

离子注入法形成的 LiTaO_3 平板光波导的特性分析*

孟鸣岐 卢 菲 王克明 刘向东

沈定予 王雪梅

(山东大学物理系, 济南 250100) (北京大学重离子物理研究所, 北京 100871)

摘 要 用能量为 2.8 MeV、剂量为 1.4×10^{16} ion/cm² 的 He^+ 在室温(300 K)下注入到晶体材料 LiTaO_3 中, 形成了离子注入平板光波导。用棱镜耦合法观察和测量了 LiTaO_3 波导导模的分布, 并对退火前后的 LiTaO_3 波导的折射率分布进行了计算和比较。利用背散射/沟道技术分析了由于 He^+ 的注入而引起的波导表面的损伤。

关键词 离子注入光波导, 折射率, 背散射分析。

1 引 言

LiTaO_3 是一种正光性单轴晶体, 具有和 LiNbO_3 等数量级的线性电光系数和非线性光学系数(三阶非线性折射率)以及较小的双折射^[1], 其抗光折变能力较 LiNbO_3 晶体大两个数量级^[2]。在用于制作波导器件方面, LiTaO_3 波导还具有较短的截止波长(< 280 nm)。因此, LiTaO_3 晶体作为一种高性能的波导材料而被广泛使用。在波导调制器方面, 可利用 LiTaO_3 较大的线性电光系数研制相位调制器和正向方向耦合器等^[3]。在频率转换波导器件方面, 可利用其较短的截止波长, 较小的光损伤和较大的非线性光学系数制作准相位匹配(QPM)结构的波导倍频器件等^[4]。而且 LiTaO_3 波导畴翻转区交叠区域较大, 从而使波导中的导模和倍频模交叠积分较大, 倍频转换效率较高。因此, 该结构的 LiTaO_3 波导倍频器的研制一直是近几年研究的热点。 LiTaO_3 波导的制备和特性分析也越来越重要。

形成光波导的方法有多种。传统的方法有扩散法、外延生长法、溅射法、离子交换法等。离子注入法是比较新的一种形成光波导的技术, 与这几种传统的波导制作方法相比, 离子注入法具有以下独特的优点: 1) 注入的离子可任意选择, 不受化学组分的限制; 2) 离子注入可在各种温度下进行; 3) 离子注入的深度和注入剂量(影响折射率的变化)可以精确地控制, 能够有目的地形成各种分布; 4) 离子注入法具有可靠的重复性等。

本文作者利用离子注入法在 LiTaO_3 晶体中形成了平板光波导, 并用 IWKB 法和最小二乘法优化计算了该光波导的折射率分布, 根据 Fluck 等人提出的数学模型对折射率分布进行了曲线拟合, 并利用背散射/沟道技术分析了 He^+ 注入所引起的波导表面的损伤。

* 国家自然科学基金、北京大学重离子物理开放实验室基金和北京中关村地区分析测试基金资助。

收稿日期: 1996 年 9 月 8 日; 收到修改稿日期: 1997 年 1 月 22 日

2 实验和测量

Z 切的 LiTaO_3 晶体(由山东大学晶体材料研究所提供)经光学抛光后,在北京大学技术物理系重离子实验室进行 MeV He^+ 的注入。注入能量为 2.8 MeV , 注入剂量为 $1.4 \times 10^{16} \text{ ion/cm}^2$, 在室温下进行。采用棱镜耦合法测量了

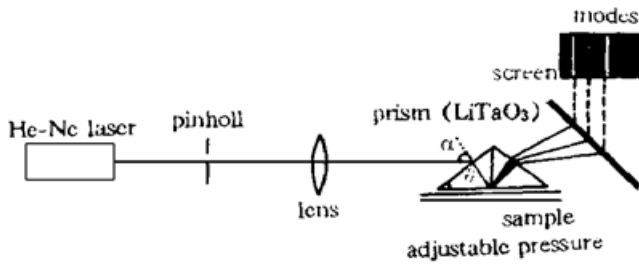


Fig. 1 Experimental setup for mode observation and measurement by using prism coupling method

波导的导模分布,测量装置如图 1 所示。将折射率高于被测样品的棱镜(TiO_2)的底面与待测样品的一个抛光面紧密接触,利用 He-Ne 激光器输出的平行光束作光源,测量棱镜内达到全反射时的输入耦合同步角(即入射光束与棱镜法线间的夹角),利用下述公式即可求出样品对应于各个导模的有效折射率^[5]:

$$n_{\text{eff}} = \sin \alpha \cos \theta + \sin \theta \sqrt{n_p^2 - (\sin \alpha)^2}$$

式中 α 为对应各个导模的输入耦合同步角, n_p 和 θ 为棱镜的折射率和底角, α 和 θ 如图 1 所示。测得的模数和其对应的各个导模的有效折射率如表 1 所示。

Table 1. The mode number and mode indices for LiTaO_3 planar waveguide

mode number	n_{eff} (TE Mode)	n_{eff} (TM Mode)
0	2.18180	2.18616
1	2.17592	2.18144
2	2.17144	2.17785
3	2.16732	2.17370
4	2.16225	2.16705
5	2.15544	2.16057
6	2.14860	2.15344
7	2.14095	2.14433
8	2.13191	2.13490
9	2.12280	2.12381
10	2.11226	

LiTaO_3 波导的沟道分析是在山东大学的 $2 \times 1.7 \text{ MV}$ 串列加速器上进行的。用 2.1 MeV 的 He^{2+} 对样品作了随机方向和沟道方向上的背散射测量。金硅面垒探测器用于探测 165° 方向上的背散射 He^{2+} 粒子,被测样品固定在一个测量精度为 0.01° 的测角器上, He^{2+} 束流一般为 15 nA , 从探测器得到的被放大的脉冲信号经过一个多道分析器被转换为谱信号。该谱信号被存储在计算机上以备数据的分析和计算。

对样品退火处理: 首先把退火炉预置在所需的温度上,然后把样品推至炉内恒温区,并开始计时。在退火过程中炉内通入氮气,以防止样品氧化和空气中的杂质扩散到样品中去。

3 结果和讨论

用所得的模数和有效折射率的关系,根据 White 等人提出的 IWKB 法^[6]和最小二乘法优化计算了折射率分布,并利用 Fluck 等人所提出的数学模型^[7]对折射率分布进行了曲线拟合。

图 2 给出的是在 TE 激发模式下寻常光折射率 n_0 的分布曲线。其中实线为拟合所得的曲

线。该曲线为两个半高斯分布，其中右半部的半高斯部分对波导模的影响很小，它不能用测量波导导模的方法精确确定。从图中可以看出该波导的波导层的深度约为 6.3 μm，阻挡层的宽度约为 2 μm。在阻挡层中最大的折射率变化为 2.96%，而且在波导区折射率稍有正的增加。由此可见，采用能量为 2.8 MeV、剂量为 1.4 × 10¹⁶ ion/cm² 的 He⁺ 注入，在 LiTaO₃ 晶体中即能得到较深的波导层和较高的阻挡层，从而可制作性能较优良的光波导。图 2 中虚线是退火后所拟合的 LiTaO₃ 波导的折射率分布。退火条件是：200 °C，40 min。从图中可以看出，退火前后 LiTaO₃ 波导的寻常光的折射率(n₀) 分布发生了变化，退火后阻挡层变宽(从而可较好地阻止波导内漏模的发生)；在波导区折射率的值有所恢复。退火除可消除波导区的色心，以减小波导损耗外；还可使阻挡层变宽，从而可更好地阻止漏模的发生，是进一步改善波导性能的有效手段。

图 3 是在 TM 模式激发下异常光折射率 n_e 的分布曲线，其中实线为退火前用 Fluck 等人提出的数学模型拟合的结果。与 TE 模式下的 n₀ 相比，n_e 的最大变化值有所降低(约为 2.62%)。退火后计算所得的折射率的拟合曲线如图 3 中的虚线所示。可见，退火对异常光折射率 n_e 的分布影响不大。

为了研究 He⁺ 的注入所引起的波导表面的损伤情况作者利用背散射/沟道技术测得了 LiTaO₃ 光波导在随机方向和沟道方向的背散射谱，如图 4 所示。图中 R 代表 LiTaO₃ 晶体的随机谱，圆点代表 LiTaO₃ 光波导的沟道谱，而三角则表示 LiTaO₃ 晶体的沟道谱。由两个沟道谱可以看出，两个谱相差不大，即由于 He⁺ 的注入所引起的波导表面的损伤很小。Townsend 等人曾分析过离子注入形成波导的机理^[8]。它对折射率的影响主要来源于在注入离子的轨迹末端，由于核损伤过程造成的晶格无序或甚至于非晶化，致使该区晶体的物理密度降低，从而引起折射率的减小；而在波导区离子注入的影响主要为电离过程，而该电离过程对多数晶体的晶格结构的影响很小。实验结果与上述理论分析相吻合。

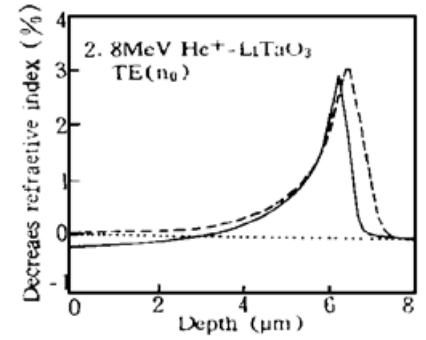


Fig. 2 The refractive index no profiles in LiTaO₃ waveguide formed by 2.8 MeV He⁺ implantation (the dose is 1.4 × 10¹⁶ ion/cm²). The solid line is the profile before annealing and the dashed line is that after annealing

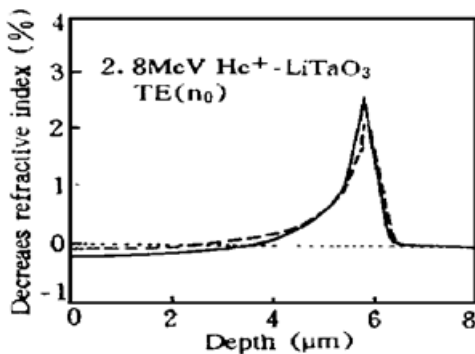


Fig. 3 The refractive index ne profiles in LiTaO₃ waveguide formed by 2.8 MeV He⁺ implantation (the dose is 1.4 × 10¹⁶ ion/cm²). The solid line is the profile before annealing and the dashed line is that after annealing

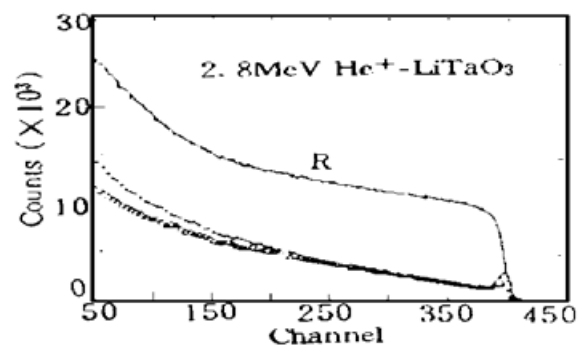


Fig. 4 The channeling spectra of LiTaO₃ bulk (hollow triangles) and waveguide (filled circles) formed by 2.8 MeV He⁺ implantation (the dose is 1.4 × 10¹⁶ ion/cm²). The R represents the random spectrum of the crystal

小 结 在 Z 切的晶体材料 LiTaO₃ 中通过注入 2.8 MeV He⁺ (剂量为 1.4×10^{16} ion/cm²) 而形成了离子注入平板光波导, 并用棱镜耦合法观察和测量了 LiTaO₃ 光波导的导模。根据 I-WKB 法和最小二乘法计算了波导折射率的分布, 并进行了曲线拟合, 分析比较了退火前后波导折射率分布的变化。利用背散射/沟道技术分析了 He⁺ 注入引起的波导表面的损伤。结果表明该损伤很小, 对波导性能的影响可忽略不计。

参 考 文 献

- [1] R. C. Miller, A. Savage, Temperature dependence of the optical properties of ferroelectric LiNbO₃ and LiTaO₃. *Appl. Phys. Lett.*, 1966, **9**(4) : 169~ 171
- [2] G. L. Tansonan, M. K. Barnoski, J. F. Lotspeich *et al.*, High optical power capabilities of Ti-diffused LiTaO₃ waveguide modulator structures. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**(5) : 238~ 239
- [3] P. J. Matthews, A. R. Michelson, Instabilities in annealed proton exchange waveguides in lithium tantalate. *J. Appl. Phys.*, 1992, **71**(11) : 5310~ 5317
- [4] K. Yamamoto, Kazuhisa Yamamoto, Tetsuo Taniuchi, Second-harmonic generation of blue light in a LiTaO₃ waveguide. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(24) : 2732~ 2734
- [5] B. Poumellec, A. Traverse, S. Artigaud *et al.*, Germanium implantation into substrates for integrated optics. *Nucl. Instr. and Meth.*, 1994, **B86** : 279~ 287
- [6] J. M. White, P. F. Heidrich, Optical waveguide refractive index profiles determined from measurement of mode indices: a simple analysis. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(1) : 151~ 155
- [7] D. Fluck, D. H. Jundt, P. Gunter, Modeling of refractive index profiles of He⁺ ion-implanted KNbO₃ waveguides based on the irradiation parameters. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(10) : 6023~ 6031
- [8] P. D. Townsend, P. J. Chandler, L. Zhang, *Optical Effects of Ion Implantation*. Cambridge University Press, 1994 : 198~ 199

Properties Analysis of Ion-Implanted Planar Optical Waveguide in LiTaO₃

Meng Mingqi Lu Fei Wang Keming Liu Xiangdong

(Department of Physics, Shandong University, Jinan 250100)

Shen Dingyu Wang Xuemei

(Heavy Ions Physics Institute, Peking University, Beijing 100871)

(Received 8 September 1996; revised 22 January 1997)

Abstract The ion-implanted planar optical waveguide in crystal LiTaO₃ was formed by implantation of He⁺ at an energy of 2.8 MeV and with a dose of 1.4×10^{16} ion/cm² at 300 K. The modes were observed and measured by prism coupling method. The refractive index profiles of the waveguide were calculated and compared before and after annealing. The damages on the crystal surface caused by the implantation of He⁺ were firstly investigated by using RBS/channeling technique.

Key words ion-implanted optical waveguide, refractive index, RBS analysis.