

用等值宽度法测量 fs 脉冲宽度*

龚正烈 钱淑荣 张 忱 王清月
(天津大学精仪系)

提 要

本文提出利用等值宽度测量 fs 光脉冲持续时间的方法。给出了脉冲形状为 $\text{sech}^2 \frac{t}{T}$ 、 $\exp(-2t^2/T^2)$ 和 $\exp(-2|t|/T)$ 的干涉相关曲线上包络与相应二阶强度相关曲线半宽度等值的位置, 它们分别是 8.984、4.875 和 4.928。定义了两种相关测量的临界延迟速度。理论分析与实验结果符合得很好。所得结果表明, 该测量方法可将常规超短脉冲相关测量的时间分辨率提高几倍至几十倍。
关键词: 等值宽度; 干涉相关测量; 干涉相关曲线上包络; 临界延迟速度。

一、引 言

超短光脉冲二阶强度相关测宽技术的提出正是因为当时(甚至今日)的光电探测元件和显示仪器不能响应 ps 脉冲的变化; 该技术把对时间的测量变成对空间的测量。但由于碰撞锁模和脉冲压缩技术的发展, 超短脉冲的持续时间已经达到几个 fs 的量级^[1]。对如此短脉冲的测量, 仍沿用常规方法是否有足够精度, 是人们关心的问题。事实上, 即使用常规法所允许的延迟速度下限进行测量, 完成几 fs 的测量只需数十 ns。这对目前在相关测量中普遍使用的函数记录仪而言, 存在一个仪器灵敏度不够的问题。

因此, 寻找新的或改进原有的测量方法自然引起人们的兴趣。本文提出的等值宽度测宽技术便是一个新的尝试。J. C. Diels 等人测出超短脉冲的干涉相关曲线, 并用之研究脉冲的某些性质^[2]。我们注意到此种曲线也携带了脉冲宽度的信息, 并预言了用这一曲线将更加精确地测量脉宽的可能性^[3]。本文将阐明等值宽度法的测宽原理, 并将报道实验结果, 两者吻合得很好。文中还定义了干涉相关和二阶强度相关测量的延迟速度界限; 从而得出, 前者测宽的分辨率至少为后者的 8 倍。由于前者只有延迟速度上限, 所以将分辨率提高一个量级是不困难的。

二、等值宽度法测宽原理

在通常的延迟速度下, 具有 ns 级响应时间的光电倍增管能够输出脉冲自相关的全部信息:

$$\langle I(\tau) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \{ \mathcal{E}^4(t) + \mathcal{E}^4(t+\tau) + 4\mathcal{E}^2(t)\mathcal{E}^2(t+\tau) + 2\mathcal{E}^2(t)\mathcal{E}^2(t+\tau)\cos 2\omega\tau + 4\mathcal{E}^2(t)\mathcal{E}^2(t+\tau)[\mathcal{E}^2(t) + \mathcal{E}^2(t+\tau)]\cos \omega\tau \} dt, \quad (1)$$

收稿日期: 1987年12月14日; 收到修改稿日期: 1988年10月17日

* 本课题得到国家自然科学基金的资助。

式中 τ 为两脉冲的延迟时间。但在这样的延迟速度下, 函数记录仪只能记录前三项, 即得到二阶强度相关曲线, 简称 3:1 曲线。只有当延迟速度足够缓慢时才能把 (1) 式各项记录下来, 即得到干涉相关曲线, 简称 8:1 曲线。

我们的任务是寻找 8:1 曲线与待测脉宽的关系。我们采用了在 8:1 曲线的上包络求取“等值宽度”的方法, 此等值宽度等于在 8:1 曲线相同延迟速度下所得的 3:1 曲线半最大值全宽度(须注意, 在这样的延迟速度下是不可能得到 3:1 曲线的)。具体做法是: 用计算机绘

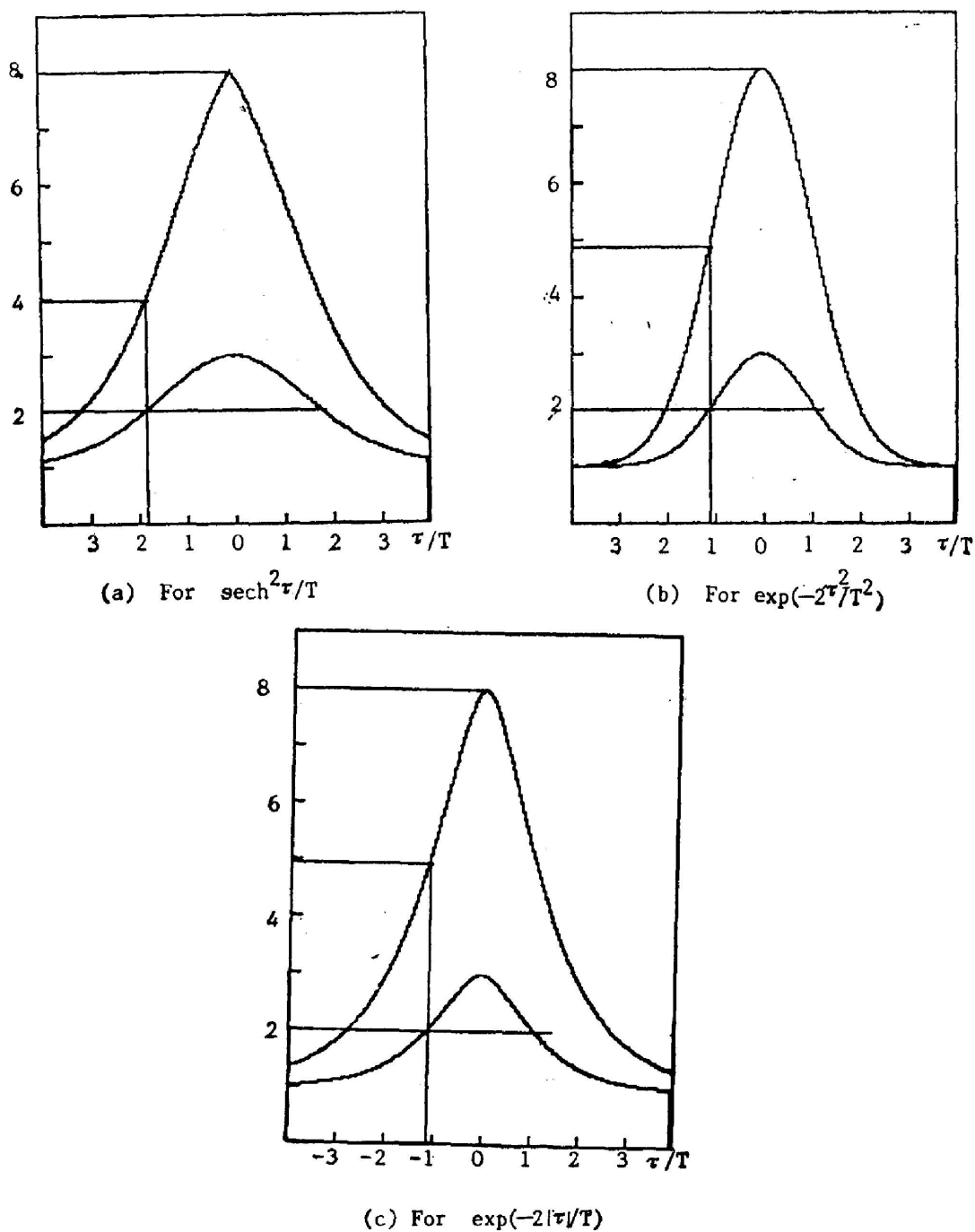


Fig. 1 The up-envelopes of 8:1 curve and 3:1 curve

制 8:1 曲线的上包络和相应(指延迟速度相同)的 3:1 曲线,找出前者某处宽度与后者“半宽度”相等的位置。对于不同的脉冲形状,这个位置一般地说稍有不同。经计算,对双曲正割形 $\text{sech}^2 t/T$ 、高斯形 $\exp(-2t^2/T^2)$ 和对称指数形 $\exp(-2|t|/T)$ 脉冲,其等值宽度的位置分别是 3.984、4.875 和 4.928(以背景作为单位)。其中双曲正割形和对称指数形计算较繁,故分别列出它们的上包络函数以供参考:

$$\langle I_1(\tau) \rangle = 1 + \frac{9}{\text{sh}^2 \tau/T} \left(\frac{\tau/T}{\text{th} \tau/T} - 1 \right) + 3 \text{csch} \tau/T \cdot \left(2 \text{cth} \tau/T - 1 - \frac{2\tau/T}{\text{sh}^2 \tau/T} + \frac{2 \ln \text{ch} \tau/T}{\text{sh}^2 \tau/T} \right); \quad (2)$$

$$\langle I_1(\tau) \rangle = 1 + 3(1 + 2|\tau|/T) \exp(-2|\tau|/T) + 2[3 \exp(-|\tau|/T) - \exp(-3|\tau|/T)], \quad (3)$$

其中 T 为与待测脉宽有关的参量。由计算机绘制的上述三种情况的图形分别示于图 1 中。上述理论计算表明,在实验上测量并用记录仪绘制超短脉冲的 8:1 曲线,然后根据脉冲形状,在该相关曲线的上包络适当的位置上量取包络的宽度;该宽度就是赖以计算待测脉宽的 3:1 曲线的宽度。至于脉冲形状的确定,可以采用拟合法。不过方便的是,作为被动锁模的染料碰撞锁模激光,理论业已计算,脉冲电场的形状为双曲正割形^[4],而本干涉相关测宽方法是针对这种激光器的。因此,我们在该激光脉冲的 8:1 曲线上包络高度为 4 处量取等值宽度。

三、临界延迟速度

已经看到,干涉相关测量是在较慢的延迟速度下进行的。因此,等值宽度测宽方法的实质是,用常规测量所不能实现的慢延迟测量常规相关曲线的宽度。图 1 是在假设相同延迟速度和相同记录仪走纸速度的情况下给出 8:1 曲线上包络和 3:1 曲线的,其中 3:1 曲线只是假设,便于计算等值宽度在 8:1 曲线上包络上的位置。可见,实验上测量这两种相关曲线时,它们在记录纸上所占的几何尺度必然是不同(走纸速度相同)的,而且“等值宽度”大于 3:1 曲线半宽度(见图 4 和图 5),尽管它们所代表的时间宽度是相同的。因此,测量等值宽度的方法具有更高的精度,从而有更高的时间分辨率。

鉴于对超短脉冲测量的时间分辨率有不同的理解,为明确起见,特重新定义:一相关测量系统在给定相对误差的情况下所能测量的最短脉宽,即是该系统的分辨率。

定义中“给定相对误差”应足够地小,使测得的脉宽基本上可代表真实的脉冲宽度。我们取此判据为 10%,也就是说,例如,系统的误差为 1fs,则其时间分辨率为 10 fs。

等值宽度测宽法比常规方法的精度,究竟可以提高多少?为此须考察得到两种曲线的物理过程。如前所述,在通常延迟速度下,记录仪不能迅速响应(1)式中干涉项的变化,在数学上就是(1)式对 τ 的某种平均。它们的主要区别在于两者具有不同的延迟速度。我们经过理论分析和实验观察认为,对两种相关测量存在一个延迟速度界限,即 8:1 曲线有上限,3:1 曲线有下限,均称为临界延迟速度。这两个界限决定了两种测量的基本精度。

由(1)式可见,8:1 信息包含了 $\cos \omega\tau$ 和 $\cos 2\omega\tau$ 两个振荡项;但理论和实验表明,整个

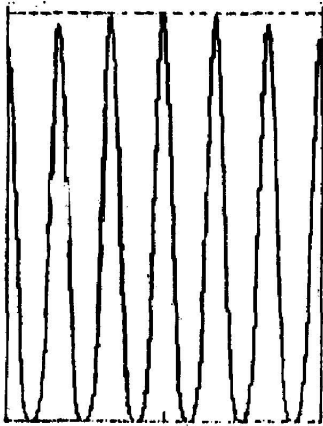


Fig. 2 The part of 8:1 curve

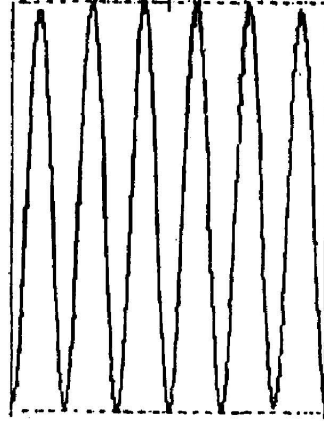


Fig. 3 The part of interference correlation curve for fundamental wave

8:1 曲线的频率完全由 $\cos \omega \tau$ 项所决定。图 2 和图 3 分别表示二次谐波的和基波的干涉相关信号

$$\langle I_2(\tau) \rangle = 1 + \int_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{E}(t) \mathcal{E}(t+\tau) \cos \omega \tau dt / \int_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{E}^2(t) dt, \quad (4)$$

随延迟 τ 变化时的振荡情况, 两者是假定由计算机在同样延迟速度和走纸速度下画出的; 由图可见, 它们的振荡周期完全相同。在实验上也不难观察出来。

设锁模脉冲的中心波长为 λ , 延迟速度为 v , 由相关测量原理和上述分析, 可得完成一个周期振荡的时间为 $t_0 = \lambda/2v$ 。可以合理地认为, 记录仪的响应时间分别为 $t_r \leq t_0/4$ 和 $t_r \geq 2t_0$ 时, 可将 8:1 和 3:1 信息记录下来。于是可得相应的延迟速度上、下限分别为 $v_s = \lambda/8t_r$ 和 $v_3 = \lambda/t_r$ 。两临界速度之比为: $v_3/v_s = 8$; 这一结果表明, 用干涉相关曲线得到的等值宽度在记录纸上的几何尺度至少为常规法的 8 倍。换言之, 前法的精度至少高于后法 7 倍。分辨率也提高了同样的倍数。实际上 8:1 曲线的延迟速度只有上限, 故进一步提高其精度是很容易的事。

四、实 验

被测光源为六镜环形腔脉冲碰撞锁模染料激光器^[5]: 激活介质为 Rh6G, 浓度为 2.5×10^{-3} ; 饱和吸收体为 DODCI, 浓度为 1.2×10^{-4} ; 锁模脉冲中心波长为 615 nm, 脉冲峰值功率为 3.2 kW。

用棱镜组合式光学相关器测量脉冲^[6], 延迟速度为 9.52×10^{-4} mm/s, 记录仪走纸速度为 0.833 mm/s, 测得干涉相关曲线如图 4 所示。在该曲线的上包络纵坐标“4”处的宽度(即等值宽度)为 239.4 fs, 则待测脉宽为 154.5 fs (按双曲正割性, 比例系数取 1.54)。

为了验证结果的正确性, 将延迟速度改为 7.69×10^{-3} mm/s, 测得 3:1 曲线“2”处的宽度为 246 fs (图 5), 相应的脉宽为 158.7 fs; 与前法所得结果相差 4.5 fs, 在误差范围内。这两个实验结果的对比, 不仅说明上述理论计算的正确性, 而且说明 3:1 曲线“2”处的宽度与 8:1 曲线“4”处的宽度(指时间)相等是脉冲为双曲正割形的必要条件。

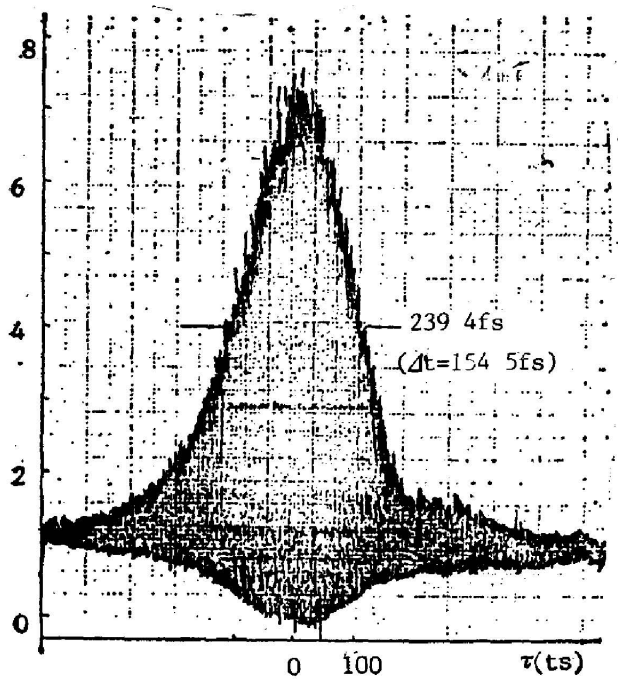


Fig. 4 Experimental 8:1 curve

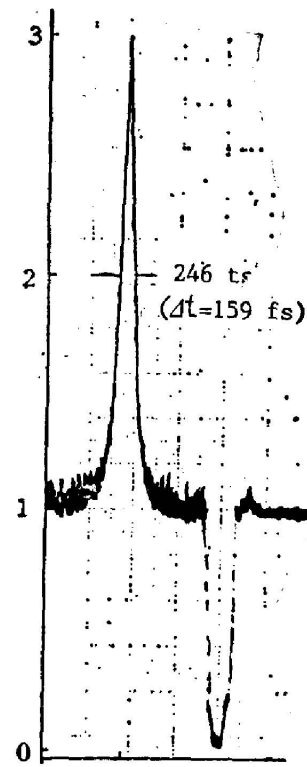


Fig. 5 Experimental 3:1 curve

五、讨 论

(1) 上述 8:1 和 3:1 实验曲线分别是在它们各自的临界延迟速度下进行的, 而记录仪走纸速度相同。于是可以求得脉宽的测量误差, 前者是 2.5 fs, 后者是 19.8 fs; 前者为后者的 13%。换言之, 等值宽度测宽法较之二阶强度相关测宽法的分辨率, 可至少提高 7 倍。这与理论计算相一致。在 10% 的误差判据下, 前者的分辨率为 25 fs, 后者的分辨率为 198 fs。

(2) 如果 3:1 曲线的实验是在低于 v_s 下进行的, 则曲线必部分地反映干涉相关的信息, 即 3:1 曲线有较大起伏(非噪音), 甚至曲线峰与背景比不是 3:1, 可能是 4:1、5:1 等等。此时由之求出的脉宽窄于真实脉宽。

(3) 本文未涉及脉冲啁啾效应对脉宽测量的影响。初步分析表明, 当脉冲含有啁啾时, 等值宽度的位置略有下降。由于对超短光脉冲与物质相互作用机理的认识还很不充分, 所以在考虑啁啾后, 对等值宽度位置进行准确的修正目前还是困难的。尤其是目前还不能人为地控制脉冲啁啾的性质和程度, 所以即便提出了修正的理论也无法在实验上进行系统的论证。我们在最简单的情况即对高斯形脉冲的线性啁啾作了计算, 结果是, 与无啁啾时相比, 在干涉相关曲线下包络的最大值不超过 1 时(这在实验曲线上可明显地看出), 即便存在啁啾, 本测量方法的误差最大仍不超过 2%。在下包络最大值大于 1 时, 误差增大(关于啁啾对脉宽相关测量的影响将有另文详细报道)。我们在对几十个干涉相关实验曲线考察后未发现它们的下包络最大值超过 1 的情况。

参加本文实验工作的还有章若冰, 袁渊。

参 考 文 献

- [1] W. H. Knox *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **46**, No. 12 (Jun), 1120~1121.
- [2] J. C. Diels *et al.*; "*Proceedings of the First International Conference on Picosecond Phenomena*", (Springer-Verlag, Berlin, 1978), 117.
- [3] 龚正烈等; 《光学学报》, 1987, **7**, No. 10 (Oct), 935~938.
- [4] J. Herrmann *et al.*; *Appl. Phys.*, 1981 **B26**, No. 3 (Nov), 197~202.
- [5] 王清月等; 《光学学报》, 1986, **6**, No. 4 (Apr), 320~325.

Measurement of femtosecond pulsewidth with interference correlation

GONG ZHENGLIE, QIAN SHURONG, ZHAN CHEN AND WANG QINGYUE
(Department of Precision Instrumentation, Tianjin University)

(Received 14 December 1987; revised 17 October 1988)

Abstract

A new technique for measurement of femtosecond pulsewidth is proposed with equality-width in this paper. The positions on the up-envelope of interference correlation curve are given at which the envelope width equals FWHM of the second order intensity correlation curve. They are 3.984, 4.875 and 4.928 corresponding to pulse shape of $\text{sech}^2 \frac{t}{T}$, $\exp\left(-2\frac{t^2}{T^2}\right)$ and $\exp\left(-2\frac{t}{T}\right)$, respectively. The critical delay velocities for two kinds of correlation measurement are defined. Theoretical analysis is in good agreement with experiment. The results show that the measurement method can enhance the resolution of correlation measurement of ultrashort pulse to a few or even tens times.

Key words: equality-width; interference correlation measurement; up-envelope of interference correlation curve; critical delay velocities.