

# KTP晶体倍频器件的 $1.064\mu\text{m}$ 和 $0.532\mu\text{m}$ 双波长增透膜

刘训民 张爱荣

(山东大学晶体材料研究所, 济南)

**摘要:** 本文介绍KTP ( $\text{KTiOPO}_4$ ) 倍频晶体端面等厚度三层倍频双波长增透膜的设计和制备工艺。该膜系结构和制备工艺简单, 重复性好, 在 $1.064\mu\text{m}$ 和 $0.532\mu\text{m}$ 的剩余反射率做到 $0.15\% \sim 0.20\%$ 。

AR coating of KTP frequency doubling devices  
for both  $1.064\mu\text{m}$  and  $0.532\mu\text{m}$

Liu Xunmin, Zhang Airong

(Institute of Crystal Materials, Shandong University)

**Abstract:** A new design and preparation technique about the anti-reflective coating for SHG of KTP ( $\text{KTiOPO}_4$ ) crystals are introduced. The coating is composed of three different films with identical thickness. The preparation is relatively easy, with high reproducibility. The residual reflectivity of both  $1.064\mu\text{m}$  and  $0.532\mu\text{m}$  has been reduced to as low as  $0.15\% \sim 0.20\%$ .

KTP 晶体是一种新型高效激光倍频材料, 它的非线性系数大, 光损伤阈值高, 透光波段宽, 热导性好, 失配梯度小, 不潮解, 机械性能和化学稳定性好, 能在较宽的温度范围内实现 I、II 类相匹配。该晶体用于 Nd:YAG 激光器上 (基频光  $1.064\mu\text{m}$ ) 通过 KTP 晶体器件获得  $1.064\mu\text{m}$  和  $0.532\mu\text{m}$  双波长输出。由于单波长“V”型增透膜增透带不够宽, 只能做到对  $1.064\mu\text{m}$  增透, 而不能同时做到对  $0.532\mu\text{m}$  处的增透, 这样由于绿光处表面反射的影响, 倍频效率比较低。如果在端面上镀制  $1.064\mu\text{m}$  和  $0.532\mu\text{m}$  的双波长增透膜, 可使倍频效率由  $40\%$  提高到  $70\%$ 。并且使进一步做三倍频和四倍频成为可能。

由于 KTP 晶体的折射率比较高。在匹配方向通光时其折射率约为  $n = 1.74$ 。按照膜系设计的要求, 必须采用新的膜料才能做到双波长增透, 为了尽可能地减小两个波长处的剩余反射率和提高光学性能的重复性, 我们着重对膜料的镀制工艺进行了研究, 并获得了满意的结果。在对大量镀制的 KTP 晶体器件的测量结果表明, 工艺稳定, 重复性好。在  $1.064\mu\text{m}$  和  $0.532\mu\text{m}$  两波长处的剩余反射率做到  $0.15\% \sim 0.20\%$ , 达到了激光倍频的使用要求。

## 一、膜系设计

对于一个多层膜系, 在垂直入射时如果每一层的光学厚度  $nd$  满足下列两式:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} nd \quad (1)$$

$$\pi - \delta = \frac{2\pi}{\lambda'} nd \quad (2)$$

分别将 $\delta$ 和 $(\pi - \delta)$ 代入膜系的矩阵计算,其特征矩阵的矩阵元 $M_{11}$ 、 $M_{12}$ 、 $M_{21}$ 、 $M_{22}$ 的绝对值对 $\lambda$ 和 $\lambda'$ 都将保持不变。因为某一波长处的反射率取决于在这一波长处的矩阵元的绝对值,所以这一膜系在 $\lambda$ 和 $\lambda'$ 处将有同样的反射率。如果使得在波长 $\lambda$ 处增透,则在 $\lambda'$ 处也增透。

将(1)式除以(2)式得:

$$\frac{\delta}{\pi - \delta} = \frac{\lambda'}{\lambda}$$

若取 $\delta = \pi/3$ , 则:

$$\lambda = (\pi - \delta)\lambda'/\delta = 2\lambda'$$

可以看出 $\lambda$ 和 $\lambda'$ 为倍数关系,若 $\lambda$ 为 $1.064\mu\text{m}$ ,则 $\lambda'$ 为 $0.532\mu\text{m}$ 。

取 $\delta = \pi/3$ ,由(1)式可得:

$$nd = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{\lambda}{2\pi} = 1773 \text{ \AA}$$

我们设计的三层双波长增透膜如图1所示,每层的光学厚度 $nd = 1773 \text{ \AA}$ ,即位相厚度 $\delta = \pi/3$ 。

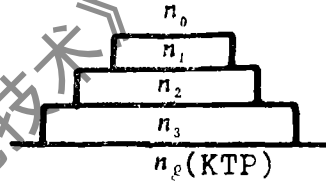


图 1

特征矩阵:

$$\begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\delta & \frac{i}{n_1} \sin\delta \\ in_1 \sin\delta & \cos\delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\delta & \frac{i}{n_2} \sin\delta \\ in_2 \sin\delta & \cos\delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\delta & \frac{i}{n_3} \sin\delta \\ in_3 \sin\delta & \cos\delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \\ & n_g \end{pmatrix}$$

化简后矩阵元的表达式:

$$M_{11} = \cos^3\delta - \frac{n_2}{n_1} \sin^2\delta \cos\delta - \frac{n_3}{n_2} \sin^2\delta \cos\delta - \frac{n_3}{n_1} \sin^2\delta \cos\delta$$

$$M_{12} = \frac{1}{n_3} \sin\delta \cos^2\delta - \frac{n_2}{n_1 n_3} \sin^3\delta + \frac{1}{n_2} \sin\delta \cos^2\delta + \frac{1}{n_1} \sin\delta \cos^2\delta$$

$$M_{21} = n_1 \sin\delta \cos^2\delta + n_2 \sin\delta \cos^2\delta - \frac{n_1 n_3}{n_2} \sin^3\delta + n_3 \sin\delta \cos^2\delta$$

$$M_{22} = -\frac{n_1}{n_3} \sin^2\delta \cos\delta - \frac{n_2}{n_3} \sin^2\delta \cos\delta - \frac{n_1}{n_2} \sin^2\delta \cos\delta + \cos^3\delta$$

$$\text{由零反射条件:} \quad M_{11} - n_g M_{22} = 0 \quad (3)$$

$$n_g M_{12} - M_{21} = 0 \quad (4)$$

将 $M_{11}$ 、 $M_{12}$ 、 $M_{21}$ 、 $M_{22}$ 的表达式代入(3)、(4)式然后进行化简可得:

$$\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)n_3^2 + \left(\frac{n_2}{n_1} - \frac{n_1 n_g}{n_2} - \frac{1 - n_g}{\text{tg}^2\delta}\right)n_3 - (n_1 + n_2)n_g = 0 \quad (5)$$

$$n_1(n_1 \operatorname{tg}^2 \delta - n_2)n_3^2 + (n_1 + n_2)(n_2 - n_1 n_2)n_3 + n_2 n_3(n_1 - n_2 \operatorname{tg}^2 \delta) = 0 \quad (6)$$

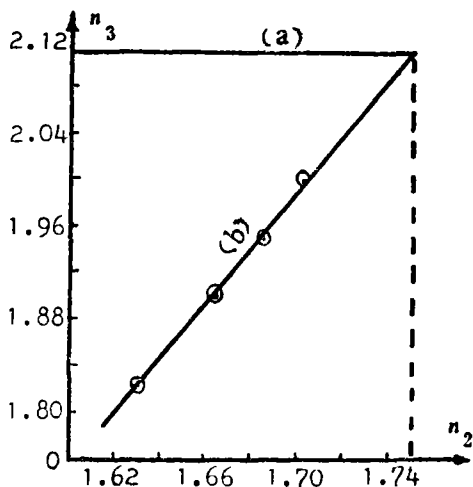


图 2

这两个式子中有三个未知量，即 $n_1$ 、 $n_2$ 和 $n_3$ （其中 $n_1 = 1.46$ ， $\delta = \pi/3$ ），若最外层膜采用 $\text{SiO}_2$ ， $n_1 = 1.46$ 利用(5)式可求出 $n_2$ 与 $n_3$ 的关系曲线(a)，再利用(6)式求出 $n_2$ 与 $n_3$ 的关系曲线(b)，两曲线之交点即为同时满足(5)、(6)式的 $n_1$ 、 $n_2$ 和 $n_3$ 的折射率值，如图2。从图中可看出： $n_1 = 1.46$ ， $n_2 = 1.75$ ， $n_3 = 2.108$ 。

我们可用矢量作图法检验矩阵法计算的结果是否正确，如图3所示，各界面的反射系数 $r$ 如下：

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} = -0.187$$

$$r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} = -0.09$$

$$r_3 = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} = -0.0938$$

$$r_4 = \frac{n_3 - n_g}{n_3 + n_g} = 0.0956$$

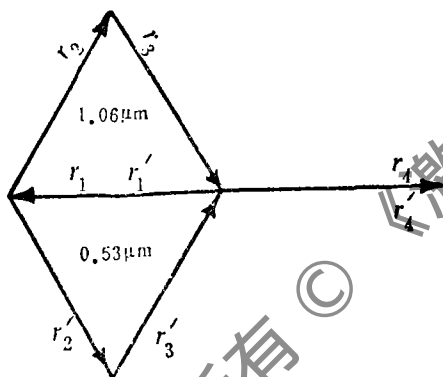


图 3

作图时将 $r_i$ 放大400倍，以毫米为单位量取 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 和 $r_4$ 的长度，对1.064μm各 $r$ 之间的夹角依次为 $2\delta = 120^\circ$ ，对0.532μm，各 $r$ 之间的夹角依次为 $2\delta = 240^\circ$ 。由图3看出，在 $n_1 =$

1.46， $n_2 = 1.75$ ， $n_3 = 2.108$ 的情况下，1.064μm和0.532μm两波长处的反射率都为零。

## 二、制 备

### 1. 膜料选择

根据计算结果，我们采用了以下三种膜料：第一层 $\text{SiO}_2$ ，第二层 $\text{ZrO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的混合物，第三层 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 。对于光学薄膜材料，除折射率要求之外，还有光学性能要求（如色散、吸收）和其它一些性能要求（如硬度，附着力，抗光伤，防潮，化学稳定性）等等。要选择色散小的膜料，否则会造成在一个波长处剩余反射率较低而在另一个波长处偏高。就上述这些性质而论，以上三种膜料，经过适当的工艺条件能够达到要求。

$\text{SiO}_2$ 是一种经常采用的膜料。我们采用的是熔石英棒，因为蒸发时的基体温度和蒸发速率对 $\text{SiO}_2$ 的折射率影响较小，所以蒸发工艺并不复杂。

$\text{ZrO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 混合膜料。因为第二层膜料折射率的最佳值为1.75，没有一种单一膜料的折射率值达到或近似达到这一要求，所以，我们选择了这种混合膜料，以求达到理论值。我

们用不同比例和不同蒸发条件在K<sub>9</sub>基板上做了单层实验,用比较测量法测量折射率,最后获得了最佳配比和合适的蒸发条件。

实验表明Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>膜料的折射率随蒸发条件变化很大。随着基体温度、真空度和蒸发速率的不同,折射率可从1.95变化到2.3。我们恰恰利用这一性质,采取恰当的蒸发条件,满意地获得了近似设计要求的材料折射率。

## 2. 镀制

整个实验工作是在DMDE-450型镀膜机上进行的,用e型电子枪蒸发高熔点氧化物SiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,用反射法控制膜厚,用K<sub>9</sub>做控制片。为了获得所需要的真空度,开始时,应将真空度抽得足够高,然后按照每层材料所要求的真空度用针形阀对真空室充入一定量的氧气。实验表明,这样做不但对获得理想的真空度行之有效,而且可提高膜层的光学质量。另外,每层膜要求不同的基体温度和蒸发速率,这在蒸发时应特别注意,否则也会造成剩余反射偏高。

高熔点氧化物材料蒸发时将大量放气,所以材料在镀前应彻底预熔,预熔后的材料再放入被镀件镀制,并且在挡板打开前还要稍加预熔。为了提高材料的纯度并减少污染,每次材料不宜放得太多,够一次用就可以了,这不但预熔彻底,而且便于控制真空度。

## 3. KTP器件的清洗处理

KTP晶体器件一般都比较小,为了使用方便,一般都把晶体镶嵌在玻璃框内。由于晶体与外框之间是用胶粘在一起的,这就给清洗带来一定困难,不能用玻璃洗液浸泡。经过多次实验,采取了以下清洗过程:

(1)晶体在光学加工时尽量保持表面及侧面清洁,并且加工后接着就镀,新鲜的光学表面可增加膜层的牢固度。

(2)用丙酮浸泡,但时间不要过长,时间太长会使胶软化,浸泡完成后,立即用干净纱布擦干净,浸泡的目的是为了去掉玻璃外侧的污物。

(3)用绸布浇无水乙醇和乙醚混合液擦拭,用10倍放大镜观察透光和反光,直至完全干净为止。

(4)擦好的器件即放入钟罩镀制,以防污染。

## 4. 热处理

众所周知,热处理会使膜层更加致密、牢固和稳定,并能增加增透效果,但KTP器件热处理时要注意两点:第一,温度不宜过高,否则会使粘合剂软化或汽化,导致影响膜层光学质量;第二,时间要足够长,这样才能消除可逆现象。

## 三、实验结果

研制的样品都是在340型分光光度计上测量的。我们从1988年2月至1989年12月分别对多批镀制的KTP倍频器件进行了测量,从统计结果看出,工艺稳定,重复性好。测量结果见表1。

表1 50次镀制样品测量结果

剩余反射率(%)		样 品 个 数
1.064(μm)	0.532(μm)	
0.33	0.42	5
0.30	0.40	10
0.24	0.32	50
0.20	0.30	30
0.15	0.20	5

# 光折变晶体四波混频在图象实时 加减及动态追迹显示中的应用

尚庆虎 于美文\*

(电子科学研究院, 北京)

**摘要:** 本文提出了利用两个四波混频相位共轭反射镜的Michelson干涉仪系统进行图象加、减、图象强度反转以及动态追迹显示的理论依据和实验方案, 并获得了理论分析与实验现象一致的结果, 证明了这种方法的可行性。

**Application of FWM photorefractive crystals in image real-time addition, subtraction and dynamic tracking display**

Shang Qinghu, Yu-Meiwen\*

(China Academy of Electronics and Information Technology)

**Abstract:** The theory analysis and experimental set-up of the optical image addition, subtraction, intensity inversion and dynamic tracking display are presented. The experimental set-up is a Michelson interferometer containing two four-wave-mixing phase conjugate mirrors. The experimental results are well accordant with the theory analysis.

\*北京理工大学光学系。(Beijing Institute of Technology).

通过选择高纯度的氧化物膜料, 器件经过严格的清洗和干燥, 适当改进镀制工艺和成膜后一定温度下较长时间的热处理, 可在KTP倍频器件上获得光学性能优越的双波长增透膜。

## 参 考 文 献

- [1] 吴周令, 范正修, 唐晋发. 光学薄膜吸收损耗的研究. 光学学报, 1989; 9(8):741
- [2] 金林法, 章宏芬, 杨本祺. 用于激光器的某些氧化物薄膜折射率的研究. 中国激光, 1984; 11(4):235

作者简介: 刘训民, 男, 1958年10月出生。助工。现从事光学晶体 (主要是激光晶体) 表面增透膜的研究。

张爱荣, 女, 1942年1月出生。实验师。现从事激光晶体增透膜的研究。

收稿日期: 1990年5月25日。