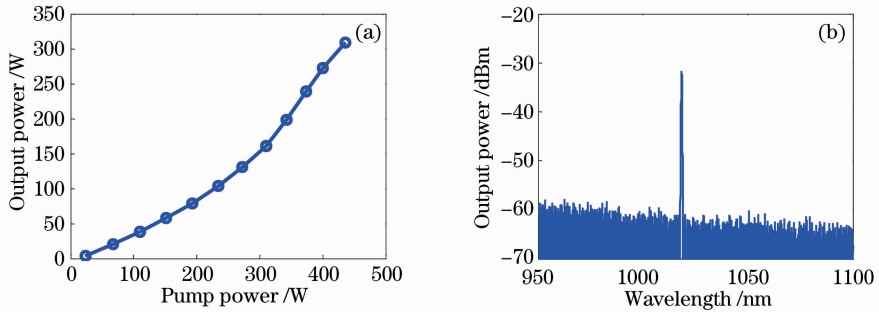


图 4 高功率 1018 nm 光纤激光器实验结果。(a) 输出功率曲线;(b) 309 W 时的输出光谱

Fig. 4 Experimental results of 1018 nm fiber laser. (a) Output power characteristics; (b) output spectrum at 309 W

3.2 980 nm 光纤激光器

由镱离子的能级结构可知,产生 980 nm 辐射的下能级为基级。由于镱离子在 980 nm 附近的吸收和发射截面接近,根据(1)式,为使 980 nm 的增益为正,需要的上能级平均反转粒子数 n 较大。但随着 n 的增加,1030 nm 附近的增益将迅速增加,有可能优先达到振荡阈值。为抑制 ASE 增益,需要合理选择增益光纤的长度和纤芯包层比。目前国内外报道的 980 nm 光纤激光均采用了纤芯包层比大、长度较短的增益光纤实现。如 Röser 等^[16]报道的 94 W 的 980 nm 光纤激光器,其增益光纤为掺镱光子晶体光纤,纤芯和包层直径分别为 80 μm 和 200 μm ,光纤长度为 1.2 m。大的纤芯包层比提高了抽运光的吸收系数,而短的增益光纤长度则降低了 ASE 的增益。此外,通过在谐振腔内加入双色镜,进一步增加了 ASE 的损耗。但该激光器为空间结构,难以满足实际应用的需要。

参考 1018 nm 光纤激光器的理论和实验结果,综合考虑抽运光的吸收效率和输出激光的光束质量,使用了 15/130 μm 双包层掺镱光纤进行理论和

实验研究。光纤的纤芯和内包层直径分别为 15 μm 和 130 μm ,光纤在 976 nm 的包层吸收系数约 6 dB/m。FBG 的中心波长为 977 nm,HR 和 HT 光栅反射率分别为 99% 和 20%。抽运光波长为 915 nm。图 5 所示为仿真结果。当增益光纤长度为 0.7 m 时可获得 977 nm 激光。图 5(b)为计算的功率曲线。由于需要将 50% 的粒子抽运到激光上能级,因此 980 nm 激光器的阈值较高,当注入抽运光功率大于 7 W 时方可产生激光输出。当注入抽运光功率为 20 W 时,输出激光功率为 1.07 W,对应的斜率效率为 8.2%,激光器效率为 5.4%。抽运光吸收不充分是效率偏低的主要原因,增益光纤长度为 0.7 m 时对应的抽运光吸收效率仅为 10.3%。但继续增加光纤长度将出现寄生振荡,无法获得 980 nm 激光[如图 5(a)所示]。图 8 为对应的实验结果。激光器的最高输出功率为 1.05 W,效率为 6.2%。实验结果与理论值较为接近。激光器达到阈值后,输出功率随抽运光功率呈线性增长。但由于激光器效率较低,未继续增加抽运光功率。

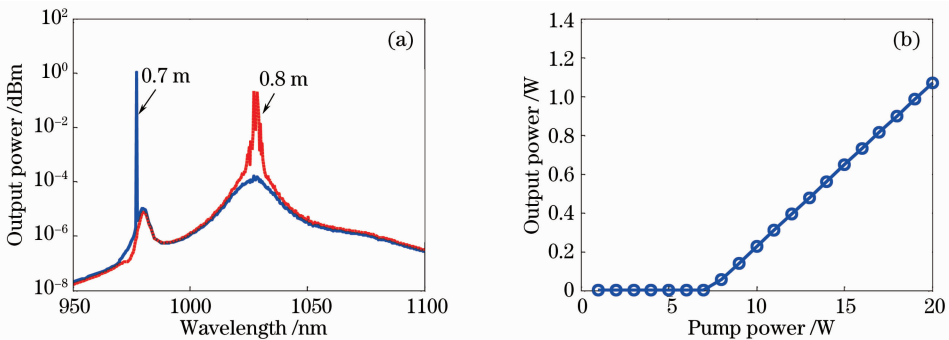


图 5 980 nm 光纤激光器仿真结果。(a) 光谱特性;(b) 功率特性

Fig. 5 Simulation results of 980 nm fiber laser. (a) Spectrum characteristics; (b) power characteristics

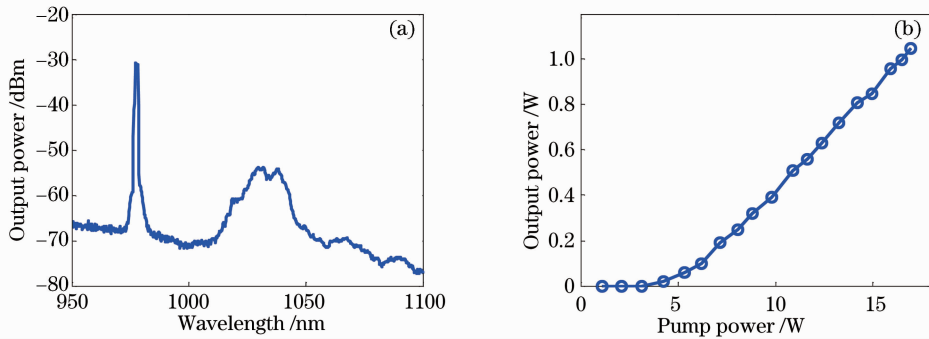


图6 980 nm 光纤激光器实验结果。(a)光谱特性;(b)功率特性

Fig. 6 Experimental results of 980 nm fiber laser. (a) Spectrum characteristics; (b) power characteristics

采用纤芯抽运方案可提高抽运光吸收系数,且纤芯抽运方案中可以适当缩小增益光纤纤芯直径,以提高输出激光的光束质量。但纤芯抽运对抽运光亮度要求较高,而目前单模 LD 的最大输出功率小于 1 W,因此受限于目前的 LD 工艺水平,纤芯抽运方案难以获得高功率 980 nm 光纤激光。

3.3 1173 nm 光纤激光器

在 L 波段以 1173 nm 为例,进行了实验研究。激光器结构同图 3。所用增益光纤的纤芯和内包层

直径分别为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $125\ \mu\text{m}$,对 976 nm 抽运光的包层吸收系数约 4 dB/m,实验中所用光纤长度为 20 m,HR 和 HT 光栅的反射率分别为 99% 和 70%。实验结果如图 7 所示,当注入抽运光为 28 W 时,得到了 15.7 W 的 1173 nm 激光输出,激光器效率为 56%。继续增加抽运功率时,在 1064 nm 附近产生了寄生振荡,如图 7(b)所示。此实验现象与文献[21]类似,目前对此问题的研究正在进行中。

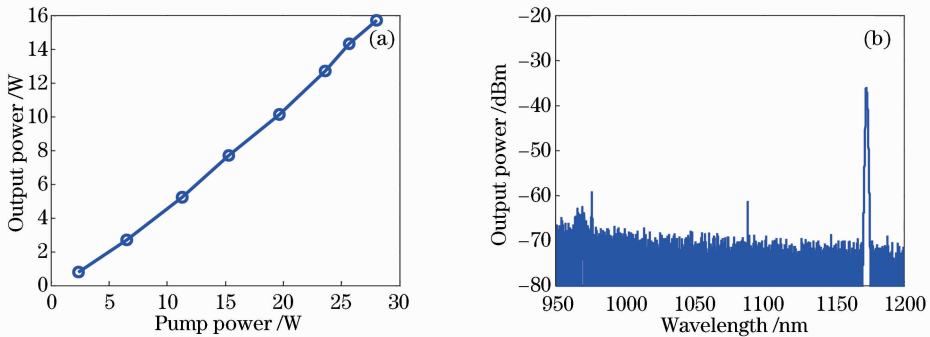


图7 1173 nm 光纤激光器实验结果。(a)光谱特性;(b)功率特性

Fig. 7 Experimental results of 1173 nm fiber laser. (a) Spectrum characteristics; (b) power characteristics

4 结 论

对特殊波长的掺镱光纤激光器进行了理论和实验研究。研究表明,降低 ASE 增益以抑制寄生振荡的建立,是获得 S 波段和 L 波段激光的关键。由于镱离子在 S 波段吸收截面较大,为提高该波段激光的小信号增益,应提高激光上能级粒子数,即使用较短的增益光纤。与之相反,实现 L 波段光纤激光输出则需要较长的光纤。实验中实现了 309 W 的 1018 nm 光纤激光输出,激光器的效率为 78.2%。309 W 为目前公开报道的 S 波段掺镱光纤激光器的最高功率。全光纤结构 980 nm 激光器实现了 1.05 W 的激光输出,效率为 6.2%。在 L 波段

搭建了 1173 nm 光纤激光器,获得了 15.7 W 的激光输出,效率为 56%。

参 考 文 献

- 1 R Paschotta, J Nilsson, A Tropper, *et al.*. Ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 1997, 33 (7): 1049-1056.
- 2 R Horley, S Norman, M Zervas. Progress and development in fibre laser technology[C]. SPIE, 2007, 6738: 67380K.
- 3 J Limpert, F Röser, S Klingebiel, *et al.*. The rising power of fiber lasers and amplifiers [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2007, 13(3): 537-545.
- 4 J Nilsson, S Ramachandran, T Shay, *et al.*. High-power fiber lasers[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2009, 15: 1-2.
- 5 D Richardson, J Nilsson, W Clarkson. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(11): 63-92.

- 6 Liu Jiang, Wang Pu. High power narrow-bandwidth continuous wave thulium-doped all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 4(1): 0102001.
刘江, 王璞. 高功率窄线宽全光纤结构掺铥连续光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102001.
- 7 Xiao Hu, Dong Xiaolin, Zhou Pu, *et al.*. Experimental investigation on 1018 nm fiber laser and tandem pumping[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0314001.
肖虎, 董小林, 周朴, 等. 1018 nm 光源及光纤激光同带抽运实验研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0314001.
- 8 闫平, 肖起榕, 付晨, 等. 1.6 kW 全光纤掺镱激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416001-5.
- 9 A S Kurkov, E M Dianov. Moderate-power CW fiber lasers[J]. Quantum Electron, 2004, 34(10): 881-900.
- 10 A S Kurkov. Oscillation spectral range of Yb-doped fiber lasers[J]. Laser Phys Lett, 2007, 4(2): 93-102.
- 11 A S Kurkov, V V Dvoyrin, A V Marakulin, *et al.*. All-fiber 10 W holmium lasers pumped at 1.15 μm [J]. Opt Lett, 2010, 35(4): 490-492.
- 12 A S Kurkov, E M Dianov, O I Mcdvedkov, *et al.*. Efficient silica-based Ho³⁺ fibre laser for 2 μm spectral region pumped at 1.15 μm [J]. Electron Lett, 2000, 36(12): 1015-1016.
- 13 J Lhermite. High energy fiber laser at 976 nm[J]. Opt Lett, 2010, 35(20): 3459-3461.
- 14 A Bouchier, G Lucas-Leclin, P Gorges. Frequency doubling of an efficient continuous wave single-mode Yb-doped fiber laser at 978 nm in a periodically-poled MgO:LiNbO₃ waveguide[J]. Opt Express, 2005, 13(18): 6974-6979.
- 15 M Laroche, C Bartolacci, B Cadier, *et al.*. Generation of 520 mW pulsed blue light by frequency doubling of an all-fiberized 978 nm Yb-doped fiber laser source[J]. Opt Lett, 2011, 36(19): 3909-3911.
- 16 F Röser, C Jauregui, J Limpert, *et al.*. 94 W 980 nm high brightness Yb-doped fiber laser[J]. Opt Express, 2008, 16(12): 17310-17318.
- 17 E Stiles. New developments in IPG fiber laser technology[C]. Proceedings of the 5th International Workshop on Fiber Lasers, 2009. 4-6.
- 18 M Melkumov, I Bufetov, K Kravtsov, *et al.*. Lasing parameters of ytterbium-doped fibers doped with P₂O₅ and Al₂O₃ [J]. Quantum Electron, 2004, 34(9): 843-848.
- 19 J Nilsson, J Minelly, R Paschotta, *et al.*. Ring-doped cladding-pumped single-mode three-level fiber laser[J]. Opt Lett, 1998, 23(5): 355-357.
- 20 N Brilliant, K Lagonik. Thermal effects in a dual-clad ytterbium fiber laser[J]. Opt Lett, 2011, 26(21): 1669-1671.
- 21 M Jacquemet, A Mugnier, G Corre, *et al.*. CW PM multiwatts Yb-doped fiber laser directly emitting at long wavelength[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2009, 15(1): 120-128.

栏目编辑: 宋梅梅