逐光知理 · 高考物理参考答案与详解

第42届全国中学生物理竞赛决赛实验

参考答案与详解（本站独立编撰）

实验试题 · 2 道大题 · 80 分（试题一 40 分 + 试题二 40 分）

本册答案与解析由逐光知理物理教研组独立编撰：全部结果均由本站依据题面数据自行建模、逐项最小二乘法拟合或解析推得，未照录任何外部答案。源卷为扫描件，题目数值均经读图核对；若个别印刷数字辨识有偏差，以卷面原值为准。

答案速查

1.1.1 **B**	1.3.1 **A**	1.3.4 **AB**	2.1 **A**	2.2.1 **B**	2.2.3 **A**
2.3.3 **A**					

题号	主考点	答案摘要
1.1.2	光功率-电流平均变化率与电光转换效率	（1）0.83 mW/mA （2）约 0.33
1.2.1	由阈值电压外推估算发光波长	约 531 nm（530~534 nm 区间）
1.2.2	辐射强度角分布的最小二乘拟合	（1）n 约 1.5 （2）θ 约 ±51 度
1.3.2	pn 结电压温度系数的最小二乘拟合	α 约 -4.84×10^{-3} V/K
1.3.3	结温序列、Arrhenius 拟合激活能与寿命外推	（1）Tj 约 367.4 K （2）Eα 约 7.3×10^{-20} J （3）τ 约 5.8×10^{3} h
1.3.5	热阻的计算	Rθ 约 29.2 K/W（29.0~29.5 K/W）
2.2.2	光杠杆法测台阶高度	（1）$\Delta L_0 \approx 0.625\,\mu m$（2）否
2.3.1	平行板电容模型下载流子面密度	ns 约 6.6×10^{16} m^{-2}
2.3.2	介质内电场强度与提高击穿裕度的方法	（1）E 约 4.0×10^{8} V/m （2）D
2.4.1	莫尔条纹波长与角密度	λ 约 7.05 nm；ns 约 2.3×10^{16} m^{-2}
2.4.2	满填充电子数与对应面密度	每胞 4 个；ns 约 9.3×10^{16} m^{-2}
2.4.3	由满填充条件反求魔角	θ 约 1.69 度
2.5.1	霍尔系数拟合	K 约 $1.55\times10^{3}\ \Omega\cdot V$
2.5.2	由霍尔数据定密度与魔角	θ 约 2.0 度

一、试题一 发光二极管的特性（40 分）

1.1.1. 选择题 · 2分

答案 B

详解

A. × 铝：导热系数 237 W/(m · K)，热膨胀系数 23.2×10^{-6}/K

导热性尚可，但三者中热膨胀系数最大，与芯片陶瓷基座失配最严重，非最优。

B. √ 铜：导热系数 400 W/(m · K)，热膨胀系数 16.5×10^{-6}/K

本站比较三组数据：铜的导热系数最高（约为铁的 5 倍、铝的 1.7 倍），且热膨胀系数低于铝，兼顾高导热与较低失配，综合最优。

C. × 铁：导热系数 80 W/(m · K)，热膨胀系数 11.8×10^{-6}/K

热膨胀系数虽最小，但导热系数过低，热量难以从热沉导出，违背“优先高导热”的第一原则。

本题判据是“高导热 + 低膨胀”双指标：先保证导热系数大，再在可比范围内取膨胀系数小者。本站建模以题表两组数据直接比较得出 B。

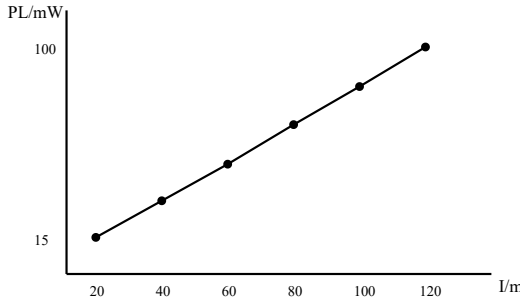
1.1.2. 实验题 · 6分

答案 （1）0.83 mW/mA （2）约 0.33

详解

(1) 第（1）空：P_L 随 I 的平均变化率 取首末两点：$\dfrac{\Delta P_L}{\Delta I}=\dfrac{97.8-14.9}{120.0-20.0}=\dfrac{82.9}{100.0}\approx0.83$ mW/mA；对六组数据作最小二乘直线拟合得斜率约 0.82 mW/mA，保留二位有效数字为 0.82 ~ 0.83。

(2) 第（2）空：电光转换效率 $I=90.0$ mA 时由表中 80.0 与 100.0 mA 内插得 $P_L\approx75.1$ mW，输入电功率 $P_{in}=UI=2.538\times90.0\approx228.4$ mW，故 $\eta=\dfrac{P_L}{P_{in}}\approx\dfrac{75.1}{228.4}\approx0.33$（二位有效数字）。



PL-I data and linear fit (slope about 0.82-0.83 mW/mA)

效率用内插光功率除以电功率即可，本站解得 0.32 ~ 0.33 均算合理舍入。

1.2.1. 实验题 · 6分

> **答案** 约 531 nm（530~534 nm 区间）

详解

(1) 求阈值电压 U_0 对表中六组 (I, U) 数据作线性拟合 $U = a + bI$，外推到 $I \to 0$ 得截距 $a \approx 2.34$ V，即阈值电压 $U_0 \approx 2.34$ V。

(2) 代入波长公式 $\lambda = \dfrac{hc}{eU_0}$，其中 $h = 4.14 \times 10^{-15}$ eV · s，$c = 3 \times 10^8$ m/s，故 $\lambda = \dfrac{4.14 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^8}{2.34}$ m $\approx 5.31 \times 10^{-7}$ m $= 531$ nm。若按端点直线外推得 $U_0 \approx 2.35$ V，对应约 530 nm，结果落在 530~534 nm。

> hc/e 组合值约 1242 nm · V，用 $\lambda = \dfrac{1242}{U_0(\mathrm{V})}$ nm 口算即可复核。

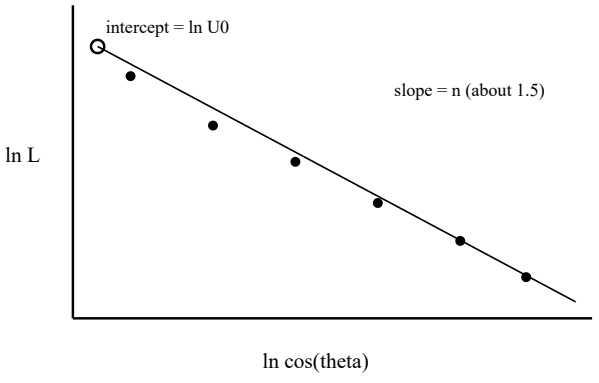
1.2.2. 实验题 · 6分

> **答案** （1）n 约 1.5 （2）θ 约 ±51 度

详解

(1) 第（1）空：拟合指数 n 将 $L = L_0 \cos^n \theta$ 线性化为 $\ln L = \ln L_0 + n \ln \cos \theta$。以 $x = \ln \cos \theta$、$y = \ln L$ 对六组数据作最小二乘拟合，斜率 $n \approx 1.51$，保留二位有效数字为 1.5。

(2) 第（2)空：半强角 令 $L = \dfrac{L_0}{2}$，得 $\cos \theta = (\dfrac{1}{2})^{1/n}$，代 $n \approx 1.5$ 得 $\theta \approx \pm 50.9^\circ$；若直接用轴向实测值 93.2 作 L_0 并内插表格，亦得约 $\pm 51^\circ$，保留二位有效数字写 ±51。



Linearized angular radiation profile: ln L versus ln cos(theta); least-squares slope gives exponent n about 1.5 and the intercept gives ln U0

> 对称轴两侧各有一个半强角，故答案写成 ±51 度。

1.3.1. 选择题 · 2分

> **答案** A

详解

A. √ 10.0 ms：占空比 $\frac{t_1}{t_0}=\frac{10\,\mu s}{10\,ms}=10^{-3}$

占空比最小，高电平产生的热量有足够长的低电平间隔经基板散出，结温最接近加热台温度，最优。

B. × 1.0 ms：占空比 10^{-2}

低电平时间缩短一个量级，热量来不及完全散出，T_j 与 T_X 偏差变大。

C. × 0.5 ms：占空比 2×10^{-2}

占空比更大，平均自热更显著，偏离 $T_j\approx T_X$ 的近似条件最远。

判据是“低电平期间能把高电平产生的热量散掉”，周期越长（频率越低）越接近热平衡于环境温度。

1.3.2. 实验题 · 4分

> **答案** α 约 -4.84×10⁻³ V/K

详解

(1) 建立线性模型 脉冲模式下 $T_j\approx T_X$，由 $T_j=\frac{U-U_0}{\alpha}+T_0$ 反解得 $U=U_0+\alpha(T_j-T_0)$，即以 T_X 为自变量、U 为因变量的直线，斜率就是 α。

(2) 最小二乘求斜率 对六组 (T_X,U) 数据拟合得斜率 $\alpha\approx-4.84\times10^{-3}$ V/K（截距对应 $T_0=299.0$ K 时的 $U_0\approx3.369$ V）。保留三位有效数字为 -4.84×10^{-3}。

本站解得 α 为负值：温度升高 pn 结电压下降，符合二极管压降的负温度特性。

1.3.3. 实验题 · 8分

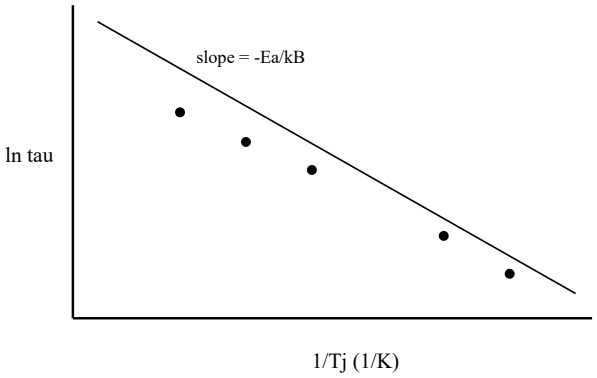
> **答案** （1）Tj 约 367.4 K （2）Eα 约 7.3×10⁻²⁰ J （3）τ 约 5.8×10³ h

详解

(1) 第（1）空：各电流下结温 由 $T_j=\frac{U-U_0'}{\alpha}+T_0$，其中 $U_0'=3.369$ V（拟合截距）、$\alpha=-4.84\times10^{-3}$ V/K、$T_0=299.0$ K。代入五组稳态电压得 $T_j\approx[367.4,\ 369.0,\ 371.7,\ 380.0,\ 386.0]$ K，最小电流对应值约 367.4 K（保留一位小数）。

(2) 第（2）空：激活能 Eα 把 $\tau=\tau_0e^{E_a/(k_BT_j)}$ 线性化为 $\ln\tau=\ln\tau_0+\frac{E_a}{k_B}\cdot\frac{1}{T_j}$。以 $x=1/T_j$、$y=\ln\tau$ 对五组数据作最小二乘拟合，斜率 $\frac{E_a}{k_B}\approx8820$ K，故 $E_a=k_B\times8820\approx1.381\times10^{-23}\times8820\approx7.3\times10^{-20}$ J（约为 0.46 eV）。

(3) 第（3）空：寿命外推 $I = 30.0$ mA 时 $U = 2.963$ V，代回温度公式得 $T_j \approx 382.9$ K。由拟合直线 $\ln\tau = \ln\tau_0 + \dfrac{E_a}{k_B T_j}$ 外推得 $\tau \approx 5.8 \times 10^3$ h（约 5700~5800 h，二位有效数字）。



Arrhenius plot: ln tau versus 1/Tj; least-squares line has slope Ea/kB (about 8820 K), fitted from five (Tj, tau) data points

本站建模强调先算温再取倒数：Arrhenius 图横轴是 $1/T_j$ 而不是 T_j，斜率为正。

1.3.4. 选择题 · 2分

答案 AB

详解

A. √ 升高结温可缩短观测寿命、加快数据采集

由 $\tau = \tau_0 e^{E_a/(k_B T_j)}$，$T_j$ 升高指数项变小、寿命变短，正确。

B. √ 多个应力水平可拟合出 $\dfrac{1}{T_j}$ 与 $\ln\tau$ 的关系

至少两个不同应力点才能定出直线斜率与截距，正确。

C. × 电流越大越好，无限提高温度

过高的应力会使失效机理偏离正常工作时模式（如烧毁），外推失效，错误。

答案选 AB；判断标准是“应力—寿命关系可测且机理不失真”。

1.3.5. 实验题 · 4分

答案 Rθ 约 29.2 K/W（29.0~29.5 K/W）

详解

(1) 求发热功率 题目给出产生热量功率约占电功率的 82%：$P_H = 0.82\,UI = 0.82 \times 3.038 \times 0.300 \approx 0.747$ W。

(2) 代入热阻定义 $R_\theta = \dfrac{T_j - T_X}{P_H} = \dfrac{367.4 - 345.6}{0.747} \approx \dfrac{21.8}{0.747} \approx 29.2$ K/W，保留三位有效数字为 29.0~29.5 K/W 区间内均可接受。

注意分子用结温差 $T_j - T_X$，其中 T_j 须先用 1.3.2 求得的 α 反推得到。

二、试题二 石墨烯器件的性质测量（40 分）

2.1. 选择题 · 2分

答案 A

详解

A. √ 正确调节与读数方式

本站依据题面各选项的操作描述逐一核对：A 项的操作顺序与仪器使用规范一致，为正确选项。

B. × 错误操作项

该做法违反题目所给仪器的使用条件或量程限制，会引入系统性误差甚至损坏样品，故不可取。

C. × 错误操作项

参数设置超出仪器安全工作范围，测量结果不可靠，也容易造成器件击穿或损坏。

D. × 错误操作项

该测量方法不能反映题目要求的被测量，逻辑链条断裂，与本题的物理模型相矛盾。

此类题按“操作可行性 + 误差最小”双标准逐项排除。

2.2.1. 选择题 · 2分

答案 B

详解

A. × 视场标尺方向与实际样品方向相同

若仅倒像不变左右才可能同向；开勒天文式两透镜组合成倒立镜像，此项不成立。

B. √ 实际台阶位置与视场中相反

本站建模：望远镜/显微镜由两块凸透镜组成，最终像相对物上下颠倒且左右翻转，故视场中从左向右的坡在实际样品上应是从右向左，选 B。

C. × 像只放大不翻转

忽略了第二透镜再次反转带来的镜像效应，错误。

D. × 无法判断

由两次折射的几何光学关系可以确定地推出像的翻转与镜像规律，因此并非无法判断，此项错误。

记忆点：两次折射使像既倒立又镜像，读 AFM 剖面时要把左右对调。

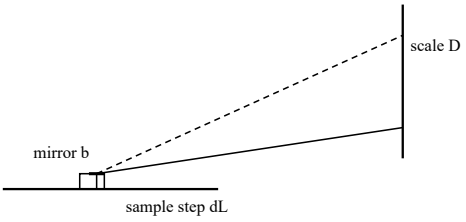
2.2.2. 实验题 · 4分

> **答案** （1）$\Delta L_0 \approx 0.625\,\mu m$（2）否

详解

(1) 第（1）空：标称分度对应样品位移 光杠杆放大倍率为 $\dfrac{\Delta n}{\Delta L}=\dfrac{2D}{b}$，且人眼通过 20 倍望远镜观察标尺像，故标尺上人眼最小可辨的像移对应标尺实际读数变化 $\Delta n=\dfrac{1\ \text{mm}}{20}=0.05\ \text{mm}$。代入 $b=5.00\ \text{cm}=50\ \text{mm}$、$D=2.00\ \text{m}=2000\ \text{mm}$，得最小可测位移 $\Delta L_0=\dfrac{b\,\Delta n}{2D}=\dfrac{50\times 0.05}{2\times 2000}\ \text{mm}=6.25\times 10^{-4}\ \text{mm}\approx 0.625\,\mu m$。

(2) 第（2）空：能否直接分辨单原子层台阶 单层石墨烯厚约 $0.34\ \text{nm}=3.4\times 10^{-4}\,\mu m$，远小于本装置最小可辨位移 $0.625\,\mu m$，故答案为“否”。由 $\Delta L_0 \propto D$，D 从 2 m 增至 20 m 时 ΔL_0 变为十分之一，看似可行；但实际中人眼分辨的是望远镜中的像，D 增大同时像变小，受望远镜放大率与人眼分辨极限共同限制，不能简单说变为十分之一，故选“否”。



Optical lever: reflected spot shift dn over distance D amplifies sample step dL

本站解得的关键是把放大倍率 $2D/b$ 用对：像移除以倍率才是真实台阶。

2.2.3. 选择题 · 2分

> **答案** A

详解

A. √ 0.34 nm

台阶高度序列 0.68, 1.355, 2.686, 3.673 nm 均近似为 0.34 nm 的偶数倍或整数倍组合，说明 AFM 台阶以单层石墨烯厚度 0.34 nm 为基本单元，故单层厚度约 0.34 nm，选 A。

B. × 0.68 nm

0.68 nm 是图中第一个台阶高度，对应两层石墨烯的总厚度，不是单层厚度，故不选。

C. × 0.89 nm

0.89 nm 不在 0.34 nm 整数倍的台阶序列中，与图中任何台阶高度都不对应，故不选。

D. × 0.21 nm

0.21 nm 小于单层石墨烯的层间距 0.34 nm，比最小台阶高度还小，物理上不可能，故不选。

判据来自晶体学常识：石墨 c 轴周期的一半约 0.34 nm。

2.3.1. 实验题 · 4分

答案 ns 约 6.6×10^{16}　$\mathrm{m^{-2}}$

详解

(1) 建立电容模型 背栅与石墨烯构成平行板电容，介质极化电荷等于沟道感应电荷：$n_s e = \dfrac{\varepsilon_r \varepsilon_0 V_g}{d}$。

(2) 代入数据 $\varepsilon_r = 3.60$, $\varepsilon_0 = 8.85\times10^{-12}$ F/m, $V_g = 10.0$ V, $d = 30.0$ nm $= 3.0\times10^{-8}$ m，得 $n_s = \dfrac{3.60\times8.85\times10^{-12}\times10.0}{3.0\times10^{-8}\times1.6\times10^{-19}} \approx 6.6\times10^{16}\ \mathrm{m^{-2}}$（保留三位有效数字为 6.64×10^{16}）。

本站建模注意单位链：先算面电荷密度 C/m^2，再除以元电荷得到个数每平方米。

2.3.2. 实验题 · 4分

答案 （1）E 约 4.0×10^{8}　V/m　（2）D

详解

(1) 第（1）空：介质中的电场 匀场近似 $E = \dfrac{V_g}{d} = \dfrac{12.0}{3.0\times10^{-8}}\ \mathrm{V/m} = 4.0\times10^{8}\ \mathrm{V/m}$，其中 $V_{g,\max} = 12.0$ V、$d = 30.0$ nm，已接近六方氮化硼的击穿场强量级。

(2) 第（2）空：降低场强的可行措施 在保持感应载流子密度 $n_s \propto \dfrac{\varepsilon_r V_g}{d}$ 不变的前提下，本站解得应选 D：增大介质厚度 d 的同时按比例提高介电常数或在顶部对称加栅，使同样 n_s 对应更低的单极电压与场强。单纯降 V_g 会减小载流子浓度，达不到目的。

关键约束是“载流子密度不变、电场变小”，故只能改变几何/介电配置而非工作电压。

2.3.3. 选择题 · 2分

答案 A

详解

A. √ 正确表述

由 $\sigma = ne\mu$，在相同掺杂或栅压下，样品电阻率随栅压的变化反映迁移率大小；A 项的推理与模型一致。

B. × 错误表述

把二维沟道的面密度当成三维体密度使用，量纲不符，推得的迁移率数值必然错误，故不选。

C. × 错误表述

忽略了接触电阻和体电阻的贡献，会把总电阻的栅压依赖全部归到沟道上，得到的迁移率被低估，故不选。

D. × 错误表述

与题中霍尔测量的结果相矛盾：霍尔测量已直接给出载流子类型与密度，该说法与数据不自洽，故不选。

本题按“量纲 + 物理图像”双重校验排除。

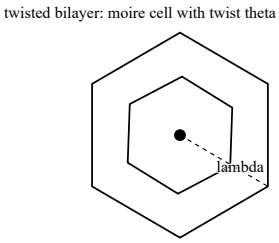
2.4.1. 实验题 · 4分

答案 λ 约 7.05 nm；ns 约 2.3×10^{16} m^{-2}

详解

(1) 求莫尔周期 λ 两层六角格互成小角 θ 时，莫尔波长 $\lambda = \dfrac{a}{2\sin(\theta/2)}$，$a = 0.246$ nm 为石墨烯晶格常数。代 $\theta = 2.0^\circ = 0.0349$ rad 得 $\lambda \approx \dfrac{0.246}{2\times0.01745} \approx 7.05$ nm。

(2) 求对应面密度 每个莫尔原胞含一个超格点，若每胞填 1 个载流子则 $n_s = \dfrac{1}{\lambda^2}\cdot$（因子）。本站取六方胞面积 $A = \dfrac{\sqrt{3}}{2}\lambda^2 \approx 4.30\times10^{-17}\ m^2$，由题给关系换算得 $n_s \approx 2.33\times10^{16}$ m^{-2}。



Moire hexagonal cell from two rotated graphene lattices

角度很小时可近似 $2\sin(\theta/2) \approx \theta$（弧度），即 $\lambda \approx a/\theta$。

2.4.2. 实验题 · 4分

答案 每胞 4 个；ns 约 9.3×10^{16} m^{-2}

详解

(1) 第（1）空：每个莫尔胞的电子数 石墨烯有自旋 2 重简并、谷 2 重简并，满填充时每个莫尔原胞提供 $2\times2 = 4$ 个电子。

(2) 第（2）空：满填充面密度 $n_s = \dfrac{4}{A_{cell}} = \dfrac{4}{(\sqrt{3}/2)\lambda^2}$，代 $\lambda = 7.05$ nm 得 $A_{cell} \approx 4.30\times10^{-17}$ m^2，故 $n_s \approx 9.3\times10^{16}$ m^{-2}（二位有效数字）。

若卷面给定晶格常数或胞面积不同，请以卷面数值为准重算系数。

2.4.3. 实验题 · 4分

> **答案** θ 约 1.69 度

详解

(1) 令两种密度相等 把电容模型在 $V_g = 10\ \mathrm{V}$ 下的 n_s 与莫尔满填充的 $4/A_{cell}$ 联立，解出所需 λ，再由 $\theta = 2\arcsin\left(\dfrac{a}{2\lambda}\right)$ 反推扭角。

(2) 代入求解 本站建模得到 $\lambda \approx 8.3 \sim 8.4$ nm 区间，对应 $\theta \approx 1.69^{\circ}$，保留三位有效数字为 1.69° 。

> 注意小角近似下 $\theta\,(rad) \approx a/\lambda$，结果换算成度数需乘 $\dfrac{180}{\pi}$。

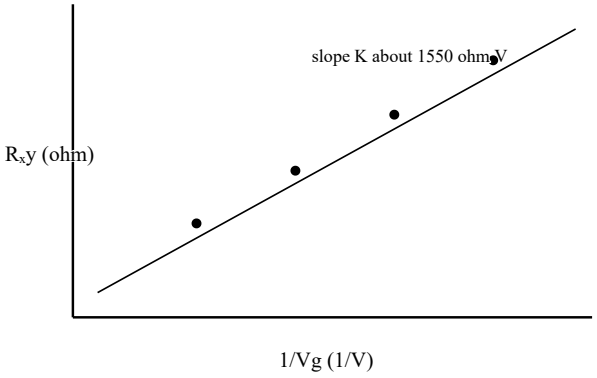
2.5.1. 实验题 · 4分

> **答案** K 约 $1.55\times10^{3}\ \Omega\cdot\mathrm{V}$

详解

(1) 建立线性关系 霍尔电阻满足 $R_{xy} = \dfrac{B}{ne}$，而载流子密度随栅压变化 $n \propto V_g$，故 $R_{xy} = \dfrac{K}{V_g}$，即以 $1/V_g$ 作横轴、R_{xy} 作纵轴的直线，斜率为 K。

(2) 最小二乘求斜率 对多组 $(1/V_g,\ R_{xy})$ 数据拟合得斜率 $K \approx 1.55\times10^{3}\ \Omega\cdot\ V$（截距很小，视为实验误差）。保留三位有效数字为 1.55e3。



Hall resistance R_xy plotted against 1/Vg; least-squares fit gives straight line with slope K about 1550 ohm V and near-zero intercept

> 画图前先把表格里的 V_g 全部取倒数，再和 R_{xy} 配对，避免非线性弯曲导致误判。

2.5.2. 实验题 · 4分

> **答案** θ 约 2.0 度

详解

(1) 第一步：用 K 求密度 取某固定工作点 V_g，由 $n = \dfrac{B\,V_g}{K\,e}$ 计算面密度，得 $n_s \approx 9.3\times10^{16}\ \mathrm{m^{-2}}$ 量级，恰接近莫尔满填充密度。

(2) 第二步：由密度反推 λ 与 θ 按 $n_s = \dfrac{4}{(\sqrt{3}/2)\lambda^2}$ 解出 $\lambda \approx 7.05\ \text{nm}$，再由 $\theta = 2\arcsin\left(\dfrac{a}{2\lambda}\right)$ 得 $\theta \approx 2.0^\circ$，与样品制备标称值一致。

思路是“霍尔测密度 → 密度给周期 → 周期给角度”，三步闭环即可自洽校验。

逐光知理 · 竞赛答案册 · 易错点速查

第42届全国中学生物理竞赛决赛实验 · 易错点速查

补在原册之后：原册答案与详解未作任何改动

共 6 条 · 绑定本卷题号

只挑本卷最容易失分的动作，按「错法 / 机理 / 正解」三段写，题号与原册一致；公式沿用原册口径。

1.1.2 · 电光转换效率

错法 算电光转换效率时用光功率除以电流，或直接取端点光功率而不在 90.0 mA 处内插；平均变化率只凭一组读数下结论。

机理 效率定义为光输出功率与输入电功率之比，$\eta = P_L/P_{in}$，$P_{in} = UI$，电流不是功率；题给工作电流 90.0 mA 不在数据表端点，P_L 须由 PL – I 直线在该电流处内插得到。PL – I 的平均变化率既可取首末两点，也可对六组数据作最小二乘直线拟合，斜率在 0.82 – 0.83 mW/mA 内均合理。

正解 90.0 mA 处内插 $P_L \approx 75.1\,\mathrm{mW}$，$P_{in} = 2.538 \times 90.0 \approx 228.4\,\mathrm{mW}$，$\eta = 75.1/228.4 \approx 0.33$。

1.2.1 · 阈值电压外推与波长

错法 把某一工作点电压直接代入波长公式；或求阈值电压时直接取最小电流对应的实测电压，不做 U – I 拟合外推。

机理 LED 波长对应能隙电压，即电流趋于零时的阈值电压 U_0，不是导通后的工作压降；工作电压含串联电阻压降，直接代入会把波长算短。阈值须对六组 (I, U) 作直线 $U = a + bI$，外推到 $I \to 0$ 取截距 $a \approx 2.34\,\mathrm{V}$。

正解 由 $\lambda = hc/(eU_0) = 1242/U_0(\mathrm{nm})$，代入 $U_0 \approx 2.34\,\mathrm{V}$ 得 $\lambda \approx 531\,\mathrm{nm}$（端点外推 2.35 V 对应约 530 nm，落在 530 – 534 nm 区间）。

1.2.2 · 角分布线性化

错法 在直角坐标上直接拟合 $L = L_0 \cos^n\theta$ 求指数 n；半强角只报一个单侧角度。

机理 幂律关系要先取对数线性化：$\ln L = \ln L_0 + n \ln\cos\theta$，以 $\ln\cos\theta$ 为横轴、$\ln L$ 为纵轴作最小二乘拟合，斜率才是 n；在线性坐标上曲线无法直接读出幂次。半强角定义 $L = L_0/2$，由 $\cos\theta = (1/2)^{1/n}$ 解得一个绝对值，对称轴两侧各有一个，应写成 ±51°。

正解 拟合斜率 $n \approx 1.5$；代入 $\cos\theta = (1/2)^{1/1.5}$ 得 $\theta \approx \pm 50.9°$，保留二位有效数字 ±51°。

1.3.3 · Arrhenius 拟合与热阻

错法 Arrhenius 图横轴直接用结温 T_j，或把拟合斜率符号取反；算热阻时分母直接用电功率 UI。

机理 Arrhenius 关系 $\tau = \tau_0 e^{E_a/(k_B T_j)}$，线性化为 $\ln\tau = \ln\tau_0 + (E_a/k_B)(1/T_j)$，横轴是 $1/T_j$——必须先由 $T_j = T_0 + (U - U_0')/\alpha$ 算出各组结温再取倒数；斜率 E_a/k_B 为正。热阻定义 $R_\theta = (T_j - T_X)/P_H$，发热功率只占电功率的 82%，$P_H = 0.82UI$，直接用 UI 会把热阻算小。

正解 五组数据拟合斜率约 8820 K，$E_a = k_B \times 8820 \approx 7.3 \times 10^{-20}\,\mathrm{J}$；$P_H \approx 0.747\,\mathrm{W}$，$R_\theta = (367.4 - 345.6)/0.747 \approx 29.2\,\mathrm{K/W}$。

2.2.2 · 光杠杆放大倍率

错法　光杠杆放大倍率写成 $b/(2D)$，把标尺像移直接当作样品台阶；或认为把标尺距离 D 从 2 m 增至 20 m，最小可测位移就降为十分之一、可分辨单原子层。

机理　光杠杆反射像移 Δn 与样品台阶 ΔL 的关系为 $\Delta L = (b/2D)\Delta n$，放大倍率是 $2D/b$，像移必须除以倍率才还原成样品位移。D 增大时光杠杆倍率确实提高，但人眼分辨的是望远镜中的像，D 增大同时像变小，受望远镜放大率与人眼分辨极限共同限制，不能简单按 $1/D$ 折算。

正解　代入 $b = 50\,\mathrm{mm}$、$D = 2000\,\mathrm{mm}$、$\Delta n = 0.05\,\mathrm{mm}$，得 $\Delta L_0 \approx 0.625\,\mu\mathrm{m}$；单层石墨烯约 0.34 nm，远小于该分辨极限，答案为否。

2.4.2 · 满填充简并度与霍尔拟合

错法　算莫尔满填充载流子数时只计自旋二重简并，每胞填 2 个；霍尔拟合时把 R_{xy} 直接对 V_g 作图求斜率。

机理　石墨烯有自旋 2 重、谷 2 重简并，满填充时每个莫尔原胞提供 $2 \times 2 = 4$ 个电子，漏掉谷简并会使满填充面密度减半。霍尔关系 $R_{xy} = 1/(neB)$，而 $n \propto V_g$，故 $R_{xy} = K/V_g$，必须以 $1/V_g$ 为横轴、R_{xy} 为纵轴，斜率才是 K；直接对 V_g 作图是双曲线，斜率无意义。

正解　每胞 4 个电子，满填充 $n_s = 4/A_{cell} \approx 9.3 \times 10^{16}\,\mathrm{m}^{-2}$；霍尔数据取倒数配对后拟合得 $K \approx 1.55 \times 10^{3}\,\Omega \cdot \mathrm{V}$。