

大口径 KDP 晶体高效率倍频的实验研究

魏晓峰 张小民 隋展 袁晓东*

(西南核物理与化学研究所, 成都 610003)

摘要: 本文介绍了利用直径为 50 mm、II 类匹配的 KDP 晶体进行单块晶体倍频和双块晶体串接倍频的实验结果。输入基频激光功率密度分别为 2.8 GW/cm^2 和 2.2 GW/cm^2 时, 单块与双块晶体倍频能量转换效率分别为 70% 和 67%。并对实验结果进行了讨论。

关键词: 大口径 KDP 晶体, 高效率倍频。

Experimental research on efficient frequency doubling using a large aperture KDP crystal

Wei Xiaofeng, Zhang Xiaomin, Shui Zhan, Yuan Xiaodong
(Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu)

Abstract: Experimental results are reported by using a 50 mm diameter type II matched KDP crystal and a tandem KDP crystal for frequency doubling. Overall energy conversion efficiency up to 70% and 67% have been measured at an input laser intensity of 2.8 GW/cm^2 for the monolithic and 2.2 GW/cm^2 for the tandem doubling respectively. The experimental results are analysed and discussed.

Key words: large-aperture KDP crystal, efficient frequency doubling

在激光等离子体物理实验中, 激光波长是一个重要的参数。在适当的功率密度条件下, 采用短波长激光打靶, 能够大幅度提高靶对激光的吸收, 显著增加消融压力, 提高 X 光的转换效率减小激光的后向散射, 相当好地消除了高能 X 射线辐射的影响。目前, 国外很多实验室都利用大口径非线性晶体, 在高功率钕玻璃激光系统上实现了 2 次、3 次等倍频激光输出^[1], 在激光等离子体物理实验中取得了令人满意的结果。国内在高功率激光倍频方面也做了一些工作^[2, 3], 但基频激光的功率密度并不高, 一般在 1 GW/cm^2 以下, 这样的功率密度一般不能满足物理实验的要求。为此, 本文利用 LF-11* 激光装置, 在高功率密度条件下, 进行了大口径 KDP 晶体倍频的实验研究。其目的是研究倍频效率同失配角 $\Delta\theta$ 、基频光功率密度 I_0 等因素的关系, 以及单块晶体倍频和双块晶体串接倍频的动态范围, 考核倍频器和准直调整系统。

一、原 理

1.1 单块晶体倍频

根据耦合波方程理论推导, 在小信号近似的情况下, 倍频光的转换效率为

收稿日期: 1988 年 12 月 8 日。

* 参加本工作的还有刘华、徐冰、雷星、刘米香、张建波、冯静等同志。

$$\eta_{\text{SHG}} = \omega^2 d_{\text{eff}}^2 L^2 I_{\omega} \left(\frac{\sin \beta \Delta \theta}{\beta \Delta \theta} \right)^2$$

式中, ω 为基频光角频率; L 为晶体长度; I_{ω} 为基频光功率密度; d_{eff} 为晶体的有效非线性系数, 在 II 类匹配方式中, KDP 晶体的有效非线性系数 $d_{\text{eff}} \approx \sin 2\theta \cdot \cos 2\varphi$; $\sin \beta \Delta \theta / \beta \Delta \theta$ 为相位匹配因子; θ 为相位匹配角, 系指基频光在晶体中相对于 z (光) 轴的方向; $\Delta \theta$ 为失配角, 即基频光偏离 θ 的量。

从上式中看出, 如果 $\Delta \theta \neq 0$, 由于 $\beta \propto L$, 则 η_{SHG} 沿晶体长度方向呈周期性变化, 这将对倍频光的输出是极为不利的, 故此, 在基频光功率一定时, 选取合适的晶体长度是提高倍频光输出的一个有效途径。

如果 $\Delta \theta = 0$, 则 $\sin \beta \Delta \theta / \beta \Delta \theta = 1$, 此时 $\eta_{\text{SHG}} = \eta_{\text{SHGmax}}$, 故将 $\Delta \theta = 0$ 称为相位匹配条件, 它是有效产生倍频光的一个重要条件。

1.2 双块晶体串接倍频

在小信号近似情况下对耦合波方程求解, 可清楚地看到串接晶体倍频的转换效率为

$$\eta_{\text{SHG}} \propto I_{\omega} \left[\frac{e^{i\Delta K_1 L_1} - 1}{i\Delta K_1 L_1} + R e^{i(\varphi + \Delta K_1 L_1)} \frac{e^{i\Delta K_2 L_2}}{i\Delta K_2 L_2} \right]$$

式中 $R = d_2 L_2 / d_1 L_1$, L_1 、 L_2 分别为两块晶体的长度; φ 为晶体间空气等介质引起的基频光与倍频光的相位差

当 $\Delta K_1 = -\Delta K_2$, $L_1 = L_2$ 时, 上式变为

$$\eta_{\text{SHG}} \propto I_{\omega} \left(\frac{e^{i\Delta K_1 L_1} - 1}{i\Delta K_1 L_1} \right) (1 + e^{i\varphi})$$

要使 $\Delta K_1 = -\Delta K_2$, 只需使两块晶体的光轴相对取向即可。

当 $e^{i\varphi} = 1$ 时, $\eta_{\text{SHG}} \propto 2I_{\omega} \left(\frac{e^{i\Delta K_1 L_1} - 1}{i\Delta K_1 L_1} \right)$ 式最大。此时, $\varphi = 2n\pi$ 。若 $\varphi = (2n+1)\pi$, 则 $e^{i\varphi} = -1$, $\eta_{\text{SHG}} = 0$, 即第二块晶体中的差频将第一块晶体中所获的倍频激光又变回到基频激光上去了。

因为 $\Delta K \propto \beta \Delta \theta$, 当 $\Delta K_1 = -\Delta K_2$ 时, $\Delta \theta_1 = -\Delta \theta_2$, 即两块晶体的失配角反向, 故此在较大的失配角范围内, 第一块晶体的失配是被第二块晶体的失配量有效地补偿了, 即降低了对调节精度的要求。

二、实验装置

LF-11* 激光装置是目前国内较大的高功率激光系统, 最高输出激光功率为 10^{11} W。为了提高末级输出的激光功率密度, 利用缩孔望远镜将 $\phi 64$ mm 的激光束缩束, 并使其同 KDP 晶体的有效孔径匹配, 此时激光束的远场发散角为 0.45 mrad, 输出基频激光波面半径 ~ 500 m, 输出功率密度为 $0.5 \sim 5.5$ GW/cm²。

根据理论计算, 采用 $\phi 50 \times 12$ mm II 类匹配的 KDP 晶体作为倍频晶体。晶体的

$$d_{36} = (1.04 \pm 0.05) \times 10^{-9} \text{ e} \cdot \text{s} \cdot \text{u}',$$

光吸收系数 $\alpha = 1.8 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1} (1.064 \mu\text{m})$, 定轴误差 $< 8''$ 。为了防止晶体在空气中的潮解和减小其端面的菲涅尔反射损耗, 将 KDP 晶体密封在充满折射率匹配液 ($n_D = 1.385$, 厚度 ~ 0.4 mm) 的晶体盒内。晶体盒的输入, 输出窗口分别镀 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $0.53 \mu\text{m}$ 波长的增透

膜, 整个晶体盒对 $1.06 \mu\text{m}$ 基频光的透过率 $>90\%$ 。为了保证在实验中精确地调整晶体的相位匹配角, 晶体盒安装在高精度二维伺服调整架上, 其调节精度为 $1''/\text{step}$ 。实验中晶体的相位匹配方式采用临界相位匹配。另外, 我们发现选用合适的折射率匹配液以及晶体盒的超净装配, 是保证 KDP 晶体在高功率条件下安全工作的先决条件。图 1 所示为实验光路图。

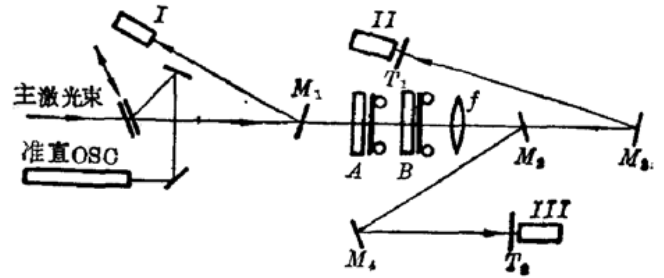


图 1 2ω 倍频实验光路图

I、II、III—Apollo 激光能量卡计;
 T_1 、 T_2 —滤光片; M_1 、 M_3 、 M_4 —取光镜;
 M_2 —分离膜 ($R_{1.06}=100\%$, $T_{0.53}=75\%$);
 A、B— $\phi 50 \text{ mm}$ KDP 晶体; f —透镜

实验中为了避免频繁地启动激光系统以及研究晶体相位匹配角自动调整方法, 安装了一台输出特性同主激光相似的重复率全主动锁膜-调 Q 振荡器来专门调整晶体, 并利用一套特殊的光学系统来保证该振荡器输出激光束同主激光束的精确同轴, 以提高调整精度。

实验中分别利用三台 Apollo 激光能量卡计测量激光能量。Apollo(I) 测量基频光能量 E_w , Apollo(II) 测量倍频光能量 E_{2w} , Apollo(III) 测量剩余基频光能量 E'_w 。其中 Apollo(I) 卡计是经过国家计量院标定过的, 测量误差 $\leq 3\%$ 。三台卡计的能量平衡保证了实验数据的可靠性。根据倍频转换效率的定义, 倍频晶体的外部与内部能量转换效率分别为

$$\eta_{\text{外}} = E_{2w} / E_w \text{ 和 } \eta_{\text{内}} = E_{2w} / (E_{2w} + E'_w)$$

三、实验结果及分析

在输入基频激光功率密度 $I_w = 2.0 \pm 0.2 \text{ GW/cm}^2$ 的条件下, 测得的单块 KDP 晶体调谐曲线示于图 2。得到厚度为 12 mm 的 II 类匹配 KDP 晶体的调谐半宽度为

$$\Delta\theta_{\text{FWHM}} = 2.45 \text{ mrad.}$$

实验曲线同文献[4]报道基本相符。

理论分析和实验结果都证明在单块 KDP 晶体倍频中, 薄晶体同厚晶体相比具有调谐半宽度宽, 在高功率密度下能保持较高转换效率的特点, 有利于提高整个倍频系统的输出稳定性。

图 3 示出了 $\eta_{\text{内}} - I_w$ 的实验曲线。当 $I_w = 2.8 \text{ GW/cm}^2$ 时, 得到最高外部能量转换效率为 70% 。从图 3 不难看出, 内部能量转换效率实验曲线同 $\Delta\theta = 300 \mu\text{rad}$ 的理论曲线吻合的较好, 这就证实了理论分析所预示的现象, 即对

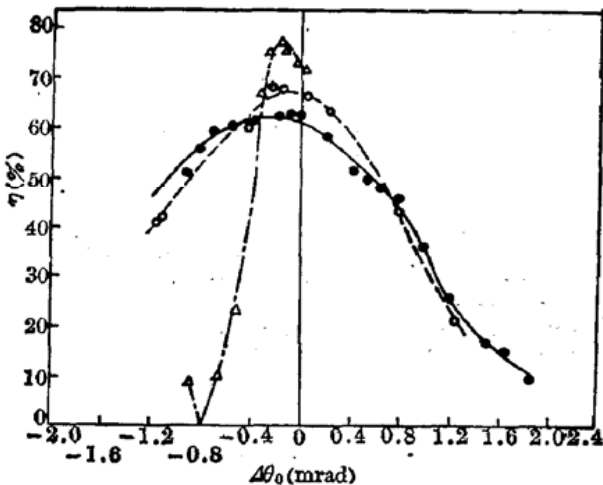


图 2 $\phi 50 \times 12 \text{ mm}$ II 类匹配 KDP 晶体在 $I_w = 2.0 \pm 0.2 \text{ GW/cm}^2$ 情况下的调谐曲线

●—实验点; ○、 Δ —文献[4]所给结果。

一定厚度的 KDP 晶体, 当失配角一定时, 随着基频激光功率密度的上升, 转换效率将起伏变化。因此应根据激光系统经常运行的功率水平选择 KDP 晶体的厚度。

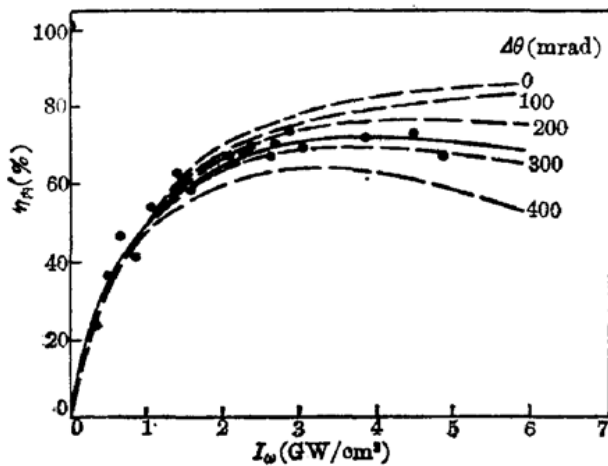


图3 单块 $\phi 50 \times 120\text{mm}$ KDP(II)晶体的 $\eta_n - I_w$ 特性曲线

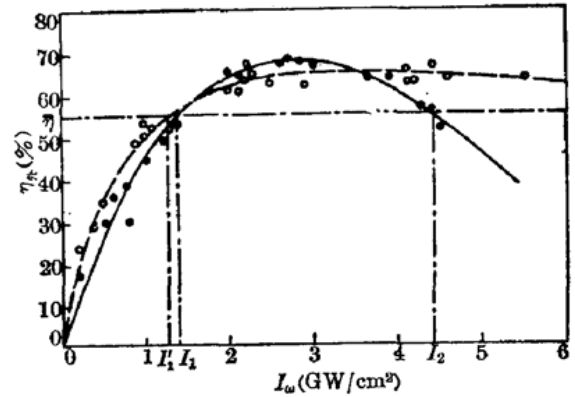


图4 单块晶体倍频与双块晶体串接倍频的 $\eta_n - I_w$ 特性曲线比较

● 为单块晶体倍频的实验点；
○ 为双块晶体串接倍频的实验点

理论分析表明双块 KDP 晶体串接倍频同时结合了单块厚晶体和薄晶体的优点，由于具有动态范围 Ω 大，调谐半宽度较宽的特点，有利于实现倍频器的稳定输出。图 4 所示为双块 KDP 晶体倍频的 $\eta - I_w$ 曲线。根据动态范围的定义： $\Omega(\bar{\eta}) = I_2/I_1$ 若取 $\bar{\eta} = 55\%$ ，则对于单块 KDP 晶体倍频有

$$I_1 = 1.41 \text{ GW/cm}^2, I_2 = 4.42 \text{ GW/cm}^2$$

则

$$\Omega_{\text{单}}(55\%) = 3.13,$$

对于双块 KDP 晶体串接倍频，有 $I'_1 = 1.27 \text{ GW/cm}^2 < I_1, I'_2 > I_2$ ，

$$\Omega_{\text{双}}(55\%) > \Omega_{\text{单}}(55\%)。$$

实验的结果完全证实了理论分析。

当基频光功率密度为 2.7 GW/cm^2 时，双块晶体串接倍频所获得的最高外部能量转换效率为 67% 。转换效率低于单块晶体倍频，主要是由于倍频器对基频光损耗太大 ($\sim 10\%$)，因此进一步减小倍频器的损耗是一个急待解决的问题。

双块 KDP 晶体串接倍频中，适当调节两块晶体间的距离是获得高倍频转换效率的关键之一。否则根据理论上的分析，第 2 块 KDP 晶体中的差频效应将把第 1 块晶体所产生的倍频光又变回到基频光上，使倍频效率大大下降。实验中发现，双块晶体之间的距离为 $(2n+1) \times 65 \text{ mm}$ ($n=0, 1, 2, \dots$)。实验中我们还对倍频器的工作稳定性进行了考核，当激光系统输出激光参数基本一定时，单块晶体倍频的转换效率起伏 $\leq 10\%$ ，双块晶体串接倍频的转换效率起伏 $\leq 5\%$ 。完全能够满足实际工作的要求。

王子久同志设计了倍频器。山东大学晶体所提供了大口径 KDP 晶体，在此谨表感谢。

参 考 文 献

- 1 G. J. Linford *et al.*, *Appl. Opt.*, **21** (20), 3633 (1982); W. Sekes *et al.*, *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-17** (9), 1689 (1981)
- 2 蔡希洁, 戴美兰 *et al.*, *光学学报*, **6** (12), 1898 (1986)
- 3 尤晨华, 陆祖康 *et al.* *光学学报* **6** (5) 413 (1986)
- 4 W. L. Smith, LLNL, *Laser Program Annual Report*, **1**, 2~255 (1980)