

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905092

基于太赫兹波的高分辨率空间电荷测试方法及系统*

张颖¹, 李悠^{1,2}, 王暄¹

(1. 哈尔滨理工大学电介质工程国家重点实验室培育基地 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨电工仪表研究所 哈尔滨 150028)

摘要:空间电荷的特性及分布状态直接改变介质内部电场的强弱,严重影响器件的电学性能。近年来,纳米材料和微纳电子器件飞速发展,在纳米量级乃至更小尺度上探测和掌握空间电荷的特征信息成为亟待解决的问题。为此基于脉冲电声法基本原理,设计并实现了一种基于太赫兹波和弹光取样技术的空间电荷分布测试新方法。基于应力双折射效应原理,设计制作了弹光取样传感器,并测试了性能。搭建了空间电荷测试系统,对定制硅PN结试样进行了测试,空间电荷区宽度随偏置电压的变化规律与PN结基本电学特性吻合。该方法采用全光学技术手段,克服了传统电子测试技术对系统带宽的限制,实验结果表明,该测试方法可以有效且可靠地将空间电荷测试分辨率提升至纳米量级。

关键词:空间电荷;太赫兹波;分辨率;纳米量级;弹光取样传感器

中图分类号: TP212 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

High resolution space charge measurement method and system based on THz wave

Zhang Ying¹, Li You^{1,2}, Wang Xuan¹

(1. State Key Breeding Base of Dielectric Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. Harbin Research Institute of Electrical Instruments, Harbin 150028, China)

Abstract: The characteristic and distribution status of space charge directly changes the intensity and distribution of the electric field inside dielectric material and seriously affects the electric performance of electric device. In recent years, nano materials and micro-nano electric devices develop rapidly, detecting and grasping the characteristic information of space charge in nanoscale even smaller scale becomes a problem to be solved urgently. Based on the basic principle of pulsed electro-acoustic method is new space charge distribution test method was designed and implemented based on THz wave and elastic-optic sampling technology. Based on the stress-induced birefringence effect, the elastic-optic sampling sensor was designed and manufactured and its performances are tested. A space charge test system is built and used to test the custom silicon PN junction samples. The results show that the changing rule of space charge region width versus bias voltage is consistent well with the basic electrical characteristics. The method adopts the entire optical technical means, which breaks the limitation of traditional electronic test technology to system bandwidth. Experiment results show that the method designed in this paper can effectively and reliably improve the space charge test resolution to nanoscale.

Keywords: space charge; THz wave; resolution; nanoscale; elastic-optic sampling sensor

0 引言

异质界面的基本行为之一是电荷注入,即电子在材料交界处的一定尺度内发生转移,并在界面处形成一定的空间电荷区域。空间电荷的分布和特性显著影响材料

内的局部电场,直接改变局部电场的强弱和分布,致使材料和器件的击穿、老化等各方面电学性能下降,甚至会导致大型电力设备的运行可靠性降低^[1-3]。对空间电荷分布状态的探测一直重要而活跃的研究内容,经过半个多世纪的研究和探索,诞生了很多基于不同原理的测试方法,比如弹性波法、热波法、光电法和扫描探针法^[4-8]等,

收稿日期:2019-05-05 Received Date:2019-05-05

* 基金项目:国家自然科学基金(51575149)、哈尔滨市科技创新人才(2016RAQXJ025)项目资助

这些方法逐渐被各国研究人员熟知和利用,并广泛应用于科学研究及生产实践中。近年来,微纳电子器件、机电系统以及纳米材料的研究与应用不断深入,对于金属/电介质、半导体/电介质等复杂界面特性的探索成为研究的热点^[9-11]。然而,由于异质界面的空间尺度一般认为在几到几十纳米的数量级(金属/半导体界面尺度稍大),而目前缺乏在纳米尺度上对电荷分布及界面特性的有效研究方法,可靠实验数据的获取存在困难。

将空间电荷测试分辨率提升至纳米级,关键问题是测试系统的带宽必须达到太赫兹量级。而目前成熟的测试方法,大都基于电子测试技术进行,显然无法达到如此高的带宽。太赫兹波的频率在 10^{12} Hz数量级,在电磁波谱中刚好介于电磁波和光波之间^[12-16],太赫兹技术的快速发展与成熟应用为这一问题的解决提供了有力支持。

本文基于脉冲电声法基本原理,采用全光学手段,设计提出了一种基于太赫兹波和弹光取样技术的空间电荷分布测试新方法,即:以太赫兹波作为激励,以弹光取样技术完成响应信号的探测与接收,从而避免了电子测试技术对系统带宽的限制。该方法不仅能够实现对空间电荷分布的纳米级测试,而且对待测样品和测试环境没有任何特殊的限制和要求,并可以方便地与其它测试方法相结合,获得更多空间电荷的特征信息。

1 测试原理及分辨率提升方案

1.1 脉冲电声法基本原理

脉冲电声法属于弹性波类的测试方法,由于其结构简单、测试方便、易于操作、设备造价低廉等优点,备受世界各国科研人员青睐,已成为测试空间电荷最常用的方法之一^[17-21]。脉冲电声法基本原理如图1所示,对待测试样施加脉宽很窄的高压脉冲,在脉冲电场力的作用下,试样中的空间电荷受到扰动,激发出弹性波脉冲 $p(t)$,该弹性波脉冲 $p(t)$ 的幅值与空间电荷密度成正比,同时携带空间电荷的分布信息。用压电传感器接收弹性波脉冲 $p(t)$,并对采集到的信号进行分析和处理,可以获得试样中空间电荷的分布情况。脉冲电声法虽然具备良好的灵活性与适应性,但是测试分辨率和灵敏度对激发脉冲以及压力传感器性能依赖程度过高。

1.2 空间分辨率

空间分辨率是弹性波类测试方法中的固有概念,由Lord Rayleigh团队于1879年首次提出,也有部分学者称之为位置分辨率。如图2所示,最高空间分辨率可以等效成在时域上对两个半高宽为 τ 脉冲的分辨,当两个脉冲的中心相距为 τ 时称为恰能分辨。

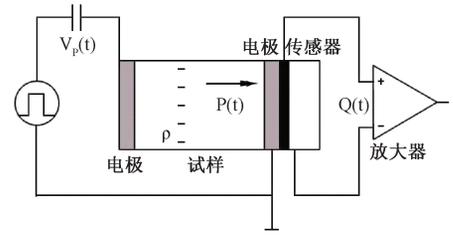


图1 脉冲电声法基本原理

Fig.1 Basic principle diagram of PEA method

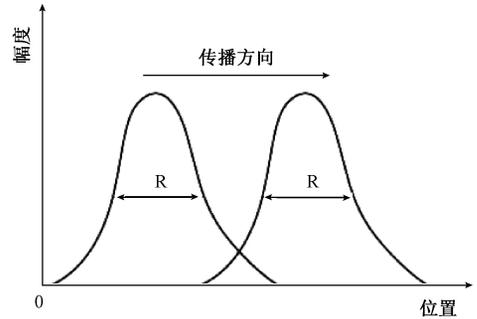


图2 空间分辨率示意图

Fig.2 Schematic diagram of space resolution

若 τ 代表脉冲的半高宽, v 代表弹性波在介质中的传播速度,则测试的空间分辨率 R 可表示如下:

$$R = v \cdot \tau = \frac{v}{2f_{\max}} \quad (1)$$

式中: f_{\max} 为测试系统的最大带宽。

1.3 改进方案

对于目前电气绝缘领域使用的典型材料聚乙烯而言,弹性波在其中的传播速度约为2 000 m/s。按照式(1)对空间分辨率的定义,若测试的分辨率达到1 nm,可以计算出测试的带宽大约需要 2×10^{12} Hz,即2 太赫兹 (THz),这是所有使用电子测试技术的空间电荷测试方法都无法达到的。

对脉冲电声法的改进方案如下:在激励端,用太赫兹波代替脉冲电压;在测量端,用弹光取样传感器代替压电传感器和电子放大器,即利用非线性光学材料构成的传感器接收携带电荷信息的弹性波。整个测试过程全部基于光学技术进行,从而避免了电子电路对系统带宽的限制。

1.4 光脉冲电场与空间电荷的作用

与高压脉冲电场相类似,光电场也会对空间电荷产生扰动。如图3所示。

样品厚度为 d ,空间电荷层密度为 ρ ,光电场沿 x 轴方向分量表示为 $E(x)$,则空间电荷层受到的应力大小可以表示为:

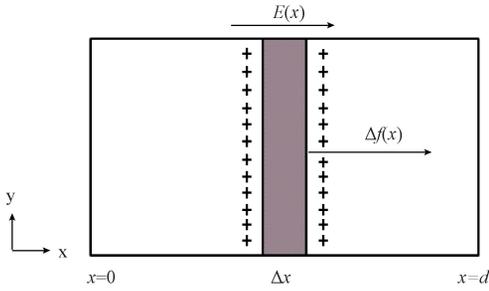


图 3 光电场与空间电荷作用示意

Fig.3 Schematic diagram of the interaction between photoelectric field and space charge

$$\Delta f(x) = \rho(x) \cdot \Delta x \cdot E(x) \quad (2)$$

如果弹性波在样品中的传播速度为 v , 则任意位置处的脉冲分量为:

$$\Delta p(x, t) = \frac{1}{2} \Delta f\left(x, t - \frac{x}{v}\right) = \frac{1}{2} \rho(x) \Delta x E\left(x, t - \frac{x}{v}\right) \quad (3)$$

样品内空间电荷密度可以表示为:

$$r(\tau) = \rho(v\tau) \quad (4)$$

式中: τ 为延迟时间。将式(4)带入式(3), 可得:

$$\Delta p(x, t) = \frac{1}{2} v r(\tau) \Delta \tau E(t - \tau) \quad (5)$$

弹性波含量可以表示为:

$$p(t) = \frac{1}{2} v \int_0^t r(\tau) E(t - \tau) dt \quad (6)$$

2 弹光取样传感器

2.1 传感器结构

弹光取样传感器为“三明治”结构, 如图 4 所示。制备方法如下:

将高反射铝膜均匀镀于衬底上。弹光材料 2,4-二硝基苯胺接枝咪唑聚磷腈充分溶解于四氢呋喃(THF)溶剂中, 混合溶液用滤纸(0.2 μm) 多次过滤, 充分去除未溶解的固体材料。利用旋涂机, 在镀有高反射铝膜一侧的衬底上均匀旋涂滤后溶液, 转速设置为 3 000 r/min, 时间设定为 30 s, 可制备厚度在 2 μm 左右的薄膜。极化处理, 用 ITO 玻璃盖板进行封装。

2.2 传感器工作原理

激发光脉冲于待测试样的一侧表面入射, 光电场矢量可以分解为两个分量, 如图 5 所示, 即: 与光入射面垂直的 s 分量与与光入射面平行的 p 分量。由于 s 分量垂直于激发光脉冲入射面, 因此光电场方向与待测试样表面平行, 对空间电荷不产生任何作用力。同理, p 分量平行于激发光脉冲入射面, 因此光电场方向与待测试样表

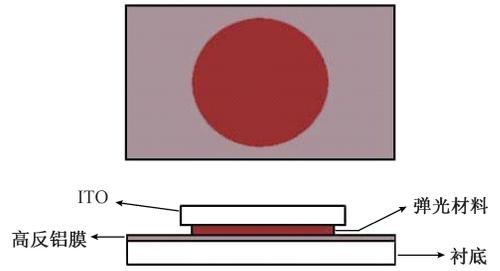


图 4 弹光取样传感器结构

Fig.4 Structure diagram of the elastic-optic sampling sensor

面垂直, 当激发光脉冲以一定角度入射到待测试样表面时, 可以产生与空间电荷层相垂直的光电场分量, 对空间电荷层产生作用力。若激发光脉冲入射角为 θ , 则当 $\theta=0$ 时, 光脉冲垂直表面入射, 光电场方向平行样品表面, 对空间电荷无扰动; 当 $\theta=90$ 时, 光电场分量垂直于样品表面, 此时的扰动达到理论最大值。事实上, 入射光平行于试样表面入射是无法实现的, 因此 θ 值设定于 0° 到 90° 之间。

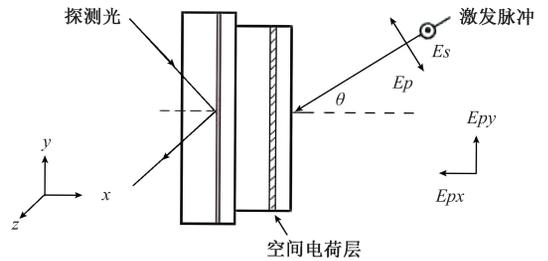


图 5 弹光取样传感器工作原理

Fig.5 Operation principle diagram of the elastic-optic sampling sensor

在待测试样表面处, p 分量可以进一步分解为两个分量, 即: 垂直于样品表面的分量 E_{px} 和平行于试样表面的分量 E_{py} 。通过前文分析可知, 对空间电荷起激发作用的是激发光脉冲的 p 分量, 为了避免额外光学效应的产生, 在激发光脉冲入射样品前加入格兰棱镜, 充分过滤掉 s 分量, 将激发光将变为只有 p 振动分量的线性偏振光。

2.3 应力检测试验

对弹光传感器进行应力检测试验, 如图 6 所示。

入射光透射传感器, 并透射四分之一波片后, 由沃拉斯顿棱镜分为两束, 分别投射到平衡探测器上。无外力作用时, 即: $F=0$, 调节四分之一波片, 使出射光变为圆偏振光, 此时由于两束光光强相同, 平衡探测器无信号输出; 对传感器施加连续外力, 即: $F=F_t$, 两束光光强变化, 平衡探测器有非零信号输出。

实验中, 对弹光传感器施加连续应力, 范围从 5 N~

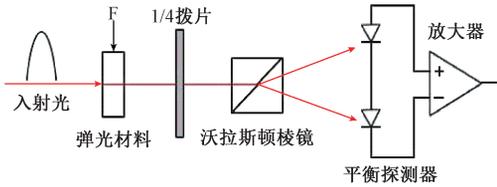


图6 应力检测实验原理

Fig.6 Experiment principle diagram of stress test

50 N, 分别记录信号输出, 可得外加应力与平衡探测器输出值是成正比关系, 如图7所示。

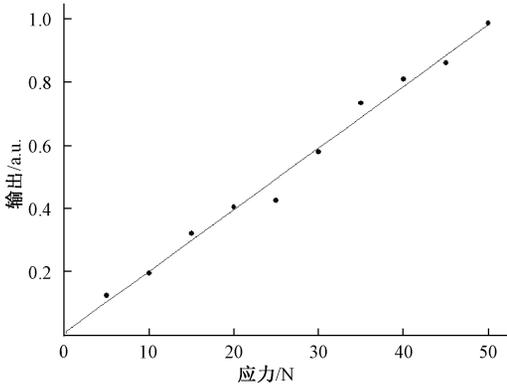


图7 平衡探测器输出值随外施应力变化关系

Fig.7 Changing relationship diagram between the balance detector output and external stress

3 空间电荷测试实验

3.1 系统构成及工作原理

如图8所示, 测试系统大体可分为2个单元, 即: 太赫兹波激发单元和弹光取样检测单元。

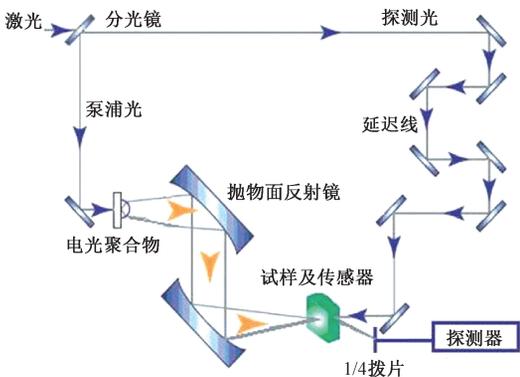


图8 测试系统工作原理

Fig.8 Operation principle diagram of the test system

基本工作过程描述如下: 用分光镜将偏振飞秒激光分成两束, 一束照射电光聚合物材料, 基于光整流效应激发出太赫兹波。经过反射镜组准直和聚焦后, 太赫兹波作为激发光脉冲照射待测试样中, 电场分量对空间电荷产生扰动作用, 从而激发出弹性波。弹性波在介质中传播, 被与待测试样紧密耦合的弹光传感器接收。在弹性波作用下, 传感器光学特性发生变化, 产生应力双折射效应。另一束光作为探测光, 经光学延迟线延迟一定时间后, 入射到弹光传感器的另一侧表面, 由于弹光传感器光学特性发生变化, 线偏振的探测光入射传感器后偏振态将发生变化, 由四分之一波片和平衡检测器构成的检测单元可以对其进行检测和记录。实验中, 只需要调控步进电机, 就可以精确控制延迟时间, 分时地获取弹性波的时域信息, 将这些时域信息进行组合, 可以获得弹性波完整的时域波形。对时域波形加以分析和计算, 可以获得空间电荷的特征信息。

3.2 弹光取样测试过程

弹光取样过程与电光取样过程类似, 要利用延迟线, 通过对延迟时间的精确控制来实现。光学延迟线位移单位为 μm , 速度单位为 $\mu\text{m/s}$ 。调节步进电机, 精确控制采样时间间隔为 Δt , 若假设延迟线光程为 Δs 时, 则探测脉冲光程为 $2\Delta s$ 。若空气中光传播的速度为 c , 则采样时间间隔 Δt 可以表示为:

$$\Delta t = \frac{2\Delta s}{c} \tag{7}$$

如图9所示, 弹光取样测试过程可以描述如下: 从飞秒激光开始激发时刻起计时, 步进电机精确控制光学延迟线在一个扫描范围内进行扫描, 探测光脉冲对弹性波进行时分分辨取样, 有效取样点分布在弹性波脉冲的若干个周期内。用锁相放大器和斩波器构成检测单元, 接收平衡探测器输出的电信号, 获取弹性波的振幅和相位信息。将取样信息进行合成, 可以获得弹性波的完整时域波形。

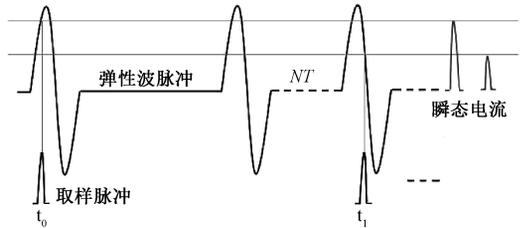


图9 弹光取样过程示意

Fig.9 Schematic diagram of elastic-optic sampling test process

3.3 测试结果及分析

待测试样为定制硅 PN 结, 出场参数为: 衬底为 n 型, 正向压降 0.7 V, 反向击穿电压 30 V, 额定电流 1 A,

复合区杂质浓度为 10^{14} cm^{-3} , 结深为 $0.5 \text{ }\mu\text{m}$, 平衡状态下耗尽层宽度理论值为 28.9 nm 。

测试结果如下:

在太赫兹电场分量的作用下,耗尽层中正、负电荷均将受到扰动,分别激发出弹性波。从被激发直到被传感器感,弹性波传播的路程差即为耗尽层宽度。图 10 为 PN 结处于平衡状态下的测试结果,将正电荷激发出的弹性波记为 $p_1(t)$, 负电荷激发出的弹性波记为 $p_2(t)$, 由图可知, $p_1(t)$ 与 $p_2(t)$ 出现的时间间隔 Δt 为 5.1 ps , 弹性波在硅材料中的传播速度为 5760 m/s , 计算可知此时空间电荷区宽度为 29.3 nm 。与标准参数 28.9 nm 相比,测量误差为 1.2% 。同理,图 11 为 PN 结反向偏置电压为 -5 V 时测试结果, $p_1(t)$ 与 $p_2(t)$ 出现的时间间隔 Δt 为 10.8 ps , 此时空间电荷区宽度为 62.2 nm 。图 12 为 PN 正向偏置电压为 0.5 V 时测试结果, $p_1(t)$ 与 $p_2(t)$ 出现的时间间隔 Δt 为 2.1 ps , 此时空间电荷区宽度为 12.1 nm 。

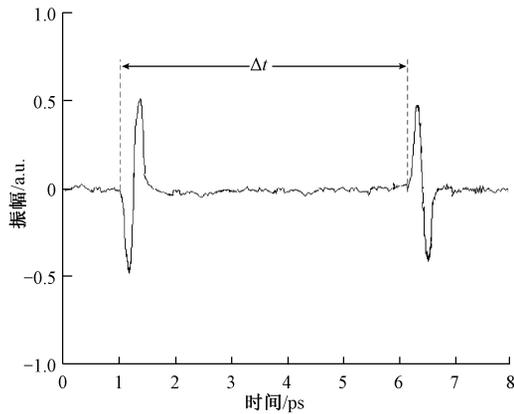


图 10 平衡状态下测试结果

Fig.10 The test result under equilibrium condition

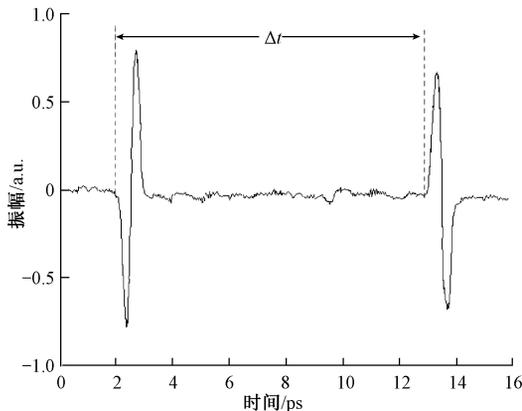


图 11 反向偏置电压为 -5 V 时测试结果

Fig.11 The testing result for the reverse bias voltage of -5 V

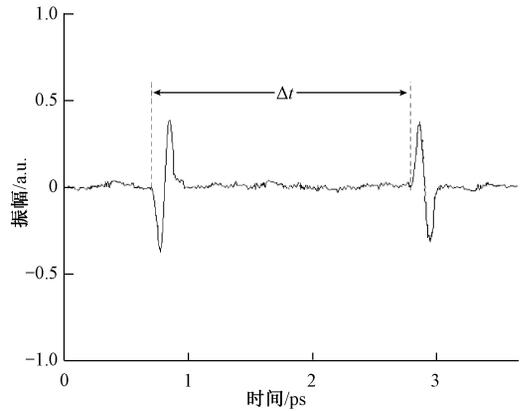


图 12 正向偏置电压为 0.5 V 时测试结果

Fig.12 The test result for the forward bias voltage of 0.5 V

从上述测试结果中可以发现共同点,相同测试条件下,相邻波形的幅值有微小减弱。在时域上,相邻波形出现微小展宽,造成这种现象的主要原因是弹性波在介质中传播时出现了不同程度衰减。此外,太赫兹波的强度、入射角度、空间电荷密度等因素均与输出波形的幅值相关。

空间电荷区宽度随偏置电压的变化关系如图 13 所示。由图可知,空间电荷区宽度随反向偏置电压的增大而变大,随着正向偏置电压的增大而变小。当正偏电压为 0.65 V 时,空间电荷区宽度达最小值 9 nm , 此后继续增大正向偏置电压电压,空间电荷区宽度保持不变,变化规律与 PN 结基本电学特性吻合。

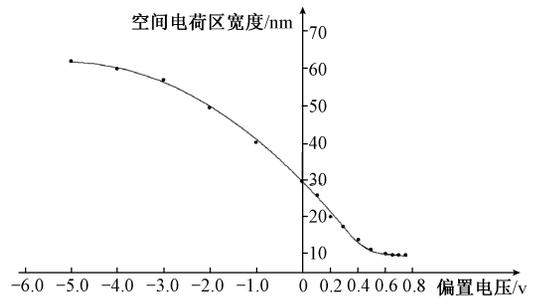


图 13 空间电荷区宽度与偏置电压的关系

Fig.13 Relationship between the space charge region width and bias voltage

4 结 论

本文基于脉冲电声法的基本原理,设计实现了一种基于太赫兹波和弹光取样技术的空间电荷分布测试新方法。该方法采用全光学技术手段,克服了传统电子测试

技术对系统带宽的限制,成功将空间电荷测试分辨率提升至纳米级。基于应力双折射效应的基本原理,设计制作了具有“三明治”结构的弹光传感器。应力检测实验结果表明,传感器具有较高的灵敏度及应用灵活性,可以在不改变结构的前提下,实现对弹光材料薄膜的加压极化。传感器稳定性良好,在连续工作 1 年之后,各项性能未发生明显变化。搭建了测试系统,并对定制硅 PN 结试样进行了测试,当 PN 结处于平衡状态下,空间电荷区宽度为 29.3 nm,相比于出厂标准参数 28.9 nm,测量误差为 1.2%。得到了空间电荷区在正向偏置电压、反向偏置电压分别作用时,宽度随偏置电压的变化曲线。当正偏电压为 0.65 V 时,空间电荷区宽度达最小值 9 nm,变化规律与 PN 结基本电学特性吻合。实验结果表明,该测试方法可以有效地将空间电荷测试分辨率提升至纳米级,在界面结构以及界面态的精细研究领域中具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 郭佳,雷勇,周凯,等. 用于 HVDC 电缆主绝缘料选型的空间电荷检测系统 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 213-219.
GUO J, LEI Y, ZHOU K, et al. Space charge detection system of the main insulation materials selection for HVDC cable. [J]. Chinese Journal of Science and Instrument, 2018, 39(4): 213-219.
- [2] DAGHER Z G, HOLE. A preliminary study of space charge distribution measurements at nanometer spatial resolution [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(5): 1036-1041.
- [3] LIU M N, YANG Q, WU S. Space charge injection behaviors and dielectric characteristics of nano-modified transformer oil using different surface condition electrodes. [J]. AIP Advances, 2019, 9(3): 035319.
- [4] MEZIAN M, MEKHALDI A, TEGUAR M. Effect of space charge layers on the electric field enhancement at the physical interfaces in power cable insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(6): 3725-3733.
- [5] MONTANARI G C. Dielectric material properties investigated through space charge measurements [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(1): 56-64.
- [6] LI P, KANG J, RUAN L. A study of space charge measurement [J]. Journal of Electrostatics, 2014, 72(6): 457-461.
- [7] HOLE S. Behind space charge distribution measurements [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(4): 1208-1214.
- [8] ROGTI F. Space charge behavior and its modified electric field in the cross-linked polyethylene under applied voltage DC and different temperatures [J]. Journal of electrostatics 2013, 71(6): 1046-1054.
- [9] 刘杰,陈全芳. 电容式微机械超声传感器的工艺综述 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 98-109.
LIU J, CHEN Q F. Overview of manufacturing technologies of capacitive micromachined ultrasonic transducer. [J]. Chinese Journal of Science and Instrument, 2018, 39(8): 98-109.
- [10] CHEN W, WU Y, LIU J. Hybrid interfacial layer leads to solid performance improvement of inverted perovskite solar cells [J]. Energy and Environment Science, 2015, 8(2): 629-640.
- [11] 兰莉,吴建东,王雅妮,等. 低密度聚乙烯/乙丙橡胶双层介质的界面空间电荷特性 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1266-1272.
LAN L, WU J D, WANG Y N, et al. Electro-optic polymer sensor with coplanar electrodes structure for THz application [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1266-1272.
- [12] 张颖,李悠. 面向太赫兹应用的平面结构聚合物电光传感器 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1226-1231.
ZHANG Y, LI Y. Electro-optic polymer sensor with coplanar electrodes structure for THz application [J]. Chinese Journal of Science and Instrument, 2017, 38(5): 1226-1231.
- [13] 潘学文,赵永红,刘元明. 基于太赫兹光谱和超香肠神经网络的转基因甜菜的无损鉴别 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(12): 93-98.
PAN X W, ZHAO Y H, LIU Y M. Nondestructive identification of transgenic sugar beet based on terahertz spectroscopy and hyper sausage neuron [J]. Journal of electronic measurement and instrumentation, 2018, 32(12): 93-98.
- [14] CORZO-GARCIA S C, ALFARO M E. Transit time enhanced bandwidth in nanostructured terahertz emitters [J]. Journal of infrared millimeter and terahertz waves, 2014, 35(12): 987-992.
- [15] 赵国忠,申彦春,刘影. 太赫兹技术在军事和安全领域的应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(8):

1097-1101.

ZHAO G ZH, SHEN Y CH, LIU Y. Application of terahertz technology in military and security field [J]. Journal of electronic measurement and instrumentation, 2015, 29(8): 1097-1101.

- [16] 杨洋, 姚建铨, 王力, 等. 基于太赫兹目标散射特性测试系统的设计与应用 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 975-980.

YANG Y, YAO J Q, WANG L, et al. Design and application of the test system based on terahertz target scattering characteristics [J]. Chinese Journal of Science and Instrument, 2013, 34(5): 975-980.

- [17] FUKUNAGA K. Innovative PEA space charge measurement systems for industrial application [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2004, 20(2): 18-26.

- [18] ARNAOUT M, PAULMIER T, DIRASSEN B. Non-contact in-situ pulsed electro acoustic method for the analysis of charge transport in irradiated space-used polymers [J]. Journal of electrostatics, 2015, 77: 123-129.

- [19] 田冀焕, 邹军, 袁建生, 等. 应用改进脉冲电声法的空间电荷波形恢复技术 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 113-117.

TIAN J H, ZHOU J, YUAN J SH. An improved technique for the space charge distribution recovery on the basis of the PEA measurement [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 113-117.

- [20] WANG X, CHEN C, CHENG C H, et.al. Space charge characteristics in 160 kV DC XLPE cable under temperature gradient [J]. IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, 2018, 25(6): 2366-2374.

- [21] WANG Y, HAO M E, XU Z. Experimental demonstration of deep traps in silica-based polyethylene nanocomposites by combined isothermal surface potential decay and pulsed electro-acoustic measurements [J]. Applied physics letters, 2018, 113(2): 022904.

作者简介



张颖(通信作者), 2004年于哈尔滨理工大学获得学士学位, 2007年于哈尔滨理工大学获得硕士学位, 2015年于黑龙江大学获得博士学位, 现为哈尔滨理工大学副教授, 主要研究方向为功能材料与器件。

E-mail: zhangying20151221@163.com

Zhang Ying (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Harbin University of Science and Technology (HUST) in 2004 and 2007, respectively, and received his Ph. D. degree from Heilongjiang University in 2015. Now, he is an associate professor in HUST. His main research interest includes functional materials and devices.



李悠, 2010年于哈尔滨理工大学获得学士学位, 2017年于哈尔滨理工大学获得硕士学位, 现为哈尔滨电工仪表研究所工程师, 哈尔滨理工大学在读博士研究生, 主要研究方向为材料电性能分析与检测。

E-mail: waterunderbridge@163.com

Li You received her B. Sc. and M. Sc. degrees both from Harbin University of Science and Technology (HUST) in 2010 and 2017, respectively. Now, she is an engineer in Harbin Research Institute of Electrical Instruments and a Ph. D. student in HUST. Her main research interest includes material electrical property analysis and test.



王暄, 1984年于黑龙江大学获得学士学位, 1988年于哈尔滨电工学院获得硕士学位, 1999年于西安交通大学获得博士学位, 现为哈尔滨理工大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为功能材料与器件。

E-mail: bush_z@163.com

Wang Xuan received his B. Sc. degree from Heilongjiang University in 1984, M. Sc. degree from Harbin Institute of Electrical Engineering in 1988 and Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1999. Now, he is a professor and Ph. D. supervisor in Harbin University of Science and Technology. His main research interest includes functional materials and devices.