

基于单端半导体光放大器的可调谐超短光脉冲源 理论与实验研究*

徐 帆 张新亮† 刘德明 黄德修

(华中科技大学光电子工程系和武汉光电国家实验室 武汉 430074)

(2005 年 3 月 31 日收到 2005 年 5 月 8 日收到修改稿)

超短光脉冲源是光时分复用(OTDM)系统中的关键器件.提出了一种基于单端半导体光放大器(SOA)的注入型主动锁模光纤激光器产生超短光脉冲的方案,建立了该方案的理论模型.实验实现了高消光比稳定的重复频率 10—40GHz 皮秒级光脉冲的输出,输出波长在 30nm 范围内连续可调.

关键词:超短光脉冲,单端半导体光放大器,主动锁模

PACC:4260F,4265K,4265G

1. 引 言

高重复频率的超短光脉冲是光时分复用(OTDM)系统的核心技术,也是提高系统传输速率和距离的主要因素之一.主动锁模光纤激光器是产生适合 OTDM 系统使用的稳定超短光脉冲的主要方法.目前已报道的主动锁模光纤激光器通常有以下两种^[1-4].基于掺铒光纤激光器(EDFA)的环腔锁模激光器和基于半导体光放大器(SOA)的环腔锁模激光器.基于 EDFA 的环腔锁模激光器利用 EDFA 做增益介质,其输出能量高,但是由于腔长较长,需要反馈控制回路实现稳定的输出.基于 SOA 的环腔锁模激光器的腔长较短(约数十米长),所以稳定性较好.它又可分为两类.第一类方案和基于 EDFA 的方案原理类似,SOA 仅做增益介质,环腔内用铌酸锂调制器或电吸收调制器调制腔的增益.这类方案由于采取电调制,输出光脉冲的重复频率受电子速率瓶颈的限制,一般只能达到 10GHz 左右^[5].第二类方案则利用 SOA 中的交叉增益调制(XGM)和交叉相位调制(XPM)特性,SOA 既做增益介质起放大光信号的作用,又作为调制器使环腔增益受到周期性调制^[6].这类方案重复频率高,但由于受 SOA 增益限制,输出锁模脉冲能量较小,消光比不高.

本文在基于 SOA 环腔激光器的第二类方案的基础上,采用单端 SOA 构成注入型主动锁模光纤激光器.单端 SOA 具有载流子恢复时间短,增益大等优点^[7].因此和普通基于 SOA 环腔锁模激光器相比,除了稳定性好外,还具有输出锁模脉冲能量大,消光比高等优点.本文同时建立了相应的理论模型,实验实现了重复频率 10—40GHz,波长连续可调,脉宽 8.3ps 以下的超短光脉冲输出.

2. 方案概述

由单端 SOA 组成的主动锁模光纤激光器的实验结构如图 1 所示.环腔中光隔离器保证环腔中的光信号沿顺时针传播,偏振控制器(PC)用来控制注入光信号的偏振态.单端 SOA 有源区长度为 1000 μm ,后端面上镀了反射率为 30% 的反射膜.实验和理论证明^[8],这样的结构可以缩短单端 SOA 的载流子恢复时间.在 250mA 偏置电流下,其小信号增益约为 25dB.

分布反馈激光器(DFB)输出波长为 1550nm 的连续光被两个铌酸锂(LiNbO₃)调制器所调制.第一个铌酸锂调制器由数据(Data)信号驱动,第二个铌酸锂调制器由时钟脉冲(Pulse)驱动,调节这两个调制器,可以得到重复频率 5—20GHz 的 RZ 和 NRZ 信

* 国家重点基础研究发展规划项目(批准号:G2000036605)、国家高技术研究发展计划(批准号:2002AA312160)、国家自然科学基金(批准号:60407001)和教育部新世纪优秀人才支持计划资助的课题.

† E-mail: xlzhang@mail.hust.edu.cn

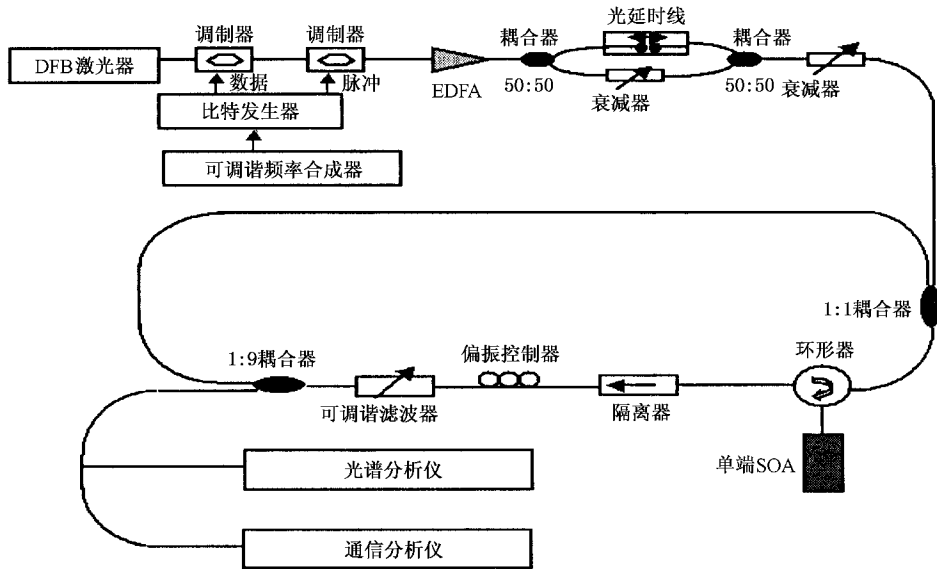


图1 主动锁模半导体光纤激光器实验结构示意图

号.将重复频率为 20GHz 的 1010RZ 信号通过一个 1:1 耦合器(OC)分为两路,当 RZ 信号的脉宽较窄(8.3ps 左右)时,调整两分路中的光纤延时线和衰减器,可以很容易地将 20GHz 信号复用成 40GHz 信号.复用得到的 40GHz 信号质量并不高,比如它的脉宽较宽、消光比较低、各个光脉冲之间幅度不等、存在多种频率成分等等.复用得到的 40GHz 光脉冲通过 3dB 耦合器被注入由单端 SOA 构成的环腔中.单端 SOA 不仅作为增益介质在锁模脉冲形成过程中为腔内提供足够增益,而且它也是实现主动锁模的光调制器.由于 SOA 的交叉增益调制(XGM)特性,SOA 的增益将被注入信号所调制.通过可调频率合成器来仔细地调节注入信号的重复频率,使其为环腔基频的整数倍,即可实现主动谐波锁模.锁模脉冲的中心波长由带通滤波器决定,通过 1:9 耦合器的 1 端口输出.通信分析仪(Tektronix CSA8000B)和光谱分析仪(Anritsu MS9710C)分别用来观测超短光脉冲的波形和光谱.

3. 理论模型

信号光耦合进单端 SOA,引起 SOA 的增益饱和,从而使环腔的增益受到信号光的调制.如果信号光的重复频率为环腔基频的整数倍,则环腔激光的探测光每次经过 SOA 时都会受到固定的增益调制.探测光在环腔中多次环形最终形成稳定的锁模脉冲输出,重复频率和信号光相同.

在忽略三阶非线性效应和放大自发复合引起的载流子消耗后,SOA 中的载流子速率方程和基本传输方程可表示为

$$\frac{\partial N(t, z)}{\partial t} = \frac{I}{eV} - \frac{N(t, z)}{\tau_s} - \sum_{w=p, c} \frac{\Gamma g_{N, w}(N(t, z) - N_0)}{h\nu_w A} |A_w(z)|^2 \quad (1)$$

$$\frac{dA_w(z)}{dz} = \frac{1}{2} [\Gamma g_{N, w}(N(t, z) - N_0) (1 - i\alpha) - \alpha_{int}] A_w(z), \quad (2)$$

式中 I 为 SOA 的偏置电流, e 为电子基本电荷量, V 为有源区体积, $N(t, z)$ 表示某一时刻 SOA 中 z 处的载流子浓度, $g_{N, w}$ 为对应特定波长的微分增益系数, $h\nu_w$ 是对应特定波长的光子能量, A_w 为光波电场的慢变化包络, $w = p$ 对应注入信号光, $w = c$ 对应环腔产生的探测光, A 为有源区横截面的面积, Γ 是模场限制因子, α 是线宽加强因子, α_{int} 为 SOA 的内部损耗系数.

利用 SOA 的分段模型,将 SOA 分为 n 个相等长度的子段,每一子段的长度为 Δz .可以近似地认为在每个子段中沿长度方向载流子浓度是均匀的.相应地把 A_w 以光波穿过每个 SOA 子段的时间为时间间隔在时间上进行分段.即 $\Delta t = \Delta z \times n_{eff}/c$.其中 n_{eff} 为 SOA 中有效折射率, c 为光速.在这个假设前提下,SOA 中第 i 子段的载流子速率方程和传输方程则可以写为

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{I}{eV} - \frac{N_i}{\tau_s}$$

$$- \sum_{w=p, e} \frac{\Gamma g_{N, w} (N_i - N_0)}{h\nu_w A} |A_{i, w}(z)|^2 \quad (3)$$

$$A_{i+1, w} = A_{i, w} \exp\left\{ \frac{1}{2} [\Gamma g_{N, w} (N_i - N_0) (1 - i\alpha) - \alpha_{int}] \times \Delta z \right\}, \quad (4)$$

N_i 表示第 i 子段的载流子浓度, $A_{i, w}$ 表示通过第 i 子段光波的慢变化包络。

使用经典四级四阶龙格-库塔方法解方程(3), (4), 可以解出探测光在环腔中环形一圈后的波形 A_1 。根据谐波锁模条件, 注入光信号的频率应为环腔基频的整数倍, 这意味着探测光在环腔中环形一圈的时间应为 SOA 中载流子浓度变化周期的整数倍, 因此可以用迭代的方法, 以 A_1 为初值, 代入方程(3)(4), 用同样的方法解出探测光环形两圈后的波形 A_2 。再以 A_2 为初值, 计算出探测光环形三圈后的波形 A_3 ……这样迭代下去最终会得到一个稳定的波形输出, 这时环腔输出的就是稳定的锁模脉冲。利用这个模型可以模拟环腔锁模的过程并分析锁模脉冲在时域和频域内的特性。

4. 结果和讨论

利用上述理论模型, 对 10—40GHz 的锁模过程进行了模拟, 并从时域和频域两个方面分析了锁模脉冲的特性。计算中的参数如表 1 所示。

表 1 理论计算所用的参数

有源区长度 L/m	1.0×10^{-3}
有源区宽度 w/m	2.0×10^{-6}
有源区厚度 d/m	0.1×10^{-6}
载流子有效寿命 τ_s/ps	270
微分增益系数 g_N/m^2	5.0×10^{-20}
有源区内部损耗 α_{int}/m^{-1}	4.0×10^3
注入信号光波长 λ_p/nm	1550
SOA 分段数 n	10
滤波器中心波长 λ_{cen}/nm	1545
线宽加强因子 α	3.5
透明载流子浓度 N_0/m^{-3}	1.0×10^{24}
模场限制因子 Γ	0.35
环腔中无源器件损耗 $\epsilon(\lambda)/dB$	3

图 2—图 4 分别模拟的是 10—40 GHz 锁模脉冲

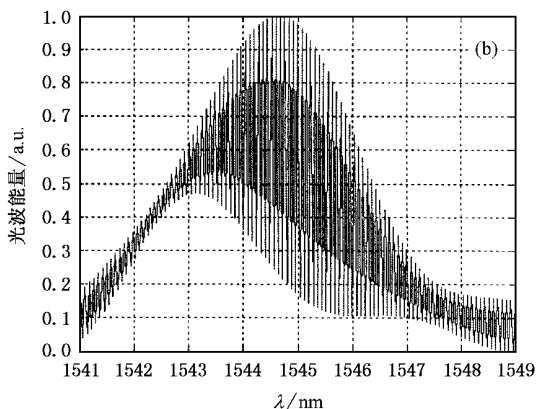
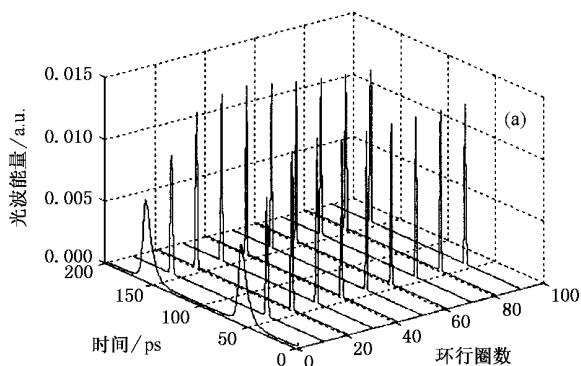


图 2 10GHz 锁模脉冲的模拟 (a) 时域内锁模脉冲建立的过程 (b) 稳定锁模脉冲频域内波形

在时域中形成的过程, 以及稳定的锁模脉冲在频域内的波形。注入信号光的波长为 1550nm, 峰值功率为 13mW。10GHz, 20GHz, 40GHz 锁模脉冲对应的 SOA 偏置电流为 200mA, 250mA, 300mA。这是因为随着脉冲重复频率的提高, SOA 增益恢复的时间也越来越小, 为了给环腔提供足够的增益, 必须提高 SOA 的偏置电流。这点是和实验结果相符合的。从图 2—图 4 可以看到, 随着环腔所产生的探测光在环腔中循环的圈数增加, 脉冲的宽度逐渐变窄, 峰值功率逐渐变大, 最后大约在第 30—40 圈时会形成稳定的锁模脉冲。10—40GHz 稳定锁模脉冲在时域内的脉宽

逐渐减小, 而在频域内的谱宽则逐渐变大, 这也是和理论相符合的^[9]。值得注意的是, 随着探测光不断通过 SOA, 探测光的中心波长会有一些的漂移, 这是由 SOA 中的非线性效应引起的^[10]。在模拟过程中还发现, 加大 SOA 的偏置电流, 可以加快形成锁模的速度, 提高锁模脉冲的能量, 但是由于 SOA 中的非辐射复合等多种因素影响, 偏置电流并不能无限加大。

实验中环腔有效长度为 21m, 对应环腔的基频 $f_r = 9.5238MHz$ 。当注入光信号的重复频率为 f_r 整数倍时, 即可产生谐波锁模。在我们的实验中, 通过细微的调整注入光信号的重复频率和功率, 得到了重

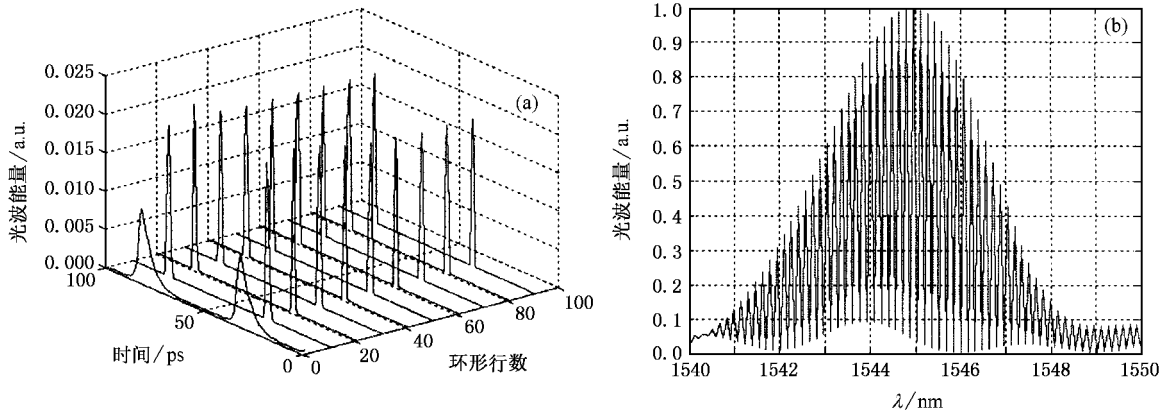


图3 20GHz 锁模脉冲的模拟 (a) 时域内锁模脉冲建立的过程 (b) 稳定锁模脉冲频域内波形

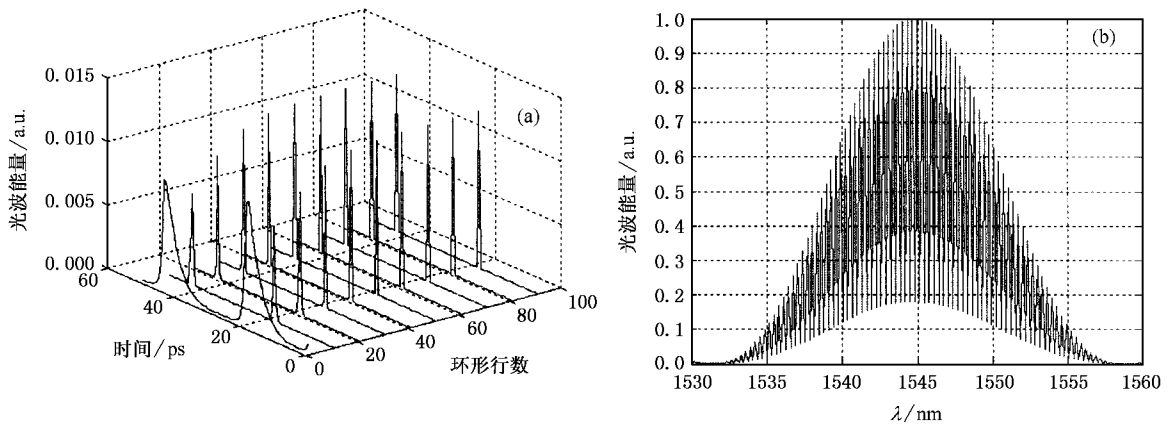


图4 40GHz 锁模脉冲的模拟 (a) 时域内锁模脉冲建立的过程 (b) 稳定锁模脉冲频域内波形

复频率在 10—40GHz 之间连续可调的稳定锁模光脉冲.图 5 是利用上文所述的实验装置实现 10—40GHz 重复频率的锁模脉冲的实验结果.图中 Power 为锁模脉冲的能量 λ 为锁模脉冲的波长.图 5 (a₁), (b₁), (c₁) 分别表示 10GHz, 20GHz, 40GHz 锁模脉冲的光谱 (a₂), (b₂), (c₂) 则分别表示 10GHz, 20GHz, 40GHz 锁模脉冲的波形.从图 5 可以看到,当锁模脉冲的重复频率为 10GHz 和 20GHz 时,脉冲的峰值功率约有 1mW;当重复频率提高到 40GHz 时,脉冲峰值功率约为 0.6mW.这是因为随着重复频率的提高,SOA 载流子浓度恢复的时间会缩短,从而 SOA 的增益降低,导致了高重复频率的锁模脉冲能量会有所下降.由于通信分析仪的光探头响应速度的限制,重复频率大于 40GHz 的超短光脉冲的脉宽并不能正确的显示出来,但是可以综合光谱图和波形图估计出脉冲的脉宽在 10ps 以下.需要指出的是注入信号光的功率对实验结果有很大的影响.当注入信号光的功率过大时会使 SOA 的增益饱和,从而 SOA

对环腔的增益失去了调制作用,这时环腔没有锁模的光脉冲输出;若注入信号光功率过小,这时 SOA 对环腔所产生的探测光仅仅只是放大的作用,环腔同样不会输出锁模脉冲.因此,在信号光注入环腔前,用一个可调谐光衰减器来调整功率,将其功率大小调整至最适合发生锁模的功率.

实验中使用的带通滤波器可调范围为 1530—1560nm, 3dB 带宽为 1.6nm,因此锁模脉冲的波长在 1530—1560nm 之间连续可调.图 6、图 7 分别是 40GHz 锁模脉冲的 3dB 谱宽、消光比和波长之间的关系.可以看到 40GHz 锁模脉冲的 3dB 谱宽在 0.413—0.66nm 之间变化.当脉冲的波长为 1548nm 时,消光比达到最大,约为 11.5dB.这是由 SOA 的增益曲线特性决定的.

有理论证明^[9],如果滤波器的带宽适当增大,锁模的结果会更加理想.但是我们在实验中发现,如果滤波器带宽过大,由于 SOA 增益的限制,环腔激光器不能正常激射,无法得到锁模脉冲.这时必须在环

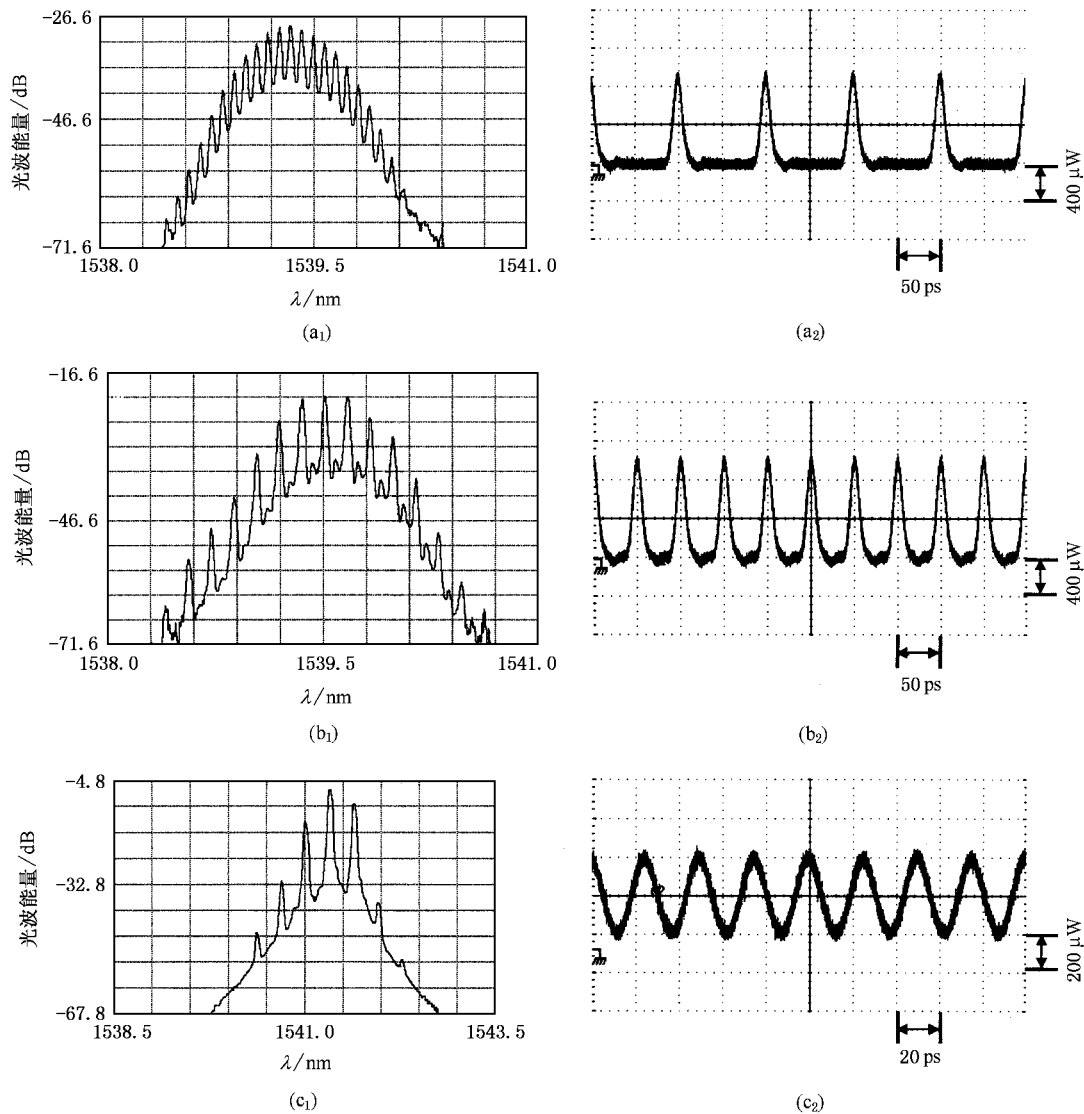


图5 10—40GHz 锁模脉冲 (a₁)10GHz 锁模脉冲光谱 (a₂)10GHz 锁模脉冲波形 (b₁)20GHz 锁模脉冲光谱 (b₂)20GHz 锁模脉冲波形 (c₁)40GHz 锁模脉冲光谱 (c₂)40GHz 锁模脉冲波形

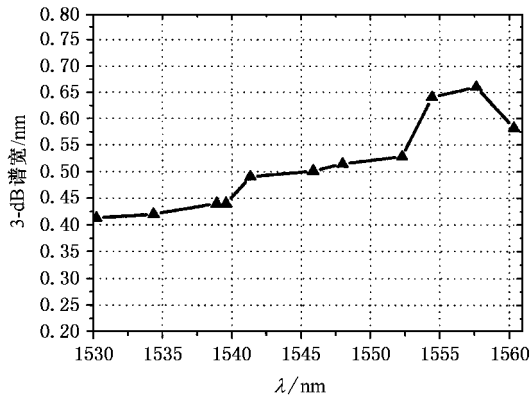


图6 40GHz 锁模脉冲的 3dB 谱宽和波长的关系

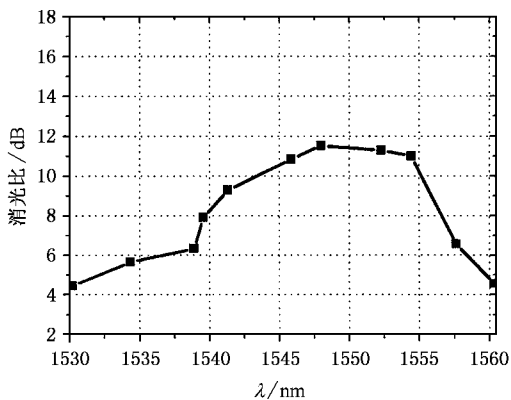


图7 40GHz 锁模脉冲的消光比和波长的关系

腔中加入 EDFA 来增加环腔的增益从而实现锁模. 但这样加长了环腔的长度, 使锁模激光器稳定性受到影响.

5. 结 论

本文提出一种基于单端 SOA 的注入型主动锁

模激光器产生超短光脉冲的方案. 对该方案建立了相应的理论模型, 研究了锁模脉冲在时域内形成的过程和频域内的特性. 在实验中得到了 10—40GHz 的稳定锁模脉冲, 波长可调谐范围达 30nm. 该方案具有重复频率和波长连续可调谐, 消光比高, 稳定性好等优点, 具有进一步研究的价值.

- [1] Wu C , Dutta N K 2000 *IEEE J. Quantum Electron* **36** 145
- [2] Choi K H , Seo D S , Jang C W *et al* 2001 *The 14th Annual Meeting of the IEEE* **12** 717
- [3] Wang L , Yu J L , Ma X H *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 876 (in Chinese) 王 林、于晋龙、马晓红等 1999 *物理学报* **48** 876]
- [4] Guy M J , Taylor J R , Moodie D G *et al* 1996 *Electron. Lett.* **32** 2240
- [5] Peng C , Yao M Y , Zhang H M *et al* 2003 *Chinese Journal of Lasers* **30** 101 (in Chinese) 彭 璨、姚敏玉、张洪明等 2003 *中国激光* **30** 101]
- [6] Schares L , Occhi L , Guekos G *et al* 2002 *IEEE Lasers and Electro-Optics* **1** 56
- [7] Zhang X L , Huang D X , Sun J Q *et al* 2001 *Chin. Phys.* **10** 124
- [8] Dong J J , Zhang X L , Huang D X *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 763 (in Chinese) 董建绩、张新亮、黄德修等 2005 *物理学报* **54** 763]
- [9] Kuizenga D J , Siegman A 1970 *IEEE J. Quantum Electron* **QE-6** 694
- [10] Antonio M , Jesper M *et al* 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 761

Tunable ultra-short optical pulse source based on reflective semiconductor fiber ring laser^{*}

Xu Fan Zhang Xin-Liang Liu De-Ming Huang De-Xiu

(Department of Optoelectronic Engineering , Huazhong University of Science and Technology & Wuhan National Laboratory for Optoelectronics , Wuhan 430074 , China)

(Received 31 March 2005 ; revised manuscript received 8 May 2005)

Abstract

Ultra-short optical pulse source is one of key components in optical time-division multiplexing(OTDM) system. In this paper , a wavelength and repetition rate tunable actively mode-locked fiber ring laser based on cross-gain modulation in a reflective Semiconductor Optical Amplifier(SOA) is demonstrated. Theoretical model for this scheme is also established and output characteristics are calculated. Stable picosecond pulse trains with high extinction ratio at 10—40 GHz repetition rate are obtained. 30nm wavelength tuning range is also achieved in our proposed actively mode-locked laser.

Keywords : ultra-short pulse , reflective semiconductor optical amplifier , active mode locking

PACC : 4260F , 4265K , 4265G

* Project supported by the State Key Development Programme for Basic Research of China(Grant No. G2000036605) , the National High Technology Development Programme of China(Grant No. 2002AA312160) , the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 60407001) and the Program for New Century Excellent Talents in University.