

## 人工智能科学实践——化学气相沉积石墨烯制备电子皮肤

潘袁春, 林欣昀, 杨乐怡, 胡文亚, 宋德魁, 刘楠\*

北京师范大学化学学院, 北京 100875

**摘要:** 电子皮肤在健康监测、假肢交互和机器人智能化等领域发挥着重要作用。化学气相沉积石墨烯具有优异的光电性能和生物相容性, 是制备电子皮肤的理想材料。我们将石墨烯电子皮肤的制备表征和肌电信号采集交互融入实验课程, 全面锻炼学生的科研能力。同时注重思政教育, 旨在培养品德优良、富有社会责任感的科学人才。

**关键词:** 化学气相沉积; 石墨烯; 电子皮肤; 综合设计实验

**中图分类号:** G64; O6

## Artificial Intelligence Science Practice: Preparation of Electronic Skin by Chemical Vapor Deposition of Graphene

Yuanchun Pan, Xinyun Lin, Leyi Yang, Wenya Hu, Dekui Song, Nan Liu \*

College of Chemistry, Beijing Normal University, Beijing 100875, China.

**Abstract:** Electronic skin has emerged as a crucial component in health monitoring, prosthetic interfaces, and robotic intelligence applications. Graphene synthesized through chemical vapor deposition exhibits exceptional optoelectronic properties and biocompatibility, rendering it an ideal material for electronic skin fabrication. This study integrates the preparation, characterization, and application of graphene-based electronic skin into experimental courses, encompassing material synthesis, characterization techniques, electromyographic signal acquisition, and prosthetic interface development. The comprehensive curriculum is designed to enhance students' research capabilities. Additionally, the course incorporates ideological and political education elements, aiming to cultivate scientific talents with strong moral character and social responsibility.

**Key Words:** Chemical vapor deposition; Graphene; Electronic skin; Comprehensive design experiment

随着科技的飞速发展, 电子皮肤作为一种仿生人体皮肤的柔性传感器系统, 在医疗健康<sup>[1-4]</sup>、假肢制造<sup>[5-7]</sup>以及智能机器人<sup>[8-10]</sup>等领域展现出广泛的应用前景, 正逐渐成为研究热点。2024年1月, 工信部等七个部门发布《关于推动未来产业创新发展的实施意见》, 明确提出要突破包含电子皮肤在内的多项核心技术, 重点推进智能制造、家庭服务、特殊环境作业等领域产品的研制及应用。为了实现这一目标, 寻找合适的材料来制备高性能的电子皮肤至关重要。化学气相沉积(CVD)生长的石墨烯凭借优良的稳定性、生物相容性、快速的电子传输能力等诸多性质, 成为制备电子皮肤的理想材料<sup>[11,12]</sup>。然而, 固有的平面结构和刚性限制了单层石墨烯的拉伸性和导电性, 而双层石墨烯由于其双层结构以及层间电子相互作用, 比单层石墨烯有更好的机械稳定性和导电性, 更适用于电子皮肤的制备<sup>[13,14]</sup>。

收稿: 2024-12-11; 录用: 2025-02-24; 网络发表: 2025-06-27

\*通讯作者, Email: nanliu@bnu.edu.cn

基金资助: 国家自然科学基金(22275022, 22072006); 北京市杰出青年科学基金(JQ23002)

在国家深入实施创新驱动发展战略、科教兴国战略与人才强国战略的背景下，高等教育肩负着培养创新型人才、加速科技进步、推动国家智能化发展的重大责任<sup>[15,16]</sup>。为此，我们积极探索科教融合、理实融合新模式，将前沿科技融入实验课程，设计了基于CVD石墨烯的电子皮肤制备与应用综合设计实验。在实验过程中，学生不仅动手制备了CVD石墨烯电子皮肤，还学习了材料的形貌与结构表征、性能测试等，并探索其在肌电信号监测与人机交互领域的应用，切身体验人工智能技术。这一实验课程为学生搭建了从理论到实践、从课堂到社会的桥梁，有助于提升学生的实验操作技能，激发创新意识，增强团队协作与沟通能力。同时，立足于立德树人的根本任务，我们将思政元素巧妙融入课程教学之中，通过潜移默化的方式，引导学生逐步树立正确的世界观、人生观以及价值观。

## 1 实验目的

- (1) 了解石墨烯材料和电子皮肤领域的前沿科技。
- (2) 掌握CVD石墨烯的制备原理和操作流程。
- (3) 掌握CVD石墨烯转移至其他衬底的基本原理和操作流程。
- (4) 掌握表征石墨烯基电子皮肤的基本原理和方法。
- (5) 了解石墨烯基电子皮肤人机交互应用基本流程。

## 2 实验原理

### 2.1 CVD石墨烯的制备原理

使用CVD法制备石墨烯，目前一般选择甲烷、乙烷等气态碳源为前驱体，通过调控生长工艺及参数，使其沉积在金属衬底上，从而生长大面积、高质量石墨烯。其中，依据衬底的溶碳能力和催化能力的不同将生长机理分为两种。(1) 溶解析出机制：以镍、钴为代表。因其具有高溶碳能力的特点，高温下碳源将会溶解于金属衬底内，降温后过饱和的碳析出至金属衬底表面成核后形成石墨烯。(2) 表面催化机制：以铜、钼为代表。这类金属在高温下溶碳能力很低，高温下碳源在金属表面催化作用下脱氢形成碳活性基团，活性基团达到一定浓度后在金属衬底表面成核，随后二维生长形成石墨烯<sup>[12]</sup>。

本实验以甲烷为碳源，通入体系后经过气相反应生成活性物种( $C_xH_y$ )，同时扩散并吸附在铜衬底表面，分解为活性碳物质( $(CH_x)_s$ )后在表面扩散。碳活性物质达到一定浓度后成核形成石墨烯晶格，进而形成“石墨烯岛”，并通过“石墨烯岛”的外延以及相互连接得到连续的石墨烯薄膜。非活性的副产物从铜衬底表面解析，随着气流排出。反应机理如图1所示<sup>[17]</sup>：

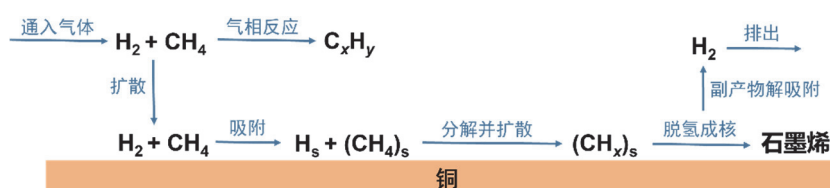
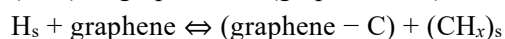
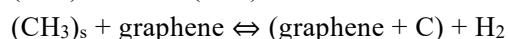
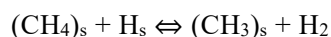
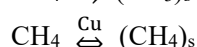
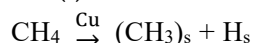
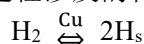


图1 石墨烯生长机理图

该过程涉及的化学反应为<sup>[18]</sup>：



## 2.2 电生理信号采集原理

人体内的生理活动会引起可兴奋细胞产生电位变化, 通过细胞间的传递, 可以从人体的组织和器官上检测到相应的电信号, 包括肌电信号(EMG)、脑电信号(EEG)、心电信号(ECG)和眼电信号(EOG)。皮肤通过电流和电阻的变化进行电生理信号的传导, 将电极与电生理信号采集设备联用, 可将人体内的离子电流转化为电极电流, 将微弱的电信号放大。由于电生理信号可能会受到环境电磁、电子设备、其他生物信号等的干扰, 因此需要滤波处理将这些干扰除去。

## 3 材料与仪器

### 3.1 实验材料

铜箔(25  $\mu\text{m}$ , 99.8%, 阿法埃莎化学有限公司), 氯苯(分析纯, 北京东方事博精细化工有限公司), 聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA,  $M_w \sim 99600$ , 阿拉丁生物科技有限公司), 过硫酸铵(分析纯, 阿拉丁生物科技有限公司), 聚二甲基硅氧烷(PDMS, 美国陶氏化学公司), 丙酮(分析纯, 北京东方事博精细化工有限公司), 异丙醇(分析纯, 北京东方事博精细化工有限公司), 硝酸(分析纯, 北京东方事博精细化工有限公司)。

### 3.2 实验仪器

单温区管式炉(合肥科晶材料技术有限公司), 台式匀胶机(KW-4A, 北京塞得凯斯电子有限责任公司), 电化学工作站(CHI660E, 上海辰华仪器有限公司), 光学显微镜(DM2700M, 德国徕卡仪器有限公司), 电生理测试装置(Backyard Brains), 共聚焦显微拉曼光谱仪(LabRAM HR Evolution, 日本堀场公司, 激光波长: 532 nm)。

## 4 实验内容

### 4.1 CVD生长石墨烯

(1) 准备工作: 用质量分数为5.4%的稀硝酸清洗生长石墨烯的石英管, 洗去表面的铜杂质, 再用去离子水清洗干净。剪取5 cm  $\times$  5 cm的铜箔, 用镊子将铜箔放入稀硝酸中浸泡30 s, 除去铜表面的氧化物, 取出后用丙酮冲洗铜箔表面的稀硝酸和少量油污, 再用氮气枪吹干, 用称量纸将铜片放置于洁净干燥的石英管中(小心操作, 防止铜箔褶皱)。

将PDMS的预聚体A和固化剂B以10 : 1的质量比混合, 均匀涂在玻璃板上, 60  $^{\circ}\text{C}$ 加热固化1 h, 得到PDMS膜。

配制0.2 mol  $\cdot$  L<sup>-1</sup>的过硫酸铵溶液, 静置除去气泡, 防止在转移石墨烯时因气泡造成的铜箔刻蚀不完全或石墨烯破损。

(2) 排气与洗气: 将装有铜箔的石英管安装到单温区管式炉上, 连接进、出气口。关闭大气阀, 打开真空泵, 对连接好的装置抽真空, 排出石英管内的空气。当气压降至0.1 Pa后, 打开H<sub>2</sub>流量计开关, 设置流量为20 sccm(标准立方厘米每分钟)进行洗气, 时间为5 min, 使石英管内充满H<sub>2</sub>, 提供H<sub>2</sub>环境。

在等待洗气的时间内设置单温区管式炉的升温程序: 起始温度为当前实验室温度, 20 min之后升温至200  $^{\circ}\text{C}$ , 再经过40 min后升温至1000  $^{\circ}\text{C}$ , 保持1000  $^{\circ}\text{C}$ 的温度100 min, 最后停止加热。

(3) 石墨烯的生长: 洗气结束之后保持20 sccm H<sub>2</sub>的通入, 然后开始加热, 按照设置好的程序进行升温。在恒温时间为第60 min时打开CH<sub>4</sub>流量计的开关, 开始通入35 sccm的CH<sub>4</sub>, 第100 min之后关闭CH<sub>4</sub>流量计。在此过程中, H<sub>2</sub>流量计和真空泵全程打开。当温度自然降至200  $^{\circ}\text{C}$ 以下时, 可以打开炉盖, 降温至50  $^{\circ}\text{C}$ 后可关闭H<sub>2</sub>流量计和真空泵。(注意: 学生和教师在操作时必须穿戴防护眼镜、实验服、口罩、高温手套等个人防护装备。必须在管式炉温度显示低于200  $^{\circ}\text{C}$ 后才可以打开炉盖, 并且在石英管温度降至室温后再取出, 防止烫伤。另外, 由于通入了甲烷和氢气, 学生在操作前必须详细了解操作细节, 并在操作时按照教师的指导小心操作。)

## 4.2 双层石墨烯电子皮肤的制备

(1) 石墨烯的转移。当管式炉降至室温之后,取出铜箔。剪一小块铜箔,用毛细管将异丙醇点在玻璃片上,铜箔放置于异丙醇液滴上,并用玻璃片按压。将粘有铜箔的玻璃片放置在台式匀胶机中,均匀地在铜箔上滴加一层PMMA,旋涂的转速为 $2000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,时间为 $60\text{ s}$ ,旋涂结束后在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下加热 $15\text{ min}$ 。将铜箔小心揭下,修剪四周,避免PMMA包住边缘阻碍刻蚀。PMMA面朝上,将铜箔轻放在过硫酸铵溶液表面,刻蚀铜箔。待铜箔完全除去后,用玻璃片捞出,放入去离子水中洗涤三次,每次 $30\text{ min}$ ,洗去残留的过硫酸铵溶液。用 $\text{SiO}_2/\text{Si}$ 衬底(用于形貌和结构表征)或PDMS膜(用于制备电子皮肤)从去离子水中捞出带有PMMA的石墨烯,PMMA面朝上。晾干后将其依次放入丙酮、丙酮和异丙醇(体积比为 $1:1$ )及异丙醇中浸泡 $1\text{ min}$ ,除去PMMA,用镊子取出,再用 $\text{N}_2$ 吹干,得到单层石墨烯。

(2) 重复步骤(1),在转移有单层石墨烯的PDMS膜上再转移一层石墨烯,得到双层石墨烯电子皮肤,制备流程如图2所示。使用铜胶带或者用透明胶带将铜箔粘贴在电子皮肤上的双层石墨烯处,作为导线与外接电极相连进行性能测试与应用。

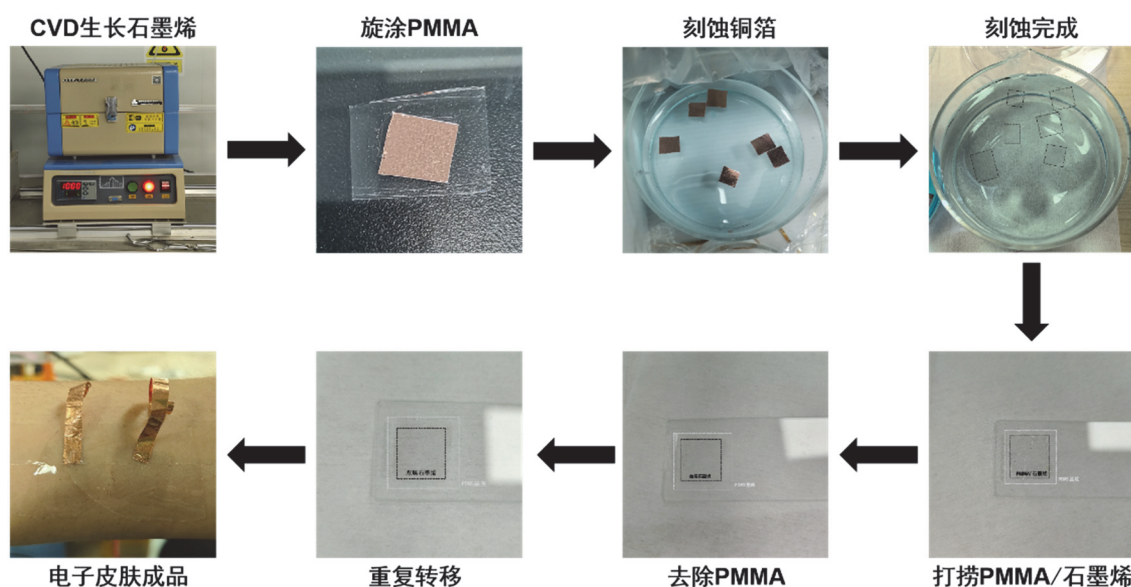


图2 双层石墨烯电子皮肤制备流程

## 4.3 形貌与结构表征

将转移至 $\text{SiO}_2/\text{Si}$ 衬底上的石墨烯用于形貌和结构表征。使用光学显微镜观察石墨烯的表面,由于 $\text{SiO}_2/\text{Si}$ 衬底和不同层数的石墨烯对光源的反射不同,导致光学图像中呈现出颜色差异。图3a为双层石墨烯边缘处的光学图像,可以清晰地看到硅片、单层石墨烯和双层石墨烯的交界。图3b和图3c分别为单层石墨烯和双层石墨烯的光学显微镜图片,观察到石墨烯表面洁净无杂质,而且连续无破损,说明以PMMA为介质的湿法转移CVD石墨烯是可行的,可以得到连续的单层石墨烯和双层石墨烯,用于制备电子皮肤。

拉曼光谱是表征碳材料的典型方法,是分析石墨烯结构最常用的技术,我们利用共聚焦显微拉曼光谱仪(激光波长: $532\text{ nm}$ )表征石墨烯的结构。图4的拉曼光谱图中有明显的D峰( $1350\text{ cm}^{-1}$ )、G峰( $1580\text{ cm}^{-1}$ )和2D峰( $2700\text{ cm}^{-1}$ )。D峰源于一个单声子的二阶双共振拉曼散射过程,代表着碳晶格中的缺陷和无序情况,因此石墨烯的缺陷会反映在其拉曼D峰上;G峰来源于完整晶格中 $sp^2$ 碳原子的对称伸缩振动,是石墨烯的主要拉曼特征峰;2D峰是G峰的二次散射,是二阶双共振拉曼散射过程。D峰与G峰强度的比值 $I_D/I_G$ 表示石墨烯的缺陷密度,用于判断石墨烯的质量,图中 $I_D/I_G$ 比值较小,说

明石墨烯质量较好。G峰和2D峰强度的比值 $I_G/I_{2D}$ 可用于判断石墨烯的层数，图4a中 $I_G$ 远小于 $I_{2D}$ ，表明得到的是单层石墨烯；图4b中 $I_G/I_{2D}$ 约为1，表明为双层石墨烯<sup>[19,20]</sup>。

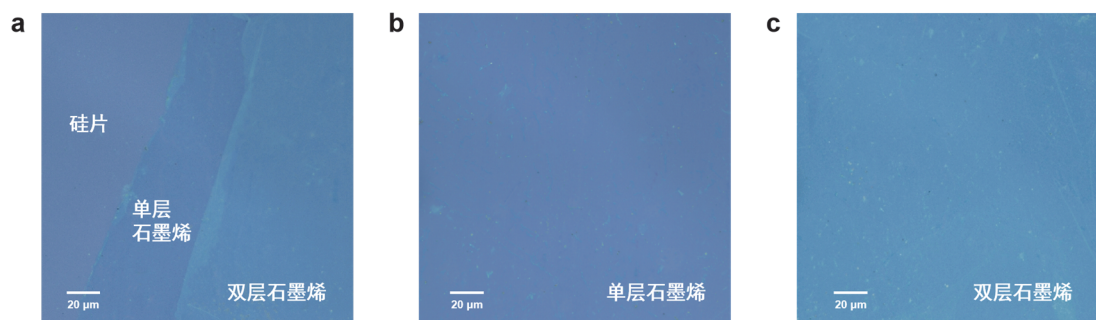


图3 (a) 硅片、单层石墨烯与双层石墨烯交界处；(b) 单层石墨烯；(c) 双层石墨烯的光学显微镜图片

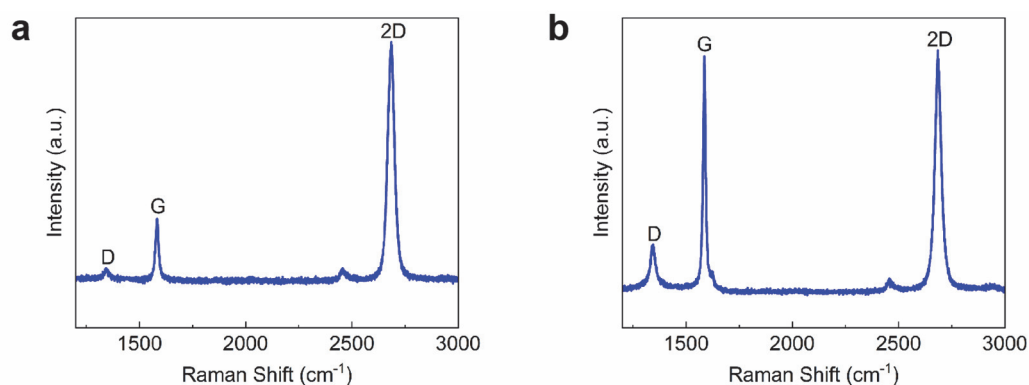


图4 (a) 单层石墨烯；(b) 双层石墨烯的拉曼光谱图

#### 4.4 电学性能测试

较低的电极/皮肤界面阻抗是准确采集电生理信号的前提，分别将商用电极、单层石墨烯和双层石墨烯电子皮肤置于手臂上，电极夹与导线连接后打开电化学工作站，测试方法选择交流阻抗，测试 $1-10^5$  Hz范围内的电极/皮肤界面阻抗。将上述电极的电极/皮肤界面阻抗进行比较，如图5所示。

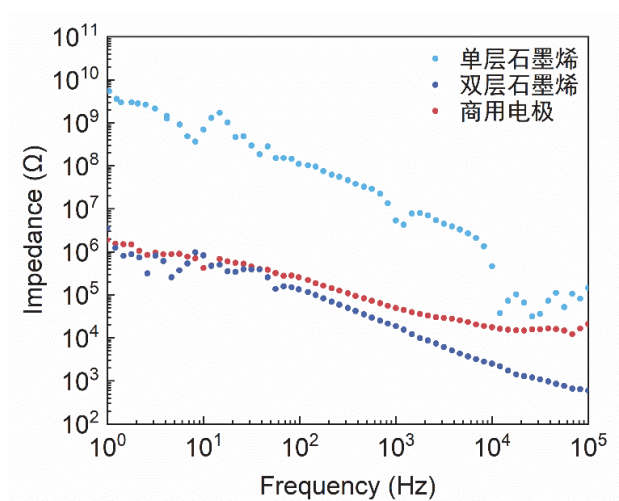


图5 电极/皮肤界面阻抗图

由于单层石墨烯仅为单原子厚度，在实际应用时易破损，造成石墨烯的不连续，并且单层石墨烯自身阻抗较高，从而导致单层石墨烯/皮肤界面阻抗极高。双层石墨烯由于增强层间的相互作用和优化的电子结构<sup>[1]</sup>，在拉伸强度和导电性上均优于单层石墨烯，测量所得的电极/皮肤界面阻抗与商用电极相当。基于双层石墨烯电子皮肤具有更低的界面阻抗，可用于测量电生理信号。

#### 4.5 肌电信号采集

将一对双层石墨烯电子皮肤(或商用电极)放置于前臂上，两电极间隔约2 cm。电生理测试装置的电极夹与电极相连，另一端与电脑相连，设定在50–100 Hz频率下进行肌电信号采集。在实验过程中学生保持静止，前臂放在一张平台上，测试手臂不断紧握、放松，信号经由电极采集后滤波放大处理并记录。采集到的肌电信号如图6所示，双层石墨烯电子皮肤能够采集到清晰的肌电信号，其质量与商用电极采集的信号相当，表明其在电生理传感方面的应用潜力。

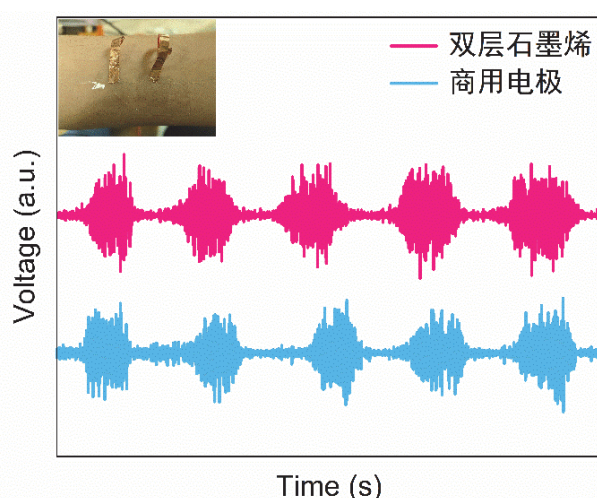


图6 肌电信号图

#### 4.6 人机交互

电子皮肤在智能领域的一个重要应用是实现人机交互。将双层石墨烯电子皮肤贴附在与手指运动直接关联的手臂肌肉上，再通过导线与多通道肌电采集装置、计算机和智能机械手相连。当手指活动时，手臂肌肉产生相应的肌电信号，这些信号被电子皮肤和多通道肌电采集装置捕捉传输至计算机，经由数模转化模块将其转化为控制机械手活动的指令，进而实现对机械手的运动控制。如图7，随着学生做出“五”“四”“OK”的动作，机械手随之做出相同的手势。这体现了双层石墨烯电子皮肤在人机交互中的可靠性，为智能假肢、机器人控制等领域提供了重要的技术支持。

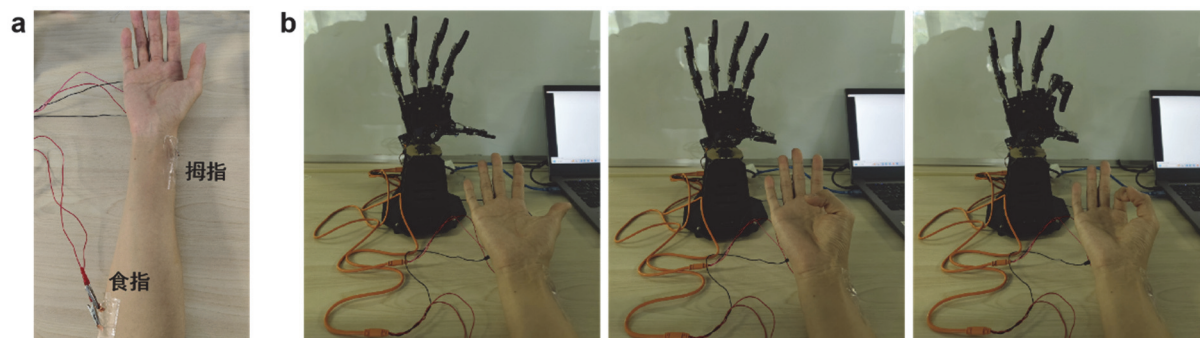


图7 (a) 电子皮肤粘贴照片；(b) 控制机械手做出不同手势

## 5 教学内容与安排

实验包括背景介绍、准备工作、CVD石墨烯的制备、转移、形貌与结构表征、性能测试与应用以及数据处理与分析这几个部分，共24学时，用时四周，对学生进行全方位的科研训练，具体内容与安排如表1所示。教师可根据实际课程时间，灵活安排实验环节。

表1 实验内容与安排

实验步骤	学时	实验内容
背景介绍	2	在背景介绍时，首先向学生展示石墨烯的相关讯息，介绍刘忠范院士在纳米碳领域的贡献，以及北京石墨烯研究院的产出和成就，使学生深刻体会到科研人员的无私奉献和为国为民的家国情怀，激发爱国情感和社会责任感。再向学生介绍电子皮肤的定义与特点、发展历程及智能化应用，让学生全面了解这一新兴技术领域；同时，介绍华人女科学家鲍哲南在电子皮肤领域的成就，以及中国在这方面所取得的突破性进展，弘扬科学精神和创新意识，增强学生的民族自豪感和自信心。接着介绍一些国际权威期刊和常用的文献检索网站，鼓励学生自主查阅文献，了解电子皮肤的最新研究进展、制备技术和工作原理等。这不仅有利于拓宽学生的知识面，让他们认识到电子皮肤在人工智能时代的应用潜力和广阔前景，还能培养他们的自主学习能力、批判性思维和信息整合能力
准备工作	2	制备PDMS膜，清洗石英管与铜箔，配制过硫酸铵溶液并封口静置保存至转移石墨烯时取出使用
CVD石墨烯的制备	4	教师向学生介绍CVD石墨烯的制备原理、操作流程、实验安全以及废弃物处理注意事项，提醒学生在实验的同时注意环保问题，遵循绿色发展、可持续发展理念。教师带领学生进行实验，同时重点强调操作规范与实验安全，例如使用管式炉进行高温反应的注意事项，关于气体钢瓶的存放和使用的安全教育，增强学生的严谨态度与安全意识。CVD石墨烯生长时间较长，学生在此期间进行文献阅读，详细了解CVD石墨烯生长机理。等待降温时学生无需在场，教师在装置温度降至室温后关闭H <sub>2</sub> 流量计和真空泵
CVD石墨烯的转移	8	教师讲解石墨烯转移原理、方法与注意事项，学生在教师的指导下进行石墨烯的转移。在用去离子水清洗的等待时间内，学生阅读关于石墨烯转移的相关文献与撰写实验报告。该部分分为两次课进行，每次课转移一层石墨烯
形貌与结构表征	2	教师向学生介绍光学显微镜和共聚焦显微拉曼光谱仪的工作原理、用途与使用，通过提问加深学生关于这两种仪器相关知识的印象；操作演示的同时详细解说，强调操作要点与注意事项。学生在教师的指导下完成表征，熟悉并掌握光学显微镜和拉曼光谱表征方法
性能测试与应用	4	教师讲解电化学工作站的工作原理、用途与使用方法，学生动手操作。在教师的指导下，学生学习使用电化学工作站测量电极/皮肤界面阻抗，使用电生理采集装置采集肌电信号；随后，通过电子皮肤控制机械手的活动，实现人机交互的实际应用，培养学生的动手实践能力、团队合作与沟通能力，激发学生的科研兴趣与热情
数据处理与分析	2	教师教授使用Origin软件处理数据以及作图的基本操作，要求学生独立完成实验数据的分析处理，使学生熟练掌握数据处理技能，提高数据分析能力

在课程当中，首先由教师进行详细解说与操作演示，然后学生在教师的指导下进行实验。该课程学生人数为12–16人，在CVD石墨烯制备环节中，学生分为4人一组，共同完成这一环节；其他环节则是每位学生单独操作，保证每名学生都能获得实验的机会。

## 6 注意事项

(1) 实验操作时会接触到稀硝酸、易挥发的有机溶剂等试剂，要求做好防护，穿着实验服，佩戴护目镜、口罩、手套等，使用挥发物质时在通风橱中进行实验操作。

(2) 在石墨烯的生长制备时，涉及高温反应，为确保设备免受损害并维护实验的整体安全性，升温步骤需严格控制，升温速度不可过快；程序停止后，必须在管式炉温度低于200 °C之后才可以打

开炉盖，并且在石英管降至室温后再取出，防止烫伤。

(3) 由于实验中使用可燃性气体甲烷和氢气，学生在操作前必须掌握具体的实验细节，并在实验过程中严格遵循教师的指导。气体钢瓶应当存放在阴凉、干燥并且远离热源的场所，同时，可燃性气体钢瓶必须与氧气钢瓶分开存放。使用气瓶中的气体时，必须使用适配的减压阀(气压表)，各种气体的气压表不得混用，以防爆炸；另外，不可将气瓶内的气体全部用完，必须保留至少0.05 MPa的残留压力。使用过程中，应先旋转开启开关阀，随后再打开减压器；实验结束后，则应首先关闭开关阀，待余气完全释放后，再关闭减压器。注意，千万不可以只关闭减压器，不关闭开关阀。

(4) 为得到连续的石墨烯，在石墨烯的生长与转移过程中需要小心操作，保证铜箔不产生褶皱。

## 7 成绩评定与教学效果

成绩评定分为平时成绩与实验报告两方面，各占比50%。平时成绩包括实验习惯和实验操作，实验报告包括内容是否完整、数据分析是否合理以及思考题是否正确。综合各方面得出最终分数。

该实验课程面向本科三年级学生，从2022年开设至今，已有两年，通过观察学生课上的表现和批改课后提交的实验报告，我们发现学生的思维能力、实践能力以及科学素养有了显著提升，主要体现在以下几个方面：

(1) 对石墨烯材料形成了直观且深入的认识，了解了“电子皮肤”这一新兴技术领域，加强了知识积累。

(2) 初次接触CVD技术便成功制备出石墨烯，在此过程中，学生的安全意识与团队协作能力得到了显著提升。

(3) 能够熟练掌握CVD石墨烯的转移技术，动手能力得到了锻炼。

(4) 掌握了光学显微镜、共聚焦显微拉曼光谱仪和电化学工作站等实验仪器的工作原理、使用方法与用途，学会了如何分析光学图片和拉曼光谱数据，熟悉了电极/皮肤界面阻抗的测量和肌电信号的采集流程。

(5) 切身体验了石墨烯基电子皮肤在人机交互方面的实践应用，进而提高了科研热情与自信心。

## 8 结语

“化学气相沉积石墨烯制备电子皮肤”是面向本科三年级学生开设的综合设计实验课程，内容包括CVD石墨烯电子皮肤的制备、表征和应用，全方位训练学生的科研能力，提高学生的综合素质。学生在亲身实践中深化对专业知识的理解，掌握材料制备、仪器使用、数据分析等基本技能，为未来的科研探索和职业发展奠定牢固的基础。通过引导学生关注电子皮肤在医疗健康监测、人机交互、智能机器人设计等领域的应用前景，增强学生的社会责任感和使命感，培养人文关怀。

该实验课程将科技前沿引入本科生教学中，是推进科教融合与理实融合的有效途径，对于实现教育强国、科技强国、人才强国的战略目标，以及推动高等教育现代化具有重要意义。同时，在课程中融入思政元素，是贯彻落实立德树人根本任务、践行党的教育方针的必然要求，有利于培养既精通技术又具备高尚品德的智能时代新人才，为国家智能化发展提供坚实的人才支撑。

## 参 考 文 献

- [1] Gogurla, N.; Kim, Y.; Cho, S.; Kim, J.; Kim, S. *Adv. Mater.* **2021**, 33 (24), 2008308.
- [2] Hu, W. Y.; Song, D. K.; Shi, X. H.; Zhou, L. C.; Zhao, Z.; Xue, T.; Lin, X. Y.; Liu, N. *Adv. Funct. Mater.* **2024**, 34 (11), 2309359.
- [3] Chen, T. L.; Ye, G.; Wu, H. W.; Qi, S. Y.; Ma, G. R.; Zhang, Y.; Zhao, Y.; Zhu, J.; Gu, X. D.; Liu, N. *Adv. Funct. Mater.* **2022**, 32 (46), 2206424.
- [4] Lin, X. Y.; Song, D. K.; Shao, T. C.; Xue, T.; Hu, W. Y.; Jiang, W. C.; Zou, X. Q.; Liu, N. *Adv. Funct. Mater.* **2024**, 34 (11), 2311637.
- [5] Xun, X. C.; Zhang, Z.; Zhao, X.; Zhao, B.; Gao, F. F.; Kang, Z.; Liao, Q. L.; Zhang, Y. *ACS Nano* **2020**, 14 (7), 9066.

- [6] Hwang, W.; Kim, J.; Park, S.; Kang, T.-H.; Kim, S.; Lee, K.; Lee, M.-G.; Kwak, R.; Choi, I.-S.; Yi, H. *Adv. Mater. Technol.* **2023**, *8* (1), 2200477.
- [7] Wang, W. Y.; Yao, D. J.; Wang, H.; Ding, Q. L.; Luo, Y. B.; Ding, H. J.; Yu, J. H.; Zhang, H.; Tao, K.; Zhang, S. *et al. Adv. Funct. Mater.* **2024**, *34* (32), 2316339.
- [8] Zhang, P. X.; Deng, B.; Zhu, K.; Zhou, Q.; Zhang, S. M.; Sun, W. T.; Zheng, Z. J.; Liu, W. S. *EcoMat* **2022**, *4* (6), 12253.
- [9] Li, S.; Huang, J. T.; Wang, M. L.; Deng, K.; Guo, C. H.; Li, B.; Cheng, Y.; Sun, H. Y.; Ye, H.; Pan, T. R. *et al. Adv. Sci.* **2023**, *10* (33), 2304106.
- [10] Neto, J. O.; Chirila, R.; Dahiya, A. S.; Christou, A.; Shakthivel, D.; Dahiya, R. *Adv. Sci.* **2022**, *9* (27), 2201525.
- [11] Ramezani, M.; Kim, J. H.; Liu, X.; Ren, C.; Allothman, A.; De-Eknamkul, C.; Wilson, M. N.; Cubukcu, E.; Gilja, V.; Komiyama, T. *et al. Nat. Nanotechnol.* **2024**, *19* (4), 504.
- [12] Li, X. S.; Cai, W. W.; An, J. H.; Kim, S.; Nah, J.; Yang, D. X.; Piner, R.; Velamakanni, A.; Jung, I.; Tutuc, E. *et al. Science* **2009**, *324* (5932), 1312.
- [13] Liu, N.; Chortos, A.; Lei, T.; Jin, L. H.; Kim, T. R.; Bae, W. G.; Zhu, C. X.; Wang, S. H.; Pfättner, R.; Chen, X. Y. *et al. Sci. Adv.* **2017**, *3* (9), e1700159.
- [14] Zhao, Y.; Zhang, S.; Yu, T. H.; Zhang, Y.; Ye, G.; Cui, H.; He, C. Z.; Jiang, W. C.; Zhai, Y.; Lu, C. M. *et al. Nat. Commun.* **2021**, *12* (1), 4880.
- [15] 苏玺元, 胡震临, 樊焯, 刘先渊, 鹿现永. *大学化学*, **2024**, *39* (5), 228.
- [16] 程涛, 李祥春, 赖文勇. *大学化学*, **2024**, *39* (1), 254.
- [17] Deng, B.; Liu, Z. F.; Peng, H. L. *Adv. Mater.* **2019**, *31* (9), 1800996.
- [18] Vlassiuk, I.; Regmi, M.; Fulvio, P.; Dai, S.; Datskos, P.; Eres, G.; Smirnov, S. *ACS Nano* **2011**, *5* (7), 6069.
- [19] 吴娟霞, 徐华, 张锦. *化学学报*, **2014**, *72* (3), 301.
- [20] Chen, G. Q.; Liu, Y. X.; Liu, F.; Zhang, X. *Appl. Surf. Sci.* **2014**, *311*, 808.