

doi:10.3788/gzxb20154405.0523004

周期性极化铌酸锂晶体的电光复合逻辑门

钟东洲, 计永强

(五邑大学 信息工程学院, 广东 江门 529020)

摘 要:根据准相位匹配线性电光效应耦合波理论, 基于单个周期性极化铌酸锂晶体, 提出了外电场可控的电光复合与门、或门的逻辑计算方法. 采用级联周期性极化铌酸锂晶体, 探讨了外电场可控的电光复合逻辑异或门、半加法器、半减法器的逻辑计算方法. 在外加电场分别为 0.184 KV/mm 和 0.368 KV/mm 条件下, 分析了光波的波长、方位角和极角、晶体的温度对逻辑输出的影响. 研究表明, 基本逻辑门的逻辑计算能够成功实现, 但其逻辑计算对光波波长、晶体温度、方位角和极化角非常敏感, 这些参量轻微的变化会导致逻辑输出的改变. 该方案可推广到更为复杂的基本逻辑门以及三个以上逻辑输入与输出的基本逻辑门中.

关键词:非线性光学; 逻辑门; 电光效应; 周期性极化铌酸锂晶体; 相位匹配; 偏振效应

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)05-0523004-8

Electro-optical Composite Logic Gates Based on Periodically Poled Lithium Niobate Crystal

ZHONG Dong-zhou, JI Yong-qiang

(School of Information Engineering, Wuyi University, Jiangmen, Guangdong 529020, China)

Abstract: According to the coupling-wave theory of quasi-phase-matched linear electro-optic effect, the logical calculation methods of the AND and OR gates with electro-optical composite were proposed based on a single periodically poled lithium niobate. And those of the exclusive-OR gate, half-adder and half-subtractor were further explored based on cascading periodically poled lithium niobate crystal. With the applied electric field fixed at 0.184 KV/mm and 0.368 KV/mm, the influences of the wavelength, the azimuth and the polar angle of light, as well as the temperature of the crystal on the logic output were discussed. It is found that the logical calculation of the above-mentioned basic logic gates can be performed successfully. However, the logical calculation is very sensitive to the temperature, the azimuth and the polar angle. The slight varization of these parameters will lead to the change of the logic output. The calculation scheme can be generalized to applications of more complex basic logic gate, and the various basic logic gates of more than three logic inputs and outputs.

Key words: Nonlinear optics; Logic gate; Electro-optic effect; Periodically poled lithium niobate; Phase matching; Polarization effect

OCIS Codes: 230.3750; 190.3270; 200.3760; 230.2090

0 引言

将晶体的二阶非线性效应(如倍频、和频、差频、参量转换效应)和三阶非线性效应推广应用于电光复合

逻辑门和全光逻辑门一直是研究的焦点^[1-11]. 而基于电光晶体的线性电光效应, 在电光复合逻辑门或全光逻辑门的应用很少受到关注. 其原因是: 长期以来, 线性电光效应通常用折射率椭球理论来描述. 当外电场施

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61475120)和广东省自然科学基金(No. S2011010006105)资助

第一作者: 钟东洲 (1977-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为高速全光信息处理, 高速光电子技术, 激光混沌保密通信等. Email: dream_yu2002@126.com

收稿日期: 2014-11-21; 录用日期: 2015-01-31

<http://www.photon.ac.cn>

加在电光晶体的任意方向且光波沿晶体的任意方向传播时,折射率椭球方程标准化相当困难,甚至无法实现.此外,采用折射率椭球理论,也难以获得最优的外加电场.当折射率椭球理论应用到全光逻辑门或光电复合逻辑门逻辑计算时,很大程度上受到限制.2001年,余等人提出线性电光效应耦合波理论^[12],该理论可以应用到任意光脉冲沿着电光晶体任意方向传播的情形.因此,线性电光效应耦合波理论在电光复合逻辑门和全光逻辑门的逻辑计算中有潜在的应用价值.在此理论中,如何匹配光场的两偏振分量之间相位是最关键的技术问题.目前,与双折射率相位匹配技术相比,基于光学超晶格晶体的准相位匹配技术具有工程上比较容易实现、响应带宽较宽、能利用晶体的最大电光和二阶非线性系数和透明波长范围等优点^[13].而周期性极化铌酸锂晶体(Periodically Poled Lithium Niobate, PPLN),作为光学超晶格晶体典型代表,具有良好的电光特性.它广泛用于线性电光效应相位匹配^[14-17].基于PPLN的线性电光效应的全光和电光逻辑门,其主要优势在于铌酸锂材料上加上准相位匹配技术,使其具有转换效率高、无噪音辐射、对信号格式透明等优点.另外,随着在铌酸锂基底上制作光波导的技术日渐成熟,基于PPLN的逻辑门在未来集成化和小型化方面有着光明前景.因此,基于PPLN的线性电光效应的电光复合逻辑门和全光逻辑门的应用,作为PPLN一个新拓展,拥有很好的应用前景.2011年,陈险峰等提出了基于PPLN线性电光效应的三个基本的非门、异或门和同或门全光逻辑门实现方案^[3-4].在本文中,基于PPLN准相位匹配线性电光效应耦合波理论^[14],提出了外电场可控的电光复合逻辑与门、或门,并通过级联PPLN线性电光效应,提出了电光复合异或门、半加法器、半减法器逻辑门及逻辑计算方法.

1 理论模型

图1为PPLN晶体的线性电光效应,外加电场 E_0 沿晶体坐标轴的y轴方向.频率为 ω 的单色平面波在

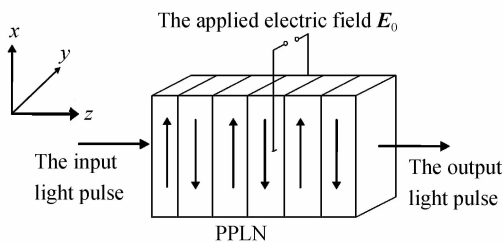


图1 PPLN晶体中线性电光效应

Fig.1 The schematic of linear electro-optical effect in PPLN 双折射晶体传输时,其光场可分解为两个独立或者相互垂直的偏振分量,即

$$\mathbf{E}(\omega) = \mathbf{E}_1(\omega) + \mathbf{E}_2(\omega) = \mathbf{E}_1(r) \exp(i\mathbf{k}_1 r) +$$

$$\mathbf{E}_2(r) \exp(i\mathbf{k}_2 r) \quad (1)$$

式中, \mathbf{k}_1 和 \mathbf{k}_2 表示 \mathbf{E}_1 和 \mathbf{E}_2 所对应的波矢.当 $\mathbf{k}_1 = \mathbf{k}_2$ 时, \mathbf{E}_1 和 \mathbf{E}_2 为电场两个相互垂直的偏振分量,它们的偏振方向可以是任意的.当 $\mathbf{k}_1 \neq \mathbf{k}_2$ 时, \mathbf{E}_1 和 \mathbf{E}_2 对应晶体的两个相互独立的偏振分量,它们对不同的折射率敏感.令

$$\begin{cases} \mathbf{E}_1(r) = \sqrt{\omega/n_o} A_1(r) \mathbf{a} \\ \mathbf{E}_2(r) = \sqrt{\omega/n_e} A_2(r) \mathbf{a} \\ \mathbf{E}(0) = E_0 \mathbf{c} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ 为单位矢量, \circ 光和 e 光单位向量分别为 $\mathbf{a}, \mathbf{b}, A_1(r)$ 和 $A_2(r)$ 是两个偏振分量的归一化振幅; n_o 和 n_e 为 \circ 光与 e 光的折射率; k_0 是光在真空中的波数; E_0 是外加电场的振幅.另外,PPLN晶体结构函数是周期性函数,Fourier级数展开后为

$$f(r) = \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} G_m \exp[i a_m r] \quad (3)$$

式中,第 m 阶倒格矢 $a_m = 2\pi m/\Lambda$; Λ 是晶体极化周期; G_m 是Fourier序列函数.对于 $m \neq 0$, $G_m = \frac{1}{i\pi m} [1 - \cos(2\pi m D) + i \sin(2\pi m D)]$.当 $m = 0$, $G_0 = 2D - 1$, $D = l^+ / (l^+ + l^-)$ 为晶体的占空比, l^+ 和 l^- 分别为晶体的正畴和负畴长度.如图1,当光波沿晶体的 z 轴方向传播时,在外加电场作用下,光脉冲经历非常丰富的二阶非线性效应^[15],例如,线性电光效应: $\omega_{1x}(\circ$ 光) $\leftrightarrow \omega_{1y}(e$ 光).二次谐波效应(Second Harmonic Generation, SHG)或参量下转换(Parametric Down Conversion, PDC): $\omega_{1y} + \omega_{1y} \leftrightarrow \omega_{2y}(ee)$; $\omega_{1x} + \omega_{1y} \leftrightarrow \omega_{2y}(oe)$; $\omega_{1x} + \omega_{1x} \leftrightarrow \omega_{2y}(oo)$; $\omega_{1y} + \omega_{1y} \leftrightarrow \omega_{2x}(ee)$; $\omega_{1x} + \omega_{1y} \leftrightarrow \omega_{2x}(oe)$; $\omega_{1x} + \omega_{1x} \leftrightarrow \omega_{2x}(oo)$;式中,下标1代表基频;下标2表示倍频.考虑晶体中一阶倒格矢($m = 1$)非常接近线性电光效应中 \circ 光和 e 光的波矢失配量 $\Delta k [= 2\pi(n_e - n_o)/\lambda_0]$,即

$$\delta k = a_1 + \Delta k = 0 \quad (4)$$

由于波矢失配,其它阶倒格矢对线性电光效应所起的作用非常小而被忽略.由于PPLN为单轴晶体, \circ 光与 e 光的单位向量为 $\mathbf{a} = (\sin \varphi, -\cos \varphi, 0)$ 和 $\mathbf{b} = (-\cos \theta \cos \varphi, -\cos \theta \sin \varphi, \sin \theta)$.当初始输入光波沿晶体的 z 轴方向(非光轴方向)时(见图1),极角 $\theta = \pi/2$,并且方位角 $\varphi = 0$.设光波的中心波长 $\lambda_0 = 850$ nm,晶体温度 $T = 293$ K,晶体占空比为0.5,根据PPLN晶体的Sellmerier折射率公式^[18],得到 \circ 光的折射率 $n_o = 2.2494$, e 光的折射率 $n_e = 2.1708$,2倍频 \circ 光的折射率 $n_{2o} = 2.451$,2倍频 e 光的折射率 $n_{2e} = 2.306$.因此,对于线性电光效应,波矢失配量 $\Delta k = -5.7880 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$.由式(4)得到极化周期 $\Lambda = 1.0856 \times 10^{-5} \text{ m}$,再根据 $l^+ = D\Lambda$, $l^- = D(l^+ + l^-)$,得到晶体正畴 l^+ 长度和负畴长度 l^- 均为 $5.4278 \mu\text{m}$.在一阶倒格矢 a_1 补

偿下,SHG 或 PDC 效应中的波矢总失配量为:若为 eee 或 oee 效应, $\delta k_1 = 2\pi(n_e - n_{2e})/\lambda_0 + a_1$, 其值为 $-1.743 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$; 在 eeo 或 oeo 条件下, $\delta k_2 = 2\pi(n_e - n_{2o})/\lambda_0 + a_1 = -1.6849 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$; 对于 ooo 或 oeo 效应, $\delta k_3 = 2\pi(n_o - n_{2o})/\lambda_0 + a_1$, 它的值为 $-1.8349 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$. 若为 ooe 或 oee 效应, $\delta k_4 = 2\pi(n_o - n_{2e})/\lambda_0 + a_1 = -1.8930 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$. 由上述讨论可知,在晶体的一阶阶格矢 a_1 完全补偿线性电光效应的波矢失配条件下,SHG 或 PDC 效应中的波矢总失配量比较大,以致这些二次效应非常微弱而被忽略. 因此,在平面波近似下,光在 PPLN 晶体中经历二阶非线性效应仅仅为线性电光效应,其耦合波方程组为^[12]

$$\frac{dA_1(r)}{dr} = -ik_q A_2(r) \exp(i\delta k r) - i\nu_{1q} A_1(r) \quad (5)$$

$$\frac{dA_2(r)}{dr} = -ik_q^* A_1(r) \exp(-i\delta k r) - i\nu_{2q} A_2(r) \quad (6)$$

式中, $k_q = \kappa G_m$, $k_q^* = \kappa G_{-m}$, $\nu_{1q} = \nu_1 G_0$, $\nu_{2q} = \nu_2 G_0$, $\nu_1 = k_0 r_{\text{eff}2} E_0 / 2n_o$, $\nu_2 = k_0 r_{\text{eff}3} E_0 / 2n_e$, 系数 $k = k_0 r_{\text{eff}1} E_0 / 2\sqrt{n_o n_e}$, $r_{\text{eff}i}$ ($i=1, 2, 3$) 是有效的电光系数^[12]. 式(5)和(6)有解析解,即

$$A_1(r) = \rho_1(r) \exp[i\beta r + i\varphi_1(r)] \quad (7)$$

$$A_2(r) = \rho_2(r) \exp[i(\beta - \Delta k)r + i\varphi_2(r)] \quad (8)$$

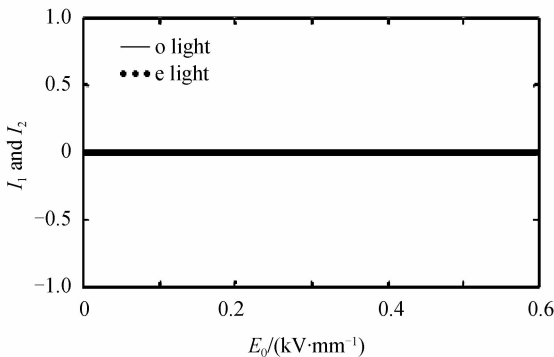
式中

$$\rho_1(r) = \left\{ A_1^2(0) \cos^2(\mu r) + \left[\frac{\gamma A_1(0) - \kappa_q A_2(0)}{\mu} \right]^2 \sin^2(\mu r) \right\}^{1/2} \quad (9)$$

$$\varphi_1(r) = \arg \left[A_1(0) \cos(\mu r) + i \frac{\gamma A_1(0) - \kappa_q A_2(0)}{\mu} \sin(\mu r) \right] \quad (10)$$

$$\rho_2(r) = \left\{ A_2^2(0) \cos^2(\mu r) + \left[\frac{\gamma A_2(0) + \kappa_q^* A_1(0)}{\mu} \right]^2 \sin^2(\mu r) \right\}^{1/2} \quad (11)$$

$$\varphi_2(r) = \arg \left[A_2(0) \cos(\mu r) + i \frac{-\gamma A_2(0) - \kappa_q^* A_1(0)}{\mu} \sin(\mu r) \right] \quad (12)$$



(a) $[A_1(0), A_2(0)] = (0, 0)$

$$\mu = \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta k + \nu_{1q} - \nu_{2q})^2 + 4\kappa_q k_q^*} \quad (13)$$

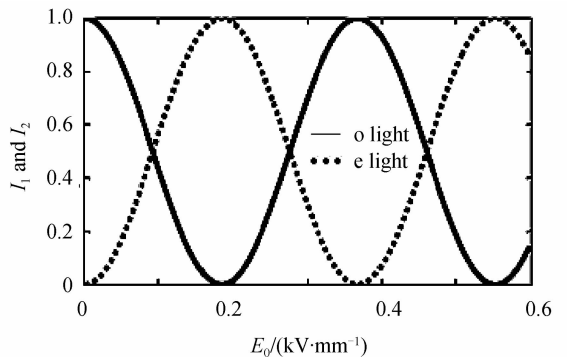
$$\gamma = \frac{1}{2} (\nu_{2q} - \nu_{1q} - \Delta k), \beta = \frac{1}{2} (\Delta k - \nu_{1q} - \nu_{2q}) \quad (14)$$

式中, $A_1(0)$ 和 $A_2(0)$ 为两个偏振分量归一化振幅的初始值.

2 结果与讨论

在计算过程中有电光张量元 $r_{61} = -3.4 \times 10^{-12} \text{ m/V}$, $r_{13} = 8.6 \times 10^{-12} \text{ m/V}$, $r_{33} = 30.8 \times 10^{-12} \text{ m/V}$, $r_{51} = 28 \times 10^{-12} \text{ m/V}$. 假设 $A_1(0)$ 和 $A_2(0)$ 分别表示 o 光和 e 光的初始输入振幅,并令 $A_1(0) = 1$ 或 $A_2(0) = 1$ 表示逻辑输入“1”, $A_1(0) = 0$ 或 $A_2(0) = 0$ 表示逻辑输入“0”. 因此逻辑输入有四种情况: $[A_1(0), A_2(0)] = (0, 0)$; $[A_1(0), A_2(0)] = (0, 1)$; $[A_1(0), A_2(0)] = (1, 0)$; $[A_1(0), A_2(0)] = (1, 1)$. 又假设 $A_1(L)$ 和 $A_2(L)$ 分别表示 o 光和 e 光的逻辑输出,那么,当 $A_1(L) \geq 0.5$ 或 $A_2(L) \geq 0.5$, o 光和 e 光逻辑输出为“1”. 当 $A_1(L) = 0$ 或 $A_2(L) = 0$ 时, o 光和 e 光逻辑输出为“0”.

针对两偏振分量四种不同的逻辑输入情况,计算了两偏振分量输出光强与外加电场的依赖关系,如图2,图中, $I_1 = |A_1|^2$; $I_2 = |A_2|^2$. 从图2(a)中可以发现,当 $[A_1(0), A_2(0)] = (0, 0)$ 时,两偏振光的输出轨迹为一条直线,且为零,这表明,两偏振光的输出与外加电场无关,即 $[A_1(L), A_2(L)] = (0, 0)$. 当 $[A_1(0), A_2(0)] = (0, 1)$ 和 $[A_1(0), A_2(0)] = (1, 1)$ 时,随外加电场的增加, e 光输出光强表现出余弦周期性变化, o 光输出光强呈现正弦周期性变化,因此,通过改变外加电场,可以得到不同的逻辑输出. 例如,如表1所示,在 $[A_1(0), A_2(0)] = (0, 1)$ 条件下,对于 $E_0 = 0.368 \text{ KV/mm}$, $[A_1(L), A_2(L)] = (0, 1)$; 若 $E_0 = 0.184 \text{ KV/mm}$, $[A_1(L), A_2(L)] = (1, 0)$. 在 $[A_1(0), A_2(0)] = (1, 1)$ 条件下,若 E_0 固定在 0.368 KV/mm , $[A_1(L), A_2(L)] = (1, 1)$; 对于 $E_0 = 0.276 \text{ KV/mm}$, $[A_1(L), A_2(L)] = (0, 1)$. 同理,当两偏振光输入 $[A_1(0), A_2(0)] = (1, 0)$ 时, e 和 o 光输出光强随外加电场分别成正弦和余弦周期性变



(b) $[A_1(0), A_2(0)] = (0, 1)$

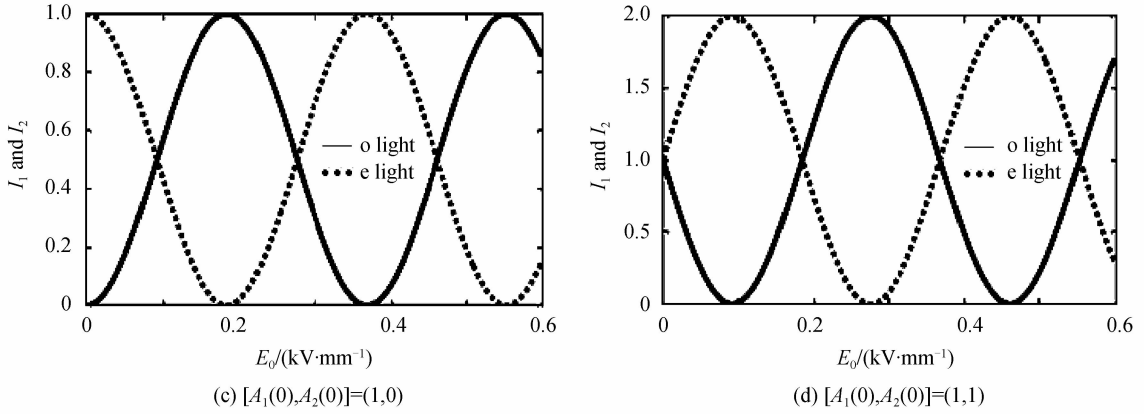


图2 不同逻辑输入时输出o光和e光与外加电场 E_0 的关系

Fig. 2 For four logic inputs the vs high-intensity of the output vs the applied electric field E_0

化.这时,通过调控外加电场,也可以得到不同的逻辑输出,见表1.

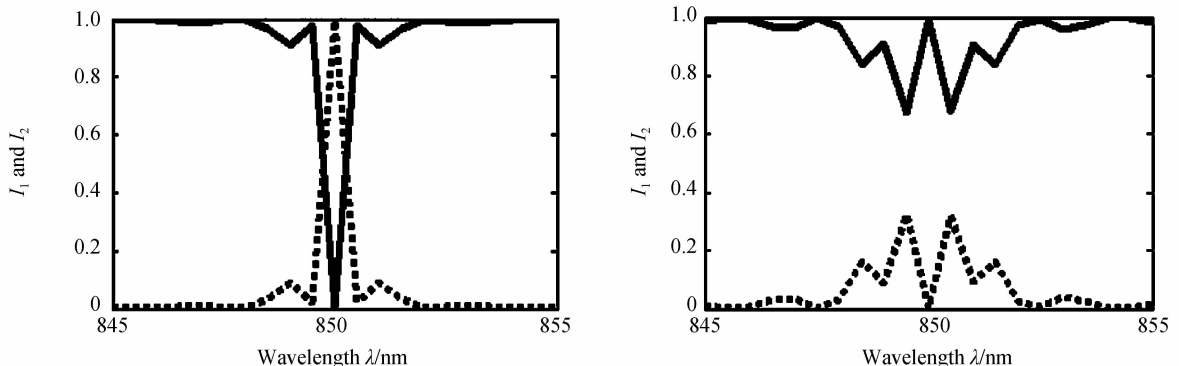
表1 不同外电场下的输出逻辑信号真值表

Table 1 The truth table of the output logic signals under different applied electric field

E_0 (KV/mm)	$A_1(0)$	$A_2(0)$	$A_1(L)$	$A_2(L)$
0.368	0	0	0	0
0.368	0	1	0	1
0.368	1	0	1	0
0.368	1	1	1	1
0.184	0	0	0	0
0.184	0	1	1	0
0.184	1	0	0	1
0.184	1	1	1	1
0.276	0	0	0	0
0.276	0	1	X	X
0.276	1	0	X	X
0.276	1	1	0	1

针对表1中所给出的二个外加电场 $E_0 = 0.184$ KV/mm和 0.368 KV/mm,以输入逻辑 $[A_1(0), A_2(0)] = (0, 1)$ 为例,计算o光和e光光强与光波波长 λ 、方位角 φ 和极角 θ ,以及晶体温度 T 的关系,如图3.图中,实线为e光光强;点线为o光光强.左边一列图中 $E_{01} = 0.184$ KV/mm;右边一列图中 $E_{01} =$

0.368 KV/mm.图(a)~(d)分别表示o光和e光光强与光波波长、晶体温度、极化角与方位角 θ 的变化关系.从图3(a)可知,两线性偏振光强对光波波长、极角和方位角、以及晶体温度非常敏感.这些参量的改变会引起o光光强和e光光强之间的相互转换,从而引起逻辑输出的改变,降低逻辑门成功实现的概率.其原因可以解释为,由于晶体的一阶倒格矢 a_1 只能补偿在 $\lambda = 850$ nm, $\varphi = 0$, $\theta = \pi/2$ 和 $T = 293$ K 条件下的两线性偏振光的波矢失配.但在上述四个参量中,其中一个参量的变化会引起两线性偏振光折射率发生改变,从而引起波矢失配发生变化,这时,一阶倒格矢 a_1 不能完全补偿波矢失配,从而引起两偏振光之间的光电效应转换效率下降,改变逻辑输出.例如,在 $E_0 = 0.184$ KV/mm的条件下,当光波波长 $\lambda = 850$ nm时,一阶倒格矢 a_1 完全补偿波矢失配,输出逻辑信号 $[A_1(L), A_2(L)] = (1, 0)$,若光波波长 $\lambda < 848$ nm或 $\lambda > 852$ nm,其它参量不变时,由于波矢失配量增大, a_1 不能完全补偿,两线性偏振光之间的转换效率几乎为零,所以输出逻辑信号与输入逻辑信号一样,即 $[A_1(L), A_2(L)] = (0, 1)$, [见图3(a)左图].同理,如图3(b)所示,当 $T = 293$ K时; $[A_1(L), A_2(L)] = (1, 0)$;在 $T = 293 \pm 5$ K处,逻辑输出 $[A_1(L), A_2(L)] = (0,$



(a) $\theta = \pi/2, \varphi = 0, T = 293$ K

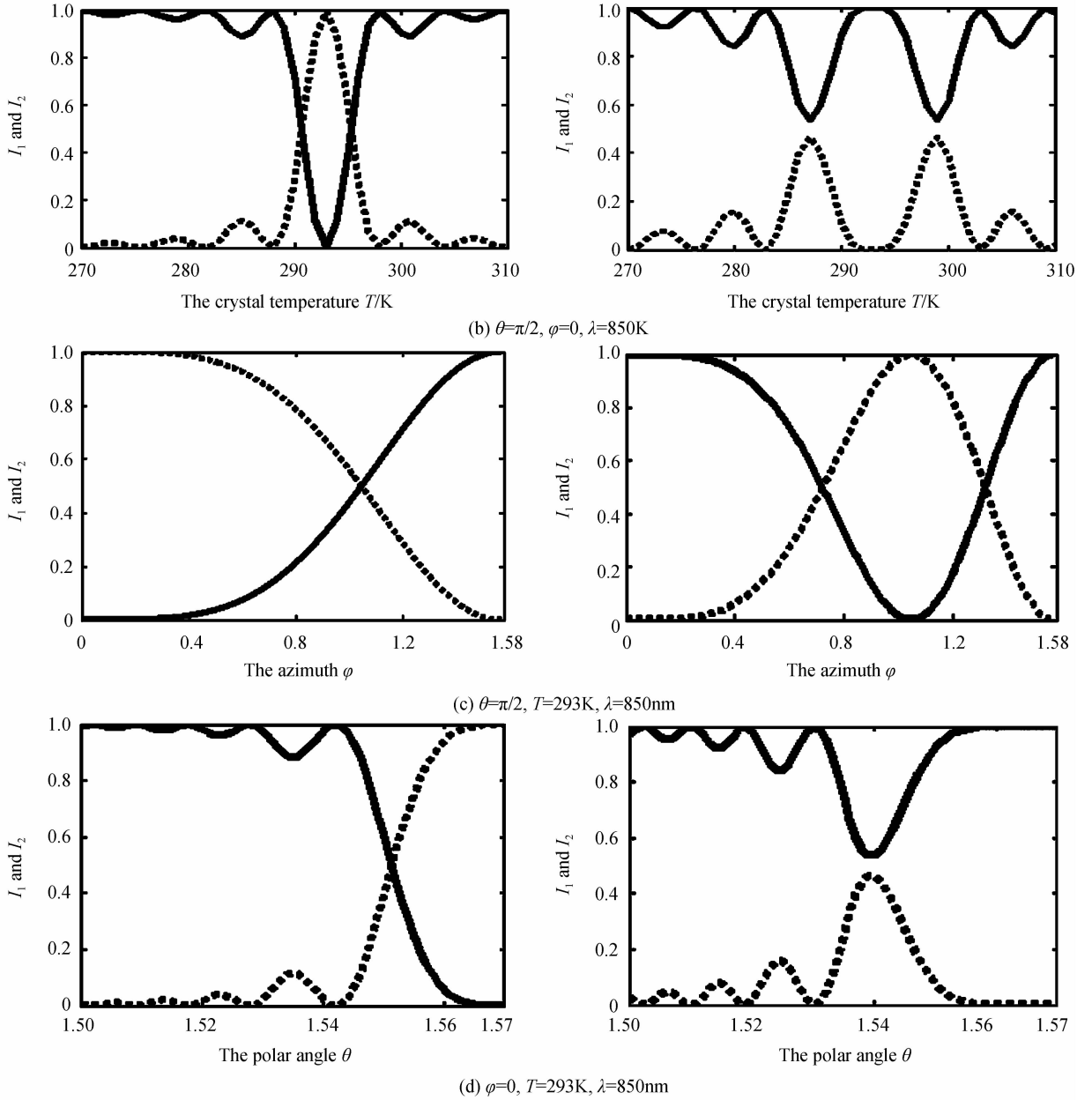


图3 针对不同外加电场, o光和e光光强与光波波长 λ 、方位角 φ 和极角 θ ,以及晶体温度 T 的依赖关系
 Fig. 3 For different applied electric field, the dependences of the intensity of the o-and e-light on wavelength of light λ , the azimuth φ and the polar angle θ , as well as the crystal temperature T

1);而在 $T=293 \pm 2.34$ K 处, $[A_1(L), A_2(L)] = (1, 1)$. 若极角依次为 $0, 1.07, 1.57$ 时, 逻辑输出依次为 $(1, 0), (1, 1), (1, 0)$, [见图 3(c)左图]. 如图 3(d)左图所示, 当方位角 θ 依次等于 $1.5, 1.5513, 1.57$ 时, 逻辑输出依次为 $(0, 1), (1, 1), (0, 1)$. 同样, 对于 $E_0 = 0.368$ KV/mm, 当上述四个参量中的其中一个发生改变时, 会导致逻辑输出的改变. 因此, 稳定上述参量值是电光复合逻辑门计算的必要条件. 根据表 1 所给出真值表, 本文讨论电光复合逻辑与、或门, 异或门、半加器和减法器的逻辑计算.

首先给出外加电场可控的电光复合逻辑与门和逻辑或门逻辑计算示意图, 如图 4. 图中, $A_1(0)$ 和 $A_2(0)$

分别为 o 和 e 光逻辑输入; $A_1(L)$ 和 $A_2(L)$ 分别为 o 和 e 光逻辑输出; PD 为光电二极管. Q 是电逻辑与门的输出, 用来控制 PPLN 晶体的外加电场; 可调直流高压源用来提供不同的外加电场(以下相同); 电路控制单元用来调控直流高压源输出电场大小(以下相同). 如图 4, 逻辑输入信号 $A_1(0)$ 和 $A_2(0)$ 被分成两路, 其中一路中的两个逻辑输入信号直接注入到 PPLN 中, 并在外加电场作用下经历线性电光光强调制; 另一路信号中的两个逻辑输入信号经过 PD 后转换成两个对应的电逻辑信号. 其中一个来自于 $A_2(0)$ 的电信号首先被电逻辑非运算, 然后与另一个来自于 $A_1(0)$ 的电信号进行电逻辑与运算, 其逻辑输出定义为 Q. 直流高压控制

单元通过 Q 值来改变直流高压源的电压,从而改变施加于晶体的外加电场 E_0 . 表 2 为外加电场可控的光电复合逻辑与门和逻辑或门真值表,当 $[A_1(0), A_2(0)] = (1, 0)$ 时, $Q = 1$. 由 Q 值可知, 直流高压源输出电场 $E_0 = 0.184$ KV/mm. 这时, $[A_1(L), A_2(L)] = (\overline{A_1(0)}, \overline{A_2(0)})$; 当 $[A_1(0), A_2(0)] \neq (1, 0)$ 时, $Q = 0$. 根据 Q 值, 通过电路控制单元使直流高压源产生的电场为 0.368 KV/mm, 有 $[A_1(L), A_2(L)] = [A_1(0), A_2(0)]$. 从表 2 中, 可以得出输出 $A_1(L) = A_1(0)A_2(0)$; $A_2(L) = A_1(0) + A_2(0)$. 系统可以实现“与”和“或”的逻辑运算.

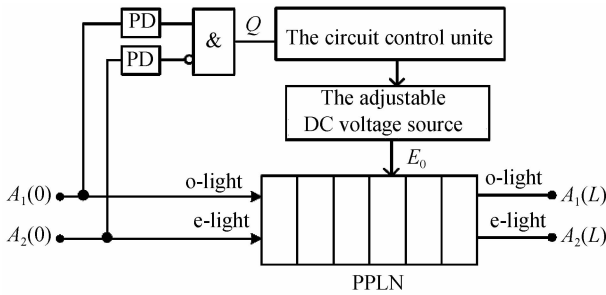


图 4 外加电场可控的光电复合逻辑与门和逻辑或门逻辑计算原理

Fig. 4 The logic calculation schematic of electro-optical composite logic OR gate and AND one controlled by the applied electric field

表 2 外加电场可控的电光复合逻辑与门和逻辑或门的真值表

Table 2 The truth table of the logic OR and AND gates with Electro-optical composite controlled by the applied electric field

$A_1(0)$	$A_2(0)$	Q	$A_1(L)$	$A_2(L)$	E_0 (KV/mm)
0	0	0	0	0	0.368
0	1	0	0	1	0.368
1	0	1	0	1	0.184
1	1	0	1	1	0.368

图 5 为外加电场可控的电光复合异或逻辑门原理. 图中, Y 为输入信号 $A_1(0)$ 和 $A_2(0)$ 经过两级联 PPLN 后输出; Q_1 和 Q_2 分别用来控制 PPLN₁ 和 PPLN₂ 外加电场; 两个相同的 PPLN₁ 和 PPLN₂ 被级联. 如图 5 所示, 逻辑输入信号 $A_1(0)$ 和 $A_2(0)$ 都被分成两路, 其中一路两个逻辑输入信号直接注入到 PPLN₁, 并在外加电场作用下经历线性电光光强调制. PPLN₁ 输出逻辑信号, 作为 PPLN₂ 的逻辑输入, 再经线性电光效应电光光强调制. 取 PPLN₂ 的输出 o 光为逻辑输出, 其定义为 Y . 另一路中两个输入逻辑信号经过 PD 后转换成两个对应的电逻辑信号. 这两个电逻辑信号又被分成两路, 其中一路直接被与运算, 其输出被定义为 Q_2 , 它用来控制施加于 PPLN₂ 的外电场 E_{02} . 另一路中一个来自于 $A_1(0)$ 的电信号首先被电逻辑非运算, 然后与另一个来自于 $A_2(0)$ 的电信号进行电逻辑与运算, 其逻辑输出定义为 Q_1 . 它用来控制 PPLN₁ 的

外加电场. 当 $(A_1(0), A_2(0)) = (0, 1)$ 时, Q_1 等于 1, E_{01} 为 0.184 KV/mm. 当 $(A_1(0), A_2(0)) \neq (0, 1)$, Q_1 为 0, E_{01} 为 0.368 KV/mm. 在 PPLN₁ 的外加电场控制电路中, 当输入 E_{01} 为 0.368 KV/mm; 在 PPLN₂ 的外加电场控制电路中, 当输入 $(A_1(0), A_2(0)) = (1, 1)$ 时, $Q_2 = 1, E_{02}$ 为 0.276 KV/mm. 若 $(A_1(0), A_2(0)) \neq (1, 1)$, Q_2 等于 0, E_{02} 为 0.368 KV/mm. 根据表 (1), 可得到输出光信号 Y 的真值表, 如表 3. 从表 3 中, 可以看出 $Y = A_1(0) \oplus A_2(0)$, 即实现异或门逻辑运算.

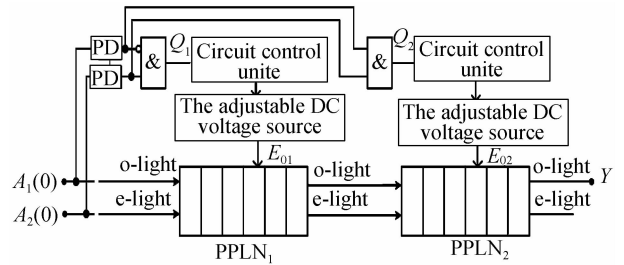


图 5 外加电场可控的电光复合异或逻辑门逻辑计算原理
Fig. 5 The logic calculation schematic of electro-optical composite logic XOR gate controlled by the applied electric field

表 3 电光复合逻辑异或门真值表

Table 3 The truth table of the electro-optical composite logic XOR gate

$A_1(0)$	$A_2(0)$	Q_1	Q_2	Y	E_{01} (KV/mm)	E_{02} (KV/mm)
0	0	0	0	0	0.368	0.368
0	1	1	0	1	0.184	0.368
1	0	0	0	1	0.368	0.368
1	1	0	1	0	0.368	0.276

对于半加法器, 其逻辑输出信号等于两个输入逻辑信号相加, 这里, 假设 S 为加数, C 为进位数. 给出电光复合逻辑半加法器的逻辑计算原理, 如图 6. 图中, S 和 C 分别为加数和进位数; Q_1 和 Q_2 分别用来控制 PPLN₁ 和 PPLN₂ 外加电场. PPLN₁ 输出 e 光为进位数 C , PPLN₂ 输出 o 光为加数 S . 在图 6 的 PPLN₁ 的外加电场控制电路中, 当 $[A_1(0), A_2(0)] = (1, 0)$ 时, $Q_1 = 1$, 可调直流高压源产生外加电场 $E_{01} = 0.368$ KV/mm. 若 $[A_1(0), A_2(0)] \neq (1, 0)$ 时, $Q_1 = 0$, 并且 $E_{01} = 0.184$ KV/mm. 在图 6 的 PPLN₂ 的外加电场控制电路中, 当 $[A_1(0), A_2(0)] = (1, 1)$ 时, $Q_2 = 1$, 有 $E_{02} = 0.276$ KV/mm; 对于 $[A_1(0), A_2(0)] \neq (1, 1)$, $Q_2 = 0$, 则 $E_{02} = 0.368$ KV/mm. 这样, 由表 1, 得电光复合逻辑半加法器的真值表, 如表 4, 表中外加电场 E_{01} 和 E_{02} 单位为 KV/mm(以下相同). 从表 4 可知, 当 $[A_1(0), A_2(0)] = (0, 0)$, $S = 0$ 和 $C = 0$; 若 $[A_1(0), A_2(0)] = (0, 1)$, $S = 1$ 和 $C = 0$; 对于 $[A_1(0), A_2(0)] = (1, 0)$, $S = 1$ 和 $C = 0$; 当 $[A_1(0), A_2(0)] = (1, 1)$, $S = 0$ 和 $C = 1$. 因此, 有 $S = A_1(0) \oplus A_2(0)$, $C = A_1(0)A_2(0)$. 这样, 系统实现了电光复合半加法逻辑计算.

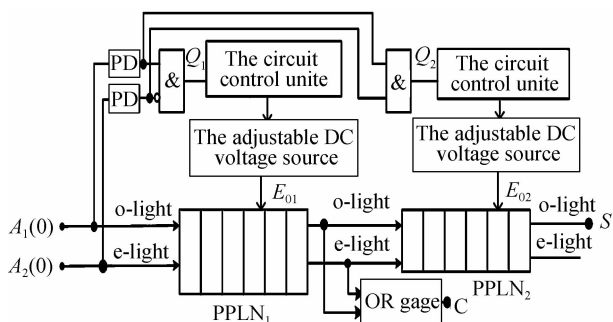


图 6 电光复合半加器原理

Fig. 6 The logic calculation schematic of electro-optical composite half-adder

表 4 电光复合逻辑半加器真值表

Table 4 The truth table of electro-optical composite half-adder

$A_1(0)$	$A_2(0)$	Q_1	Q_2	S	C	E_{01}	E_{02}
0	0	0	0	0	0	0.184	0.368
0	1	0	0	1	0	0.184	0.368
1	0	1	0	1	0	0.368	0.368
1	1	0	1	0	1	0.184	0.276

进一步给出电光复合逻辑半减器计算原理,如图 7,图中, S_1 为减数, C_1 为借位数; Q_1 和 Q_2 分别用来控制 E_{01} 和 E_{02} . PPLN₁ 输出 o 光作为借位数 C_1 , PPLN₂ 输出 o 光作为借位数 S_1 . 在 E_{01} 的控制电路中,当 $[A_1(0), A_2(0)] = (1, 1)$ 时, $Q_1 = 1$, 则 $E_{01} = 0.276$ KV/mm; 若 $[A_1(0), A_2(0)] \neq (1, 1)$, $Q_1 = 0$, 有 $E_{01} = 0.184$ KV/mm. 对于 E_{02} 的控制电路, 当 $[A_1(0), A_2(0)] = (0, 1)$ 时, $Q_2 = 1$, 则 $E_{02} = 0.184$ KV/mm; 若 $[A_1(0), A_2(0)] \neq (0, 1)$, $Q_2 = 0$, 并且 $E_{02} = 0.368$ KV/mm. 因此, 由表 1 得到电光复合逻辑半减器的真值表, 如表 5. 从表 5 中, 可以得到: 若 $[A_1(0), A_2(0)] = (0,$

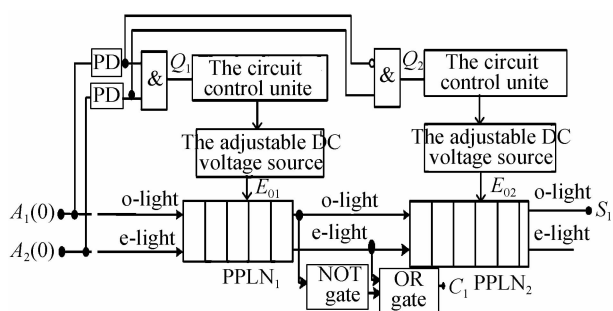


图 7 电光复合逻辑半减器计算原理

Fig. 7 The logic calculation schematic of electro-optical composite half-subtractor

表 5 电光复合逻辑半减器真值表

Table 5 The truth table of the electro-optical composite logic half-subtractor

$A_1(0)$	$A_2(0)$	Q_1	Q_2	S_1	C_1	E_{01}	E_{02}
0	0	0	0	0	0	0.276	0.368
0	1	0	0	1	1	0.276	0.368
1	0	0	1	1	0	0.276	0.184
1	1	1	0	0	0	0.184	0.368

$0)$, $S_1 = 0$ 和 $C_1 = 0$; 当 $[A_1(0), A_2(0)] = (0, 1)$ 时, $S_1 = 1$ 和 $C_1 = 1$; 对于 $[A_1(0), A_2(0)] = (1, 0)$, $S_1 = 1$ 和 $C_1 = 0$; 若 $[A_1(0), A_2(0)] = (1, 1)$, $S_1 = 0$ 和 $C_1 = 0$. 结果, $S_1 = A_1(0) \oplus A_2(0)$, $C_1 = \overline{A_1(0)} A_2(0)$, 表明, 系统可以实现半减器的逻辑运算.

总之, 在上述逻辑门计算方案中, 针对每一种逻辑门的输入与输出逻辑关系, 根据 o 光和 e 光四种不同的逻辑输入状态, 通过外部电路控制单元来调控直流高压源, 使其产生一定的外加电场, 从而得到相应的逻辑输出. 与现有的逻辑门, 如基于半导体光放大器的逻辑门, 基于高非线性光纤的逻辑门, 逻辑计算方法相比, 该逻辑计算方法可以根据逻辑门的输入与输出的逻辑关系, 自适应调控外加电场, 得到相应的逻辑输出, 从而构建多个基本的逻辑门. 由于这些电光复合逻辑门的逻辑计算方案具有可控性和自适应性, 也可以扩展到其他更为复杂的逻辑门、以及具有 3 个以上的逻辑输入和输出的各种基本的逻辑门.

3 结论

根据 PPLN 的准相位匹配线性电光效应耦合波理论, 提出了外电场可调的电光复合逻辑门的计算方案. 在该方案中, 根据 o 光和 e 光的四种不同逻辑输入, 以及逻辑门的输入与输出逻辑关系, 通过电路控制单元调控直流外加电场, 使 PPLN 产生相应的逻辑输出, 结果表明, 基于单个 PPLN 的电光复合与门和或门逻辑计算成功被实现, 并且, 基于两个级联 PPLN 的电光复合异或门、半加法器和半减法器的逻辑计算也是可行的. 该逻辑计算方法可以根据各种逻辑门的输入与输出的逻辑关系, 自适应调控外加电场, 得到相应的逻辑输出. 在光子信号处理、光学通信、光学互联、可控调的光电子逻辑器件有潜在的应用价值.

参考文献

[1] WANG Wen-ru, YU Jin-long, HAN Bing-chen, et al. All-optical logic gates based on nonlinear polarization rotation in high nonlinear fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(8): 268-276.
 王文睿, 于晋龙, 韩丙辰, 等. 基于高非线性光纤中非线性偏振旋转效应的全光逻辑门研究[J]. *物理学报*, 2012, **61**(8): 268-276.

[2] GUO L Q, CONNELLY M J. All-optical AND gate with improved extinction ratio using signal induced nonlinearities in a bulk semiconductor optical amplifier[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(7): 2938-2943.

[3] ZHANG Yin-xing, CHEN Yu-ping, CHEN Xian-feng. Polarization-based combinational optoelectronic logic controlled-NOT, XOR, and XNOR gates employing electro-optic effect in periodically poled lithium niobate[J]. *Applied Physics Letter*, 2011, **99**(16): 161117-161119.

[4] TANG Yu-bin, CHEN Yu-ping, JIANG Hao-wei, et al. Proposal for simultaneous combinational optoelectronic AND, NOR, and XNOR logic gates using QPM cascading nonlinear effects in two PPLNs[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, **11**

- (6): 061901.
- [5] WANG J, SUN J Q, ZHANG X F, *et al.* Ultrafast combinational optoelectronic three-input Boolean XOR operation for differential phase-shift keying signals using periodically poled lithium niobate[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(13): 1419-1421.
- [6] WANG J, SUN J, SUN Q, *et al.* Dual-channel-output combinational optoelectronic logic AND gate at 20 Gbit/s based on cascaded second-order nonlinearity in PPLN wave guide[J]. *Electronics Letters*, 2007, **43**(17): 940-941.
- [7] WANG J, SUN J, SUN Q, *et al.* Combinational optoelectronic tunable wavelength conversion with extinction ratio enhancement using periodically poled lithium niobate waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(17): 3137-3148.
- [8] WENG Zi-Hua, ZHU Jin-pan, HE Jing-yan, *et al.* All-fiber magneto-optic switch with the nanosecond-level switching-time [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12): 1441-1446.
翁梓华, 朱金攀, 何竞彦, 等. 纳秒量级开关时间的全光纤磁光开关[J]. *光子学报*, 2012, **41**(12): 1441-1446.
- [9] CHLOUVERAKIS K E, ADAM M J. Optoelectronic realization of NOR logic gate using chaotic two-section lasers [J]. *Electronics Letters*, 2005, **41**(6): 8026-8027.
- [10] DUAN Jie, XIE Xiao-ping, DUAN Tao, *et al.* An all-optical exclusive-OR gate based on terahertz optical asymmetric demultiplexer-four wave mixing effect[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(9): 1031-1038.
段杰, 谢小平, 段涛, 等. 基于太赫兹光解复用器-四波混频效应的全光异或门方案[J]. *光子学报*, 2013, **42**(9): 1031-1038.
- [11] PARAMESWARAN K R, FUJIMURA M, CHOU M H, *et al.* Low-power combinational optoelectronic gate based on sum frequency mixing in APE waveguides in PPLN [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **12**(6): 654-656.
- [12] SHE W L, LEE W K. Wave coupling theory of Linear electro-optic effect[J]. *Optics Communications*, 2001, **195**(1): 303-311.
- [13] LU Y Q, WAN Z L, WANG Q, *et al.* Electro-optic effect of periodically poled optical superlattice LiNbO₃ and its applications[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, **77**(23): 3719-3721.
- [14] ZHENG Guo-liang, WANG Hong-cheng, SHE Weilong. Wave coupling theory of Quasi-phase-Matched linear electro-optic effect[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(12): 5535-5540.
- [15] HUANG D, SHE W L. High-flux photon-pair source from electrically induced parametric down conversion after second-harmonic generation in single optical superlattice[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(13): 8275-8283.
- [16] XIE Xiao-ping, DUAN Jie, DUAN Tao, *et al.* An all-optical encryption system schem for 8 wave signals based on LiNbO₃ waveguide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(10): 1169-1175.
谢小平, 段杰, 段涛, 等. 基于铌酸锂光波导的8波长信号全光加密系统方案[J]. *光子学报*, 2013, **42**(10): 1169-1175.
- [17] ZHU W G, SHE W L. Generation of tunable three-dimensional polarization in 4pi focusing system[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(14): 17265-17274.
- [18] HOB DEN M V, WARMER J. The temperature dependence of the refractive indices of pure lithium niobate[J]. *Physics Letters*, 1996, **22**(3): 243-244.