

多波长超短脉冲主动锁模光纤激光器

张劲松 李唐军 齐赞伟 简水生

(北方交通大学光波技术研究所 北京 100044)

提要 利用色散补偿光纤增加腔内色散,在主动锁模光纤环形激光器实验中得到了重复频率 10 GHz, 8 个波长(19 个波长)的输出脉冲。

关键词 光纤激光器, 主动锁模, 色散补偿光纤

1 引 言

能同时产生多个波长、超短脉冲输出的单一光源在波分复用(WDM)通信系统等领域中有着重要的应用。目前多波长光纤激光器主要有两类:(1)在谐振腔端面利用光纤光栅等作反射镜来提供光反馈并选择激射波长。J. M. Battiato 等采用一段 Er-Nd 共掺光纤作增益介质,两对光栅作反射镜,810 nm 与 980 nm 双抽运方式,实现了 1069 nm(Nd), 1550 nm(Er) 双波长激光输出^[1]。S. K. Liaw 等采用 σ 形腔结构,得到线宽 3 kHz, 信噪比 63 dB, 等功率的双波长激光输出^[2]。O. Graydon 等使用 8 m 长双芯掺铒光纤(EDF),通过宏观上(mm 量级)的空间烧孔效应实现了稳定的 3 个波长同时振荡^[3]。(2)在谐振腔内放置各种滤波器,利用其多波长滤波特性来选择激射波长。J. Chow 等用一透射型宽带光栅 F-P 标准具作为梳状滤波器,将掺铒光纤放入液氮中,得到了 1535 nm 波段 11 个(间隔 0.65 nm, 线宽 0.1 nm)波长的激光输出^[4]。还有在腔内放置光栅波导路由器(WGR)及波分复用器(WDM),利用保偏光纤中双折射导致的 Lyot 滤波特性^[5]等的研究报道。

最近, S. Li 等报道了利用色散补偿光纤(DCF)增加腔内色散,在主动锁模光纤环形激光器实验中实现了 3 波长的激光输出,并通过调节调制频率,实现了单波长、双波长的连续调谐,调谐范围分别达 37 nm, 17 nm^[6]。我们采用这种新方法,实现了 8 波长(0.7km DCF), 19 波长(2km DCF), 重复频率 10 GHz 的光脉冲输出。

2 实验设置、结果及讨论

实验装置如图 1 所示。环形谐振腔由 WDM, EDF, DCF, 调制器, 偏振控制器(PC), 耦合器, 光隔离器(OI)等组成。980 nm 抽运光通过 980 nm/1550 nm 波分复用器有效地耦合到 15 m 长铒光纤中。实验所用抽运源为 NORTEL LC91E-20 型激光二极管。所用铒光纤为国产武邮 Er-Al-P 共掺光纤,小信号增益大于 30 dB, 功率波长带宽大于 35 nm, 数值孔径 0.22 ±

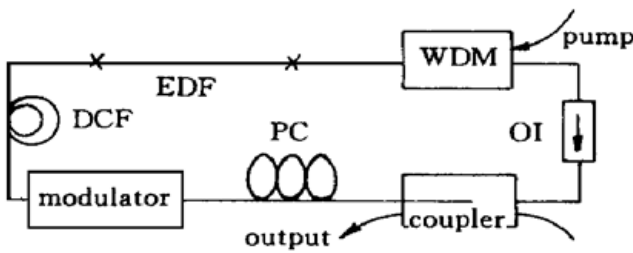


图 1 主动锁模光纤激光器实验装置图
Fig. 1 Experimental configuration of actively mode-locked fiber laser

0.02。所用调制器为 UTP LiNbO₃ 光幅度调制器,其输入端是保偏(PM)光纤,输出端是普通单模(SM)光纤,所以在调制器的输入端还插入了一实验室自制的偏振控制器。在环形腔中插入 OI 保证了激光在腔中的单向传输以使有较好的抽运转换效率,并避免输出端的端面反射等对谐振腔的影响。利用 HP83711B 型频率合成器提供 10 GHz, 10 dBm 正弦信号,经过放大后作为幅度调制器的射频(RF)输入,仔细调节直流偏置使调制器在线性区域工作。光脉冲经过一实验室自制的 50·50 耦合器输出送到 ANDO AQ6317 光谱仪(OSA,最高分辨率 0.01 nm)或 Tektronix CSA803A 型通信信号分析仪(CSA)进行观察。

所用 DCF 长度为 0.7 km 时,铒光纤处于室温下,观察到的光谱如图 2(a)所示。由于铒光纤的均匀展宽特性,各波长之间的竞争比较严重,即使仔细调节 PC,也只能观察到 4 个幅度比较一致的波长。为了得到更多波长,将铒光纤浸入液氮中(温度 77 K)以减小掺铒光纤的均匀展宽线宽,观察到如图 2(b)所示的 8 个波长稳定激光输出,波长间隔约为 1.38 nm,实验时最多观察到了 10 个波长的激光输出。

所用 DCF 长度为 0.7 km 时,铒光纤处于室温下,观察到的光谱如图 2(a)所示。由于铒光纤的均匀展宽特性,各波长之间的竞争比较严重,即使仔细调节 PC,也只能观察到 4 个幅度比较一致的波长。为了得到更多波长,将铒光纤浸入液氮中(温度 77 K)以减小掺铒光纤的均匀展宽线宽,观察到如图 2(b)所示的 8 个波长稳定激光输出,波长间隔约为 1.38 nm,实验时最多观察到了 10 个波长的激光输出。

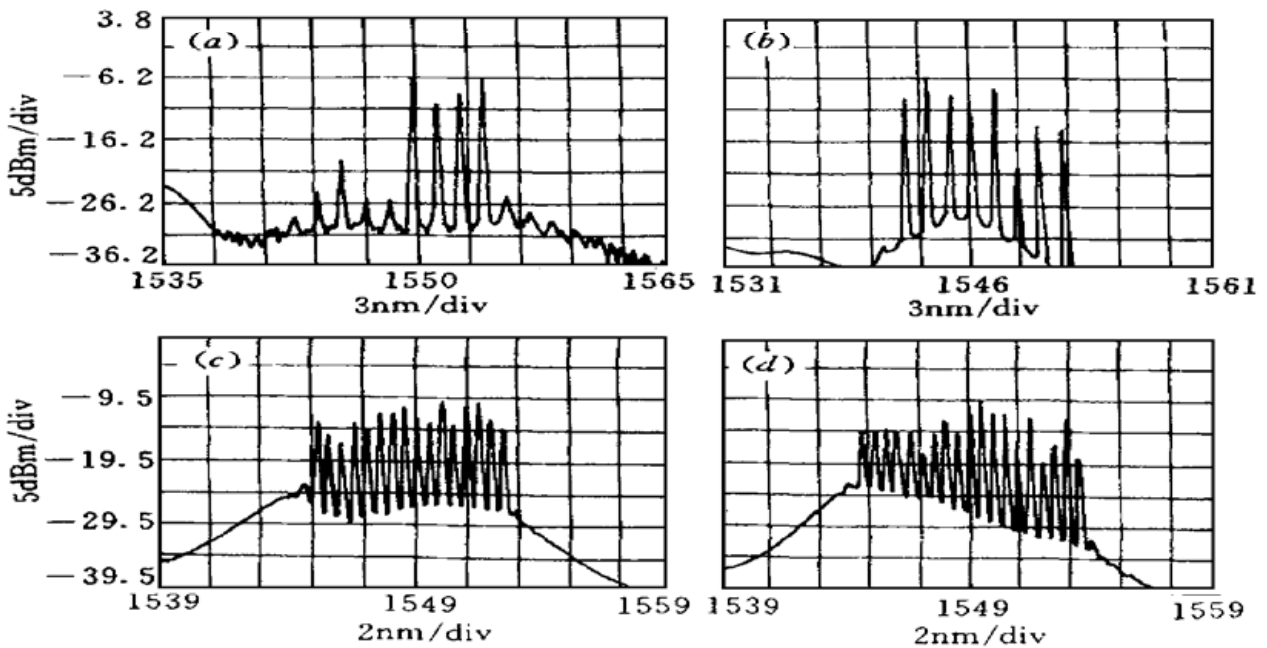


图 2 输出激光光谱

Fig. 2 Optical spectrum of the output laser

换用 2 km 长的 DCF,铒光纤处于 77 K 温度下,观察到如图 2(c)所示的 16 个波长稳定激光输出,实验时最多观察到了如图 2(d)所示的 19 个波长激光输出,波长间隔约为 0.49 nm。

铒光纤处于 77 K 温度下,DCF 长度为 0.7 km 时,8 个波长输出脉冲的波形如图 3 所示,重复频率 10 GHz,脉冲宽度 58.29 ps。

该实验的机理可解释如下。因为色散光纤引入了较大的腔内色散,导致在同一调制频率下,可以实现不同次数的谐波锁模

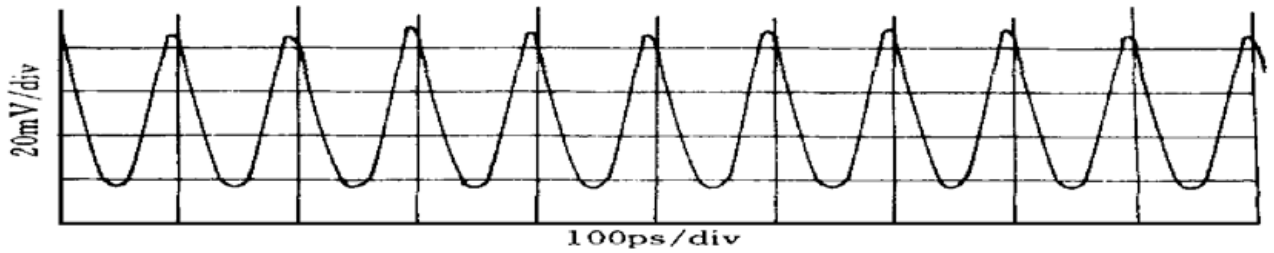


图3 与图2(b) 相对应的输出脉冲波形

Fig. 3 Waveform of the output pulses corresponding to Fig. 2 (b)

$$f_{\text{RF}} = \frac{mc}{n(\lambda)L + n_d(\lambda)L_d} \quad (1)$$

这里, f_{RF} 为射频驱动频率, L 为除 DCF 外的腔长, 包括普通单模光纤及铒光纤, L_d 为 DCF 的长度, n 为普通单模光纤及铒光纤的折射率, n_d 为 DCF 的折射率, m 为谐波锁模次数, c 为真空中光速。

由式(1) 可以得到不同波长所对应的谐波锁模次数差

$$\Delta m = f_{\text{RF}}(DL + D_d L_d)(\lambda_s - \lambda_l) \quad (2)$$

这里, Δm 为长波长 λ_l , 短波长 λ_s 所对应的谐波锁模次数差, DCF 的色散参量 $D_d = -100 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ ($1.5 \mu\text{m}$ 处), 普通单模光纤及铒光纤的色散参量 $D = 17 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ ($1.5 \mu\text{m}$ 处)。

例如 77 K 温度下, $\lambda_l = 1551.90 \text{ nm}$, $\lambda_s = 1542.26 \text{ nm}$, $f_{\text{RF}} = 10 \text{ GHz}$, $L_d = 0.7 \text{ km}$, $L \cong 25 \text{ m}$ (与图 2 (b) 对应的实验数据), 由式(2) 可算出 $\Delta m = 6.71$, 近似等于 7, 与实验结果 8 个波长激光输出基本吻合(输出激光波长数为 $\Delta m + 1$)。77 K 温度下, $\lambda_l = 1553.50 \text{ nm}$, $\lambda_s = 1544.66 \text{ nm}$, $f_{\text{RF}} = 10 \text{ GHz}$, $L_d = 2 \text{ km}$, $L \cong 25 \text{ m}$ (与图 2 (d) 对应的实验数据), 由式(2) 可算出 $\Delta m = 17.64$, 近似等于 18, 与实验结果 19 个波长激光输出基本吻合。

3 结 论

利用色散补偿光纤增加腔内色散, 在主动锁模光纤环形激光器中得到了重复频率 10 GHz, 8 个波长(19 个波长) 的输出脉冲。腔内没有附加波长选择器件如滤波器、光栅等, 是实现多波长锁模光纤激光器的一种新的简单有效途径。

参 考 文 献

- 1 J. M. Battiato, T. F. Morse, R. K. Kostuk. Dual-wavelength common-cavity codoped fiber laser. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(7): 913~ 915
- 2 S. K. Liaw, C. C. Lee, K. Po Ho *et al.*. Power equalized wavelength-selective fiber lasers using fiber Bragg gratings. *Opt. Commun.*, 1998, **155**(4, 6): 255~ 259
- 3 O. Graydon, W. H. Loh, R. I. Laming *et al.*. Triple-frequency operation of an Er-doped twincore fiber loop laser. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(1): 63~ 65
- 4 J. Chow, G. Town, B. Eggleton *et al.*. Multiwavelength generation in an erbium-doped fiber laser using in-fiber comb filters. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(1): 60~ 62
- 5 N. Park, P. F. Wysocki. 24-line multiwavelength operation of erbium-doped fibre-ring laser. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(11): 1459~ 1461
- 6 S. Li, K. T. Chan. Electrical wavelength tunable and multiwavelength actively mode-locked fiber ring laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(16): 1954~ 1956

Multiwavelength and Ultra-short Pulses Actively Mode-locked Fiber Laser

Zhang Jingsong Li Tangjun Qi Zanwei Jian Shuisheng

(Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract By using a dispersion compensation fiber (DCF) to increase the cavity dispersion, an actively mode-locked fiber ring laser with an output pulse at repetition rate 10 GHz and 8 wavelengths (19 wavelengths) in the experiment was obtained.

Key words fibre laser, actively mode-locking, dispersion compensation fiber

BiB₃O₆ 单晶生长及其 1.064 μm 的二倍频、三倍频输出*

BiB₃O₆(BIBO) 晶体是一种新型的非线性光学晶体,属单斜晶系,空间群为 C_2 , 具有不潮解、物化性能稳定、损伤阈值高、非线性系数大等特点。1999 年, Petra Becker 等首次报道了 BIBO 晶体的生长习性和结构^[1], 随后公布了该晶体的折射率拟合方程及非线性光学系数张量元, 发现它的有效非线性系数可以高达 3.2 pm/V, 优于当前普遍应用的 KTiOPO₄(KTP) 等晶体^[2]。

我们采用顶部籽晶法, 在 3~5 r/min 的转速下, 6 天时间生长出尺寸为 40 mm × 20 mm × 10 mm 的 BIBO 单晶, 重量为 24.7 g。利用 BRUKER-P4 型四圆衍射仪测定了该晶体的晶胞参数: $a = 0.71203(7)$ nm, $b = 0.49948(7)$ nm, $c = 0.65077(7)$ nm, $\beta = 105.586(8)^\circ$, $V = 0.22293(5)$ nm³。使用 HITACHI U-3500 型分光光度计测量了室温下的透过光谱, 其紫外截止波长短至 270 nm, 红外透过波段可延伸至 3200 nm ($T > 50\%$)。

以美国 Continuum 公司生产的 PY61 型 Nd:YAG 锁模激光器作为激光光源, 用 BIBO 晶体进行了 1.064 μm 二倍频实验。所用晶体样品沿(010)平面内的一类相位匹配方向切割(与 a 轴夹角为 19.5°), 其通光长度为 4.7 mm。当入射基频光的单脉冲能量为 8.6 mJ 时, 532 nm 输出为 5.5 mJ, 转换效率达到 64%。以 KTP 作为二倍频转换器, 转动 BIBO 晶体观察到 1.064 μm + 0.532 μm → 0.355 μm 的和频输出。

多次生长实践表明, BIBO 晶体的(110)表面易呈现棕色, 并一直延伸到晶体内部, Becker 等将此现象解释为该方向上缺乏硼、氧元素^[2]。BIBO 晶体的显色问题直接导致透过率下降, 进而降低损伤阈值。当 1.064 μm 的入射功率密度为 2 GW/cm² 时, 晶体的无色部分没有明显变化, 而棕色部分已被打黑。关于该晶体显色问题的研究正在进行中。

参 考 文 献

- 1 Petra Becker, Josef Liebertz, Ladislav Bohaty. Top-seeded growth of bismuth triborate BiB₃O₆. *Journal of Crystal Growth*, 1999, **203**: 149~ 155
- 2 H. Hellwig, J. Liebertz, L. Bohaty. Exceptional large nonlinear optical coefficients in the monoclinic bismuth borate BiB₃O₆(BIBO). *Solid State Commun.*, 1999, **109**(4): 249~ 251

山东大学晶体材料国家重点实验室 济南 250100
王正平 滕冰 刘耀岗 江怀东 王继扬 邵宗书
收稿日期: 2000-10-08

* 国家重点基础研究和发展规划资助项目。