基于克尔效应的真空绝缘子表面电场在线测量*

刘微粒† 邹晓兵 付洋洋 王鹏 王新新

(清华大学电机系, 电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

(2013 年 11 月 17 日收到; 2014 年 1 月 11 日收到修改稿)

克尔效应 (Kerr Effect) 作为一种电光效应, 主要表现为: 克尔介质在外加电场作用下, 会使得入射到其中的探测光带有外加电场的信息. 基于上述原理, 设计并搭建了由快脉冲高电压源、YAG 激光器、同步控制子系统、被测绝缘子及克尔效应单元、相位差检测子系统构成的真空绝缘子表面电场在线测量实验平台. 通过对比性测量, 观察到了真空绝缘子沿面带电导致的表面电场畸变现象. 并进一步对绝缘子表面电场的畸变进行了时间分辨测量.

关键词: 真空绝缘子, 表面电场, 在线测量, 克尔效应

PACS: 52.80.Vp, 52.80.–s, 51.50.+v **DOI:** 10.7498/aps.63.095207

1 引 言

真空介质在保证足够高的绝缘强度的同时, 可以显著降低绝缘成本和设备自重. 因此, 许多涉及脉冲功率技术的大型科研设备如加速器、强 X 射线源等多采用真空绝缘, 而真空绝缘对外太空工作的飞行器而言更是具有显著的优越性. 然而, 当在真空环境中引入起机械支撑和电气隔离作用的绝缘子后, 反而会导致真空绝缘强度明显下降, 其原因就在于绝缘子与真空交界面处会在较低的外加电压条件下发生放电, 即产生真空沿面闪络现象[1]. 由于引起真空沿面闪络的电压一般远低于真空间隙的击穿电压和绝缘子固体击穿电压, 所以真空沿面闪络的发生往往会影响设备的正常运行甚至引起闪络事故[2,3], 从而成为了制约设备性能指标进一步提升的瓶颈问题. 因此, 对绝缘子真空沿面闪络现象的研究具有重大的实际意义和应用价值, 并长期受到各国研究者的广泛关注[1,4]. 虽然众多研究人员对影响闪络的各种物理因素进行了较为系统的研究[5,6], 但目前仍然未对导致真空沿面闪络的物理机理给出一个较为统一完备的理论解释[7,8]. 但是随着研究的不断深入, 研究者们愈发关注闪络前绝缘子的表面带电现象及由此引起的表面电场畸变, 并普遍将这一物理过程看作影响沿面闪络发展的关键因素[9,10].

目前研究者多是采用探针法[11]和粉尘图法[12]测量直流、交流或微秒脉冲电压作用下绝缘子的表面电场或电荷分布, 而对纳秒脉冲电压下绝缘子表面带电现象的研究则相对较少. 此外, 这两种方法属于离线测量方法, 即在撤除外加电压之后再测量绝缘子表面的电场或电荷分布, 而对于电压施加过程中绝缘子表面电场的在线实时观测却难于实现.

随着脉冲功率技术的不断发展, 对脉冲功率设备参数的要求日益提高, 不但要求实现高电压、大电流, 而且要求脉冲宽度达到亚纳秒或纳秒量级. 这就使得纳秒脉冲电压下真空绝缘子的沿面闪络问题愈发受到重视. 然而受到测量手段的限制, 关于纳秒脉冲电压作用下绝缘子表面带电现象的在线测量实验结果罕有报道. 为了给纳秒脉冲电压下真空沿面闪络物理机理的研究提供更真实、丰富的实验数据, 我们设计并搭建了基于克尔效应的真空绝缘子表面电场测量系统, 实现了对纳秒高压脉冲

* 国家自然科学基金 (批准号: 51107064) 和教育部博士点基金 (批准号: 20100002120007) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lwl0115@gmail.com

© 2014 中国物理学会 Chinese Physical Society

作用下真空绝缘子表面电场的在线观测. 利用该测量系统, 我们观察到了沿面闪络发生前表面带电引起的绝缘子表面电场畸变, 并对沿面放电发展过程中表面电场畸变程度的变化情况进行了时间分辨测量.

2 克尔效应原理

克尔效应 (Kerr Effect) 是一种电光效应, 即介质在外加电场作用下表现出光学各向异性的物理现象. 通常在某些液体介质如硝基苯、碳酸丙烯脂中可以明显的观察到这种效应. 这类液体也因此被称为克尔液体. 如图 1 所示, 将平行平板电极置于充满克尔液体的克尔腔中. 当给电极施加高电压时, 就会在极板间形成一个强电场区域, 而此时穿过该强场区域的入射光的偏振状态就会发生变化. 通常情况下, 当一束线偏振光入射时, 由于外加电场的存在, 出射时则变成椭圆偏振光. 与之对应的两个光学偏振分量, $P_{\parallel}$ 和 $P_{\perp}$, 则在出射时产生一个相对位相差 $\Delta\varphi$. 这个位相差与外加电场有关 [13], 具体表示为

$$\Delta\varphi = 2\pi B \int_l |\boldsymbol{E}|^2 \mathrm{d}z, \tag{1}$$

其中 B 是克尔液体的克尔电光常数; 电场 $\boldsymbol{E}$ 是垂直于光传播方向平面上的外加电场分量, 而 $\boldsymbol{P}_{\parallel}$ 和 $\boldsymbol{P}_{\perp}$ 的偏振方向则分别平行和垂直于 $\boldsymbol{E}$ 的方向. 积分路径则为探测光在克尔液体中的传播路径.

该相对位相差的信息, 可以用如图 1 所示的位相差测量系统获得. 该测量系统主要由两个透光轴方向相互垂直的偏振片构成, 分别置于克尔腔体的两侧. 从图 1 中可以看出, 当探测激光沿 z 轴方向传播时, 其偏振平面位于 $x-y$ 平面上. 当起偏器透光轴方向和外加电场方向存在如图 2 (b) 所示关系时, 根据文献 [13] 中的推导, 从检偏器出射的激光光强 I 可以表示为

$$I = I_0 \times \sin^2 2(\theta_{\mathrm{i}} - \theta_{\mathrm{e}}) \times \sin^2(\Delta\varphi/2), \tag{2}$$

其中, I_0 为穿过起偏器入射到克尔腔体的探测光强, θ_{i} 和 θ_{e} 分别为起偏器透光轴方向以及外加电场 $\boldsymbol{E}$ 的方向与 x 轴的夹角, $\Delta\varphi$ 则为 (1) 式中的相对位相差. 由此可见, 通过测量出射光的光强, 就可以获得引起克尔效应的外加电场的信息.

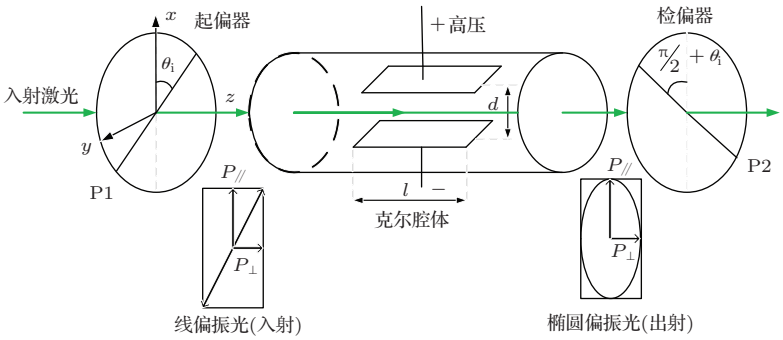

图 1 克尔效应原理图

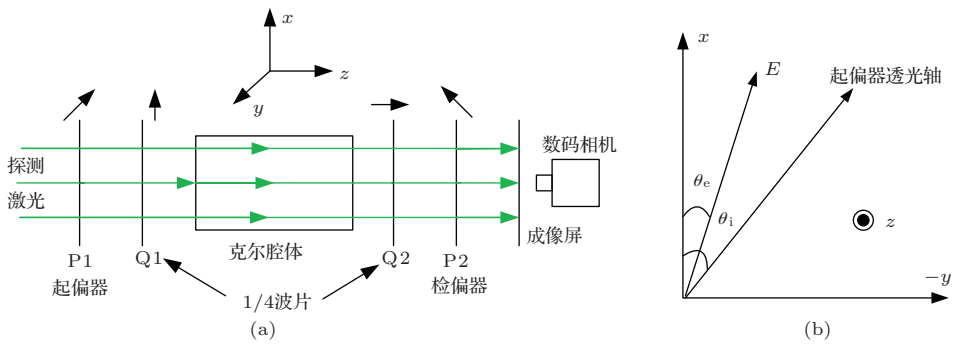

图 2 (a) 圆偏振测量系统示意图; (b) 起偏器偏振方向与外加电场角度关系示意图

通常人们只关心外加电场的大小, 因此可利用圆偏振测量系统消除 (2) 式中与电场方向有关的正弦项. 如图 2 (a) 所示, 圆偏振光学测量系统包括两个偏振片和两个 1/4 波片: 其中两个偏振片的透光轴相互垂直, 与 x 轴方向的夹角各为 45°; 而两个波片的快轴 (慢轴) 也相互垂直, 并分别与偏振片 P1 和 P2 的透光轴方向呈 45° 的夹角. 此时, 从检偏器出射的光强分布表示为 [13]

$$I = I_0 \times \sin^2(\Delta\varphi/2). \tag{3}$$

在实验中, 探测激光束通常先经过扩束镜组扩束后再入射到克尔腔体中, 从而使得探测光能够覆盖整个电极及被测绝缘子的横截面. 从 (1)—(3) 式中可以看出, 若克尔液体中电场发生变化, 相应的出射光强分布也会发生变化. 因此, 通过观测出射探测光的二维光强空间分布就可以获知克尔液体中电场空间分布的信息.

3 实验系统及测量结果

如上所述, 若利用克尔效应对绝缘子表面电场进行在线测量, 就必须在施加电压的同时使探测激光穿过克尔腔体. 为此, 我们设计了如图 3 (a) 所示的测量系统. 该测量系统主要包括快脉冲高压源、YAG 调 Q 激光器、光学相位差测量系统 (偏振片 P1, P2 及 1/4 波片 Q1, Q2)、克尔腔体及绝缘子试品、同步控制系统五个组成部分 [14]. 该测量系统利用脉冲形成线技术给克尔腔体中的绝缘子施加一个脉宽 100 ns, 幅值 100 kV 左右的正向高压脉冲. 同步控制系统则用于保证探测激光能够在高压脉冲施加在绝缘子上时穿过克尔腔体, 从而实现在线测量.

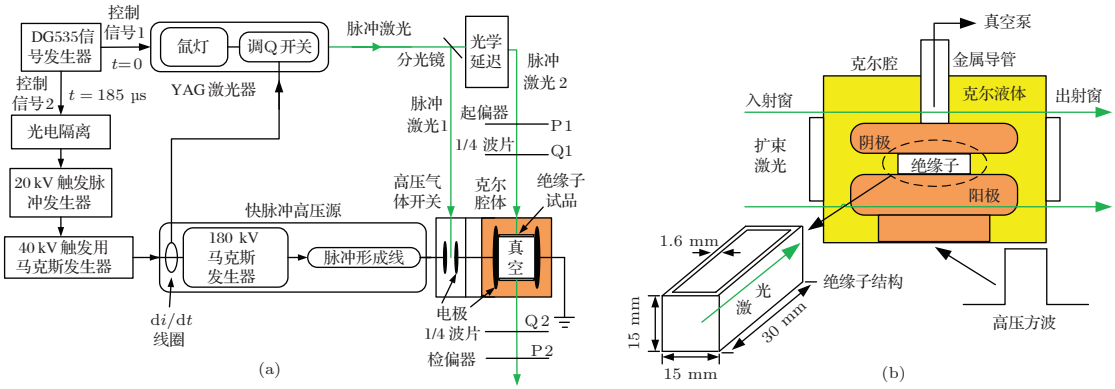

图 3 (a) 在线测量系统组成及同步控制原理图; (b) 克尔腔体及绝缘子结构示意图

如图 3 (b) 所示, 克尔腔中的被测绝缘子为一个中空薄壁长方体 (30 mm × 15 mm × 15 mm), 其长边侧壁厚度为 1.6 mm, 材料为尼龙. 腔体中的电极为直径 80 mm 的圆形金属电极, 绝缘子和上下电极连接在一起. 实验中选择安全系数高、毒性较小的碳酸丙烯脂 (Propylene Carbonate) 作为克尔液体, 并将绝缘子和电极整体浸没在克尔液体中. 克尔腔体中的下电极作为阳极引入正向高压脉冲; 而克尔腔体中的上电极接地, 并与真空分子泵的导气管相连. 在实验中, 绝缘子的内部抽成真空 (保持在 10^{-4} Pa) 形成真空/固体界面, 同时在克尔液体中形成克尔液体/固体界面. 根据克尔效应的测量原理, 通过观测克尔液体/固体界面附近探测光强的分布, 就可以进一步分析液体/固体界面以及真空/固体界面附近区域的电场变化情况.

如图 4 (b) 所示, 由于在实验中使用的是圆电极, 所以 (1) 式中位相差的积分路径为电极所决定的圆形区域内的各条弦长. 因此, 电极之间的探测光强分布为图 4 (a) 中明暗相间的有限宽条纹分布. 图 4 (c) 则给出了典型的实验波形图. 其中施加在绝缘子上的脉冲电压脉宽 100 ns, 上升沿为 40—50 ns; 探测激光一般在脉冲电压到达或接近幅值时入射到克尔腔体中进行测量. 通过比较探测激光信号和脉冲信号的波形, 可以确定出测量时刻施加在绝缘子上的电压及电场大小.

如前所述, 在外加电压作用下, 绝缘子表面积累的电荷会使绝缘子的表面电场发生畸变. 根据上述的测量原理, 若想观察表面电场的畸变, 就必须分别得到绝缘子表面带有电荷和没有电荷时的光强分布. 然而在实际测量中, 很难保证也难以判断

绝缘子表面是否带有电荷. 考虑到绝缘子沿面不存在表面电荷时克尔液体中的电场, 应该与电极间没有绝缘子时克尔液体中的电场为等效的拉普拉斯电场 (除去绝缘子占据的空间). 因此, 其对应的光强分布也应该是相同的. 所以我们选择测量电极间撤去绝缘子时的条纹分布来与相同电极间距、相同外加电压条件下有绝缘子时的条纹分布进行对比. 图 5 和图 6 则分别给出了不同电极间距条件下典型的对比实验结果.

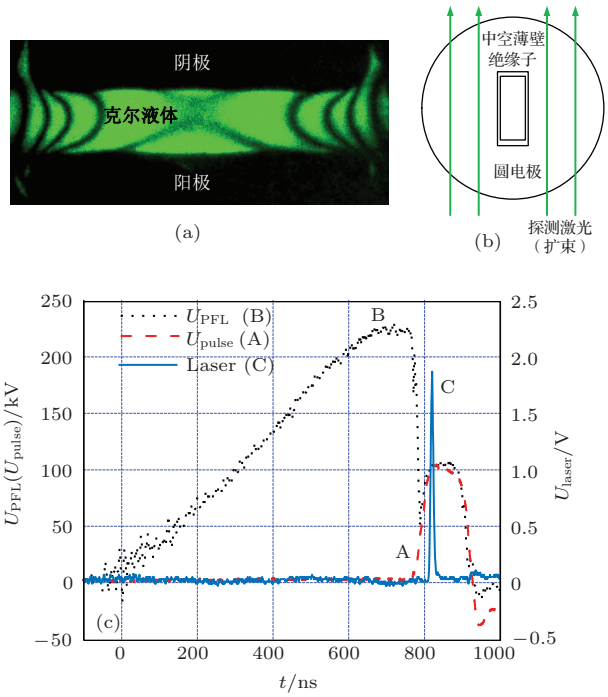

图 4 (a) 电极间的出射光强分布; (b) 扩束激光穿过电极和绝缘子的俯视示意图; (c) 在线测量实验中得到的典型试验波形 (A. 脉冲方波电压, B. 脉冲形成线上的电压, C. 探测激光信号)

图 5 (b) 是在拉普拉斯电场 (无表面电荷影响) 条件下得到的探测光强分布. 而图 5 (a) 则是绝缘子沿面闪络发生前某时刻的探测光强分布, 图中电极间的长方形阴影是绝缘子在成像屏上的投影. 在图 5 所示的对比实验中, 电极间距保持为 20 mm, 测量时刻的外加电压都为 108 kV. 通过对比可以看出, 图 5 (a) 中最靠近绝缘子沿面的那一级暗条纹向绝缘子表面方向发生了移动, 占据了图 5 (b) 中对应位置亮条纹所在的部分区域. 条纹的这种相对位移反映出: 在外加电压作用下, 绝缘子表面积累了电荷从而畸变了表面电场. 考虑到在液体中电荷的迁移率远小于真空中电荷的迁移率. 因此, 在纳秒脉冲电场作用下, 固体/液体交界面处基本不会存在外加电场导致的电荷积聚; 而引起克尔液体中电场改变的应该是固体/真空界面上积累的表面电荷. 此外, 还可以观察到, 条纹的移动在空间上并不是均匀对称的——靠近阴极区域的条纹移动要明显得多. 这就意味着绝缘子表面不同位置处的电场畸变程度有所不同. 由此可以初步判断出: 表面电荷的空间分布并不是均匀的, 靠近阴极附近区域积累了较多的电荷, 从而引起了该区域电场的显著畸变.

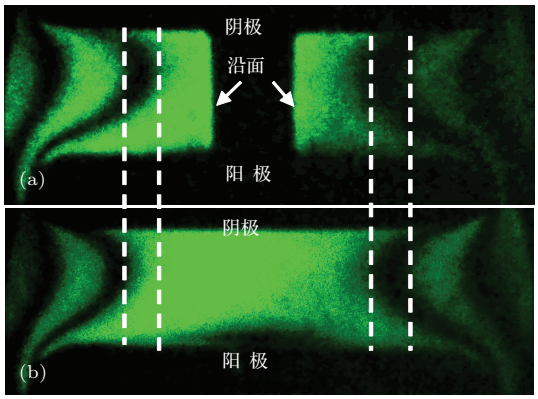

图 5 绝缘子表面电场分布的对比测量 (a) 电极之间以及绝缘子沿面附近的光强分布; (b) 电极间无绝缘子时的光强分布

可以认为, 光强分布图像上位于同一级明/暗条纹上的空间点对应同一个位相差 $\Delta\varphi((2k+1)\pi$ 或 $2k\pi$, $k=0, 1, 2, \cdots)$. 根据 (1) 式可知, 位相差 $\Delta\varphi$ 是由电场和积分路径 (圆的弦长) 共同决定的. 因此对于处在同一级条纹上的不同空间点而言, 当一个点对应较长的积分路径 (弦长) 时, 其对应的平均积分电场则相对较弱. 因此, 若某一级条纹向绝缘子表面 (圆形区域中心) 移动时, 就意味着相位不变而弦长变大. 相应的, 条纹所在区域的电场则相对减弱. 因此, 从图 5 中条纹的位移情况可以初步推断出: 测量时刻绝缘子表面靠近阴极附近的部分电场被削弱了. 而根据电极和绝缘子所决定的这种电场位形则可以推断出, 这种表面电场的局部削弱可能是由于绝缘子表面靠近阴极的区域积累负电荷造成的.

图 6 则给出了绝缘子表面电场畸变的时间分辨测量结果. 在这组对比实验中, 电极间距都为 15 mm, 测量时刻的外加电压都为 106 kV. 从图 6 (d) 和 (e) 中可以看出: 图 6 (a) 中所示的光强分布反映了闪络发生前某时刻绝缘子表面电场的情况, 而图 6 (c) 所示的光强分布则反映了沿面闪络即将发

生时刻绝缘子表面电场的情况. 将图6 (a) 和 (c) 分别与图6 (b) 进行对比可以发现: 不论在闪络发生前还是闪络开始时刻, 绝缘子表面电场都发生了畸变——临近绝缘子表面的条纹都发生了向内的位移. 然而, 不同发展阶段的畸变情况有着明显的不同——图6 (a) 中电场畸变的程度与图5中的实验结果类似, 而闪络开始时刻表面电场的畸变程度则要比闪络前电场的畸变程度严重得多. 有些研究者认为: 表面电荷的积累与沿面闪络的发展有直接的关系, 当绝缘子的表面电荷积累到一定程度后, 就会促使绝缘子沿面发生贯穿性的闪络放电. 由于表面电荷的积累程度决定了表面电场的畸变程度, 因此我们对表面电场畸变的时间分辨测量结果恰好验证了上述观点.

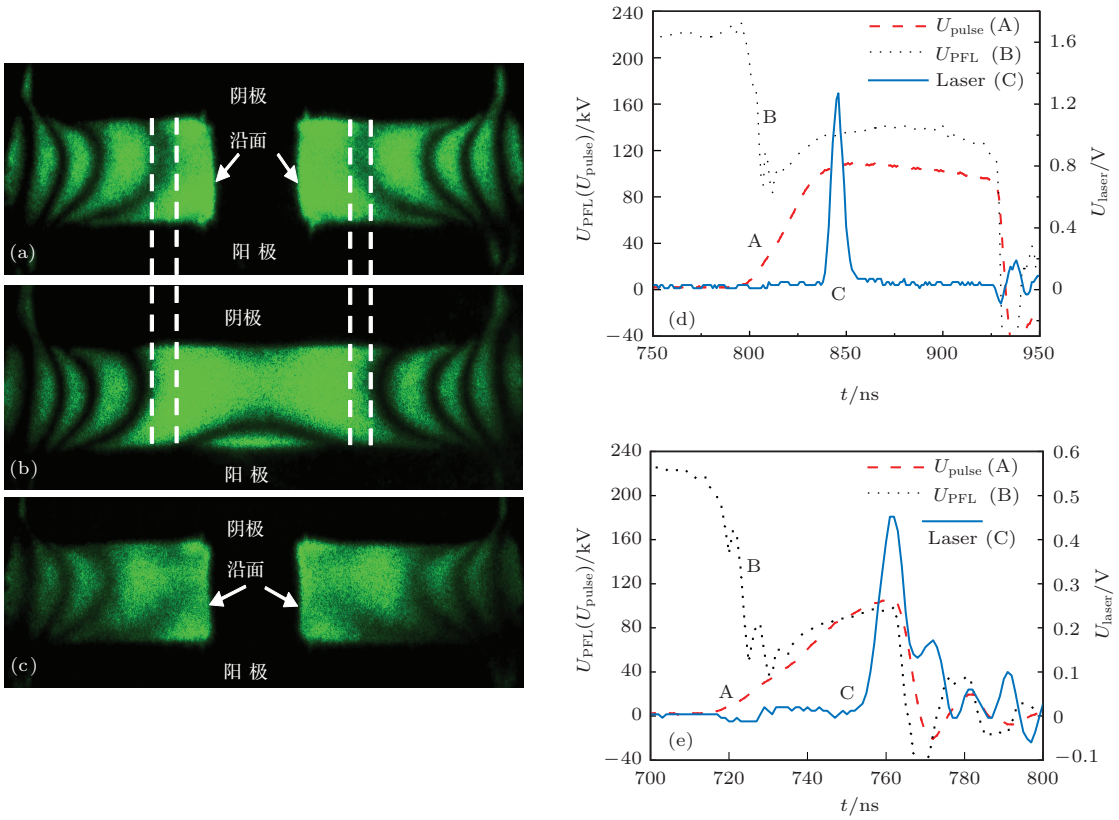

图6 绝缘子表面电场分布的时间分辨测量 (a), (c) 电极之间以及绝缘子沿面附近的光强分布; (b) 电极间无绝缘子时的光强分布; (d), (e) 实验 (a) 和 (c) 中测到的脉冲电压 $U_{\rm pulse}$ (A)、形成线充电电压 $U_{\rm PFL}$(B) 及探测激光信号 (C) 的波形

4 结 论

本工作研制了一套基于克尔电光效应的, 测量真空绝缘子表面电场的实验系统. 并利用该系统实现了纳秒脉冲电压作用下真空绝缘子表面电场的在线测量. 通过对比性实验, 观察到了由于沿面带电所导致的绝缘子沿面电场畸变现象. 同时发现, 闪络发生前靠近阴极区域的绝缘子沿面积累了较多的负电荷. 本工作还对表面电场畸变程度的变化情况进行了时间分辨测量, 发现在脉冲电压的持续作用下, 表面电场畸变程度不断加剧, 并最终导致沿面闪络. 真空绝缘子表面电场在线测量系统的建成, 丰富了真空沿面闪络现象的研究手段, 有助于直观地理解纳秒脉冲电压作用下绝缘子沿面闪络的物理机理. 下一步计划用马赫-曾德干涉仪代替目前现有的相位差检测系统, 从而可以对真空绝缘子表面电场/电荷分布进行更加准确和细致的分析研究.

参考文献

[1] Miller H C 1989 *IEEE Trans. Electrical Insulation* **24** 765

[2] Stern J E, Mercy K R 1971 *IEEE Trans. Electrical Insulation* **EI-6** 90

[3] Vlieks A E, Allen M A, Callin R S, Fowkes W R, Hoyt E W, Lebacqz J V, Lee T G 1989 *IEEE Trans. Electrical Insulation* **24** 1023

[4] Wetzer J M 1997 *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation* **4** 349

[5] Li S T, Huang Q F, Sun J, Zhang T, Li J Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 422 (in Chinese)[李盛涛, 黄奇峰, 孙健, 张拓, 李建英 2010 物理学报 **59** 422]

[6] Zhang G J, Zhao W B, Zheng N, Yu K K, Ma X P, Yan Z 2007 *High Voltage Engineering* **33** 30 (in Chinese) [张冠军, 赵文彬, 郑楠, 于开坤, 马新沛, 严璋 2007 高电压技术 **33** 30]

[7] Anderson R A 1974 *Appl. Phys. Lett.* **24** 54

[8] Blaise G, Gressus C L 1991 *J. Appl. Phys.* **69** 6334

[9] Tumiran, Maeyama M, Imada H, Kobayashi S, Saito Y 1997 *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation* **4** 400

[10] Chalmers I D, Lei J H, Yang B, Siew W H 1995 *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation* **2** 225

[11] Faircloth D C, Allen N L 2003 *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation* **10** 285

[12] Sone M, Toriyama K, Toriyama Y 1974 *Appl. Phys. Lett.* **24** 115

[13] Zahn M 1994 *IEEE Trans. Electrical Insulation* **1** 235

[14] Zhu H L, Liu W L, Zou X B, Wang X X 2011 *High Voltage Engineering* **37** 717 (in Chinse) [朱宏林, 刘微粒, 邹晓兵, 王新新 2011 高电压技术 **37** 717]

On-line measurement on surface electric field of insulator in vacuum based on Kerr effect*

Liu Wei-Li† Zou Xiao-Bing Fu Yang-Yang Wang Peng Wang Xin-Xin

(*State Key Laboratory of Power System, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

(Received 17 November 2013; revised manuscript received 11 January 2014)

Abstract

Kerr effect is defined as an electro-optical physical phenomenon, in which the testing laser can change its polarization state as passing through a Kerr medium stressed by applied field. In this work, an on-line measurement system based on Kerr effect is established to investigate the surface electric field of insulator stressed by nanosecond HV pulse in vacuum which include a HV pulse source, YAG laser, synchronous controlling apparatus, Kerr cell & insulator sample, optical phase shift detecting subsystem. According to comparison experiments, the distortion of insulator surface electric field caused by surface charging is observed. And a time-resolution measurement on this field distortion is also performed.

Keywords: vacuum insulator, surface field, on-line measurement, Kerr effect

PACS: 52.80.Vp, 52.80.–s, 51.50.+v **DOI:** 10.7498/aps.63.095207

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51107064), and the Doctoral Fund of Ministry of Education of China (Grant No. 20100002120007).

† Corresponding author. E-mail: lwl0115@gmail.com