

# PE-LiTaO<sub>3</sub> 波导中的切伦科夫倍频\*

牟晓东 邵宗书 卓 壮 岳学锋 陈 军

(山东大学晶体材料研究所, 济南 250100)

**摘 要** 对用质子交换法生长的 LiTaO<sub>3</sub>(PE-LiTaO<sub>3</sub>)波导特性进行了研究, 并利用该种波导实现了由 1.06 μm 到 0.53 μm 的切伦科夫倍频转换(CSHG), 转换效率为 122 %/W·cm<sup>2</sup>. 倍频光束质量好, 垂直波导面方向的发散角度为 1.3 mrad, 平行波导面方向的发散角度为 3.3 mrad.

**关键词** 光波导, 切伦科夫倍频转换, 质子交换的 LiTaO<sub>3</sub>.

## 1 引 言

PE-LiNbO<sub>3</sub> 波导中的切伦科夫倍频现象在过去的几年中得到了广泛而细致的研究, 转换效率已超过了 1%<sup>[1]</sup>. 但是, 作为集成光学材料, 近几年中 LiTaO<sub>3</sub> 晶体受到了越来越多的重视<sup>[2~4]</sup>, 因为 LiTaO<sub>3</sub> 晶体比 LiNbO<sub>3</sub> 晶体有更优越的光学特性, LiTaO<sub>3</sub> 晶体的非线性系数  $d_{33} = 26$  pm/V, 与 LiNbO<sub>3</sub> 晶体相差不多, 而且其截止波长可到 280 nm, 抗光伤阈值要比 LiNbO<sub>3</sub> 大<sup>[2]</sup>. 因此, LiTaO<sub>3</sub> 波导更加适合于对低功率、短波长半导体激光器的倍频. 本文制作了 LiTaO<sub>3</sub> 波导并研究了其特性, 首次给出了质子交换波导折射率分布公式. 实现了由 1.06 μm 到 0.53 μm 的切伦科夫倍频转换, 并与文献[5]的 LiNbO<sub>3</sub> 波导中的切伦科夫倍频进行了比较.

## 2 波导制作与性能研究

本文中使用的 LiTaO<sub>3</sub> 波导是用 c-切 LiTaO<sub>3</sub> 基片在 240 °C 的苯甲酸溶液中进行质子交换后制成的, 生长时间由 4 hr 至 96 hr. 对制作好的波导用 m-线测量术进行了测试和分析, 结果表明, PE-LiTaO<sub>3</sub> 波导中只有 e 光折射率得到增加, 在波长为 0.633 μm 和 0.53 μm 时波导表面折射率的增加分别为 0.014 和 0.018. 图 1 是用 WKB 方法绘制的光波长为 0.532 μm 时波导层的折射率分布曲线, 波导生长时间为 96 hr. 可以看出, PE-LiTaO<sub>3</sub> 波导的折射率分布是很好的近阶跃型分布. (1)式给出了该波长下的折射率分布公式, 图 1 中的曲线是利用(1)式绘出的折射率分布曲线, 显然, 它和实验点符合的很好.

$$n(x) = n_0 + c\Delta n(1 + e^{(x-d)/a})^{-1} + (1 - c)\Delta n(1 + e^{(x-d)/b})^{-1} \quad (1)$$

式中  $x$  为由波导层内到波导表面的距离,  $n_0 = 2.2063$  为衬底的 e 光折射率,  $\Delta n = 0.018$  为波

\* 本课题得到国家“863”计划基金的资助

收稿日期:1993年4月12日;收到修改稿日期:1993年8月23日

导表面折射率的增加量,  $d = 4.227 \mu\text{m}$  为波导层厚度,  $a = 0.0645 \mu\text{m}$ ,  $b = 1.852 \mu\text{m}$ ,  $c = 0.6943$  为拟合参数.

波导层厚度与交换时间的关系由(2)式给出:

$$d = (4Dt)^{1/2} \quad (2)$$

由此可以求出该晶体在 240 °C 时沿  $c$  方向的扩散系数为  $D_c = 0.047 \mu\text{m}^2/\text{hr}$ .

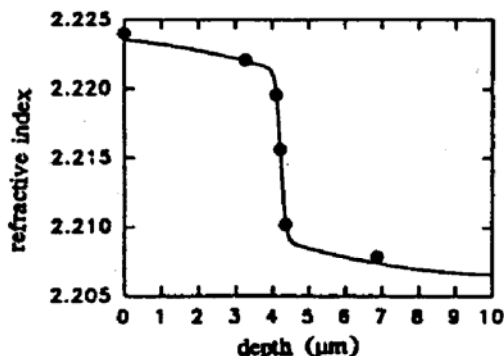


Fig. 1 The refractive index profile of PE-LiTaO<sub>3</sub> waveguide measured at 0.532  $\mu\text{m}$ . The filled circles are the experimental value, the solid line is the fitting curve

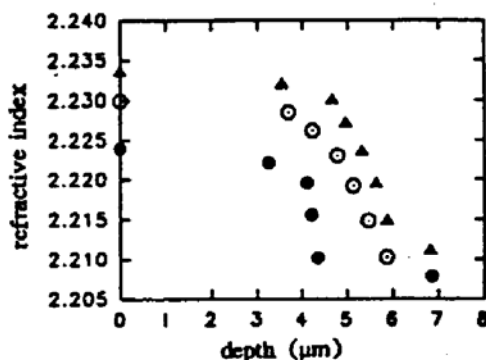


Fig. 2 Refractive index profiles measured at 0.532  $\mu\text{m}$  before and after annealing. The filled circles correspond to the profile before annealing, the empty circles and filled triangles show the profiles after annealing for 6 and 8 hours at 320 °C

Table 1. The surface refractive indexes of PE-LiTaO<sub>3</sub> waveguide at different annealing time ( $\lambda = 0.533 \mu\text{m}$ )

Annealing time (h)	0	2	4	6	8	10
Surface indexes	2.2240	2.2290	2.2300	2.2300	2.2338	2.2320

PE-LiTaO<sub>3</sub> 波导的退火特性与 PE-LiNbO<sub>3</sub> 波导存在着明显的不同. 对 PE-LiNbO<sub>3</sub> 波导退火时, 波导层的折射率逐渐降低, 而 PE-LiTaO<sub>3</sub> 波导的退火却不同. 表 1 是对前面生长 96 hr 样品经过不同退火时间后的测量结果, 退火温度为 320 °C. 退火前对 0.532  $\mu\text{m}$  的波长可以观察到 5 个导模, 退火 4 hr 后增加到 6 个模, 退火 8 hr 后增加到 7 个模. 在该温度下退火 8 hr 后表面折射率增加由 0.018 变为 0.026, 达到了最大值, 继续增加退火时间, 表面折射率开始下降. 图 2 中给出了退火前后的折射率分布曲线, 可以看出一定时间的退火使波导的表面折射率得到增加, 同时波导的厚度也在增加.

### 3 切伦科夫倍频转换实验及分析

切伦科夫倍频是利用波导的基频光的导模到倍频光的辐射模的倍频, 这具有许多优点, 首先基频光为导模形式, 可以提高光功率密度和增加相互作用长度, 同时由于倍频光为辐射模, 其传播常数可以连续的变化, 因此可以自动满足位相匹配条件, 另外, 这种方式的倍频还可利用晶体的最大非线性系数  $d_{33}$ . LiTaO<sub>3</sub> 晶体的 o 光和 e 光折射率在波长为 1.064  $\mu\text{m}$  和 0.532  $\mu\text{m}$  时分别为 2.1348, 2.1396 和 2.2026, 2.2063. 利用波导模方程可以绘出波长为 1.064  $\mu\text{m}$  和 0.532  $\mu\text{m}$  导模有效折射率随波导层厚度的变化曲线, 如图 3 所示. 可以看出,

由于在 PE-LiTaO<sub>3</sub> 波导中折射率的增加要比在 PE-LiNbO<sub>3</sub> 波导中折射率的增加小一个量级, 基频光和倍频光的有效折射率不存在相交的点, 因此它也无法向 PE-LiNbO<sub>3</sub> 波导一样形成导模间的倍频. 此时基频光的导模有效折射率变化范围完全处于倍频光的辐射模折射率范围之内, 因此只要基频光能形成导模, 切伦科夫倍频转换的位相匹配条件就可得到满足, 可以实现由基频导模到倍频辐射模的切伦科夫倍频转换.

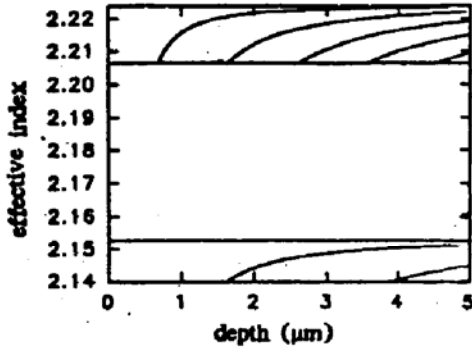


Fig. 3 Effective refractive index of waveguide modes as a function of the waveguide depth. The upper is the curves of harmonic wave, the lower is the curves of fundamental wave

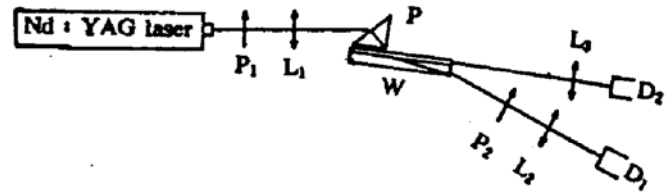


Fig. 4 The experimental arrangement of CSHG; P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, polarizer; L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub>, lens; P, rutile prism; W, waveguide; D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, detector

切伦科夫倍频实验装置如图 4 所示, 用 Nd:YAG 声光调 Q 激光器输出的 1.064 μm 激光作为基频光源, 在 Nd:YAG 激光器前加一起偏器来产生 e 光偏振, 用一长焦距透镜 ( $f = 30$  cm) 将光束通过金红石棱镜耦合到波导之中, 倍频输出端用检偏器检测倍频光的偏振性, 并用功率计测量倍频光和波导层输出的基频光的强度. 实验结果表明, 所有的基频导模都产生了由衬底中出射的倍频光. 其偏振方向与入射光同为 e 光偏振, 由此可以证明, 本文所得到的是切伦科夫倍频转换, 在交换时间为 24 hr 的波导样品上获得了最高的倍频转换效率, 在 5.8 mW 的基频光功率输入下得到了 41 μW 的倍频光输出, 相互作用长度为 1 cm, 可以计算出其转换效率为 122 %/W · cm<sup>2</sup>. 测试结果表明, 倍频光的输出功率同基频光输入功率的平方成正比. 图 5 是倍频输出功率随输入功率的变化曲线. 图 6 是 PE-LiTaO<sub>3</sub> 波导的切伦科夫倍频的近场光斑照片. 实验发现, PE-LiTaO<sub>3</sub> 波导的切伦科夫倍频光的能量主要集中在光斑中心且准直性好. 实验中不附加任何光学元件时, 在 3 m 处测量光斑尺寸: 垂直波导面方向宽

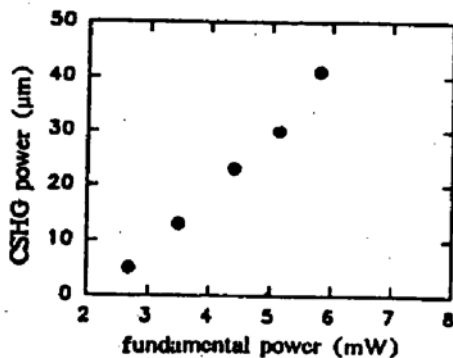


Fig. 5 Measured CSHG power plotted against the fundamental power

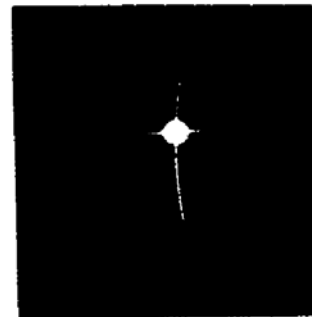


Fig. 6 The harmonic wave pattern of CSHG

为 4 mm, 平行波导面方向长为 10 mm, 分别对应 1.3 mrad 和 3.3 mrad 的发散角. 这比 PE-LiNbO<sub>3</sub> 波导切伦科夫倍频光斑要好得多. 此结果表明, 通过改进波导质量和波导设计, 波导的切伦科夫倍频的光束质量可以达到多种实际应用的要求, 这方面的研究工作正在进行之中.

前面进行退火实验的样品在退火前有两个基频导模, 其中 1 阶模的倍频输出较强. 退火 6 hr 后观察到 3 个倍频输出方向, 但输出强度都明显减弱, 这可能是波导厚度加深后造成的<sup>[5]</sup>.

**结 论** 本文制作了 PE-LiTaO<sub>3</sub> 波导, 实现了由 1.06 μm 到 0.532 μm 的切伦科夫倍频, 实验结果证明, 这种波导具有高的转换效率和好的光束质量, 比 LiNbO<sub>3</sub> 波导有更多的优越性, 同时这种波导的折射率改变值小, 便于同光纤相匹配, 能够满足多种实际应用的需要.

### 参 考 文 献

- [1] G. Tohmon, K. Yamamoto, T. Taniuchi, Blue light source using guide-wave frequency doubler with a diode laser. *Proc. SPIE*, 1988, **898**: 70~75
- [2] Kiminori Mizuuchi, Kazuhisa Yamamoto, Tetsuo Taniuchi, Second-harmonic generation of blue light in a LiTaO<sub>3</sub> waveguide. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(24): 2732~2734
- [3] K. Miuuchi, K. Yamamoto, Generation of blue light by quasiphase matching SHG in LiTaO<sub>3</sub>. *California CLEO*, 1992, 388~389
- [4] Toshiya Yuhara, Kunio Tada, Yu Shan Li, *J. Appl. Phys.*, 1992, **71**(8): 3966~3974
- [5] 牟晓东, 邵宗书, 陈 军等, c-切 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 质子交换平板波导中切伦科夫倍频的理论分析. *光学学报*, 1993, **13**(6): 520~526

## Cerenkov Second Harmonic Generation in Proton Exchanged LiTaO<sub>3</sub> Optical Waveguides

Mu Xiaodong    Shao Zhongshu    Zhuo Zhuang    Yue Xuefeng    Chen Jun

(National Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

(Received 14 April 1993; revised 23 August 1993)

**Abstract** The characters of proton exchanged (PE) LiTaO<sub>3</sub> optical waveguides are studied and the Cerenkov second harmonic generation (CSHG) from 1.064 μm to 0.532 μm is demonstrated in these waveguides with a conversion efficiency of 122 %/W · cm<sup>2</sup>. The quality of the harmonic beam is high and the beam divergences along the two directions of vertical and parallel to the plane of the waveguide are 1.3 and 3.3 milliradian respectively.

**Key words** optical waveguide, Cerenkov second harmonic generation (CSHG), proton exchanged LiNbO<sub>3</sub> (PE-LiNbO<sub>3</sub>).