第 49 卷 第 2 期：577-589 高电压技术 Vol.49, No.2: 577-589
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221334

温度对碳化硅器件封装用有机硅弹性体陷阱特性的影响

孟 伟[1]，李学宝[1]，张金强[1]，赵志斌[1]，崔 翔[1]，王 亮[2]
（1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室，北京 102206;
2. 北京智慧能源研究院先进输电技术国家重点实验室，北京 102209）

摘 要：有机硅弹性体作为一种高分子聚合物，因具有良好的耐高温性能、绝缘强度以及与芯片的相容性，已在碳化硅功率器件中得到应用。目前国内外针对有机硅弹性体在高温下的绝缘特性研究较少，而介质的陷阱特性与其绝缘性能密切相关，研究有机硅弹性体的陷阱特性及其受温度的影响，对于该种灌封材料在碳化硅器件封装中的应用具有重要意义。为此，采用表面电位衰减法(surface potential decay，SPD)测量了有机硅弹性体在温度20~250 ℃范围内的表面电位衰减曲线，提取了不同温度下有机硅弹性体的陷阱电荷能级密度分布和迁移率等微观参数，建立了有机硅弹性体迁移时间、迁移率、电位衰减时间常数随温度变化的拟合表达式，分析了温度对有机硅弹性体陷阱特性的影响机制，确定了有机硅弹性体陷阱捕获电荷数量最大时的温度阈值。此外，结合有机硅弹性体陷阱特性，从载流子输运的角度解释了该材料电导率、迁移率以及深浅陷阱的电位衰减时间常数之差随温度变化的规律，并通过分析有机硅弹性体的微观结构特征，解释了该材料陷阱特性的极性效应。相关结果可以为不同温度下有机硅弹性体绝缘特性的认知提供支撑。

关键词：高压大功率碳化硅器件；高温；有机硅弹性体；陷阱特性；表面电位衰减

Trap Characteristics with Their Temperature-dependence of Silicone Elastomer for Encapsulation in SiC Devices

MENG Wei[1], LI Xuebao[1], ZHANG Jinqiang[1], ZHAO Zhibin[1], CUI Xiang[1], WANG Liang[2]
(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, Beijing Institute of Smart Energy,
Beijing 102209, China)

Abstract: Silicone elastomer, as a kind of high molecular polymer, has been applied in SiC power module because of its fine high-temperature resistance, insulation strength and internal compatibility with chips. At present, the studies on the insulation properties of silicone elastomers at high temperature are rarely available in the literature, and the trap characteristics of the dielectric are closely related to its insulation properties. Therefore, it is of great significance to study the trap characteristics of silicone elastomer and its temperature-dependence for the application of this kind of encapsulant in SiC device packaging. In this paper, the surface potential decay (SPD) method is used to measure the surface potential decay curve of silicone elastomer in the temperature range of 20~250 ℃. The microscopic parameters such as trap energy level, trapped charge density, and mobility of silicone elastomer at different temperatures are extracted, and the fitting expressions of silicone elastomer mobility and potential decay time constant with temperature are established. The influence mechanism of temperature on the trap characteristics of silicone elastomer is analyzed, and the temperature threshold for the maximum quantity of trapped charges in silicone elastomer is determined. In addition, combined with the trap characteristics of silicone elastomer, the patterns of the conductivity, mobility and the potential decay time constant difference between deep and shallow trap of the material changing with temperature are explained from the perspective of carrier transport. The polarity effect of the trap characteristics of silicone elastomer is explained through its microstructure. The

基金资助项目：国家电网有限公司总部科技项目(碳化硅高压封装绝缘关键技术)(5500-202158438A-0-0-00)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (Key Technology of SiC High Voltage Packaging Insulation) (5500-202158438A-0-0-00).

relevant results can provide support for the cognition of the insulation characteristics of silicone elastomer at different temperatures.

Key words: high voltage and high power silicon carbide device; high temperature; silicone elastomer; trap characteristics; surface potential decay

0 引言

碳化硅器件因具有更高的功率密度、更优越的开关性能等优势，将成为未来柔性直流输电装备中的核心器件[1-2]。但是，其性能提升所面临的更高阻断电压以及内部高温环境为传统灌封封装技术带来了挑战。灌封的目的主要是在导体之间增加额外的绝缘保护，并且可以使芯片和金属互连部分免受恶劣环境如湿气、化学腐蚀等影响。为了充分发挥高压大功率碳化硅器件的运行潜力,需要可以耐受200 ℃以上并且其绝缘性能在长期运行下不发生劣化的灌封材料。

碳化硅器件灌封封装材料的选取需要在热稳定性和与器件中其他材料的相容性之间权衡[3-4]。硬封装材料如玻璃、陶瓷和聚酰亚胺等具有良好的耐高温性能和介电性能。但这些材料面临的主要问题是其热膨胀系数与器件内部其他封装材料失配，致使高温下的热机械应力严重降低器件运行可靠性[4-5]。而有机硅凝胶作为传统的软封装材料，具有良好的相容性，却无法满足高压大功率碳化硅器件在更高温度下运行的需求[6]。相比于以上材料，有机硅弹性体固化前流动性好(粘度为 11 300 mPa·s)，固化的线收缩率低(<0.1%)，对器件内部的复杂结构可以充分填充。同时其弹性模量和热膨胀系数适中，与器件内部其他材料的相容性好。此外，有机硅弹性体具有优良的耐高温性能和介电强度，即使在 250 ℃高温下进行长达 14 d 的老化测试后，依然保持稳定的击穿场强和介电常数，是碳化硅器件理想的灌封材料[7-9]。

当前已有研究机构使用有机硅弹性体作为碳化硅器件灌封的封装材料[10-14]。然而在高压大功率碳化硅器件的实际运行工况下，封装材料所承受正极性重复方波电压的局部高场会引起电荷在周围聚集。电荷激发导致局部电场畸变，最终造成绝缘介质劣化甚至绝缘击穿现象的出现[15-16]。而高温运行环境会进一步增加绝缘隐患，并且使得这一过程更加难以分析。

美国雅典娜公司的 Katsis 等在对比不同种高温灌封材料的可用性时，给出了有机硅弹性体的介电强度，同时测量了该材料在 220 ℃长期运行下的耐局部放电能力[8]。美国弗吉尼亚理工大学的 Yao 等测量了有机硅弹性体在在室温至 250 ℃下的介电强度和宽温度宽频率的下的介电特性[17]。法国图卢兹大学的 Locatelli 等使用二氧化硅对有机硅弹性体进行填充，并测量了其在频率范围为 10^{-1}～10^{6} Hz、温度范围为–150～300 ℃内的介电特性。该材料在室温至 250 ℃下的介电强度也通过在球球电极结构下的击穿实验获得[3]。华北电力大学的刘东明等测量了有机硅弹性体在频率范围 10^{-2}~10^{7} Hz、温度范围 20~280 ℃内的介电特性[18]，并得到了温度对有机硅弹性体介电特性的影响规律。

以上研究为有机硅弹性体在碳化硅器件的高温高压环境中应用提供了支撑。但截止至目前，国内外针对有机硅弹性体绝缘特性的研究尚未深入开展，关于温度特别是高温环境对有机硅弹性体绝缘特性的内在影响机制尚不明确。而绝缘材料内部陷阱特性、迁移率等微观参数可作为介质绝缘特性认知的基础。因此，针对有机硅弹性体陷阱特性及温度影响的研究，对于该材料绝缘特性认知及碳化硅器件封装绝缘设计具有重要意义。

目前表征绝缘材料电学微观参数特性的方法有表面电位衰减法、电声脉冲法、热刺激去极化电流法和热扩散法、激光感应压力脉冲法等[19-21]。其中，表面电位衰减法实验原理简单、易于实现，用作描述介质表面电荷消散特性的常用手段。同时该方法能表征绝缘材料的陷阱特性，获取载流子迁移率等微观参数[22-23]。通过设置不同的温度组进行实验，则可了解温度对材料载流子的入陷、脱陷、迁移过程以及宏观上输运特性的影响。

为此，本文使用表面电位衰减法(surface potential decay，SPD)对有机硅弹性体表面电位衰减特性进行了测量，提取了其在 20~250 ℃内的陷阱电荷能级密度分布、迁移率、电位衰减时间常数等微观参数。解释了有机硅弹性体陷阱以及陷阱特性极性效应的成因，分析了温度对有机硅弹性体陷阱特性的影响机制，详细描述了深浅陷阱电荷数密度受温度影响的变化过程，为不同温度下有机硅弹性体

绝缘特性的认知提供支撑。

1　样品准备与实验平台介绍

1.1　样品准备

图 1 展示了有机硅弹性体在碳化硅器件中的灌封应用。本实验所使用的有机硅弹性体属于加成型双组份室温硫化硅橡胶，A 组分的主要成分为基胶(乙烯基封端的聚二甲基硅氧烷)与催化剂，B 组分的主要成分为同种基胶与交联剂(甲基含氢聚硅氧烷)。将 A、B 组分混合后，两种功能性官能团在催化剂的作用下发生加成反应，交联形成三维网状结构，固化的化学反应原理式[24]如图 2 所示。

有机硅弹性体的制备过程共分 3 步：混合、脱气与固化。首先使用自动点胶装置将 A、B 组分以质量比 1:1 的方式均匀混合后倒入附录 A 图 1 所示的模具中。然后将模具放入真空箱中进行脱气，脱气步骤采用文献[25]中多次泄压的脱气曲线。最后将模具放置于 120 ℃恒温箱内进行固化，设置固化时间为 2 h。固化完成的有机硅弹性体样品为厚度 1.5 mm、半径 10 cm 的半透明圆形弹性体，如附录 A 图 1 中白色区域所示。对该样品进行热重分析(thermogravimetric analysis，TGA)的测试结果如附录 A 图 2 所示，可知有机硅弹性体初始分解温度为 277 ℃，5%质量分解温度为 412 ℃，具有很好的耐高温特性。

1.2　实验平台及测量

本文的 SPD 实验平台在借鉴前人工作[26]的基础上增加了高温模块，以实现不同温度下有机硅弹性体表面电位衰减曲线的测量。如图 3 所示，电荷注入装置由针栅电极组成，其中针电极为直径 500 μm、曲率半径 10 μm 的钨钢针，通过电晕放电产生电荷。栅网电极为直径 100 mm、目数为 100 的金属网，作用为在栅电极与地电极之间建立均匀电场，使产生的电荷均匀洒在样品表面[27]，减少由于电荷分布不均匀而增大的表面电荷水平迁移过程。调整针电极与栅网电极对样品表面的垂直距离分别为 2 cm 和 1 cm。使用有源静电计作为样品表面电位的测量设备，调整静电计探头位置距离样品表面垂直高度为 3 mm。

实验开始前，调整各个固定悬臂的臂长使针电极、栅网电极和静电探头的中心位置距离支柱轴心距离相等，则可以实现电荷注入位置中心与电位测量位置中心重合。将有机硅弹性体样品放置于具有

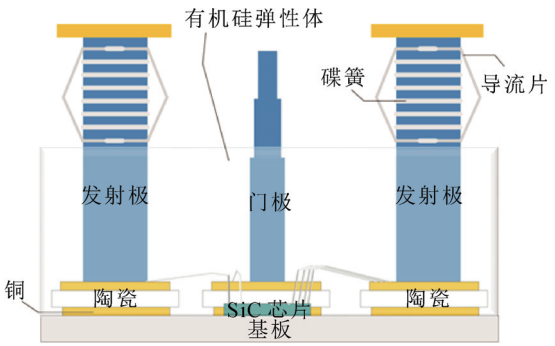


图 1　有机硅弹性体用于碳化硅器件灌封示意图

Fig.1　Schematic diagram of silicone elastomer used in SiC device encapsulation

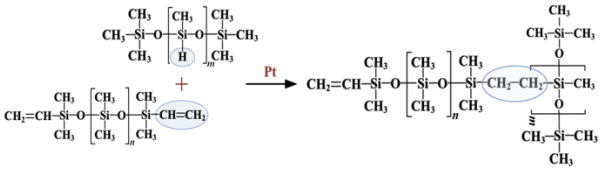


图 2　有机硅弹性体固化的加成反应化学式

Fig.2　Chemical formula of addition reaction for silicone elastomer curing

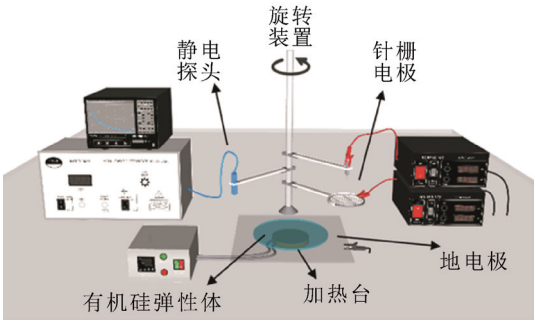


图 3　表面电位衰减实验平台示意图

Fig.3　Schematic diagram of surface potential decay experimental platform

良好导电性以及导热性的金属铜电极中心位置，进行接地后在下方布置加热台。通过控制加热台的温度，可以实现样品表面温度在室温至 250 ℃之间调节。电荷注入装置和表面电位测量装置被固定在同一支柱上，使得两装置的切换过程控制在 1 s 内完成，则可以减少实验组之间由于衰减速率不同所引起的样品表面电位初值测量不一致所带来的影响。实验过程中，向针电极与栅网电极同时施加幅值分别为 10 kV 与 6 kV 的直流电压，加压 1 min 后旋转固定支柱，使表面电位测量开始，测量结果将储存在示波器当中。分别改变针栅电极电压的极性，重复上述过程即可获得正负极性表面电位衰减曲线。

2 实验结果及分析

2.1 不同温度下的电位衰减特性

图 4 中给出了有机硅弹性体不同温度下负极性电位绝对值的衰减曲线。结果表明，随着时间增加，样品表面电位绝对值呈下降趋势，当温度>50 ℃时，衰减速度显著增加。

以在 50 ℃下有机硅弹性体表面正负极性电位衰减测量结果为例，采用式(1)所示的双势陷阱模型对电位的衰减特性进行拟合[28]。结果如图 5 所示，拟合优度分别为 0.9977 和 0.9850。

$$\varphi(t)=\varphi_0+A\exp\left(-\frac{t}{\tau_a}\right)+B\exp\left(-\frac{t}{\tau_b}\right) \tag{1}$$

式中：$\varphi(t)$为随时间变化的样品表面电位，V；A 为浅陷阱分量，V；τ_a 为由浅陷阱电荷脱陷引起电位衰减的时间常数，后文统一称为浅陷阱时间常数，s；

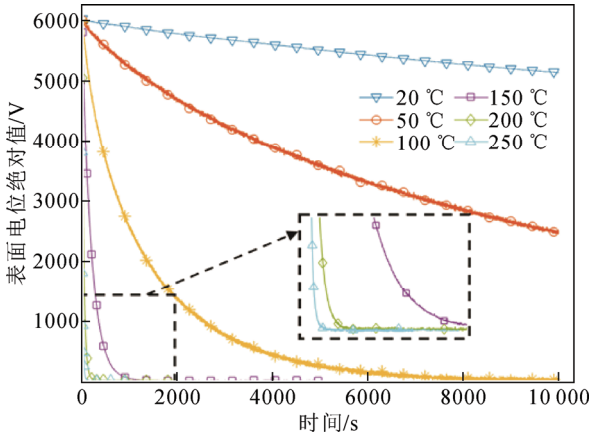


图 4 不同温度下样品表面负极性电位衰减曲线

Fig.4 Negative potential decay curve of sample surface at different temperatures

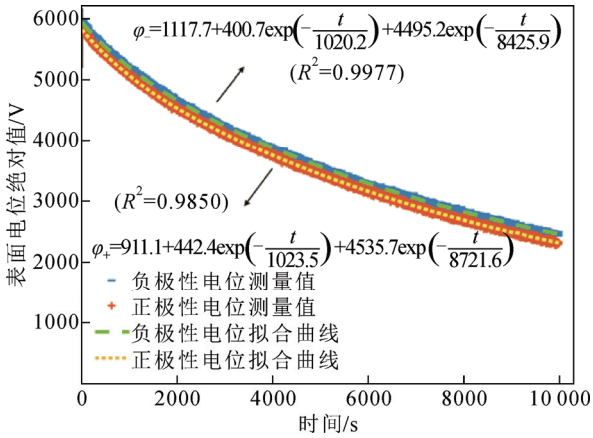


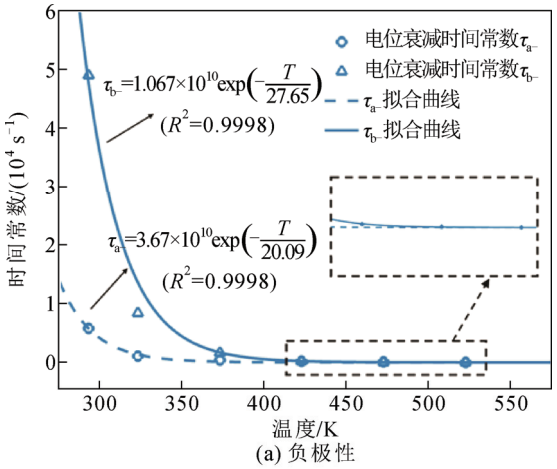
图 5 50 ℃下不同极性表面电位衰减及拟合曲线

Fig.5 Surface potential decay and fitting curve of different polarities at 50 ℃

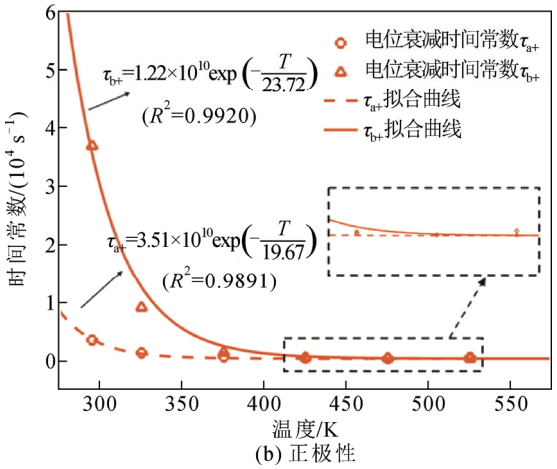
B 为深陷阱分量，V；τ_b 为由深陷阱电荷脱陷引起电位衰减的时间常数，后文统一称为深陷阱时间常数，s。

采用式(1)对实验中所有温度组的电位衰减结果进行了拟合。结果如附录表 A1 所示，拟合优度均高于 0.998，表明测量结果均可以较好地满足双势陷阱模型。需要说明的是，在所有温度组中负极性的衰减曲线始终位于正极性上方，且负极性初始电位的绝对值大于正极性。如图 6 所示，根据测量结果获得了正负极性的深、浅陷阱时间常数随温度的变化趋势以及拟合曲线。结果表明，随温度升高，时间常数均减小，且相同温度下 τ_{a-}和 τ_{a+}分别小于 τ_{b-}和 τ_{b+}(下标+、−表示正、负极性)。

当温度升高到 150 ℃时，深、浅陷阱时间常数之差逐渐减小。随着温度继续升高，正负极性深、浅陷阱时间常数最终几乎维持在相同的量级。这表示被深陷阱和浅陷阱捕获的电子、空穴都将以一个近似的时间常数消散。该现象与文献[29]中有机硅



(a) 负极性



(b) 正极性

图 6 正负极性电位衰减时间常数随温度变化图

Fig.6 Time constant of positive and negative potential decay versus temperature

凝胶电位衰减时间常数随温度变化的趋势类似。

2.2　不同温度下的陷阱分布特性

本实验中有机硅弹性体表面电位产生的原因是在高电场下通过电晕放电注入的电荷被材料的陷阱所捕获。当外加电场撤离时，电荷注入过程停止，被捕获的电荷开始脱陷，表面电位随时间衰减起始[30-31]。

Simmons 等人从能量结构的角度分析了空间电荷的稳定性[21, 32]，假设电荷主要通过体传导的方式消散且一经消散后不再注入，其中陷阱能级深度 E_T 由电荷随时间 t 的脱陷过程决定，表示为

$$E_T(t) = k_B T \ln(\upsilon_{ATE} t) \tag{2}$$

式中：k_B、T 和 ν_{ATE} 分别是玻耳兹曼常数、热力学温度和逃逸频率，逃逸频率 $\nu_{ATE}=10^9$ Hz。而不同能级下被陷阱捕获的电荷数密度可以进一步通过式(3)计算[33]。

$$Q(t) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{elL}\left|\frac{\mathrm{d}\varphi(t)}{\mathrm{d}t}\right| t \tag{3}$$

式中：ε_0 为真空介电常数；ε_r 为材料的相对介电常数；e 为单位电荷量，C；l 为固定的穿透深度，本文取值为 1 μm；L 为样品厚度，mm；t 为衰减时间，s。

借助式(2)和式(3)，可以得到有机硅弹性体不同温度下陷阱电子能级密度分布如图 7 所示。结果表明随着温度上升，陷阱电子的中心能级升高，能级分布范围抬升。20~250 ℃下陷阱电子的中心能级分别为 0.79、0.83、0.90、0.95、0.99、1.05 eV。陷阱电子中心能级的密度呈现先增大后减小的趋势，在温度为 150 ℃时到达峰值。需要补充的是，在陷阱空穴的能级密度分布中也观察到了相同的趋势，其中心能级密度同样在 150 ℃时到达峰值。可知随温度升高，有机硅弹性体陷阱捕获电子、空穴的最大数量先增大后减小，在 150 ℃附近时，有机硅弹性体对正负极性载流子的捕获数量最大。

如图 8 所示，由实验结果进一步得到有机硅弹性体不同温度下深、浅陷阱电荷能级密度分布。结果表明随着温度的升高，深、浅陷阱电荷的中心能级升高，能级分布范围逐渐抬升。深陷阱电荷中心能级密度先增大后减小，且在减小过程中伴随着浅陷阱电荷中心能级密度的增大，当温度进一步升高至 250 ℃时，深、浅陷阱电子密度同时减小。

为了对比有机硅弹性体陷阱电子、空穴的极性差异，以及详细描述其深、浅陷阱特性受温度影响的变化规律，附录图 A3、A4 进一步给出 100、150、200 ℃下，总陷阱电子、空穴的能级密度分布以及

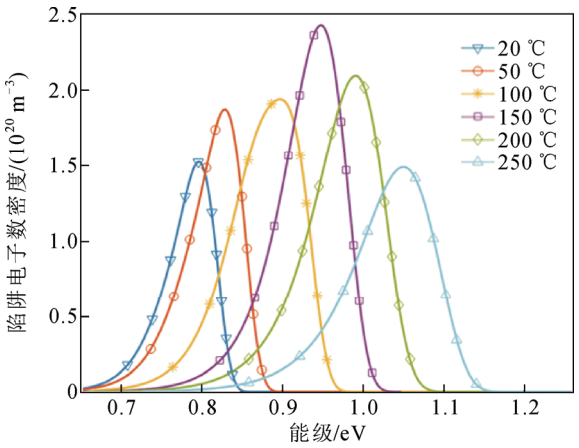


图 7　不同温度下陷阱电子能级与密度分布

Fig.7　Trapped electrons energy level and density distribution at different temperatures

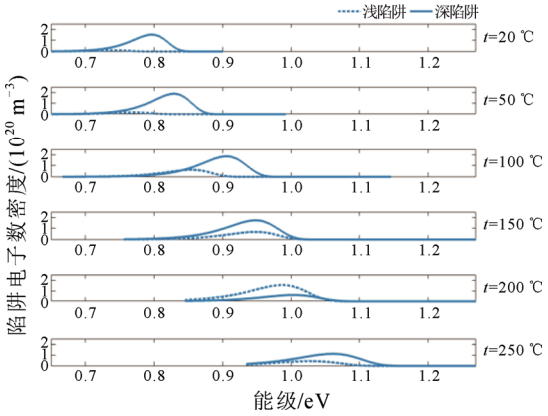


图 8　不同温度下深浅陷阱电子能级与密度分布

Fig.8　Deep and shallow trapped electrons energy level and density distribution at different temperatures

对应温度组下的深、浅陷阱电荷能级密度分布。

如附录图 A3 所示的结果表明，陷阱电子的中心能级以及能级分布范围略高于陷阱空穴的能级分布，其中心能级处的电荷数密度大于陷阱空穴中心能级处的电荷数密度。值得说明的是，在所有温度组中均观察到了相同的现象，因此有机硅弹性体的陷阱对电子捕获作用强于空穴，显示出陷阱特性的极性差异。

由实验结果得知，有机硅弹性体在 20~100 ℃时深陷阱电子中心能级密度整体大于深陷阱空穴，浅陷阱电子中心能级密度小于浅陷阱空穴。对比附录图 A4(a)、(b)、(c)可以发现，有机硅弹性体中陷阱电子、陷阱空穴的密度对比，以及深陷阱电荷、浅陷阱电荷的密度对比，是随温度是不断变化的。当温度升高至 150 ℃时,深陷阱电子中心能级密度

首先开始减小，空穴密度仍然增大，其中包含着电子向浅陷阱迁移、空穴向深陷阱迁移的过程。最终使深、浅陷阱电子密度分别与深、浅陷阱空穴密度的大小关系与此前相反。当温度持续升高到 200 ℃时，深陷阱电子、空穴密度显著减小，其中浅陷阱电子密度大大增加，超过了深陷阱电子密度。浅陷阱空穴密度略微增大，却仍然维持较低水平。

2.3 不同温度下的迁移率

一般来说，载流子迁移率是定量表征材料中电荷传输特性的重要参数。假设所有电荷在 t=0 s 时注入到样品表面，则载流子迁移率的计算式[34]可以表示为

$$\mu = \frac{L^2}{\varphi(0)t_{\mathrm{T}}} \tag{4}$$

式中：t_{T} 为迁移时间，s，由文献[35-36]中方法计算得出，指载流子在 t=0 s 时从样品表面迁移到接地电极所需的实际时间。

根据式(4)计算得出不同温度下载流子迁移时间、迁移率以及对应拟合曲线分别如表 1 和图 9、图 10 所示。其中 $t_{\mathrm{T-}}$和 $t_{\mathrm{T+}}$分别表示由负、正极性电位衰减曲线测量结果所得到的迁移时间。表示结果表明，随着温度升高正负极性载流子迁移时间逐渐减小，迁移率逐渐增大，且负极性载流子迁移率在相同温度下始终小于正极性载流子迁移率。

表 1 不同温度下迁移时间与迁移率

Table 1 Migration time and mobility at different temperatures

t/℃	$t_{\mathrm{T-}}$/s	$t_{\mathrm{T+}}$/s	μ_-/(m^2·V^{-1}·s^{-1})	μ_+/(m^2·V^{-1}·s^{-1})
20	1754	1175	2.14×10^{-13}	3.19×10^{-13}
50	436	409	8.60×10^{-13}	9.17×10^{-13}
100	251	214	1.49×10^{-12}	1.75×10^{-12}
150	171	125	2.19×10^{-12}	3.00×10^{-12}
200	51	36	7.35×10^{-12}	1.04×10^{-11}
250	17	7	2.21×10^{-11}	5.36×10^{-11}

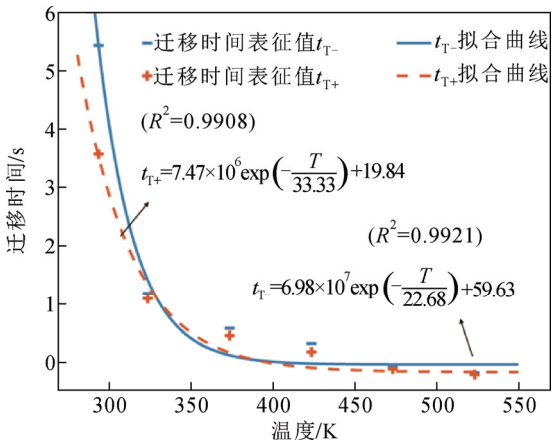


图 9 迁移时间随温度变化图

Fig.9 Diagram of migration time versus temperature

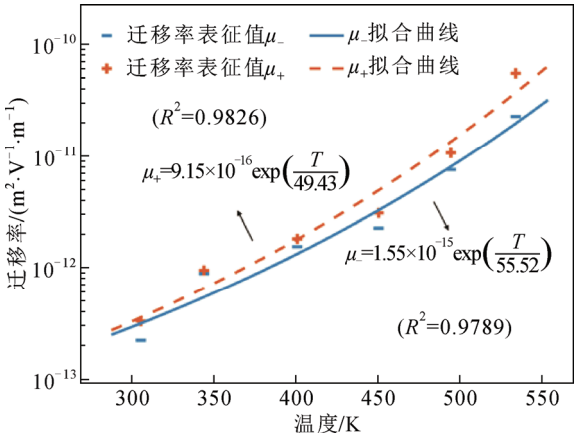


图 10 迁移率随温度变化图

Fig.10 Diagram of mobility versus temperature

3 分析与讨论

3.1 有机硅弹性体陷阱以及陷阱特性极性差异的成因

有机硅弹性体在原料生产、交联过程中会不可避免地产生杂质和结构缺陷，使固化后材料内部形成能量水平处于禁带的局域态，即载流子陷阱[37-38]。陷阱根据成因不同又可区分为物理陷阱与化学陷阱[39-40]，分别对应陷阱能级较小的浅陷阱与能级较大的深陷阱[41-42]。有机硅弹性体中物理陷阱主要为局部混乱的物理结构对电子、空穴所形成的复杂吸引力，其中包括固化时未完全交联大分子的随机排列以及聚合物长链无序的弯曲折叠；化学陷阱为生产制备过程中引入的添加剂、杂质以及支链上不同官能团形成的不对称结构所造成的局部亲和势差异。

根据实验结果，在不同温度组中均观察到了有机硅弹性体陷阱电子密度大于空穴的现象。其陷阱特性的极性差异，相比于文献[29]中有机硅凝胶的结果呈现相反的趋势。这是有机硅弹性体的特殊微观结构，造成的材料内部电子、空穴电导特性差异所引起的。

如图 11 所示，有机硅弹性体与有机硅凝胶的红外光谱在波数为 900~700 cm^{-1}、1100~1000 cm^{-1} 以及 1260~1250 cm^{-1} 附近均出现了明显的吸收峰[43]。这些吸收峰分别对应相同的化学基团，表明有 2 种材料的化学组成基本相同。不同的是，有机硅弹性体红外光谱在波数为 3100~3000 cm^{-1} 范围未出现明显吸收峰，而该吸收峰对应了基胶 V-PDMS 中用于

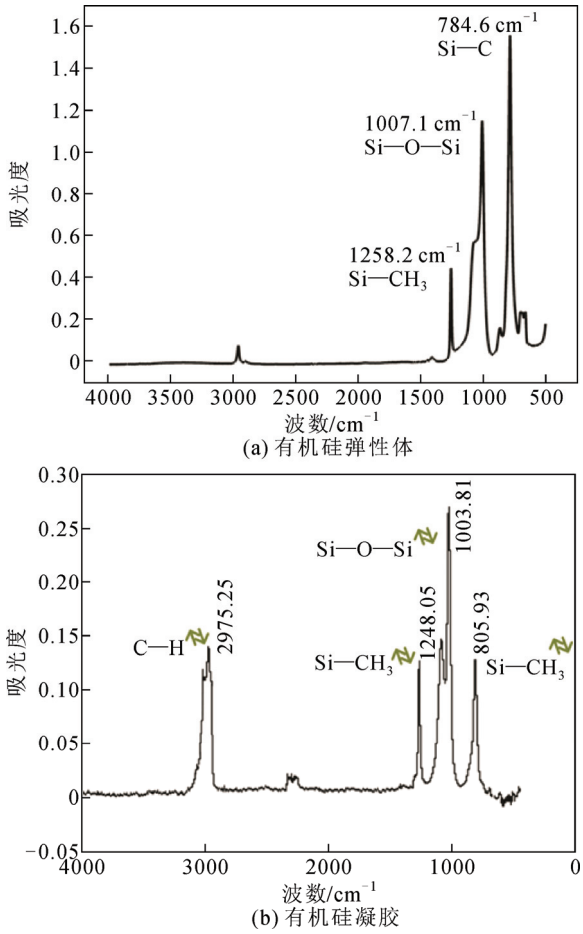


图 11　有机硅弹性体与有机硅凝胶红外光谱图

Fig.11　Infrared spectrogram of silicone elastomer and silicone gel

加成反应的═CH_2和═CH 基团的伸缩振动[44-45]。结果表明，有机硅弹性体固化时硅氢加成反应完全、交联程度更高；有机硅凝胶固化后仍存在未充分交联的基胶 V-PDMS。

图 12 中给出了有机硅弹性体和有机硅凝胶的微观结构示意图。加成型室温硫化硅橡胶固化前基胶 V-PDMS 的链长(聚合度 n)一般为 50~200[46]，且用于交联的乙烯基官能团一般位于端基位置。因此，长链 V-PDMS 倾向于分别加成到不同主链的交联剂甲基含氢聚硅氧烷上，与交联剂共同形成网状结构；短链 V-PDMS 倾向于加成到同一主链或距离较近的不同主链的交联剂上，位于交联剂周围。这使得固化所形成的三维交联网络中存在局部空隙，如图 12 中空白区域所示。但有机硅凝胶中还存在大量未交联的 V-PDMS，通过渗透压的作用下保持在交联网络的内部[47-48]，则在一定程度上填补了这些空隙。

由于导带边缘波函数的链间特性和价带波函

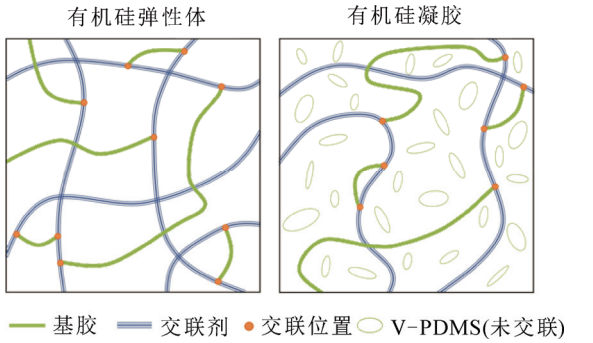


图 12　有机硅弹性体与有机硅凝胶的结构对比示意图

Fig.12　Schematic diagram of structural comparison between silicone elastomer and silicone gel

数的链内特性[39,49]，电子更容易向低密度区域移动，被链间的电子陷阱捕获，而空穴则更容易被分子链周围的空穴陷阱捕获。因此在本实验中，有机硅弹性体因链间特性的效应更大，表现出在不同温度组下对电子更强的吸引作用。

3.2　温度对有机硅弹性体陷阱特性的影响机制以及不同温度下有机硅弹性体的能带分布

通过电晕放电产生的电荷被有机硅弹性体内部的陷阱所捕获，而陷阱电荷从热振动或外界吸收获得足够能量时，脱陷过程就会发生[32, 50]。随着温度升高，有机硅弹性体内部载流子热运动加剧，使更多的自由电荷因碰撞而损失大量能量后被更深的陷阱捕获。当温度进一步升高时，载流子的热运动程度继续提高，碰撞损失能量后会在极短时间恢复一定能量，即使被深能级陷阱捕获也会吸收足够的能量后脱陷。因此，有机硅弹性体载流子在高温状态下，其内能维持在较高水平，被深陷阱捕获的机率减小，反而更容易短时被浅陷阱捕获，脱陷后直接到达导带的数量也大大增加。

因此在 2.2 节的实验结果中，出现了有机硅弹性体总陷阱电荷中心能级密度随温度上升先增大后减小的现象。并且，有机硅弹性体总陷阱电荷数密度与深陷阱电荷数密度随温度变化的趋势大致相同。总陷阱电荷数密度减小过程与深陷阱电荷向浅陷阱转化过程在同一温度下发生。

造成这一现象的主要原因是当温度达到某一阈值温度前后，有机硅弹性体内部载流子的输运过程发生宏观变化。因此本文定义有机硅弹性体中心能级陷阱电荷数密度到达最大值时的温度(150 ℃)为阈值温度，称作深浅陷阱电荷起始转化温度 t_s，该温度的引入有助于区分在高温影响下载流子的输

运过程发生关键转变的温度节点。同时，此阈值温度反映了有机硅弹性体在受温度影响下陷阱捕获电荷数量的最大值。

见图 13，在小于分解温度的温度范围内变化时，有机硅弹性体的物理化学结构不发生改变，可以认为其陷阱的能级分布以及数量都不会发生变化。由电晕放电注入有机硅弹性体内部的电子则因能量不同，被不同能级位置处的陷阱捕获，或以自由电荷的形式迁移至导带。

根据 IRC 以及双势陷阱理论[21, 32]，在单位时间内被陷阱捕获的载流子脱陷传导至导带，将引起电荷消散。该过程通过电位变化的形式被记录下来，可以理解为电荷消散对电位衰减所带来的“贡献”。随着温度升高，有机硅弹性体陷阱电荷的能级范围不断抬升，代表了开始出现载流子被更深能级位置的陷阱捕获，以及吸收足够热量后从这些陷阱中脱陷的事件。

当 $t<t_s$(如图 13(a)所示)，有机硅弹性体导带处有少量自由电子，深、浅陷阱电子能级位置较低。当温度升高时，电子向更深能级处注入，导带处电子密度减小。当 $t\approx t_s$ 时(如图 13(b)所示)，陷阱电子密度达到最大值，此时导带位置的电子虽然能量水平提升，但是密度降低至最小。原来较低能级位置的陷阱电荷数密度减小，代表陷阱电荷从该能级位置脱陷传导至导带的数量减小。原因为更多的载流子因吸收足够能量，在不被这些能级位置处的陷阱捕获的情况下直接成为自由载流子而消散。当 $t>t_s$ 时(如图 13(c)所示)，随着温度升高，陷阱电荷在能带模型中的位置就越深，同时也越靠近本征费米能级处。高温下深陷阱电荷数密度大幅减小的原因为，即使系统足以提供载流子从深陷阱脱陷传导至导带的能量，也还要避免传导过程中因碰撞造成能量损失后重新入陷于低能级陷阱，以浅陷阱形式脱陷的影响，因此越深能级位置处的陷阱电荷数密度越小。

3.3 有机硅弹性体电导率、迁移率、电位衰减时间常数之差的温度影响规律解释

由以上分析得知，有机硅弹性体的陷阱特性反映该种介质内部载流子的输运特性，可以为理解其他电学微观参数受温度影响的机制提供参考。以图 14 所示的负极性下有机硅弹性体的微观参数为例，利用在温度影响下有机硅弹性体载流子的陷阱特性，可以解释电导率、迁移率、电位衰减时间常数的实验结果。需要说明的是，图 14 中的不同温度下

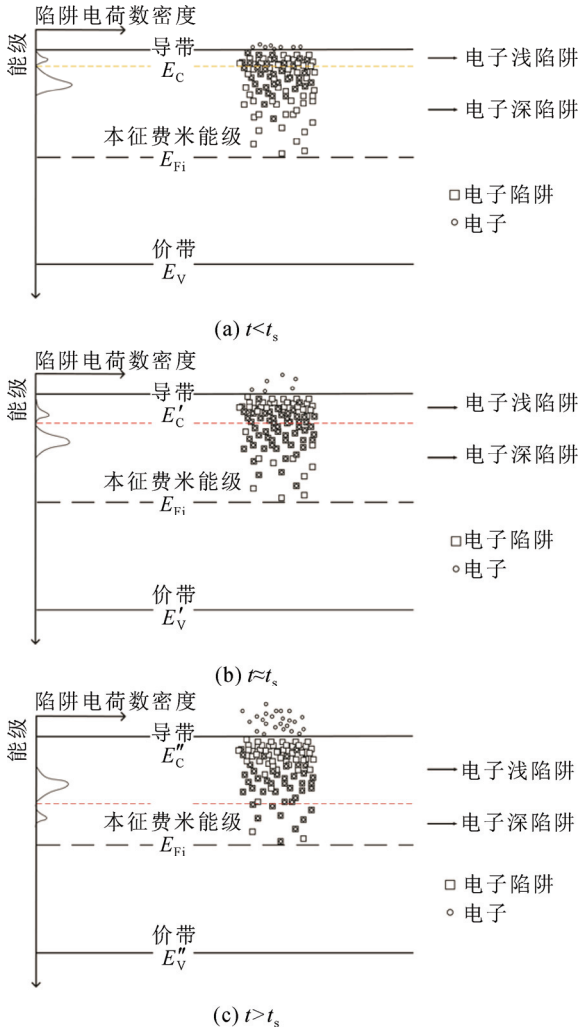


图 13 不同温度下电子与电子陷阱的能带分布示意图

Fig.13 Schematic diagram of electron and trapped electron distribution in energy band at different temperatures

电导率的测试结果是根据宽频介电谱分析仪测量得到的[18]。

一般来说，材料的电导率可以反映单位时间载流子的迁移能力，与载流子的数量与运动有关。如图 14 所示，有机硅弹性体的电导率随着温度升高呈现整体上升的趋势，仅在 140、160、180 ℃温度组之间出现了先下降后上升的测量结果。由有机硅弹性体陷阱特性可知，随着温度升高，被捕获的载流子数目增多，但因为系统内能提升，增大了自由载流子的运动能力，使电导率增大。当温度升高到 150 ℃附近时，陷阱捕获了大量碰撞后损失能量的载流子，而该温度下自由载流子迁移能力的提升对电导率贡献有限，造成电导率减小。当温度进一步升高，入陷电荷数量减少意味着自由载流子增多，而载流子的运动能力继续提升，使电导率增大。

而有机硅弹性体迁移率随温度升高也呈现整体上升的趋势。根据迁移率计算模型，迁移率是根据电荷注入过程结束后，载流子从样品表面迁移到接地电极所需的实际时间得到的[34]。随着温度升高，即使在 20~150 ℃出现了更多载流子被陷阱捕获的过程，但载流子迁移能力提升，被陷阱捕获后吸收足够能量而脱陷所需的时间也减小。因此第一批载流子可以更快地达到地电极，出现了迁移率随温度升高持续增大的结果。

至于深、浅陷阱时间常数随温度变化所表现出的电位衰减快慢，反映了有机硅弹性体内陷阱电荷的入陷、脱陷状态。深浅陷阱时间常数之差则可以半定量的描述这两种输运状态之间的差异。由图 14 及附录表 A1 可知有机硅弹性体深浅陷阱时间常数之差是随温度升高而逐渐减小，当温度>150 ℃时，深浅陷阱时间常数近似相等，其物理意义为分别被深浅陷阱捕获的电荷以近似相同的状态脱陷消散。造成这一现象的根本原因是，高温使被深、浅陷阱捕获的电荷，在近似的时间内吸收足够的能量而脱陷。

4　结论

本文针对高压大功率碳化硅器件灌封用有机硅弹性体开展研究，搭建了带有温度模块的表面电位衰减实验平台，使用表面电位衰减的实验方法，测量了有机硅弹性体在 20~250 ℃下正负极性表面电位衰减特性曲线。主要结论如下：

1）提取了不同温度下有机硅弹性体的陷阱电荷能级密度分布、电位衰减时间常数以及迁移率等微观参数，获得了有机硅弹性体相关参数随温度变化的影响规律。在此基础上，建立了迁移时间、迁移率和表面电位衰减时间常数随温度变化的拟合公式。

2）分析了温度对有机硅弹性体陷阱特性的影响规律和机制，确定了有机硅弹性体陷阱捕获电荷数量最大时的温度 t_s。结果表明：有机硅弹性体陷阱捕获电荷数量最大时的温度为 150 ℃。总陷阱电荷数密度随温度变化的趋势主要受深陷阱电荷的影响。随温度升高，深、浅陷阱能级范围抬升，深陷阱电荷数密度先增大后减小，其中伴随着载流子在深浅陷阱之间的转移过程。

3）不同温度下有机硅弹性体陷阱电子中心能级密度大于陷阱空穴中心能级密度，且电子的迁移率小于空穴。当 $t<t_s$ 时，电子与空穴相比深陷阱电荷数密度大而浅陷阱电荷数密度小，而当 $t\geq t_s$ 时，情况相反。有机硅弹性体微观结构中的局部空隙，使导带边缘波函数的链间特性作用更明显，因而提供了大量的电子陷阱，是有机硅弹性体吸附电子数量大于空穴的原因。

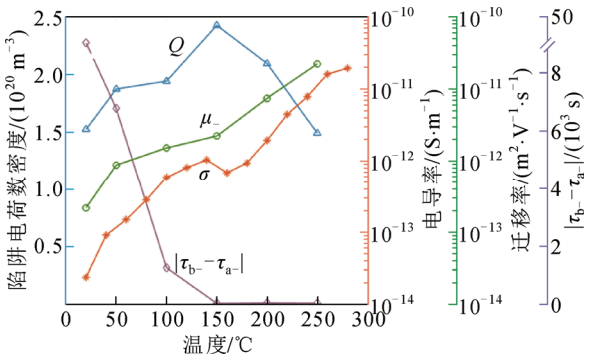


图 14　陷阱电子数密度与电导率、迁移率、深浅陷阱时间常数差随温度变化图

Fig.14　Temperature dependence of trapped electron density, conductivity, mobility, and time constant difference between deep and shallow trap

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] 刘增训，游沛羽，周勤勇. 适用高比例新能源系统广域消纳的输电技术研究综述[J]. 电力工程技术，2020，39(5)：59-70.
LIU Zengxun, YOU Peiyu, ZHOU Qinyong. Transmission technologies adapting to power systems with widely-consumed high-proportion renewable energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 59-70.

[2] 盛　况，董泽政，吴新科. 碳化硅功率器件封装关键技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报，2019，39(19)：5576-5584.
SHENG Kuang, DONG Zezheng, WU Xinke. Review and prospect of key packaging technologies for silicon carbide power devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5576-5584.

[3] LOCATELLI M L, KHAZAKA R, DIAHAM S, et al. Evaluation of encapsulation materials for high-temperature power device packaging[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(5): 2281-2288.

[4] KHAZAKA R, MENDIZABAL L, HENRY D, et al. Survey of high-temperature reliability of power electronics packaging components[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2456-2464.

[5] SCOFIELD J D, MERRETT J N, RICHMOND J, et al. Performance and reliability characteristics of 1200 V, 100 A, 200 ℃ half-bridge SiC MOSFET-JBS diode power modules[J]. Additional Conferences (Device Packaging, HiTEC, HiTEN, & CICMT), 2010, 2010: 289-296.

[6] DO M T, AUGÉ J L, LESAINT O. Breakdown field in silicone gel under needle-plane geometry[C]// 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2008). Yokkaichi, Japan: IEEE, 2008: 222-225.

[7] YAO Y Y, CHEN Z, LU G Q, et al. Characterization of encapsulants for high-voltage high-temperature power electronic packaging[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2012, 2(4): 539-547.

[8] KATSIS D C, ZHENG Y Q. Development of an extreme temperature range silicon carbide power module for aerospace applications[C]// 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference. Rhodes, Greece: IEEE, 2008: 290-294.

[9] 李文艺，王亚林，尹 毅. 高压功率模块封装绝缘的可靠性研究综述[J]. 中国电机工程学报，2022，42(14)：5312-5326.
LI Wenyi, WANG Yalin, YIN Yi. Review of packaging insulation reliability for high voltage power module[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5312-5326.

[10] CHEN Z, YAO Y Y, ZHANG W L, et al. Development of a 1200 V, 120 A SiC MOSFET module for high-temperature and high-frequency applications[C]//The 1st IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications. Columbus, USA: IEEE, 2013: 52-59.

[11] NING P Q, LAI R X, HUFF D, et al. SiC wirebond multichip phase-leg module packaging design and testing for harsh environment[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(1): 16-23.

[12] CHEN Z, YAO Y Y, BOROYEVICH D, et al. A 1200-V, 60-A SiC MOSFET multichip phase-leg module for high-temperature, high-frequency applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(5): 2307-2320.

[13] NING P Q, YUAN T S, KANG Y H. The engineering design of SiC hybrid switch series[C]//2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Beijing, China: IEEE, 2019: 1337-1342.

[14] NING P Q, LAI R X, HUFF D, et al. 250 ℃ SiC power module package design[R]. Warrendale, USA: SAE International, 2008.

[15] 杨 昊，李学宝，赵志斌，等. 正极性重复脉冲电压下有机硅凝胶–PI 界面的沿面放电特性[J]. 高电压技术，2022，48(2)：724-735.
YANG Hao, LI Xuebao, ZHAO Zhibin, et al. Surface discharge characteristics of interface between silicone gel and PI under positive repetitive pulse voltage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 724-735.

[16] YANG Z D, LI X B, MENG X R, et al. Influence of frequency on the surface discharge characteristics of PEEK under positive repetitive square voltage[J]. High Voltage, 2020, 5(6): 669-678.

[17] YAO Y Y. Thermal stability of Al_2O_3/Silicone composites as high-temperature encapsulants[D]. Blacksburg, USA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2014: 31-57.

[18] 刘东明，李学宝，项佳宇，等. 高压 SiC 器件封装用有机硅弹性体高温宽频介电特性分析[J]. 电工技术学报，2021，36(12)：2548-2559.
LIU Dongming, LI Xuebao, XU Jiayu, et al. Analysis of high temperature wide band dielectric properties of organic silicone elastomer for high voltage SiC device packaging[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(12): 2548-2559.

[19] 张冶文，潘佳萍，郑飞虎，等. 固体绝缘介质中空间电荷分布测量技术及其在电气工业中的应用[J]. 高电压技术，2019，45(8)：2603-2618.
ZHANG Yewen, PAN Jiaping, ZHENG Feihu, et al. Distribution measurement for space charge in solid insulation medium and its application in electrical industry[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2603-2618.

[20] 许旭日，高 宇，李 敬，等. 基于等温表面电位衰减法预测不同厚度的聚乙烯纳米复合材料直流击穿场强[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2864-2872.
XU Xuri, GAO Yu, LI Jing, et al. Prediction of thickness-dependent DC breakdown strength of polyethylene nanocomposite estimated with surface potential decay measurement[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2864-2872.

[21] SIMMONS J G, TAYLOR G W. High-field isothermal currents and thermally stimulated currents in insulators having discrete trapping levels[J]. Physical Review B, 1972, 5(4): 1619-1629.

[22] RYCHKOV A, KUZNETSOV A, GULYAKOVA A, et al. Surface potential decay of corona charged polyethylene films: influence of deep surface traps[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(6): 1933-1937.

[23] 刘孟佳，周福升，陈铮铮，等. 采用等温表面电位衰减法表征 LDPE 与 HDPE 内陷阱的分布特性[J]. 中国电机工程学报，2016，36(1)：285-291.
LIU Mengjia, ZHOU Fusheng, CHEN Zhengzheng, et al. Characterizing trap distribution in LDPE and HDPE based on isothermal surface potential decay measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 285-291.

[24] 刘东明. 高压碳化硅器件灌封用耐 200 ℃以上的硅弹性体绝缘特性研究[D]. 北京：华北电力大学，2021：3-19.
LIU Dongming. Research on insulation characteristics of silicone elastomer resistant to 200℃ or higher temperature for packing high voltage SiC devices[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2021: 3-19.

[25] 项佳宇，李学宝，崔 翔，等. 高压大功率 IGBT 器件封装用有机硅凝胶的制备工艺及耐电性[J]. 电工技术学报，2021，36(2)：352-361.
XU Jiayu, LI Xuebao, CUI Xiang, et al. Preparation process and breakdown properties of silicone gel used for the encapsulation of IGBT power modules[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(2): 352-361.

[26] 葛 扬. 冲击电压下纳米改性变压器油中电荷输运机理的研究[D]. 北京：华北电力大学，2019：62-63.
GE Yang. Research on the charge transport mechanism in transformer oil-based nanofluid under impulse voltage[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2019: 62-63.

[27] 欧阳本红，赵健康，周福升，等. 基于等温表面电位衰减法的直流电缆用低密度聚乙烯和交联聚乙烯陷阱电荷分布特性[J]. 高电压技术，2015，41(8)：2689-2696.
OUYANG Benhong, ZHAO Jiankang, ZHOU Fusheng, et al. Characteristics of trapped charge distribution in LDPE and XLPE used in DC cables based on isothermal surface potential decay method[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2689-2696.

[28] DAS-GUPTA D K. Decay of electrical charges on organic synthetic polymer surfaces[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990, 25(3): 503-508.

[29] XU J Y, LI X B, CUI X, et al. Trap characteristics and their temperature-dependence of silicone gel for encapsulation in IGBT power modules[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 7(3): 614-621.

[30] ZHANG B Y, ZHANG G X. Interpretation of the surface charge decay kinetics on insulators with different neutralization mechanisms[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(10): 105.

[31] KINDERSBERGER J, LEDERLE C. Surface charge decay on insulators in air and sulfurhexafluorid-part I: simulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(4): 941-948.

[32] SIMMONS J G, TAM M C. Theory of isothermal currents and the direct determination of trap parameters in semiconductors and insulators containing arbitrary trap distributions[J]. Physical Review B, 1973, 7(8): 3706-3713.

[33] LI J Y, ZHOU F S, MIN D M, et al. The energy distribution of trapped charges in polymers based on isothermal surface potential decay model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(3): 1723-1732.

[34] DU B X, DU Q, LI J, et al. Carrier mobility and trap distribution dependent flashover characteristics of epoxy resin[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(2): 466-471.

[35] ZHOU F S, LI J Y, YAN Z M, et al. Investigation of charge trapping and detrapping dynamics in LDPE, HDPE and XLPE[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(6): 3742-3751.

[36] DU B X, CHANG R, JIANG J P, et al. Temperature-dependent surface charge and flashover behaviors of oil-paper insulation under impulse with superimposed DC voltage[J]. IEEE Access, 2018, 6: 63087-63093.

[37] TEYSSEDRE G, LAURENT C. Charge transport modeling in insulating polymers: from molecular to macroscopic scale[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(5): 857-875.

[38] 雷清泉，刘关宇. 工程电介质的基础物理知识与学习思考方法[J]. 中国电机工程学报，2018，38(16)：4898-4917.
LEI Qingquan, LIU Guanyu. Basic physical knowledge of engineering dielectrics and learning thinking method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4898-4917.

[39] SERRA S, TOSATTI E, IARLORI S, et al. Interchain electron states in polyethylene[J]. Physical Review B, 2000, 62(7): 4389-4393.

[40] MIZUTANI T. Behavior of charge carriers in organic insulating materials[C]// IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Kansas City, USA: IEEE, 2006: 1-10.

[41] MEUNIER M, QUIRKE N, ASLANIDES A. Molecular modeling of electron traps in polymer insulators: chemical defects and impurities[J]. The Journal of Chemical Physics, 2001, 115(6): 2876-2881.

[42] MEUNIER M and QUIRKE N. Molecular modeling of electron trapping in polymer insulators[J]. The Journal of Chemical Physics, 2000, 113(1): 369-376.

[43] 项佳宇. 高压大功率 IGBT 器件封装用有机硅凝胶电气特性的研究与应用[D]. 北京：华北电力大学，2022：25-26.
XU Jiayu. Research and application on the electrical characteristics of silicone gel for the encapsulant of high-voltage high-power IGBT modules[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2022: 25-26.

[44] 胡皆汉，郑学仿. 实用红外光谱学[M]. 北京：科学出版社，2011：364-368.
HU Jiehan, ZHENG Xuefang. Practical infrared spectroscopy[M]. Beijing, China: Science Press, 2011: 364-368.

[45] 翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱分析[M]. 2 版. 北京：化学工业出版社，2010：304-309.
WENG Shifu. Fourier transform infrared spectroscopy analysis[M]. 2nd ed. Beijing, China: Chemical Industry Press, 2010: 304-309.

[46] 冯圣玉. 有机硅高分子及其应用[M]. 北京：化学工业出版社，2004：140-144.
FENG Shengyu. Silicone polymer and its application[M]. Beijing, China: Chemical Industry Press, 2004: 140-144.

[47] YAWORSKI H G, BUKOVNIK R. Silicone gel technology for power cable accessories[C]// 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No. 01CH37294). Atlanta, USA: IEEE, 2001: 837-842.

[48] FINIS G. Das Verhalten von Silikongel unter hohen elektrischen Feldstärken[M]. Kassel, Germany: Kassel University Press, 2005: 6-13.

[49] ANDRÉ J M, LADIK J. Electronic structure of polymers and molecular crystals[M]. New York, USA: Springer, 1975: 505-545.

[50] MIZUTANI T, IEDA M. Carrier transport in high-density polyethylene[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1979, 12(2): 291-296.



孟　伟
1997—，男，硕士
研究方向为高压大功率电力电子器件封装技术
E-mail: w.meng@ncepu.edu.cn

MENG Wei



李学宝(通信作者)
1988—，男，博士，副教授，博导
主要从事高压大功率电力电子器件封装的研究工作
E-mail: lxb08357@ncepu.edu.cn

LI Xuebao
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2022-08-08　修回日期　2022-11-14　　编辑　曾文君

附录 A

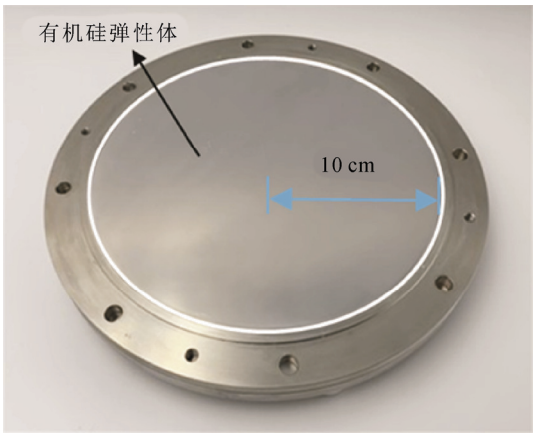


图 A1　有机硅弹性体及制备模具

Fig.A1　Silicone elastomer and mould

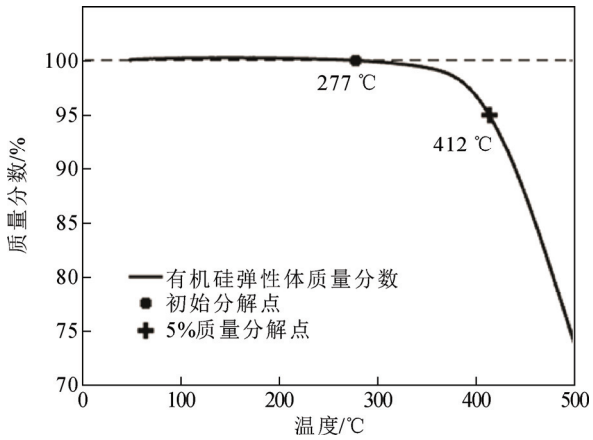


图 A2　有机硅弹性体 TGA 测试[25]

Fig.A2　TGA of Silicone elastomer[25]

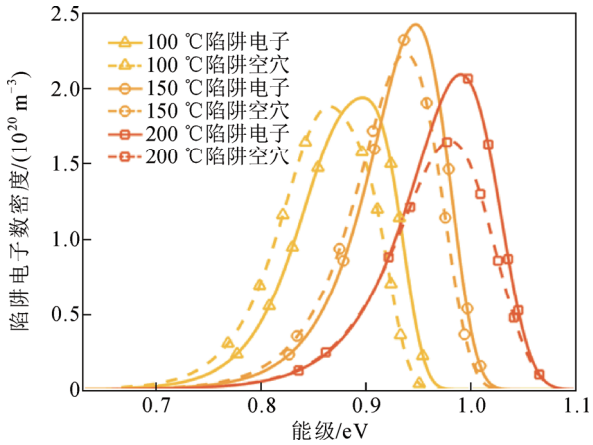


图 A3　100、150、200 ℃温度下不同极性陷阱电荷能级与密度分布

Fig.A3　Trapped charge with different polarities energy level and density distribution at 100, 150 and 200 ℃

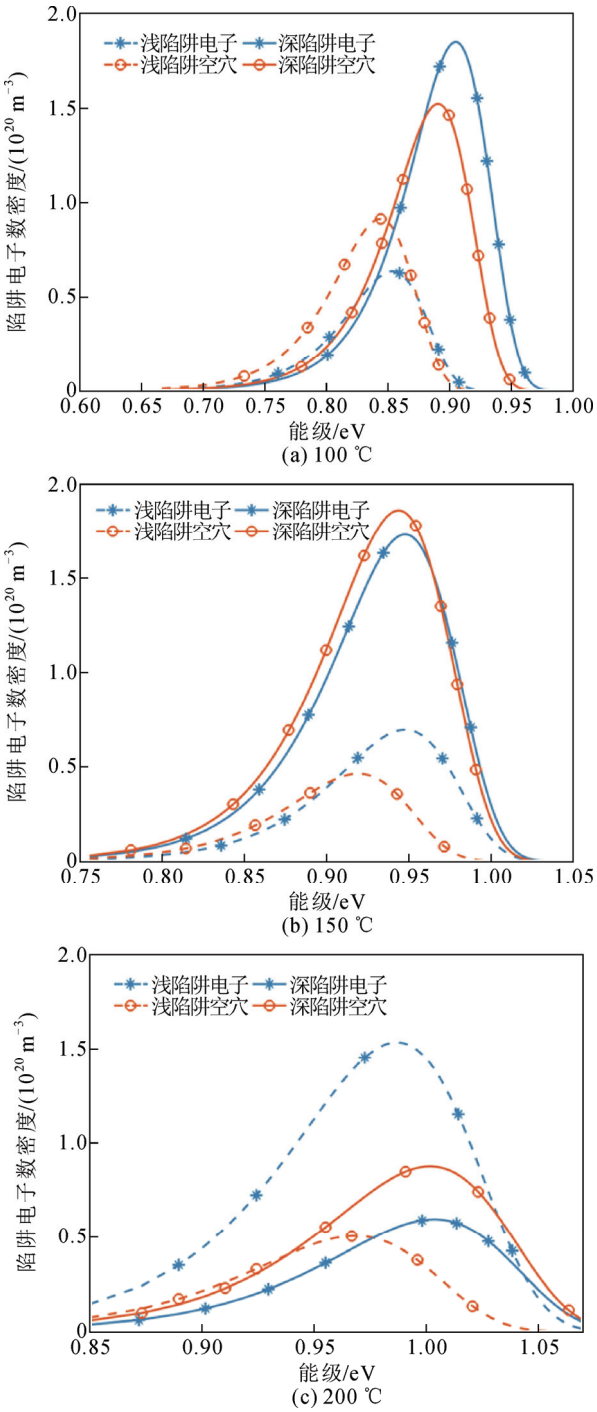


图 A4　100 ℃、150 ℃、200 ℃温度下深浅陷阱电荷能级与密度分布

FigA4　Deep and shallow trapped charge energy level and density distribution at 100 ℃, 150 ℃ and 200 ℃

表 A1　不同温度下正负极性衰减曲线拟合参数

Table A1　Fitting parameters of positive and negative dacay curves at different temperatures

t/℃	极性	A	τ_a/s	B	τ_b/s	V_0/V
20	负	248.9	5825.5	3656.1	49 316.4	2138.4
	正	188.6	3235.3	3197.2	36 734.6	2560.6
50	负	400.7	1020.2	4495.2	8425.9	1117.7
	正	429.4	980.1	3197.2	8793.8	871.2
100	负	1525.5	341.9	4446.0	1689.2	7.2
	正	2191.3	251.9	3661.0	1081.9	15.8
150	负	1665.4	195.0	4163.4	195.0	6.5
	正	1107.2	89.0	4473.0	175.0	4.3
200	负	1423.8	49.2	3686.9	32.7	11.1
	正	1212.8	20.8	2102.0	47.0	6.6
250	负	1074.8	8.3	2688.9	16.5	6.4
	正	362.1	207.8	2457.9	11.7	13.4