

固体电介质空间电荷的光电子学测量方法研究进展

王健¹, 李庆民¹, 任瀚文¹, 李承前¹, 高浩予¹, 刘涛²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京 102206;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 为适应直流和电力电子装备中高频绝缘与纳米绝缘材料的电荷测试需求, 研究固体电介质空间电荷的高分辨率快速测量方法已成为该领域的重要发展方向。本文首先分析了影响空间电荷测量分辨率和跟踪速度的关键因素, 并综述了当前流行的非光学测量方法的研究现状及应用局限性, 进一步对采用光学元件作为激励源的激光诱导压力波法、激光光强调制法和基于 Pockels 效应的新型测量方法的相关研究进展进行了梳理和评述, 最后归纳出研制高时空分辨率空间电荷测量系统所面临的技术挑战。分析指出, 非光学测量方法受限于测量信噪比和自身系统特性, 难以完全满足高频和脉冲电应力下快速响应和高分辨率的测量要求, 而基于光电子学的测量方法具有高信噪比和高系统带宽等特点, 为发展纳米级分辨率的电荷快速测量方法提供了潜在技术途径, 但仍需开展更深入的研究工作。

关键词: 空间电荷; 光电子学; 高频绝缘; 纳米绝缘

DOI: 10.12067/ATEEE1908033

文章编号: 1003-3076(2020)03-0055-12

中图分类号: TM85

1 引言

随着直流输、配电系统和微电网的不断发展, 电力电子化的大型交-直流电网柔性互联与智能配电已成为未来电网的主要发展形态^[1,2]。为适应电力网络的快速更新, 大功率电力电子装备面临向大容量化、紧凑型和高电压等级的发展需求^[3]。装备的绝缘系统是支撑整个装备设计的基础, 相对于传统电力装备, 大功率电力电子装备绝缘除承受一般的交、直流应力外, 还要经受高频类正弦波和瞬态 PWM 开关脉冲等强场特殊电应力的作用, 运行条件更加恶劣^[4], 因此绝缘系统的设计面临严峻的挑战。为提高绝缘设计中绝缘材料的各项基本性能, 纳米修饰已成为绝缘材料性能提升的重要技术手段^[5]。合理评估传统绝缘材料与改性绝缘材料在特殊电应力下的本征特性, 已成为电力电子装备绝缘设计的重要基础之一。

作为影响绝缘介质内部电场分布与表征绝缘介

电性能和老化状态的重要因素, 绝缘材料空间电荷的研究已受到国内外学者的广泛关注。介质内部电荷的大量积聚会导致绝缘内部最大畸变电场远高于平均电场, 容易引起严重影响介质性能的材料电树枝发展和击穿等现象^[6]。当前对空间电荷的研究依赖于电荷的准确测量技术。随着近三十年来无损测量技术的发展, 已形成了相对成熟的研究手段, 主要包括电声脉冲法 (PEA)、压力波法与热学方法等; 此外, 近年来也出现了一些基于光学效应与频域激励原理的新型测试方法。

现有空间电荷的测量方法多针对直流和工频交流等测试极化条件, 而针对高频与脉冲等复杂电应力下的电荷测量则研究很少, 这主要与这些极化条件的特殊性有关。除需要考虑特殊应力对测量装备本身的影响外, 复杂应力对测量技术的性能实际上也提出了更高的要求。已有研究中, 直流或工频条件下空间电荷的测量通常只考虑长时极化条件下电荷积聚现象的变化规律^[7]。当测量系统的测试速

收稿日期: 2019-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51929701; 51737005; 51477051)、中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2019QN113)、国家留学基金资助项目

作者简介: 王健 (1985-), 男, 山东籍, 讲师, 博士, 研究方向为 GIL 绝缘监测与机械承载;

李庆民 (1968-), 男, 山东籍, 教授, 博导, 研究方向为高电压与绝缘技术、放电物理 (通讯作者)。

度有所提高时,可以发现低速测量系统无法捕捉到的电荷快速通过现象^[8,9]。而当面对频率为数千赫兹甚至几十千赫兹的高频或脉冲等特殊电应力时,现有测量技术并不能达到与应力频率相匹配的实时测量速度,这一问题严重限制了测量技术在这些领域的发展与应用。

此外,相对于直流极化条件下的测量结果,交流极化过程存在的极性反转情况也会造成绝缘内部电场更严重的畸变^[10]。针对千赫兹频率交流极化条件下的电荷仿真现象表明,高频交流下的空间电荷可能主要集中在被测绝缘材料的两侧电极附近^[11],这就要求测量系统的空间分辨率必须足够高,以保证电荷的有效测量。现有测量手段多以微米尺度的空间分辨率观测电荷现象,则临近绝缘两个界面处的空间电荷信息往往被界面处大量的面感应电荷所掩盖,难以适应高频应力下的空间电荷测试要求。针对改性材料中电荷现象的观测,有学者分析指出,测量系统的空间分辨率决定了测量结果能否展现试样中掺杂粒子对电荷分布的影响^[12-14],因此,针对纳米改性与掺杂对材料电荷分布影响的研究,也需要研制纳米级的高分辨率电荷测量系统。

在目前已有的空间电荷测量技术中,基于非激光激励的非光学测量方法尽管发展得相对成熟,但都存在测量信噪比低、激励手段与探测系统受限等问题,导致测量时间相对较长,且空间分辨率较低。而以激光为激励的光电子学测量方法,则表现出高测试速度和纳米级空间分辨率的潜在优势。鉴于此,本文在综述传统非光学测量方法的基础上,重点梳理了基于激光激励的空间电荷测量方法及其进展,并指出未来研究所面临的技术挑战。

2 空间电荷测量技术的关键性能指标

空间电荷测量方法的关键性能指标主要包括灵敏度、空间分辨率和测试速度等。灵敏度指输出信号的幅值,与激励幅值、激励宽度及传感器的厚度有关,一般选择幅值较高的激励来获得幅值合适的测试结果。

不同方法的测试分辨率与激励类型有关,对于电声脉冲法和压力波法,测量系统的空间分辨率 R 由被测试样中的声速 v 和脉冲激励的半峰值时间 τ 所决定,如式(1)所示^[15]。空间电荷测量手段获得的结果实际上都表征空间分辨率范围以内的净电荷量分布。

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

式中, f_{\max} 为测量系统的带宽。

对于热学方法,测量的分辨率主要由材料的扩散率 D 和扩散时间 t 所决定,如式(2)所示^[15]。

$$R = 2.35 \sqrt{Dt} = 2.35 \sqrt{\frac{D}{2f_{\max}}} \quad (2)$$

由于固体试样中的声速和扩散率均有一定的上限,测量系统的分辨率主要由其带宽所决定。要实现纳米尺度空间分辨率的测量目标,就要求测量系统的带宽达到太赫兹级别^[16]。

对于现有发展较为成熟的测量方法,通常在一次激励作用下能够获得一个完整的表征电荷分布的测试波形。但由于多数方法测量结果的随机噪声较大,必须采用多次测试取平均的方法来提高测量信号的信噪比,因此,测量系统的测试速度由获得一次测量结果的时间 t_m 以及获得光滑测试波形所需的平均次数 N_a 所决定,如式(3)所示^[17]。

$$T_m = t_m N_a \quad (3)$$

式中, T_m 为获得一次高信噪比测量结果所需的总时间。

由此,要发展实时快速的电荷测量手段,不仅需要保证激励源的高输出频率,还希望测量结果能够具有较高的信噪比以减少测试所需的平均次数。

针对上述问题,基于光电子学的空间电荷测量方法可提供有效的技术途径。作为激励使用的激光功率较高,测量结果中随机噪声相对很小。当所选设备的灵敏度合适时,测试信号往往具有较高的信噪比,不需要对测量结果进行平均就能得到良好的测试波形^[18],因此,该类方法具有提高测试速度的潜力。结合飞秒激光激励与高带宽传感器的使用,可使得测量系统的分辨率达到纳米尺度^[15],因而发展前景较好。由此,本文后续将重点梳理现有光电子学测量方法的研究进展。

3 非光学方法研究进展及其局限性

相对于基于光电子学的空间电荷测量方法,非光学方法的测量系统搭建成本较低,相对发展得更为成熟。其中,压力波法除了以激光脉冲为激励手段的激光诱导压力波法(LIPP)外,还有采用压电传感器产生激励的压电压力波法(PIPWP)。热学方法除了激光光强调制法(LIMM)外,还包括热脉冲法(TPM)和热阶跃法(TSM)等。

电声脉冲法的测量原理如图 1 所示。测量用电脉冲激励和极化电压可以同步施加于所测试样上。电脉冲使积聚在介质表面和内部的空间电荷发生微小位移,进而产生幅度与电荷量呈正比的压力波。压力波经下电极传播到达压电传感器后转化为电信号,再经低噪放大器放大后可记录为最终的测量信号^[17]。

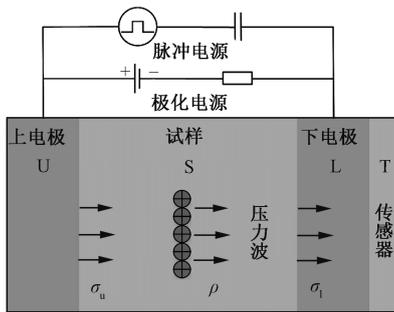


图 1 PEA 法的测量原理

Fig.1 Measurement principle of PEA method

作为当前发展最为成熟的电荷测量方法,PEA 方法无论在测试传感还是电荷恢复方面都在不断改进,且已经形成相应的 IEC 标准^[19]。自 PEA 方法提出以来,主要在测量维度^[20-22]、电缆本体^[23,24]、分辨率和测试速度等方面不断发展。其中,在多维测量方面,主要依靠多传感器、移动试样或传感器等方式来实现。针对电缆本体的研究,不仅需要考虑轴状电缆本体形状,还需考虑激励脉冲注入方式、同轴电缆温度梯度导致的信号畸变等问题。在测试分辨率方面,由于 PEA 方法的分辨率由激励脉冲宽度与传感器厚度所决定,文献^[25]通过采用 0.6ns 脉宽的脉冲源和 1 μm 厚的 PVDF 传感器,使系统分辨率达到了 1.6 μm 。在测量速度方面,PEA 方法一般需要对连续测量的 100~1000 组数据进行平均来获得一组电荷分布结果。为提高测量速度,Fukuma 和 Matsui 等学者分别将激励源的输出时间提高到 10 μs 和 20 μs 间隔^[26,27]。上海交通大学的尹毅教授研制了电荷快速测量用的脉冲电源,可输出频率为 3kHz 的脉冲群^[28]。由此,现有 PEA 测量系统能够达到的最高测量重复频率为 3kHz。

基于 PEA 方法的测量系统也已推广应用于工频交流下的试样测量中^[29],相比于直流极化条件,工频交流下需要针对性的相位匹配方法^[30]或后处理技术^[31]来实现不同相位下的电荷现象捕捉。此外,PEA 方法还被用于与热刺激电流^[32]、电导电流^[33]、场致发光^[34]、局部放电^[35]的联合测量中,也

有研究提出无接触上电极形式的 PEA 系统,用于同步测量空间电荷与表面电荷^[36]。相对于其他测量方法,PEA 方法测量原理简单,测量系统容易搭建且极化电路与测量电路没有直接的电接触,测试信号的恢复方法也不太复杂,因而已发展成最常用的空间电荷测量方法。

但是,PEA 测量技术也存在一定的局限性。首先是测试分辨率方面,文献^[25]中所采用的设备几乎已达到现有技术的极限,因而以 PEA 技术实现纳米级分辨率测量的难度很大。其次,由于测量本身的信噪比很低,大量的平均次数极大地限制了该方法向快速在线测量发展的可能性。

对于 PIPWP 方法,其与同属压力波法的 LIPP 方法的区别仅在于产生激励的方法不同。PIPWP 方法的优势在于不需要昂贵的激光器,但也需要多次重复测量和平均技术来提高信噪比,因此该方法的测试速度也有所限制。与 PEA 方法相比,PIPWP 方法尽管在试样三维测量的水平方向上表现出更高的空间分辨率^[37],但方法本身并没有突出的优势,且可测量的介质厚度相对其他方法更为有限^[38],还包含 LIPP 方法相同的易损坏信号电路等问题,因而该方法并没有像 PEA 方法一样得到广泛应用。此外,PIPWP 测量系统还缺乏用于产生压力波的性能良好的传感器,因此其运用也有所限制,但 PIPWP 方法在低温环境中的测量结果更为理想^[39]。

热学方法中三种测量原理的区别也主要体现在施加激励的形式上。其中,TPM 方法所测量的信号是与电荷和极化分布相关的电压响应,而 TSM 方法的测量信号为电流响应。由于温度的作用速度缓慢,热学方法测量时所需的时间相对其他方法更加漫长,这一点在 TSM 方法上体现得更为明显^[40]。由于测量过程中试样的温度分布难以直接测量,热学方法都存在恢复方法复杂和恢复精度较低等问题。针对 TPM 方法,测量信号的反卷积过程需要考虑许多变量,有学者提出在试样两侧施加激励获得测量数据并进行恢复处理^[41]。同样,采用傅里叶形式的反卷积技术也需要运用到 TSM 方法的恢复中^[42],并且也需要考虑辐射装置与试样的热接触导致的电流衰减与延迟等^[43]。

除了上述问题外,热学方法测试过程中,由于热扩散过程的严重衰减色散,通常只在热扩散初始位置表现出较高的测试分辨率,这一点将在后续 LMM 方法的综述中进行详述。

此外,近几年也有学者提出了以在频域内具有正弦特征的信号作为测量激励的电声反射法(EAR),测量系统组成如图2所示^[44,45]。相对于传统方法中复杂的电路设计,该测量手段主要依赖于其中用于产生激励和接收信号的网路分析器。当试样中积聚电荷时,设备发出的激励信号的部分能量会转换为电荷产生弹性波时所需的能量,对损失能量的共振信号进行傅里叶反变换,可得到表征试样内部各个位置的电荷信号结果。

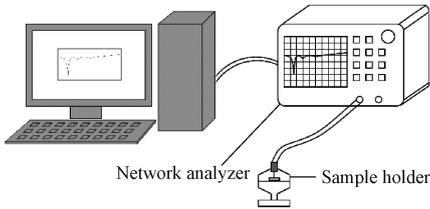


图2 EAR方法的测量系统^[44,45]

Fig.2 Measurement system of EAR method^[44,45]

该测量方法的优势在于测量结果有较高的空间分辨率,文献[44,45]对PVDF试样的测量分辨率已达到 $1.6\mu\text{m}$,并且通过提高激励质量可实现更高分辨率的分辨率测量。但是,由于测量结果本身信噪比不高,该测量方法需要连续输出多个激励来达到类似时域内“数据平均”的效果,因此测量速度与上述传统声波类测量方法的速度一致,难以用于快速电荷的可靠追踪。此外,除了测量方法中尚未有完善的波形恢复手段外,测量过程中的信号传播机制与能量转换机理仍不清晰。更重要的是,虽然EAR测量系统容易搭建,但也难以解决极化的同步施加问题,这就极大限制了该方法对瞬变极化状态下空间电荷的在线测量研究。

4 基于光电子学原理的空间电荷测量方法

基于光电子学的电荷测量方法通常采用激光脉冲源产生需要的激励或探测信号,现有发展较为完善的方法包括LIPP方法和LIMM方法等,并且也有学者基于光电效应中的Pockels效应,利用飞秒激光光源和弹光取样传感器对纳米尺度分辨率的电荷测量进行了初步探索。

4.1 激光诱导压力波法

LIPP方法的基本原理如图3所示。利用激光照射靶材料使材料消散并产生前沿陡峭的压力波,压力波穿过试样并扰动试样内部的空间电荷,进而导致材料的介电常数发生变化。测试由介电常数变

化影响的外电路电流,以此表征介质中的空间电荷分布^[46]。

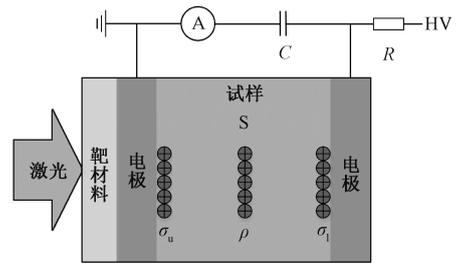


图3 LIPP方法的基本原理

Fig.3 Basic principle of LIPP method

采用LIPP方法进行测量时,虽然用于产生压力波的激光源的种类较多,但测试的效果基本相同^[47-49]。另外,搭建测量系统时为减少阻抗不匹配引起的反射信号,通常要求试样与信号输出端、信号输出端与保护电路、保护电路与放大器之间的线缆长度等都小于 0.5m ^[50]。LIPP方法由于以极高功率激光为激励,测试得到的有效信号幅值往往远高于传统PEA测试方法,测试随机噪声幅值相对较低,测试信噪比很高,几乎不需要采用平均技术进行处理,因而在测试速度上具有一定的优势,并且测试不受温度限制。相对于其他测量方法,LIPP方法不需要反卷积处理,恢复方法相对简单^[51]。也有研究指出,该方法由于作为激励使用的压力波的频率较低,其在传播过程中的衰减较小,因此可以忽略压力波的衰减影响,由此,该方法测得的结果可直接用于平板试样空间电荷分布的分析中^[52]。

现有对LIPP方法的研究主要集中在靶材料的选择以及模型电缆的测量上。选择靶材料时,不仅需要顾及材料在激光脉冲下的寿命,还需考虑压力波在靶材料中传播时的衰减过程以及在材料界面处的信号反射影响。由于传统的半导体材料在激光作用下的寿命较低,有研究提出采用铝电极^[53]或油墨^[54]作为靶材料,且油墨作为靶材料时测量得到的电荷信号表现出很高的灵敏度。相对于薄膜测量材料,LIPP方法运用于模型电缆的测量时,需要考虑电缆中电场分布的不均匀性以及压力波激励在传播过程中的变化等^[55]。施加于同轴电缆上的电压会使其内部电场由外径向内径逐渐增加,且由电缆外层产生的压力波向内部传播时会发生压力波的聚焦效应^[56]。针对上述问题,国内同济大学的张冶文等学者基于理论推导指出电缆中的测量信号并非像平板试样中的信号一样正比于空间电荷分布,并提出

了电流测试信号的修正方法^[57]。此外,LIPP方法也被应用于电子束辐射后的绝缘材料空间电荷的测量^[58]。

随着LIPP方法的不断完善,基于该方法的测量技术已形成IEC标准并逐步推广应用^[59]。现有LIPP系统可以测量的试样厚度能在 $50\mu\text{m}\sim 20\text{mm}$ 间选择^[53],当采用飞秒激光器作为激励源时,测量系统的最佳分辨率已能达到 $0.1\mu\text{m}$ 左右,但受限于激光导致电极形变的机械限制^[60],LIPP方法的测试分辨率难以进一步提高。

此外,LIPP方法本身也有一定的局限性。LIPP测量系统中,测量电路与极化电路仅通过隔直电容相连,因此存在潜在的设备损坏风险和操作安全风险,且电容的屏蔽情况也会直接影响测量结果的精确程度,因此在试样发生电晕和击穿过程时的空间电荷积聚研究方面也有所限制,这也是所有基于压力波法的测量系统使用时的局限性^[61]。此外,LIPP方法对接收激光信号的靶材料也有一定的破坏性。

4.2 激光光强调制法

LIMM方法属于热学方法中的一种,其基本原理如图4所示。将频率可调的激光照射到试样表面使之瞬间产生较高的热量,检测由非均匀分布的热扩散导致的介质热电流变化并进行恢复分析,进而得到试样中的空间电荷分布^[62]。

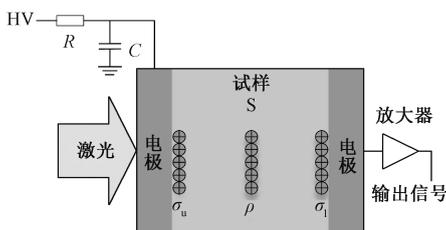


图4 LIMM方法的基本原理

Fig.4 Basic principle of LIMM method

LIMM方法由于热扩散过程中的衰减与色散等,其测量结果通常只在临近照射电极附近有较高的空间分辨率和灵敏度,且两种性能随热扩散距离的增加会有非常明显的下降,因此LIMM方法一般仅用于几十微米厚度的试样测试中^[63]。同时,基于热扩散过程的测量方法,不能像电声脉冲法和压力波法一样依据激励传播过程中的空间-时间对应关系直接计算空间电荷分布,且测量得到的热电流与空间电荷调制的变化电场的关系复杂,因此其测量结果的恢复过程相对其他方法复杂得多^[63,64]。

基于LIMM方法的典型测量结果如图5所示^[65]。通常,基于其他激励类型的测试方法获得的结果中,在介质两侧界面处都会存在明显的电荷波峰,但根据图5,LIMM方法得到的测量波形仅在左侧电极附近有明显的电荷积聚,即意味着热学方法与其他方法的测量结果存在较为明显的差异。其原因可能是热学方法测量分辨率随距离增大严重降低,最终使测量结果与高分辨率结果相比差异明显。

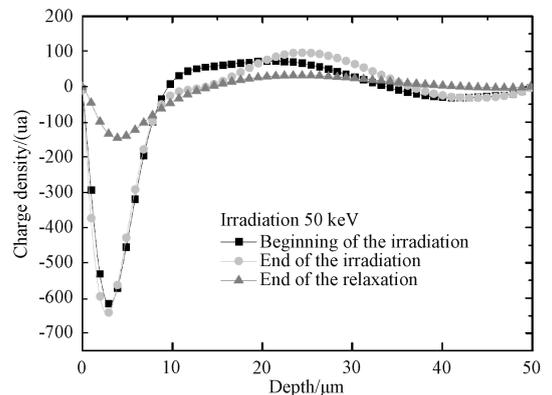


图5 基于LIMM方法的测试结果^[65]

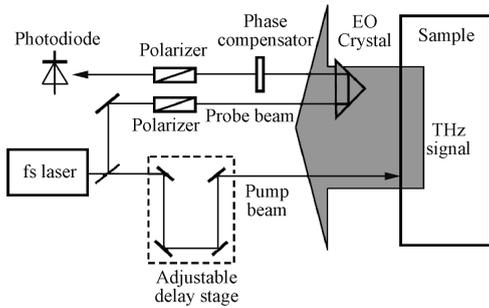
Fig.5 Measured results based on LIMM method^[65]

由于热学方法的复杂性且测量周期较长,该方法的应用并不像其他方法一样广泛。有学者基于LIMM方法的三维测量平台^[66,67],将该方法进一步推广应用于电极与试样无接触形式的测量^[68],这将有助于在同步施加电子辐射的条件下进行电荷测量。

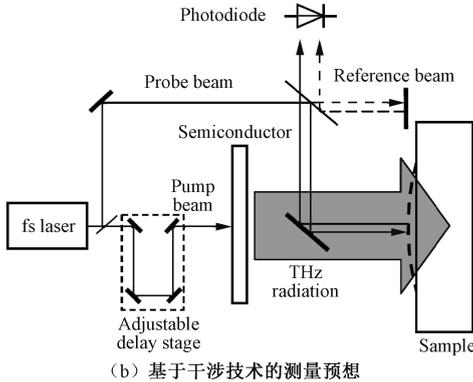
4.3 基于Pockels效应的光电子学测量方法

相对于基于Kerr效应的液体中的空间电荷测量与反演技术已发展数十年且日趋完善^[69,70],基于Pockels效应的固体中的空间电荷测量与恢复计算方法还有很大发展空间。虽然早在2004年Y. Tanaka就提出了基于Pockels效应的固体绝缘空间电荷测量方法^[71],但并没有引起学者们的广泛重视。

随后,由S. Hole等学者于2006年提出了纳米级分辨率测量系统的预想^[72]。一种方法是将热学方法与压力波法测量原理进行推广,如图6(a)所示,由太赫兹激光脉冲系统在试样表面产生激励作用并扰动介质电荷产生变化的电磁场,基于Pockels效应检测电磁场导致的探测光折射变化,以此分析空间电荷的具体分布。另一种方法提出了结合电声脉冲基本原理的纳米分辨率空间电荷测量系统,主要采用干涉技术,原理如图6(b)所示。



(a) 基于Pockels效应的测量预想



(b) 基于干涉技术的测量预想

图 6 纳米级分辨率空间电荷分布测量技术的预想^[72]

Fig.6 Prefigure of measurement technology with nano resolution for space charge^[72]

基于图 6(a) 中的测量原理,文献[15]对测量方法进行了改进,如图 7 所示。由飞秒激光器发出激励光产生的太赫兹波,与试样中的空间电荷相互作用产生弹性波并由传感器接收。而探测光照射到传感器后偏振状态发生变化,根据该变化分析试样中的空间电荷分布。

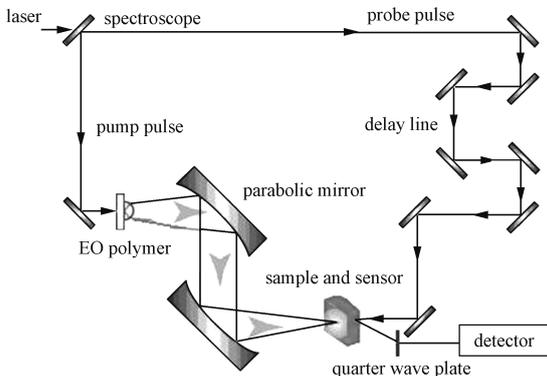


图 7 基于 Pockels 效应的测量系统^[15]

Fig.7 Measurement system based on Pockels effect^[15]

基于该原理文献[15]中搭建了相应的测量系统,并对定制的硅 PN 结进行了先验性的测量实验,测量结果如图 8 所示。由 PN 节耗尽区的测量结果

可知,测量分辨率可达 9nm 左右,说明基于该测量方法能够实现纳米级的测量空间分辨率,因此基于 Pockels 效应的方法在测量分辨率方面具有较大优势。但是,虽然光学信号的信噪比很高,但测量中选择了弹光等效时间取样过程,即一次探测光探测下只能获得一个位置点的电荷信号^[73]。由于控制取样的步进电机移动速度缓慢,该方法获得一次空间电荷分布的时间可能需要数十分钟^[74],这就极大限制了该方法在追踪快速变化电荷方面的可能性,且现有系统也不适用于进一步研究瞬变极化环境中的信号测量。

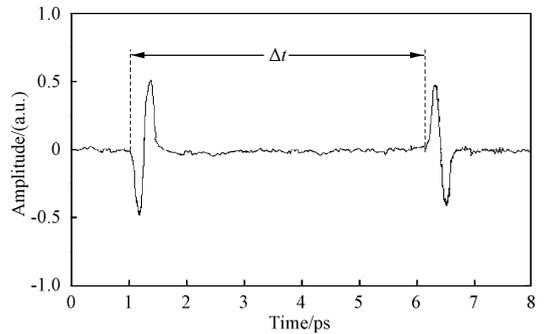


图 8 基于 Pockels 效应的测量结果^[15]

Fig.8 Measured results based on Pockels effect^[15]

此外,自该系统搭建完成后,目前尚未见相关的后续研究进展,笔者认为可能的原因包括以下几点:

(1) 方法理论体系的构建具有一定难度。基于该测量方法获得的空间电荷信号,需先后经过激励光-太赫兹波-压力波-偏振状态变化的探测光等发展过程,该过程不仅涉及光电子学的相关理论知识,太赫兹波与介质电荷的作用过程也可能需要基于量子光学的相关理论进行研究,因此该方法的理论体系相对于其他测量方法更为复杂。

(2) 试样的同步极化存在难度。与基于 Kerr 效应的液体介质空间电荷的测量方法相比,所测固体介质多为薄膜形式的试样,不能像液体测量一样从任意角度施加极化电压。由于现有测量系统设计中传感器需要紧贴在试样表面,这就使测量过程难以同步施加极化电压。此外,即使解决了极化电压的施加问题,由于传感器的紧密接触,极化电压不可避免地会严重影响传感器的工作性能,这就对传感器的性能提出了更高要求。如果只能对极化后的试样进行测量,则会极大地限制该方法的使用范围,且试样与传感器的配合安装复杂,安装过程中试样的电荷特性可能已有明显变化。

(3)空间电荷恢复方法的复杂性。由于测量得到的信号并非空间电荷的直接定量描述,需要对测量结果中的畸变部分进行恢复处理。但测量过程中的光电转换过程较为复杂,测量结果中可能存在未知的畸变因素,这会严重影响介质中电荷分布的定量评估。因此,基于 Pockels 效应的固体介质空间电荷测量方法仍有较大的研究和发展空间。

对上述三种光电子学方法进行总结,如表 1 所示。对比可见,LIPP 方法和 L IMM 方法虽然相对发

展得比较成熟,但分别存在测量系统隔离与信号恢复等问题,且两者的测量分辨率已难以进一步提高。受限于方法的局限性,LIPP 方法不能应用于击穿、电晕和电磁噪声较大的场景,而 L IMM 方法则只适用于很薄试样的测试。基于 Pockels 效应的测量方法虽然表现出高测量分辨率的优势,但整体体系构建还不完善,且只能应用于离线状态下的测量情况中。对于至今仍存在的不足,研究针对性的高可靠高灵敏系统改进方法,仍是指导光电子学方法进一步发展的重要方向。

表 1 三种光电子学方法的总结

Tab.1 Summary of three kinds of optoelectronics-based methods

测量方法	LIPP 方法	L IMM 方法	基于 Pockels 效应的方法
空间分辨率	最高可达 0.1 μm	照射电极附近有较高分辨率	可达几纳米
测量速度	无需平均处理技术,测量速度较快	由于热扩散过程缓慢,测量速度慢	受限于弹光取样过程,测量速度缓慢
优点	方法已成体系,并形成 IEC 标准	照射电极附近分辨率很高	方法测量分辨率可达纳米水平
缺点与局限性	测量与信号电路难以良好隔离	整体分辨率低;畸变信号恢复方法复杂	理论体系不完善;极化和恢复方法欠缺
解决方案	针对激励与测量的隔离,发展高灵敏线圈电流测量方法	提取信号频域特征进行恢复处理,并结合其他电荷测量手段进行标定	以光-机械-电信号转换过程为核心构建理论体系,基于此研究极化影响与信号畸变

5 高时空分辨率空间电荷测量面临的挑战

(1)为研究绝缘在高频与脉冲等特殊电应力下的空间电荷变化规律,需要发展可靠的高时间分辨率测量装备,然而,传统非光学测量手段都存在信噪比较低、所需测量平均次数多等问题。具有高信噪比的基于激光激励的传统测量手段,或受系统本身特性限制,或受测试速度限制,都无法达到理想的测试速度。现有新发展的基于 Pockels 效应的测量方法,受限于测试信号取样过程——弹光取样过程的缓慢,也无法实现快速的电荷测量。但是,光学信号本身的高信噪比特点,使其仍存在实现高测试速度的潜在优势,这就需要对测试的取样过程,包括探测激励的选择以及传感信号的接收和分析系统等,进行适应高速测量的改进设计。

(2)随着高频绝缘装备与纳米改性绝缘材料的发展,从纳米尺度研究绝缘中的空间电荷分布已变得尤为重要。传统发展相对成熟的非光学测量手段,受激励特性和系统本身限制,只能达到微米级别的测量分辨率。采用脉冲激光作为激励时,当激光的持续时间达到飞秒级,测量系统的分辨率即存在

达到纳米级的可能性,但这对传感信号的接收系统同样也提出了较高的要求。接收系统的合理设计,已成为实现高分辨率和高测试速度的关键基础。

(3)此外,所有测量方法都存在一个尚未很好解决的重要问题:如何评估测量和恢复结果的准确度,这也是电荷测量方法发展以来一直受到的质疑。空间电荷测量方法不能判断空间电荷的类型与本质,测量结果的重复性也相对较差,且仍未取得公认的结果。此外,实验室试样与实际绝缘装备的电荷积聚规律的等价性,以及实验室内短时间的极化过程与实际绝缘长时间运行后电荷积聚的等价性等问题,也都有待进一步解决,这些都构成空间电荷测量领域需要继续探索的重要问题。

6 结论

现有固体介质空间电荷的非光学测量方法发展得较为成熟和完善,其中 PEA 方法搭建原理简单且电路可有效保护,因而应用最为广泛。但传统测量方法受限于测量硬件条件和低信噪比等因素,向高分辨率和高测量速度发展时存在局限。

基于光电子学的空间电荷测量技术逐渐表现出

高信噪比和高空间分辨率的测量优势,但无论是传统的 LIPP 方法还是 LImm 方法,在测量应用或波形恢复方面都存在一定局限性。基于 Pockels 效应的光电子学测量方法表现出纳米尺度测量分辨率的潜在优势,但目前仍存在测量速度较低、同步极化困难以及理论体系不完善等问题。

为适应高频绝缘与纳米绝缘的空间电荷测量需求,需研制能实现高分辨率的高速测量系统,以期可在更微观的角度追踪绝缘内部的电荷快速变化过程,并揭示复杂电应力下电荷的演化规律。要同时实现高分辨率和高测量速度的性能指标,就要保证测量激励的输出频率和持续时间、测量信号信噪比以及传感信号的接收系统都能达到两个性能指标的要求。综合分析现有的空间电荷测量技术,基于光电子学的测量方法更具发展潜力,但仍需深入开展大量的研究工作。

参考文献 (References):

- [1] Molina M G. Energy storage and power electronics technologies: A strong combination to empower the transformation to the smart grid [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105 (11): 2191-2219.
- [2] 程林, 田立亭, 葛贤军, 等 (Cheng Lin, Tian Liting, Ge Xianjun, et al.). 含分布式电源的多电压等级交流直流混合配用电测试系统 (Benchmark test system for multi-voltage hybrid AC/DC distribution network integrated with distribution resources) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (2): 60-71.
- [3] 鲁杨飞, 李庆民, 刘涛, 等 (Lu Yangfei, Li Qingmin, Liu Tao, et al.). 高频电压下表面电荷分布对沿面放电发展过程的影响 (Effect of surface charge on the surface discharge evolution for polyimide under high frequency voltage) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2018, 33 (13): 3059-3070.
- [4] Liu T, Li Q M, Huang X W, et al. Partial discharge behavior and ground insulation life expectancy under different voltage frequencies [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25 (2): 603-613.
- [5] 黄旭炜, 倪潇茹, 王健, 等 (Huang Xuwei, Ni Xiaoru, Wang Jian, et al.). 苯硫醚聚酰亚胺电极覆膜材料合成及直流应力下对金属微粒运动特性的抑制作用 (Synthesis of phenyl-thioether polyimide as the electrode coating film and its suppression effect on motion behavior of the metal particles under DC stresses) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2018, 33 (20): 4712-4721.
- [6] 周远翔, 黄欣, 黄猛, 等 (Zhou Yuanxiang, Huang Xin, Huang Meng, et al.). 温度对油纸绝缘空间电荷消散特性的影响 (Influences of temperature on space charge dissipation in oil-paper insulation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (7): 1-8.
- [7] 郝建, 徐瑞林, Chen George, 等 (Hao Jian, Xu Ruilin, Chen George, et al.). 直流和工频电压下油浸纸绝缘系统空间电荷特性的差异 (Space charge characteristics difference of oil-impregnated paper insulation system under DC and power frequency voltage) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2013, 37 (4): 1166-1173.
- [8] Montanari G, Dissado L, Serra S. The hidden threat to HVDC polymeric insulation at design field: Solitonic conduction [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2014, 30 (4): 39-50.
- [9] Montanari G, Fabiani D, Dissado L. Fast charge pulses: The evidence and its interpretation [A]. IEEE International Conference on Solid Dielectrics [C]. Bologna, Italy, 2013. 10-14.
- [10] Tanaka Y, Fujitomi T, Kato T, et al. Packet-like charge formation in cable insulating materials at polarity reversal [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24 (3): 1372-1379.
- [11] Li S T, Zhu Y W, Min D M, et al. Space charge modulated electrical breakdown [J]. Scientific Reports, 2016, (6): 32588.
- [12] Stéphane H, Griseri V, Dissado L A, et al. Improvement of PEA signal analysis using simulations for complex geometry samples [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 35 (1): 19-24.
- [13] Stéphane H, Sylvestre A, Lavallée O G, et al. Space charge distribution measurement methods and particle loaded insulating materials [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39 (5): 950-956.
- [14] Fukunaga K. Progress and prospects in PEA space charge measurements techniques [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24 (3): 26-37.
- [15] 张颖 (Zhang Ying). 基于新型太赫兹器件的高分辨率界面空间电荷测试系统 (Improved particle swarm algorithm and its application in power system) [D]. 哈尔滨: 黑龙江大学 (Harbin: Heilongjiang University), 2015.
- [16] 黄印 (Huang Yin). 基于光学方法的低密度聚乙烯空间电荷测量研究 (Research on space charge measurement of LDPE based on the optical method) [D]. 哈尔

- 滨: 哈尔滨理工大学 (Harbin: Harbin University of Science and Technology), 2014.
- [17] Ren H W, Wang J R, Chen H Y, et al. Research challenges on space charge measurement at high speed under the condition of high-frequency voltage [A]. International Conference on Dielectrics, Budapest, Hungary [C]. 2018. 1-4.
- [18] Stéphane H, Claude A, Jacques L. Measurement of space-charge distributions in insulators under very rapidly varying voltage [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4 (6): 719-724.
- [19] IEC/TS 62758-2012, Calibration of space charge measuring equipment based on the pulsed electro-acoustic (PEA) measurement principle [S].
- [20] Fukuma M, Fukunaga K, Laurent C. Two-dimensional structure of charge packets in polyethylene under high DC fields [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88 (25): 253110.
- [21] Imaizumi Y, Suzuki K, Tanaka Y, et al. Three-dimensional space charge distribution measurement in solid dielectrics using pulsed electroacoustic method [A]. International Symposium on Electrical Insulating Materials [C]. Tokyo, Japan, 1995. 315-318.
- [22] Maeno T. Three-dimensional PEA charge measurement system [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8 (5): 845-848.
- [23] 王霞, 赫佳齐, 熊锦州, 等 (Wang Xia, He Jiaqi, Xiong Jinzhou, et al.). 不同脉冲注入方式下长电缆中空间电荷测量结果的等效性分析 (Analysis on equivalences of different pulse injection methods used for space charge measurements in the long cables) [J]. 中国电机工程学报 (Proceeding of the CSEE), 2018, 38 (17): 5275-5285.
- [24] Mazzanti G, Chen G, Fothergill J C, et al. A protocol for space charge measurements in full-size HVDC extruded cables [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22 (1): 21-34.
- [25] Kumaoka K, Kato T, Miyake H, et al. Development of space charge measurement system with high positional resolution using pulsed electro acoustic method [A]. International Symposium on Electrical Insulating Materials [C]. Niigata, Japan, 2014. 389-392.
- [26] Fukuma M, Maeno T, Fukunaga K, et al. High repetition rate PEA system for in-situ space charge measurement during breakdown tests [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 11 (1): 155-159.
- [27] Matsui K, Tanaka Y, Takada T, et al. Space charge behavior in low density polyethylene at pre-breakdown [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12 (3): 406-415.
- [28] 万佳东, 吴建东, 黄若栋, 等 (Wan Jiadong, Wu Jiandong, Huang Ruodong, et al.). 快速空间电荷测量用高压高频脉冲源的研究 (A study on high-voltage high-frequency pulse source applied in fast space charge measurement) [J]. 电气自动化 (Power System and Automation), 2016, 38 (3): 41-43.
- [29] 刘云鹏, 刘贺晨, 高丽娟, 等 (Liu Yunpeng, Liu Hechen, Gao Lijuan, et al.). 电声脉冲法研究热老化对160kV 直流电缆绝缘材料陷阱特性的影响 (Influence of thermal stress on the traps energy properties of 160kV HVDC cable insulation material based on pulsed electro-acoustic method) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (24): 105-112.
- [30] He D X, Wang W, Lu J, et al. Space charge characteristics of power cables under AC stress and temperature gradients [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23 (4): 2404-2412.
- [31] 唐超, 叶开颜, 周天春, 等 (Tang Chao, Ye Kaiyan, Zhou Tianchun, et al.). 改进电声脉冲法的交流空间电荷测量新方法 (New method for space charge measurement under AC stress via the pulsed electroacoustic method) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2013, 49 (2): 8-12.
- [32] Tanaka Y, Kitajima H, Kodaka M, et al. Analysis and discussion on conduction current based on simultaneous measurement of TSC and space charge distribution [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5 (6): 952-956.
- [33] 郑煜, 吴建东, 王俏华, 等 (Zheng Yu, Wu Jiandong, Wang Qiaohua, et al.). 空间电荷与直流电导联合测试技术用于纳米 MgO 抑制 XLPE 中空间电荷的研究 (Research on the space charge suppressing mechanism of nano-MgO in XLPE with a joint measuring technology of DC conduction and space charge) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (5): 126-131.
- [34] Leroy S, Miyake H, Tanaka Y, et al. Simultaneous measurement of electroluminescence and space charge distribution in low density polyethylene under a uniform DC field [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, 38 (1): 89-94.
- [35] Imburgia A, Romano P, Viola F, et al. Space charges and partial discharges simultaneous measurements under DC stress [A]. IEEE Conference on Electrical Insulation

- and Dielectric Phenomena [C]. Toronto, Canada, 2016. 514-517.
- [36] Perrin C, Griseri V, Laurent C. Measurement of internal charge distribution in dielectrics using the pulsed electro-acoustic method in non-contact mode [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15 (4): 958-964.
- [37] Tian Y, Chen G, Davies A. Development of a three dimensional space charge measurement system for dielectrics using PWP method [A]. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena [C]. Cancun, Mexico, 2002. 644-647.
- [38] Imburgia A, Miceli R, Sanseverino E R, et al. Review of space charge measurement systems: Acoustic, thermal and optical methods [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23 (5): 3126-3142.
- [39] Stéphane H, Bruzek C É, Lallouet N. Space charge measurements at very low temperatures [A]. IEEE International Conference on Dielectrics [C]. Montpellier, France, 2016. 167-168.
- [40] Castellon J, Agnel S, Notinger P. Review of space charge measurements in high voltage DC extruded cables by the thermal step method [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2017, 33 (4): 34-41.
- [41] Von S H, West J E, Kubli R A. Determination of charge centroids in two-side metallized electrets [J]. Review of Scientific Instruments, 1984, 55 (6): 964-967.
- [42] Notinger P, Agnel S, Toureille A. Recent advances in calculating space charge distribution by processing the signals obtained using the thermal step method [A]. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena [C]. Atlanta, USA, 1998. 154-157.
- [43] Notinger P, Agnel S, Filloycorbrion C, et al. Surface temperature measurement for space charge distribution measurements with thermal methods [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22 (3): 1506-1511.
- [44] Louiza H, Emmanuel G, Stéphane H. Very high spatial resolution space charge measurement using electro-acoustic reflectometry (EAR) [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2017, 33 (5): 9-16.
- [45] Louiza H, Emmanuel G, Stéphane H. Electro-acoustic reflectometry: Reaching high spatial resolution and high sensitivity for space charge measurements [A]. International Symposium on Electrical Insulating Materials [C]. Toyohashi, Japan, 2017. 219-222.
- [46] Sun Y L, Zhang Y W, Stéphane H, et al. Pressure wave propagation method for space charge measurement in coaxial geometry [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25 (6): 2139-2146.
- [47] Alquie C, Dreyfus G, Lewiner J. Stress-wave probing of electric field distributions in dielectrics [J]. Physical Review Letters, 1981, 47 (20): 1483-1487.
- [48] Rozno A G, Gromov V V. Electric charge distribution and radiation effects in irradiated dielectrics [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1986, 21 (3): 417-425.
- [49] Sessler G M, Gerhard Mulhaupt R, West J E, et al. Optoacoustic generation and electrical detection of subnanosecond acoustic pulses [J]. Journal of Applied Physics, 1985, 58 (1): 119-121.
- [50] Stéphane H. Resolution of direct space charge distribution measurement methods [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15 (3): 861-871.
- [51] 吴锴, 陈曦, 王霞, 等 (Wu Kai, Chen Xi, Wang Xia, et al.). 温度梯度下电缆绝缘中空间电荷特性的研究现状 (Research situation of space charge characteristic in cable insulation under temperature gradient) [J]. 绝缘材料 (Insulating Materials), 2012, 45 (3): 60-68.
- [52] 李栋, 朱智恩, 杨黎明, 等 (Li Dong, Zhu Zhi'en, Yang Liming, et al.). PWP法柔性直流电缆空间电荷特性研究 (Research on space charge characteristics of HVDC flexible cable by PWP method) [J]. 绝缘材料 (Insulating Materials), 2017, 50 (5): 35-38.
- [53] 温己年 (Wen Yinian). 基于LIPP法的空间电荷测量系统 (Space charge measurement system based on LIPP) [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学 (Harbin: Harbin University of Science and Technology), 2017.
- [54] Tran V H, Auge J L, Rain P. Study of the generation of the pressure pulse in the laser induced pressure pulse method: Optimization of the process [A]. IEEE International Conference on Solid Dielectrics [C]. Potsdam, Germany, 2010. 1-4.
- [55] Choo W, Chen G, Swingler S G. Electric field in polymeric cable due to space charge accumulation under DC and temperature gradient [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18 (2): 596-606.
- [56] Sun Y, Zhang Y, Stéphane H, et al. Physical model of measuring space charge distribution by pressure wave propagation method for high voltage cable [A]. IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis [C]. Xi'an, China, 2016. 251-253.
- [57] 孙雅丽, 张治文, Stéphane H, 等 (Sun Yali, Zhang

- Zhiwen, Stéphane H, et al.). 同轴结构中压力波法测量空间电荷分布的物理模型研究 (A physical model for measuring space charge distribution by pressure wave method in coaxial structures) [J]. 物理学报 (Acta Physica Sinica), 2017, 66 (12): 329-334.
- [58] Blob P, Steffen M, Schäfer H, et al. A comparison of space-charge distributions in electron-beam irradiated FEP obtained by using heat-wave and pressure-pulse techniques [J]. Journal of Applied Physics, 1997, 30 (11): 1668-1675.
- [59] IEC/TR 62836-2013, Measurement of internal electric field in insulating materials - Pressure wave propagation method [S].
- [60] Stéphane H. Recent developments in the pressure wave propagation method [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2009, 25 (3): 7-20.
- [61] 周远翔, 王宁华, 王云杉, 等 (Zhou Yuanxiang, Wang Ninghua, Wang Yunshan, et al.). 固体电介质空间电荷研究进展 (Review of research on space charge in solid dielectrics) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2008, 23 (9): 16-25.
- [62] Amanda V S, Laurent B, Didier M D. Thermal modeling and calibration in (F) LMM using an external bias field: Theory and experiment [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25 (3): 783-790.
- [63] Baudon S, Notingher P, Agnel S, et al. Advances in electric charge measurements in semi-conducting structures by non-destructive thermal methods [A]. Industry Applications Society Meeting [C]. Vancouver, Canada, 2014. 1-7.
- [64] Lang S B, Fleming R. A comparison of three techniques for solving the fredholm integral equation of the laser intensity modulation method (LMM) [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16 (3): 809-814.
- [65] Bouchareb S, Griseri V, Berquez L. In situ space charge profile measurements on electronic irradiated material by LMM [A]. IEEE International Conference on Solid Dielectrics [C]. Bologna, Italy, 2013. 776-779.
- [66] Marty D D, Berquez L, Petre A, et al. Three-dimensional cartography of space charge by FLIMM [A]. IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena [C]. Cancun, Mexico, 2002. 602-605.
- [67] Anh T T, Berquez L, Boudou L, et al. Effect of trapped space charge on mechanical deformation induced by electric field [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18 (5): 1416-1422.
- [68] Marty D D, Ziani A C, Petre A, et al. Space charge distributions in insulating polymers; A new non-contacting way of measurement [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86 (4): 043905.
- [69] 司马文霞, 黄思思, 杨庆, 等 (Sima Wenxia, Huang Sisi, Yang Qing, et al.). 基于 Kerr 电光效应测量的液体空间电荷产生及其分布特性 (Generation and distribution characteristics of space charge in liquid dielectric based on Kerr electro-optic effect) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2014, 40 (1): 16-23.
- [70] 杨庆, 金洪, 司马文霞, 等 (Yang Qing, Jin Yang, Sima Wenxia, et al.). 两种电极材料下变压器油的冲击绝缘特性和空间电荷作用机理 (Space charge effect mechanism and insulation properties of transformer oil under two kinds of electrode material) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2018, 44 (6): 1750-1756.
- [71] Tanaka Y, Usui Y, Umemura K, et al. Optical measurement techniques for surface and bulk charge distribution [A]. IEEE International Conference on Solid Dielectrics [C]. Toulouse, France, 2004. 959-962.
- [72] Dagher G, Hole S, Lewiner J. 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.
- [73] 王璐, 刘庆纲, 李锁印, 等 (Wang Lu, Liu Qinggang, Li Suoyin, et al.). 超高速电光采样技术及应用 (New progress and applications of ultra high speed electro-optic sampling technique) [J]. 微纳电子技术 (Microelectronic Technology), 2006, (4): 197-202.
- [74] 王璐 (Wang Lu). 超快电信号电光采样测试系统的研究 (Study on the electro-optic sampling system for ultra-fast electrical signals) [D]. 天津: 天津大学 (Tianjin: Tianjin University), 2006.

Advances in optoelectronics-based measurement of space charge in solid dielectrics

WANG Jian¹, LI Qing-min¹, REN Han-wen¹, LI Cheng-qian¹, GAO Hao-yu¹, LIU Tao²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Development of space charge measurement technology with high spatial resolution and fast response for solid dielectrics becomes an important research focus in the area, so as to meet the special requirement of charge measurement for high frequency insulation and nano-composite materials with DC and power electronics equipment. In this paper, the principal factors that affect spatial resolution and tracking speed of the measurement methods are elucidated in the first stance, and state-of-the-art of the prevailing non-optical methodologies as well as their application limits are also briefly summarized. Further, research progress review of the measurement methods utilizing optical elements as the excitation sources is fully accounted, including laser-induced pressure pulse method, laser intensity modulation method and new methods based on Pockels effect. Finally, the technological challenges in developing a space charge measurement system with high spatial resolution and quick response are presented. The proposed analysis indicates that, it is difficult for the non-optical schemes to fully achieve both high speed and high resolution measurement due to limitations of signal-to-noise ratio and the system performance itself. By contrast, the optoelectronics-based methods that render high signal-to-noise ratio and wide bandwidth present potential technological approaches in realizing fast space charge measurement together with high spatial resolution, but still need further in-depth investigations.

Key words: space charge; optoelectronics; high-frequency insulation; nanocomposite insulation