

一种新的偏振无关电光调制器*

郑国梁 余卫龙**

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

摘 要 提出一种全新的偏振无关强度调制器设计原理. 这种调制器只需要一个电光晶体, 不需要辅助偏振片, 电极设计和制作相当简单. 采用线性电光效应耦合波理论对光在调制器中的传播行为进行详细的研究, 经过理论计算, 发现光通过调制器后, 出射的调制光强不依赖于入射光的偏振状态. 最后, 以 4 mm 晶系中的 SBN 和 KNSBN 为例, 给出调制器在横向应用时电光晶体优化切割方案.

关键词 光电子学; 电光调制器; 偏振无关; 线性电光效应耦合波理论

中图分类号 O436.4 **文献标识码** A

0 引言

偏振无关器件的研究引起了人们的极大的兴趣^[1~9], 这是由于偏振无关器件相对于偏振依赖器件来说在很多方面具有优越性: 在光通信系统中如果使用偏振无关的器件, 就可以用普通的单模光纤来代替保偏光纤; 不出现偏振依赖损耗; 可以应用在一些特殊的场合, 例如在光通信应用中, 由于在很多情况下入射光的偏振状态是动态变化的, 这种器件可用作偏振无关可变光衰减器.

现有的偏振无关调制器一般是波导型的, 这种调制器的缺点是波导制造工艺复杂, 价格昂贵, 而且实际中的电极的制作误差经常使用得两束光的调制电压不同, 达不到完全偏振无关的调制. 2003 年, Shizhuo Yin 等^[1]提出了一种“三文治”型的设计方案, 在一定程度上解决了问题, 但是由于该方案仍然采用两个大小和晶轴取向都相同的电光晶体, 对切割准确度要求非常高, 同时电极也比较难制作. 本文提出的一种全新的设计原理方法, 它只需要一个电光晶体, 而且对电极设计和制作没有特殊的要求, 偏振无关特性好.

1 设计装置

图 1 是基本设计图, 整个调制器由一对准直系统、一个电光晶体、两个旋光晶体和两个相位补偿器和一个相位延迟片构成. OAC_1 和 OAC_2 是相同的顺时针旋光晶体, 它们使得光的偏振方向旋 $\frac{\pi}{2}$, P_1 和 P_2 是相位补偿器, 其折射率为 OAC_1 和 OAC_2 的

o 光折射率(n_o)相同, P 是相位延迟片, 用于补偿电光晶体中 o 光与 e 光的折射率不同引起的相差. 光通过入射扩束准直系统后, 光束均等地分布在 P_1 和 OAC_1 上, 然后一起进入电光调制晶体, 在电光晶体的另一端, 让上下两束光都通过一个相位延迟片 P , 然后上半部分通过 P_2 , 下半部分经过 OAC_2 , 最后通过出射准直系统汇合输出.

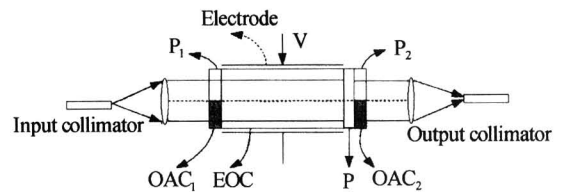


图 1 基本设计原理
Fig. 1 The basic structure of the modulator

2 理论计算

本文所设计的电光调制器, 入射光不沿电光晶体的光轴传播, 在此情况下, She 等^[10]给出的线性电光效应的耦合波方程可以退化成

$$\begin{cases} \frac{dE_1(r)}{dr} = -id_2 E_1(r) \\ \frac{dE_2(r)}{dr} = -id_4 E_2(r) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $E_1(r)$ 和 $E_2(r)$ 是光场的两个垂直的分量, 对应于晶体中的 o 光和 e 光, 而 d_2 和 d_4 为

$$d_2 = \frac{k_0}{2n_1} r_{\text{eff}2} E_0, \quad d_4 = \frac{k_0}{2n_2} r_{\text{eff}3} E_0 \quad (2)$$

式中, k_0 是光在真空中的波矢, $r_{\text{eff}i}$ ($i=2, 3$) 是有效电光系数, E_0 是外加场的振幅, n_1 和 n_2 分别为 $E_1(r)$ 和 $E_2(r)$ 的折射率.

若记 $E_1(r)$ 、 $E_2(r)$ 和外加场 E_0 的方向为 a 、 b 和 c , 则有效电光系数表示成 $r_{\text{eff}2} = \sum_{i,j,k} (\epsilon_{ij} \epsilon_{kk}) (a_j r_{jkl} a_k c_l)$, $r_{\text{eff}3} = \sum_{i,j,k} (\epsilon_{ij} \epsilon_{kk}) (b_j r_{jkl} b_k c_l)$ (3) 式中, r_{jkl} 是电光张量元, ϵ_{ij} 和 ϵ_{kk} 是介电张量的对角元.

* 国家自然科学基金(批准号:10374121)和广东省自然科学基金(批准号:031567)资助课题

** Tel:020-84112863 Email:stils02@zsu.edu.cn

收稿日期:2004-10-15

式(1)的解可以方便求得,并将结果考虑光频部分,可以得到

$$\begin{cases} E_1(\omega) = E_1(0) e^{i(k_1 - d_2)r} \\ E_2(\omega) = E_2(0) e^{i(k_2 - d_4)r} \end{cases} \quad (4)$$

式中, k_1 和 k_2 分别对应两个光场的波矢.

设入射光场的偏振状态是随机的,表示为

$$E_{in} = 2E_{10} \mathbf{a} + 2E_{20} e^{i\delta} \mathbf{b} \quad (5)$$

式中 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 分别对应应在电光晶体中的 o 光和 e 光的方向, δ 是两分量的相位差,它是一个随机量. 入射光经扩束后,记上下两部分光场为: $E'(0) = E'_1(0) \mathbf{a} + E'_2(0) e^{i\delta} \mathbf{b}$ 和 $E''(0) = E'_1(0) \mathbf{a} + E'_2(0) e^{i\delta} \mathbf{b}$, 易知 $E'(0) = E''(0)$.

光经过旋光晶体 OAC_1 , 其偏振方向旋过 $\frac{\pi}{2}$, 同时两个分量都有相同的相移量 φ_0 , 因此从 OAC_1 出来的光可以表示成 $E'(OCA_1) = (-E'_2(0) e^{i\delta} \mathbf{a} + E'_1(0) \mathbf{b}) e^{i\varphi_0}$.

设光不沿光轴方向传播,通过电光晶体 EOC 后,由线性电光耦合波理论,即由式(4)可以得到从电光调制晶体出来的光场为

$$E''(EOC) = (-E'_2(0) e^{i\delta} e^{i(k_1 - d_2)L} \mathbf{a} + E'_1(0) e^{i(k_2 - d_4)L} \mathbf{b}) e^{i\varphi_0} \quad (6)$$

式中, L 是电光晶体长度.

当光通过相位延迟片 P 时,它使得 \mathbf{a} 和 \mathbf{b} 分量产生的相移分别为 φ_1 和 φ_2 , 且使两分量的相移之差为 $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = (k_1 - k_2)L$. 由于 \mathbf{a} 和 \mathbf{b} 的方向只跟电光晶体晶轴方向和入射光的波矢方向有关,所以只要入射光的波矢方向不变, $\Delta\varphi$ 是不变的,相位延迟片 P 无需重新调节.

当光又通过另外一个旋光晶体 OAC_2 , 光也是沿光轴传播,它使得光偏振方向再转 $\frac{\pi}{2}$, 同样地,光场两分量也发生相移 φ_0 . 这时光场变为

$$E''(OCA_2) = (-E'_1(0) e^{i(k_2 - d_4)L} e^{i\varphi_2} \mathbf{a} - E'_2(0) e^{i\delta} e^{i(k_1 - d_2)L} e^{i\varphi_1} \mathbf{b}) e^{i2\varphi_0} \quad (7)$$

光经过 P_1 、电光晶体 EOC 和相位延迟片 P, 最后从 P_2 出来后,由于光通过 P_1 和 P_2 同光通过 OAC_1 和 OAC_2 有相同的光程,所以它们产生的相移也是 φ_0 , 可以得到最后从 P_2 出来的光场是

$$E'(P_2) = (E'_1(0) e^{i(k_1 - d_2)L} e^{i\varphi_1} \mathbf{a} + E'_2(0) e^{i\delta} e^{i(k_2 - d_4)L} e^{i\varphi_2} \mathbf{b}) e^{i2\varphi_0} \quad (8)$$

由于上下两部分的光束大小一样,两分量偏振也相同,故在出射系统会聚光束后,两束光相应的 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 分量的振幅应相同. 又由于入射和出射系统的结构尺寸是相同的,因此,从式(5)可以知道,两束光在出射系统处 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 分量的振幅分别为 E_{10} 和 E_{20} . 因

此,得到在出射系统处的光场为

$$E_{out} = (E_{10} \mathbf{a} - E_{20} e^{i\delta} \mathbf{b}) e^{2i\varphi_0} (e^{i(k_1 - d_2)L} e^{i\varphi_1} - e^{i(k_2 - d_4)L} e^{i\varphi_2}) \quad (9)$$

将式(9)表示成光强形式

$$E_{out} E_{out}^* = 4(E_{10}^2 + E_{20}^2) \sin^2\left(\frac{d_4 - d_2}{2} L\right) \quad (10)$$

从式(10)可以知道,输出光强不依赖于 δ , 可见,调制器是偏振无关的.

3 优化设计

从式(10)可以看出,要使调制器发挥最大性能,必须使得 $|d_4 - d_2|$ 最大. 以 4 mm 晶系为例进行优化设计,其非零电光元是 $r_{13} = r_{23}$, r_{33} 和 r_{23} .

对光不沿光轴传播情况, d_2 和 d_4 为^[10]

$$d_2 = \frac{k_0 n_0^3 E_0}{2} [\sin^2 \varphi r_{1l} + \cos^2 \varphi r_{2l}] c_l = \frac{k_0 n_0^3 E_0}{2} r_{13} c_3 \quad (11)$$

$$d_4 = \frac{k_0 E_0}{2n_2} [n_0^4 \cos^2 \theta r_{13} c_3 + n_e^4 \sin^2 \theta r_{33} c_2 - n_0^2 n_e^2 \cdot \sin 2\theta \sin \varphi r_{42} c_2 - n_0^2 n_e^2 \sin 2\theta \cos \varphi r_{51} c_1] \quad (12)$$

式中, θ 和 φ 分别是波矢 \mathbf{k} 在晶轴坐标系里的极角和方位角.

对于 SNB: 75 晶体,最大的电光张量元是 r_{33} , $r_{33} = 1400 \text{ pm/V}$, $r_{42} = r_{51} = 42 \text{ pm/V}$ ^[11]. 要充分利用 r_{33} , 显然,应该取 $\theta = \frac{\pi}{2}$, $\mathbf{c} = \hat{\mathbf{z}}$ ($\hat{\mathbf{z}}$ 是坐标 z 轴的单位矢量), 即应采取如图 2 装置. 这时

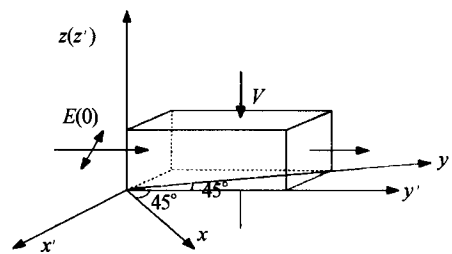


图 2 SBN 晶体的电光调制器装置
Fig. 2 The modulator setup using SBN crystal

$$\begin{aligned} |d_2 - d_4| &= \left| \frac{k_0 E_0}{2} \left(n_0^3 r_{13} - \frac{n_e^4}{n_2} r_{33} \right) \right| \\ &\approx \left| \frac{k_0 n_0^3 E_0}{2} (r_{13} - r_{33}) \right| \approx \frac{k_0 n_0^3 E_0}{2} r_{33} \end{aligned} \quad (13)$$

对 KNSBN-3 晶体,最大电光张量元是 r_{42} (r_{51}), $r_{42} = r_{51} \approx 400 \text{ pm/V}$ ^[11]. 从式(12)可以看到,应该取 $\theta = \frac{\pi}{4}$, $\varphi = \frac{\pi}{4}$ 才能充分利用最大张量元. 由于实验装置是横向应用的,故 $\mathbf{c} \perp \mathbf{k}$, 为加工方便,让 \mathbf{c} 、 \mathbf{k} 和 z 轴在同一平面,注意到 d_4 表达式中的正负号,应该使 c_1 与 c_2 同 c_3 符号相反,于是让 \mathbf{c} 的方向为 $\theta =$

$\frac{\pi}{4}$, $\varphi = \frac{5\pi}{4}$, 这时 c 的方向导数是 $c_1 = c_2 = -\frac{1}{2}$, $c_3 = \frac{\sqrt{2}}{2}$. 这时可以求得

$$|d_2 - d_4| \approx \frac{\sqrt{2}k_0 n_0^3 E_0}{8} (r_{33} + 2r_{42} - r_{13}) \quad (14)$$

晶体中, 波矢方向和外加电场方向同晶轴方向的关系如图 3.

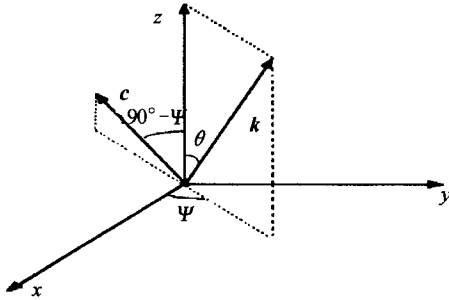


图 3 波矢 k 在 KNSBN 晶体中与各矢量的关系
Fig. 3 The relationship between k and other vectors in KNSBN crystal

4 结论

本文提出的这种横向电光调制器具有偏振无关特性. 它只需要一个电光晶体, 其性能相比需要两个电光晶体的调制器来说要好得多. 这是因为两个电光晶体不可能做到严格一样, 其切割存在误差; 同时电极的制作误差经常使得两束光的调制电压不同, 达不到完全偏振无关的调制, 而在本文提出的这种调制器中两束光都是通过一个电光晶体, 其调制电极是相同的, 所以它们的调拨电压严格相等. 同时可以看到, 这种调制器的电极设计和制作都非常简单. 因此, 提出的这种调制器可望有重要应用.

参考文献

- 1 Yin S, Purwadi P, Guo Z, et al. A polarization independent athermal design for electro-optic modulators and variable optical attenuators. *Processings of SPIE*, 2003, **4989**: 22~29
- 2 Haverkort J E M, Dorren B H P, Kemerink M, et al. Design of composite InAsP/InGaAs quantum wells for a 1.55 μm polarization independent semiconductor optical amplifier. *Appl Phys Lett*, 1999, **75**(18): 2782~2784
- 3 Philippe D, Alain B, Denis D, et al. Polarization independent phase demodulation using photorefractive two-wave mixing. *Appl Phys Lett*, 1999, **74**(21): 3087~3089
- 4 Wallace C H, Choy E, Herbert L, et al. Polarization insensitive electro-absorption and gain-switching quantum-well modulators using interdiffusion. *Proceedings of SPIE*, 1999, **3666**: 282~285
- 5 Donald A P, Tigran V G, Roger A L. Polarization independent grating coupling in planar wave-guide using photo-induced birefringence. *Proceedings of SPIE*, 2003, **4833**: 719~726
- 6 王葵如, 项允楠, 张海庭, 等. 与偏振无关的波导强度调制器. 北京邮电大学学报, 1996, **19**(1): 9~14
Wang K R, Xiang Y N, Zhang H T, et al. *Journal of Beijing University of Postsand Telecommunications*, 1996, **19**(1): 9~14
- 7 项允楠, 王葵如, 张海庭, 等. 与偏振无关的高速调制器. 北京邮电大学学报, 1997, **20**(2): 74~77
Xiang Y N, Wang K R, Zhang H T, et al. *Journal of Beijing University of Postsand Telecommunications*, 1997, **20**(2): 74~77
- 8 邵永红, 冯进良, 姜耀亮, 等. 一种新型偏振无关光交错复用器的设计. 光子学报, 2004, **33**(5): 533~535
Shao Y H, Feng J L, Jiang Y L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 533~535
- 9 刘德明, 周密, 黄德修. 棱镜分光式光学环形器及其应用. 光子学报, 1994, **23**(1): 39~44
Liu D M, Zhou M, Huang D X. *Acta Photonica Sinica*, 1994, **23**(1): 39~44
- 10 She W L, Lee W K. Wave coupling theory of linear electrooptic effect. *Optics Communication*, 2001, **195**(1~4): 303~311
- 11 Neurgaonkar R R, Cory W K, Oliver J R, et al. Development and modification of photorefractive properties in the tungsten bronze family crystals. *Optical Engineering*, 1987, **26**(5): 392~404

A New Kind of Polarization Independent Electro-optic Modulator

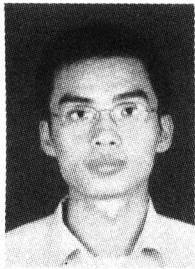
Zheng Guoliang, She Weilong

The State Key Laboratory of optoelectronic Materials and Technologies, Guangzhou 510275

Received date: 2004-10-15

Abstract A new kind of polarization independent electro-optic modulator is presented. The modulator needs only one piece of electro-optic crystal, and the design and the fabrication of electrodes are very simple. The propagation of light through the modulator is studied in detail using wave coupling theory of linear electrooptic effect. The study result demonstrates that the intensity of output light doesn't depend on the polarization state of the incident light. Finally, an optimum design of electro-optic crystals is given, taking examples for SBN and KNSBN which belong to 4 mm crystal system.

Keywords Optoelectronics; Electro-optic modulator; Polarization independent; Wave coupling theory of linear electro-optic effect



Zheng Guoliang was born in 1980, in Guangdong, China. He received the bachelor degree in 2003 from physics department, Zhongshan University. He is pursuing the M. S. degree in the State key Laboratory of optoelectronic Materials and Technologies, Zhongshan University. His research interests are linear electro-optic effect and optical communication devices.