

基于激光参数与碳纳米管掺杂协同调控的 LIG 导电性能研究

王嘉琄, 朴林华*, 张永豪

(北京信息科技大学 北京市传感器重点实验室, 北京 102206)

摘要: 针对激光诱导石墨烯(LIG)导电性能优化问题,文章系统探究了激光参数调控与多壁碳纳米管(MWCNTs)原位掺杂对LIG电阻特性及微观形貌的影响规律。实验结果表明:在5~10 J/mm²能量密度范围内,LIG电阻值随激光能量密度增加显著降低,并在激光功率为30 W、能量密度为8 J/mm²条件下,所得LIG电阻值最低,达到约1 k Ω 。采用MWCNTs与聚酰胺酸(PAA)不同质量比进行原位掺杂后,SEM表征显示复合LIG形成了更完善的协同导电网络,复合LIG电阻值按一定规律显著降低,最低可达0.5 k Ω ,性能优于纯LIG。基于此,进一步提出激光参数与掺杂协同调控的LIG导电性能优化窗口,为高性能柔性电阻式应变传感器的制备提供了有效的工艺优化策略。

关键词: 激光诱导石墨烯;激光参数优化;碳纳米管掺杂;导电性能;协同效应

中图分类号: TN249 **文章编号:** 1001-5868(2026)04-0696-07

Synergistic Modulation of Laser Parameters and Carbon Nanotube Doping for Enhanced Conductivity of Laser-Induced Graphene

WANG Jiakuan, PIAO Linhua, ZHANG Yonghao

(Beijing Key Laboratory of Sensors, Beijing University of Information Science and Technology, Beijing 102206, CHN)

Abstract: In this study, an approach towards the optimization of the electrical conductivity of laser-induced graphene (LIG) was investigated by systematically analyzing the effects of varying laser parameters and in-situ doping with multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) on the resistance characteristics and microstructure of LIG. The experimental results showed that the resistance of the LIG decreased as the laser energy density increased from 5 to 10 J/mm². The minimum resistance of ~ 1 k Ω was obtained at a laser power of 30 W and an energy density of 8 J/mm². After in-situ doping was performed with different mass ratios of MWCNTs to poly(amic acid) (PAA), scanning electron microscopy (SEM) revealed that the composite LIG formed a more complete conductive network. As a result, the resistance of the composite LIG was further reduced to a minimum of 0.5 k Ω , which is lower than that of pristine LIG. These findings indicated that an effective processing window could be established to optimize the conductivity of LIG by regulating the laser parameters and dopant content. Thus, this study provided a practical reference on the fabrication of LIG-based flexible resistive strain sensors and the optimization of their performance.

收稿日期:2026-03-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61771060);北京市教育委员会科研计划项目资助项目(KZ20231123221);北京市新世纪百千万人才工程培养资助项目(2019A20);现代测控技术教育部重点实验室资助项目(2024202101);北京信息科技大学北京市传感器重点实验室资助项目(2024202108).

*通信作者:朴林华

Key words: laser-induced graphene; laser parameter optimization; carbon nanotube doping; conductivity; synergistic effect

0 引言

激光诱导石墨烯(LIG)是一种可通过激光在聚合物基底表面直接制备的多孔石墨烯材料。自Tour等首次报道采用CO₂激光在聚酰亚胺(PI)薄膜上原位生成石墨烯以来,LIG因制备方法简单、无需复杂转移、便于图案化等优点而得到广泛研究^[1]。现有研究表明,激光参数对LIG的结构和电学性能有重要影响。其中,激光功率和扫描速度等参数会共同影响单位面积内的能量输入,从而改变聚合物的碳化过程以及孔结构形成情况。当能量输入过低时,难以形成连续导电网络;当能量输入过高时,则可能引起基底烧蚀或结构破坏,进而影响LIG的成膜质量和电学稳定性^[2]。因此,如何通过激光参数优化,使LIG同时具备较完整的结构和较好的导电性能,已经成为当前领域研究的重点。

2021年,Murray等^[3]采用70 μm厚背胶PI薄膜,并利用响应面法(DoE-RS)优化工艺参数,在2.1 W激光功率和70 mm/s扫描速度下制备出用于湿度传感的LIG电极,最低方阻达到16 Ω/sq。同年,Wang等^[4]以75 μm厚PI薄膜为基底,在24 W功率和12.5 mm/s扫描速度条件下研究了能量剂量对单次扫描LIG导电性的影响,所得样品在10 mm长度下的电阻约为30 Ω。2023年,房国庆等^[5]使用355 nm紫外激光器,在50 μm厚PI薄膜和50 mm/s扫描速度条件下制备了具有多维感知能力的双层石墨烯柔性应变传感器,其LIG电阻率范围为0.5~2 kΩ·cm。2023年,杨丽等^[6]在50 μm厚的PI薄膜上,采用10.5%的激光功率(约3.15 W)和127 mm/s的扫描速度,制备出蛇形结构柔性超疏水温度传感器,其初始电阻约为213 Ω。除激光参数调控外,通过引入导电填料对LIG进行复合改性也是提升其电学性能的有效途径。2024年,陈雪莹等^[7]将多壁碳纳米管(MWCNTs)混合在聚酰胺酸(PAA)前驱体中,涂覆在PI膜上,在14%的激光功率和90 mm/s的扫描速度下制备了工字形复合电极,灵敏度(GF)高达649。2024年,孙美琴等^[8]利用激光直写技术在PI上制备LIG并转印至PDMS,随后使用质量分数为5.2%的MWCNTs水分散液进行表面修饰,制备了LIG/MWCNTs复合微电极,显著提升了电极的导电性和

电化学活性。2024年,邱凤英^[9]采用逐层喷涂法在半固化PDMS上构建CNT与rGO双导电网络,制备了一种三明治结构的柔性应变传感器,该传感器在保证高灵敏度($GF=200.3$)的同时,实现了高达213%的宽拉伸范围。2024年,刘晓春等^[10]基于逾渗理论,制备了石墨烯/碳纳米管/水性聚氨酯(Gn/CNT-WPU)复合柔性传感器,通过掺杂0.5%的CNT和0.5%的Gn,该传感器的初始电阻为4.8 kΩ,并实现了0~15%的应变监测量程。

综上所述,尽管激光参数优化和CNT掺杂均被证明能够在一定程度上改善LIG的导电性能,但现有研究多集中于单一因素的独立调控,对激光参数与碳纳米管原位掺杂条件下二者协同作用的系统研究仍存在不足^[11-12]。基于此,本文以PI基底为研究对象,采用PAA溶液分散的多壁碳纳米管进行原位掺杂,在保证成膜质量的前提下,选取1:300、1:250和1:200三个MWCNTs/PAA质量比,系统考察能量密度与掺杂比例对LIG导电性能和微观形貌的协同影响。通过测试LIG的电学性能,并结合SEM电镜对表面形貌进行观察,分析不同激光参数条件下LIG导电性能变化。

1 实验

1.1 材料与仪器

实验材料包括PI薄膜、PAA溶液、MWCNTs、固化PAA的玻璃板以及PI衬底的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)基板。主要实验仪器如图1所示,其中激光雕刻机光斑直径为100 μm。

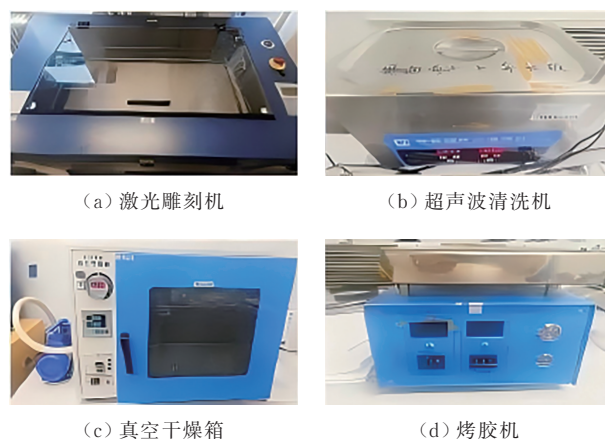


图1 实验设备

1.2 实验原理

LIG 的形成主要在于高能量密度激光作用于 PI 等聚合物基底时产生的光热效应。在激光作用于 PI 薄膜表面后,局部区域迅速升温,短时间内温度可超过 2 500℃。在高温作用下,聚合物分子链发生热解,PI 中的 C—O、C=O 和 C—N 等化学键逐步断裂,氧、氮等非碳元素以 CO、CO₂、H₂O 和 N₂ 等气体形式释放^[13]。剩余碳原子重新排列,并在基底表面形成三维多孔石墨烯网络^[14]。激光能量密度是影响 LIG 光热碳化过程的关键参数。当能量密度较低时,前驱体分解不充分,碳原子难以形成有序结构,材料中无定形碳比例较高,导电网络连续性较差,因此电阻较大;当能量密度过高时,过度烧蚀可能破坏已形成的石墨烯骨架,并引起二次氧化,使结构缺陷增加,最终使导电稳定性下降^[15]。

在激光直写制备 LIG 过程中,激光功率和扫描速度对成膜质量及导电性能有明显影响。激光功率决定了材料单位时间内接收的能量:当激光功率过低时,光热效应不足,PI 难以充分碳化;当功率过高时,局部热积累增强,可能导致 PI 基底严重烧蚀甚至燃烧,进而破坏 LIG 的三维多孔骨架。扫描速度主要影响激光与材料的作用时间;当速度较低时,单位面积能量输入增加;当速度过高时,材料碳化不充分,也会影响 LIG 的形成^[16]。为了综合评价激光工艺对 LIG 生成的影响,引入激光能量密度这一评价指标,其与各参数间的数学关联如公式(1)所示^[13,17]。

$$E = \frac{P}{v \cdot d} \quad (1)$$

式中, E 为激光能量密度,单位为 J/mm²; P 为激光输出功率,单位为 W; v 为扫描速度,单位为 mm/s; d 为激光光斑直径,单位为 μm。

由公式(1)可知,激光能量密度可视为协调功率和扫描速度的关键参数,其既会影响 PI 薄膜表面的碳化程度,也会对 LIG 的微观形貌、孔隙结构和整体导电性能产生影响。因此,将激光能量密度控制在合适范围内,可有效改善 LIG 导电网络的形成质量。另外,实验还引入了 MWCNTs 来和石墨烯一起构建复合导电网络。MWCNTs 具有一维结构和较高长径比,能够在石墨烯片层之间起到连接作用,这相当于增加了片层之间的导电通路^[18]。这种碳材料之间的协同作用,有利于减

弱激光诱导过程中产生的部分结构缺陷带来的影响,使材料在更宽的工艺窗口内仍然保持较好的导电性能^[19]。

因此,本文将激光能量密度作为横向输入参数,并结合 MWCNTs 掺杂比例进行协同调控,以便获得结构完整、导电连续和工艺稳定的优化窗口。

1.3 实验过程

1.3.1 MWCNTs/PAA 复合前驱体的制备

为了制备分散均匀的碳纳米管/聚酰胺酸复合溶液,分别按照 1:300、1:250、1:200 三组质量比称取适量 MWCNTs 加入到 PAA 溶液中。机械搅拌初步混合后利用超声清洗机对混合液进行超声处理 10 min,通过超声波破坏碳纳米管之间的范德华力团聚,使其均匀分散在聚合物基体中,最终获得稳定的黑色 MWCNTs/PAA 复合前驱体溶液。

1.3.2 激光诱导石墨烯的制备

采用刮涂法制备复合薄膜。取 2 g 上述制备好的复合溶液,均匀涂覆在尺寸为 5 cm×5 cm 的洁净玻璃基板上。为了去除溶剂并使 PAA 发生脱水闭环反应转化为 PI,采用梯度升温法对样品进行热亚胺化固化处理。

具体的固化工艺流程如下:首先在 50℃ 温度下保持 30 min 以初步挥发溶剂;随后依次升温至 70℃ 保持 20 min、100℃ 保持 10 min、140℃ 保持 10 min 和 180℃ 保持 10 min;最后在 230℃ 下进行末段高温固化,使 PAA 进一步亚胺化并完成聚酰亚胺结构构建^[20]。待样品自然冷却至室温后,将其从玻璃基板上揭下,得到平整的 MWCNTs/PAA 复合薄膜,用于后续的激光直写实验。将制备好的复合薄膜平铺并固定在聚甲基丙烯酸甲酯基板上,以确保加工过程中的平整度与稳定性。将固定好样品的基板置于激光雕刻机的工作平台上,并调整激光头焦距至最佳位置。利用计算机软件(AutoCAD)绘制预设的电极图案,并导入激光控制系统。为了获得最佳的导电性能,选取合适的激光功率与扫描速度参数组合,通过激光束在薄膜表面进行点阵扫描,引发光热碳化反应,从而在复合薄膜表面原位诱导生成特定的石墨烯图案。操作流程如图 2 所示。

在该过程中,激光束产生的局部高温会促使聚合物前驱体发生脱水 and 碳化反应,并在气体释放的

同时逐步转化为多孔石墨烯网络。需要指出的是,激光能量密度对LIG的微观结构及其导电性能有着直接影响。当能量密度偏低时,前驱体难以充分碳化,不易形成连续的电子传输通道;而当能量密度过高时,又容易造成明显烧蚀,使石墨烯骨架受损,甚至出现基底烧穿现象。鉴于此,为了探究最佳的工艺窗口以平衡结构完整性与导电性,实验选取的激光功率为30 W,40 W,50 W,扫描速度范围为30~100 mm/s,激光能量密度为5~10 J/mm²。

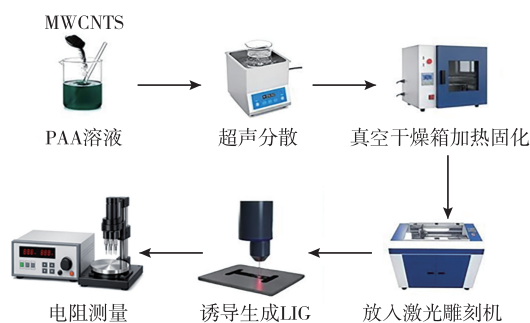


图2 激光诱导石墨烯制备流程图

2 结果与讨论

2.1 激光参数对LIG导电性的影响

激光能量密度会影响聚酰亚胺的碳化程度,并进一步影响石墨烯的形成质量。为考察不同加工条件下LIG电阻的变化,在激光频率保持不变的条件下,设置30 W,40 W和50 W三组激光功率,并通过调整扫描速度将能量密度控制在5~10 J/mm²范围内,对不同参数下LIG电阻的变化进行了比较。根据1.3节实验流程所制备出的激光诱导石墨烯图案尺寸如图3所示。

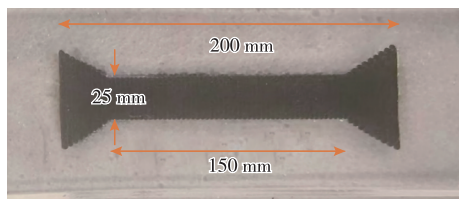


图3 激光诱导石墨烯图案尺寸

如图4所示,随着激光能量密度的增加,所有功率组别的LIG电阻值均呈现出显著的下降趋势,且变化规律表现为明显的两个阶段。在第一阶段($E < 7 \text{ J/mm}^2$),电阻随能量密度的增加急剧下降。这是因为较低的能量输入不足以使PI分子链完全断裂并重排,形成的碳层主要为无定形碳,导电通路不连续;随着能量密度增加,光热效应增强,石墨

烯的导电网络结构逐渐完善,电阻迅速降低。在第二阶段($E > 7 \text{ J/mm}^2$),电阻下降趋势变缓并趋于稳定。进一步对比不同功率下的电阻曲线可以发现,在相同的能量密度下,30 W功率组的表现优于40 W和50 W组。特别是在 $E = 8 \text{ J/mm}^2$ 附近,30 W功率下LIG电阻值最低,达到1 kΩ左右。相比之下,50 W的高功率虽然也能实现碳化,但过高的瞬时峰值功率容易造成石墨烯骨架的过度烧蚀使得多孔结构的破坏,反而破坏了导电网络的完整性,导致电阻略有回升。

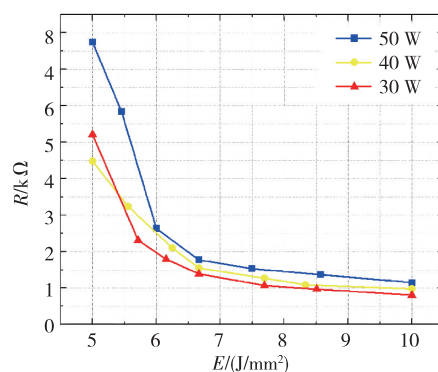


图4 激光功率分别为30 W,40 W,50 W条件下LIG电阻随激光能量密度的变化关系

该结果表明,LIG导电性能优化并非单纯依赖更高的能量输入,而是在避免碳化不足与过度烧蚀之间存在适宜的能量密度范围。在本研究条件下,30 W、8 J/mm²附近对应的能量输入更有利于形成连续且稳定的导电网络,可作为后续复合掺杂研究的基准窗口。

2.2 掺杂碳纳米管结合激光参数对LIG导电性的影响

虽然激光参数优化可显著降低LIG的电阻,但单一碳化结构仍存在大量难以连接的结构缺陷。为进一步提升传感器的导电性能,引入了MWCNTs原位掺杂策略进行系统研究。

前驱体溶液的成膜质量对后续激光加工效果有直接影响。通过预实验发现,当MWCNTs与PAA的质量比高于1:200时,碳纳米管由于比表面积较大且范德华力较强,容易在溶液发生团聚,这会对激光直写过程中的光热吸收均匀性产生不利影响^[21]。因此,在兼顾分散性和成膜质量的基础上,研究选取1:200、1:250、1:300三种MWCNTs/PAA质量比进行实验,并设置纯PI薄膜作为对照组,结果如图5所示。

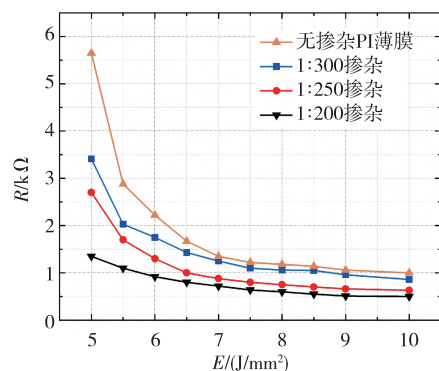


图5 不同MWCNTs掺杂浓度条件下LIG电阻随激光能量密度的变化

实验结果显示,与未掺杂的LIG相比,MWCNTs掺杂样品的导电性能均有明显提升,在相同激光能量密度条件下,1:300、1:250、1:200三组样品的电阻整体呈逐步下降趋势。特别是在低能量密度条件下,MWCNTs的引入有效降低了导电网络形成的阈值,掺杂的降阻作用较为明显;在较高能量密度区间,各掺杂组电阻差异缩小但仍保持差异。上述结果表明,原位掺杂MWCNTs的方法不仅能够提升LIG的电导率,还能拓宽激光诱导的工艺窗口。由此可见,激光能量密度与MWCNTs掺杂比例之间存在明显的协同作用,共同构成LIG导电性能的优化窗口,这为制备高质量的柔性电子器件提供了有价值的参考。

2.3 掺杂碳纳米管对LIG微观形貌的影响

为进一步分析MWCNTs掺杂对LIG微观结构的影响,对纯LIG样品及不同掺杂比例下制备的复合LIG样品进行了扫描电子显微镜表征,结果见图6。随着MWCNTs掺杂量增加,LIG表面形貌由较为疏松、起伏明显的片层堆叠结构,逐渐转变为均匀、致密且连续的导电网络。这说明MWCNTs的引入有助于改善复合体系的微观结构。

由图6(a)可知,未掺杂MWCNTs的纯LIG表面整体结构相对疏松,局部存在较大尺度的起伏及不规则堆积区域。尽管该样品已表现出激光诱导石墨烯的典型网络化特征,但局部区域连续性不足,说明纯LIG导电网络尚不完善。这一形貌特征与2.2节中纯LIG电阻相对较高的结果相对应。

与纯LIG相比,掺杂MWCNTs后复合LIG的表面形貌发生了明显变化。由图6(b)可见,当MWCNTs/PAA质量比为1:300时,片层之间的搭接与连接程度有所增强,表明MWCNTs已分散并嵌入石墨烯片层之间,导电网络分布趋于均匀。上

述结果说明,在较低掺杂水平下,MWCNTs能够在LIG骨架之间发挥初步的桥联作用,从而改善导电通路的连续性。

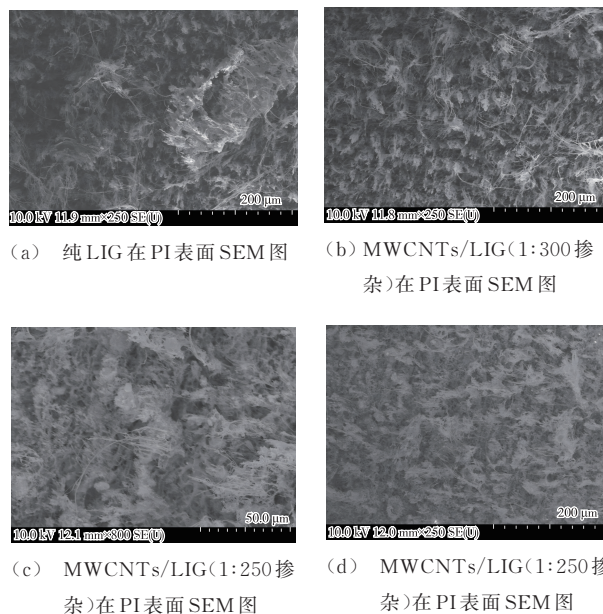


图6 不同掺杂比例的MWCNTs/LIG在PI基底上扫描电镜图

当掺杂比例进一步提高到1:250再到1:200时,如图6(c)和(d)所示,样品表面整体形貌更致密,网络更完善,说明较高含量的MWCNTs在石墨烯片层之间发挥了更显著的填充与桥联作用。在该条件下,复合体系形成了连续性更强的三维交联导电网络,有利于电子在不同片层之间的传输。

综上,MWCNTs的引入显著改善了LIG的表面微观形貌。随着掺杂比例的提高,微观形貌由相对疏松的片层堆叠结构逐步转变为更均匀致密的交联网络,片层间缺陷与间隙得到有效弥补,导电通路连续性明显增强。MWCNTs在复合体系中主要发挥桥联石墨烯片层和完善导电网络的作用,上述形貌演变为2.2节中复合LIG电阻降低及导电性能提升提供了形貌学依据。

2.4 Raman光谱分析

为了进一步分析MWCNTs掺杂对样品碳结构的影响,对纯LIG及不同掺杂比例的复合样品进行了Raman光谱测试,结果如图7所示。由图可见,各样品在 $1\,350\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,580\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\,700\text{ cm}^{-1}$ 附近均出现了明显的D峰、G峰和2D峰,证明激光处理后表面均已成功生成石墨化碳结构。与纯LIG相比,掺杂MWCNTs后样品的 I_D/I_G 比值发生了明显改

变。这一特征峰相对强度的变化说明,MWCNTs的引入有效调控了LIG的微观结构,改变了材料内部的缺陷分布,并提升了碳骨架的有序性^[22]。结合2.2节的电阻测试与2.3节的SEM形貌分析可以得出,适量的MWCNTs掺杂不仅优化了LIG本身的结构缺陷,还协助构建了更加连续的三维导电网络,两者共同促进了复合材料导电性能的提升。

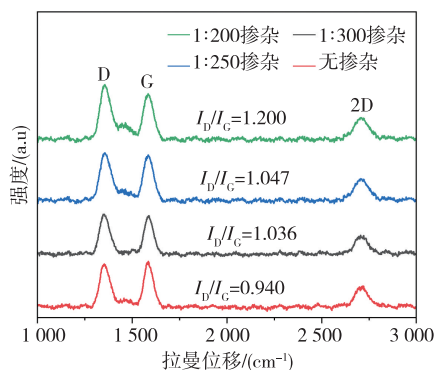


图7 纯LIG及不同MWCNTs/PAA质量比LIG样品的Raman光谱

3 结论

本研究以PI薄膜为基底,研究了激光参数对LIG导电性能的影响,同时结合MWCNTs掺杂,探讨了二者对LIG电阻特性和微观形貌的共同作用。主要结论如下:

(1)激光能量密度对LIG电阻有明显影响。在5~10 J/mm²范围内,随着激光能量密度增加,LIG电阻整体呈下降趋势。在30 W激光功率、8 J/mm²能量密度条件下,样品电阻最低,约为1 kΩ,说明此时碳化较充分、导电网络连接较好。

(2)MWCNTs掺杂有助于提升LIG导电性能。在本研究选取的掺杂范围内,随着MWCNTs/PAA质量比由1:300提高至1:200,复合LIG电阻整体呈下降趋势,表明适量增加MWCNTs掺杂有助于改善石墨烯片层间导电连接并降低接触电阻,最低可降至0.5 kΩ。SEM与Raman的结果表明,在适当掺杂比例下,MWCNTs在LIG片层之间分布较均匀,导电网络也更加完整。

(3)综合激光参数优化与MWCNTs掺杂策略,本文建立了LIG导电性能的协同优化窗口:适中的能量密度可保证PI前驱体充分碳化而避免过度烧蚀,适宜的MWCNTs掺杂比例可降低导电网络形成阈值并增强结构连续性。该协同优化窗口为LIG导电网络构建提供了可推广的工艺设计思路。

参考文献:

- [1] Lin J, Peng Z, Liu Y, et al. Laser-induced porous graphene films from commercial polymers[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5714.
- [2] 慕 铭, 赵伟伟, 陈光孟, 等. 基于激光诱导石墨烯的应变传感器研究进展[J]. *化工进展*, 2024, 43(9): 4970-4979.
Mu Ming, Zhao Weiwei, Chen Guangmeng, et al. Research progress of strain sensor based on laser-induced graphene[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, 43(9): 4970-4979.
- [3] Murray R, Burke M, Iacopino D, et al. Design of experiments and optimization of laser-induced graphene[J]. *ACS Omega*, 2021, 6(26): 16736-16743.
- [4] Wang Z, Tan K K, Lam Y C. Electrical resistance reduction induced with CO₂ laser single line scan of polyimide[J]. *Micromachines*, 2021, 12(3): 227.
- [5] 房国庆, 高康康, 王 哲, 等. 激光诱导石墨烯基柔性应变传感器的传感行为分析[J]. *高分子材料科学与工程*, 2023, 39(4): 101-108.
Fang Guoqing, Gao Kangkang, Wang Zhe, et al. Analysis of sensing behavior of laser-induced graphene-based flexible strain sensors [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2023, 39(4): 101-108.
- [6] 杨 丽. 基于激光诱导石墨烯的柔性超疏水温度传感器的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2023.
Yang Li. Study on flexible superhydrophobic temperature sensors based on laser-induced graphene[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2023.
- [7] 陈雪莹. 基于激光诱导石墨烯复合材料的柔性传感器制备及性能研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2024.
Chen Xueying. Preparation and performance of flexible sensors based on laser-induced graphene composites [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2024.
- [8] 孙美琴, 邹长军, 喻红梅, 等. 激光诱导石墨烯/碳纳米管复合柔性微电极的制备及性能研究[J]. *高校化学工程学报*, 2024, 38(2): 308-316.
Sun Meiqin, Zou Changjun, Yu Hongmei, et al. Preparation and properties of laser-induced graphene/carbon nanotube composite flexible microelectrodes [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2024, 38(2): 308-316.
- [9] 邱凤英. 基于石墨烯与碳纳米管的应变传感器的制备及性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2024.
Qiu Fengying. Preparation and performance of strain sensors based on graphene and carbon nanotubes [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2024.
- [10] 刘晓春. 基于石墨烯/碳纳米管/水性聚氨酯复合材料的柔性传感器研究[D]. 长沙: 中南大学, 2024.
Liu Xiaochun. Study on flexible sensors based on graphene/carbon nanotube/waterborne polyurethane composites [D]. Changsha: Central South University, 2024.

- [11] Zhao J, Luo J, Zhou Z, et al. Novel multi-walled carbon nanotubes-embedded laser-induced graphene in crosslinked architecture for highly responsive asymmetric pressure sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 323: 112658.
- [12] Movaghgharnezhad S, Kang P. Laser-induced graphene: synthesis advances, structural tailoring, enhanced properties, and sensing applications[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, 12(19): 6718-6742.
- [13] Bressi A C, Dallinger A, Steksova Y, et al. Bioderived laser-induced graphene for sensors and supercapacitors [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15 (30) : 35788-35814.
- [14] Zheng L, Cao Y, Chen S. Molecular imprinting sensors based on laser-induced graphene for tigecycline sensing [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2024, 19(9): 100710.
- [15] Barja A M, Ryu Y K, Tarancón S, et al. Laser-induced graphene strain sensors for body movement monitoring [J]. *ACS Omega*, 2024, 9(37): 38359-38370.
- [16] 朱文志, 党明珠, 田 健, 等. 激光能量密度对激光选区熔化 Cu-Al-Ni-Ti 合金相对密度、微观组织和力学性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(15): 53-64.
Zhu Wenzhi, Dang Mingzhu, Tian Jian, et al. Effect of laser energy density on relative density, microstructure and mechanical properties of Cu-Al-Ni-Ti alloy fabricated by selective laser melting [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(15): 53-64.
- [17] Hristovski I R, Herman L A, Mitchell M E, et al. Manifestations of laser-induced graphene under ultraviolet irradiation of polyimide with varied optical fluence [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(8): 1241.
- [18] Tang Y, Gou J. Synergistic effect on electrical conductivity of few-layer graphene/multi-walled carbon nanotube paper [J]. *Materials Letters*, 2010, 64(22): 2513-2516.
- [19] Gerasimenko A Y, Kuksin A V, Shaman Y P, et al. Electrically conductive networks from hybrids of carbon nanotubes and graphene created by laser radiation [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(8): 1875.
- [20] Chen W, Chen W, Zhang B, et al. Thermal imidization process of polyimide film: interplay between solvent evaporation and imidization [J]. *Polymer*, 2017, 109: 205-215.
- [21] Atif R, Inam F. Reasons and remedies for the agglomeration of multilayered graphene and carbon nanotubes in polymers [J]. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2016, 7: 1174-1196.
- [22] Ferrari A C, Basko D M. Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene [J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(4): 235-246.

作者简介:

王嘉瑄(2001—),男,硕士研究生,主要研究方向为柔性传感器;

朴林华(1970—),男,博士,教授,硕士研究生导师,主要研究方向MEMS惯性传感器。