材料、结构及工艺

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20250807001

激光参数调控与化学金属协同优化的LIG导电性能研究

张永豪[1,2],朴林华[1,2]*,孙嘉浩[1,2]

(北京信息科技大学 1. 北京市传感器重点实验室; 2. 理学院,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、聚酰亚胺(PI)化学预处理及金属溅射对LIG电阻特性及表面形貌的影响规律。实验结果表明:在10.87～46.25 J/mm^{2}能量密度范围内,LIG的电阻值与激光能量密度呈显著负相关;采用2 mol/L NaOH与0.028 2 mol/L $AgNO_3$溶液对PI基底进行预处理后,所得LIG的电阻值较原始样品降低两个数量级,性能优于其他对比方案;进一步在预处理样品表面溅射铂金属层最大可以降低15.07%的电阻值。该研究为高性能LIG的制备提供了有效的工艺优化策略。

关键词: 激光技术; 导电性能优化; 激光参数调控; 化学预处理; 金属溅射

中图分类号: TN249 **文章编号:** 1001－5868(2026)01－0100－08

Laser Parameter Modulation and Chemical－Metal Co-Optimization for Investigating Laser-Induced Graphene Conductivity

ZHANG Yonghao[1,2], PIAO Linhua[1,2], SUN Jiahao[1,2]

(1. Beijing Key Laboratory of Sensors; 2. College of Science, Beijing University of Information Science and Technology, Beijing 102206, CHN)

Abstract: In this study, the effects of laser parameter modulation, polyimide (PI) chemical pretreatment, and metal sputtering on the electrical resistance characteristics and surface morphology of laser-induced graphene (LIG) were systematically investigated for optimizing its conductivity. The experimental results show that the resistance of LIG is significantly negatively correlated with the laser energy density in the energy density range of 10.87～46.25 J/mm^2. The resistance value of LIG, obtained after pretreating the PI substrate with a solution containing 2 mol/L of NaOH and 0.028 2 mol/L of $AgNO_3$, is two orders lower than that of the original sample. This result demonstrates the superior performance of the pretreatment solution compared to those of other solutions. Further sputtering a platinum metal layer on the surface of the pretreated sample can reduce the resistance value by a maximum of 15.07%. This study provides an effective process optimization strategy for preparing high-performance LIGs.

Key words: laser technology; conductivity optimization; laser parameter tuning; chemical pretreatment; metal sputtering

收稿日期:2025－08－07.

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

* **通信作者:**朴林华

0　引言

柔性传感器以其优异的柔韧性、可穿戴性和生物相容性，在医疗健康监测、人机交互和智能电子皮肤等领域展现出广阔的应用前景，智能可穿戴市场随之迅速发展，柔性可穿戴传感器应用范围也不断扩大[1]。2014年，Tour等利用CO_2红外激光在聚酰亚胺（PI）薄膜上进行烧蚀，生成了图案化的多孔石墨烯，并且石墨烯与图案化的生成是同步的，这种制备方法所得到的石墨烯被称为激光诱导石墨烯（LIG）[2-4]。

近年来，LIG技术因其高效、低成本及图案化灵活的特点，成为制备柔性传感器的核心方法之一。在此背景下，如何进一步提升激光诱导石墨烯的导电性能，也成为了当前的研究热点。2021年，中国科学院大学的黄坤等[5]使用50 μm厚的PI，4.8 W的激光功率和3.5 inch/s的扫描速度，制作了一种激光诱导石墨烯材料的柔性温度传感器，LIG电阻值约为7.5 kΩ。2023年，吉林大学的孙炳华等[6]使用200 μm厚的PI，0.9 W的激光功率和50 mm/s的扫描速度，制作出一种应用于人机交互的激光诱导石墨烯柔性传感器，LIG方阻为4.5 Ω/sq（电阻值约为36 Ω）。同年，浙江理工大学的房国庆等[7]通过LIG技术制作了一种柔性应变传感器，PI厚度为50 μm，最优扫描速度为50 mm/s，电阻率在0.5～2 kΩ·cm范围内（电阻值约为83.3 kΩ）。约克大学的Nazeri等[8]使用125 μm厚的PI薄膜，14 W的激光功率和300 mm/min的扫描速度，利用LIG技术制备了激光诱导石墨烯电极用于有机电化学晶体管（OECTS），所制备的LIG电极方阻为7.86 Ω/sq（电阻值约为106 Ω）。此外，立陶宛物理研究所的Aivaras等[9]对激光诱导石墨烯在聚酰亚胺中的应用进行了研究，使用的PI薄膜厚度为127 μm，选择的激光功率和扫描速度分别为5 W和200 mm/s，所制备的LIG方阻为36.6 Ω/sq（电阻值约为30 Ω）。2024年，中国民用航空飞行学院的邹瑶等[10]制作了一种激光诱导石墨烯柔性可穿戴应变传感器，使用125 μm厚的PI和105 mm/s的扫描速度，制备的LIG电阻值为107.4 Ω。2024年，闽西职业技术学院的郑丽丽等[11]使用125 μm厚的PI薄膜，激光功率和扫描速度分别选用8.6 W和10 cm/s，所得到的LIG方阻为18.2±0.8 Ω/sq（电阻值约为210 Ω）。2024年，马德里理工大学的Barja等[12]制作了一种用于身体运动监测的LIG应变传感器，所使用的PI厚度为125 μm，最优激光功率和扫描速度分别为2.4 W和60 mm/s，LIG电阻值为85 Ω。2025年，马德里理工大学的Hamada等[13]选用2.4 W的激光功率和80 mm/s的扫描速度在厚度为125 μm的PI薄膜上制备LIG，其电阻值为78 Ω。2025年，韩国庆熙大学的Thang等[14]使用了50 μm厚的PI薄膜，最优的激光功率及扫描速度分别为5.4 W和80 mm/s，所得到的LIG方阻为103 Ω/sq（电阻值约为515 Ω）。

以上研究虽然提高了LIG的导电性能，但大多数是对激光参数中的扫描速度和激光功率进行单一研究，而将两者结合的研究相对较少，LIG的电学性能还有很大的提升空间。所选择的PI厚度过薄容易烧蚀透，影响碳化质量，过厚则穿戴舒适性较差。LIG在氧化环境中，性能容易退化，稳定性降低。本文为兼顾LIG碳化质量与穿戴舒适性，选择125 μm厚的PI薄膜。采用激光功率和扫描速度双参数协同调控方法提升LIG导电性能，并通过对PI化学预处理工艺，进一步降低LIG电阻值。在LIG表面溅射Pt金属层，提升LIG的性能稳定性，试图通过以上方法优化LIG的导电性能。

1　实验

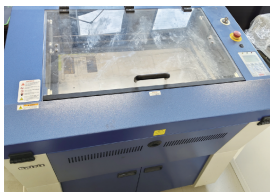
1.1　实验材料与设备

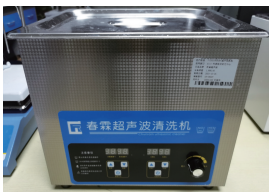
实验材料主要有PI薄膜、氢氧化钠（NaOH）溶液、硝酸银（$AgNO_3$）溶液、Pt靶材以及作为衬底的PMMA板。材料具体参数如表1所示，h为材料的厚度，c为液体的浓度，D为铂金靶材的直径。

表1　实验材料具体参数

材料名称	物理参数	数值
PI	h/μm	125
NaOH	c/(mol/L)	2/5
$AgNO_3$	c/(mol/L)	0.028 2
靶材Pt	D/mm	57
靶材Pt	h/mm	1
PMMA板	h/mm	1

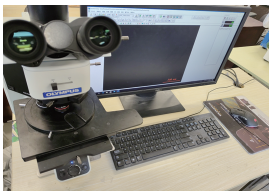
主要实验设备如图1所示。


（a）激光切割机（光斑直径为100 μm）



（b）超声波清洗机


（c）真空干燥箱


（d）金相显微镜（10倍镜头）

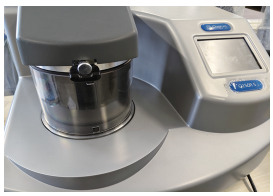

（e）磁控溅射仪

图1 实验设备

1.2 实验原理及方法

1.2.1 实验原理

在CO_2红外激光辐照过程中，利用激光产生的光热效应，使得PI表面产生碳化。激光能量被有效耦合至PI材料体系，激发PI晶格振动，促使材料局部区域在极短时间内形成高于2 500℃的瞬态高温环境，PI分子链中的C—O、C═O和N—C等化学键发生断裂解离，部分原子通过重组形成小分子气态形式进行释放，碳原子则进行结构重排[2,15]，最终形成LIG。LIG的导电性主要与表面絮状结构有关，其表面所形成的密集、互联的絮状多孔网络结构，通过提供大量连续的电子传输通道、增强结构互连性，并增加了载流子浓度及迁移率等，显著提升了LIG的整体导电性[16]。絮状结构的密度、均匀性以及连通性与LIG的导电性能呈正相关，即絮状结构越多，越连通，分布网格越均匀密集，LIG的导电性能越好。

激光功率（P）和扫描速度（v）是影响LIG微观结构、表面质量及导电性能的主要因素。通常，当激光功率太低时，在PI表面上无法碳化形成LIG，而当激光功率太高时，PI表面会发生变形或燃烧[3]，破坏其多孔结构。扫描速度的快慢也会影响到激光输入量，较高的扫描速度会减少激光输入量，反之，则会提高激光输入量。调节激光功率和扫描速度的参数则会改变激光能量密度，关系式如下[17-18]：

$$E=\frac{P}{v\cdot d} \tag{1}$$

式中，E为激光能量密度，单位为J/mm^2；d为光斑直径，单位为μm。

由公式（1）可知激光功率与扫描速度直接影响激光能量密度，LIG的微观结构、表面质量及导电性能等则受激光能量密度的影响，激光能量密度是LIG的关键影响因素之一。

1.2.2 实验方法

（a）无PI预处理下的LIG制备：首先，准备好所需尺寸的PI薄膜材料（本实验选用PI薄膜厚度为125 μm），并使用酒精和去离子水分别对PI进行清洁处理，清洁并用无尘布擦干后利用透明胶带将PI薄膜固定在PMMA板上，随后放入激光切割机中，调节好扫描速度和激光功率后进行激光诱导，最后得到LIG，并使用四探针测试仪进行电阻测量。操作流程如图2所示。

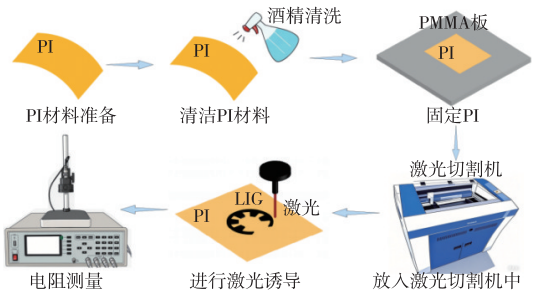


图2 无PI预处理的LIG制备流程图

（b）PI化学预处理下的LIG：首先，将PI放入装有去离子水的超声清洗机中，清洗10 min，然后将PI放入真空干燥箱中，温度调至50℃，保持恒温30 min，进行干燥处理，接下来将干燥后的PI放入到NaOH（2 mol/L）溶液中浸泡2.5 h，然后用去离子水清洗干净并干燥后，将PI放至$AgNO_3$（0.028 2 mol/L）溶液中浸泡35 min[10]。浸泡完毕后，将PI取出并用去离子水清洗干燥后，用透明胶带固定到PMMA板上，然后放到激光切割机中，选择好CAD图案并调好激光功率和扫描速度参数后进行激光诱导，最后，得到所需的LIG。操作流程如图3所示。

浓度为5 mol/L的NaOH溶液在实验中操作流程与图3一致，将图3流程中的NaOH换成所需浓度配比的溶液即可。

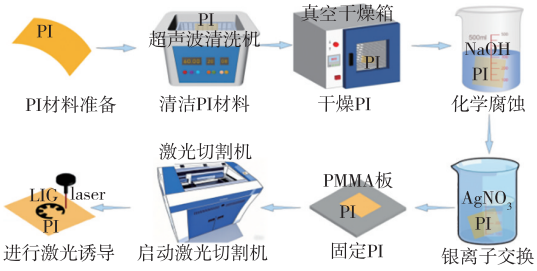


图 3　PI 化学预处理及 LIG 制备流程图

（c）LIG 表面金属溅射[19-21]：操作流程如图 4 所示，参照图 3 流程图制备完 PI 预处理的 LIG，含 LIG 的 PI 大小与 PMMA 镂空尺寸一致，随后将含 LIG 的 PI 对齐粘贴到 PMMA 板镂空处的 PI 掩膜胶带上，确定粘贴牢固后，根据镂空尺寸从 PMMA 板上切割分离。最后，放入磁控溅射仪中溅射 Cr 与 Pt（Cr 溅射 0.5 h，Pt 溅射 4.5 h），得到 LIG-Pt。

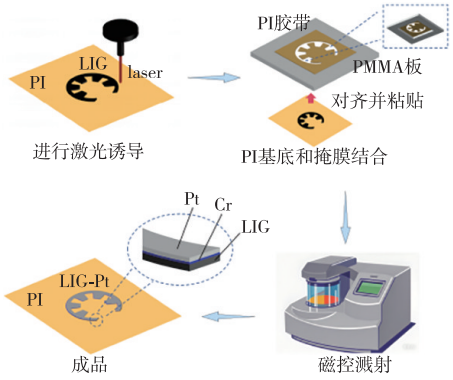


图 4　LIG 表面 Pt 溅射流程图

经过一系列的预实验，发现过高的激光功率和过慢的扫描速度会使 PI 表面变形或燃烧，影响 PI 表面的诱导石墨烯质量，反之 PI 表面所生成的 LIG 图案有残缺且碳化量低，甚至无法形成 LIG。为了避免上述问题，选择激光功率及扫描速度适中的参数范围进行实验分析，激光切割机扫描速度在 16～46 mm/s 范围内，激光功率在 50～74 W 范围内，即激光能量密度在 10.87～46.25 J/mm²范围内。

2　结果与讨论

2.1　激光参数对 LIG 性能的影响

为了验证激光参数对 LIG 电阻值的原始影响，所以并未对 PI 进行预处理，通过 Origin 将激光能量密度 E 与电阻 R 进行拟合，所得到的拟合曲线如图 5 所示，激光诱导图案尺寸如图 6 所示。

通过图 5 拟合曲线可以看出，在未对 PI 进行预处理的情况下，LIG 的电阻值随着激光能量密度的增大而减小，两者为反比例关系。为了便于分析激光能量密度对 LIG 表面的影响，本实验使用金相显微镜（10 倍镜头）进行观察，通过 10 倍镜头的金相显微镜即可清楚观察材料形貌的区别和变化，无需成本高的 SEM 电镜图。此外，选取了 10.87 J/mm²，22 J/mm²和 46.25 J/mm²作为观察点，对这三个激光能量密度的 LIG 表面形貌进行对比，如图 7 所示。

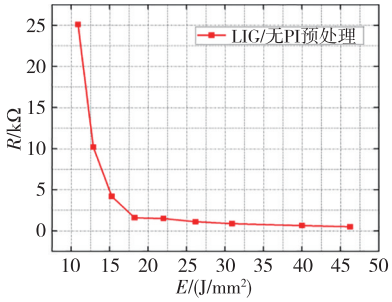
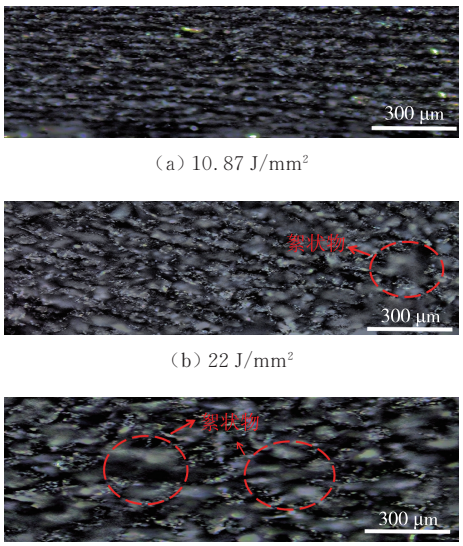


图 5　激光能量密度与电阻的拟合曲线图



图 6　激光诱导图案尺寸



（a）10.87 J/mm²

（b）22 J/mm²

（c）46.25 J/mm²

图 7　无 PI 预处理下的 LIG 表面形貌图

由图 7 可以看出，当激光能量密度为 10.87 J/mm²时的 LIG 表面形貌较为平整，无明显絮状物；当激光能量密度为 22 J/mm²时则出现了絮状的结构，平铺在 LIG 表面，并且平整度也有所降低；当激光

能量密度为46.25 J/mm²时，絮状结构更为明显，且平铺的面积更大。因此，随着激光能量密度的增大，电阻随之减小，LIG表面形貌也随之发生变化，逐渐出现絮状结构，并且絮状结构面积占比随激光能量密度的提升而增加，两者为正比例关系。

2.2 PI化学预处理结合激光参数对LIG导电性能的影响

为了与无PI预处理下的LIG作对比，在$AgNO_3$浓度（0.028 2 mol/L）不变的情况下，选用不同浓度的NaOH溶液进行对比。使用0.028 2 mol/L的$AgNO_3$溶液和2 mol/L的NaOH溶液对PI做预处理，所得到LIG的激光能量密度与电阻值的关系拟合曲线如图8所示。

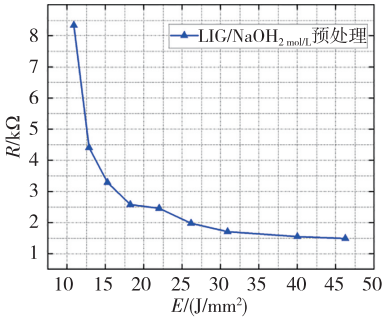
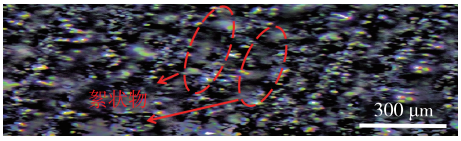
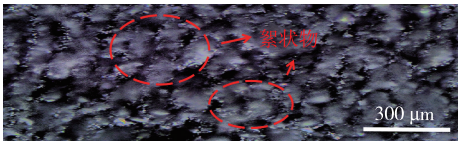


图8 激光能量密度与电阻的拟合曲线图

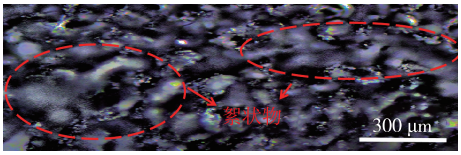
通过图8可以看出，使用2 mol/L的NaOH对PI做预处理的LIG电阻值要小于图5无PI预处理的LIG电阻值。在$NaOH_{2mol/L}$PI预处理下，10.87 J/mm²，22 J/mm²和46.25 J/mm²三个激光能量密度的LIG表面形貌如图9所示。



（a）10.87 J/mm²



（b）22 J/mm²



（c）46.25 J/mm²

图9 $NaOH_{2\ mol/L}$PI预处理下的LIG表面形貌图

根据图9可以看出，对PI做预处理之后的LIG表面形貌与无PI预处理的LIG表面形貌两者具有明显区别。无PI预处理的LIG表面絮状结构相对较少，在高激光能量密度下才较为明显，而$NaOH_{2\ mol/L}$PI预处理的LIG表面絮状结构相对较多，并在高激光能量密度下的絮状结构更为明显，分布更加均匀，在激光诱导过程中碳化更加充分。

使用浓度为0.028 2 mol/L的$AgNO_3$溶液和5 mol/L的NaOH溶液对PI做预处理，所得LIG的激光能量密度与电阻值的拟合曲线如图10所示。

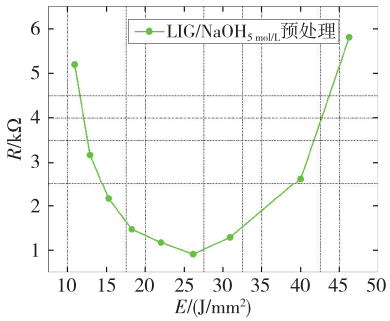
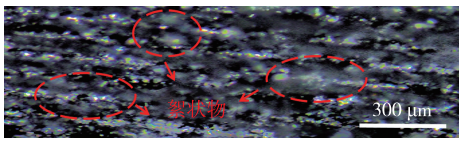
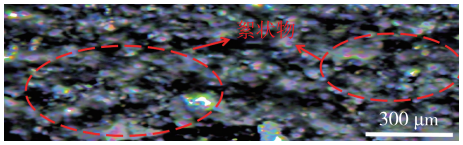


图10 激光能量密度与电阻的拟合曲线图

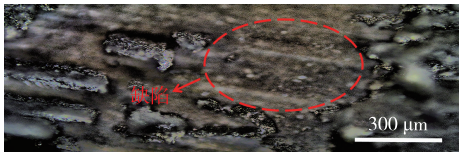
由图10可以看出，使用浓度为5 mol/L的NaOH溶液对PI做预处理后，所得到的LIG电阻值在10.87～26 J/mm²范围内随激光能量密度的增大而减小，而当激光能量密度超过26 J/mm²后，则变化趋势发生改变，随激光能量密度的增大而增大。在$NaOH_{5\ mol/L}$PI预处理下，10.87 J/mm²，22 J/mm²和46.25 J/mm²三个激光能量密度的LIG表面形貌如图11所示。



（a）10.87 J/mm²



（b）22 J/mm²



（c）46.25 J/mm²

图11 $NaOH_{5\ mol/L}$PI预处理下的LIG表面形貌图

通过图 11 可以发现，当激光能量密度为 10.87 J/mm²和 22 J/mm²时，LIG 的表面絮状结构与无 PI 预处理和 $NaOH_{2\ mol/L}$PI 预处理下的 LIG 相比，分布更加均匀，并且絮状结构更为显著；但是当激光能量密度为 46.25 J/mm²时，LIG 表面形貌虽然也具有絮状结构，但是分布不均匀，且有较多的结构缺陷，碳化质量下降严重。这种现象主要是由于在高浓度 NaOH 预处理中 PI 内部结构被破坏，使 PI 材料强度降低，在与 $AgNO_3$ 进行离子交换后，在高激光能量密度下，会引发局部能量聚集和剧烈热效应。强度较低的 PI 材料本身承受不住高激光辐照，从而导致不均匀的过度烧蚀，出现结构缺陷[3]，破坏 LIG 结构的完整性，最终使得电阻值增大。

为了便于对比分析无 PI 预处理、$NaOH_{2\ mol/L}$PI 和 $NaOH_{5\ mol/L}$PI 预处理这三种情况下的 LIG 电阻值变化趋势以及 LIG 表面形貌图，将拟合曲线图以及表面形貌图进行汇总，拟合曲线图及 LIG 表面形貌汇总图分别如图 12 和 13 所示。

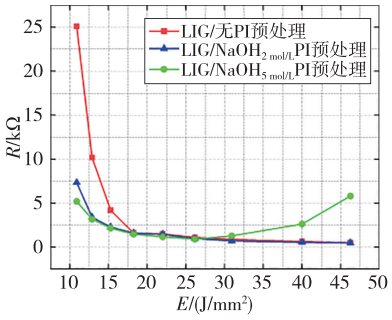


图 12　无 PI 预处理和 PI 预处理下 LIG 拟合曲线汇总图

图 12 中无 PI 预处理和 $LIG/NaOH_{2\ mol/L}$PI 预处理下的 LIG 电阻值变化趋势一致，电阻值都随着激光能量密度的增大而减小，两者呈反比例关系。在每个激光能量密度下，$LIG/NaOH_{2\ mol/L}$PI 预处理下的 LIG 电阻值都低于 LIG/无 PI 预处理的 LIG 电阻值。虽然 $LIG/NaOH_{5\ mol/L}$PI 预处理下的 LIG 电阻值在 10.87～26 J/mm²范围内电阻值小于无 PI 预处理和 $LIG/NaOH_{2\ mol/L}$PI 预处理下的 LIG 电阻值，但是在 26～46.25 J/mm²范围内的 LIG 电阻值反而高于另外两种，并且在 10.87～46.25 J/mm²总的激光能量密度范围内，$LIG/NaOH_{5\ mol/L}$PI 预处理下的 LIG 最小电阻值也要远高于另外两种情况下的 LIG 最小电阻值。综合分析可以得出结论，在 10.87～46.25 J/mm² 的激光能量密度范围内，$LIG/NaOH_{2\ mol/L}$PI 预处理下的 LIG 最小电阻值要低于另外两种的 LIG 最小电阻值，所以 $LIG/NaOH_{2\ mol/L}$PI 预处理下的 LIG 导电性能最佳。

通过图 13 可以看出，随着激光能量密度的增加，LIG 表面絮状结构随之增加，激光能量密度的调控与 $NaOH_{2\ mol/L}$PI 预处理结合所得到的絮状结构更加细微，分布更加均匀，效果最佳。过高浓度的 NaOH 则会出现负面影响，LIG 表面絮状结构会存在一定的缺陷。

2.3　LIG 表面 Pt 溅射

经上述分析可知，$LIG/NaOH_{2\ mol/L}$PI 预处理下的电阻效果最佳，在此基础上溅射金属层（Cr 溅射 0.5 h，Pt 溅射 4.5 h），即 LIG-Pt，探究其导电性能，具体实验步骤流程参考图 4，实验结果如图 14 所示。由图 14 可以看出，在 $NaOH_{2\ mol/L}$PI 预处理下的 LIG 上溅射金属 Pt 能够降低电阻值，可再度提升导电性能。

2.4　技术对比

激光参数调控协同化学金属工艺技术与飞秒激光修复和原位金属复合工艺技术对比如表 2 所示。

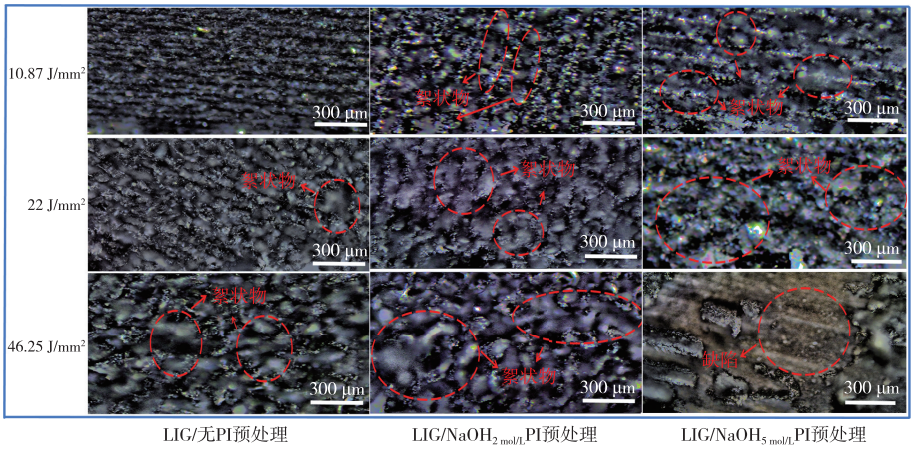


图 13　LIG 表面形貌汇总图

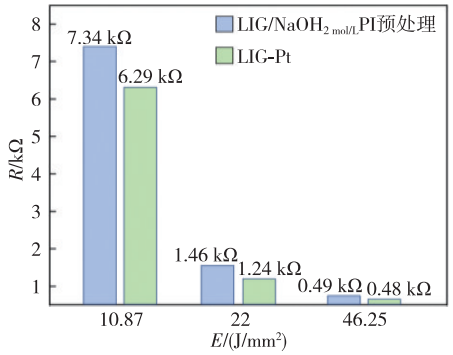


图14 LIG/$NaOH_{2\ mol/L}$PI预处理与LIG-Pt电阻值对比图

表2 技术对比

研究单位	技术名称	R/Ω
中南大学[22]	飞秒激光修复	118
中南大学[23]	飞秒激光修复	~50
坎普尔学院[24]	原位金属复合	35
印度理工学院[25]	原位金属复合	~2 800
北信科	激光参数调控协同化学金属	480

表2对比了不同LIG性能优化技术下的导电性能。飞秒激光修复技术所用材料成本低、操作流程简单、精度高、热影响小，但是设备成本高、效率低[24-25]；原位金属复合技术所用材料成本低，可提高强度和耐磨性，但设备成本高、工艺流程复杂、工艺条件苛刻、参数控制要求高、难度大[26-27]；激光参数调控协同化学金属技术所用设备便宜、材料成本低、工艺简单、易操作、效率高，适合柔性材料，便于工业化量产。

3 结论

通过激光参数调控、PI化学预处理与金属溅射协同方法对LIG导电性能的优化研究，本文得出以下结论：

（1）激光能量密度是影响LIG电阻值的核心因素之一。实验结果表明，在无化学预处理的条件下，LIG电阻值随激光能量密度的增大呈反比例关系下降。通过金相显微镜发现，在高激光能量密度下，碳化更加充分，LIG表面絮状结构分布更加均匀，但激光能量密度过高（大于46.25 J/mm²）则容易导致PI薄膜变形或烧透。

（2）PI化学预处理后，结合激光参数调控方法可显著降低LIG电阻值。采用2 mol/L的NaOH与0.028 2 moI/L的$AgNO_3$溶液对Pl进行预处理后，再通过激光参数调控方法，LIG电阻值较无PI预处理时显著降低。对比不同浓度NaOH预处理效果发现，5 mol/L的NaOH溶液虽在低能量密度下（小于26 J/mm²）电阻值更低，但在高激光能量密度下（大于26 J/mm²）因表面碳化缺陷导致电阻值反升，所以2 mol/L的NaOH溶液为最佳预处理浓度。

（3）金属溅射可进一步优化导电性能。在最优化学预处理（$NaOH_{2\ mol/L}$PI预处理）的LIG表面溅射Pt层后，电阻值再度降低，并且Pt层可以有效增强LIG的稳定性，提高可靠性。

参考文献：

[1] 苏炳添，李健良，徐慧华，等. 科学训练辅助：柔性可穿戴传感器运动监测应用[J]. 中国科学：信息科学，2022，52(1)：54-74.
Su Bingtian，Li Jianliang，Xu Huihua，et al. Scientific athletics training：flexible sensors and wearable devices for kineses monitoring applications[J]. Scientia Sinica（Informationis），2022，52(1)：54-74.

[2] Lin J，Peng Z，Liu Y，et al. Laser-induced porous graphene films from commercial polymers[J]. Nature Communications，2014，5：5714.

[3] 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.

[4] 李 钊，刘 翠. 激光诱导石墨烯的制备、改性与应用[J]. 复合材料学报，2024，41(6)：2761-2774.
Li Zhao，Liu Cui. Preparation，modification and application of laser-induced graphene[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2024，41(6)：2761-2774.

[5] Huang K，Liu B，Orban M，et al. Accurate flexible temperature sensor based on laser-induced graphene material[J]. Shock and Vibration，2021，2021：9938010.

[6] Sun B，Zhang Q，Liu X，et al. Fabrication of laser-induced graphene based flexible sensors using 355 nm ultraviolet laser and their application in human - computer interaction system[J]. Materials，2023，16(21)：6938.

[7] 房国庆，何雨昕，季善鹏，等. 激光诱导石墨烯基柔性应变传感器的传感行为分析[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版)，2023，49(1)：9-16.
Fang Guoqing，He Yuxin，Ji Shanpeng，et al. Analysis of sensing behavior of laser-induced graphene-based flexible strain sensor[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University（Natural Sciences Edition），2023，49(1)：9-16.

[8] Nazeri M，Ghalamboran M，Grau G. Laser-induced graphene electrodes for organic electrochemical transistors（OECTs）[J]. Advanced Materials Technologies，2023，8(17)：2300188.

[9] Sartanavičius A，Žemgulytė J，Ragulis P，et al. Laser-induced

graphene in polyimide for antenna applications[J]. Crystals, 2023, 13(7): 1003.

[10] 邹　瑶. 激光诱导石墨烯柔性可穿戴应变传感器的制备与性能研究[D]. 广汉：中国民用航空飞行学院, 2024.
Zou Yao. Preparation and performance of flexible wearable sensors based on laser-induced graphene[D]. Guanghan: Civil Aviation Administration of China Flight School, 2024.

[11] 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.

[12] 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.

[13] Hamada A, Ryu Y K, Velasco A, et al. Boosting flexible laser-induced graphene supercapacitors performance through double pass laser processing[J]. iScience, 2024, 28(1): 111696.

[14] Thang T Q, Kim J. Laser irradiation and property correlation in double-lasing processes on laser-induced graphene electrodes[J]. Nanomaterials, 2025, 15(5): 333.

[15] Dong Y, Rismiller S C, Lin J. Molecular dynamic simulation of layered graphene clusters formation from polyimides under extreme conditions[J]. Carbon, 2016, 104: 47-55.

[16] Yang W, Xie Y, Feng Y, et al. Surface and interface functionalization of laser induced graphene: properties, fabrication, and applications to flexible sensor[J]. Results in Surfaces and Interfaces, 2025, 18: 100362.

[17] 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.

[18] 雷声远，蔡志民，蒋新成，等. 能量密度对激光熔覆钼层组织及性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 0531001.
Lei Shengyuan, Cai Zhimin, Jiang Xincheng, et al. Effect of energy density on structure and properties of a laser cladding molybdenum layer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(5): 0531001.

[19] 张宇晗. 石墨烯-铂/金过氧化氢传感器的研制及应用[D]. 大连：大连理工大学, 2019.
Zhang Yuhan. Development and application of graphene-platinum/gold hydrogen peroxide sensor[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.

[20] Abedheydari F, Sadeghzadeh S, Saadatbakhsh M, et al. Silver-decorated laser-induced graphene for a linear, sensitive, and almost hysteresis-free piezoresistive strain sensor[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 28715.

[21] Panghal A, Singh T, Deepak D, et al. Fabrication of nickel decorated laser-induced graphene for flexible wearable microsupercapacitors[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 115: 115981.

[22] Wang L, Yin K, Li X, et al. Femtosecond laser ultrafast atomic scale renovating laser-induced graphene[J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(43): 2506215.

[23] Wang L, Yin K, Li X, et al. In situ construction of multifunctional femtosecond laser-induced graphene on arbitrary substrates[J]. Materials Horizons, 2025, 12(15): 5780-5790.

[24] Gupta R, Santra T, Misra S K, et al. Cu-Ag nanoparticles-dispersed and microchannel textured-laser induced graphene: a chemiresistive aptasensor for thrombin[J]. Microchemical Journal, 2024, 207: 111895.

[25] Ali H, Gupta D, Gupta R, et al. Laser induced graphene and Cu nanoparticles functionalized microtextured chemiresistive sensor for the fast detection of aqueous Hg^{2+}[J]. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2022, 181: 109146.

作者简介：

张永豪(2000—)，男，硕士研究生，主要研究方向为柔性传感器及MEMS惯性传感器；

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。