

基于方波激励电致发光效应的电场与温度可视化方法

王 凯, 任 明, 周沁昱, 张崇兴, 董 明

(电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学), 西安 710049)

摘 要: 为实现直接覆铜陶瓷(direct bonded copper, DBC)衬底电场的可视化和定量分析, 探讨了方波激发电致发光(electroluminescence, EL)特性, 旨在建立 DBC 衬底电场分布可视化反演模型。首先, 采用时间分辨率光响应技术和积分光谱分析了 EL 的机理及其物理过程。基于此, 提取 EL 图像的 G 通道强度作为特征变量, 基于高斯过程回归(Gaussian processes regression, GPR)建立了发光强度与无量纲电场指数拟合关系, 以构建标准电场下的参考反演模型。此外, 基于高温下 EL 光谱特征峰演化趋势, 建立了 EL 图像 G 通道与 B 通道强度比值($R_{G/B}$)参数同温度之间的映射关系。针对指型电极, 考虑其强电场区域对弱电场区域具有显著的散射效应, 提出了盲解卷积算法对其表面发光分布进行校正。基于参考反演模型, 获得指型电极表面电场分布可视化结果, 并通过评估不同电压等级下指型电极中心区域电场反演结果与外施电压之间的线性关系, 验证了所提电场反演方法的有效性。最后, 对 DBC 衬底的电场分布、高危绝缘点分布概率及其高温下的温度场分布进行了可视化。实验结果表明, 所提方法能够实现电场和温度分布的高分辨率可视化, 为 DBC 衬底的绝缘校核提供了一种新的手段。

关键词: DBC 衬底; 绝缘校核; 电致发光; 电场可视化反演; 温度分布可视化

Visualization Method of Electric Field and Temperature Based on Square Wave Excitation Electroluminescence Effect

WANG Kai, REN Ming, ZHOU Qinyu, ZHANG Chongxing, DONG Ming

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

Abstract: To enable electric field visualization and quantitative analysis in direct bonded copper (DBC) substrates, this study investigates electroluminescence (EL) characteristics under square-wave excitation, aiming to establish a visual inversion model for electric field distribution. Initially, EL mechanisms and physical processes were analyzed using time-resolved optical response techniques and integral spectroscopy. A fitting relationship between luminescence intensity and a dimensionless electric field index was then established via Gaussian process regression (GPR). Furthermore, a mapping between the G-channel to B-channel intensity ratio ($R_{G/B}$) in EL images and temperature was established on the basis of high-temperature EL spectral characteristics. The significant scattering from strong electric field regions to weak electric field regions is taken into account, and a blind deconvolution algorithm was adopted to correct the luminous distribution. Subsequently, the surface electric field distribution of interdigitated electrode was deduced. The effectiveness of the proposed electric field inversion method was validated by the linear relationship between inverted electric field results in the finger electrode's central region and applied voltage. Finally, the electric field distribution, high-risk insulation point probability, and high-temperature field distribution of the DBC substrate were visualized. Results demonstrate the method achieves high-resolution electric field and temperature visualization, offering a novel approach for DBC substrate insulation verification.

Key words: DBC substrate; insulation verification; electroluminescence; visualization inversion of electric field; visualization of temperature distribution

0 引言

近年来, 中压宽禁带功率半导体碳化硅(silicon carbide, SiC)器件在 10~15 kV 电压等级内得到迅猛

的发展^[1]。功率模块布局优化和封装技术的创新突破推动了功率模块向小型化、高效化和集成化方向的发展^[2]。然而, 中高压功率模块封装仍面临高电压等级、高开关频率以及高结温等多重挑战。其中, 绝缘可靠性是决定设备安全与长期稳定运行的关键因素^[3]。

基金资助项目: 国家重点研发计划(2023YFB2406900)。

Project supported by National Key R&D Program of China (2023YFB2406900).

功率模块绝缘失效通常由直接覆铜陶瓷(direct bonded copper, DBC)衬底铜层边沿的尖锐结构引发局部强电场畸变所致^[4-6]。受环路寄生参数影响,在长期振铃和电压过冲作用下,电场严重畸变区域易出现局部放电(partial discharge, PD)^[3],并在长时间激励下形成电树^[6]。尽管电树并未直接破坏衬底的绝缘完整性,但其显著削弱了铜层间的绝缘强度。此外,高结温环境下绝缘材料的老化加速以及 PD 活跃性增强,将进一步加速 DBC 衬底绝缘失效^[7]。因此,从功率模块绝缘设计的角度出发,消除由异常电场引发的绝缘问题至关重要。准确评估 DBC 衬底表面电场,进而有效识别并优化电场畸变区域,是提升功率模块绝缘可靠性的重要途径^[8-9]。

有限元方法(finite element method, FEM)通常在布局设计阶段用于 DBC 衬底准静态电场分布评估^[10-11]。但是在实际应用中,由于微裂纹和不规则边缘等缺陷的存在,FEM 难以精确捕捉真实工况下的电场分布。其次,方波激励下多层封装绝缘材料间不同的介电常数和电导率会导致电场分布呈现复杂的非均匀特性,这种介电特性的不匹配将进一步加剧电场畸变,增加了 FEM 精确捕捉实际电场分布的难度。在实际电场测量领域,电场探针已广泛用于高压电力设备外绝缘的表面电场分布测量,并为绝缘结构的优化设计提供依据^[12-13]。该方法通过改变探针位置以遍历绝缘件不同点位的电势值,进而反演得到电场分布结果。然而,其电场分布空间分辨率受到探针大小及其形状等因素影响,同时探针的引入会对原始电场分布产生扰动,进而影响反演结果的准确性^[14-17]。因此,在满足高频方波激励下 DBC 衬底电场分布可视化需求方面,基于探针的方法面临诸多应用挑战。

近年来,对电场、热、光等外界刺激产生响应的材料(刺激响应材料)在荧光探针、光电子显示和柔性电子等领域得到了广泛应用^[18-19]。其中,高场电致发光(electroluminescence, EL)材料由于其对电场的快速变化具有灵敏的响应特性,使其在异常电场的可视化检测中具有重要的应用价值^[20]。这类 EL 材料在交变电场激发下,电子发生跃迁并与掺杂剂引入的杂质能级复合而发光。基于其高效的电-光转换特性,EL 材料在复杂绝缘结构电场分布的非接触式测量方面展现出显著潜力。杨欣颐等人基于 ZnS:Cu 工频交流电压下的致发光效应^[21],提出一种非接触式测量绝缘子表面场强分布的试验方法。朱

明晓等人研究了在交流激励下绝缘体表面电场分布的 EL 效应^[20],揭示了 EL 粉末的电荷极化机制。因此,通过对绝缘件表面发光分布开展分析,可以实现对绝缘结构表面电场分布的直观可视化检测。基于该方法不仅避免了传统探针测量中因引入外部器件而导致的电场扰动问题,还为高空间分辨率、高灵敏度的电场测量提供了新的技术路径。然而,目前针对功率模块在高压重频方波这一典型工作激励下的 EL 研究仍显不足:一方面,对其动态发光行为、与电压和材料特性的内在关联,以及局部放电相互作用的物理机制缺乏系统性的实验探究和理论分析,这直接制约了基于 EL 效应实现高精度电场传感与评估的潜力。另一方面,在温度评估方面,利用 ZnS:Cu 材料荧光光谱的方法虽对温度敏感^[22],但存在光谱采集过程操作繁琐的问题;同时,基于 EL 的温度空间分布直接反演技术尚未得到充分发展,难以通过便捷的图像信息快速获取温度场的精细分布特征^[23]。这些因素共同构成了当前利用 EL 效应对功率模块进行全面、精确状态评估的技术瓶颈。

为此,本研究致力于深入揭示方波激励下 EL 的核心特性,并在此基础上构建一套针对电场分布和温度场分布的高效、高分辨率可视化及定量评估方法。首先,为弥补对 EL 机制认知不足的缺陷,本研究通过制备标准三明治结构的 EL 器件,并搭建集成时间分辨率光响应与积分光谱分析的光学检测平台,系统研究了在不同温度及方波激励参数(电压极性、频率及峰峰值)条件下 EL 的动态发光特性与光谱演化规律,旨在阐明方波激励下 EL 的物理过程和关键影响因素,为后续反演模型的构建提供坚实的物理基础和实验数据支撑。其次,针对现有 EL 反演技术操作相对繁琐且在复杂结构中精度不足的问题,本研究提出并发展了一系列改进的反演策略:

1) 在电场反演方面,为实现非接触、高分辨率的测量,我们提取 EL 图像的 G 通道强度作为关键特征量,并运用高斯过程回归(Gaussian processes regression, GPR)算法,建立了发光强度与无量纲电场指数之间的非线性映射关系,从而构建了适用于标准电场条件下的基础反演模型。针对 DBC 衬底表面强电场区域的发光对邻近弱电场区域存在显著光散射效应并导致反演精度下降的问题,本研究引入了盲解卷积算法修正原始发光分布,提升了电场

分布反演的准确性和空间分辨能力。

2) 在温度评估方面,本研究基于 EL 光谱的温度敏感特性,提取 EL 图像的 G/B 通道强度比值作为温度表征参数。实验验证了该参数在不同激励电压下的稳定性后,采用 GPR 算法建立了 G/B 比值与温度之间的定量映射关系,从而能够基于 EL 图像快速获取温度的空间分布。

为了全面验证所提出方法体系的有效性和实用性,本研究分别在指型电极和两种典型 DBC 衬底(无缺陷及含人工微缺陷)上进行了系统的实验验证。实验结果充分表明,本研究所提出的基于方波激励 EL 效应的电场与温度可视化方法,能够实现对于 DBC 衬底表面电场及其温度空间分布的高分辨率、量化评估。该方法不仅为 DBC 衬底的绝缘状态在线校核与高危风险点识别提供了新颖、高效且精确的技术手段,也为未来高功率密度封装结构的绝缘优化设计和热管理策略提供了重要的理论依据与实践指导。

1 电致发光复合涂层的制备与性能表征

1.1 ZnS:Cu 复合发光涂层介电特性

选择聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)(道康宁 Sylgard 184)作为 EL 粉末 ZnS:Cu(平均粒径约为 25 μm)的聚合物基体。PDMS 及其固化剂按照 10:1 的质量比进行混合,同时将 ZnS:Cu 填料按照掺杂比例(质量分数,下同)8%、16%和 24%进行掺杂。采用四面湿膜制备器(200 μm)在光滑玻璃板上对混合物进行刮刀涂覆,随后将玻璃板置于真空干燥箱中,在 100 $^{\circ}\text{C}$ 条件下固化 1 h,最终获得不同掺杂比例下的复合发光涂层薄膜(厚度约 190 μm)。如图 1 所示,通过显微镜观察了不同掺杂比例样品中 EL 颗粒的分散情况。随 ZnS:Cu 填料比例的增加,EL 颗粒在 PDMS 基体中的分布密度显著提高,且在高掺杂比例(质量分数 24%)下出现颗粒团聚现象,这可能显著影响材料的介电性能和发光特性。

研究进一步使用 Novocontrol CONCEPT 43 宽频介电谱仪对纯 PDMS 薄膜及不同掺杂比例的 PDMS-ZnS:Cu 复合薄膜的介电性能进行了测量。测量频率范围为 0.1~10 kHz,温度设定为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。测试电压设置为 400 V 交流电压。结果如图 2(a)所示,所有样品的介电常数均随频率升高而逐渐降低,表现出典型的介电弛豫行为。此外,随着 ZnS:Cu 颗

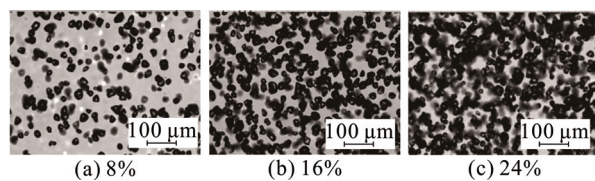


图 1 不同掺杂比例下的复合发光材料

Fig.1 SEM images of EL particles with different mass fractions

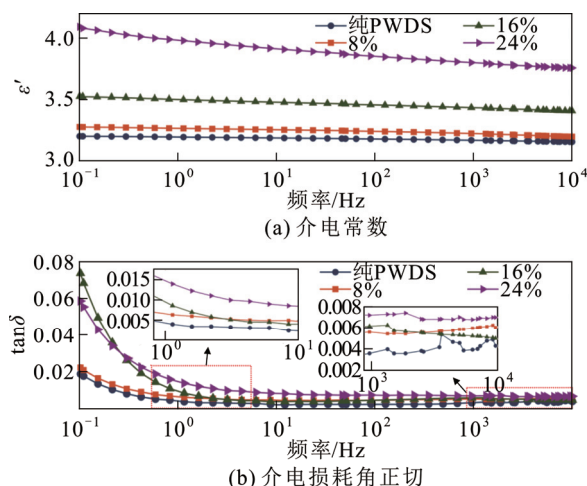


图 2 不同掺杂比例下的复合 EL 涂层介电参数特性

Fig.2 Dielectric parameter characteristics of composite EL coatings under different doping ratios

粒掺杂比例的增加,复合 EL 涂层的介电常数显著提高。这可归因于 ZnS:Cu 颗粒自身的高介电响应及其引发的界面极化效应^[24]。如图 2(b)所示,随着 EL 颗粒含量增加,介电损耗也随之增加,这主要是由于 ZnS:Cu 颗粒与 PDMS 基体界面区域发生极化且电荷分布不均匀所致。在高掺杂比例(24%)下,颗粒团聚现象进一步加剧了界面区域的电荷积聚和介电损耗。因此,为平衡发光亮度和复合涂层的介电性能,选择掺杂比例 16%作为最终 EL 颗粒质量分数。

为研究 EL 颗粒对绝缘结构电场分布的影响,本研究首先建立了如图 3 所示二维 FEM 模型,其中 ZnS:Cu 颗粒被简化为理想椭圆形状。模型中 ZnS:Cu 颗粒介电常数设为 8.5^[25],PDMS 的介电常数设定为 2.75。对几何模型的上边界施加 100 V 的工频交流电压。仿真结果表明,高电场主要出现在 ZnS:Cu 颗粒两端。这是由于 ZnS:Cu 颗粒和 PDMS 基质的介电常数存在显著差异,导致电势和电场分布呈现非均匀特性。对于厚度为 k 的薄膜,当施加电压为 U 时,其内部平均电场强度可表示为 $E_m = U/k$ 。对于介电常数为 ϵ_1 的 ZnS:Cu 颗粒和介电常数

为 ε_2 的电介质基体, 颗粒两端的电场 $E_{\text{ZnS:Cu}}$ 可通过式(1)计算:

$$E_{\text{ZnS:Cu}} = E_m \left(\frac{3\varepsilon_2}{2\varepsilon_2 + \varepsilon_1 - d(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \right) \quad (1)$$

式中: d 表示 EL 颗粒的体积比。对于固定掺杂比例下的复合涂层, 可以推断颗粒两端的电场强度 $E_{\text{ZnS:Cu}}$ 与平均电场强度 E_m 成正比。因此, 可以通过引入比例系数对颗粒两端电场进行修正。此外, 基于上述宽频介电参数的测量结果, 本研究进一步建立了如图 4 所示 DBC 衬底模型, 对比分析了涂覆及未涂覆发光涂层两种情况下陶瓷表面的电场分

布。仿真结果表明, 两种情况下 DBC 衬底表面电场分布无显著差异, 即发光涂层不会对 DBC 衬底原有电场分布产生显著影响。这主要归因于发光涂层厚度较薄, 且其介电常数与二次灌封用硅凝胶的介电常数相近, 故未引起明显的电场畸变。

为进一步评估 EL 涂层对 DBC 衬底绝缘性能的影响, 本研究在 1 kHz 方波激励下, 对涂覆复合 EL 材料和未涂覆的 DBC 衬底试样进行 PD 起始电压 (PD inception voltage, PDIV) 的统计分析。为了消除 DBC 衬底制造工艺所致的随机性影响, 每组实验均准备了 5 个样品, 并对每个样品重复测量 5 次 PDIV。

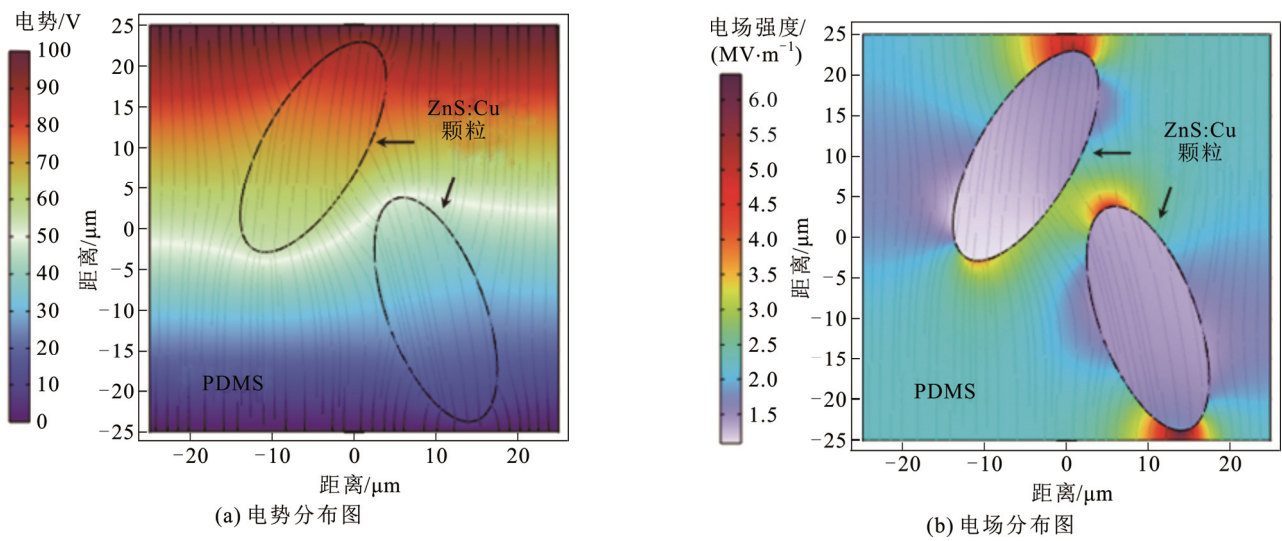


图 3 复合 EL 材料微观电场分布图

Fig.3 Microscopic electric field distribution diagram of composite EL material

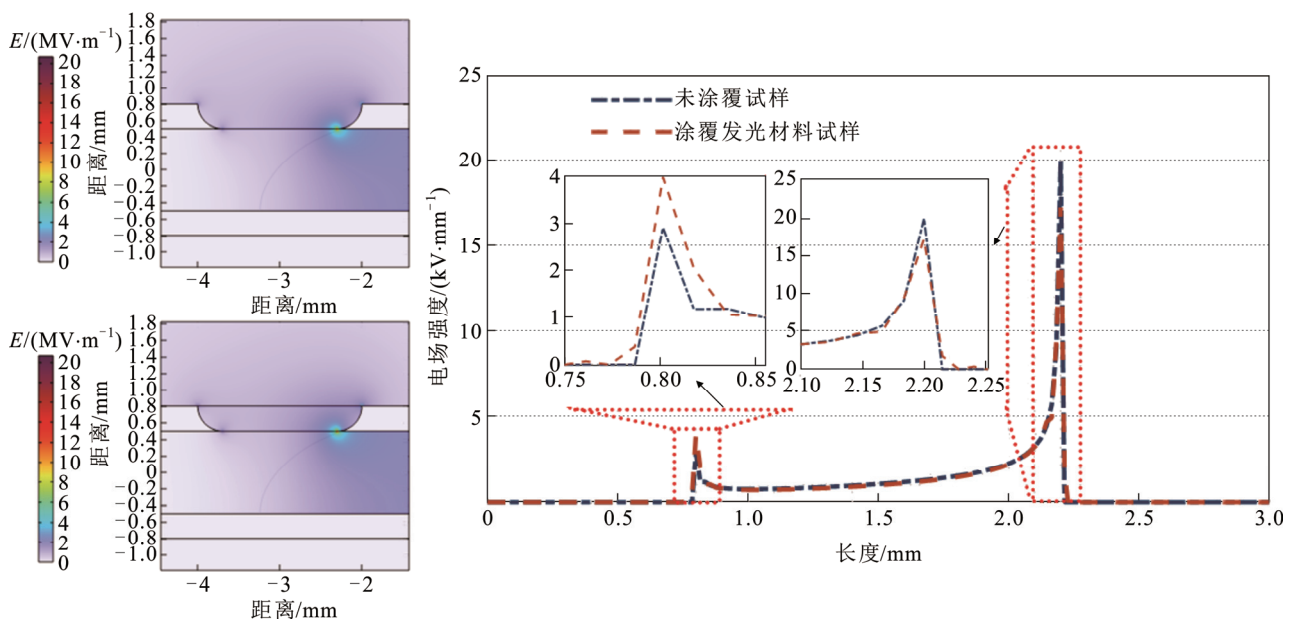


图 4 涂覆复合 EL 涂层前后 DBC 衬底表面电场仿真结果

Fig.4 Simulation results of electric field for DBC substrate with and without EL coating

依据 IEC 60270 标准, 测试电压从 1 kV 开始, 以 0.2 kV 的步长逐步升高。每个电压等级保持 5 min, 若在此期间未检测到 PD 事件, 则继续提升电压至下一等级, 直至首次触发 PD 事件, 此时的电压即为 PDIV。如图 5 所示, 对两组试样的 PDIV 结果进行 Weibull 分布分析。结果显示, 两组试样的 Weibull 分布形状参数(分别为 9.42 和 9.47)及尺度参数(分别为 35.69 和 41.64)均高度相似, 表明 EL 涂层对 DBC 衬底的绝缘性能无显著影响。进一步验证了 EL 涂层在实现电场分布可视化的同时, 能够保持 DBC 衬底原有的绝缘可靠性。

1.2 电致发光器件制备

为研究方波激励下 EL 的电压参数依赖性, 建立平板电极下 EL 强度与外施电场的映射关系, 并探究温度对 EL 特性的影响, 本研究采用如图 6(a)所示的丝网印刷法制备了三明治结构的 EL 器件(如图 6(b)所示)。

器件制备流程简述如下: 首先将 PET-ITO 透明导电薄膜放置在真空烘箱中, 在 90 °C 条件下干燥预处理 30 min; 随后将 ZnS:Cu(质量分数 16%)与 PDMS 的混合物作为发光层, 通过 200 目网板印刷至 PET-ITO 薄膜上; 进一步在发光层上印刷商用 BaTiO₃ 浆料作为绝缘层; 随后在绝缘层上印刷导电银浆作为底层电极; 最后将厚度约为 30 μm 的热塑性聚氨酯膜热压至底层电极表面进行封装。采用信号发生器和功率放大器实现 EL 器件外施电压参数灵活调控(包括极性、频率和峰峰值)。此外, 在 EL 器件保护层外部粘贴高温氧化铝陶瓷发热片, 通过调节陶瓷发热片外施电压实现对器件的精确温控。

1.3 指型电极和 DBC 衬底试样制备

为验证基于 EL 效应在方波激励下实现复杂电极结构电场分布反演的可行性, 本研究设计并制作了图 7 所示的指型电极结构。该电极以 Al₂O₃ 陶瓷为基底, 通过尼龙螺杆将两个半球形电极固定于亚克力底座上, 电极间距调整为 5 mm。随后将复合 EL 涂层通过硅胶刮刀均匀涂覆在 Al₂O₃ 陶瓷表面。为确保涂层的均匀性, 初步刮涂的试样在 0.02 MPa 的环境下进行 30 min 脱气处理, 随后在 90 °C 条件下固化 40 min, 形成厚薄均匀发光涂层。

此外, 为研究电场反演模型在 DBC 衬底上的应用可行性, 依据中高压功率模块绝缘优化设计共识^[26-28], 本研究设计并制备了两种 DBC 衬底。上下铜迹边缘的偏移偏差设置为 0, 所有铜迹的圆角

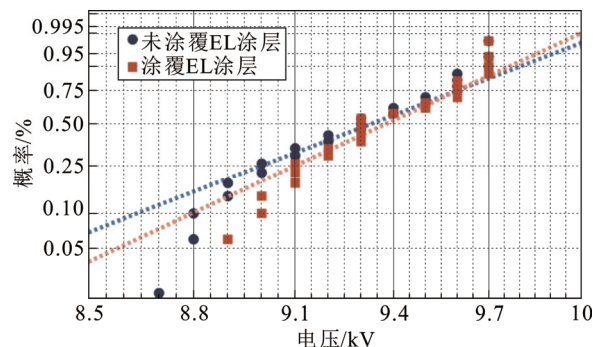
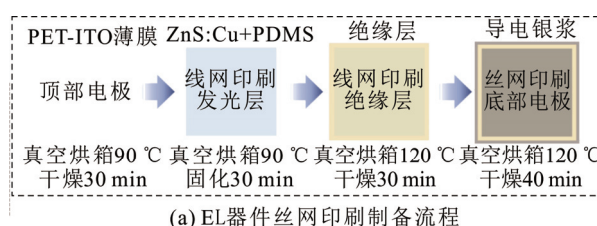
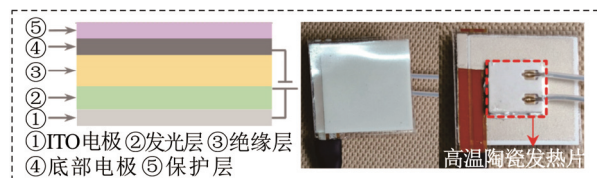


图5 涂覆复合 EL 涂层前后 DBC 衬底 PDIV 威布尔分布
Fig.5 Weibull distribution of PDIV for the DBC substrates with and without coating



(a) EL 器件丝网印刷制备流程



(b) EL 器件结构与实物

图6 EL 器件结构及其制备流程

Fig.6 Schematic diagrams of EL device structure and manufacturing procedure

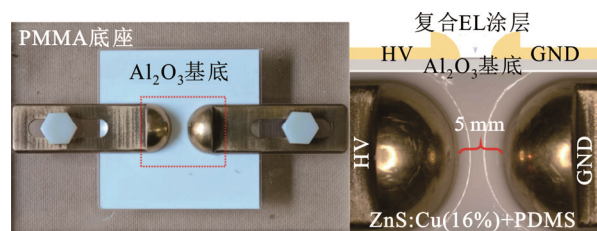


图7 指型电极结构示意图

Fig.7 Schematic diagram of finger-electrodes

半径设置为 1 mm。对于无人工缺陷的 DBC 衬底(如图 8(a)所示), 其中心十字形接地电极与四周高压电极的间距分别设计为 0.5、1、1.5 和 2 mm。DBC 衬底表面涂覆 EL 材料后进行了硅凝胶二次灌封。此外, 设计并制备了含人工尖锐缺陷的 DBC 衬底(如图 8(b)所示), 在高压电极边沿处设置了尺寸一致的凹陷型和突出型两种缺陷。其中, 高压电极与两侧接地电极的间距分别设计为 2 mm 和 3 mm, 用于观测不同间距及缺陷类型下电极边沿处的发光分布。

1.4 电致发光检测平台

在暗室中搭建了如图 9 所示光学测量平台,用于研究方波激励下 EL 器件的时间分辨率光响应特性。该平台由光电倍增管(photomultiplier tube, PMT, 型号 PMTHS1-CR131A), 光谱仪(Ocean Optics USB 4000, 探测光谱范围为 200~900 nm)以及数码相机组成。通过 PMT 获取 EL 器件在方波激励下的时间分辨光响应信号。为避免 EL 器件大范围发光可能导致的 PMT 过载或损伤,采用多芯石英光纤对 EL 器件的局部发光区域进行信号采集与观测。使用 0~1.5 kV 直流高压可调电源为 PMT 供电,并通过调节电压值改变 PMT 的输出增益,以适应不同发光强度下的测量需求。此外,采用光谱仪获取 EL 的积分光谱,用于分析其发光特征波段的分布特性。同时,配备体视显微镜(SANQI TD-6S, 放

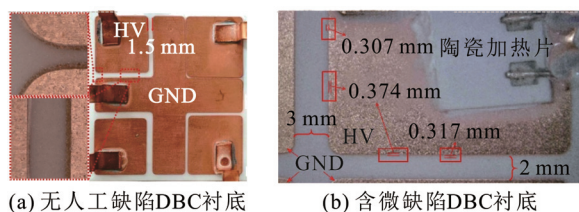


图 8 DBC 衬底试样

Fig.8 Schematic diagram of DBC substrates

大倍率为 0.65~5.8)与数码单反相机(分辨率为 6 016×4 016),用于获取 EL 区域的空间分布图像,为后续的电场分布反演可视化提供空间信息。

此外,为模拟功率模块实际电压工况,研究基于高压半桥模块搭建了正极性重频方波源,如图10(a)所示。其中 $R_p(70\text{ k}\Omega)$ 为保护电阻, C_r 为储能电容器($0.5\text{ }\mu\text{F}$, 30 kV), D 为高压硅堆(40 kV , 5 A)。 $R_{s1}(100\text{ }\Omega)$ 和 $R_{s2}(100\text{ }\Omega)$ 分别是方波脉冲上升沿和下降沿的充放电电阻, $R_j=20\text{ k}\Omega$ 为波头调节电阻,其输出方波峰峰值范围为 $0\sim 20\text{ kV}$ 。图10(b)展示了当双极型晶体管集成电路(transistor-transistor-logic, TTL)频率为 1 kHz 时,高压方波源输出电压波形,其电压转换率(dv/dt)为 4.13 V/ns 。

2 基于方波激励 EL 的电场分布反演

2.1 方波激励 EL 电压参数依赖性

为研究方波激励下 EL 与各电压参数的关系, 本研究基于图 9 所示的光学检测平台对 EL 器件进行了实验。首先研究电压极性的影响, 设定了不同极性的方波电压, 其频率为 1 kHz, 峰峰值为 27 V, 占空比为 50%。测量了不同极性方波(频率 1 kHz, 峰峰值 27 V, 占空比 50%)上升沿(10%~90%电压阈值之间)的电压转换率, 分别为 902、906 和 907 mV/ μ s。

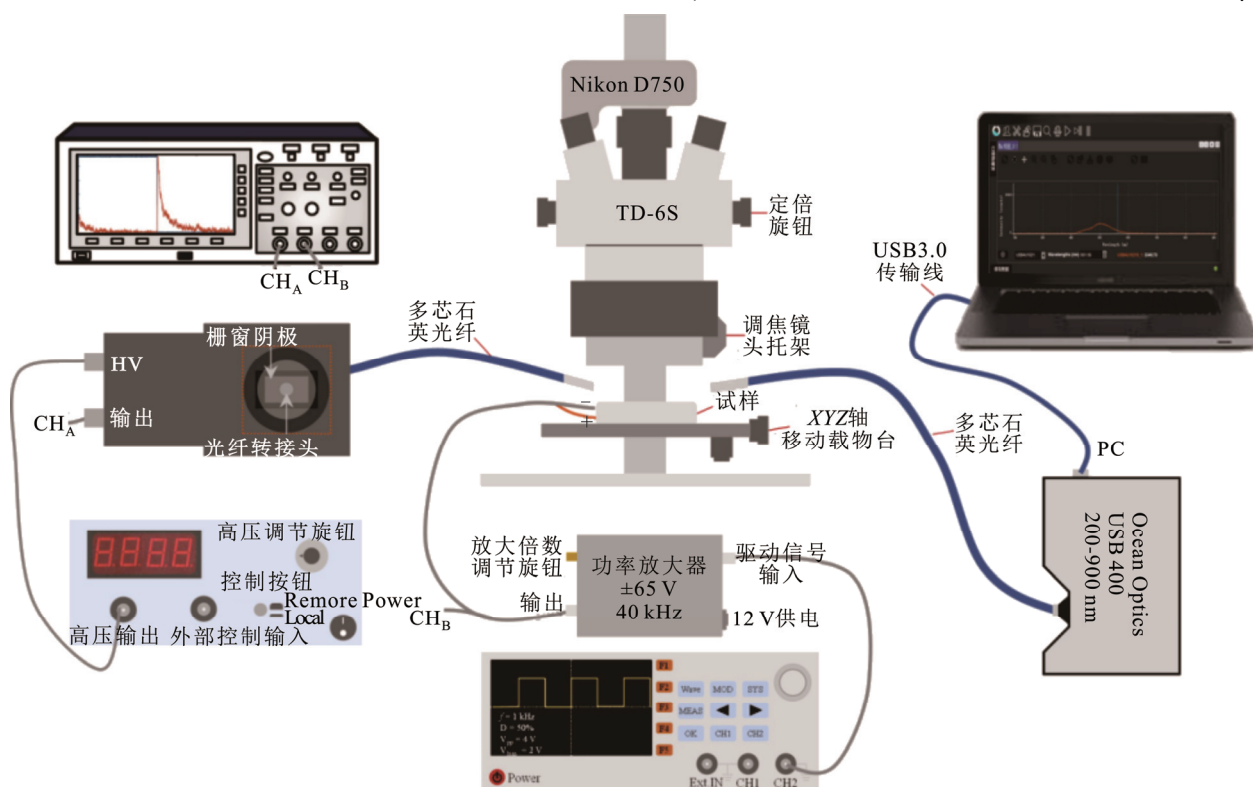


图9 光学检测系统

Fig.9 Optical measurement platform

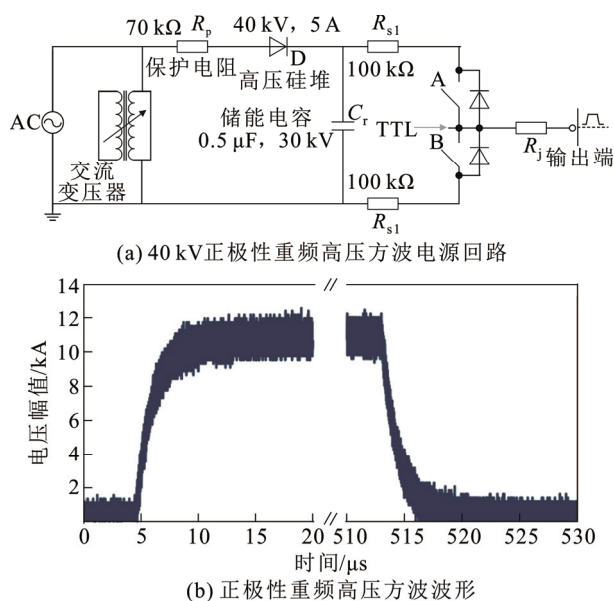


图 10 正极性重频方波源电路结构及其输出波形

Fig.10 Circuit diagram of the high-voltage repetitive square wave generator and its output waveform

不同极性方波电压下, EL 光响应曲线如图 11 所示。结果表明, 光响应出现在电压转换的瞬间, 随后缓慢衰减。在不同极性电压激励下, 上升沿和下降沿的 PMT 光响应信号幅值分别约为 0.51、0.48、0.45 V 和 1.85、1.84、1.87 V, 表明 EL 强度与所施加电压的极性相关性较弱。因此, 后续研究均针对正极性方波激励展开。已有研究表明, 在掺杂铜的 ZnS 的制备过程中会形成线型 Cu_xS 导电相。在电场施加瞬间, 导电相上的电场在其弛豫时间内发生畸变, 如图 12 中①—②所示。当导带中的自由电子跃迁至被电场激发的发光中心复合时, 产生发光现象。因此, 发光仅发生在电子迁移到捕获空穴的区域时, 而当空穴注入到含有捕获电子的区域时, 发光会被猝灭。由于电子的迁移速度更快, 内建电场主要由正电极附近的空穴陷阱组成, 如图 12 中③所示。当外部电场减小至零或反向时, 先前形成的极化场将驱动电子(或空穴)发生反向注入, 并与之前被捕获的空穴(或电子)在相似区域复合而发光。这一过程揭示了 EL 强度与电场强度的直接相关性。

图 13 进一步展示了不同电压幅值正极性方波激励下 EL 的积分光谱曲线。通过高斯分峰拟合分析发现, 在 1 kHz 方波激励下, EL 积分光谱主要存在 3 个不同的特征峰, 其波长范围分别约为 420~450 nm、485~500 nm 和 515~530 nm。随着外施电压幅值的增加, 位于约 442 nm 和 495 nm 的两个主要特征峰

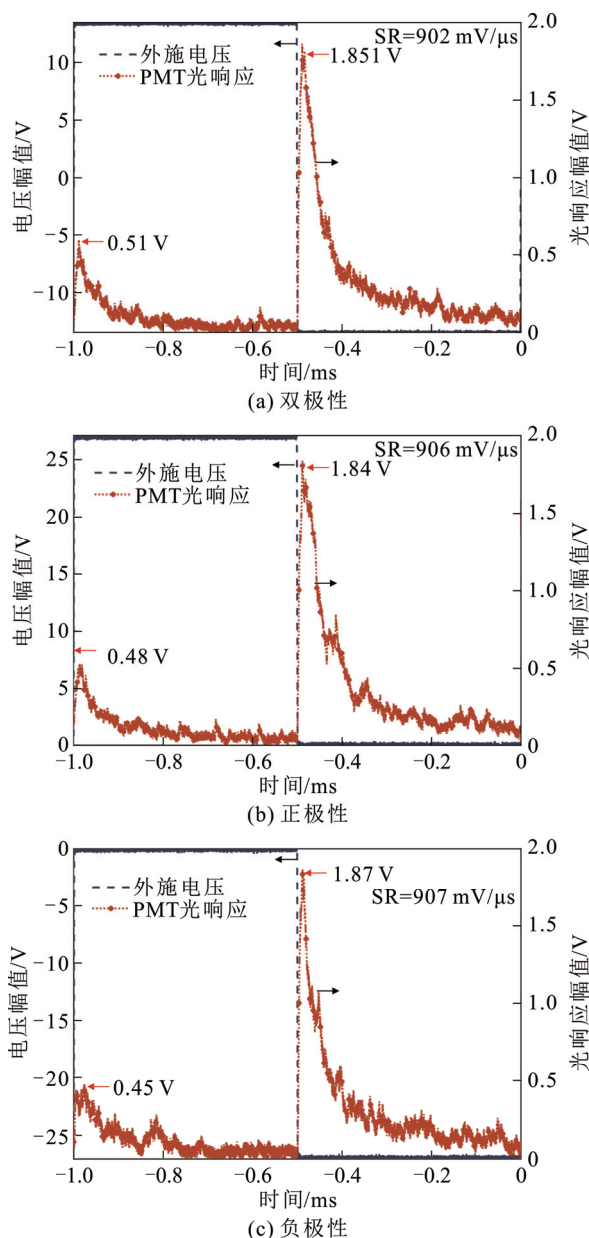


图 11 不同极性方波激励下的 PMT 响应

Fig.11 PMT response under different polarity square wave excitation

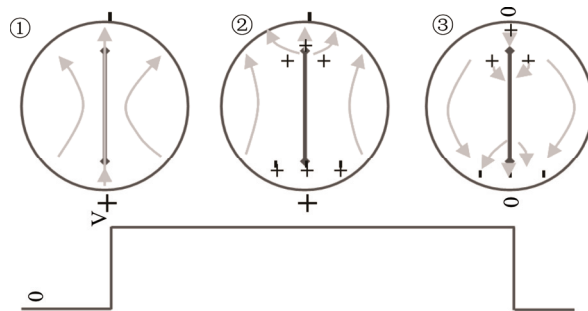


图 12 方波激励下 EL 颗粒内部电子和空穴复合过程

Fig.12 Schematic diagram of the recombination process of electrons and holes inside EL particles under square wave excitation

均未出现显著的波长偏移, 表明在本实验的电压范围内, 外施电场强度的变化对发光光谱的峰位影响不明显, 因此本研究主要关注前两个特征峰。此外, 进一步研究方波激励频率对 EL 发光特性的影响, 在 0.5~15 kHz 范围内测量了 EL 积分光谱分布情况, 结果如图 14 所示。结果表明, 随着激励频率的增加, 绿色发光波段的特征峰从约 498 nm(低频)蓝移至约 482 nm(高频), 而位于约 442 nm 的蓝色发光波段的峰值强度显著增加。这一现象与 ZnS:Cu 颗粒发光物理过程密切相关。ZnS:Cu 具有两个不同的发光中心, 一是远离价带的深受主能级(绿色, 处于 Cu^{2+} 的 t_2 态), 二是更接近价带的能级(蓝色, 处于 Cu^{2+} 的 e 态)^[29]。在低频激励下, 蓝色发光中心上空穴的寿命相对较短(与激励半周期相比), 当蓝色发光中心的空穴电离后, 易被邻近的绿色发光中心捕获并重新激活后者。因此, 在低频激励下, 绿色发光中心对整体发光起主导作用; 随着频率的增加, 蓝色发光中心逐渐成为主导发光中心。上述结果表明, EL 发光特性不仅与外施电场强度相关, 还依赖于激励频率。为建立 EL 强度与外施电场之间的映射关系, 进而实现 DBC 衬底表面电场分布的可视化, 需要依据 EL 光谱随激励参数变化的特性来选择合适的图像特征参数。

基于上述方波激励下的 EL 时间分辨率光响应特性与积分光谱特性, 研究进一步开展 EL 强度与外施电压关系的关联关系分析。基于 EL 颗粒两端电场与背景平均电场之间存在的近似线性关系, 本研究定义了无量纲电场指数。随后, 固定电压频率为 1 kHz, 在不同电压下拍摄 EL 器件长曝光图像(ISO 400, 曝光时间 1 s), 选取图像中心 690×690 像素区域作为感兴趣区域(region of interest, ROI), 计算其 G 通道强度并进行空间平均处理。基于 GPR 算法建立 G 通道平均强度与无量纲电场指数之间的拟合关系, 其拟合结果如图 15 所示。

2.2 基于盲卷积的发光分布修正

为验证方波激励下基于 EL 效应在复杂电极结构上实现电场分布反演的可行性, 采用数码相机(ISO 400, 曝光时间 1 s)拍摄在正极性重频高压方波电压激励(峰值 U_{pp} 为 1~9 kV, $f=1$ kHz, $D=50\%$)下的指型电极的发光分布。实验发现, 在指型电极和 DBC 衬底中, 高压电极边沿、陶瓷与金属的接合处以及复合涂层内部(如 EL 颗粒与 PDMS 基体的界面附近)均存在显著的电场集中效应。随着外施电压的

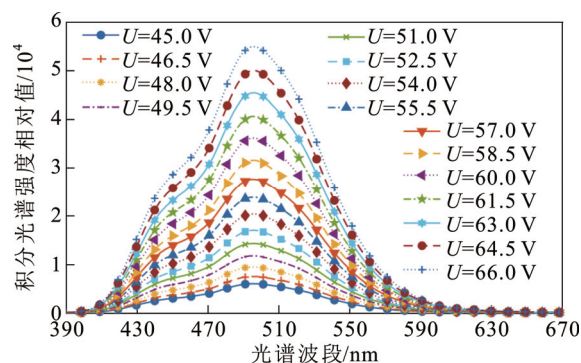


图 13 不同电压幅值激励 EL 积分光谱曲线

Fig.13 Integrated spectrum curves of EL at different peaks to peaks square wave voltage

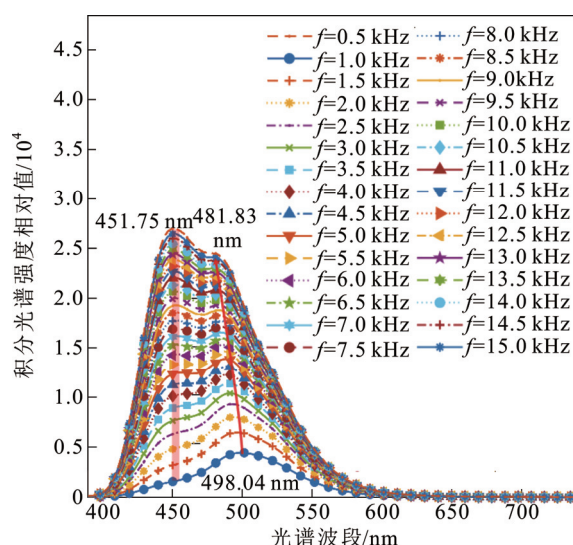


图 14 不同频率正极性方波激励 EL 积分光谱曲线

Fig.14 Spectral distribution characteristics under different frequency unipolar square wave excitation

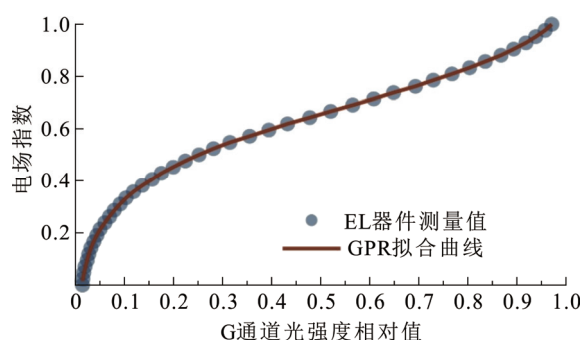


图 15 EL 器件 G 通道强度与电场指数拟合结果

Fig.15 Reference fitting model for the EL intensity and the normalized electric field index based on GPR

升高, EL 现象首先出现在高压电极的边缘区域; 当电极间隙内的平均电场强度达到 EL 激发阈值时,

沿电极截线方向的发光强度分布开始变得显著, 并与该方向上的电场分布趋势相对应。如图 16 所示, 沿图示箭头方向的 EL 强度分布与有限元电场分布仿真得到的该路径上电场强度分布趋势表现出良好的一致性。然而, 在距离电极边缘约 500 μm 范围内, 发光分布呈现缓慢衰减特征。这可归因于该区域测量到的光强实际上是电极边缘强发光区的散射与该区域自身发光强度的叠加。为消除这种光学串扰对 EL 强度测量的干扰, 提升电场反演的准确性, 本研究引入了基于点扩散函数(point spread function, PSF)的盲解卷积算法对观测到的发光分布进行校正。

为此, 将整个测量表面划分为 $N \times M$ 个有限元素, 因此位置 i 处的实际光强度可以表示如下:

$$\sigma(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sigma'(x, y) h(x-m, y-n) \quad (2)$$

式中: $\sigma(x, y)$ 是 (x, y) 点测量得到的发光强度; $h(x-m, y-n)$ 表示位置 (m, n) 处的发光对 (x, y) 点强度的影响函数; $\sigma'(x, y)$ 表示 (x, y) 点的本征发光强度。对于本研究中的指型电极及 DBC 衬底试样, 其光学系统的点扩散函数在成像区域内可近似认为具有平移不变性, 即系统对点光源的响应特性与点光源的位置无关。基于这一特性, 观测到的 EL 发光分布与真实发光分布之间的关系可建模为卷积过程, 如图像处理领域的“退化-复原”模型所示(参见图 17)^[30]。因此, 基于平移不变性属性将式(2)变换为卷积形式:

$$\sigma(x, y) = h(x, y) * \sigma'(x, y) \quad (3)$$

应用泊松分布和最大似然估计来实现上述模型在时域内的迭代求解^[31], 基于贝叶斯理论, 将 EL 强度分布修正过程建模为如下迭代优化问题:

$$P(X|Y) = \frac{P(Y|X)P(X)}{\int P(Y|X)P(X)dX} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P(X) &= \int P(X|Y)P(Y)dY = \\ &\int \frac{P(Y|X)P(X)}{\int P(Y|X)P(X)dX} P(Y)dY = \\ &\int \frac{P(Y|X)P(Y)}{\int P(Y|X)P(X)dX} dYP(X) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: X 表示实际发光分布; Y 为测量结果; $P(X)$ 表示原始结果的灰度分布函数, 即 $f(x, y)$; $P(Y)$ 表示测量结果的灰度分布函数, 即 $g(x', y')$; $P(X|Y)$ 表示点 (x, y) 处的点扩散函数(point spread function,

PSF), 即 $h(x'-x, y'-y)$ 。方程(5)可进一步写为^[31]:

$$f(x, y) = \left(\left(\frac{g(x, y)}{f(x, y)h(x, y)} \right) h(-x, -y) \right) f(x, y) \quad (6)$$

随后采用迭代法对实际发光分布 $f(x, y)$ 进行估计:

$$f^{n+1}(x, y) = \left(\left(\frac{g(x, y)}{f^n(x, y)h(x, y)} \right) h(-x, -y) \right) f^n(x, y) \quad (7)$$

式中: $f^n(x, y)$ 和 $f^{n+1}(x, y)$ 分别代表执行 n 次和 $n+1$ 次迭代后的恢复图像。考虑 EL 颗粒的 PSF $h(x, y)$ 是未知的, 研究基于 Lucy-Richardson 模型实现盲解卷积, 同步获得 $h(x, y)$ 和 $f(x, y)$ 。迭代计算过程如图 18 所示, 在第 n 次盲迭代中, 已知 $f^n(x, y)$, 则 $h^n(x, y)$ 可以通过式(8)计算, 同时, $f^{n+1}(x, y)$ 则进一步由式(9)进行迭代计算^[28]。

$$h^n(x, y) = h^{n-1}(x, y) \cdot \left(\left(\frac{g(x, y)}{h^{n-1}(x, y) * f^n(x, y)} \right) * f^n(-x, -y) \right) \quad (8)$$

$$f^{n+1}(x, y) = f^n(x, y) \cdot \left(\left(\frac{g(x, y)}{f^n(x, y) * h^n(x, y)} \right) * h^n(-x, -y) \right) \quad (9)$$

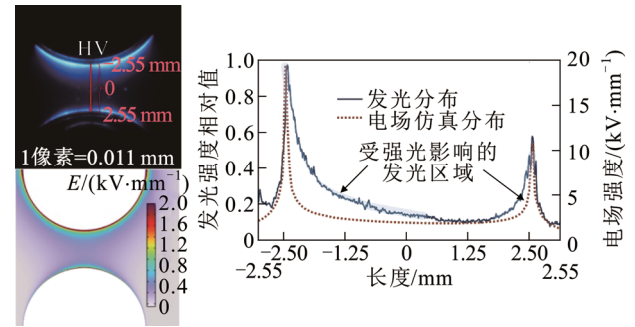


图 16 指型电极目标截线上电致发光分布与电场分布

Fig.16 Schematic diagram of comparison between EL distribution and the simulated electric field.

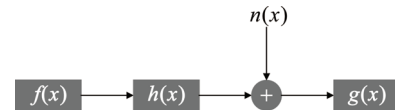


图 17 图像“退化-复原”模型

Fig.17 Degradation and restoration of an image

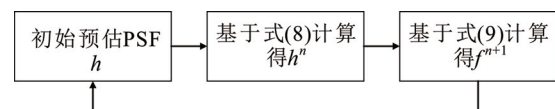


图 18 盲解卷积求解过程示意图

Fig.18 Schematic diagram of blind deconvolution solution process

基于上述盲解卷积模型对指型电极 EL 发光分布进行处理, 得到如图 19 所示 EL 系统 PSF 和修正发光分布结果。对比修正前后沿电极特定截线上的 EL 分布曲线, 可以看出经过盲解卷积处理后, 电极边沿区域的发光强度分布与理论电场分布更为接近。将修正后的发光分布结果带入 GPR 参考反演模型, 得到如图 20 所示无量纲电场指数分布可视化结果。对于本研究采用的指型电极(其产生的电场为稍不均匀场), 理论上其几何中心点处的电场强度与外施电压成正比。为验证电场反演的准确性, 采集了指型电极在不同外施电压(1~9 kV)下的 EL 图像, 对其进行盲解卷积修正后, 提取中心点的发光强度并反演得到无量纲电场指数。如图 21 所示, 无量纲电场指数与外施电压之间呈现良好线性相关性, 拟合优度为 98.85%。结果表明, 所提出的电场反演模型能够对指型电极这类非均匀场结构的电场分布实现高分辨率的可视化反演。

为进一步验证上述电场反演模型在 DBC 衬底上的适用性, 将图 8(a)所示无缺陷 DBC 衬底中央十字形铜层接地, 并且将距离中心接地电极 1.5 mm 的铜层作为高压电极, 对其施加高压重频方波电压(频率 1 kHz, 峰峰值 $V_{pp}=0.8$ kV), 进行电场反演模型验证。基于前述电场修正和反演流程, 获得了 DBC 衬底表面无量纲电场指数分布可视化结果。结果显示, 铜层边沿的电场分布呈现显著的不均匀性, 这可能与制造工艺导致的铜层边沿存在微小尖锐点, 从而引发局部电场集中有关。如图 22 所示, 在选定的 ROI 截线上, 通过 EL 反演得到的无量纲电场指数分布趋势与有限元仿真得到的电场分布趋势具有较高一致性。

2.3 绝缘失效点概率评估

随后, 通过直流电压源控制陶瓷发热片的功率, 以设定一系列梯度变化的温度条件。并在固定方波电压参数的不同温度下对两款 DBC 衬底 EL 分布进行连续图像拍摄(每个温度下间隔 1 s 连续拍摄 150 张发光图像)。从每张图片中提取最大发光强度的位置坐标, 然后应用 k-means 聚类算法对这些坐标在不同温度下分别进行空间聚类。每个聚类的中心被定义为一个高危绝缘区域的代表点。图 23(a)展示了在无人工缺陷的 DBC 衬底上, 不同温度条件下(温度由红外测温仪测量发热片表面得到)识别出的多个高危绝缘区域的分布。在各温度条件下采集的所有图像中, 高压铜层圆角与直线段的切点附

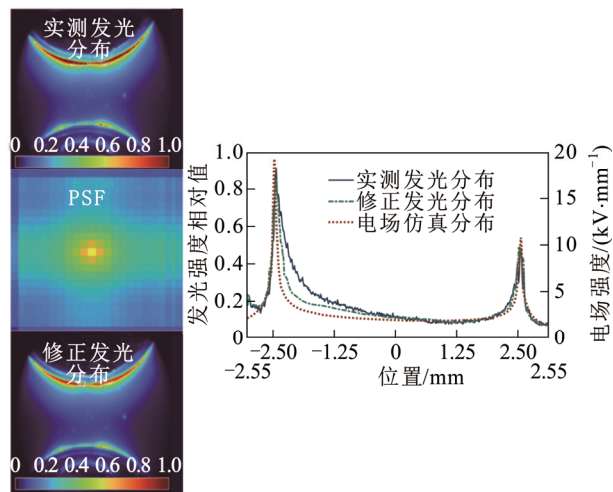


图 19 发光分布盲解卷积修正结果

Fig.19 The blind deconvolution results

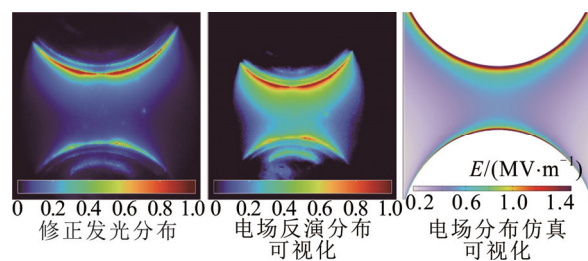
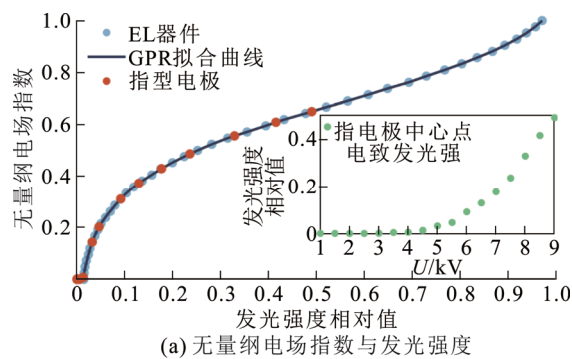
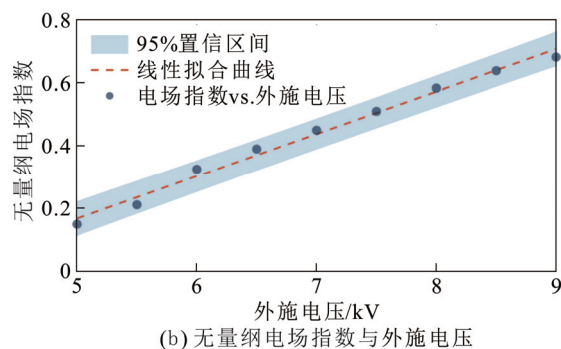


图 20 电场反演可视化结果

Fig.20 Comparison between the estimated electric field and the simulated electric field



(a) 无量纲电场指数与发光强度



(b) 无量纲电场指数与外施电压

图 21 指型电极中心点处无量纲电场指数与外施电压关系

Fig.21 Relationship between the dimensionless electric field index at the center point of the finger electrode and the applied voltage

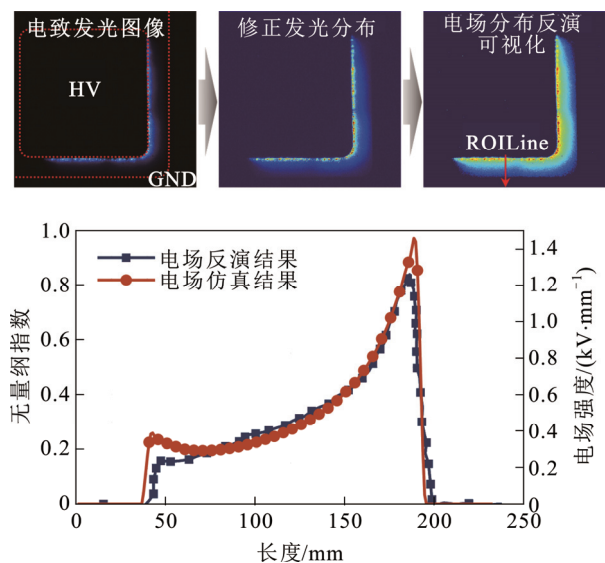


图22 无人工缺陷 DBC 衬底表面电场分布可视化结果

Fig.22 Schematic diagram of electric field inversion for artificial defect-free DBC substrate

近区域成为最大发光点聚类中心(即高危绝缘区域)的概率为 66.33%, 这与蚀刻工艺易导致铜层圆角切线处形成微小尖锐缺陷的普遍认知相符^[32]。对于含缺陷的 DBC 衬底, 各温度下最大发光点聚类中心主要分布于两个人工尖锐点, 其分布概率分别为 56.47%(间距 2 mm)和 38.82%(间距 3 mm)。进一步对两个尖锐点沿图 24 所示方向上的发光分布进行可视化。结果显示, 两个尖锐点的最大发光强度基本一致(幅值差异小于 2%), 表明在此实验条件下(峰值 $V_{pp}=0.8$ kV), 高压电极与接地电极之间的间距(2 mm 和 3 mm)对缺陷尖端 EL 强度的影响相对较小。这进一步说明铜层边界(特别是缺陷处)的 EL 效应主要受局部强电场(如三结合点或尖端附近的强垂直电场分量)控制。由此可以推断, 在一定范围内, 单纯增加铜层间距对提升 DBC 衬底特定缺陷点绝缘性能的改善效果可能有限。此外, 观察到随着温度的升高, 发光曲线的峰值增加且发光区域有外扩的趋势, 这可能归因于长时间方波激励下空间电荷的积累以及高温与电场的耦合效应对局部电场分布产生了影响^[33-34]。

3 温度场分布反演可视化

3.1 方波激励 EL 温度依赖性

为探究温度对 EL 积分光谱分布特性的影响, 本节在固定方波电压参数的条件下, 使用陶瓷加热片将 EL 器件加热至不同设定温度。如图 25(a)所示,

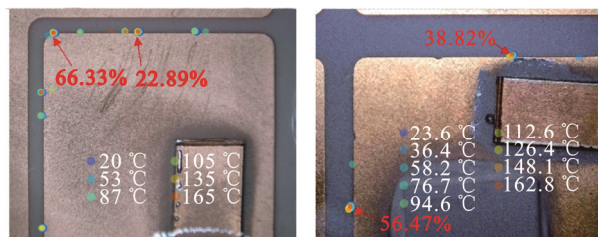


图23 不同温度下最大发光点分布概率分布

Fig.23 Schematic diagram of probability distribution of maximum electric field point

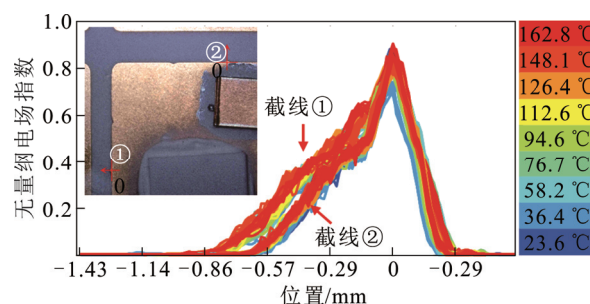
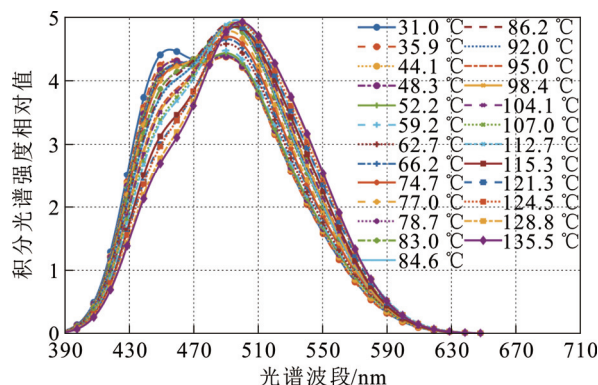
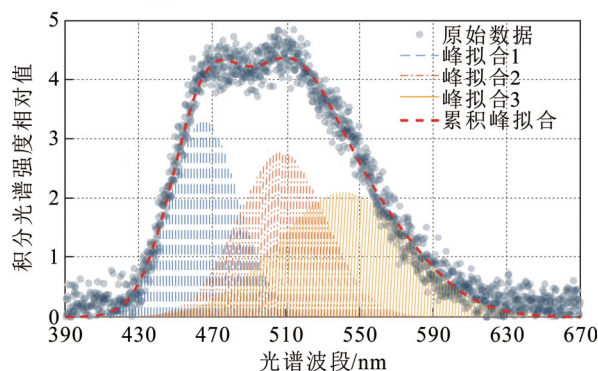


图24 不同温度下不同间距的尖锐区域发光分布

Fig.24 EL distribution of the sharp areas with different spacing varying with temperature



(a) 不同温度下EL积分光谱曲线



(b) 高斯分峰拟合结果

图25 不同温度下 EL 积分光谱特性

Fig.25 Schematic diagram of the integral spectrum curve varying with temperature

不同温度下 EL 光谱特征峰主要位于蓝绿光波段。以 51.2 °C 下的 EL 积分光谱曲线为例, 通过高斯分峰拟合可以得到如图 25(b)所示的 3 个主要特征峰及其拟合曲线。从图 26 可以看出, 随着温度的升高, 特征峰 1(波长范围约 420~470 nm)和特征峰 2(波长范围约 470~520 nm)的中心波长均呈现出红移现象。这一现象主要归因于温度升高导致带隙宽度减小, 使得电子跃迁所需的能量降低, 从而导致发光峰值的红移。EL 在不同温度条件下的光谱特性变化规律, 为实现基于 EL 效应的温度分布可视化应用提供了重要的理论依据。

3.2 基于电致发光效应的温度分布反演

前述方波激励下 EL 的温度依赖性实验结果表明, EL 颗粒发光中心的光谱特性对温度具有显著的敏感性。积分光谱分峰拟合结果表明蓝色与绿色发射峰的 EL 强度随着温度升高呈规律变化。因此, 本研究选择计算 EL 图像 G-B 通道强度比值($R_{G/B}$)作为表征温度的特征参数。计算 EL 器件 ROI 区域图像的 $R_{G/B}$ 后取平均值, 绘制了其随温度变化的演化散点分布, 如图 27 所示。为了研究外施电压幅值与 $R_{G/B}$ 温度响应特性之间可能存在的耦合关系, 本研究在一系列梯度温度点上, 对 EL 器件分别施加 60~90 V 的阶梯变化的方波电压(步长 2 V)。在每个电压和温度组合下, 同步采集 EL 发光图像(每组重复采集 10 次以减小随机噪声影响), 并计算 ROI 区域内 $R_{G/B}$ 的均值 $\mu_{T,U}$ 及标准差 $\sigma_{T,U}$ 。随后定义如下式所示变异系数(coefficient of variation, CV) $C_{V,T,U}$, 通过标准化离散程度, 实现各电压幅值激励下 RGB 分布的平稳性量化:

$$C_{V,T,U} = \frac{\sigma_{T,U}}{\mu_{T,U}} \times 100\% \quad (10)$$

图 28 展示了 84 °C 条件下, 不同电压幅值(60~90 V, 步长 2 V)激励下多次采集(10 次)得到的 $R_{G/B}$ 分布箱型图。计算结果显示, 在同一温度下, 不同电压幅值激励下的 CV 值均小于 1.5%, 表明多次测量得到的 $R_{G/B}$ 值分布集中且稳定。进一步对所有测试温度点下的 CV 值进行统计, 结果表明在各个温度节点, 不同电压幅值激励所对应的 CV 值均小于 10%, 说明在较宽的温度和电压范围内, 外施电压幅值的变化对 $R_{G/B}$ 值无显著影响。上述结果表明, 基于 EL 发光特性提取 $R_{G/B}$ 作为温度表征量具有较好的电压独立性。因此, 采用 GPR 算法进一步建立了 $R_{G/B}$ 与温度的映射关系, 如图 27 中红色虚线所示。

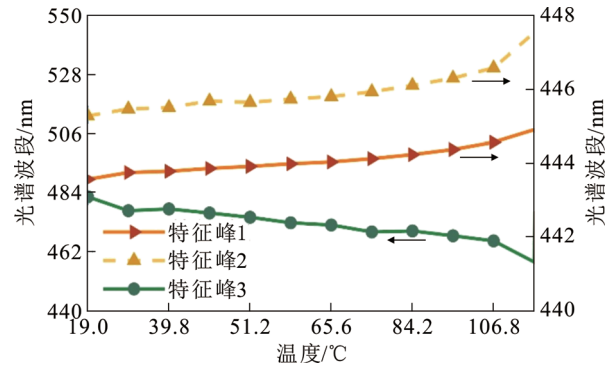


图 26 特征峰波段随温度升高演化趋势

Fig.26 Schematic diagram of the characteristic spectral peaks varying with temperature

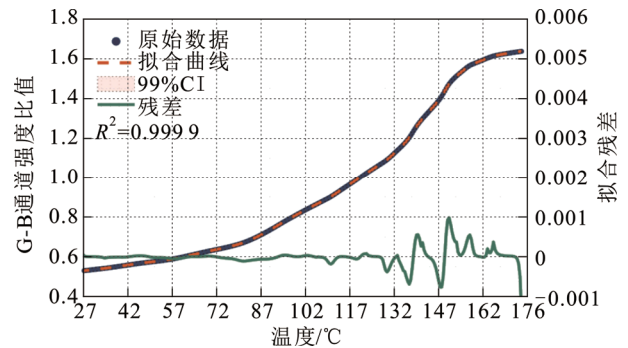


图 27 EL 器件 G/B 通道强度比值随温度升高演化趋势(GRP 拟合结果)

Fig.27 Evolution trend of G/B channel intensity ratio with temperature increase in EL devices (fitting results of GPR model)

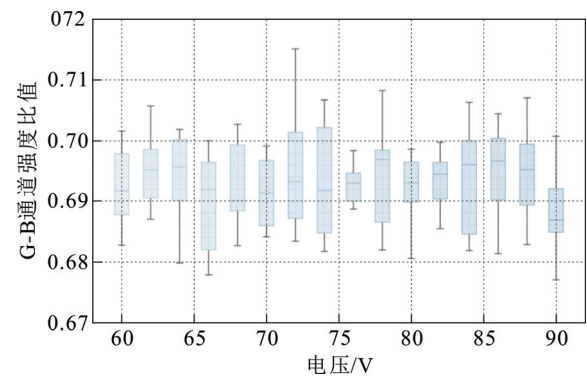


图 28 不同幅值电压激励下多次采集($m=10$)RGB 分布箱型图(84 °C)

Fig.28 Box plots of RGB distribution under multiple acquisitions ($m=10$) with different amplitude voltage excitation (84 °C)

此外, 针对两款 DBC 衬底试样, 使用陶瓷发热片施加不同温度, 并拍摄固定方波电压下目标区

域的EL图像。由于两款DBC衬底的几何结构不同,预期其表面会形成不同的温度空间分布。实验中,两种试样的发热片均粘贴于高压铜层上,以模拟实际功率模块运行时的发热情况。对这些图像进行盲解卷积发光分布修正后,计算其空间分布上的强度比值参数 $R_{G/B}$ 。然后,将得到的 $R_{G/B}$ 空间分布逐点代入已建立的 $R_{G/B}$ 与温度之间的映射关系中,得到DBC衬底目标区域空间温度分布可视化结果,如图29所示,标注的温度为使用红外测温仪对发热片中心的测温结果。对无人工缺陷DBC衬底上1.5 mm高压-接地间隙区域的发光分布进行观测。温度反演结果如图29所示,取发光区域固定点位(按照距离接地电极距离大小进行选择)的温度反演结果,反演结果表明各点位温度分布值差异较小,即此时1.5 mm间距铜层间的温度分布均匀。这是由于该试样中陶瓷发热片粘贴于DBC衬底背面铜层,且铜的导热能力较强,此时上铜层以及铜层间的陶瓷表面温度分布均匀。对于含微缺陷的DBC衬底,其2 mm HV-GND间距下的温度反演结果表明,在铜层边缘反演得到较高温度,且温度大致沿垂直于高压铜条边缘并指向接地电极的方向快速衰减。值得注意的是,最大温度位于人工设置的尖锐缺陷处,表明结构缺陷处不仅是电场集中点,也更容易形成局部高温点,从而构成潜在的绝缘薄弱点。该方法实现了DBC衬底温度分布的精细化可视化反演,可为功率模块的热设计验证与热失效分析提供亚毫米级的实验依据。

4 结论

1) 提出了一种DBC衬底电场与温度同步反演及可视化方法。该方法基于方波激励下的EL光学特性,旨在满足中高压功率模块DBC衬底绝缘状态的评估需求。通过对复合发光涂层介电特性的研究,并结合有限元仿真及PD测试,验证了该涂层对DBC衬底原有电场分布无显著影响。

2) 建立了EL特性与关键物理量的映射模型。通过研究三明治结构EL器件在不同方波电压和温度下的光响应及光谱特性,利用GPR算法,分别构建了EL图像G通道强度与无量纲电场指数之间、以及G-B通道强度比值($R_{G/B}$)与温度之间的定量关系。

3) 实现了复杂条件下发光分布的精确校正与电场反演。考虑到实际测量中强发光区域存在光学散射效应,引入盲解卷积算法对观测到的电极表面

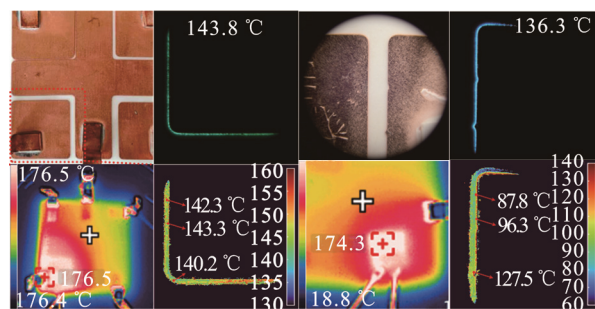


图29 DBC衬底温度分布反演可视化结果

Fig.29 Visualization results of DBC substrate temperature distribution inversion

发光分布进行校正。基于此,获得了指型电极和典型DBC衬底试样表面的无量纲电场指数分布,并通过与外施电压的线性关系及有限元仿真结果对比,验证了电场反演可视化模型的有效性。

4) 拓展了方法在绝缘评估与温度监测中的应用。实现了不同梯度温度下DBC衬底高危绝缘点(最大发光点)出现概率的评估,并基于发光强度比值参数实现了DBC衬底温度分布的可视化。

参考文献 References

- [1] 段子越, 孟永庆, 宋博阳, 等. 基于模块化多电平矩阵换流器的柔性低频输电系统大信号稳定性分析[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 3741-3751.
DUAN Ziyue, MENG Yongqing, SONG Boyang, et al. Large signal stability analysis of flexible low frequency transmission system based on modular multilevel matrix converter[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3741-3751.
- [2] 孟伟, 李学宝, 张金强, 等. 温度对碳化硅器件封装用有机硅弹性体陷阱特性的影响[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 577-587.
MENG Wei, LI Xuebao, ZHANG Jinqiang, et al. Trap characteristics with their temperature-dependence of silicone elastomer for encapsulation in SiC devices[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 577-587.
- [3] 李标俊, 向权舟, 姚传涛, 等. 柔直换流阀功率模块热阻抗综合分析方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 238-247.
LI Biaojun, XIANG Quanzhou, YAO Chuantao, et al. Comprehensive analysis method of thermal impedance for power module of flexible direct current converter[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 238-247.
- [4] CAVALLINI A, FABIANI D, MONTANARI G C. Power electronics and electrical insulation systems - part 1: phenomenology overview[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, 26(3): 7-15.
- [5] FABIAN J H, HARTMANN S, HAMIDI A. Analysis of insulation failure modes in high power IGBT modules[C]//Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference. Hong Kong, China: IEEE, 2005: 799-805.
- [6] LIU X C, LI X B, LI C, et al. Characteristics and identification of partial discharge for insulation structures in high voltage IGBT modules under positive square wave voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(4): 5347-5359.
- [7] EBKE T, KHADDOUR A, PEIER D. Degradation of silicone gel by partial discharges due to different defects[C]//2000 Eighth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications. Edinburgh, UK: IET, 2000: 202-207.

- [8] MO S Y, CHANG F H, YANG J L, et al. Analysis of discharge caused by soldering defect in wire-bonding power module[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2022, 12(12): 1907-1913.
- [9] SCHULZ-HARDER J. Advantages and new development of direct bonded copper substrates[J]. Microelectronics Reliability, 2003, 43(3): 359-365.
- [10] LI J J, LIANG Y, MEI Y H, et al. Packaging design of 15 kV SiC power devices with high-voltage encapsulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(1): 47-53.
- [11] DIMARINO C M, MOUAWAD B, JOHNSON C M, et al. 10-kV SiC MOSFET power module with reduced common-mode noise and electric field[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 6050-6060.
- [12] 冯 迪, 刘 灏, 李嘉贤, 等. 基于电场传感器阵列的输电线路电压非接触式测量方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 292-301.
- FENG Di, LIU Hao, LI Jiaxian, et al. Non-contact voltage measurement method of transmission line based on electric field sensor array[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 292-301.
- [13] YANG Q, SUN S P, HE Y X, et al. Intense electric-field optical sensor for broad temperature-range applications based on a piecewise transfer function[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1648-1656.
- [14] YAZDANI M, THOMSON D J, KORDI B. Passive wireless sensor for measuring AC electric field in the vicinity of high-voltage apparatus[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4432-4441.
- [15] LI Z Y, YUAN H W, CUI Y, et al. Measurement of distorted power-frequency electric field with integrated optical sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(4): 1132-1139.
- [16] YANG X Y, JIA Y F, GAO L, et al. A method for measuring surface electric field intensity of insulators based on electroluminescent effect[J]. Energy Reports, 2020, 6: 1537-1543.
- [17] CHEN T, SHAFAI C, RAJAPAKSE A, et al. Micromachined ac/dc electric field sensor with modulated sensitivity[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 245: 76-84.
- [18] POURHOSSEINI A S, BERBILLE A, WANG S Y, et al. Magnetic-force-induced-luminescent effect in flexible ZnS: Cu/PDMS/NdFeB composite[J]. Advanced Materials Interfaces, 2023, 10(9): 2202332.
- [19] LIAO J, SUN J L, DONG F Y, et al. Self-powered, flexible, and instantly dynamic multi-color electroluminescence device with bi-emissive layers for optical communication[J]. Nano Energy, 2023, 112: 108488.
- [20] GUO X B, TANG H D, XUE J Y, et al. Self-diagnosis and high-flashover-strength electroluminescence coatings[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(2): 663-671.
- [21] 杨欣颐, 贾云飞, 高 璐, 等. 基于电致发光效应的绝缘子表面场强测量方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1411-1419.
- YANG Xinyi, JIA Yunfei, GAO Lu, et al. Method for measuring surface electric field intensity of insulators based on electroluminescence effect[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1411-1419.
- [22] LI B, ZHANG F, LIU W, et al. Fluorescent optical fiber intensity ratio temperature sensor based on polymer matrix using down-conversion from ZnS: Cu[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 7006607.
- [23] 冒俊杰, 高洪艺, 李成敏, 等. 基于电致发光效应的非接触式碳化硅 MOSFET 结温在线检测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 1092-1102.
- MAO Junjie, GAO Hongyi, LI Chengmin, et al. Research on non-contact on-line junction temperature detection method of SiC MOSFET based on electroluminescence effect[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 1092-1102.
- [24] SAMET M, KALLEL A, SERGHEI A. Maxwell-Wagner-Sillars interfacial polarization in dielectric spectra of composite materials: scaling laws and applications[J]. Journal of Composite Materials, 2022, 56(20): 3197-3217.
- [25] YANG C H, CHEN B H, ZHOU J X, et al. Electroluminescence of giant stretchability[J]. Advanced Materials, 2016, 28(22): 4480-4484.
- [26] 王争东, 罗 盟, 成永红. 高压大功率 IGBT 失效机理和耐高温改性有机硅灌封材料研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1632-1644.
- WANG Zhengdong, LUO Meng, CHENG Yonghong. Review of research on failure mechanism of high voltage and high power IGBT and modified silicone potting materials with high temperature resistance[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1632-1644.
- [27] WANG L, ZENG Z, SUN P, et al. Electric-field-dominated partial discharge in medium voltage SiC power module packaging: model, mechanism, reshaping, and assessment[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 5422-5432.
- [28] TOUSI M M, GHASSEMI M. Characterization of nonlinear field-dependent conductivity layer coupled with protruding substrate to address high electric field issue within high-voltage high-density wide bandgap power modules[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(1): 343-350.
- [29] MOON JEONG S, SONG S, LEE S K, et al. Mechanically driven light-generator with high durability[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(5): 051110.
- [30] ZHANG B Y, GAO W Q, QI Z, et al. Inversion algorithm to calculate charge density on solid dielectric surface based on surface potential measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(12): 3316-3326.
- [31] RICHARDSON W H. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. Journal of the Optical Society of America, 1972, 62(1): 55-59.
- [32] BAYER C F, WALTRICH U, SCHNEIDER R, et al. Enhancing partial discharge inception voltage of DBCs by geometrical variations based on simulations of the electric field strength[C]//9th International Conference on Integrated Power Electronics Systems. Nuremberg, Germany: VDE, 2016: 1-5.
- [33] WANG Q L, CHEN X R, DAI C, et al. Experimental and finite element analysis of epoxy-based composites for packaging materials to reduce electric field and power loss under AC and DC conditions[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2022, 12(1): 11-26.
- [34] ZHANG X T, CHENG Z L, SUN X, et al. A direct bonding copper degradation monitoring method for insulated gate bipolar transistor modules: boundary-dependent thermal network combined with feedback control[J]. High Voltage, 2023, 8(6): 1264-1274.



WANG Kai

Ph.D. candidate



REN Ming

Ph.D., Professor

Corresponding author

王 凯

1992—, 男, 博士生

主要从事功率模块绝缘封装可视化校核、方波激励局部放电检测与诊断等方面的研究

E-mail: wangkai9370@stu.xjtu.edu.cn

任 明(通信作者)

1987—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事高压试验技术、状态监测智能传感器、图像融合与故障可视化等方面的研究

E-mail: renming@xjtu.edu.cn