

超短激光脉冲测量技术的发展

陈碧芳

自从 60 年代中期实现固体激光器的锁模以来,激光脉冲的宽度经历皮秒(ps, 10^{-12} 秒)、飞秒(fs, 10^{-15} 秒)量级,目前已向阿秒(as, 10^{-18} 秒)量级进军。超短激光脉冲自诞生以来一直朝着更短更强及波段更宽的方向发展。超短激光脉冲为人类提供了强有力的研究超快现象的手段,应用领域日趋扩大。作为评价和应用超短脉冲的前提,测量技术和超短脉冲的产生技术本身具有同等的重要意义。纵观超短激光脉冲测量技术的发展历史,其进步与超短激光脉冲产生技术的发展是分不开的。因此研究超短激光脉冲测量技术,完整准确地了解脉冲的宽度、相位及形状信息,是超快技术研究中非常重要的内容。

皮秒脉冲测量技术

目前国际上已有两种皮秒量级分辨率的可直接测量的仪器。一种是高速示波器,例如美国 Tek 公司的采样示波器。它是利用上升时间小于 30 皮秒的光电二极管做采样探头,可直接观察波形,实现对周期光脉冲信号的测量。高速示波器的时间分辨率可以达到的数量级为~100ps。另一种是高速条纹相机,对于脉宽在 ≈ 100 ps 数量级以下的超短脉冲,可以采用该条纹相机,例如日本滨松光电公司的 C2908 系列。它是通过高压扫描、偏转放大被测光脉冲信号,得到光脉冲的条纹图像,摄得的条纹长度与脉冲宽度有关,而条纹的反差代表光脉冲强度的变化,用微密度计读出底片上条纹密度的变化,就可以得到一根再现出来的光脉冲波形曲线。高速条纹相机最高时间分辨率为 2ps。

间接测量主要采用相关法。它是利用非线性晶体通过自相关产生二次谐波的所谓 SHG 法进行间接测量;或者利用某些材料非线性吸收特性的所谓双光子效应 TPF 法进行间接测量。测量的基本思想是将待测光脉冲分裂为强度相等的两束,让它们经过不同的光程之后,汇合于能够产生双光子荧光或者二次谐波的物质上,两个波包的重叠程度决定了 TPF 或 SHG 信号的强度;改变两个脉冲的相对延迟时间,同时测量 TPF 或 SHG 信号,可以获得二阶自相关函数,并由此推算出脉冲宽度。

飞秒脉冲测量技术

目前国际上对飞秒激光脉冲没有直接测量的仪器,主要采用间接测量法。超短激光脉冲技术从 ps 进入 fs 阶段,双光子荧光法、条纹相机等测量技术受时间、空间分辨率的限制已经无法适用,仅有相关测量法沿用至今。相关测量法大致包括强度自相关测量法和干涉自相关测量法。由于强度自相关法只能给出超短脉冲的宽度而不能给出脉冲的相位、脉冲的形状等信息,故在飞秒脉冲测量中很少用。现在国际上公认的用于飞秒脉冲测量的方法,主要是基于干涉自相关测量法上发展起来的频率分辨光学开关法(FROG)和自参考光谱相位相干电场重构法(SPIDFR)。

FROG 的基本方法是将待测脉冲经分束器分为两束,一束作为探测光,另一束作为光开关,并且让作为开关的光束引入一个时间延迟 τ , 然后再让两束光通过倍频晶体产生相互作用,经光谱仪进行光谱展开后,用 CCD 进行测量,得到相互作用后的光强随频率和时间延迟变化的空间图形,称为 FROG 迹线。利用脉冲迭代算法从 FROG 迹线中恢复脉冲的振幅和相位分布。其测量装置如图 1 所示。

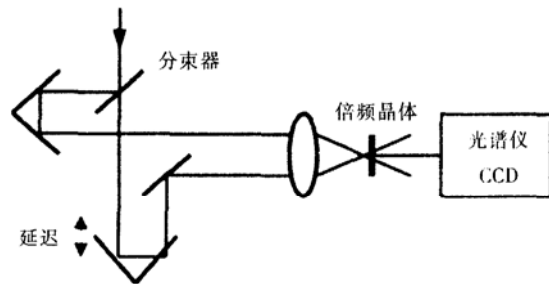


图 1 FROG 测量装置示意图

在 FROG 测量方法中,脉冲迭代算法是利用傅里叶变换和傅里叶逆变换交替迭代计算,并结合频域限制和时域限制,对假定的信号进行反复修改,最终获得待测脉冲的电场 $E(t)$ 。在实验时,将入射光分为探测光 $E(t)$ 和光开关 $g(t-\tau)$,探测光与光开关相互干涉产生信号光 $E_{sig}(t,\tau)$,有

$$E_{sig}(t,\tau) = KE(t)g(t-\tau) \quad (1)$$

进行傅里叶变换后,有

$$I_{\text{sig}}(t, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_{\text{sig}}(t, \tau) \exp(-i\omega t) dt \right|^2 \quad (2)$$

上式即为实际探测到的信号光强度分布，可以看出这是一个与时间和频率有关的二维函数，对此结果进行迭代计算即可同时得到脉冲的宽度和光谱信息。图2所示为迭代算法流程图。

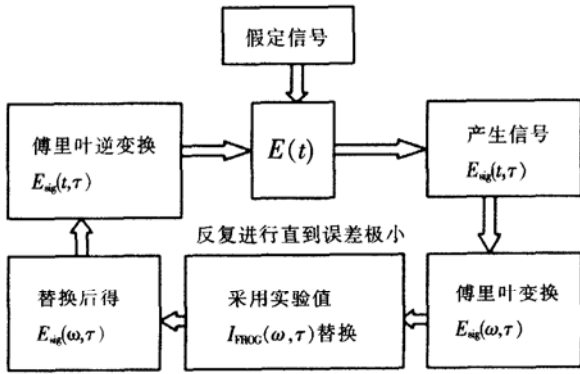


图2 迭代算法流程图

SPIDER的基本方法是基于一种叫做光谱剪裁相干的方法。它是将待测脉冲经分束器分为两束，其中一束通过一块色散介质展宽为啁啾脉冲，另一束经迈克尔逊干涉仪分为二个具有时间延迟的 τ 脉冲对，然后再将它们聚焦到倍频晶体中进行频率转换。由于两脉冲在时间上的走离，在和频之后它们的中心频率就出现了微小的差别，这个频率差称为光谱剪裁 Ω 。和频后的脉冲对经过光谱仪记录下光谱相干的干涉条纹，再利用反演算法，就可得到入射脉冲的相位。其测量装置如图3所示。

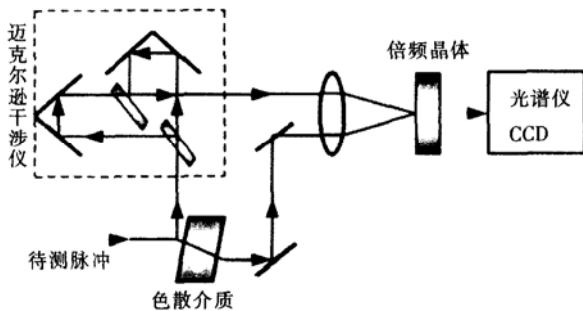


图3 SPIDER测量装置示意图

在SPIDER测量方法中，干涉条纹公式表示为

$$D(\omega_c) = \left| \tilde{E}(\omega_c - \Omega) \right|^2 + \left| \tilde{E}(\omega_c) \right|^2 + 2 \left| \tilde{E}(\omega_c - \Omega) \right| \left| \tilde{E}(\omega_c) \right| \cos[\phi(\omega_c - \Omega) - \phi(\omega_c) - \tau\omega_c] \quad (3)$$

式中 $\omega_c - \Omega$ 和 ω_c 分别为两脉冲的中心载波频率， $\tilde{E}(\omega_c - \Omega)$ 和 $\tilde{E}(\omega_c)$ 为输入脉冲对的光谱表示。在SPI-

DER中，反演算法是利用傅里叶变换将数据变换到时间域，用滤波函数将交流成份提出来，则所要的相位差为 $\phi(\omega_c) - \phi(\omega_c - \Omega) + \tau\omega_c$ ，然后再去掉线性相位项 $\tau\omega_c$ ，就得到经过频移后脉冲与没有频移脉冲之间的相位差

$$\theta(\omega_c) = \phi(\omega_c) - \phi(\omega_c - \Omega) \quad (4)$$

然后通过积分可近似得到光谱位相

$$\phi(\omega_c) \approx \frac{1}{\Omega} \int \theta(\omega_c) d\omega_c \quad (5)$$

图4所示为反演算法流程图。

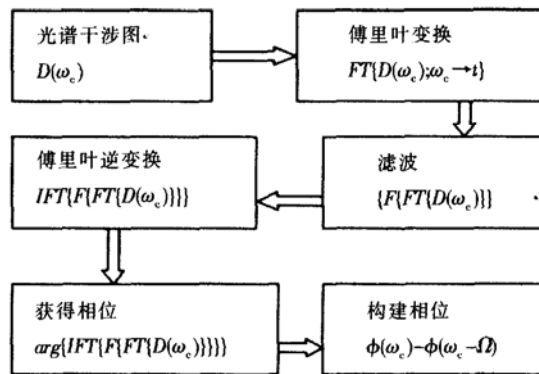


图4 反演算法流程图

FROG和SPIDER测量技术已经成为刻划10fs以下脉冲特性的标准方法。瑞士联邦工业大学的凯勒(U. Keller)领导的研究组对FROG和SPIDER的实际测量精度进行了比较，SPIDER明显好于FROG。

阿秒脉冲测量技术

早在1993年，当人们首次观察到超短脉冲与气体相互作用产生高次谐波时就已经知道其中蕴含着阿秒成份。最近，高次谐波产生阿秒脉冲技术有了突破性的进展。一个由奥地利维也纳技术大学、加拿大国家研究中心和德国比利斐尔德大学的研究人员组成的国际课题组，报道了他们产生的单个脉冲为650as的X射线脉冲。他们采用氙气作为非线性介质靶，用一束超高强度超短激光脉冲聚焦在靶上，从而获得了类似激光的X射线脉冲，并且利用新的测量技术第一次测出了此X射线脉冲的脉宽是650as。

阿秒脉冲测量带给人们的是比阿秒脉冲产生更大的挑战，从原理上讲，阿秒脉冲的测量也可以采用飞秒脉宽测量的自相关法。但是对于阿秒测量来说，实现起来有很多的障碍，最大的困难是极紫外或软

金属磁记忆无损检测技术

蹇兴亮

1997年,在美国旧金山举行的第50届国际焊接学术会议上,俄罗斯学者杜波夫(Doubov)首先提出金属应力集中区的磁记忆效应,并形成一套全新的无损检测与诊断技术——金属磁记忆(metal magnetic memory, MMM)技术。1999年10月在汕头召开的第七届全国无损检测年会上,杜波夫教授在大会上向中国学者介绍了磁记忆检测的原理及其在管道、锅炉压力容器上的应用。此后,金属磁记忆现象和检测技术在我国得到了极大的关注并展开了广泛的研究和讨论。金属磁记忆检测技术问世以来,在国际无损检测学界引起了巨大反响,促使许多科学家正在对它的物理机制进行更加深入的研究。该项技术有着巨大的发展潜力,目前的情况是基础理论研究落后于实际应用,还有许多问题尚待解决。

金属磁记忆效应:铁磁性金属(常见的钢铁等)零件在加工和运行时,由于受载荷和地磁场共同作用,在应力和变形集中区域会发生具有磁致伸缩性

质的磁畴定向和不可逆的重新取向,这种磁状态的不可逆变化在工作载荷消除后不仅会保留,还与曾经有过的最大作用应力有关。金属构件表面的这种剩磁状态记忆微观缺陷或应力集中的位置,这就是磁记忆效应。

基于金属磁记忆效应制作的检测仪器,工作过程如图1所示。图中的工件曾经在地磁场中沿轴向(x 方向)被拉伸,并在工件内部的图中所圈出的 E 区域出现应力集中,该区域的拉应力大于其他地方,应力过大就可能在此产生裂纹等缺陷。应力集中区磁畴发生不可逆的重新取向,产生的磁场经过工件表面形成漏磁,当载荷消除不再拉伸时,这种漏磁场仍然保留。

参见图2,磁力线的疏密反映了磁场的强弱,箭头方向表示磁场方向。漏磁场的特点是:在应力集中区附近,图中的 B 点,磁场的切向分量具有最大值,而法向分量改变符号且具有零值点。通过对漏磁场法

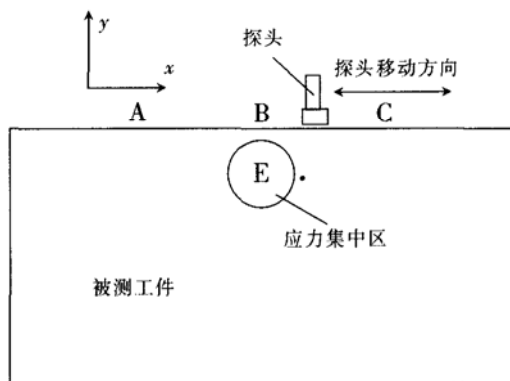


图1 工件表面磁场检测示意图

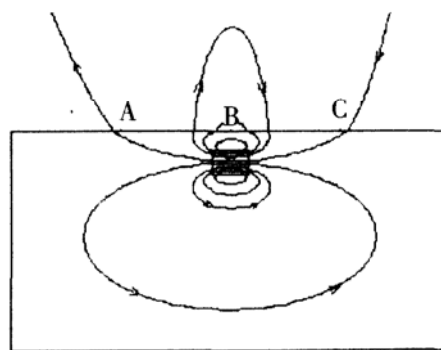


图2 应力集中区的磁畴在工件内外磁场分布

X射线阿秒脉冲的强度都太低,无法在原子介质中产生可测量的非线性效应。后来,对自相关测量法进行了重大的改进,提出了互相关测量法。

互相关测量阿秒脉冲的基本方法是当一个极紫外或软X射线光脉冲射入一氮原子气体靶,使氮原子发生光电离,所产生的光电子在产生时刻受到比X射线脉冲延迟了时间 t_0 的驱动飞秒激光脉冲光场作用,其动能发生改变,改变的大小取决于此刻飞秒激光脉冲的振荡光场的振幅、载波频率和绝对相位。通过在垂直于激光偏振方向的小

角度内探测产生光电子的能谱位移,从而获得X射线脉冲的脉宽。

以上综述了超短激光脉冲测量技术的发展历程,特别介绍了目前国际上公认的测量飞秒脉冲的两种标准方法,即FROG和SPIDER,并概述了处于实验室阶段的阿秒脉冲产生的基本原理及测量方法。随着阿秒脉冲产生和测量技术的进一步发展,科学家也将从研究原子分子动力学过程的飞秒化学时代进入研究原子内电子动力学的阿秒物理时代。

(浙江嘉兴学院医学院 314001)