

# 级联电光光子晶体的研究进展

蒋洪苇, 李广珍, 刘一岸, 陈玉萍, 陈险峰

上海交通大学物理与天文系, 上海 200240

**摘要** 利用级联的线性电光效应对光进行控制是一种非常有效而且常用的控制光的手段。对于周期性畴反转铌酸锂(PPLN)一维光子晶体,在平行于光轴方向施加电场可周期性改变折射率大小,形成电光光子晶体结构;在垂直于光轴方向施加电场不仅可以改变折射率椭球大小,同时可以周期性改变折射率椭球主轴方向。综述了部分已报道的基于周期性的级联电光效应的应用,介绍了其在可调的手性器件、全光逻辑门、基于快慢光的时间隐身和非线性光学等方面的应用,展望了级联电光效应在未来集成光子芯片中的潜在应用。

**关键词** 非线性光学; 级联电光光子晶体; 电光效应; 铌酸锂

**中图分类号** O734+.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.060001

## Recent Advances in Cascading Electro-Optic Photonic Crystal

Jiang Haowei, Li Guangzhen, Liu Yian, Chen Yuping, Chen Xianfeng

*Department of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*

**Abstract** Controlling light based on cascading linear electro-optic effect is an effective and widely used method for light modulation. For a one-dimensional photonic crystal like periodically poled lithium niobate (PPLN), while electric field is applied parallel to the optical axis, the refractive index is periodically changed, and an electro-optic photonic crystal is formed. While electric field is applied vertically to the optical axis, not only the size of refractive index ellipsoid is periodically changed, but also the direction of spindle of refractive index ellipsoid is periodically changed. Some of the applications based on cascading electro-optic effect are reviewed, including tunable chirality devices, all optical logic gates, temporal cloak based on simultaneous fast and slow light, and nonlinear optics. The great potential applications of the cascading electro-optic effects in integrated photonic circuit are predicted.

**Key words** nonlinear optics; cascading electro-optic photonic crystal; electro-optic effect; lithium niobate

**OCIS codes** 190.4360; 230.2090; 160.3730

## 1 引言

根据信息学摩尔定律,计算机的运算速度每18个月翻一番。随着信息科学技术的飞速发展,传统的基于电子的信息处理和传输器件因受电子本身物理性质的限制,已接近其瓶颈,难以继续保持高速增长。于是研究人员开始考虑使用新的信息载体实现信息的传播、处理和存储。由于光子传输速率高以及光子之间不易互相干扰,利用光子搭建超高速和大容量的全光信息网络是长期以来的目标<sup>[1-2]</sup>。光纤替代电缆并作为主要媒介来进行网络信号传输已经基本实现。但以目前所掌握的技术,光子不如电子易于操控,所以在信息处理单元,微电子技术依然占据主流。尽管如此,近年来集成光学器件依然取得了一定的进展。2007年Guarino等<sup>[3]</sup>在铌酸锂微环腔上集成电极,实现了片上电光调制。2016年Mhaouech等<sup>[4]</sup>在周期性畴反转

**收稿日期:** 2017-01-13; **收到修改稿日期:** 2017-01-31

**基金项目:** 国家自然科学基金(11574208,10874120,61235009)

**作者简介:** 蒋洪苇(1991—),男,博士研究生,主要从事电光效应及非线性光学等方面的研究。

E-mail: jsjdjhw@sjtu.edu.cn

**导师简介:** 陈玉萍(1974—),女,博士,副教授,主要从事非线性光学和飞秒激光微纳加工等方面的研究。

E-mail: ypch@sjtu.edu.cn(通信联系人)

铌酸锂(PPLN)平面波导中实现了低驱动电压的电光布拉格衍射。Chang 等<sup>[5]</sup>在铌酸锂薄膜上实现了集成的畴反转调制,并利用准相位匹配实现了频率转换。Lin 等<sup>[6]</sup>利用铌酸锂微腔实现了相位匹配的二阶非线性转换。

光子晶体的产生为有效操纵光子提供了一种有效的解决方案。光子晶体的概念由 John 和 Yablonovitch 在 1987 年分别独立提出<sup>[7-8]</sup>。光子晶体由介电系数在空间上周期性变化的电介质构成,当光子晶体的周期和波长量级接近时,光的色散曲线发生分裂,从而形成人工的光子带隙结构。传统光子晶体的折射率的分布和大小是固定的,这里主要介绍折射率可调的电光光子晶体。对于 PPLN 一维单轴光子晶体,其线性电光系数受周期性的反转调制,通过外加电场可实现对折射率的周期性调制<sup>[9]</sup>。在平行于光轴方向施加电场,可以周期性放大或缩小折射率椭球主轴的长度,从而形成折射率周期性变化的电光光子晶体。在垂直于光轴方向施加电场不仅可改变折射率椭球主轴的长度,还会周期性改变折射率椭球主轴方向,该周期性的旋转使得光子晶体在产生人工带隙结构的同时还会对光的偏振信息进行调制<sup>[10]</sup>。电光光子晶体折射率周期性变化的幅度与外加电场的大小线性相关,这使得一切基于该原理的光子晶体均具有带隙可调的性质。

从构建全光信息处理系统的目标出发,综述了部分已报道的基于上述周期性的级联电光效应的应用。介绍了其在可调的手性器件、全光逻辑门、基于快慢光的时间隐身和非线性过程调制等方面的应用,展望了级联电光效应在未来的集成光子芯片中的应用<sup>[11-16]</sup>。

## 2 基本原理

### 2.1 线性电光效应

电光效应指置于电场中的物质的光学性质随电场发生变化的现象。常见的电光效应有:1) 折射率变化与电场强度呈线性关系,称为线性电光效应,又叫泡克耳斯效应;2) 折射率变化与电场强度的平方呈线性关系,称为电光克尔效应。

线性电光效应只存在于非各向同性介质中,介质中光的折射率与方向有关。以铌酸锂晶体为例,折射率椭球在电场作用下的形式为

$$\left(\frac{1}{n_o^2} - \gamma_{22}E_Y + \gamma_{13}E_Z\right)X^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} - \gamma_{22}E_Y + \gamma_{13}E_Z\right)Y^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + \gamma_{33}E_Z\right)Z^2 + 2\gamma_{51}E_YYZ - 2\gamma_{51}E_XXZ - 2\gamma_{51}E_XXY = 1, \quad (1)$$

式中  $E_X$ 、 $E_Y$ 、 $E_Z$  分别为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的电场; $n_o$  为无外加电场时寻常光的折射率; $n_e$  为无外加电场时非寻常光的折射率; $\gamma_{22}$ 、 $\gamma_{13}$ 、 $\gamma_{33}$ 、 $\gamma_{51}$  为线性电光效应的电光系数。分别考虑外加电场方向垂直于光轴(横向电光效应)和平行于光轴(纵向电光效应)两种情况。令光轴沿  $Z$  方向。当仅施加垂直于光轴的  $Y$  方向电场时, $E_X = 0$ ,  $E_Z = 0$ , 将坐标在  $YZ$  平面内进行旋转变换,有

$$\begin{cases} X = X' \\ Y = Y' \cos \theta - Z' \sin \theta \\ Z = Y' \sin \theta + Z' \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

根据(2)式可以得到新坐标下的主轴折射率为

$$\begin{cases} n'_X = n_o + \frac{1}{2}\gamma_{22}E_Y n_o^3 \\ n'_Y = n_o - \frac{1}{2}\gamma_{22}E_Y n_o^3 - \frac{1}{2}\gamma_{51}E_Y n_o^3 \tan \theta \\ n'_Z = n_e + \frac{1}{2}\gamma_{51}E_Y n_e^3 \tan \theta \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\theta$  为折射率椭球整体旋转的角度,满足

$$\tan(2\theta) = \frac{2\gamma_{51}E_Y}{1/n_o^2 - 1/n_e^2} \quad (4)$$

在仅施加  $Y$  方向电场的情况下,折射率椭球除了大小发生变化外,还绕  $X$  轴整体旋转了  $\theta$  角度。当仅施加  $Z$  方向电场时, $E_x=0, E_y=0$ , 铌酸锂晶体在仅受到沿光轴方向的电场作用时,折射率椭球不会发生旋转,仅存在大小的变化,主轴折射率变为

$$\begin{cases} n'_x = n_o - \frac{1}{2}\gamma_{13}n_o^3E_z \\ n'_y = n_o - \frac{1}{2}\gamma_{13}n_o^3E_z \\ n'_z = n_e - \frac{1}{2}\gamma_{33}n_e^3E_z \end{cases} \quad (5)$$

## 2.2 周期性结构中的偏振耦合理论

如上所述,在电光光子晶体中,由于电光系数周期性反转,在外加电场作用下,折射率椭球也呈现周期性变化,这使得不同传输模式之间会发生能量转移,能量变化的过程可以用耦合模理论解释。

考虑 PPLN 晶体中偏振光之间的能量耦合效应。作为双折射单轴晶体,光在铌酸锂晶体内的偏振态可分解为与光轴平行的分量以及与光轴垂直的分量。在晶体内,与光轴平行的分量称为非寻常光(e光),与光轴垂直的分量称为寻常光(o光),通常情况下,o光和e光之间不会发生有效能量耦合。当施加垂直于光轴方向的外加电场时,由第 2.1 节讨论的电光效应可知,铌酸锂晶体的光轴会在电场和光轴组成的平面内旋转  $\theta$  角度。同时,由于正负畴的电光系数相反,PPLN 晶体的正负畴会周期性向相反方向旋转,如图 1 所示。该周期性旋转可以看作是对介电张量的周期性微扰。在特定的周期下,此周期性微扰会诱导 o 光和 e 光之间强烈的能量耦合。耦合模方程为

$$\begin{cases} dA_1/dz = -i\kappa A_2 \exp(i\Delta\beta z) \\ dA_2/dz = -i\kappa^* A_1 \exp(-i\Delta\beta z) \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $\Delta\beta = k_1 - k_2 - G_m, G_m = 2m/\Lambda, \Lambda$  为 PPLN 晶体畴反转周期; $\kappa$  为耦合系数; $A_1$  为 o 光的归一化振幅; $A_2$  为 e 光的归一化振幅。

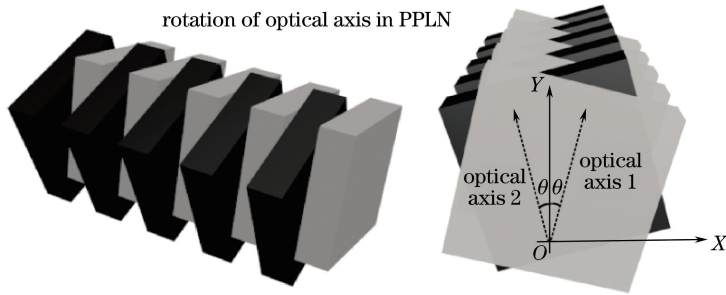


图 1 电光效应导致光轴偏转示意图

Fig. 1 Diagram of optical axis rotation caused by electro-optic effect

当入射光为 e 光时,耦合波方程的初始条件为  $A_1(0)=0, A_2(0)=1$ , e 光的透过率可表示为

$$I_2(z) = [A_2(Z)/A_2(0)]^2 = \cos^2(sz) - \Delta\beta^2 / [(2s)^2 \sin^2(sz)], \quad (7)$$

式中  $s^2 = \kappa^* \kappa + (\Delta\beta/2)^2$ 。当入射光为 o 光时,初始条件为  $A_1(0)=1, A_2(0)=0$ , 则 o 光的透过率为

$$I_1(z) = [A_1(Z)/A_1(0)]^2 = \cos^2(sz) - \Delta\beta^2 / [(2s)^2 \sin^2(sz)]. \quad (8)$$

由 o 光和 e 光的透过率表达式可知,当  $\Delta\beta=0$  时,透过率达到极大值,透过率表达式可简化为

$$I_1(z) = [A_1(Z)/A_1(0)]^2 = \cos^2(sz). \quad (9)$$

当  $sz = m\pi/2 (m=1, 3, 5, \dots)$  时,透过率为 0,即出现光子禁带。

## 3 级联电光效应的应用

下面讨论级联电光光子晶体在全光信息处理系统中的应用。

### 3.1 基于级联电光效应的手性旋光调控

在信息处理中,需有效控制信息流的去向,才能准确处理信号成分。改变材料的手性可以改变其旋转对称性,从而改变光在介质中的传输性质。电光光子晶体性质可受电场调控,经过设计的级联电光光子晶体可以实现对介质手性的调制,从而达到控制光信号传输的效果。

由第2节介绍的横向电光效应可知,当沿Y轴施加一个恒定的电场 $E_Y$ 时,折射率椭球的Y轴和Z轴会绕X轴旋转 $\theta$ 角度。如图2所示,当沿PPLN晶体的+Y方向施加电场V时,若以+X方向视角观察,可以看到正畴的折射率椭球的Y轴和Z轴向左旋转了 $\theta$ 角度,而负畴对应的Y轴和Z轴则向右旋转了 $\theta$ 角度<sup>[11]</sup>。当畴的总个数为N时,光沿-X方向穿过PPLN后,光的偏振方向会向右旋转了 $2N\theta$ 角度。当沿-X方向观察时,可以看到正畴的折射率椭球的Y轴和Z轴向右旋转了 $\theta$ 角度,而负畴对应的Y轴和Z轴则向左旋转了 $\theta$ 角度,光沿+X方向传播后偏振右旋转了 $2N\theta$ 角度。因此无论光沿正向或反向传播,偏振面都以同样的方式旋转。然而,当外加电场V沿-Y方向时,折射率椭球的Y轴和Z轴旋转方向会反转。此时,无论正向或反向传播,总的偏振方向旋转效果都是左旋转。由此表明,PPLN用于旋光调制时的手性可以由外加电场控制。

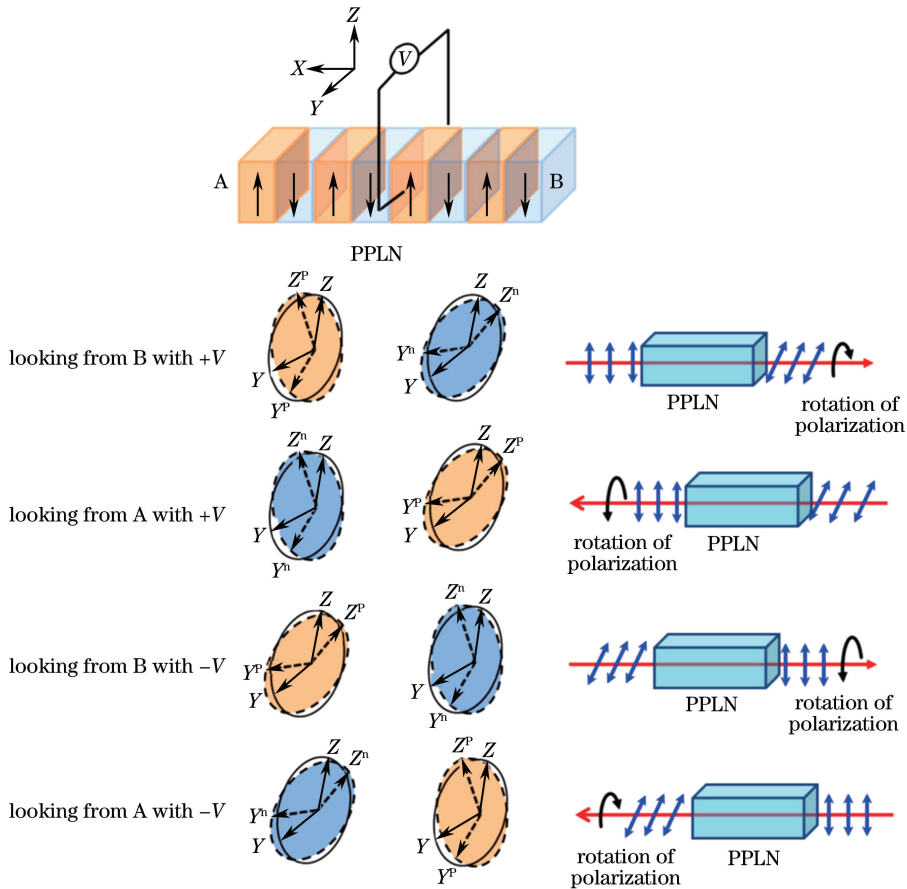


图2 在外加横向电场作用下铌酸锂晶体偏振面旋转示意图

Fig. 2 Schematic of polarization plane rotation of PPLN crystal with external transverse electric field

### 3.2 电光偏振逻辑门

当实现对光信号传输的控制后,信息处理系统需实现的核心功能为全光逻辑运算。

基于级联电光光子晶体对偏振态的调制,可以设计出偏振编码的全光逻辑门。传统电子计算机因受物理机制的限制,其计算速度已经接近瓶颈,因此速度更快、容量更大的全光计算系统越来越受到研究人员的重视。作为全光计算的基本单元,全光逻辑门在过去的几十年中一直是研究的关键所在。此前实现的多数全光逻辑门都是基于光强编码。王健等<sup>[17]</sup>提出的全光计算方案,综合利用了基于PPLN的准相位匹配技术实现了差频、和频、倍频以及级联的非线性过程,在单片PPLN晶体上实现了高速的全光与门、或门、异或门

和全光半加器半减器。

光强在计算过程中衰减很快,极易造成信号的丢失。只要光强大于0,光的偏振信息便可以一直存在。此外,随着光的衰减,偏振信号比强度信号更容易分辨出来。因此,为了避免强度信号损失以及实现更复杂的信号处理,Zaghloul等<sup>[18]</sup>提出并实现了偏振编码的光逻辑门。在该方案中,偏振的两个正交态被用来分别表示逻辑1和逻辑0。

由第3.1节可知,寻常光和非寻常光之间的相速度差使得PPLN的每个畴相当于一个半波片。经过一系列半波片后,光的偏振方向持续旋转,最终产生一个总的旋转角度 $2N\theta$ 。在适当的外加电场下,光的偏振方向在通过PPLN后会旋转 $90^\circ$ 。

将起偏器设为Y偏振,检偏器设为Z偏振,o光可以被转换为e光。相反,将起偏器设为Z偏振,检偏器设为Y偏振,则e光可以被转换为o光。

异或门、同或门、非门与门和或门的实现已在相关文献被报道<sup>[12-13]</sup>。实现了该系列基本逻辑门后,下一个目标即实现半加器和半减器。为了实现偏振编码的半加器和半减器,需要与门(AND)和异或门(XOR)。图3所示为实现半加器和半减器的实验装置。

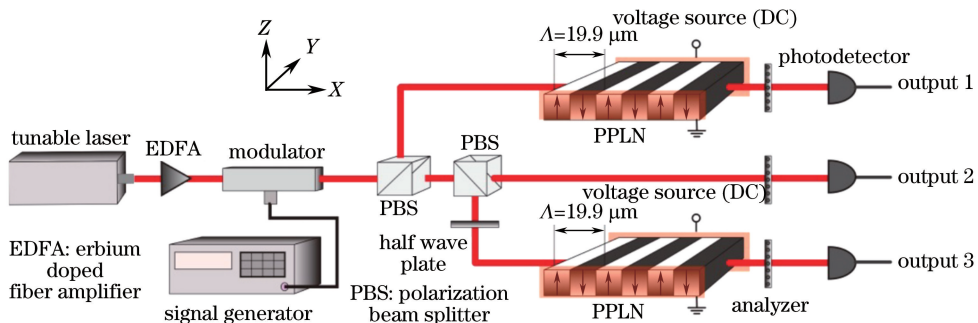


图3 基于PPLN中的与门和异或门的半加器和半减器实验装置图(入射的调制信号光为信号1,外加电场 $E_Y$ 为信号2)

Fig. 3 Experimental setup of half-adder and half-subtractor based on AND and XOR gates realized in PPLN with incident modulated light as signal 1, and external electronic field  $E_Y$  as signal 2

图3中可调激光器输出一束波长为1552.9 nm的连续波(CW),连续波通过掺铒光纤放大器后功率被放大到数十毫瓦量级。紧接着该连续波被旋光调制器调制为信号1。光纤中的信号1经过光纤准直器后进入PPLN。电场 $E_Y$ 作为信号2,由一个电压源提供。结合图3中输出2和输出3可以得到一个与门。类似地,异或门可以由图3的输出1得到。结合上面所述的异或门和与门,可以实现一个半加器。如果需要一个半减器,则只需要测量输出3,将输出3作为借位项,并与输出1的异或门结合。表1所示为和、差、进位和借位的真值表。

表1 半加器和半减器的和、差、进位和借位运算的真值表

Table 1 Truth table of sum, difference, carry and borrow calculations of half-adder and half-subtractor

	Definition				Sum/Difference				Carry				Borrow			
Signal 1	→	→	↑	↑	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
Signal 2	0	E	0	E	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Output 1	→	↑	↑	→	0	1	1	0								
Output 2	→	→	0	0												
Output 3	0	0	→	↑					0	0	0	1	0	0	1	0

实验中信号1为一串偏振调制的数字光信号,信号2为可调的外加电场。在输出端可测得一系列数字光信号输出,其信噪比可达10 dB。对于信号1,定义水平偏振和竖直偏振分别为逻辑0和1;对于信号2,定义逻辑0和1分别对应电场强度0和E。用与信号1相同的定义方式得到输出项的和/差(输出1)和进位(输出2和输出3相加)。和和进位两项共同组成了半加器。对于借位项,需要采用与信号1相反的真值定义。差和借位两项结合即得到半减器。

### 3.3 时间隐身

第 3.1、3.2 节分别用级联电光光子晶体实现了光传输和运算控制,因此基本的信息处理系统已成型。随着网络的发展,信息越来越透明化,信息的私密性和安全性越来越受重视。有些信息处理过程不希望被看到,除了采用对结果加密的方法以外,还有一个更直接的方法就是对这段过程进行隐身化处理。

实现时间隐身的关键在于利用群速度调制产生一个足够容纳事件发生的时间间隙。通常利用高群速度色散的光纤来产生时间间隙<sup>[19-21]</sup>,也可以利用可调节的快慢光产生时间间隙。级联的电光光子晶体除了可以实现以上可调的偏振控制以外,其光子晶体禁带的位置也可以随外加电压的变化而改变,从而调制快慢光这类依赖于禁带的物理现象。

为实现群速度在时间上的走离效应,需要在晶体中同时实现快光和慢光。研究发现,对于铌酸锂一维电光光子晶体,在透过率禁带中心,光的传播呈现反常色散,在禁带边缘则呈现正常色散。由于电光光子晶体的禁带位置可以通过外加电场进行连续调节,因此对于特定波长的光,可以通过外加电场进行快慢光的切换。

图 4 所示为利用同时产生的快光和慢光实现时间隐身的方案示意图<sup>[14]</sup>。将  $Z$  向切得的 PPLN 作为提供色散功能的电光光子晶体,并向其施加  $Y$  向电压。时间隐身所需要的另一个关键的功能是时间棱镜,即在时间上产生二次相移。时间棱镜通常可以通过电光调制和非线性光学的方法实现。通过对准相位匹配周期的设计可以令级联的电光效应和二阶非线性同时实现<sup>[22]</sup>,级联的二阶非线性具有时间棱镜的功能。第一个时间棱镜将入射的信号光  $\lambda_0$  分为  $\lambda_+$  和  $\lambda_-$ 。将信号光入射到第一个电光光子晶体中,此时外加电压为  $0.1 \text{ V}/\mu\text{m}$ ,  $\lambda_+$  和  $\lambda_-$  分别处在透过率曲线的边缘和中心,即分别处在慢光和快光区间。光穿过整个晶体后,  $\lambda_+$  作为慢光被延迟,  $\lambda_-$  作为快光被提前,因此连续光中间产生了时间间隙。在该时间间隙中,如果发生一个短于时间间隙的事件,则不会对光产生任何影响。第二块电光光子晶体的作用是闭合该时间间隙,此时需要一个相反的快慢光的过程。仍然使用同样的电光光子晶体,将外加电场变为  $0.2 \text{ V}/\mu\text{m}$ ,则实验可以观察到透过率谱右移了约  $0.3 \text{ nm}$ 。该移动导致  $\lambda_+$  对应的透过率从禁带边缘移到了禁带中心,并导致  $\lambda_-$  对应的透过率从禁带中心移到禁带边缘。相应地,  $\lambda_+$  光信号由第一片晶体中的慢光变成快光,而  $\lambda_-$  则由快光变成慢光。第二块时间棱镜可将频率分开的光重新恢复为初始态  $\lambda_0$  的光信号。于是,在输出端看到的是与输入端相同的连续光信号,无法确定中间时间间隙是否发生过事件,从而实现时间隐身。

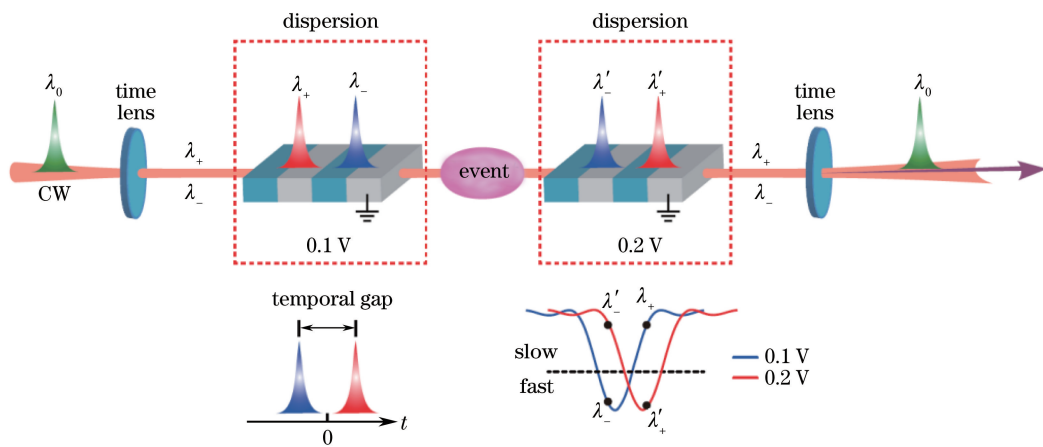
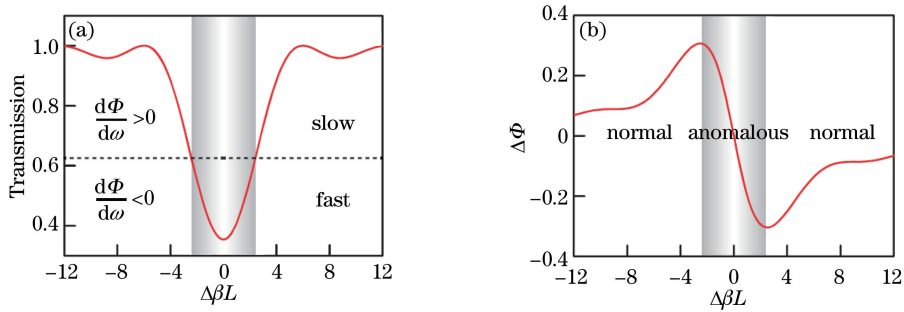


图 4 基于电光光子晶体实现时间隐身的示意图

Fig. 4 Configuration of temporal cloak based on electro-optic photonic crystal

当施加外加电场时,新的折射率椭圆的主轴相对于未受电场微扰时的主轴旋转了  $\pm\theta$  角度。在满足旋光效应所需要的相位匹配条件时,入射的基频  $e$  光能量会转移到  $o$  光,随后能量又会从  $o$  光转移到  $e$  光,此时的  $e$  光和初始的未被完全转变的  $e$  光会有一个相位差。

图 5 所示为透过率谱和相移关于  $\Delta\beta L$  的曲线。偏振旋转效应导致了基频  $e$  光的消耗,透过率谱下降,即出现禁带。该禁带位置可以同时产生快光和慢光<sup>[23]</sup>。在禁带中心附近,光的相移谱存在反常色散,而在禁带边缘处则呈现正常色散。基于群速度的定义,反常色散产生快光,而正常色散产生慢光。因此透过率谱可以分为 3 个部分,快光区间处在透过率禁带中心附近,两个慢光区间则靠近透过率禁带的边缘。

图 5 (a) 透过率谱; (b) e 光相移关于  $\Delta\beta L$  的曲线Fig. 5 (a) Transmission spectrum; (b) phase shift of e-polarized light as a function of  $\Delta\beta L$ 

### 3.4 电光光子晶体对非线性过程的调制

对非线性过程的调制可以产生新的光频,可操控的光频的范围和密度对全光信息系统的容量起着至关重要的作用。铌酸锂电光光子晶体是一个很好的非线性介质,并可以有效地通过电光效应对非线性过程进行调制。

文献[15]利用电光光子晶体 PPLN 实现了对差频过程的电光调制,同样沿 PPLN 晶体的 Y 轴方向施加一个电场,通过调节电场大小,可以实现光场能量在抽运光、信号光、o 偏振差频光以及 e 偏振差频光之间的转换。实验中使用了波长为 40 mm 的 PPLN 晶体,并在 100 °C 的环境下进行实验。当信号光和抽运光的能量比小于 0.324 时,光强超过一定数值的抽运光总能在一定的外加电场下完全转化为信号光和差频光,而当信号光和抽运光的能量比大于 0.324 时,则抽运光只在特定范围内可以实现完全转换。

基于 PPLN 晶体中存在的电光耦合效应,可以对倍频过程进行调制<sup>[16]</sup>。研究发现,当在发生非线性过程的 PPLN 晶体中引入另一束光波时,可改变晶体中原有光波的耦合过程。改变引入光波的强度大小,可有效调整非线性过程的调制效率以及二次谐波的偏振态。

### 3.5 片上集成的半加器和半减器

片上集成的光信息处理系统对光子处理系统的高度集成和小型化具有重要意义。如图 6 所示,结合 PPLN、微盘谐振腔和微电极等结构,并通过波导将这些结构相连接,有望实现片上集成的半加器和半减器。铌酸锂具有出色的非线性光学性质、电光性质以及机械性质,因此周期性的铌酸锂光子晶体在电控光栅、可调谐滤波器、气体传感器等方面都有很好的应用<sup>[9,12,24-30]</sup>。

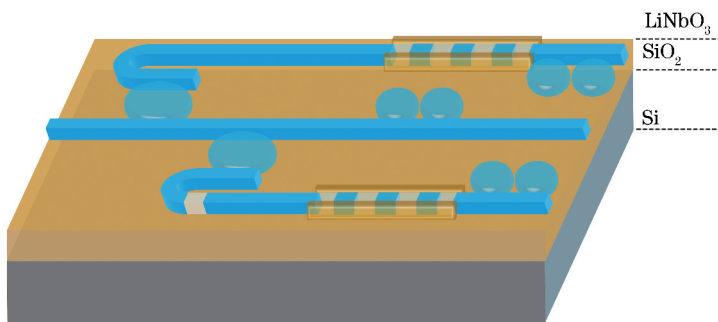


图 6 基于硅基铌酸锂薄膜的半加器和半减器集成示意图

Fig. 6 Integration diagram of half-adder and half-subtractor based on  $\text{LiNbO}_3$  thin film with Si substrate

## 4 结束语

对已报道的部分基于铌酸锂级联电光光子晶体的工作进行了综述。详细介绍了基于电光级联效应的手性旋光调控;利用电光光子晶体实现的光逻辑与门、或门、同或门、异或门以及半加器和半减器的构造方法,电光光子晶体中的快慢光调制以及时间隐身的实现以及电光光子晶体对非线性过程的调制。级联电光光子晶体有望在一个完备而且安全的光信息处理系统中发挥作用。

## 参 考 文 献

- [1] Cotter D, Manning R J, Blow K J, *et al.* Nonlinear optics for high-speed digital information processing[J]. *Science*, 1999, 286(5444): 1523-1528.
- [2] Saruwatari M. All-optical signal processing for terabit/second optical transmission[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(6): 1363-1374.
- [3] Guarino A, Poberaj G, Rezzonico D, *et al.* Electro-optically tunable microring resonators in lithium niobate[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(7): 407-410.
- [4] Mhaouech I, Coda V, Montemezzani G, *et al.* Low drive voltage electro-optic Bragg deflector using a periodically poled lithium niobate planar waveguide[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(18): 4174-4177.
- [5] Chang L, Li Y F, Volet N, *et al.* Thin film wavelength converters for photonic integrated circuits[J]. *Optica*, 2016, 3(5): 531-535.
- [6] Lin J T, Xu Y X, Ni J L, *et al.* Phase-matched second-harmonic generation in an on-chip LiNbO<sub>3</sub> microresonator[J]. *Physical Review Applied*, 2016, 6(1): 014002.
- [7] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [8] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [9] Zhang Xinxin, She Weilong. Electrically controlled grating based on PPLN[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0105001.  
张欣欣, 余卫龙. 周期极化铌酸锂晶体电控光栅[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0105001.
- [10] Lu Y Q, Wan Z L, Wang Q, *et al.* Electro-optic effect of periodically poled optical superlattice LiNbO<sub>3</sub> and its applications[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(23): 3719-3721.
- [11] Shi L, Tian L H, Chen X F. Electro-optic chirality control in MgO:PPLN[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(7): 073103.
- [12] Zhang Y X, Chen Y P, Chen X F. Polarization-based all-optical logic controlled-NOT, XOR, and XNOR gates employing electro-optic effect in periodically poled lithium niobate[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(16): 161117.
- [13] Jiang H W, Chen Y P, Li G Z, *et al.* Optical half-adder and half-subtractor employing the Pockels effect[J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 9784-9789.
- [14] Li G Z, Chen Y P, Jiang H W, *et al.* Tunable temporal gap based on simultaneous fast and slow light in electro-optic photonic crystals[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18345-18350.
- [15] Li Peipei, Tang Haibo, She Weilong. Efficient electro-optical controlled difference-frequency conversion in quasi-periodic optical superlattice[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0619004.  
李培培, 唐海波, 余卫龙. 基于准周期光学超晶格的高效电光调制差频转换[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0619004.
- [16] Kong Yan, Zhang Xiumei, Su Zhouping, *et al.* Intensity and polarization modulation on cascaded frequency doubling and electro-optic coupling in periodically poled lithium niobate[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(10): 101901.  
孔 艳, 张秀梅, 苏宙平, 等. 基于 PPLN 倍频—电光耦合级联的光调谐技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(10): 101901.
- [17] 王 健, 孙军强, 张新亮, 等. 基于周期极化反转铌酸锂光波导的全光信号处理[J]. *中国光学*, 2008, 45(2): 12.
- [18] Zaghoul Y A, Zaghoul A R M. Complete all-optical processing polarization-based binary logic gates and optical processors[J]. *Optics Express*, 2006, 14(21): 9879-9895.
- [19] Mc Call M W, Favaro A, Kinsler P, *et al.* A spacetime cloak, or a history editor[J]. *Journal of Optics*, 2010, 13(2): 024003.
- [20] Fridman M, Farsi A, Okawachi Y, *et al.* Demonstration of temporal cloaking[J]. *Nature*, 2012, 481(7379): 62-65.
- [21] Lukens J M, Leaird D E, Weiner A M. A temporal cloak at telecommunication data rate[J]. *Nature*, 2013, 498(7453): 205-208.
- [22] Li G Z, Chen Y P, Jiang H W, *et al.* Enhanced Kerr electro-optic nonlinearity and its application in controlling second-



- harmonic generation[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(4): 168-172.
- [23] Boyd R W. Material slow light and structural slow light: Similarities and differences for nonlinear optics [invited][J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 28(12): A38-A44.
- [24] Zhang J F, Chen Y P, Lu F, *et al.* Flexible wavelength conversion via cascaded second order nonlinearity using broadband SHG in MgO-doped PPLN[J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 6957-6962.
- [25] Fürst J U, Strekalov D V, Elser D, *et al.* Naturally phase-matched second-harmonic generation in a whispering-gallery-mode resonator[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(15): 153901.
- [26] Lin J, Xu Y, Fang Z W, *et al.* Second harmonic generation in a high-Q lithium niobate microresonator fabricated by femtosecond laser micromachining[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(11): 114209.
- [27] Liu K, Shi J H, Chen X F. Linear polarization-state generator with high precision in periodically poled lithium niobate [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(10): 101106.
- [28] Rolland Q, Dupont S, Gazalet J, *et al.* Acousto-optic couplings in two-dimensional lithium niobate photonic crystal [C]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, 68(1): 012006.
- [29] Zhang Ailing, He Peidong, Pan Honggang, *et al.* Design of electrically controlled double wavelength orthogonal polarization tunable filter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 072301.  
张爱玲, 何培栋, 潘洪刚, 等. 电控可调谐的正交偏振双波长滤波器的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 072301.
- [30] Jiang Meng, Feng Qiaoling, Wei Yufeng, *et al.* Recent advance in miniaturization of photo-acoustic spectroscopy gas sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(2): 020006.  
姜 萌, 冯巧玲, 魏宇峰, 等. 小型化光声光谱气体传感器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(2): 020006.