

文章编号: 0258-7025(2008)10-1553-05

# 空间光强分布不均匀对二阶单次 自相关脉宽测量的影响

郝欣<sup>1,2</sup> 朱启华<sup>1</sup> 王逍<sup>1</sup> 耿远超<sup>1,2</sup> 周凯南<sup>1</sup> 黄征<sup>1</sup> 王凤蕊<sup>1</sup>

(中国工程物理研究院<sup>1</sup> 激光聚变研究中心,<sup>2</sup> 研究生部, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 为研究空间光强分布不均匀对二阶单次自相关脉宽测量的影响,分析了二阶单次自相关测量脉宽的原理,重点讨论了周期性调制和局部暗区/强区对脉宽测量的影响,用数值模拟的方法分析了不同调制形式以及不同调制制度可能引起的测量误差,并进行了初步的实验验证。结果表明,当近场空间光强分布有周期性条纹状调制时,在一定范围内条纹越稀疏,调制度越大,CCD的测量值偏差越大;当近场有局部暗区(强区)调制时,在暗区宽度不大的前提下,暗区宽度越宽或强区宽度越窄,调制度越大,CCD的测量值偏差越大。

**关键词** 激光技术;二阶单次自相关;脉宽测量;空间光强不均匀

中图分类号 TN 247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083510.1553

## Influence of the Spatial Irregular Intensity Distribution on the Single-Shot Second-Order Autocorrelator

Hao Xin<sup>1,2</sup> Zhu Qihua<sup>1</sup> Wang Xiao<sup>1</sup> Geng Yuanchao<sup>1,2</sup>  
Zhou Kainan<sup>1</sup> Huang Zheng<sup>1</sup> Wang Fengrui<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Research Center of Laser Fusion, <sup>2</sup>Graduate University,  
China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** To study the influence of the spatial irregular distribution of the fundamental beams on the measurement of pulse duration of the second-order autocorrelator, the principle of single-shot second-order autocorrelator was analyzed. The influences of periodical modulation and local dim/bright region on the measurement of pulse duration were discussed numerically. The results show that when the intensity was modulated periodically, at certain extent the higher the modulation and the sparser the strips, the bigger the autocorrelator measurement warp will be. When the intensity was modulated by local dim/bright region and the dim region is not large, the wider the dim region or the narrower the bright region, as well as the higher the modulation, the bigger the autocorrelator measurement warp will be.

**Key words** laser technique; single-shot second harmonic correlation; measurement of pulse duration; irregular spatial intensity distribution

## 1 引言

超短超强脉冲激光能够在实验室中创造前所未有的极端物态条件,具有非常大的潜在应用价值<sup>[1~4]</sup>。国内已建立了 SILEX-I 数百太瓦级超短脉冲激光装置<sup>[5]</sup>,目前正在做进一步的升级。对于超短脉冲激光系统,脉宽是一个关键的参数,直接关系

到最终可获得的功率密度,关系到准确判定所从事实验的实验条件、可靠性及成功率,同时准确地提供这一参数可为激光系统的正常运行提供指导。

目前,超短脉冲脉宽测量的方法<sup>[6,7]</sup>主要有自相关法、自参考光谱相位相干电场重建法(SPIDER)及频率分辨光学开关法(FROG)等。二

收稿日期:2008-01-31;收到修改稿日期:2008-03-17

基金项目:高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室项目(9140C6803020605)资助课题。

作者简介:郝欣(1985—),女,山东人,硕士研究生,主要从事超短激光脉冲技术方面的研究。E-mail: xinh19@126.com

导师简介:朱启华(1969—),男,四川人,研究员,硕士生导师,主要从事超短激光脉冲技术方面的研究。

E-mail: qihzh@163.com

次谐波自相关法以其结构简单、调整方便、造价低等特点成为目前超短光脉冲测量最常用的方法。本文重点讨论空间光强分布不均匀对二阶单次自相关脉宽测量的影响。

## 2 基本原理

二阶单次自相关测量的基本原理<sup>[8]</sup>是利用非线性晶体的非共线相位匹配和频效应,将自相关曲线的时间分布转换为空间分布,用 CCD 对倍频光强的空间分布进行测量,通过对测量结果的分析换算得出激光脉冲的时间特征。

当两束光以一定的夹角非共线入射时,自相关信号只在两脉冲的时间和空间共同的重合点产生,测量方法<sup>[9]</sup>的原理如图 1 所示。输入脉冲  $I(t)$  首先被分为强度相等的两束,以一定的角度同时射入非线性晶体相互重叠。由于非共线相位匹配倍频效应,即产生瞬时二次谐波脉冲信号。假定光束的束腰在交叠区远大于脉冲长度  $c\tau_p$  (其中  $c$  为光速,  $\tau_p$  为脉冲宽度),则两光束  $I(t), I(t+\tau)$  可在晶体中时间和空间上交叠,  $I(t+\tau)$  为延迟  $\tau$  时间后再入射的光脉冲信号。在重叠区域的每一点,产生的二次谐波信号的强度正比于每一路径上局部光强的乘积, CCD 接收到的光电流  $S(x)$  为

$$S(x) \propto \int_{-\infty}^{+\infty} I(t)I(t+\tau)dt, \quad (1)$$

$S(x)$  的方向平行于两束光夹角的平行线方向。因此,中心线(交叠区的平分线)代表两个脉冲在时间上完全交叠。这样自相关函数转化为倍频光的空间强度分布(沿  $x$  方向)可由 CCD 相机记录。如果脉冲形状已知,则激光脉冲的半峰全宽(FWHM)  $t_p$  可由自相关函数的半峰全宽导出。空间强度分布的自相关半峰全宽( $\Delta x$ )和激光半峰全宽的关系为

$$t_p = (k\Delta x \sin \phi) / c, \quad (2)$$

式中  $\phi$  为两束光交角的一半,  $k$  为脉冲线形修正系

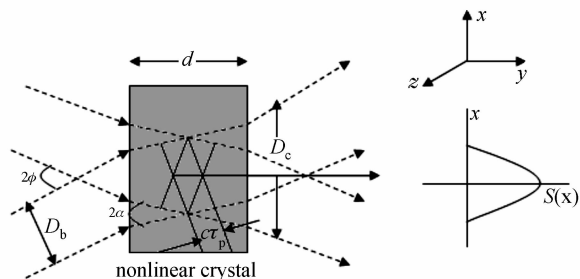


图 1 测量原理示意图

Fig. 1 Schematic of measurement principle

数,对于高斯型和  $\text{sech}^2$  型,  $k$  分别为  $\sqrt{2}$  和 1.3。

## 3 空间光强不均匀对二阶单次自相关测量的影响

### 3.1 二阶单次自相关数值计算模型

由单次自相关的原理可知,自相关信号是由倍频光空间强度分布的时间积分(能量密度)表征的,因此基频光的空间光强分布对自相关信号有影响,也就是空间光强分布不均匀会影响脉宽的测量结果。基频光脉冲模型用矩阵来表示,矩阵的两维分别表示空间和时间,矩阵值对应一定空间一定时刻的光强分布。当不存在空间调制时,假设激光脉冲在时间上呈高斯分布,在空间上振幅分布均匀,则矩阵行代表空间光强分布,即同一行矩阵值相等,矩阵列代表光强时间分布

$$I(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)^2, \quad (3)$$

式中  $A$  为激光脉冲峰值。

数值计算模型由三个矩阵来表示:矩阵 1,2 分别模拟传播方向与  $y$  轴交角为  $\pm\phi$  的两束强度、频率均相同的基频光,矩阵 3 的元素值由矩阵 1,2 交叠后对应元素的相乘得到。CCD 接收到的倍频光的空间强度分布(沿  $x$  方向)如图 2 所示。

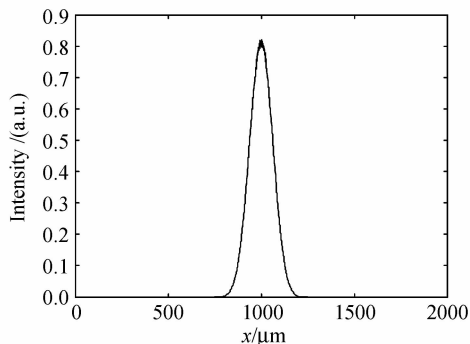


图 2 无调制时 CCD 接收到的自相关曲线

Fig. 2 Autocorrelation curve obtained by CCD without modulation

由于两束基频光由同一光源分出,在计算中认为两束光有相同的空间调制,其参数取值分别为  $A = 1/2\pi, \tau = 100 \text{ fs}, t \in (0, \tau), \phi = 11^\circ$ , 无调制时 CCD 测得的倍频光空间强度分布的半峰全宽为 144 fs。事实上这些取值只是为了便于表述和说明,由于后面的一些误差计算均为相对值,这些取值对分析结果并无影响。

### 3.2 周期性调制对脉宽测量的影响

在实际光学系统中由于硬边衍射等原因,光束

近场中可能出现周期性的调制,为模拟这种调制对脉宽测量的影响,假设基频光近场中有正弦型条纹状分布,在计算模型中基频光的时空光强分布如图3(a)所示,空间光强调制度(光强调制度=最大光强/平均光强) $M = 1.25$ ,正弦条纹疏密度 $f = 10 \text{ mm}^{-1}$ ,调制后 CCD 接收到的光强半峰全宽为 126 fs,如图3(b)所示。图4为实验中基频光近场受条纹状调制时,CCD采集到的自相关曲线,图中从左自右,第一、三脉冲为基频光自倍频光强分布曲线,中间脉冲为自相关曲线。

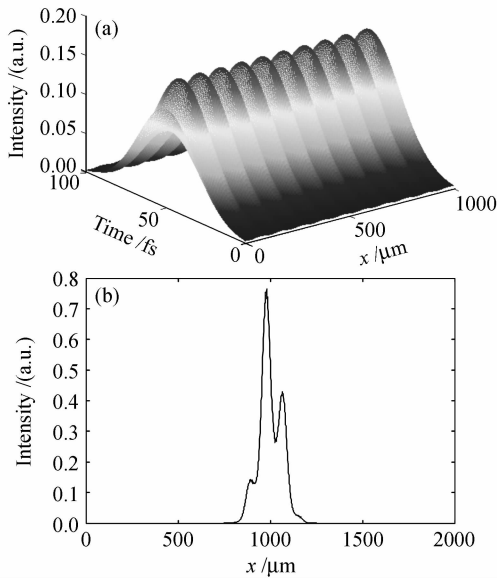


图3 正弦调制的空间光强分布(a)及对应的自相关曲线(b)  
Fig. 3 Spatial intensity (a) and autocorrelation curve (b) modulated by sine wave

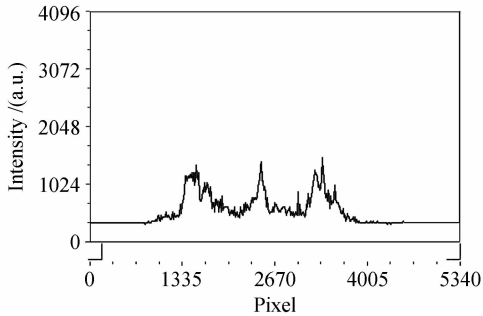


图4 实验采集到的自相关曲线

Fig. 4 Autocorrelation curve obtained by experiment

1) 保持正弦条纹疏密度 $f$ 不变,改变其调制度 $M$ ,观察调制度对调制后半峰全宽的影响,如图5(a)所示,纵轴代表调制后自相关曲线的半峰全宽 $t'_{\text{FWHM}}$ 相对于光强均匀时半峰全宽 $t_{\text{FWHM}}$ 的偏差 $\Delta t = |t_{\text{FWHM}} - t'_{\text{FWHM}}| / t_{\text{FWHM}}$ 。从图5(a)可见,对于相同 $f$ ,调制度越大,偏差 $\Delta t$ 越大,当调制度趋近于1时,偏差越小,越接近光强均匀时的半峰全宽。此外,

对于不同 $f$ 值,条纹越密,即 $f$ 值越大,偏差变化率越小,曲线变化越缓和,受调制度的影响越小。

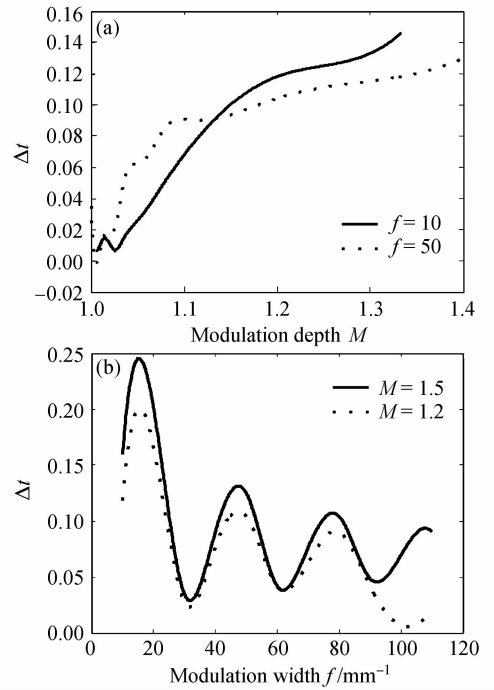


图5 偏差 $\Delta t$ 与调制度 $M$ (a),条纹疏密度 $f$ (b)的关系  
Fig. 5 Deviation  $\Delta t$  versus modulation depth (a) and the density of sine wave (b)

2) 保持调制度 $M$ 不变,改变条纹疏密度 $f$ ,观察疏密度的变化对 $t'_{\text{FWHM}}$ 的影响,如图5(b)所示。从图可见,对于同一调制度,条纹越密,偏差 $\Delta t$ 越小,且逐渐增密其条纹, $\Delta t$ 将大幅振荡下降。对于不同调制度, $M$ 越小, $\Delta t$ 越小。

因此,空间光强分布的条纹状调制会对脉宽测量造成影响,条纹越稀疏,调制度越大,脉宽测量值的偏差越大。

### 3.3 局部暗区及强区对脉宽测量的影响

在实际光学系统中不均匀的光强分布往往表现为局部的暗区或强区,为模拟这种调制对脉宽测量的影响,假设基频光近场中有高斯状凹陷(或凸起)调制,并假设该凹陷(或凸起)在两光束交叠区的中心位置。

如图6(a1)所示,凹陷处光强调制深度 $M_D = 1.27$ (未调制时的强度/调制最低值的强度),高斯状凹陷宽度占两基频光交叠区宽度的比例 $k_D = 0.22$ (凹陷宽度/基频光交叠区宽度),调制后 CCD 接收到的自相关曲线如图6(b1)所示,可见半峰全宽 $t'_{\text{FWHM}} = 172 \text{ fs}$ ;如图6(a2)所示,凸起处空间光强调制高度 $M_H = 1.25$ (调制最高值的强度/未调制时的强度),高斯状凸起宽度比例 $k_H = 0.22$ (突起宽度/

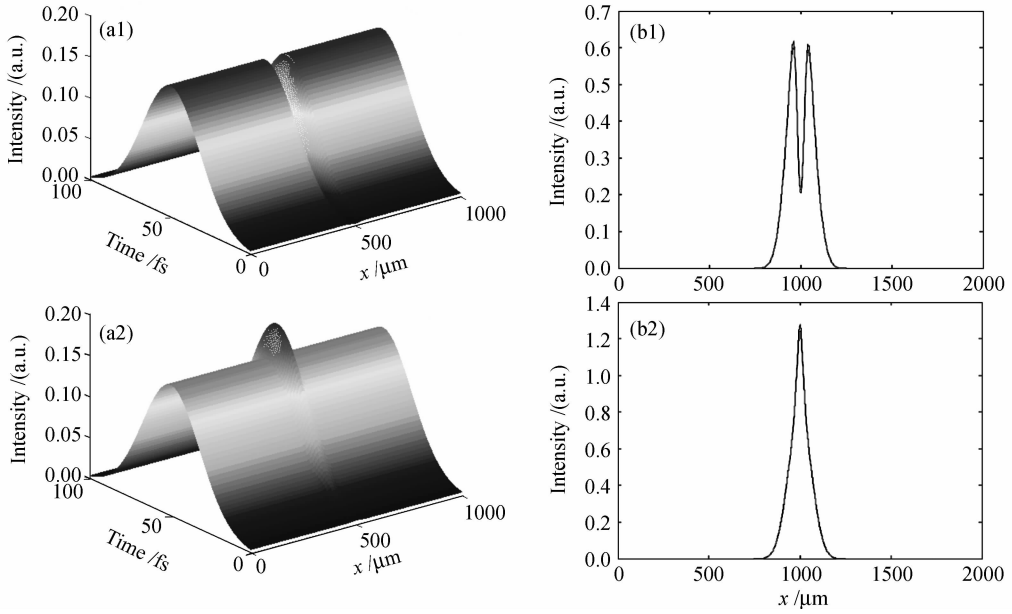


图 6 模拟受局部暗区(a1),局部强区(a2)的空间光强分布及对应的自相关曲线(b1),(b2)

Fig. 6 Spatial intensity modulated by local dim region (a1) and local bright region (a2), and autocorrelation curve (b1), (b2)

基频光交叠区宽度),调制后 CCD 接收到的自相关曲线如图 6(b2)所示,  $t'_{FWHM} = 90$  fs。

1) 保持高斯状凹陷(凸起)的宽度比例不变,改变其调制深度(高度),观察调制度的变化对  $t'_{FWHM}$  的影响,如图 7 所示。

从图 7 可见,对于同一凹陷(凸起)宽度比例,偏差随着调制深度(高度)的增大而增大;对于不同的宽度比例,基频光有局部暗区的情况,凹陷宽度极窄时,偏差极小,且基本不随  $M_D$  的增大发生变化,凹陷宽度越宽,偏差  $\Delta t$  越大,而基频光有局部强区的

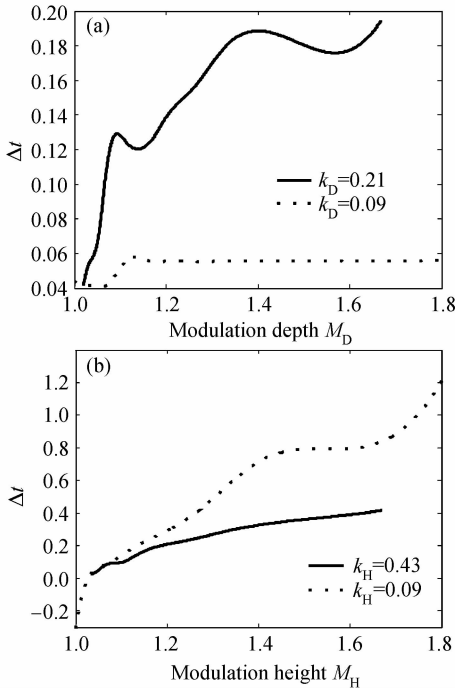


图 7 偏差  $\Delta t$  与暗区深度调制度  $M_D$  (a)和强区高度调制度  $M_H$  (b)的关系

Fig. 7 Deviation  $\Delta t$  versus modulation depth (a) and modulation height (b)

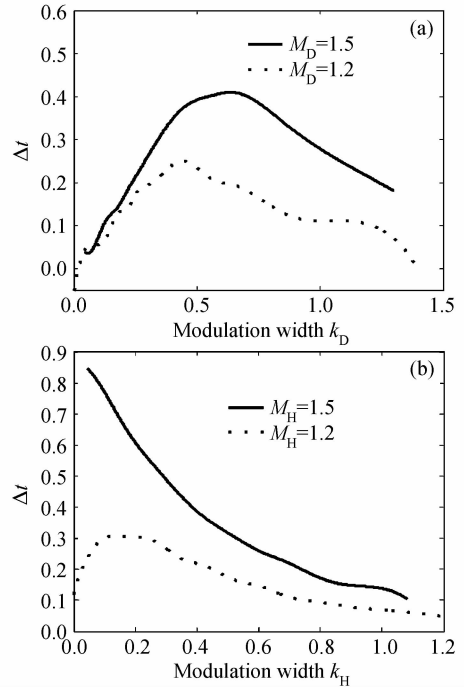


图 8 偏差  $\Delta t$  与暗区宽度比例  $k_D$  (a)和强区宽度比例  $k_H$  (b)的关系

Fig. 8 Deviation  $\Delta t$  versus modulation width  $k_D$  of dim region (a) and modulation width  $k_H$  of bright region (b)

情况,恰好相反,凸起宽度越窄,偏差  $\Delta t$  越大。也就是说,非周期性的局部小尺度暗区调制对脉宽测量的影响较小,而局部小尺度强区调制对脉宽测量的影响较大。

2) 保持调制深度(高度)不变,改变凹陷(凸起)宽度比例,观察宽度比例的变化对调制后半峰全宽的影响,如图 8 所示。

从图 8 可见,空间光强有局部暗区的情况,对于同一  $M_D$ ,偏差  $\Delta t$  随凹陷宽度比例的增大,先增大后减小。这是由于随着暗区宽度的增加,暗区逐渐覆盖了基频光交叠区的绝大部分区域,原有的均匀光强对测量自相关曲线已不占主导地位,故在交叠区当暗区面积占大部分时暗区越大,偏差反而越小;空间光强有局部强区的情况,对于同一  $M_H$ ,偏差  $\Delta t$  随凸起宽度比例的增大而减小。

综上所述,当基频光近场中有局部暗区时(例如由于光学元件上有坏点或污点形成光强暗斑),在暗斑宽度不太大时( $k < 0.5$ ),暗斑宽度越宽,调制度越大,CCD 的测量值偏差越大;基频光近场中有局部强区时,亮斑宽度越窄,调制度越大,CCD 的测量值偏差越大。

## 4 结 论

讨论了空间光强分布不均匀对二次谐波自相关测量结果的影响,数值模拟了周期性调制和局部暗区/强区对脉宽测量值的影响,获得了不同调制状态下的偏差曲线。当近场空间光强分布有条纹状调制时,在一定范围内(当条纹稀到一定程度时可按非周期性局部强区和暗区处理),条纹越稀疏,调制度越大,CCD 的测量值偏差越大;当近场有局部暗区(强区)调制时,在暗区宽度不大的前提下,暗区宽度越宽或强区宽度越窄,调制度越大,CCD 的测量值偏差越大。

在实验中应尽量减小光强分布不均匀对脉宽测量的影响,例如尽可能选择近场中的均匀区域(调制度较小的区域),采用软边取光,避免硬边衍射造成

的调制,保持透镜的洁净度等,以避免这些人为因素造成的光强分布不均匀给自相关测量带来的偏差。

## 参 考 文 献

- Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences (1) [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6):721~729  
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用(1)[J]. 中国激光, 2006, **33**(6):721~729
- Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences (2) [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):865~873  
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用(2)[J]. 中国激光, 2006, **33**(7):865~873
- Song Xiangyang, Han Shensheng, Zhang Lingqing *et al.*. Superthermal electron energy transport in the fast ignition concept [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(12):1101~1106  
宋向阳,韩中生,张令清等. ICF 快点火概念中超热电子的能量输运[J]. 中国激光, 1997, **A24**(12):1101~1106
- He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):595~622  
何飞,程亚. 飞秒激光微加工:激光精密加工领域的新前沿[J]. 中国激光, 2007, **34**(5):595~622
- Huang Xiaojun, Peng Hansheng, Wei Xiaofeng *et al.*. Ultra-short ultra-intense Ti:sapphire laser facility with peak power of hundred-terawatt-level [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(11):1685~1688  
黄小军,彭翰生,魏晓峰等. 100 TW 级超短超强钛宝石激光装置[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(11):1685~1688
- Li Gaoping, Yang Zhaojin, Lü Chunli *et al.*. Measurement methods for time distribution proper ties of short and ultrashort-laser pulses [J]. *Applied Optics*, 2000, **21**(6):29~34  
黎高平,杨照金,吕春力等. 短、超短脉冲激光时间分布特性的几种测量方法[J]. 应用光学, 2000, **21**(6):29~34
- Yan Weizi, Sun Lijun, He Zhuorong. Measurement of ultra-short laser pulse by biphotonic autocorrelation [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2005, **3**(4):61~65  
颜微子,孙力军,何灼容. 双光子自相关测量超短激光脉冲技术的研究[J]. 光学与光电技术, 2005, **3**(4):61~65
- Qiu Wenfa, Hong Zhi, Wang Xiuping *et al.*. The real-time measurement of ultrashort pulse duration-autocorrelator [J]. *Optical Instruments*, 1998, **20**(5):8~12  
邱文法,洪治,王秀萍等. 超短激光脉冲宽度的实时测量-自相关仪[J]. 光学仪器, 1998, **20**(5):8~12
- M. Raghuramaiah, A. K. Sharma, P. A. Nalk *et al.*. A second-order autocorrelator for single-shot measurement of femtosecond laser pulse durations [J]. *Sadhana*, 2001, **26**(6):603~611