

文章编号: 0258-7025(2003)02-0101-04

## 10 GHz 主动锁模光纤激光器

彭 璨, 姚敏玉, 张洪明, 徐千帆, 张剑锋, 高以智

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘要** 报道了由电吸收调制器(EAM)和半导体光放大器(SOA)构成的 10 GHz 光纤锁模激光器,可输出脉宽为 10 ps,谱宽为 0.4 nm 近变换极限的锁模光脉冲序列。该激光器在未加反馈控制回路情况下,可稳定工作 6 h 以上。并对 EAM 和 SOA 工作参数对锁模脉冲性能的影响进行了分析。

**关键词** 光电子技术;光纤环行激光器;电吸收调制器;半导体光放大器;主动锁模

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

### 10 GHz Actively Mode-locked Fiber Ring Laser

PENG Can, YAO Min-yu, ZHANG Hong-ming,

XU Qian-fan, ZHANG Jian-feng, GAO Yi-zhi

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** It is demonstrated that an actively mode-locked fiber ring laser consisted of electro-absorption modulator (EAM) and semiconductor optical amplifier (SOA). A 10 GHz, 10ps pulse trains with 0.4 nm spectrum width were obtained. The output pulse train can be stable for more than 6 hours without any feedback controlling circuit. The performances of the laser effected by the parameters of SOA and EA were analyzed.

**Key words** optoelectronic technique; fiber ring laser; electro-absorption modulator; semiconductor optical amplifier; actively mode-locked

## 1 引言

幅度稳定,时间抖动小的高重复频率超短光脉冲源是光 A/D 转换以及光通信系统中的关键器件之一<sup>[1~3]</sup>。增益开关分布反馈(DFB)激光器虽结构简单,重复频率可调,但输出脉冲较宽,且有较大的时间抖动和频率啁啾。光纤锁模激光器因可直接产生性能良好的皮秒超短光脉冲,时间抖动小,无啁啾而受到普遍的关注。通常一个主动锁模光纤激光器主要由强度调制器、增益介质及滤波器构成。由掺铒光纤放大器(EDFA)提供信号增益的环腔锁模激光器有输出功率大的优点,但因其环腔长,稳定性差,超模噪声大,要获得稳定实用的超短光脉冲需要有较为复杂的反馈结构<sup>[4]</sup>。本文将报道由电吸收调

制器(EAM)和半导体光放大器(SOA)构成的主动锁模光纤激光器。因所用的 EAM 与 SOA 都是偏振依赖性较小的半导体器件,较短的腔长(数十米腔长)使其受外界温度及振动的影响小,无需采用反馈控制回路便可获得输出稳定的超短光脉冲。

## 2 实验装置

由 SOA 和 EAM 构成的主动锁模光纤激光器实验装置如图 1 所示。其中 SOA 作为增益放大器,在锁模脉冲形成过程中为腔内提供足够增益。EAM 是实现主动锁模的关键器件,在 EAM 上加正弦微波信号,利用其陡峭的调制曲线对腔内损耗进行调制以获得窄脉冲。由于 SOA 器件对于 TE 和

收稿日期:2001-12-03;收到修改稿日期:2002-01-29

基金项目:国家自然科学基金(编号:60077001)及教育部博士点基金资助项目。

作者简介:彭璨(1978—),男,清华大学电子工程系信息光电子学研究所硕士研究生,学士,主要从事超短脉冲源及光 A/D 转换的研究。E-mail: pengcan00@mails. tsinghua. edu. cn

TM 模有 2 dB 增益差,故在环内加入偏振控制器使输出脉冲获得最佳性能。环内滤波器可对起振的中心频率进行控制和调节,同时减小 SOA 的自发辐射(ASE)噪声。隔离器用于限制光的传播方向,只允许一个方向的光起振。当 EAM 上所加正弦微波频率等于环腔本征频率( $c/L$ , $c$ 为真空中光速, $L$ 为环腔光程)的整数倍时就会发生锁模,产生重复频率与 EAM 调制频率相等的短脉冲序列。该脉冲序列通过 90:10 耦合器输出腔外。外接采样示波器或光谱仪对输出脉冲性能进行观测。

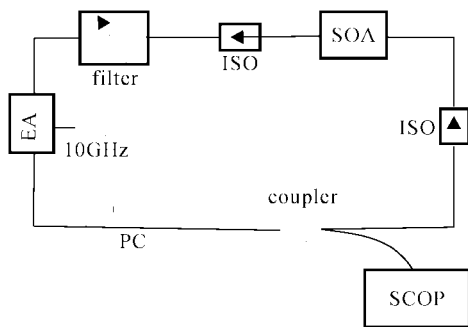


图 1 光纤锁模激光器结构

Fig. 1 Structure of mode-locked fiber ring laser

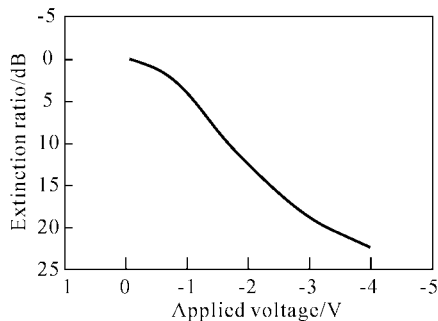


图 2 EAM 调制曲线

Fig. 2 Modulation curve of EAM

### 3 实验结果与分析

实验中所用 SOA 系阿尔卡特(Alcatel)公司产品,小信号增益为 28 dB,饱和输出功率为 8.3 dBm。EAM 的调制曲线如图 2 所示。从图上可看出 EAM 所加偏压在  $-1 \sim -2$  V 之间调制曲线最陡,透过下降约 8 dB。所用滤波器的 3 dB 带宽为 1.5 nm,0.5 dB 带宽为 0.8 nm。

实验中 EAM 偏置电压为  $-2.6$  V,所加微波调制功率约为 5 dBm。图 3(a),(b)为用美国泰克公司 11801C 示波器及日本爱德万公司光谱仪测得的锁模脉冲序列的波形和光谱。图 3(b)所示谱宽约

0.4 nm。由于示波器接收器响应时间的限制,由图 3(a)所示的锁模脉冲波形不可能直接测得脉冲的实际宽度,我们用自相关测量仪测得的脉冲自相关曲线如图 4 所示。计算可得脉宽为  $\sim 10$  ps。因此谱宽脉宽乘积约为 0.5,脉冲形状约为高斯形,输出脉冲为近变换极限,有一定的啁啾。通过用单模光纤和色散补偿光纤(DCF)组成的梳状光纤链脉冲压缩,可得到脉宽为 5~6 ps 的超短光脉冲。

从原理上讲,在由 EAM 和 SOA 构成的环形锁模光纤激光器中,EAM 作为幅度调制器件在锁模脉冲形成过程中起压窄脉冲作用,在调制曲线一定的情况下,合适的直流偏压和调制深度能加强 EAM 的压窄作用。脉冲在光纤环中运行时每次通过 EAM 时被压窄,光谱加宽,而滤波器的有限带宽会导致脉冲展宽,当两种效应达到均衡时得到脉宽稳定的脉冲序列。因此 EAM 调制曲线越陡,光滤波器透过带宽越宽,输出脉冲脉宽也越窄<sup>[5]</sup>。但实验表明滤波器透过谱太宽,自发辐射引入的幅度抖动和时间抖动大,得到的脉冲稳定性较差。

在实验中考察几个参数对输出脉冲的影响。当 EAM 偏置电压绝对值越大,调制度越大,脉冲序列消光比越高,脉冲越窄。但当这些值大到一定程度时,其对脉冲质量的影响就不再明显。对此激光器作理论分析可得脉宽与调制幅度的关系,如图 5 所示,此时偏置电压约为 2.5 V。SOA 增益对脉冲质量影响也很明显。总的来说在激光器能够起振的前提下,SOA 增益较小时脉冲幅度抖动较小。理论分析表明,SOA 小信号增益越大,导致脉宽有一定增加。同时因为要得到稳定脉冲序列,环腔中净增益只能在脉冲中心附近大于零,而在其他时刻小于零,但在小信号增益过大时,腔中净增益在脉冲前后沿时仍大于零,从而放大了自发辐射噪声,导致脉冲序列不稳定。脉宽及脉冲峰值功率与 SOA 小信号增益的关系如图 6 所示。此外偏振态对脉冲质量也有一定影响,这是因为不同偏振态在 SOA 中获得增益不同所致。

与通常使用的铌酸锂调制器和 EDFA 组成的光纤锁模激光器相比,本实验中构成的光纤锁模激光器腔长为 24 m,对应的本征腔模频率间隔在 8~9 MHz 之间,故锁定脉冲频率为本征腔模频率间隔 1000 多倍。另因 EAM 较铌酸锂调制器的偏振依赖性小,从实验结果比较,由 EAM 和 SOA 构成的锁模光纤激光器的短期和长期稳定性较铌酸锂调制器和 EDFA 组成的锁模光纤激光器为好,无需加任

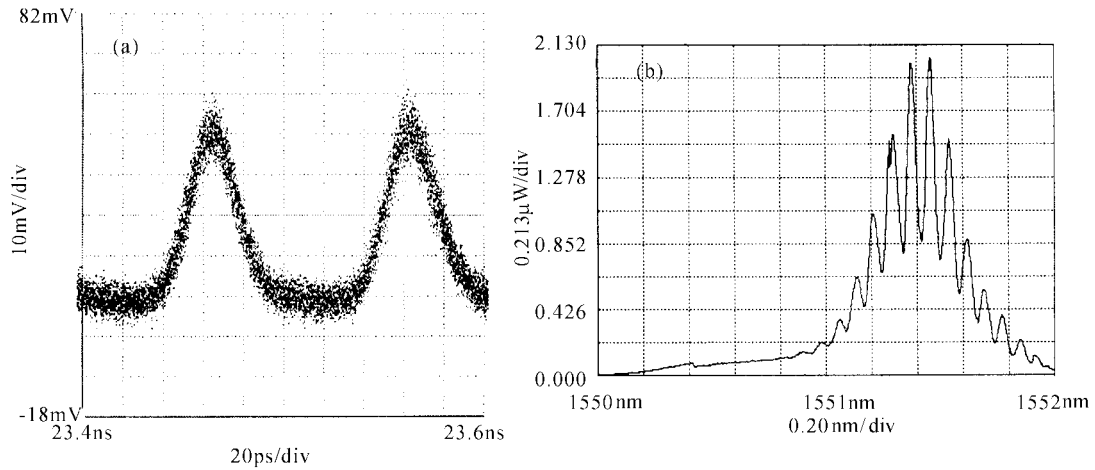


图 3 锁模脉冲的性能测试  
 (a) 输出脉冲波形;(b) 输出脉冲光谱  
 Fig. 3 Characteristics of the mode-locked pulses  
 (a) waveform of output pulses; (b) spectrum of output pulses

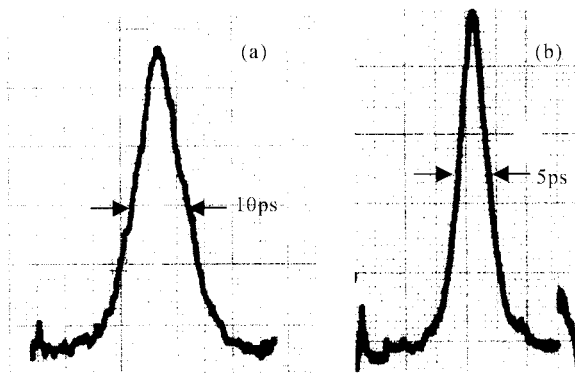


图 4 输出脉冲自相关曲线  
 (a) 压缩前;(b) 压缩后  
 Fig. 4 Autocorrelation of output pulses  
 (a) before squeezing; (b) after squeezing

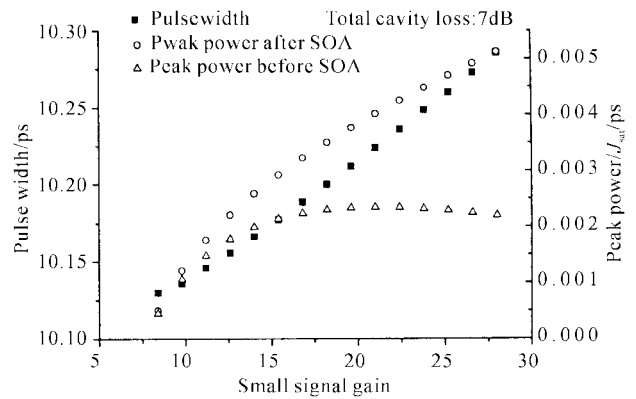


图 6 SOA 小信号增益对脉宽与脉冲峰值功率的影响  
 ( $J_{sat}$  为 SOA 的饱和能量)  
 Fig. 6 Effects of the small signal gain on the pulse width and the peak power

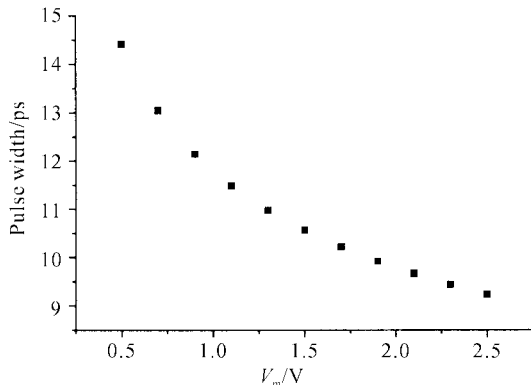


图 5 脉宽与调制幅度的关系( $V_m$  为微波峰值电压)  
 Fig. 5 Relationship between pulse width and bias voltage

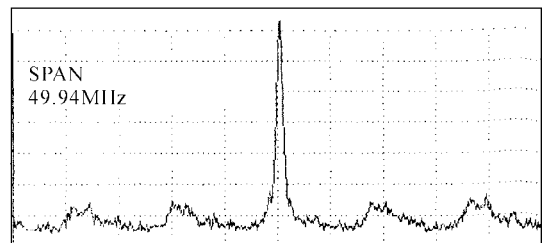


图 7 输出脉冲的 RF 谱  
 Fig. 7 RF spectrum of output pulses

何反馈控制回路,其输出脉冲在连续 6 h 内均可保

持较小的时间抖动和幅度抖动(时间抖动在 1.7 ps 以内,幅度抖动在 6%以内),输出光谱也相当稳定。图 7 是脉冲序列通过 PIN 接收后从频谱分析仪上得到的电功率(RF)谱。由图可见超模抑制比为近

60 dB。由超模间隔估算对应环长约为 24m。由示波器测得的脉冲时间抖动均方差示值为 1.7 ps。

### 参 考 文 献

- 1 R. C. Jr. Thomas. High-Performance Photonic Analog-to-Digital Converters [C]. OFC'2001, WV1-1
- 2 M. Shirane, Y. Hashimoto, H. Yamada *et al.*. A compact optical sampling measurement system using mode-locked laser-diode modules [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(11):1537~1539
- 3 J. C. Twichell, R. Helkey. Phase-encoded optical sampling for analog-to-digital converters [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(9):1237~1239
- 4 M. Nakazawa, E. Yoshida. A 40-GHz 850-fs regeneratively FM mode-locked polarization-maintaining erbium fiber ring laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(12):1613~1615
- 5 Z. Li, C. Lou, Y. Li *et al.*. Effect of tunable filter characteristics on the pulse performance of actively mode-locked fiber lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(11):1462~1464



## BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub> 晶体 946 nm 倍频蓝光输出\*

BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub> (BIBO)是一种新型的非线性光学晶体,物化性能稳定,不潮解,光损伤阈值高。该晶体短波吸收边位于 270 nm, I 类相位匹配的  $d_{\text{eff}}$  高于 II 类,达到 3.2 pm/V,优于 KTP。以上性质表明,利用该晶体可望制作高效的频率变换器件,产生可见及近紫外光。

BIBO 晶体沿(161.7°, 90°)的 I 类相位匹配方向加工,使用单次通过(Single Pass)方法在钛宝石可调谐激光器上进行 946 nm 倍频实验。晶体长度 5 mm,两端镀 946 nm, 473 nm 双增透膜。光源为相干公司生产的 Mira900 型钛宝石自锁模激光器,脉宽 200 fs,重复频率 76 MHz,输出波长固定于 946 nm。光束自激光器出射后,首先用  $\phi = 1$  mm 的光阑整形,然后用  $f = 15$  cm 的透镜聚焦到倍频晶体上,再经双色滤波片,最后照射到功率计上。滤

波片的参数为  $T = 0.1\% @ 946$  nm,  $T = 93.8\% @ 473$  nm,用于滤除经过晶体后剩余的 946 nm 基频。当入射到 BIBO 晶体上的基频功率为 550 mW 时,获得了 28.5 mW 的 473 nm 蓝光输出(已考虑滤波片的损耗),相应的倍频转换效率为 5.2%。

我们希望通过优化晶体长度、透镜焦距,以及使用非线性谐振腔等手段,进一步提高倍频蓝光输出,并在此基础上开发出有实际应用前景的新型固体蓝光激光器。

山东大学晶体材料国家重点实验室,  
山东 济南 250100  
王正平,杜晨林,许心光,董胜明,  
滕冰,许贵宝,王继扬,邵宗书  
收稿日期:2003-01-03

\* 教育部科学技术研究重点项目(批准号 99182)。