

文章编号: 1001-3806(2006)04-0360-03

离子注入铌酸锂平面波导双折射特性的研究

张 剑, 李国华*, 郝殿中

(曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 272165)

摘要: 为了获得折射率信息, 采用 UT300-FPD 型椭圆仪对 $5\text{mm} \times 10\text{mm} \times 1\text{mm}$ 铌酸锂晶体及注入镱的铌酸锂晶体波导的双折射特性进行了测量。首先对铌酸锂晶体测量结果进行建模及数据处理, 得到晶体在 $190\text{nm} \sim 1700\text{nm}$ 之间的双折射特性; 在此模型的基础上, 进一步对注入镱的铌酸锂晶体波导进行了建模和数据处理, 得到了波导层的双折射率的分布。所得表征结果为铌酸锂晶体波导在光子器件中的应用提供了有用的信息。

关键词: 集成光学; 铌酸锂; 波导; 双折射; 椭圆仪;

中图分类号: O734 文献标识码: A

The theory of correcting the deviation of retardation of wave-plate

ZHANG Jian, LI Gou-hua, HAO Dian-zhong

(Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

Abstract In order to get the information of index of refraction, we measure the properties of birefringence of LiNbO_3 and LiNbO_3 waveguide using UT300-FPD ellipsometry. Firstly, we made model of LiNbO_3 and fit the results so we have the index of refraction from $190\text{nm} \sim 1700\text{nm}$. Secondly, based on the model of the first step we readily obtain the model of LiNbO_3 waveguide and the distribution of the index of refraction. The work we have done provide useful information for the development of LiNbO_3 waveguide as photon devices.

Key words integrated optics; lithium niobate; waveguide; birefringence; ellipsometry

引 言

自 1965 年 BALLMAN 利用 Czochralski 方法成功生长铌酸锂 (LiNbO_3 , LN) 晶体以来, 由于铌酸锂晶体本身具有的压电、热电、铁电、线性和非线性特点, 使其在工程应用领域大显身手, 被称为通用型和聪明型晶体, 国内外厂商采用电阻或中频感应加热炉方法生长出较大尺寸的人工单晶体^[1~4]。铌酸锂晶体是重要的非线性光学及光折变晶体, 广泛应用于光学二次谐波、光学存储、光学相位共轭等光学信息处理的许多方面, 在这样的光学材料上形成光波导将能使材料的光学性能与光波导优良的传输特性相结合, 提供一种高效小型化的光学系统, 因而已成为集成光学研究领域的重要内容。离子注入是制作光波导的重要方法之一。离子注入形成光波导的原理是: 经电场加速的离子在注入材料后, 由于在离子注入末端注入离子与晶格原子的碰撞破坏了晶体的有序结构, 从而造成这部分晶格的部分非晶化。这层部分非晶化的损伤层具有较低的

折射率, 使得在损伤层与晶体表面之间传输的光发生全反射, 即形成波导结构。因此对注入离子的损伤层折射率的研究就有十分重要的意义。以往的文献中对注入层折射率分布研究报道一般是采用“选择零原法”^[5,6], 反 WKB 方法(对多膜波导较为准确)^[7], 也采用简单解析函数的方法^[8]。椭圆仪一向用来测量薄膜的厚度和折射率, 具有相当高的精度, 也可以用来测量体材料, 用椭圆仪对铌酸锂波导双折射性质进行研究却鲜有报道。作者则采用法国产的椭圆仪对铌酸锂晶体及注入多层镱的铌酸锂晶体进行测量, 对数据进行从简入繁的建模和拟合, 得到了损伤层的平均折射率。

1 椭圆术原理和测量系统

椭圆仪是通过测量偏振光偏振状态的改变来测量薄膜厚度和折射率的。对于体材料, 如图 1 所示, 图中下标 i 表示入射光, r 表示反射射光, 根据菲涅耳公式^[9]:

$$r_{01,p} = \frac{n_1 \cos\Phi_0 - n_0 \cos\Phi_1}{n_1 \cos\Phi_0 + n_0 \cos\Phi_1} = |r_p| \exp(i\delta_p) \quad (1)$$

$$r_{01,s} = \frac{n_0 \cos\Phi_0 - n_1 \cos\Phi_1}{n_0 \cos\Phi_0 + n_1 \cos\Phi_1} = |r_s| \exp(i\delta_s) \quad (2)$$

式中, $r_{01,p}$, $r_{01,s}$ 为菲涅耳系数, p 表示平行分量, s 表示垂直分量, n_0 为空气的折射率, n_1 为第 1 介质的折射率, Φ_0 为入射角, Φ_1 为折射角, 可以得到: $\rho = r_p / r_s =$

作者简介: 张 剑 (1978-), 男, 硕士研究生, 主要从事偏光测量和偏光器件的设计工作。

* 通讯联系人。 E-mail: gh16@163.com

收稿日期: 2005-04-11; 收到修改稿日期: 2005-12-07

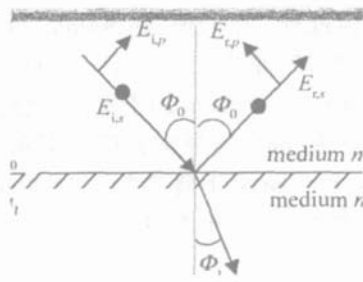


Fig 1 Bulk sample

$\tan\Psi \exp(j\Delta)$ 。其中, Ψ 和 Δ 为测量值; $\tan\Psi = \frac{|r_p|}{|r_s|}$ 为 ρ 的模; $\Delta = \xi_i - \xi_r$ 是反射引起的相位变化。解方程 $\rho(\Psi, \Delta) = f(\epsilon_0, \epsilon_1, \Phi_0)$, 其中, ϵ_0 为空气的介电常数, ϵ_1 为第 1 介质的介电常数, 即可得第 1 介质的折射率 n_1 和吸收系数 k_1 。

对于单层膜的模型如图 2 所示, 反射率 $R = \sum r_i$,

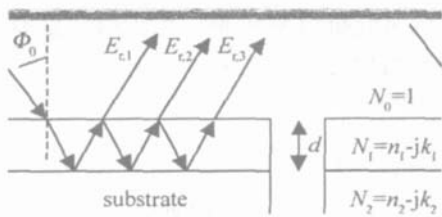


Fig 2 The two phase model

与两个反射界面有关, $R = \frac{r_{01} + r_{12} \exp(-2\beta)}{1 + r_{01} r_{12} \exp(-2\beta)}$, 其中,

$\beta = 2\pi(d/\lambda) n_1 \cos\Phi_1$ 是由反射引起的相位变化, 解方程 $\rho(\Psi, \Delta) = f(\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \Phi_0, d, \lambda_0)$, 其中 ϵ_0 为空气的介电常数, ϵ_1 为第 1 介质的介电常数, ϵ_2 为第 2 介质的介电常数, Φ_0 为入射角, λ_0 为入射光波长, 可得 n_1, k_1 和 d ; Ψ 和 Δ 为测量值。

对于多层膜, 理论上 $\rho(\Psi, \Delta) = f(\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n, \Phi_0, d_1, \dots, d_n, \lambda_0)$, 可解得各层的折射率 n 和厚度 d 。

法国 UT300-FPD 型椭圆偏光系统如图 3 所示。

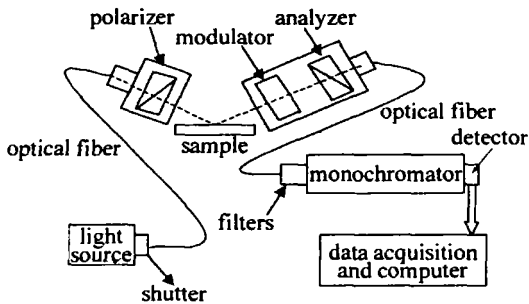


Fig 3 Optical set up of the SPME

它采用了电光调制晶体补偿反射光, 由 CCD 测得的光强公式为: $I(t) = E_r E_t^* = I[I_0 + I_s \sin\delta(t) + I_c \times \cos\delta(t)]$, 测量时, $I_0 = 1, I_s = \sin 2\Psi \sin \Delta, I_c = \sin\Psi \cos\Delta$, $\delta(t) = A \sin(\omega t)$, 调制频率为 50Hz, 测试光谱范围为 190nm ~ 1700nm, 用椭圆偏光仪进行测量的步骤为测量、建模、拟合、结果分析。双折射晶体中常光和非常光折

射率的色散公式也可用椭圆偏光仪测量, 要求样品光轴平行于入射面, 建模也比较复杂。

2 椭圆偏光仪测量铌酸锂晶体

由于铌酸锂晶体波导物理模型比较复杂, 首先对铌酸锂晶体进行了测量、建模和拟合。铌酸锂晶体物理模型如图 4 所示, 铌酸锂晶体表面粗糙层的厚度大

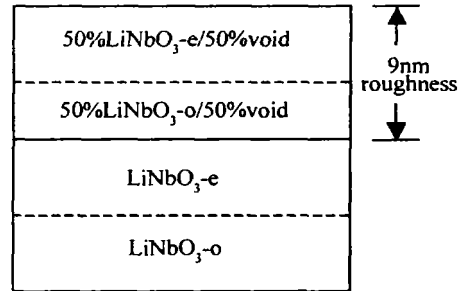


Fig 4 Model of LN crystal

约为 9nm, 晶体占粗糙层厚度的 50%。选用经典公式对测量数据进行了拟合结果, 如图 5 所示。

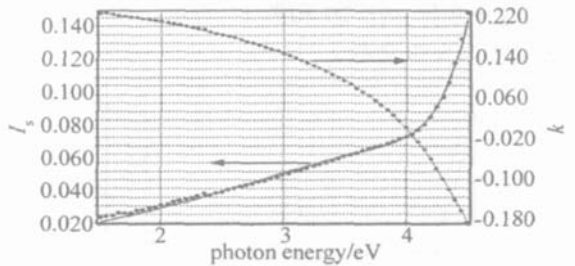


Fig 5 Fit result graphic of LN crystal

软件计算出的铌酸锂晶体 e 光和 o 光的折射率和电介常数如图 6 和图 7 所示。粗实线为折射率, 细

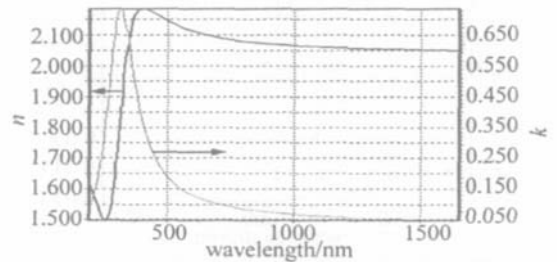


Fig 6 The index of refraction of e light of LN crystal

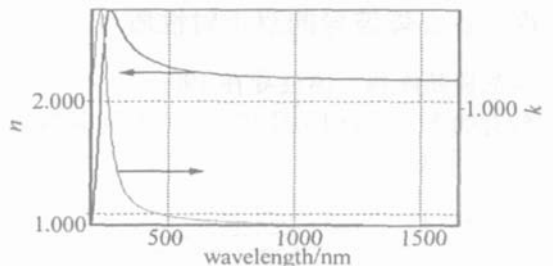


Fig 7 The index of refraction of o light of LN crystal

实线为介电常数。根据铌酸锂晶体表面粗糙层的厚度以及已知的波导层的大约厚度, 对注入镱的铌酸锂晶体进行建模和拟合, 得到了相当理想的结果。物理模型及拟合结果如图 8 和图 9 所示。

50%LiNbO ₃ -e/50%void	0.1nm
50%LiNbO ₃ -o/50%void	
LiNbO ₃ -e	98310nm
LiNbO ₃ -o	
LiNbO ₃ -Ga-e	204758nm
LiNbO ₃ -Ga-o	
LiNbO ₃ -e	
LiNbO ₃ -o	

Fig 8 Model of LN crystal waveguide

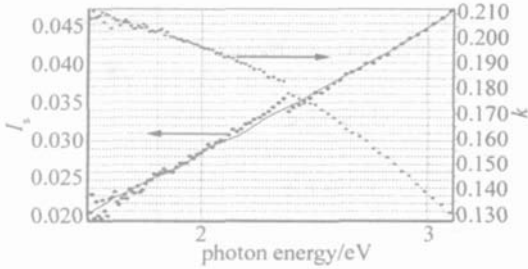


Fig 9 Fit result graphic of LN crystal waveguide

软件计算出的铌酸锂晶体波导层 e光和 o光的折射率和电介常数如图 10和图 11所示。粗实线为折射率,细实线为介电常数。

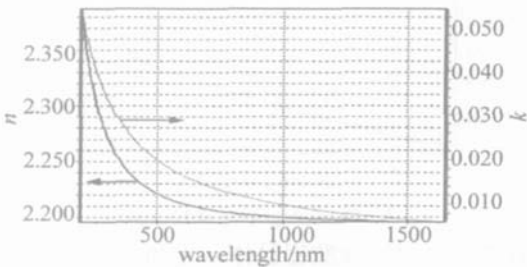


Fig 10 The index of refraction of e light of LN crystal waveguide

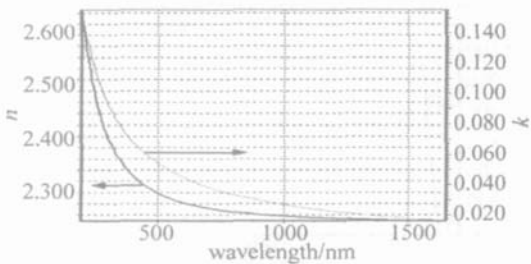


Fig 11 The index of refraction of o light of LN crystal waveguide

3 铌酸锂晶体波导的双折射性质

铌酸锂晶体和晶体波导在 190nm ~ 1700nm 之间相比较有如下性质: (1)图 12中,铌酸锂晶体常光折

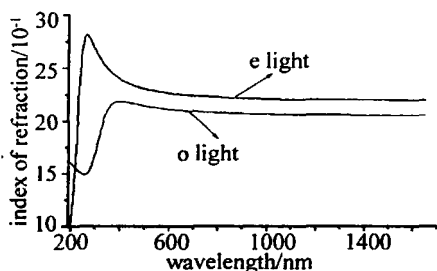


Fig 12 The index of refraction of LN crystal

射率 300nm附近有一个峰值,在 500nm ~ 1700nm 趋于平缓,大约为 2.25,非常光折射率在 400nm 附近有一个峰值,在 700nm ~ 1700nm 趋于平缓,大约为 2.01。

(2)图 13中,晶体波导常光折射率和非常光折射率在 190nm ~ 600nm 呈下降趋势,在 600nm ~ 1700nm 趋于平缓,大约为 2.27和 2.21。

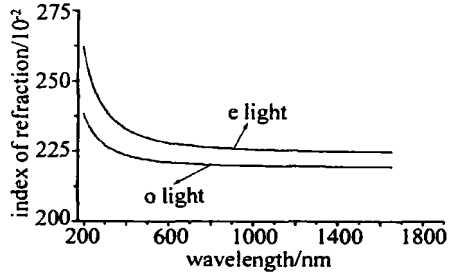


Fig 13 The index of refraction of LN crystal waveguide

(3)图 14中,在 600nm ~ 1700nm,晶体波导和铌酸锂晶体的常光折射率和非常光折射率都有增加;非常光折射率增加得多。

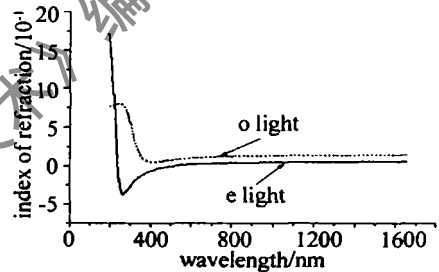


Fig 14 The change of the index of refraction

(4)图 15中,铌酸锂晶体的双折射率在 300nm 附近有一个峰值,在 500nm ~ 1700nm 趋于平缓,大约为 0.15,晶体波导双折射率在 190nm ~ 500nm 呈下降趋势,在 500nm ~ 1700nm 之间趋于平缓,大约为 0.07。

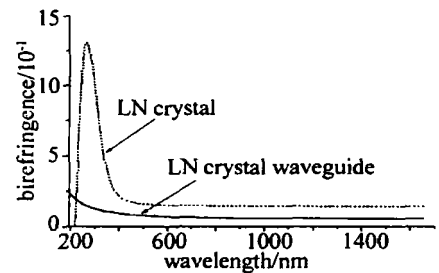


Fig 15 The change of the birefringence

4 结论

利用椭偏仪对铌酸锂晶体以及注入镱的波导的双折射特性进行测量,对结果进行建模及数据处理,可以精确地得到波导层的双折射率的分布,对这类光子器件(无源器件)的表征及应用提供了有用的数据。所建立的模型及数据处理方法对这类器件设计有参考价值,可以对质子交换或掺钛波导这类铌酸锂波导器件进行推广,因为目前质子交换制备波导的工艺较为广泛和成

(下转第 365页)

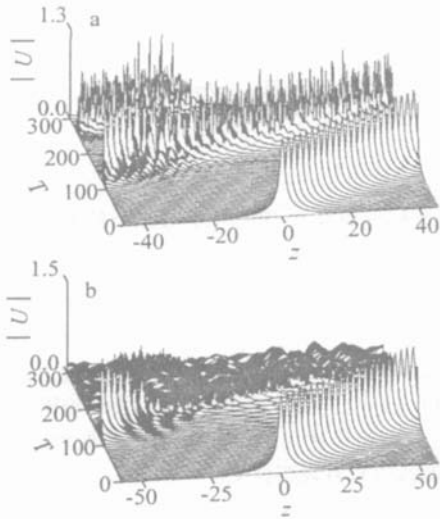


Fig 3 Evolution of unstable Bragg grating solitons

a—multiple modes oscillatory vibration region b—scattering region

EGGLETON 等实验研究了布喇格孤子在光纤布喇格光栅中的产生^[12], 研究表明, 在入射脉冲强度为 $20\text{GW}/\text{cm}^2$ 时, 可以形成速度降低的稳定布喇格孤子, 其相应布喇格孤子解的参数 θ 和 v 分别约为 0.16 和 0.74 对应于本文中分析的稳定谐振区; 在入射脉冲大于 $55\text{GW}/\text{cm}^2$ 时, 孤子脉冲开始分裂, 进入多模振荡区。他们还数值研究了入射脉冲为 $100\text{GW}/\text{cm}^2$ 时光纤布喇格光栅中电场强度随时间的变换, 发现 150ps 后电场的能量就分为 3 部分。其实验和理论研究结果属于本文中分析的特殊情况, 与作者的结果一致。

3 结论

布喇格孤子在光纤布喇格光栅中传输的稳定性对于研究布喇格孤子的特性已经在新型光纤器件中的应用是十分重要的。从非线性耦合模方程出发给出了布喇格孤子的解析解, 以它们作为初始条件, 数值研究了

布喇格孤子传输的稳定性, 得到布喇格孤子传输的稳定传输区、多振荡模式区和散射区。数值模拟了布喇格孤子在多振荡模式区和散射区的传输变化。对于设计新型器件和开展实验工作提供了有益的指导。

参考文献

- [1] ZHOU H Q, XIA G Q, DENG T *et al* Influence of external cavity length variation on the lasing wavelength of the fiber external cavity semiconductor laser [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5): 476~490 (in Chinese).
- [2] CHENG Ch Y, QIAO X G, JIA Zh A *et al* Study on wavelength detection system based on tunable filters with a novel multiplexing structure [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(2): 150~153 (in Chinese).
- [3] CHRISTODOULIDES D N, JOSEPH R I Slow Bragg solitons in nonlinear periodic structures [J]. *Phys Rev Lett* 1989, 62(15): 1746~1749
- [4] ACEVES A B, WABNITZ S Self-induced transparency solitons in nonlinear refractive periodic media [J]. *Phys Lett* 1989, A141(1~2): 37~42
- [5] de STERKE C M, SIFFERT J E Gap solitons [J]. *Progress in Optics* 1994, 33(1): 203~260
- [6] EGGLETON B J, SIFFERT R, de STERKE C M *et al* Bragg grating soliton [J]. *Phys Rev Lett* 1996, 76(10): 1627~1630
- [7] SANG X Zh Research on properties of microstructured optical devices and their applications [D]. Beijing Beijing University of Posts and Telecommunications 2005. 46~81 (in Chinese).
- [8] MAK W C K, MALOMED B A, CHU P L Interaction of a soliton with a local defect in fiber Bragg grating [J]. *J O S A*, 2003, B20(4): 725~735
- [9] MAK W C K, MALOMED B A, CHU P L Slowdown and splitting of gap solitons in apodized Bragg gratings [J]. *Journal of Modern Optics* 2004, 51(14): 2141~2158
- [10] STOLEN R H, LIN C Self-phase modulation in silica optical fiber [J]. *Phys Rev* 1978, A17(4): 1448~1453
- [11] MALOMED B A, TASCAL R S Vibration modes of a gap soliton in a nonlinear optical medium [J]. *Phys Rev* 1994, E49(6): 5787~5795
- [12] EGGLETON B J, de STERKE C M. Nonlinear pulse propagation in Bragg grating [J]. *J O S A*, 1997, B14(11): 2980~2993 (in Chinese).
- [6] WALPITA L M. Solutions for planar optical waveguide equations by selecting zero elements in a characteristic matrix [J]. *J O S A*, 1985, A2(4): 595~602.
- [7] CHIANG K S. Construction of refractive-index profiles of planar dielectric waveguides from the distribution of effective indexes [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1985, LT-3(2): 385~391.
- [8] NIKOLOPOULOS J, YIP G L. Accurate modeling of the index profile in annealed proton-exchanged LNbO_3 waveguides [J]. *SPE*, 1991, 1583 71~82
- [9] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. New York: Pergamon, 1980 1~10.
- [10] CAIA L, POKROVSKII L, TERFUGOV N. Optical and structural properties of annealed PE: LNbO_3 waveguides formed with pyrophosphoric and benzoic acids [J]. *J A P*, 1993, 73(5): 3125.
- [11] LU B, LU L, XU L. Characteristics of recording and thermal fixing in lithium niobate [J]. *Appl Opt* 1998, 37(11): 2170~2176

(上接第 362 页)

熟, 能给出折射率的分布是一件很有意义的工作。

参考文献

- [1] DUNBAR B P, PETER B F. Defect-based description of lithium diffusion into lithium niobate [J]. *J A P*, 1994, 76(8): 3422~3428
- [2] PETER B F, NORWOOD R G, BIRD C D *et al* Stoichiometry issues in single-crystal lithium tantalate [J]. *J A P*, 1995, 78(3): 4647~4650
- [3] PETER B F, NORWOOD R G, CALVERT G D. Compositional uniformity in growth and poling of large diameter lithium niobate crystals [J]. *J Crystal Growth* 1991, 6(2): 61~68
- [4] DUNBAR B P. Analysis of diffusion in lithium niobate [J]. *J Mater Sci* 1993, 28(8): 302~315
- [5] CHENG X F, XIE Sh W, XIA Y X *et al* Theoretical modeling and characterization of annealed proton-exchanged planar waveguides in z-cut LNbO_3 [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2000, 27(7): 611~615