

基于瑞利散射和布里渊散射的自调 Q 双包层掺镱 光纤激光器研究

黄琳,王淑梅

(烟台大学 光电信息科学技术学院 先进功能材料与光学工程研究中心,山东 烟台 264005)

摘要: 结合光纤干涉环原理和受激布里渊散射效应数值求解描述双包层掺镱光纤激光器的速率方程,得到构建光纤干涉环的耦合器耦合率及泵浦功率与输出脉冲重频的关系;进一步采用掺镱双包层光纤激光器中光子数守恒的半数值模型得到耦合器耦合率、泵浦功率与输出平均功率、脉冲能量的关系。实验测试了不同泵浦功率对输出平均功率和脉冲能量的影响,实验结果与仿真结果吻合。研究表明:提高泵浦功率只能提高脉冲重复频率和平均功率,并不能提高脉冲能量;选择合适耦合率的耦合器构建光纤干涉环才能获得较高脉冲能量;泵浦功率较高时会激发二阶斯托克斯光脉冲。

关键词: 光纤激光器; 光纤干涉环; 瑞利散射; 受激布里渊散射

中图分类号: O437.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3517-08

Investigation of self-Q-switched ytterbium-doped double-clad fiber lasers based on Rayleigh scattering and stimulated Brillouin scattering

Huang Lin, Wang Shumei

(Research Center of Advanced Functional Materials and Optical Engineering, Institute of Photoelectric Information Science and Technology, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: The rate equations of ytterbium-doped double-clad fiber lasers were solved by numerical simulation under principles of fiber interference loop and stimulated Brillouin scattering. The relationships between pulse repetition rate, pump power and couple ratio of the coupler which constructed the fiber interference loop were obtained. The relationships between average output power, pulse energy, pump power and couple ratio were also obtained by exploiting the model based on photon balance. A self-Q-switched Yb^{3+} -doped double-clad fiber laser was employed experimentally to test how the pump power affect average power, pulse energy and pulse repetition rate respectively. The results show that both average power and pulse repetition rate can be increased by increasing pump power, and the increase of pulse energy needs to choose appropriate couple ratio other than the increase of pump power. It also shows that the second-order Stokes pulse will be stimulated if the pump power is high enough.

Key words: fiber laser; fiber interference loop; Rayleigh scattering; stimulated Brillouin scattering

收稿日期:2015-04-05; 修订日期:2015-05-03

基金项目:国家自然科学基金(10974168);山东省高校科技计划(J09LA06)

作者简介:黄琳(1977-),女,副教授,博士,主要从事非线性光学放大器和激光器研究。Email:linhuang_568@aliyun.com

0 引言

光纤激光器较之普通的固体激光器或气体激光器,具有更高的泵浦效率和更好的光束质量^[1-2]。多模激光二极管泵浦的调 Q 双包层光纤激光器可以产生高功率的短脉冲,被广泛应用于 OTDR、远程传感、激光测距、激光外科和激光打标等领域。双包层光纤激光器的调 Q 技术不断取得新的进展,诸如利用声光调制器(AOM)和电光调制器(EOM)调 Q^[3-4]、基于 Michelson 干涉仪调 Q^[5]、基于调谐 Bragg 光栅反射波长调 Q^[6-8]和基于可饱和吸收体调 Q^[9-12]。减小与腔长成正比的脉冲宽度是提高脉冲峰值功率的一个有效途径。短腔长的采用可以减小脉冲宽度,但依赖于掺杂粒子数和掺杂粒子上能级寿命的可提取能也会随增益光纤的缩短而减少;高掺杂光纤作为增益介质可以减小脉冲宽度同时保证可提取能不减少,但是过高的掺杂浓度会出现浓度猝灭等问题。采用大模场光纤增加光纤中的可提取能是提高脉冲峰值功率的另一个途径^[13-14],但将泵浦光耦合进光纤需要采用透镜,由此带来较大的插入损耗。自调 Q 技术是利用光纤中的某些非线性效应周期性改变谐振腔 Q 值从而获得激光脉冲输出的被动调 Q 技术,在一定程度上克服了主动调 Q 技术带来的弊端,从而成为研究热点^[15]。光纤中的受激布里渊散射(SBS)与光纤干涉环中受激瑞利散射(RS)共同作用可以实现自调 Q,由瑞利散射提供的反馈激发布里渊效应从而产生的频率下移的斯托克斯脉冲对激光腔提供瞬时强反馈,从而在数量级上提高激光腔内 Q 值,输出脉冲激光。国内外均有报道利用这种原理实验获得峰值功率达到 kW 量级,脉宽小于 10 ns 的激光脉冲^[16-17],但是均未从理论上给予分析。

文中对带有光纤干涉环的自调 Q 掺 Yb³⁺双包层光纤激光器(YDDCL)进行了理论和实验研究。结合 SBS 产生原理和干涉环滤波原理对 YDDCL 速率方程数值求解,分析了泵浦功率和构建光纤干涉环的耦合器的耦合率对输出激光脉冲重频的影响,并由 YDDCL 中光子数守恒的半数值模型分析了泵浦功率及耦合器的耦合率对输出脉冲平均功率和脉冲能量的影响。通过实验测试不同泵浦功率下脉冲平均功率和重频,验证了理论模型的正确性。

1 理论与仿真

1.1 干涉环原理

采用 2×2 耦合器构建的干涉环结构如图 1 所示^[18]。

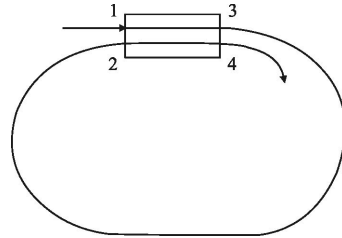


图 1 光纤干涉环结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of fiber interference loop

由端口 1 进入的光通过两种不同方式耦合到端口 4 进行双光束干涉,一种方式为从端口 3 经端口 2 耦合到到端口 4,另一种方式为通过消逝场耦合到端口 4。满足干涉环谐振频率的光波在端口 3 干涉相长,在端口 4 干涉相消;偏离谐振频率的光波在端口 3 干涉相消,在端口 4 干涉相长。

干涉环谐振频率 ν 为:

$$\nu = q \frac{c}{nR} \quad q \text{ 为整数} \quad (1)$$

自由光谱范围(FSR)为:

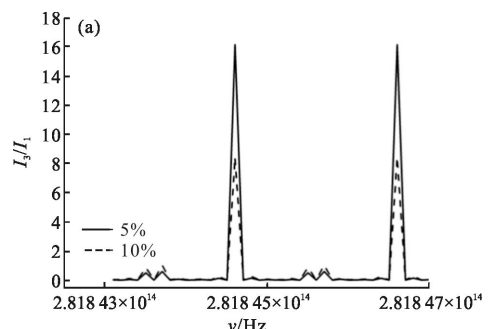
$$FSR = c/nR \quad (2)$$

干涉环起带阻滤波器的作用,耦合率 κ 和环长 L_R 有公式(3)中关系:

$$\kappa = (1 - \gamma)e^{-2\alpha L_R} \quad (3)$$

式中: γ 为 2×2 耦合器的耦合损耗; α 为干涉环光纤中信号光的损耗; n_R 为干涉环光纤折射率。

在 κ 与 L_R 满足关系式(3)的条件下,分别设定 5%和 10%的耦合损耗和 3 m 环长,对干涉环滤波特性进行仿真。光频与输出端口 3、4 分别与输入端口 1 的光强比关系如图 2 所示。



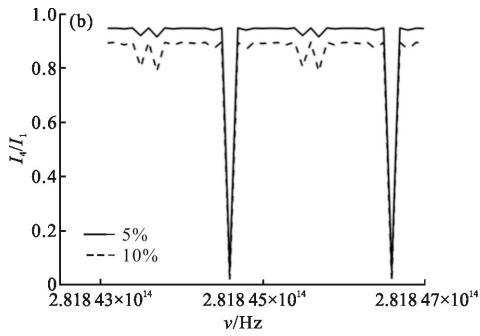


图 2 α 为 0.001/m, L_R 为 3m, γ 为 5% 和 10% 时, 干涉环输出端口 3 与输入端口 1 的光强比(a), 输出端口 4 与输入端口 1 的光强比 (b)

Fig.2 Intensity ratios of light from port 3 and port 1 (a), or from port 4 and port 1 (b), at $\alpha=0.001/m$, $\gamma=5\%$ and 10% respectively, $L_R=3m$

由图 2 可知, 采用耦合损耗越小的耦合器构建的干涉环的滤波特性越好。由于干涉环 FSR 的表达式(2)可知, 在 L_R 和 κ 满足关系式(1)的情况下, L_R 越小, FSR 越大, 滤出的波长数越少。

1.2 基于 SBS 的自调 Q YDDCL 原理与仿真

1.2.1 理论模型

自调 Q YDDCL 结构如图 3 所示。

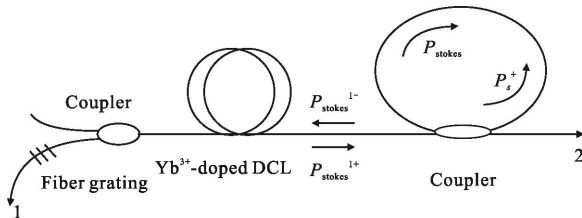


图 3 自调 Q YDDCL 结构图

Fig.3 Schematic diagram of Yb^{3+} -doped self-Q-switched fiber laser

调 Q 分两个阶段:(1) 激光谐振腔由于干涉环中瑞利反射和光纤光栅(FBG)提供反馈。由于瑞利反射率很小, 腔内损耗很大, 故腔内 Q 值极低, 不能形成激光振荡, 只在连续泵浦下不断积累上能级粒子数。YDDCF 中同时满足干涉环谐振频率和激光谐振腔振荡频率的 ASE 光不断往返增强, 每一次到达干涉环端口 3 都得到 $\frac{1-\gamma}{1-\kappa}$ 倍加强;(2) 当 ASE 光功率 $P_s^+(L, T)$ 达到了干涉环中激发 SBS 效应的阈值功率 P_{SBS} , 频率下移 16.7 GHz 的一阶背向斯托克斯光被

激发;斯托克斯光经过一次放大到达 FBG, 一部分被透射并从端口 1 以脉冲形式输出, 另一部分被反射再次到达干涉环, 由于偏离了干涉环的谐振频率, 以脉冲形式从干涉环的端口 4, 即端口 2 输出。整个调 Q 过程耗尽集聚的上能级粒子。若上能级粒子数足够多, 一阶斯托克斯光获得的单程增益足够大, 则频率再次下移 16.7 GHz 的二阶斯托克斯光可能被激发。

信号光从干涉环得到的瑞利反射率 R_2 为:

$$R_2 = \Lambda L_R (1 - \kappa)^2 / (1 - \sqrt{\kappa})^4 \quad (4)$$

式中: Λ 为瑞利反射系数。

1.2.2 数值仿真

YDDCF 中纵模频率间隔 $\Delta\nu$ 与干涉环 FSR 需满足:

$$\Delta\nu = c/2nL = mc/n_R L_R \neq 16.7 \times 10^9 \quad m=1, 2, \dots \quad (5)$$

式中: n 为增益光纤折射率; L 为增益光纤长度。

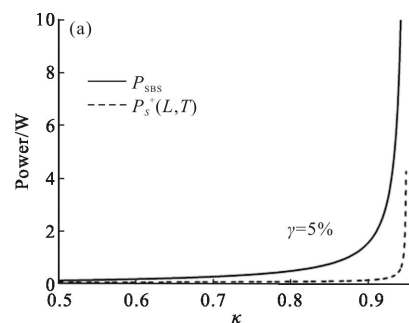
干涉环中 SBS 效应的阈值激发功率 P_{SBS} 为:

$$P_{SBS} = 21 A_{SMF} / g_B L_R^{eff} \quad (6a)$$

$$L_{eff}^R = [1 - \exp(-\alpha L)] / \alpha \quad (6b)$$

式中: A_{SMF} 为干涉环纤芯面积; g_B 为布里渊峰值增益, 其中 L_R 与干涉环耦合率 κ 满足关系式(3)。

光纤光栅和干涉环对增益光纤中的振荡模式进行了两次选频。设定 YDDCF 的折射率 n 为 1.45, 干涉环光纤折射率 n_R 为 1.5。图 4(a)、(b) 给出设定干涉环耦合损耗 γ 分别为 5% 和 10% 时, 干涉环内激发 SBS 效应所需的阈值功率 P_{SBS} 以及干涉环耦合率与达到 P_{SBS} 所需的 $P_s^+(L, T)$ 的关系。图 5 给出干涉环耦合比与干涉环提供的瑞利散射反射率的关系。由图 5 看出: 耦合器耦合损耗 γ 为 5% 时, 干涉环提供的瑞利散射反射率 R_2 在 $\kappa=0.902$ 时达到极大值随后逐渐减小; γ 为 10% 时, R_2 在 $\kappa=0.81$ 时达到极大值随后逐渐减小。



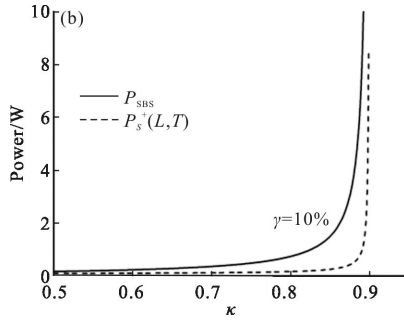


图 4 耦合损耗为 5%(a)、10%(b)时,干涉环耦合率与干涉环内激发 SBS 效应的阈值功率 P_{SBS} 及达到 P_{SBS} 所需的 $P_s^+(L, T)$ 的关系

Fig.4 Relationship of interference ring coupling ratio and $P_s^+(L, T)$ which is threshold power of SBS stimulating, at $\gamma=5\%$ (a) and 10% (b)

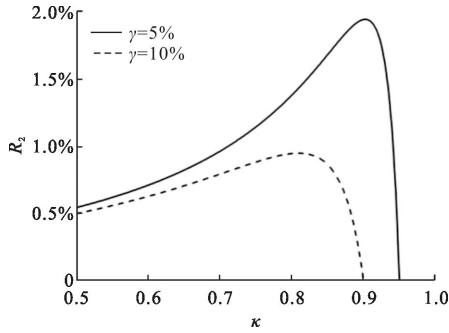


图 5 干涉环耦合比与环中瑞利反射率的关系,耦合损耗分别为 5% 和 10%

Fig.5 Relationship of interference ring coupling ratio and Rayleigh reflectance, at $\gamma=5\%$ and 10%

在恒定泵浦速率下, YDDCL 的速率方程为^[19]:

$$\frac{N_2(z, t)}{N} = \frac{\frac{P_p(z, t)\sigma_{\text{ap}}\Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{\Gamma_s\sigma_{\text{as}}[P_s^+(z, t) + P_s^-(z, t)]}{h\nu_s A}}{\frac{P_p(z, t)\sigma_{\text{ap}}\Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{1}{\tau} + \frac{\Gamma_s(\sigma_{\text{as}} + \sigma_{\text{es}}) + [P_s^+(z, t) + P_s^-(z, t)]}{h\nu_s A}} \quad (7a)$$

$$\frac{dP_p(z, t)}{dz} = \Gamma_p[\sigma_{\text{ep}}N_2(z, t) - \sigma_{\text{ap}}N_1]P_p(z, t) - \alpha_p P_p(z, t) \quad (7b)$$

$$\pm \frac{\partial P_s^\pm(z, t)}{\partial z} + \frac{1}{v_s} \frac{\partial P_s^\pm(z, t)}{\partial t} = \Gamma_s[\sigma_{\text{es}}N_2(z, t) - \sigma_{\text{as}}N_1]P_s^\pm(z, t) - \alpha_s P_s^\pm(z, t) + 2\Gamma_s\sigma_{\text{es}}N_2(z, t)h\nu_s\Delta\nu_s \quad (7c)$$

线型腔边界条件为:

$$P_s^+(0, t) = R_1 P_s^-(0, t), P_s^-(L, t) = R_2 P_s^+(L, t), P_p(0, t) = \eta_p P_{p0} \quad (8a)$$

设定 YDDFC 中粒子沿光纤轴向均匀分布, 则初始条件为:

$$P_s^+(z, 0) \text{ 为高斯随机噪声}, P_p(z, 0) = 0 (z \neq 0), N_2(z, 0) = N \quad (8b)$$

式中: $P_p(z, t)$ 为泵浦功率; $P_s^\pm(z, t)$ 为信号光功率(+、- 分别代表前向和后向); N 为光纤掺杂浓度; N_1 和 N_2 分别为激光下能级和上能级的粒子数密度; σ_a 和 σ_e 分别为吸收和发射截面; v_p 和 v_s 分别为泵浦光和信号光的群速度; α_p 和 α_s 分别为光纤中泵浦光和信号光的衰减系数; Γ_p 和 Γ_s 分别为泵浦光和信号光与光纤掺杂面积的重叠因子; A 为光纤的掺杂面积; α_{RS} 为瑞利散射系数; S 为纤芯的捕获因子; $\Delta\nu_s$ 为增益带宽; h 为普朗克常数; c 为真空中光速; P_{p0} 为泵浦功率; η_p 为泵浦合束器的耦合效率; R_1 为 FBG 对信号光的反射率; R_2 为干涉环对信号光提供的瑞利散射反射率。

采用分步有限差分法在边界条件(8a)和初始条件(8b)下对速率方程组(7)数值求解, 计算采用步长 Δz 为 0.5 m, Δt 为 5 μs , 参数如表 1 所示。

表 1 计算采用的参数值

Tab.1 Parameters in numerical calculation

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
σ_{ap}	$2.8 \times 10^{-24} \text{ m}^2$	α_s	0.003/m	R_1	0.95
σ_{ep}	$2.5 \times 10^{-24} \text{ m}^2$	α	0.001/m	N	$7.6 \times 10^{21} / \text{m}^3$
σ_{as}	$1.5 \times 10^{-27} \text{ m}^2$	Γ_s	0.8	η_p	0.8
σ_{es}	$2.5 \times 10^{-25} \text{ m}^2$	Γ_p	0.003	γ	0.05
λ_p	975 nm	A_{SMF}	$5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$	h	$6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
λ_s	1 064 nm	A	$2.8 \times 10^{-11} \text{ m}^2$	L	40 m
τ	1.3 ms	Λ	$6 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$	-	-
$S\alpha_{\text{RS}}$	$1.2 \times 10^{-7} / \text{m}$	g_B	$2.5 \times 10^{-11} \text{ m/W}$	-	-

由于脉冲宽度为纳秒量级, 远小于脉冲间距(μs 量级), 因此计算中以脉冲间距近似作为脉冲周期。计算从 $P_s^+(0, 0) = 0$ 开始, 到 $P_s^+(z, t)$ 达到激发干涉环内 SBS 效应所需的 $P_s^+(L, T)$ 停止, 因此 $1/T$ 即为脉冲重复频率。图 6 为设定 P_{p0} 为 4 W 及 κ 为 0.92, 采用表 1 参数, 数值计算得到的 $P_s^+(z, t)$ 在 YDDFC 中随位置和时间变化。图 7 为设定 P_{p0} 分别为 2 W, 3 W,

4 W 时,脉冲重频与 κ 的关系。由于脉冲宽度依赖于声子与激光介质的相互作用时间而不是谐振腔寿命,故无法由速率方程(7)得到脉冲宽度的数值结果。

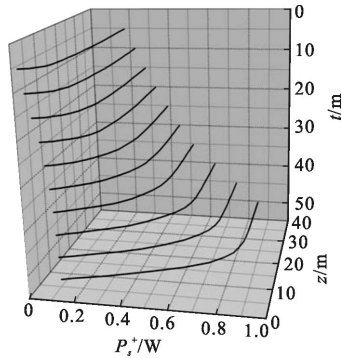


图 6 YDDCF 中正向信号光功率与位置和时间

Fig.6 Positive signal light power in YDDCF with the changes of location and time

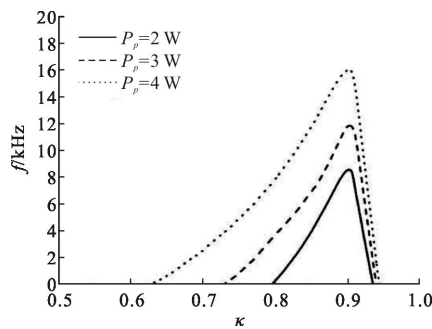


图 7 脉冲重复频率与干涉环耦合率的关系,泵浦功率分别为 2 W, 3 W, 4 W

Fig.7 Relationship of interference ring coupling ratio and pulse repetition frequency of output laser at 2 W, 3 W, 4 W pumping power

由 Patrick Even 提出的 YDDCL 光子数守恒的半数值模型^[20],输出功率 P_{out} 可表达为:

$$P_{out} = \left[P_p(1 - e^{-g_p}) - \frac{NAxLh\nu_p}{\tau} \right] \frac{v_{SBS}}{(1+R)v_p} \quad (9a)$$

$$g_p = [(x-1)\sigma_{ap} + x\sigma_{ep}] \Gamma_p NL \quad (9b)$$

$$x = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{N_2(z, T)}{N} dz \quad (9c)$$

$$R = \left(\frac{1 - R_{1SBS}}{1 - R_{2SBS}} \right) \sqrt{\frac{R_{2SBS}}{R_{1SBS}}} \quad (9d)$$

式中: $\frac{NAxLh\nu_p}{\tau}$ 为自发辐射损失的光功率; R_{1SBS} 和 R_{2SBS} 分别为 FBG 及干涉环对频率下移的斯托克斯光的反射率。

设 R_{1SBS} 为 0.5, R_{2SBS} 为 0.02, 公式(9)结合公式(8)得到 P_{out} 与 κ 的关系, P_{out} 除以 f 近似得到两个端口输出脉冲能量总和 E 。

图 8 和图 9 分别泵浦功率 P_{p0} 为 2 W、3 W、4 W 时 κ 与 P_{out} 和 E 的关系。

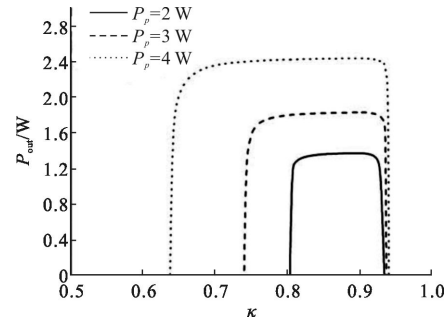


图 8 泵浦功率分别为 2 W、3 W、4 W 时干涉环耦合率与输出功率的关系

Fig.8 Relationship of interference ring coupling ratio and power of output laser at 2 W, 3 W, 4 W pumping power

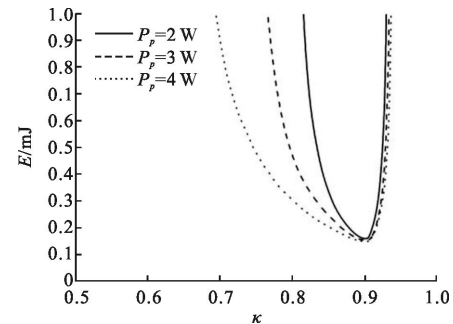


图 9 泵浦功率分别为 2 W、3 W、4 W 时干涉环耦合率与脉冲能量的关系

Fig.9 Relationship of interference ring coupling ratio and pulse energy of output laser at 2 W, 3 W, 4 W pumping power

1.2.3 仿真结果分析

由仿真结果可以看出: 构建干涉环的 2×2 耦合器的耦合损耗一定时, 耦合器耦合率与干涉环提供的瑞利反射率不是单调关系, 存在一个拐点, 耦合损耗越大, 拐点对应的耦合率越小; 脉冲重频由正向信号光功率从零增加到激发干涉环内 SBS 效应的阈值功率所需的时间决定, 因此在泵浦功率一定时, 干涉环提供的瑞利反射率越大, 所需时间越少, 脉冲重频越大; 由于干涉环提供的瑞利反射率与干涉环耦合率密切相关, 因此脉冲重频在干涉环耦合率等于拐点数值时达到极值, 随后逐渐减小; 干涉环耦合率一定时, 泵浦功率越大, 正向信号光功率从零增加到激

发干涉环内 SBS 效应的阈值功率所需的时间越少, 脉冲重频越大; 泵浦功率一定时, 由于干涉环对谐振腔提供的瑞利反射率与耦合器耦合率直接相关, 若瑞利反射率过小, 不能激发斯托克斯光来瞬间提高谐振腔 Q 值, 从而无法获得脉冲激光输出, 瑞利反射率过大, 谐振腔 Q 值开始就不低, 上能级粒子数无法得到积累, 即使激发了斯托克斯光提高了 Q 值, 依然无法获得脉冲激光输出, 因此耦合器的耦合率在一定范围内才有激光脉冲输出, 泵浦功率提高, 达到激发斯托克斯光阈值光功率所需的瑞利反射率降低, 因此耦合器耦合率的范围扩大; 泵浦功率一定时, 随着干涉环提供的瑞利反射率增大, 上能级粒子数积累的时间缩短, 数目减少, 因此自发辐射损失的光功率减小, 输出光功率增加, 反之, 则减少; 干涉环耦合率满足输出光脉冲的条件下, 耦合率等于拐点值时输出光功率达到极大值; 干涉环耦合率一定时, 输出功率和脉冲重频均随泵浦功率增加而增加, 故脉冲能量不一定增加; 数值计算结果表明: 泵浦功率增大, 脉冲能量反而减小; 泵浦功率一定, 脉冲能量随干涉环耦合率增加而减小, 当耦合率等于拐点值时脉冲能量达到极小值。

2 实验结果

采用图3所示的 YDDCL 进行实验。实验中: 波长 975 nm、最大输出功率 6.5 W 的多模激光二极管作为泵浦源, 由 6+1×1 的泵浦合束器将泵浦光耦合进 YDDCF; YDDCF 长度为 7.5 m, 对 975 nm 光的吸收率为 2.6 dB, 数值孔径 0.15, 在 1060 nm 的模场直径(MFD)为 6 μm, 内包层数值孔径为 0.46; 构成干涉环的 2×2 耦合器耦合损耗为 5.8%, 耦合比为 89.67%; 对谐振腔提供高反馈的 FBG 中心反射波长 1064.21 nm、反射率 13.07 dB (95%), 3 dB 带宽 0.142 nm (38 GHz); 图 10 为采用光功率计(ANDO AQ2140)得到的不同泵浦功率下两个端口输出脉冲平均功率总和和重复频率与泵浦功率的关系, 自行设计的探测器对输出脉冲有 20 倍展宽作用以降低峰值功率, 从而避免脉冲峰值功率过高对仪器的损害。图 11 为采用光谱仪(ANDO6319)观察得到的泵浦功率为 1.45 W 时端口 1 和端口 2 输出脉冲激光的激光光谱图, 图 12 为采用数字示波器(Tektronix TDS3052)观察得到的相应的波形图。

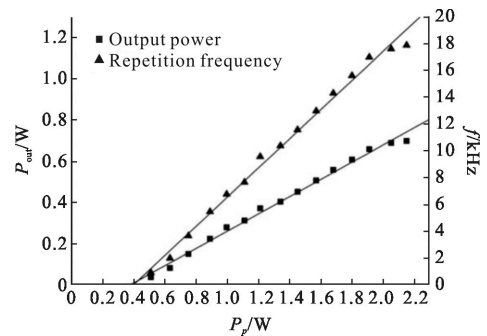


图 10 脉冲重频和脉冲平均功率与泵浦功率的关系

Fig.10 Relationship of pumping power and repetition frequency of output laser or average power of that

由图 10 可以看出, 泵浦功率增大, 脉冲功率和重复频率都增大, 但重复频率增大的速度比功率增大的速度快, 因此脉冲能量随泵浦增大反而减小, 但变化不大; 从理论上分析, 干涉环选用的耦合器耦合损耗为 5.8%, 耦合率 89.67%, 接近该耦合损耗对应的耦合率拐点值 89.3%, 因此随着泵浦功率增大脉冲能量变化不大。

从图 11(a) 和 12 可以看出, 泵浦功率为 1.45 W 时, 波长比 FBG 中心反射波长红移 0.12 nm 的二阶 Stokes 脉冲被激发, 由端口 1 输出。

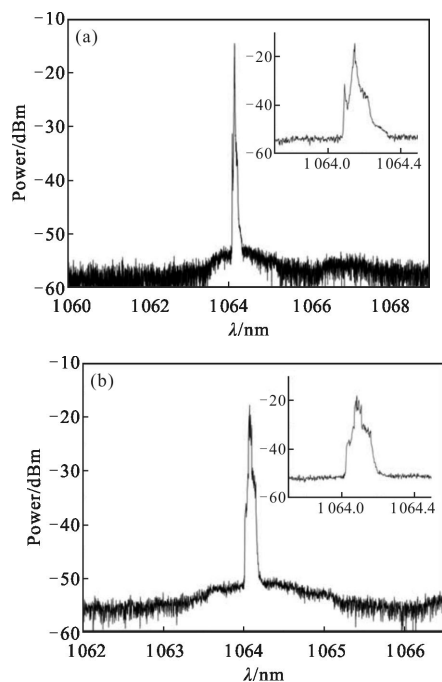


图 11 泵浦功率 1.45 W 时激光器端口 1(a) 和端口 2(b) 的激光光谱图

Fig.11 Wave profile of output laser at output port 1 (a) and port 2 (b), at 1.45 W pumping power

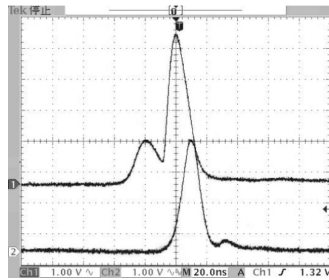


图 12 泵浦功率 1.45 W 时激光器端口 1(上)和端口 2(下)的脉冲激光波形图

Fig.12 Spectrum of output pulse laser at port 1 (up) and port 2 (down) at 1.45 W pumping power

实验结果与仿真结果吻合,表明建立的理论模型正确。

3 结论

通过对基于 SBS 的自调 QYDDCL 进行理论和实验研究,结合 SBS 产生原理对 YDDCL 速率方程数值求解得到了干涉环耦合率和泵浦功率与输出脉冲重频、平均功率、脉冲能量的关系。结果表明:(1)耦合器耦合损耗一定时,存在一个瑞利反射率拐点,且耦合损耗越大,拐点对应的耦合率数值越小;(2)泵浦功率一定时,干涉环耦合率在一定范围内取值才有脉冲激光输出,泵浦功率越大该范围越大。为了在泵浦功率较低时得到光脉冲输出,应选择耦合率接近瑞利反射率变化拐点对应的耦合率值的耦合器构建干涉环;(3)干涉环耦合器的耦合率一定时,脉冲重频和平均功率随泵浦功率的增大而增大;(4)脉冲能量随泵浦功率增大而减小,提高脉冲能量可以通过选择耦合率大于拐点的耦合器构建干涉环来实现。(5)泵浦功率一定时,若干涉环耦合率小于拐点的值,耦合率增大,脉冲重频和平均功率均增大而脉冲能量减小,反之,耦合率增大,脉冲重频和平均功率均减小而脉冲能量增大。(6)泵浦功率较高时会激发二阶斯托克斯光脉冲。

因此,虽然增大泵浦功率可以提高输出脉冲激光的重频和平均功率,但并不能提高脉冲能量。选择耦合率接近瑞利反射率变化拐点对应的耦合率值的耦合器构建光纤干涉环,可以在较低泵浦功率下得到较高脉冲能量。

参考文献:

- [1] Pask H M, Carman R J, Hanna D C, et al. Ytterbium-doped silica fiber lasers: versatile sources for the 1–1.2 m region [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 1995, 1(1): 2–13.
- [2] Zenteno L A. High-power double-clad fiber lasers [J]. *J Lightwave Technol*, 1993, 11(9): 1435–1446.
- [3] Lee G P, Taverner D, Richardson D J, et al. Q-switched erbium doped fiber laser utilising a novel large mode area fiber[J]. *Electron Lett*, 1997 33(5): 393–394.
- [4] Huang Dingwei, Liu Wenfung, Yang C C. Q-switched all-fiber laser with an acoustically modulated fiber attenuator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(9): 1153–1155.
- [5] Feng Dejun, Kai Guiyun, Liu Zhiguo, et al. Study of all-fiber reflected mach-zehnder interferometric multi-wavelength filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22 (3): 332–335. (in Chinese)
- [6] Russo N A, Duchowicz R, Mora J, et al. High-efficiency Q-switched erbium fiber laser using a Bragg grating-based modulator[J]. *Opt Comm*, 2002, 210(6): 361–366.
- [7] Sheu Fangwen, Kang Jungjui. All-fiber actively Q-switched fiber laser tuned by a pair of temperature controlled fiber Bragg grating[J]. *Opt Commun*, 2007, 278: 132–137.
- [8] Zalvidea D, Russo N A, Díez A, et al. High-repetition rate acoustic-induced Q-switched all-fiber laser [J]. *Opt Commun*, 2005, 244: 315–319.
- [9] Yanming Huo, Peter K Cheo. Modeling of passively Q-switched $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped clad-pumped fiber lasers [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2005, 11(3): 658–666.
- [10] Wu D D, Luo Z Q, Xiong F F, et al. Passive synchronization of 1.06– and 1.53- μm fiber lasers Q-switched by a common graphene SA [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(14): 1474–1477.
- [11] Wu D D, Xiong F F, Zhang C K, et al. Large-energy, wavelength-tunable, all-fiber passively Q-switched Er:Yb-codoped double-clad fiber laser with mono-layer chemical vapor deposition graphene[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(19): 4089–4093.
- [12] Luo Z Q, Liu C, Huang Y Z, et al. Topological-insulator passively Q-switched double-clad fiber laser at 2 μm wavelength [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2014, 20(5): 1–8.
- [13] Offerhaus H L, Alvarez-Chavez J A, Nilsson J, et al. Multi-mJ, multi-Watt Q-switched fiber laser [J]. *Opt Lett*, 2000, 25(1): 37–39.

- [14] Renaud C C, Alvarez-Chavez J A, Sahu J K, et al. 7.7 mJ pulses from a large core Yb-doped cladding pumped Q-switched fiber laser [C]//Conference Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO)-Technical Digest, 2001: 219.
- [15] Wu D D, Luo Z Q, Cai Z P, et al. An all fiber self-Q-switched Er-Yb co-doped double-cladding fiber ring laser [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2014, 25 (3): 460-464.
- [16] Chen Z J, Grudinin A B, Porya J, et al. Enhanced Q-switched in double-clad fiber lasers [J]. *Opt Lett*, 1998, 23 (6): 454-456.
- [17] Fan Y X, Lu F Y, Hu S L, et al. 105-kW peak-power double-clad fiber laser[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, 15(5): 652-654.
- [18] Gautam Das, John W Y Lit, Wavelength switching of a fiber laser with a sagnac loop reflector [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(1): 60-62.
- [19] Yong Wang, Alejandro Martinez-Rios, Hong Po. Analysis of a Q-switched ytterbium-doped double-clad fiber laser with simultaneous mode locking [J]. *Opt Commun*, 2003, 224: 113-123.
- [20] Swiderski J, Zajac A, Konieczny P, et al. Numerical model of a Q-switched double-clad fiber laser [J]. *Optics Express*, 2004, 12(15): 26.