

基于电光采样的超快脉冲波形参数实验研究

冯志刚, 赵科佳, 杨智君, 吴钊, 陈赫, 缪京元, 李抵非, 吴昭春, 何昭

中国计量科学研究院信息与电子计量科学和测量技术研究所, 北京 100029

摘要 针对 NTN 技术的脉冲波形参数国家基准已无法完全满足目前超高速电脉冲波形测量和校准的现状, 构建了基于电光采样技术的脉冲波形参数测量系统, 自主设计并制备了钽酸锂基共面波导结构的高频电光调制器, 通过网络分析系统测量得到了其 3 dB 频率响应可达 100 GHz。以高速光电探测器输出的电脉冲波形作为待测信号, 对系统参数进行了详细的分析和优化。在优化完善的基础上, 最终实现了对 70 GHz 高速光电探测器输出电脉冲波形的精密测量, 获得的波形的上升时间和半峰全宽分别为 4.6 ps 和 5.0 ps, 这将为我国基于电光采样技术脉冲波形参数国家基准的建立和持续提升提供参考。

关键词 计量; 脉冲波形; 电光采样; 上升时间; 电光调制

中图分类号 O452

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0532001

Experimental Investigation of Ultrafast Pulse Waveform Parameter Based on Electro-Optic Sampling

Feng Zhigang, Zhao Kejia, Yang Zhijun, Wu Fan, Chen He,

Miao Jingyuan, Li Difei, Wu Zhaochun, He Zhao

Division of Electronics and Information Technology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

Abstract The national standard of pulse waveform parameter based on the NTN technique cannot fully meet the measurement and calibration requirements of the current ultra-high speed electrical pulse waveform. We structure the pulse waveform measurement system based on electro-optic sampling technique and independently design and prepare the high frequency LiTaO₃-based electro-optic modulator with coplanar waveguide structure. The 3 dB frequency of the modulator measured by the network analysis system can reach 100 GHz. We optimize the system parameters by analyzing the experimental results of the output pulse waveform of photodetector. On the basis of the above optimization and improvement, we finally achieve the precise measurement for the electric pulse waveform of 70 GHz high-speed photodetector, and the rise time and full width at half maximum of the measured waveform are 4.6 ps and 5.0 ps, respectively. It will give reference for the establishment and sustained promotion of the national standard pulse waveform parameters of our country based on the electro-optic sampling technique.

Key words metrology; pulse waveform; electro-optic sampling; rise time; electro-optic modulation

OCIS codes 120.3940; 320.5550; 320.7100; 320.7150

1 引 言

脉冲波形参数作为无线电计量的基本参数之一, 其量值的准确、可靠不仅为无线电诸多计量参数提供溯源, 而且在军事、民用、通信等领域具有难以估量的潜在应用价值和重要意义。微电子技术的不断发展使电子信息器件呈现出微型化和高速化的发

展趋势, 器件的响应时间已进入皮秒甚至亚皮秒时代, 频带宽度达到了百吉赫兹, 作为通用测量设备的取样示波器的带宽也已达到百吉赫兹以上。目前建立在中国计量科学研究院的基于 NTN 技术^[1]的脉冲波形参数国家基准只能提供上升时间为 7 ps、系统带宽为 50 GHz 的测试校准能力, 已无法满足日益增长的高速电子器件和测试设备的校准需求。另

收稿日期: 2017-10-25; 收到修改稿日期: 2017-12-18

基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAK02B03)、中国计量科学研究院基本科研业务费项目(27-AKY1705)、中国计量科学研究院探索性科研项目(27-AKYCX1604)

作者简介: 冯志刚(1981—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事脉冲计量、量子光学及原子物理精密测量方面的研究。

E-mail: fengzg@nim.ac.cn(通信联系人)

外,NTN技术只适用于安捷伦的取样示波器,对实时示波器则无法校准,而且其有效性引入的不确定度也较大,严重限制它的应用范围,此校准技术已被各国计量研究院摒弃。脉冲波形参数计量面临严峻挑战,因此发展高带宽、高灵敏度的新型脉冲波形参数计量技术和标准已迫在眉睫。基于电光效应的电光采样技术^[2-3]以超短激光脉冲作为采样门,通过测量待测电信号调制光强的变化来实现对高速电子器件或电路响应的无干扰测量。相比于传统的电学测量方法,该技术具有飞秒量级的时间分辨率和太赫兹的测量带宽,是突破以上传统校准技术瓶颈的有效途径之一。具体为:由于电光效应,电光晶体在电场作用下的折射率将发生变化,进而引起通过晶体光波的偏振态及光强的变化,而光强的变化与此刻电信号的幅值成正比,这样就可以通过测量光信号强度的变化推知相应电信号的变化,然后利用等效采样原理便可实现对超快脉冲波形的复现测量。随着对电光材料及其电光特性研究的不断深入^[4-6],电光采样技术已在太赫兹光谱、太赫兹成像、微波采样和高速取样示波器等测量和校准方面具有广泛的应用^[7-10]。目前只有美国、德国和英国的国家计量研究院陆续开展并建立了基于电光采样技术的脉冲波形参数基准装置。美国国家标准与技术研究院(NIST)建立了钽酸锂基共面波导结构的透射式电光采样系统,采用该系统对高速光电探测器产生的电脉冲进行了精密测量,通过失配校正方法形成了带宽为200 GHz脉冲波形的测量校准能力^[11],并进行了详细的不确定度分析和评定^[12],然后用校准的光电探测器对带宽为110 GHz取样示波器的频率响应进行了校准^[13]。针对不同NIST的技术方案,英国物理实验室和德国物理技术研究院分别建立了基于钽酸锂晶体的反射式电光采样系统,以低温砷化镓光导开关^[14]产生的电脉冲作为被校对象,它们分别具备70 GHz和1 THz的测试能力^[15-16],然后用校准的电脉冲作为标准信号分别对带宽为70 GHz和100 GHz的取样示波器的冲激响应进行了精确校准^[17]。另外,文献^[18]针对50 GHz取样示波器的上升时间进行了双边比对。为应对我国脉冲波形参数国家基准面临的严峻挑战和高速电子器件测试需求的不断提高,本研究以高速光电探测器产生的电脉冲作为被测信号,建立了透射式电光采样超快脉冲波形测量系统。被校准的高速光电探测器可作为移动的标准脉冲源,便于量值传递。如利用被校准的高速光电探测器可以很方便对宽带取样

示波器进行精确校准,而被校准的取样示波器不仅为阶跃脉冲源、梳状波发生器等提供有效的溯源,而且可以实现对复杂调制信号及5 GHz波形等的精密测量。另外,高频电光调制器作为电光采样系统的核心部件,其性能指标直接关系到系统的最终测量能力,是各个国家计量机构竞争的焦点。为此,本研究小组自主设计、制备了共面波导结构的钽酸锂基高频电光调制器,实验测量的3 dB频率带宽为100 GHz,优于美国NIST电光调制器的3 dB频率带宽^[11]。基于时域脉冲波形的实验结果对锁相放大器的时间常数、斩波器调制频率、飞秒激光功率等系统参数进行了详细的分析和优化,得到了高信噪比的最佳实验条件,最终实现了对70 GHz光电探测器输出电脉冲波形的精密测量,可为我国脉冲波形参数国家基准的有效提升提供参考。

2 理论分析

电光采样的核心是电光调制技术,而电光调制的物理基础是电光效应,即电光晶体在电场的作用下,其折射率将发生变化,当光波通过此晶体时,其偏振、强度等传输特性因受到影响而变化。通常用折射率椭球来描述光波在晶体中的传输特性,晶体未加电场时,在以 x 、 y 、 z 为介质主轴方向的坐标系中,折射率椭球可表示为

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1, \quad (1)$$

式中: n_x 、 n_y 、 n_z 为折射率椭球的主折射率。本研究中采用的晶体为钽酸锂(LiTaO₃)晶体,为了简便起见,假设在 z 轴外加电场 E_z ,其折射率椭球方程变为

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{13}E_z\right)x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{13}E_z\right)y^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + \gamma_{33}E_z\right)z^2 = 1, \quad (2)$$

式中: n_o 为寻常光的折射率; n_e 为非寻常光的折射率; γ_{13} 和 γ_{33} 为晶体的有效电光系数。

对应的折射率变为

$$\begin{cases} n_x = n_o - \frac{1}{2}n_o^3\gamma_{13}E_z \\ n_y = n_o - \frac{1}{2}n_o^3\gamma_{13}E_z \\ n_z = n_e - \frac{1}{2}n_e^3\gamma_{33}E_z \end{cases} \quad (3)$$

由(3)式可以看出,在电场作用下, x 、 y 、 z 轴方向的折射率都发生了变化。实验中采样光沿钽酸锂

晶体的 y 轴(晶体表面的法线方向)方向入射,而且用起偏器实现光的偏振方向与 x 轴(共面波导传输线方向)成 45° 角,可以将其分解为 x 和 z 方向的两个分量,因此在 $y=0$ 位置的折射率椭球为

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{13} E_z\right) x^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + \gamma_{33} E_z\right) z^2 = 1. \quad (4)$$

设通光方向晶体的厚度为 H , 共面波导信号线与地线间隙为 G , 在共面波导上加电压 $V_z = E_z G$ 引起光波的相位延迟为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_x - n_z)H = \Delta\varphi_s + \Delta\varphi_{eo} = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)H + \frac{\pi}{\lambda}(n_e^3 \gamma_{33} - n_o^3 \gamma_{13})V_z \frac{H}{G}, \quad (5)$$

式中: λ 为采样光波长; $\Delta\varphi_s$ 为与电场无关的钽酸锂晶体静态双折射引起的相位延迟, 实验中通常用相位补偿器消除; $\Delta\varphi_{eo}$ 为完全由外电场引起的相位延迟, 与所加电压成线性关系。用偏振分束器将入射光分成偏振方向相互垂直的两束偏振光, 由平衡探测器探测得到两偏振光的光强差为

$$\Delta I = I_{in} - 2I_{in} \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) = I_{in} \cos \Delta\varphi, \quad (6)$$

式中: I_{in} 为入射光强度。定义 $\Delta\varphi_{eo} = \pi$ 时电压值为半波电压 V_π , 则

$$\Delta I = I_{in} \cos \Delta\varphi = I_{in} \cos\left(\frac{\pi}{V_\pi} V_z\right). \quad (7)$$

为了使 ΔI 与 V_z 成线性关系, 在起偏器前插入一个四分之一波片, 这样就增加了 $\pi/2$ 的固定相位延迟, 则(7)式变为

$$\Delta I = I_{in} \cos\left(\Delta\varphi + \frac{\pi}{2}\right) = -I_{in} \sin\left(\frac{\pi}{V_\pi} V_z\right). \quad (8)$$

电光晶体的半波电压通常在千伏量级, 当被测电压值远小于半波电压值时, 可以认为光强差与被测电压值成线性关系, 这样通过平衡探测器精确测量其光强差可以实现对电压的线性测量。可以看出, 电光采样可以将电场作用下折射率的变化转换为光强的变化, 最终来复现加载到电光晶体上电压的变化。

3 实验装置

电光采样脉冲波形参数实验装置如图 1 所示。波长为 1560 nm、重复频率为 80 MHz、脉冲宽度为 80 fs 的飞秒激光器产生的超短激光脉冲被偏振分光棱镜分成两束, 其中一束作为激励光抽运高速光电探测器产生周期电脉冲信号, 此信号作为待测信号通过 110 GHz 微波探针加载到共面波导结构的

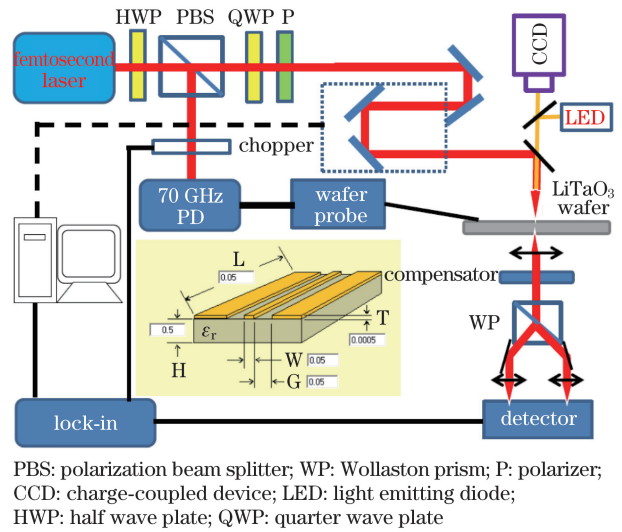


图 1 电光采样实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of electro-optic sampling

钽酸锂基电光调制器上; 另一束作为采样光束首先经过四分之一波片和起偏器, 使其偏振方向与共面波导传输线方向成 45° 角穿过电光晶体。

当无外电场时, 采样光偏振方向不发生变化, 经 Wollaston 棱镜分束后的两个相互垂直的偏振分量大小相等, 即光强度相等, 由平衡探测器探测后输出为零。当有外电场时, 由于电光效应, 晶体的折射率发生变化, 继而导致采样光偏振态的变化, 这时经 Wollaston 棱镜分束后的两个相互垂直的偏振分量大小将不再相等, 导致平衡探测器的输出不再为零, 而偏振态的变化与此刻共面波导上所加的待测电信号的幅值成正比, 利用光偏振态的变化导致光强的变化实现了电信号幅值的精密测量。

然后利用可变机械延迟线(如图 1 中虚线框所示)来调节光脉冲与电脉冲到达晶体的相对时间, 并分别记录不同幅值电脉冲调制作用下光脉冲光强的变化, 实现对电脉冲时域脉冲波形的复现测量。为了提高信号的信噪比和灵敏度, 实验中采用斩波器对激励光进行调制, 然后利用锁相放大器对平衡探测器的输出信号进行直接解调。锁相放大器的参考信号由斩波器的同步输出提供。整个采集过程由程序控制, 在实现机械可变延迟线相对时间延迟扫描的同时, 由计算机同步记录锁相放大器的测量数据。

电光调制器作为电光采样系统的核心器件之一, 其性能的优劣是实现超快脉冲波形精密测量的关键。钽酸锂晶体具有较小的静态双折射率、高的电光系数及较低的半波电压, 这些优点使其成为制备高频电光调制器的理想材料。基于 y 轴切割且厚度为 $500 \mu\text{m}$ 的钽酸锂晶体, 设计、制备了共面波导

结构的电光调制器,如图 1 中插图所示。由于金具有较高的导电率,共面波导金属传输线电极材料选择金。考虑到电极回波损耗及特性阻抗匹配等因素,经过仿真设计,最终制备的传输线中心导带(信号线)和接地线宽度分别为 $50\ \mu\text{m}$ 和 $300\ \mu\text{m}$,信号线与接地线的间隙为 $50\ \mu\text{m}$,电极厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 。为了对共面波导结构电光调制器的传输线特性进行分析,采用安立公司的矢量网络分析仪、美国 Cascade 公司微波探针和 110 GHz 微波探针等组成的在片 S 参数测量系统,同时选择系统自带的 Multiline-TRL 校准算法软件,测量了传输线的正向传输系数 S_{21} 随频率的变化曲线,结果如图 2 所示,得到的 3 dB 频率响应达到 100 GHz,曲线信噪比非常好,完全能满足百吉赫兹脉冲波形测量的实验要求,并且其 3 dB 频率带宽指标优于 NIST 电光调制器的结果^[11]。受系统 110 GHz 微波探针频带宽度的限制,同时为了保证测量的准确性,研究中只对共面波导 110 GHz 以内的频率响应进行了测量,相比于 3 dB 带宽,本研究中共面波导电光调制器的实测带宽还有很大提升空间。

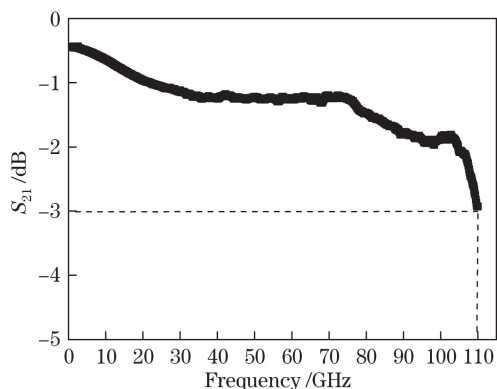


图 2 传输系数 S_{21} 随频率的变化

Fig. 2 Variation of transmission coefficient S_{21} with frequency

以 70 GHz 光电探测器输出的电脉冲波形作为待测信号,测量得到的典型时域脉冲波形如图 3 所示。可以看出:脉冲波形峰值比较尖锐,信号噪底比较平缓,具有很好的信噪比。通过高斯拟合得到的脉冲波形的半峰全宽(FWHM)约为 6.8 ps,从脉冲幅度的 10% 上升到 90% 所需要的时间(上升时间)约为 12 ps。众所周知,上升时间是脉冲波形的重要参数之一,对于一个确定的示波器或系统来说,时域中陡峭的上升沿对应着频域中丰富的谐波分量,即系统带宽信息。要实现上升时间的准确测量,测量系统的带宽必须足够宽。也就是说,上升时间越陡峭与测量系统带宽越大是等价的。对于一个确定的

系统而言,系统上升时间与带宽存在一个相对固定的转换系数,即系统的上升时间与其带宽的乘积近似为 0.35^[19]。对于带宽为 70 GHz 的光电探测器而言,上升时间大约为 5 ps,而共面波导和微波探针的带宽都优于 100 GHz,但本实验测量的上升时间值的确远大于 5 ps。因此,需要对系统参数进行详细的分析和优化,使其得到最佳的实验测量条件。

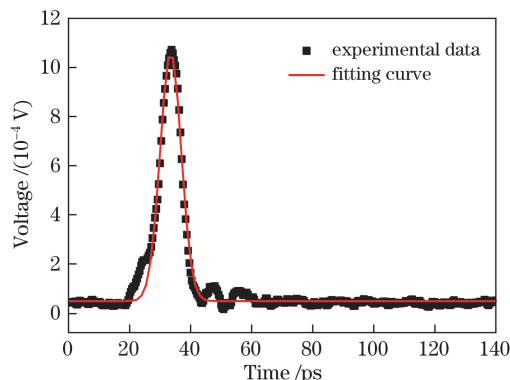


图 3 70 GHz 光电探测器的时域脉冲波形

Fig. 3 Time domain pulse waveform of 70 GHz photodetector

4 实验结果和优化分析

电光采样技术的物理基础是电光效应,电光效应性能的好坏不仅取决于调制电场的质量,还与激光功率的强弱有关。另外,锁相放大器和斩波器的参数及稳定性也会对实验结果产生影响。为了提升电光采样系统的整体性能和探测能力,使其更好地满足高频脉冲波形复现的实验要求,本研究对系统参数进行了详细分析和优化,具体如下。

4.1 锁相放大器和斩波器

电光晶体的半波电压通常在千伏量级,对于光电探测器输出的百毫伏量级的待测电信号来说,平衡探测器接收到的光强变化非常弱。为了提高系统测量的灵敏度和信噪比,通常采用锁相放大器的相敏检波技术,即在特定相位和参考频率下提取信号,而参考频率外的信号将被滤除。锁相放大器的噪声抑制能力取决于等效噪声带宽(ENBW)的大小,ENBW 越小,噪声抑制越大;而 ENBW 反比于积分器的时间常数,也就是说,时间常数越大,噪声抑制能力越强。

实验中,同样以 70 GHz 光电探测器输出的电脉冲波形作为待测信号,锁相放大器时间常数分别设为 1, 3, 10 s,测量相应的时域脉冲波形如图 4 所示。可以看出,时间常数越长,信噪比越好,特别是信号基底信噪比在较大时间常数下有明显的提高。

而实验中选用的 DSP-SR850 型数字锁相放大器,其时间常数范围为 $10\ \mu\text{s}\sim 3\ \text{ks}$,20 挡可选。考虑到时间常数过大将延长锁相放大器的反应时间,从而导致实验时间过长而影响实验的稳定性,因此实验中将锁相放大器的时间常数设定为 10 s。

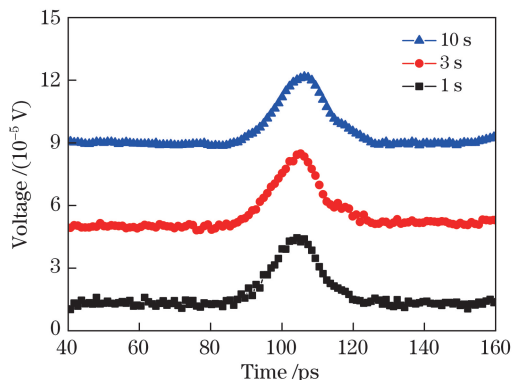


图 4 锁相放大器时间常数分别为 1 s、3 s 和 10 s 时测得的时域脉冲波形

Fig. 4 Time domain pulse waveforms with time constants of lock-in amplifier of 1 s, 3 s and 10 s, respectively

锁相放大器的参考频率由斩波器的同步输出提供,所以斩波器调制频率的大小和稳定性对测量信号有不可忽略的影响。锁相放大器采集的信号是斩波器调制的无数个周期内等效采样平均的结果。一般来说,斩波器的调制频率越高,实验信号越稳定。实验中设定锁相放大器的时间常数为 10 s,当斩波器的调制频率分别为 0.5,1,1.5 kHz 时测量的相应时域脉冲波形如图 5 所示。从实验结果可以看出:随着斩波器调制频率增加,信噪比越来越好,但当斩波器频率为 1.5 kHz 时,相比于 1 kHz 的实验结果,信噪比反而变差,而且信号波动性也增大,这与斩波刀片在高速旋转过程中的抖动及漂移等导致的斩波器频率稳定度下降有关。尽管使用的斩波器(SR540)的最高频率可达 3.7 kHz,但考虑到信号的稳定性和信噪比,实验中斩波器的调制频率设定为 1 kHz。

4.2 飞秒激光功率

飞秒激光作为电光采样系统的光源,其功率在很大程度上对信号有不可忽略的影响。一方面是采样光功率对电光采样信号强弱的影响,另一方面是光电探测器激励光功率对产生的电脉冲信号的影响,继而影响到电光采样信号。

在保证锁相放大器和斩波器参数优化的同时,实验中将不同透光率的光学衰减片分别插入到采样光束中,以此分析其时域脉冲波形的变化。固定光电探测器激励的光功率不变,在采样光束中分别插

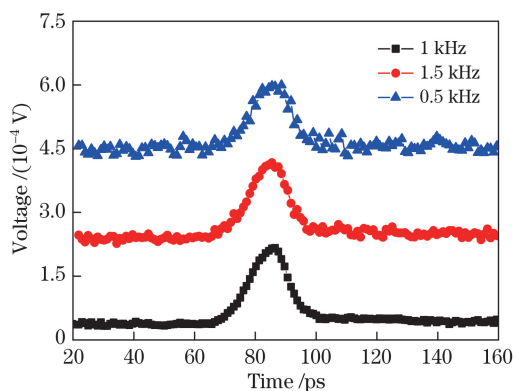


图 5 斩波器频率分别为 0.5 kHz、1 kHz 和 1.5 kHz 测得的时域脉冲波形

Fig. 5 Time domain pulse waveforms with chopper frequency of 0.5 kHz, 1 kHz and 1.5 kHz, respectively

入透光率为 1%、10% 和 50% 的衰减片,得到的相应的时域脉冲波形如图 6 所示。可以看出,脉冲波形的信号峰值高度随输入功率的减小而明显减弱,反映了电光效应的强弱随输入光强的变化关系,而且与(8)式中平衡探测器探测信号与输入光强成正比的结论一致。但采样光功率的强弱对信号半峰全宽的影响较小,从最终的输出信号与输入光强成比例变化的关系可以推知被测电脉冲波形特性与采样光功率的关系不大,但在很大程度上取决于光电探测器本身的特性。信号峰值位置的不完全重合是由衰减片的厚度不一致导致的,这也为光学镜片的有效折射率和厚度等参数的精密测量提供了新的技术手段。

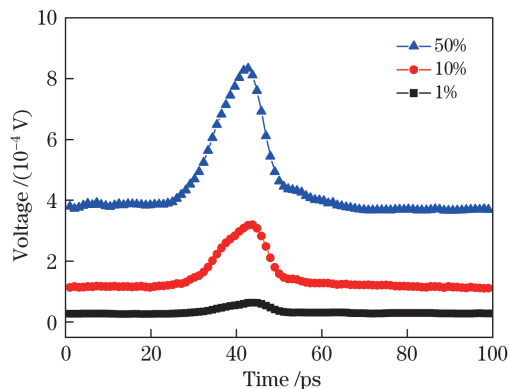


图 6 采样光功率分别衰减 1%、10% 和 50% 时的时域脉冲波形

Fig. 6 Time domain pulse waveforms with sampling optical power attenuated of 1%, 10% and 50%, respectively

本研究通过衰减片改变光电探测器激励光功率的变化来研究其对信号的影响,而光电探测器接收到的光强与其供电电流成正比,即光强越强,电流越大。图 7 为固定采样光功率不变,不同供

电电流下的时域脉冲波形。可以看出:随着电流增加,即激励光强增强,信号峰值略微增强,对脉冲波形上升时间的影响基本可以忽略;但脉冲波形宽度有明显的加宽,这是由光电探测器随入射光强的时间响应决定的。

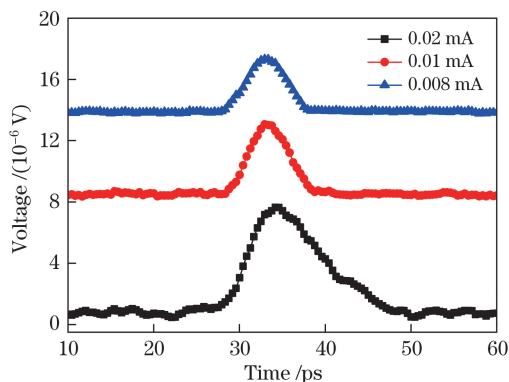


图 7 不同激励光功率下的时域脉冲波形
Fig. 7 Time domain pulse waveforms with different excitation powers

当光脉冲照射光电探测器时,光生载流子浓度从零快速上升并达到稳态;但光脉冲消失时,由于光生载流子存在一定的生存时间或寿命,载流子浓度在光照消失后不会立刻消失,而是弛豫一段时间后逐渐降到零。由于研究中使用的飞秒激光脉冲远小于光电探测器皮秒量级的时间响应,可以认为光电探测器输出的电脉冲信号为其冲击响应,因此电脉冲的上升时间不随输入光强的增加而变化。但随着光强的增加,光生载流子浓度就会增大,当光脉冲消失时,光生载流子的弛豫时间变长,这也是实验中观察到脉冲宽度明显展宽并呈现出非高斯特性的原因。通过以上分析可以看出,为了获得高斯型脉冲波形,需要调整激励光功率,通过降低光生载流子浓度来缩短其整体的弛豫时间。当光电探测器的供电电流小于 0.01 mA 时,载流子浓度降低,脉冲波形基本呈高斯型分布,而且脉冲宽度随电流的变化很小。为了保证足够的信号强度,实验中通过调节光电探测器的激励光功率,使其供电电流保持在 0.01 mA。

在对电光采样系统实验进行分析和整体优化的基础上,设定锁相放大器的时间常数为 10 s,斩波器的调制频率为 1 kHz,光电探测器的供电电流为 0.01 mA。虽然采样光束光功率对信号的影响不大,但考虑到信号噪底的平整度,在实验中插入透光率为 10% 的衰减片。优化后测量得到的 70 GHz 光电探测器输出电脉冲时域波形如图 8 所示。通过高斯函数拟合得到脉冲波形的半峰全宽为 5.0 ps,相比

于图 3 中测量的 6.8 ps 明显变窄。然后用密度分布众数法来确定脉冲波形的顶量值和底量值,将两者之差定义为脉冲幅度,而从脉冲幅度的 10% 上升到 90% 所需要的时间为上升时间,由实验曲线计算得到的 70 GHz 光电探测器输出的时域脉冲波形的上升时间为 4.6 ps。根据系统的上升时间与其带宽乘积近似为 0.35 的关系,得到相应的带宽约为 76 GHz,这与出厂实测带宽大于 74 GHz 的指标基本一致。可以看出,通过系统参数优化后,脉冲半峰全宽和上升时间的测量精度有了明显提高,说明本研究实现了整体系统带宽大于 70 GHz 的测试能力,已大大突破现有 50 GHz 脉冲波形参数国家基准的测量水平,同时佐证了本研究中所设计的共面波导高频电光调制器在微波探针加载过程中造成的失配影响很小,可为今后设计、制备更高频的电光调制器及失配修正提供参考。

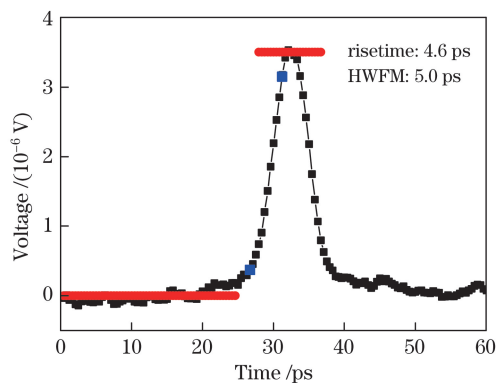


图 8 优化后的 70 GHz 光电探测器的时域脉冲波形
Fig. 8 Optimized time domain pulse waveform of 70 GHz photodetector

5 结 论

本研究构建了基于电光采样技术的脉冲波形测量系统,自主设计并制备了共面波导结构的钽酸锂基电光调制器,以光电探测器输出的电脉冲作为研究对象,通过分析和优化锁相放大器时间常数、斩波器调制频率、飞秒激光功率等参数对实验结果的影响,实现了对 70 GHz 高速光电探测器输出电脉冲时域波形的精密测量,为实现更高频脉冲波形实验研究及国家脉冲波形基准的提升提供参考。

参 考 文 献

- [1] Verspecht J. Broadband sampling oscilloscope characterization the “nose-to-nose” calibration procedure: a theoretical and practical analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,

- 1995, 44(6): 991-997.
- [2] Valdmanis J A, Mourou G A, Gabel C W. Picosecond electro-optic sampling system[J]. Applied Physics Letters, 1982, 41(3): 211-212.
- [3] Valdmanis J A, Mourou G. Subpicosecond electrooptic sampling: principles and applications[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, 22(1): 69-78.
- [4] Wang Q, Zhang H, Liu N, *et al.* Electro-optic effects induced by the built-in electric field in a {001}-cut silicon crystal[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(1): 012301.
- [5] Chen Z G, Zhao J X, Zhang Y H, *et al.* Electric-field-induced linear electro-optic effect in silicon[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1336-1340.
陈占国, 赵建勋, 张玉红, 等. 硅材料的场致线性电光效应[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1336-1340.
- [6] Li C S. Mutual compensation property of electrooptic and magneto-optic effects and its application to sensor[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(4): 047801.
李长胜. 电光与磁光效应的互补特性及其传感应用[J]. 物理学报, 2015, 64(4): 047801.
- [7] Jepsen P U, Cooke D G, Koch M. Terahertz spectroscopy and imaging—modern techniques and applications[J]. Laser & Photonics Reviews, 2011, 5(1): 124-166.
- [8] Blanchard F, Tanaka K. Improving time and space resolution in electro-optic sampling for near field terahertz imaging[J]. Optics Letters, 2016, 41(20): 4645-4648.
- [9] Seitz S, Bieler M, Spitzer M, *et al.* Optoelectronic measurement of the transfer function and time response of a 70 GHz sampling oscilloscope[J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(10): L7-L9.
- [10] Lee D J, Kwon J Y, Kang N W. Field analysis of electro-optic probes for minimally invasive microwave sampling[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 2897-2909.
- [11] Williams D F, Hale P D, Clement T S, *et al.* Calibrated 200-GHz waveform measurement[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(4): 1384-1389.
- [12] Williams D F, Lewandowski A, Clement T S, *et al.* Covariance-based uncertainty analysis of the NIST electrooptic sampling system[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(1): 481-491.
- [13] Clement T S, Hale P D, Williams D F, *et al.* Calibration of sampling oscilloscopes with high-speed photodiodes[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(8): 3173-3181.
- [14] Loata G C, Bieler M, Gunter H, *et al.* Optically induced voltage pulses by resonant excitation of a passive GaAs photoconductive switch[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2008, 25(8): 1261-1264.
- [15] Harper M, Smith A J A, Basu A, *et al.* Calibration of a 70 GHz oscilloscopes[C]. Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, 2004: 9264258.
- [16] Bieler M, Pierz K, Siegner U. Simultaneous generation and detection of ultrashort voltage pulses in low temperature grown GaAs with below-bandgap laser pulses[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(5): 051108.
- [17] Füsler H, Eichstädt S, Baaske K, *et al.* Optoelectronic time-domain characterization of a 100 GHz sampling oscilloscope[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(2): 025201.
- [18] Bieler M, Seitz S, Spitzer M, *et al.* Rise-time calibration of 50 GHz sampling oscilloscopes: intercomparison between PTB and NPL[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(2): 266-270.
- [19] Liu M L, Lu F M, Zhu J M, *et al.* Modern pulse metrology[M]. Beijing: Science Press, 2010.
刘明亮, 陆福敏, 朱江森, 等. 现代脉冲计量[M]. 北京: 科学出版社, 2010.