

超宽带脉冲电场测试技术研究*

徐晓英^{1,2,†} 朱长青² 刘尚合²

(1 武汉理工大学物理系 武汉 430063)

(2 军械工程学院静电与电磁防护研究所 石家庄 050003)

摘要 电磁脉冲测试尤其是宽带脉冲电场测试已成为电子设备抗扰度试验研究的重要手段,国内外不少学者开展了这方面的研究,但是研制宽频带、大动态、高灵敏度的脉冲电场测试仪始终是该研究领域的一个难点.文章作者在国家自然科学基金资助下,对国内外研究动态进行了调查分析,综合运用相关先进技术,研制成功超宽带脉冲电场测试系统,其技术指标达到:带宽为 3.5Hz—1GHz,电场强度从 V/m 量级到 MV/m 量级,动态范围达到 60dB,从而为脉冲电场的测试和电磁防护研究及电子设备抗扰度试验提供了强有力的手段.

关键词 静电放电,超宽带,脉冲电场,测试

Measurement of ultra-wide-band pulsed electrical fields

XU Xiao-Ying^{1,2} ZHU Chang-Qing² LIU Shang-He²

(1 Department of Physics, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

(2 Institute of Electrostatic and Electromagnetic Protection, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract The measurement of pulsed electromagnetic fields, especially wide-band pulsed fields, has become an important means for testing the anti-interference of electrical equipment. However, a pulsed field test meter with wide band, large dynamic range and high sensitivity remains a difficulty in this area. Based on studies of related domestic and overseas technologies we successfully developed an ultra-wide-band pulsed electric field test and measurement system which can cover a bandwidth from 3.5Hz to 1GHz for a field amplitude of V/m to MV/m, and a dynamic range of up to 60dB. This system should be of great use for pulsed fields measurement, electromagnetic detection and electrostatic discharge immunity tests of electronic devices.

Keywords electrostatic discharge, ultra-wide-band, pulsed electric field, test and measurement

1 引言

超宽带脉冲电场包括静电放电电磁脉冲及高功率微波等产生的脉冲电磁场.在干燥的环境,人体由于活动等种种原因,常常带有数千伏甚至几万伏的静电电压.这时候你若去触摸门把之类金属物体,就会感到有电击发生,这就是人体静电放电.静电放电可以通过导体传输能量,假如这类事件发生在有危

险品的场所,可能成为点火源、引爆源,引发重大工程事故.静电放电还可以在空间产生超宽带脉冲电磁场,国内外报道的由静电放电等超宽带脉冲电场导致卫星失控、火箭发射失败、飞机失事等恶性事故有数十起之多^[1].在微电子技术领域,全球每年损

* 国家自然科学基金(批准号:60471024)资助项目;国家自然科学基金重点(批准号:50237040)资助项目

2005-05-20 收到初稿 2005-06-13 修回

† 通讯联系人. Email: xyxu@public.wh.hb.cn

失高达数百亿美元。所以,超宽带脉冲电场防护研究一直是工业发达国家十分重视的研究课题。而脉冲电磁场测试理论与技术研究是揭示脉冲电磁场特性、阐明电磁脉冲的作用机理、评价电磁防护效能、研究电磁防护措施的重要手段。

电磁脉冲测试与传统连续波测试有很大不同。连续波测试技术目前已经十分成熟,而脉冲电磁信号通常是单个或一串具有极快上升沿、持续时间很短、幅值变化剧烈的脉冲,在频域上占有极宽的频谱范围。所以电磁脉冲测试不仅要测量信号的幅度,更重要的是要测量信号的时域分布。因此,它对包括天线及后续处理电路在内的整个测试系统的带宽、最大测试幅度及动态范围等都提出了更高的要求。此外,由于脉冲电磁场的边界条件、介质类型、空间分布、激励条件等都异常复杂,理论计算有很大的局限性,使得测试问题在脉冲电磁场研究中更突显出其重要性。

电磁脉冲测试尤其是宽带脉冲电场测试中,静电放电及其辐射场具有代表性,因为静电放电可产生上升沿极快和持续时间很短的电磁脉冲,其辐射场的频带宽度可以从零到几个 GHz。因此,静电放电电磁脉冲的测试成为有关脉冲电磁场测试的重要研究对象。

脉冲电磁场测试研究重点是场信号传感变换。目前用于测量电场的主要是极子类天线,其应用频率范围大约是 100kHz—750MHz。在对天线的研究方面,人们还没有研制出一种合适的高增益天线,能够在准直流至数 GHz 的频带范围内具有平坦的频率特性,以适合脉冲电磁场测试所需的场信号的传感变换。为了展宽脉冲电磁场测试天线的带宽,日本 NTT 电信网络实验室曾有人利用三副不同工作频段的的天线,组合起来对静电放电辐射场进行了测试^[2]。也有采用类似的方法,用 10kHz—350MHz 的半球形偶极子天线和工作频率为 40MHz—1.2GHz 的截头横电磁波喇叭天线相配合,对静电放电辐射电场进行测试研究^[3,4]。电阻加载天线或电抗加载天线^[5-7]可使天线的带宽在谐振点附近得到展宽,但又会降低天线的灵敏度。电小环天线和电小单极子天线具有很宽的频率范围,也不会对被测场产生大的影响,但其灵敏度较低。总的来说,天线的类型虽然很多,但一般都难以满足脉冲电磁场的测试要求,原因之一是天线的实际尺寸影响,难以保障响应频带在零到数个 GHz 范围内具有平坦的阻抗特性。之二是由导电材料做成的天线当其置于被测场时,

将会改变被测电磁场的分布,尤其是在静电放电辐射场为小空间、近场时更是如此。

近几年,我们在国家自然科学基金的资助下,开展了脉冲宽带电场测试技术研究并取得了初步成果。

2 设计原理

脉冲电场测试系统要解决的难题是如何实现天线接收信号的超宽带电光调制。因此,我们将天线与电光调制溶合在一起,直接构成电场传感探头,这种直接电光调制的方法,实现了传输系统的超宽带,从根本上解决了电场传感的带宽问题。

脉冲电磁场测试技术研究的关键是如何将空间传播的电磁辐射信号全息转换为便于处理的电压或电流信号,以及如何进行信号传输、信号处理等 3 个方面。图 1 所示为超宽带脉冲电场测试系统原理框。

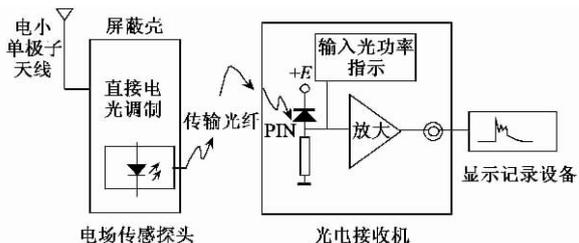


图 1 超宽带脉冲电场测试系统原理框图

测试系统由直接电光调制电场传感探头、传输光纤、光电接收机、显示记录设备 4 部分组成。电光调制电场传感探头直接将天线接收的被测脉冲电场信号转换为强度受电场信号调制的毫瓦数量级激光波,经光纤传至光电接收机,由光电接收机完成光电转换,获得被测电场信号,经放大,由显示记录设备显示记录,完成脉冲电场强度信号的测试。

2.1 直接电光调制原理

直接电光调制电场传感探头如图 2 所示。电阻 R、半导体激光器 LD、场效应管 Q 串联连接,棒状电小单极子天线的输出端直接连于场效应管的栅极,由于场效应管是一个电压控制电流元件,且具有很高的输入电阻,这样棒状电小单极子天线感应的电场信号直接控制场效应管的源漏电流,实现了天线接收信号的高阻输出,这种天线高阻耦合输出,充分利用了天线的工作带宽,为脉冲电场测试奠定了宽带基础。由于半导体激光器与场效应管相串联,场效应管的源漏电流即为半导体激光器的工作电流,实现了天线接收电场信号对激光器的直接驱动,最终

达到了电场信号与调制光信号的直接转换,从测试源头上展宽了测试系统的带宽。

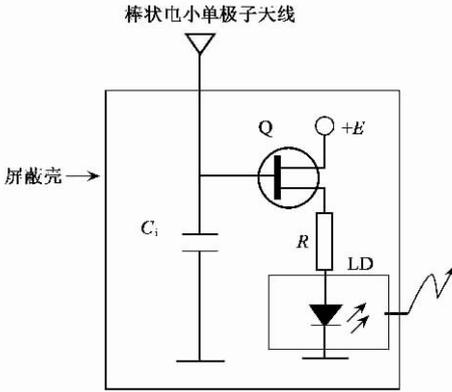


图2 直接电光调制电场传感探头

2.2 天线—电容分压原理

通过在图2中加装不同容量的电容 C_i ,可实现既能测试较弱的电场又能测试 $1\text{MV}/\text{m}$ 强脉冲电场。电小单极子天线在工作频段内可等效于一个与频率无关的电容 C_a ,因此天线回路等效于由电容 C_a 和 C_i 构成的与频率无关的分压电路,即

$$\frac{u_0(t)}{u_i(t)} = \frac{C_a}{C_a + C_i} \quad (1)$$

而天线回路的下限频率为

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_i(C_a + C_i)} \quad (2)$$

式中 R_i 为天线的负载电阻, C_a 为天线的等效电容,通过改变分压电容 C_i 的大小,可改变测试系统的灵敏度,实现对强脉冲电场的测试。电容 C_i 的值越大,天线回路的下限频率越低,强场测试时,系统的低频特性也会进一步得到改善。

3 测试系统研制

3.1 电场传感探头

直接电光调制电场传感探头是本设计的核心。它由一只源漏电流达 120mA 、截止频率为 25GHz 的高迁移率特殊微波场效应管 $3\text{SK}4\text{S}1$ 、棒状电小单极子天线,一只同时起限流和自偏压作用的电阻以及用于直接电光调制的半导体激光器4个部件组成。它将天线和电光调制器合为一体,省去了限制传输带宽的阻抗变换网络和放大驱动电路,克服了电光调制器与天线连接出现的问题。

由于电路要求具有从准直流到 1GHz 以上的超宽频带范围,设计中采用了极小化技术,所涉及到的

电阻、电容、场效应管均采用表面贴装元件,配合印刷线路的宽带设计,尽量降低分布参数的影响,以满足测试系统的超宽带。阻容元件采用的是 0603 系列,场效应管的封装形式是 $\text{SOT}-343$,半导体激光器采用的是具有 1.75GHz 模拟带宽的 $\text{LDM}13106$,并选用直径 1mm 、长度 2cm 的细铜棒作为棒状电小单极子天线,由(2)式可知,天线的工作频带可以满足 1GHz 的上限要求。

为了减小导体对被测电场分布造成的干扰,探头屏蔽外壳利用表面镀铜的 $45\#$ 钢制作,使其具有良好的电和磁屏蔽效果,形状上设计成超薄圆柱体结构,这样,在起到电磁屏蔽作用的同时,其外表面也是棒状电小单极子天线的反射面,使棒状电小单极子在电性能上构成电小偶极子。

3.2 光电接收机

目前示波器生产厂商 Tektronix (泰克)、 Agilent (安捷伦)、 Lecroy (力科)等都有与示波器相配套的光电转换探头,但除了价格原因之外,其灵敏度、光功率及带宽均无法满足脉冲电场测试系统的要求。为此我们自行设计了由高线性度 InGaAs 平面结构 PIN 光探测器、高增益低噪声超宽带放大电路、光功率检测与显示电路、电源电路等组成的光电接收机。

实现光电转换的高线性度 InGaAs 平面结构 PIN 光探测器,在 $0-5\text{mW}$ 的光功率输入范围内,对波长为 $1100-1650\text{nm}$ 的激光波具有良好的光电线性转换特性。高增益低噪声超宽带放大电路的核心是具有低噪声、截止频率大于 25GHz 的 $\text{BG}1360\text{W}$ 晶体管,电路中增加了可对其频率特性进行调整的元件,以利于调试整个测试系统的频率特性。光功率检测和显示电路主要由一对同时起电源滤波作用的阻容元件构成,光功率显示电路用3位半数字表头改装而成。供电电路由电源滤波器、制式开关电源、稳压电路等组成。

光电接收机最后输出被测电场强度信号,由显示记录设备进行显示处理(示波器或数字分析仪等),考虑到光电接收机的输出电阻约 300Ω ,为了保证测试系统具有 1GHz 的带宽,要求所选显示处理设备应具有大于 1.5GHz 的模拟带宽和 $1\text{M}\Omega$ 的输入阻抗。

3.3 传输光纤^[8]

用于光信号传输的光纤分为单模光纤和多模光纤。单模光纤仅传输光的一种极化模式,不存在模式色散,其传输特性要比多模光纤好,但其对接损耗较多,多模光纤大,本测试系统选用较大功率的激光器,因

此,可选用单模光纤.

4 宽带脉冲电场测试系统测试能力实验

经国防电磁计量测试站测试标定^[9],该系统的测试带宽为 3.5Hz—1GHz 以上(±1.5dB),动态范围达 60dB,最大可测场强为 1MV/m.同时,我们利用所研制的超宽带脉冲电场测试系统对静电放电辐射场、模拟雷电电磁脉冲、大功率超宽带电磁脉冲辐射场等进行了实际测试,检验了测试系统的实际测试能力.

根据 IEC61000-4-2 标准规定的电子设备静电放电测试装置,在 2kV 接触放电状态下,用研制的超宽带脉冲电场测试系统(如图 3)对距放电模拟器的水平距离为 30cm,耦合板上方 20cm,50cm,1m 处的电场强度进行了实际测试,分别得到图 4、图 5 和图 6 所示的电场波形.



图 3 超宽带脉冲电场测试系统

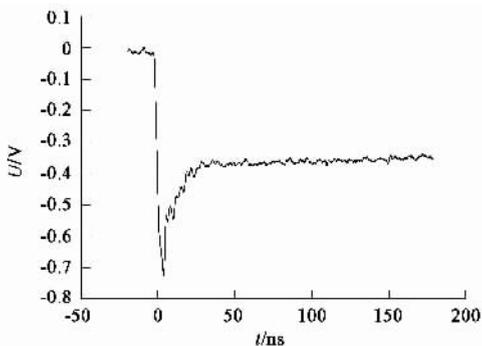


图 4 水平耦合板上方 20cm 处的电场波形

从图 4 5 6 可以看出,水平板耦合电场强度符合理论分析所揭示的一般规律^[9],即在距放电点较近时,静电场分量在所测电场强度中起主导作用,并随距离的增加而衰减.从实验上进一步验证了测试

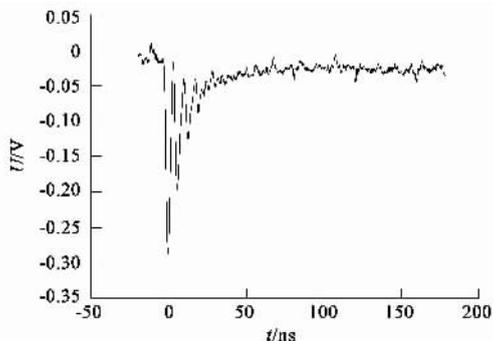


图 5 水平耦合板上方 50cm 处的电场波形

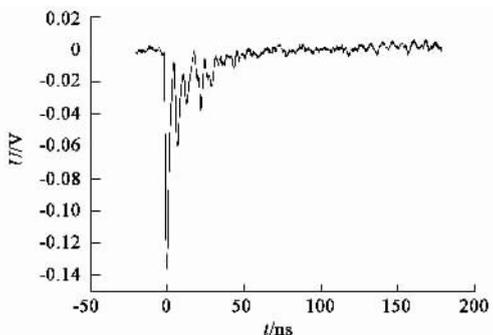


图 6 水平耦合板上方 1m 处的电场波形

系统的测试能力.

5 一个值得探讨的研究方向

随着光通信技术的迅速发展,利用电光晶体实现电光调制的技术得到了广泛的应用,与天线感应电场信号不同,它的理论基础是晶体的 Pockels 效应^[10].即当偏振光通过晶体时,偏振光的相位将随施加在晶体中的电场强度的大小而改变,从而实现电场对光信号的相位调制,经检偏后可形成强度调制光.利用此原理可制作用于脉冲电场测试的传感探头.但从实用的角度看,由于晶体的电光系数有限,进行电光调制需要的电场强度非常高,而当脉冲电场较弱时,则无法实现对光信号的相位调制,因而不能用于弱脉冲电场的测试.为此,有人利用集成光波导和加装偶极子天线等技术提高调制深度,其效果尚不理想^[11].目前利用外部电光调制原理制作的电光调制器仅见于数字通信领域,也不适合于模拟信号的电光调制.但是,从理论上讲,利用此原理制作的脉冲电场测试探头是无源部件,而且测试探头结构尺寸小,适合微小空间的电磁场测量要求,此外,由于测试探头是用非导电材料制作,不会对被测电场产生干扰,因此,在脉冲电磁场测试方面有很大

的发展潜力,不失为一个重要的研究方向.

6 结束语

长期以来,宽带脉冲电场的测试手段一直是制约电磁防护技术发展的难题,宽带场信号传感器作为测量系统中不可缺少的组成部分,它的性能直接影响到系统的整体效果.本课题研制的宽带脉冲电场测试系统,解决了极低频至1GHz以上的脉冲电场测试问题.为宽带脉冲电磁场的实验研究提供了一个重要的手段,对电磁防护的定量评价、理论计算的实验验证等都会有很大的帮助.

参 考 文 献

- [1] 刘尚合,武占成等. 静电放电及危害防护. 北京:北京邮电大学出版社,2004[Liu S H, Wu Z C *et al.* On Protection of ESD and Damages. Beijing: Beijing Univ. Post and Telecommunication Press, 2004(in Chinese)]
- [2] Masugi M, Murakawa K, Krwabara N *et al.* IEEE International Symposium on EMC. Anaheim, CA, USA, 1992, 361
- [3] Kozlowski A J, Barski M, Stuchly S S. Precision Electromagnetic Measurements. CPEM90 Ottawa, Ont., Canada. 1990, 420
- [4] Kozlowski A J, Barski M, Stuchly S S. 1989 IEEE National Symposium on EMC. Denver, CO, USA. 1989, 343
- [5] Karu P E, Stuchly S S. S. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1991, 39(11): 1587
- [6] Shen H M, King R W P, Wu T T. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1990, 38(1): 838
- [7] Wu T T, King R W P. IEEE Trans. On Antennas and Propagation, 1965(5) 369
- [8] 彭吉虎, 吴伯瑜. 光纤技术及应用. 北京: 北京理工大学出版社, 1995[Peng J H, Wu B Y. Technology and Application of Optical Fiber. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995(in Chinese)]
- [9] 朱长青. 脉冲电磁场测试理论与技术研究. 石家庄: 军械工程学院博士学位论文, 2005[Zhu C Q. A Research on Test & Measurement Theory and Technology of Pulsed Electromagnetic Fields. Shijiazhuang: Dissertation for the Doctoral Degree in Engineering of Ordnance Engineering College, 2005(in Chinese)]
- [10] Naghski D H, Boyd J T, Jackson H E *et al.* Journal of Light Wave Technology, 1994, 12(12): 1092
- [11] 谢彦召, 郑振兴, 焦杰. 传感器技术, 1999, 18(3) 5 [Xie Y Z, Zhen Z X, Jiao J. Journal of Transducer Technology, 1999, 18(3) 5(in Chinese)]

· 书评和书讯 ·

科学出版社物理类新书推荐

书 名	作(译)者	定价	出版日期	发行号
相互作用的规范理论	戴元本	估计 ¥65.00	2005年6月	0-2148
计算物理学	马文淦	¥37.00	2005年5月	0-2147
计算电磁学要论	盛新庆	¥32.00	2005年3月	0-1900
窄禁带半导体物理学	褚君浩	¥120.00	2005年5月	0-2093
计算声学——声场的方程和波	李太宝	¥38.00	2005年1月	0-2016
半导体量子器件物理	傅英, 陆卫	¥50.00	2005年1月	0-2004
磁层粒子动力学	徐荣兰	¥35.00	2005年1月	0-1961
现代声学理论基础	马大猷	¥48.00	2005年1月	0-1830
物理学家用微分几何(第二版)	侯伯元, 侯伯宇	¥98.00	2005年3月	0-1976
数学物理方程及其近似方法	程建春	¥58.00	2005年2月	0-1952
随机振动的虚拟激励法	林家浩, 张亚辉	¥45.00	2004年9月	0-1889
准晶物理学	王仁卉	¥45.00	2004年8月	0-1802
非平衡凝固新型金属材料	陈光, 傅恒志	¥42.00	2004年8月	0-2027
金属陶瓷薄膜及其在光电子技术中的应用	孙大明, 孙兆奇	¥56.00	2004年7月	0-1942
岩石力学	谢和平, 陈忠辉	¥54.00	2004年5月	0-1944

欢迎各界人士邮购科学出版社各类图书. 如果您有出版意向, 请和我们联系. 凡购书者均免邮费, 请按以下方式和我们联系:

电 话: 010-64017957 64033515 电子邮件: mlhukai@yahoo.com.cn 或 dpyan@cspg.net

通讯地址: 北京东黄城根北街16号 科学出版社 邮政编码: 100717 联系人: 胡凯 鄢德平

欢迎访问科学出版社网址 <http://www.sciencep.com>