

doi: 10.3788/gzxb20144301.0105001

基于严格耦合波理论的周期性极化铌酸锂晶体的电光衍射性质分析

万玲玉, 卢智勇, 廖洋, 超亮芳, 胡龙敢

(广西大学 物理科学与工程技术学院, 南宁 530004)

摘 要:采用严格耦合波理论,数值计算了不同参量下周期性极化铌酸锂晶体的电光衍射性质.研究表明:周期性极化铌酸锂晶体的周期性畴反转结构在电场的作用下相当于折射率衍射光栅,衍射性质和晶体的几何结构、周期、施加电场和入射角密切相关.以布喇格角度入射并满足布喇格衍射条件时,0 级衍射光能量随施加电场的增大周期性地转化到-1 级的衍射光中,最大转化效率达 100%,增大周期性极化铌酸锂晶体的长度可以有效地降低转换电压值;以布喇格角度入射但光传输不满足布喇格衍射条件时,0 级衍射光和-1 级衍射光不能进行 100%的能量转换,同时调制的周期性受到破坏.以布喇格角的倍数角入射时,0 级光能量可以转化到相应的其他较高衍射级次,其中奇倍数衍射级的最大转换效率可达 100%.研究结果为基于 PPLN 的集成电光器件设计提供有价值的参考.

关键词:周期性极化铌酸锂;电光效应;耦合波理论;布喇格衍射;衍射性质

中图分类号:TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)01-0105001-6

Study on Electro-optical Diffraction Characteristics of Periodically Poled Lithium Niobate Based on the Rigorous Coupled Wave Theory

WAN Ling-yu, LU Zhi-yong, LIAO Yang, CHAO Liang-fang, HU long-gan
(College of Physics Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Using the rigorous coupled wave theory, the electro-optical diffraction properties of periodically poled lithium niobate with different parameters were numerically studied. The analysis show that, the periodic domain structures of a periodically poled lithium niobate act as an index of refraction diffraction grating under the applied electric fields and its diffraction characters have relation to the geometry structures, the period, the applied electric-fields and the incident angles. The periodically poled lithium niobate produces Bragg diffraction under the Bragg condition. In this case, the 0 order of diffraction light is periodically converted to -1 order of diffraction light with the increase of applying electric field. The maximum conversion efficiency can reach to 100% and the conversion voltage value can be reduced effectively by lengthening crystal. If angle of incidence is the Bragg angle, and the propagation of light in periodically poled lithium niobate does not satisfy the conditions of Bragg diffraction, the power of 0 order diffraction light can not transfer to -1 order of diffraction light with 100%. Meanwhile, the periodic modulation are damaged. The 0 order light is converted to corresponding multiple orders of diffraction lights with high diffraction efficiency when the incident angles are multiple Bragg angles. The maximum conversion efficiency is also reach 100%. The analysis results are helpful for developing the integrated devices of periodically poled lithium niobate.

Key words: Periodically poled lithium niobate; Electro-optical effect; Coupled wave theory; Bragg diffraction; Diffraction properties

OCIS Codes: 260.1180; 230.2090; 130.3730; 050.1960

基金项目:国家自然科学基金(No. 61367004)和广西自然科学基金创新团队项目(No. 2013GXNSFFA019001)资助

第一作者:万玲玉(1975-),女,教授,主要研究方向为晶体光学和表面等离激光纳米探测技术. Email:wanlingyu75@126.com

收稿日期:2013-05-02;录用日期:2013-06-28

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

0 引言

周期性极化铌酸锂 (Periodically Poled Lithium Niobate, PPLN) 是重要的非线性光学晶体, 在准相位匹配、波长转换领域广为应用, 近年来其电光效应在集成光学器件方面的应用也逐渐受到重视. 当铌酸锂晶体被周期性极化后, 在不同的方向加电场, 其电光效应不同, 光传播性质也不同, 目前 PPLN 的电光效应已被用于制作光开关^[1-7]、光逻辑门^[8]、光滤波器^[9]、脉冲整形器^[10-11]、光隔离器^[12]等光学器件. PPLN 的电光效应和施加电场以及光传播方向密切相关, 李世忱等^[4]在 PPLN 的极化方向 (z 方向) 加电场, 光沿 x 方向传播, 通过电控调谐极化周期控制失配将准相位匹配器件同时做成电光调制器件, 实现全光开关功能. 上海交通大学陈险峰课题组^[7-10,12]研究了在 PPLN 的 y 方向加电场, 光沿 x 方向传播时, 光偏转态的旋转变换及其应用, 并实验研究了在 PPLN 的 z 方向加电场, 光沿 x 方向传播时的自聚焦效应^[13]. 当在 PPLN 的 z 方向加电场, 光沿 y 方向传播时, PPLN 相当于一个折射率光栅, 现有的研究通常仅用标量衍射理论讨论一种特殊情况——布喇格角入射^[1-3]时的衍射性质, 缺少对其他入射情况的研究. 由于 PPLN 是各向异性晶体, 相邻畴的电光效应和入射光的传播方向和偏振性质等因素相关, 仅用标量衍射理论难以正确分析不同入射条件下的衍射性质.

因此, 本文采用严格的矢量耦合波理论, 通过数值仿真方法, 研究三维的 PPLN 在 z 方向加电场, 光与 xz 平面成任意角度入射时 PPLN 的电光衍射性质, 研究其在不同衍射条件和其他入射角下的衍射特性, 为 PPLN 的集成应用提供有价值的参考.

1 光栅的严格耦合波理论

图1为光栅的衍射示意图, 光栅区由两种折射率

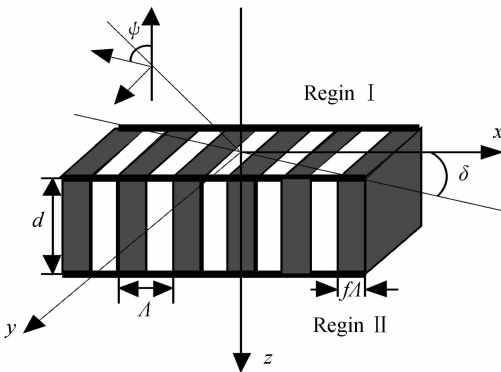


图 1 光栅的衍射示意图

Fig. 1 Diffraction geometry of one-dimensional grating

分别为 n_{e_1} 和 n_{e_2} 的材料周期性交替生成. 光栅的周期为 Λ , 材料的占空比为 f , 光栅深度为 d . 入射空间 I 区的折射率为 n_1 , 透射空间 II 区的折射率为 n_0 . 光栅平面的法线方向沿 z 轴, 光栅矢量沿 x 轴. 一束偏振光入射到光栅上, 入射角为 θ , 方位角为 δ . 入射光电矢量与入射平面的夹角为偏振角 ψ , 因此, $\psi=90^\circ$ 对应着 TE 偏振波, $\psi=0^\circ$ 对应着 TM 波.

在光栅区 ($0 < z < d$), 周期性结构对应的介电常量可展开为傅里叶级数形式^[14-15], 即

$$\epsilon(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \epsilon_m \exp(jKmx) \quad (1)$$

式中, $K=2\pi/\Lambda$ 为光栅矢量的大小, ϵ_m 为光栅区介电常量的第 m 级傅里叶分量. 则 ϵ_m 可表示为

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= n_{e_1}^2 f + n_{e_2}^2 (1-f) \\ \epsilon_m &= (n_{e_1}^2 - n_{e_2}^2) \frac{\sin(\pi m f)}{\pi m} \quad (m \neq 0) \end{aligned} \quad (2)$$

在 I 区, 入射光的场归一化矢量为

$$\mathbf{E}_{\text{inc}} = \mathbf{u} \exp[-jk_0 n_1 (\sin \theta \cos \delta x + \sin \theta \sin \delta y + \cos \theta z)] \quad (3)$$

$$\mathbf{u} = (\cos \psi \cos \theta \cos \delta - \sin \psi \sin \delta) \hat{x} + (\cos \psi \cos \theta \sin \delta - \sin \psi \cos \delta) \hat{y} - \cos \psi \sin \theta \hat{z} \quad (4)$$

式中, $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ 为入射光波波长.

I 区和 II 区的归一化电矢量可表示为

$$\mathbf{E}_I = \mathbf{E}_{\text{inc}} + \sum_i \mathbf{R}_i \times \exp[-j(k_x x + k_y y - k_{1,z} z)] \quad (5)$$

$$\mathbf{E}_{II} = \sum_i \mathbf{T}_i \exp\{-j[k_x x + k_y y - k_{II,z} (z-d)]\} \quad (6)$$

式中 $k_x = k_0 [n_1 \sin \theta \cos \delta - i(\lambda_0/\Lambda)]$,

$$k_y = k_0 n_1 \sin \theta \sin \delta, i=0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$\begin{aligned} k_{l,z} &= \left\{ +[(k_0 n_l)^2 - k_x^2 - k_y^2]^{1/2} \times (k_x^2 + k_y^2)^{1/2} < \right. \\ &\quad \left. k_0 n_l - j[-(k_0 n_l)^2 + k_x^2 + k_y^2]^{1/2} \times (k_x^2 + k_y^2)^{1/2} > \right. \\ &\quad \left. k_0 n_l \right. \\ &\quad \left. (k_x^2 + k_y^2)^{1/2} < k_0 n_l \right. \\ &\quad \left. (k_x^2 + k_y^2)^{1/2} > k_0 n_l \right. \end{aligned} \quad l=I, II \quad (7)$$

\mathbf{R}_i 是 I 区中反射波的归一化电矢量振幅, \mathbf{T}_i 是 II 区中透射波的归一化电矢量振幅. I 区和 II 区中的磁矢量可以由麦克斯韦方程得到. 光栅区的电矢量和磁矢量可以按衍射级次展开为

$$\mathbf{E}_g = \sum_i [S_x(z) \hat{x} + S_y(z) \hat{y} + S_z(z) \hat{z}] \cdot \exp[-j(k_x x + k_y y)] \quad (8)$$

$$\mathbf{H}_g = -j(\epsilon_0/\mu_0)^{1/2} \times \sum_i [U_x(z) \hat{x} + U_y(z) \hat{y} + U_z(z) \hat{z}] \exp[-j(k_x x + k_y y)] \quad (9)$$

式中的 S_i, U_i 分别是第 i 级衍射光电矢量和磁矢量. 将式(8)、(9)代入光栅区的麦克斯韦方程组, 得到

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E}_g &= -j\omega\mu_0 \mathbf{H}_g \\ \nabla \times \mathbf{H}_g &= -j\omega\epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}_g \end{aligned} \quad (10)$$

这样, 便得到了耦合波方程, 令 $z' = k_0 z$, 可得矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} \partial S_y / \partial(z') \\ \partial S_x / \partial(z') \\ \partial U_y / \partial(z') \\ \partial U_x / \partial(z') \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \mathbf{K}_y \mathbf{E}^{-1} \mathbf{K}_x & \mathbf{I} - \mathbf{K}_y \mathbf{E}^{-1} \mathbf{K}_y \\ 0 & 0 & \mathbf{K}_x \mathbf{E}^{-1} \mathbf{K}_x - \mathbf{I} & -\mathbf{K}_x \mathbf{E}^{-1} \mathbf{K}_y \\ \mathbf{K}_x \mathbf{K}_y & \mathbf{E} - \mathbf{K}_y^2 & 0 & 0 \\ \mathbf{K}_x^2 - \mathbf{E} & \mathbf{K}_x \mathbf{K}_y & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_y \\ S_x \\ U_y \\ U_x \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 \mathbf{K}_y 和 \mathbf{K}_x 分别是对角元为 (k_y/k_0) 和 (k_x/k_0) 的对角阵, \mathbf{E} 是由介电常量的傅里叶分量组成的矩阵, 其第 (i, p) 个矩阵元为 $\epsilon(i-p)$, \mathbf{I} 是单位矩阵. 利用切向电矢量和磁矢量在 $z=0$ 和 $z=d$ 处的连续边界条件, 通过计算该矩阵的本征值和本征矢可求解耦合波方程, 进而可以得出光栅各级的衍射效率.

矢量耦合波分析方法基于严格的电磁场理论及边界条件, 理论上可以分析任意周期结构的光学元件. 本文研究的 PPLN 为各向异性介质, 在进行三维结构的衍射性质分析时, 应采用矢量分析法进行. 在 PPLN 的 z 方向施加电场 E_v , 光沿 y 轴传播时相当于一个折射率衍射光栅, 如图 2, 图中钽酸锂晶体的光轴为 z 轴方

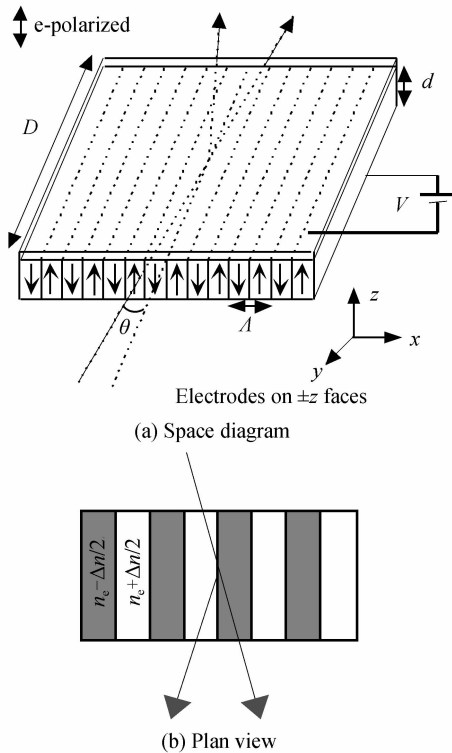


图 2 PPLN 的电致衍射光栅示意

Fig. 2 Schematic diagram of electrically induced diffraction grating of PPLN

向. 设入射光为线偏光, 偏振方向与钽酸锂晶体的光轴一致, 入射光线与晶体的光轴构成主平面, 入射光的振动方向在主平面内, 当入射光为 e 光时 (折射率为 n_e), 由于电光效应, 正畴 (The positive polarized area) 和负畴 (The negative polarized area) 的折射率变化为

$$\begin{cases} n_p = n_e - \frac{1}{2} n_e^3 \gamma_{33} E_v, \text{正畴} \\ n_g = n_e + \frac{1}{2} n_e^3 \gamma_{33} E_v, \text{负畴} \end{cases} \quad (12)$$

形成了周期性的折射率变化光栅, 正畴和负畴区域为一个光栅周期, 在一个光栅周期内, 对应上述光栅区的折射率为

$$\begin{cases} n_{g_1} = n_e - \frac{1}{2} \Delta n \\ n_{g_2} = n_e + \frac{1}{2} \Delta n \end{cases} \quad (13)$$

式中 $\Delta n = \frac{1}{2} n_e^3 \gamma_{33} E_v = \frac{1}{2} n_e^3 \gamma_{33} \frac{V}{d}$, V 为晶体施加的电压. 接下来采用严格耦合波理论来计算分析 PPLN 的电光衍射特性.

2 模拟计算与讨论

2.1 PPLN 的布喇格衍射特性

计算采用的模型参量如下: 光波的波长为 $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$, 钽酸锂晶体的 e 光的折射率为 $n_e = 2.2024$, 畴反转结构的周期为 $\Lambda = 7 \mu\text{m}$, 厚度为 $d = 0.5 \text{ mm}$, 模拟过程忽略材料的色散和吸收. 光射入这样的 PPLN, 在电场的作用下将发生衍射, 常用参量 $Q = 2\pi L (\lambda_0 / n_e \Lambda^2)$ 的值来作为判别发生布喇格衍射的条件, 其中 L 为光传播的长度. 常规认为 $Q \geq 4\pi$ 时为布喇格衍射, 而布喇格角满足公式 $2\Lambda n_e \sin \theta = \lambda$, 在本文的模型中, 求得布喇格入射角为 $\theta = 0.9886^\circ$, 传播长度为 $L = 1 \text{ mm}$ 时对应的 Q 值为 30.98, 当 L 大于 0.5 mm 后可认为满足布喇格衍射条件.

图 3~5 分别是布喇格角入射条件下, 不同参量对应的 PPLN 的电光衍射性质. 取 $D = 2 \text{ mm}$, 图 3 给出了入射角为 $\theta = 0.9886^\circ$ 时, PPLN 各级的电光衍射效率和施加电场的关系. 从图中可以看出, 当光以布喇格角度入射且满足布喇格衍射条件时, 只有 0 级和 -1 级衍射光, 二者的衍射效率总和为 1, 0 级的衍射光随着电场的增大按余弦规律周期性转换到 -1 级衍射光上, 在施加电场 E_v 为 0.644 kV/mm 时, 0 级衍射光第一次全部转化为 -1 级衍射光, 转化效率达到 100%. 因此通过电场的控制可以将入射光全部转变为 -1 级的衍射光, 利用该特点可以制作转换效率高的电光开关. 图 4 是在 $D = 2 \text{ mm}$, 施加电场为 0.644 kV/mm、入射角为 $\theta = 0.9886^\circ$ 时, 衍射效率随波长的变化情况. 只有波长为 $0.532 \mu\text{m}$ 的光波在 -1 级衍射处可以全部透过 PPLN, 可见 PPLN 也可以用作滤波器, 使单一波长的光通过, 通过入射角、晶体参量和施加电场的调制可以进行透射波长的选择. 图 5 为不同长度 D 下的 -1 级衍射效率随电场的变化

关系. 从图上可看出,随着长度的增长,0级全部转化为-1级所需的最小电场逐渐减小,因此通过增加长度,有助于降低施加电场,当长度为10 mm时,全部转化所需的最小电场大约为0.12 kV/mm.

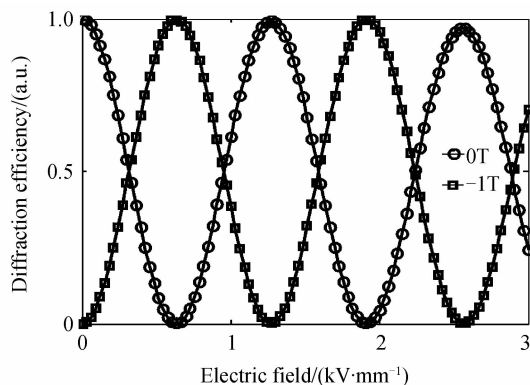


图3 在 $\theta=0.9886^\circ$ 下,PPLN的电光衍射效率与施加电场关系

Fig. 3 Relationship between diffraction efficiency of PPLN and applied electric-field with incident angle θ of 0.9886°

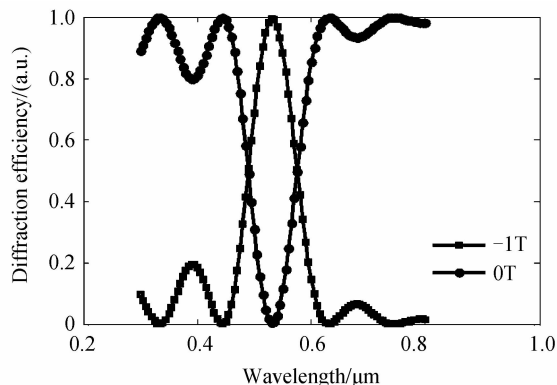


图4 当 $E_z=0.644$ kV/mm, $\theta=0.9886^\circ$ 时,PPLN的衍射效率随波长的变化关系

Fig. 4 The relationship between diffraction efficiency of PPLN and incident wavelength with applied electric-field E_z of 0.644 kV/mm and incident angle θ of 0.9886°

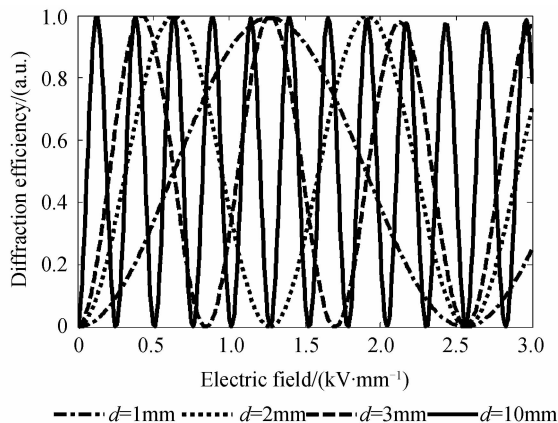


图5 不同长度 D 下,0级光的衍射效率随施加电场的变化关系

Fig. 5 Diffraction efficiencies of 0 order light vary with applied electric-field with different crystal length

当改变PPLN的周期或长度时,其 Q 值便发生了变化,为了验证电光PPLN产生布喇格衍射的条件,通过上述模型计算了0级和-1级光随 Q 值的变化情况,其中采用电场为0.644 kV/mm,入射角满足 $2\Delta n_e \sin \theta = \lambda$,如图6.从图上可以看出,在 $Q=7.5$ 时,0级的衍射效率是 $0.0012 \approx 0$,-1级的衍射效率是0.954;之后,-1级衍射有几个较大弧度的振荡,在 $Q=13$ 时,-1级的衍射效率达到0.96,其震荡弧度较小,并随着 Q 的增大而逐渐趋近于1,与声光衍射中采取 $Q > 4\pi$ 作为产生布喇格衍射的条件一致,其中没有完全达到1的原因是还没有完全达到布喇格衍射的匹配条件.

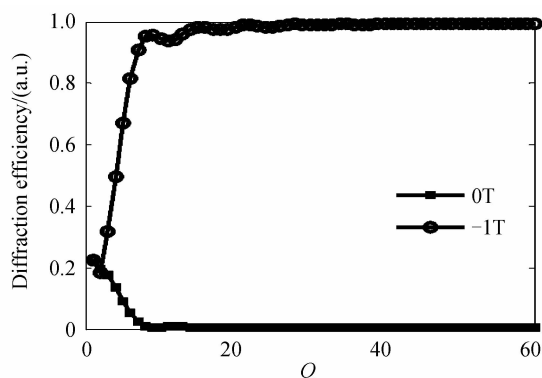
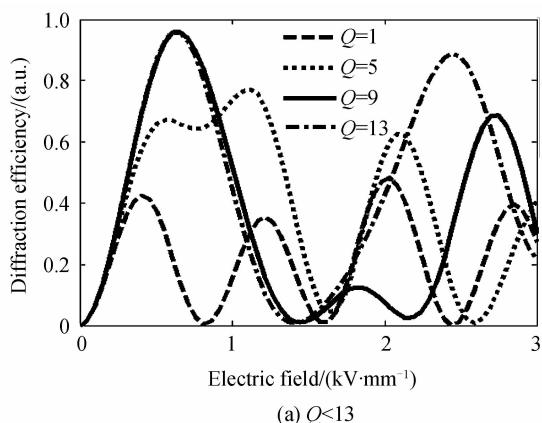


图6 在 $\theta=0.9886^\circ$ 下,0级和-1级光的衍射效率随 Q 值的变化关系

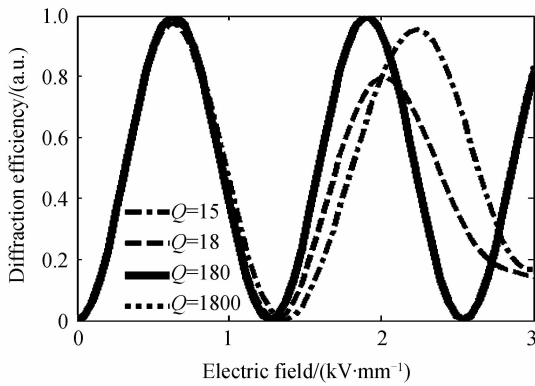
Fig. 6 The relationship between diffraction efficiency of PPLN and Q value with incident angle θ of 0.9886°

2.2 不同 Q 值对PPLN衍射的影响

由2.1节的研究可知,在满足 $Q \geq 13$,同时在完全匹配的条件下,通过适当的电场控制,才可以使0级的衍射全部转化为-1级的衍射.若 $Q < 13$,则PPLN不会产生完全的布喇格衍射,而是一些较为复杂的衍射.下面分别计算不同 Q 值对-1级衍射光产生的影响.PPLN的长度 $D=2$ mm不变,通过改变周期 Λ 来改变 Q 值.图7是不同 Q 值下,-1级的衍射效率随电场的变化.大量计算表明,随 Q 值的增大,-1级的最大衍射效率逐渐上升,在 $Q < 7.5$ 时,-1级的最大衍射效率小于95%, Q 值大于9后,最大衍射效率增加到约



(a) $Q < 13$



(b) $Q > 13$

图7 不同Q值下,-1级衍射效率随施加电场的变化关系
Fig.7 The relationship between diffraction efficiency of -1 order light and applied electric-field with different Q value

95%,继续增大Q值至15,在电场为0.644 kV/mm的附近-1级出现接近100%的衍射效率,但此时-1级的衍射效率却不作周期性变化,而是一种无规则的变化.当Q值远大于13后,其-1级的衍射效率可以达到100%,同时在0~3 kV/mm的范围内随电场做周期性震荡.

2.3 非布喇格入射角下的PPLN电光衍射特性

由于目前PPLN的周期在微米的量级,其布喇格

角相对较小,限制了它的电光效应的应用,为了拓展应用,本节研究当入射角不是布喇格角时PPLN的电光衍射性质.模型为长(D) \times 宽 \times 厚度(d) $=3\times2\times0.5\text{ mm}^3$ 的铌酸锂晶体,采用与2.1节相同的波长入射,当施加电场为2 kV/mm时,各衍射级的衍射效率随入射角的变化情况如图8(计算到-5级).由图8可看出,除了布喇格入射角外,在倍数入射角附近,对应倍数衍射级也有较高的衍射效率,取布喇格角的倍数角入射,计算了对应的倍数衍射级次的衍射效率随电场的变化情况.图9(a)~(d)分别是布喇格角的2倍

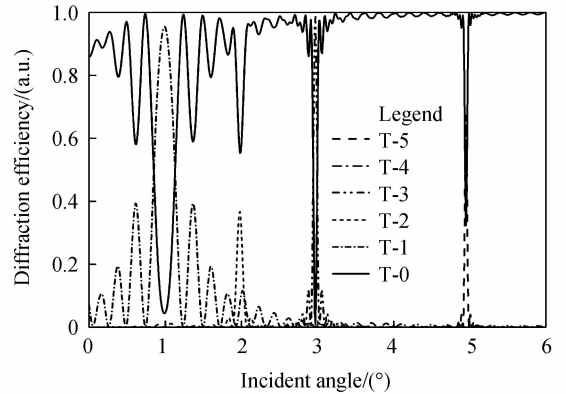
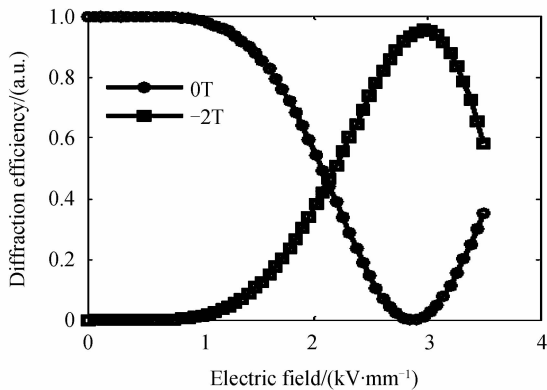
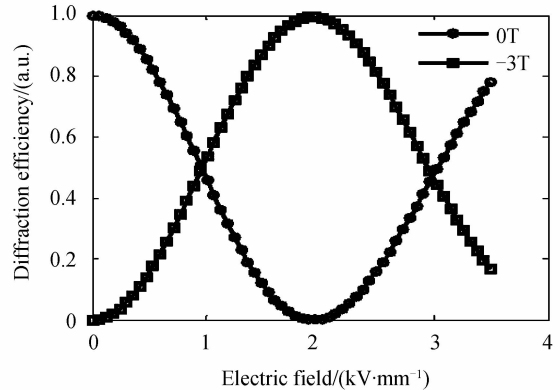


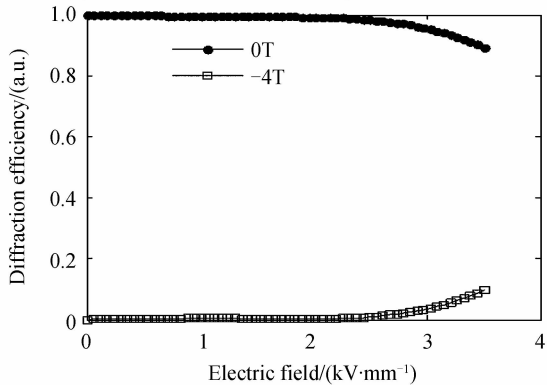
图8 施加电场为2 kV/mm时,不同入射角下的衍射性质
Fig.8 The diffraction properties of PPLN for different incident angle with applied electric-field of 2 kV/mm



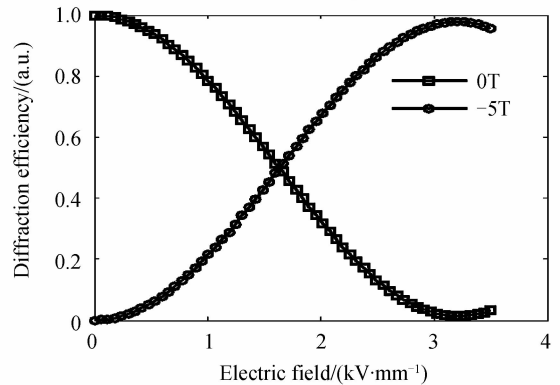
(a) $\theta=1.98^\circ$, diffraction efficiency of 0 order and -2 order



(b) $\theta=2.97^\circ$, diffraction efficiency of 0 order and -3 order



(c) $\theta=3.96^\circ$, diffraction efficiency of 0 order and -4 order



(d) $\theta=4.95^\circ$, diffraction efficiency of 0 order and -5 order

图9 以布喇格角的倍数角度入射时,0级与倍数衍射级的衍射效率与施加电场关系
Fig.9 Relationships between diffraction efficiencies of 0 order and corresponding multiple diffraction orders and applied electric-field with incident angles of multiple Bragg angle

(1.98°)、3倍(2.97°)、4倍(3.96°)和5倍(4.95°)作为入射角时,0级与-2级、0级与-3级、0级与-4级和0级与-5级的衍射效率随施加电场的变化情况.从图9(a)~(d)可以看出,当光束以布喇格倍数角入射时,在电场0~3 kV/mm的范围内,除了入射角为4倍布喇格入射角时的-4级衍射效率较低外,其他几个角度在对应的电场下相应的倍数衍射级次均可以达到相对较高的衍射效率,其中奇倍数-3衍射级的最大衍射效率达到了100%.因此,在实际应用中,可以使用布喇格倍数角增大使用范围.

3 结论

本文根据严格耦合波理论模拟计算了PPLN的电光衍射特性,研究表明,当把PPLN集成在晶体中,在PPLN的 z 方向加上电场,光与 xz 平面为任意角度入射时,PPLN成为一个折射率光栅,其电光衍射性质根据衍射条件的不同而不同.当以布喇格角度入射且光在PPLN中的传输满足布喇格衍射条件时,在适当的电场控制下可以实现0级光和1级衍射光之间的转换,最大转换效率达到100%,并且具有周期性的调制性质,0级光可以随着施加电场的增大周期性的转化到-1级的衍射光中,增大光在PPLN的传播长度可以降低100%转化所需的电场值.光以布喇格角度入射,但光在PPLN中的传输不满足布喇格衍射条件时,0级光和1级衍射光之间不能实现100%的转换,并且电场调制的周期性发生变化.当入射角不是布喇格角度时,以布喇格的倍数角入射,在相应的奇数倍数衍射级上最大衍射效率同样可以达到100%.在实际应用中,可以利用PPLN的上述电光衍射特性,合理控制电场、入射角和结构参量制作各种高效小型化的光学集成器件.

参考文献

- [1] GNEWUCH H, PANNELL C N, ROSS G W, *et al.* Nanosecond response of Bragg deflectors in periodically poled LiNbO₃[J]. *Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(12): 1730-1732.
- [2] YAMADA M. Electrically induced Bragg-diffraction grating composed of periodically inverted domains in lithium niobate crystals and its application devices[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, **71**(11): 4010-4016.
- [3] ABERNETHY J A, GAWITH C B E, EASON R W, *et al.* Demonstration and optical characteristics of electrooptic Bragg modulators in periodically poled lithium niobate in the near-infrared[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **81**(14): 2514-2516.
- [4] LI Shi-chen, XUE Ting, YU Jian. A novel electrooptical switching in PPLN waveguide[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(9): 2018-2021.
李世忱,薛挺,于建. 新颖的PPLN电光开关[J]. *物理学报*, 2002, **51**(9): 2018-2021.
- [5] LI Ying, CHEN Xing-lin. Projection pursuit learning networks applying for eliminating noises of fiber optic gyroscope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 94-98.
李颖,陈兴林. 投影寻踪网络用于光纤陀螺噪声消除的研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1): 94-98.
- [6] JUA Nuan-huo, LIU Kun, CHEN Xian-feng. 1×2 precise electro-optic switch in periodically poled lithium niobate[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(15): 15603-15608.
- [7] CHEN Hong-yun, LV Tao, ZHENG An-shou, HAN Yan-ling. Controlled switching of discrete solitons in periodically poled lithium niobate waveguide arrays[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(8): 1663-1667.
- [8] ZHANG Yin-xing, CHEN Yu-ping, CHEN Xian-feng. Polarization based all-optical logic gates employing electro-optic effect in periodically poled LiNbO₃[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(s1): s117001.
张寅星,陈玉萍,陈险峰. 基于周期性极化铌酸锂的偏振相关全光逻辑门[J]. *中国激光*, 2011, **38**(s1): s117001.
- [9] LIU Kun, SHI Jian-hong, CHEN Xian-feng. Electro-optical flat-top bandpass Solc-type filter in periodically poled lithium niobate[J]. *Optics Letter*, 2009, **34**(7): 1051-1053.
- [10] HUANG Rong-an, CHEN Xian-feng, SHI Jian-hong, *et al.* Pulse shaping by the electro-optic effect in chirped periodically poled lithium niobate[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(5): 795-799.
- [11] LIU S, LEE K J, PARMIGIANI F, *et al.* Retiming of short pulses using quadratic cascading in a periodically poled lithium niobate waveguide[J]. *Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(2): 94-96.
- [12] SHI Lei, TIAN Ling-hao, CHEN Xian-feng. Optical isolator based on the electro-optic effect in periodically poled lithium niobate with the addition of a half domain[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(36): 8521-8525.
- [13] YANG Yong, DENG Xuewei, LAO Huiying, *et al.* Self-focusing effect in voltage-controlled PPLN waveguide arrays[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(2): 021901.
- [14] QIAN Chen, CHEN Zhen-yu, ZHU Ning-hua. Analysis of interdigital electrooptic bragg diffraction grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 548-552.
钱辰,陈振宇,祝宁华. 叉指电光布喇格衍射光栅分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 548-552.
- [15] CAI Tuo, SANG Tian, ZHAO Hua. Coupled-wave analysis, numerical calculation and discussion for diffraction properties of grating[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(4): 141-146.
蔡托,桑田,赵华. 光栅衍射特性的耦合波分析、计算与讨论[J]. *光电工程*, 2010, **37**(4): 141-146.