

## 用于 ICF 驱动器高效三倍频方案的分析\*

秘国江 蔡邦维 杨春林 何钰娟

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

魏晓峰 袁晓东 郑万国 袁 静

(中物院核物理与化学研究所激光技术工程部, 成都, 610003)

**摘要:** 用数值计算方法对适用于 ICF 驱动器的 I/II 角度失谐和 II/II 偏振失配(在  $5.0\text{GW}/\text{cm}^2$  附近获得最佳三倍频转换效率)两种三倍频方案进行了详细地对比分析, 还给出了基频光脉冲空间分布均匀和空间分布为六阶超高斯, 时间分布均为高斯(脉宽  $1\text{ns}$ ), 入射功率密度范围为  $0\sim 10\text{GW}/\text{cm}^2$  时的三倍频效率曲线, 对 ICF 三倍频实验具有很重要的参考价值。

**关键词:** 角度失谐 偏振失配 I/II 类匹配方式 II/II 类匹配方式

## The analysis of the third harmonic generation schemes for ICF drivers

*Bi Guojiang, Cai Bangwei, Yang Chunlin, He Yujuan*

(Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

*Wei Xiaofeng, Yuan Xiaodong, Zheng Wanguo, Yuan Jing*

(Institute of Nuclear Physics & Chemistry, CAEP, Chengdu, 610003)

**Abstract:** In this paper, using numerical calculation, we analyzed the type I / type II angle detuning and type II / type II polarization mismatching third harmonic generation (THG) scheme, and gave the tripling frequency transferring efficiency curves. Meanwhile the laser pulse shape of the fundamental beam is flat in space and Gaussian in time, or extra Gaussian (sixth order) in space and Gaussian in time. With the variation of input intensity from 0 to  $10\text{GW}/\text{cm}^2$ , the tripling transfer efficiency changed, and at the point of  $5\text{GW}/\text{cm}^2$  the optimum tripling efficiency obtained. This paper has the important reference value to THG experiments for ICF.

**Key words:** angle detuning polarization mismatch type I / type II phase match type II / type II phase match

## 引 言

在惯性约束核聚变实验中, 用短波长激光来驱动 ICF 靶的重要性已为人们所认识。从目前来看, 短波长激光一般通过非线性晶体的三倍频来获得, 而 KDP 晶体由于有许多优点而被广泛应用。用非线性晶体中通过的双折射来补偿晶体色散的影响, 以达到相位匹配, 很自然地导致两种匹配方式: I 类匹配, 两入射基频光在晶体中有相同的偏振方向且平行于二倍频晶体的  $o$  轴(对负单轴晶体而言); II 类匹配, 两入射基频光正交偏振。美国 R. S. Craxton 提出了两

\* 国家高技术约束聚变委员会资助。

种调节二倍频的转换效率来控制光子混合比例的方法: (1) 角度失谐, 调节二倍频晶体相位失谐角度  $\Delta\theta_d$  的大小; (2) 偏振失配, 调整入射到二倍频晶体上的基频光线偏振方向与二倍频晶体  $o$  轴的夹角。在 KDP 晶体三倍频中, 一般通过两块 KDP 晶体的倍频与和频来分别完成。由于有两种匹配方式和两种控制光子混合比例的方法, 三倍频器的设计就有了如图 1a~ 图 1h) 所示的八种可能方案。

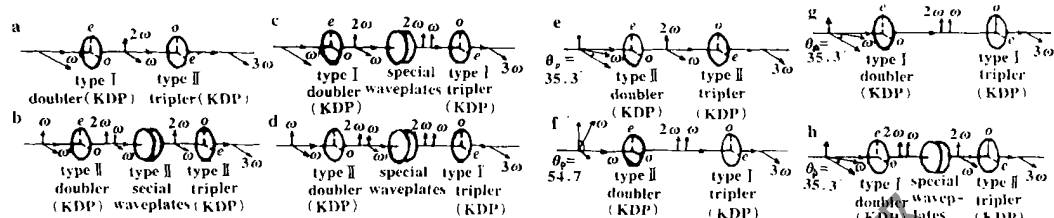


Fig.1 Idealized doubler performance for three tripling schemes

a—angle detuning scheme (I / II)    b—angle detuning scheme (II / II)    c—angle detuning scheme (I / I)    d—angle detuning scheme (II / I)    e—polarization mismatch scheme (II / II)    f—polarization mismatch scheme (II / I)    g—polarization mismatch scheme (I / I)    h—polarization mismatch scheme (I / II)

在大口径高通量的三倍频实验中,所需要的大口径、耐高功率密度波片很难制作,且 I 类匹配方式对角度失谐太敏感,因此,限制了一些三倍频方案的应用。在 ICF 高通量实验中只考虑了两种方案: (1) I / II 匹配方案,通过角度失谐来影响二次谐波的转换效率以控制光子混合比例; (2) II / II 匹配方案,通过调节入射到二倍频晶体的基频光的线偏振角度来影响二次谐波的转换效率从而控制光子混合比例<sup>[1]</sup>。

美国 R. S. Craxton 用 KDP 晶体三倍频的平面波数值计算模型对图 1b, e, g 三种方案进行了分析(在  $4.0\text{GW}/\text{cm}^2$  附近获得最佳转换效率)<sup>[2]</sup>,此模型因所需运算量小且所得结果与实验值非常吻合而被广泛应用。故我们仍采用该数值计算模型,对适用于 ICF 驱动器的 I / II 角度失谐和 II / II 偏振失配三倍频方案进行了详细地分析比较。在大口径、高通量的三倍频实验中,光束的空间分布近似为六阶超高斯、时间分布为高斯,还给出了基频光脉冲空间分布均匀、时间分布为高斯(脉宽 1ns)以及空间分布为六阶超高斯、时间分布为高斯,基频光功率密度范围为  $0\sim 10\text{GW}/\text{cm}^2$  时这两种三倍频方案的效率曲线,对 ICF 三倍频实验具有很重要的参考价值。I / II 角度失谐和 II / II 偏振失配三倍频方案均在  $5.0\text{GW}/\text{cm}^2$  附近获得最佳三倍频转换效率,并且有较大的动态范围,其三倍频的参数如表 1 所示。

KDP 晶体对三种频率光的吸收系数分别为  $\alpha_{1\omega}=0.04\text{cm}^{-1}$ ,  $\alpha_{2\omega}=0.0001\text{cm}^{-1}$ ,  $\alpha_{3\omega}=0.0001\text{cm}^{-1}$ , 没有考虑晶体端面的反射损耗,谐波耦合方程组与其它

Table 1 Representative configurations for several tripling schemes desigend to operate in KDP at around  $5.0\text{GW}/\text{cm}^2$

	doubler	tripler
angle detuning	type I , 1.24cm, detuning $300\mu\text{rad}$	type II , 1.05cm
	or type II , 0.93 cm, detuning $784\mu\text{rad}$	
polarization mismatch	type II , 0.82cm, $\theta_p=35.3^\circ$	type II , 1.03cm
	or type II , 0.82 cm, $\theta_p=54.7^\circ$	type I , 1.23cm

非线性系数见文献[ 2],[ 3]。本文中基频光波长为  $1.054\mu\text{m}$ (Nd: glass 激光器),为了实验中调整晶体的方便,失谐角度均在空气中测得,约为晶体内失谐角度的 1.5 倍。由于平面方波更能清楚地反映谐波转换的效率变化,因此,不加说明均指入射基频光为平面方波,转换效率均为

外转换效率。

### 1 I / II 角度失谐和 II / II 偏振失配三倍频方案的分析比较

I / II 角度失谐与 II / II 偏振失配三倍频方案分别如图 1a, e 所示。二倍频内转换效率约为 66.7%, 这样进入三倍频(混频)器的基频  $\omega$  光子与二倍频  $2\omega$  光子的光子数比 1:1 (能量比为 1:2),  $\omega_2\omega + e_{1\omega} \rightarrow e_{3\omega}$ , 一个剩余基频  $\omega$  光子(均相对于第二块晶体而言)正好与一个二倍频  $\omega$  光子结合生成一个  $3\omega$  的  $e$  光子, 此时, 三倍频效率最高。在 I / II 角度失谐方案中, 入射线偏振光方向平行于二倍频器晶体  $\omega$  轴方向,  $\omega_1\omega + \omega_1\omega \rightarrow e_{2\omega}$ , 调整二倍频器失谐角度, 使二倍频内转换效率约为 66.7%; 在 II / II 偏振失配三倍频方案中, 入射基频光线偏振方向与二倍频晶体  $\omega$  轴夹角为  $35.3^\circ$ ,  $\omega_1\omega + e_{1\omega} \rightarrow e_{2\omega}$ , 其二倍频内转换效率约为 66.7%, 来达到进入三倍频器(混频)的基频  $\omega$  光子与二倍频  $2\omega$  光子的光子数比为 1:1 的目的。

I / II 角度失谐和 II / II 偏振失配三倍频方案都有各自的优缺点, 以下进行分析讨论。

#### 1.1 I / II 角度失谐三倍频方案的分析

倍频晶体采用 I 类匹配的 KDP 晶体, 混频晶体选用 II 类匹配的 KDP 晶体。此方案的角度失谐灵敏度比采用 II 类匹配方式的倍频晶体高约 2.6 倍, 并较 II 匹配方式切割的 KDP 晶体浪费材料, 但在强激光作用下, 晶体内产生 SBS 和 SRS 的阈值较 II 匹配方式的高得多, 并且, 由于二倍频晶体的  $\omega$  轴与入射激光的偏振方向一致, 倍频器的放置比较方便。

I 类匹配失谐角度为  $300\mu\text{rad}$  附近的二倍频效率的内转换效率如图 2a 所示, 要把二倍频内转换效率控制在 66.7% 附近, 效率太高或太低均要造成三倍频效率的下降。相应 I / II 角度失谐三倍频方案的转换效率( $\Delta\theta_d$  变化,  $\Delta\theta_t = 0\mu\text{rad}$ ) 如图 2b 所示, 其中二倍频晶体失谐角度  $\Delta\theta_d$  分别为  $275\mu\text{rad}$ 、 $285\mu\text{rad}$  时, 效率曲线在  $5.0\text{GW}/\text{cm}^2$  附近

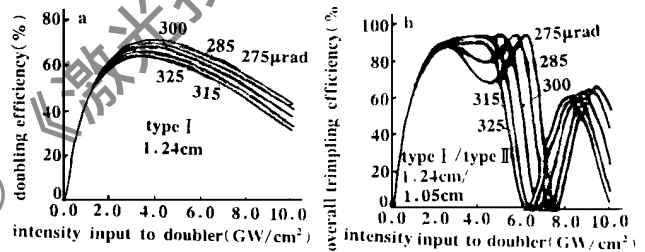


Fig. 2 Doubling characteristics for type I crystal of (a); overall tripling characteristics for type I / type II angle detuning system of (b)

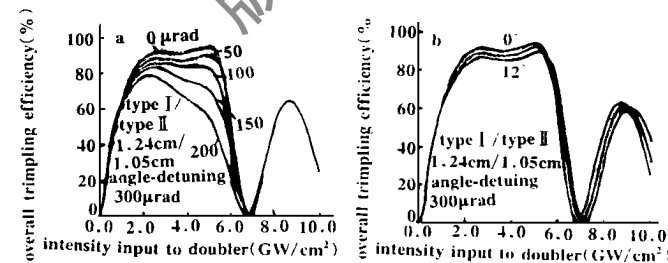


Fig. 3 a—overall tripling characteristics for type I / type II angle detuning system for tripler detuning angles  $\Delta\theta_t$  from 0 to  $200\mu\text{rad}$  b—for doubler various the input polarization angle  $0\sim 12^\circ$

的下凹原因是二倍频转换效率太高, 以致于没有足够的剩余  $1\omega$  光子跟  $2\omega$  光子结合生成三倍频光子。在  $\Delta\theta_d = 0\mu\text{rad}$ ,  $\Delta\theta_t$  变化时的三倍频效率曲线如图 3a 所示, 与图 2b 相比, I / II 角度失谐匹配方式对二倍频晶体的失谐角度要比混频晶体的失谐角度敏感的多, 主要是由于三倍频方案对进入混频晶体的基频  $\omega$  光子与二

倍频  $2\omega$  光子的光子数混合比非常敏感, 且 I 类匹配方式对角度失谐比较敏感。此外, 还给出了

I / II 角度失谐方案在最佳匹配, 转动入射基频光的线偏振方向与二倍频晶体的夹角时三倍频效率的变化, 如图 3b 所示, 可见 I / II 角度失谐方案对此非常不敏感, 入射基频光的线偏振方向与二倍频晶体 o 轴的夹角由 0 变化到 12° 时, 三倍频效率仍在 85% 以上。

从上面的分析表明, I / II 角度失谐匹配方式对二倍频晶体的失谐角度要比混频晶体的失谐角度敏感的多, 但对入射基频光线偏振方向与二倍频晶体 o 轴的夹角不敏感, 这也是此倍频方案的特点之一。

### 1.2 II / II 偏振失配三倍频方案的分析

II 类相位匹配, 入射基频光线偏振方向与二倍频晶体 o 轴夹角为 35.3° 附近时的二倍频内转换效率曲线如图 4a 所示, 可见其对入射基频光线偏振方向与二倍频晶体 o 轴夹角比较敏感, 仅 1° 的变化足以使二倍频内转换效率发生很大变化。II / II 偏振失配三倍频效率曲线如图 4b 所示, 从中也可看出其对入

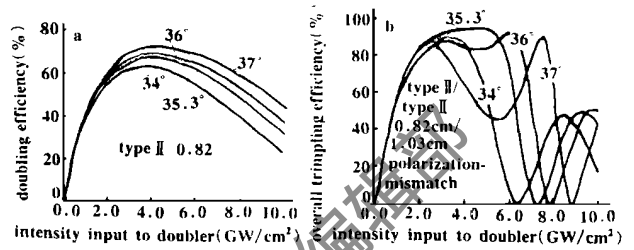


Fig. 4 a—doubling characteristics for type II crystal ; b—overall tripling characteristics for type II / II polarization mismatch system

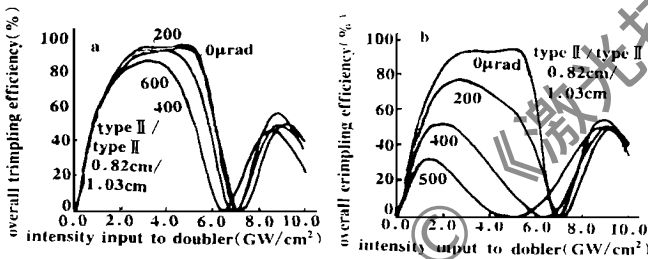


Fig. 5 a—overall tripling characteristics for polarization mismatch scheme which doubler detuning angles varies ; b—the tripler detuning angles varies

射基频光线偏振方向与二倍频晶体 o 轴夹角比较敏感, 这也是由于三倍频方案对进入混频晶体的基频 o 光子与二倍频 e 光子的光子数混合比非常敏感造成的。

II / II 偏振失配方式中三倍频效率对二倍频晶体角度失谐不敏感, 对混频晶体的失谐角  $\Delta\theta_i$  的变化要比二倍频晶体失谐角  $\Delta\theta_d$

的变化敏感约 2.1 倍, 从图 5a, b 的效率曲线中, 也可看出这种趋势。从上面的分析可看出, II / II 偏振失配匹配方式对入射基频光线偏振方向与二倍频晶体 o 轴的夹角非常敏感, 但对二倍频晶体的失谐角度失谐角度的变化不敏感。

### 1.3 I / II 角度失谐与 II / II 偏振失配三倍频方案的比较

由以上分析可知, I / II 角度失谐方案对二倍频晶体失谐角度的大小非常敏感, 但对基频光线偏振方向与二倍频晶体 o 轴的夹角的变化不敏感; 而 II / II 偏振失配方案则完全与之相反。为了更好地对两种三倍频方案进行比较, 给出了在入射基频光功率密度为 5.0GW/cm² 时, 两种三倍频

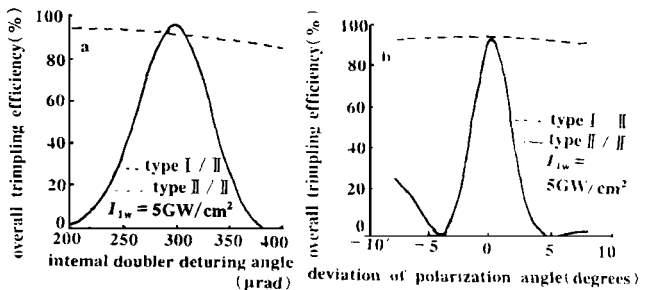


Fig. 6 a—overall tripling efficiency versus crystal angles for the type I / II angle detuning and II / II polarization mismatch and an input irradiance of 5.0GW/cm²

方案对角度失谐(图 6a)和偏振失配(图 6b)大小变化时的失谐(失配)曲线,从中可清楚看到这一点。

一般情况下,基频光脉冲时间分布为高斯,空间分布均匀,而在大口径、高通量的 ICF 实验中,基频光空间分布为近似六阶超高斯。故作者给出了基频光空间分布均匀和空间分布为六阶超高斯,时间分布均为高斯两种情况下的三倍频效率曲线,如图 7 所示,可看出二者具有相似的动态范围。在时间分布为高斯、基频光功率密度为  $5.0 \text{ GW/cm}^2$  附近,空间分布为六阶超高斯时,由于圆形光斑边缘基频光功率密度的下降引起倍频效率的下降,较空间分布均匀时的效率低。

## 2 结 论

综上所述, I / II 角度失谐与 II / II 偏振失配三倍频方案二者动态范围相似,都有各自的特点。II / I 偏振失配(图 1f)与 I / I (图 1g)偏振旁路三倍频方案也不需波片,且后者被认为是最佳的三倍频方案<sup>[2]</sup>,但混频采用了 I 类匹配晶体对角度失谐太敏感,约为 II 类混频晶体的 1.8 倍,均没被采用。虽 I / II 角度失谐比 II / II 偏振失配三倍频方案对角度失谐敏感约 2.6 倍,并较 II 匹配方式切割的 KDP 晶体浪费材料,但在强激光作用下,由于晶体内产生 SBS 和 SRS 的阈值较 II 匹配方式的高得多等优点而作为 ICF 实验中基本的三倍频方式。为了抑制三倍频晶体在  $915 \text{ cm}^{-1}$  带的 SRS,混频晶体拟采用  $\text{KD}^* \text{P}$  晶体。

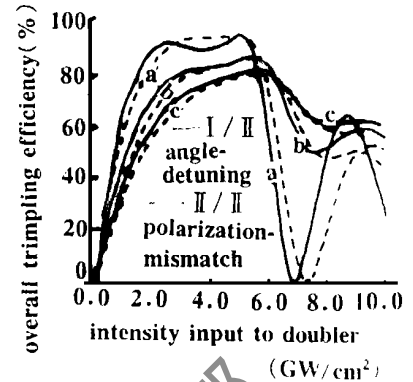


Fig. 7 Third harmonic conversion efficiency versus input irradiance a, a'—single rays at indicated intensity b, b'—average over Gaussian temporal profile c, c'—average over extra Gaussian spatial profile and Gaussian temporal profile

## 参 考 文 献

- 1 Barker C E, van Wonerghem B M, Auerbach J M *et al.* SPIE, 1997; 2633: 398
- 2 Craxton R S IEEE J Q E, 1981; QE17(9): 1771
- 3 Craxton R S, Jacobs S D, Rizzo J E *et al.* IEEE J Q E, 1981; QE17(9): 1782
- 4 蔡希洁, 舒美冬, 覃文骅. 光学学报, 1985; 5(11): 975
- 5 Barker C E, Sacks R A, van Wonerghem B M *et al.* SPIE, 1997; 2633: 501
- 6 任兆玉, 张纪岳. 激光杂志, 1997; 18(4): 18

作者简介: 秘国江, 男, 1973 年 3 月出生。研究生。现从事非线性光学方面的研究。

收稿日期: 1998-08-07

• 简 讯 •

## 准分子激光器

美国佛罗里达州 Lambda Physik 公司生产的 Nova Line K2000 是一种用于 DU V 微印刷术的准分子激光器。这种 248nm 的 KrF 激光器在 2kHz 重复频率上传输 20W 的输出功率。Power Lok 能量系统控制输出功率, 以保证全部曝光量的稳定性超过 0.5%。1kHz 的 Nova Line LITHO 激光器能够升级到 20W/2kHz 操作。

(张贤义 曹三松 供稿)