

# 三倍频激光束特性传输变换的近似模型\*

钱列加 邓锡铭

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 高功率激光物理实验室, 上海 201800)

**摘 要** 针对具有振幅和位相扰动的激光束的三次谐波转换, 理论上研究了三倍频激光束特性的传输变换, 给出了光束质量  $M^2$  因子、振幅和位相扰动变换的近似解析模型, 可为高功率激光驱动器的设计提供理论依据。

**关键词** 振幅扰动, 位相扰动, 光束质量。

## 1 引 言

光束质量和光束特性的传输变换是激光光学的一个重要领域<sup>[1, 2]</sup>, 它可为分析和设计光学系统提供重要依据。这方面的研究已经涉及到任意光束经畸变线性光学系统传输的实际问题<sup>[3]</sup>。随着激光聚变驱动器的发展和相应等离子体物理的深入研究, 需要了解和掌握激光三倍频过程中谐波光束基本特性的变换规律, 但目前对谐波转换的研究大都只关心效率问题<sup>[4, 5]</sup>, 理论模型也只适用于平面波或高斯光束<sup>[6, 7]</sup>, 而高功率高能钕玻璃激光具有一定程度的位相畸变和光强不均匀, 其光束质量一般为 10~20 倍衍射极限, 因此对谐波光束特性的研究是非常必要和有价值的。本文将按照最近邓锡铭等人讨论傍轴光束的光束质量的概念, 区分研究光束位相和振幅扰动的传输变换, 应用微扰方法, 建立了谐波光束位相、振幅扰动和光束质量变换的近似理论模型。

## 2 振幅和位相扰动的传输变换

对入射基波光束振幅和位相扰动经非线性晶体波长变换器传输变换的研究, 作如下基本假定: 1) 入射基波光束的主要成份是时间和空间均匀的平面波, 谐波光束的扰动将主要取决于描述波长变换过程的耦合波方程的平面波解; 2) 不考虑位相扰动的方向对三倍频的影响, 对大口径 ( $> \phi 250$  mm) 激光束的三倍频而言, 位相扰动的方向角只有在远大于  $10 \mu\text{rad}$  时, 才会对倍频有明显的影 响。对实际应用的高效转换而言, 这一假定是合理的; 3) 三倍频变换器包含二倍频和混频晶体, 晶体足够薄, 可忽略衍射效应, 慢振幅近似成立。采用与文献[8]一致的符号及规定, 基于平面波解的倍频和混频过程的耦合波方程可表达为如下方程组, 其中已忽略晶体的吸收, 且严格满足波矢匹配:

\* 本项研究工作受到国家惯性约束聚变委员会和国家自然科学基金委的支持。

收稿日期: 1996年3月28日

$$\left. \begin{aligned} \frac{dE_1}{dE} &= -iK E_3 E_2^* \\ \frac{dE_2}{dE} &= -i(\omega_2/\omega)K E_3 E_1^* \\ \frac{dE_3}{dE} &= -i(\omega_3/\omega)K E_1 E_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

2.1 振幅扰动

入射基波假定有振幅扰动  $\rho_1$ , 则

$$E_{1\omega} = E_0(1 + \rho_1) \quad (2)$$

在一阶近似情况下, 光强为

$$I_{1\omega} = I_0(1 + 2\rho_1) \quad (3)$$

由于三倍频转换效率  $\eta$  只取决于基波入射光强, 而与位相扰动及其方向无关, 一阶近似时, 可表示为:

$$\eta(I_{1\omega}) = \eta_0(I_0) + \frac{\partial \eta_0}{\partial I_0} 2I_0 \rho_1 \quad (4)$$

输出三倍频光波可表示为入射光波与振幅转换效率的乘积:

$$E_{3\omega} = E_{1\omega} \eta^{\text{幅}}, \quad \eta^{\text{幅}} = \eta_0^{\text{幅}} [1 + \frac{\partial \eta_0}{\partial I_0} \frac{I_0}{\eta_0} \rho_1] \quad (5)$$

因此三倍频光波的振幅扰动

$$\rho_3 = \nu \rho_1, \quad \nu = \frac{1}{\eta_0} \frac{\partial (\eta_0 I_0)}{\partial I_0} \quad (6)$$

式中转换效率  $\eta_0$  可由耦合波方程(1) 给定。在小信号近似时,  $\eta_0$  正比于  $I_0^2$ ,  $\nu = 3$ ; 高效转换时, 通常  $\nu \approx 1$ 。因此较高效率的谐波转换的设计, 有利于对振幅扰动的抑制。

2.2 位相扰动

从耦合波方程组(1), 可直接得出二倍频和三倍频的位相扰动的变换分别为:

$$\mathcal{Q}_{2\omega} = 2\mathcal{Q}_\omega, \quad \mathcal{Q}_{3\omega} = 3\mathcal{Q}_\omega \quad (7)$$

位相扰动的传输变换与转换效率无关, 这一结论对存在波矢失配的情况不适用, 对此, 文献 [7] 已作了更普遍的讨论和分析。

综合方程(6)、(7)式, 光束振幅和位相扰动的传输变换可简单表示为  $2 \times 2$  的矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \rho_{3\omega} \\ \mathcal{Q}_{3\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nu & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_{1\omega} \\ \mathcal{Q}_{1\omega} \end{bmatrix} \quad (8)$$

3 光束质量

为对光束质量  $M^2$  因子讨论方便起见, 先分析入射光束具有一特定空间频率  $s_x$  的传输变换:

$$\left. \begin{aligned} E_{1\omega} &= E_0 [1 + p_{1\omega}^+(s_x) e^{i2\pi s_x x} + p_{1\omega}^-(s_x) e^{-i2\pi s_x x}] \\ E_{3\omega} &= E_{30} [1 + p_{3\omega}^+(s_x) e^{-i2\pi s_x x} + p_{3\omega}^-(s_x) e^{i2\pi s_x x}] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中空间谱  $p^+(s_x)$  和  $p^-(s_x)$  是振幅和位相扰动的另一种形式, 可假定为实数。按照本文第 2 部分的结论, 空间谱的变换可用下述矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} p_{3\omega}^+(s_x) \\ p_{3\omega}^-(s_x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{\omega}^+(s_x) \\ p_{\omega}^-(s_x) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$A = (\nu + 3)/2, \quad B = (\nu - 3)/2$$

对一般情况下, 空间频率  $s_x$  的二阶矩  $\sigma^2$  则可表达为:

$$\begin{aligned} \sigma_{3\omega}^2 &= \sum_{s_x} s_x^2 \{ [p_{3\omega}^+(s_x)]^2 + [p_{3\omega}^-(s_x)]^2 \} \\ &= \sum_{s_x} s_x^2 \{ (A^2 + B^2) [(p_{\omega}^+)^2 + (p_{\omega}^-)^2] \\ &\quad + 4AB p_{\omega}^+(s_x) p_{\omega}^-(s_x) \} \end{aligned} \quad (11)$$

考虑到  $A > 0$ ,  $B < 0$ , 可以从(11)式得到如下不等式:

$$(A + B)^2 \leq \sigma_{3\omega}^2 / \sigma_{\omega}^2 \leq 2(A^2 + B^2) \quad (12)$$

高效谐波转换时  $\nu \approx 1$ , 可以认为基波光束和谐波光束的二阶矩光腰尺度近似相等, 则基波和谐波光束的光束质量  $M^2$  因子有如下关系:

$$A + B \leq M_{3\omega}^2 / M_{\omega}^2 \leq \sqrt{2(A^2 + B^2)} \quad (13)$$

在大都数情况下,  $1 \leq \nu \leq 3$ , 因此三倍频光束质量  $M_{3\omega}^2$  与基波光束质量  $M_{\omega}^2$  相比较, 将变差, 在高效转换时, 其比值约在 1 至 3 倍之间, 分别由振幅和位相扰动的增长比例决定。从光束的发散角来说, 谐波光束将稍优于基波光束。

**结 论** 本文基于谐波转换的平面波解, 在理论上研究了光束的振幅扰动、位相扰动和光束质量经谐波转换的传输变换, 采用一阶微扰方法, 给出了其近似的变化规律。光束位相扰动的增长远快于振幅扰动, 是光束聚焦特性或光束质量变差的主要原因, 由于波长变短的缘故, 谐波光束的发散角或聚焦光斑大小将不逊于基波光束, 从而在高效转换时, 保持光束的亮度基本不变。这些结果与美国里弗莫尔实验最近报道的实验测量结果相吻<sup>[9]</sup>, 证实了本文的近似模型的正确性。本文讨论的光束的三种特性是高功率激光驱动器物理中特别感兴趣的物理量, 振幅扰动将影响光学元件的破坏问题, 而位相扰动和光束质量都与光束的聚焦特性有关, 在驱动器物理中有着特殊的要求。对这些物理量变化规律的掌握, 将对激光驱动器光束质量的控制和设计, 起到重要作用。

### 参 考 文 献

- [1] 吕百达, 激光光学(第二版), 成都: 四川大学出版社, 1992: 16~ 120
- [2] 邓锡铭, 有限束宽光流体力学. 杭州大学出版社, 1993: 5~ 30
- [3] 钱列加, 范滇元等, 有关光束质量的若干基本问题及其新进展. 中国激光, 1994, **A21**(12): 981~ 987
- [4] A. K. Cousins, Power conversion efficiency in second harmonic generation with nonuniform beams. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1993, **QE-29**(1): 217~ 226
- [5] M. A. Henesian, P. J. Wegner, D. R. Speck *et al.*, Modeling of large aperture third harmonic frequency conversion of high power Nd: glass laser system. *Proc. SPIE*, 1991, **1415**: 90~ 103
- [6] A. 亚里夫, 量子电子学. 上海: 上海科技出版, 1982: 432~ 447
- [7] G. D. Boyd, D. A. Kleinman, Second harmonic generations of Gaussian laser beams. *J. Appl. Phys.*, 1968, **39**(B): 3597~ 3618
- [8] R. S. Craxton, High efficiency frequency tripling schemes for high power Nd: glass lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**(9): 1771~ 1782

- [9] B. M. Van Wonterghem, C. E. Barker, J. R. Murray *et al.*, System description and initial performance results for beamlet. *ICF Quarterly Report*, LLNL, Oct. -Dec. 1994, 5(1): 1~ 19

## Approximate Model on Transform of Beam Characteristics in Frequency Tripling

Qian Liejia      Deng Ximing

*nal Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechan  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)*

(Received 28 March 1996)

**Abstract** We have investigated on the transform of harmonic beam characteristics such as beam quality  $M^2$  factor, amplitude and phase ripples in the frequency tripling of laser beam with amplitude and phase ripples. Approximate model has been developed. It is applicable in designs of high power laser drivers.

**Key words** amplitude ripples, phase ripples, beam quality.