

文章编号: 0253-2239(2010)10-3005-05

# 光束的时空调制对自相关信号影响分析

孙志红 夏彦文 刘 华 傅学军

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 通过采用分步傅里叶变换方法求解非共轴相关耦合波方程,分析了单发次自相关方法测试脉冲宽度时光束空间和频率调制对自相关信号的影响。分别讨论了两束基频光都存在空间调制和一束基频光在传输光路中强度分布受到调制等情况下的谐波信号变化。模拟结果表明谐波信号的调制随入射基频光调制度增大而增加,随基频光强调制频率增大而减少。相关信号外包络线与光束未调制情况下得到的结果一致,脉冲啁啾只是导致自相关信号效率降低。提出了基于自相关函数外包络线求解被测信号脉冲宽度的方法,为正确测试脉冲宽度提供了理论依据。

**关键词** 非线性光学;脉冲宽度;分步傅里叶变换;单发次自相关;调制度

**中图分类号** TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.3005

## Effect of Temporal and Spatial Modulation on Noncollinear Autocorrelation

Sun Zhihong Xia Yanwen Liu Hua Fu Xuejun

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

**Abstract** The split step Fourier transform method is adopted to study the coupled-wave equation of noncollinear autocorrelator. The influence of spatial intensity distribution and pulse chirp of the fundamental beams on measurement of pulse duration of second-order autocorrelation signal are simulated. Two fundamental beams and only one fundamental beam modulated by spatial intensity distribution are respectively discussed. It is shown that the irregular spatial intensity distribution modulation of the second harmonic beams increases with the fundamental beam modulation and decreases with modulated intensity increase of the fundamental beam. The outside envelope of the autocorrelation with irregular spatial intensity distribution is the same as that of the autocorrelation without modulation. The pulse chirp only leads to efficiency decrease of autocorrelation. The method of pulse duration derived from outside envelope of autocorrelation is presented. The analyzing results are of reference value for the exact measurement of pulse duration.

**Key words** nonlinear optics; pulse duration; split-step Fourier transform method; single-shot autocorrelation; modulation

### 1 引 言

随着获得的超短激光脉冲宽度不断地缩短,精确、可靠而简便地测量超短脉冲的脉宽和对比度成为迫切需要解决的关键问题,也是超快激光技术领域研究的一个重要方面。超短激光脉冲技术从皮秒进入飞秒阶段,通用的条纹相机等测量技术已无法

满足需要,用超短脉冲本身来测量的自相关方法是目前采用的主要方法,包括二阶自相关法和三阶自相关法等测试技术<sup>[1~6]</sup>。随着激光输出功率增大,重复频率激光输出就会降低到单次脉冲输出,对于单次超短脉冲脉宽和对比度的测试采用单发次自相关方法,单发次自相关仪采用无背景的非共线相位

收稿日期: 2009-12-06; 收到修改稿日期: 2010-02-07

基金项目: 中国工程物理研究院激光聚变研究中心和等离子体物理国家级重点实验室创新基金资助课题。

作者简介: 孙志红(1965—),女,硕士,副研究员,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: sunzh01@163.com

匹配耦合技术。其基本思想是利用非线性晶体的非共线相位匹配倍频效应,输入脉冲首先被分为强度相等的两束,两束光以非共线相位匹配角<sup>[7]</sup>入射到非线性晶体得到倍频脉冲信号,两个脉冲在晶体中重叠区域的每一点所产生的二次谐波信号强度正比于两束光强的乘积,非共线倍频结果将激光脉冲的时间分布转换为空间分布,记录相关函数,通过与脉冲形状有关的半峰全宽换算因子而得到被测脉冲宽度。关于非共轴二次谐波转换测试短脉冲宽度的实验国内外也开展了一些研究报道<sup>[1~5]</sup>,但对其测试精度影响因素分析报道很少。在实际的被测光束中,存在光束空间调制,通常还带有一定的频率调制,因此理论分析光束空间调制和脉冲啁啾等因素影响对于采用单发次自相关方法正确测试脉冲宽度是非常重要的。

本文根据非线性介质的波动方程及慢变包络近似得到非共轴相关耦合波方程,采用离散傅里叶变换和四阶龙格-库塔方法结合的分步傅里叶变换方法求解,数值模拟周期性空间光强调制、脉冲啁啾对自相关信号影响,分析结果对于采用自相关方法正确测试短脉冲宽度有一定的理论指导意义。

## 2 理论分析

平面波动方程在考虑二阶非线性效应,应用慢变包络近似,将倍频相互作用场表示为

$$E_n(z, t) = \frac{1}{2} A_n(z, t) \exp[i(k_n z - \omega_n t)] + c. c. \quad (1)$$

式中  $n=1, 2, 3$  分别对应入射的两束基频光和二倍频光脉冲,  $E_n(z, t)$  和  $A_n(z, t)$  分别为电场强度和复振幅,假定三个相互作用脉冲电场是准单色,得到描述非共轴倍频过程的非线性耦合波方程为<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} \hat{M}_1 A_1 = -i\sigma_1 A_3 A_2^* \exp(-i\Delta k z), \\ \hat{M}_2 A_2 = -i\sigma_2 A_3 A_1^* \exp(-i\Delta k z), \\ \hat{M}_3 A_3 = -i\sigma_3 A_1 A_2 \exp(i\Delta k z), \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\hat{M}_i = s_z \frac{\partial}{\partial z} + s_x \frac{\partial}{\partial x} + \frac{1}{u_i} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{i}{2k_i} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + \frac{i}{2} \beta_{2i} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{6} \beta_{3i} \frac{\partial^3}{\partial x^3} + \delta_i + Q_i(A_i)$ ,  $i=1, 2, 3$ , 没有考虑晶体的各向异性,式中  $\sigma$  为非线性耦合系数;  $s_z$  和  $s_x$  为单位波矢在  $z$  和  $x$  方向的投影;  $u_i$  为群速度;  $\beta_{2i} = (\partial^2 k_i / \partial \omega^2)_{\omega_i}$  分别为入射的两束基频光和二倍频光脉冲的二阶群速度色散系数,  $\beta_{3i} = (\partial^3 k_i / \partial \omega^3)_{\omega_i}$  为三阶群速度色散系数;  $\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)$  项表示衍射效

应;  $\delta$  为线性吸收系数;  $Q_i(A_i)$  项为非线性吸收(如双光子吸收)。忽略衍射效应、线性和非线性吸收、二阶和高阶群速度色散影响,通过离散傅里叶变换和四阶龙格-库塔方法为基础的分步傅里叶变换方法进行求解非线性耦合波方程<sup>[9~11]</sup>。

通常,二阶自相关函数可以表示为

$$I(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I_1(t) I_1(t - \tau) dt. \quad (3)$$

式中  $I_1(t)$  为基频光强度,  $\tau$  为时间延迟; (3) 式是非线性耦合波方程在群速度失配小<sup>[12]</sup>, 群速度色散小, 及小信号近似前提下得到的, 即所产生的二次谐波信号相对入射光强非常小。按照二阶自相关函数的定义式, 可以得到与脉冲形状有关的半峰全宽换算因子, 即波形因子的数值。对于不同形状脉冲, 如高斯、双曲正割平方、洛仑兹和对称指数函数可计算出对应的二阶自相关法测试脉冲宽度的波形因子分别为 1.4142, 1.5428, 2 和 2.4213。

## 3 数值模拟结果

计算中, 设定基频光波长为  $1.064 \mu\text{m}$ , 脉冲时域上为高斯分布, 空间上为 16 阶超高斯分布, 对 KDP 晶体采用非共轴 I 类  $90^\circ$  相位匹配,  $T=298 \text{ K}$ , 两束基频光入射到晶体上的角度为  $10.164^\circ$ , 脉冲半峰全宽为  $8 \text{ ps}$ , 入射光束口径为  $1.9 \text{ cm}$ , 晶体厚度为  $4 \text{ mm}$ 。计算中, 横向取样范围为  $0 \sim 10 \text{ cm}$ , 时域取样范围为  $0 \sim 80 \text{ ps}$ , 不同波长的折射依据塞耳迈耶尔方程<sup>[8]</sup>得到, 基频光和二倍频光的群速度分别为  $5.8031 \times 10^6 \text{ ps/km}$  和  $5.1479 \times 10^6 \text{ ps/km}$ 。计算给出二倍频转换效率与入射基频光能量之间关系, 如图 1 所示, 二倍频光转换效率按照  $\eta = E_{2\omega} / (E_{1\omega} + E_{1\omega})$  计算。由图可见, 随着入射能量的增大, 二倍频转换效率不断增加, 由于二阶自相关

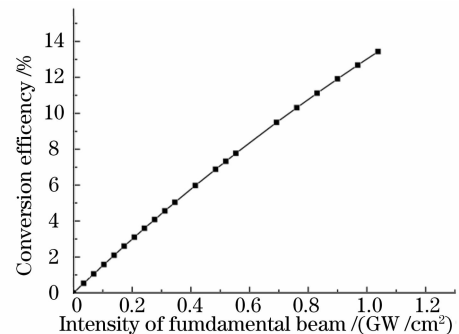


图 1 倍频效率与基频光功率密度之间关系

Fig. 1 Conversion efficiencies of second harmonic generation as a function of intensity of fundamental beam

函数是非线性耦合波方程在小信号近似前提下得到的,实验中若要是得到非畸变的相关信号,谐波转换效率要小于 10%<sup>[4]</sup>,根据图 1 计算结果理论上可以给出满足谐波转换效率要求的对应入射光功率密度。当入射光功率密度为 0.35 GW/cm<sup>2</sup>,效率为 5.1%时,入射基频光没有空间调制时的二倍频光空间分布和入射基频光与二倍频光强度分布曲线如图 2 所示。

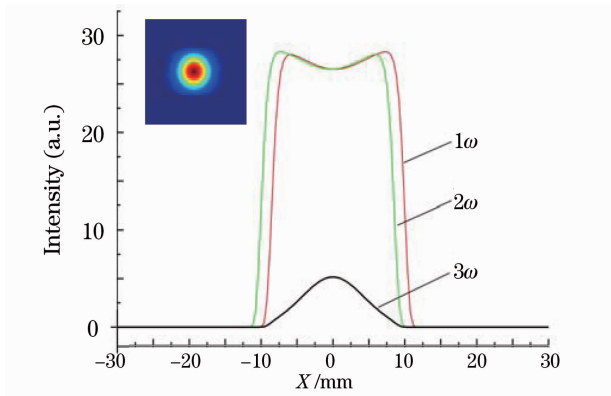


图 2 不加空间调制时的二倍频光和入射基频光强度分布曲线(内插图为自相关信号)

Fig. 2 Intensity curves of fundamental and the second harmonic beams without spatial modulation (inset is corresponding autocorrelation signal)

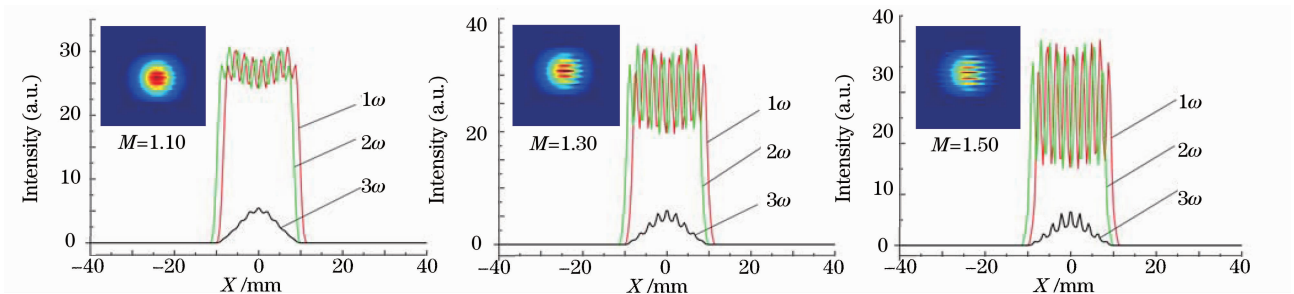


图 3 不同调制度下的基频光和二倍频光强度分布曲线(内插图为自相关信号)

Fig. 3 Intensity curves of fundamental and the second harmonic beams under different modulations (inset is corresponding autocorrelation signal)

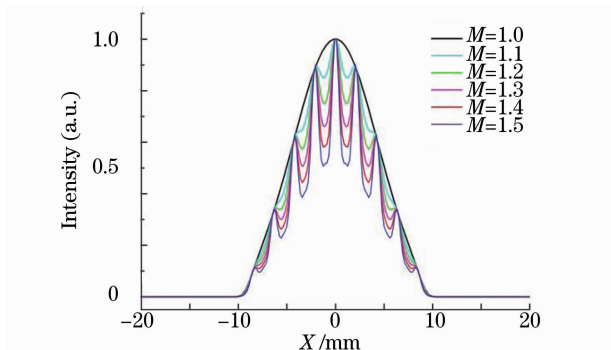


图 4 自相关信号强度分布与基频光强度调制度之间关系

Fig. 4 Autocorrelation intensity as a function of fundamental beam intensity modulation

在自相关法测试脉冲宽度的实际测试中,由于激光系统硬边衍射及光学元件的缺陷,被测光束近场总存在强度分布不均匀现象,即一定的空间调制,为模拟这种调制对脉宽测量的影响,假设基频光近场是正弦型分布调制,采用近场空域调制度  $M$  作为光强度调制的评价参数,调制度定义为近场的平顶区域峰值强度  $I_{\max}$  与平均强度  $I_{\text{avg}}$  之比<sup>[13]</sup>,即:  $M = I_{\max}/I_{\text{avg}}$ ,调制度反映的是近场整体起伏量,  $M$  越小,近场越均匀。保持基频光强调制频率不变的情况下,改变光强调制度,图 3 给出基频光强调制度分别为 1.10, 1.30 和 1.50 时基频光和二倍频光的强度空间分布。

将存在不同基频光强调制度时的自相关信号强度分布进行归一化处理,如图 4 所示。对于空间均匀的高斯基频脉冲,得到的相关信号空间分布光滑,对应图中  $M=1.0$  的自相关信号强度分布,随着基频光调制深度增大,所得二阶自相关信号的调制深度也加大,因为在低转换效率下,  $S_{2\omega} \propto \int I_{1\omega}(t) * I_{1\omega}[t - \tau(x)] d\tau$ , 调制函数的卷积同样为调制函数,随着基频光强调制度增大,所得到的二阶自相关信号的调制深度增加,对于自相关信号半峰全宽测量的偏差越大。

保持调制度  $M=1.2$  不变,改变基频光空间调制疏密度,二阶自相关信号也会发生变化。图 5 分别给出基频光空间光强调制频率分别为 0.15, 0.35, 0.55 和 0.75 lp/mm 时二阶自相关信号和光强分布。可以看出,随着基频光强调制频率增大,即强度空间分布曲线越密,二阶自相关信号的调制密度增大,光强度分布曲线变得越光滑,对于自相关信号半峰全宽的测试偏差越小。将不同基频光空间调制频率得到的自相关信号强度分布进行归一化(如图 6 所示),同样可以看出受到调制的谐波信号外包络分布与没有空间光强调制时(对应光强调制频率  $f=0$ )得到的相关信号强度分布一致,当然,随着基频光空间调制频率增

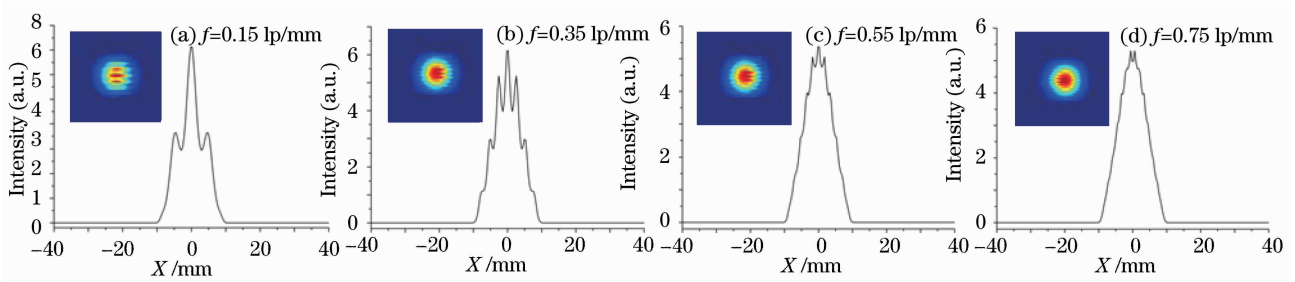


图 5 不同基频光强度调制频率时的二阶自相关信号强度分布(内插图自自相关信号)

Fig. 5 Intensity curves of the autocorrelation under different spatial frequency of intensity modulation of fundamental beams (inset is corresponding autocorrelation signal)

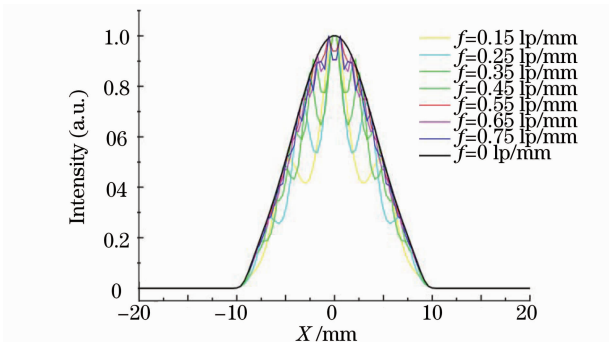


图 6 自相关信号强度与基频光强度调制频率之间关系

Fig. 6 Autocorrelation intensity as a function of spatial frequency of intensity modulation of fundamental beams

加,自相关信号半高宽度测量越接近空间均匀的高斯型基频脉冲产生的自相关信号半峰全宽。

由于光学元件的表面缺陷,可能只有一束基频光在传输光路中光强分布受到调制,当入射基频光中有一束光受到空间调制,谐波信号出现调制的光强分布与两束光受到空间调制的自相关信号变化规律一致,在此不再赘述。实际测试中,被测基频光束不但光束分布不均匀,通常还带有一定的啁啾,假设初始脉冲带有线性啁啾,其入射场为  $A(0, T) = \exp[-(1 + iC)(T/T_0)^2/2]$ , 式中  $C$  为初始啁啾参量。计算结果表明,随着脉冲啁啾增加,自相关信号空间分布保持不变,谐波转换效率减少,图 7 给出仅改变基频光束啁啾量,在没有啁啾及啁啾参量分别为 6, 10 和 12 时自相关信号的强度分布。

实验中采用在入射的基频光近场中加入遮光细条从而对入射基频光近场进行调制,通过改变遮挡条数目,可观察到二阶自相关信号调制频率也相应发生变化;图 8 给出了基频光近场存在调制情况下测得的二阶自相关函数分布曲线。

理论分析和实验测试表明,基频光近场空间光强调制会影响自相关信号的形状,因此通常根据采集到的自相关信号强度分布直接求半峰全宽而得到的被

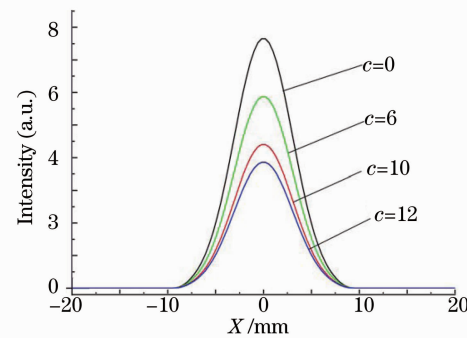


图 7 基频光脉冲啁啾与自相关信号强度关系

Fig. 7 Autocorrelation intensity as a function of fundamental pulse chirp

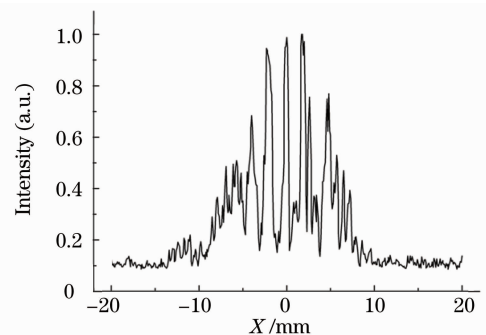


图 8 存在基频光强度调制实测的二阶自相关函数分布  
Fig. 8 Experimental second autocorrelation function with intensity modulation of fundamental beams

测光束半峰全宽是不正确的。在测量中要尽量减少光强分布不均匀对测量的影响,尽可能选择被测光束近场中的均匀区域(调制度较小的区域),由图 4 和 6 计算结果可见,若仍存在光强调制时,要正确测试存在强度调制的被测基频光宽度,先对得到的谐波信号求外包络线,然后由包络线半峰全宽根据与波形有关的换算因子求出被测基频光半峰全宽,这种处理方法可使脉冲宽度测量更加准确。

## 4 结 论

基于非线性介质的波动方程及慢变包络近似得

到非共轴相关耦合波方程,采用离散傅里叶变换和四阶龙格-库塔方法结合的分步傅里叶变换方法求解,数值模拟了周期性空间光强调制对自相关信号影响。分别讨论两束基频光都存在空间调制,或是一束基频光在传输光路中光强分布受到调制的情况,计算结果表明谐波信号的调制随入射基频光调制度增大而增加,随基频光强调制频率增大而减少,相关信号外包络线与光束未调制得到的相关信号分布一致。因此,若要正确测试谐波信号宽度,先对得到的谐波信号求外包络线,根据包络线求得半峰全宽即为没有强度调制的谐波信号的半峰全宽。计算结果还表明,随着脉冲啾啾增加,谐波转换效率减少,自相关信号空间分布保持不变。

### 参 考 文 献

- 1 F. Salin, P. Georges, Groger *et al.*. Single-shot measurement of a 52 2 fs pulse[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(21): 4528~4531
- 2 M. Raghuramaiah, A. K. Sharma, P. A. Naik *et al.*. A second-order autocorrelator for single-shot measurement of femtosecond laser pulse durations[J]. *Sadhana*, 2001, **26**(6): 603~611
- 3 Wang Xingtao, Yin Dingjun, Shuai Bin *et al.*. Measure ultrashort pulsewidth with total reflection second-order autocorrelator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 1018~1020  
王兴涛, 印定军, 帅 斌等. 应用全反射二阶自相关仪测量超短脉冲脉宽[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 1018~1020
- 4 O. Konoplev, Y. Fisher, D. Meyerhofer. Ultra-high dynamic range measurement of high contrast pulses using a second order autocorrelator[J]. *LLE Review*, 1999, **75**: 159~168
- 5 Ouyang Xiaoping, Zhang Fuling, Zhang Panzheng *et al.*. Second order autocorrelation applied to femtosecond laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 742~745
- 6 Wang Zhaohua, Wang Peng, Wei Zhiyi *et al.*. Contrast measurement of ultra-intensity laser and particle beams[J]. *High Power Laser and Particale Beams*, 2004, **16**(4): 434~436  
王兆华, 王 鹏, 魏志义等. 超短超强激光对比度的测量研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(4): 434~436
- 7 Deng Qinghua, Peng Hansheng, Zhang Xiaomin *et al.*. New method of chirped-pulse spectrum shaping using phase mismatched optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 354~359  
邓青华, 彭翰生, 张小民等. 光学参变啾啾脉冲放大相位失配啾啾脉冲频谱整形新方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 354~359
- 8 V. G. Dmitriev, L. V. Tarasov. *Applied nonlinear optics*[M]. Moscow: Radio and Communication, 1982: 206~208
- 9 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. Jia Dongfang *et al.*. transl., 3rd ed., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 33~35  
G. P. 阿戈沃 非线性光纤光学原理及应用[M], 贾东方等译. 第3版. 北京: 电子工业出版社, 2002: 33~35
- 10 P. J. Wegner, J. M. Auerbach, C. E. Barker *et al.*. Frequency converter development for the National Ignition Facility[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 392~405
- 11 W. M. Peter, J. M. Auerbach, D. Eimerl. Frequency conversion modeling with spatially and temporally varying beams[C]. *SPIE*, 1995, **2633**: 230~241
- 12 Wang Li, Han Xiuyou. Influence on crystal matching length by group velocity delay in optical parametric process[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 313~317  
王 丽, 韩秀友. 参变过程中的群速延迟对晶体匹配长度的影响[J], *光学学报*, 2007, **27**(2): 313~317
- 13 Sun Zhihong, Peng Zhitao, Liu Hua *et al.*. Calculation methods of high power laser near field parameters[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 544~548  
孙志红, 彭志涛, 刘 华等. 高功率激光近场空域计算方法[J], *中国激光*, 2008, **35**(4): 544~548