

# KTP 晶体——第二代光纤通信的重要材料

黄朝恩

(国家建筑材料工业总局人工晶体研究所, 北京 100018)

磷酸氧钛钾(简称 KTP) 晶体是一种综合性能优异的非线性光学晶体。它的电光系数大, 介电常数小, 这就使它在集成光学中有着巨大的潜在用途。本文着重介绍 KTP 的电光及介电性能, 其波导的制作方法, 以及在光纤通信中的可能应用。

磷酸氧钛钾 (KTiOPO<sub>4</sub>, 简称 KTP) 晶体作为一种综合性能优良的非线性光学材料, 已经广泛地用于固体激光系统, 如卫星测距、激光雷达、半导体微加工、致盲武器、医用激光以及舞台美术等方面。本刊曾就该晶体的结构、性能、晶体生长及应用作过介绍<sup>[1]</sup>。最近几年来, 由于科学家们的努力, 在 KTP 晶体的电光性能的研究及应用这个新课题上又取得了重大的进展。可以预期, KTP 晶体将成为下一代光纤通信的重要材料之一。

众所周知, 与其他通信系统比较, 光纤通信有许多明显的特点, 如信息容量大、传输损耗小、快速敏捷、安全可靠、不易受干扰以及不易受窃听等。因此, 光纤通信在 80 年代得到了迅速发展, 目前已在全面地准备着第二代光纤通信系统了<sup>[2]</sup>。

第二代光纤通信系统的重要标志之一就是光路的集成化。目前的光纤通信系统是由许多分立的电子器件和光器件组合而成的, 它不仅制作复杂, 成本难以降低, 而且所有的开关和复接等许多功能都是由电子器件完成的, 这就限制了光器件的优点(如快速、大容量等)的发挥。所以, 在下一代光纤通信中, 开关、调制及复接等光作用将由薄膜波导来完成, 这就大大加快了数据的传输速率及安全可靠程度, 信息容量

至少可以提高一个数量级。图 1 是集成光路的示意图。光信号的处理任务是由基片上的波导来完成的。发送机中的集成光路包括激光光源、调制器、方向耦合器及开关等。在接收机中, 它包括时间分隔解复器、开关和光检测。中继站中的集成光路包括开关和波导。目前看来, KTP 晶体是最好的材料。

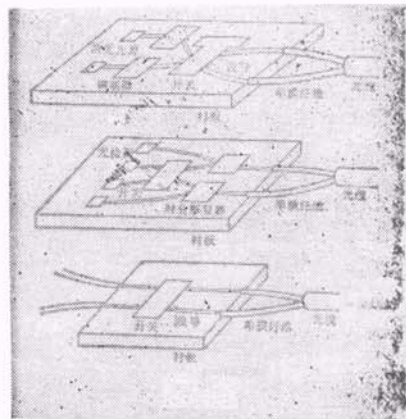


图 1 集成光路示意图

KTP 晶体的电光和介电性能十分优良<sup>[3]</sup>, 与它的非线性光学性能一样有着非常诱人的应用前景, 在各式各样的电光应用中具有巨大的潜力。表 1 列出了 KTP 的电光常数  $r$  及介电常数  $\epsilon$ 。常数的下标表示不同方向的分量。

$$r_{c1} = r_{33} - (n_1/n_3)^3 r_{13},$$

行为的周期性和可预测性。对生物医学过程分形本质的理解和研究将会促进 21 世纪医药学的发展, 同时也可以在大具有标度不变的社

会问题中得到应用。

(张昕 黄响 根据 American Scientist  
1990 年第 2 期第 40—45 页编译)

$$r_{e2} = r_{33} - (n_2/n_3)^3 r_{23}$$

它们分别表示在  $y$  和  $x$  方向传播的光波调幅时的有效电光系数。

表 1 KTP 的电光和介电常数

常数	低频	高频
$r_{13}$ (pm/V)	+9.5	+8.8
$r_{23}$ (pm/V)	+15.7	+13.8
$r_{33}$ (pm/V)	+36.3	+35.0
$r_{31}$ (pm/V)	7.3	6.9
$r_{42}$ (pm/V)	9.3	8.8
$r_{e1}$ (pm/V)	+28.6	+27.0
$r_{e2}$ (pm/V)	+22.2	+21.5
$\epsilon'_{11}$	11.9	11.6
$\epsilon'_{22}$	11.3	11.0
$\epsilon'_{33}$	>17.5	15.4

在表 2 中我们把几种常用的光电调制材料的性能作一比较。其中,  $k$  是延迟温度系数, 而  $\epsilon$ ,  $n$  及  $r$  是所列的调制方式下相应的高频参数。  $n^3 r^2 / \epsilon$  是体器件电光应用的品质因素, 它

的大小与带宽驱动功率比相对应。在表 3 中我们又列出了若干电光波导材料的性能并与 KTP 进行比较。其中  $\epsilon_{\text{eff}}$  是几何平均介电常数  $(\epsilon_{11}\epsilon_{33})^{0.5}$ , 而  $n^3 r / \epsilon_{\text{eff}}$  则为波导电光应用的品质因素。

从表 2 可以看出, 作为电光体调制器件, KTP 的品质因素与 LiNbO<sub>3</sub> 相当, 都是属于最好的材料。但是, KTP 还在其他两个重要的方面大大优于 LiNbO<sub>3</sub>, 即第一, KTP 的延迟温度系数比 LiNbO<sub>3</sub> 小 2—4 倍, KTP 调制器在运行时可以不进行温度控制, 而对 LiNbO<sub>3</sub> 来说恒温装置却是必不可少的。第二, KTP 的抗光损伤能力比 LiNbO<sub>3</sub> 要大 10 倍以上, KTP 的工作可靠性也相应有很大的提高。从表 3 更可以看出, 作为电光波导材料, KTP 的品质因素比其他材料要大二倍以上, 再考虑到光、热和机械的稳定性, 在以波导为基础的集成光路中, KTP 晶体是目前最好的材料。

表 2 电光调制材料

	$\epsilon$	$n$	相 调 制			幅 调 制		
			$r$ (pm/V)	$k$ (10 <sup>-6</sup> /°C)	$n^3 r^2 / \epsilon$ (pm/V) <sup>2</sup>	$r$ (pm/V)	$k$ (10 <sup>-6</sup> /°C)	$n^3 r^2 / \epsilon$ (pm/V) <sup>2</sup>
KTP	15.4	1.86	35.0	31	6130	27.0	11.7	3650
KD*P <sup>1)</sup>	48	1.47	24	9	178	24	8	178
LiIO <sub>3</sub>	5.9	1.74	6.4	24	335	1.23	15	124
LiNbO <sub>3</sub>	27.9	2.2	28.8	82	7410	20.1	42	3500

1) KD\*P 为 KD<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>。

表 3 电光波导材料

	$r$ (pm/V)	$n$	$\epsilon_{\text{eff}}$ ( $\epsilon_{11}\epsilon_{33}$ ) <sup>1/2</sup>	$n^3 r / \epsilon_{\text{eff}}$ (pm/V)
KTP	35	1.86	13	17.3
KNbO <sub>3</sub>	25	2.17	30	9.2
LiNbO <sub>3</sub>	29	2.20	37	8.3
Ba <sub>2</sub> NaNb <sub>5</sub> O <sub>15</sub>	56	2.22	86	7.1
SBN(25—75)*	56—1340	2.22	119—3400	5.1—0.14
GaAs	1.2	3.6	14	4.0
BaTiO <sub>3</sub>	28	2.36	373	1.0

\* SBN(25—75) 为 Sr<sub>0.75</sub>Ba<sub>0.25</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>。

下面我们将简单地介绍一下如何在 KTP 晶体上制作光波导。所采用的方法与在玻璃底板上做成光波导的方法类似, 即用离子交换法。

首先把 KTP 晶体  $z$  向切割成薄片, 厚度为 0.5—1mm。把晶片的一个表面抛光。为了制作沟道波导, 先在 KTP 晶片的抛光面上镀上



一层掩膜,合适的金属掩膜是 Al, Au, Ti 等。然后用光刻的方法把金属掩膜开口,开口的地方就是希望做成波导的地方。再把这样做成的 KTP 晶片浸没在离子交换浴中。离子交换浴是由 Rb, Cs 或 Tl 的熔融硝酸盐(或者由它们的各种比例混合物)组成的,加热温度在 300 至 400°C 之间。具有开口掩膜的 KTP 晶片浸于盐浴中的时间以形成波导为准,一般为 30 min—4h 不等。当 KTP 晶片浸泡在盐浴中时,未受金属掩膜保护的开口部分便与高温熔盐相接触, KTP 中的 K 离子便与熔盐中的其他离子(如 Rb, Cs 或 Tl)进行交换,形成了离子交换沟道波导。

图 2 是一幅沟道波导的相衬显微照片,波导宽  $6\mu\text{m}$ , 是 Tl 离子交换形成的。从照片可看出,波导的边界非常清晰,整个波导都很均匀。表 4 列出不同的交换离子所产生的折射率改变、光衰减及加工条件。表 4 中的结果都是从  $z$  向切割的基片上得到的。因为在 Rb, Cs 及 Tl 离子交换过程中,离子交换速率或扩散速率在  $z$  方向上比在  $x-y$  平面上要好几个数量级,所以只能从  $z$  向切割的基片上才能制得边界清晰的沟道波导器件。

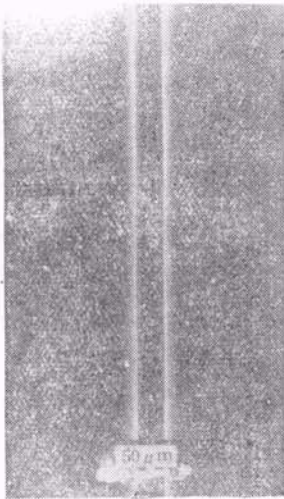


图 2 KTP 中 Tl 交换的沟道波导顶视图

因为离子交换速率与基片的离子导电率有关,所以导电率的变化将使波导的性能也发生变化,从而引起器件制作方面的一些问题。为

表 4 KTP 的离子交换波导

方法
用盐: RbNO <sub>3</sub> , CsNO <sub>3</sub> , TlNO <sub>3</sub>
温度: 315—400°C
时间: 0.5—4.0h
表面折射率的增加 ( $\Delta n_x = \Delta n_y = \Delta n_z$ )
Rb: $\Delta n = 0.020$
Cs: $\Delta n = 0.023$
Tl: $\Delta n = 0.23$
衰减 (Rb, Tl) < 0.4dB/cm

表 5 二价离子对 KTP 波导性能的影响 (Rb<sup>+</sup>/M<sup>++</sup> 离子交换, 300°C, 2h)

M	离子半径 (Å)	深度 (μm)	$\Delta n$
无	—	0	0
Ca	1.18	1	0.007
Sr	1.30	7	0.018
Ba	1.47	15	0.025
K	1.55		

了改进波导的均匀性,减少基片导电率变化的影响,可以在一价的硝酸盐浴中加入二价的离子盐。只要离子半径合适,就会有少量的二价离子取代 KTP 晶格中的 K,形成 K 离子空位。这些空位就会增大表层的离子导电率,增大一价离子的交换速率,并由此而减少基片导电率的变化带来的不良影响。对于取代 K 来说,碱土离子具有比较合适的半径。用 20 mol% 的碱土离子,80 mol% 的 Rb 进行离子交换而形成的波导性能参数示于表 5 中。从表 5 中可以看出,二价离子半径越是接近 K 离子半径,则其影响就越大,二价离子与 K 离子的交换速率也越大。对于实验中所用的 KTP 基片而言,如果不加入二价离子盐,那么即使交换温度更高些,也基本上不能形成波导。

图 3 是二价离子对交换速率的影响的例子。在这里, KTP 样品是在盐浴中于 350°C 处理 2h,盐浴中是 Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>/RbNO<sub>3</sub>,其克分子比为 20/80。波导的深度约 100 μm。若不加入 Ba 盐,则波导的深度从不到 1 μm 到大约 8 μm 不等,视基片的导电率而定。图 3 也说明, KTP 的扩散性能有强烈的各向异性。该沟道波导为 6 μm 宽,大约 100 μm 深,但基本上没见到有横



# 分子激光光谱学的进展

王祖赓

(华东师范大学物理系, 上海 200062)

本文综述了激光分子光谱学的进展,指出了进行该领域研究的重要性,简略地介绍了它所涉及的几个重要方面,其中包括高分辨率激光分子光谱学、分子光谱的简化、光泵分子受激辐射光谱学、分子高激发态光谱学和分子的灵敏探测等。

我们知道,分子光谱是人们洞察分子内部结构、运动规律和物化特性的门户,但在激光发

明之前,谁都没有预料到古老的光谱学将会发生一次巨大而深刻的变革。激光光谱学的建立

向扩散。对于制作高密度波导阵列,优化调制器及开关的叠交电场,选择非线性波导器件的叠交光场,以及制作可变折射率波导来说,上述的扩散性能的各向异性特点将带来极大的方便。

$V_{cm}$ ,差不多就是预期的理论值。用1mm厚的KTP晶体 $z$ 向切割的基片做成 $6\mu m$ 宽的Rb交换波导,镀上 $0.4\mu m$ 的 $SiO_2$ 过渡层,1cm的电场相互作用长度,及 $25\mu m$ 的电极间隙,那么若输入光波长为 $1.3\mu m$ ,则半波电压 $V_{\pi}$ 为10V,若光波波长为 $0.633\mu m$ ,则 $V_{\pi}$ 为5V。这样做成的马赫-曾德尔调制器带宽可达16GHz,比目前通用的光纤通信容许带宽高几十倍。同样,KTP波导也能实现激光倍频,例如把红外光变成绿光。 $6\mu m$ 宽的Rb交换沟道波导把 $1.064\mu m$ 的激光转变为绿光的效率达 $4\% W^{-1}cm^{-2}$ ,这也是具有非线性光学性能的最佳水平。

总之,用KTP晶体做成波导的工艺简单,波导的损耗低,抗光损伤能力强,热稳定性和机械性能好,效率高,在集成光学及下一代光纤通信中将得到广泛的应用。美国杜邦公司的研究者曾估计,在大约十年内,以KTP为基本材料的集成光学制品可能会达到十亿美元。毫无疑问,KTP已经成为一个最有吸引力的晶体品种之一。

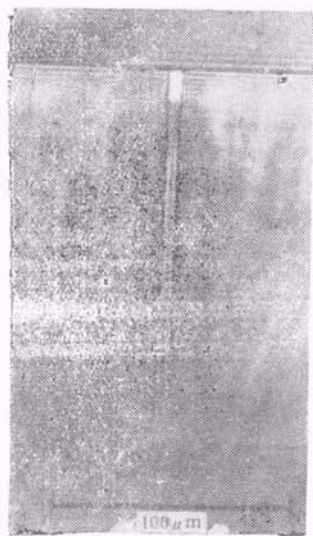


图3 KTP中Ba/Rb交换的沟道波导侧视图

用上述的方法已经制成了一些波导器件。正如所预料的那样,这些波导器件的品质因素好,耐光损伤,热稳定性和机械性能都比其他材料制成的器件要好得多。用KTP基片做成 $6\mu m$ 宽的沟道波导,镀上 $0.2\mu m$ 的 $MgF_2$ 过渡层,耦合在 $r_{22}$ 的电光系数方向上,那么在 $6328\text{ \AA}$ 波长时的半波电压与电极距离的乘积为6

- [1] 黄朝恩,物理,15-5(1986), 281.
- [2] 张煦,光纤通信原理,上海交通大学出版社,(1985), 202.
- [3] J. D. Bierlein and H. Vanherzeele, *J. Opt. Soc. Am. B*, 6-4(1989), 622.