

文章编号: 0258-7025(2006)07-0903-07

惯性约束核聚变驱动器高强度三倍频系统 输出能力分析

李恪宇, 贾怀庭, 王成程, 冯 斌, 向 勇, 李富全, 马 驰, 魏晓峰

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 以惯性约束核聚变(ICF)驱动器——原型装置(TIL)的研制为背景, 针对原型装置首束达标的要求, 采用理论模拟指导实验, 实验结果考核程序的方法, 对影响惯性约束核聚变驱动器大口径高强度三倍频(THG)效率的多种因素进行了详细的分析和研究, 并对惯性约束核聚变驱动器高强度三倍频系统的输出能力进行了详细的分析。结果表明, 当 $I_{1\omega}$ (基频光功率密度) 为 2.7 GW/cm^2 左右时, 实测效率为 $50\% \sim 55\%$, 而理论计算值为 60% 左右, 理论结果和实验结果符合得很好, 为原型装置的八束达标和功率平衡提供了相应的实验依据和计算工具。

关键词 非线性光学; 三倍频效率; 脉冲波形; 调制; 相位畸变; 失谐角

中图分类号 O 437.1 **文献标识码** A

Output-Ability Analysis of High-Intensity Third Harmonic Generation System for ICF Driver

LI Ke-yu, JIA Huai-ting, WANG Cheng-cheng, FENG Bin,

XIANG Yong, LI Fu-quan, MA Chi, WEI Xiao-feng

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract By basing on the study and manufacture of the technical integration experiment line (TIL) prototype laser facility, and using the method that theoretical simulations guide experiments and experiment results check programs, the actors affecting third harmonic generation (THG) efficiency for large-aperture, high-intensity inertial confinement fusion (ICF) laser facility have been analyzed and studied in detail. Furthermore, the output-ability of THG system for ICF driver has been discussed adequately. As shown through experiment results, when average drive irradiance of fundamental light, $I_{1\omega}$ is 2.7 GW/cm^2 , measured value of THG efficiency is $50\% \sim 55\%$ and the theory value is 60% , which indicates that the experiment result can be agreed with the theory value well. The experiment results will provide experiment proofs and calculation tools for eight beam eligibility and power balance of prototype laser facility.

Key words nonlinear optics; third harmonic generation efficiency; pulse format; modulation; phase aberration; mismatching angle

1 引 言

在国内外大型惯性约束核聚变(ICF)激光器的运行中, 如何进行高效、稳定的三倍频(THG)一直是各国科学家追求的目标。这不但是激光器打靶对三倍频能量的需求, 而且还是多路功率平衡的根本要求。所以, 三倍频系统的输出能力既是激光器关键的单元技术之一, 也是激光器打靶运行成功的瓶

颈之一。因此, 以实现原型装置(TIL)首束达标为契机, 在 2004~2005 年的首束达标实验中, 重点研究了原型装置三倍频系统涉及的一些主要科学、技术和工程问题, 对影响惯性约束核聚变驱动器大口径高强度三倍频效率的多种因素进行了详细的分析和研究, 并对影响因素进行了相应的控制, 而且达到了预期的效果。

收稿日期: 2005-12-01; 收到修改稿日期: 2006-02-06

基金项目: 国家高技术惯性约束聚变基金资助项目。

作者简介: 李恪宇(1976—), 男, 中国工程物理研究院助理研究员, 硕士, 主要研究方向为强激光技术和非线性光学。

E-mail: likeyu6969@163.com

2 三倍频理论

如图 1 所示,原型装置由 8 路光束组成,将来它主要用于进行惯性约束核聚变实验和高能密度实验,图 2 表示了首束达标实验中 I 型终端光学组件(FOA)和三倍频系统的布局。

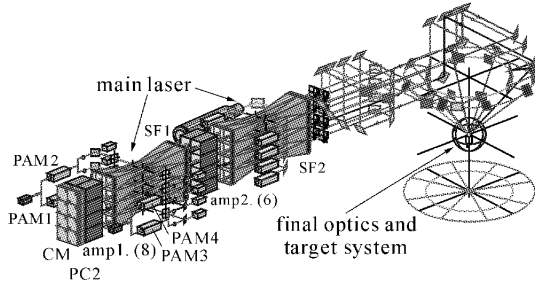


图 1 原型装置的光路排布

Fig. 1 TIL laser facility beam layout

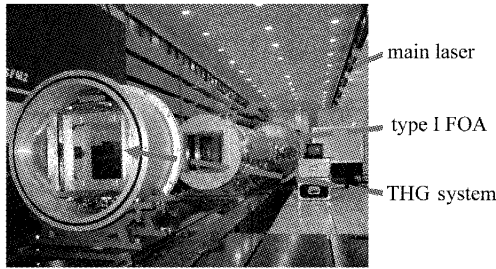


图 2 首束达标实验中的 I 型终端组件和三倍频系统

Fig. 2 FOA and THG system in first beam eligibility experiment

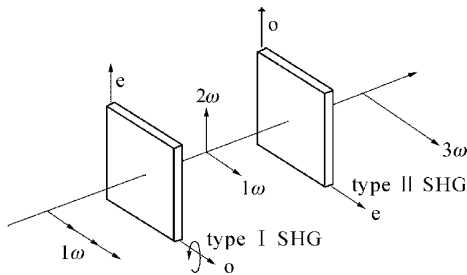


图 3 原型装置三倍频方案

Fig. 3 Frequency conversion scheme for TIL

原型装置三倍频系统采用的是 I / II 类角度失谐的三倍频方案,如图 3 所示。其中,包含了 1 块 11.8 mm 厚的 I 类二倍频 KDP 晶体和 1 块 9 mm 厚的 II 类三倍频 KDP 晶体。

这种方案的优点是对基频光偏振态不太敏感,可以很好地克服高强度条件下的激光束退偏问题。其缺点是对晶体失谐角非常敏感。

从麦克斯韦方程组及波动方程出发,经过推导,得到的三倍频耦合方程组为^[1~5]

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + 2in_e(\omega) \frac{\omega}{c} \left[\frac{\partial F}{\partial z} + \rho_\omega(\theta) \frac{\partial F}{\partial y} \right] = -\frac{(\omega)^2}{c^2} \chi H^* G \exp(i\Delta kz) - i \frac{n_e(\omega)\omega}{c} \alpha_1 F, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + 2in_o(2\omega) \frac{2\omega}{c} \frac{\partial H}{\partial z} = -\frac{(2\omega)^2}{c^2} \chi F^* G \exp(i\Delta kz) - i \frac{2n_o(2\omega)\omega}{c} \alpha_2 H, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} + 2in_e(3\omega) \frac{3\omega}{c} \left[\frac{\partial G}{\partial z} + \rho_{3\omega}(\theta) \frac{\partial G}{\partial y} \right] = -\frac{(3\omega)^2}{c^2} \chi FH \exp(-i\Delta kz) - i \frac{3n_e(3\omega)\omega}{c} \alpha_3 G, \quad (3)$$

其中 F, H 和 G 分别为 $1\omega, 2\omega$ 和 3ω 的复振幅, $\rho_\omega(\theta)$ 和 $\rho_{3\omega}(\theta)$ 为离散因子, χ 为非线性系数, $\Delta k = \frac{\omega}{c} [3n_e(3\omega, \theta) - n_e(\omega, \theta) - 2n_o(2\omega)]$ 为相位失配量, θ 为光传播方向 z 与光轴的夹角, $\varphi = 0^\circ$ 为方位角, $n_e(\omega, \theta)$ 和 $n_e(3\omega, \theta)$ 分别为基频 e 光和三倍频 e 光的折射率, $n_o(2\omega)$ 为二倍频 o 光的折射率, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 分别为 1ω 光, 2ω 光和 3ω 光的吸收系数。

将方程(1) ~ (3) 用一般形式来表示

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + 2in_A \frac{\omega_A}{c} \left[\frac{\partial A}{\partial z} + \rho_A \frac{\partial A}{\partial y} \right] = f(A, B, C) - \frac{in_A \omega_A}{c} \alpha_A A, \quad (4)$$

其中,左边第一、二项表示光场的衍射效应;左边第三项表示场振幅在 z 方向的变化;左边第四项表示 e 光的离散效应;右边第一项是非线性转换项,右边第二项是吸收项。对于 o 光, ρ_A 为零。可以看出,该模型考虑了如下物理过程和参量:三波混频(二倍频及三倍频,为二阶非线性效应)、傍轴衍射、走离效应(空间变化场)、晶体体损耗及表面反射等。

3 三倍频效率影响因素分析

根据耦合波方程组,可以得到三倍频效率的小信号近似解为

$$\eta_{\text{THG}} = \kappa \times I_{1\omega} \times \text{sinc}^2(\Delta k \times L/2), \quad (5)$$

(5) 式表明,三倍频效率是基频光功率密度 $I_{1\omega}$, 相位失配量 Δk 和晶体厚度 L 的函数,其中 κ 是一固定系数。不过,当 $I_{1\omega}$ 为 $1 \sim 3 \text{ GW/cm}^2$ 时,三倍频效率的结果必须采用计算机计算求解,但影响因素仍然是小信号近似解得到的三个因素。

3.1 基频光功率密度 $I_{1\omega}$ 对三倍频效率的影响

$I_{1\omega}(x, y, t)$ 是空间和时间的函数,即它与基频

光的近场分布和脉冲波形有关。基频光的近场分布和脉冲波形越趋于平顶,则越有利于三倍频,即三倍频效率越高。反之,不同程度的近场和脉冲波形扰动与调制将会导致三倍频效率不同程度的降低。采用编号为 2005062002 的数据,当平均 $I_{1\omega}$ 为 2.7 GW/cm^2 ,基频光调制度 M 为 2.17,对比度 C 为 0.22 时,计算得到的三倍频近场和转换效率的空间分布如图 4,5 所示,其中图 4(a)为实测的基频光近场,(b)为计算得到的三倍频光近场,(c)为三倍频效率的空间分布,(d)为原型装置厚度优化下三倍频效率随基频光功率密度的变化。图 5(a)为三种脉冲波形,(b)为三种脉冲波形下三倍频效率的变化。

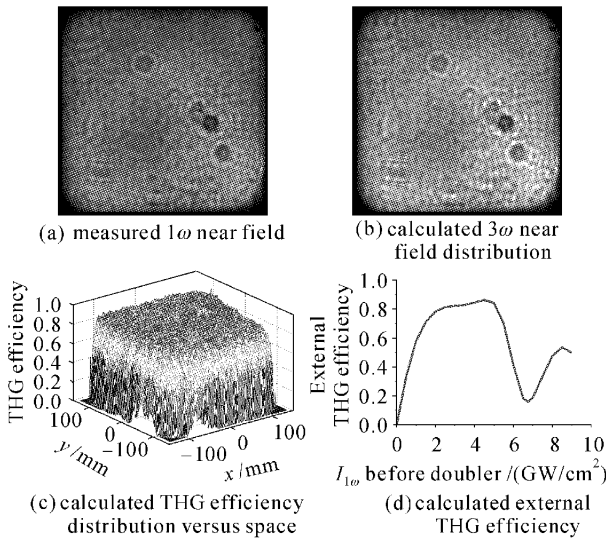


图 4 理想平顶脉冲下近场调制对三倍频效率的影响
Fig. 4 Influence of near field distribution on THG efficiency in ideal square pulse

图 4,5 表明, 1ω 光近场调制对三倍频效率的影响量只有 1% 左右。但是,标准高斯脉冲波形对效率的影响为 9% 左右,并且,脉冲越趋于平顶则越有利于三倍频。由于两者满足 RSS (root-sum-squared) 叠加规律,则 $I_{1\omega}(x, y, t)$ 在空间和时间上的调制对三倍频效率的影响在 9% 左右。

从图 4(d)可以看出,三倍频效率随基频光功率密度的变化是先上升(0~2.5 GW/cm^2),然后平顶(2.5~5 GW/cm^2),再下降(5~7 GW/cm^2)。当平均 $I_{1\omega}$ 为 2.7 GW/cm^2 ,基频光调制度 M 为 2.17 时,其最大的 $I_{1\omega}$ 在 5.5 GW/cm^2 左右,即近场大部分区域内的 $I_{1\omega}$ 在 2~5.5 GW/cm^2 之内时,其对应的三倍频效率刚好在平顶区,因此近场调制对三倍频效率的影响不大。

但是,脉冲波形的形状对三倍频效率的影响则

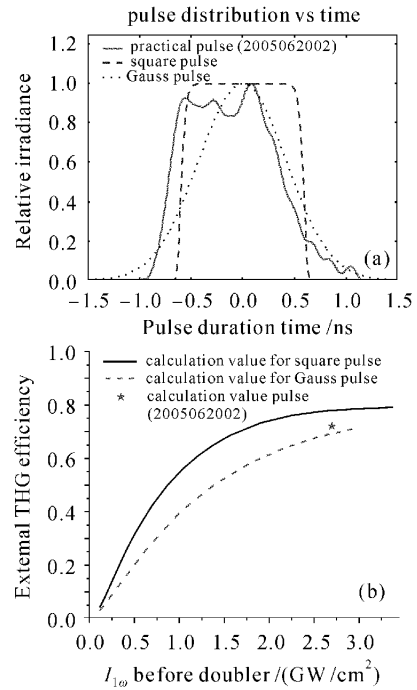


图 5 近场为理想平顶条件下脉冲波形调制对三倍频效率的影响
(a) 三种脉冲波形;(b) 三种脉冲波形下三倍频效率的变化
Fig. 5 Influences of three pulse formats on efficiency in ideal square 1ω near field distribution
(a) three pulse formats: practical, square and Gauss pulse;
(b) calculated THG efficiency versus 1ω irradiance and three pulse formats

大不一样。结合图 4(d),图 5,图 6 和表 1,当基频光的脉冲波形越趋于平顶时,不同脉冲时刻上的功率密度基本一致,则效率也一致。但是,当脉冲波形越趋于高斯脉冲或者是三角形脉冲时,由于其上升沿和下降沿太长,而前后沿底部的功率密度却太低,导致底部的三倍频效率大大低于顶部的效率。结果,脉冲的平均效率也大大降低了。

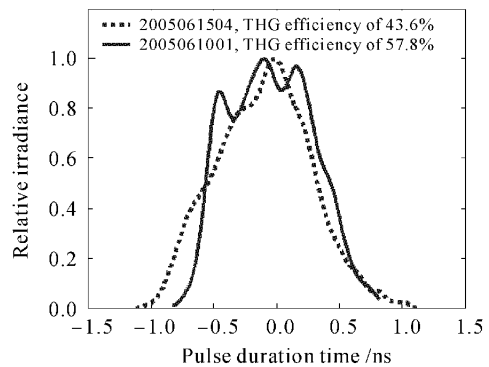


图 6 不同脉冲波形对三倍频效率的影响
Fig. 6 Two practical THG pulse waveforms

表 1 两种实际脉冲波形的相关参数和实验结果

Table 1 Correlative parameters and experiment results of two practical pulses in experiment

Number	Beam aperture /mm	1ω energy /J	Pulse width /ns	Average $I_{1\omega}$ /(GW/cm^2)	3ω energy /J	THG efficiency /%
2005061504	28×28	1930	0.879	3.1	842	43.6
2005061001	28×28	1441	0.991	2.0	783	57.8

3.2 相位失配量 Δk 对三倍频效率的影响

如图 7 所示, $\Delta k(x, y)$ 是空间的函数, 不同近场区域 $\Delta k(x, y)$ 的不一致性将导致近场三倍频效率的非均匀性。而 $\Delta k(x, y)$ 是失谐角 $\beta(x, y)$ 的函数, 因此, 实验中需要控制的是匹配角的失谐量, 它主要表现为:

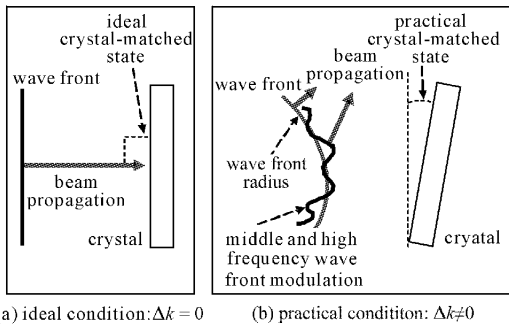


图 7 理想和实际两种情况下的相位失配量 Δk
Fig. 7 Mismatch Δk under ideal and practical conditions

1) 晶体失谐角 β 的偏差值 $\Delta\beta$ 。如图 8 所示, 由于晶体加工时的定轴误差, 三倍频效率最高时, 晶体最佳匹配姿态并非是激光正入射到晶体表面, 而是以一定的倾角入射, 这个倾角就是晶体最佳匹配角 θ 。在首束达标实验中两块晶体的 θ 值依次为: 二倍频 (SHG) 晶体: -27.245 mrad ; 三倍频晶体: 1.86 mrad 。同时, 在晶体最佳匹配的基础上, 根据基

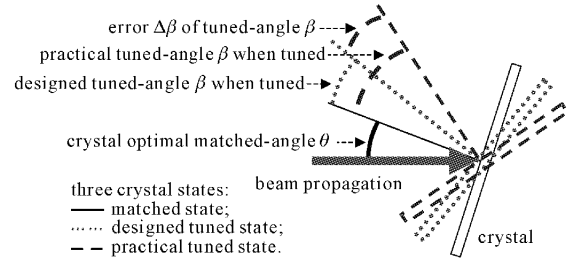


图 8 晶体的匹配、设计失谐和实际失谐姿态
Fig. 8 Crystal states when matched, designed and practical

频光功率密度的增加, 需要适当地将晶体再倾斜一定的角度, 这个角度就是晶体失谐角 β 。比如, 当基频光功率密度小于 $1.5 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 时, 要求 β 为 0, 即要求晶体处于最佳匹配状态, 而当基频光功率密度在 $2.5 \sim 5 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 之内时, 要求 β 为 $220 \mu\text{rad}$ 。但由于各种因素的影响, 晶体失谐角 β 的设计值和实际值往往有一定的偏差值 $\Delta\beta$ 。

$\Delta\beta$ 主要来源于晶体最佳匹配角的测量误差、两块晶体调节的准直误差、光路耦合误差、基频光指向性的漂移和晶体周围温度扰动等。在高功率密度下, 二倍频晶体宏观失谐角的偏差值 $\Delta\beta$ 将会更为重要。如表 2 所示, 在首束达标实验中, 晶体失谐角 β 的偏差值 $\Delta\beta$ 为 $50 \mu\text{rad}$, 效率降低 5% 左右。

表 2 影响晶体失谐角 β 的 6 种因素

Table 2 Six sources of $\Delta\beta$ (Mag. is abbreviation of magnitude with the unit of μrad internal)

Sources	Mag	Comments
Measure of crystal optimal matched-angle θ	± 35	Angle drift of YLF laser, curve-fit error of crystals rocking curve for optimal matched-angle θ
Crystals alignment	± 20	Crystals alignment with the tool for angle measurement
Reposition of optimal matched-angle θ	± 10	Lost steps when the crystals are repositioned according to the angle of θ
Beam coupling	± 20	Error of the norm mirror relative to datum plane and of coupling of 1ω far field
Beam drift	± 10	Stability of optical elements
Temperature drift	± 20	Doubler thermally tunes at $50 \mu\text{rad}/^\circ\text{C}$; tripler at $200 \mu\text{rad}/^\circ\text{C}$, measured-temperature error is $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ without controlled-temperature device
Total (RSS)	$\pm 50 \mu\text{rad}$	
Efficiency loss	5% or so	

表 3 影响波面曲率半径的因素 ($\lambda=0.6328 \mu\text{m}$)

Table 3 Correlative parameters about the four surface figure of crystals and 1ω wavefront radius ($\lambda=0.6328 \mu\text{m}$)

Wavefront aberration	1ω wavefront radius	Front surface of doubler	Back surface of doubler	Front surface of tripler	Back surface of tripler
<i>P-V</i> value (λ)	5.5	32.092	29.152	15.191	12.016
Curvature radius <i>R</i> /m	3700	960	1050	2060	2500
Efficiency loss		7% or so			

2) 波面曲率半径 *R*: 在晶体内部光束波前的轮廓为一定曲率半径的球面,即低频波前畸变。它主要来源于基频光的角度发散、晶体表面的面形畸变等。在光束达标实验中,波面曲率半径值见表 3 和图 9,它对效率的综合影响值为 7% 左右。并且,曲率半径越小,波面的畸变值将越大,对效率的影响则越大。

3) 波前微观调制: 在晶体内部,各种光束的波前轮廓之上还有一定扰动,即中高频波前畸变。它来源于光路灰尘和其他非线性效应导致晶体前基频

光波前的中高频波前调制、晶体内部光轴均匀性、晶体表面加工时留下的周期性小尺度纹波调制、晶体表面与内部的各种疵病与缺陷等。由于目前测量手段有限,因此对前两项无法定量描述,但后两项可以通过晶体测量的透射波前数据来说明(见图 10)。因此,目前对三倍频效率影响因素的全面分析还有所欠缺。

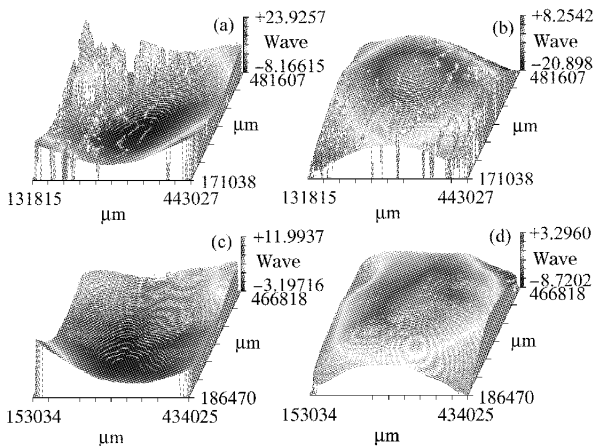


图 9 影响波面曲率半径的四个晶体表面
(a) 二倍频晶体前表面; (b) 二倍频晶体后表面;
(c) 三倍频晶体前表面; (d) 三倍频晶体后表面

Fig. 9 Four surface figure of crystals
(a) front surface of doubler; (b) back surface of doubler;
(c) front surface of tripler; (d) back surface of tripler

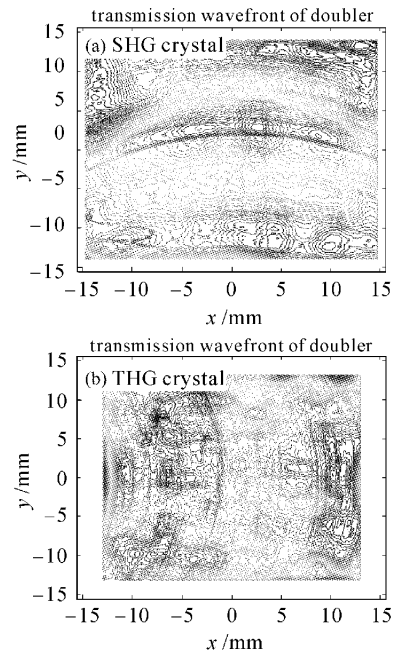


图 10 影响波前微观调制的晶体透射波前

Fig. 10 Middle and high frequency modulation in the contour of transmission wavefront of crystals

表 4 影响波前微观调制的晶体透射波前参数 ($\lambda=0.6328 \mu\text{m}$)

Table 4 Influence of middle and high frequency modulation caused by crystals ($\lambda=0.6328 \mu\text{m}$)

Crystals	Geometry aperture /mm	Transmission wavefront modulation		Crystals status
		PV (λ)	GRMS (λ /cm)	
Doubler	330×325×11.8	0.767	0.063	There are much dust, small-scale periodicity trace, deep crack at the surface. And there are many defects inside and outside the crystals.
Tripler	300×300×9	0.512	0.060	
Efficiency loss				1% or so

在以上三种因素对相位失配量 Δk 的影响中, R 和波前微观调制满足 RSS 规律, 这两者的总和再与 $\Delta\beta$ 满足相干叠加规律. 因此, 相位失配量 Δk 对三倍频效率的影响总和为

$$\sqrt{7\%^2 + 1\%^2} + 5\% = 12\%. \quad (6)$$

3.3 晶体厚度 L 对三倍频效率的影响

如图 11 所示, 为了保证高效三倍频, 在理想条件下进行了原型装置中两块晶体厚度的优化, 优化组合结果为“11.8 mm/9 mm”.

从图 11 和图 4(d)可以看出, 当原型装置在 1 ns 下的优化点(2.5~3 GW/cm²)运行时, 理想条件下能保证二倍频内效率在 67%左右, 三倍频外转效率在 80%左右, 即晶体厚度的优化组合能够满足要求.

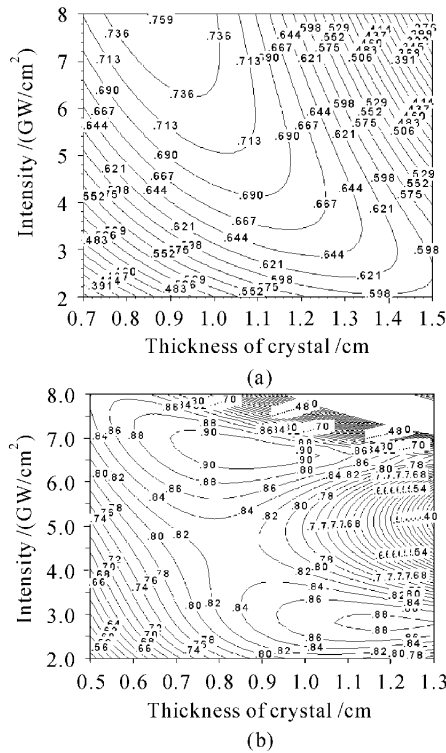


图 11 理想条件下的晶体厚度优化

(a) 二倍频内效率随 $I_{1\omega}$ 和二倍频晶体厚度变化的等高线; (b) 三倍频外效率随 $I_{1\omega}$ 和三倍频晶体厚度变化的等高线

Fig. 11 Two crystals' thickness optimization under ideal condition

(a) contour of the SHG efficiency as a function of $I_{1\omega}$ and the doubler thickness; (b) contour of the THG efficiency as a function of $I_{1\omega}$ and the tripler thickness

3.4 小结

对影响三倍频效率的三大因素分析小结如表 5

所示.

表 5 影响三倍频效率的三大因素

Table 5 Brief summary of the three factors affecting THG efficiency

Factors	1ω intensity modulation in time and space distribution	Space modulation of phase-mismatch value Δk	Crystals thickness L
Efficiency loss	9%	12%	0
Total efficiency loss	Total efficiency loss of 21% in a sum accumulation of the three factors because the three factors are not random		

4 三倍频效率理论值和实测值的对比分析

将影响三倍频效率的三大因素相关数据代入三倍频程序, 并采用编号为 2005062002 的基频光近场和脉冲波形数据, 得到的计算结果如图 12 所示.

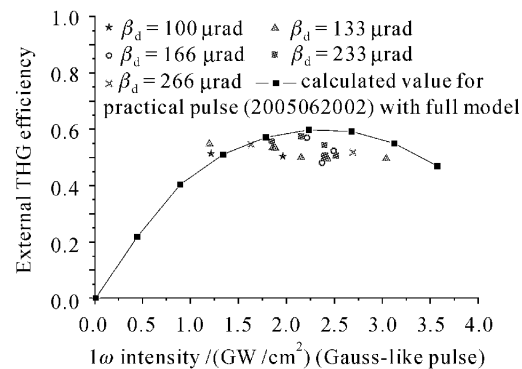


图 12 首束达标实验中计算与实验结果的对比分析

Fig. 12 Theory and measurement value of THG efficiency at different mismatch-angle, β_d of doubler

从图 12 可得知: 1) 在考虑了 $I(x, y, t)$, $\Delta k(x, y)$ 和晶体厚度 L 的基础上, 三倍频效率理论上的最大值为 60%左右; 2) 实验中三倍频效率最大值为 50%~55%; 3) 理论和计算有 5%~10%的误差, 这主要来源于目前无法定量的因素: 晶体光轴非均匀性、光路灰尘、其他非线性效应和晶体表面雾迹等因素. 因此, 计算结果与实验结果比较吻合. 并且, 通过晶体后石英窗口的损伤可知, 由于光路灰尘和其他非线性效应, 导致晶体前基频光波前的中高频波前调制非常严重, 但目前还无法对此因素进行定量分析.

5 结 论

本次实验的三倍频绝对能量达到了达标值,三倍频能量最高输出1248 J/3 ns(光束口径为240 mm × 240 mm)和1147J/1 ns(光束口径为280 mm × 280 mm),验证了三倍频系统的输出能力,并考核了 I/II 类角度失谐三倍频方案的可行性,为主机方案奠定了基础。但是三倍频效率为 50%~55%,距离优化点的设计值还相差 15%~20%,与 Livermore 实验室从 NOVA 到 NIF 的发展历程类似。15 年以前,NOVA 的三倍频效率也仅能达到 55%左右,但目前 NIF 的四束三倍频效率已能达到 78%^[6]。因此,我们目前的水平还不能与 NIF 相比,仅相当于 NOVA 的水平。

同时,通过对影响三倍频效率的三大因素的分析,从而能够很好地解释首束实验中三倍频效率最大值仅为 50%~55%的原因,证明了计算结果与实验结果的一致性。并且,为实现原型装置八束达标和将来的功率平衡提供了相关依据,指出了下一步的工作重点:1) 关键在于改善晶体前基频光脉冲波形的形状,使其趋于平顶分布,这样效率就可以提高 4%~8%;2) 重点改善晶体的反射面形质量,要求反射面形的 $P-V$ 值小于 10λ , 这样对效率的影响值将控制在 1%以内;3) 逐步提高各种调试和测试技

术,降低晶体失谐角 β 的偏差值 $\Delta\beta$, 争取对效率的影响值控制在 3%以内;4) 提高光路的洁净度,并且控制主放后所有光学元件面形中的中高频调制。在上述四个方面的努力均得以实现后,三倍频效率将有望于达到 70%以上。

致谢 作者在此感谢范滇元院士及张小民、郑万国、景峰、隋展、陈波、胡东霞和粟敬钦等同志对本工作的帮助和有益的讨论。

参 考 文 献

- 1 P. J. Wegner, J. M. Auerbach, C. E. Barker *et al.*. Frequency converter development of National Ignition Facility [C]. *SPIE*, 1998, **3492**:392~405
- 2 Y. Wang, B. Luther-Davies, Y.-H. Chuang *et al.*. Highly efficient conversion of picosecond Nd laser pulses with the use of group-velocity-mismatched frequency doubling in KDP [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(13):1862~1864
- 3 J. M. Auerbach, D. Milam, C. E. Barker *et al.*. Frequency-conversion modeling [R]. UCRL-LR-105821-96-4, 1996. 199~206
- 4 P. W. Milonni, J. M. Auerbach, D. Eimerl. Frequency conversion modeling with spatially and temporally varying beams [C]. *SPIE*, 1997, **2633**:230~241
- 5 P. J. Wegner, M. A. Hennesian, D. R. Speck *et al.*. Harmonic conversion of large-aperture 1.05 μm laser beams for inertial-confinement fusion research [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **3**(30):6414~6426
- 6 B. M. Van Wonterghem, S. C. Burkhart, C. A. Haynam *et al.*. National Ignition Facility commissioning and performance [C]. *SPIE*, 2004, **5341**:55~65