

脉冲方波作用下印制电路板互连系统的击穿特性

孟国栋, 成永红, 酉小广, 吴锴, 刘英

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 通过脉冲直接注入法,研究了印制电路板(PCB)互连系统在脉冲方波作用下的击穿损伤特性,并根据试验结果对脉冲方波作用下的 PCB 互连系统进行了绝缘性能评价. 性能评价中利用了试样的击穿行为符合威布尔分布模型的特点,通过统计分析方法,得到试样在不同电极间距以及注入脉冲宽度时的累积失效概率曲线. 研究表明,当在 PCB 平行互连线间注入方波脉冲时,其线间击穿场强随线间距离的增大而减小,且变化趋势存在两个明显的阶段,同时击穿场强也随注入脉冲宽度的增大而减小. 比较击穿前后的微观形貌特征和击穿场强的变化趋势发现,具有特定结构特征的 PCB 平行互连线间的击穿行为属于“固-气”复合介质的击穿,且绝缘强度不可恢复. 另外,通过威布尔统计方法,对击穿数据进行分析处理,可以得到该类器件在不同状况下的累积失效率曲线,从而为该类器件在方波脉冲下的绝缘性能评价研究提供重要参考.

关键词: 印制电路板;互连系统;脉冲击穿;可靠性;威布尔分布;性能评价

中图分类号: TM855 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)04-0058-06

Breakdown on Interconnect System of Printed Circuit Board under Square Wave Pulse

MENG Guodong, CHENG Yonghong, YOU Xiaoguang, WU Kai, LIU Ying

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Electrical breakdown characteristics of interconnect system on printed circuit board (PCB) under square pulse are investigated with direct pulse injection. And the performance evaluation for the interconnect system insulation is carried out according to the experimental results. Following the fact that the breakdown behaviors agree with Weibull distribution, the curves of cumulative failure rate under the conditions of different insulation gap distances and different injection pulse widths are obtained by statistical analysis. It is indicated that as parallel interconnects on PCB are injected with square pulse, the breakdown field strength increases with the decreasing insulation distance, accompanied with two distinct phases; breakdown field strength also decreases with increasing injection pulse width. Compared with the breakdown characteristics and morphology before and after breakdown, the breakdown behavior between parallel interconnects on PCB is thought as “solid-gas” composite dielectric accompanied by an unrecoverable dielectric strength. The insulation failure rate curves of samples under different conditions are obtained by Weibull statistical methods to provide an important reference for the insulation performance evaluation of similar devices under the impact of square pulse.

Keywords: printed circuit board; interconnect system; electrical breakdown; reliability; Weibull distribution; performance evaluation

印制电路板(PCB)在电气与电子工业中被广泛应用,主要提供电路元件和器件之间的电气连接,是电子设备中电路元件和器件的支撑部件。近年来,随着微电子器件的集成度大幅度提高,电子器件及其互连系统的线宽不断减小,使得导体之间的绝缘距离不断降低,抗过电压或过电流能力不断下降,导致印制电路板上器件以及互连系统的绝缘可靠性问题变得日益突出^[1]。另外,随着越来越多的高功率脉冲武器(NEMP、HPM、UWB等)被应用到现代战争中,这些具有快前沿、高能量密度以及高场强幅值的电磁脉冲会通过各种耦合途径进入军用或民用的电子设备中,导致通讯、交通、雷达等通信控制系统的失效甚至损伤,达到对敌方关键设备的“软杀伤”效果。因此,电子设备在复杂电磁脉冲环境下的可靠性问题得到国内外学者的广泛关注^[2-3]。文献[4-5]通过辐射场耦合法,研究了在核电磁脉冲和高功率微波脉冲耦合场下不同类型的电子系统以及不同工艺的电子器件的损伤效应,总结得到了相关的失效率规律和不同损伤程度对应的电场强度阈值曲线。文献[6-8]主要研究了静电放电(ESD)对微电子器件的潜在性损伤的阈值及其作用机理。文献[9]研究了直流作用下PCB互连系统在低气压环境中的表面绝缘击穿特性,总结了直流作用下互连线间击穿随气压的变化规律和击穿机理。

目前,对于复杂电磁脉冲环境下电子系统的绝缘可靠性研究,主要集中在分立或集成的电子器件以及特定的电子设备上,对于线宽持续减小的PCB上金属互连系统的电磁脉冲失效的研究却不多见。已有的研究表明,在电子系统中分布广泛的PCB金属互连线在电磁脉冲的直接耦合和间接耦合下,极易感应产生较高电压,导致表面绝缘的失效。因此,对于PCB互连系统在复杂电磁脉冲环境下的可靠性问题的研究亟待开展。

本文利用高压快速MOSFET开关,建立了具有单次触发和重复频率脉冲输出的可调脉宽的方波脉冲发生器,系统地研究了在脉冲作用下PCB互连系统的击穿特性随互连线绝缘距离和脉冲宽度等因素的变化规律,结合击穿现象和击穿通道的微观形貌特征,进行了在脉冲作用下PCB互连线间绝缘失效的机理分析。同时,由于固体绝缘的击穿行为服从威布尔分布,提出了基于两参数威布尔分布的互连系统绝缘性能的评价方法,对于研究相关电子器件在复杂电磁脉冲环境下的绝缘性能的评价具有重要意义。

1 试验系统与试验方法

脉冲击穿试验系统主要由试样、电极系统、方波脉冲发生器、电气参数测量设备、数据采集与记录设备等部分组成,如图1所示。研究对象选用以单层印制电路板作为基板的具有不同绝缘距离的金属平行互连线结构,该结构主要由玻璃环氧树脂覆铜箔层压板(FR-4型)、印刷铜箔、阻焊层等部分组成(如图2所示)。其中,FR-4玻璃环氧树脂基板厚度约为1.5 mm,阻焊剂厚度为18~20 μm ,金属铜互连线厚度为35 μm ,截面是上底宽度为350 μm 、下底宽度为400 μm 的梯形结构。

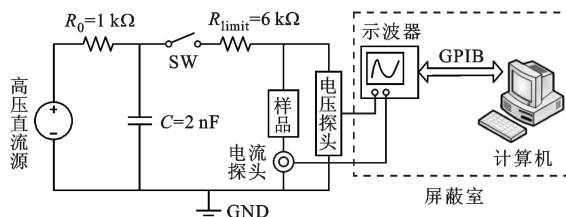


图1 脉冲击穿试验系统图

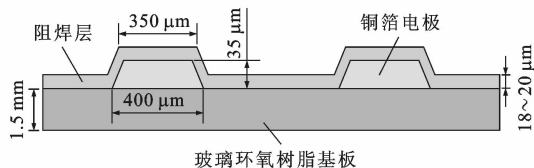


图2 互连线试样结构示意图(剖视)

方波脉冲发生器主要由高压直流电源、快速高压MOSFET开关、储能电容、限流电阻等组成^[10],利用MOSFET开关的快速通断能力产生所需的方波脉冲波形。脉冲源测试结果表明,方波脉冲发生器可以输出电压范围为0~10 kV的单次触发以及重复频率方波脉冲,脉冲上升时间约为100 ns,脉冲平顶宽度为0.2~1 μs ,重复频率为1~3 kHz,其开启、关断以及重复频率的调节均可通过触发脉冲控制器控制。

为研究脉冲方波作用下PCB互连线线间的击穿特性,本文依据国军标《半导体器件电磁脉冲损伤阈值试验方法》的规定,采用方波脉冲直接注入法进行试验。为了保证方波脉冲注入时击穿发生在两平行线间的区域,设计了如图3所示的电极结构,平行互连线两端的“圆弧”结构可以有效地避免由端部的电场集中引起的“边缘效应”。电压测试端是直径为3 mm的镀银层,可以为试验电压测试提供可靠的欧姆接触。击穿时刻的判断为平行互连线间发生贯

穿性放电,通过试样的电流骤增,记录此时的电压和电流值作为击穿电压和击穿电流。

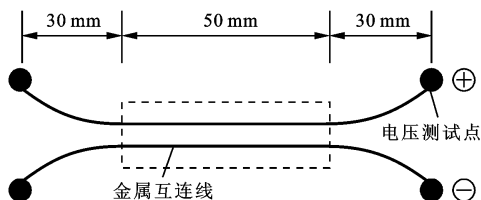


图3 金属电极的物理结构图(俯视)

2 互连线间距对击穿特性的影响

图4所示为平均击穿电场强度 E_{avg} 随互连线间距 S 的变化规律,其中 $E_{\text{avg}} = U_d / S$ (U_d 为击穿时刻的电压值)。

由图4可知,总的来说平均击穿场强随电极间距 S 的减小而增大。当电极间距 S 小于 0.2 mm 时,击穿场强显著增大;当电极间距 S 大于 0.2 mm 时,击穿场强与线间距呈现准线性关系。击穿电压的变化趋势则相反。该临界点的出现是由于两平行电极间的介质表面难免吸附微粒、水分等杂质,且随着电极间距的减小,杂质在击穿过程中的影响越来越大,当电极间距减小到与表面杂质的尺寸可比的情况时,会存在一个临界点。在该临界点两侧的尺度下,击穿电压的变化趋势有明显差异,从而导致击穿阈值的突变。该临界点并非定值,它与样品的材料种类以及样品的表面状态有关。

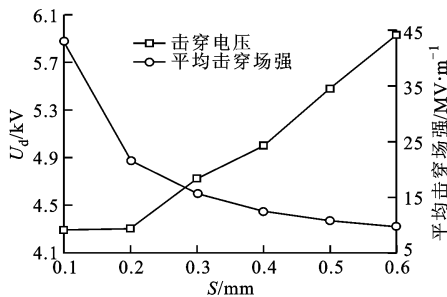


图4 击穿阈值随线间距的变化曲线

3 脉冲宽度对击穿特性的影响

图5为在一定重复频率(100 Hz)方波作用下,平均击穿场强随注入脉冲宽度的变化曲线。从图中可以看到:当脉冲宽度在 0.2~10 μs 时,互连线试样的线间击穿场强基本不随脉冲宽度的变化而变化,击穿场强都在 15 MV/m 左右;当脉宽达到 100 μs 时,击穿场强显著下降到 13.7 MV/m;当直接施

加直流电压时,击穿电压值更是降至 10.05 MV/m,说明互连线间的击穿场强与注入脉冲宽度有关。脉宽为 10 μs 是一个临界点,当脉宽小于 10 μs 时,击穿特性受脉冲宽度的影响较小;当脉冲宽度大于 10 μs 时,击穿场强随脉冲宽度的增加而显著降低,说明互连线的线间击穿具有脉冲宽度效应。平行电极间的击穿是场击穿,存在一个建立过程,需要一定的建立时间,并且场强越高,击穿建立过程就越快。这可能是造成线间击穿脉冲宽度效应的主要原因,并且 10 μs 可能是击穿建立的特征时间。

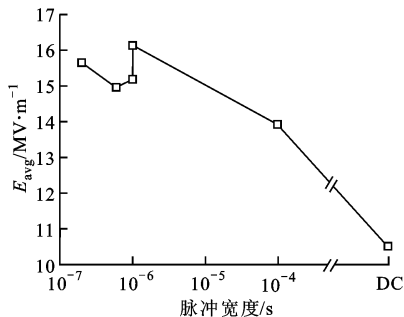


图5 击穿场强随注入脉冲宽度的变化曲线

4 复合介质的电气击穿

图6为不同互连线间距的击穿电压随击穿次数的变化曲线。每组试样的第一次击穿电压最大,随着击穿次数的增加,击穿电压逐渐下降,并且在大约连续5次击穿后,击穿电压稳定在一个较低的水平。这充分说明了该击穿过程是不可恢复的,因此不可能是简单的沿面击穿过程。

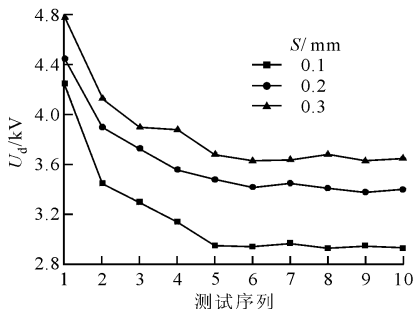


图6 击穿电压随击穿次数的变化曲线

根据介质物理理论^[11],固体的击穿属于弱点击穿,即当试样两端施加方波脉冲时,击穿会发生在两平行线间的绝缘薄弱区域。同时,对发生第一次击穿后的试样进行微观形貌分析(形貌分析采用奥林巴斯 Olympus BX51M 型金相显微镜进行,放大倍数为 1 000),得到击穿损伤形貌如图7所示。从图中可

以观察到,破坏最为严重的是两电极间的内边缘位置,而且只有在该击穿点附近存在明显的烧蚀现象,两电极间的击穿通道并没有明显的烧蚀或破坏痕迹.结合图 2 以及相应的 Ansys 电场仿真计算图(如图 8 所示)可知,当在 PCB 两平行互连线之间施加一定电场时,梯形覆铜线的底边夹角处(电极-介质-基板三结合点)的电场最为集中,是介质绝缘的薄弱点.当施加场强达到绝缘介质的击穿场强时导致体积击穿,并在介质层垂直方向上产生击穿通道,同时伴随着光、热、声音的产生.当脉冲电压逐步上升到一定值时,放电继续发展直至贯穿绝缘介质表面气体层,形成持续导通,最终导致击穿的发生.因此,互连线间的击穿过程实际上是一个“固-气”复合介质的击穿.由于存在两种凝聚态,所以复合介质的绝缘虽然不可恢复,但仍保持一定的绝缘水平.实际的击穿通道并不是与互连线垂直的最短沿面击穿距离,可能是因为在在线间的绝缘介质表面中存在微粒、水分等杂质导致了通道的变化.

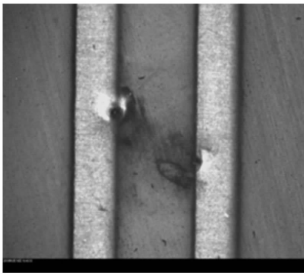


图 7 试样损伤形貌分析

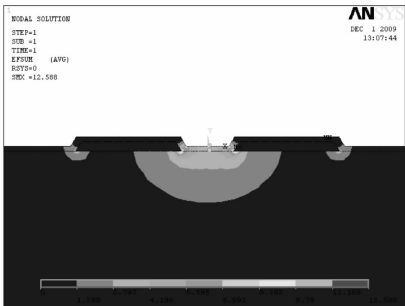


图 8 试样结构的电场仿真图

5 击穿场强威布尔分析

威布尔分布是可靠性分析及寿命检验的理论基础,在可靠性理论中被广泛使用,大多数电子、机械、机电产品的寿命都可以认为服从威布尔分布.在给定的产品故障数据的情况下,采用威布尔分析方法,研究部件的使用寿命及其与可靠性之间的关系.

威布尔分布在绝缘击穿寿命统计方面也得到了广泛应用,特别适用于绝缘材料的击穿统计和分析,它反映了材料在一定电场强度下的击穿概率或在一定时间的失效概率^[12-13].根据上节的分析可知,由于 PCB 互连系统结构的特殊性,其击穿行为属于复合介质的电气击穿,击穿发生在互连线间绝缘的薄弱位置,且击穿后绝缘水平不可恢复,符合威布尔分布模型.因此,本文利用两参数威布尔分布进行击穿数据的分析和处理,进而评定互连系统绝缘的可靠性水平.

两参数威布尔分布表达式为

$$F(E) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{E}{\alpha}\right)^\beta\right)$$
 (1)

变形后可写成

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(E)} = \beta(\ln E - \ln \alpha)$$
 (2)

式中: $\ln \ln \frac{1}{1 - F(E)}$ 与 $\ln E$ 在直角坐标系下成线性关系; α 和 β 分别为威布尔函数的尺度参数和形状参数, α 反映了当击穿概率 $F(E)$ 为 63.2%时电场强度的大小, β 反映坐标系中直线斜率的大小^[14].通过试验得到各组试样的击穿场强的威布尔分布参数如表 1 所示.通常 α 被看作其击穿场强的大小,故尺度参数越大,说明绝缘性能越好,试样在脉冲方波作用下的可靠性越高,反之亦然.表 1 所示特征击穿场强 α 随着互连线线间距离的增大而减小,且间距越大特征场强的幅值变化越小,这与体击穿电场强度随绝缘厚度的变化趋势一致.同时,威布尔形状参数 β 表征击穿数据的分散性大小,即 β 值越大击穿数据的分散性越小,说明样品的质量或工艺越好^[15].比较表 1 所示的形状参数 β 可知,当 β 值在 7~14 时,与线间距离的大小没有关系,表明样品的工艺稳定性比较好.

表 1 击穿场强的威布尔分布参数

S/mm	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
$\alpha/\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$	42.96	21.55	15.78	12.53	10.98	9.91
β	7.10	14.45	8.46	10.09	7.68	8.04
$E/\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$	11.74	11.39	5.31	5.03	3.31	3.15
置信水平/%	95					

注: E 为可靠率等于 99.99%下的电场强度.

结合表 1 的威布尔分布参数,利用数学软件 Matlab 统计工具箱中的 wblcdf 函数,计算出其累积概率分布图,然后利用极大似然法进行威布尔拟

合,得到不同试样在脉冲作用下的累积概率分布及其拟合曲线,如图9所示.对图9中拟合得到的累积概率分布函数进行求逆处理,从而得到置信水平为95%时样品的失效率为0.01%(即可靠率为99.99%)对应的最大注入方波脉冲幅值(如表1所

示).例如,在高功率方波(200 ns 脉宽,正极性脉冲)作用下,间距为0.1 mm的单层PCB铜互连线线间的耐压可靠率为99.99%时,其对应的典型注入脉冲场强为11.74 MV/m.

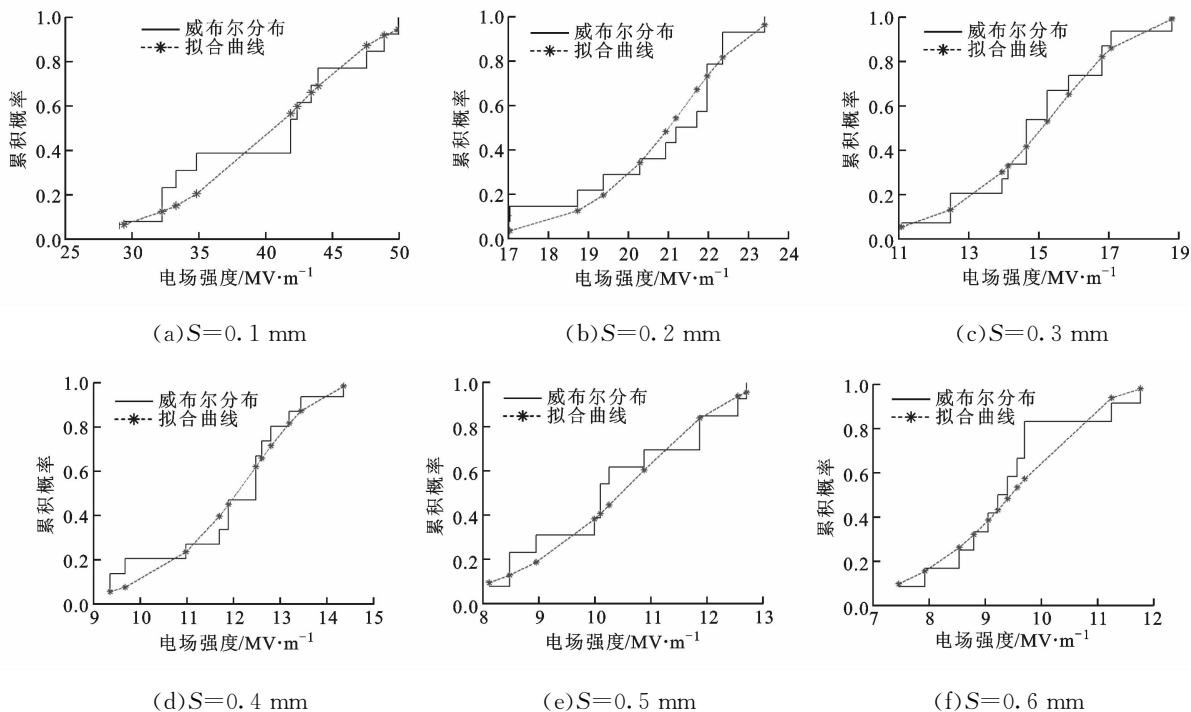


图9 击穿场强的威布尔累积概率分布及拟合曲线

6 结论

本文通过试验研究了PCB互连系统在脉冲方波作用下的电气击穿特性,提出了基于威布尔分布模型的方波脉冲作用下的绝缘性能评价方法,得出如下结论.

(1)脉冲方波作用下互连系统的线间击穿属于复合介质击穿,包括表面涂覆绝缘层的体击穿以及沿介质层的沿面击穿,并且试样的损伤效应与注入脉冲源的特性参数和互连线的物理尺寸等均有关系.

(2)互连系统的击穿场强随着线间距的减小而增大,当线间距小于0.2 mm后,试样的击穿场强基本保持稳定,不再随间距的减小而增大.但是,当线间绝缘距离达到亚微米、深亚微米尺度时,击穿场强随间距的变化还有待进一步研究.

(3)对于同一互连线结构,当脉冲宽度在亚微秒尺度时,试样的击穿场强与脉冲宽度的关系不大,当脉冲宽度达到微秒级以上时,击穿场强随着脉冲宽度的增加而增大,即互连线结构具有一定的脉冲宽

度效应.

(4)互连系统的电气击穿符合威布尔分布模型,通过威布尔统计分析可知,该类型试样在可靠率为99.99%时的击穿场强至少可达到3.15 MV/m,且随着线间绝缘距离的减小,其击穿场强显著提高.

参考文献:

- [1] LEONE M. Radiated susceptibility on the printed-circuit-board level: simulation and measurement [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(3): 471-478.
- [2] HAAKE K, TER HASEBORG J L. Determination of coupling of UWB pulses into complex PCB line structures using multi-alignment measurements [C] // 2008 IEEE International Symposium on EMC. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1-5.
- [3] HWANG S M, HONG J, HAN S M, et al. The susceptibility of microcontroller device with coupling caused by UWB-HPM [C] // Progress in Electromagnetics Research Symposium Proceedings. Cambridge, MA, USA: IEEE, 2009: 1269-1272.

- [4] CAMP M, GARBE H, NITSCH D. Influence of the technology on the destruction effects of semiconductors by impact of EMP and UWB pulses[C]//2002 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 87-92.
- [5] NITSCH D, CAMP M, SABATH F, et al. Susceptibility of some electronic equipment to HPEM Threats[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(3): 380-389.
- [6] 陈京平,刘尚合,谭志良,等. ESD脉冲对集成电路损伤效应的实验研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 121-124.
CHEN Jingping, LIU Shanghe, TAN Zhiliang, et al. Experimental study of the damage effects of integrated circuits stressed with ESD pulse[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 121-124.
- [7] 陈京平,刘尚合,谭志良,等. 集成电路方波脉冲注入损伤效应实验研究[J]. 军械工程学院学报, 2006, 18(2): 12-19.
CHEN Jingping, LIU Shanghe, TAN Zhiliang, et al. Damage effects of integrated circuits injected by square wave pulse[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2006, 18(2): 12-19.
- [8] 祁树锋,杨洁,刘红兵,等. ESD对微电子器件造成潜在性失效的研究综述[J]. 军械工程学院学报, 2006, 18(5): 27-31.
QI Shufeng, YANG Jie, LIU Hongbing, et al. Review of experiment investigation latent failure of ESD on microelectric device[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2006, 18(5): 27-31.
- [9] DU B, LIU Y, LIU H. Effect of low pressure on tracking failure of printed circuit boards[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(5): 1379-1384.
- [10] 孟国栋,成永红,吴锴,等. 重复频率和脉宽可调的高压方波发生器[C]//2010年电工测试技术学术交流会. 北京:中国电工技术学会, 2010: 207-210.
- [11] 金维芳. 电介质物理学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002: 161-162.
- [12] 杨丽君,廖瑞金,李剑,等. 用逐步升压法和 Weibull 参数估计油纸绝缘寿命[J]. 高电压技术, 2004, 30(6): 4-8.
YANG Lijun, LIAO Ruijin, LI Jian, et al. Estimating lifetime of oil-paper insulation under electrical aging conditions using step-stress tests and Weibull parameters[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(6): 4-8.
- [13] DISSADO L A, FORTHERGILL J C, WOLFE S V, et al. Weibull statistics in dielectric breakdown: theoretical basis, applications and implications[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1984, 19(3): 227-233.
- [14] PELISSOU S, BENCAAND P, GROSS L H. Electrical properties of metallocene polyethylene[C]//2004 International Conference on Solid Dielectrics: Volume 1. New York, NY, USA: IEEE, 2004: 466-469.
- [15] 王乐,徐曼,孙颖,等. 纳米银/环氧树脂复合物的电阻和击穿特性研究[J]. 绝缘材料, 2006, 39(4): 37-40.
WANG Le, XU Man, SUN Ying, et al. Study on the resistance and electrical breakdown properties of nano silver/epoxy resin composite[J]. Insulating Materials, 2006, 39(4): 37-40.

[本刊相关文献链接]

TiO₂/Al₂O₃-Al₂O₃-TiO₂/Al₂O₃ 绝缘结构的真空沿面闪络特性. 2012, 46(2): 93-99.

特高压交流套管尾部均压球结构优化研究. 2012, 46(2): 88-92.

变压器现场超高频局部放电信号的时域特征分析. 2011, 45(12): 82-86.

溅射金膜对氧化铝陶瓷纳秒脉冲真空沿面闪络的影响. 2011, 45(8): 97-101.

用于电力变压器局部放电定位的超声波相控阵传感器的研制. 2011, 45(4): 93-99.

环氧及其复合材料在变压器油中的快脉冲闪络特性. 2010, 44(10): 83-87.

正脉冲电压下水中流注放电特性的研究. 2009, 43(2): 96-100.

基于模型识别的并联电容器保护. 2008, 42(12): 1506-1509.
环氧及其复合材料气固界面快脉冲闪络特性. 2008, 42(6): 703-707.

过模高功率太赫兹表面波振荡器优化设计. 2008, 42(12): 1531-1536.

支持向量机在电力变压器故障诊断中的应用. 2007, 41(6): 722-726.

(编辑 杜秀杰)