

文章编号: 2095-4980(2015)01-0023-05

基于光栅倾斜脉冲前沿的太赫兹脉冲单次测量

翟召辉^{a,b}, 钟森城^{a,b}, 孟坤^{a,b}, 刘乔^{a,b}, 李江^{a,b}, 朱礼国^{a,b}, 彭其先^{a,b}, 李泽仁^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.流体物理研究所; b.微系统与太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘要: 太赫兹脉冲单次测量技术对于不可逆或者单次超快过程的太赫兹光谱研究具有重要意义。为了实现无畸变的高频率分辨率的太赫兹脉冲单次探测, 利用光栅产生了一束具有倾斜前沿的飞秒探测脉冲, 并利用该探测脉冲实现了对太赫兹脉冲时域电场波形的单次测量, 测量时间范围达到 20 ps, 频谱覆盖 0.1 THz~2.5 THz 范围。且测量的结果与使用传统电光采样方法测量的结果相符合。对于基于光栅产生倾斜脉冲前沿的太赫兹脉冲单次测量方法进行了建模分析, 获得了光栅和光学元件参数的选取, 以及光路设计等指导性结论。

关键词: 太赫兹脉冲; 单次测量; 光栅; 倾斜脉冲前沿

中图分类号: TN012

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201501.0023

Single shot measurement of terahertz pulse based on pulse front tilting by grating diffraction

ZHAI Zhaohui^{a,b}, ZHONG Sencheng^{a,b}, MENG Kun^{a,b}, LIU Qiao^{a,b}, LI Jiang^{a,b}, ZHU Ligu^{a,b}, PENG Qixian^{a,b}, LI Zeren^{a,b}

(a.Institute of Fluid Physics; b.Microsystems and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The single shot measurement of terahertz pulse is of great importance to the study of terahertz spectrum on ultra fast irreversible or single shot processes. A femtosecond pulse with tilted intensity front generated by using commercial grating are adopted as the probe beam for the measurement, in order to implement single shot measurement of terahertz pulses with low distortion and high frequency resolution. The time window is up to 20 ps and spectrum range covers from 0.1 THz to 2.5 THz. The result agrees well with that of the traditional electrical-optic sampling method. Analytical model for the single shot measurement of terahertz pulse using tilted pulse front technique is established, and some conclusions concerning the parameters preference of grating and optical system components, as well as optical design, are obtained.

Key words: terahertz pulse; single shot measurement; optical grating; pulse front tilting

太赫兹波是频率介于微波和红外的电磁波, 具有穿透性高, 光子能量低等特性, 并且具有特殊的光谱特性。近年来, 飞秒激光系统的飞速发展使得人们可以有效地产生太赫兹波并对其探测, 将其应用于多种研究。由于具有超短的脉冲长度, 基于飞秒激光脉冲产生的太赫兹脉冲可以用来对超快过程进行探测, 例如对半导体材料弛豫过程和分子晶体瞬态电导率等的时间分辨测量^[1]。目前利用超短太赫兹脉冲所进行的光谱研究大多是针对具有可重复性的超快过程, 采用逐点扫描的测量方法。对于诸如材料损伤和结构相变等不可逆超快的过程, 上述方法不再适用, 需要采用单次太赫兹测量的方法, 对太赫兹脉冲的波形进行一次性的成像, 从而获得不可逆超快过程的太赫兹光谱数据。目前人们已经发展了多个太赫兹脉冲单次测量的技术, 如光谱编码^[2]、色散棱镜^[3-4]等, 但是这 2 种方法都具有一定的缺点: 光谱编码技术所依赖的数学算法具有很大的不确定性, 在进行数据解算时常常引入很大的偏差^[5], 而色散棱镜技术所能探测的时间窗口只有数个皮秒, 无法用于精密的光谱测量实验。近年来人们又发展了基于光栅倾斜脉冲前沿的单次探测技术^[6], 测量的时间窗口达到 20 ps。本文基于光栅产生倾斜脉冲前沿的技术, 利用光栅产生了一束具有倾斜前沿的飞秒探测脉冲, 并利用该探测脉冲实现了对太赫兹脉冲时域电场波形的单次测量, 测量的结果与使用传统电光采样方法测量的结果相符合。本文还对基于光栅产生倾斜脉

冲前沿的太赫兹脉冲单次测量方法进行了建模分析,获得了光栅参数、光路设计、光学元件参数的选取等指导性结论。

1 理论分析

对太赫兹脉冲进行单次探测的技术一般基于电光采样原理,即利用太赫兹电场在探测晶体中的电光效应,对探测光的偏振状态进行调制,通过分析探测光通过探测晶体后的偏振状态,就可以获得太赫兹脉冲的电场波形。与传统太赫兹时域光谱(THz Time Domain Spectrum, THz-TDS)系统不同的是,THz-TDS系统一般使用了锁相放大器^[7-8],采用多次采样并取平均的方法,并不断调整探测脉冲与太赫兹脉冲之间的时间窗口,以获得具有较高信噪比的信号波形,而单次测量使用一个探测脉冲对单个太赫兹脉冲的电场波形进行一次探测,无需调整相对延迟和取多次平均。基于光栅产生倾斜脉冲前沿进行太赫兹脉冲单次测量的系统设计光路见图1,其中G为光栅,LiNbO₃为铌酸锂晶体,M为反射镜;OAP(Off Axis Parabolic)为离轴抛物面镜,PBS(Polarization Beam Splitter)为偏振分束棱镜。飞秒探测光束经过光栅衍射后,脉冲前沿发生倾斜,经过氧化铟锡(Indium Tin Oxide, ITO)玻璃反射,并经透镜聚焦到ZnTe探测晶体上,其偏振状态被THz电场调制。然后经过二分之一波片和偏振分束棱镜对探测光的偏振态进行分析,经过透镜放大并成像到电荷耦合元件(Charge Coupled Device, CCD)相机上。

在实验设计中,采用了 $f=50\text{ mm}$ 的2个透镜对光栅进行聚焦和成像。光栅参数选择闪耀角 28.7° ,闪耀波长 800 nm ,刻线密度 $1200/\text{mm}$ 的光栅。光栅距离前透镜5倍焦距即 250 mm 。

利用光栅产生倾斜脉冲前沿的原理见图2。将一束脉冲式平面波打入到闪耀光栅上,由于相邻条纹衍射的光具有 $m\lambda$ (其中 m 是任意整数,后面的讨论中 $m=1$, λ 是入射光的波长)的光程差,其衍射光束的脉冲前沿会发生倾斜,倾斜角度通过其与垂直传播方向平面的角 θ 表示, $\theta=0$ 表示无倾斜。

假设光栅的闪耀角为 ϕ ,刻线密度为 N 。考虑一般情况,光束入射角度为 α ,衍射角度为 β ,那么有衍射方程:

$$\frac{\sin \alpha + \sin \beta}{N} = m\lambda \quad (1)$$

闪耀波长 λ_b 为:

$$\lambda_b = \frac{2 \sin \phi}{N} \quad (2)$$

脉冲前沿的倾斜角为:

$$\tan \theta = \frac{m\lambda}{d \cos \beta} \quad (3)$$

式中: d 是光栅刻线的周期; $Nd=1$ 。

出射脉冲的直径将从入射的 W_0 变为:

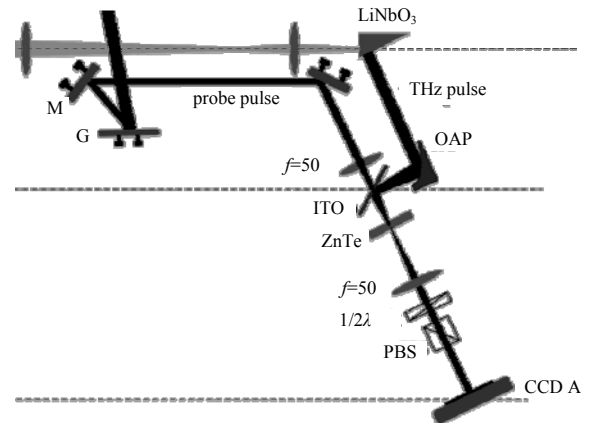


Fig.1 Schematic of single shot measurement of THz pulse based on pulse front tilting

图1 利用倾斜脉冲前沿对THz脉冲进行单次测量的光路示意图

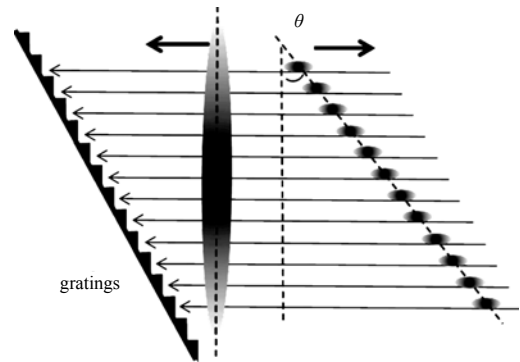


Fig.2 Basic principles of pulse front tilting using grating(The incidence angle equals to the blazing angle of gratings.)

图2 利用光栅倾斜脉冲前沿的原理示意图(以闪耀角入射)

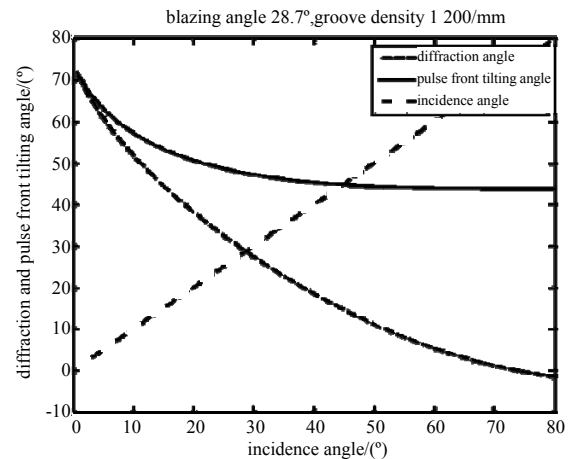


Fig.3 Diffraction angle and the pulse front tilting angle with different incidence angles, where the straight line represents the incidence angle

图3 不同入射角度下光栅衍射角度及脉冲前沿的倾斜角度,其中直线为入射角

$$W_{out} = W_0 \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \tag{4}$$

以闪耀角为 $\phi=28.7^\circ$, 刻线密度 $N=1\ 200/\text{mm}$ (闪耀波长 $800\ \text{nm}$) 为例, 计算不同入射角下的衍射角度和脉冲前沿倾斜角度, 如图 3 所示。一般选择入射角和衍射角度相近的条件, 这样可以使得光栅衍射的效率较高, 但不能选择闪耀波长, 因为此时入射角和衍射角相等, 传播方向相反, 2 束光分离困难。

如果选定入射角为 20° , 衍射角为 38° , 倾斜角度将有 50° 左右。如果采用 $5\ \text{mm}$ 宽光束入射, 出射的光束宽度约为 $4.2\ \text{mm}$, 时间窗口 $\Delta t = W_{out} \tan \theta / c \approx 17\ \text{ps}$, c 为光速。若采用较大入射角, 将得到更大的时间窗口, 如 $\alpha=40^\circ$, $\Delta t = W_{out} \tan \theta / c \approx 21.0\ \text{ps}$, 但这时光斑尺寸将变得较大, 约 $6\ \text{mm}$ 。图 4 给出了不同入射角度下光束直径的缩放比例, 图 5 给出了不同入射角度下得到的时间窗口, 可以看到入射角越大, 出射光束的宽度变得越大, 时间窗口越大。在实际中要针对时间窗口和光斑尺寸这 2 个参数进行综合选择。

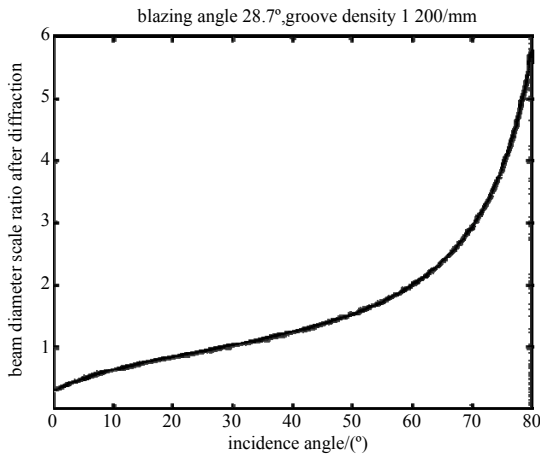


Fig.4 Beam diameter scale ratio after diffraction with different incidence angles

图 4 不同入射角度下光栅衍射的光束尺寸缩放比例

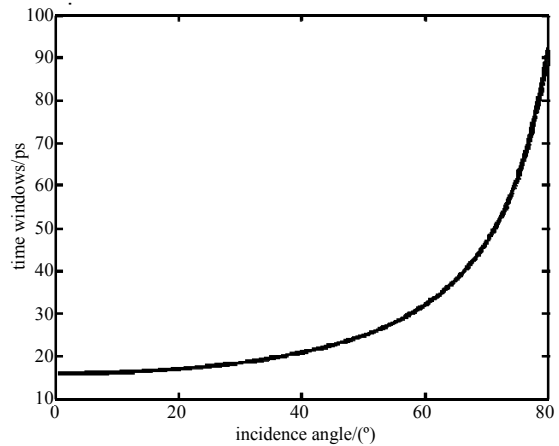


Fig.5 Time window generated with 5 mm diameter incident beam

图 5 5 mm 入射光斑下能够得到的时间窗口

光栅色散会影响成像, 由于光栅会对飞秒脉冲激光产生色散效应, 不同波长成分的光会在 $800\ \text{nm}$ 衍射角度附近具有不同程度的偏转, 见图 6。在到达聚焦透镜时光斑直径会扩大, 下面计算扩大的程度。

根据光栅衍射公式, 在一定入射角的情况下, 不同的波长具有的衍射角也不一样, 对其进行微分, 有:

$$\delta\beta = \frac{N}{\cos \beta} \delta\lambda \tag{5}$$

式中 $\delta\lambda$ 代表飞秒脉冲的谱宽。

若光栅与透镜之间的距离(物距)为 d_0 , 那么光束的直径将从 W 扩展到 $W_f = W + d_0 \tan \delta\beta$ 。根据式(5), 采用前述光栅参数, 可以估算出谱宽 $40\ \text{nm}$ 的飞秒脉冲光的衍射偏转角度约为 $\delta\beta = N \cdot \delta\lambda / \cos \beta \approx 0.061\ \text{rad} = 3.5^\circ$, 而且在传播 $250\ \text{mm}$ 后光束的直径将从 $4.2\ \text{mm}$ 扩展到 $19.5\ \text{mm}$ 。因此透镜的孔径必须大于 $20\ \text{mm}$, 才能够将光束全部收集进来。图 7 给出直径为 $5\ \text{mm}$ 的光在不同入射角下入射到光栅, 然后传播 $250\ \text{mm}$ 后的光斑尺寸, 其中假设飞秒光谱宽 $40\ \text{nm}$ 。可看到入射角在 $20^\circ \sim 50^\circ$ 之间时, 衍射光斑的尺寸小于 $20\ \text{mm}$ 。入射角太小, 导致 $\cos \beta$ 较小, 而若入射角太大, 光束从光栅出射时的光斑尺寸 W 就已经比入射前扩大了好几倍, 因此入射角太大和太小, 都会导致光斑在传播一定距离后衍射非常严重。

使用焦距为 f 的透镜将光栅成像到电光晶体上面, 所成像的大小为 W_i (假设物距为 d_0):

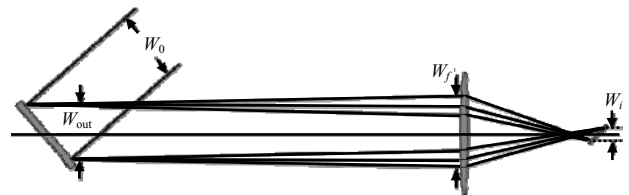


Fig.6 Illustration of beam diameter change due to the dispersion of the gratings
图 6 在光束传播的不同位置由于光栅色散导致光束尺寸变化的示意图

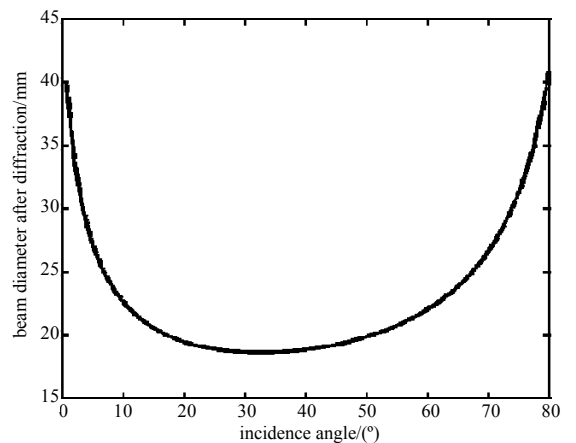


Fig.7 Beam diameter after diffraction and propagated 250 mm
图 7 探测光在光栅衍射后传播 250 mm 的光斑尺寸

$$W_i = W_{out} \frac{d_i}{d_0} = W_0 \frac{f}{d_0 - f} \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \quad (6)$$

图 8 给出了不同入射角和物距下成像光斑的尺寸与入射光斑尺寸的比值。如采用 20° 入射角,物距为 5 倍焦距 250 mm,那么成像光斑大小缩小为原来尺寸的 0.18 倍,若以 5 mm 宽光束入射,其成像光斑大小约为 0.9 mm。

2 实验结果与分析

图 9 给出了太赫兹脉冲单次测量的实验结果。图 9(a)为 CCD 采集到的原始数据,横轴代表了不同的时间窗口,蓝色和红色区域代表了太赫兹时域电场波形振荡的谷和峰的位置和强度。将此数据沿着数值方向进行累加,即可得到图 9(b)所示的时域波形曲线,进一步做傅里叶变换可以得到其频谱,见图 9(c)。使用该方法测量的时间范围约为 20 ps,频谱分辨率 < 0.05 THz。可以看出探测得到的脉冲频谱范围为 0.1 THz~2.5 THz。根据电光采样方法测得的太赫兹脉冲波形经估算,太赫兹脉冲峰值电场强度约为 0.2 kV/cm。另外由于水蒸气吸收,可以看到太赫兹脉冲时域波形主振荡峰之后的振荡,这降低了探测信号的信噪比。在下一步研究当中,将对系统进行进一步优化,如提高太赫兹脉冲源的单脉冲能量,将系统密封起来充入高纯度氮气以消除水蒸气吸收的影响,根据计算分析结果选用并建立完全满足优化设计的探测系统,以期提高单次测量的信噪比。

3 结论

利用光栅产生了一束具有倾斜前沿的飞秒探测脉冲,并利用该探测脉冲实现了对太赫兹脉冲时域电场波形的单次测量,测量的结果与使用传统电光采样方法测量的结果相符合。对于基于光栅产生倾斜脉冲前沿的太赫兹脉冲单次测量方法进行了建模分析,获得了光栅参数、光路设计、光学元件参数的选取等指导性结论。太赫兹脉冲单次测量技术的实现对于不可逆或者单次超快过程的太赫兹光谱研究具有重要意义。

参考文献:

- [1] Schmuttenmaer C A. Exploring dynamics in the far-infrared with terahertz spectroscopy[J]. Chem. Rev., 2004,104(4):1759-1780.
- [2] Kim K Y, Yellampalle B, Rodriguez G, et al. Single-shot, interferometric, high-resolution, terahertz field diagnostic[J]. Applied Physics Letters, 2006,88(26):041123.
- [3] Yoichi Kawada, Takashi Yasuda, Atsushi Nakanishi, et al. Single-shot measurement of terahertz temporal waveform using pulse-front tilting by a direct vision dispersion prism[J]. Review of Scientific Instruments, 2009,80(11):113703.
- [4] Yoichi Kawada, Takashi Yasuda, Hironori Takahashi, et al. Real-time measurement of temporal waveforms of a terahertz pulse using a probe pulse with a tilted pulse front[J]. Optics Letters, 2008,33(2):180-182.
- [5] Yellampalle B, Kim K Y, Rodriguez G, et al. Algorithm for high-resolution single-shot THz measurement using in-line spectral interferometry with chirped pulses[J]. Applied Physics Letters, 2005,87(21):211109.
- [6] Yoichi Kawada, Takashi Yasuda, Atsushi Nakanishi, et al. Single-shot terahertz spectroscopy using pulse-front tilting of an ultra-short probe pulse[J]. Optics Express, 2011,19(12):11228.

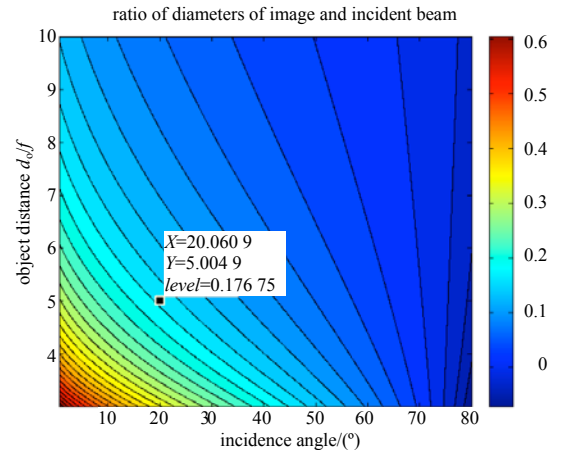


Fig.8 Ratio of diameters of the image and the incident beam
图 8 成像光斑尺寸与入射光斑尺寸的比值

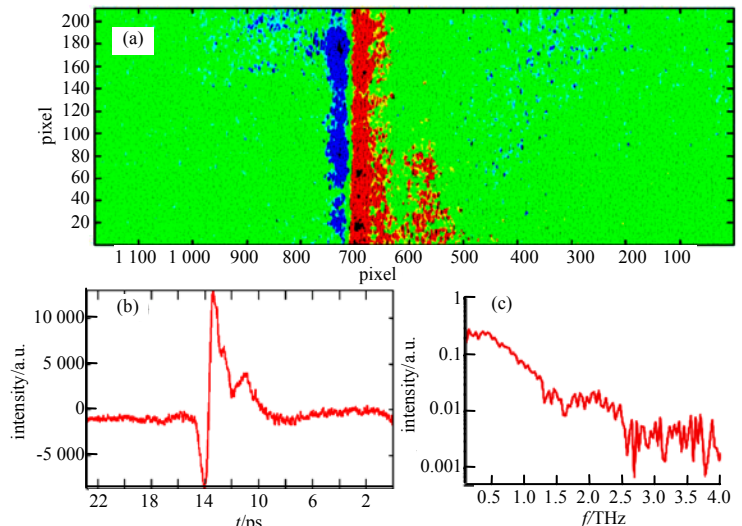


Fig.9 Experiment results of single shot measurement of THz pulses
图 9 太赫兹脉冲单次测量的实验结果