

# 高效率 KDP 倍频晶体的精选

蔡希浩 覃文骅\* 叶 曦\*\* 陆瑞熙  
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

本文提出了用固有外失配角来表征由倍频晶体折射率不均匀性所产生的相位失配,并给出了对其进行高精度测量的方法,它能方便地、可靠地从已切割好的晶体中挑选出高转换效率的倍频晶体。

非线性晶体存在光学不均匀性(即双折射不均匀性),在其用作激光倍频或参量振荡时会引起相位失配,从而降低转换效率,特别是在高功率密度情况下,倍频转换效率对相位失配更加灵敏,情况就更为严重。

近年来,由于高功率激光核聚变的需要,倍频技术有了很大的发展。美国利弗莫尔实验室在 $1\sim 2.5\text{GW}/\text{cm}^2$ 的功率密度下,用 KDP 晶体获得了大于 65% 的转换效率<sup>[1]</sup>,在 $9.5\text{GW}/\text{cm}^2$ 下,倍频效率高达 83%<sup>[2]</sup>。说明选择优质的非线性晶体,获得高转换效率为高功率激光器所必要的一环。

选择优质晶体通常的方法有:测量消光比<sup>[3]</sup>或干涉法<sup>[4]</sup>。这两种方法都可测出双折射不均匀性 $\partial(n_e - n_o)/\partial z$ ,但消光比只能在晶体切割前沿光轴方向测量,对已切割好的晶体无法测量;而测量干涉条纹的灵敏度较低,它只能对不均匀性较差的晶体进行测量,对于象 KDP 均匀性较好的晶体就很难检测其优劣了。本文介绍一种通过小信号倍频转换效率的测量与理论计算值比较以确定由晶体的光学不均匀性所引起的有固有失配角的方法,直接比较各块倍频晶体的质量,并把它与固有外部失配角联系起来。

## 一、原 理

横向和纵向的双折射不均匀性对倍频转换效率的影响已有文献对它们进行了理论研究<sup>[5,6]</sup>。本文以另一种方式来研究 KDP 晶体的纵向不均匀性。众所周知,倍频的非线性耦合波方程为

$$\begin{aligned} (dE_1/dz) &= -(1/2)\gamma_1 E_1 - iK E_1^* E_2 \exp(-i\Delta kz), \\ (dE_2/dz) &= -(1/2)\gamma_2 E_2 - iK E_1^2 \exp(i\Delta kz). \end{aligned}$$

当  $\Delta k$  为  $z$  的函数时,  $\Delta kz$  应写为  $\int_0^z \Delta k dz$ 。式中  $E_1$ 、 $E_2$  分别为  $\omega$  与  $2\omega$  的光电场振幅,  $\gamma_i$  为吸收系数;设  $\Delta k = \Delta k_0 + \Delta k_{\text{散}}$ ,  $\Delta k$  为由激光束的发散角  $\Delta\theta$  所引起的相位失配,  $\Delta k_{\text{散}}$  为由于晶

收稿日期: 1984年11月27日; 收到修改稿日期: 1985年1月3日

\* 中国科技大学 82 级研究生。

\*\* 长春光机学院应届毕业生。

体的双折射不均匀性  $\Delta n_{\text{晶}}$  所引起相位失配, 我们也把这一相位失配用一个固有的外部失配角  $\Delta\theta_{\text{晶}}$  来表示, 令  $\beta_i = (\Delta k / \Delta\theta)$ , 则:

$$\Delta k = \beta_i \Delta\theta_{\text{晶}} = \beta_i (\Delta\theta + \Delta\theta_{\text{晶}}); \quad \Delta n_{\text{晶}} = (\lambda_1 / 2\pi) \beta_i \Delta\theta_{\text{晶}}.$$

对 KDP 晶体, 在 I、II 类匹配的情况下, 各参量的数值分别为<sup>[7]</sup>

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= 0.04 \text{ cm}^{-1}, & \gamma_2 &= 0, \\ \beta_{\text{I}} &= -3.304 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1} \cdot \mu\text{rad}^{-1}, & \beta_{\text{II}} &= -1.733 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1} \cdot \mu\text{rad}^{-1}, \end{aligned}$$

$$\Delta n_{\text{晶}}^{\text{I}} = [n_{2e}(\theta_{pm}) - n_{1e}(\theta_{pm}) - n_{1o}], \quad \Delta n_{\text{晶}}^{\text{II}} = \frac{1}{2} [2n_{2e}(\theta_{p,m}) - n_{1e}(\theta_{pm}) - n_{1o}],$$

其中  $\Delta n_{\text{晶}}$  的平均值是对  $z$  取平均。

由于  $\beta_{\text{I}}/\beta_{\text{II}} = 1.9$ , 所以对于相同的  $\Delta n_{\text{晶}}^{\text{I}} = \Delta n_{\text{晶}}^{\text{II}}$ , 有  $\Delta\theta_{\text{晶}}^{\text{II}} = 1.9\Delta\theta_{\text{晶}}^{\text{I}}$ 。表 1 列出了它们的对应关系。

表 1  $\Delta n_{\text{晶}}$  与  $\Delta\theta_{\text{晶}}$  的关系

Table 1 Relationship between  $\Delta n_{\text{crystal}}$  and  $\Delta\theta_{\text{crystal}}$

$\Delta n_{\text{晶}}$	$\Delta\theta_{\text{晶}}^{\text{I}}$ ( $\mu\cdot\text{rad}$ )	$\Delta\theta_{\text{晶}}^{\text{II}}$ ( $\mu\cdot\text{rad}$ )	$\Delta n_{\text{晶}}$	$\Delta\theta_{\text{晶}}^{\text{I}}$ ( $\mu\cdot\text{rad}$ )	$\Delta\theta_{\text{晶}}^{\text{II}}$ ( $\mu\cdot\text{rad}$ )
$10^{-6}$	35.7	67.9	$5 \times 10^{-6}$	178.7	339.6
$2.5 \times 10^{-6}$	89.4	169.8	$10^{-5}$	357.5	679.2

通过对耦合波方程作数值解, 作出倍频转换效率  $\eta_{\text{倍}}$  对失配角  $\Delta\theta_{\text{晶}}$  的调谐曲线, 对应于实验测得的转换效率, 在图中找出这块晶体的  $\Delta\theta_{\text{晶}}$ , 在测出激光器的发散角  $\Delta\theta$  后, 就可定出  $\Delta\theta_{\text{晶}}$ 。

## 二、实 验

实验装置如图 1 所示, 采用具有一级放大的重复率 YAG 激光器, 用 LiF 晶体作被动调 Q, 获得了脉宽为 7 ns、束宽为  $\phi 6 \text{ mm}$ 、功率密度为  $20 \text{ MW/cm}^2$  的激光输出。实验采用了比较测量的方法, 把激光分束为两路, 每次测量都测出被测晶体与作比较的晶体的转换效率之比 (测试时, 所有晶体都应处在最佳相位匹配方向), 最后, 只要测出其中一块晶体 (No. 838201) 的转换效率 (为 1.8%), 就可以确定所有晶体转换效率的绝对值。

实验数据如表 2、3 所示。其中激光器的发散角为  $200 \mu\cdot\text{rad}$ 。表中  $L$ ,  $\phi$  分别为晶体的长度与直径,  $\eta_{\text{倍}}$  为转换效率 (%)。图 2 和图 3 分别画出了 I 类和 II 类的理论调谐曲线和部分实验点\*。

\* 在本实验中, 每个点都重复了 12 次, 测量误差小于 6%。

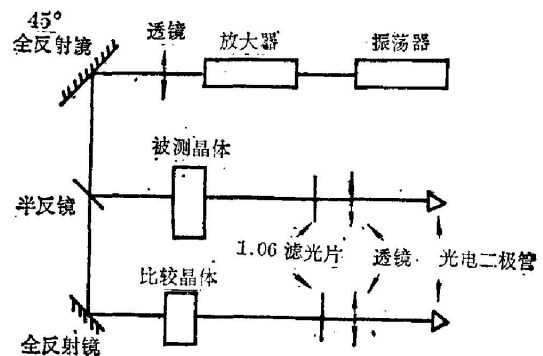


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental arrangement

表 2 I 型 KDP 的固有失配角的测量

Table 2 Measured data of the inherent mismatching angle of type-I KDP

No.	L (mm)	$\phi$ (mm)	$\eta_{\text{倍}}$	$\Delta\theta_{\text{总}}$ ( $\mu\cdot\text{rad}$ )	$\Delta\theta_{\text{晶}}$ ( $\mu\cdot\text{rad}$ )	No.	L (mm)	$\phi$ (mm)	$\eta_{\text{倍}}$	$\Delta\theta_{\text{总}}$ ( $\mu\cdot\text{rad}$ )	$\Delta\theta_{\text{晶}}$ ( $\mu\cdot\text{rad}$ )
838102	30	60	1.9	290	90	838211	30	45	1.3	350	150
838201	30	45	1.8	300	100	838202	20	46	1.2	340	140
838210	30	45	1.10	370	170	838213	16	60	0.90	370	170

表 3 II 型 KDP 的固有失配角的测量

Table 3 Measured data of the inherent mismatching angle of type-II KDP

No.	L (mm)	$\phi$ (mm)	$\eta_{\text{倍}}$	$\Delta\theta_{\text{总}}$ ( $\mu\cdot\text{rad}$ )	$\Delta\theta_{\text{晶}}$ ( $\mu\cdot\text{rad}$ )	No.	L (mm)	$\phi$ (mm)	$\eta_{\text{倍}}$	$\Delta\theta_{\text{总}}$ ( $\mu\cdot\text{rad}$ )	$\Delta\theta_{\text{晶}}$ ( $\mu\cdot\text{rad}$ )
831206	35	70	4.4	470	270	831209	20	70	2.8	480	280
840402	32	70	4.1	495	295	838212	20	46	1.9	740	540
840902	30	30	3.5	50	350	838207	19	46	1.9	720	520
840405	30	30	2.8	620	420	831208	16	45	2	440	240
838209	30	46	2.0	710	510	831203	16	44	1.4	820	620
840403	30	70	2.9	600	400	838216	15	30	1.6	620	420
840404	29.5	78	2.3	670	470	840101	14	44	1.5	520	320
831204	24	44	3.3	500	300	840104	12	44	1.2	400	200
838214	24	30	3.0	570	370	838301	10	46	0.72	970	770
840301	30	50	5.91	300	100						

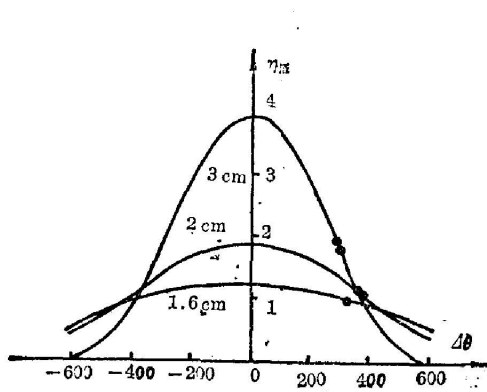


图 2 I 类 KDP 晶体的实验点与理论计算调谐曲线

Fig. 2 Experimental results (shown as dots) and calculated curves for type-I KDP crystals

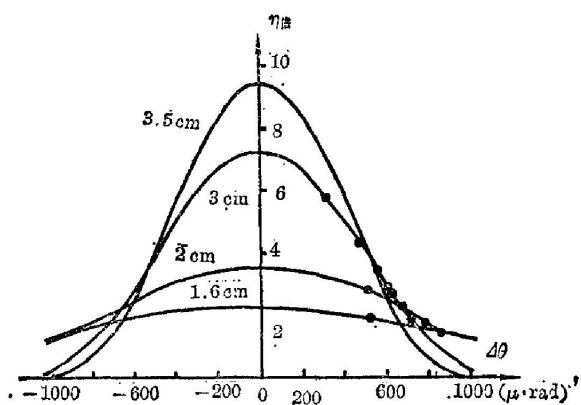


图 3 II 类 KDP 晶体的实验点与理论计算调谐曲线

Fig. 3 Experimental results (shown as dots) and calculated curves for type-II KDP crystals

### 三、结果与讨论

由表 2 和表 3 可以看出, 对所测晶体,  $\Delta\theta_{\text{E}}^{\text{E}}$  在  $90\sim 170\ \mu\cdot\text{rad}$  之间,  $\Delta\theta_{\text{E}}^{\text{E}}$  在  $100\sim 770\ \mu\cdot\text{rad}$  之间。对应的  $\Delta n_{\text{E}}$  表征了这块晶体纵向双折射不均匀性的平均值。其范围分别为  $2.5\times 10^{-6}\sim 4.76\times 10^{-6}$  和  $1.47\times 10^{-6}\sim 1.13\times 10^{-5}$ 。由本实验所测出的  $\Delta n_{\text{E}}$  与双折射梯度  $\partial(n_{\text{e}}-n_{\text{o}})/\partial z$ , 虽然都反应出晶体的纵向不均匀性, 但它们仍是有一定差别的。双折射梯度是一个独立的量, 与其它因素无关。因此, 它在晶体的选料时, 可用来初步确定那些晶体的光学均匀性较好以及在大块晶体中确定光学均匀性较好的那一部分, 以获得质量较优的晶体。然而,  $\partial(n_{\text{e}}-n_{\text{o}})/\partial z$  还不是与倍频转换效率直接有关的量, 而且还忽略了色散效应, 它只能反映出一个大致的趋向。用消光比方法只能沿光轴方向测量, 对已切割好了的晶体就无能为力了。而且对象 KDP 这样光学均匀性较好的晶体, 双折射梯度的测量是较困难的, 很难测得准,  $\Delta n_{\text{E}}$  是一个直接与倍频转换效率有关的量, 由于在实验中采用了比较测量的方法, 抵消了由激光器输出强度, 波形和方向性等参数的涨落所造成的误差。测量误差基本上仅由测量系统所决定, 因此测量具有较高的精度, 并且实验方法简单、可靠实用。可对用双折射率梯度初选出来的晶体再进行精选, 以获得优质的晶体。

从  $\Delta k$  在耦合波方程所起的作用看,  $\Delta n_{\text{E}}$  对应于  $\int_0^z \Delta k dz = (4\pi/\lambda) \Delta n_{\text{E}} z$ 。  $\partial(n_{\text{e}}-n_{\text{o}})/\partial z$  对应于  $\int_0^z \Delta k dz = (2\pi/\lambda) [\partial(n_{\text{e}}-n_{\text{o}})/\partial z] z^2$ 。因为它们对方程对  $z$  从  $0\sim l$  积分时所起的作用相等, 而在  $z$  较小时必有  $\Delta n_{\text{E}} z > [\partial(n_{\text{e}}-n_{\text{o}})/\partial z] (z^2/2)$ 。所以在  $z=l$  时应有  $\Delta n_{\text{E}} < (l/2) [\partial(n_{\text{e}}-n_{\text{o}})/\partial z]$ , 只有这样才能保证它在方程中所起的作用相等。由于  $\Delta n_{\text{E}}$  对应的  $\Delta k$  是个常数, 并与  $\Delta\theta_{\text{E}}$  相联系。所以在分析倍频晶体不均匀性对转换效率的影响时, 用  $\Delta n_{\text{E}}$  比  $\partial(n_{\text{e}}-n_{\text{o}})/\partial z$  更直观。较容易对在高功率密度下所获得的倍频转换效率作出恰当的估计。我们选用 840402 和 840901 两块晶体在六路激光装置上进行高能转换效率总体实验, 其结果与本实验的数据是符合的。因此测量  $\Delta\theta_{\text{E}}$  方法可认为是一种方便可行的精确测量表征倍频晶体质量参数的方法。

值得一提的是, 在晶体中由于散射颗粒和吸收系数稍有不同所造成的影响, 与  $\Delta n_{\text{E}}$  相比是很小的。它们所造成的误差小于实验误差。

本工作是在邓锡铭、王之江教授的关心和支持下进行的; 并得到了屠世谷、葛夏平、庄斗南、何鹤泉、何伟、李庆国、朱宁生和 304 组同志的帮助, 作者谨向他们表示衷心感谢。

这里所使用的 KDP 晶体是由中国科学院福建物构所提供的, 在此一并致谢。

### 参 考 文 献

- [1] C. E. Thomas; «Digest of Conference on Lasers and Electrooptics», (Optical Society of America, Washington, D. C., 1981), paper WH1.
- [2] J. Linford, B. C. Johnson; *Appl. Opt.*, 1982, **21**, No. 20 (15 Oct), 36.
- [3] K. Sugibuchi *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1968, **13**, No. 3 (1 Aug), 107.
- [4] J. E. Midwinter; *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **11**, No. 4 (15 Aug), 128.

- [5] Hideki Tsuya *et al.*; *Appl. Phys.*, 1970, **41**, No. 6 (Jun), 2557.  
[6] R. G. Smith; *Appl. Phys.*, 1970, **41**, No. 7 (Jul), 3014.  
[7] R. S. Craxton *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**, No. 9 (Sep), 1782.

## Selection of KDP doubling crystals with high conversion efficiencies

CAI XIJIE QIN WENGHUA JE XI AND LU RIEIXI

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 27 November 1984; revised 3 January 1985)

### Abstract

The inherent external mismatching angle is used to represent the phase mismatching caused by inhomogeneity in refractive-indices of doubling crystals. A new method is presented that can measure this important parameter accurately. The small-signal conversion efficiency is measured under a laser intensity of about 20 MW/cm<sup>2</sup>. A reference KDP crystal is used to eliminate laser-induced fluctuations. The experimental data are compared with theory in determining the mismatching angle of crystals,  $\Delta\theta_e$ , as listed in Tables II, III. Among doubling crystals those with high conversion efficiencies can thus be selected readily. For some of them, the high conversion efficiencies have been born out experimentally.