

# 采用外调制方式产生 5 Gbit/s 的 非归零码光脉冲\*

余建军<sup>1,2</sup> 杨伯君<sup>1</sup> 管克俭<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>北京邮电大学基础科学部 <sup>2</sup>北京邮电大学电信工程学院 北京 100088)

**提要** 采用外调制方式得到了重复频率为 5 GHz 的非归零码光脉冲。采用二次谐波强度自相关法测量了光脉冲。对实验中的关键技术进行了理论和实验研究。

**关键词** M-Z 型 Ti·LiNbO<sub>3</sub> 强度调制器, 非归零码, 二次谐波自相关强度

## 1 引 言

用高频信号直接调制激光器产生的光信号具有较大的频率负啁啾, 这种负啁啾在反常色散光纤中传输时将会引起光脉冲的时域展宽, 从而引起相邻脉冲之间的串扰, 降低了整个系统的性能。采用外调制可以得到啁啾接近于零或啁啾为正啁啾的光脉冲, 这将大大提高光系统的性能。另外如果对这种高重复频率的非归零码进行处理, 能够得到抖动很小、脉冲宽度为几皮秒、接近变换极限的光脉冲, 这种光脉冲对高速时分复用将是很理想的。人们对采用 M-Z 型 Ti·LiNbO<sub>3</sub> 强度调制器进行了广泛的研究<sup>[1~5]</sup>。文献[5]采用 M-Z 型 Ti·LiNbO<sub>3</sub> 强度调制器作外调制得到了 10 Gbit/s 的光脉冲并进行了 10 Gbit/s×8 的波分复用信号传输。文献[3]采用外调制进行了 2.4 Gbit/s 50 km 的传输实验。本文对采用 M-Z 型 Ti·LiNbO<sub>3</sub> 强度调制器的原理进行了分析, 通过 M-Z 型 Ti·LiNbO<sub>3</sub> 强度调制器外调制方式得到 5 Gbit/s 的光脉冲, 并采用二次谐波强度自相关仪测量了这种脉冲, 并对实验中的现象进行了分析。

## 2 实验原理

### 2.1 调制器特性

我们采用 M-Z 型 Ti·LiNbO<sub>3</sub> 强度调制器的调制信号, 调制器的主要指标有半波电压、调制频率带宽、插入损耗以及光强输出特性。我们对这几个主要参量进行分析。

#### 2.1.1 半波电压

M-Z 型 Ti·LiNbO<sub>3</sub> 强度调制器简图如图 1 所示, 当两支路上有电压  $V$  时, 产生电场  $E_e$ , 电极间隔为  $g$ , 波导作用区长度为  $l$ 。对这种调制器主要考虑非常光影响, 由 Pockel 效应, 晶体在

\* 邮电部重点资助项目, 863 科技资助项目。

外加电场作用下, 折射率发生变化:

$$\Delta n_e = - \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_{\text{eff}} \tag{1}$$

式中  $n_e$  为波导非常光折射率,  $r_{33}$  为电光系数张量的一个元素,  $E_{\text{eff}}$  为作用区有效电场。在调制器单通道光的情况下, 光场  $E_0$  与电场  $E_e$  相互作用产生有效电场

$$E_{\text{eff}} = E_e \times \Gamma = \frac{V}{g} \times \Gamma \tag{2}$$

其中  $\Gamma = \frac{g}{V} \frac{\iint |E_0|^2 |E_e| d\Omega}{\iint |E_0|^2 d\Omega}$  为  $E_e$  和  $E_0$  的迭积分, 表征两者相互作用程度, 是一个无量纲系数, 一般为  $0 < \Gamma < 1$ , 其数值与特定调制器有关。折射率的变化使 M-Z 两支路产生的相位差

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi r_{33} l \Gamma}{g \lambda} n_e^3 V, \text{ 令 } a = g \lambda / (\Gamma r_{33} l), \text{ 得}$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{a} n_e^3 V \tag{3}$$

M-Z 型 Ti·LiNbO<sub>3</sub> 强度调制器是两个调相波相互作用形成调制波来实现的。当两个调相波相位差为  $\pi$  时对应的调制电压为半波电压  $V_\pi$ 。令  $\Delta\varphi = \pi$ , 代入(3) 式得

$$V_\pi = \frac{a}{2n_e^3} \tag{4}$$

### 2. 1. 2 输出光功率 P

光功率与光强成正比关系, 即  $I = P/A_{\text{eff}}$ , 式中  $A_{\text{eff}}$  为波导有效横截面积, 若输入光强为  $I_{\text{in}}$ , 测得输出光强  $I_{\text{out}}$

$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}} \sin^2 \Delta\varphi = I_{\text{in}} \sin^2 \left[ \frac{\pi V}{V_\pi} \right] = \frac{1}{2} I_{\text{in}} \left[ 1 - \cos \left[ 2\pi \frac{V}{V_\pi} \right] \right] \tag{5}$$

### 2. 1. 3 微波信号和直流电流的匹配

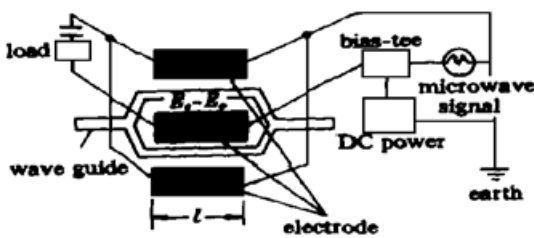


图 1 M-Z 型 Ti·LiNbO<sub>3</sub> 强度调制器的结构和微波电路

Fig. 1 The configuration of the M-Z Ti·LiNbO<sub>3</sub> modulator

电光调制的微波电压, 来自于微波信号源, 对于调制器需要加上直流电压偏压。所以, 既要保证微波, 还需要提供直流同时加到电极, 为了防止直流源与微波信号源之间的互相干扰, 两者之间必须隔离, 具有这种功能的微波电路如图 1 所示。由图 1 可知, 由于匹配负载与电极串联, 应当加上隔直电容, 防止直流电流经电极。因为如果电极上有直流通过, 必将引起热效应, 进而因发热导致晶体受损。同时, 电流通过电极时, 也必将通过微波信号源, 热效应同样会使微波信号源受损。

## 2. 2 光脉冲检测系统

光脉冲的形状一般采用示波器直接观测, 但是采用示波器存在着一些缺点。首先示波器测量的是电信号, 为了检测高频光脉冲, 必须先将光脉冲转换为电脉冲, 对于高频光信号我们需要一个带宽较宽的光电探测器。其次, 目前对于大于 1 GHz 的电信号, 一般采用取样的方式测量, 不能实时地观测脉冲形状。对于重复特性较好、抖动性小的皮秒光脉冲, 可以采用二次谐波强度自相关仪测量, 二次谐波强度自相关仪的原理在文献[6] 里有详细的论述。

### 3 实验装置

实验中采用的光源为 DFB 激光器, 为了使输出光强稳定, 对激光器采用了温控和功率控制。激光器频谱图如图 2 所示, 谱宽为 0.5 nm, 中心波长为 1555.7 nm, 阈值为 21 mA。当偏置电流为 40 mA 时, 激光器输出平均功率为 2mW。所用调制器为 M-Z 型 Ti·LiNbO<sub>3</sub> 强度调制器, 3 dB 的带宽为 6 GHz, 插入损耗为 10 dB, 半波电压较高为 12 V。在此实验中采用二次谐波自相关仪检测光脉冲, 我们研制的相关仪能测量的最大脉宽为 1000 ps, 通过改进技术, 此仪器的精度为 0.1 ps。由于用二次谐波自相关仪检测光脉冲只能测得光脉冲的自相关曲线, 因此必须经过一定的变换才能够测得光脉冲的宽度和曲线形状。

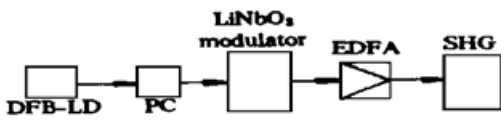


图 3 实验装置图

Fig. 3 The schematic diagram of the experimental setup

由于光脉冲经过调制器、偏振控制器和光纤接头损耗以后, 信号已经很小, 采用光纤放大器放大信号, 所用光纤放大器采用了两个 1480 nm 大功率半导体激光器作泵浦, 输出饱和功率为 9 dBm, 小信号增益为 30 dB, 信噪比小于 6 dB。为了将直流和交流信号一起调制, 在调制器上采用了一只 Bias-Tee, 所用 Bias-Tee 的带宽为 6 GHz。整个实验装置如图 3 所示, 因为使用的调制器与光偏振方向有一定的关系, 所以采用偏振控制器控制光的偏振方向。

### 4 实验结果和讨论

图 4 给出了实验采用的调制器的静态特性曲线, 可以看到当外加直流电压为 0 V 时, 输出的光信号最大, 当直流电压为 12 V 时, 输出光信号最小, 当再增大电压时, 输出光信号增大。可以看到此调制器的调制曲线与文献[7]的调制曲线不一致, 在文献[7]中当外加偏压为 0 V 时, 输出光信号最小, 而当外加偏压为半波电压时输出光功率最大。这与实验中所用的调制器的特性相反, 这是由于在制作 M-Z 型调制器的过程中, 由于工序复杂及不可避免的因素, 两支路长度不可能完全相等, 其有效截面积 ( $A_{eff}$ ) 也不可能完全相等, 所以器件上即使不加偏压, 也会两支路上产生一初始相位差, (3) 式可修改为

$$\Delta\varphi + \Delta\varphi_0 = \frac{2\pi}{a} n_e^3 V + \Delta\varphi_0 \tag{6}$$

因而输出光强

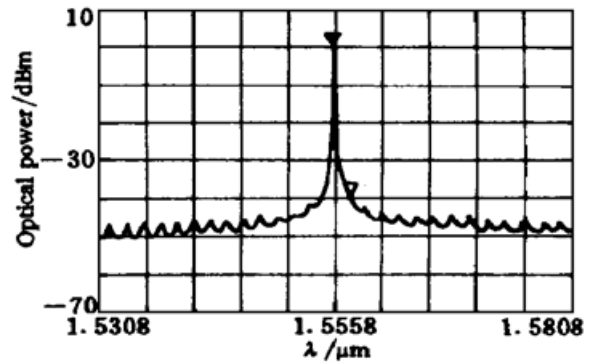


图 2 激光器静态光谱

Fig. 2 The static characteristic spectrum of a DFB-LD

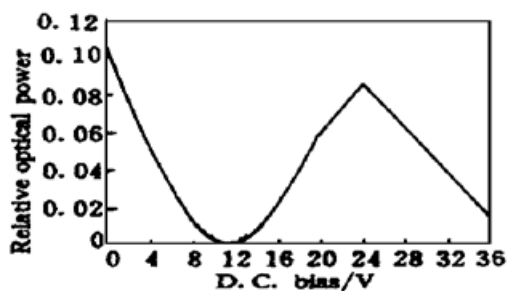


图 4 静态特性曲线

Fig. 4 The static characteristic of the DFB-LD

$$I = I_0 \sin^2(\Delta\varphi + \Delta\varphi_0) = \frac{1}{2} I_0 [1 - \cos(2\Delta\varphi + 2\Delta\varphi_0)] \quad (7)$$

比较(5) 和(7) 式可以发现, 实际波形横向位移为  $2\varphi_0$ , 从图 4 可以看出调制器的附加位相近似为  $\pi/2$ 。微波信号的波形可以用  $y = \sin(2\pi f t)$  表示, 微波信号的重复频率为 5 GHz, 微波信号最大输出功率为 735 mW, 由于调制器阻抗为 50  $\Omega$ , 所以最大微波信号相对于该阻抗的电压为 6 V。在实验中为了得到最大的输出光信号, 将微波信号的输出置为最大。改变偏压测得一系列自相关曲线。图 5 (a), (b) 分别为偏压为 4 V 和 7 V 时测量得到的典型自相关曲线, 可以看到光脉冲具有较好的重复性, 说明产生的信号抖动很小。测量得到的自相关曲线的幅度不同是

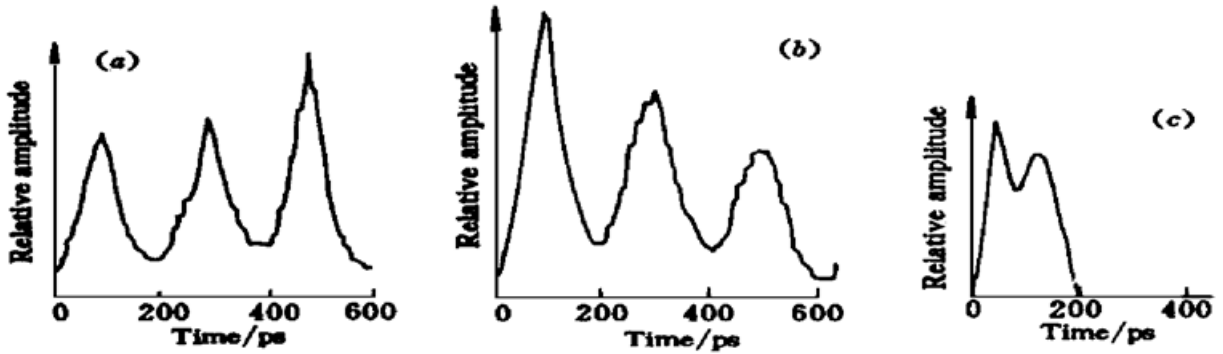


图 5 光脉冲的自相关曲线

(a) 偏压为 7 V; (b) 偏压为 11 V; (c) 偏压为 4 V

Fig. 5 The auto-correlation curve of the optical pulse

(a) D. C. bias= 7 V; (b) D. C. bias= 11 V; (c) D. C. bias= 4 V

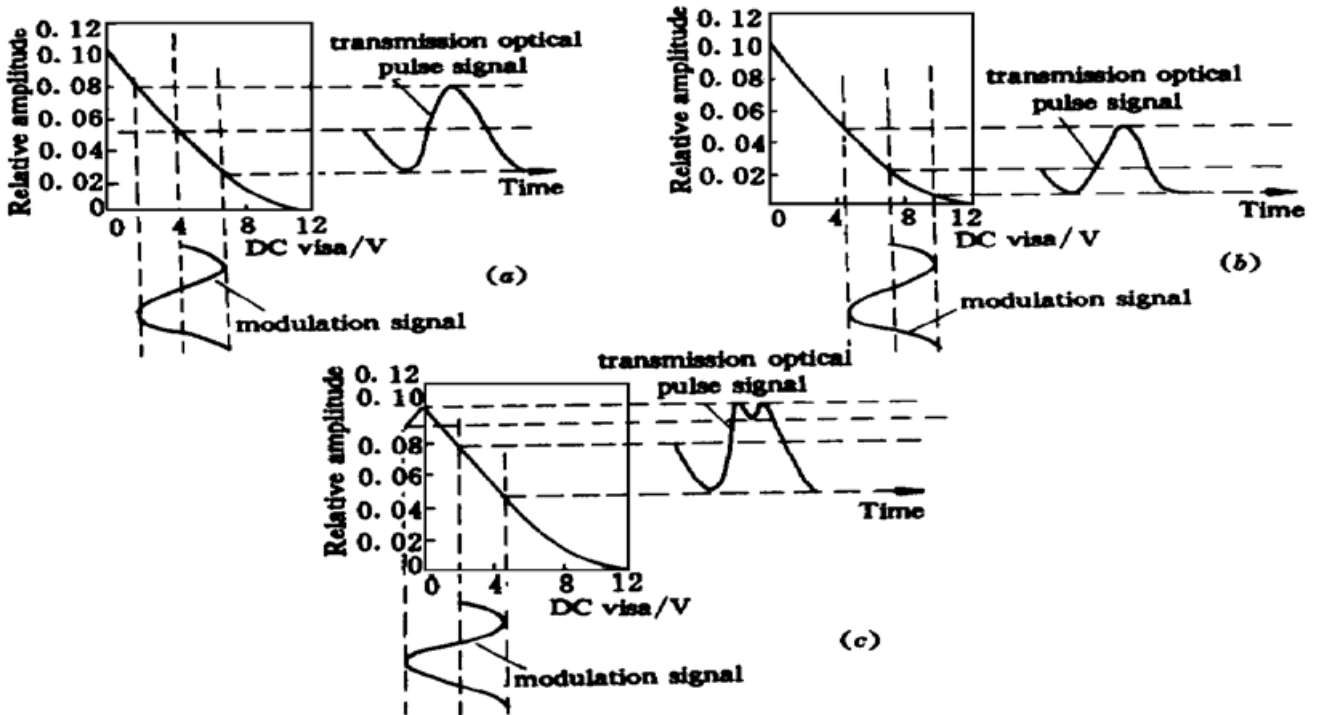


图 6 调制器的调制曲线

(a) 偏压为 7 V; (b) 偏压为 11 V; (c) 偏压为 4 V

Fig. 6 The modulation curve of the modulator

(a) D. C. bias= 7 V; (b) D. C. bias= 11 V; (c) D. C. bias= 4 V

由于自相关仪光路的不对称引起的。当偏压为 2 V 时, 测量得到的自相关曲线为图 5 (c), 可以看到基本上不能得到脉冲的自相关曲线。这可以用图 6 解释。可以看到当偏压比较适当时 (偏压为 4 V 和 7 V), 得到的光脉冲具有较好的形状。当偏压不适当时 (为 2 V), 产生的光脉冲将会严重失真。

**致谢** 作者感谢清华大学和中国科学院半导体所提供了部分实验设备。在实验过程中得到了杨启敏同学和张晓光副教授的帮助, 特此致谢。

### 参 考 文 献

- 1 John C. Cartledge. Performance of 10 Gb/s Lightwave systems based on lithium niobate Mach-Zehnder modulators with asymmetric Y-branch waveguides. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, 7(9) : 1090~1092
- 2 Eric A. Swanson, Stephen R. Chinn. 40 GHz pulse train generation using soliton compression of a Mach-Zehnder modulator output. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, 7(1) : 114~ 116
- 3 Xie Yong, Yang Zhixing, Liu Fenghai *et al.*. 2.4 Gb/s optical fiber transmission over 50 km at 1.55  $\mu\text{m}$  by using LiNbO<sub>3</sub> Mach-Zehnder amplitude modulator. *Optical Communication Technology* (光通信技术), 1996, 20(1) : 13~ 15 (in Chinese)
- 4 Gao Fubin, Zhou Lieying. 1.5  $\mu\text{m}$  lithium niobate Mach-Zehnder modulators. 1991 annual meeting on optoelectronics technology and components & integrated technique. Beijing : The Press of Qinghua University, 1992, 597~ 599 (in Chinese)
- 5 P. B. Hansen, L. Eskildsen, S. G. Grubb. Unrepeated WDM transmission experiment with 8 channels of 10 Gbit/s over 352 km. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, 8(8) : 1082~ 1084
- 6 Yu Jianjun, Zhang Xiaoguang, Yang Bojun. Crystal considerations for the second harmonic detection of soliton pulses. *Study on Optical Communications* (光通信研究), 1996 (1) : 14~ 18 (in Chinese)
- 7 Chen Jisheng. The theory and technique of the integrated optoelectronics modulator. Beijing : The Press of National Defense, 1995, chapter one (in Chinese)

## The Generation of 5 Gbit/s NRZ Optical Pulses Employing a Ti·LiNbO<sub>3</sub> Amplitude Modulator

Yu Jianjun Yang Bojun Guan Kejian

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088)

**Abstract** 5 GHz non-return zero (NRZ) optical pulses were generated by employing a Ti·LiNbO<sub>3</sub> amplitude modulator. The optical pulses were measured by a second harmonic auto-correlator. The key technology was theoretically and experimentally studied.

**Key words** Mach-Zehnder Ti·LiNbO<sub>3</sub>, non-return zero (NRZ), second harmonic auto-correlator