

## 双端输出近单模准连续全光纤激光器\*

丁欣怡<sup>1)2)</sup> 王力<sup>1)</sup> 曾令筏<sup>1)</sup> 吴函烁<sup>1)3)</sup>王小林<sup>1)3)†</sup> 宁禹<sup>1)3)</sup> 习锋杰<sup>1)3)</sup>

1) (国防科技大学前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

2) (电子科技大学光电科学与工程学院, 成都 611731)

3) (国防科技大学南湖之光实验室, 长沙 410073)

(2023 年 4 月 16 日收到; 2023 年 5 月 13 日收到修改稿)

准连续光纤激光器在工业领域有着广阔的应用前景, 双端输出结构为工业低成本高功率光纤激光器提供了新思路, 提出并研究了双端输出准连续光纤激光器. 基于稳态速率方程, 建立了双端准连续光纤激光振荡器的理论模型, 对该类型激光器的输出功率、时序及非线性效应进行了仿真研究. 结果表明: 延长泵浦上升时间可以有效抑制弛豫振荡, 在脉冲持续时间内获得稳定的输出; 双端输出准连续激光器相比单端输出结构, 非线性效应累积更小. 实验采用纤芯/包层直径为 20/400  $\mu\text{m}$  的掺镱光纤, 首次实现了峰值功率 3 kW 的双端准连续近单模激光输出, 两端峰值功率分别为 1218 和 2220 W, 对应光束质量因子  $M^2$  分别为 1.34 和 1.27, 光光转换效率约为 60%, 脉宽为 100  $\mu\text{s}$ , 重频为 1 kHz. 验证了双端输出准连续光纤激光器实现高功率、高光束质量输出的可行性, 为小体积、低成本、高功率和高亮度的准连续光纤激光器提供了支撑.

关键词: 光纤激光, 准连续, 双端输出, 近单模

PACS: 42.55.Wd, 42.55.Xi

DOI: 10.7498/aps.72.20230616

## 1 引言

准连续 (quasi-continuous wave, QCW) 光纤激光器是一种兼具连续和脉冲工作模式的激光器, 具有输出脉冲的脉宽和重频可调范围大, 时域稳定性高, 电光转换效率高, 以及峰值功率高等优点, 在医疗和航空航天等领域, 特殊材料切割、精细焊接和微钻孔等方面都有着极为广阔的应用前景<sup>[1,2]</sup>.

近年来, 国内外对 QCW 激光器展开了广泛的研究, 其中中国科学院理化技术研究所和国防科技大学在高功率研究方面取得了显著的成果, 研究情况归纳如表 1 所列<sup>[3-18]</sup>. 中国科学院理化技术研究所采用空间主振荡功率放大 (master oscillator-

power amplifier, MOPA) 结构, 在 2015 年实现了平均功率为 8.2 kW 的 QCW 激光输出, 对应峰值功率为 102.5 kW<sup>#</sup>, 光束质量  $\beta$  因子为 3.5<sup>[3]</sup>; 在 2020 年实现了平均功率为 0.861 kW 的输出, 对应峰值功率为 2.2 kW<sup>#</sup>, 光束质量因子  $M^2=1.37$ <sup>[4]</sup>. 然而, 该激光器采用的空间结构, 体积庞大、成本高昂, 难以在工业中得到应用. 2020 年, 本课题组采用全光纤振荡器结构对高功率 QCW 激光器展开了较为深入的研究<sup>[5-8]</sup>, 在 2022 年实现了平均功率为 0.973 kW, 峰值功率为 10.75 kW,  $M^2\approx 1.61$  的 QCW 激光输出<sup>[8]</sup>. 在保证高功率、高光束质量的前提下, 降低了 QCW 激光器的体积和成本, 提高了 QCW 激光器的鲁棒性.

在产业化方面, 美国 IPG 公司推出的单模 QCW

\* 湖南省杰出青年基金 (批准号: 2023JJ10057) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chinaphotonics@163.com

表 1 QCW 激光器科研与产业现状  
Table 1. QCW laser research and industry status.

年份	科研单位	结构/型号	峰值功率 /kW	平均功率 /kW	光束质量 因子 $M^2$	脉宽/ms	频率/kHz
2013	中国科学院理化技术研究所 <sup>[9]</sup>	空间MOPA结构 (Nd:YAG平板放大器)	0.564 <sup>#</sup>	0.0423	1.56	0.075	1
2015	中国科学院理化技术研究所 <sup>[3]</sup>	空间MOPA结构 (Nd:YAG平板放大器)	102.5 <sup>#</sup>	8.2	>3.5	0.2	0.4
2020	中国科学院理化技术研究所 <sup>[4]</sup>	空间MOPA结构 (Nd:YAG平板放大器)	2.2 <sup>#</sup>	0.0861	1.37	0.1	0.4
2022	国防科技大学 <sup>[5]</sup>	全光纤振荡器	9.7	0.898	~2.4	0.1	1
2022	国防科技大学 <sup>[6]</sup>	全光纤振荡器	6.5	0.501	1.38	0.1	1
2022	国防科技大学 <sup>[7]</sup>	全光纤振荡器	7.3	0.5689	1.43	0.1	1
2023	国防科技大学 <sup>[8]</sup>	全光纤振荡器	10.75	0.973	~1.61	0.09	1
2015	IPG <sup>[10]</sup>	YLM-150/1500-QCW	1.5	0.150	1.05	0.05—50	0—50
2015	IPG <sup>[11]</sup>	YLM-250/2500-QCW	2.5	0.250	1.05	0.05—50	0—50
2015	IPG <sup>[12]</sup>	YLS-2000/20000-QCW	20	2	12.33 <sup>#</sup> , 44 <sup>#</sup>	0.2—10	2
2016	IPG <sup>[13]</sup>	YLS-2300/23000-QCW	23	2.3	12.33 <sup>#</sup> , 44 <sup>#</sup>	0.2—10	2
2018	武汉锐科 <sup>[14]</sup>	RFL-QCW450/1500FS	1.5	0.450	<1.45 <sup>#</sup> , <5.82 <sup>#</sup>	0.1—75	0.050—5
2018	武汉锐科 <sup>[15]</sup>	RFL-QCW150/1500	1.5	0.150	<1.45 <sup>#</sup> , <5.82 <sup>#</sup>	0.05—50	0—5
2021	武汉锐科 <sup>[16]</sup>	RFL-QCW1500/15000	15	1.5	<11.64 <sup>#</sup>	0.05—50	0—5
2019	创鑫激光 <sup>[17]</sup>	MFSQ-150/1500W	1.5	0.150	1.3, 2.8	0.1—50	0.001—5
2019	创鑫激光 <sup>[18]</sup>	MFSQ-500/2500W	2.5	0.500	2.5	0.1—50	0.001—5

注: 标#数据根据已知数据计算得出.

激光器 (YLM-250/2500-QCW) 光束质量因子  $M^2$  可达 1.05, 对应峰值功率为 2.5 kW<sup>[11]</sup>; 高功率 QCW 激光器 (YLS-2300/23000-QCW) 峰值功率已达到 23 kW, 平均功率达到 2.3 kW, 采用芯径为 100  $\mu\text{m}$  的输出尾纤时, 光束参量积 (beam-parameter product, BPP) 为 4.2 mm  $\times$  mrad ( $M^2 = 12.33^{\#}$ )<sup>[13]</sup>. 国内对于 QCW 激光器的商业化研究也取得了一定的成果, 创鑫激光的 MFSQ-150/1500W 激光器实现了光束质量因子  $M^2 = 1.3$  的单模 QCW 激光输出, 但其输出功率较低, 对应峰值功率为 1.5 kW<sup>[17]</sup>; 武汉锐科的 RFL-QCW1500/15000 激光器实现了峰值功率为 15 kW 的输出, 但是其光束质量较差, 对应的 BPP 为 4 mm  $\times$  mrad ( $M^2 = 11.64^{\#}$ )<sup>[16]</sup>. 显然, 目前已有的 QCW 光纤激光器产品无论在峰值功率还是光束质量上都还有很大的提升空间.

目前对于 QCW 光纤激光器的研究都只采用了单端输出的结构, 而双端输出光纤激光振荡器仅需一个谐振腔就能实现两路激光输出, 与两台相同功率的单端输出光纤激光振荡器相比, 双端输出光纤激光振荡器减少了增益光纤、光纤光栅、合束器

和水冷板的数量, 节约了系统成本, 压缩了系统的体积和质量, 并且能够同时完成两台单端输出激光振荡器的工作量, 极大地提高了工作效率. 此外, 双端输出 QCW 光纤激光器有望通过双端输出合束实现更高功率的激光输出<sup>[19,20]</sup>. 因此, 在本课题组发明的双端输出连续光纤激光器 (ZL201821644646.3) 基础上<sup>[21]</sup>, 本文提出采用双端结构实现 QCW 激光器输出, 并首次开展了相关理论和实验研究.

本文首先基于速率方程构建了双端输出 QCW 光纤激光振荡器的理论模型, 研究了泵浦上升时间对弛豫振荡的影响, 以及双端结构对受激拉曼散射效应 (stimulated Raman scattering, SRS) 的影响. 然后, 进行了双端输出 QCW 光纤激光振荡器的实验研究, 基于纤芯/内包层直径为 20/400  $\mu\text{m}$  的双包层掺镱光纤, 首次实现了双端 QCW 激光峰值功率 3 kW 的近单模输出. 随后进行了单端输出 QCW 光纤激光振荡器的实验研究, 对比验证了双端结构对 SRS 的抑制作用. 研究结果表明, 增加泵浦上升时间可以有效抑制弛豫振荡, 双端结构可以有效减小光纤中的非线性效应累积, 从而抑制 SRS.

## 2 理论研究

### 2.1 仿真模型

为研究双端 QCW 光纤激光振荡器的输出特性, 构建了相应的仿真模型, 对双端 QCW 光纤激光振荡器输出激光的时域、光谱, 以及增益光纤中的泵浦光功率、信号光功率和上能级粒子数分布进行仿真。

考虑放大自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 和 SRS, 稳态下高功率光纤激光器中信号光功率的离散化速率方程可以表示为

$$\begin{aligned} & \pm \frac{dP_n^{s\pm}(\lambda_n^s, z)}{dz} \\ &= \Gamma_s [\sigma_n^{es}(\lambda_n^s) N_2(z) - \sigma_n^{as}(\lambda_n^s) N_1(z)] P_n^{s\pm}(\lambda_n^s, z) \\ &+ 2\sigma_n^{es}(\lambda_n^s) N_2(z) \frac{hc^2}{(\lambda_n^s)^3} \Delta\lambda - a_n^s(\lambda_n^s) P_n^{s\pm}(\lambda_n^s, z) \\ &+ \Gamma_n^s(\lambda_n^s) P_n^{s\pm}(\lambda_n^s, z) \sum_{i=1}^N \frac{1}{A_{eff}^{i,n}} g_R(\omega_i - \omega_n) \\ &\times [P_i^{s+}(\lambda_i^s, z) + P_i^{s-}(\lambda_i^s, z)]. \end{aligned} \quad (1)$$

泵浦光的速率方程为

$$\begin{aligned} & \pm \frac{dP_m^{p\pm}(\lambda_m^p, z)}{dz} \\ &= \Gamma_p [\sigma_m^{ep}(\lambda_m^p) N_2(z) - \sigma_m^{ap}(\lambda_m^p) N_1(z)] P_m^{p\pm}(\lambda_m^p, z) \\ &- a_m^p(\lambda_m^p) P_m^{p\pm}(\lambda_m^p, z). \end{aligned} \quad (2)$$

上能级粒子数随时间的变化为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N_2(z, t)}{\partial t} = \\ & \left\{ \frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)] \Gamma_p \sigma_{ap}}{A_{core} h \nu_p} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)] \Gamma_s \sigma_{as}}{A_{eff} h \nu_s} \right\} N_1 \\ & - \left\{ \frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)] \Gamma_p \sigma_{ep}}{A_{core} h \nu_p} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)] \Gamma_s \sigma_{es}}{A_{eff} h \nu_s} \right\} N_2 \\ & - N_2 \frac{1}{\tau}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $N_1$  与  $N_2$  的关系为

$$N_0 = N_1 + N_2. \quad (4)$$

基于上述方程, 结合边界条件 (5)—(8) 式 [22], 把脉冲信号的每一个时刻都看作稳态进行仿真, 从而建立了双端 QCW 光纤激光器的理论模型。

$$P_n^{s+}(\lambda_n^s, 0) = P_n^{s-}(\lambda_n^s, 0) R_n^{OC1}(\lambda_n^s), \quad (5)$$

$$P_n^{s-}(\lambda_n^s, L) = P_n^{s+}(\lambda_n^s, L) R_n^{OC2}(\lambda_n^s), \quad (6)$$

$$P_n^{s-}(\lambda_n^s, 0) = P_n^{s-}(\lambda_n^s, L) [1 - R_n^{OC1}(\lambda_n^s)], \quad (7)$$

$$P_n^{s+}(\lambda_n^s, L) = P_n^{s+}(\lambda_n^s, L) [1 - R_n^{OC2}(\lambda_n^s)]. \quad (8)$$

进一步采用 Smith 的“假想光子”模型对 SRS 进行了修正. Smith 指出, 输出端的受激拉曼散射是由发生在整个光纤上的放大自发斯托克斯散射产生的, 对其所有自发辐射加权求和, 可以等效为在光纤输入端, 光纤的每个模态 (纵向和横向) 都有一个光子的输入通量, 其边界有效入射功率为 [23]

$$P_{s0}^{eff} = h\omega_s B_{eff}. \quad (9)$$

(1)—(9) 式中的物理量及其物理意义如表 2 所列。

表 2 仿真参数  
Table 2. Simulation parameter.

物理量	物理意义	上下标符号	物理意义
$P$	功率	+	正向
$N_0$	掺杂离子浓度	—	反向
$N_1$	基态粒子数密度	p	泵浦光
$N_2$	激发态粒子数密度	s	信号光
$A_{core}$	纤芯面积	$m$	泵浦光波长序数
$A_{eff}$	纤芯有效面积 [24]	$n$	信号光波长序数
$\lambda$	波长	$N$	信号光波长离散数
$z$	增益光纤的轴向坐标	e	发射截面
$\Gamma$	填充因子	a	吸收截面
$\sigma$	吸收发射截面	OC1	输出耦合光栅1
$R$	反射率	OC2	输出耦合光栅2
$a$	损耗系数		
$g_R$	拉曼增益系数		
$\tau$	激发态粒子寿命		
$\nu$	光波频率		
$\omega$	光波角频率		
$B_{eff}$	斯托克斯辐射的有效带宽		
$\Delta\lambda$	实际增益光谱带宽		
$L$	增益光纤长度		
$h$	普朗克常量		
$\hbar$	约化普朗克常量		
$c$	光速		

### 2.2 泵浦调制上升时间对弛豫振荡的影响

由于直接调制光纤耦合半导体激光器 (laser diode, LD), 每输出一个脉冲就相当于对 LD 进行了一次开关机, LD 开机时即激光起振初期, 受激辐射振荡消耗上能级粒子数产生弛豫振荡尖峰. 弛

豫振荡导致的过冲效应会在光纤中产生大量的热沉积和超高的峰值功率,降低非线性阈值<sup>[25]</sup>,限制 QCW 光纤激光器的功率提升. 现有实验研究表明,调制泵浦 LD,降低泵浦抽运速率可以抑制连续 (continuous wave, CW) 型高功率光纤激光器的过冲效应<sup>[26]</sup>. 为减小或消除 QCW 输出激光中的弛豫振荡峰,基于上述模型对双端 QCW 光纤激光振荡器进行数值仿真.

计算采用的泵浦光中心波长为 981 nm,对应的吸收/发射截面为  $8.57 \times 10^{-25} / 1.07 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ ,计算范围为 965—985 nm,填充因子为 0.0025, A, B 两端泵浦平均功率均为 200 W,重频为 1 kHz,占空比为 10%;信号光中心波长为 1080 nm,对应的吸收/发射截面为  $2.29 \times 10^{-27} / 2.82 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,计算范围为 1050—1150 nm,填充因子为 1. 图 1 给出了 800—1150 nm 的吸收/发射截面曲线. 双包层掺镱光纤的纤芯/内包层直径为 20/400  $\mu\text{m}$ ,长度为 25 m,光纤包层吸收系数为 0.61 dB/m(@981 nm),纤芯数值孔径为 0.065,纤芯/包层衰减为 9.3/2.4 dB/km; A 和 B 两端输出耦合光纤布拉格光栅 (output coupler fiber Bragg grating, OC FBG) 参数相同,中心波长为 1080 nm,反射率为 10%,吸收系数 3 dB 带宽为 1 nm;掺杂离子浓度为  $6.56 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ <sup>[22]</sup>.

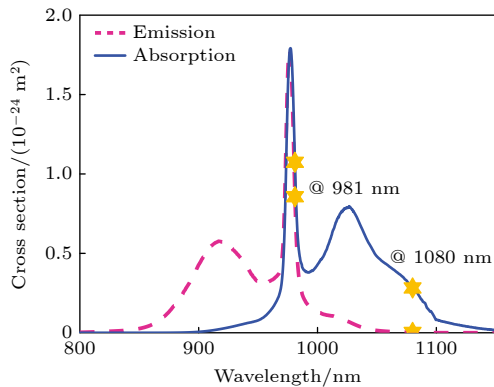


图 1 掺镱光纤的吸收/发射截面

Fig. 1. Absorption/emission cross sections of ytterbium-doped fibers.

采用高斯函数构建泵浦脉冲的上升沿,上升时间定义为响应曲线从稳态值的 10% 上升到稳态值的 90% 所需的时间,研究了上升时间分别为 0, 5, 10, 15  $\mu\text{s}$  四种情况下的信号光时域特性,泵浦功率随时间的变化如图 2(a) 所示. 从稳态值的 90%

开始计算高电平时间,仿真的脉宽均为 100  $\mu\text{s}$ ,且下降时间均为 0  $\mu\text{s}$ .

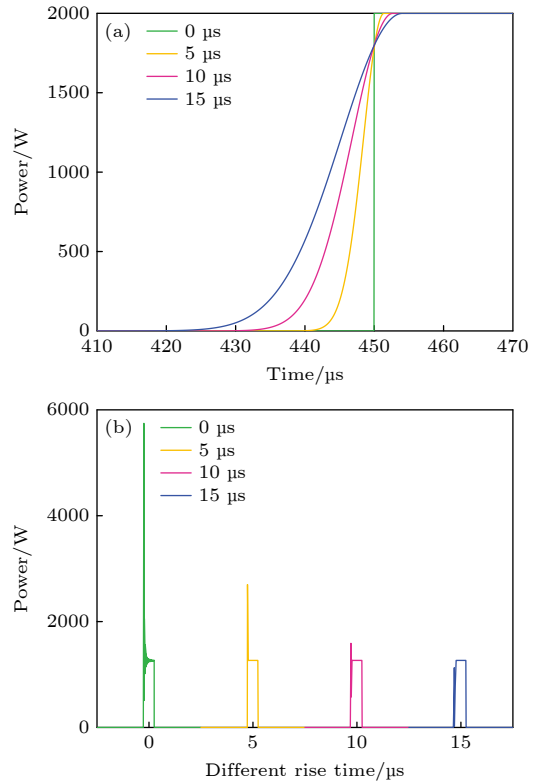


图 2 时域图 (a) 泵浦脉冲上升沿; (b) 不同上升时间下的输出脉冲

Fig. 2. Time domain diagram: (a) Rising edge of pump pulse; (b) output pulses at different rise times.

仿真结果如图 2(b) 所示,上升时间为 0  $\mu\text{s}$  时,弛豫振荡峰对应的功率为 5745 W,为稳态输出峰值功率的 4.57 倍,随着上升时间的增加,弛豫振荡峰迅速减小. 当上升时间为 5  $\mu\text{s}$  时,弛豫振荡功率减小到稳态的 2.13 倍,10  $\mu\text{s}$  时减小到 1.25 倍. 上升时间为 15  $\mu\text{s}$  时弛豫振荡峰仍存在,但对应的功率为 1128 W,已低于脉冲稳态输出峰值功率 1267 W,此时 QCW 激光器的输出脉冲脉宽为 100  $\mu\text{s}$ ,上升时间约为 11  $\mu\text{s}$ . 仿真结果表明,延长泵浦上升时间可以有效抑制弛豫振荡,在脉冲持续时间内获得稳定的脉冲输出.

### 2.3 系统结构对 SRS 的影响

2022 年,本课题组钟鹏林等<sup>[19]</sup>通过实验发现,总输出功率相同时双端输出 CW 光纤激光器与单端输出 CW 光纤激光器相比, SRS 抑制比更高. 为了对比验证双端结构对 SRS 的抑制作用,对单端输出 QCW 光纤激光振荡器进行仿真. A 端 OC FBG



替换为高反射光纤布拉格光栅 (high reflectivity fiber Bragg grating, HR FBG), 即反射率设置为 99.9%, 其余仿真参数不变.

将该仿真结果与双端结构下的结果进行对比, 输出光谱如图 3 所示. 单端结构下, 输出功率为 247 W 时, SRS 抑制比为 45 dB; 双端结构下, B 端输出功率为 254 W 时, SRS 抑制比为 48 dB, 比单端输出的 SRS 抑制比高 3 dB, 输出总功率为 252 W 时, SRS 抑制比为 61 dB, 比单端输出的 SRS 抑制比高 16 dB. 说明在单端输出功率相同和总输出功率相同的情况下, 双端输出 QCW 激光器都具有更好的 SRS 抑制能力.

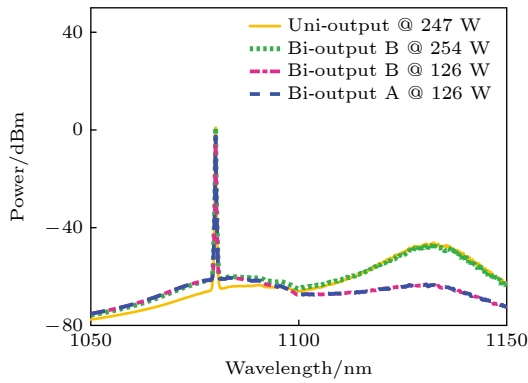


图 3 不同结构下的仿真输出光谱

Fig. 3. Simulation output spectra under different structure.

引入  $B$  积分来衡量光纤中的非线性效应累积<sup>[27]</sup>:

$$B(z) = \frac{2\pi}{\lambda} \int n_2 \frac{P(z)}{A_{\text{eff}}} dz \quad (10)$$

式中, 激光传输介质的非线性折射率  $n_2 = 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ <sup>[23]</sup>.

单端结构下, 输出功率为 247 W 时,  $B$  积分值为 2.72; 双端结构下, B 端输出功率为 254 W 时,  $B$  积分值为 1.69, 输出总功率为 252 W 时, 两端  $B$  积分值均为 0.84. 可见, 双端输出结构改变了能

量在光纤中的分布 (如图 4(a) 和 (b) 所示), 减小了光纤中的非线性效应累积, 从而抑制了 SRS.

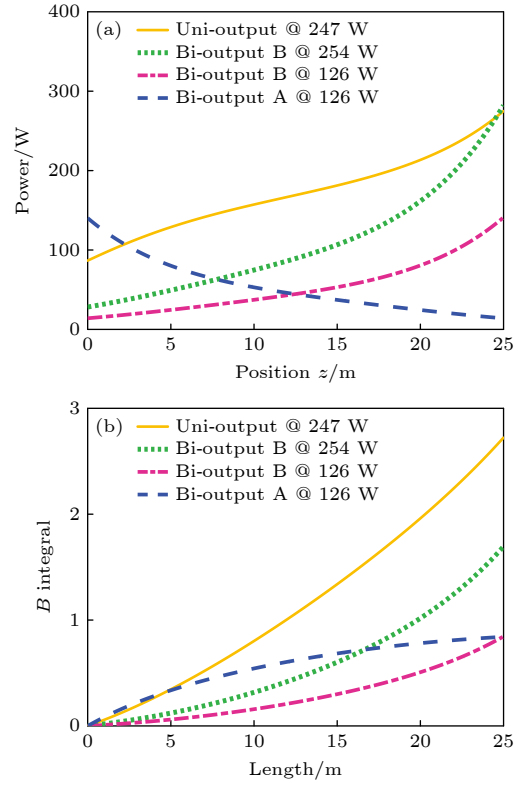


图 4 增益光纤中的非线性效应累积 (a) 功率分布; (b)  $B$  积分

Fig. 4. Accumulation of nonlinear effects in gain fibers: (a) Power distribution; (b)  $B$  integral.

### 3 实验与分析

#### 3.1 实验结构

实验采用双端输出 QCW 激光振荡器结构, 如图 5 所示. 通过对泵浦源直接调制来产生 QCW 激光, 实验中调制频率为 1 kHz, 占空比为 10%. A 和 B 两端均使用 3 台稳波长 981 nm 的 LD 进行泵浦, 泵浦光经泵浦信号合束器 (pump and signal

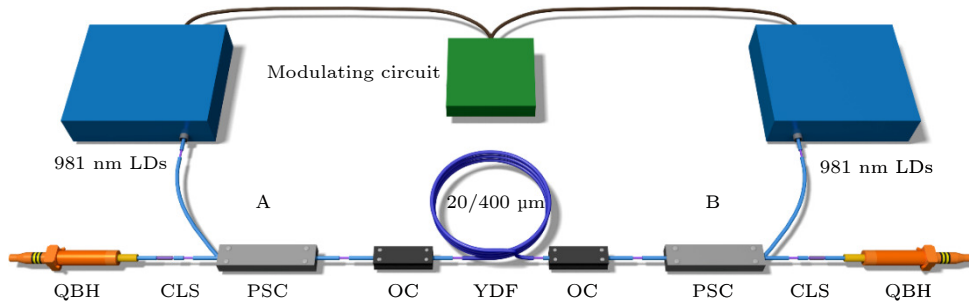


图 5 双端输出 QCW 光纤激光器实验结构

Fig. 5. Experimental structure of double-ended output QCW fiber laser.

combiner, PSC) 合束后注入增益光纤. 信号光从 OC FBG 输出后, 利用包层光滤除器 (cladding light stripper, CLS) 滤除泄漏的信号光和残余的泵浦光, 最后从光纤端帽 (quartz block head, QBH) 输出. 其中, 双包层掺镱光纤纤芯/内包层直径为 20/400  $\mu\text{m}$ , 长度为 25 m, 光纤包层吸收系数为 0.61 dB/m(@981 nm), 纤芯数值孔径为 0.065, 包层数值孔径为 0.46 (误差为 5%), 纤芯/包层衰减为 9.3/2.4 dB/km; A 端 OC FBG 中心波长为 1079.94 nm, 反射率为 10.6%, 3 dB 带宽为 0.99 nm; B 端 OC FBG 中心波长为 1079.97 nm, 反射率为 10.9%, 3 dB 带宽为 0.98 nm.

实验采用的一体化测试平台如图 6 所示, QBH 输出的激光经准直器 (collimator, CO) 进入分束系统, 经高反射镜 (high-reflectivity mirror, HR) 反射和扩束镜 (beam expander, BE) 扩束后进入功率计 (power meter, PM) 测量功率, 光电探测器 (photodetector, PD) 和光谱仪 (optical spectrum analyzer, OSA) 测量散射光, 光束质量分析仪 (beam quality analyzer, BQA) 测量透射光, 分别

对输出激光的时域、光谱和光束质量进行表征, 报警器 (sensor) 对散射光强度进行监测, 防止功率突变损坏激光器. 此外, BQA 前置滤光片 (optical filter, OF) 滤除信号光波段以外的光, 其中心波长为 1075 nm, 带宽为 50 nm.

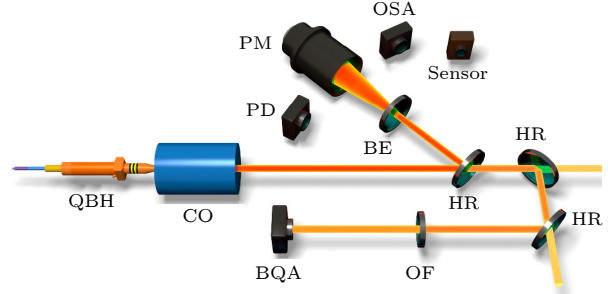


图 6 一体化测试平台

Fig. 6. Integrated test platform.

### 3.2 双端输出 QCW 光纤激光器输出特性

如图 7(a) 所示, 激光器输出功率随泵浦功率增加呈现近似线性增长, 但是光光转换效率较低, 保持在 60% 左右, 这是由于采用 981 nm 的 LD 泵浦总吸收较低. 泵浦平均功率为 533 W 时, 两端平

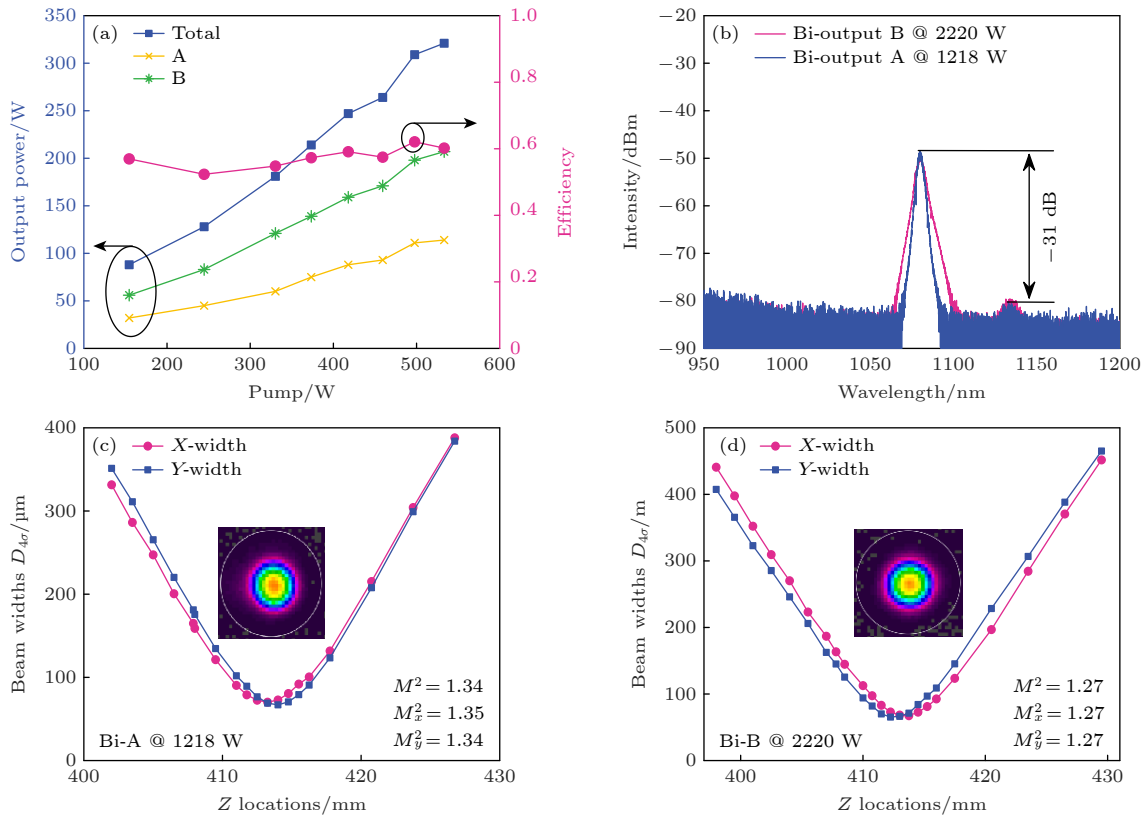


图 7 双端输出 QCW 光纤激光器实验结果 (a) 输出功率与效率曲线; (b) 输出光谱; (c) A 端光束质量; (d) B 端光束质量

Fig. 7. Experimental results of double-ended output QCW fiber laser: (a) Curves of output laser power and efficiency; (b) spectra of output laser; (c) beam quality at end A; (d) beam quality at end B.

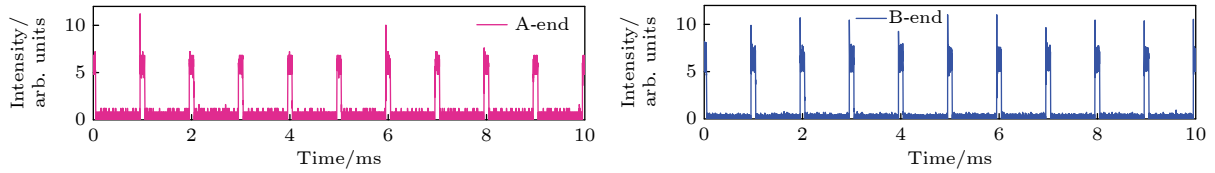


图 8 脉冲形态

Fig. 8. Pulse morphology.

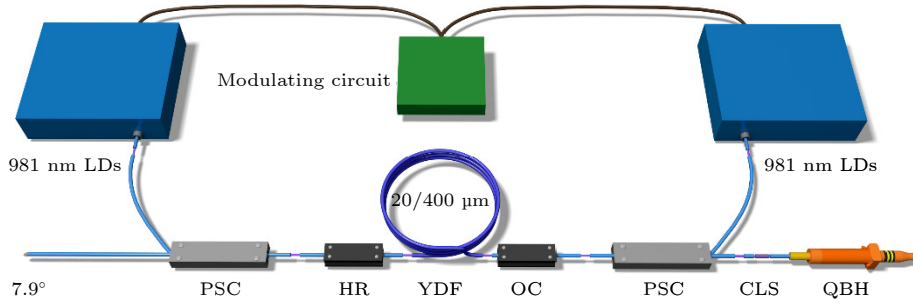


图 9 单端输出 QCW 光纤激光器实验结构

Fig. 9. Experimental structure of single-ended output QCW fiber laser.

均输出功率达到 321 W, 对应峰值功率为 3438 W, 其中 A 端峰值功率为 1218 W, B 端峰值功率为 2220 W, 两端器件输出特性的差异和熔接损耗的不同造成了 A 和 B 两端输出功率的差异. 最大输出功率时, 光谱如图 7(b) 所示, 拉曼抑制比为 31 dB, A 和 B 端输出光谱的 3 dB 带宽分别为 2.91 和 4.01 nm. 如图 7(c) 和图 7(d) 所示, A 端光束质量  $M^2 = 1.34$ , B 端光束质量  $M^2 = 1.27$ , 整个实验过程中光束质量随功率增加退化量小于 0.04.

双端输出 QCW 激光的脉冲幅值稳定, A 端和 B 端的输出时序信号如图 8 所示. 由于电路响应效应, 采用上升时间为 0  $\mu\text{s}$  的脉冲对 LD 直接调制后, 实际输出的泵浦脉冲上升时间约为 31  $\mu\text{s}$ . 这在一定程度上抑制了过冲效应的产生, 弛豫振荡尖峰的功率不超过脉冲稳态输出峰值功率的 1.9 倍.

### 3.3 双端输出 QCW 激光器对 SRS 的抑制作用

为了对比双端结构与单端结构输出特性的差异, 后续又采用单端输出 QCW 光纤激光振荡器结构进行实验, 实验结构如图 9 所示. 双端结构下的 B 端即为单端结构下的输出端, 另一端切斜角 7.9°, 消除端面反馈导致的激光不稳定; 双端结构下 A 端的 OC FBG 更换为 HR FBG, 其中心波长为 1080.06 nm, 反射率为 99.9%, 3 dB 带宽为 1.99 nm.

对比输出光谱 (图 10), 单端结构下输出功率为 1904 W 时, SRS 抑制比为 26 dB, 双端结构下 B 端输出功率为 2129 W 时, SRS 抑制比为 32 dB, 比单端结构的 SRS 抑制比高 6 dB; 而双端结构下总输出功率为 1950 W 时, 未出现 SRS. 说明双端输出 QCW 激光器具有更好的 SRS 抑制能力.

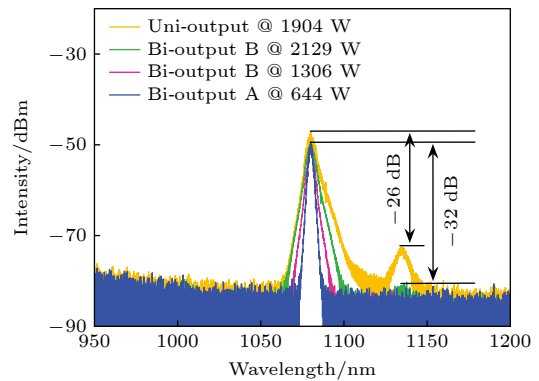


图 10 不同结构下的输出光谱

Fig. 10. Output spectra under different structures.

## 4 结 论

基于双端输出 QCW 激光振荡器结构, 首次实现了峰值功率 3 kW 的双端 QCW 激光输出, 两端峰值功率分别为 1218 和 2220 W, 对应光束质量因子  $M^2$  分别为 1.34 和 1.27. 结合双端 QCW 光纤激光振荡器的理论模型, 验证了双端结构对 SRS 的抑制作用, 同时发现了增加泵浦上升时间可以削

弱输出脉冲弛豫振荡的尖峰. 双端输出 QCW 光纤激光器由于热累积较少, 受模式不稳定限制较小, 其输出峰值功率极限有可能超过 CW 光纤激光器. 双端输出 QCW 光纤激光器的功率提升主要受限于泵浦功率和 SRS. 后续增加泵浦数量, 采用光纤包层吸收系数更大的增益光纤, 以促进泵浦吸收, 缩短光纤长度, 控制 SRS 强度, 提高激光器输出功率和转换效率, 有望在高功率光纤激光器的研究和应用中做出进一步突破.

感谢国防科技大学前沿交叉学科学院徐小勇在实验过程中的支持和帮助.

## 参考文献

- [1] Huang T, Du W Z, Su K, Zhang J C, Li J Y, Qi J F, Lei Y P, Wu Q, Xiao R S 2022 *Chin. J. Lasers* **49** 28 (in Chinese) [黄婷, 杜伟哲, 苏坤, 张建超, 李敬洋, 祁俊峰, 雷永平, 武强, 肖荣诗 2022 *中国激光* **49** 28]
- [2] Marimuthu S, Smith B 2021 *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **113** 177
- [3] Chen Z Z, Xu Y T, Guo Y D, Wang B S, Xu J, Xu J L, Gao H W, Yuan L, Yuan H T, Lin Y Y, Xiao Y S, Bo Y, Peng Q J, Lei W Q, Cui D F, Xu Z Y 2015 *Appl. Opt.* **54** 5011
- [4] Bian Q, Bo Y, Zuo J W, Yuan L, Chen H B, Peng Q J, Xu Z Y 2020 *Opt. Express* **28** 13895
- [5] Hong Z J, Wan Y C, Xi X M, Zhang H W, Wang X L, Xu X J 2022 *Appl. Opt.* **61** 1826
- [6] Wang L, Zhang H W, Wang P, Yang B L, Wang X L, Ning Y, Xu X J 2022 *Opt. Laser Technol.* **154** 108338
- [7] Wang L, Zhang H W, Wang P, Yang B L, Wang X L, Ning Y, Xu X J 2022 *IEEE Photonics J.* **14** 1
- [8] Wang L, Zhang H W, Wang P, Wang X L, Ning Y, Han K, Xu X J 2023 *Chin. J. Lasers* **50** 152 (in Chinese) [王力, 张汉伟, 王鹏, 王小林, 宁禹, 韩凯, 许晓军 2023 *中国激光* **50** 152]
- [9] Zheng J K, Bo Y, Xie S Y, Zuo J W, Wang P Y, Guo Y D, Liu B L, Peng Q J, Cui D F, Lei W Q, Xu Z Y 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 074202
- [10] IPG <https://www.ipgphotonics.com/en/229/FileAttachment/YLM-QCW+and+YLR-QCW+Single-mode+Datasheet.pdf> [2023-03-30]
- [11] IPG <https://www.ipgphotonics.com/cn/101/FileAttachment/YLM-QCW+Series+Datasheet.pdf> [2023-03-30]
- [12] IPG [https://www.ipgphotonics.com/ru/86/FileAttachment/YLS-2000\\_20000-QCW+Datasheet.pdf](https://www.ipgphotonics.com/ru/86/FileAttachment/YLS-2000_20000-QCW+Datasheet.pdf) [2023-03-30]
- [13] IPG [https://www.ipgphotonics.com/ru/126/FileAttachment/YLS-2300\\_23000-QCW+Datasheet.pdf](https://www.ipgphotonics.com/ru/126/FileAttachment/YLS-2300_23000-QCW+Datasheet.pdf) [2023-03-30]
- [14] 武汉锐科 [https://www.raycuslaser.com/upload/old\\_file/201808/5b6168071a474.pdf](https://www.raycuslaser.com/upload/old_file/201808/5b6168071a474.pdf) [2023-03-30]
- [15] 武汉锐科 <https://www.raycuslaser.com/upload/20210507/1f52nmd6in812mko.pdf> [2023-03-30]
- [16] 武汉锐科 <https://www.jyothishya.com/view/2636.html> [2023-03-30]
- [17] 创鑫激光 <http://www.maxphotonics.com/vancheerfile/files/2020/4/20200416155923674.pdf> [2023-03-30]
- [18] 创鑫激光 <http://www.maxphotonics.com/vancheerfile/files/2020/4/20200416155938936.pdf> [2023-03-30]
- [19] Zhong P L, Wang L, Yang B L, Zhang H W, Xi X M, Wang P, Wang X L 2022 *Opt. Lett.* **47** 2806
- [20] Liu J Q, Zeng L F, Wang P, Yang B L, Xi X M, Shi C, Zhang H W, Wang X L, Xi F J 2023 *IEEE Photonics J.* **15** 1500209
- [21] Wang X L, Ye Y, Xi X M, Shi C, Zhang H W, Han K, Wang Z F, Xu X J, Zhou P, Si L, Chen J B 2018 *CN Patent* 201821644646.3 (in Chinese) [王小林, 叶云, 奚小明, 史尘, 张汉伟, 韩凯, 王泽锋, 许晓军, 周朴, 司磊, 陈金宝 2018 中国专利 201821644646.3]
- [22] Wang X L, Zhang H W, Shi C, Duan L, Xi X M 2021 *Fiber Laser Modeling and Simulation Based on SeeFiberLaser* (Beijing: Science Press) pp19, 22, 40, 44 (in Chinese) [王小林, 张汉伟, 史尘, 段磊, 奚小明 2021 基于SeeFiberLaser的光纤激光建模与仿真 (北京: 科学出版社) 第19, 22, 40, 44页]
- [23] Agrawal G P (translated by Jia D F, Ge C F) 2014 *Nonlinear Fiber Optics* (5th Ed.) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp25, 205 (in Chinese) [阿戈沃著(贾东方, 葛春风译) 2014 非线性光纤光学(第五版) (北京: 电子工业出版社) 第25, 205页]
- [24] Zhu C H Y R, Xi P K Z R(translated by Song X) 2013 *Illustrative Introduction to Fiber Lasers* (Beijing: China Machine Press) p62 (in Chinese) [住村和彦日, 西浦匡则日著(宋鑫译) 2013 图解光纤激光器入门 (北京: 机械工业出版社) 第62页]
- [25] Lv X G, Liao T Q, Yi Y 2019 *J. Phys. Conf. Ser.* **1213** 42053
- [26] Gao J F, Yan M J, Liang H S, Zhan Y, Han Z G, Zhu R H, Liu M 2021 *Laser & Infrared* **51** 1013 (in Chinese) [高俊峰, 闫明鉴, 梁慧生, 詹涌, 韩志刚, 朱日宏, 刘明 2021 *激光与红外* **51** 1013]
- [27] Villate D, Blanchot N, Rouyer C 2007 *Opt. Lett.* **32** 524



# Double-ended output near-single-mode quasi-continuous wave monolithic fiber laser<sup>\*</sup>

Ding Xin-Yi<sup>1)2)</sup> Wang Li<sup>1)</sup> Zeng Ling-Fa<sup>1)</sup> Wu Han-Shuo<sup>1)3)</sup>

Wang Xiao-Lin<sup>1)3)†</sup> Ning Yu<sup>1)3)</sup> Xi Feng-Jie<sup>1)3)</sup>

1) (*College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

2) (*School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic*

*Science and Technology of China, Chengdu 611731, China*)

3) (*Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

( Received 16 April 2023; revised manuscript received 13 May 2023 )

## Abstract

Quasi-continuous fiber lasers have a broad application prospect in the industrial field. However, in the current research on quasi-continuous wave (QCW) fiber lasers only the single-ended output structure is used. A double-ended output fiber laser oscillator needs only one resonator to realize two laser outputs. Compared with single-ended output laser, it has a low cost, small volume and high work efficiency. It is expected to achieve higher power laser output through double-ended output beam combining. Therefore, the double-ended output QCW fiber laser is proposed and studied in this paper. The steady-state rate equation establishes a theoretical model of a QCW fiber laser oscillator with two ends, considering the stimulated Raman scattering (SRS) and amplified spontaneous emission (ASE). The output power, time domain and nonlinear effects of this type of laser are simulated. The results show that the overshoot effect caused by relaxation oscillation will produce a large amount of thermal deposition and ultra-high peak power in the fiber. It will reduce the nonlinear threshold and limit the increase of power of the QCW fiber laser. Prolonging the rise time of the pump can effectively suppress the relaxation oscillation and obtain a stable pulse output during the pulse duration. In addition, compared with the single-ended QCW laser, the double-ended output structure changes the energy distribution in the fiber and reduces the accumulation of nonlinear effects in the gain fiber, thus inhibiting SRS. Then, the ytterbium-doped fiber with a core/cladding diameter of 20/400  $\mu\text{m}$  is used to achieve the first double-ended QCW laser output with a peak power of 3 kW. The peak power values at both ends are 1218 and 2220 W, respectively. The values of corresponding beam quality factor  $M^2$  are 1.34 and 1.27. The optical-to-optical conversion efficiency is about 60%. The pulse width is 100  $\mu\text{s}$ , and the repetition frequency is 1 kHz. This research verifies the feasibility of high power and high beam quality output by double-ended output QCW fiber laser, which provides support for small volume, low cost, high power and high brightness QCW fiber laser. Further breakthroughs in the research and application of high-power fiber lasers are expected to be made by continually optimizing experiments, increasing pump power, and improving the laser's output power and conversion efficiency.

**Keywords:** fiber laser, quasi-continuous wave, double-ended output, near-single-mode

**PACS:** 42.55.Wd, 42.55.Xi

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230616

<sup>\*</sup> Project supported by the Fund for Distinguished Young Scholars of Hunan Province, China (Grant No. 2023JJ10057).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [chinaphotonics@163.com](mailto:chinaphotonics@163.com)

## 双端输出近单模准连续全光纤激光器

丁欣怡 王力 曾令筏 吴函烁 王小林 宁禹 习锋杰

## Double-ended output near-single-mode quasi-continuous wave monolithic fiber laser

Ding Xin-Yi Wang Li Zeng Ling-Fa Wu Han-Shuo Wang Xiao-Lin Ning Yu Xi Feng-Jie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 154205 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230616

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230616>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 增益开关线偏振单频脉冲光纤激光器

Gain switched linearly polarized single-frequency pulsed fiber laser

物理学报. 2022, 71(19): 194204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220829>

#### 基于偏振依赖多模-单模-多模光纤滤波器的波长间隔可调谐双波长掺铒光纤激光器

Continuously spacing-tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on polarization-dependent in-line multimode-single-mode-multimode fiber filter

物理学报. 2019, 68(15): 154202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190297>

#### 530 W全光纤结构连续掺铥光纤激光器

530 W all-fiber continuous-wave Tm-doped fiber laser

物理学报. 2020, 69(18): 184209 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200466>

#### 国产长锥形光纤实现400 W单频单模激光输出

400-W single-mode single-frequency laser output from homemade tapered fiber

物理学报. 2021, 70(20): 204204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210682>

#### 国产部分掺杂光纤实现3 kW全光纤激光振荡输出

Home-made confined-doped fiber with 3-kW all-fiber laser oscillating output

物理学报. 2020, 69(23): 234205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200620>

#### 基于M型掺铒光纤的近单模2 kW光纤放大器

Near-single-mode 2-kW fiber amplifier based on M-type ytterbium-doped fiber

物理学报. 2022, 71(3): 034205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211751>