

全光纤掺镱激光器实现锁模和多波长输出

张攀政 范 薇 汪小超 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘要 利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)和光纤环形镜(FLM)分别作为腔镜,实现了线形腔结构的全光纤掺镱激光器。通过调节偏振控制器(PC)和抽运功率得到了调 Q、调 Q 锁模、连续锁模、二次谐波、三次谐波、多波长等多种输出状态。其中连续锁模状态可实现开机自启动,脉冲宽度 31 ps,单脉冲能量 40 pJ,重复频率 19.3 MHz,中心波长 1030.8 nm,光谱带宽 2.3 nm。多波长输出信号中心波长在 1033 nm 左右,波长间隔及波长数随抽运功率和 PC 状态发生变化。最大抽运功率(420 mW)时,可得到最小平均波长间隔约 0.11 nm。实验中得到 10 dB 光谱范围内最大波长数为 35,此时 3 dB 范围内对应的波长数为 34。

关键词 光纤激光器;半导体可饱和吸收镜;光纤环形镜;全光纤;锁模;多波长

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0302001

Mode-Locking and Multiwavelength Operation from All-Fiber Ytterbium Doped Laser

Zhang Panzheng Fan Wei Wang Xiaochao Lin Zunqi

(National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Using a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) and a fiber loop mirror (FLM) as end mirror respectively, an all-fiber line-cavity Yb³⁺-doped laser is demonstrated. Q-switched pulse, Q-switched mode-locking, coherent mode-locking, harmonic pulses, and multiwavelength operation are obtained by adjusting the pump power and the polarization controller (PC). Mode-locking can be self-started and the width of mode-locking pulses is 31 ps. The pulse repetition rate is 19.3 MHz, corresponding to 40 pJ pulse energy. The spectral bandwidth of the mode-locked operation is 2.3 nm, at the center wavelength of 1030.8 nm. While multiwavelength operation centered at about 1033 nm is achieved, the wavelength space and the number of wavelength can be changed by adjusting the pump power and the PC. At the maximum pump power of 420 mW, the average wavelength space can be as small as about 0.11 nm. Up to 35 wavelengths within the spectral range of 10 dB are obtained, with 34 wavelengths in the 3 dB scale.

Key words fiber lasers; semiconductor saturable absorber mirror; fiber loop mirror; all fiber; mode-locked; multiwavelength

OCIS codes 060.4370; 060.2605; 140.4050; 140.3510

1 引 言

被动锁模 Yb³⁺ 光纤激光器由于结构简单、紧凑,能够产生很窄的光脉冲而受到国内外很多科研机构的广泛关注^[1~6],并在通信、医学、加工、传感和探测等众多领域得到了越来越广泛的应用。已报道

的 Yb³⁺ 光纤激光器被动锁模机制主要有:非线性偏振旋转^[5]、加成脉冲锁模 8 字环^[7]、非线性光学环形镜^[8]和半导体可饱和吸收镜(SESAM)^[9,10]几种。其中利用 SESAM 实现被动锁模相比其他方法具有结构简单、紧凑等优点。并且,将 SESAM 与特殊处

收稿日期:2010-09-01;收到修改稿日期:2010-11-09

作者简介:张攀政(1983—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器及光纤放大器等方面的研究。

E-mail: nwpuzhangpanzheng@163.com

导师简介:林尊琪(1942—),男,中国科学院院士,博士生导师,主要从事激光惯性约束核聚变和高功率激光驱动器等方面的研究。E-mail: zqlin@mail.shenc.ac.cn

理过的光纤端面粘合,可实现激光器的全光纤结构,与传统的光纤激光器相比具有体积小、易调节、高稳定性、封闭式的波导结构等独特优势。2004年 H. Robert 等^[9]利用 SESAM 成功实现了全光纤 Yb³⁺ 锁模激光器,并分析了 SESAM 不同性能参数对锁模输出的影响。2008年,谷庆元等^[10]报道了利用 SESAM 实现的全光纤被动锁模激光器,得到了中心波长1064 nm,3 dB带宽0.4 nm的锁模脉冲。但上述激光器都无法改变腔镜反射率和信号输出比,给激光器的调节带来极大的不便。

多波长激光器在光通信、光谱分析和光传感等领域都具有重要的应用。其中1 μm 波段的多波长激光器尤其在空间光通信方面具有很多应用。近年来人们对通信波段1550 nm附近的多波长掺铒光纤激光器进行了大量的研究^[11~15],而对掺镱多波长光纤激光器的研究则相对较少。2003年,迟荣华等^[16]利用多模光纤中导模的空间模式跳变构成梳状滤波器,在环形腔掺铒光纤激光器中实现了1030 nm附近的6个波长输出。2007年,朱宗玖等^[17]利用法布里-珀罗(F-P)标准具的梳状滤波作用,实现了掺铒光纤激光器在1035 nm附近5个波长的输出。同年,该课题组又通过在光纤环形镜(FLM)中加入保偏光纤的方法产生梳状滤波效应,实现了线形腔结构掺铒光纤激光器的多波长输出,在1060 nm波段得到了12个波长的振荡输出^[18]。

本文利用 SESAM 和 FLM 分别作为腔镜,实现了线形腔结构的全光纤掺铒锁模激光器。SESAM 同时作为锁模元件,通过对信号的非线性吸收效应实现振幅调制。FLM 的透射端作为激光器输出端,在 FLM 中加入偏振控制器(PC)可用来调节 FLM 的反射率^[19],极大方便了激光器的调节。激光器中无 F-P 滤波器^[17]、保偏光纤^[18]等传统多波长激光器中所必需的线性梳状滤波元件,而是利用普通单模光纤的非线性双折射效应^[20]构成双折射 FLM 产生梳状滤波作用。通过调节 PC 和抽运功率,激光器分别得到了调 Q、调 Q 锁模、连续锁模、二次谐波、三次谐波、多波长等多种输出状态。

2 实验装置

实验光路如图 1 所示,激光器采用线型 F-P 腔结构。SESAM 和 FLM 分别为腔镜构成光学谐振腔。SESAM 吸收波长范围为990~1090 nm,恢复时间为9 ps,饱和通量为60 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$,小信号吸收为65%,饱和吸收率为30%,对应35%的调制深度。

较大的调制深度和较长的恢复时间保证了激光器的锁模自启动能力^[21]。将 SESAM 与处理过的单模光纤垂直端面粘合,光纤的另一端直接与1053 nm/980 nm波分复用器(WDM)的1053 nm信号输入端熔接。抽运源是输出波长978 nm的二极管激光器(LD),最大输出功率420 mW,并通过 WDM 对增益光纤进行纤芯抽运。增益光纤为一段30 cm长的高掺杂浓度单模 Yb³⁺ 光纤。FLM 是通过将3 dB光纤耦合器的两个同向输出端熔接构成,FLM 的透射端为激光器的输出端。FLM 内连接一个 PC 用来调节 FLM 的反射率,从而改变激光器的腔镜损耗及输出耦合比。腔内器件全部是尾纤输出并直接熔接形成具有封闭式波导结构的全光纤谐振腔,简单紧凑无需准直,避免了光路准直系统带来的复杂性和不稳定因素。实验中使用的全部为普通单模光纤,纤芯直径6 μm 。构成 FLM 的光纤环长5 m,从 SESAM 到 FLM 之间的光纤长度为2.8 m,所以信号在腔内传输一周经历的总光纤长度为10.6 m(其中包括 Yb³⁺ 光纤0.6 m),对应19.3 MHz的重复频率和0.249 ps²左右(普通单模光纤在1030 nm波段的色散值 $\beta_2 = 23.6 \text{ ps}^2/\text{km}$,Yb³⁺ 光纤在1030 nm波段的色散值 $\beta_2 = 21.9 \text{ ps}^2/\text{km}$)的正常色散值。

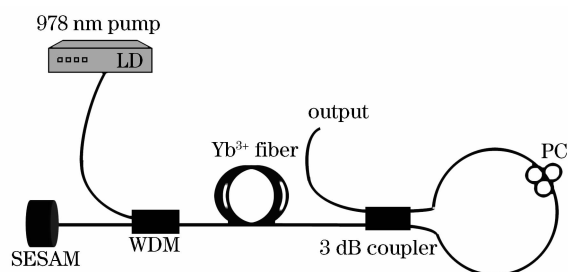


图 1 全光纤掺 Yb³⁺ 激光器装置图

Fig. 1 Schematic of the all-fiber Yb³⁺ doped laser

3 实验结果及分析

抽运功率较小时只有连续光输出,当抽运功率增加至50 mW时,调节 PC 开始出现调 Q 脉冲。保持 PC 状态不变,逐渐加大抽运能量,脉冲宽度随之减小,且脉冲时间间隔逐渐变小,这是因为抽运功率增加,激光器增益达到损耗所需要的积累时间减小的缘故,符合调 Q 的基本原理^[22]。图 2(a),(b)为用快速(8 GHz)光电探测器结合宽带(12 GHz)数字示波器观察得到的抽运功率分别为60 mW,140 mW时的输出脉冲波形。相应的脉冲宽度分别为1.6 μs 和800 ns,脉冲时间间隔分别为17.3 μs 和7.1 μs 。可以看出,抽运功率不同,脉冲宽度和脉冲间隔都存在明显

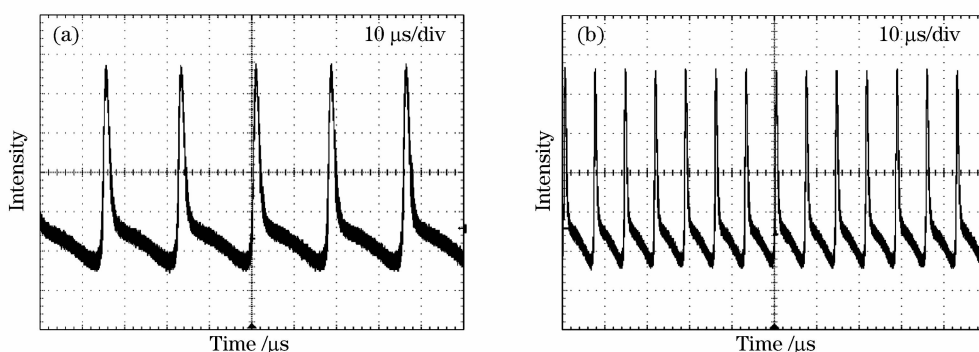


图2 不同抽运功率下的调Q脉冲波形图。(a) 抽运功率 60 mW, (b) 抽运功率 140 mW

Fig. 2 Q-switched pulse train at different pump powers
(a) pump power of 60 mW, (b) pump power of 140 mW

的区别。图3是不同抽运功率下调Q脉冲对应的输出光谱,随着抽运功率的增加,调Q脉冲的光谱宽度也在增加,这主要与脉冲宽度的减小有关。

继续增加抽运功率至 180 mW 左右,调Q脉冲峰值功率开始下降,脉冲振幅开始跳动。抽运功率 200 mW 时,激光器开始出现调Q锁模。输出脉冲及光谱如图4(a), (b)所示。

继续增加抽运功率至 260 mW 时,激光器出现稳定的连续锁模输出,输出脉冲及光谱如图5(a), (b)所示。锁模输出具有稳定的脉冲峰值,平均输出功率为 0.8 mW,脉冲重复频率 19.3 MHz,对应 51.8 ns 的脉冲间隔和 40 pJ 左右的单脉冲能量。光谱中心波长 1030.8 nm,半峰全宽(FWHM)为

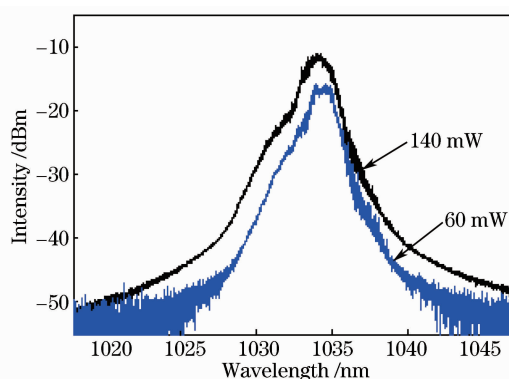


图3 不同抽运功率下调Q脉冲对应的输出光谱
Fig. 3 Spectra of the Q-switched pulse at different pump powers

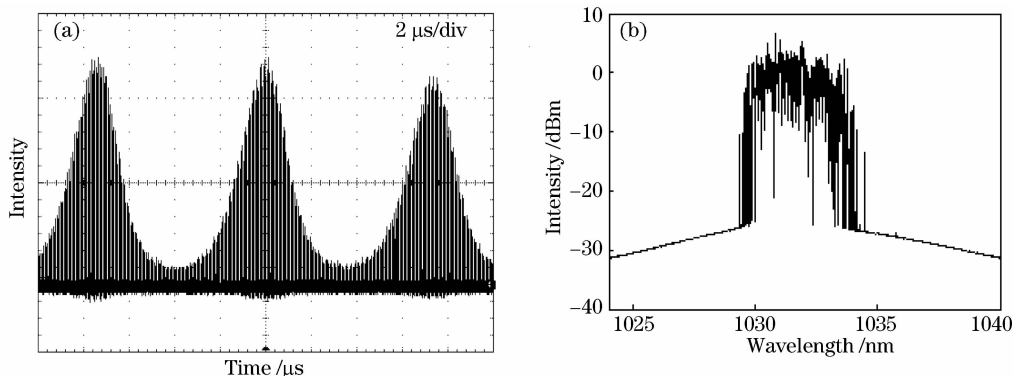


图4 调Q锁模时的输出脉冲及光谱。(a) 输出脉冲, (b) 对应的输出光谱

Fig. 4 Emitted pulse train and the corresponding spectra of Q-switched mode-locked operation
(a) emitted pulse train, (b) corresponding spectrum

2.3 nm。用带宽 8 GHz 的光电探测器结合 12 GHz 的数字示波器观察锁模脉冲,无多脉冲现象出现。将锁模脉冲经过 450 m 单模光纤传输后再次通入光电探测器,测得经光纤色散展宽后的脉冲宽度为 74 ps,根据光纤群速色散原理并结合输出光谱可知激光器输出的锁模脉冲宽度为 31 ps 左右。锁模状态下,直接关闭抽运电源后再重新打开,激光器可自

动恢复到相同的锁模状态,表明激光器锁模具有很好的开机自启动能力。抽运功率 300 mW 以上时,出现二次谐波[图 6(a)]和三次谐波[图 6(b)]。二次谐波时,通过仔细调节 PC 可出现两谐波等峰值等间隔分布的情况[图 6(c)],但该状态极不稳定,持续不到 1 min 后便消失。实验中没有出现等峰值等间隔的三次谐波。

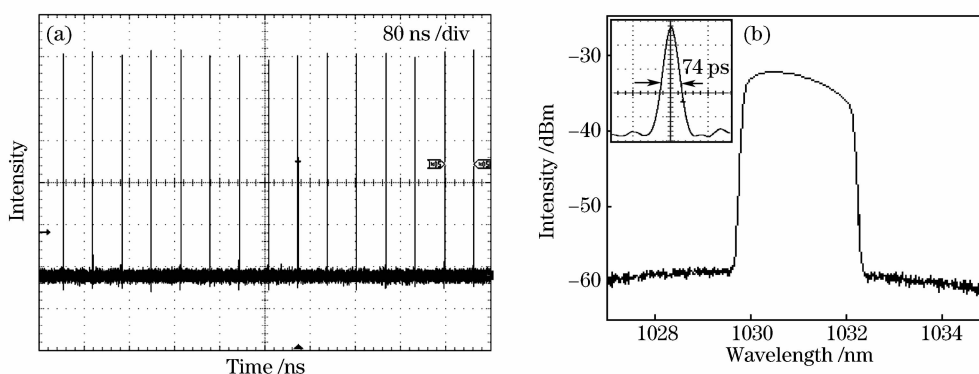


图 5 连续锁模时的输出脉冲序列及输出光谱

(a) 输出脉冲序列, (b) 连续锁模输出光谱, 插图为用快速光电二极管观察到的单脉冲时间波形

Fig. 5 Emitted pulse train and the corresponding spectrum of coherent mode-locking

(a) emitted pulse train, (b) output spectrum of coherent mode-locking, inset: single pulse observed with a fast photodiode

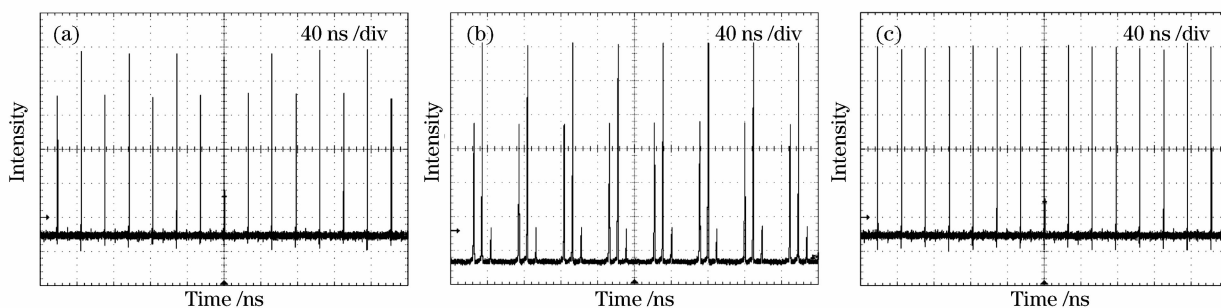


图 6 激光器多次谐波输出脉冲序列

(a) 二次谐波脉冲序列, (b) 三次谐波脉冲序列, (c) 等间隔等峰值的二次谐波脉冲序列

Fig. 6 Pulse train of harmonic generation. (a) pulse train of second-harmonic, (b) pulse train of third-harmonic,

(c) pulse train of second-harmonic with uniform pulse spaces and peak power

另外,当抽运功率高于 100 mW 时,通过调节 PC 还可以使激光器出现多波长输出。输出光谱呈梳状分布,各波长的光谱带宽均小于 0.02 nm(测量所用光谱仪的测量精度),图 7(a), (b) 为抽运功率 300 mW 时观察到的 3 dB 范围内 13 个波长输出的光谱图。实验中发现,输出信号的波长间隔及波长个

数随抽运功率和 PC 状态的不同发生明显变化。如保持 PC 不变而改变抽运功率,随着抽运功率的增加,输出信号的平均波长间隔逐渐减小,抽运功率 420 mW 时得到最小平均波长间隔约 0.11 nm,如图 8 所示。同时输出波长个数也随抽运功率逐渐增加,实验中得到的 10 dB 范围内的最多输出波长数为

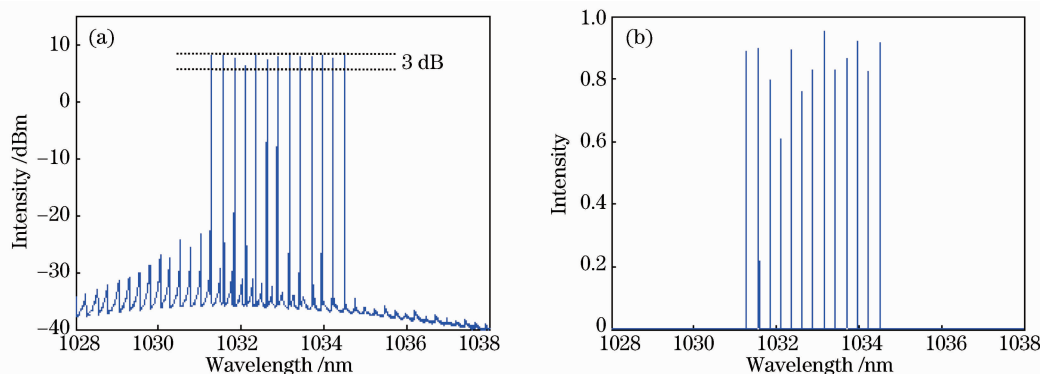


图 7 抽运功率 300 mW 时的多波长输出光谱。(a) 对数坐标下观察到的输出光谱, (b) 线性坐标下观察到的输出光谱

Fig. 7 Output spectra of multiwavelength operation at the pump power of 300 mW

(a) spectra observed in logarithm scale, (b) spectra observed in linear scale

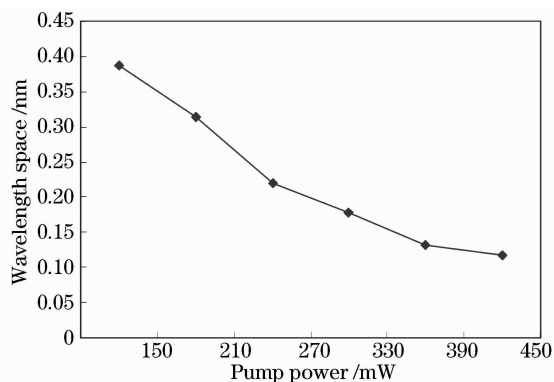


图 8 保持偏振控制器状态不变时平均波长间隔随抽运功率的变化

Fig. 8 Average wavelength space in respect to pump power while keeping the polarization controller state fixed

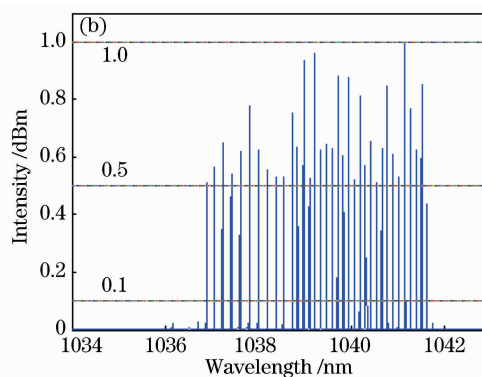
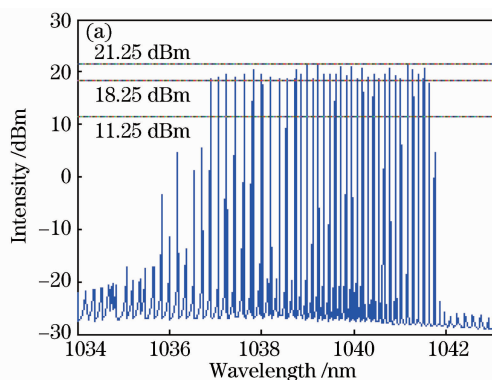


图 9 输出波长数达到最大时的对应光谱。(a) 对数坐标下的输出光谱, (b) 线性坐标下的输出光谱

Fig. 9 Corresponding spectra when the maximum wavelength number is obtained

(a) spectra observed in logarithm scale, (b) spectra observed in linear scale

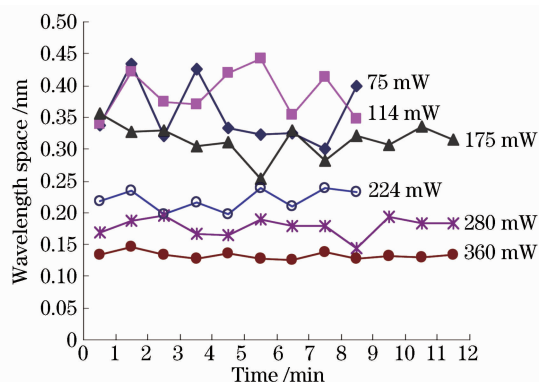


图 10 不同抽运功率下平均波长间隔的时间跳动

Fig. 10 Average wavelength space in respect to operating time at different pump powers

均匀加宽, SESAM 的非线性吸收, 模式竞争等多个因素有关。

根据以上实验观察结果, 激光器输出的波长间隔随着抽运功率和 PC 状态的不同发生明显变化。

35, 此时 3 dB 范围内的波长数为 34, 如图 9 所示, 是已报道的多波长掺镱光纤激光器的最大输出波长个数。保持抽运功率不变, 对 PC 进行调节并观察激光器输出状态的变化。如轻微调节 PC, 波长间隔和波长个数也发生明显变化, 效果与保持 PC 不变而调节抽运功率时的情况相同。如 PC 的调节幅度过大, 则多波长输出消失, 继续调节 PC 则输出状态可以变为调 Q 脉冲、调 Q 锁模、连续锁模或是多次谐波中的一种, 具体情况与当前的抽运功率有关。

多波长输出状态下, 固定抽运功率及 PC 状态不变, 观察激光器的输出光谱。最边缘的波长部分时有时无, 平均波长间隔也会发生一定的跳动, 且抽运功率越大波长间隔的跳动越小, 如图 10 所示, 在抽运功率 360 mW 时, 波长间隔的跳动幅度(均方根)只有 0.2%。这种跳动应该与 Yb^{3+} 增益光纤的非

而调节 PC 状态和抽运功率的主要共同点在于两者都可以引起激光腔内信号强度发生变化, 所以可初步推断激光器输出的波长间隔与腔内信号强度有着一定的联系。因为无法确定 FLM 的具体反射率, 所以不能根据输出功率来判定调节 PC 所引起的腔内功率的具体变化趋势, 因而无法根据调节 PC 时波长间隔的变化来推断输出波长间隔与腔内功率之间的变化关系。但可以确定的是, 抽运功率的增加必然引起腔内功率的增加, 再结合实验中平均输出波长间隔随抽运功率增加而减小的现象, 可知输出波长间隔与腔内信号强度有关, 且随着信号强度的增加而减小。

根据现有报道, 多波长输出激光器都需要在腔内加入梳状滤波器, 如 F-P 滤波器^[17]、超结构取样光栅^[23]、马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪型滤波器^[24]、双折射 FLM 滤波器^[18]等, 且激光器输出波长间隔由梳状滤波器波长间隔决定。其中双折射 FLM 滤波

器通常是通过在 FLM 内加入一段双折射光纤形成。但在本实验中,除了采用一个由普通单模光纤构成的 FLM 作为腔镜以外,不包含以上所述的其他任何可能产生梳状滤波器作用的结构,所以可初步推断激光器多波长输出的形成应该与 FLM 有关,且该 FLM 内光纤存在一定的双折射效应从而形成等效的双折射 FLM。

根据双折射 FLM 滤波原理^[18,25]可知,梳状滤波器波长间隔 $\Delta\lambda = \lambda^2/(BL)$,与光纤环内光纤双折射系数 B 及光纤长度 L 成反比,当 FLM 光纤长度 L 一定时,梳状滤波器波长间隔随光纤双折射系数的增大而减小。结合上述输出波长间隔随信号强度增加而减小的推论可知,实验中 FLM 内光纤的双折射系数随腔内信号强度增加而增大。

光纤的双折射包括不对称性引起的线性双折射和非线性效应引起的非线性双折射。线性双折射的大小与光纤内信号强度无关。根据光纤非线性原理,光纤的非线性折射率主要与光纤传输的信号强度有关^[20]。结合上文中光纤双折射系数随腔内信号强度发生变化的推断结果可知,实验中 FLM 内光纤的双折射应该为光纤非线性双折射。综合以上分析可初步推断激光器产生多波长输出的原因为:FLM 内光纤在强信号光的作用下产生较强的非线性双折射,从而形成等效的双折射 FLM 梳状滤波器。

基于以上分析结果,激光器多波长输出的实现过程为:调节 PC,可使 FLM 的反射率在 0%~100%之间连续变化^[19]。当调节 PC 至 FLM 反射率较低时,对应较大的激光腔损耗,腔内能量无法迅速积累增大,SESAM 对入射信号表现出非线性吸收特性,产生较强的振幅调制,激光器根据抽运功率的不同可得到调 Q、调 Q 锁模、连续锁模或多次谐波输出。当 FLM 的反射率接近 100%时,入射信号几乎全部被反射,腔内能量迅速增加并远超过 SESAM 的饱和阈值,导致 SESAM 始终处于饱和状态,失去对信号的非线性吸收作用,而表现出固定的反射率(70%)。腔内信号强度进一步增加,直至达到增益饱和,这时,光纤环内产生较强的非线性双折射,FLM 产生梳状滤波作用。经过腔内多次循环滤波并放大,激光器进入平衡状态并得到多波长输出。

4 结 论

利用 SESAM 和 FLM 分别作为腔镜,实现了

线形腔结构的全光纤掺镱激光器。得到了调 Q、调 Q 锁模、连续锁模、多次谐波、多波长等多种输出状态。其中连续锁模状态可实现开机自启动,脉冲宽度 31 ps,单脉冲能量约 40 pJ,中心波长 1030.8 nm,光谱带宽 2.3 nm。多波长输出信号中心波长约 1033 nm,波长间隔及波长数随抽运功率和 PC 状态发生变化。最大抽运功率(420 mW)时,可得到最小平均波长间隔约为 0.11 nm。10 dB 光谱范围内得到最大波长数为 35,对应 3 dB 范围内的波长数为 34。初步分析了多波长输出的形成原因及形成过程,但目前还无法进行严格的理论证明并对其达到全面彻底的理解,进一步的研究和实验验证正在进行中。另外,激光器多波长输出表现出一定的不稳定性,分析引起不稳定的原因并加以克服也是目前正在进行的工作之一。

参 考 文 献

- 1 A. Chong, W. H. Renninger, F. W. Wise. Properties of normal-dispersion femtosecond fiber laser [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(2):140~148
- 2 A. Chong, J. Buckley, W. Renninger *et al.*. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(21):10095~10100
- 3 S. Michael, K. Heike, P. Oliver *et al.*. All-fiber ytterbium femtosecond laser without dispersion compensation [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(24):19562~19566
- 4 P. Z. Zhang, W. Fan, X. C. Wang *et al.*. Generation of 8.5-nJ pulse from all-fiber dispersion compensation-free ytterbium laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(8):768~770
- 5 Huang Xiujiang, Liu Yongzhi, Sui Zhan *et al.*. Ultrashort pulse Yb³⁺-doped fiber ring laser with all-fiber structure [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(3):1191~1195
黄绣江,刘永智,隋展等.全光纤超短脉冲掺 Yb³⁺ 光纤环形激光器[J]. *物理学报*, 2006, **55**(3):1191~1195
- 6 Zhao Yu, Zhao Deshuang, Liu Yongzhi *et al.*. Output coupling ratio in passively mode-locked fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4):794~798
赵羽,赵德双,刘永智等.被动锁模光纤激光器的耦合输出比[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4):794~798
- 7 Ma Haiquan, Liu Chang, Zhao Wei *et al.*. Figure-of-eight cavity Yb³⁺-doped fiber mode-locked lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1173~1177
马海全,刘畅,赵卫等.8字形腔锁模掺 Yb³⁺ 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9):1173~1177
- 8 N. J. Doran, D. Wood. Nonlinear-optical loop mirror [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(1):56~58
- 9 H. Robert, O. G. Okhotnikov. Dispersion compensation-free fiber laser mode-locked and stabilized by high-contrast saturable absorber mirror [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(7):893~899
- 10 Gu Qingyuan, Hou Jing, Cheng Xiang'ai *et al.*. All-fiber passive mode-locked laser realized by semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5):655~659
谷庆元,侯静,程湘爱等.利用半导体可饱和吸收镜实现的全光纤被动锁模激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5):655~659
- 11 S. W. Harun, S. D. Emami, F. A. Rahman *et al.*. Multiwavelength Brillouin/erbium-ytterbium fiber laser [J].

- Laser Phys. Lett.*, 2007, **4**(8):601~603
- 12 Z. X. Zhang, K. Xu, J. Wu *et al.*. Multiwavelength figure-of-eight fiber laser with a nonlinear optical loop mirror [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2008, **5**(3):213~216
- 13 Z. Chen, S. Ma, N. K. Dutta. Multiwavelength fiber ring laser based on a semiconductor and fiber gain medium [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(3):1234~1239
- 14 Feng Suchun, Xu Ou, Lu Shaohua *et al.*. Multi-wavelength erbium-doped fiber laser using polarization-maintaining fiber Bragg gratings in symmetrical linear cavities [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7):1886~1889
冯素春, 许欧, 鲁韶华等. 基于保偏光纤光栅的对称腔多波长掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7):1886~1889
- 15 Xu Huiwen, Yang Hua, Wen Shuangchun *et al.*. Tunable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9):2272~2276
徐慧文, 杨华, 文双春等. 基于非线性偏振旋转的可调谐多波长掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9):2272~2276
- 16 Chi Ronghua, Lü Kecheng, Chen Shengping *et al.*. Multi-wavelength Yb-doped ring fiber laser with same polarization state [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(12):1061~1064
迟荣华, 吕可诚, 陈胜平等. 单一偏振的多波长环形腔掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12):1061~1064
- 17 Zhu Zongjiu, Zhou Mengran. Experiment study of multiwavelength ytterbium-doped fiber-line laser [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(3):335~337
朱宗玖, 周孟然. 多波长掺镱光纤线形腔激光器的实验研究[J]. *半导体光电*, 2007, **28**(3):335~337
- 18 Zhu Zongjiu, Zhou Mengran. Experiment study on multiwavelength ytterbium-doped fiber laser [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(7):59~62
朱宗玖, 周孟然. 多波长掺镱光纤激光器实验研究[J]. *光电工程*, 2007, **34**(7):59~62
- 19 Feng Sujuan, Shang Liang, Mao Qinghe. Continuously adjusting the reflectivity of fiber loop mirror using a polarization controller [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(8):4677~4685
冯素娟, 尚亮, 毛庆和. 利用偏振控制器连续调节光纤环镜的反射率[J]. *物理学报*, 2007, **56**(8):4677~4685
- 20 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.* Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 13~14, 64~83
阿戈沃. *非线性光纤光学原理及应用*[M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌等译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 13~14, 64~83
- 21 M. Guina, N. Xiang, A. Vainionpää *et al.*. Self-starting stretched-pulse fiber laser mode locked and stabilized with slow and fast semiconductor saturable absorbers [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(22):1809~1811
- 22 Chen Yuqing, Wang Jinhuan. *The Principle of Laser* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005. 367~378
陈钰清, 王静环. *激光原理*[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2005. 367~378
- 23 Li Jiafang, Feng Ming, Li Yigang *et al.*. 48-line linear cavity multi-wavelength Er-doped fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4):485~488
李家方, 冯鸣, 李乙刚等. 48-波长线形腔多波长掺铒光纤激光器[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4):485~488
- 24 G. E. Town, K. Sugden, J. A. R. Williams *et al.*. Wide-band Fabry-Perot-like filters in optical fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(1):78~80
- 25 Liu Lihui, Zhao Qida, Zhou Guang *et al.*. Study on characteristics of two high-birefringence fiber loops mirror filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9):1185~1188
刘丽辉, 赵启大, 周广等. 双折射光纤环形镜滤波器特性研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9):1185~1188