

大口径光束高效三倍频理论和实验研究

丘志仁* 蔡希洁 郎家俊 黄奎喜 葛夏平 李戈平** 林康春

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

根据三频耦合波方程,研究了基波与谐波能量比,晶体长度、功率密度、角失配量和匹配类型等诸因素对三倍频最大可获转换效率的影响。大口径光束三倍频实验结果与理论计算相一致。用类型 II KDP 晶体三倍频,在中等功率密度下,获得了 43% 的能量转换效率。

关键词: 最三可获转换效率, 归一化角失配量。

一、引 言

随着高功率钕玻璃激光系统的建立,功率密度大大提高,光束方向性、均匀性又进一步改善,人们已获得 80% 以上的倍频效率^[1], Craxton^[2~5]为此发展了高功率激光高效三倍频理论及有效实验方案。不久,美国罗切斯特大学首次获得了 80% 的三倍频内转换效率,从而为激光核聚变系统向短波长发展展现了光明的前景。本文将系统地研究基波和谐波能量比、晶体长度、功率密度、角失配量和匹配类型等诸因素对大口径可获三倍频效率的影响。

二、三倍频最大效率及参数选择

根据 Craxton 高效三倍频方案^[3],尽可能使倍频器输入到三倍频器的有效作用,基波和谐波能量比 $(I_{10}/I_{20}) = \tan^2 \theta_B = 1/2$, 即参数 $\theta_B = 35.3^\circ$, 与文献[2]中倍频器前的 θ , 相对应。根据三倍频耦合波方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{dE_1}{dz} &= -\frac{1}{2} \gamma_1 E_1 - iK E_3 E_2^* \exp(-i\Delta k \cdot z), \\ \frac{dE_2}{dz} &= -\frac{1}{2} \gamma_2 E_2 - i2K E_3 E_1^* \exp(-i\Delta k \cdot z), \\ \frac{dE_3}{dz} &= -\frac{1}{2} \gamma_3 E_3 - i3K E_1 E_2 \exp(i\Delta k \cdot z), \\ \beta &= \frac{\partial \Delta k}{\partial \theta}, \Delta k = k_3 - k_1 - k_2, K = \frac{\pi (d_{eff})_{\max}}{\lambda_1 \sqrt{n_1 n_2 n_3 \epsilon_0}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 γ_i 为吸收系数, Δk 为波矢失配, β 为角度失配因子, K 为非线性耦合系数。从(1)式中

收稿日期: 1988年11月21日; 收到修改稿日期: 1990年5月8日

* 现在广州市中山大学激光与光谱学研究所(原上海光机所研究生)。

** 长春光学精密机械学院 87 届实习生。

忽略吸收, 不难得知三倍频效率

$$\left. \begin{aligned} \eta &\propto K^2 L^2 I_{12} \sin^2 \theta_E \sin^2 c^2 \left(\frac{1}{2} \Delta k \cdot L \right), \\ I_{12} &= I_{10} + I_{20}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 L 为晶体长度。因此, 只要 $KL\sqrt{I_{12}}$ 、 $\Delta k \cdot L$ 和 (I_{10}/I_{20}) 保持常数, 无论 K 、 L 、 I_{12} 和 Δk 怎样变化, 其转换效率将不变。分别定义参数: $G = \Delta\theta / \sqrt{I_{12}}$, $Q = [\beta \cdot \Delta\theta \cdot L / KL\sqrt{I_{12}}] = (\beta/K) \cdot G$ ($\Delta\theta$ 为角度失配量), 前者 G 称为归一化的角失配量, 后者 Q 将用来量度不同晶体、不同匹配时参数的选择。此外, 还可借助它们估算其最大可获得转换效率 η_{\max} 。

1. 最大可获得转换效率 η_{\max} 与 G 值的关系

(1) 图 1 为 KDP 三倍频器情形。显然 η_{\max} 随 G 的增大而减小。此外, 当 $G \geq 3 \times 10^{-4} \text{ cm}/\sqrt{\text{GW}}$, 即小功率大失配角时, 参数 θ_E 对 η_{\max} 影响较小, 而当 $G < 3 \times 10^{-4} \text{ cm}/\sqrt{\text{GW}}$, 即高功率或小失配情况下, θ_E 值对 η_{\max} 值影响较大, 最佳值 $\theta_E = 35.3^\circ$;

(2) 在最佳值 $\theta_E = 35.3^\circ$ 时, 比较 I、II 类匹配情况。对 KDP 晶体, $G < 4 \times 10^{-5} \text{ cm}/\sqrt{\text{GW}}$ 时, I 类比 II 类匹配效率高, 如图 1 所示。但目前运行的激光系统的 G 值通常在 $4 \times 10^{-5} \text{ cm}/\sqrt{\text{GW}}$ 以上, 则 II 类匹配是较好选择, 如将来系统进一步改善, I 类匹配将是最佳方案。但对 BBO 晶体, I 类和 II 类匹配的 $\eta_{\max} \sim G$ 曲线是重合的。

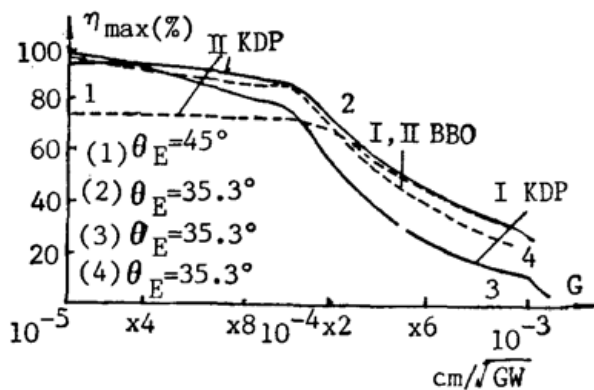


Fig. 1 Dependence of maximum attainable tripling efficiency on G

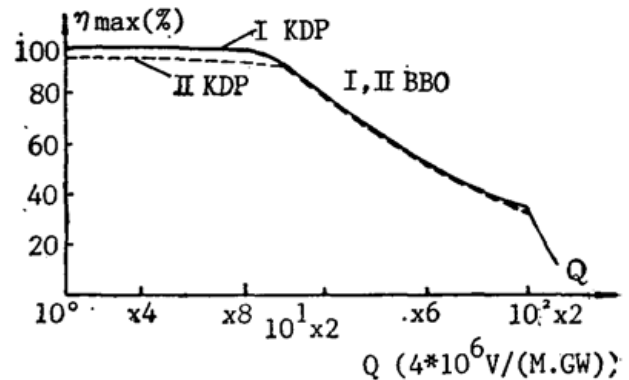


Fig. 2 Dependence of the maximum attainable tripling efficiency on Q , $\theta_E = 35.3^\circ$

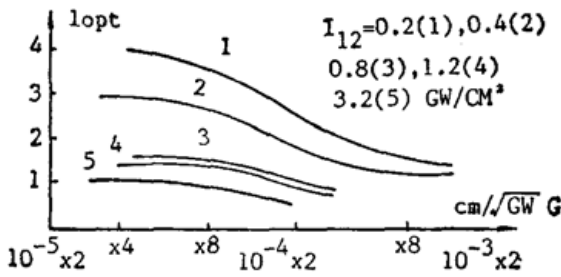
2. 最大转换效率与 Q 值的关系

图 2 作出了 I、II 类匹配下 $\eta_{\max} \sim Q$ 曲线, 结果表明, 无论是 KDP 晶体, 还是 BBO 晶体, 无论何类匹配, 只要 Q 值相同, 则它们的 η_{\max} 几乎相同。

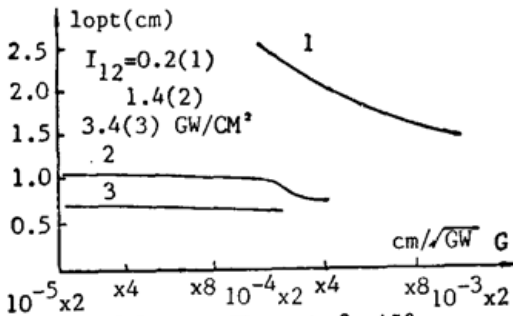
3. 最佳晶体长度 Q_{opt} 与 G 值的关系

图 3 显示了 KDP 晶体 I、II 类匹配, $\theta_E = 35.3^\circ, 45^\circ$; 及不同功率密度下的 $L_{\text{opt}} \sim G$ 曲线。随着功率密度的提高, L_{opt} 逐渐减小。BBO 晶体亦有类似结果, 如图 4 所示。不同的是对 KDP 晶体, $K^{\text{II}} = 1.22K^{\text{I}} = 1.13 \times 10^{-6} \text{ cm}/\text{V}$, $L_{\text{opt}}^{\text{I}} = 1.22L_{\text{opt}}^{\text{II}}$; 对 BBO 晶体, $K^{\text{I}} = 1.38K^{\text{II}} = 3.70 \times 10^{-6} \text{ cm}/\text{V}$, $L_{\text{opt}}^{\text{II}} = 1.38L_{\text{opt}}^{\text{I}}$ 。

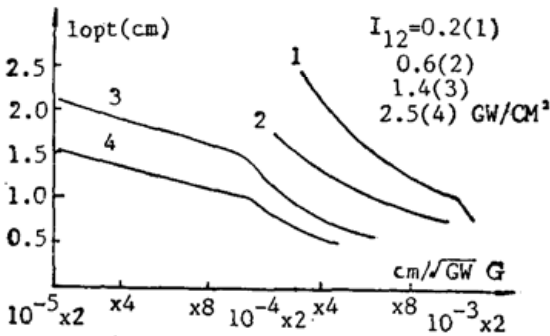
由以上分析可知, 若 $(\beta_1/K_1) \neq (\beta_2/K_2)$, 要获得相同转换效率 (即 Q 值相同), 则 $G_1 \neq G_2$ 。在光束角失配量不变的情况下, 则达到该转换效率所需功率密度不同, 而且晶体最佳长度也不同。



(a) Type II match. $\theta_E=35.3^\circ$



(b) Type II match. $\theta_E=45^\circ$



(c) Type I match. $\theta_E=0.35.3^\circ$

Fig. 3 Dependence of the optimal crystal length of KDP tripler on G

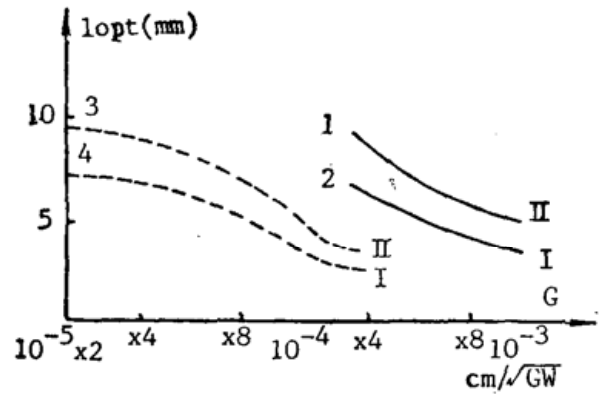


Fig. 4 Dependence of the optimal crystal length of BBO tripler on G

$\theta_E=35.3^\circ$. Type-I(2, 4), Type-II(1, 3).
 $I_{12}=0.2(1, 2), 1.4(3, 4)\text{GW/cm}^2$.

三、三倍频实验研究

1. 实验装置与参数选择

总体实验是在中国科学院上海光学精密机械研究所的六路钕玻璃激光系统中 $\phi 45\text{mm}$ 棒放大器的一束激光输出端进行的, 装置如图 5 所示。能量计 10、12、11、13 分别监测倍频器前后基波能量 W_1 、 W'_1 , 倍频光输出 W_2 和三倍频输出 W_3 。基波光放大 $1.064\ \mu\text{m}$, 脉宽约 $250\ \text{ps}$, 谱宽 $0.5\ \text{\AA}$, 光斑面积 $\phi 25$ 或 $\phi 40\ \text{mm}$, 总基波功率约 $0.3\ \text{GW/cm}^2$, 属中小功率, 原则上采用角度不失配的三倍频系统(I/II), 由于仅仅着重研究三倍频过程, 故前级倍频晶体仍采用对角度和温度不敏感的 II 类匹配 KDP 晶体, 厚度为 $3\ \text{cm}$, 如图 6 所示; 倍频效率 $\sim 40\%$, 相应的 $\theta_E \sim 48^\circ$, $I_{12} \sim 0.2\ \text{GW/cm}^2$, 角失配量 $\sim 150\ \mu\text{rad}$, 则 $G \sim 3.4 \times 10^{-4}\ \text{cm}/\sqrt{\text{GW}}$ 。由此从图 1 中, 采用 II 类 KDP 晶体作三倍频器, 有 $\eta_{\text{max}} \sim 56\%$, 若按图 3(b), $\theta_E \sim 45^\circ$ 情形估计三倍频晶体最佳长度 $L_{\text{opt}} \sim 2.1\ \text{cm}$ 。这里三倍频效率定义为

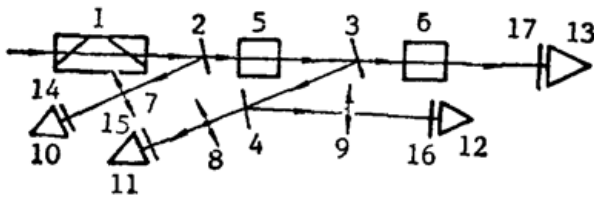


Fig. 5 Schematic of tripling experiments

1 polarizer (2~4) beamsplitters. (5, 6) doubler, tripler. (7~9) focal lens ($f=1m$). (10~13) calorimeters. (14~17) filters

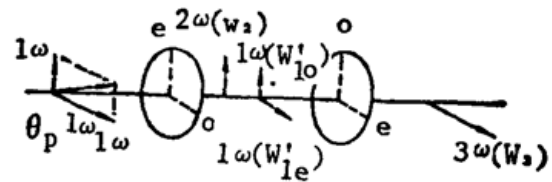


Fig. 6 Frequency tripling experimental polarization scheme

$$\eta = \frac{W_3}{(W_2 + W'_{1e})T_3}, \quad (3)$$

式中 T_3 为三倍频器的透过率。

2. 实验结果分析

(1) 角度调谐曲线

2.4cm 和 1.4cm 两块 KDP 三倍频晶体的角度调谐实验半宽为 $500 \mu rad$, $1100 \mu rad$, 实验条件是 $I_{10} \approx I_{20} \approx 0.1 GW/cm^2$, 实验值和理论谱半宽 $450 \mu rad$ 和 $1000 \mu rad$ 相符合。图 7 给出了 1.4cm 厚 KDP 三倍频晶体的角度调谐实验曲线。

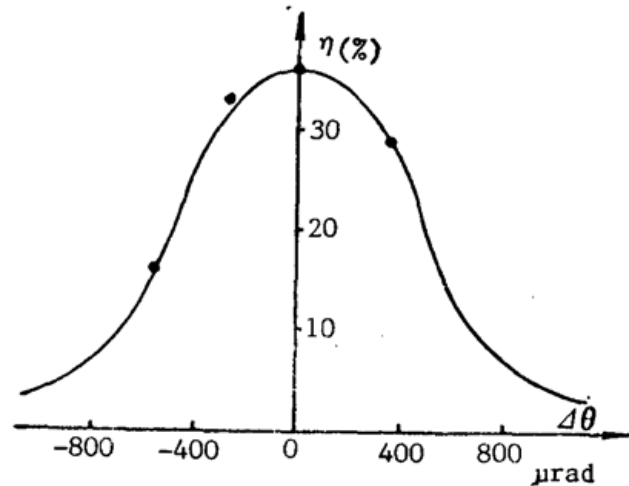
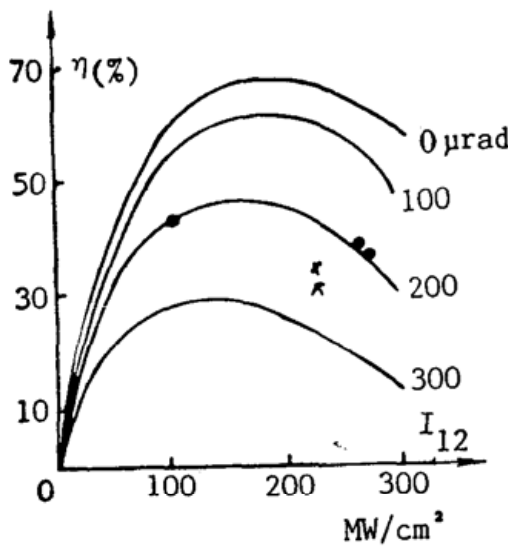


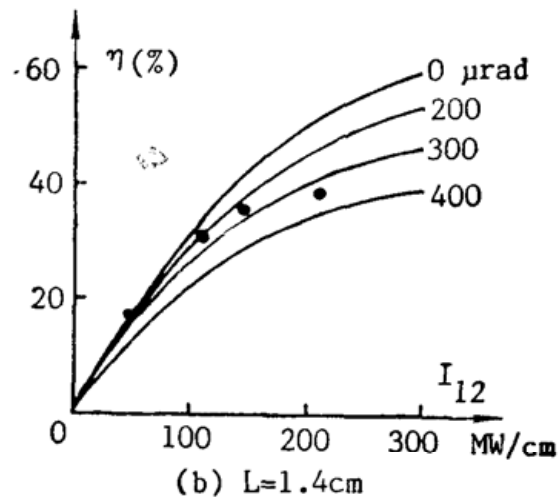
Fig. 7 Experimental curve of tripling angle-detuned for type II KDP. $I=0.2 GW/CM^2$, $L=1.4cm$.

(2) 三倍频效率特性曲线

如图 8 所示, 图 8(a) 显示了在较低功率密度下, 采用较厚 $L=2.4cm$ 晶体将获得较高转换效率, 功率密度再提高, 其效率很快下降。当倍频效率影响, 使 θ_B 偏离最佳值 35.3° 较大时, η_{max} 明显下降, 图中“.”为 $\theta_B \sim 48^\circ$, “x”为 $\theta_B \sim 53^\circ$ 的实验点。在 $I_{12} =$



(a) $L=2.4cm$



(b) $L=1.4cm$

Fig. 8 Dependences of tripling efficiency on I_{12} for type II KDP tripler.

x for $\theta_B=53^\circ$, • for $\theta_B=48^\circ$

0.11 GW/cm² 下, 获得了最高转换效率 43% (3ω 输出为 50 mJ), 晶体工作在角失配 200 μ rad 附近。按上面理论估计, 如采用较薄些的(如 2.1 cm)晶体, 在 $I_{12}=0.2$ GW/cm² 下, 将可能获得最大转换效率 56%。图 8(b)采用更薄的晶体 $L=1.4$ cm 时, 其在低功率密度下, 效率不高。在目前实验的最大功率密度 $I_{12}=0.2$ GW/cm² 下, 效率为 39% (3ω 输出为 235 mJ), 还呈上升趋势, 也未能达到该功率密度下可获最大转换效率 56%。而且较高功率时, 实验点偏离曲线较大, 其原因可能是该实验过程中光束质量差所致 不会影响最佳参数的选择。

本工作还得到茅建华、胡士元、柴志豪和上海光学精密机械研究所六路激光运行组全体同志的帮助和大力协作, 在此深表感谢。

参 考 文 献

- [1] C. E. Robert *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, **QE-20**, No. 10 (Oct), 1173.
- [2] R. S. Craxton; *Opt. Commun.*, 1980, **34**, No. 3 (Sep), 474.
- [3] R. S. Craxton; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**, No. 9 (Sep), 1771.
- [4] R. S. Craxton *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**, No. 9 (Sep), 1782.
- [5] R. S. Craxton; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 17 (Sep), 2739.
- [6] W. Seka *et al.*; *Opt. Commun.*, 1980, **34**, No. 3 (Sep), 469.
- [7] W. Seka *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**, No. 9 (Sep), 1689~1691.
- [8] 蔡希洁等;《光学学报》, 1986, **6**, No. 12 (Dec), 1098.
- [9] 丘志仁等;《光学学报》, 1987, **7**, No. 12 (Dec), 1063.
- [10] S. D. Jacobs *et al.*; *Topical Meeting on Inertial Confinement Fusion*, San Diego, 1980).

Theoretical and experimental study of high efficiency frequency tripling using large-aperture laser beam

QIU ZHIREN^{*}, CAI XIJIE, LANG JIJUN, HUANG KUIXI, GE XIAPING, LI GEPING^{**} AND LIN KANGCHUN
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 21 November 1988; revised 8 May 1990)

Abstract

On the base of three-wave interaction equations, the dependences of the maximum attainable tripling efficiency on the energy ratio of the fundamental wave to the second harmonic wave, crystal length, power density, input beam divergence and match-type are given. The experimental results of frequency tripling are in agreement with theoretical calculations. With type-II KDP used in tripling, energy conversion efficiency as high as 43% has been obtained for moderate power levels.

Key words: the maximum attainable efficiency; the reduced divergence.

* Post graduate student of SIOFM.

** Student of the Changchun Institute of Optics & Fine Mechanics.