

文章编号: 1001-3806(2008)05-0471-03

## 脉冲形状对 3 次谐波转换的影响分析

韩 伟, 钟 伟, 李富全, 向 勇, 王礼全, 李恪宇, 贾怀庭, 冯 斌  
(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

**摘要:** 为了使谐波转换系统保持高效稳定的 3 次谐波转换, 采用数值模拟的方法, 研究了基频光脉冲波形对 3 倍频转换效率的影响, 并对高斯脉冲和平顶脉冲的不同谐波转换特点作了详细分析。当基频光为高斯脉冲时, 在  $3\text{GW}/\text{cm}^2$  的输入条件下最佳的 2 倍频转换效率为 56.8%, 低于理论预计的 66.7%。进一步计算了不同功率密度下, 最佳 2 倍频转换效率与超高斯脉冲阶数的关系。当考虑空间走离效应, 基频光时间和空间均为平顶分布时, 最佳的 2 倍频转换效率为 62%; 若基频光时间为平顶分布、空间分布为高斯分布时, 最佳 2 倍频转换效率为 51%, 进一步地偏离 66.7%。结果表明, 当基频光脉冲形状偏离理想的平顶分布时, 适当地降低 2 倍频转换效率, 可提高 3 倍频转换效率。

**关键词:** 非线性光学; 3 次谐波转换; 高斯脉冲; 转换效率

中图分类号: TN248.1; O437 文献标识码: A

### Influence of fundamental pulse shape on third-harmonic generation

HAN Wei, ZHONG Wei, LI Fu-quan, XIANG Yong, WANG Li-quan, LI Ke-yu, JIA Hua-ting, FENG Bin  
(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract** In order to achieve stable and high conversion efficiency, the influence of fundamental pulse shape on third-harmonic generation was analyzed and different physical insights of third-harmonic conversion with flat top pulse and Gaussian pulse were studied respectively. In the case of Gaussian fundamental pulse and  $3\text{GW}/\text{cm}^2$  input intensity, the calculated optimal second-harmonic conversion efficiency was 56.8%, lower than 66.7% predicted in theory. Furthermore, the dependence of optimal second-harmonic conversion efficiency on fundamental pulse shape was calculated under different input intensity. The spatial walk-off effect will influence the optimal second-harmonic conversion efficiency, lowering it to 62% in the case of fundamental pulse with flat top spatial and temporal distribution. The optimal second-harmonic conversion efficiency will decrease to 51% when the spatial distribution of fundamental pulse is Gaussian. It is discovered that when the fundamental pulse is not ideal flat top pulse shape, the third-harmonic conversion efficiency can be improved by lowering the second-harmonic conversion efficiency properly.

**Key words** nonlinear optics; third-harmonic conversion; Gaussian pulse; conversion efficiency

## 引 言

在国内外大型惯性约束核聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 激光器的运行中, 3 倍频系统的稳定输出能力是激光器的关键单元技术之一, 高效、稳定的 3 倍频 (third-harmonic generation, THG) 不仅是物理实验对 3 倍频转换系统的需求, 而且还是多路功率平衡的根本要求<sup>[1-2]</sup>。所以, 如何进行高效、稳定的 3 倍频一直是各国科学家追求的目标。

在 ICF 激光器的三倍频研究中, 一些研究小组做了大量的工作, 但这些工作多是从相位失配的角度出发来研究基频光空间特性 (光强, 位相) 对 3 倍频过程的影响<sup>[3-7]</sup>。本文中主要是研究基频光 (fundamental harmonic, FH) 脉冲波形对 3 倍频转换效率的影响, 对高斯脉冲和平顶脉冲的不同谐波转换特点作了详细分析。研究表明, 应根据不同的脉冲形状合理地控制 2 倍频 (second-harmonic generation, SHG) 的转换效率, 才能取得最佳的 3 倍频输出效率。

### 1 3 倍频理论模型<sup>[8-10]</sup>

以 I / II 类角度失谐的 3 倍频方案为例, 它包括一个 I 类匹配的 2 倍频过程和一个 II 类匹配的和频过程。描述倍频与和频过程的耦合波方程组为:

$$\frac{\partial^2 A_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_1}{\partial y^2} + 2n_1 \frac{\omega_1}{c} \left[ \frac{\partial A_1}{\partial z} + \beta(\theta) \frac{\partial A_1}{\partial y} + a_1 \frac{\partial A_1}{\partial t} \right] =$$

基金项目: 高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室基金资助项目 (9140C6803010802)

作者简介: 韩 伟 (1982-), 男, 研究实习员, 从事非线性光学和激光技术研究。

E-mail: tonyhan2000@163.com

收稿日期: 2007-04-29; 收到修改稿日期: 2007-07-04

$$\begin{aligned}
& -\frac{\omega_1^2}{c^2} \bar{\chi}_2^* A_3 \exp(i\Delta kz) - i\frac{n_1\omega_1}{c} \alpha_1 A_1, \\
\frac{\partial^2 A_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_2}{\partial y^2} + 2n_2 \frac{\omega_2}{c} \left[ \frac{\partial A_2}{\partial z} + \rho_2(\theta) \frac{\partial A_2}{\partial y} + a_2 \frac{\partial A_2}{\partial t} \right] = \\
& -\frac{\omega_2^2}{c^2} \bar{\chi}_1^* A_3 \exp(i\Delta kz) - i\frac{n_2\omega_2}{c} \alpha_2 A_3, \\
\frac{\partial^2 A_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_3}{\partial y^2} + 2n_3 \frac{\omega_3}{c} \left[ \frac{\partial A_3}{\partial z} + \rho_3(\theta) \frac{\partial A_3}{\partial y} + a_3 \frac{\partial A_3}{\partial t} \right] = \\
& -\frac{\omega_3^2}{c^2} \bar{\chi}_1 A_2 \exp(-i\Delta kz) - i\frac{n_3\omega_3}{c} \alpha_3 A_3 \quad (1)
\end{aligned}$$

式中,  $A_j (j=1, 2, 3)$  为光场复振幅,  $n_j$  为折射率,  $\omega_j$  为角频率,  $\rho_j(\theta)$  为 e 光的走离系数,  $a_j = \frac{1}{v_{gj}} - \frac{1}{v_{g1}}$ ,  $v_{gj}$  为群速度,  $\alpha_i (i=1, 2, 3)$  为吸收系数,  $\epsilon_0$  为自由空间介电常数,  $\Delta k$  为位相失配量,  $c$  为真空中的光速,  $\bar{\chi}$  为有效非线性系数。倍频与和频晶体长度分别为 1mm 和 9mm。

### 2 计算结果及分析

在 3 倍频过程中, 理论上认为入射到和频晶体上的基频光和 2 倍频光的光子数之比为 1:1, 即 2 倍频转换效率为 66% 时, 3 倍频转换效率可以达到最高。但是, 计算表明当基频光脉冲不是平顶分布时, 66% 的 2 倍频转换效率并不能保证 3 倍频转换效率达到最大, 相反适当地降低 2 倍频转换效率反而可提高 3 倍频转换效率, 如图 1 所示。图 1 中实线和虚线分别为高斯脉冲和平顶脉冲的 3 倍频转换效率与 2 倍频转换效率的关系曲线, 基频光功率密度为  $3\text{GW}/\text{cm}^2$ 。

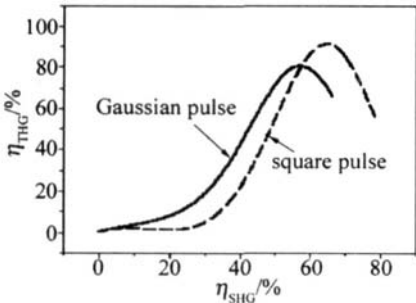


Fig 1 Third-harmonic conversion efficiency as a function of second-harmonic conversion efficiency

图 1 说明, 对于平顶脉冲而言, 最佳的 2 倍频转换效率为 66%, 但是对于高斯脉冲而言, 最佳的 2 倍频转换效率为 56.8%, 小于 66%。基频光为高斯脉冲时, 最佳的 2 倍频转换效率偏离 66%, 说明“和频晶体中基频光和 2 倍频光子数之比为 1:1 时转换效率最高”是在一定条件下适用的。仅考虑 3 倍频过程中的和频过程, 假设入射基频光和 2 倍频光脉冲形状相同, 均为高斯脉冲, 计算转换效率与两入射脉冲能量比的关系, 如图 2 所示, 图中能量比例定义为 2 倍频光

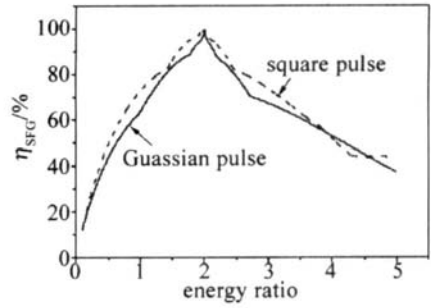


Fig 2 Sum-frequency conversion efficiency as a function of energy ratio between fundamental pulse and second harmonic pulse

能量与基频光能量的比例。

图 2 说明在和频过程中, 当 2 倍频光和基频光的脉冲形状相同时, 两者的能量之比为 2:1 时和频过程的转换效率最大。而图 1 指出当基频光为高斯脉冲时, 最佳的 2 倍频转换效率低于 66%, 这是因为当基频光为高斯脉冲, 倍频晶体输出的 2 倍频光和基频光的脉冲形状不相同, 如图 3 所示。图 3 分别是 2 倍频转换效率为 56.8% (见图 3a) 和 66% (见图 3b) 时和频晶体前基频光和 2 倍频光的脉冲形状。

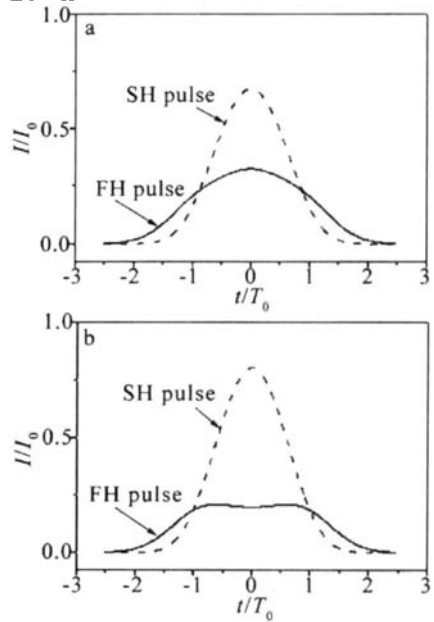


Fig 3 Pulse shape of fundamental and second-harmonic pulse under different SHG conversion efficiency

从图 3 可以看出, 2 倍频转换效率为 56.8% 时和频晶体前基频光和 2 倍频光的脉冲形状基本相似, 两者仍保留为高斯脉冲的形状, 但是当 2 倍频转换效率为 66% 时, 两者的脉冲形状相差很大, 2 倍频光为高斯脉冲, 而基频光的顶部变平。2 倍频转换效率为 66% 虽然能保证入射到和频晶体上的 2 倍频光和基频光的总能量比为 2:1, 但是对于和频过程而言, 欲使其转换效率最高, 要求脉冲的不同时刻 2 倍频光和基频光的光强之比为 2:1, 方能使基频光和 2 倍频光充分转换为 2 倍频光。从图 3 可以看出, 56.8% 的 2 倍频

转换效率时, 2 倍频光和基频光在  $t = 0$  时刻两者的光强之比为 2:1, 而 2 倍频转换效率为 66.7% 时,  $t = 0$  时刻两者光强之比为 4:1, 这样在和频过程中, 2 倍频光能量过剩, 将会导致逆转换的出现, 引起转换效率的降低, 如图 4 所示。图 4 分别是 2 倍频转换效率为 56.8% (见图 4a) 和 66.7% (见图 4b) 时 3 倍频输出的基频光、2 倍频光和 3 倍频光的脉冲形状。

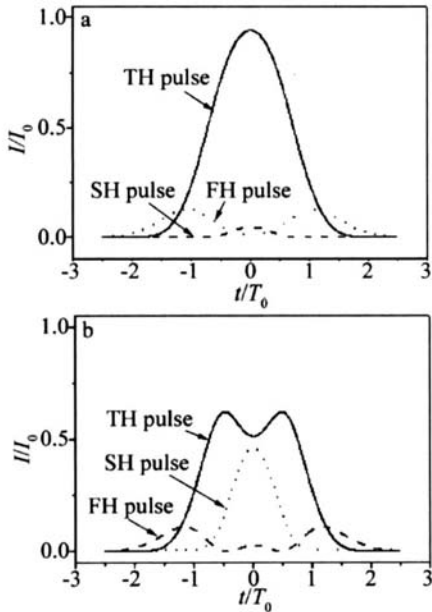


Fig 4 Pulse shape of fundamental second-harmonic and third-harmonic pulse under different SHG conversion efficiency

因此, 在 3 倍频过程中, 欲使 3 倍频转换效率最高, 应使和频晶体前 2 倍频光和基频光脉冲不同时刻的光强之比为 2:1, 而不是使两者的总体能量之比为 2:1。当基频光脉冲不是理想的平顶分布时, 应适当地降低 2 倍频转换效率, 保证脉冲功率密度较高的部位 (如  $t = 0$  时刻) 2 倍频光和基频光的光强之比为 2:1。

基频光的脉冲波形不同, 其最佳的 2 倍频转换效率也不同, 如图 5 所示。图 5 表示不同功率密度下, 最

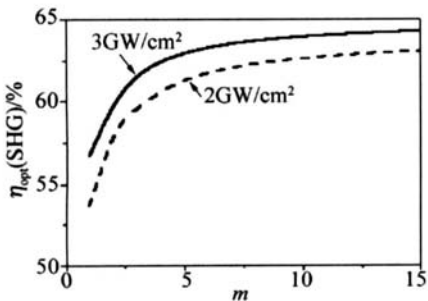


Fig 5 The dependence of optimal SHG conversion efficiency on pulse shape

佳 2 倍频转换效率与超高斯脉冲阶数的关系,  $m = 1$  为高斯脉冲,  $m$  越大脉冲形状越趋于平顶形状, 从图 5 可以看出, 脉冲形状越趋于平顶分布, 最佳的转换效率越接近 66.7%, 而超高斯脉冲的阶数越低时, 其最佳的 2

倍频转换效率越小。

不仅基频光脉冲形状会影响最佳的 2 倍频转换效率, 而且走离效应和基频光的空间分布也会影响最佳的 2 倍频转换效率, 如图 6 所示。当基频光时间和空

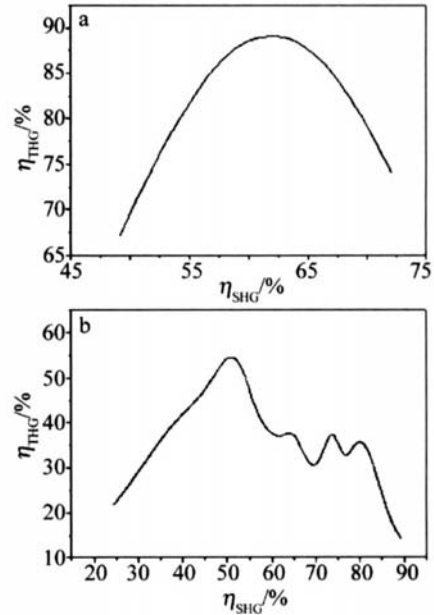


Fig 6 a—the dependence of THG efficiency on SHG efficiency including walk-off effect of fundamental harmonic beams b—the dependence of THG efficiency on SHG efficiency including spatial distribution of fundamental harmonic beams

间均为平顶分布时, 空间走离效应会导致最佳的 2 倍频转换效率偏离 66.7%, 如图 6a 所示, 其中 2 倍频转换效率为 62% 时 3 倍频转换效率最高, 小于 66.7%, 这是因为倍频晶体出射的基频光和倍频光空间上不完全重合。这种空间效应对最佳 2 倍频转换效率的影响在基频光空间为高斯分布时更为明显, 如图 6b 所示, 其中基频光时间为平顶分布, 空间是高斯分布, 此时最佳的 2 倍频转换效率为 51%, 严重地偏离了理想情况下的最佳 2 倍频转换效率 66.7%, 其原因与脉冲形状对最佳 2 倍频转换效率的影响相同。

### 3 结 论

在激光装置的实际运行中, 基频光的脉冲波形会偏离平顶脉冲式的形状, 这给高效稳定的 3 倍频带来难度, 本文中分析了基频光脉冲形状对 3 倍频转换效率的影响。计算结果指出当基频光脉冲形状偏离理想的平顶脉冲分布时, 适当降低 2 倍频转换效率可以提高 3 倍频转换效率, 并给出了不同功率密度下, 最佳 2 倍频转换效率与超高斯脉冲阶数的关系。进一步地研究了空间走离效应和基频光空间分布对最佳 2 倍频转换效率的影响, 研究表明, 走离效应和基频光空间为非理想的平顶分布两者都会导致最佳的 2 倍频转换效率

(下转第 557 页)

时,切割前沿温度迅速升高。这是因为当气压较低时,气体流量低,发生放热反应帮助切割的热量较少,温度升高缓慢。此时,在激光功率和速度不变的情况下,热影响区较小,缝宽较小,切割质量较好。反之,当气压过高时,发生放热反应帮助切割的热量较多,温度迅速上升。在其它参量不变的情况下,输入到工件的有效能量大大增加,引起切割点“烧蚀”,大大降低了切割质量。

#### 4 结 论

对中厚钢板小圆孔的高功率 CO<sub>2</sub> 激光切割工艺进行了试验研究,得到了较好的切割质量及优化工艺参量。当激光功率为 1kW、速度为 1.2m/min、氧气压力为  $1.2 \times 10^5$  Pa、离焦量为 -1mm 时,切割线能量为 57kJ/m,在 6mm 厚的 A3 钢板上切割  $\varnothing 5$ mm 小孔可以获得最佳的切割效果。在激光切割面板或模板上(中厚板)的深径比不大于 2 的小孔时,采用小功率、慢速度和低气压的工艺参量可以避免切割点附近局部温度过高,获得最佳的切割效果。

#### 参 考 文 献

- [1] LIU D H. Laser cutting [J]. Laser Journal 1992, 13(4): 207-213 (in Chinese).
- [2] LIX Y, ZENG X Y, HUANG W L. Status and prospect of precision laser

machining [J]. Laser Journal 2000, 21(5): 1-3 (in Chinese).

- [3] YANG Y M. Applications of precision machining with Nd:YAG laser [J]. Lasers and Infrared, 1997, 27(6): 333-337 (in Chinese).
- [4] LIX Y, ZENG X Y, LU Y. Study of YAG Laser cutting process with stainless steel sheet [J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, A28(12): 1125-1129 (in Chinese).
- [5] LI Y Sh. Study on laser deep hole drilling [J]. Laser Technology 1998, 22(2): 36-40 (in Chinese).
- [6] RAJARAM N, SHEKH-AHMAD J, CERAGH I S H. CO<sub>2</sub> laser cut quality of 4130 steel [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(4): 351-358.
- [7] ZHENG Q G. Laser advanced manufacture [M]. Wuhan Huazhong University of Science and Technology Press, 2002, 25-27 (in Chinese).
- [8] LIANG Y R. Study of correlation between material surface temperature and laser average power and cutting speed [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1996, 32(6): 17-19 (in Chinese).
- [9] CHEN S L, STEENW M. The theoretical investigation of gas assisted laser cutting [C] // ICALEO, San Jose USA: Laser Institute of America, 1991, 221-227.
- [10] KAEBERNICK H, JEROMIN A, MATHEW P. Adaptive control for laser cutting using striation frequency analysis [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1998, 47(1): 137-139.
- [11] CHENG H, NELW O. The effects of power rippling on CO<sub>2</sub> laser cutting [J]. Opt & Laser Technol, 1997, 29(3): 125-134.
- [12] NELW O, STEENW M. A three dimensional analysis of gas entrainment operating during the laser cutting process [J]. J Phys, 1995, D28(1): 12-18.

(上接第 473 页)

偏离 66.7%, 特别是后者的影响更大。本文中的结论在激光器的实际运行中可以用来指导倍频系统的调试,即根据基频光的脉冲形状来适当地调整 2 倍频晶体的失谐角度以便控制 2 倍频转换效率,从而提高 3 倍频转换效率。

#### 参 考 文 献

- [1] WEGNER P J, AUERBACH J M, BARKER C E. Frequency converter development of national ignition facility [J]. Proc SPIE, 1998, 3492: 392-405.
- [2] WEGNER P J, HENESIAN M A, SPECK D R. Harmonic conversion of large aperture 1.05 $\mu$ m laser beams for inertial confinement fusion research [J]. Appl Opt, 1992, 31(30): 6414-6426.
- [3] ZHANG B, LI Q, CAI B W. Influence of high-power third harmonic conversion on laser beam quality [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(5): 553-556 (in Chinese).
- [4] HE Y J, CAI B W, WEI X F. Effect of phase ripples on the third harmonic generation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, A28(9): 789-

792 (in Chinese).

- [5] LI Q, ZHANG B, CAI B W, *et al*. Effects of amplitude modulation and phase perturbation on the optimizing parameters of third harmonic generation [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(1): 73-76 (in Chinese).
- [6] HOU J, ZHANG Y D, JIANG W H. Phase distortion of second harmonic generation with phase aberrated beam [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 22(4): 402-406 (in Chinese).
- [7] HOU J, LONG N. Third harmonic conversion of aberrated laser beam [J]. Chinese Journal of Laser, 2004, 29(6): 525-529 (in Chinese).
- [8] MILLONNI P W, AUERBACH J M, EMERL D. Frequency conversion modeling with spatially and temporally varying beams [J]. Proc SPIE, 1997, 2622: 230-241.
- [9] MA Ch, HE Y J, WEI X F, *et al*. Two dimensional numerical simulation study on high power high efficiency tripling harmonic [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(s1): 131-136 (in Chinese).
- [10] LI Q, ZHANG B. Inverse problem of monochromatic third harmonic generation [J]. Laser Technology, 2006, 30(2): 186-188 (in Chinese).