

文章编号: 0253-2239(2009)04-0892-05

基于半导体光放大器结合延迟干涉仪的全光波长转换

赵晓凡 潘时龙 杨彦甫 娄采云 高以智 章恩耀

(清华信息科学与技术国家实验室(筹), 集成光电子学国家联合重点实验室)
清华大学电子工程系, 北京 100084

摘要 研究了基于半导体光放大器(SOA)结合延迟干涉仪(DI)结构的全光波长转换。分析了 SOA-DI 结构的工作原理和 DI 参数的作用,进行了 10 Gb/s 和 40 Gb/s 归零码全光波长转换实验研究。实验结果表明,基于 SOA 中交叉增益调制(XGM)效应实现的波长转换为反相转换,输出信号消光比较低,当工作速率较高时波长转换信号质量明显恶化。而 SOA-DI 结构可实现同相波长转换并可改善波长转换信号的消光比,从而改善单个 SOA 实现波长转换的性能并提高系统的工作速率,该结构还具有结构简单、可光子集成等优点。

关键词 光通信; 半导体光放大器; 延迟干涉仪; 波长转换

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092904.0892

All-Optical Wavelength Conversion Based on Semiconductor Optical Amplifier and Delay Interferometer

Zhao Xiaofan Pan Shilong Yang Yanfu Lou Caiyun Gao Yizhi Zhang Enyao

(*Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology (Prepared),
State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics,
Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract An investigation of all-optical wavelength conversion based on semiconductor optical amplifier (SOA) and delay interferometer (DI) scheme is presented. The working principle of SOA-DI configuration is explained and the functions of DI parameters are analyzed. Experiments of wavelength conversion at 10 Gb/s and 40 Gb/s for return-to-zero format are demonstrated. The experimental results show that wavelength conversion exploiting cross-gain modulation leads to reversed polarity and degradation of extinction ratio (ER) for the converted signal, and the performance of the wavelength conversion at a high bit rate is degraded. In addition, the results show that the wavelength conversion based on SOA-DI scheme can preserve the data polarity and improve the ER of the converted signal so that the performance of wavelength conversion using one single SOA is improved and the system can operate at a high bit rate. The SOA-DI scheme has advantages of compactness and photonic integration potential.

Key words optical communications; semiconductor optical amplifier (SOA); delay interferometer (DI); wavelength conversion

1 引言

构建高速大容量、透明灵活的全光网络是光通信技术发展的趋势。全光波长转换作为光网络中的关键技术可直接在光域实现波长的再利用,降低网络的阻塞率从而提高光网络的灵活性和可扩展性。

目前全光波长转换主要依靠光纤和半导体器件中的非线性效应实现。利用光纤实现波长转换主要利用光纤中的交叉相位调制(XPM)效应^[1]和四波混频(FWM)效应^[2]。基于光纤非线性效应实现波长转换的优点是响应速度快,可工作在很高的速率,但其

收稿日期: 2008-08-15; **收到修改稿日期**: 2008-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(60736036)、北京邮电大学教育部重点实验室开放课题和国家 863 计划(2009AA01Z256)资助课题。

作者简介: 赵晓凡(1982—),男,博士研究生,主要从事光信号处理技术方面的研究。

E-mail: zhaoxf@mails. tsinghua. edu. cn

导师简介: 娄采云(1946—),女,教授,博士生导师,主要从事高速光通信系统方面的研究。

E-mail: loucy@ee. tsinghua. edu. cn

缺点也十分明显,由于光纤的非线性系数较小,实现波长转换一般需要较长的光纤和较高的控制光功率,这将导致系统的不稳定且不易于实现光子集成。常见的用于实现波长转换功能的半导体器件有电吸收调制器(EAM)和半导体光放大器(SOA)。反向偏压下的 EAM 吸收系数很大,在强控制光入射的情况下,EAM 的吸收系数首先会减小然后迅速恢复,从而形成一个时域上的开关窗。EAM 实现波长转换码型效应小,但由于它是一个吸收型器件,通常需要在输出端用低噪声放大器对输出信号进行放大。基于 SOA 的波长转换主要利用其中的交叉增益调制(XGM)、XPM、FWM 和交叉偏振调制等效应。由于 SOA 的载流子恢复时间一般为数百皮秒,因此基于 XGM 效应实现的波长转换具有严重的码型效应,当工作速率较高时会导致信号消光比严重恶化,XGM 波长转换的另外一个缺点是转换信号一般具有较大的啁啾,不利于信号的后续传输。为了克服载流子恢复时间产生的工作速率瓶颈,研究者们提出了注入辅助光^[3]、XPM 效应结合蓝移滤波^[4]等方法来减小 SOA 载流子恢复时间,利用这些技术可以有效减小 SOA 的码型效应。另一种提高 SOA 器件工作速率并改善输出信号消光比的方法是采用干涉结构,主要结构有 SLALOM 型^[5]、Mach-Zehnder (MZI)型^[6]以及延迟干涉(DI)型^[7,8]等。在这类方案中 XPM 效应起主导作用,控制光通过改变 SOA 中的载流子浓度和折射率来控制干涉结构中两路信号的相位差,再通过干涉形成一个时域上的开关窗口。这类方案的特点是控制光需要的能量很小并且可以实现高速操作。以上这些方案中,SOA-DI 结构只使用单个 SOA,操作简单且稳定性高,该结构还被证明可以提高 SOA 的调制带宽^[9]且具有对信号的再生功能^[10,11],因而受到研究者的广泛关注。SOA-DI 结构可被看作一个光开关,其中 SOA 和 DI 分别起移相器和滤波器的作用,与

XPM 效应结合窄带滤波方法相比,该方案由于没有使用窄带滤波器,波长转换后的信号不会明显展宽。本文对 SOA-DI 结构光开关进行了研究,分析了 SOA-DI 结构的工作原理和 DI 参数的作用。利用 SOA-DI 结构进行了 10 Gb/s 和 40 Gb/s 的全光波长转换实验,实验结果表明基于 XGM 效应实现的波长转换为反相变换,输出信号消光比较差,当工作速率为 40 Gb/s 时转换信号质量恶化,而基于 SOA-DI 的波长转换为同相变换,输出信号具有较高消光比,利用该结构可以提高单个 SOA 波长转换的性能。

2 工作原理

SOA-DI 光开关的典型结构如图 1 所示,波长不同的连续光和归零码(RZ)信号光分别作为探测光和控制光经 3 dB 耦合器输入 SOA。SOA 的输出端放置光滤波器用于滤除控制光和 SOA 的放大自发辐射(ASE)噪声,经过滤波器后的探测光输入 DI。在 DI 模型中,输入信号首先经 3 dB 耦合器分成两路,一路信号经历 $\Delta\tau$ 的延时,另一路经历 $\Delta\phi$ 的附加相移,在输出端两路信号通过分光比为 $\gamma:(1-\gamma)$ (γ 为分光系数)的耦合器干涉输出。在 SOA-DI 结构中,SOA 作为非线性介质,控制光通过改变 SOA 的增益和折射率对探测光进行幅度和相位调制。控制光分别为 0 码和 1 码时探测光获得的增益和产生的非线性附加相移不同。当控制光为 0 码时 SOA 的增益变化较小,探测光幅度变化和获得的非线性相移较小,经 DI 后可完全相消。当控制光为 1 码时会使 SOA 的增益经历一个先快速饱和后缓慢恢复的过程,与此同时探测光的相位经历一个相似的变化过程。探测光经过 DI 时,一路信号相对另一路信号有固定的延时 $\Delta\tau$,这使得两路信号产生一定的相位差,经耦合器干涉后会产生宽度为 $\Delta\tau$ 的窗口,移相器可用于优化相位差的大小使得干涉结果最佳。

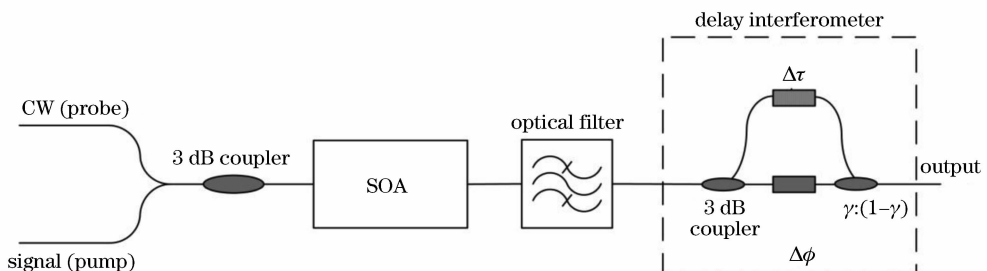


图 1 半导体光放大器-延迟干涉仪(SOA-DI)光开关原理图

Fig. 1 Working principle of the SOA-DI configuration

DI 的传输函数可描述为

$$H(\omega) = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1-\gamma} \exp(-i\omega\Delta\tau) + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\gamma} \exp[i(\Delta\phi + \pi)], \quad (1)$$

由(1)式可知,DI 传输函数随信号频率周期性变化,变化周期由 $\Delta\tau$ 的倒数决定。由(1)式可得 DI 的透过率 $|H(\omega)|^2$, 如图 2 所示。

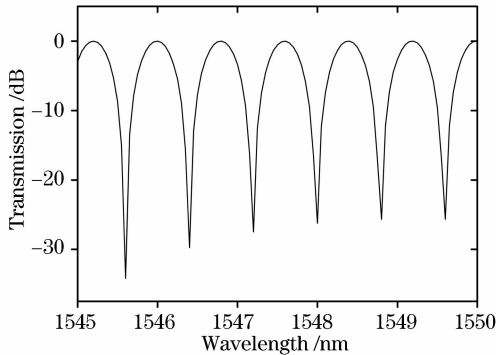


图 2 DI 透过率曲线

Fig. 2 Transmission curve of DI

可以看出 DI 的作用相当于周期性滤波器。滤波器透过峰的位置可通过调节相移 $\Delta\phi$ 来改变。耦合器的分光系数 γ 决定了滤波器的陡峭程度,当耦合器的分光系数 $\gamma=0.5$ 时滤波器最为陡峭,在某些波长发生完全相消干涉。当 $\gamma=0$ 或 $\gamma=1$ 时,其中一路信号完全通过,DI 仅起到对信号移相或延时的作用。利用 SOA-DI 结构进行波长转换时,控制光为 1 码时对探测光的 XPM 作用较强,探测光获得较大的非线性相移并产生较大频率啁啾,其下降沿由于增益饱和产生红移啁啾,而上升沿由于增益缓慢恢复产生蓝移啁啾;控制光为 0 码时对探测光的 XPM 作用较弱,探测光获得的非线性相移和产生的

啁啾很小。当 SOA-DI 用于实现波长转换时,调节 DI 使探测光波长位于 DI 透过率最小值附近,这使得当控制光为 1 码时探测光由于具有较大频率啁啾而有较大透过率,当控制光为 0 码时探测光频率啁啾较小而透过率很低,其能量被极大地抑制,这样经 DI 输出得到的是具有高消光比、与控制光同相的波长转换信号。

3 实验结果与讨论

基于上述分析,对 10 Gb/s 和 40 Gb/s 的全光波长转换进行了实验研究。实验装置如图 3 所示,可调谐 DFB 激光器产生中心波长为 1549.4 nm 的连续光作为探测光。中心波长为 1543.9 nm 码长为 $2^{31}-1$ 的 10 Gb/s 数据信号的产生原理基于文献[12]中的报导,复用器将 10 Gb/s 数据信号复用成 40 Gb/s 信号,数据信号作为控制光与探测光经 3 dB 耦合器输入 SOA,控制光与探测光功率均通过可变衰减器进行调节。在 SOA 的输出端,3 dB 带宽为 1 nm 的可调谐光滤波器(BPF)的中心波长与探测光的中心波长重合,用于滤除控制光和 SOA 的 ASE 噪声,实验中使用的 DI 类似于文献[7]中的结构,由两个偏振控制器(PC)、可变微分群时延(DGD)元件以及起偏器(polarizer)组成。

在 10 Gb/s 波长转换实验中,SOA 的工作电流为 250 mA,输入控制光和探测光功率分别为 -3.8 dBm 和 -1.8 dBm,DI 延时为 10.2 ps。输入的控制光信号眼图如图 4(a)所示,图 4(b)为利用 SOA 中 XGM 效应得到的波长转换信号的眼图。可以看出,XGM 波长转换为反相转换,信号的消光比较低且上升沿带有明显的“拖尾”,这是由于 SOA 载流子恢复时间较长导致。图 4(c)为相同条件下

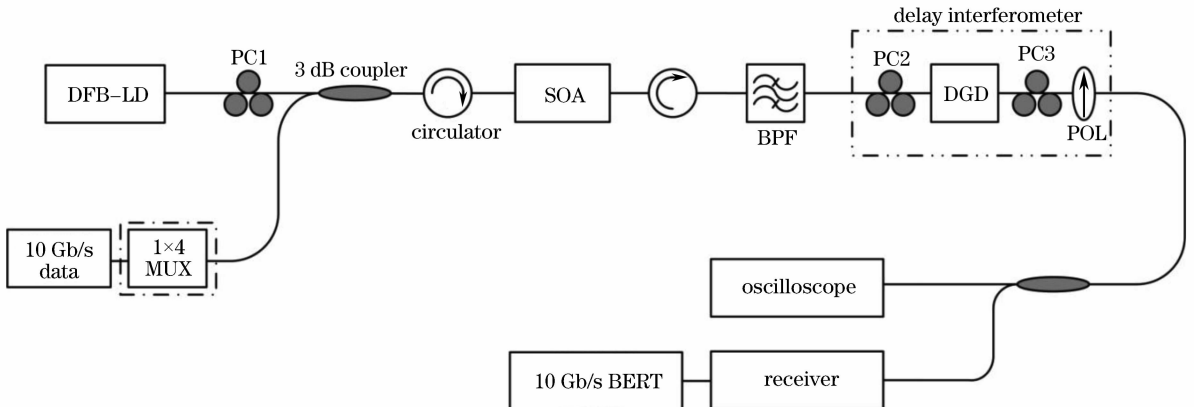


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup

SOA-DI 波长转换信号的眼图,此时得到的是同相波长转换。与图 4(b)相比,转换信号的直流分量被明显抑制,消光比得到改善。图 5 为 DI 延时分别取 11.2 ps 和 15 ps 时得到的波长转换信号眼图。图 6 为 DI 延时取 10.2 ps/11.2 ps/15 ps 时 SOA-DI 波

长转换信号的误码率曲线,误码率为 1×10^{-9} 时波长转换的功率代价约为 2 dB,这说明当 DI 延时在合适范围内取值时都可以得到质量较好的波长转换信号,相同条件下利用 XGM 效应实现的波长转换功率代价大于 10 dB。

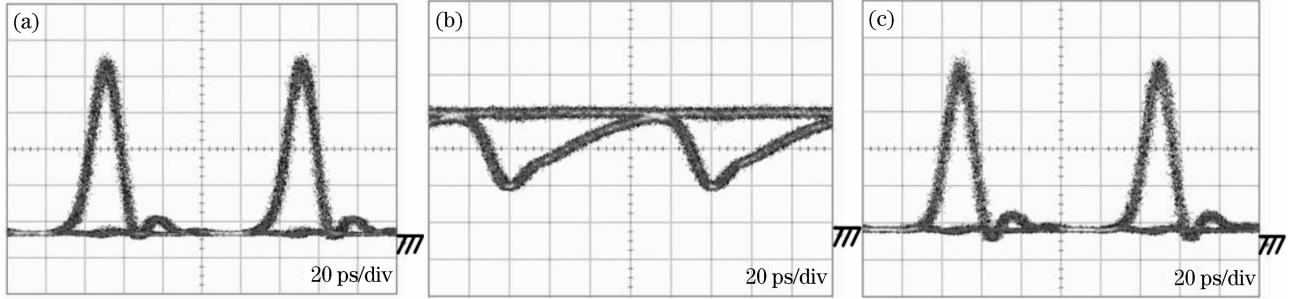


图 4 10 Gb/s (a)原始信号;(b)交叉增益调制转换信号;(c)半导体光放大器-延迟干涉仪转换信号的眼图
Fig. 4 Eyediagram of (a) original signal; (b) converted signal based on XGM; (c) converted signal based on SOA-DI at 10 Gb/s

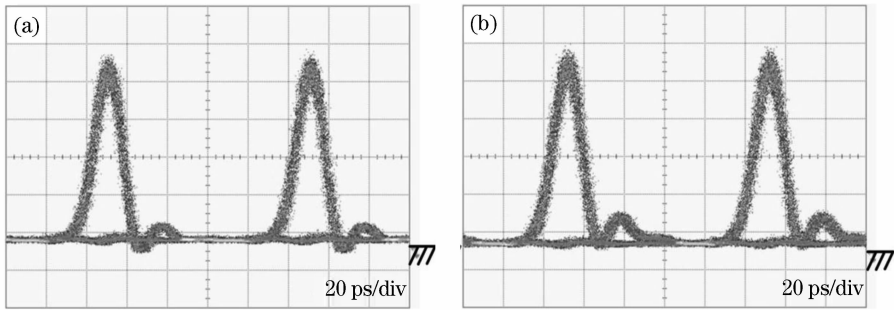


图 5 延迟干涉仪延时分别为(a)11.2 ps 和(b)15 ps 时半导体光放大器-延迟干涉仪波长转换信号的眼图
Fig. 5 Eye diagram of converted signal with DI delay of 11.2 ps (a) 15 ps (b)

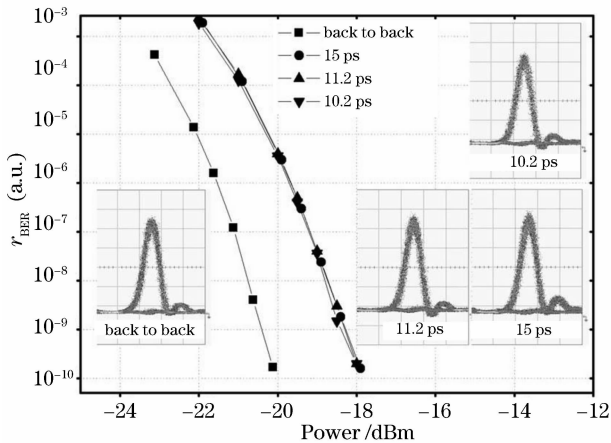


图 6 10 Gb/s SOA-DI 波长转换误码率曲线
Fig. 6 Bit error rate of converted signal based on SOA-DI at 10 Gb/s

行了 40 Gb/s 波长转换实验。SOA 的工作电流为 300 mA,信号光和探测光的波长分别为 1536.8 nm 和 1549.4 nm,功率分别为 5 dBm 和 1.45 dBm,采用的 DI 延时为 5.7 ps。复用得到的 40 Gb/s 信号眼图如图 7(a)所示,图 7(b)为 XGM 波长转换信号的眼图,可以看出转换信号的消光比较低,眼图张开度较差。与图 4 中 10 Gb/s 波长转换结果相比,信号质量明显恶化。由于 SOA 的载流子恢复时间要远大于一个比特周期(25 ps),因此 SOA 的增益动态范围较 10 Gb/s 时明显减小,导致波长转换信号消光比恶化。图 7(c)为经 DI 后得到的波长转换信号眼图,与图 7(b)相比,转换信号的消光比明显提高,眼图张开度变大,这说明 SOA-DI 结构可以提高波长转换信号消光比并改善波长转换的性能。

为了研究工作速率对波长转换性能的影响,进

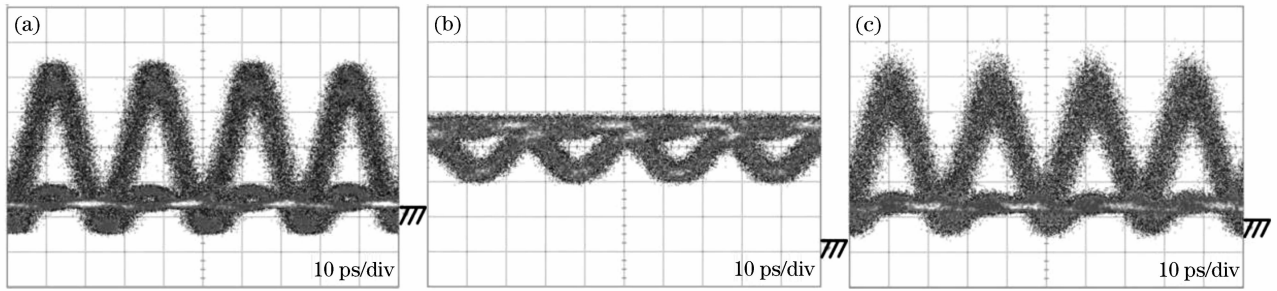


图 7 40 Gb/s (a)原始信号,(b)交叉增益调制转换信号,(c)半导体光放大器-延迟干涉仪转换信号的眼图

Fig. 7 Eye diagram of (a)original signal; (b) converted signal based on XGM; (c) converted signal based on SOA-DI at 40 Gb/s

4 结 论

研究了基于半导体光放大器结合延迟干涉结构的全光波长转换。分析了 SOA-DI 结构的工作原理和 DI 参数的作用。利用 SOA-DI 结构进行了 10 Gb/s 和 40 Gb/s 归零码全光波长转换实验,实验结果表明基于 XGM 效应实现的波长转换为反相转换,转换信号消光比较低,当工作速率提高时信号质量明显恶化。而基于 SOA-DI 结构实现的波长转换为同相转换,得到的波长转换信号具有较高的消光比,信号质量较 XGM 波长转换信号明显改善,且当 DI 延时量在合适范围内取值时均可得到质量较高的转换信号,上述结果证明利用 SOA-DI 结构可以改善单个 SOA 实现波长转换的性能。

参 考 文 献

- 1 K. J. Blow, N. J. Doran, B. P. Nelson. Demonstration of the nonlinear fibre loop mirror as an ultrafast all-optical demultiplexer [J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(14): 962~964
- 2 P. O. Hedekvist, M. Karlsson, P. A. Andrekson. Fiber four-wave mixing demultiplexing with inherent parametric amplification[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(11): 2051~2058
- 3 M. Usami, M. Tsurusawa, Y. Matsushima. Mechanism for reducing recovery time of optical nonlinearity in semiconductor laser amplifier[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(21): 2657~2659
- 4 Y. Liu, E. Tangdongga, Z. Li *et al.*. Error-free all-optical wavelength conversion at 160 Gb/s using a semiconductor optical amplifier and an optical bandpass filter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1): 230~236
- 5 J. P. Sokoloff, P. R. Prucnal, I. Glesk *et al.*. A terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD) [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(7): 787~790
- 6 T. Durhuus, C. Joergensen, B. Mikkelsen *et al.*. All optical wavelength conversion by SOA's in a Mach-Zehnder configuration [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(1): 53~55
- 7 Y. Ueno, S. Nakamura, K. Tajima *et al.*. 3.8-THz wavelength conversion of picosecond pulses using a semiconductor delayed-interference signal-wavelength converter (DISC) [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(3): 346~348
- 8 J. Leuthold, C. H. Joyner, B. Mikkelsen *et al.*. 100 Gbit/s all-optical wavelength conversion with integrated SOA delayed-interference configuration [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(13): 1129~1130
- 9 M. L. Nielsen, J. Mork. Increasing the modulation bandwidth of semiconductor-optical-amplifier-based switches by using optical filtering [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(9): 1606~1619
- 10 S. Bischoff, B. Lading, J. Mork. BER estimation for all-optical regenerators influenced by pattern effects [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(1): 33~35
- 11 J. Leuthold, B. Mikkelsen, R. E. Behringer *et al.*. Novel 3R regenerator based on semiconductor optical amplifier delayed-interference configuration [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(8): 860~862
- 12 Zhou Hongbo, Lou Caiyun, Pan Shilong *et al.*. Ultra-short pulse source based on phase and intensity hybrid modulation [J]. *J. Tsinghua University (Sci & Tech)*, 2008, **48**(4): 538~540
周鸿波, 娄采云, 潘时龙等. 基于相位-强度调制的超短光脉冲源 [J]. *清华大学学报*, 2008, **48**(4): 538~540