

大口径 KDP 晶体高效率串接倍频

蔡希洁 戴美兰 郎家俊 陆瑞熙

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

覃文骅

(中山大学物理系)

提 要

本文给出了串接倍频的原理及两块晶体相对取向的要求。利用两块 1.4cm 厚的 II 类 KDP 晶体串接, 入射基频激光强度为 $0.33 \sim 0.67 \text{ GW/cm}^2$, 外转换效率达到 60% 以上, 激光束口径为 $\phi 42 \text{ mm}$ 。实验结果与计算值符合很好。

本文将 $L_1=L_2=1.4 \text{ cm}$ 的串接倍频器与厚度分别为 3cm 和 1.4cm 的单块晶体倍频器的实验特性作了比较, 表明串接倍频器同时兼有单块厚晶体倍频器和单块薄晶体倍频器的优点。

一、引 言

由于实际上存在着多种因素的影响, 倍频晶体中总有一定的相位失配存在, 这使得倍频转换效率的提高遇到一定的困难。特别是在功率密度较低的情况下, 仅靠增加晶体长度来获得高转换效率要受到最佳长度 L_{opt} 的限制, 而且晶体越长, 失配角的接收半宽度也越小, 调试就越困难。人们采用两块晶体串接的概念^[1~6, 8], 使两块晶体中同一方向的失配角, 所引起的失配量的符号相反, 来克服这一困难。这可以由改变两块晶体的相对取向来获得。本文对串接倍频的理论给予详细的讨论, 并用两块 1.4cm 的 II 类 KDP 晶体在 $0.33 \sim 0.67 \text{ GW/cm}^2$ 的功率密度下, 获得 $> 60\%$ 的倍频转换效率。

二、理 论

众所周知, 描述倍频过程的耦合波方程为:

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

如果我们忽略吸收项, 即 $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$, 并设在两块晶体内没有任何损耗, 则在小信号近似下可以很清楚地看出串接倍频的优越性。

$$\begin{aligned}
 E_2 &= -iK E_1^2 \int_0^{l_1+l_2} \exp\left(i \int_0^z \Delta k dz\right) dz \\
 &= -iK E_1^2 \left\{ \int_0^{l_1} \exp(i\Delta k_1 z) dz + \exp(i\phi) \int_{l_1}^{l_1+l_2} \exp\left(i \int_0^z \Delta k dz\right) dz \right\} \\
 &= K E_1^2 \left\{ \frac{1 - \exp(i\Delta k_1 l_1)}{\Delta k_1} + \exp\left[i(\phi + i\Delta k_1 l_1)\right] \frac{1 - \exp(i\Delta k_2 l_2)}{\Delta k_2} \right\}, \tag{2}
 \end{aligned}$$

其中 ϕ 为在晶体之间空气等媒质所引起的基频与倍频光的相位差

当 $\Delta k_2 = -\Delta k_1, l_1 = l_2$ 时

$$E_2 = K E_1^2 \left(\frac{1 - \exp(i\Delta k_1 l_1)}{\Delta k_1} \right) [1 + \exp(i\phi)]. \tag{3}$$

要使 $\Delta k_2 = -\Delta k_1$, 只须使两块晶体的光轴相对取向, 如图 1 所示。图 2 示出了 Δk 变号的原理图。对同一根失配光线(如在匹配方向的右边), 由于它在如图 1 所放置的两块晶体中所引起的失配角的符号相反, 因为 $\Delta k = \beta \Delta \theta$, 所以失配量 Δk_1 与 Δk_2 也反号。为获得高的转换效率, 只要适当调整两块晶体的距离, 使 $\phi = 2n\pi$ 即可(在空气中能产生 $\phi = \pi$ 的长度为 65 mm)。这时:

$$|E_2|^2 = (K |E_1|^2)^2 (2l_1)^2 \sin^2(\Delta k l_1 / 2). \tag{4}$$

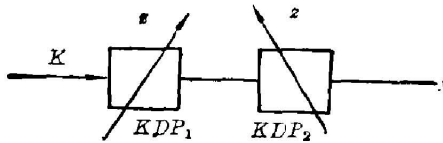


Fig. 1 Relative orientations of tandem crystals

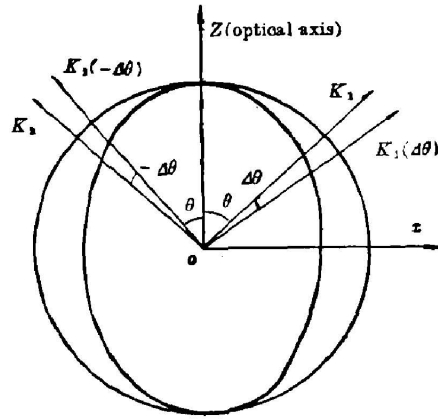


Fig. 2 Principle of change in sign of phase mismatch Δk

(4)式表明, 在较大的失配角范围内, 第一块晶体的失配量被第二块晶体最佳地补偿了。两块晶体串接的结果是: 倍频转换效率与晶体总长度 ($L = l_1 + l_2 = 2l_1$) 的平方成正比, 而由于相位失配 Δk 所引起的转换效率的下降只与单块晶体 l_1 的情况相同。即降低了对调整精度的要求, 增加了倍频器的稳定性。

如 $\phi = (2n+1)\pi$ 时, 由(3)式得: $E_2 = 0$ 。

即在第二块晶体中的差频把从第一块晶体中所获得的倍频光又全部变回到基频上去了, 这是要尽力避免的^[4]。

为了对在高功率密度下的转换特性作进一步的了解, 并尽量

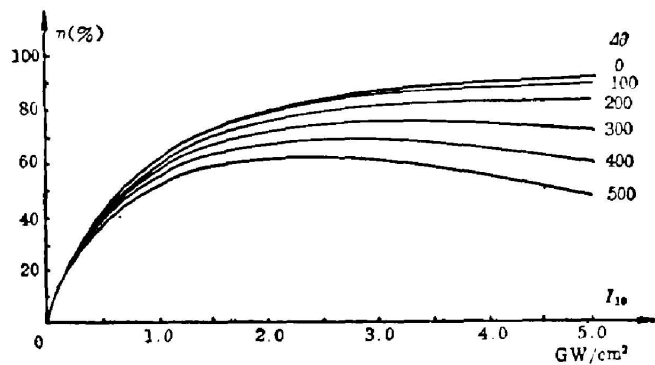


Fig. 3 Doubling characteristics of a 1.4 cm type-II KDP crystal detuned 0~500 μ rad from phase matching; are raged over the Gaussian temporal profile

与实验情况相近,我们对(1)式作数值解,对光脉冲的时间分布为高斯型作数值积分。并考虑到晶体表面在加了折射率匹配液后仍有 $\sim 1\%$ 的端面反射。其它参数见文献[11]。图3及图4分别画出了单块1.4cm,两块1.4cm串接的II类KDP晶体的转换效率随入射光功率密度变化的特性曲线。

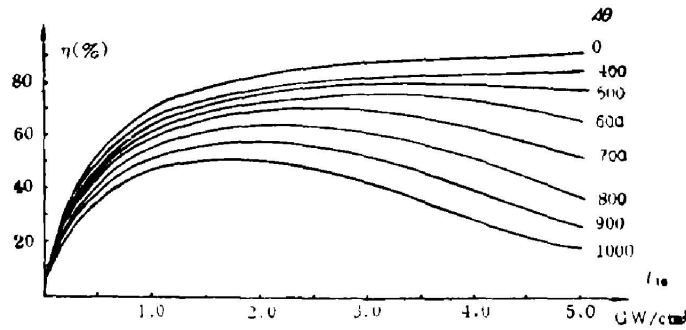


Fig. 4 Doubling characteristics of a 1.4cm type-II KDP crystals detuned $0\sim 1000\ \mu\text{rad}$ from phase matching

三、实验装置

选用两块厚度均为1.4cm的II类KDP晶体来做串接倍频的实验。 $\phi 70\text{mm}$ 的KDP晶体是由中国科学院福建物构所生长的。为了防止晶体在空气中潮解,把KDP晶体密封在晶体盒内,玻璃窗口的内侧镀敷对基频及倍频光都增透的膜层,内侧和晶体之间填充了折射率匹配液,为了防止在高功率密度下,折射率匹配液被打坏,整个KDP晶体盒是超净组装

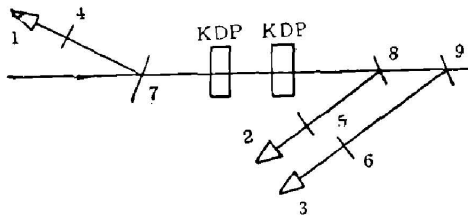


Fig. 5 Experimental setup

而成。总透过率 $T_{1\omega}=90\%$ 。KDP盒安装在二维伺服调整架上,调整角精度为 $1.5''/\text{step}$ 。

总体实验在我们研究所的六路激光装置上 $\phi 45\text{mm}$ 棒状放大器输出端进行的^[9],激光波长为 $1.06\ \mu\text{m}$,脉宽250ps,光斑直径 $\phi 42\text{mm}$,为平面波前,其方性(用列阵相机测定)为 0.5mrad 内占70%能量($0.6\text{GW}/\text{cm}^2$ 水平下)。实验光

路如图5所示。用卡计^[7]1,2监测输入及输出的基频光能量 E_1 及 E'_1 ,卡计3监测输出倍频光能量 E_2 ,滤光片4,5, $T_{1\omega}=70\%$, $T_{2\omega}=0$ 滤光片6, $T_{1\omega}=0$, $T_{2\omega}=68\%$,分光板7,8,9 $R=8\%$ 。外转换效率 $\eta_{\text{外}}=E_2/E_1$,内转换效率 $\eta_{\text{内}}=E_2/(E'_1+E_2)$ 。

四、实验结果及讨论

串接倍频器的调试程序是这样的,首先将第一块KDP晶体调谐到最佳相位匹配方向上,再加入第二块晶体,作串接倍频器对第二块晶体的角度调谐曲线,找到最佳的相位匹配方向后,再做串接倍频器的 $\eta_{\text{外}}-I_{10}$ 特性曲线。

图 6 给出了第一块晶体的角度调谐曲线,测得的 $\Delta\theta_{FWHM} \sim 2400 \mu\text{rad}$, 表明薄晶体的失配角半宽度 $\Delta\theta_{FWHM}$ 较大。图 7 给出了第一块 KDP 晶体的倍频转换效率随基频功率密度变化的特性曲线, 图上还画出了 $\Delta\theta = 0$, $600 \mu\text{rad}$ 的理论计算曲线。当功率密度为 $1.33 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 时, 获得了本实验中单块晶体的最高倍频转换效率 $\eta_{\#} = 45.5\%$, 对应的 $\eta_{\text{理}} = 50.5\%$ 。

按串接倍频的要求加入第二块 KDP 晶体, 图 8 给出了串接倍频器对第二块 KDP 的角度调谐曲线, 测得 $\Delta\theta_{FWHM} = 2480 \mu\text{rad}$, 其数值与单块晶体的情况相同。表明在角度调谐的特性方面, 串接倍频器仍具有与单块薄晶体相同的优点, 即 $\Delta\theta_{FWHM}$ 较大。调谐精度要求较低。

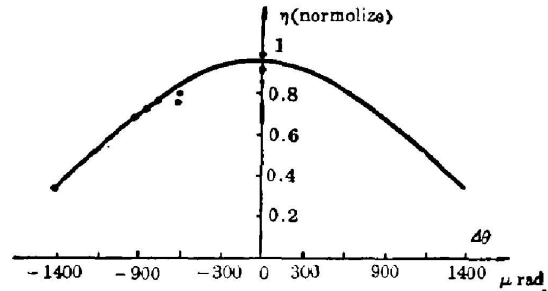


Fig. 6 Measured detuning curve of a 1.4 cm type-II KDP crystal

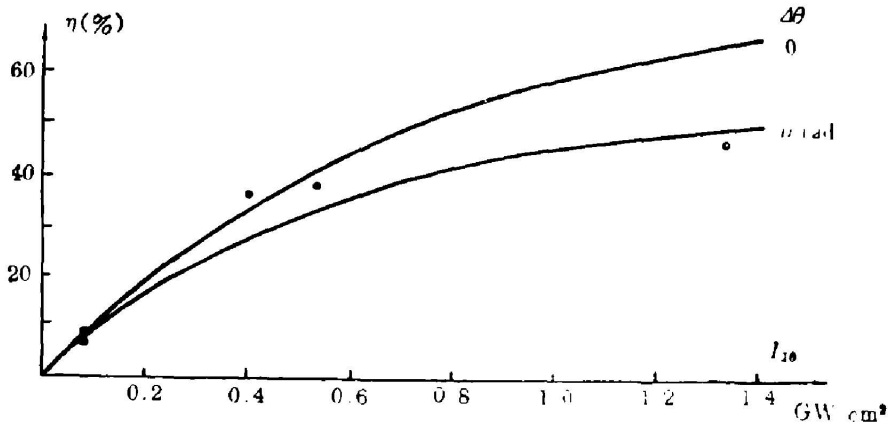


Fig. 7 Measured overall doubling energy efficiency of a 1.4-cm-thick type-II KDP crystal as a function of input intensity I_{10} with an aperture of 42 mm. Dashed line: theoretical calculation for phase mismatch angle $\Delta\theta = 0.600 \mu\text{rad}$, averaged over Gaussian temporal profile

图 9 给出了串接倍频器的 $\eta_{\#} - I_{10}$ 特性曲线。在 $I_{10} = 0.5 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 时获得了最大的倍频转换效率 $\eta_{\#} = 63\%$ 对应于 $\eta_{\text{理}} = 77.8\%$ 。实现了 $\phi 42 \text{ mm}$ 大口径高效率的倍频输出。在入射功率密度范围内, 折射率匹配液及 KDP 晶体都没有出现超负载破坏。

为了能够更清楚地看出串接倍频的特点, 现将实验得到的单块 1.4、3.0 cm 及两块 1.4 cm 串接 KDP 倍频的实验曲线集中在图 10 上。从图上可以清楚地看出, 串接倍频器的特性曲线比单块晶体的要好。在低功率密度时 ($I_{10} < 0.3 \text{ GW}/\text{cm}^2$), $\eta_{\#} < \eta_{3 \text{ cm}}$, $\eta_{3 \text{ cm}}$ 在 $0.3 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 处达到峰值, 而 $\eta_{\#}$ 在 $0.5 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 处达到峰值。这都是理论所预期的, 因为串接倍频器的总长度 $L = L_1 + L_2 = 2.8 \text{ cm}$, 比单块 $L = 3 \text{ cm}$ 要小。实验测得 $\eta_{\#}$ 及 $\eta_{3 \text{ cm}}$ 的最高转换效率很接近。但值得注意的是在高功率密度区 ($I_{10} > 0.5 \text{ GW}/\text{cm}^2$), $\eta_{\#} > \eta_{3 \text{ cm}}$ 。这是因为串接倍频器具有相位失配自补偿的功能, 故转换效率的下降比单块的同样总长度的晶体

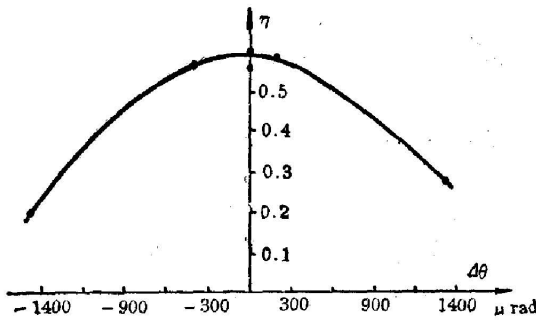


Fig. 8 Conversion efficiency of tandem KDP doubler as a function of phase mismatch angle of the second KDP crystal

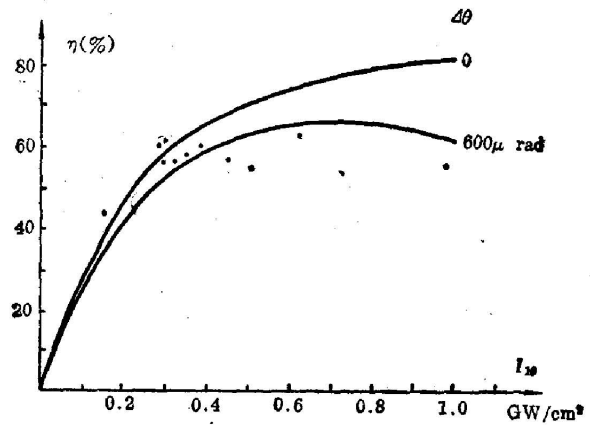


Fig. 9 Measured overall doubling efficiency η of the tandem doubler ($L_1 = L_2 = 1.4$ cm type-II KDP) as a function of input intensity I_{10} with an aperture of 42 mm. Dashed line: theoretical calculation curve for phase mismatch angle $\Delta\theta = 0.600 \mu\text{rad}$, averaged over Gaussian temporal profile

出现得要晚一些。如定义转换效率 η_0 的动态范围为 $\Omega(\eta_0) = \frac{I_{10\text{上限}}}{I_{10\text{下限}}}$ ，其中 $I_{10\text{上限}}$ 及 $I_{10\text{下限}}$ 的定义为仅当 I_{10} 处于 $I_{10\text{上限}} \geq I_{10} \geq I_{10\text{下限}}$ 区域内， $\eta > \eta_0$ 。由图 10 可知， $\Omega_{3\text{cm}}(55\%) = 3$ ，而 $\Omega_{\text{串}}(55\%) \approx 4$ ，显然串接倍频的动态范围比 3 cm 晶体的要大。其实用性能好。与 3 cm 的单块晶体实验曲线^[10]相比，我们还可以看出，串接倍频除了保持单块厚晶体在低功率密度下，具有较高的转换效率的优点外，还在较宽的功率密度范围内具有较大的失配角接收半宽度，使倍频器的输出比较稳定，离散点较小。

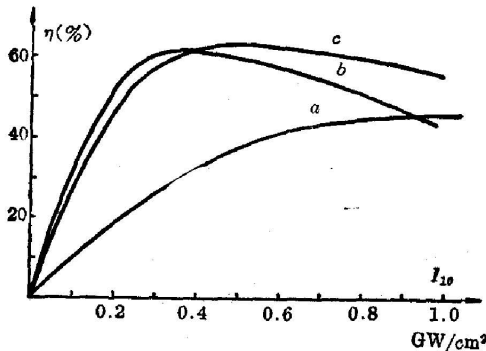


Fig. 10 Experimental characteristics for three kinds of doublers

a— $L = 1.4$ cm type-II KDP (840402), $\Delta\theta: 600 \mu\text{rad} \sim 700 \mu\text{rad}$; b— $L = 3.0$ cm type-II KDP (840901), $\Delta\theta: 270 \mu\text{rad}$; c— $L_1 = L_2 = 1.4$ cm type-II KDP tandem crystals (840402), $\Delta\theta: 600 \mu\text{rad} \sim 700 \mu\text{rad}$

要特别指出的是，单块 1.4 cm 及两块 1.4 cm 串接的 II 类 KDP 倍频器都运行在 $\Delta\theta \sim 60 \mu\text{rad}$ 甚至更大的相位失配状态，而单块 3 cm KDP 晶体运行在 $\Delta\theta \sim 270 \mu\text{rad}$ 的状态，两者差别是如此之大，然而串接倍频器仍然达到了同样高的倍频转换效率这一点，充分说明串接倍频器具有相位失配自补偿的功能使其对于激光性能、晶体质量以及调整精度等的要求比单块厚晶体倍频器要低。单块 1.4 cm 的 KDP 晶体由于比较薄，因此在低功率密度时转换效率不太高，但在高功率密度时转换效率仍保持上升趋势。

最后，通过对这些实验数据的比较，我们可以得出以下结论：

1. 单块厚晶体虽能在低功率密度下获得较高的转换效率，但随着功率密度的提高，转

换效率较快出现下降趋势,而且由于转换效率对失配角比较灵敏,因此整个倍频器输出不稳定。

2. 单块薄晶体的转换效率虽然在低功率密度下不高,但在较宽的功率密度范围内仍保持上升趋势,对失配角不灵敏,因此倍频器输出比较稳定。

3. 串接倍频同时结合了单块薄晶体及厚晶体的优点。不但在低功率密度下能获得高转换效率,而且随着功率密度的提高,仍能保持高转换效率。倍频器输出比较稳定。

本工作是在邓锡铭教授的关心和支持下进行的。本工作使用的 KDP 晶体是中国科学院福建物构所苏根博等同志提供的,此外李庆国同志研制了晶体盒窗口多波长增透膜,骆永山同志设计了晶体盒,范滇元同志提供了折射率匹配液的型号,在此一并志谢。

参加本工作的还有舒美冬、黄奎喜、葛夏平同志。

参 考 文 献

- [1] A. G. Akhmanov; *Thesis for candidate Degree*, (Moscow State University, 1969).
- [2] D. G. Gonzalez *et al.*; *IEEE JQE*, 1973, **QE-9**, No. 1 (Jan), 23~26.
- [3] V. G. Dmitriev *et al.*; *Sov. JQE*, 1975, **4**, No. 9 (Sep), 1083.
- [4] V. D. Volosov *et al.*; *Sov. JQE*, 1976, **6**, No. 10 (Oct), 1163.
- [5] M. A. Summers *et al.*; *Digest of Conference of Lasers and Electro-optics*, (Optical Society of America, Washington, D. C., 1981), 30.
- [6] *LLNL 1981 Annual Report*, 1981, 7-4.
- [7] 林康春等; *中国激光*, 1983, **10**, No. 3 (Mar), 186.
- [8] Б. В. Бокунь, *и др.*; *ЖИЦ*, 1982, **37**, No. 5, 748.
- [9] 谢梓铭等; *光学学报*, 1985, **5**, No. 3 (Mar), 211.
- [10] 蔡希洁等; *光学学报*, 1985, **5**, No. 11 (Nov), 975.
- [11] B. S. Craxton *et al.*; *IEEE JQE*, 1981, **QE-7**, No. 9 (Sep), 1782.

Large-aperture high-efficiency frequency doubling using tandem KDP crystals

CAI XITE, DAI MEILAN, LANG JIAJÜN AND LU RUIXI
(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

QIN WENHUA
(*Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou*)

(Received 24 February 1986; revised 7 April 1986)

Abstract

The theory of tandem SHG and the requirement on the relative orientations of two KDP crystals are discussed in detail. Using two 1.4-cm-thick type-II KDP tandem crystals, an overall energy efficiency higher than 60% was obtained in our experiment with the incident intensity ranging from 0.33 GW/cm² to 0.67 GW/cm². The laser beam had a diameter of 42 mm. The experimental results were in agreement with theoretical calculations.

The measured performance of the tandem doubler ($L_1=L_2=1.4$ cm) was compared with those of simple crystal doublers with thicknesses of 3 cm and 1.4 cm respectively. The tandem doubler was found to have a combined merit of both the thick crystal doubler and the thin crystal doubler.