

· 研究论文 ·

磁场诱导定向提升环氧树脂复合电介质非线性电导特性与调控机理

徐华松^{1,2*} 罗天熠^{1,2} 陈艾琳^{1,2} 陈有顺^{1,2} 张齐艳^{1,2} 张月³

(深圳大学¹电子与信息工程学院²射频异质异构集成全国重点实验室 深圳 518060)

(³哈尔滨理工大学 工程电介质及其应用教育部重点实验室 哈尔滨 150080)

摘要 为改善高压电气设备中因电场分布不均导致的绝缘材料老化与击穿问题,提出了一种通过磁场诱导定向提升 SiC 纳米线/环氧树脂复合材料非线性电导性能的新方法.首先,通过在 SiC 纳米线表面负载磁性 Fe₃O₄ 纳米粒子赋予其磁场响应能力,随后在外加磁场诱导下固化成型,实现了纳米线在环氧树脂基体中的纵向有序排列.研究表明,该方法制备的定向复合材料在低填充体积分数下即表现出超高的非线性电导性能,其中在体积分数为 5% 填充下非线性系数最高可达 30.88,且所有定向样品的非线性系数均高于 15.通过调控 SiC@Fe₃O₄ 填料的体积分数和 Fe₃O₄ 的负载量,可有效调节复合材料的阈值场强.结合 XPS 分析与第一性原理计算,证实了在 SiC 与 Fe₃O₄ 界面处因电子的自发转移形成了内建电场和肖特基势垒,该因素是产生非线性电导性能的主导原因.热刺激电流测试结果进一步揭示了 Fe₃O₄ 负载量通过引入深陷阱能级来调控阈值场强的影响机制.本研究为设计高性能非线性电导绝缘材料提供了新的制备策略与理论依据.

关键词 环氧树脂;碳化硅纳米线;磁场定向;非线性电导;肖特基势垒

引用: 徐华松,罗天熠,陈艾琳,陈有顺,张齐艳,张月. 磁场诱导定向提升环氧树脂复合电介质非线性电导特性与调控机理. 高分子学报, doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26052.

Citation: Xu, H. S.; Luo, T. Y.; Chen, A. L.; Chen, Y. S.; Zhang, Q. Y.; Zhang, Y. Enhanced nonlinear conductivity of epoxy resin composite dielectrics via magnetic field-induced alignment and regulation mechanism research. *Acta Polymerica Sinica* (in Chinese), doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26052.

随着特高压直流输电技术不断发展,其电气设备的绝缘性能可靠性是至关重要的核心保障.随着电气和电力设备趋向于高电压、小型化和高功率密度,对绝缘材料的电、热、力等核心性能提出了严峻挑战^[1].环氧树脂、硅橡胶等聚合物基体目前已被广泛应用于绝缘子、电缆附件、套管等输变电装备领域^[2,3].但由于材料介电特性的差异、结构几何形状的突变以及界面缺陷的存在,在长时间带电运行后电场分布易产生局部集

中与畸变,形成显著的不均匀电场,严重时导致绝缘电介质降解甚至击穿失效^[4-6].为了抑制电场畸变从而改善电场分布不均的现象,研究人员通常将宽禁带半导体材料(如 SiC、ZnO 等)掺杂进聚合物基体制备具有非线性电导特性的智能电介质复合材料.该复合电介质可以在低场下维持优异的绝缘性能,在高电场下快速消散表面电荷,从而维持电气设备的安全稳定运行^[7-11].

研究人员一直致力于非线性电导复合电介质

2026-02-11 收稿, 2026-04-10 录用, 网络出版.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(基金号 52207231)和工程电介质及其应用教育部重点实验室哈尔滨理工大学(项目号 KFM202609).

* 通信联系人, E-mail: xuhs@szu.edu.cn

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26052; CSTR: 32057.14.GFZXB.2026.7604

的结构与性能调控机理研究. 为了制备具有优异非线性电导性能的复合材料, 通常需要在聚合物基体中掺杂较高浓度的半导体填料, 这虽然可以带来优异的非线性电导性能, 但较高的填充量会严重影响材料的机械性能和可加工性能, 并降低击穿强度^[12]. Zhao等^[13]制备了ZnO压敏微球与碳纤维的硅橡胶三元复合材料, 实现了非线性电导性能, 非线性系数达到12.6, 但其逾渗阈值高达33%体积分数, 显著增加了复合材料的加工难度. 因此, 如何保持复合材料在较低的填充量下获得优异的非线性电导性能至关重要. 研究表明, 利用一维以上的高纵横比填料可以降低复合材料的渗流阈值. 南策文等人研究了材料维数对于复合材料中电渗流网络的影响, 发现管状、棍状等一维填料相较于片状与颗粒填料可提供更优异的非线性电导性能^[14]. 基于上述发现, 迟庆国团队利用硅烷偶联剂改性碳化硅晶须充当填料制备了具有非线性电导性能的环氧树脂复合材料, 在体积分数为4%下, 复合材料的非线性系数达到6.57^[15]. 然而, 上述仅从填料维数方面提升非线性电导性能的效果有限, 非线性系数仅在10以下, 难以达到ZnO压敏微球填充复合材料的非线性系数(10~20). 目前, 在实现高非线性系数的可行策略中, 一种有效途径是选用高纵横比填料并构建较高的势垒屏障, 同时结合三维逾渗网络结构设计, 从而在低填充体积分数下获得优异的非线性电导特性.

本研究提出了一种肖特基势垒构建并结合磁场辅助定向提升复合电介质非线性电导性能的新方法. 通过在SiC纳米线表面负载磁性Fe₃O₄纳米粒子构建界面势垒, 以环氧树脂为聚合物基体, 结合外加磁场辅助定向技术改变SiC纳米线在基体中的取向结构, 构建沿电场方向的高场导电路径, 合成了具有超高非线性系数的低填充非线性电导复合电介质. 其次, 综合界面势垒的量子化学计算与热刺激电流、介电测试验证, 揭示了该新型复合电介质的非线性导电机理. 研究结果有望为新型非线性电导复合电介质的合成及调控机理研究提供新思路和理论指导.

1 实验部分

1.1 试样制备

1.1.1 实验材料

SiC纳米线材料(直径约为100 nm, 长度约为

10~20 μm)由丰汇纳米科技有限公司提供. 脂环族环氧树脂购自南通新纳希新材料有限公司. *N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)、甲基六氢苯酚(MHHPA)、2-乙基-4-甲基咪唑(EMI)均购自上海麦克林生化有限公司. EMG-605磁流体购自日本FerroTec集团大和热磁电子有限公司. 所有原材料均未额外处理或进一步提纯.

1.1.2 SiC纳米线表面负载

首先, 取一定质量的SiC纳米线分散在200 mL去离子水中(这里以4 g SiC负载质量分数2%的Fe₃O₄粒子为例), 超声分散30 min, 得到分散液. 然后, 将380 μL EMG-605用8 mL去离子水稀释, 得到稀释液. 在磁力搅拌器中, 将稀释液逐滴加入分散液, 待完全吸附后, 将溶液过滤. 将过滤得到的固体在100 °C下干燥10 h得到负载Fe₃O₄粒子的SiC纳米线. 将上述得到的纳米线命名为 $x\%SiC@y\%Fe_3O_4$. 其中, x 表示填料占整体的体积分数(%), y 表示Fe₃O₄纳米粒子占SiC纳米线的质量分数(%).

1.1.3 环氧树脂复合材料的制备

首先, 将一定质量的SiC@Fe₃O₄纳米线超声分散在*N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)中30 min, 随后将分散液同5 g脂环族环氧树脂混合并在130 °C下搅拌2 h以确保SiC@Fe₃O₄纳米线均匀分散在环氧树脂中. 待DMF蒸发干净后, 加入5.5 g固化剂和0.1 g促进剂在磁力搅拌器中混合均匀. 所得混合液在70 °C真空烘箱中连续真空脱气15 min以去除混合液中的气泡. 最后, 将混合液倒入聚四氟乙烯模具后, 将模具置于高温磁铁所产生的磁场之中(磁铁尺寸50 mm × 50 mm × 10 mm, 相距40 mm, 单块磁铁表面磁场强度约为2920 Gs, 将永磁体近似为磁偶极子模型, 其轴线上远场磁场按 $1/z^3$ 规律衰减. 以磁体磁化方向厚度 $d=10$ mm为特征长度, 中心点距磁体表面距离 $z=20$ mm, 则单块磁体在中心处的磁感应强度可按相对距离比 $(d/z)^3$ 估算, 约为365 Gs. 两块磁体异极相对、磁场同向叠加, 总磁感应强度约为730 Gs), 在鼓风干燥箱中以100 °C, 1 h、115 °C, 1 h、135 °C, 1 h梯度程序升温固化, 得到厚度为0.5 mm的定向填充的环氧树脂样品. 同时, 将固化过程中未利用磁铁定向的随机填充环氧树脂复合材料作为对照组.

1.2 表征方法

1.2.1 结构与形貌表征

采用X射线衍射(XRD)、高分辨透射电子显微镜(TEM)和X射线光电子能谱(XPS)表征SiC纳米线表面负载纳米 Fe_3O_4 前后的形貌与化学结构特征. 通过扫描电子显微镜(SEM)观测环氧树脂复合材料的横截面形貌. 制样时, 通过液氮急速冷冻并使其断裂, 保留完整的截面结构并喷金, 以便于观察. XRD采用日本RIGAKU公司的MiniFlex600型号衍射仪; TEM采用美国FEI公司的Talos F200x型号电镜; XPS采用美国THERMO公司的Nexsa型号能谱仪; SEM采用捷克TESCAN公司的MIRA LMS型号电镜.

1.2.2 直流电导率测试

采用武汉普塞斯仪表有限公司的E300高压直流源表测试不同种复合材料的非线性电导特性, 该源表能提供0~3500 V阶梯上升的直流电压, 并测量每个电压点下复合材料的电流大小, 计算得到复合材料的电流密度-电场强度(J - E)曲线. 其中, 测试电极的面积 S 固定, 即样品的电流密度 J 可由 I/S 得到. 通过测量复合材料的厚度 d , 样品电场强度 E 可由 V/d 得到. 样品的电导率 σ 可由 J/E 计算得到. 用 σ - E 曲线表征复合材料的非线性电导特性, 其阈值场强和非线性系数可由提供符合样品的伏安特性曲线由式(1)拟合得到^[16]:

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 + (E/E_s)^{\alpha-1} \right) \quad (1)$$

式中, σ 为电导率(S/m); σ_0 为低电场下的电导率(S/m); E 为电场强度(kV/mm); E_s 为阈值场强(kV/mm); α 为非线性系数;

1.2.3 介电性能测试

采用KEYSIGHT公司的E4980AL阻抗分析仪测试环氧树脂复合材料的介电常数和介质损耗角正切, 测试频率范围是 $10^2 \sim 10^6$ Hz, 电极直径为10 mm, 测量电压幅值为1 V.

1.2.4 热刺激电流测试(TSDC)

通过高压放大器(Trek Model 624)、温控烘箱与电流计(Keithley 6514)搭建测试平台, 对环氧树脂复合材料进行热刺激电流测试. 在60 °C下对样品施加100 V电压并保持15 min, 随后利用液氮迅速降温至10 °C. 再以5 °C/min的恒定速率升温, 记录样品电流与温度曲线, 以此衡量样品中陷阱的能级分布. 所有样品均采用喷金镀上相

同面积的电极, 以确保测量电流大小的准确性.

1.2.5 第一性原理计算

基于密度泛函理论的第一性原理平面波赝势方法, 运用VASP软件计算了原子各轨道的电子态密度, 选择基组为广义梯度近似(general gradient approximate, GGA)下的(Perdew-Burke-Ernzerhof, PBE)交换-关联泛函, 使用平面波基矢计算体系的电子能带结构和态密度. 将能量、自洽场以及能带的收敛精度均定为 1×10^{-6} eV. 作用于原子上的最大力为0.1 eV/nm, 截止能为700 eV. 由于SiC- Fe_3O_4 模型是层状结构, 在布里渊区积分采用 $5 \times 5 \times 1$ 的Monkhost-Pack型K点网格进行迭代设置. 真空层设定为2 nm.

2 结果与讨论

2.1 SiC纳米线表面改性

通过XRD测试观察了SiC与SiC@ Fe_3O_4 的晶体结构特征, 如图1(a)所示. 位于33.8°、35.7°、41.5°、60.6°、71.9°和75.5°处的较强衍射峰分别对应SiC的(101)、(102)、(104)、(110)、(116)和(0012)晶面(参考XRD标准卡PDF#29-1131). Fe_3O_4 的衍射峰较弱, 在30.6°、43.5°、57.5°和63.0°的衍射峰分别对应 Fe_3O_4 的(220)、(400)、(511)和(440)晶面(参考XRD标准卡PDF#19-0629), 其中位于35.5°的(311)晶面由于与SiC的(102)晶面位置接近而重合, 这可能是由于 Fe_3O_4 的负载量较少且粒径较小所造成的^[17].

为了进一步表征 Fe_3O_4 纳米粒子的成功负载, 采用TEM观察了SiC@ Fe_3O_4 的微观形貌以及结构特征, 如图1(b)和1(c)所示. 观察到单根SiC纳米线外负载有一定量的纳米颗粒, 且通过高分辨的晶格间距分析, 可发现纳米颗粒的晶格间距与XRD观察到的 Fe_3O_4 衍射峰所对应PDF标准卡中的晶格间距相吻合. 这证明了 Fe_3O_4 纳米颗粒成功负载至SiC纳米线上.

采用XPS进一步研究了SiC@ Fe_3O_4 的元素组成以及Fe的元素价态, 如图1(d)所示. 全谱图中可以观察到Si、C、O、Fe 4种元素各个轨道的谱峰, 同XRD测试结果表明存在SiC和 Fe_3O_4 这两种化合物组成. 通过对比SiC与SiC@ Fe_3O_4 的全谱图, 可以观察到在56.3和711.0 eV处SiC@ Fe_3O_4 分别出现了Fe 3p和Fe 2p的特征峰, 进一步证明了 Fe_3O_4 纳米颗粒的成功负载. 图1(e)为 Fe_3O_4 的

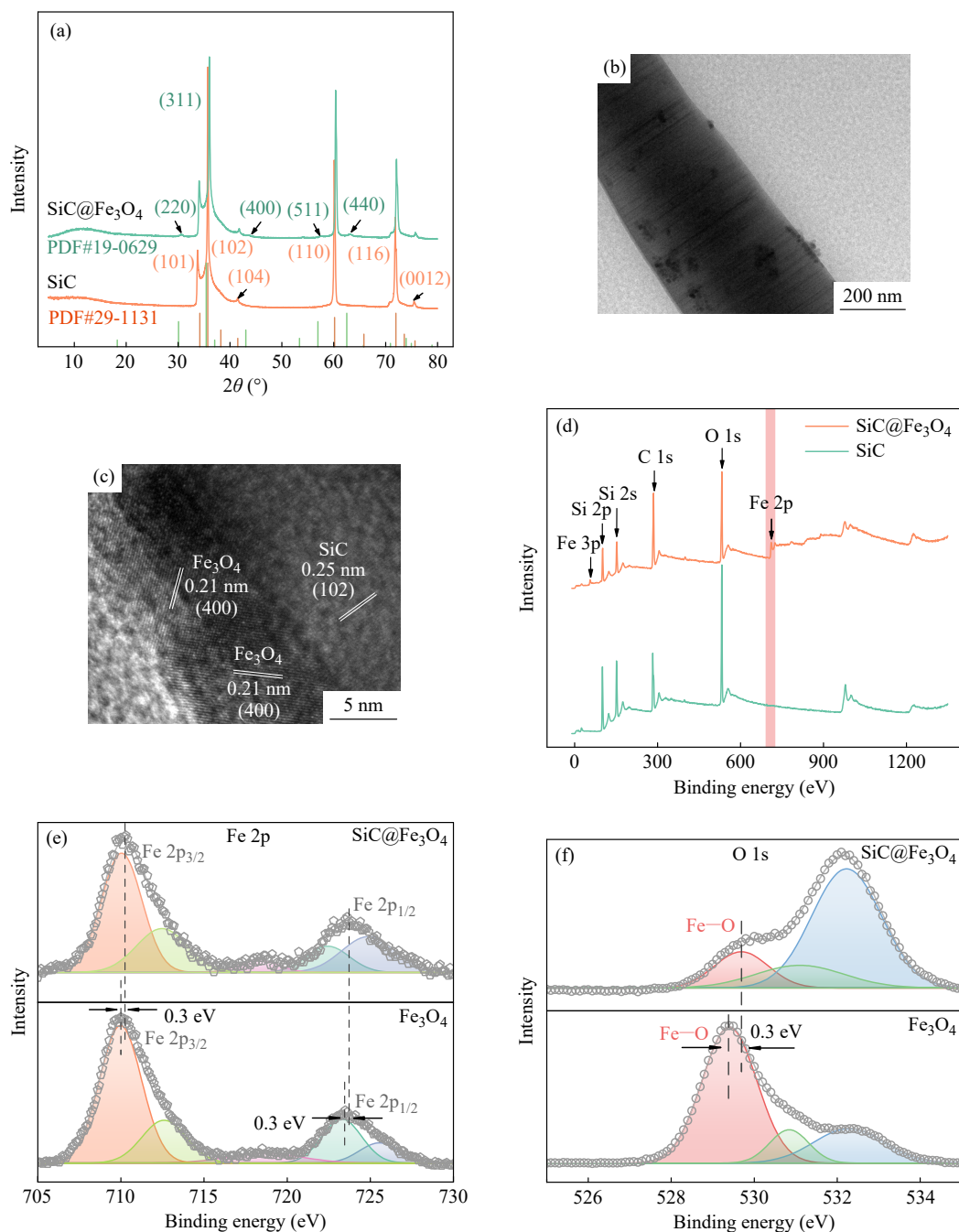


Fig. 1 Characterization and theoretical calculation of Fe₃O₄ nanoparticles surface-loaded on SiC nanowires: (a) XRD patterns of SiC nanowires before and after surface modification; (b) Low-magnification TEM image of SiC@Fe₃O₄; (c) High-magnification TEM image and lattice spacing of SiC@Fe₃O₄; (d) XPS survey spectrum comparison of SiC and SiC@Fe₃O₄; (e) Fe 2p spectrum comparison of SiC@Fe₃O₄ and Fe₃O₄; (f) O 1s spectrum comparison of SiC@Fe₃O₄ and Fe₃O₄.

Fe 2p 精细谱图, 其由 2 个主峰构成, 710.1 与 723.4 eV 分别对应 Fe 2p_{3/2} 与 Fe 2p_{1/2} 2 个特征峰, 代表 Fe³⁺ 与 Fe²⁺ 的贡献, 对应 Fe₃O₄ 中同时存在 Fe³⁺ 与 Fe²⁺ 2 种 Fe 元素的价态^[18,19]. 通过对比 Fe₃O₄ 与 SiC@Fe₃O₄ 的 Fe 2p 特征峰, 发现 Fe 2p_{3/2} 与 Fe 2p_{1/2} 2 个特征峰均存在 0.3 eV 的偏移量. 这种峰偏移现象同样存在于 Fe₃O₄ 与 SiC@Fe₃O₄ 的

O 1s 谱图中(图 1(f)), 其中的 Fe—O 特征峰也存在 0.3 eV 偏移. 结合能的增加代表电子的丢失, 而结合能减少代表着电子的获得. 由于 SiC 与 Fe₃O₄ 具有不同的功函数, 两者接触时将形成内建电场, 从而导致电子的转移. 结合图 1(e) 与 1(f), SiC@Fe₃O₄ 的 Fe 2p 与 O 1s 的结合能增加, 表明电子在内建电场的驱动下由 Fe₃O₄ 流向 SiC^[20,21].

上述结果证明了电子相互作用的发生，并证实了界面电子从 Fe_3O_4 转移到SiC，这促进了电子的重新分配，并在SiC/ Fe_3O_4 异质结处构建了肖特基势垒，提高了整体势垒高度。

为了进一步研究 $\text{SiC}@Fe_3O_4$ 中的能带结构，基于密度泛函理论的第一性原理平面波赝势方法，运用VASP软件计算了原子各轨域的电子态密度。图2为 $\text{SiC}@Fe_3O_4$ 理论计算的模型体系。图中黄色代表电子密度相比原来增加，蓝色代表电子密度相比原先减少。由图2可知，电子会在

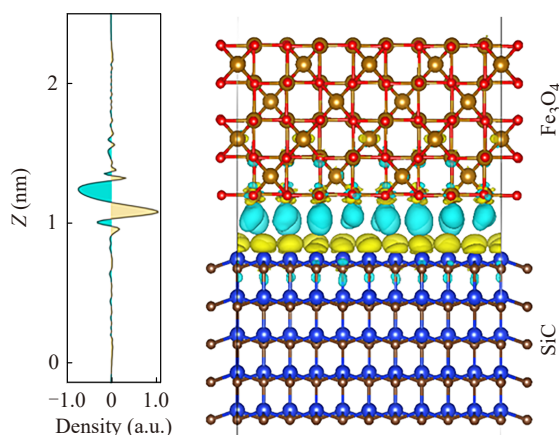


Fig. 2 Differential charge density distribution image of $\text{SiC}@Fe_3O_4$.

$\text{SiC}-Fe_3O_4$ 界面处重排，在靠近 Fe_3O_4 一侧消耗，靠近SiC一侧积聚，代表异质结构形成时电子会自发地由 Fe_3O_4 流向SiC。其中，在Si原子表面形成的电荷积累区和在Fe表面形成的电荷耗尽区共同构成了 $\text{SiC}-Fe_3O_4$ 界面电场，导致其能带向上弯曲，进一步证实了在 $\text{SiC}-Fe_3O_4$ 界面处形成内建电场和肖特基势垒，这与上述XPS中的分析一致。

3.2 环氧树脂复合材料形貌分析

通过SEM测试观察了随机填充与定向填充的环氧树脂复合材料截面形貌。为了清晰观察到复合材料中纳米线的排列取向结构，样品均采用液氮进行脆断，脆断后的SEM横截面图如图3所示。对于随机填充的纳米线/环氧树脂复合材料(图3(a))，可以清楚观察到纳米线在横截面表面处呈现不规则的无序结构。而对于施加磁场定向的纳米线/环氧树脂复合材料(图3(b))，可以清楚的观察到纳米线在横截面表面处呈现纵向定向排列，纳米线之间互相搭接(图3(c))，这种排列方式使得纳米线之间更容易形成纵向连贯的导通路径。此外，可以发现纳米线与环氧树脂基体之间并未出现明显的界面缺陷。其次，通过对比随机填充与定向复合材料表明的XRD图(图3(d))，定

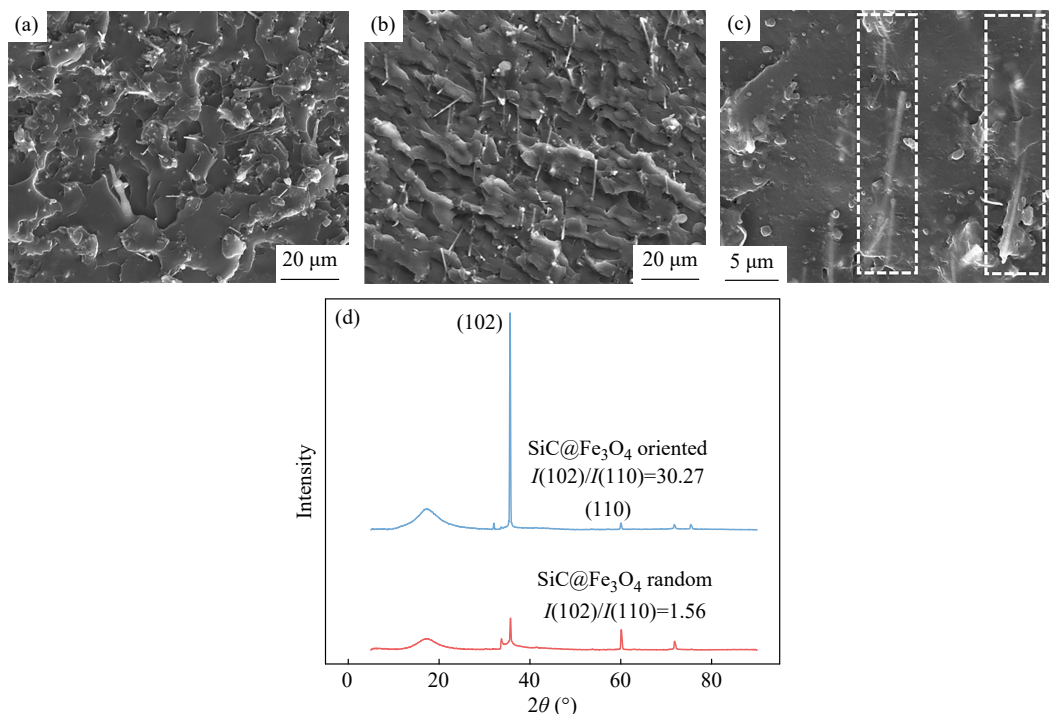


Fig. 3 SEM images of composite materials: (a) cross-section of randomly filled composite materials, (b) cross-section of magnetic field-assisted oriented composite materials and (c) SEM image of interconnected nanowires; (d) XRD patterns of composites before and after orientation.

向复合材料中 SiC 的(102)晶面与(110)晶面比值由 1.56 提升至 30.27, 这说明纳米线在基体中具有极强的取向性, 形成纵向定向有序排序. 这种纵向定向排序的方式在纳米线之间形成了紧密连接的传导路径, 从而在出现局部电场不均引发的局部放电情况时, 连贯的纳米线可以充当电荷的释放路径, 使积聚的电荷沿着纳米线的排列方向快速消散释放^[22].

3.3 非线性电导特性分析

对于非线性电导复合材料, 阈值场强 E_s 和非线性系数 α 都对改善电场均匀性有着重要作用. 阈值场强 E_s 和非线性系数 α 可以通过上述提到的式(1)计算拟合. 随机和定向填充的环氧树脂复合材料非线性电导特性如图 4(a)和表 1 所示. 在相同的填充体积分数(5%)下, 经过磁场定向的

复合材料的非线性系数明显高于随机填充的样品. 这是由于定向样品中 SiC 纳米线的定向排布使得在电荷积累时, 存在更多的导通路径来释放电荷, 进而达到较高的非线性系数. 此外, 这种定向排布使得复合材料的阈值场强相较于未经定向的样品更低, 这是由于定向样品中纳米线所形成的路径相较于未经定向的样品更短以较少数量的纳米线即可形成完整的电荷释放路径, 从而使得阈值场强更低^[23].

图 4(b)为负载量相同体积分数不同下的定向分布复合材料的非线性电导率. 由图可知, 在体积分数为 2% 的填充浓度下, 定向样品即可呈现出显著的非线性电导特性, 具有高达 15.61 的非线性系数. 随着填充体积分数的增加, 非线性系数均维持在较高的范围(15 以上), 阈值场强呈现

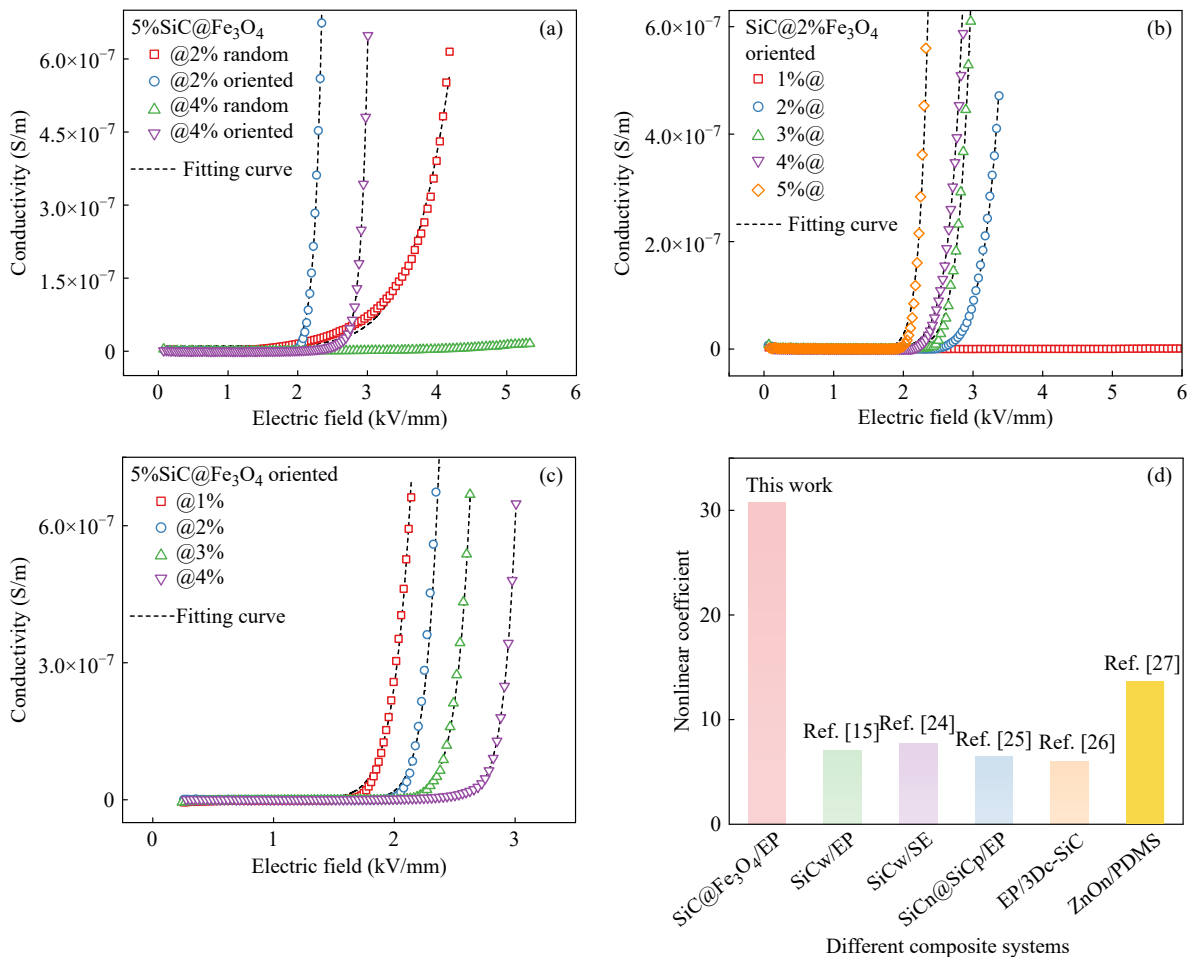


Fig. 4 Nonlinear conductivity performance tests of composites: (a) nonlinear conductivity performance of composites with volume fraction of 5% filler before and after orientation, (b) nonlinear conductivity performance tests of oriented composites with 2 wt% loading Fe₃O₄ at different volume fractions and (c) nonlinear conductivity performance tests of oriented composites with volume fraction of 5% filler at different loading contents; (d) Comparison of nonlinear coefficient with previously reported studies.

Table 1 Nonlinear conductivity performance comparison between composite materials.

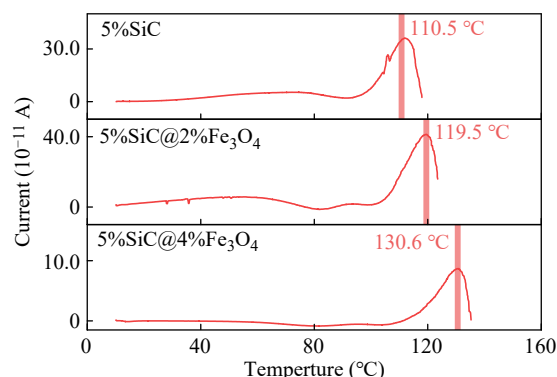
Sample		α	E_s (kV/mm)
5%SiC@Fe ₃ O ₄	@2% Random	8.67	2.48
	@2% Oriented	22.52	1.64
	@4% Random	—	—
	@4% Oriented	30.88	2.46
SiC@2%Fe ₃ O ₄ Oriented	1%@	—	—
	2%@	15.61	2.24
	3%@	18.00	1.93
	4%@	15.77	1.81
	5%@	22.52	1.64
5%SiC@Fe ₃ O ₄ Oriented	@1%	16.19	1.48
	@2%	22.52	1.64
	@3%	23.71	2.03
	@4%	30.88	2.46

下降趋势，这是因为随着体积分数的增加，样品内部更易形成完整导电路径。因此，针对不同电压等级的应用场景，可通过调控填充浓度实现复合电介质的定制化设计。

图4(c)为5%体积分数下不同Fe₃O₄负载量下具有纳米线定向排列的复合材料非线性电导率。由图可知，在相同体积分数(5%)下，所有样品均表现出较高的非线性系数，而阈值场强随着Fe₃O₄负载量的增加而增大。这可能是由于Fe₃O₄纳米粒子的加入使得体系中的晶界增多，陷阱加深，使得样品需要在更强的电场下才能表现出非线性电导特性。

为进一步凸显本研究制备材料的性能优势，将其与近年来已报道的定向或3D结构同类非线性电导复合材料进行非线性系数性能对比。图4(d)是本研究与文献报道^[15,24-27]的同类型复合材料比较，本研究中的复合材料在低填料含量下即可实现更高的非线性系数突破。

为了研究Fe₃O₄负载量对样品阈值场强的调控机制，对不同Fe₃O₄负载量下的非线性电导复合材料进行了热刺激电流(TSDC, thermally stimulation depolarization current)测试，测试结果如图5所示。当未负载Fe₃O₄时，峰值温度仅为110.5 °C，随着负载量增加至4%，峰值温度增加到130.6 °C，上述结果表明，SiC纳米线表面负载的纳米Fe₃O₄引入了深陷阱能级并增加了陷阱电荷密度。在强电场下，载流子被界面深陷阱捕

**Fig. 5** TSDC properties of composite materials.

获，只有克服更大的束缚才能脱陷，从而显著提升阈值场强。其次，Fe₃O₄的引入在SiC/Fe₃O₄界面处构建了肖特基势垒，提高了势垒高度进而提升阈值场强，这也使得复合材料的整体阈值范围有所提升。综上，不仅可通过改变SiC@Fe₃O₄的填充体积调节复合材料的阈值场强，还可以通过调整Fe₃O₄纳米粒子负载量引入深陷阱能级从而调控陷阱电荷密度，起到改变非线性电导材料阈值场强的目的。

3.4 介电性能分析

图6(a)与6(b)对比了纯SiC填充与SiC@Fe₃O₄填充复合材料相对介电常数和介电损耗角正切值的变化曲线。由图可知，在包覆Fe₃O₄纳米粒子后，复合材料的介电常数有所下降，这是因为在包覆磁性Fe₃O₄纳米粒子后，在交流电下复合材料会有部分感性分量抵消容性电流，从而使得等效介电常数降低。图6(b)与6(c)对比了SiC@Fe₃O₄纳米线在不同填充体积下随机分布和定向排列复合材料相对介电常数和介电损耗角正切值的变化曲线。由图可知，在经过磁场定向排布后，不同填充浓度下的复合材料介电常数均有所提高，说明电介质复合材料经过宏观取向诱导后，其内部偶极子相较于未定向的复合材料转向极化更加充分，从而导致更高的介电常数^[28]。图6(d)为Fe₃O₄负载量更高的定向填充复合材料，在不同填充体积下，负载4% Fe₃O₄的试样相较于2%的试样介电常数都增加了1左右。这是由于更高的负载量引入更多Fe₃O₄纳米粒子，此时纳米线能更好地响应磁场的作用，进而使得复合材料中的偶极子转向更加充分，介电常数升高。通过对比3组复合材料介电损耗角正切值，可以发现Fe₃O₄纳米粒子与磁场定向的引入并未显著影响复合材料的

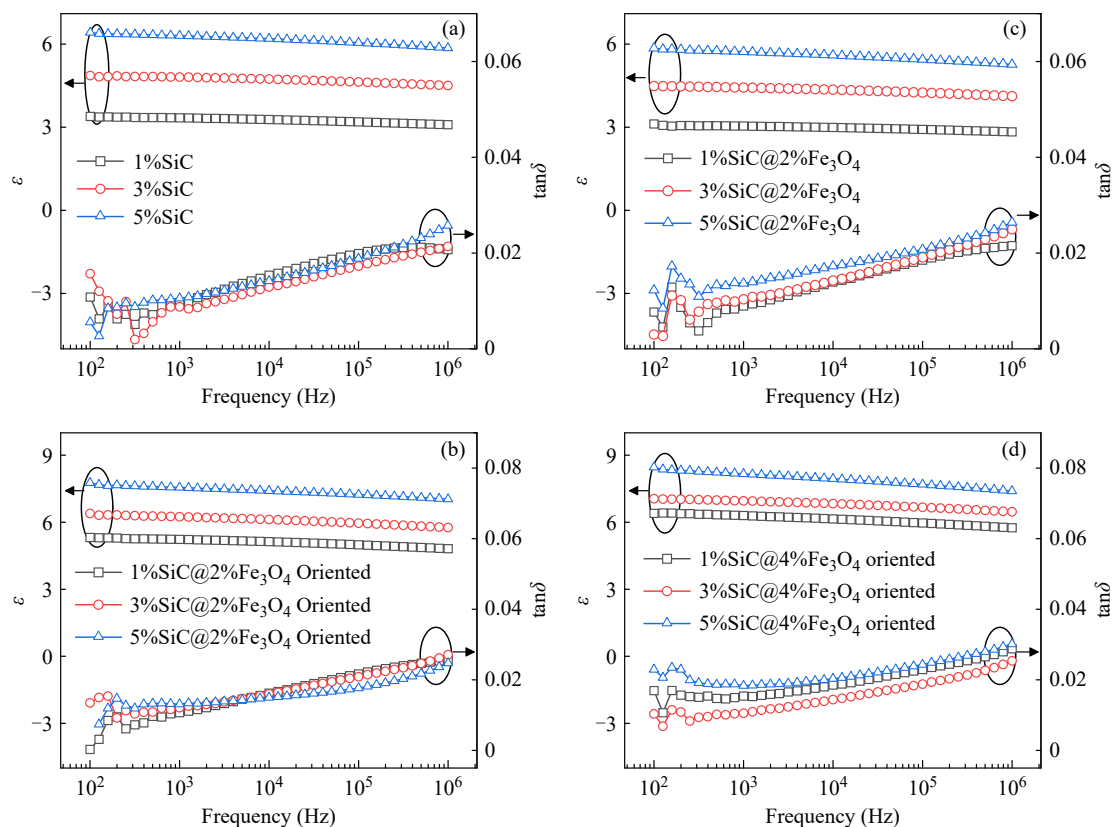


Fig. 6 Dielectric properties tests of composites: (a) random composite samples with SiC, (b) random composite samples with 2% Fe_3O_4 loading content, (c) oriented composite samples with 2% Fe_3O_4 loading content and (d) oriented composite samples with 4% Fe_3O_4 loading content.

介电损耗，复合材料的介电损耗角正切值均在 0.03 以下。

4 结论

通过磁场诱导辅助定向制备了具有优异非线性电导性能的环氧树脂复合材料，结合实验测试与量子化学仿真分析揭示了其非线性产生机理，得出的主要结论如下：

(1) 通过在 SiC 纳米线表面负载 Fe_3O_4 纳米粒子，并利用磁场诱导定向技术，成功合成了具有优异非线性电导特性的环氧树脂复合材料，实现了填料在基体中的纵向有序排列。

(2) 磁场定向使复合材料在低填充体积分数 (2%) 下即可表现出显著的非线性电导特性，在体积分数 5% 填充下非线性系数最高可达 30.88，远高于未定向的复合材料。

(3) Fe_3O_4 与 SiC 之间形成的内建电场和肖特基势垒促进了界面电子重新分布，为复合材料的高非线性电导行为提供了理论支撑。

(4) 通过调节 Fe_3O_4 纳米粒子的负载量可有效调控复合材料的阈值场强。 Fe_3O_4 的引入加深了复合材料的陷阱能级，并协同提高了阈值场强，为实现定制化非线性电导材料提供了可行路径。

REFERENCES

- 1 陈杰, 吴世林, 胡丽斌, 任成燕, 邵涛. 退役高压电缆附件绝缘状态及理化性能分析. 电工技术学报, **2021**, 36(12), 2650-2658.
- 2 王运松, 刘育豪, 樊浩楠, 王黎明. 硅橡胶和脂环族环氧树脂复合绝缘子界面的水煮老化特性. 高电压技术, **2022**, 48(5), 2028-2035.
- 3 尚南强, 陈庆国, 秦君. 纳米 TiO_2 /液体硅橡胶直流电缆附件绝缘复合材料的介电性能. 复合材料学报, **2019**, 36(1), 104-113.

- 4 梁虎成, 王雨帆, 杜伯学, 姜金鹏, 王禹淮, 李进, 李忠华. 表层非线性电导盆式绝缘子表面电荷分布与沿面放电特性. *中国电机工程学报*, **2022**, 42(2), 835-843.
- 5 罗传仙, 邱虎, 孙亚辉, 文豪, 程立丰, 罗子秋, 张晓星, 郭世瑞. 直流电压下GIS盆式绝缘子表面电荷及电场分布特性仿真研究. *高压电器*, **2024**, 60(3), 101-110.
- 6 Zhao, X. L.; Yang, X.; Hu, J.; Wang, H.; Yang, H. Y.; Li, Q.; He, J. L.; Xu, Z. L.; Li, X. X. Grading of electric field distribution of AC polymeric outdoor insulators using field grading material. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **2019**, 26(4), 1253-1260.
- 7 Can-Ortiz, A.; Laudebat, L.; Valdez-Nava, Z.; Diahm, S. Nonlinear electrical conduction in polymer composites for field grading in high-voltage applications: a review. *Polymers*, **2021**, 13(9), 1370.
- 8 伍珈乐, 熊沛琪, 邢泽西, 龚阳智, 卞星明. SiC掺杂对直流电缆附件用硅橡胶材料非线性电导特性的优化研究. *电工技术学报*, **2023**, 38(5), 1129-1138.
- 9 杨国清, 郭玥, 王德意, 王诗成, 贾嵘, 李平. 不均匀电场下纳米氧化锌改性环氧树脂的绝缘特性. *高电压技术*, **2017**, 43(9), 2825-2830.
- 10 陈向荣, 黄小凡, 王启隆, 王恩哲, 张添胤. 温度和频率对环氧树脂/碳化硅晶须复合材料交流非线性特性的影响. *电工技术学报*, **2022**, 37(15), 3897-3912.
- 11 何金良, 谢竟成, 胡军. 改善不均匀电场的非线性复合材料研究进展. *高电压技术*, **2014**, 40(3), 637-647.
- 12 张懿议, 马海帮, 王倩, 刘捷丰, 查俊伟. 非线性电导聚合物材料研究进展. *高电压技术*, **2023**, 49(2), 461-471.
- 13 Zhao, X. L.; Yang, X.; Li, Q.; He, J. L.; Hu, J. Synergistic effect of ZnO microspherical varistors and carbon fibers on nonlinear conductivity and mechanical properties of the silicone rubber-based material. *Compos. Sci. Technol.*, **2017**, 150, 187-193.
- 14 Nan, C. W.; Shen, Y.; Ma, J. Physical properties of composites near percolation. *Annu. Rev. Mater. Res.*, **2010**, 40, 131-151.
- 15 迟庆国, 崔爽, 张天栋, 杨蒙, 陈庆国. 碳化硅晶须/环氧树脂复合介质非线性电导特性研究. *电工技术学报*, **2020**, 35(20), 4405-4414.
- 16 Tousi, M. M.; Ghassemi, M. Combined geometrical techniques and applying nonlinear field dependent conductivity layers to address the high electric field stress issue in high voltage high-density wide bandgap power modules. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **2020**, 27(1), 305-313.
- 17 Sajid, M.; Shuja, S.; Rong, H. P.; Zhang, J. T. Size-controlled synthesis of Fe₃O₄ and Fe₃O₄@SiO₂ nanoparticles and their superparamagnetic properties tailoring. *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.*, **2023**, 33(1), 116-119.
- 18 Kim, M. J.; Lee, C.; Jo, Y. R.; Jung, W. G.; Ha, J. S.; Shim, J. H.; Park, J. H.; Ryu, S. W.; Kim, B. J. Amorphous exsolution of Fe₃O₄ nanoparticles in SrTiO₃: a path to high activity and stability in photoelectrochemical water-splitting. *Small Struct.*, **2025**, 6(4), 2400450.
- 19 Hua, M. Q.; Xu, L.; Cui, F.; Lian, J. B.; Huang, Y. P.; Bao, J.; Qiu, J. X.; Xu, Y. G.; Xu, H.; Zhao, Y.; Li, H. M. Hexamethylenetetramine-assisted hydrothermal synthesis of octahedral nickel ferrite oxide nanocrystallines with excellent supercapacitive performance. *J. Mater. Sci.*, **2018**, 53(10), 7621-7636.
- 20 Chen, H. Y.; Yang, L.; Wang, R. X.; Zhang, W. J.; Liu, R.; Yun, Y. Z.; Wang, N.; Ramakrishna, S.; Jiao, L. F.; Long, Y. Z. Constructing CoO/Mo₂C heterostructures with interfacial electron redistribution induced by work functions for boosting overall water splitting. *Small*, **2023**, 19(49), 2304086.
- 21 Xu, F. Y.; Meng, K.; Cheng, B.; Wang, S. Y.; Xu, J. S.; Yu, J. G. Unique S-scheme heterojunctions in self-assembled TiO₂/CsPbBr₃ hybrids for CO₂ photoreduction. *Nat. Commun.*, **2020**, 11, 4613.
- 22 Li, Z. L.; Du, B. X.; Yang, Z. R.; Li, J. Effects of crystal morphology on space charge transportation and dissipation of SiC/silicone rubber composites. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **2017**, 24(4), 2616-2625.
- 23 Chi, Q. G.; Meng, Z. T.; Zhang, T. D.; Zhang, C. H.; Tang, C.; Lei, Q. Q. Effect of MWCNTs/ZnO inorganic fillers on the electrical, mechanical and thermal properties of SiR-based composites. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **2021**, 32(23), 27676-27687.
- 24 姚欢民, 穆海宝, 李鹤, 李元, 李文栋, 张大宁. 不同频段下IGBT自组装非线性绝缘材料介电性能的温度依赖性. *高电压技术*, **2025**, 51(1), 322-335.
- 25 赵莉华, 陈钰, 魏华超, 杨帅, 张跃, 任俊文. 大型发电机定子绕组用环氧树脂基复合电介质的制备及性能分析. *绝缘材料*, **2026**, 1-10.
- 26 Xu, H. S.; Wang, R.; Gou, B.; Zhou, J. G.; Li, L. C.; Xie, C. Z. Globally enhanced thermal, mechanical and electrical properties of current-field grading composites with self-assembly semiconducting grains on 3D cellulose aerogel scaffolds. *Compos. Sci. Technol.*, **2022**, 218, 109197.

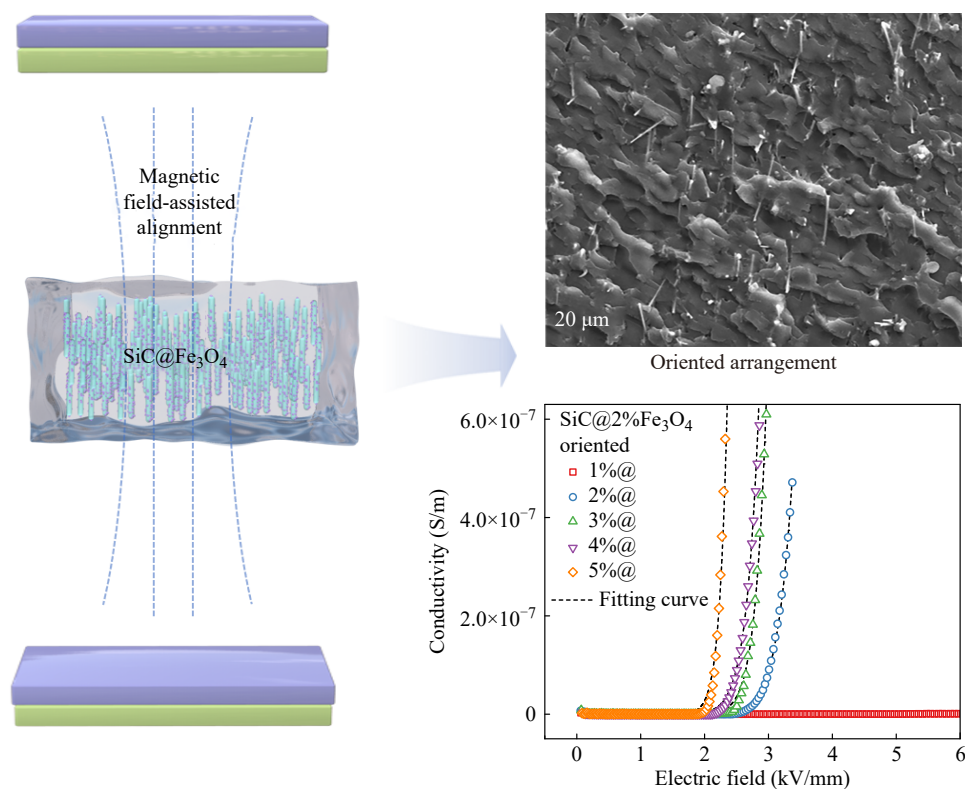
- 27 Yang, X.; Hu, J.; Wang, S. J.; Meng, P. F.; Zhao, X. L.; Peng, S. M.; Yuan, Z. K.; Yuan, C.; Li, Q.; He, J. L. A dielectric polymer/metal oxide nanowire composite for self-adaptive charge release. *Nano Lett.*, **2022**, 22(13), 5167–5174.
- 28 Zhu, L.; Wang, Q. Novel ferroelectric polymers for high energy density and low loss dielectrics. *Macromolecules*, **2012**, 45(7), 2937–2954.

Research Article

Enhanced Nonlinear Conductivity of Epoxy Resin Composite Dielectrics via Magnetic Field-induced Alignment and Regulation Mechanism Research

Hua-song Xu^{1,2*}, Tian-yi Luo^{1,2}, Ai-lin Chen^{1,2}, You-shun Chen^{1,2}, Qi-yan Zhang^{1,2}, Yue Zhang³
 (¹College of Electronics and Information Engineering, ²State Key Laboratory of Radio Frequency Heterogeneous Integration, Shenzhen University, Shenzhen 518060)
 (³Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080)

Abstract To address insulation aging and breakdown issues in high-voltage electrical equipment caused by uneven electric field distribution, we proposed a novel method for enhancing the nonlinear conductive properties of SiC nanowire/epoxy composites through magnetic field-induced orientation in this work. First, magnetic Fe₃O₄ nanoparticles were loaded onto the SiC nanowire surface to impart magnetic field responsiveness. Subsequently, curing under an external magnetic field achieved the oriented arrangement of nanowires within the epoxy matrix. Results demonstrated that the oriented composites exhibit exceptionally high nonlinear conductance even at low volume fractions. At a volume fraction of 5% loading, the nonlinear coefficient α reached a maximum of 30.88, with all oriented samples exceeding a α of 15. By adjusting the volume fraction of SiC@Fe₃O₄ filler and the



* Corresponding author: Hua-song Xu, E-mail: xuhs@szu.edu.cn

loading amount of Fe_3O_4 , the threshold electric field (E_s) strength of the composite material could be effectively tuned. XPS analysis and First-principles calculations confirmed that the built-in electric field and Schottky barrier formed at the SiC- Fe_3O_4 interface due to electron transfer were the dominant factors responsible for the nonlinear conductivity properties. TSDC test further revealed that Fe_3O_4 loading modulated E_s by introducing deep-level traps. This study provides novel fabrication strategies and theoretical foundations for designing high-performance nonlinear conductive insulating materials.

Keywords Epoxy resin; SiC nanowire; Magnetic field orientation; Nonlinear conductivity; Schottky barrier