

高斯脉冲非理想条件下的谐波转换规律

李格宇 冯斌 王芳 贾怀庭 韩伟 赵润昌 向勇*

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 对于实际的大口径高功率激光器而言, I/II 类角度失谐三倍频系统的谐波转换规律常常偏离理想情况。为了研究其实际的谐波转换规律, 以便于指导实际情况的晶体调试, 研究了各种非理想条件下, 比如 1 ns 高斯脉冲, 不同波面半径和晶体损耗对三倍频谐波转换的影响。研究表明: 高斯形脉冲的三倍频外效率绝对值比平顶脉冲降低了 10%; 为了追求最高三倍频外效率, 由于受 1 ns 高斯脉冲和三倍频晶体损耗的影响, 二倍频晶体的最佳内失谐角是 160 μrad 而非 220 μrad , 二倍频内部效率最佳平均值并非为 67%, 而是在 60%~63% 左右为最佳, 并且晶体损耗越高, 二倍频内部效率的最佳平均值越低; 功率密度越高, 波面半径和发散角对谐波转换的影响越大。

关键词 非线性光学; 高斯脉冲; 内部效率; 外部效率; 波面半径; 失谐角

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0819001

Harmonic Conversion Rule for Gaussian Pulse with Nonideal Conditions

Li Keyu Feng Bin Wang Fang Jia Huaiting Han Wei Zhao Runchang Xiang Yong

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

Abstract The harmonic conversion rule of I/II angle-tuned third harmonic generation (THG) system will be far away from the ideal rule on actual large-aperture and high-intensity laser facility. To study actual harmonic conversion rule and guide the crystal debugging, the nonideal conditions, such as 1ns Gauss pulse, different wave radius and crystal loss have been studied. It is proved that the THG external efficiency will reduce 10% than flat-temporal pulse. To obtain the highest THG efficiency, the optimal SHG internal tuned angle is not 220 μrad but 160 μrad impacted by 1 ns Gauss pulse and crystal loss. And the optimal second harmonic generation (SHG) internal efficiency is not 67% but 60%~63%. The higher of crystal loss, the lower of SHG internal efficiency. And the higher of 1ω intensity, the greater of infection of wave radius and divergence angle on harmonic conversion.

Key words nonlinear optics; Gauss pulse; internal efficiency; external efficiency; wave radius; tuned angle

OCIS codes 190.2620; 190.4223

1 引言

当前国内外各种大型惯性约束核聚变(ICF)激光器, 一般采用 I/II 类角度失谐三倍频(THG)方案进行谐波转换。实现高效、稳定的三倍频谐波转换, 一直是各国科学家追求的器件运行目标^[1-4]。因此, 国内外不少科学家为此进行了大量的理论研究^[5-8]以及相关的实验研究^[9-10]。由于受各种条件的限制, 这些理论研究一般假定各种理想条件, 比如

脉冲时空分布平顶、波前为平面的平面波和晶体表面损耗为零等, 并且只注重输入和输出的对应关系, 从而难以对实际非理想情况下的晶体调试进行指导。因为在器件的实际运行中, 上述理想条件一般难以满足, 则 I/II 类角度失谐三倍频系统的谐波转换规律常常偏离理想情况, 其谐波转换过程的相关参数也将会发生相应的变化。为了给器件的运行调试提供有益指导, 本文研究了各种非理想条件下的

收稿日期: 2014-02-15; 收到修改稿日期: 2014-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(11304293)

作者简介: 李格宇(1976—), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事高功率激光技术与非线性光学方面的研究。

E-mail: likeyu6969@163.com

* 通信联系人。E-mail: xiangyong6969@163.com

谐波转换规律。

2 三倍频理论

2.1 三倍频模型

为了克服激光退偏效应对三倍频效率的影响,当前国内外各种大型激光器一般采用 I/II 类角度失谐三倍频方案,如图 1 所示。

从麦克斯韦方程组及波动方程出发,经过推导,可以得到如下的三倍频耦合方程组为^[4]

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

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

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

可以看出,上述模型考虑了如下物理过程及参量:三波混频[二倍频(SHG)及三倍频]、晶体体损耗及表面反射、走离效应(空间变化场)和傍轴衍射等。

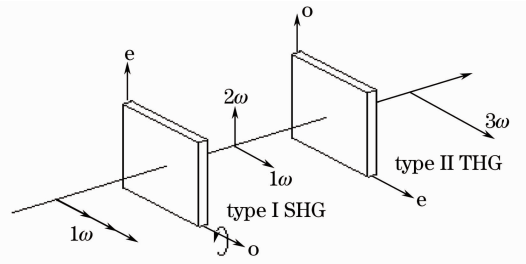


图 1 含一块 I 类二倍频晶体和一块 II 类三倍频晶体的 I/II 类角度失谐三倍频方案
Fig. 1 I/II angle-tuned THG scheme with a type-I KDP doubler and a type-II KDP tripler

2.2 三倍频过程的参数定义

为了理解谐波转换过程及其规律,根据图 2,先对一些物理参数进行定义。

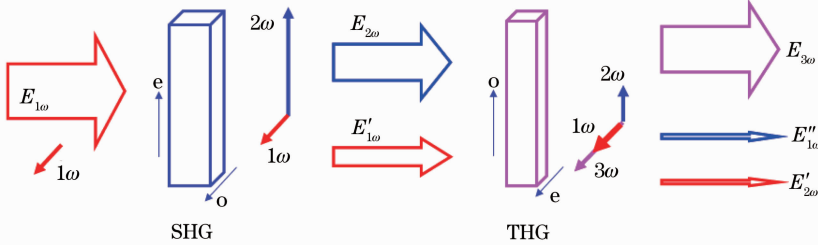


图 2 I/II 类角度失谐三倍频系统的相关参数图

Fig. 2 Correlative parameters of I/II angle-tuned THG scheme

三倍频过程主要涉及如下 4 个内外转换效率参数:

1) 二倍频外效率:

$$\eta_{2\omega} = E_{2\omega} / E_{1\omega}, \quad (4)$$

2) 二倍频内效率:

$$\eta'_{2\omega} = E_{2\omega} / (E'_{1\omega} + E_{2\omega}), \quad (5)$$

3) 三倍频外效率:

$$\eta_{3\omega} = E_{3\omega} / E_{1\omega}. \quad (6)$$

4) 三倍频内效率:

$$\eta'_{3\omega} = E_{3\omega} / (E_{3\omega} + E'_{2\omega} + E'_{1\omega}). \quad (7)$$

上述 4 个式子中,晶体前基频光输入能量 $E_{1\omega}$,以及晶体后三种光的能量 $E_{3\omega}$ 、 $E'_{2\omega}$ 、 $E'_{1\omega}$,一共 4 个参数为实际测量值,其余参数均为计算值。在已知晶体表面与内部损耗的前提下,三倍频内效率与外效率

为实测值,而二倍频内效率与外效率均为计算值。内效率只反映某一块晶体自身调试效果的好坏,而外效率则是调试和损耗的综合反映。器件运行追求的最终目标参数为三倍频外效率 $\eta_{3\omega}$,该参数与另外三个参数又存在千丝万缕的关系,因此在下述讨论中,该 4 个参数一并进行讨论。

3 完全理想情况下的二、三倍频效率的变化规律

国内外各种大型 ICF 激光器的运行工作点为 $2 \sim 3 \text{ GW/cm}^2$,因此首先选定“ $2 \sim 3 \text{ GW/cm}^2$,近场均匀,平面波,脉冲平顶,晶体理想”这 5 个条件,以及根据上述的三倍频模型,进行理想情况下的谐波转换规律研究,其二、三倍频效率随光强的变化如图 3 所示。

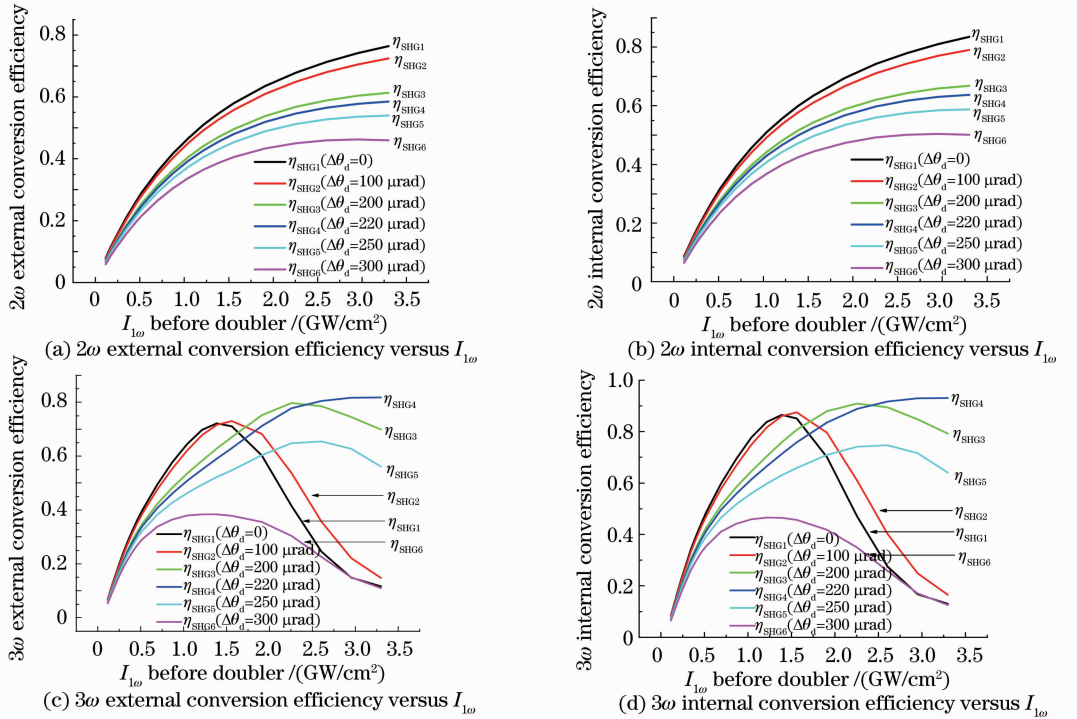


图3 理想情况下的二、三倍频效率随晶体前基频光光强的变化

Fig. 3 SHG and THG efficiency versus 1ω intensity before doubler with ideal conditions

从图 1 看出,理想情况下,为了保证在 $2\sim 3\text{ GW/cm}^2$ 较宽动态范围内均有比较稳定的三倍频转换效率,只有当二倍频失谐角(内角,用 $\Delta\theta_d$ 表示)为 $220\ \mu\text{rad}$ 时,即上述四幅图中的第四条曲线(η_{SHG4} 或者 η_{THG4}),二倍频内效率为 67% [图 3(b)].二倍频外效率为 $58\%\sim 60\%$ [图 3(a)]时,THG 内效率接近 90% [图 3(d)],器件追求的最大 THG 外效率接近 82% [图 3(c)].

4 非理想情况下的二、三倍频效率的变化规律

4.1 1 ns 高斯形脉冲和晶体表面有损耗前提下的谐波转换规律

高功率激光器运行中,首先遇到的问题是脉冲形状并非平顶分布,而是典型的 1 ns 高斯形脉冲,并且随着激光发次的增加,晶体表面有损耗,因此假设如下条件进行研究,计算结果如图 4 所示。

1) 近场均匀,波面为理想平面波,脉冲为 1 ns 高斯形脉冲,晶体理想;

2) 光束口径: $280\text{ mm}\times 280\text{ mm}$; 计算口径: $335\text{ mm}\times 335\text{ mm}$;

3) 晶体厚度:分别为 11.8 mm 和 9 mm ;

4) 运行一段时间后,两晶体表面对三种光(

光或 e 光)的反射率: 1% 。

依次对比图 3 与图 4 的 4 张图,可得到以下信息:

1) 1 ns 高斯形脉冲对三倍频效率的影响较大,影响量基本在 10% 左右。比如,平顶脉冲在 2.5 GW/cm^2 左右能达到 82% 的理论效率[图 3(c)],而 1 ns 高斯形脉冲却只能达到 72% 左右[图 4(c)],这主要是由于高斯形脉冲的底脉冲部分三倍频效率较低,从而导致脉冲持续时间内的三倍频总效率降低 10% 左右,而平顶脉冲的平顶部分三倍频效率均为一稳定的较高值。

2) 高功率密度的非理想情况下,为了保证在 $2\sim 3\text{ GW/cm}^2$ 较宽的动态范围内均有比较稳定的三倍频转换效率,二倍频晶体必须失谐。但是,受 1 ns 高斯形脉冲和三倍频晶体损耗的影响,二倍频内部效率平均值并非在 67% 左右为最佳,而是在 $60\%\sim 63\%$ 左右,即二倍频外部效率平均值在 55% 左右,此时二倍频晶体的最佳内失谐角是 $160\ \mu\text{rad}$ (图 4 中 4 幅图的第三条曲线 η_{SHG3} 或者 η_{THG3})。并且晶体损耗越高,二倍频内部效率的最佳平均值越低。二倍频内部效率之所以并非在 67% 左右为最佳,原因在于受高斯形脉冲和晶体表面有损耗的影响,只有当二倍频晶体完全匹配(即不失谐)时,才能实现二倍频内部效率为 67% ,而完全匹配将导致在 $2\sim$

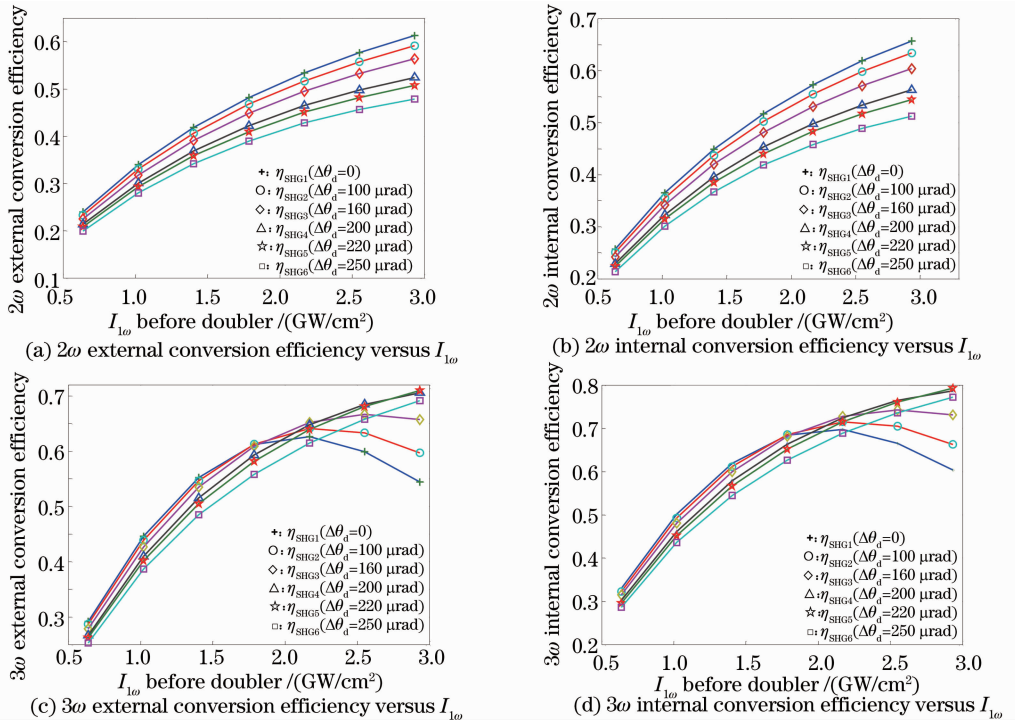


图 4 1 ns 高斯形脉冲和晶体表面有损耗前提下的二、三倍频效率变化

Fig. 4 SHG and THG efficiency with 1ns Gauss pulse and crystal surface loss

3 GW/cm² 内效率极不稳定(图 4 的 4 副图中第一条曲线 η_{SHG1} 或者 η_{THG1}), 不具有较宽的动态范围, 即不利于激光器的器件运行。

3) 对比图 3(c)~(d)和图 4(c)~(d)可见, 1 ns 高斯形脉冲下三倍频效率对二倍频晶体失谐角的敏感性降低, 这主要是由于 1 ns 高斯形脉冲不同时刻上光强不一致, 对二倍频晶体失谐角的敏感性不一致所导致, 从而大大降低三倍频效率对二倍频晶体失谐角的敏感性。

4.2 不同波面半径(即发散角)下的谐波转换规律

美国国家点火装置(NIF)的发散角为 $\pm 20 \mu\text{rad}$, 即对于 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的光束口径, 其波面半径为 14000 m, 波面畸变峰谷(PV)值为 $2.85 \mu\text{m}$, 即 2.7 个波长, 可见其对波面半径和发散角要求极高。而对于神光 III 原型装置 $280 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$ 的光束口径, 若波面半径为 14000 m, 相当于波面畸变 PV 值为 $1.4 \mu\text{m}$, 即 1.3 个波长。在光束口径值为 L 的前提下, 波面畸变 PV 值 Δ 与波面半径 R 的示意图如图 5 所示。

当光束口径 L 为定值时, 以波面半径值作为单一变量, 则发散角 β 、波面畸变 PV 值 Δ 与其的相互关系表达式为

$$\beta = \frac{\sqrt{2}L}{R} = 4 \times \frac{\Delta}{\sqrt{2}L/2}. \quad (8)$$

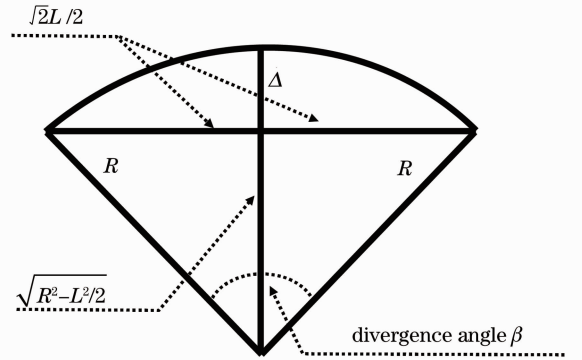


图 5 发散角 β 、波面畸变 PV 值 Δ 与波面半径 R 的相互关系示意图

Fig. 5 Schememap for divergence angle β , wave aberration PV (Δ) and wave radius R

下面分析高功率密度 ($I_{1\omega} = 2.5 \text{ GW/cm}^2$) 下, 不同波面半径 ($R = \infty$ 和 $R = 1000 \sim 14000 \text{ m}$) 对三倍频效率和晶体调谐曲线的影响, 如图 6 所示。输入条件同 4.1 节, 只是改变波面半径值和相应的发散角。

从图 6~图 7 的 6 幅图, 可以得到如下信息:

1) 高功率密度 ($I_{1\omega} = 2.5 \text{ GW/cm}^2$) 下, 波面半径减小和发散角的增大, 对二倍频的平均效率基本没影响[图 6(a)], 而对三倍频影响极大[图 6(b)与 6(c)]。波面半径为 2000 m 时, 三倍频效率已由最大值(70%)降至 55%了[图 6(b)]。此现象的原因

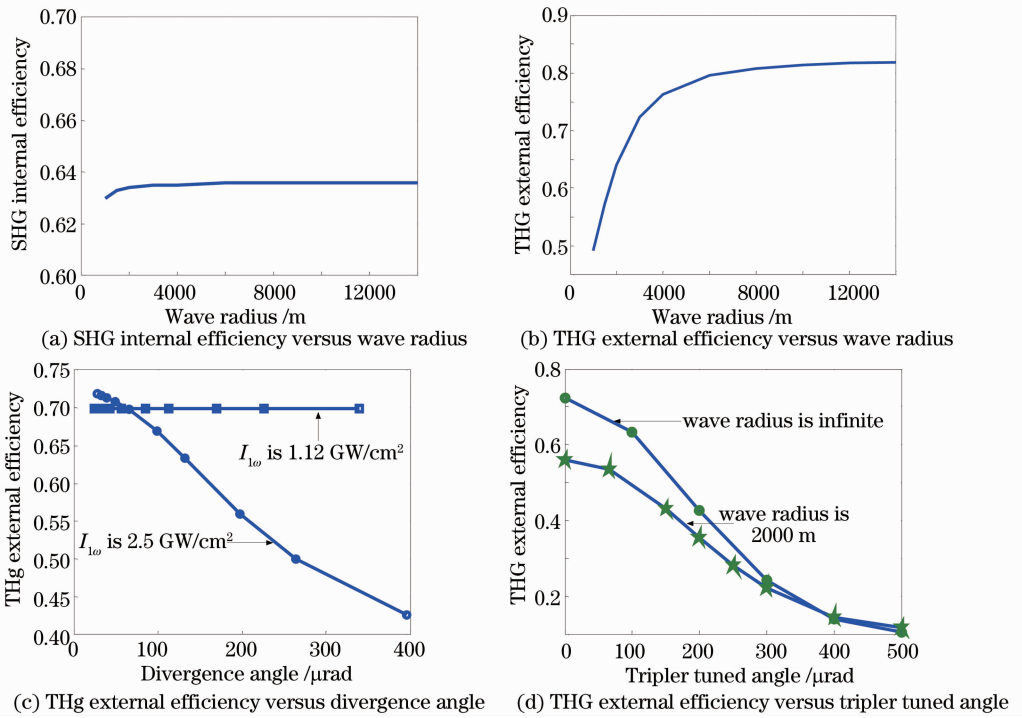


图 6 二、三倍频效率,三倍频晶体调谐曲线随波面半径及发散角的变化

Fig.6 SHG efficiency, THG efficiency and THG crystal tuned line versus different wave radius R

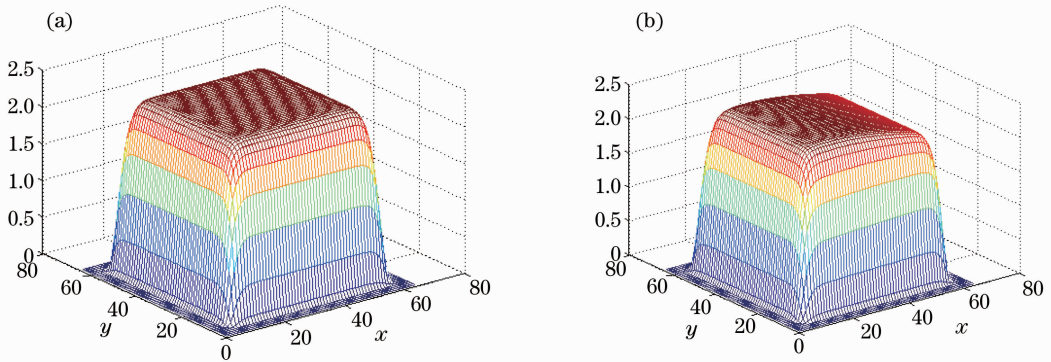


图 7 不同波面半径对 3ω 光近场的影响。(a)平面波；(b)波面半径 2000 m

Fig.7 Influence of different wave radius R on 3ω near field. (a) Plane wave; (b) wave radius is 2000 m

在于高功率密度下的三倍频效率受二倍频晶体失谐角的影响最大,并且三倍频效率是两块晶体的综合反映效果[图 3(c)和(d)],而二倍频效率是自身晶体的单一反映效果[图 3(a)和(b)]。

2) 而在低功率密度下 ($I_{1\omega} = 1.12 \text{ GW/cm}^2$), 波面半径在 $1000 \sim 14000 \text{ m}$ 之内变化,对二、三倍频基本没影响[图 6(b)],此现象的原因在于低功率密度下两晶体的调谐半宽要宽得多。

3) 从图 6(d)可以看出,相对于平面波(即波面半径无穷大)来说,波面半径为 2000 m 的调谐曲线变化已比较平缓。即波面半径的减小,会降低三倍频效率对敏感角的敏感程度。这是因为随着波面半径的减小,发散角随之增大,最高三倍频效率会降

低。但是,在对三倍频晶体进行失谐时,处于完全匹配的部分区域会一直存在并且区域大小改变缓慢,从而降低了三倍频效率对敏感角的敏感程度。

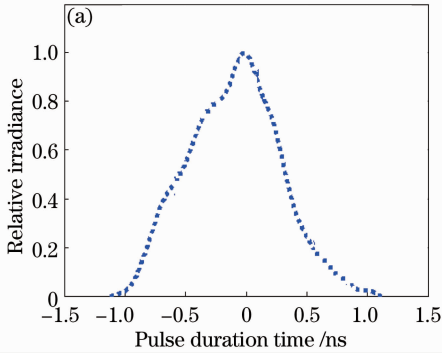
4) 从图 7 可以看出,相对于平面波来说, 3ω 光的近场分布比较对称,而对于波面半径为 2000 m 的光来说, 3ω 光的近场分布在某一方向出现一边高一边低的现象。此主要是由于发散角的存在,导致全口径内无法实现完全匹配,从而使得在某一方向的局部区域匹配,而另外一些区域失配。

5 验证实验

以 ICF 驱动器——神光 III 原型装置为研究平台,针对 1 ns 高斯脉冲的非理想情况条件,对二倍

频不同失谐角度下进行了三倍频外效率的对比实验,验证条件和实验结果如图 8 所示。从图 8 可以得知:

1) 1 ns 高斯形脉冲的三倍频外效率绝对值最大值为 70% 左右,比理想的平顶脉冲三倍频外效率降低了 10%;



2) 当基频光功率密度大于 1.5 GW/cm^2 后,对二倍频晶体进行一定的失谐角度,则有利于高效三倍频。但受 1 ns 高斯脉冲和三倍频晶体损耗的影响,为了追求最高三倍频外效率,二倍频的最佳失谐角度并非理想情况下的 $220 \mu\text{rad}$,而是 $160 \mu\text{rad}$ 。

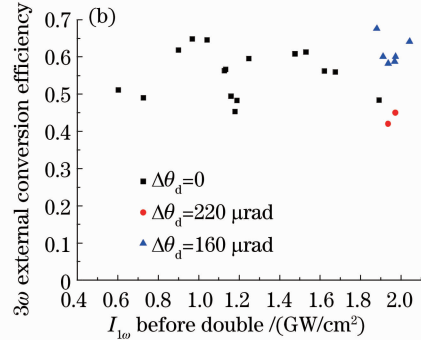


图 8 (a) 实测的 1ω 光高斯脉冲和 (b) 二倍频晶体不同失谐角度时三倍频外效率的对比实验

Fig. 8 (a) Measured 1ω Gauss pulse and (b) THG efficiency contrastive experiments versus different doubler tuned angles

6 结 论

对于非理想条件下的谐波转换,研究 1 ns 高斯脉冲,不同波面半径和晶体损耗对三倍频谐波转换的影响。结果表明,为了保证在 $2\sim 3 \text{ GW/cm}^2$ 较宽的动态范围内均有比较稳定的三倍频转换效率,二倍频的最佳失谐角度为 $160 \mu\text{rad}$,而非理想情况下的 $220 \mu\text{rad}$ 时,此时得到 $60\%\sim 63\%$ 左右的二倍频内效率,以及 70% 左右的理论与实测三倍频外转换效率。并且功率密度越高,波面半径和发散角对谐波转换的影响越大。

参 考 文 献

- 1 C E Barker, J M Auerbach, C H Adams, *et al.*. National ignition facility frequency converter development [C]. SPIE, 1996, 3047: 197-202.
- 2 P J Wegner, J M Auerbach, C E Barker, *et al.*. Frequency converter development of national ignition facility [C]. SPIE, 1998, 3492: 392-405.
- 3 R J Wegner, M A Hennesian, D R Speck, *et al.*. Harmonic conversion of large-aperture $1.05 \mu\text{m}$ laser beams for inertial-confinement fusion research [J]. Appl Opt, 1992, 31(30): 6414-6426.
- 4 J M Auerbach, D Wilam, C E Barker, *et al.*. Frequency-

Conversion Modeling [R]. UCRL-LR-105821-96-4.

- 5 He Yujun. The Spatial Character of High-Intensity Laser in Harmonic Conversion [D]. Sichuan: Sichuan University, 1999.
- 何玉娟. 高强度激光场谐波转换空间特性的研究[M]. 成都: 四川大学, 1999.
- 6 Li Kun. Study on Propagation Characteristic and Harmonic Conversion of High Power Laser [D]. Sichuan: Sichuan University, 2006.
- 李 琨. 靶场强激光频率转换及光传输特性研究[D]. 成都: 四川大学, 2006.
- 7 Li Qiang. Study on Propagation Characteristic of Third Harmonics of High Power Laser [D]. Chengdu: Sichuan University, 2004.
- 李 强. 高强度三倍频光传输特性研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- 8 Wang Fang. Study on Beam-Quality Change of 3ω in ICF Laser Equipment [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2007.
- 王 芳. ICF 驱动器 3ω 光学系统光束质量变化特性研究[M]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2007.
- 9 W M Petter. Frequency conversion modeling with spatially and temporally varying beams [C]. SPIE, 1997, 2633: 494.
- 10 Li Keyu. Output-ability analysis of high-intensity third harmonic generation system for ICF driver [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(7): 903-909.
- 李格宇. 惯性约束核聚变驱动器高强度三倍频系统输出能力分析[J]. 中国激光, 2006, 33(7): 903-909.

栏目编辑: 韩 峰