

文章编号: 0253-2239(2004)10-1353-5

# 电光调制器的温度特性及其最优化设计\*

陈海波<sup>1,2</sup> 余卫龙<sup>1\*\*</sup>

(1 中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)  
(2 中山大学物理系, 广州 510275)

**摘要:** 利用线性电光效应的波耦合理论对铌酸锂晶体电光调制器的温度特性进行研究, 给出了不同光波波矢和晶体光轴夹角情况下电光效应的温度变化特性, 发现可以利用角度调节来克服电光调制器的温度敏感性; 在此基础上, 进一步对电光调制器进行了最优化设计, 得到一个半波电压小(几十伏)、零场泄漏几乎为零(零电压出射光强和入射光强比为 0.0027)、消光比达到 365.6、温度性能稳定而且不需要透明电极的一个设计。

**关键词:** 非线性光学; 电光效应; 电光调制器; 温度特性; 最优化设计

中图分类号: O734<sup>+</sup>.1 文献标识码: A

## Temperature Dependence of Electrooptic Modulator and Its Optimal Design

Chen Haibo<sup>1,2</sup> She Weilong<sup>1</sup>

(*The State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies,*  
*Zhongshan University, Guangzhou 510275*  
*2 Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275*)

(Received 9 June 2003; revised 1 January 2004)

**Abstract:** A wave coupling theory of linear electrooptic effect has been used to study the temperature dependence of electrooptic modulator. The numerical results of temperature dependence have been obtained from this method under different angles between incident light vector and crystal optical axis. The results show that temperature stability of electrooptic modulator can be obtained by angle modulation. An optimal design of electrooptic modulator has also been presented, which has the advantages of a very small zero-field leakage, a relatively small half-wave voltage, a large extinction ratio and good stability of output intensity versus temperature. And the design doesn't need transparent electrodes.

**Key words:** nonlinear optics; electrooptic effect; electrooptic modulator; temperature dependence; optimal design

## 1 引 言

电光调制器是一种非常重要的光调制器, 可以对光波的相位、幅度、强度以及偏振状态进行调制<sup>[1]</sup>, 已被广泛应用于高速光纤通信网络<sup>[2]</sup>、光纤传

感器<sup>[3]</sup>、光谱展宽<sup>[4]</sup>、电光开关<sup>[5]</sup>、光纤陀螺<sup>[6]</sup>、电压测量<sup>[7]</sup>以及光波偏振态测量<sup>[8]</sup>等方面。电光调制器的基础是电光效应<sup>[1]</sup>。根据电光晶体的折射率变化量和外加电场强度的关系, 电光效应可分为线性电光效应(泡克耳斯效应)和二次电光效应(克尔效应)。因为线性电光效应比二次电光效应的作用效果明显, 因此实际中多用线性电光调制器对光波进行调制。线性电光调制器可分为纵向的和横向的。在纵向的调制器中, 电场平行于光的传播方向, 而横向调制器的电场则垂直于光传播的方向。

\* 国家自然科学基金(10074082)、广东省自然科学基金(001192)资助课题。

\*\* 通信联系人。E-mail: stils02@zsu.edu.cn

收稿日期: 2003-06-09; 收到修改稿日期: 2004-01-01

传统分析电光效应的理论是折射率椭球理论<sup>[9]</sup>。受此理论的限制,绝大多数的电光调制器,无论是纵向或是横向的,外电场方向都只能限制在一些特殊的方向。这给实际应用带来诸多不便。例如,近年来,因为受外电场方向的限制,人们在研究新型电光晶体的性能时,所需外加半波电压特别大<sup>[10,11]</sup>;而研究晶体电光开关的时候,外电场方向的限制为器件的设计增加了一些困难<sup>[5]</sup>;在传统的纵向调制器中,因为电场方向平行于光的传播方向,因此需要透明电极或环形电极结构,器件制作工艺比较复杂,而且,这种调制器的半波驱动电压很大,这是实际应用中最不希望的。横向电光调制器没有上述的缺点,但是它有零场泄漏(即外电场为零时输出光强不为零),这个问题对调制器特别是电光开关影响很大;另外一个问题是,横向电光调制器对温度的变化极为敏感<sup>[1]</sup>,严重影响它的性能。实际应用中采用组合型电光调制器来解决温度敏感性这个问题,但是要求两块组合的电光晶体长短一致,且具有相同的温度分布特性等,这较难实现。为了避免这一缺点,又有人提出了偏振光旋转反射法,在光路中插入一个 $\lambda/4$ 波片。此方法比较方便,但是这样一来器件的增多又增加了插入损耗。此外还有人提出运用调节外加电压的方法来补偿温度变化,但是这个方法不甚方便,而且补偿的范围十分有限<sup>[12]</sup>。

在以前国外的一些文献中,对电光效应一些特殊情况的研究运用了一种电磁理论方法<sup>[13]</sup>,从另一个

角度进行研究,但因此法不甚实用,没有受到重视。近几年国内又有人提出新的电光效应理论方法<sup>[14]</sup>和电光调制器设计<sup>[15]</sup>,但都只是着重提高出射光效率,并没有克服其余的缺点。文献<sup>[16]</sup>中提出了一种全新的电磁理论方法来分析电光效应。运用这种方法,可以研究光在任意一个方向的电场作用下沿任意一个方向传播的各种线性电光效应情况。这为设计电光调制器带来了极大的方便。本文利用该耦合波理论方法,研究了电光调制器的温度特性。利用简单的角度调节,就克服了温度敏感性这个问题,且不会增加调制器的插入损耗。在很大的温度变化范围内,器件的输出光强非常稳定。在此基础上,本文还进一步对线性电光调制器作了最优化设计。找到了一个合适的入射光角度,同时克服了以往纵向调制和横向调制的缺点。在此设计中,调制器的零场泄漏几乎为零,半波电压也不是很大,温度稳定性好,而且还不用透明电极,非常适合于实际应用。

## 2 运用耦合波理论研究电光调制器的温度特性

文献<sup>[16]</sup>中提出一个线性电光效应的耦合波理论,此方法从麦克斯韦方程出发,把入射电光晶体的光波分解为两个独立的线偏振分量 $E_1, E_2$ 。通过一系列的推导,最后用耦合波方程解得电光晶体出射面的 $E_1, E_2$ 光的电场强度的解析解:

$$E_1(\omega) = E_1(r) \exp(ik_1 r) = \rho_1(r) \exp[i(k_1 + \beta)r] \exp[i\phi_1(r)], \quad (1)$$

$$E_2(\omega) = E_2(r) \exp(ik_2 r) = \rho_2(r) \exp[i(k_2 + \beta)r] \exp[i\phi_2(r)], \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} \rho_1(r) = \sqrt{E_1^2(0) \cos^2(\mu r) + \left[ \frac{\gamma E_1(0) - d_1 E_2(0)}{\mu} \right]^2 \sin^2(\mu r)}, \\ \phi_1(r) = \arg \left\{ E_1(0) \cos(\mu r) + i \left[ \frac{\gamma E_1(0) - d_1 E_2(0)}{\mu} \right] \sin(\mu r) \right\}, \\ \rho_2(r) = \sqrt{E_2^2(0) \cos^2(\mu r) + \left[ \frac{\gamma E_2(0) - d_3 E_1(0)}{\mu} \right]^2 \sin^2(\mu r)}, \\ \phi_2(r) = \arg \left\{ E_2(0) \cos(\mu r) - i \left[ \frac{\gamma E_2(0) + d_3 E_1(0)}{\mu} \right] \sin(\mu r) \right\}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \beta = (\Delta k - d_2 - d_4)/2, \\ \mu = \sqrt{(\Delta k + d_2 - d_4)^2 + 4d_1 d_3}/2, \\ \gamma = (d_4 - d_2 - \Delta k)/2, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} d_1 = \frac{k_0}{2n_1} r_{\text{eff1}} E_0, & d_2 = \frac{k_0}{2n_1} r_{\text{eff2}} E_0, \\ d_3 = \frac{k_0}{2n_2} r_{\text{eff1}} E_0, & d_4 = \frac{k_0}{2n_1} r_{\text{eff3}} E_0, \end{cases} \quad (5)$$

上面(3)式中的  $\arg[\cdot]$  表示复数的幅角,取值范围为  $[0, 2\pi]$ 。 $r_{\text{eff}1}, r_{\text{eff}2}, r_{\text{eff}3}$  为有效电光系数,它们与电光张量元的关系为

$$\begin{cases} r_{\text{eff}1} = \sum_{j,k,l} (\epsilon_{jj}\epsilon_{kk})(a_j r_{jkl} b_k c_l), \\ r_{\text{eff}2} = \sum_{j,k,l} (\epsilon_{jj}\epsilon_{kk})(a_j r_{jkl} a_k c_l), \\ r_{\text{eff}3} = \sum_{j,k,l} (\epsilon_{jj}\epsilon_{kk})(b_j r_{jkl} b_k c_l), \end{cases} \quad (6)$$

$\epsilon_{jj}$  和  $\epsilon_{kk}$  为对角化后的介电张量元素。

$$\epsilon_{jj} = n_{jj}^2, \quad \epsilon_{kk} = n_{kk}^2. \quad (7)$$

$\Delta k = k_2 - k_1$ , 而  $k_i = n_i k_0 = n_i \frac{\omega}{c}, i = 1, 2, n_1, n_2$  为

$E_1, E_2$  光的在介质中的折射率,  $E_1(0), E_2(0)$  分别为  $E_1$  光和  $E_2$  光在入射处的振幅值,  $E_0$  为外电场强度。 $r_{jkl}$  是晶体的电光张量元,将前两个下标  $jk$  作以下替换:  $11 \rightarrow 1, 22 \rightarrow 2, 33 \rightarrow 3, 23(32) \rightarrow 4, 31(13) \rightarrow 5, 12(21) \rightarrow 6$ , 三阶张量  $r_{jkl}$  就简化为我们平常通用的电光系数  $r_{jk}$ 。 $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$  分别是  $E_1, E_2, E_0$  的单位矢量,  $r$  是电光晶体长度。

传统电光调制器在电光晶体前后有一对互相正交的线偏振器,这即为正交偏振器系统。对这一系统,根据线偏振光干涉的原理<sup>[17]</sup>,输出光强为

$$I_{\text{out}} = \frac{\rho_1^2(r) + \rho_2^2(r) - 2\rho_1(r)\rho_2(r)\cos[\phi_1(r) - \phi_2(r)]}{2}. \quad (8)$$

此方法比较直观,它的最大的特点是可以求得光在任意一个方向的电场作用下沿任意一个方向传播时的  $E_1, E_2$  光的电场强度的解析解和出射光强度,非常方便。有了这个方法,我们可以更全面的去研究电光调制器的设计。

下面我们以铌酸锂为例来阐述如何利用耦合波理论方法进行电光调制器的温度特性研究,然后解决电光调制器温度敏感性这个问题。铌酸锂的非零电光张量元素分别为  $r_{12} = -3.4, r_{13} = 8.6, r_{33} = 30.8, r_{42} = 28, r_{22} = -r_{12}, r_{23} = r_{13}, r_{51} = r_{42}$  和  $r_{61} = r_{12}$

(单位是  $10^{-12} \text{ m/V}$ )<sup>[9]</sup>。再设  $k_1$  (或者  $k_2$ ) 与光轴 ( $z$  轴) 的夹角为  $\theta$ , 而  $k_1$  (或者  $k_2$ ) 在  $xy$  平面的分量与  $x$  轴的夹角为  $\varphi$ ; 于是

$$\begin{cases} \mathbf{a} = [\sin \varphi, -\cos \varphi, 0], \\ \mathbf{b} = [-\cos \theta \cos \varphi, -\cos \theta \sin \varphi, \sin \theta]. \end{cases}$$

温度对电光效应各个参量影响的最大的电光晶体的折射率<sup>[18]</sup>。在单轴晶体中,  $E_1, E_2$  光就是  $o$  光和  $e$  光。从文献[15]中可查得  $o$  光和  $e$  光在铌酸锂的折射率色散公式:

$$\begin{cases} n_o^2 = 4.9130 + \frac{0.1173 + 1.64 \times 10^{-8} T^2}{\lambda^2 - (0.212 + 2.7 \times 10^{-8} T^2)^2} - 2.78 \times 10^{-2} \lambda^2, \\ n_e^2 = 4.5567 + 2.605 \times 10^{-7} T^2 + \frac{0.097 + 2.7 \times 10^{-8} T^2}{\lambda^2 - (0.201 + 5.4 \times 10^{-8} T^2)^2} - 2.24 \times 10^{-2} \lambda^2, \end{cases} \quad (9)$$

(9)式中  $T$  为温度(单位 K),  $\lambda$  为入射光波长(单位是  $\mu\text{m}$ )。我们把(9)式代入到(1)式~(8)式,这样就可求得光在任意温度下和任意一个方向的电场作用下沿任意一个方向传播时候的光强。下面我们给出一些

数值结果来说明不同角度下电光调制器的出射光强随温度的变化情况。

图1中实线是外加电压为半波电压时的出射光强随温度的变化情况,点线是外电压为零时的光强变

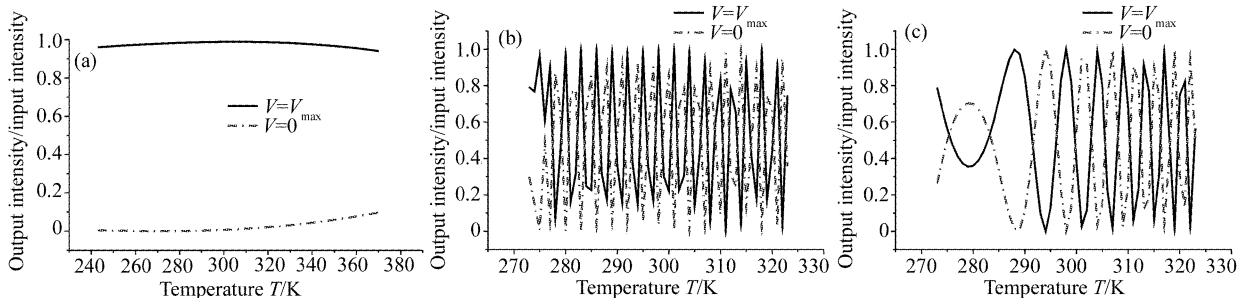


Fig. 1 Output intensity of electrooptic modulator of different angle vs temperature

化情况。我们在这里选用了三个比较典型和能说明问题的角度来阐述利用我们这个方法所得出的结果。图 1(a)是 $\theta=0.0063\pi$ 、 $\varphi=0.08\pi$ 时(相当于入射光波矢和晶体光轴的夹角很小)出射光强随温度的变化情况,我们可以看到无论外电压为半波电压或者为零时,出射光强都非常稳定,并不随温度的变化有很大的改变;图 1(b)中的 $\theta=0.1231\pi$ 、 $\varphi=0.5\pi$ ,图 1(c)中的 $\theta=0.4602\pi$ 、 $\varphi=0.035\pi$ (相当于入射光波矢和晶体光轴的夹角接近 $90^\circ$ ),这两个图的出射光强随着温度的变化发生了很大的改变,曲线变化剧烈。

从图 1 中我们可以知道,电光调制器在不同的入射光波矢和晶体光轴夹角不同的情况下有不同的温度特性。在夹角很小的情况下,出射光强的温度稳定性很好,而且消光比也变化的不大,非常适合于实际应用,而其余的角度光强的变化非常厉害。这个结论也和以前折射率椭球的方法所得的结果一样,以前的方法得出的结论是纵向调制器(相当于入射光波矢和晶体光轴的夹角为零)的温度稳定性很好,横向调制器(相当于入射光波矢和晶体光轴的夹角为 $\pi/2$ )温度稳定性很差<sup>[1]</sup>。

### 3 利用电光效应耦合波理论进行电光调制器的最优化设计

有了图 1 这个结果,就可以在此基础上进行电光调制器的最优化设计。电光调制器有几个比较重要的特性<sup>[20]</sup>,首先是透射特性,这里面很重要的两个指标是消光比和零电压出射光强。通常都希望消光比越大越好,而消光比的大小和零电压出射光强又有密切的关系,因为在外电压为零时,通过的光强越小,消光比也越大。零场泄漏对于电光开关的性能影响特别大,所以实际应用中人们都通过各种补偿的方法来减小它。以前许多调制器是利用成对晶体或者增加补偿偏置器来减小零场泄漏,这样做又增加了插入损耗。通过程序计算,利用角度调节,可以得到零电压出射光强为很小的结果。

电光调制器另一个重要的参量是半波电压。半波电压当然是越小越好,小的半波电压可以令外电路的设计变得方便。利用耦合波理论方法,可以通过调节入射光波矢在 $xy$ 平面的分量与 $x$ 轴的夹角 $\varphi$ 、外电场的方向以及晶体的长度和厚度来减小半波电压。电光调制器第三个特性是温度稳定性,利用耦合波的方法,只要稍微调节一下入射光波矢和晶体光轴的夹角就可以使得调制器的温度稳定性很好。

通过计算机优化计算,得到一个优化设计,它可以同时克服了以往纵向调制和横向调制的缺点。得到的优化参量是: $\theta=0.0063\pi$ 、 $\varphi=0.08\pi$ 、 $r=2.5\text{ cm}$ 、 $c=[\sqrt{2}/2,\sqrt{2}/2,0]$ 、 $\lambda_0=500\text{ nm}$ 利用这组参量,我们最后算得在常温下,出射光强和入射光强的比值随着外电场强度的变化,结果如图 2 所示。所用的外电场最大强度(对应半波电压) $E_0=200\text{ v/cm}$ 。

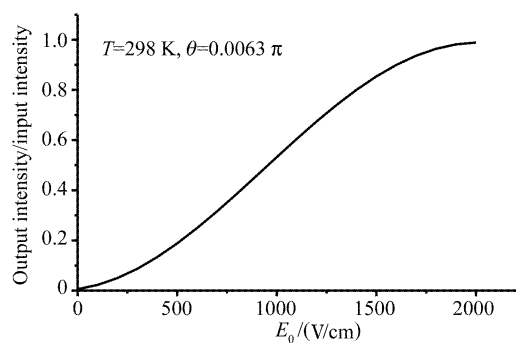


Fig. 2 Output intensity changes with the electric field intensity in the normal temperature

从上图可以看出,曲线的中间段接近线性变化,适合于信号调制。其中零电压出射光强对入射光强之比为 $0.0027$ ,已经足够小了;在半波电压下出射光强对入射光强之比为 $0.987$ ,而消光比可以达到 $365.6$ 。如果选定晶体厚度为几十微米,半波电压仅为几十伏。从图 1 中可以看出,在此设计下从摄氏 $-30\sim 100^\circ\text{C}$ 出射光强都非常稳定,非常适合于实际应用。

这个设计与以往大多数电光调制器最大的不同是外电场强度并不沿着某个主轴方向,而是在 $xy$ 平面上,这样就避免了要用透明电极。在这里选用 $E_0$ 与 $x$ 轴和 $y$ 轴的夹角均为 $45^\circ$ ,特别要注意的是入射光波矢方向并不是和晶体的 $z$ 轴重合,而是有一个很小的夹角。我们就是利用了这一个小角度调节,克服了以往许多电光调制器的缺点。

以上的例子说明了如何用电光效应耦合波的方法实现电光调制器的最优化设计,而实际上最优化的设计不是唯一的,还有其它一些特定的角度可以选择,只要用同样的方法就可以找到。而这套方法也适用于其它的电光晶体,可以说应用范围很广,而且原理简单,容易实现,可供光器件的设计者参考。

**结论** 利用线性电光效应的波耦合理论研究了铌酸锂晶体电光调制器的温度特性,从而得出在不同情况下电光调制器的出射光强随温度变化的情况。在这个基础上,实现了电光调制器的最优化设计,克服了

以往横向和纵向电光调制器的缺点,为电光调制器的设计提供了一个简单的方法。

### 参 考 文 献

- 1 Dong Xiaoyi. *The Electronics of Light Wave* (光波电子学). Tianjin: Nankai University Press, 1987. 312~356 (in Chinese)
- 2 Zhang Bing, Wu Boyu, Zhou Weiqin *et al.*. 40 GHz LiNbO<sub>3</sub> electro-optic modulators. *J. Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2001, **12**(11): 1199~1201 (in Chinese)
- 3 Li Kaicheng, Zhang Jianmei, Dai Jianhua *et al.*. Several optical fiber Voltage transducers based on electro-optic effect. *High Voltage Apparatus* (高压电器), 2001, **37**(1): 41~43 (in Chinese)
- 4 Chen Lei, Yu Changtai. Design and fabrication of novel standing wave electrooptical modulator for getting large modulation index. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(8): 1089~1094 (in Chinese)
- 5 Li Shichen, Ni Wenjun, Yang Tianxin *et al.*. Studies on crystal KTP electro-optic switch. *J. Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 1999, **10**(2): 95~98 (in Chinese)
- 6 Wang Wei, Zhang Guicai. Study on application of integrated-optic phase modulator in FOG. *J. Chinese Inertial Technology* (中国惯性技术学报), 1994, **2**(3): 39~44 (in Chinese)
- 7 Xu Yan, Chen Zhiping, Zhu Yong *et al.*. The measuring principle for high Voltage and the signal demodulation method based pockels longitudinal electrooptic effect. *High Voltage Engineering* (高电压技术), 2000, **26**(4): 59~66 (in Chinese)
- 8 Yao Ruoya, Cui Xiang, Li Changsheng *et al.*. Application of electrooptic modulator to measuring the state of optical polarization. *Chin. J. Sensors and Actuators* (传感技术学报), 1997, **2**(1): 43~46 (in Chinese)
- 9 Yariv A. *Quantum Electronics* (量子电子学). Liu Songhao, Wu Chenghai, Wang Mingchang transl. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1988. 339~362 (in Chinese)
- 10 Liu Yuanshe. Electrooptical effect of Ba<sub>2</sub>NaNb<sub>5</sub>O<sub>15</sub> crystal. *J. Southwestern Petroleum Institute* (西南石油学院学报), 1995, **17**(2): 131~134 (in Chinese)
- 11 Yin Xin, Lin Yaogang, Cheng Ruiping *et al.*. The electro-optic properties of  $\beta$ -BBO single crystal. *Appl. Laser* (应用激光), 1995, **15**(6): 257,246 (in Chinese)
- 12 Song Fenghua, Huo Qifeng. Research and improvement of low temperature characteristics of the crystal in photoelectricity equipment. *J. Academy of Equipment Command and Technology* (装备指挥技术学院学报), 2002, **13**(3): 92~95 (in Chinese)
- 13 Armstrong J A, Bloembergen N, Ducuing J *et al.*. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric. *Phys. Rev.*, 1962, **127**(6): 1918~1939
- 14 Yu Kuanxin, Zhao Qida, He Shiya *et al.*. Theory about coupled wave equations of acous-electro-optic effect. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(4): 466~470 (in Chinese)
- 15 Chen Fushen. Optimal electrode and waveguide design for high efficiency integrated optic modulators and switches. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(3): 357~363 (in Chinese)
- 16 She Weilong. Wave coupling theory of linear electrooptic effect. *Opt. Commun.*, 2001, **195**: 303~311
- 17 Li Liangde. *Basic Optics* (基础光学). Guangzhou: Zhongshan University Press, 1987. 378~382 (in Chinese)
- 18 Lu Xiuquan, Chen Shaohe. KTP electro-optic switch. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 1999, **26**(4): 321~324 (in Chinese)
- 19 Zhang Kecong, Wang Xinmin. *Nonlinear Optical Crystal Materials* (非线性光学晶体材料科学). Beijing: Science Press, 1996. 201~203 (in Chinese)
- 20 Li Jingzhen. *Handbook for Optics* (光学手册). Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1986. 1078~1088 (in Chinese)