

高效率 高稳定性 1018 nm 单纤振荡器

陈楠谕^{1,2}, 陈晓龙¹, 刘万生^{1,2}, 刘一博¹, 汪贺^{1,2}, 何兵^{1,2*}, 周军^{1,2}¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光及应用技术重点实验室, 上海 201800;²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 基于连续波速率方程,建立了 1018 nm 单纤振荡器理论模型,优化了激光器增益光纤长度、输出腔镜低反光栅反射率和带宽以及激光器的结构。采用正向泵浦结构,使用波长锁定的半导体泵浦源和 2.7 m 长的 30 μm /250 μm 掺 Yb³⁺ 双层包层光纤,实现了 520 W 的最高功率输出,光光效率为 80.2%,光束质量因子(M^2)为 1.85。此外,在 447 W 处具有最高光光效率 84.2%。同时,利用激光器主结构温度控制技术,使激光器稳定工作在 21 $^{\circ}\text{C}$ 。最终实现了激光器连续工作 1 h 功率不稳定性为 0.7%的目标,实现了高效率、高稳定性 1018 nm 激光的单纤振荡输出。

关键词 激光器; 光纤激光器; 高效率; 功率稳定性

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1701002

1 引言

高功率光纤激光器由于体积小、散热好等优点而受到人们广泛的关注。但工业、科学、医疗等领域的日益发展^[1-3]对单纤功率输出的要求越来越高。1018 nm 光纤激光同带泵浦技术是提升光纤激光输出功率的有效技术途径^[4-5]。这种技术相比于常规的 976 nm 半导体激光直接泵浦技术,具有亮度更高、量子亏损小等优点,使得可注入泵浦功率更高、光纤和器件的热效应更低。通常情况下,半导体激光器的亮度在数百 $\text{MW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ 量级,目前已知最高亮度的半导体激光器是由美国 Teradion 公司创造的 $10\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ ^[6],但与 1018 nm 光纤激光器相比还是差很多。目前 1018 nm 光纤激光器的亮度记录是 Kalyoncu 等^[7]在 15 μm /130 μm 增益光纤中实现的 $36.6\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$,在 30 μm /250 μm 大芯径增益光纤中亮度也不小于 $24\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ ^[8-9]。高亮度特性使得 1018 nm 光纤激光器非常适合作为同带泵浦的泵浦源。

高功率光纤激光器具有放大器结构和振荡器结构两种结构。目前 1018 nm 全光纤主振荡功率放大器(MOPA)由于 1018 nm 激光的重吸收问题,报道的研究成果极少,输出功率仅为 100 W 左右^[10-11]。2019 年,研究者通过加入放大自发辐射(ASE)滤波器等非光纤器件,实现了 1018 nm 单模 616 W 的放大输出^[12]。1018 nm 振荡器相比于放大器具有结构简单、

安全稳定的特点,最重要的是可以获得更高的功率。2016 年, Glick 等^[13]采用振荡器得到输出功率为 230 W、光光效率为 75%的 1018 nm 单模输出。2017 年, Yan 等^[8]基于自制的 $(1+1)\times 1$ 合束器实现了 1018 nm 激光 521 W 的最大功率输出,光光效率为 82.8%。次年,他们将输出功率提升到 1150 W,光光效率为 82.9%^[9]。2020 年, Kalyoncu 等^[7]在 1018 nm 单纤振荡器上获得了 502 W 的单模输出,效率为 76%。2020 年, IPG 公司实现了 1330 W 的 1018 nm 单模输出,光光效率为 78%^[14]。以上这些均是高功率方面的研究成果,但技术的发展需要更效率的振荡器。同时,先前报道基本没有对激光器的功率稳定性进行相关的描述。由于 1018 nm 光纤激光器主要是作为同带泵浦的泵浦源,因此效率和稳定性是衡量泵浦源性能的关键指标。

本文报道了一种 1018 nm 高效率、高稳定性光纤振荡器。我们基于连续波速率方程,建立了 1018 nm 单纤振荡器理论模型,优化了激光器增益光纤长度、振荡腔输出光栅反射率和激光器的结构。在 531 W 泵浦输入的情况下实现了 447 W 功率输出,光光效率为 84.2%,据我们所知,这是目前纤芯直径不小于 30 μm 的 1018 nm 光纤振荡器的最高效率之一。同时,我们采用高稳定激光器水冷温度控制技术,将激光器置于最高输出功率 520 W 下进行激光器的稳定性测试,功率不稳定性为 0.7%,说明该激光器可以作为高功率光纤激光器的理想泵浦源。

收稿日期: 2021-10-22; 修回日期: 2021-11-21; 录用日期: 2021-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(61735007, 61805261, 61705243)、科技部重点研发计划(2018YFB0504500)、中科院青促会项目(2020252)

通信作者: *bryanho@siom.ac.cn

2 基本原理

如图 1 所示,1018 nm 光纤振荡器主要由以下几部分组成:半导体泵浦源(LDs)、掺 Yb³⁺ 光纤、一对光纤光栅、合束器(combiner)。泵浦源采用的是中心波长为 976 nm 的波长锁定半导体激光器。泵浦激光经过(6+1)×1 合束器后被耦合到光纤布拉格光栅(FBG1)中,FBG1 是基模反射率为 99.8% 的光纤光栅,3 dB 带宽为 2 nm,FBG2 是基模反射率为

9.5% 的光纤光栅,3 dB 带宽为 1 nm。增益光纤采用的是纤芯包层尺寸为 30 μm/250 μm 的双包层掺 Yb³⁺ 光纤,975 nm 处的吸收系数为 6.3 dB/m,纤芯/包层的数值孔径分别为 0.06/0.46。在低反光栅的输出端熔接包层光滤除器(stripper)以滤除残余的泵浦光,输出尾纤切 8° 斜角以防止后向散射。最后放置一个功率计来监测输出功率,在功率计靶面前放置光谱仪(spectrograph)输出探头进行激光器输出光谱的监测。

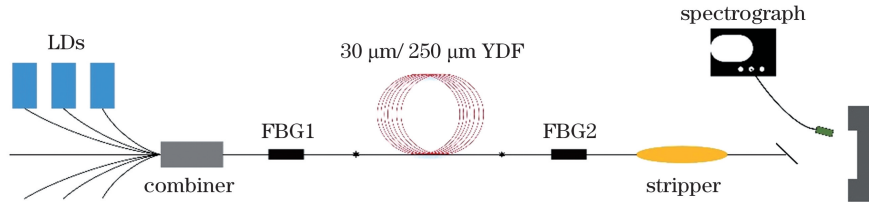


图 1 基于 LD 泵浦源的 1018 nm 光纤激光器

Fig. 1 1018 nm fiber laser based on LD pump source

1018 nm 光纤激光器面临的困难主要是 Yb³⁺ 在 1018 nm 处的吸收截面比长波处的大。这就导致了 1018 nm 激光相比于长波段的激光具有严重的重吸收,并且 Yb³⁺ 的第二大发射峰在 1030 nm 附近,因此 1018 nm 激光和 1030 nm 激光在 ASE 方面的激烈竞争。高功率时过强的 ASE 可能会严重损害激光器。Glick 等^[13]通过建模及实验研究发现,影响 ASE 最重

要的因素是增益光纤的长度和激光器的结构。因此,本文重点研究了结构和增益光纤长度对 1018 nm 激光器输出特性的影响。根据 Wang 等^[15]提出的激光器含时速率方程组,我们把 ASE 光谱分成 K 个等间隔的区域,每个区域的中心波长为 λ_i ,带宽为 $\Delta\lambda_i$,其中 $i=1,2,3,\dots,K$ 。建立连续波情况下的速率方程模型:

$$0 = \frac{\lambda_p \Gamma_p \sigma_p}{hcA} \cdot [N - N_2(z)] \cdot P_p(z) + \frac{\Gamma_s}{\lambda_p \Gamma_p \sigma_p} \cdot \sum_{i=1}^K \lambda_i \sigma_a(\lambda_i) \cdot [P^+(z, \lambda_i) + P^-(z, \lambda_i)] - \frac{\Gamma_s}{hcA} \cdot N_2(z) \cdot \left\{ \frac{hcA}{\Gamma_s \tau} + \sum_{i=1}^K \lambda_i \sigma_e(\lambda_i) \cdot [P^+(z, \lambda_i) + P^-(z, \lambda_i)] \right\}, \quad (1)$$

$$\pm \frac{\partial P^\pm(z, \lambda_i)}{\partial z} = \Gamma_s \{ [\sigma_e(\lambda_i) + \sigma_a(\lambda_i)] \cdot N_2(z) - \sigma_a(\lambda_i) \cdot N \} \cdot P^\pm(z, \lambda_i) + \Gamma_s \sigma_e(\lambda_i) \cdot \frac{2hc^2}{\lambda_i^3} \cdot N_2(z) - \alpha(\lambda_i) \cdot P^\pm(z, \lambda_i), \quad (2)$$

$$\pm \frac{\partial P_p^\pm(z)}{\partial z} = -\Gamma_p \{ [\sigma_{24}(\lambda_p) - \sigma_p] \cdot N_2(z) + \sigma_p \cdot N \} \cdot P_p^\pm(z) - \alpha(\lambda_p) \cdot P_p^\pm(z, t), \quad (3)$$

式中: h 是普朗克常数; c 是光速; A 是纤芯截面面积; λ_p 是泵浦光的中心波长; Γ_p 是泵浦光功率填充因子; σ_p 是泵浦光的吸收和发射截面的和; N 是掺杂粒子浓度; N_2 是上能级粒子数; z 是光纤长度; $P_p(z)$ 是泵浦功率; Γ_s 是信号光功率填充因子; $\sigma_a(\lambda_i)$ 是第 i 个波长区域的吸收截面; $P^\pm(z, \lambda_i)$ 是第 i 个波长区域 ASE 的功率; τ 是上能级粒子寿命; $\sigma_e(\lambda_i)$ 是第 i 个波长区域的发射截面; $\alpha(\lambda_i)$ 是光纤的衰减系数; $P_p^\pm(z)$ 是泵浦功率,其中正号表示前向传输,负号表示后向传输; σ_{24} 是吸收截面。由于 Yb³⁺ 的两能级间隔较远,不存在激发态吸收,因此激发态吸收截面 $\sigma_{24} = 0$ 。

在泵浦结构的搭建方面,根据上面的理论模型,在总泵浦功率为 600 W 的前提下,针对不同泵浦方式下激光器的输出功率和输出光谱进行了数值模拟。如

图 2(a) 所示。可以很明显的看到,在总泵浦功率相同的情况下,前向泵浦方式下的输出功率为 493 W,后向泵浦方式下的输出功率为 483 W,前向泵浦方式下的输出功率比后向泵浦方式多 2.1%。后向泵浦方式下的 ASE 比前向泵浦方式高约 2 dB[图 2(b)]。由此可见,选用正向泵浦方式更加合理,因此实验结构采用正向泵浦方式。这个结构的顺利实施也得益于高功率合束器的支持。

考虑输出腔镜(OC)的反射率和带宽对激光器输出特性的影响^[8-9,13]。使用前向泵浦的方式,采用 3 m 长的增益光纤,仅改变输出腔镜的反射率和带宽。数值模拟的结果如图 3(a) 所示。由图 3(c) 可以看到,在相同的 3 dB 带宽下,当输出腔镜的反射率由 5% 增加到 15% 时,激光器的输出功率呈现下降趋势。但是,

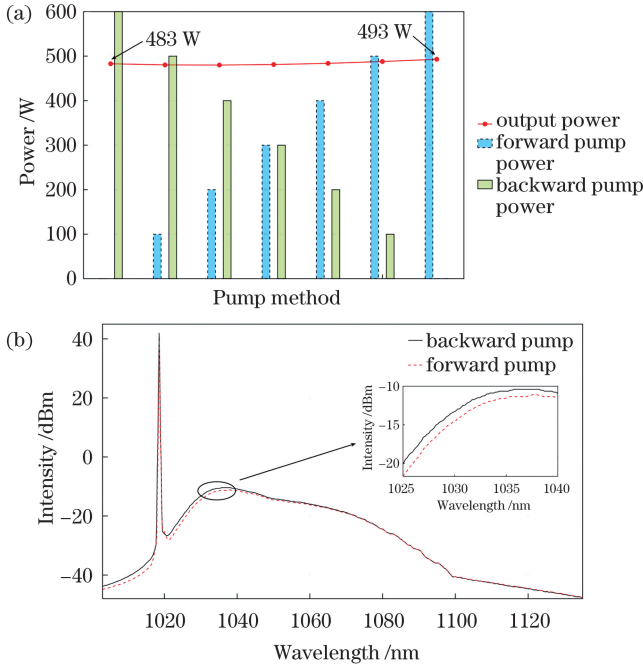


图 2 不同泵浦方式下输出功率和输出光谱。(a)输出功率; (b)输出光谱

Fig. 2 Output powers and output spectra under different pump schemes. (a) Output power; (b) output spectra

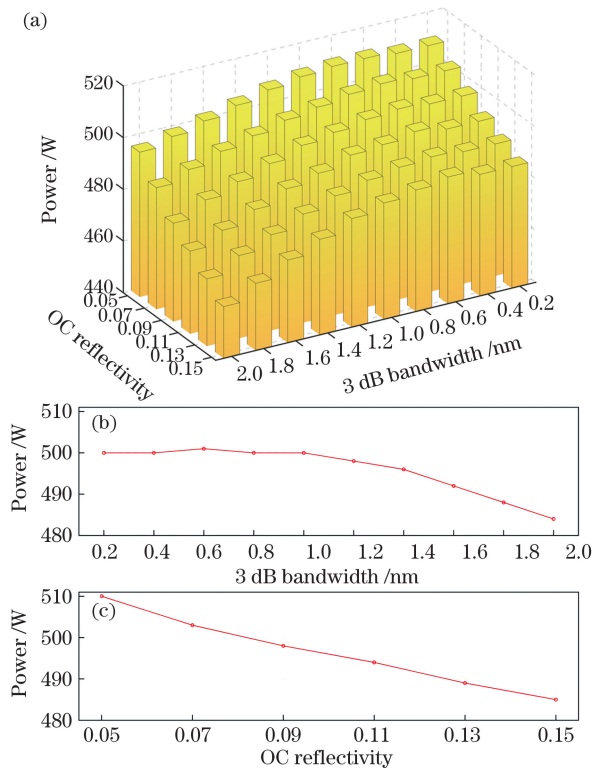


图 3 激光器的输出功率变化。(a)输出功率变化的三维图; (b)在相同低反光栅反射率下,输出功率随低反光栅带宽的变化曲线; (c)在相同低反光栅带宽下,输出功率随低反光栅反射率的变化曲线

Fig. 3 Output power change of laser. (a) Three-dimensional graph of output power change; (b) output power versus OC bandwidth under same OC reflectivity; (c) output power versus OC reflectivity under same OC bandwidth

通过观察输出光谱,我们发现腔镜反射率的变化并不会对 ASE 造成大的影响。而在相同的反射率下,如图 3(b)所示,当输出腔镜的带宽由 0.2 nm 增加到 1 nm 时,激光器的输出功率保持在 500 W 左右,随着带宽继续增加到 2 nm,输出功率则迅速降到 478 W。因此我们认为输出腔镜的带宽范围为 0.2~1.0 nm,反射率在 0.05~0.15 范围内对于激光器是比较合理的选择。

在确定了激光器的泵浦结构和光纤光栅腔镜反射率之后,需要对增益光纤长度进行优化,不同长度掺镱光纤(YDF)在正向泵浦时对激光器输出特性的影响的理论仿真结果如图 4 所示。输出腔镜的反射率为 9.5%,3 dB 带宽为 1 nm。在将所使用的 YDF 长度从 3.0 m 增加到 4.0 m 的过程中,激光器的输出功率随着 YDF 长度的增加开始缓慢增长[图 4(a)],此时在输出功率中,1018 nm 激光功率所占的比重减小,ASE 功率所占的比重(T)则从 0.2% 快速增加到 7.5%,也就是说输出功率中 ASE 功率从 1.2 W 迅速增加到 40 W。根据仿真结果[图 4(b)]可知,如果输出光谱中 1018 nm 激光强度与 ASE 强度的差值小于 40 dBm,这对于激光器来说是不安全的。

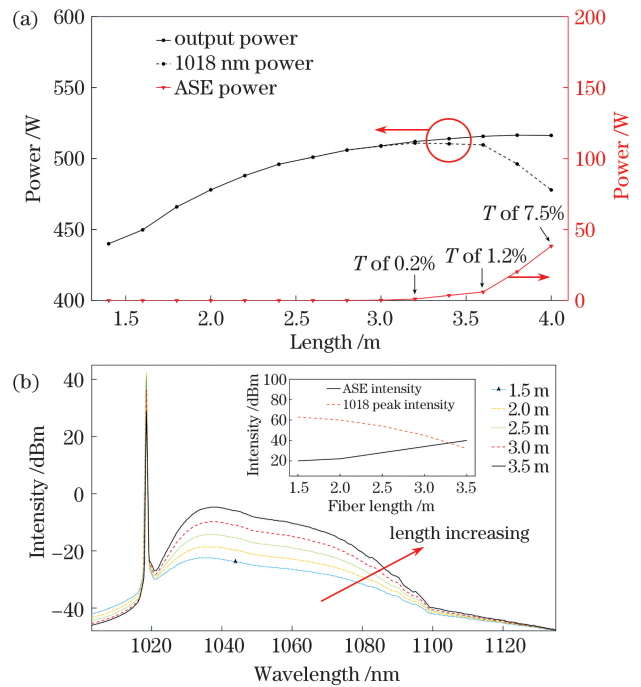


图 4 不同增益光纤长度下输出功率和输出光谱。(a)输出功率; (b)输出光谱

Fig. 4 Output powers and output spectra under different gain fiber lengths. (a) Output powers; (b) output spectra

3 分析与讨论

根据仿真结果,选择 3.2 m 的增益光纤及反射率为 9.5%、3 dB 带宽为 1 nm 的输出腔镜进行实验验证。当泵浦光功率为 383 W 时,光光效率为 81.9%。泵浦光功率为 400 W 时得到的输出光谱如图 5(a)所

示。可以看到,这时已经出现了自激振荡,此时 1018 nm 激光与 ASE (不包括自激振荡峰)的峰峰差为 38 dB,小于第 2 节指出的 40 dB 安全值。因此我们有理由认为,1018 nm 激光峰值与 ASE 峰值的比值最少不能低于 40 dB,这样才能保证激光器安全运行。通过实验优化,我们最终选择了 2.7 m 长的 30 μm /250 μm 双层掺 Yb³⁺ 光纤。同时为了提高激光器的运行效率和稳定性,使用了功率波动更小的波长锁定半导体泵浦源。实验研究表明,波长锁定的半导体泵浦源能够显著提高 1018 nm 光纤振荡器的效率^[6]。同时,使用高稳定度的水冷机对激光器进行冷却,使得激光器运行温度得到精准控制。最终在 531 W 泵浦输入的情况下实现了 447 W 的 1018 nm 激光输出,中心波长为 1018.38 nm,3 dB 带宽为 0.19 nm。最大光光效率为 84.2%,斜率效率为 82.8%。光束质量因子 (M^2) 为 1.85[图 5(c)]。如图 5(b)所示,激光器的实际输出光谱和理论仿真结果吻合较好,可见该理论模型能很好地预测实验。

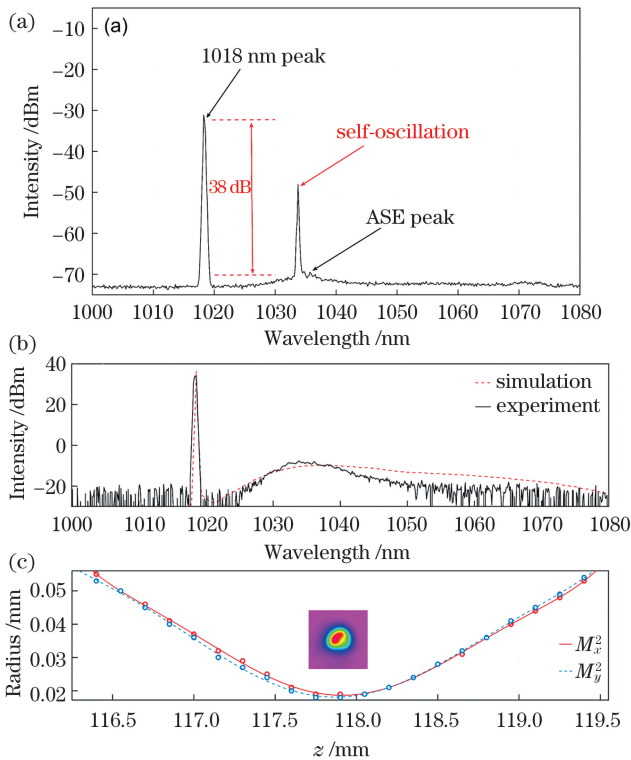


图 5 1018 nm 激光器的输出特性。(a) 1018 nm 激光器中 3.2 m YDF 的输出光谱;(b)实际输出光谱与仿真结果的对比;(c)输出光束的束腰光斑及光束质量

Fig. 5 Output characteristics of 1018 nm laser. (a) Output spectrum of 3.2 m YDF in 1018 nm laser; (b) comparison of actual output spectrum and simulated result; (c) output beam waist spot and beam quality

为了验证之前理论模型的准确性,我们进行了正向泵浦和反向泵浦[结构如图 6(a)所示]的对比实验,实验结果如图 6(b)所示。在与理论模拟相同的泵浦功率的情况下,正向泵浦和反向泵浦在 1034 nm 附近

的 ASE 峰值强度相差 2 dB 左右,与图 2(b)的模拟结果十分接近。两种泵浦情况下的输出功率曲线如图 6(c)所示,可以看到,前向泵浦的光光效率是大于后向泵浦的,证明了正向泵浦方式更适合 1018 nm 激光器。

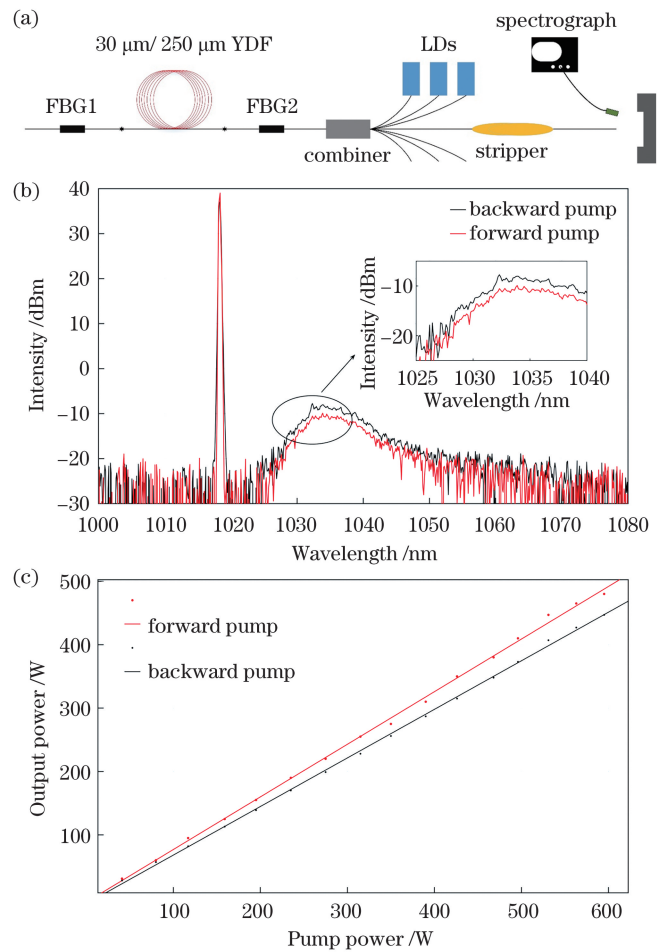


图 6 反向泵浦结构及正反向输出特性的对比。(a)反向泵浦的 1018 nm 激光器的结构图;(b)正向泵浦和反向泵浦条件下输出光谱的对比;(c)正向泵浦和反向泵浦条件下的输出功率对比

Fig. 6 Backward pump structure and comparison of output characteristics for forward pump and backward pump. (a) Structural diagram of backward pumped 1018 nm laser; (b) comparison of output spectra for forward pump and backward pump; (c) comparison of output powers for forward pump and backward pump

激光器工作的稳定性与工作温度有较大关系。我们基于高稳定激光器水冷温度控制技术,使用高稳定度的水冷机来进行激光器的控温制冷。为了得到激光器工作的最佳温度,对不同水冷温度下的激光器输出特性进行了测试,测试结果如表 1 所示。可以很清楚地看到,激光器的输出功率随着水冷温度的上升而下降,中心波长随着水冷温度的上升有明显的红移,3 dB 带宽在 5 $^{\circ}\text{C}$ 的温升下展宽了 10%。这是因为随着温

表 1 不同水冷温度下 1018 nm 激光器的输出特性

Table 1 Output characteristics of 1018 nm laser at different water cooling temperatures

Water cooling temperature / °C	Average power / W	Central wavelength / nm	3 dB bandwidth / nm	Peak power instability	Power instability
19	516	1018.4137	0.2643	±0.856%	±1.034%
20	525	1018.2852	0.1901	±0.953%	±1.109%
21	520	1018.3364	0.1938	±0.577%	±0.831%
22	517	1018.3815	0.1908	±0.774%	±0.998%
23	516	1018.4014	0.2005	±0.678%	±0.764%
24	517	1018.4116	0.2333	±0.966%	±1.137%
25	515	1018.4611	0.2895	±0.874%	±1.107%

度的变化, Yb^{3+} 的吸收截面面积在 1000~1500 nm 的光谱范围内也会发生变化, 如图 7(a) 所示。这将导致激光器的重吸收强度不断变化, 也就造成了激光器的输出功率不稳定性。此外, 温度变化对 LD 性能的影响也是导致激光器输出功率不稳定的一大因素。图 7(b1) 所示的是水温为 21 °C 时的 LD 输出光谱。当 LD 的电流增大时, LD 的发热量增加, LD 的输出光谱出现了非 976 nm 的泵浦波长 [图 7(b2)], 这也导致了激光器输出功率降低。特别地, 当将水冷温度控制

为 19 °C 时, 这个温度超出了半导体泵浦源的体布拉格光栅 (VBG) 的工作温度范围, 导致 LD 的锁波长同样出现了下降 [图 7(b3)]。

综合考虑激光器的输出特性以及运行的稳定性, 最终将冷却水温度设置为 21 °C。当输出功率为 520 W 时, 进行了 3500 s 的激光器稳定性测试。如图 8 所示, 输出功率不稳定性 (Δp_1) 为 0.7%, 峰值不稳定性 (Δp_2) 为 0.5%, 均小于 1.0%。这说明本文报道的大纤芯 1018 nm 光纤激光振荡器功率不稳定性达到了先进水平^[17]。

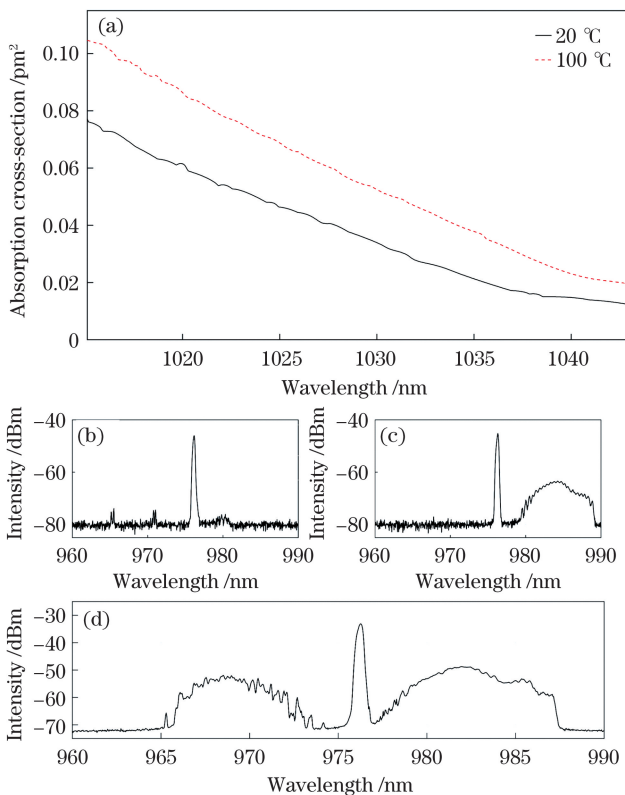


图 7 激光器输出功率不稳定的影响因素。(a) 不同温度下石英中的 Yb^{3+} 吸收截面曲线^[16]; (b) 21 °C, (c) 21.5 °C, (d) 19 °C 下的 LD 输出光谱

Fig. 7 Factors influencing laser output power instability. (a) Absorption cross-section curves of Yb^{3+} in quartz at different temperatures^[15]; LD output spectra at (b) 21 °C, (c) 21.5 °C, and (d) 19 °C

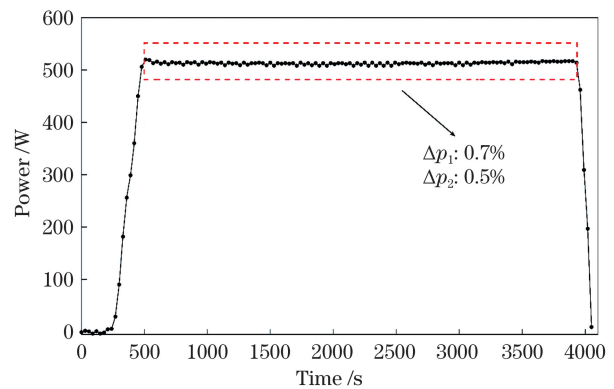


图 8 激光器持续运行 1 h 的实时功率曲线

Fig. 8 Real-time power curve of laser running continuously for 1 h

4 结 论

报道了一种 1018 nm 高功率光纤激光器。基于连续光速率方程模型, 分析了不同长度增益光纤长度对 1018 nm 激光器输出特性的影响。发现当所使用的增益光纤长度达到 4 m 及以上时, ASE 的功率占到了总输出功率的 7.5%, 为 40 W。因此, 为了抑制强烈的 ASE, 经过理论计算和实验优化, 选择了 2.7 m 长的增益光纤。同时, 由于 Yb^{3+} 在 976 nm 附近的吸收峰很窄, 因此选择了波长锁定的半导体泵浦源以使泵浦光被最大程度地吸收, 最终获得了 520 W 的最高功率输出。输出功率为 447 W 时系统具有最大光光效率 84.2%, 据我们所知, 这是目前纤芯直径不小于

30 μm 的 1018 nm 光纤激光振荡器的最高效率之一。为了使激光器稳定,进一步优化激光器结构,提高其稳定性,使用了功率波动更小的泵浦源,并使用高稳定度的水冷机。在 21 $^{\circ}\text{C}$ 的环境下保持激光器运行,当输出功率为 520 W 时功率不稳定性保持为 0.7%。该激光器可作为可靠的高功率光纤激光器同带泵浦的泵浦源。

参 考 文 献

- [1] Wang Y, Kitahara R, Kiyoyama W, et al. 8-kW single-stage all-fiber Yb-doped fiber laser with a BPP of 0.50 mm-mrad[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11260: 1126022.
- [2] Ikoma S, Uchiyama K, Takubo Y, et al. 5-kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for materials processing [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10512: 105120C.
- [3] Sotsuka Y, Nishimoto S, Tsumano T, et al. The dawn of computer-assisted robotic osteotomy with ytterbium-doped fiber laser[J]. Lasers in Medical Science, 2014, 29(3): 1125-1129.
- [4] Lim K J, Kai-Wen S S, Yong'En Y J, et al. High absorption large-mode area step-index fiber for tandem-pumped high-brightness high-power lasers[J]. Photonics Research, 2020, 8(10): 1599.
- [5] 肖起榕, 田佳丁, 李丹, 等. 级联泵浦高功率掺镱光纤激光器: 进展与展望[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1501004.
Xiao Q R, Tian J D, Li D, et al. Tandem-pumped high-power ytterbium-doped fiber lasers: progress and opportunities [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1501004.
- [6] Hecht J. Beam combining cranks up the power[J]. Laser Focus World, 2012, 48(6): 50-53.
- [7] Kalyoncu S K, Yeniay A. High brightness 1018 nm monolithic fiber laser with power scaling to >500 W[J]. Applied Optics, 2020, 59(16): 4763-4767.
- [8] Yan P, Wang X J, Li D, et al. High-power 1018 nm ytterbium-doped fiber laser with output of 805 W [J]. Optics Letters, 2017, 42(7): 1193-1196.
- [9] Yan P, Wang X J, Wang Z H, et al. A 1150-W 1018-nm fiber laser bidirectional pumped by wavelength-stabilized laser diodes [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 17627593.
- [10] Xiao H, Zhou P, Wang X L, et al. Experimental investigation on 1018-nm high-power ytterbium-doped fiber amplifier [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(13): 1088-1090.
- [11] Xie Z X, Fang Q, Xu Y, et al. Hundred-Watts-level monolithic narrow linewidth linearly-polarized fiber laser at 1018 nm [J]. Optical Engineering, 2019, 58(10): 106106.
- [12] Palma-Vega G, Walbaum T, Heinzig M, et al. Ring-up-doped fiber for the generation of more than 600 W single-mode narrow-band output at 1018 nm [J]. Optics Letters, 2019, 44(10): 2502-2505.
- [13] Glick Y, Sintov Y, Zuitlin R, et al. Single-mode 230 W output power 1018 nm fiber laser and ASE competition suppression [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2016, 33(7): 1392-1398.
- [14] Platonov N, Shkurikhin O, Fomin V, et al. High-efficient kW-level single-mode ytterbium fiber lasers in all-fiber format with diffraction-limited beam at wavelengths in 1000-1030 nm spectral range [J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11260: 1126003.
- [15] Wang Y, Po H. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(10): 2262-2270.
- [16] Kurkov A S. Oscillation spectral range of Yb-doped fiber lasers [J]. Laser Physics Letters, 2007, 4(2): 93-102.
- [17] 张秀娟, 段云锋, 赵水, 等. 高效率 1018 nm 全光纤激光器实验研究 [J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0414002.
Zhang X J, Duan Y F, Zhao S, et al. Experimental study on high efficient all-fiber lasers at 1018 nm [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0414002.

High Efficiency and Stability 1018 nm Single Fiber Oscillator

Chen Nanyu^{1,2}, Chen Xiaolong¹, Liu Wansheng^{1,2}, Liu Yibo¹, Wang He^{1,2},
He Bing^{1,2*}, Zhou Jun^{1,2}

¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China;

² College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective The laser power requirement is becoming higher and higher in the industrial and medical fields. It is an effective way to improve the output power of the 1018 nm fiber laser using the tandem-pumped technology. Compared with the conventional direct pumping technology for the 976 nm semiconductor laser, this technology has the advantages of high brightness and low quantum loss, resulting in the high output of pump power and the low influence of thermal effect from fiber and device. However, the main difficulty in the 1018 nm fiber laser is that the absorption cross-section of Yb^{3+} at 1018 nm is larger than that at a longer wavelength. This leads to fierce competition between lasing at 1018 nm and amplified spontaneous emission (ASE) at 1030 nm. Based on the continuous wave rate equation model, the effects of gain fiber length, output grating reflectivity, and bandwidth on the output characteristics of a 1018 nm laser are analyzed. We hope that the methods and results of our research can be helpful to the design of stable and efficient tandem-pumped sources.

Methods In this paper, first, we divide the ASE spectrum into the K equally spaced regions based on the rate equation model of a laser. The central wavelength of each region is λ_i , and the bandwidth is $\Delta\lambda_i$, where $i = 1, 2, 3, \dots, K$. A rate equation model with an ASE term is established for a continuous wave. Second, the above model is used to simulate the output powers and output spectra of the laser under different pumping modes, and the appropriate pumping mode is

selected. Third, the output characteristics of the output couplers with different reflectivity and bandwidths are simulated to screen out the appropriate range of reflectivity and bandwidth for the output coupler. Fourth, the effect of gain fiber length on the output characteristics of the laser is quantitatively described. According to the results of numerical simulation, we optimize the parameters of the laser system and conduct the experiments. Finally, the experimental results are compared with the simulated results, and an efficient and stable laser scheme is founded.

Results and Discussions According to the physical model established above, it is found by calculation that the output power under forward pump is 2.1% higher than that under backward pump when the total pump power is the same [Fig. 2(a)]. Therefore, the forward pump is more reasonable. When we adopt forward pump and use a 3 m gain fiber, only the reflectivity and bandwidth of the output coupler are changed. The results of numerical simulation are shown in Fig. 3(a). The bandwidth range of the output coupler is 0.2–1.0 nm, and the reflectivity is 0.05–0.15, which are a reasonable choice for the laser. We increase the ytterbium doped fiber (YDF) length from 3.0 m to 4.0 m, and the laser output power grows slowly [Fig. 4 (a)]. At the same time, the power proportion of the 1018 nm laser in the output power decreases, while the power proportion of ASE increases rapidly from 0.2% to 7.5%. Finally, we use a 2.7 m 30 μm /250 μm double-clad Yb^{3+} fiber with an output grating reflectivity of 9.5% and a 3 dB bandwidth of 1 nm. A 447 W 1018 nm laser output with a central wavelength of 1018.38 nm and a 3 dB bandwidth of 0.19 nm is achieved with a 531 W pump input. The maximum optical to optical efficiency is 84.2% and the slope efficiency is 82.8%. The beam quality factor (M^2) indicating beam quality is 1.85 [Fig. 5(c)].

Conclusions In this paper, a 1018 nm high power fiber laser is reported. Based on the continuous wave rate equation model, the influence of gain fiber length on the output characteristics of the 1018 nm laser is analyzed. It is found that when the gain fiber length reaches 4 m or more, the power of ASE is up to 40 W and accounts for 7.5% of the total output power. Therefore, in order to suppress the strong ASE, a 2.7 m gain fiber is used after theoretical calculation and experimental optimization. Meanwhile, as the absorption peak of Yb^{3+} at 976 nm is very narrow, a wave-locked semiconductor pump source is used to maximize the absorption of pump light. The maximum power output of 520 W is obtained. It has the maximum optical to optical efficiency of 84.2% at 447 W. To our knowledge, it is one of the highest efficiencies for the 1018 nm fiber laser oscillators with a core diameter larger than 30 μm . In order to make the laser stable, the structure of the laser is further optimized. The pump source with less power fluctuation and the water cooler with high stability are used. In addition, the laser operation at 21 $^{\circ}\text{C}$ is kept. The power instability is 0.7% at 520 W, which indicates that it can be used as a reliable pump source for tandem pumping of high power fiber lasers.

Key words lasers; fiber lasers; high efficiency; power stability