

doi:10.3788/gzxb20134210.1169

# 基于铌酸锂光波导的 8 波长信号全光加密系统方案

谢小平<sup>1,2</sup>, 段杰<sup>1,2</sup>, 段弢<sup>2</sup>, 温钰<sup>1</sup>

(1 西安通信学院, 西安 710106)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

**摘要:** 由于目前的全光加密方案基于光学非线性效应, 因此仅适用于单波长光信号的加密操作. 为了解决全光加密方案无法对多波长信号同时进行加密的问题, 提出了一种多波长信号异或加密系统方案. 该方案基于铌酸锂光波导泡克耳斯效应, 利用外加电场对铌酸锂光波导中光信号产生调制相移, 并通过多波长相干光明文与光密钥的干涉实现异或加密. 由于相邻波长光信号在相同外加电场作用下的调制相移差别很小, 因此该方案能够实现较高输入信号波长范围的多波长信号全光加密操作. 利用该方案仿真实现了对  $8 \times 10$  Gbps, 波长间隔为 0.8 nm, 码形为上升沿与下降沿均为 10 ps 的非归零码信号的异或加密操作, 输出各波长加密信号误码率小于  $4.30 \times 10^{-86}$ , Q 因子大于 21.51; 理论分析与仿真得出了该多波长全光加密方案能够完成输入信号波长范围高达 400 nm 的异或加密操作; 并得出该加密方案在输入信号波长小于 78 nm 时, 加密操作能够改善输入信号消光比. 理论分析与仿真结果共同验证了该方案对于多波长光信号进行异或加密的可行性与有效性.

**关键词:** 全光加密; 多波长; 铌酸锂光波导; 干涉

中图分类号:

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)10-1169-7

## An All-optical Encryption System Scheme for 8 Wave Signals Based on LiNbO<sub>3</sub> Waveguide

XIE Xiao-ping<sup>1,2</sup>, DUAN Jie<sup>1,2</sup>, DUAN Tao<sup>2</sup>, WEN Yu<sup>1</sup>

(1 Xi'an Telecommunication College, Xi'an 710106, China)

(2 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Owing to based on the nonlinear effect, the all-optical encryption scheme can only be applied to encrypt signal wave optical signal, in order to solve the problem that recent all-optical scheme can not be applied to encrypt multi-wave signal simulatanously, an all-optical encryption system scheme which can simultaneously encrypt multi-wave optical signals is proposed. This scheme is based on pockels effect of LiNbO<sub>3</sub> waveguide and achieves signals encrypting operation by interference of coherent optical signals and keys. Because the difference of modulated phase shift of different wavelength through the same external electric field in LiNbO<sub>3</sub> waveguide is very small, so, this scheme can be used to encrypt multi-wave signals simultaneously. The simulation of encrypting operation of  $8 \times 10$  Gbps multe-wave signals whose interval of wavelength is 0.8 nm has been realized, the code type is NRZ with rise and fall time of 10ps, the BER of the encrypted output is smaller than  $4.30 \times 10^{-86}$ . And the Q factor of the encrypted output is larger than 21.51. It is verified that this all-optical encryption scheme can achieve encrypting operation for multi-wave input signals within 400 nm by theoretic analyzing and simulative experiment. Moreover, when the waveleghth range of multi-wave signal is small than 78 nm, the operation of all-optical encyption can improve the extinction ratio of input signals. Theoretic analyzing and simulative experiment comfirm the feasibility

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60907026)和中意合作项目“新型分布式光传感与网络技术”(No. 2010DFA14640)资助

第一作者: 谢小平(1976-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为高速光通信、光网络安全. Email: xxp@opt.ac.cn

通讯作者: 段杰(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光网络物理层安全方面的研究. Email: duanjiedemail@163.com

收稿日期: 2013-03-28; 录用日期: 2013-06-17

and effectiveness of this multi-wave all-optical encryption system.

**Key words:** All-optical encryption; Multi-wave; LiNbO<sub>3</sub> waveguide; Interference

## 0 引言

在全光信号处理技术中,全光加密因其能够大大提高全光网络通信的机密性与安全性而受到广泛关注<sup>[1-5]</sup>.目前实现全光加密通常采用全光异或技术完成<sup>[6-14]</sup>,而全光异或技术通常借助于非线性效应,例如基于半导体光放大器-交叉相位调制(Semiconductor Optical Amplifier-Cross Phase Modulation, SOA-XPM)效应的异或加密方案<sup>[15-16]</sup>,基于半导体光放大器-交叉增益调制(Cross Gain Modulation, XGM)效应的异或加密方案<sup>[17-18]</sup>,基于高非线性光纤-四波混频(High Nonlinear Fiber-Four Wave Mixing, HNLF-FWM)效应的异或加密方案<sup>[19]</sup>.这些方案的原理都基于非线性效应,由于各种非线性效应严格的发生条件,因此上述全光加密方案仅能对单一波长的光信号进行加密操作.而目前的光纤通信系统采用多波长复用技术,如果采用单波长加密,那么就需要多套分离的加密设备来完成对多波长复用信号的加密操作,这势必会增加设备的复杂度与控制难度.

本文提出一种基于铌酸锂光波导泡克耳斯效应,通过对铌酸锂光波导结构的设计与外加电压的设定,使多波长明文通过相移干涉完成异或加密操作的系统方案.该系统方案分为信号源部分与全光异或门部分,信号源部分产生多波长相干明文与光密钥,全光异或门部分能够通过集成的光波导器件同时对多波长明文进行异或加密,并且输出为多波长复用加密信号,因此大大简化了多波长信号加密与复用操作的复杂度.本文通过仿真验证了该方案对  $8 \times 10$  Gbps,波长间隔为 0.8 nm 的复用信号的异或加密操作.并且分析了相位调制电压恒定时,该方案能够完成异或加密的输入波长范围.

## 1 方案原理

当调制电压  $u(t)$  施加于图 1 所示的铌酸锂光

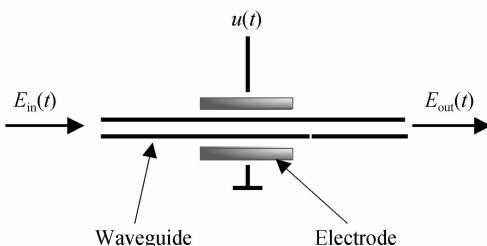


图 1 利用铌酸锂光波导的相位调制器结构

Fig. 1 Schematic diagram of phase modulator based on LiNbO<sub>3</sub> waveguide

波导时,由于泡克耳斯效应(Pockels effect),电场会改变铌酸锂光波导折射率,从而对通过其中的光信号产生相位调制.因为波导层很薄,可以近似认为调制电场  $u(t) \approx u(t)/\pi D'$ ,式中  $D'$  为电极间距<sup>[20]</sup>.对于 TE 偏振,这一电场产生的波导折射率改变量为

$$\Delta n_{eo} = n_e^3 \gamma_{33} E_y / 2 \quad (1)$$

式中  $n_e$  为非寻常系数,  $\gamma_{33}$  为铌酸锂晶体的最大电光学常量,  $E_y$  为外加电场.因此,波导对输入光信号的调制相位为

$$\Delta \phi = (n_e^3 \gamma_{33} L / \lambda D') u(t) \quad (2)$$

式中,  $L$  为电场对光波导的作用长度.定义  $\Delta \phi = \pi$  时所需的调制电压为  $V_\pi$ ,所以由式(2)可得

$$V_\pi = \pi \lambda D' / (n_e^3 \gamma_{33} L) \quad (3)$$

对于不同波长光信号,根据文献[21]中铌酸锂晶体的  $n_e$  随温度与入射光波长间关系的 Sellmeier 公式,在温度为  $20 \sim 250^\circ\text{C}$ ,波长在  $0.4 \sim 5 \mu\text{m}$  的范围内可得

$$n_e^2 = 5.35583 + 4.629 \times 10^{-7} f + \frac{0.100473 + 3.862 \times 10^{-8} f}{\lambda^2 - (0.20692 - 0.89 \times 10^{-8} f)^2} + \frac{100 + 2.657 \times 10^{-5} f}{\lambda^2 - (11.34927)^2} - 1.5334 \times 10^{-2} \lambda^2 \quad (4)$$

式中  $f$  为温度,其与摄氏温度  $T$  的关系为  $f = (T - 24.5)(T + 570.82)$ .这里选择  $T$  为  $25^\circ\text{C}$ ,令  $g(\lambda) = \lambda/n_e^3$ ,那么式(3)可简化为

$$V_\pi = g \pi D' / (\gamma_{33} L) \quad (5)$$

$\lambda$  在  $1530 \sim 1570$  nm 范围内时,  $g(\lambda)$  函数曲线如图 2 所示.

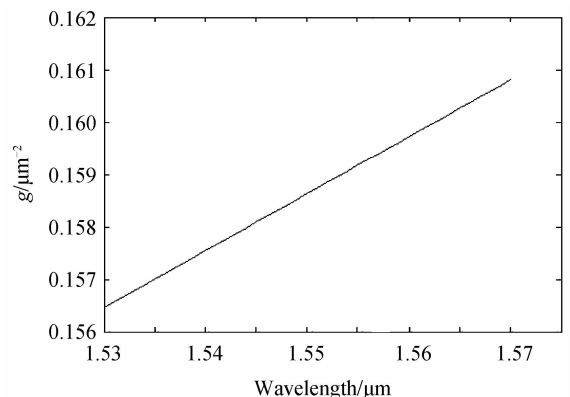


图 2 函数  $g(\lambda)$  曲线

Fig. 2 Curve of  $g(\lambda)$

从图 2 可以看出当波长在  $1530 \sim 1570$  nm 范围内不断增大时,  $g(\lambda)$  也不断增大,由式(5)可知,在  $1530 \sim 1570$  nm 范围内,随着光波长的增大,调制相位  $\pi$  所需的半波电压也在不断增大.假设当入

射光波长为 1 530 nm 时,铌酸锂光波导对应的半波电压为  $V_{\pi_1}$ ,根据式(5)可得  $g(1570 \text{ nm}) = 1.027g(1530 \text{ nm})$ ,因此当入射光波长为 1 570 nm 时,铌酸锂光波导的半波电压为  $1.027V_{\pi_1}$ .那么当输入光波长在 1 530~1 570 nm 之间时,在电场  $V_{\pi_1}$  作用下的入射光被调制相位在  $\pi/1.027$  到  $\pi$  之间.因此,当外加电压为 1 530 nm 的半波电压,输入光波长在 1 530~1 570 nm 范围内变化,波长的不同对其被调制相位的影响很小.

如图 3 所示,当单波长光场  $E_{in}(t)$  输入在基于铌酸锂光波导 MZI 中被分为两路,分别被外加电场

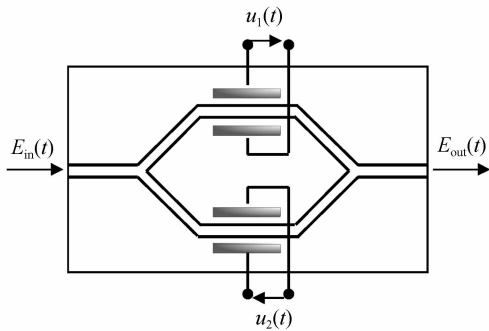


图 3 基于铌酸锂光波导的马赫曾德尔干涉仪结构图  
Fig. 3 Schematic diagram of mach-zehnder interferometer based on LiNbO<sub>3</sub> waveguide

$u_1(t)$  与  $u_2(t)$  调制相位,图 3 所示输入输出光场的关系为

$$\frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} = \frac{1}{2} (e^{j\varphi_1(t)} + e^{j\varphi_2(t)}) \quad (6)$$

式中  $\varphi_1(t)$ ,  $\varphi_2(t)$  分别为  $u_1(t)$  与  $u_2(t)$  对通过光波导光场的调制相位,令

$$\varphi_1(t) = \frac{u_1(t)}{V_{\pi_1}} \pi, \varphi_2(t) = \frac{u_2(t)}{V_{\pi_2}} \pi \quad (7)$$

当  $u_1(t) = -u_2(t) = u(t)/2$ ,  $V_{\pi_1} = V_{\pi_2} = V_{\pi}$  时,有  $\varphi_1(t) = -\varphi_2(t)$ .由式(6)可得

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cos \left[ \frac{u(t)}{2V_{\pi}} \pi \right] \quad (8)$$

图 4 所示结构可以分为两部分:信号调制部分

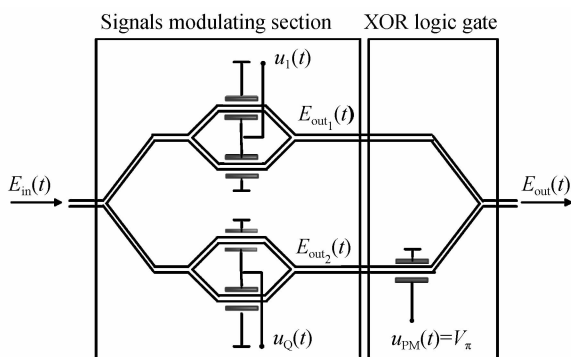


图 4 基于铌酸锂光波导的单波长全光加密方案结构  
Fig. 4 Schematic diagram of all-optical encryption scheme based on LiNbO<sub>3</sub> waveguide

(Signals modulating section) 与全光异或部分 (XOR logic gate),其中信号调制部分 (Signals modulating section) 用于将电信号  $u_1(t)$  与  $u_2(t)$  调制为相干的光明文  $E_{out_1}(t)$  与光密钥  $E_{out_2}(t)$ ;而全光异或部分用于对  $E_{out_1}(t)$  与  $E_{out_2}(t)$  进行全光异或部分操作,输出  $E_{out}(t)$  即为对光明文的异或加密结果.其具体原理如下,根据式(8)可得

$$E_{out_1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{in}(t) \cos \left[ \frac{u_1(t)}{V_{\pi}} \pi \right] \quad (9)$$

$$E_{out_2}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{in}(t) \cos \left[ \frac{u_Q(t)}{V_{\pi}} \pi \right] \quad (10)$$

在图 4 所示的全光异或 (XOR logic gate) 部分令  $u_{PM}(t)$  为光波导的半波电压.将式(8)带入式(6),得

$$E_{out}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_{out_1}(t) + E_{out_2}(t) e^{j\pi}) = E_{in}(t) \left[ \cos \left[ \frac{u_1(t)}{V_{\pi}} \pi \right] - \cos \left[ \frac{u_Q(t)}{V_{\pi}} \pi \right] \right] \quad (11)$$

由式(11)可得,当  $u_1(t)$  与  $u_Q(t)$  同时为 1 码或 0 码时,  $u_1(t) = u_Q(t)$ ,则  $E_{out}(t)$  为 0,输出记为 0 码;当  $u_1(t)$  与  $u_Q(t)$  仅有一个为 1 码时,  $u_1(t) \neq u_Q(t)$ ,  $E_{out}(t)$  不为 0,输出记为 1 码.因此,图 4 所示结构实现了对光明文  $E_{out_1}(t)$  的异或加密操作.如果将两个图 4 所示结构进行并联,并同时输入两个波长的连续光 ( $E_{in_1}(t)$ ,  $E_{in_2}(t)$ ),如图 5 所示,在信号源部分 (Dual-wave signals source), 波长为  $\lambda_1$  与  $\lambda_2$  的连续光  $E_{in_1}(t)$ ,  $E_{in_2}(t)$  分别被调制为光明文 1 ( $Pi_1$ )、光密钥 1 ( $Ki_1$ ) 与光明文 2 ( $Pi_2$ )、光密钥 2 ( $Ki_2$ ).在全光异或门部分,将  $Ki_1$  与  $Ki_2$  耦合后利用外加电场  $u_{PM}(t) = V_{\pi}$  对两信号进行  $\pi$  相移,从以上分析可知,当  $\lambda_1$  与  $\lambda_2$  在 1 530~1 570 nm 范围内,可以近似认为 1 530~1 570 nm 内任意波长对

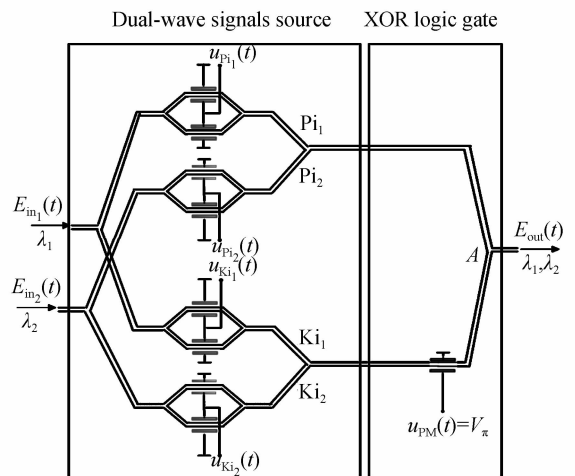


图 5 基于铌酸锂光波导的 2 波长信号全光加密方案结构  
Fig. 5 Schematic diagram of all-optical encryption scheme for two wave signals based on LiNbO<sub>3</sub> waveguide

应的半波电压大小的  $u_{PM}(t)$  对  $Ki_1$  与  $Ki_2$  产生的相移均为  $\pi$ . 经相移后的  $Ki_1$ 、 $Ki_2$  与  $Pi_1$ 、 $Pi_2$  在 A 点耦合, 波长为  $\lambda_1$  的  $Pi_1$ 、 $Ki_1$  与波长为  $\lambda_2$  的  $Pi_2$ 、 $Ki_2$  耦合输出满足式(11). 因此  $E_{out}(t)$  即为波长为  $\lambda_1$  的  $Pi_1$  与  $Ki_1$  的异或结果与波长为  $\lambda_2$  的  $Pi_2$  与  $Ki_2$  的异或结果的复用信号. 同理, 在图 5 所示结构的基础上, 通过并联更多图 5 中红色或蓝色光波导结构即可实现更多波长光密文的调制与异或加密操作.

## 2 仿真实现

为了验证该方案对 8 波长信号同时进行加密的可行性与有效性, 在图 5 所示双波长加密方案的基础上, 通过并联增加图 3 所示基于铌酸锂光波导 MZI 数量, 实现 8 个不同波长信号的调制与异或加密操作. 如图 6 所示, 左上角方框 1 内为光信号  $Pi_1$  与光密钥  $Ki_1$  的信号源结构, 利用图 3 所示结构的  $MZM_1$  和  $MZM_2$  对 CW laser1 发出平均功率为 3 dBm, 波长为 1 545 nm 的连续光进行调制, 其中  $MZI_1$  与  $MZI_2$  中四个臂光波导结构与半波电压相同, 参考安利 (Anritsu) 公司的 MP1800A 型误码仪直接能够输出的电信号, 令  $u_{ki_1}(t)$  与  $u_{pi_1}(t)$  为速率为 10 Gbps, 上升沿与下降沿均为 10 ps 的 NRZ 码电信号, 并且当  $u_{ki_1}(t)$  与  $u_{pi_1}(t)$  码字同时为 1 或 0 时, 信号电压相同. 根据图 5 结构原理可知,  $u_{ki_1}(t)$

与  $u_{pi_1}(t)$  分别调制  $MZI_1$  与  $MZI_2$  得到了光信号  $Ki_1$  与  $Pi_1$  (即图 5 中的  $E_{out_1}(t)$  与  $E_{out_2}(t)$ ), 参考富士通公司的 FTM7962EP 型铌酸锂调制器, 令 PM 在温度为 25 度, 波长为 1 545 nm 处的半波电压为 14 V, 通过给 PM 施加 14 V 的直流电压, 来使其对通过其中  $Ki_1$  产生  $\pi$  相移. 同理, 在标号为 2 到 8 方框内产生另外 7 组速率与码型均与  $Pi_1$ 、 $Ki_1$  相同的光信号与光密钥, 它们的波长按顺序分别为 1 545.8 nm, 1 546.6 nm, 1 547.4 nm, 1 548.2 nm, 1 549 nm, 1 549.8 nm, 1 550.6 nm. 将  $Ki_1$  至  $Ki_8$  利用 coupler<sub>2</sub> 耦合为一组信号. 该耦合信号经过 PM 后, 根据上文分析可知, 由于各信号波长均在 1 530~1 570 nm 范围内, 因此可认为  $Ki_1$  至  $Ki_8$  均发生了  $\pi$  相移.  $Pi_1$  至  $Pi_8$  耦合信号与  $\pi$  相移后的  $Ki_1$  至  $Ki_8$  耦合信号在 coupler<sub>3</sub> 中相遇, 各个相同波长的光信号与光密钥发生干涉, coupler<sub>3</sub> 输出即为 8 个波长的加密复用信号. 加密后得到的复用信号通过波分解复用器 (WDM Demux) 分离出 8 个波长的加密信号, 其中 WDM Demux 的 8 个通道中心波长与信号波长相同, 滤波器为 0.4 nm 的高斯型滤波器. 利用示波器观察各个波长加密信号波形. 另外通过将某一波长加密信号与光信号与光密钥通过异或逻辑器件完成直接异或结果相对比, 得到加密信号的误码率与 Q 因子.

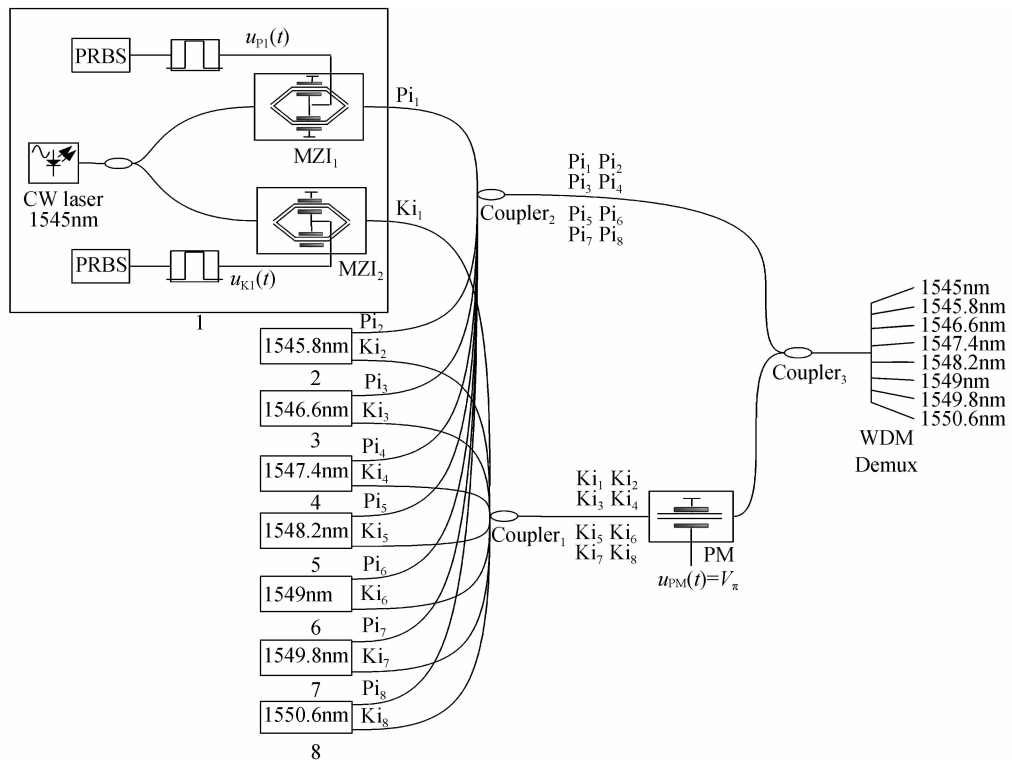


图 6  $8 \times 10$  Gbps 全光加密系统仿真结构图

Fig. 6 Schematic diagram of all-optical encryption system at  $8 \times 10$  Gbps

图7中横坐标为时间,单位为200 ps/div;纵坐标为功率,单位为4 mW/div.对比各波长光信号,光密钥与加密信号波形可以得到,当光信号和光密钥同时为1或0时,没有加密信号脉冲波形;当光信号与光密钥仅有一个为1时,有加密信号脉冲波形.并且加密输出波形与输入光信号波形基本相同.由此可得,利用该方案,能够同时完成8个波长,速率为10 Gbps的光信号的异或加密操作,并且加密过程产生的信号波形失真很小.

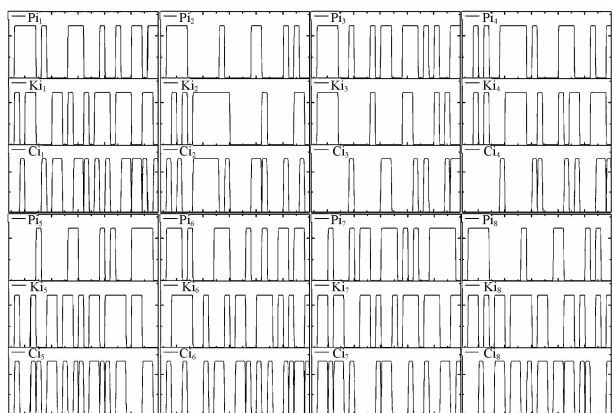


图7 各波长光信号、光密钥、加密信号波形

Fig. 7 Waveform of optical signals, optical keys and encryption outputs at different wavelengths

以波长1545 nm信号为例,根据其眼图说明加密输出信号质量,利用仿真软件的眼图分析功能,如图8所示,将加密输出信号经光电探测器后与 $P_{i1}$ 与 $K_{i1}$ 的直接异或运算结果进行对比,得到其误码率为 $4.19 \times 10^{-86}$ , $Q$ 因子为21.52.而对于波长为1550.6 nm的输入信号,根据式(5)可得,波长为1545 nm输入信号大小为2.8 V的半波电压对1550.6 nm输入信号产生的相移为 $179.32^\circ$ ,仿真得到其加密输出信号误码率为 $4.30 \times 10^{-86}$ , $Q$ 因子为21.51.可以看出8个信号波长在5.6 nm范围内时,利用该方案得到的加密输出信号的误码率与 $Q$ 因子差别很小.

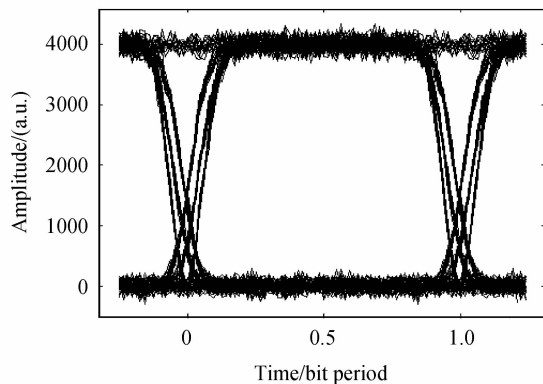


图8 1545 nm信号加密结果眼图

Fig. 8 Eye diagram of encrypted signal at 1545 nm

### 3 性能分析

为了研究该方案在输入信号波长范围较大时的异或加密输出误码率,下面以温度为 $25^\circ$ ,光波导在1545 nm时的半波电压为14 V,并且使图6所示 $u_{PM}$ 大小为14 V,相比以上仿真,仅改变输入信号的波长间隔大小,通过加密输出 $Q$ 因子找出该方案对输入信号波长范围的要求.并讨论多波长输入信号波长范围多大时,该加密方案能够改善输入信号消光比.

从图9可以看出,当 $u_{PM}$ 为1545 nm时的半波电压时,随着输入信号波长与1545 nm差值的增大,加密输出信号的 $Q$ 因子就越来越小.当输入信号波长小于1370 nm时,加密输出 $Q$ 因子小于6.5,误码率大于 $1.5 \times 10^{-5}$ ;而当输入信号波长大于1780 nm时,加密输出 $Q$ 因子小于6.2,误码率大于 $3.5 \times 10^{-5}$ .已经失去了通信的意义.

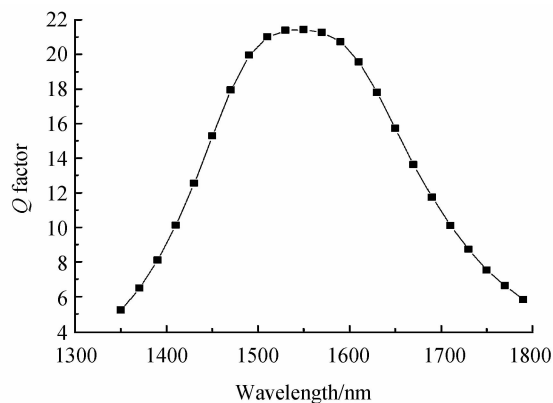


图9 加密输出 $Q$ 因子与输入信号波长关系曲线

Fig. 9 The curve of the relationship between  $Q$  factors of encrypted output and wavelength of input

另外在仿真中发现,对于波长为1545 nm的输入信号,其加密输出信号消光比得到了明显的改善:对比图10与图11可以看出,输入信号 $P_{i1}$ 的

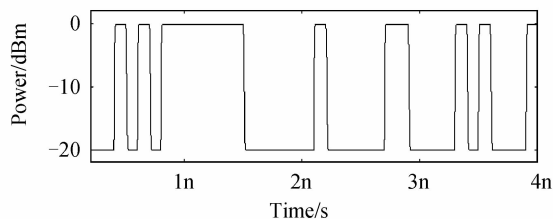


图10  $P_{i1}$ 波形图

Fig. 10 Waveform of  $P_{i1}$

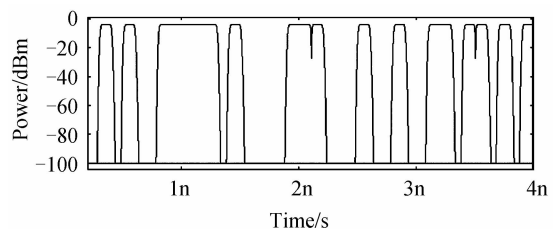


图11 加密输出波形

Fig. 11 Waveform of encrypted output

消光比为 20 dB 左右,而加密输出信号的消光比却几乎达到 100 dB,其原因如下,如图 6 所示,当  $P_{i_1}$  与  $K_{i_1}$  在 coupler<sub>3</sub> 相遇并发生干涉时,干涉输出光强满足

$$I_{out} = I_{P_{i_1}} + I_{K_{i_1}} + 2\sqrt{I_{P_{i_1}} I_{K_{i_1}}} \cos(\Delta\varphi) \quad (12)$$

式中  $I_{P_{i_1}}$  为  $P_{i_1}$  的光强,  $I_{K_{i_1}}$  为  $K_{i_1}$  的光强,  $\Delta\varphi$  为两信号相位差,  $I_{out}$  为干涉输出光强,由于  $K_{i_1}$  经  $\pi$  相移,因此  $\Delta\varphi = \pi$ . 将  $\Delta\varphi = \pi$  带入式 11 并分解因式可得

$$I_{out} = (I_{P_{i_1}} - I_{K_{i_1}})^2 \quad (13)$$

由式(12)可知,当  $P_{i_1}$  与  $K_{i_1}$  的光强越接近时,干涉输出光强越接近 0. 因此,当  $P_{i_1}$  与  $K_{i_1}$  同时为 0 码或 1 码时,由于两信号光强相等,所以干涉输出光强几乎为 0. 当  $P_{i_1}$  与  $K_{i_1}$  只有一个为 1 码时,由于 1 码与 0 码功率相差 20 dB,所以干涉使得 1 码光强减弱可以忽略不计. 而根据消光比的计算公式  $ER = u_1/u_0$  ( $u_1, u_0$  分别为 1 码和 0 码的平均光功率)可知,这种干涉相消改善了异或输出信号的消光比.

但是由于实际中  $u_{PM}(t)$  仅能满足某一波长信号的半波电压,因此其他波长信号难以获得精确的  $\pi$  相移. 下面讨论当光波导在 1 545 nm 半波电压为 14 V, 并且  $u_{PM}(t) = 14$  V 时,输入多波长信号的波长范围如何选择才能够获得消光比大于 20 dB 的异或加密输出.

如图 12 所示,当  $u_{PM}(t) = 14$  V 对光信号的调制相位在  $[175.1^\circ, 184.9^\circ]$  范围内时可以获得消光比大于 20 dB 的异或加密输出. 根据式(5)可得当 1 545 nm 处半波电压产生调制相位的范围为  $[175.1^\circ, 184.9^\circ]$ , 其对应的输入信号波长范围近似为  $[1 507 \text{ nm}, 1 585 \text{ nm}]$ , 可以看出,在近 80 nm 的波长范围内,该方案均能改善异或加密输出信号的消光比.

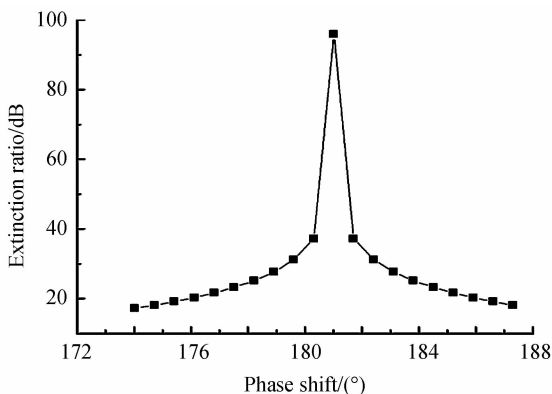


图 12 加密输出信号消光比与调制相位关系曲线

Fig. 12 The curve of relationship between extinction ratio of encrypted output and phase shift

## 4 结论

结合铌酸锂光波导在电场作用下对光相位的影响与光的干涉效应,设计了一种能够实现多波长光信号同时进行异或加密的系统方案. 该方案结构简单,易于集成. 通过对 8 波长速率为 10 Gbps, 波长间隔为 0.8 nm 的波分复用信号的加密仿真,验证了该方案对多波长信号异或加密的可行性与有效性,加密输出信号误码率小于  $4.30 \times 10^{-86}$ ,  $Q$  因子大于 21.51. 并且由于在光域中不需要进行复杂的调节与控制,该方案仅通过在电域对信号的调节与控制即可完成对多波长光信号的加密操作,因此大大降低了该方案的控制难度. 本文通过仿真分析了输入信号波长范围对异或加密输出信号  $Q$  因子的影响,得出利用该方案能够通过给全光异或部分光波导外加 14 V 电压实现波长范围为 1 370~1 780 nm 的多波长信号异或加密操作,加密信号误码率小于  $3.5 \times 10^{-5}$ ; 并且相同条件下,在光明文波长范围为 1 507~1 585 nm 时,输出加密信号消光比高于输入光明文信号消光比.

### 参考文献

- [1] ZHAO Zi-sen. Past, present and future of optical fiber communications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900109.  
赵梓森. 光纤通信的过去、现在和未来[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900109.
- [2] LU Xiang-shan, WANG Yao-shan, SHENG Yan, et al. An algorithm of keeping non-negative integer value in image encryption[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1365-1371.  
吕善翔, 王兆山, 盛堰, 等. 一种保持非负整数值的图像加密算法[J]. *光子学报*, 2012, **41**(11): 1365-1371.
- [3] QIN Yi, ZHENG Chang-bo. Color image encryption based on double random phase encoding[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(3): 326-329.  
秦怡, 郑长波. 基于双随机相位编码的彩色图像加密技术[J]. *光子学报*, 2012, **41**(3): 326-329.
- [4] ZOU Xin, YE Zhi-qing. Controlled by a third party to realize quantum secure dialogue[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 501-504.  
邹昕, 叶志清. 受第三方控制的量子安全对话方案[J]. *光子学报*, 2012, **41**(4): 501-504.
- [5] ZENG Da-kui, MA Li-hong, LIU Jian. Amplitude image optical encryption based on two-step only quadrature phase-shifting interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 72-76.  
曾大奎, 马利红, 刘建. 基于两步正交相移的振幅图像光学加密技术[J]. *光子学报*, 2012, **41**(1): 72-76.
- [6] TRUNG D-vo, RAVI Pant, MARK D-pelusi, et al. Photonic chip-based all-optical XOR gate for 40 and 160Gbit/s DPSK signals[J]. *Optics Letters*, **36**(5): 710-712.
- [7] WANG Qiang, ZHU Guang-hao, CHEN Hong-min, et al. Study of all-optical xor using mach-zehnder interferometer and

- differential scheme [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, **40**(6): 703-710.
- [8] LI Lan-lan, WU Jian, QIU Ji-fang, *et al.* Reconfigurable all-optical logic gate using four-wave mixing(FWM) in HNLF for NRZ-PolSK signal[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**: 3608-3612.
- [9] YU Chang-yuan, LOUIS Christen, LUO Ting, *et al.* All-optical XOR gate using polarization rotation in single highly nonlinear fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(6): 1232-1234.
- [10] JAE Hun-kim, YOUNG Min-jhon, YOUNG Tae-byun, *et al.* All-optical XOR gate using semiconductor optical amplifiers without additional input beam[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(10): 1436-1438.
- [11] HOUBAVLIS T, ZOIROS K. All-optical XOR in a semiconductor optical amplifier-assisted fiber sagnac gate[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, **11**(3): 334-336.
- [12] ZHOU Yun-feng, WU Jian, LIN Jin-tong. Novel ultrafast all-optical XOR scheme based on sagnac interferometric structure[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2005, **41**(6): 823-827.
- [13] QIU Ji-fang, KAI Sun, MARTIN Rochette. Reconfigurable all-optical multi logic gate(XOR, AND, and OR) based on cross-phase modulation in a highly nonlinear fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(16): 1199-1201.
- [14] WANG Jian, SUN Jun-qiang, ZHANG Xin-liang, *et al.* Ultrafast all-optical three-input Boolean XOR operation for differential phase-shift keying signals using periodically poled lithium niobate[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(13): 1419-1421.
- [15] NATALIE Kostinski, KONSTANTIN Kravtsov, PAUL R-prucnal. Demonstration of an all-optical OCDMA encryption and decryption system with variable two-code keying [J]. *Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(24): 2045-2047.
- [16] WANG Ya-ping, WU Chong-qing, WANG Zhi, *et al.* An encryption-decryption method using XOR gate based on the XPM between o-band and c-band light waves[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, **26**(7): 1-3.
- [17] CHANG Wan-son, SEOK Lee, GIL Sang, *et al.* Realization of 10Gbps optical encryption and decryption by using cross-gain modulation[C]. 32nd Australian Conference on Optical Fibre Technology. Melbourne, 2007; 4519130.
- [18] YOUNG Jin-Jung, ChANG Wan-Son, SEOK Lee, *et al.* Demonstration of 10Gbps, all-optical encryption and decryption system utilizing SOA XOR logic gates[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2008, **40**: 425-430.
- [19] MABLE P-Fok, PAYL R-prucnal. All-optical Encryption based on interleaved waveband switching modulation for optical network security[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(9): 1315-1317.
- [20] LUO Hui. The research of key technique of lithium niobate phase modulator [D]. Chengdu; University of Electronic Science and Technology of China, 2006; 8-10.  
罗辉. 铌酸锂相位调制器关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2006;8-10.
- [21] DIETER H-jundt. Temperature-dependent sellmeier equation for the index of refraction  $n_e$  in congruent lithium niobate[J]. *Optics Letters*, 1997, **22**(20):1553-5.