

# 基于体光栅的被动锁模可调谐线型腔 掺铥光纤激光器

白扬博<sup>†</sup> 向望华 祖鹏 张贵忠

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 教育部光电信息技术重点实验室, 天津 300072)

(2012年3月8日收到; 2012年4月20日收到修改稿)

搭建了基于反射型体光栅和半导体可饱和吸收镜的线型腔全正色散掺铥光纤激光器, 室温下实现了稳定的波长可连续调谐的连续被动锁模脉冲输出. 重复频率 16.42 MHz, 锁模脉冲中心波长 1030 nm 时, 脉冲光谱带宽 0.32 nm, 最大平均输出功率 10.2 mW, 单脉冲能量 0.63 nJ. 转动体光栅角度, 利用其分光谱和选波长的特性, 可使锁模脉冲的中心波长在约 1011.9—1050.6 nm 的范围内调谐, 调谐范围约 38.7 nm. 实验中亦可观察到调 Q 锁模、二次谐波锁模、双波长和三波长输出现象. 输出单波长锁模脉冲时, 由于其波长可调谐的特性, 该激光器可用作波分复用/光时分复用通信系统的光源和光学相干层析的调谐光源.

**关键词:** 激光器, 波长调谐, 半导体可饱和吸收镜, 体光栅

**PACS:** 42.55.Wd, 42.55.Xi, 42.60.Fc, 42.65.Re

## 1 引言

中心波长连续可调谐的锁模脉冲光源可应用于高速波分复用/光时分复用通信系统、光学相干层析光源、光纤传感以及计量测试等<sup>[1-4]</sup>. 目前, 波长可调谐被动锁模光纤激光器因输出光束质量高、散热性能好、转换效率高、结构紧凑、可靠性强等优势<sup>[5]</sup>, 成为研究热点.

近年来, 国内外学者主要采用 8 字型腔、环型腔和线型腔搭建波长可调谐的被动锁模光纤激光器<sup>[6-10]</sup>. 在国内, 李喆等<sup>[11]</sup>在 8 字型腔锁模掺铥光纤激光器中利用可调谐光纤光栅滤波器使脉冲中心波长在 1047—1055 nm 调谐, 调谐范围仅 8 nm, 平均输出功率仅 8.02 mW. Zhang 等<sup>[12]</sup>在非线形偏振旋转锁模环型腔掺铥光纤激光器中, 利用非平衡马赫泽德干涉仪实现了仅 30 nm 的波长调谐范围. 在国外, Kivistö 等<sup>[13]</sup>在半导体可饱和吸收镜 (semiconductor saturable absorption mirror, 简记为 SESAM) 锁模线型腔掺铥光纤激光器中利用声光可调谐滤波器实现 1025—1055 nm 的波长

调谐, 但所需的直接数字式频率合成器较复杂, 且波长调谐是分立而非连续的. Sotobayashi 等<sup>[14]</sup>搭建线型腔 SESAM 锁模掺铥光纤激光器, 利用可调谐滤波器实现脉冲波长在 1570—1600 nm 调谐, 调谐范围仅 30 nm.

目前, 体布拉格光栅 (volume Bragg grating, 简记为 VBG) 因为体积小、结构简单、功能灵活而被广泛用作波长调谐器件. 在国内, Wang 等<sup>[15]</sup>在包层抽运掺铥光纤激光器中利用 VBG 进行波长选择, 输出连续激光的调谐范围 1948—1998 nm, 光谱线宽 10 pm. Liu 和 Wang<sup>[16]</sup>在线型腔掺铥光纤激光器中利用 VBG 调谐波长, 同时输出单线偏振的双波长连续激光, 双波长调谐范围均为 1001—1081 nm. 在国外, McComb 等<sup>[17]</sup>在掺铥光纤激光器中插入 VBG 输出窄线宽连续激光, 调谐范围 1947—2052.5 nm. Zeil 和 Laurell<sup>[18]</sup>采用 915 nm LD 抽运掺铥光纤激光器, 利用 VBG 作为波长选择和窄带滤波器, 实现连续激光 980—1100 nm 的波长调谐.

上述实验是将独立的 VBG 插入腔内, 输出波长可调谐的连续激光, 结构相对复杂且腔内损耗

<sup>†</sup> E-mail: byb19852004@yahoo.com.cn

较大. 本文采用同一块 VBG 作为腔镜和调谐器件, 输出中心波长可连续调谐的被动锁模脉冲, 简化了实验装置, 减小了光腔损耗. 本实验搭建的线型腔掺镜光纤激光器属于全正色散 (all-normal-dispersion, 简记为 ANDi) 锁模激光器, 利用 SESAM 启动和维持被动锁模, 重复频率 16.42 MHz, 在中心波长 1030 nm 处, 脉冲光谱带宽 0.32 nm, 最大平均输出功率 10.2 mW, 单脉冲能量 0.63 nJ. 利用 VBG 分光谱和选波长的特性, 可实现脉冲中心波长在 1011.9—1050.6 nm 连续调谐, 调谐范围达 38.7 nm. 该激光器可用作高速波分复用/光时分复用通信系统的光源, 亦可用作光学相干层析的调谐光源.

## 2 实验装置与原理

### 2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 器件中心工作波长均为 1035 nm. 其中 SESAM 反射率约 95%. VBG 线密度 600 l/mm, 具有高反射率, 反射带宽小于 0.5 nm<sup>[19]</sup>; 保偏掺镜光纤 (polarization maintaining Yb-doped fiber, 简记为 PM-YDF) 的纤芯吸收系数为 250 dB/m@975 nm. 976/1035 nm 波分多用 (WDM) 标称工作范围 1030—1040 nm.

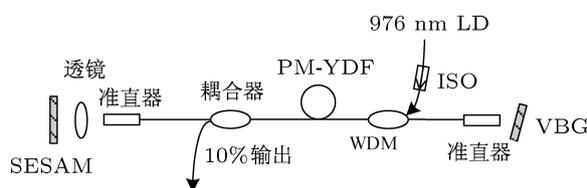


图 1 线型腔掺镜光纤激光器结构图

### 2.2 实验原理

SESAM 的引入, 使得激光器易于运转在调  $Q$  锁模状态, 脉冲功率和能量不稳定. 随着抽运功率增加, 激光器一般经历三个状态: 连续运转、调  $Q$  锁模、连续锁模. 为了抑制皮秒光纤锁模激光器中的自调  $Q$ , 应满足如下关系<sup>[20]</sup>:

$$E_p^2 > E_{\text{sat,L}} E_{\text{sat,A}} \Delta R = (F_{\text{sat,L}} A_{\text{eff,L}}) \times (F_{\text{sat,A}} A_{\text{eff,A}}) \Delta R, \quad (1)$$

$$E_p = P_{\text{intra}} / f, \quad (2)$$

$$F_{\text{sat,L}} = h\nu_L / m\sigma_L, \quad (3)$$

其中,  $E_p$  为单脉冲能量,  $P_{\text{intra}}$  为平均功率,  $f$  为脉冲重复频率,  $E_{\text{sat,L}}$  和  $E_{\text{sat,A}}$  分别为本实验所用 YDF 和 SESAM 的饱和能量,  $\Delta R$  为 SESAM 的调制深度,  $F_{\text{sat,L}}$  和  $F_{\text{sat,A}}$  分别为 YDF 和 SESAM 的饱和通量,  $m$  为脉冲往返一次通过 YDF 的次数 ( $m = 2$ ),  $\sigma_L$  为 YDF 的受激发射截面,  $A_{\text{eff,L}}$  和  $A_{\text{eff,A}}$  分别为腔模在 YDF 和 SESAM 上的有效光斑面积.

定义  $E_{p,c}$  为单脉冲能量临界值:

$$E_{p,c} \equiv (E_{\text{sat,L}} E_{\text{sat,A}} \Delta R)^{1/2} = [(F_{\text{sat,L}} A_{\text{eff,L}})(F_{\text{sat,A}} A_{\text{eff,A}}) \Delta R]^{1/2}, \quad (4)$$

这是得到稳定的连续被动锁模所需的最小单脉冲能量. 当  $E_p > E_{p,c}$ , 输出稳定的连续锁模脉冲; 当  $E_p < E_{p,c}$ , 输出调  $Q$  锁模. 根据 (1)—(4) 式, 为了抑制调  $Q$  锁模, 本实验采用具有小饱和通量  $F_{\text{sat,A}}$  和适当大小  $\Delta R$  的 SESAM.

非孤子锁模时, 考虑 YDF 的增益效应、光腔损耗和饱和吸收, 忽略克尔非线性效应和色散, 假设是高斯线型增益光谱, 锁模脉宽可用下式估计<sup>[21]</sup>:

$$\tau_p = \frac{1.07}{\Delta f_g} \sqrt{\frac{g}{\Delta R}}, \quad (5)$$

其中,  $\Delta f_g$  为 YDF 的增益光谱半宽度, 为 17.8 nm;  $g$  为增益系数. 由 (5) 式看出,  $\Delta R$  越大, 获得脉冲宽度越窄, 同时缓和对自启动的要求, 易于实现锁模. 但是由 (1) 式可知,  $\Delta R$  过大会使吸收过多, 导致调  $Q$  锁模;  $\Delta R$  过小, 不利于实现锁模, 所以本实验应综合考虑选择适当的  $\Delta R$  值. 当非饱和损耗远小于饱和吸收损耗时, 可以获得的最小脉宽  $\tau_{p,\min}$  为

$$\tau_{p,\min} = \frac{1.07}{\Delta f_g \sqrt{S}}. \quad (6)$$

通常连续锁模情况下, 饱和参数  $S = F_p / F_{\text{sat,A}} = 3-5$ , 其中  $F_p$  为脉冲通量. 更高的  $S$  值容易产生多脉冲, 应予以避免. 本实验中  $\tau_{p,\min}$  为 0.27—0.35 ps.

本实验中 PM-YDF 为 80 cm, 其他单模光纤为 526 cm, 理论上锁模脉冲的重复频率应为 16.50 MHz. 掺镜单模光纤色散值  $\beta_2 = 21.9 \text{ ps}^2/\text{km}@1030 \text{ nm}$ , 普通单模光纤色散值  $\beta_2 = 23.6 \text{ ps}^2/\text{km}@1030 \text{ nm}$ , 那么脉冲在腔内传输往返一次对应约 0.14 ps<sup>2</sup> 的正色散值. 腔内不引入任何色散补偿元件, 属于 ANDi 被动锁模, 将输出具有低峰值功率的宽脉冲, 可有效避免由于积累较高非线性相移而致脉冲分裂, 从而得到较高的单脉冲能量.

本实验利用 VBG 的分光谱和选波长的特性实现锁模脉冲中心波长的连续调谐 [22]. 选择从准直器出射的光经 VBG 衍射后的正一级光谱返回到腔内振荡, 即衍射级次  $m = 1$ , 那么 VBG 的衍射波长  $\lambda_o$  由下式决定:

$$2\Lambda n_o \cos \theta_r = \lambda_o, \quad (7)$$

$$\sin \theta_i = n_o \sin \theta_r, \quad (8)$$

其中,  $\Lambda$  为 VBG 折射率的周期,  $n_o$  为其平均折射率,  $\theta_r$  为在 VBG 传输的光束与  $z$  轴间的夹角 (即折射角),  $\theta_i$  为光束入射角. 由 (7) 和 (8) 式可知, 调节 VBG 角度改变  $\theta_i$ , 能够改变 VBG 的衍射波长, 使得正一级光谱中的各波长成分依次反馈回光腔, 实现脉冲中心波长连续调谐.

### 3 实验结果及讨论

#### 3.1 被动锁模输出

##### 3.1.1 SESAM 反射光谱

图 2 是 SESAM 的相对反射率曲线.

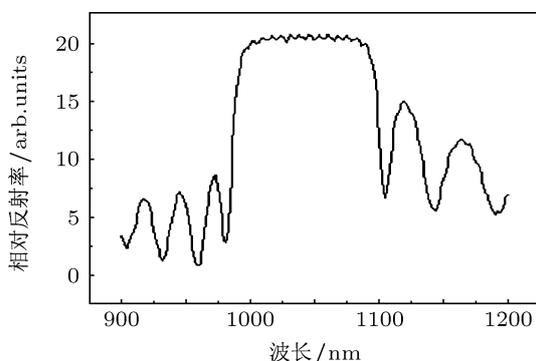


图 2 SESAM 相对反射率

##### 3.1.2 锁模阈值抽运功率

不同波长处输出连续激光和被动锁模脉冲的阈值抽运功率  $P_{p(CW)}^{th}$  和  $P_{p(ML)}^{th}$  的曲线如图 3. 其中 PM-YDF 的荧光谱呈开口向下的抛物线形状.  $P_{p(CW)}^{th}$  和  $P_{p(ML)}^{th}$  曲线均呈开口向上的抛物线形状且走势基本相同; 在每一波长处的  $P_{p(ML)}^{th}$  均比  $P_{p(CW)}^{th}$  略高, 说明当输出连续激光时, 需要再适当提高抽运功率才能启动被动锁模. 当  $\lambda = 1033$  nm 时,  $P_{p(CW)}^{th}$  和  $P_{p(ML)}^{th}$  均达到最小;  $\lambda$  从 1012 nm 调谐至 1033 nm, PM-YDF 的增益系数逐渐增高, 对应的  $P_{p(CW)}^{th}$  和  $P_{p(ML)}^{th}$  逐渐变小;  $\lambda$  从 1033 nm 调谐至 1048 nm, 随着增益系

数降低,  $P_{p(CW)}^{th}$  和  $P_{p(ML)}^{th}$  逐渐变大. 说明  $P_{p(CW)}^{th}$  和  $P_{p(ML)}^{th}$  均与 PM-YDF 的增益系数呈负相关.

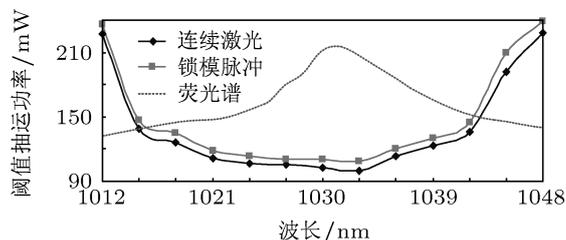


图 3 阈值抽运功率和锁模阈值抽运功率曲线图, 虚线代表掺镱光纤的荧光谱

##### 3.1.3 锁模脉冲波形及光谱图

连续激光运转时, 适当提高抽运功率 ( $P_p$ ), 可实现调  $Q$  锁模, 如图 4(a), (b), 频率为 118.29 kHz. 根据实验原理中关于抑制调  $Q$  锁模的分析, 我们提高  $P_p$ , 即提高  $P_{intra}$ , 并且利用短焦透镜将光斑聚焦在 SESAM 表面, 减小  $A_{eff,A}$  (同时注意避免损伤 SESAM), 使得  $E_p > E_{p,c}$  满足 (1) 式, 此时激光器输出连续锁模脉冲. 图 4(c), (d) 是基频连续被动锁模波形, 重复频率 16.42 MHz, 与理论推算的 16.50 MHz 基本相符; 图 4(e), (f) 是二次谐波锁模, 重复频率 32.64 MHz.

##### 3.1.4 锁模脉冲的光谱带宽

图 5 是连续基频被动锁模脉冲的光谱带宽图. 其光谱宽度较窄, 是由于 VBG 反射带宽太窄, 小于 0.5 nm, 切除了大部分的频谱成分.

在不同波长处, 锁模脉冲的光谱带宽曲线如图 6 所示. 在同一波长下, 逐渐增大  $P_p$ , 脉冲的光谱带宽随之变宽, 脉冲宽度逐渐变窄. 这是因为增大  $P_p$  可提高 SESAM 表面的激光能量密度, 促进其可饱和吸收, 利于压窄脉宽. 当脉冲中心波长 1030 nm,  $P_p$  为 500 mW 时, 脉冲的光谱宽度最宽, 为 0.32 nm. 假设脉冲为高斯型, 根据  $\Delta\nu \cdot \Delta t = 0.441$ , 可以得到变换极限脉宽为 4.87 ps. 此数值大于实验原理部分推导出的最小脉宽 (约 0.27—0.35 ps), 这是由光腔中的色散和自相位调制引起的啁啾造成的, 并且实际脉冲会比变换极限脉宽 (4.87 ps) 更宽些.

##### 3.1.5 锁模平均输出功率与单脉冲能量

图 7 是不同中心波长处不同  $P_p$  下锁模脉冲的平均输出功率曲线. 在相同  $P_p$  下, 各波长功率由高到低排序为: 1030, 1035, 1025, 1040, 1020, 1045 和 1015 nm. 这是由于 PM-YDF 荧光谱的峰值位于约 1033, 1030 和 1035 nm 处的增益系数最高, 由此

处向短波长和长波长方向延伸, 增益系数逐渐降低. 说明在相同  $P_p$  下, 各波长中阈值抽运功率较低的波长更加容易起振. 图 7 中, 平均输出功率均随  $P_p$  增大呈线性增长, 因 LD 输出功率有限未观察到饱

和现象. 最高平均输出功率为 10.2 mW, 出现在脉冲中心波长 1030 nm,  $P_p$  为 500 mW 时. 该激光器斜率效率 2.31%, 光 - 光转换效率 1.50%, 效率较低是由于 VBG 反射率较低所致.

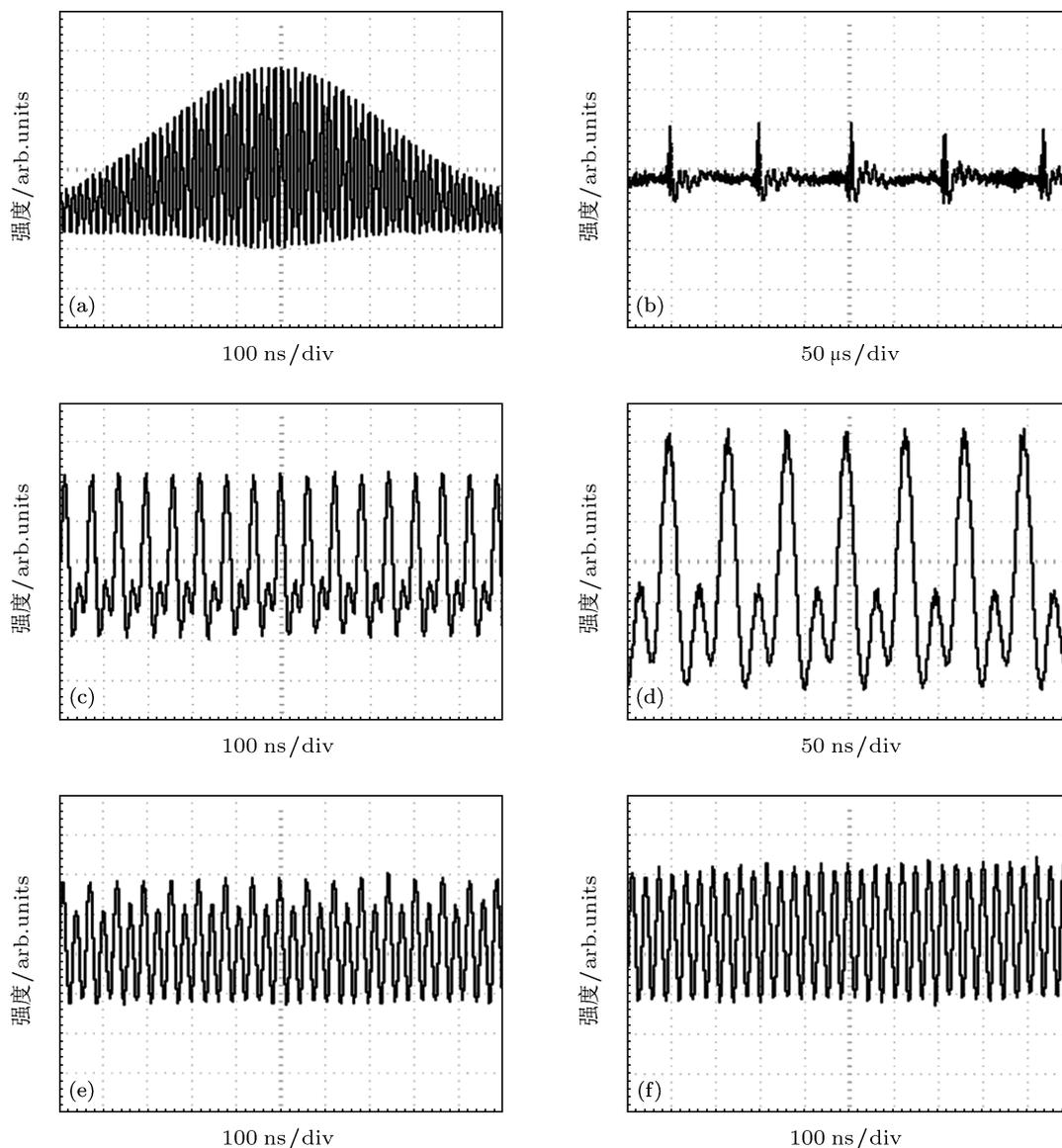


图 4 锁模脉冲波形图 (a), (b) 调 Q 锁模波形; (c), (d) 基频锁模波形; (e), (f) 二次谐波锁模波形

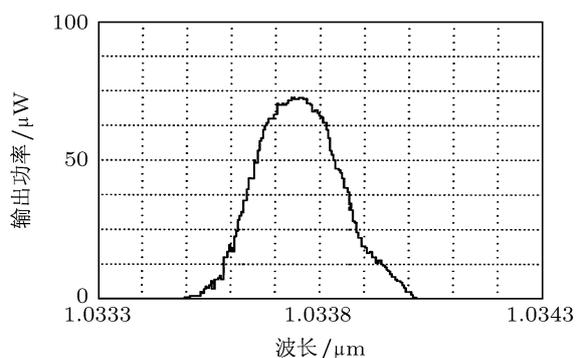


图 5 锁模脉冲光谱带宽

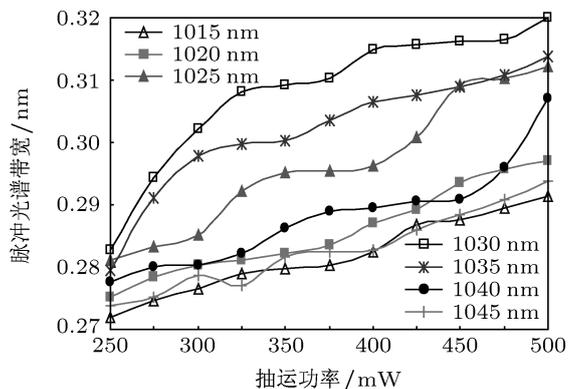


图 6 锁模脉冲光谱带宽随波长和抽运功率的变化曲线图

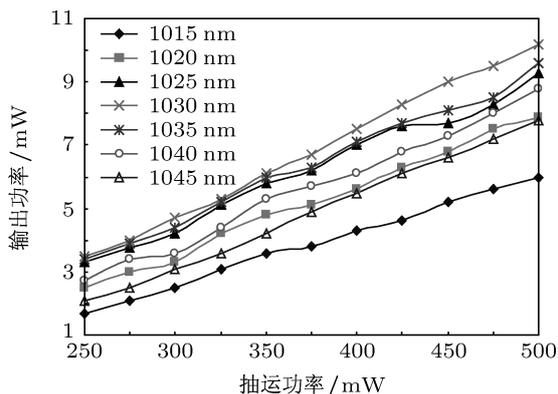


图7 不同抽运功率下的锁模脉冲平均输出功率曲线图

图8是锁模脉冲的中心波长调谐至不同波长时,在不同 $P_p$ 下的单脉冲能量曲线图.本实验中的ANDi锁模激光器可以使单脉冲携带更高的能量.当 $P_p$ 为500 mW,中心波长1030 nm时,单脉冲

能量达到最高0.63 nJ.

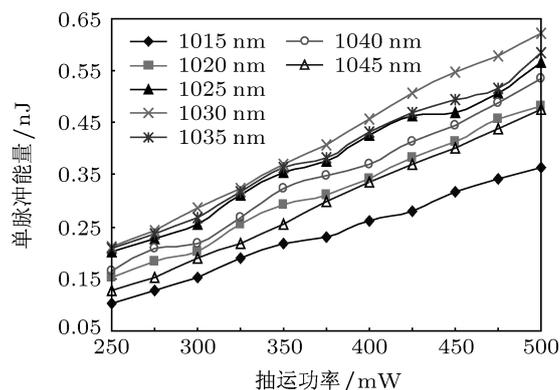


图8 不同抽运功率下的单脉冲能量曲线图

### 3.2 锁模脉冲中心波长连续调谐

如图9(a)—(f),调节VBG的角度,即可实现锁

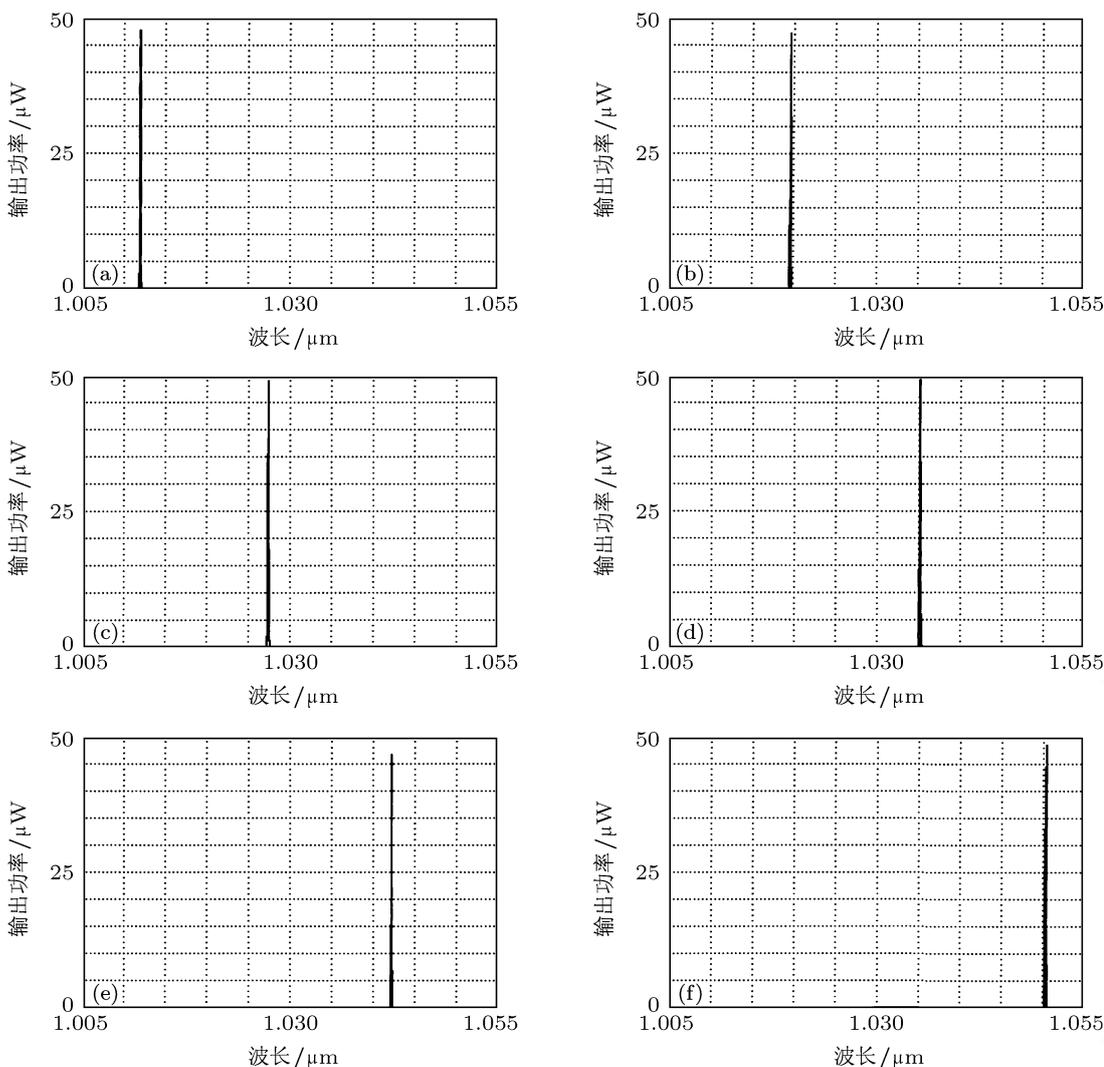


图9 锁模脉冲中心波长调谐光谱图 (a)  $\lambda = 1011.9$  nm; (b)  $\lambda = 1019.6$  nm; (c)  $\lambda = 1027.4$  nm; (d)  $\lambda = 1035.1$  nm; (e)  $\lambda = 1042.2$  nm; (f)  $\lambda = 1050.6$  nm

模脉冲中心波长在 1011.9—1050.6 nm 连续调谐, 调谐范围达 38.7 nm, 符合实验原理中的相关分析. 调谐范围相比 YDF 的增益谱范围窄很多, 这是由于实验所用 WDM 工作带宽仅 10 nm, 限制较长和较短波长振荡所致.

### 3.3 多波长输出光谱图

强抽运下, 当 VBG 旋转至某些角度时, 出现双波长或者三波长同时输出现象, 如图 10 所示.

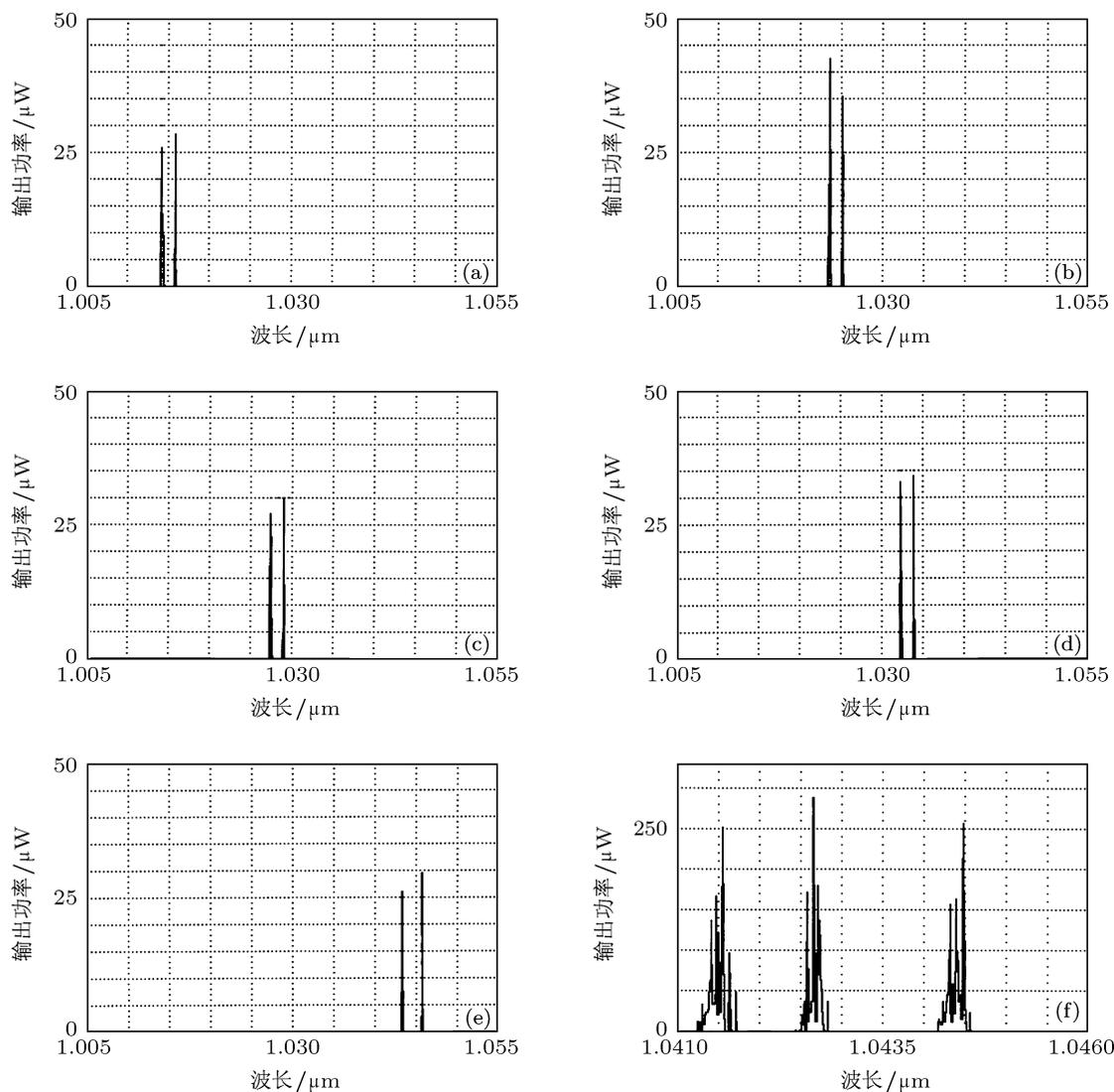


图 10 多波长输出光谱图 (a)—(e) 双波长光谱图; (f) 三波长光谱图

## 4 结论

本文利用 VBG 在 SESAM 线型腔掺镜光纤激光器中实现了室温下稳定的波长可连续调谐的被动锁模脉冲输出, 重复频率 16.42 MHz. 在中心波长 1030 nm 处, 脉冲光谱带宽 0.32 nm, 变换极限脉宽 4.87 ps, 最大平均输出功率 10.2 mW, 光-光转换效率 1.50%, 斜率效率 2.31%. 二次谐波锁模频率为 32.64 MHz. 由于该激光器是 ANDi 锁模激光

器, 输出脉宽较宽, 导致峰值功率较低, 脉冲不易分裂, 实验中获得单脉冲能量最高达 0.63 nJ. VBG 既是腔镜, 又是波长调谐器件, 利用其分光谱和选波长的特性实现波长连续调谐, 锁模脉冲中心波长可在 1011.9—1050.6 nm 范围内调谐, 调谐范围达 38.7 nm. 实验中亦观察到调 Q 锁模、双波长和三波长输出现象. 如果换用工作带宽更宽的 WDM 和输出耦合器等器件, 预计调谐范围会变宽; 如果换用大功率抽运源, 预计将得到更高的平均输出功

率和单脉冲能量. 该激光器输出单波长锁模脉冲时, 因其波长可连续调谐的特性, 可用作高速波分复用/

光时分复用通信系统光源和光学相干层析的调谐光源.

- [1] Guo Y J, Sun J Q, Wang J, Li J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4602 (in Chinese) [郭永娟, 孙军强, 王健, 李婧 2007 物理学报 **56** 4602]
- [2] Li Y J 2010 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [李艳军 2010 博士学位论文 (天津: 天津大学)]
- [3] Song C X, Xu W C, Luo Z C, Chen W C, Gao Y X, Liu S H 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 1292 (in Chinese) [宋创兴, 徐文成, 罗智超, 陈伟成, 高玉欣, 刘颂豪 2009 光学学报 **29** 1292]
- [4] Liu Y G, Zhang C S, Sun T T, Lu Y F, Wang Z, Yuan S Z, Kai G Y, Dong X Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4769 (in Chinese) [刘艳格, 张春书, 孙婷婷, 鲁云飞, 王志, 袁树忠, 开桂云, 董孝义 2006 物理学报 **55** 4769]
- [5] Ouyang C M, Chai L, Zhao H, Hu M L, Song Y J, Wang Q Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3936 (in Chinese) [欧阳春梅, 柴璐, 赵慧, 胡明列, 宋有建, 王清月 2010 物理学报 **59** 3936]
- [6] Chen N K, Lin J W, Liu F Z, Liao S K 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 700
- [7] Kivistö S, Hakulinen T, Guina M, Okhotnikov O G 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 934
- [8] Qin G S, Suzuki T, Ohishi Y 2010 *Opt. Rev.* **17** 97
- [9] Zhang C, Hu M L, Song Y J, Zhang X, Chai L, Wang Q Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7727 (in Chinese) [张弛, 胡明列, 宋有建, 张鑫, 柴璐, 王清月 2009 物理学报 **58** 7727]
- [10] Zhang P Z, Fan W, Wang X C, Lin Z Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024205 (in Chinese) [张攀政, 范薇, 汪小超, 林尊琪 2011 物理学报 **60** 024205]
- [11] Li Z, Zhao W, Zhang W, Chen G F, Wang Y S 2009 *Acta Photon. Sin.* **38** 1 (in Chinese) [李喆, 赵卫, 张伟, 陈国夫, 王屹山 2009 光子学报 **38** 1]
- [12] Zhang S M, Meng Q S, Zhao G Z 2010 *Eur. Phys. J. D* **60** 383
- [13] Kivistö S, Herda R, Okhotnikov O G 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 51
- [14] Sotobayashi H, Gopinath J T, Koontz E M, Kolodziejcki L A, Ippen E P 2004 *Opt. Commun.* **237** 399
- [15] Wang F, Shen D Y, Fan D Y, Lu Q S 2010 *Laser Phys. Lett.* **7** 450
- [16] Liu D F, Wang C H 2010 *Laser Phys. Lett.* **7** 153
- [17] McComb T S, Shah L, Sims R A, Sudesh V, Richardson M 2010 *Proceedings of the SPIE—The International Society for Optical Engineering*, 2010 v7580, p75801F
- [18] Zeil P, Laurell F 2011 *Opt. Express* **19** 13940
- [19] Wang F, Shen D Y, Fan D Y, Lu Q S 2010 *Opt. Lett.* **35** 2388
- [20] Hönninger C, Paschotta R, Genoud F M, Moser M, Keller U 1999 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 46
- [21] Paschotta R, Keller U 2001 *Appl. Phys. B* **73** 652
- [22] Bai Y B, Xiang W H, Zu P, Shi X Z, Zhang G Z 2011 *Chin. J. Lasers* **38** 1102004-1 (in Chinese) [白扬博, 向望华, 祖鹏, 师晓宙, 张贵忠 2011 中国激光 **38** 1102004-1]

# Wavelength-tunable linear-cavity passively mode-locked Yb-doped fiber laser based on volume Bragg grating

Bai Yang-Bo<sup>†</sup> Xiang Wang-Hua Zu Peng Zhang Gui-Zhong

(College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technical of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 8 March 2012; revised manuscript received 20 April 2012)

## Abstract

The linear-cavity all-normal-dispersion Yb-doped fiber laser based on semiconductor saturable absorber mirror and reflection type volume Bragg grating (VBG) is demonstrated. A passively mode-locked pulse stable output with a 0.32 nm spectral bandwidth, a 10.2 mW maximum average output power, a single pulse energy of 0.63 nJ and a 16.42 MHz repetition rate is achieved, when the central wavelength of pulse is 1030 nm. The central wavelength of the pulse can be tuned approximately from 1011.9 nm to 1050.6 nm by the spectral separation and mode selection effect of VBG with a tuning range of 38.7 nm at room temperature. *Q*-switched, second harmonic mode-locked, simultaneous dual wavelength and triple wavelength output are observed. This mode-locked fiber laser can be used as the optical source in wave division multiplexing optical time division multiplexing communication system and optical source of optical coherence tomography due to its tunable wavelength.

**Keywords:** laser, wavelength-tunable, semiconductor saturable absorber mirror, volume Bragg grating

**PACS:** 42.55.Wd, 42.55.Xi, 42.60.Fc, 42.65.Re

---

<sup>†</sup> E-mail: byb19852004@yahoo.com.cn