文章编号:1005-4642(2022)03-0039-08

### 综合研究性实验试题 B:二维材料的剥离制备与微区光学测量

潘崇佩<sup>a,b</sup>,王苏云<sup>a,c</sup>,刘东奇<sup>a,b</sup>,刘智波<sup>a,c</sup>,姚江宏<sup>a,b,c</sup>,孔勇发<sup>a,b,c</sup> (南开大学 a. 物理科学学院; b. 基础物理国家级实验教学示范中心; c. 泰达应用物理研究院,天津 300071)

摘 要:介绍了第7届全国大学生物理实验竞赛综合研究性实验试题B的命题背景、实验原理和实验内容,并给出 了试题答案以及考试结果评析.综合研究性实验试题B为二维材料的剥离制备与微区光学测量,试题涉及倒置金相显 微镜操作、二维材料样品制备、晶相测量、微区光学测量装置搭建等内容,综合考查了学生的信息提取、理论知识与实验 技能、数据分析等方面的能力.试题介绍了二维材料的研究进展,融入了信息化研究手段,在科教融合、科研训练方面具 有较强的应用性.

关键词:二维材料;光学特性;晶相测量

```
中图分类号:O439 文献标识码:A DOI:10.19655/j. cnki. 1005-4642. 2022. 03. 007
```

第7届全国大学生物理实验竞赛(教学赛)综合研究性实验试题 B 为"二维材料的剥离制备与 微区光学测量".试题以石墨烯和黑磷作为探究 对象,首先通过机械剥离法在硅片或石英片上制 备出薄层样品,进而使用金相显微镜对样品进行 光学表征,最后搭建出微区光学测量装置对制备 出的黑磷样品进行各向异性研究.试题引入近年 来二维材料领域的研究进展,将本科阶段的基础 理论知识、基本实验技能和前沿科研相结合,对于 学生解决综合性实际问题的能力提出了较高要 求,题目设计具有较强的区分度.

#### 1 实验背景

2004年,英国曼彻斯特大学的科学家安德烈· 盖姆(Andre Geim)和康斯坦丁·诺沃肖洛夫 (Konstantin Novoselov)采用简单方法得到逐渐 减薄的石墨薄片<sup>[1]</sup>,从高定向热解石墨中剥离出 石墨片,然后将薄片的两面粘在特殊的胶带上,撕 开胶带,就能把石墨片一分为二.通过不断操作 使其越来越薄,最后得到了仅由1层碳原子构成 的薄片,即石墨烯.因二维材料石墨烯的开创性 研究,2人共同获得 2010 年诺贝尔物理学奖.石 墨烯的成功制备开启了二维材料的快速发展阶段,人们目前获得了从零带隙的石墨烯<sup>[2]</sup>,到半导体的 MoS<sub>2</sub><sup>[3]</sup>、黑磷<sup>[4]</sup>,再到绝缘体的 hBN<sup>[5]</sup>等丰富的二维材料体系,并在物理、化学、材料等诸多领域中被广泛应用,将人类对材料的探索从三维体结构推进到二维世界.

目前,成熟的二维材料制备方法有机械剥离 法、氧化还原法、SiC外延生长法和化学气相沉积 法等.其中最简单、质量最好的方法是胶带撕裂 晶体的机械剥离法,该方法制备的二维材料适用 于研究本征物理性质<sup>[6]</sup>.2018年,利用机械剥离 法制备出转角双层石墨烯,发现了超导性质,为电 子关联体系的研究打开了新的大门<sup>[7]</sup>.由于原子 结构的不同,二维材料在二维平面内可能具有各 向同性(如石墨烯)或各向异性(如黑磷)的光学性 质,在光调制、光信息处理、光开关以及光传感等 众多领域存在潜在应用<sup>[8]</sup>.但机械剥离法制备的 二维材料尺寸一般在 μm 量级,必须利用显微镜 与微区测量技术对其光学性质进行研究.

试题选取典型二维材料——石墨烯与黑磷为 实验对象,通过机械剥离法制备二维石墨烯和黑 磷样品,利用显微镜探究其基本的光学性质,并通

收稿日期:2021-12-07;修改日期:2021-12-21

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 12174207);国家基础科学人才培养基金项目(No. J1210027);南开大学一流本科教育教学改革项目(No. NKJG2021045);教育部基础学科拔尖学生培养试验计划

作者简介:潘崇佩(1991-),男,山东菏泽人,南开大学物理科学学院实验师,博士,从事近代物理实验教学. E-mail: pancp@nankai.edu.cn

通讯作者:刘智波(1978-),男,河北保定人,南开大学物理科学学院教授,博士,主要研究方向为二维材料光电子器件. E-mail:liuzb@nankai.edu.cn

(1)

过搭建微区光学测量装置研究二维材料的光学各 向异性.

#### 2 实验原理

#### 2.1 二维材料与机械剥离法

二维材料每层由结合力很强的共价键或离子 键结合而成,层与层之间没有悬挂键,而是依靠较 弱的范德华力结合在一起.根据这种结构性质二 维材料被命名为层状材料.由于层状材料的层间 相互作用可依靠外力轻易打破,使得将单层或者 少数原子层从块体中无损剥离出来成为可能.目 前制备高质量的二维材料时,仍然采用机械剥离 法,该方法所制备的二维材料具有缺陷少、表面平 整和迁移率高等优势<sup>[6]</sup>.

比赛现场为考生提供了机械剥离法制备二维 材料的视频资料,其截图如图1所示.



图 1 机械剥离法制备石墨烯的视频截图

基本步骤说明如下:

a. 将待剥离的二维材料块体层状薄片置于透明胶带上;

b. 对该块体材料进行反复粘贴剥离,使其变成较薄的层状薄片;

c.将胶带上的层状薄片转移到目标基底(硅 片或石英片),静止一段时间后将胶带缓慢剥离, 使材料留在目标基底上;

d. 在光学显微镜下寻找单层或者多层的二维 层状材料.

#### 2.2 显微成像

机械剥离法制备的二维材料一般在 μm 尺 寸,必须使用光学显微镜对其进行观察.光学显 微镜是利用光学原理,把人眼无法分辨的微小物 体放大成像,以供人们提取微细结构信息的光学 仪器,主要包括物镜、目镜、反光镜和聚光器等光 学部件.根据光路不同,又可分为正置显微镜和 倒置显微镜 2 类.其中,倒置显微镜具有制样容 易的优点,已被广泛应用于金属学和生物学实验 中,其基本光路结构如图 2 所示.在机械剥离法 制备二维材料的过程中,需要将胶带上的薄层样 品转移至硅片抛光面上,将此面朝下放置于显微 镜样品台,观察并寻找薄层二维材料.



图 2 倒置显微镜的光路结构图 1

#### 2.3 石墨烯在硅片上的颜色判断

实验使用的硅片表面附带 285 nm 厚的 SiO<sub>2</sub> 层.当硅片上存在石墨烯等二维材料时,可通过 颜色来初步判断石墨烯的层数或厚度.石墨烯与 基底形成了4相2层膜结构.该结构由空气(0)/ 石墨烯(1)/SiO<sub>2</sub>(2)/Si(3)多层膜组成,如图3所 示,相应的折射率记作 $n_i(i=0,1,2,3)$ ,则相应界 面的反射系数为 $r_i = \frac{n_{i-1} - n_i}{n_i + n_{i-1}}$ .经过某介质引入 的光程差为 $\beta_i = 2\pi n_i d_i / \lambda$ ,其中 $d_i$ 为厚度, $\lambda$ 为入 射光波长.反射系数可由

 $r = \frac{r_1 e^{i(\beta_1 + \beta_2)} + r_2 e^{-i(\beta_1 - \beta_2)} + r_3 e^{-i(\beta_1 + \beta_2)} + r_1 r_2 r_3 e^{i(\beta_1 - \beta_2)}}{e^{i(\beta_1 + \beta_2)} + r_1 r_2 e^{-i(\beta_1 - \beta_2)} + r_1 r_3 e^{-i(\beta_1 + \beta_2)} + r_2 r_3 e^{i(\beta_1 - \beta_2)}}$ 





图 3 石墨烯在硅片上形成的多层膜反射结构示意图

由式(2)可求得石墨烯的反射率随波长和厚度的变化,如图4所示.根据图4,可由样品颜色 判断石墨烯的厚度,基本规律如下:当石墨烯厚度 在0~70 nm范围内变化时,其反射率峰值所对 应的波长随石墨烯厚度增大而发生红移,单层样 品的峰位位于420 nm(紫色),至40 nm 厚时其峰 位波长为480 nm(蓝色),至70 nm 厚时其峰位波 长为580 nm(黄色).



图 4 石墨烯的反射率随波长和石墨烯的厚度变化

#### 2.4 二维材料面内光学性质的各向异性

由于结构的对称性,石墨烯、MoS<sub>2</sub>等大部分 二维材料层内的光学性质多为各向同性.然而, 黑磷具备其他二维材料少有的平面内各向异性光 电子性能. 黑磷的晶向分为扶手椅(AC)和锯齿 (ZZ)2个方向,其中在可见光波段AC方向的光 吸收率大于 ZZ 方向<sup>[10]</sup>.沿上述方向,原子排列 的周期性和疏密程度不相同,由此导致晶体在不 同方向的物理化学特性也不同,此即黑磷各向异 性的来源.判断晶向的方法有透射电子显微镜、 偏振拉曼光谱和偏振反射测量等手段. 本实验利 用倒置金相显微镜测量黑磷样品的偏振反射光 谱,从而确定黑磷的晶向,原理如下:黑磷材料的 各向异性使得不同偏振态光的反射率不同,实验 中通过旋转检偏器得到不同偏振方向的偏振光, 并利用 CCD 记录反射光的强度. CCD 采集的信 息由 RGB 3 个通道组成,通过拍摄样品图像,由 软件提取出能够较好反映黑磷光学性质的 B 通 道强度. 通过测定光强出现最大值或最小值的位 置,进而标定出各向异性二维材料的晶向<sup>[11]</sup>.

#### 2.5 微区光学性质测量

传统光学表征手段大多基于测试大量集合样品的丛集光学性质.随着纳米材料与器件的出现和发展,传统表征方法已无法适应研究单个微纳结构光学性质的需求,包括机械剥离法制备的二维材料样品的光学表征.结合光学显微手段,可以实现空间分辨率至亚微米量级的微区光学特征表征,该技术被称为微区光谱技术.

二维材料吸收光谱的研究对于理解能带电子 结构极其重要,对光学及光电器件的制备具有指 导作用.在传统的自由空间光路中,光斑通常在 mm量级,无法实现对于二维材料光吸收的表征. 为了研究机械剥离法制备的高质量二维材料样 品,需将光谱测量系统的空间分辨率提高至 µm 量级.要实现这些高难度要求,必须基于显微成 像系统来开展微区光谱测量<sup>[12]</sup>.

#### 3 实验器材与实验样品

实验所使用的多数器材为普通物理实验中的 常用仪器,主要实验器材如表1所示.其中,光学 元件用于学生自主搭建微区光学测量装置,具体 配置详见4.3.

序号	器材名称	数量
1	倒置金相显微镜	1
2	一维测量分划板	1
3	532 nm 连续激光器	1
4	功率计	1
5	CCD 摄像机	1
6	物镜(10×,20×,50×)	3
7	卤素灯	1
8	光学元件	若干
9	电脑	1
10	护目镜	2

表1 主要实验器材

实验材料:1 cm×1 cm 硅片 10 片,1 cm× 1 cm石英片 5 片,3M 胶带 1 卷,手套 2 副,石墨 晶体颗粒 2 块,黑磷晶体颗粒 3 块,光路调节挡板 1 块.

实验附件包含石墨烯制备过程录像、显微镜 使用手册、反射图像提取软件使用手册、CCD使 用操作手册、激光器使用说明、功率计使用说明.

#### 4 实验任务

#### 4.1 显微镜使用、石墨烯的机械剥离制备与测量

4.1.1 倒置显微镜的使用

1)根据附件中的使用说明,调节显微镜至工 作状态.利用 CCD 拍摄 10×和 50×物镜下清晰 的标准分划板图像各 1 张.在电脑桌面新建文件 夹,将图像存储到该文件夹中.(5分)

2)利用标准分划板测量分划板刻度线上最短

线条的尺寸,并简述实验过程.(5分) 4.1.2 石墨烯的机械剥离制备与测量

1)图 5 展示了硅片基底上石墨烯对于 3 种波 长光线的反射率随厚度的变化曲线,图 6 展示了 制备的 2 个石墨烯样品 A 和 B 的显微镜图片<sup>[9]</sup>. 依据以上信息判断 2 块石墨烯样品 A 和 B 的薄 厚关系,并简述判断依据.(5 分)



图 5 在 500,550,600 nm 波长下石墨烯的反射率随 厚度的变化<sup>[9]</sup>



 (a)样品A
 (b)样品B

 图 6 石墨烯样品A和B的光学显微图片<sup>[9]</sup>

2)根据实验附件提供的机械剥离法制备流程 及录像视频,在硅片上制备出石墨烯样品,并拍摄 相应图像(要求使用 50×物镜拍摄,只保留考生 认为制备质量最好的 1 张图像).在电脑桌面新 建文件夹,将图像存储到该文件夹中.根据标准 分划板尺度测量最薄石墨烯样品最长边的长度, 在图像上进行标注,并将标注的图像存储到同一 文件夹中.(15分)

#### 4.2 薄层黑磷的制备和晶向测量

#### 4.2.1 机械剥离法制备黑磷样品

参照图 7 所示的黑磷样品图像,在硅片和石 英片基底上分别制备出边长大于 10 μm 的薄层 黑磷样品.标注边长的真实尺寸,并拍摄相应的 图像(要求使用 50×物镜拍摄,只保留考生认为 制备质量最好的 1 张图像,硅片和石英片基底各 1 张图像).在电脑桌面新建文件夹,将图像存储 到该文件夹中.(10 分)



(a)硅片基底(b)石英片基底图 7 黑磷薄层样品

4.2.2 分析倒置显微镜的光路结构

根据显微镜使用手册与图 8 所示的光路图, 判断进行偏振依赖测量时,起偏和检偏装置应分 别置于 A~E 位置的何处.(10 分)



图 8 倒置金相显微镜的光路结构图 2

4.2.3 测量样品反射光强度随偏振态的变化规 律与黑磷的晶向

使用 4.1.2 和 4.2.1 中制备的硅片基底上的 石墨烯和黑磷样品,按如下步骤进行实验操作. (20 分)

a. 在显微镜 50×物镜下找到已拍照的黑磷和石墨烯样品,在检偏位置处安放好偏振片.

b. 将偏振片调至初始刻度,光源调至适当亮度,使用 CCD 拍摄照片. 旋转偏振片(每次旋转10°),通过 CCD 拍摄照片并保存. 在电脑桌面新建文件夹,并建立"石墨烯"和"黑磷"子文件夹,将石墨烯和黑磷图片分别存储到相应的文件夹中.

c.获得不同角度照片后,通过附件中提供的 Python程序处理图像,从而得到石墨烯和黑磷的 反射光强度随偏振角度方向的变化关系图.

d. 根据上述图像测定黑磷的晶向. 在样品照 片中用直线标出黑磷的晶向(AC 或 ZZ 均可),将 标注图像保存到电脑桌面的文件夹中.

**4.3** 搭建微区光学测量装置并探究黑磷各向异性 4.3.1 显微成像光路的搭建

根据图 9,搭建显微成像装置并对黑磷样品

成像.其中,物镜规格为 20×,白光光源为卤素 灯,样品为 4.2.1 中制备的石英片基底薄层黑磷, CCD 由显微镜基座移至此处.利用 CCD 拍摄 1 张清晰的黑磷样品图像.在电脑桌面新建文件 夹,将黑磷图像保存至此文件夹.(10 分)



图 9 显微成像光路图

4.3.2 在原有光路中加入激光光路

在上述显微成像装置的基础上,根据图 10 加 入激光光路.将激光作用于黑磷样品,获得激光 聚焦于黑磷样品的成像图像,要求激光完全照射 到样品上.在电脑桌面新建文件夹,将拍摄的黑 磷图像保存至文件夹.(10 分)



图 10 激光与样品作用光路图

4.3.3 测量黑磷样品的偏振依赖透射曲线

如图 11 所示,使用功率计替换卤素灯,使用 功率计探头收集透过样品的全部激光,测量其光 功率.使用半波片调整入射激光的偏振方向,由 0°旋转至 180°,每间隔 5°记录功率计读数,得到功 率随偏振角度变化的数据.测量完成后,将光斑 移离黑磷样品,记录石英片基底的透射光功率作 为参考值.(5分)



#### 4.3.4 物理量测算

1)根据测得的数据,在坐标纸上绘制透射光 功率随入射光偏振方向的变化曲线,计算黑磷 2 个轴透射率的各向异性比 γ

$$\gamma = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}},$$
(3)

其中, $T_{\text{max}}$ 为透射率最大值, $T_{\text{min}}$ 为透射率最小值. (2分)

2) 根据上述所绘曲线及

$$\delta = \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) (n_2 + 1) \frac{c}{8\pi \delta_0}, \qquad (4)$$

计算 黑 磷 AC 和 ZZ 轴的相对光电导  $\delta_{AC}$  和  $\delta_{ZZ}^{[13]}$ .其中, $n_2 = 1.46$  为石英片基底的折射率,c为光速, $T_0$  为石英片基底的透射率.石墨烯的电 导  $\delta_0 = \frac{e^2}{4\hbar}$ ,精细结构常量 $\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$ . (3分)

#### 5 试题解答

## 5.1 显微镜使用、石墨烯的机械剥离制备与测量5.1.1 倒置显微镜的使用

本题要求学生拍摄的分划板标尺清晰可见, 如图 12 所示. 通过分度值为 0.01 mm 的分划板 定标,得到图像像素与实际长度的比值即为标尺. 定标后,测量最短样条线的像素长度,进而换算得 到其实际长度为(100.0±2.0) µm.



(a) 10×物镜(b) 50×物镜图 12 显微镜下的分划板图像

#### 5.1.2 石墨烯的机械剥离制备与测量

由图 4~5 可以看出,石墨烯样品越厚,颜色 越偏向黄色;当厚度大于 5 nm 时,其反射率也随 之增强.由于图 6 中样品 B 的反射率明显大于样 品 A,而且颜色偏向黄色,故样品 B 的厚度大于 样品 A.

实验制备石墨烯样品,对石墨烯的尺寸与层数提出了要求.图 13所示为不同层数石墨烯的照片示例,用于对考生制备的样品进行评价.其中厚度分为4档:1~5层,6~10层,10~20层,

21 层及以上,其分值递减;尺寸分为 3 档:20 μm 以上,10~20 μm,5~10 μm,其分值递减.





#### 5.2 薄层黑磷的制备和晶向测量

5.2.1 机械剥离法制备黑磷样品

实验要求在硅片和石英基底上分别制备黑磷 样品,获得与图 7 相似的样品照片.

5.2.2 分析倒置显微镜的光路结构

根据提供的倒置显微镜说明书以及显微镜实物,可以知道倒置显微镜的起偏装置位于光源的 出光口后(E处),检偏装置置于第一个分光片后 (C处).

5.2.3 测量样品反射光强随偏振态的变化规律 与黑磷的晶向

检偏角度至少应从 0~180°变化,实验要求 每次旋转 10°,因此石墨烯和黑磷应各自拍摄多 于 19 张照片.图 14 展示了石墨烯和黑磷示例样 品的反射光强随偏振角度的变化.其中,石墨烯 去除基底后相对强度的变化值处于千分位波动, 黑磷变化幅度相较于石墨烯变化至少大 10 倍.

值得说明的是,实验中所选用的 CCD 并不要 求输出严格的线性信息,只需保证输出信号随着 光强变化而单调变化即可.图 14(a)中石墨烯样 品的信号波动主要来源于显微镜内分光片的影 响,而非其本征偏振变化.



(a)石墨烯样品



(b)黑磷样品图 14 样品反射光强随偏振角度变化示例

图 15 标注了黑磷示例样品的晶向. 以竖直 方向为偏振 0°的基准方向,偏振角度顺时针增 大,ZZ 方向为第一次出现峰的角度(图中与竖直 方向成 101.4°夹角),AC 方向为第一次出现谷的 角度(图中为 11.4°). 该方法的适用性得到文献 [10-11]的验证. 在实际操作过程中,由于剥离的 晶体一般沿固定晶向断裂,通过找到并测量相近 的直边,可对测量结果做出辅助性判断或修正.



图 15 黑磷示例样品的晶向

## 5.3 搭建微区光学测量装置并探究黑磷各向异性5.3.1 显微成像光路的搭建

图 16 为使用 20×物镜拍摄所得的黑磷照 片.透射显微图像中,样品周围呈现白色,样品为 灰色.此样品应与第二部分拍摄的石英基底黑磷 图像为同一样品.



图 16 黑磷成像照片

#### 5.3.2 在原有光路中加入激光光路

要求激光光斑必须全部聚焦在待测黑磷样品 上,且与样品重合共焦,样品照片如图 17 所示.



图 17 黑磷与激光光斑重合的照片

5.3.3 测量黑磷样品的偏振依赖透射曲线

根据记录的实验数据绘制光透射率随偏振角度的变化曲线,如图 18 所示.此曲线为类正弦曲线,横坐标为光的偏振方向角度,是半波片示数的2 倍.



图 18 黑磷样品透射率随偏振角度变化曲线

5.3.4 物理量测算

各向异性之比的取值范围为 0.045~0.2,相 对光电导率  $\delta_{AC}$  和  $\delta_{ZZ}$  均在 1.00~12.00 范围内, 且  $\delta_{AC} > \delta_{ZZ}$ .在本示例中,黑磷样品各向异性之 比为 0.091, $\delta_{AC} = 10.44$ , $\delta_{ZZ} = 9.85$ .需要指出的 是,图 18 中在 175°附近出现了异常数据点,且图 中双峰值略有差异,这一现象可能与自组光路的 稳定性有关.环境变化对功率计、波片以及样品 的位置产生轻微影响,从而导致实验结果出现一 定误差.

#### 6 考试结果及评析

本次竞赛共有 27 组队伍选做综合研究性实 验试题 B. 表 2~4 分别为试题的第一部分、第二 部分得分和总分统计.

12 4	综 다 에 九 庄 ㅋ	卡亚瓜越 D 5	하기가	1 50 11
试题	最高分	最低分	中位数	平均分
	(组数)	(组数)		
4.1.1(1)	5(24)	0(2)	5	4.5
4.1.1(2)	5(8)	0(10)	2	2.3
4.1.2(1)	5(1)	0(3)	3	3.0
4.1.2(2)	8(1)	0(3)	5	3.9

#### 表 3 综合研究性实验试题 B 第二部分得分统计

试题	最高分	最低分	中位数	平均分
	(组数)	(组数)		
4.2.1	10(7)	0(3)	5	5.6
4.2.2	10(22)	0(2)	10	8.7
4.2.3	20(2)	0(6)	5	5.0

#### 表 4 综合研究性实验试题 B 总分统计

试题	最高分	最低分	由合粉	亚均公
(分数)	(组数)	(组数)	中世致	于均分
第一部分	99(1)	$\mathcal{L}(1)$	14	10.0
(30)	22(1)	0(1)	14	10.0
第二部分	25(2)	7 5(1)	17 5	10.2
(40)	35(3)	7.5(1)	17.5	19.3
第三部分	0	0	0	0
(30)	0	0	0	0
总分	50(0)	17 5(1)	20	0.0 1
(100)	53(2)	17.5(1)	30	33 <b>.</b> I

如表 2 所示,第一部分的第 4.1.1 和 4.1.2 (1)均有队伍获得满分.这些题目考查的内容为 倒置显微镜的使用与定标.参赛考生对正置显微 镜有所了解,此处主要检验其对新事物(倒置显微 镜)的学习能力.由于提供了详细的显微镜使用 说明书,题目难度不大.4.1.2(2)题要求学生制 备石墨烯样品,并对最薄样品进行拍照.这里对 学生的理论功底、学习能力、解决实际物理问题的 能力等均有所考查,相比之前题目难度有所提高.

如表 3 所示,第二部分的 3 个题目均有队伍 获得满分或 0 分.不同队伍的得分差距较大,体 现了队伍间的实力差距.经过第一部分试题的训 练后,学生对于制备二维材料样品的方法已较为 熟悉.此处的难点在于 4.2.3 对偏振依赖的反射 光测量光路的理解与应用.此题提供了编译好的 计算程序便于学生测量数据使用,考生只需按照 说明操作即可,理论上本题综合难度不高,但实际 得分情况较差,在一定层面上反映了部分学生对 于信息化工具的学习能力及适应能力不高.

第三部分重点考查学生根据光路图自主搭建 光路的实验能力,命题者围绕偏振透射光路搭建、 数据处理及理论推导等内容逐层设题,期望达到 实验与理论相结合的效果.从卷面看,该部分的 实验曲线绘制多为空白,可知考生未能获得可靠 的实验数据.究其原因,一是考生未能合理安排 答题时间,在前两部分花费过多时间;二是考生不 熟悉各种光学元件,日常搭建光路的训练不足.

表4与图19整体展示了考生的答题情况. 基于此数据及考生的赛场表现,考生对于第一部 分和第二部分使用套件(例如显微镜)的实验内容 或有详细参考资料和实验步骤的实验(例如按照 视频教程制备石墨烯)能够快速上手,证明学生对 于此类实验内容吸收消化较快.但是,考生在亲 自动手解决实际问题时(第三部分)存在不足,自 行搭建装置完成综合性实验的能力方面欠缺,体 现为绝大多数学生无法顺利完成全部实验.在巡 场中,发现有部分学生不会正确使用棱镜和位移 台,出现反向安装、轴承滑丝等错误.这些问题提 示教师应在今后的物理实验教学中需进一步加强 对学生自主设计实验的能力培养以及综合探究性 实验的训练.



图 19 总分直方图

#### 7 结束语

与前几届的物理实验竞赛题目相比,本实验 在内容与形式上进行了一定程度的创新.内容方 面,试题引入了近年来快速发展和应用的二维材 料,在有限的考试时间内针对材料制备与光学表 征进行综合性考查;形式方面,实验融入了信息化 研究手段,通过向学生提供视频资料以及 Python 编程工具的方式,使题目向当前主流的科研流程 靠拢.本实验受到了参赛高校教师及阅卷专家的 良好评价,认为其在科教融合、学生科研训练方面 具有较强的应用价值.实验所使用的材料与仪器 较为常见,整体构建成本不高,适合高校在近代物 理实验或专业物理实验课程中开设,具有一定的 推广意义.

#### 参考文献:

- [1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films
   [J]. Science, 2004,306(5696):666-669.
- [2] Geim A K. Graphene: Status and prospects [J].
   Science, 2009,324(5934):1530-1534.
- [3] Kadantsev E S, Hawrylak P. Electronic structure of a single MoS<sub>2</sub> monolayer [J]. Solid State Communications, 2012,152(10):909-913.
- [4] Castellanos-Gomez A, Vicarelli L, Prada E, et al. Isolation and characterization of few-layer black phosphorus [J]. 2D Materials, 2014,1(2):025001.
- [5] Zhang K L, Feng Y L, Wang F, et al. Two dimensional hexagonal boron nitride (2D-hBN): Synthesis, properties and applications [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2017,5(46):11992-12022.
- [6] Bonaccorso F, Lombardo A, Hasan T, et al. Production and processing of graphene and 2d crystals
   [J]. Materials Today, 2012,15(12):564-589.
- [7] Cao Y, Fatemi V, Fang S, et al. Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices [J]. Nature, 2018,556(7699):43-50.
- [8] 姜小强,刘智波,田建国. 石墨烯光学性质及其应用 研究进展[J]. 物理学进展,2017,37(1):22-36.
- [9] Ni Z H , Wang H M , Kasim J , et al. Graphene thickness determination using reflection and contrast spectroscopy [J]. Nano Letters, 2007, 7(9):2758-2763.
- [10] Mao N N, Tang J Y, Xie L M, et al. Optical anisotropy of black phosphorus in the visible regime [J]. Journal of the American Chemical Society, 2016,138(1):300-305.
- [11] Huang K X, Gao X G, Hao B J, et al. Anisotropic imaging for the highly efficient crystal orientation determination of two-dimensional materials
  [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7 (20):5945-5953.

#### **Expansion of Ransauer-Townsend effect experiment**

LI Ming-yang, MA Zhi-yuan, ZHANG Zhi-hua, GUAN Jia, FANG Kai, HE Li, SHEN Jun (School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: When the electron flow interacts with the rare gas atoms of the electron collision tube, the electron scattering probability and the total effective scattering cross section are related to the electron velocity, which is called the Ransauer-Townsend effect. In this paper, the Ransauer-Townsend effect was verified by giving the curves of electron scattering probability and the total effective scattering cross section with the changing electron velocity. The curve of the geometric factors and plate current with electron velocity was explored, and the similarities and differences of Ransauer-Townsend effect curves under different filament voltage were compared. A more simple and efficient method to measure the optimum compensation voltage was studied.

Key words: Ransauer-Townsend effect; geometric factors; filament voltage; optimum compensation voltage [责任编辑:郭 伟]

 (上接 46 页)
 [12] 倪振华,周梦凡,戴玉蓉. 微区光谱系统搭建与应用研究型教学实验[J]. 物理实验,2021,41(8): 27-32. [13] Zhang G W, Huang S Y, Wang F J, et al. The optical conductivity of few-layer black phosphorus by infrared spectroscopy [J]. Nature Communications, 2020,11(1):1-7.

# Comprehensive test B: Exfoliation and micro-area optical measurement of two-dimensional materials

PAN Chong-pei<sup>a,b</sup>, WANG Su-yun<sup>a,c</sup>, LIU Dong-qi<sup>a,b</sup>, LIU Zhi-bo<sup>a,c</sup>, YAO Jiang-hong<sup>a,b,c</sup>, KONG Yong-fa<sup>a,b,c</sup>
(a. School of Physics; b. National Demonstration Center for Experimental Physics Education; c. TEDA Institute of Applied Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The experiment background, principle, content, solution and result analysis of the comprehensive test B of the 7th Chinese Undergraduate Physics Experiment Competition were given. The comprehensive test B was about exfoliation and micro-area optical measurement of two-dimensional materials. It involved metallographic microscope operation, two-dimensional material sample preparation, crystal orientation measurement, and self-building device for micro-area optical measurement, which was a comprehensive examination on extracting effective information, physics theory basis and experimental skills, data analysis ability for students. The test introduced the research progress of two-dimensional materials and integrated information research methods, which had strong applicability in the integration of science and education and scientific research training.

Key words: two-dimensional material; optical properties; crystal orientation measurement

[责任编辑:任德香]