

大口径 KDP 晶体高效率倍频

蔡希浩 舒美冬 覃文骅* 戴美兰

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文报道了用一块3cm厚II类KDP晶体,在 $\phi 42\text{mm}$ 口径、功率密度为 $0.27\text{GW}/\text{cm}^2$ 的 $1.06\mu\text{m}$ 激光束作用下, $0.53\mu\text{m}$ 倍频激光外部能量转换效率达到61.5%的实验结果。实验和理论计算值符合较好。

一、引 言

在高功率、大口径的倍频研究中,人们已经进行了许多工作^[1~6]。已知倍频转换效率是晶体长度、相位失配角及基波激光功率密度的函数。为了获得在我们实验条件许可下的高转换效率,本文对非线性耦合波方程作了理论计算,系统地给出了各种长度KDP晶体的转换效率对相位失配角和基波激光功率密度的变化特性,并选用一块3cm厚的II类KDP晶体对计算结果加以验证。其实验曲线与理论曲线符合得较好。在 $0.25\sim 0.55\text{GW}/\text{cm}^2$ 的功率密度下,获得了大于60%的外转换效率。

二、理 论 计 算

影响倍频转换效率的因素很多,如:激光器的方向性、倍频晶体的质量、环境的变化以及激光脉冲的时间和空间分布等都在一定程度上影响着倍频的转换效率。为了了解倍频转换效率的变化特点,先看在小信号近似下的情况:

$$\eta_{\text{SHG}} \propto I L^2 \sin^2\left(\frac{1}{2} \Delta k L\right). \quad (1)$$

即倍频转换效率与基波功率密度及晶体长度的平方成正比,与失配量 $\Delta k = \Delta k \cdot \Delta\theta / \Delta\theta$ 有关。由方程(1)可以看出,调谐曲线的半高宽 $\Delta\theta_{\text{FWHM}}$ 是与晶体长度成反比的,晶体越长, $\Delta\theta_{\text{FWHM}}$ 越小,调整精度就要求越高。对一定的失配角 $\Delta\theta$,晶体存在一个能获得最高转换效率的最佳长度 L_{opt} 。在功率密度较高时,由小信号近似所得到的结果有较大的误差,因此必须作数值计算。为了使问题简化,我们考虑入射光束为: 1. 平面波, 2. 强度的空间分布均匀, 3. 强度的时间分布为高斯型, 即 $I(t) = I_{10} \cdot \exp(-t^2)$, 4. 整个光束对晶体具有同样的失配角 $\Delta\theta$, 5. 晶体每个端面都具有1%的反射损耗。在作了以上假设后,对耦合波方程^[2]

收稿日期: 1985年4月30日

* 中国科学技术大学研究生。

$$\begin{cases} \frac{dE_1}{dz} + \frac{1}{2} \gamma_1 E_1 = -iK E_1^* E_2 \exp(-i \Delta k z), \\ \frac{dE_2}{dz} + \frac{1}{2} \gamma_2 E_2 = -iK E_1^2 \exp(-i \Delta k z) \end{cases} \quad (2)$$

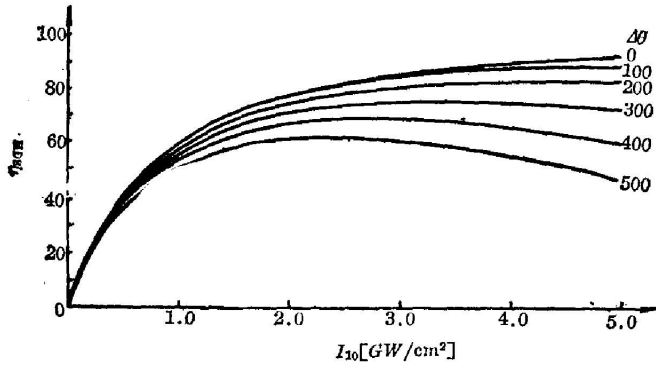


图1 1.4cm II KDP 的倍频转换效率特性曲线
Fig. 1 Doubling characteristics for a 1.4cm type II KDP crystal

作数值解,并对时间作数值积分。方程的各参数见文献[2~3]。

由于II类匹配与I类匹配相比具有较大的非线性系数($K_{II} = 1.36K_I$)和失配角接收半宽度($\Delta\theta_{FWHM}^{II} = 1.9\Delta\theta_{FWHM}^I$),因此采用II类匹配的晶体容易获得较高的转换效率。图1及图2分别画出了长度为1.4及3.0cm的II类KDP晶体的理论计算曲线。由这些曲线可以看出一些由小信号近似所不能预测的现象。如:

1. 对一定长度的晶体,随着基频光功率密度的上升,调谐曲线的半高宽 $\Delta\theta_{FWHM}$ 逐渐减小。

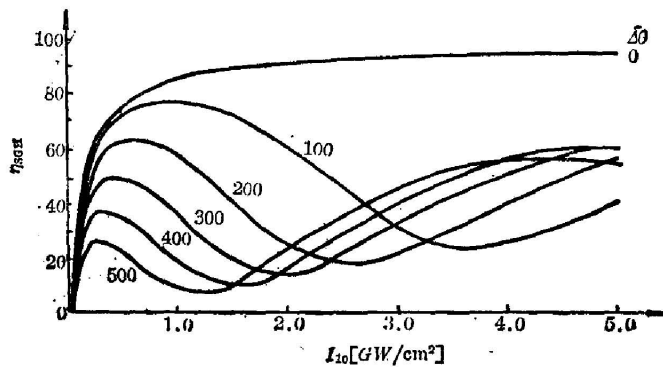
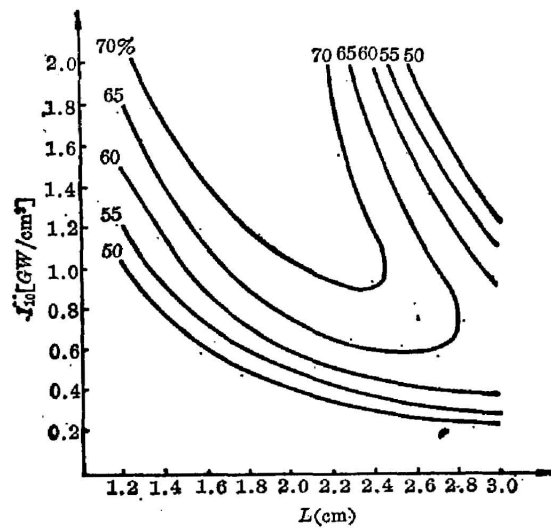


图2 3cm II KDP 的倍频转换效率特性曲线
Fig. 2 Doubling characteristics for a 3.0cm type II KDP crystal

2. 对一定的长度和失配角,随着基频光功率密度的上升,转换效率是起伏变化的,第二个极大值在 $\Delta\theta$ 较大时有可能大于第一个极大值,甚至可以达到较高的转换效率。但此时 η 对 $\Delta\theta$ 相当灵敏,因此并不实用。

3. 晶体的最佳长度 L_{opt} 不但与失配角有关,而且还与功率密度有关。

基于以上几点以及 $\Delta\theta_{FWHM}$ 随长度的增加而减小,因此要获得较高的转换效率,必须选择好晶体及激光器的各种参数。图3画出了II类KDP晶体在 $\Delta\theta = 200 \mu rad$ 时转换效率对晶体长度及激光功率密度的等高线,以便参考。

图3 $\eta_{2\omega}$ 对 I_{10} 和 L 的等高线图Fig. 3 $\eta_{2\omega}$ as a function of incident intensity I_{10} and L for type II KDP, $\Delta\theta=200 \mu \text{ rad}$

三、结果及讨论

1. 实验装置

为了对理论计算加以验证,并在功率密度不太高的情况下,获得高的转换效率,我们选用了一块 3cm 厚的 II 类 KDP 晶体(840910)来做实验。为防止 KDP 晶体在空气中潮解,用玻璃窗口把它密封在晶体盒内。窗口外侧镀有对基频和倍频光的双波长增透膜,窗口与晶体之间充满了折射率匹配液以减少 KDP 晶体端面反射的损耗。KDP 盒的总透过率为 $T_{1.06}=90\%$,并装在调谐精度为 $1.5''/\text{step}$ 的二维伺服调整架上。

本实验是在上海光学精密机械研究所六路钕玻璃激光装置的 $\phi 45 \text{ mm}$ 棒状放大器输入端进行的。激光脉冲宽度 $\sim 250 \text{ ps}$,光斑直径 $\phi 42 \text{ mm}$,平面波前,方向性为在 0.5 m rad 内占 70% 总能量($0.6 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 水平下)。实验光路如图 4 所示。图中 1 是 KDP 晶体盒,2、3 是取样板, $R \sim 8\%$ 4、6 是滤光片, $T_{1\omega}=70\%$, $T_{2\omega}=0$ 。卡计 7、9 分别用来测量入射与出射

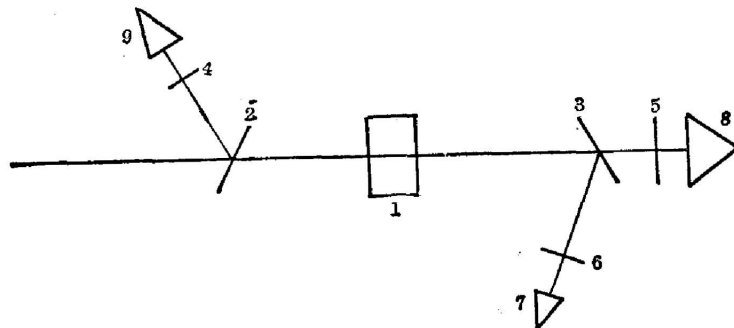


图4 实验光路图

Fig. 4 Experiment arrangement

的基频光的能量。卡计 8 测量倍频光输出的能量,并由三台卡计^[7]的能量平衡来保证数据的可靠性。KDP 晶体的外部转换效率 $\eta_{\text{外}} = E_2/E_1$, 内部转换效率 $\eta_{\text{内}} = E_2/(E_1 + E_2)$ 。 E_2 为倍频光能量, E_1 及 E_1' 分别为入射及出射的基频光能量,入射激光的脉宽是通过测量倍频光脉冲的波形推算得到的。

2. 实验结果及讨论

图 5 给出了 3 cm 厚 II 类 KDP 倍频转换效率 $\eta_{\text{总}}^*$ 对基频光功率密度 I_{10} 关系的实验点, 图上同时画出了在空气中的相位失配角 $\Delta\theta = 0, 100, 200$ 和 300 mrad 的理论计算曲线。光束口径 $\phi 42$ mm, 由图可见在本实验中 $\Delta\theta \sim 250 \mu\text{rad}$, 实验曲线与理论计算符合得较好。这表明理论计算的近似程度以及 KDP 晶体的调整精度都是可以的。当 $I_{10} \sim 0.27$ GW/cm² 时获得了本实验中的最高转换效率 $\eta_{\text{外}} = 61.5\%$, 对应的 $\eta_{\text{内}} = 73.3\%$, 实现了 $\phi 42$ mm 口径的高效率倍频输出。在 I_{10} 较低时, η_{SHG} 较大的原因可能是由于激光束的空间分布不均匀所引起的, 由于局部的 I_{10} 较高, 使得 η_{SHG} 也偏高, 同样的原因, 也使得在 I_{10} 较高时使转换效率下降。

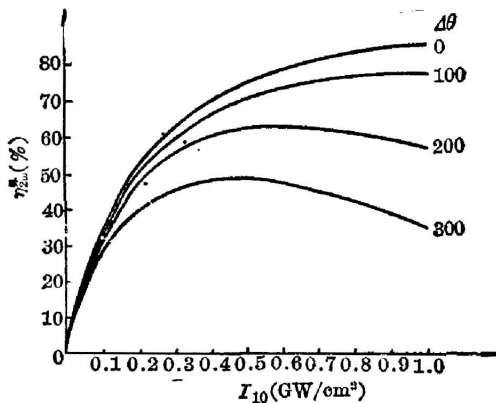


图 5 $\eta_{\text{总}}^*$ 对 I_{10} 的实验点和理论计算曲线比较

Fig. 5 Measured overall doubling energy efficiency of a 3-cm-thick KDP II type crystal as a function of input intensity I_{10} with an aperture of 42 mm. dashed lines: theoretical calculation for phase mismatch angle $\Delta\theta = 0, 100, 200, 300 \mu\text{rad}$, average over Gaussian temporal profile

不均匀所引起的, 由于局部的 I_{10} 较高, 使得 η_{SHG} 也偏高, 同样的原因, 也使得在 I_{10} 较高时使转换效率下降。

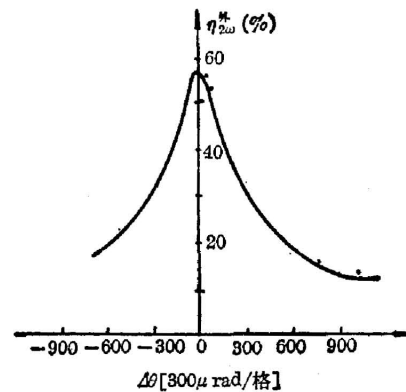


图 6 实验调谐曲线, 3 cm II KDP

Fig. 6 Experimental detuning curve for a 3 cm II KDP at $I_{10} \sim 0.6$ GW/cm²

图 6 示出了在 $I_{10} \sim 0.6$ GW/cm² 时的实验调谐曲线, 由于此时 I_{10} 较高, 测得的 $\Delta\theta_{\text{FWHM}} \sim 600 \mu\text{rad}$, 比小信号的 $\Delta\theta_{\text{FWHM}} = 1100 \mu\text{rad}$ 小了近一倍。这与理论计算的趋势及数值都是相符的。由于晶体较厚, 转换效率对 $\Delta\theta$ 的变化非常灵敏, 因此在本实验中出现了些离散的实验点。在本实验中, KDP 晶体及折射率匹配液在功率密度约 1.1 GW/cm² 的激光束多次辐照下仍未发现超负载损伤。

单块 KDP 厚晶体倍频具有结构简单的特点, 在低功率密度下能获得高转换效率, 但它对相位失配角的依赖关系十分灵敏, 实验条件较苛刻, 稳定性较差, 而且对应于高效倍频的基频光功率密度的功率范围小, 不能对激光器较大的输出范围都保持高转换效率, 适应性较差。但单块晶体倍频是两块晶体倍频的基础, 在理论和实验上弄清和掌握单块晶体倍频的规律具有重要的意义。

本工作是在邓锡铭教授的关心和支持下进行的,并得到了上海光学精密机械研究所六路钕玻璃激光装置运行组的大力支持,还得到崔志光、王治安、李庆国、梁向春同志的帮助,一并致谢。参加本工作的还有 304 组全体同志。

参 考 文 献

- [1] J. A. Srmstrong, N. Bloembergen; *et al.*; *Phys. Rev.*, 1962, **127**, No. 9 (Sep), 1918.
- [2] R. S. Craxton; *IEEE J. Q. E.*, 1981, **QE-17**, No. 9 (Sep), 1771.
- [3] R. S. Craxton *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1981, **QE-17**, No. 9 (Sep), 1782.
- [4] G. J. Linford *et al.*; *Appl. Opt.*, 1982, **21**, No. 20 (Oct), 3633.
- [5] 范琦康等;《激光》, 1979, **6**, No. 3, 14.
- [6] E. F. Ibragimov *et al.*; *Sov. J. Q. E.*, 1982, **12**, No. 6 (Jun), 714.
- [7] 林康春等;《中国激光》, 1983, **10**, No. 6, 86.

High-efficiency frequency doubling using a large-aperture KDP crystal

CAI XIJIE SHU MEIDONG QIN WENHUA AND DAI MEILAN
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 30 April 1985)

Abstract

Using a 3-cm-thick type II KDP crystal at input intensity of 0.27 GW/cm^2 , an overall doubling energy conversion efficiency up to 61.5% has been achieved in our experiments. The $1.06 \mu\text{m}$ laser beam has an aperture of 42 mm and a divergence of $\sim 0.5 \text{ mrad}$. The temporal distribution of the intensity is nearly Gaussian. Experimental results are in agreement with theoretical calculation.