

# 基于周期极化反转铌酸锂光波导高速非归零码到归零码的转换<sup>\*</sup>

汪大林 孙军强<sup>†</sup> 王 健

(武汉光电国家实验室, 华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

(2007 年 3 月 14 日收到, 2007 年 5 月 22 日收到修改稿)

研究了基于周期极化反转铌酸锂光波导级联二阶非线性效应实现非归零码到归零码高速全光码型转换的新方案, 使用的是马赫-曾德尔干涉仪结构. 转换原理是非归零码信号光在级联倍频和差频过程中受到的放大作用引起马赫-曾德尔干涉仪的不平衡, 进而通过干涉相消产生归零码信号光输出. 首先从耦合波方程出发, 数值模拟了非归零码到归零码码型转换过程. 然后分析了波导长度、光功率、相对时延对消光比的影响并对码型转换进行了优化设计. 最后分析了转换带宽, 模拟计算表明信号光在 90 nm 的 3 dB 带宽内可调谐, 进而可以实现多信道的同时转换.

关键词: 码型转换, 级联倍频和差频, 周期极化反转铌酸锂, 马赫-曾德尔干涉仪

PACC: 4265, 4265K, 4280S

## 1. 引 言

未来高速率、大容量光通信网络可能是使用波分复用(WDM)技术构建子网, 而使用光时分复用(OTDM)技术构建骨干网. 在速率相对较低的 WDM 网络中, 普遍采用的是非归零码(NRZ)的调制格式. 因为与归零码(RZ)相比, 非归零码具有谱宽窄, 对时间抖动容忍度大等优点. 相比之下, OTDM 系统则需要采用归零码的调制格式, 以便在时域上间插(interleaving)不同的信号. 与非归零码相比, 归零码的平均光功率低, 对光纤非线性、偏振模色散(PMD)的容忍度高, 而且有利于时钟恢复. 由于采用的调制格式不同, 所以在 OTDM 高速信道与 WDM 子网的接口处, 全光归零码和非归零码间的相互转换就非常重要<sup>[1]</sup>. 目前已有多种实现全光码型转换的方案, 如基于半导体光放大器(SOA)的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)<sup>[2]</sup>, 基于 SOA 的环形镜<sup>[3]</sup>, 使用注入锁定半

导体激光器<sup>[4]</sup>等. 周期极化反转铌酸锂(PPLN)光波导具有响应速度快、噪声低、无啁啾、宽转换带宽等优点以及对比特率和调制格式近乎透明的特性, 因此近年来受到了广泛地关注. 利用准相位匹配(QPM)PPLN 光波导中的级联二阶非线性效应可以实现全光波长转换<sup>[5-10]</sup>.

本文提出一种基于 PPLN 光波导的 MZI 结构实现 NRZ 码到 RZ 码的全光码型转换方案, 利用 PPLN 光波导级联倍频和差频(SHG + DFG)二阶非线性效应数值模拟了 80 Gb/s 的 NRZ-to-RZ 全光码型转换. 文章的第二部分给出了码型转换的理论分析和耦合模方程, 第三部分对码型转换进行了数值模拟, 分析了转换的 RZ 信号因群速度失配而产生的畸变对消光比的影响, 提出了消除或减弱群速度失配影响的方法, 并对其中两种方案进行了详细分析以及对转换性能进行了优化设计, 第四部分分析了转换带宽, 因此, 基于 PPLN 光波导的码型转换方案可以实现多信道同时转换, 最后对全文进行了总结.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 60577006)、教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-04-0694)、高等学校博士点基金(批准号: 20060487007)和湖北省杰出人才基金(批准号: 2005ABB003)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: jqsun@mail.hust.edu.cn

## 2. 理论分析

### 2.1. 工作原理

如图 1 所示,码型转换装置基于 MZI 结构, PPLN 光波导<sup>[11,12]</sup>置于干涉仪的下臂<sup>[13]</sup>. 中心频率为  $\omega_s$ 、调制格式为 NRZ 的信号光从①端口输入,经过第一个 3 dB 光纤耦合器后,分成光功率相等的两路信号光,分别在干涉仪的上臂和下臂中传输. 在 MZI 的抽运光入射端设置一个可调延迟线,以使中心频率为  $\omega_p$  的抽运光脉冲与信号光脉冲间产生适当延时,保持比特周期的对准. 上臂中引入可变衰减

器用来平衡下臂引入 PPLN 后产生的损耗. 在抽运光输入为零时,调节可变衰减器使得③端口输出为零;当输入抽运光时,下臂 PPLN 光波导中的抽运光在满足 QPM 条件下经过倍频效应(SHG)<sup>[14,15]</sup>频率上转换为倍频光  $\omega_{sh} = 2\omega_p$ . 与此同时,倍频光与信号光通过差频(DFG)效应产生新生的空闲光场,中心频率为  $\omega_c = \omega_{sh} - \omega_s$ . 值得注意的是,在产生空闲光场的同时信号光也得到了放大并引入了非线性相移. 这样就破坏了 MZI 原有的平衡,下臂得到放大的信号光与上臂没有放大的信号光通过第二个 3 dB 耦合器后,由于干涉相消使得输出信号光的脉冲宽度小于输入 NRZ 信号光的脉宽,这样就实现了 NRZ-to-RZ 的码型转换.

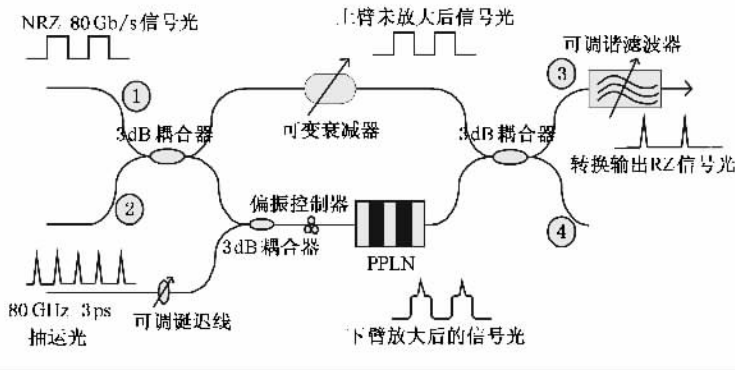


图 1 非归零码到归零码转换的原理装置图

### 2.2. 耦合波方程

从麦克斯韦方程组出发,描述波导中非线性过程的波动方程为

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \epsilon \left( \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \right) + \mu_0 \left( \frac{\partial^2 \mathbf{P}_{NL}}{\partial t^2} \right), \quad (1)$$

式中  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\epsilon$  为 PPLN 光波导的介电张量,  $\mathbf{E}$  为电场强度,  $\mathbf{P}_{NL}$  为非线性极化强度.

采用  $z$  轴与波导平行的一套坐标系,输入信号光和抽运光电场表达式分别为

$$E_s(z, t) = \frac{1}{2} A_s(z, t) \times \exp[i(\kappa_s z - \omega_s t)] + \text{c.c.}, \quad (2)$$

$$E_p(z, t) = \frac{1}{2} A_p(z, t) \times \exp[i(\kappa_p z - \omega_p t)] + \text{c.c.}, \quad (3)$$

式中  $\omega_s$ ,  $\omega_p$ ,  $\kappa_s$ ,  $\kappa_p$ ,  $A_s(z, t)$ ,  $A_p(z, t)$  分别为信号光和抽运光的中心频率、波数和复振幅.

在慢变振幅近似条件下, PPLN 光波导中的 SHG

+ DFG 过程可以用如下所示的一组偏微分方程进行描述:

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + \beta_{1p} \frac{\partial A_p}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2p} \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} = i\omega_p \kappa_{SH} A_p^* A_{sh} \exp(i\Delta\beta_{SH} z), \quad (4a)$$

$$\frac{\partial A_{sh}}{\partial z} + \beta_{1sh} \frac{\partial A_{sh}}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2sh} \frac{\partial^2 A_{sh}}{\partial t^2} = \frac{i}{2} \omega_{sh} \kappa_{SH} A_p^2 \exp(-i\Delta\beta_{SH} z) + i\omega_{sh} \kappa_{DF} A_c A_s \exp(-i\Delta\beta_{DF} z), \quad (4b)$$

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} + \beta_{1s} \frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2s} \frac{\partial^2 A_s}{\partial t^2} = i\omega_s \kappa_{DF} A_c^* A_{sh} \exp(i\Delta\beta_{DF} z), \quad (4c)$$

$$\frac{\partial A_c}{\partial z} + \beta_{1c} \frac{\partial A_c}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2c} \frac{\partial^2 A_c}{\partial t^2} = i\omega_c \kappa_{DF} A_s^* A_{sh} \exp(i\Delta\beta_{DF} z), \quad (4d)$$

式中  $\beta_{1i} = (\partial k_i / \partial \omega)_{\omega_i}$  为光脉冲群速度的倒数,  $\beta_{2i} = (\partial^2 k_i / \partial \omega^2)_{\omega_i}$  ( $i = p, sh, s, c$ ) 为群速度色散

(GVD).  $\Delta\beta_{\text{SH}}$   $\Delta\beta_{\text{DF}}$  为 SHG 和 DFG 过程的相位失配, 可分别表示为

$$\Delta\beta_{\text{SH}} = 2\pi \left( \frac{N_{\text{sh}}}{\lambda_{\text{sh}}} - 2 \cdot \frac{N_{\text{p}}}{\lambda_{\text{p}}} - \frac{1}{\Lambda} \right), \quad (5)$$

$$\Delta\beta_{\text{DF}} = 2\pi \left( \frac{N_{\text{sh}}}{\lambda_{\text{sh}}} - \frac{N_{\text{s}}}{\lambda_{\text{s}}} - \frac{N_{\text{c}}}{\lambda_{\text{c}}} - \frac{1}{\Lambda} \right), \quad (6)$$

其中  $N_i$  ( $i = \text{p, sh, s, c}$ ) 是模式折射率, 可通过 Sellmeier<sup>[16]</sup> 方程得到.  $\Lambda$  为 PPLN 光波导的极化周期.  $\kappa_{\text{SH}}$  和  $\kappa_{\text{DF}}$  是 SHG 和 DFG 过程的耦合系数, 可分别表示为

$$\kappa_{\text{SH}} = d_{\text{eff}} \sqrt{\frac{2\mu_0}{cN_{\text{sh}}N_{\text{p}}^2S_{\text{SH}}}}, \quad (7)$$

$$\kappa_{\text{DF}} = d_{\text{eff}} \sqrt{\frac{2\mu_0}{cN_{\text{sh}}N_{\text{s}}N_{\text{c}}S_{\text{DF}}}}, \quad (8)$$

其中  $d_{\text{eff}}$  是有效非线性极化系数,  $S_{\text{SH}}$  和  $S_{\text{DF}}$  分别为 SHG 和 DFG 过程的有效相互作用面积,  $c$  为真空中的光速.

### 3. 数值分析

#### 3.1. 基于 SHG + DFG 的 NRZ-to-RZ 码型转换

抽运光的脉冲包络选择为双曲正割型分布, 信号光包络选择为接近方波的超高斯型分布, 分别为

$$A_{\text{p}}(0, t) = \sqrt{P_{\text{p}0}} \operatorname{sech}\left(\frac{t}{\tau_{\text{p}0}}\right), \quad (9)$$

$$A_{\text{s}}(0, t) = \sqrt{P_{\text{s}0}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\tau_{\text{s}0}}\right)^{2m}\right]. \quad (10)$$

定义  $\tau_{\text{p-FWHM}}$  为抽运光脉冲强度的半高全宽 (FWHM), 则  $\tau_{\text{p-FWHM}} = 1.763\tau_{\text{p}0}$ ;  $\tau_{\text{s-FWHM}}$  为信号光脉冲强度的半高全宽 (FWHM),  $\tau_{\text{s-FWHM}} = 2(\ln 2)^{1/2m}\tau_{\text{s}0}$ , 其中参数  $m$  决定信号光脉冲前后沿的锐度,  $m$  越大脉冲前后沿越陡.

在数值计算中, 输入 NRZ 信号光为  $2^7 - 1$ , 80 Gb/s 的伪随机序列 (PRBS),  $\tau_{\text{s-FWHM}} = 12.5$  ps,  $m = 3$ , 消光比为 15 dB; 抽运光为其同步的时钟信号,  $\tau_{\text{p-FWHM}} = 3$  ps, 消光比为 20 dB. 信号光和抽运光中心波长分别为 1560 nm 和 1545 nm, 脉冲峰值光功率分别为  $P_{\text{p}0} = 50$  mW,  $P_{\text{s}0} = 300$  mW. PPLN 光波导长为  $L = 40$  mm, QPM 周期为  $\Lambda = 18.231$   $\mu\text{m}$ , 这可以使得 1545 nm 的抽运光在 SHG 过程中满足 QPM 条件, 即  $\Delta\beta_{\text{SH}} = 0$ , 同时 DFG 过程近似满足准相位匹配, 即  $\Delta\beta_{\text{DF}} \approx 0$ . 光速  $c = 2.998 \times 10^8$  m/s, 真空磁导率  $\mu_0 =$

$4\pi \times 10^{-7}$  N·s<sup>2</sup>/C<sup>2</sup>. SHG 与 DFG 过程的有效相互作用面积为  $S_{\text{SH}} = S_{\text{DF}} = 50$   $\mu\text{m}^2$ . PPLN 光波导的非线性系数为  $d_{33} = 27$  pm/V, 相应的有效非线性极化系数为  $d_{\text{eff}} = \frac{2}{\pi}d_{33} \approx 17.2$  pm/V. PPLN 光波导工作在室温条件下, 工作温度设置为  $T = 300$  K.

图 2 给出了 NRZ-to-RZ 码型转换中各光波的波形图. 图 2(a) 所示为图 1① 端口输入 PRBS NRZ 信号光中的 20 个比特序列 (b) 为与 NRZ 信号光比特中心对准的抽运光脉冲时钟信号. (c) 为 MZI 下臂经过 PPLN 光波导后得到放大的 NRZ 信号光 (d) 为 MZI 上下臂信号光经过干涉相消后得到的转换输出 RZ 信号光. 从图 2 中可以看到, 转换得到的 RZ 信号光比特“1”出现归零, 从而实现了 NRZ-to-RZ 的码型转换. 比较图 2(c) 和 (d) 可知在 NRZ 信号光的上升沿附近产生了一个小峰, 这对码型转换性能产生了影响. 产生这一现象的原因是由于群速度失配而引起的走离, 定义走离长度为两个脉冲时间上相差一个脉冲宽度  $\tau_0$  时所传播的距离, 即  $L_{\text{walk-off}} = \tau_0 / \left( \frac{1}{v_{\text{g}2}} - \frac{1}{v_{\text{g}1}} \right)$ , 其中  $v_{\text{g}1}$ ,  $v_{\text{g}2}$  分别为两个光脉冲的群速度. 在 DFG 过程中, 信号光在 1550 nm 波段, 而倍频光在 772 nm 波段, 不同波段的光波在波导中传输的群速度会不同, 从而产生走离.

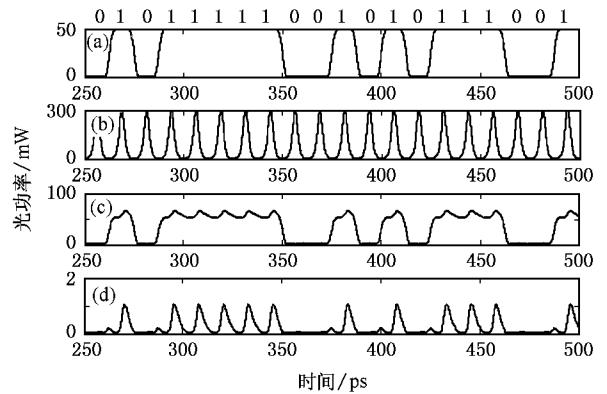


图 2 (a) 输入 NRZ 信号光 (b) 输入同步抽运脉冲时钟信号 (c) MZI 下臂经过 PPLN 光波导后得到放大的 NRZ 信号光 (d) 经过 MZI 后的 RZ 信号光. PPLN 光波导长度  $L = 40$  mm, 输入信号光和抽运光峰值功率分别为 50 mW 和 300 mW, 波长分别为 1560 nm 和 1545 nm

进一步分析走离效应对码型转换性能的影响, 图 3 所示为时间范围在 250 ps—320 ps 内的倍频光随 PPLN 光波导长度变化的三维图. 随着传输距离的增加脉冲不断向时间轴正方向漂移, 即倍频光相

对信号光有延时,产生的原因是倍频光的群速度小于信号光的群速度,当引入信号光群速度参照系时,随着传输距离的增加倍频光脉冲逐渐落后于信号光脉冲.从图3中可以看到中心位置为268.75 ps的一个倍频光脉冲,即A箭头所指位置,经过40 mm的传输后倍频光脉冲到达B箭头所指位置,其中心位置为279.71 ps,即产生了10.96 ps的延时,因此某个比特周期内的倍频光在PPLN光波导输出端将会进入下一个比特周期进而对码型转换性能产生影响.这一点同样可以理论分析如下:在PPLN光波导中信号光和倍频光的群速度分别为 $v_s = 1.3763 \times 10^8$  m/s和 $v_{sh} = 1.3288 \times 10^8$  m/s,对于 $L = 40$  mm的传输距离,由 $\tau_d = L \times \left( \frac{1}{v_{sh}} - \frac{1}{v_s} \right)$ 可知倍频光相对信号光延时10.39 ps而进入了下一个比特周期,这与数值计算结果10.96 ps基本保持一致.在倍频光由于延时而进入下一个比特周期的同时,也通过DFG过程放大了下一个比特的信号光,这正是图2中转换输出的RZ信号产生畸变的原因.为了减弱或消除因群速度失配而产生的畸变,一方面,可以通过优化设计波导长度以使产生的干扰降至最低;另一方面,可以通过调整输入抽运光和NRZ信号光的相对延时以减弱群速度失配的影响;另外,通过设计群速度匹配的PPLN光波导则可以从根本上消除走离效应的影响,从而可以得到无畸变的转换RZ信号.为了获得最佳的码型转换性能,下面分别从优化设计波导长度以及输入抽运光和NRZ信号光间的相对延时两方面来模拟码型转换过程.

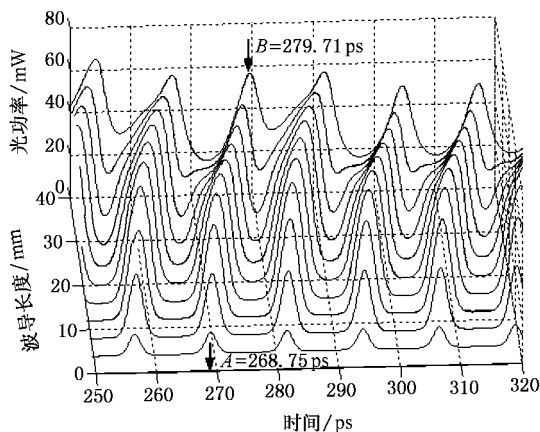


图3 倍频光随波导长度的演化图,其他不变参数与图2相同

### 3.2. 特性分析和优化设计

图4是输出RZ信号光消光比随波导长度的变

化关系图,消光比定义为输出RZ信号中比特为“1”的脉冲峰值功率平均值与比特为“0”的脉冲峰值功率平均值之比。 $\tau_d$ 是输入信号光相对输入抽运光的延迟, $\tau_d < 0$ 表示信号光相对抽运光有延迟, $\tau_d > 0$ 表示抽运光相对信号光有延迟, $\tau_d = 0$ 表示信号光相对抽运光在每个比特中心处对准.如图4所示,波导在一定长度之内转换得到RZ信号光的消光比与初始输入NRZ信号光的消光比相比减小得较为缓慢,超过这个长度之后消光比迅速减小,在到达一个最小值之后又开始有一定的增加.这可以解释为“0”码“1”码分别经过SHG+DFG效应而得到放大,在波导长度较小时由走离产生的影响也较小,此时比特为“0”的脉冲功率主要对应由“0”码经过SHG+DFG效应放大而得到.而在波导长度增加到一定长度之后,由走离效应所产生的干扰脉冲功率增加较快,并大于对应“0”码经过SHG+DFG效应得到的脉冲峰值功率,从而使得转换RZ信号消光比迅速减小.随着波导长度的继续增加,因群速度失配使得前一个比特的倍频光场漂移到下一个比特内,而对“1”码的信号也产生了一个额外的放大作用,这样得到的消光比就又有所增加.同时还可以看到 $\tau_d < 0$ 时的消光比在波导长度为箭头B所指处开始减小,此时的波导长度要大于 $\tau_d = 0$ 时箭头A所指的波导长度以及 $\tau_d > 0$ 时箭头C所指的波导长度.对于给定的波导长度, $\tau_d < 0$ 时的消光比要大于 $\tau_d = 0$ 和 $\tau_d > 0$ 时的消光比.这说明选择适当的波导长度可以抑制因群速度失配所产生的走离效应的不利影响,同时使信号光相对于抽运光有一定的延迟,也可以减弱群速度失配所产生的影响,进而可以改善转换输出RZ信号的消光比.图5是转换输出RZ信号光消光比随输入抽运光峰值功率的变化关系图,由图可知随着抽运光峰值功率的增加消光比呈减小的趋势,而在输入抽运光峰值功率一定时,输入信号光峰值功率越小输出消光比越大.由图可知使信号光相对抽运光产生适当的延迟,即在 $\tau_d < 0$ 时可以获得高的消光比.综合考虑图4和图5可见,在波导长度小于走离长度时,减小信号光和抽运光的输入峰值功率,同时使信号光相对抽运光有一定的延迟可以得到较好的消光比,即可以优化NRZ-to-RZ码型转换效果.

图6所示为光波导长度 $L = 40$  mm时转换得到RZ信号光脉宽与抽运光脉宽之比(脉宽压缩比 $\tau_{RZ-FWHM} / \tau_{p0-FWHM}$ )随抽运光脉宽变化的关系曲线.可

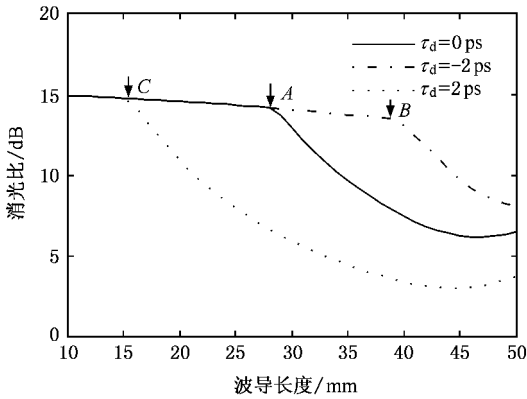


图4 输出 RZ 信号光消光比随波导长度的变化曲线,其他不变参数与图 2 相同

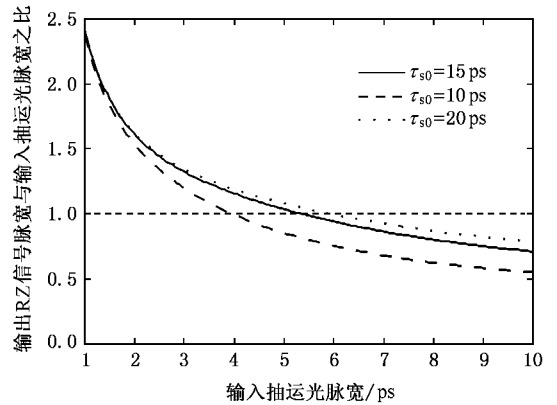


图6 转换输出 RZ 信号光脉宽与抽运光脉宽之比随抽运光脉宽变化的关系. PPLN 光波导长度  $L = 40$  mm,其他不变参数与图 2 相同

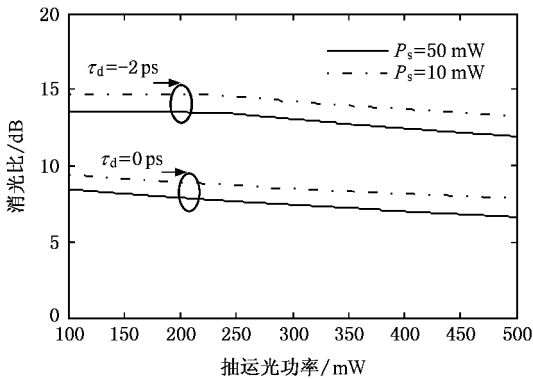


图5 输出 RZ 信号光消光比随输入抽运光功率的变化曲线. PPLN 光波导长度  $L = 40$  mm,其他不变参数与图 2 相同

见随着抽运光脉冲宽度的增加,脉宽压缩比逐渐减小.同样可以发现信号光初始脉宽越小压缩比越小,这是因为信号光脉冲宽度越窄其对应的频谱宽度越宽,这样信号光在 DFG 过程中就能在很宽的频谱范围近似满足准相位匹配条件,进而通过干涉相消效应转换得到的 RZ 信号频谱宽度就越宽,其在时域的脉冲宽度就会越窄,所以压缩比越小.

图 7 是信号光相对抽运光延迟 2ps 后转换输出 RZ 信号光在时间范围 250ps—320ps 内随波导长度变化的三维图,使信号光延迟是为了减小因群速度失配而产生的走离效应的影响.当走离严重时,由图 2 可知在脉冲的上升沿附近会产生干扰脉冲,通过延时可以抑制这种干扰脉冲.由图 7 可以看到,通过使信号光相对抽运光适当的延迟后,无畸变信号光传输的距离增加了.

为了对转换效果进行深入分析,我们进一步数值模拟了输入 NRZ 和转换输出 RZ 信号光的眼图.

当 PPLN 光波导长度  $L = 40$  mm 且输入 NRZ 信号光与抽运光没有相对延迟时,图 8 所示为输入 NRZ 信号光、抽运光时钟信号以及转换输出 RZ 信号光的眼图.此时由于受到走离效应的影响使得转换输出 RZ 信号光的眼图质量较差,如图 8(c)所示.在图 9(a)和(b)分别为选择适当波导长度以及使输入 NRZ 信号光相对抽运光有一定延迟后得到的转换输出 RZ 信号光眼图,与图 8(c)相比,眼图质量有了很明显的改善.这进一步说明了采取优化波导长度以及使输入 NRZ 信号光和抽运光产生适当延迟的措施,可以有效改善码型转换的性能.

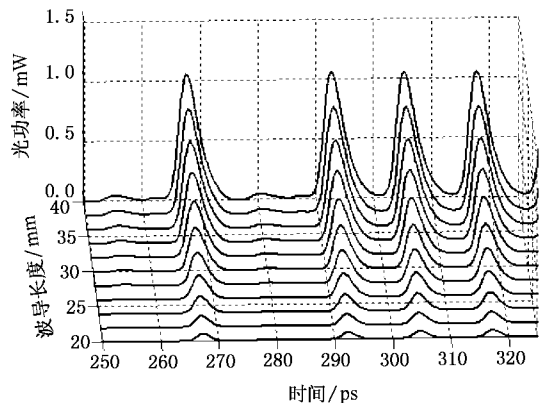


图7 在延时为  $\tau_d = -2$  ps 时,RZ 信号随波导长度变化的三维图,其他不变参数与图 2 相同

#### 4. 群速度匹配光波导

文献已经报道了光波导中可能同时实现准相位匹配和群速度匹配<sup>[17,18]</sup>.理论分析可知在这样的光

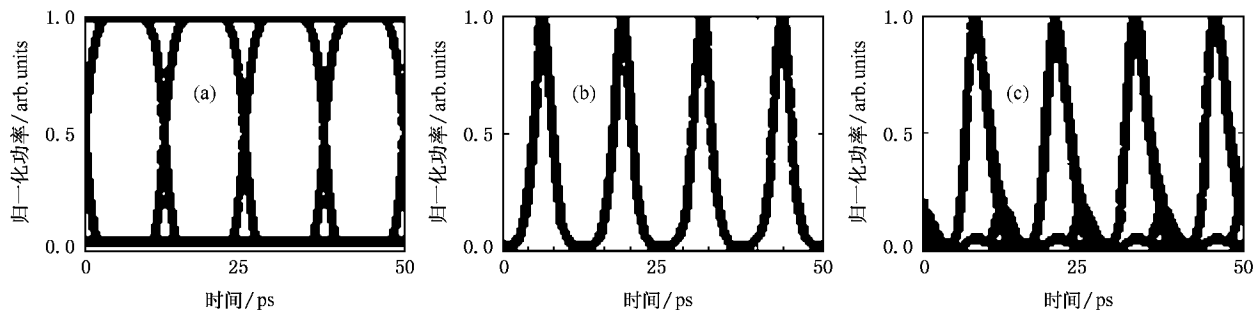


图8 (a)输入 NRZ 信号光眼图 (b)输入抽运光时钟信号眼图 (c)转换输出 RZ 信号光眼图.  $L = 40 \text{ mm}$ ,  $\tau_d = 0 \text{ ps}$

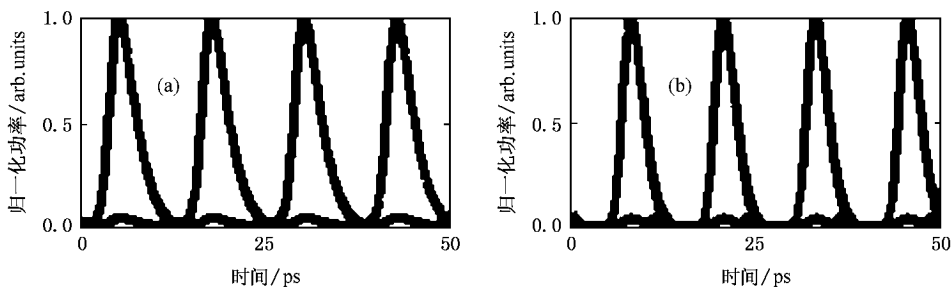


图9 转换输出 RZ 信号光眼图. (a)  $L = 30 \text{ mm}$ ,  $\tau_d = 0 \text{ ps}$  (b)  $L = 40 \text{ mm}$ ,  $\tau_d = -2 \text{ ps}$

波导中,不会存在因群速度失配而引起的走离现象,因此也就不会产生相邻比特之间的干扰,从而可以实现无畸变的 NRZ-to-RZ 全光码型转换.图 10 和 11 所示为在群速度匹配光波导中的码型转换结果,显示出了良好的码型转换效果.

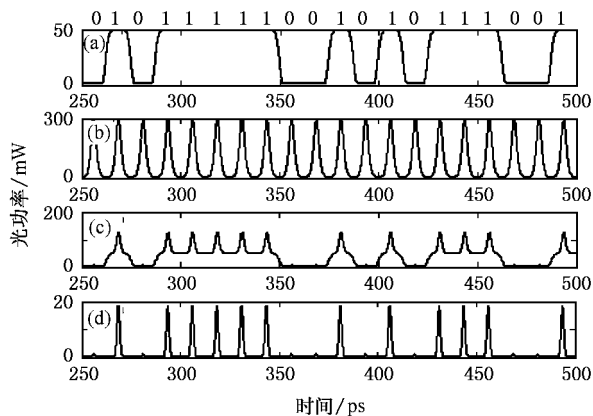


图 10 群速度匹配情况下各光波脉冲波形 (a)输入 NRZ 信号光 (b)输入抽运光时钟信号 (c)MZI 下臂经过 PPLN 光波导后得到放大的 NRZ 信号光 (d)经过 MZI 后的转换输出 RZ 信号光.  $t_d = 0 \text{ ps}$ ,  $L = 40 \text{ mm}$ ,其他不变参数与图 2 相同

## 5. 多信道同时转换

进一步分析 NRZ-to-RZ 码型转换过程中信号光

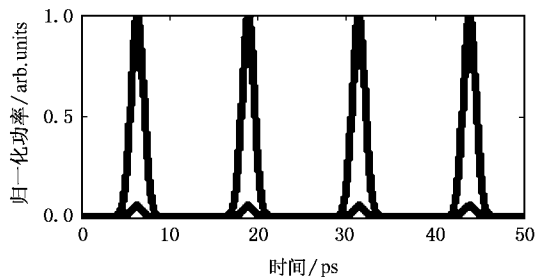


图 11 群速度匹配情况下转换输出 RZ 信号光的 eye 图.  $t_d = 0 \text{ ps}$ ,  $L = 40 \text{ mm}$ ,其他不变参数与图 2 相同

的可调谐范围.如图 12 所示,转换效率定义为输出 RZ 信号光峰值功率与输入 NRZ 信号光峰值功率之比即  $\eta = \frac{P_{\text{RZ\_peak}}(\text{out})}{P_{\text{NRZ\_peak}}(\text{in})}$ .抽运光中心波长固定在

1545 nm 以满足 SHG 过程的 QPM 条件,信号光在 1450—1650 nm 的波长范围内调节.由图 12 可见,信号光可以在较宽的波长范围内实现可调谐,其 3 dB 转换带宽接近 90 nm.这说明当同时输入多信道 NRZ 信号光时,基于 SHG + DFG 可以实现多信道 NRZ-to-RZ 全光码型转换.如图 12(a)(b)和(c)所示,进一步数值模拟了输入 NRZ 信号光相对抽运光延迟 2 ps,信号光波长分别为 1500 nm,1545 nm,1590 nm 情况下转换输出 RZ 信号光的 eye 图(分别对应图中的

$A, B, C$  三个箭头所指位置), 显示出了较好的码型转换效果.

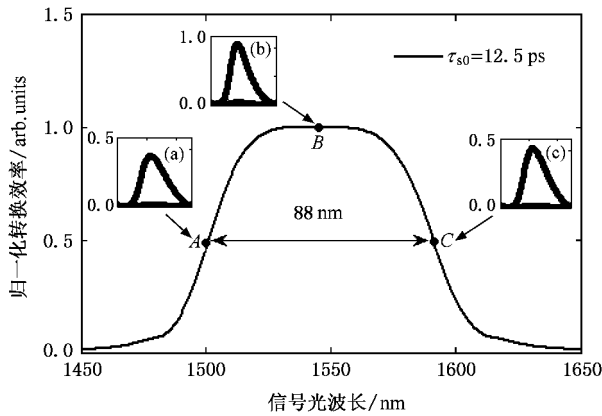


图 12 归一化的转换效率随输入信号光波长的变化关系 (a)–(c) 不同信号光波长下转换输出 RZ 信号光眼图。(a)  $\lambda_s = 1500$  nm; (b)  $\lambda_s = 1545$  nm; (c)  $\lambda_s = 1590$  nm.  $L = 40$  mm,  $\tau_d = -2$  ps, 其他不变参数与图 2 相同

## 6. 结 论

提出并数值研究了基于 PPLN 光波导 SHG + DFG 非线性效应的高速宽带 NRZ-to-RZ 全光码型转换. 对于普通的 PPLN 光波导, 由于受到群速度失配引起的走离效应的影响, 产生的 RZ 信号光存在畸变从而对码型转换效果产生影响. 通过使输入 NRZ 信号光相对抽运光有一定的初始延迟, 同时选择适当的光波导长度, 可以明显减弱走离效应的影响进而有效改善码型转换性能. 信号光可以在近 90 nm 的波长范围内实现可调谐, 因此可以实现多信道的同时 NRZ-to-RZ 全光码型转换. 本文实现码型转换采用的是 MZI 结构并基于 SHG + DFG 级联二阶非线性效应. 实际上, 通过采用其他干涉结构如基于 PPLN 光波导的光纤环形镜以及基于级联和频与差频(SFG + DFG)二阶非线性效应, 同样可以实现非归零码到归零码的全光码型转换<sup>[19, 20]</sup>.

[ 1 ] Norte D, Park E, Willner A E 1995 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **7** 902  
 [ 2 ] Lei X, Wang B C, Glesk I, Prucnal P R 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 308  
 [ 3 ] Lee C G, Kim Y J, Park C S, Lee H J 2005 *J. Lightw. Technol.* **23** 834  
 [ 4 ] Chow C W, Wong C S, Tsang H K 2004 *J. Lightw. Technol.* **22** 2386  
 [ 5 ] Sun J Q, Liu W, Tian J, Kurz J R, Fejer M M 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 1743  
 [ 6 ] Chou M H, Brener I, Fejer M M, Chaban E E, Christman S B 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 653  
 [ 7 ] Wang J, Sun J Q, Luo C H, Sun Q Z 2005 *Opt. Express.* **13** 7405  
 [ 8 ] Wang J, Sun J Q, Sun Q Z 2006 *Opt. Lett.* **31** 1711  
 [ 9 ] Wang J, Sun J Q, Kurz J R, Fejer M M 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 2093  
 [ 10 ] Wang J, Sun J Q, Li J, Guo Y J, Sun Q Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** (in Chinese) [ 王 健、孙军强、李 婧、郭永娟、孙琪真 2007 物理学报 **56** ]

[ 11 ] Ding X, Wang P, Xu D G, Yao J Q, Yu G J, Zhang B G, Zhang F, Zhang H 2004 *Chin. Phys.* **13** 364  
 [ 12 ] Bi Y, Cui D F, Li R N, Lin X C, Xu Z Y, Yao A Y 2003 *Chin. Phys.* **12** 514  
 [ 13 ] Razzari L, Liberale C, Cristiani I, Tediosi R, Degiorgio V 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 1486  
 [ 14 ] Xue T, Yu J, Yang T X, Ni W J, Li S C 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 565 (in Chinese) [ 薛 挺、于 建、杨天新、倪文俊、李世忱 2002 物理学报 **51** 565 ]  
 [ 15 ] Chen Y L, Yuan J W, Y W G, Zhou B B, Luo Y F, Guo J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2079 (in Chinese) [ 陈云琳、袁建伟、闫卫国、周斌斌、罗勇锋、郭 娟 2005 物理学报 **54** 2079 ]  
 [ 16 ] Hobden M V, Warner J 1966 *Phys. Lett.* **22** 243  
 [ 17 ] Liu Y, Diels J C 2006 *IEEE J. Quantum Electron.* **42** 760  
 [ 18 ] Xiao X S, Yang C X, Gao S M, Miao H X 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 84  
 [ 19 ] Wang J, Sun J Q, Sun Q Z, Wang D L, Huang D X 2007 *Opt. Express* **15** 583  
 [ 20 ] Wang J, Sun J Q, Sun Q Z 2007 *Opt. Lett.* **32** 1477

# High-speed data format conversion from non-return-to-zero to return-to-zero based on periodically poled lithium niobate waveguides \*

Wang Da-Lin Sun Jun-Qiang<sup>†</sup> Wang Jian

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

( Received 14 March 2007 ; revised manuscript received 22 May 2007 )

## Abstract

Based on the cascaded second-order nonlinear interactions in a periodically poled lithium niobate waveguide , a novel scheme of all-optical data format conversion from non-return-to-zero to return-to-zero is proposed , using a Mach-Zehnder interferometer structure. The conversion mechanism relies on the amplification effect induced on the signal field via cascaded second-harmonic generation and difference-frequency generation , which makes the Mach-Zehnder interferometer unbalanced and leads to the output of return-to-zero due to destructive interference. Firstly , the non-return-to-zero to return-to-zero conversion process is numerically simulated based on the coupled-wave equations. Secondly , the dependence of the extinction ratio on the waveguide length , optical power , and time-delay is analyzed and optimized. Finally , the conversion bandwidth is also discussed. It is found that the signal wavelength can be tuned in a wide wavelength range of approximately 90 nm , thus simultaneous multi-channel non-return-to-zero to return-to-zero data format conversion can potentially be implemented with the proposed scheme.

**Keywords :** data format conversion , cascaded second-harmonic generation and difference-frequency generation , periodically poled lithium niobate , Mach-Zehnder interferometer

**PACC :** 4265 , 4265K , 4280S

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60577006 ) , Program for New Century Excellent Talents in University of China ( Grant No. NCET-04-0694 ) , the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China ( Grant No. 20060487007 ) , and Science Foundation for Distinguished Young Scholars in Hubei province , China ( Grant No. 2005ABB003 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : jqsun@mail.hust.edu.cn