

KTiOPO₄ 晶体平面波导的制备和研究*

施路平 王继扬 蒋民华 刘耀岗 魏景谦

(山东大学晶体材料研究所, 济南 250100)

提 要

本文报道了对 KTiOPO₄ 晶体平面波导的制导和研究的结果, 利用 m 线方法测量了其有效折射率, 并利用 WKB 近似计算了 Z^- 和 Z^+ 面上的折射率 n_x, n_y, n_z 的分布曲线和扩散系数, 发现了离子交换过程中折射率变化的一个奇异点.

关键词 KTiOPO₄ 晶体, 平面光波导, 有效折射率.

1 引 言

磷酸钛氧钾(KTiOPO₄, KTP)晶体的光学性质优良, 有效非线性系数大, 电光系数高、介电系数小、透光波段宽(0.35~4.5 μm). 化学性质稳定. 经进一步改进后电导率降低、破坏阈值可大于 2 GW/cm², 是制作波导调制器和开关的理想材料. 目前, KTP 晶体在集成光学上的应用已引起国内外的重视^[1,2]. KTP 晶体是一种可代替 LiNbO₃ 晶体的具有广阔电光应用前景的良好材料, 本文采用离子交换法制备 KTP 平面波导, 利用 m 线方法测量了有效折射率, 并以 WKB 近似方法计算了折射率分布、扩散系数和离子交换的深度.

2 波导制备

KTP 晶体属正交晶系, 点群 $mm2$, 空间群 $Pn2_1a$ ^[3]. 一般标记的外形如图 1 所示, 其中 Z 轴对应于 2 次轴方向.

为寻找最适合于作为光波导衬底的晶片取向, 分别采作 (100)、(010) 和 (001) 片进行实验, 结果表明: (010) 片极易开裂, 不适于制作波导; (100) 片制作的波导(450°C, 交换 1 hr) 只观察到 1 条 m 线, 亦不宜使用, 故主要采用 (001) 方向的 KTP 晶片作为衬底来进行实验. 借助于离子交换法制作 KTP 平面波导, 系在可控制温度的马弗炉内采用 RbNO₃ 进行离子交换. 一般的交换温度为 350°C, 预热 1 hr, 交换时间按需要在 0.5~16 hr 之间; 交换完成后将 KTP 样品提出 RbNO₃ 熔液, 逐步冷至室温, 冷却时间约为 2 hr.

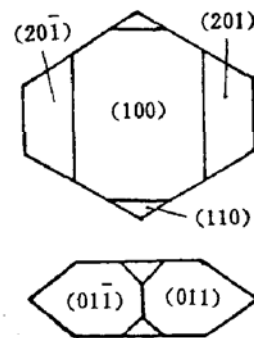


Fig. 1 The crystal habit of KTiOPO₄.

收稿日期: 1992 年 8 月 6 日; 收到修改稿日期: 1992 年 10 月 16 日

* 本课题得到国家攀登计划资助.

3 测量原理

3.1 离子交换过程

采用一维一级近似的扩散方程

$$\frac{\partial c(z,t)}{\partial t} = D_{33} \frac{\partial^2 c(z,t)}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中 D_{33} 为扩散系数, 由于在交换过程中, 晶片中交换的 Rb^+ 浓度比溶液中的 Rb^+ 浓度低得多, 故有近似边界条件: 在 $x = 0$ 处, 在任意时间 t 均有 $c = 0$; 在 $x > 0$ 处, 当 $t = 0$ 时 $c = 0$. 此时的解为:

$$c(z,t) = c_0 [1 - \text{erf}(z/d_3)] = c_0 \text{erfc}(z/d_3) \quad (2)$$

$$d_3 = 2 \sqrt{D_{33}t} \quad (3)$$

式中 d_3 为扩散深度. 由于波导层中的折射率增量和 Rb^+ 浓度成正比, 引入

$$n_i(z)t - n_{s1} = b_i(n_{\text{RTP1}} - n_{\text{KTPI}})c(z,t) \quad (4)$$

b_i 为常数, 定义:

$$\Delta n_i = b_i [n_{\text{RTP1}} - n_{\text{KTPI}}] c_0, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

显然 $\Delta n_i = n_i(0,t) - n_{s1}$, 得到 $n_i(z) = n_s + \Delta n_i \text{erfc}(z/d_3)$ (6)

3.2 WKB 近似

WKB 可得到缓慢变化折射率分布 $n(z)$ 的模的波动方程的近似解. 这个方法就是首先选择波导的有效折射率的试探值, 并令其满足方程

$$\int_0^{z_i(m)} [n^2(x) - N^2(m)]^{1/2} dx = (m + (\pi/4) + \phi_a[N(m)]) \quad (7)$$

$$n[\chi_i(m)] = N(m), \quad (8)$$

式中 $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ 是导模, 由下式给出,

$$\phi_a[N(m)] = \text{tg} \left[r_a \left(\frac{N^2(m) - n_a^2}{n_0^2 - N^2(m)} \right) \right] \quad (9)$$

其中 $n_0 = n(0)$, n 为覆盖层的折射率, 对时间问题 $n = 1$; r 与模式有关: 对 TE 模 $r = 1$, 对 TM 模, $r = (n_0/n_a)^2$.

4 测量结果

测量装置是一台改进了的阿贝折射仪(图 2). 光源为 He-Ne 激光或其它波长的激光, 光源发出的光经毛玻璃均匀化后射到波导的端面上, 然后耦合入棱镜, 从目镜的交叉线处可直接读出有效折射率数值. 光的偏振方向由毛玻璃前的起偏器调节, 以获得 TE 模或 ME 模.

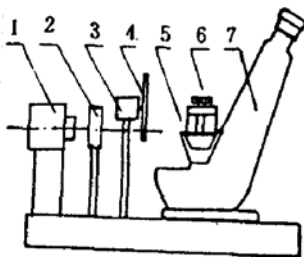


Fig. 2 Apparatus for measuring refractive index distribution

1—He-Ne laser, 2—polarizer, 3—motor, 4—scattering disk, 5—sample, 6—adjusting screw, 7—Abbe diffractive index meter

利用上述方法, 测量了对于 Z^+ 和 Z^- 的 (001) 面上波导的 m 线, 从而得到了二种波导的 $n_{\text{zeff}}, n_{\text{yeff}}$

和 n_{eff} 对 \sqrt{t} 的曲线. 图 3(a)、图 3(b) 分别表示了 $n_{\text{eff}} - n_{\text{sub}}$ 和 $n_{\text{eff}} + n_{\text{sub}}$ 对 x 的关系曲线.

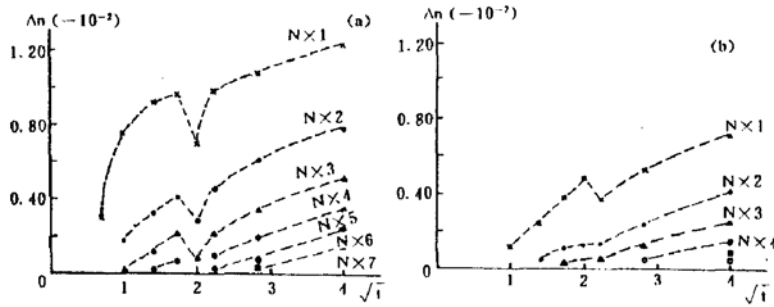


Fig. 3 m-line figures of wave guides
(a) Z^+ face (b) Z^- face

然后利用前面所述 WKB 近似方法计算了 Z^+ 和 Z^- 面上波导的 n_x, n_y 和 n_z 的折射率分布. 图 4(a) 是交换时间为 16 hr 的 Z^- 面上的折射率 n_x, n_y 和 n_z 的分布.

根据以上结果, 为了研究离子交换对其它波长光照射下折射率的影响, 在计算中, 引入了两点假设: 1) 以 632.8 nm 波长光测得的扩散深度对其它波长也适用; 2) 对一定波长的光, 有以下近似关系成立: $b_{i\lambda} \approx b_{i632.8 \text{ nm}}$, 即

$$\frac{n_{i0, 632.8 \text{ nm}} - n_{iKTP, 632.8 \text{ nm}}}{n_{iRTP, 632.8 \text{ nm}} - n_{iKTP, 632.8 \text{ nm}}} \approx \frac{n_{i0, \lambda} - n_{iKTP, \lambda}}{n_{iRTP, \lambda} - n_{iKTP, \lambda}}$$

式中 $n_{i0, 632.8 \text{ nm}}$ 和 $n_{i0, \lambda}$ 分别是波导层中 $Z = 0$ 处对 632.8 nm 和 λ 的折射率, $n_{iRTP, 632.8 \text{ nm}}$ 为 RTP 晶体对 632.8 nm 的折射率, 其余类推, $i = 1, 2, 3, \dots$.

根据以上二点假设, 可得其它波长的折射率分布, 图 4(b) 是利用这两个关系计算的 Z^- 面上交换时间为 16 hr 的波导 1.3 μm 和 1.064 μm 波长光的折射率分布. 利用上述关系, 研究了单模产生的条件, 从而获得了 1.3 μm , 0.78 μm 和 0.6328 μm 单模条状波导, 结果另作报道^[4].

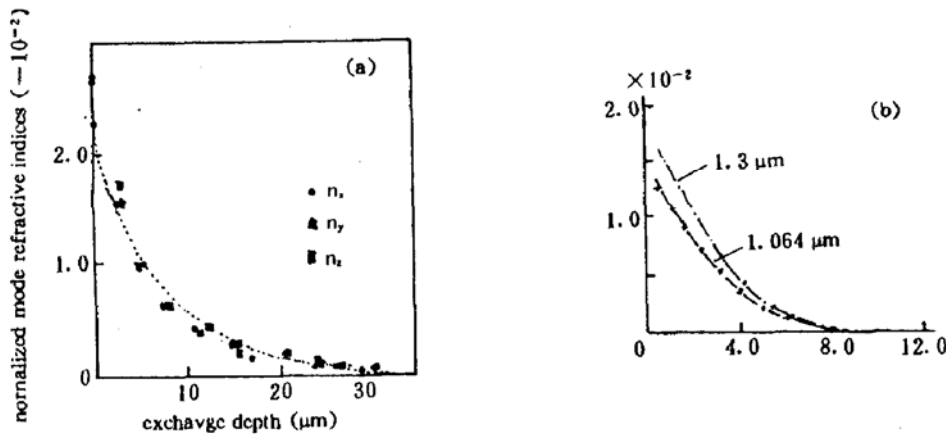


Fig. 4 The refractive index distribution shapes
(a) Z^- face (b) 1.3 μm and 1.064 μm

5 讨 论

由于 KTP 类晶体属正交晶系、 $mm2$ 点群, 其唯一的二次轴为极性轴. 本文采用的波导基片

为垂直于二次轴的(001)轴即 Z 方向片. 对应于极轴, Z 方向片具有对应于正方向的 Z⁺面和对应于负方向的 Z⁻面. 从图(3)中可以看出 Z⁺和 Z⁻面上交换性质有明显的差别. 这种差别主要是由于 KTP 晶体的不对称钛氧八面体造成的. KTP 晶体的结构基本骨架是 PO₄ 四面体和 TiO₆ 八面体在〈001〉和〈011〉方向上交替连接, 形成了 -(PO₄)-(TiO₆)-(PO₄)-(TiO₆)- 的阵列. 在 TiO₆ 八面体的六个 Ti-O 键中, 对角上的两个 Ti-O 键一个长、一个短. 这些 Ti-O 键的长短交替相连的结构特征正是 KTP 具有大的非线性系数的主要原因, 也可能是造成上述明显差别的主要原因.

从图 3 中还可以看出在 t=4 hr 处 Z⁻片 $n_{\text{eff}} - n_{\text{sub}}$ 有一个减少的奇异点. 而 Z⁺面与此对应处有一个增加的奇异点. 这一结果在本实验所用的三个样品上均出现. 为进一步验证这一结果, 采用同一基片, 多次进行离子交换, 以累加的交换时间作为折射率分布曲线同样得到此结果; 同样, 在 $n_{\text{yeff}} - n_{\text{sub}}$ 和 $n_{\text{zef}} - n_{\text{sub}}$ 与 \sqrt{t} 的曲线上亦出现这一结果. 可能的解释是: 虽然 RTP 与 KTP 晶体有相同的结构, 但是由于 Rb⁺半径大于 K⁺而电负性却小于 K⁺, 在离子交换中因为用的为 KTP 基片, 其结构只有当 Rb⁺交换到一定程度后, 才可以引起晶体内部原子位置的突变, 从而引起折射率的奇异变化. 需要说明的是上述奇异变化并不影响 KTP 波导的应用. 因为正如众所周知的那样, 只有单模波导才真正具有使用价值, 而 KTP 晶体波导的单模产生的条件(1.3 μm 光)远要奇异点出现之前. 但是这一奇异变化对研究 Rb_xK_{1-x}TiOPO₄ 系列晶体的性质有一定的启示意义.

从图 4 可见, 离子交换对 n_x 、 n_y 和 n_z 的影响不一样, 这是由于 KTP 晶体三个方向的结构和折射率不同所造成的. 从图 4 和其它不同交换时间样品所获结果, KTP 中 Rb⁺交换过程和 erfc 函数基本符合.

参 考 文 献

- [1] J. D. Bierlein, A. Ferretti *et al.*, Fabrication and characterization of optical waveguides in KTiOPO₄, *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **50**(18):1216~1218
- [2] 黄朝恩, KTP 晶体——第二代光纤通讯的重要材料, *物理*, 1991, **20**(5):270~275
- [3] I. Tordjman, R. Masse, *et al.*, *Z. Kristallogr* 1974, **139**:103~110

Preparation and measurement of KTiOPO₄ crystal planar waveguides

SHI Luping WANG Jiyang JIANG Minhua LIU Yaogang WEI Jiangqian
(Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

(Received 6 August 1992; revised 16 October 1992)

Abstract

The results of the preparation and measurements of KTiOPO₄ crystal planar wave guides are reported in this paper. Its effective refractive indices have been measured by using *m*-line method. The distribution curves of refractive indices in Z⁺ and Z⁻ faces, as well as diffusion coefficients have been calculated with WKB approximation. Anomalous point of refractive indices during ion exchange process was discovered.

Key words KTiOPO₄ crystal, planar wave guide, effective refractive indices.