第42届全国中学生物理竞赛决赛实验试题

物 理 竞 赛 实 验 试 题

共 2 道题，6 页，总分 80 分

考 生 须 知

1. 本试题共 2 道题，6 页，总分为 80 分。
2. 如遇试题印刷不清楚的情况，请务必及时向监考老师提出。
3. 解答一定要写在答题纸上指定区域，写在其它地方的解答一律不给分。

一、 试题一　发光二极管的特性（40 分）

发光二极管（LED）是一种常用的固态照明器件。大功率 LED 器件的结构如题图 1 所示，散热结构是提升其性能与可靠性的关键因素。LED 芯片产生的热量经热沉传导至散热基板，最终与外界环境实现热交换。LED 芯片的结温是决定其性能和寿命的重要参数，本实验将探究 LED 器件的发光及温度特性。

1.1.1. （2 分）

在高功率 LED 器件散热结构中，优先选择具有高导热系数和低热膨胀系数的材料。题表中最优的散热材料为（　　）。

A. 铝　　**B.** 铜

C. 铁

图待补

电极、芯片、透镜、热沉、绝缘层、散热基板、测

图 1：LED 器件结构示意图

材料名称	导热系数（W/m · K）	热膨胀系数（10^{-6} /K）
铝	237	23.2
铜	400	16.5
铁	80	11.8

1.1.2. （6 分）

在正向偏压下，LED 器件的光功率 P_L 随电流 I 的增大而增加，其变化如题表所示，据此计算该 LED 的 P_L 随 I 的平均变化率为 _____ mW/mA（保留二位有效数字）。当 LED 的 I 为 90.0 mA、电压 U 为 2.538 V 时，其电光转换效率为 _____（保留二位有效数字）。

I/mA	20.0	40.0	60.0	80.0	100.0	120.0
P_L/mW	14.9	33.8	51.2	67.4	82.7	97.8

1.2.1. （6 分）

当电压超过阈值电压 U_0 时，电流迅速增大，LED 器件开始发光。假设发光波长 λ 满足：$\lambda=hc/(eU_D)$，式中普朗克常数 $h=4.14\times10^{-15}$ eV\cdot s，光速 $c=3\times10^{8}$ m/s。某型号 LED 器件的电流随电压变化如题表所示，根据表中数据计算该 LED 器件的 λ 为 _____ nm。

U/V	2.533	2.543	2.558	2.570	2.585	2.595
I/mA	75.0	80.0	85.0	90.0	95.0	100.0

1.2.2. （6 分）

通常 LED 器件的辐射场呈轴对称型，远场观察下 LED 发光器件近似成点光源，光强分布符合：$L=L_0\cos^n\theta$，L_0 为轴向方向光强，θ 为光线方向与轴向的夹角（图 1），n 为常数。LED 器件的光强 L 随 θ 分布见题表所示。利用最小二乘法线性拟合计算 n 等于 _____（保留二位有效数字）。当发光强度下降到轴向光强一半时，对应的角度 θ 为 _____ 度（保留二位有效数字）。

θ/°	15.0	30.3	40.4	51.3	60.8	69.4
L(a.u.)	93.2	76.0	62.0	47.3	31.0	20.4

1.3. 用电流源驱动 LED 器件，用电压表测量 pn 结两端电压。随着驱动功率增加，LED 器件的 pn 结温度升高，从而降低发光效率和减小寿命。利用题图所示的实验方法，对 LED 器件发光的温度特性进行研究，pn 结温度记为 T_j。LED 器件放置在加热台上，利用温度计测量加热台的温度，记为 T_x。用积分球测量 LED 器件的发光亮度。实验上分别用脉冲电流和连续电流驱动：在特定脉冲模式下，高电平时产生的热量在低电平期间通过基板与外界进行热量交换，此时 LED 器件产生的自热可以忽略，T_j 与 T_x 近似相等；在连续模式下，由于 LED 器件产生显著自热，此时 T_j 高于 T_x。



(a) 驱动电源、V、LED、积分球；(b) t_1、t_0、I_0 待补

图 1.3：(a) 实验电路图　(b) 脉冲驱动模式示意图

1.3.1. （2 分）

室温下，采用图 1.3（b）所示的脉冲驱动，脉宽 $t_1=10\,\mu$s，LED 器件正常工作。在以下提供的三个脉冲电源的周期 t_0 中，能使 T_j 更接近 T_x 的 t_0 最优选择为（　　）。

A. 10.0 ms　　**B.** 1.0 ms

C. 0.5 ms

1.3.2. （4 分）

在一定电流和温度范围内，pn 结的电阻与结温近似呈线性关系。pn 结的电压与结温满足以下关系：

$$T_j=\frac{U-U_0}{\alpha}+T_0$$

式中 U_0 和 T_0 分别为初始时的电压和结温，α 为电压温度系数。本题至题 1.3.5 采用相同的 LED 器件，且初始温度均为 299.0 K。在脉冲驱动模式下，电流幅值固定为 300.0 mA 时，周期采用 1.3.1 题中的最优选择。利用加热台对 LED 器件进行加热，不同加热台温度 T_x 下 pn 结的电压见题表所示。利用最小二乘法计算 pn 结的电压温度系数 α 等于 _____ V/K（保留三位有效数字）。

T_x/K	299.0	313.0	335.0	356.0	375.0	392.0
U/V	3.370	3.301	3.193	3.094	3.000	2.920

1.3.3. （7 分）

LED 器件在高温环境下使用会加速老化，从而降低其光电性能。LED 器件的寿命 τ 与结温 T_j 满足以下关系：

$$\tau=A_0\exp\left(\frac{E_a}{kT_j}\right)$$

式中 E_a 为激活能，k 是玻尔兹曼常数（1.38×10^{-23} J/K），A_0 为常数。在连续模式下，LED 器件的电流设为 300.0 mA，利用加热台对 LED 器件进行加热，不同加热台温度 T_x 下 LED 器件的电压及寿命变化见题表所示。利用最小二乘法线性拟合计算激活能 E_a 等于 _____ J（保留三位有效数字）。当 LED 器件的电压测得为 2.963 V 时，预测 LED 器件的寿命 τ 为 _____ h。

T_x/K	308.0	323.0	338.0	353.0	368.0
U/V	3.038	3.030	3.017	2.977	2.948
τ/h	10400	9400	8800	6700	5000

1.3.4. （2 分）

在长期使用过程中，LED 器件的发光亮度会逐渐衰减，以下哪些措施可以降低 LED 的光衰（　　）。

A. 降低工作电流　　**B.** 降低环境温度

C. 降低散热材料导热性

1.3.5. （5 分）

通常 LED 器件的热阻 $R_{\theta(j-x)}$ 定义为导热介质两端的温度差与热耗散功率 P_H 的比值：

$$R_{\theta(j-x)}=\frac{T_j-T_x}{P_H}$$

在连续模式下，当电流设为 300.0 mA 时，测量 LED 器件的电压为 3.038 V，已知 18% 电能用于发光，其余能量为热耗散。用图 1 所示的温度传感器测量散热基板温度 T_x 为 345.6 K，则 LED 器件的热阻 $R_{\theta(j-x)}$ 为 _____ K/W。

二、 试题二　石墨烯器件的性质测量（40 分）

选择题中有多选题，多选少选不得分；本试题最终计算结果均保留三位有效数字。

石墨烯是由单层碳原子以 sp^2 杂化方式排列成的六角蜂窝状二维晶体，具有许多独特且优异的物理性质。当两个单层石墨烯以微小角度 θ 堆叠时，形成转角双层石墨烯，其晶格周期性叠加形成更大的“波纹”图案（类似两层纱窗叠加后的明暗条纹），也称摩尔晶格，如题图所示。其周期性长度称为摩尔晶格波长 λ，计算公式为：$\lambda=a/[2\sin(\theta/2)]$，其中石墨烯晶格常数 a=0.246 nm。

2.1. （2 分）

石墨是层状结构，由碳六元环组成的二维蜂窝状平面堆叠而成，层间通过范德华力结合。两位来自英国曼彻斯特大学的科学家因在二维材料石墨烯方面的开创性实验而获得 2010 年诺贝尔物理学奖。他们的贡献之一是用极其简单的方法：（　　）获得石墨烯。

A. 机械剥离法（又称胶带法）　　**B.** 液相剥离法

C. 氧化还原法　　**D.** 化学气相沉积法

图待补

θ、λ、60°、摩尔晶格单元待补

图 1：转角双层石墨烯摩尔晶格示意图

2.2.1. （3 分）

实验中可用光杠杆法对微小位移量进行放大测量，例如杨氏模量测量实验，其原理如题图所示。如人眼从望远镜中看到的标尺像如图所示，实际标尺是下列哪个？（　　）

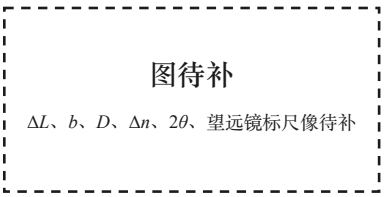

图 2.2.1：光杠杆法测量微小位移量示意图

A. 标尺镜像选项 A　**B.** 标尺镜像选项 B　**C.** 标尺镜像选项 C　**D.** 标尺镜像选项 D

2.2.2. （4 分）

根据图 2.2.1 中的公式，如果 $b=5.00\,\mathrm{cm}$，$D=2.00\,\mathrm{m}$，使用 20 倍望远镜，人眼最小可分辨的 Δn 为 1 mm，计算可测量的最小位移量 ΔL_0 等于 _____ μm。在常规光杠杆法测杨氏模量实验中，如果距离 D 从 2 m 增加到 20 m，这是否意味着可测量的最小位移量为原来的十分之一？（　　）

A. 是　　**B.** 否

2.2.3. （3 分）

对于纳米量级厚度的薄膜，可以用原子力显微镜（AFM）进行测量，AFM 也是基于光杠杆原理进行测量，题图为 AFM 测量不同层数石墨烯薄膜厚度的实验结果，计算单层石墨烯的厚度约为（　　）。



图 2.2.3：AFM 测量不同层数石墨烯薄膜厚度

A. 0.34 nm　**B.** 0.68 nm　**C.** 0.89 nm　**D.** 0.21 nm

2.3.1. （4 分）

石墨烯的电输运测试电路如题图所示，石墨电极（栅极）与石墨烯构成一个电容器。极板间填充的六方氮化硼为介电材料，厚度 $d=30.0\,\mathrm{nm}$，相对介电常数 $\varepsilon=3.60$，真空介电常数 $\varepsilon_0=8.85\times10^{-12}\,\mathrm{F/m}$，电子电量 $e=1.60\times10^{-19}\,\mathrm{C}$。改变栅极电压（栅压）$V_g$，可以改变载流子浓度进而调控费米面。当 $V_g=10.0\,\mathrm{V}$ 时，石墨烯上单位面积的电子浓度是 _____ $\mathrm{m^{-2}}$。



图 2.3.1：电输运测试电路侧视图（上方六方氮化硼为保护层）

2.3.2. （3 分）

已知 $V_g=12.0\,\mathrm{V}$ 是该器件可加载的最大栅压，则六方氮化硼的击穿场强为 _____ V/m；如果希望将上题中石墨烯上单位面积的电子浓度再增加一倍，可采用如下哪种方法：（　　）。

A. 增加底部栅压　　**B.** 减小介电材料的厚度

C. 改变栅压正负　　**D.** 器件顶部再增加一个对称栅极，实现栅压调控

2.3.3. （2 分）

单层石墨烯中电子与空穴浓度相等（净电荷为零）的平衡状态，对应费米面位于狄拉克点。如题图所示。当栅压 $V_g=0$ 时，石墨烯处于电中性点；此时若施加一个正电压（栅压 $V_g>0$），以下说法正确的是（　　）。

A. 电子浓度增加，正栅压吸引电子进入石墨烯

B. 电子浓度减少，正栅压吸引电子进入石墨烯

C. 空穴浓度增加，正栅压吸引电子进入石墨烯

图待补

实测曲线待补，不臆造峰位与数值

图 2.3.3：单层石墨烯的电阻率随栅压变化曲线

2.4.1. （2 分）

对于转角双层石墨烯器件，如果转角 $\theta=2.00°$，对应的摩尔晶格波长是 _____ nm。若每个摩尔晶格填充 1 个电子，则对应的单位面积载流子浓度为 _____ m^{-2}。

2.4.2. （3 分）

石墨烯中每个摩尔晶格单元中电子有 2 种自旋（↑、↓）和 2 种谷（K、K′），则每个摩尔晶格单元最多容纳 _____ 个电子（对应满填充状态），$\theta=2.00°$ 时对应的单位面积载流子浓度为 _____ m^{-2}。

2.4.3. （6 分）

已知 $V_g=0\,V$ 系统处于电中性点，当 $V_g=10.0\,V$ 时转角双层石墨烯的电阻急剧增大（对应满填充状态），介电层厚度 $d=30.0\,nm$，相对介电常数 $\varepsilon=3.60$，求转角 θ 等于 _____ 度。

2.5.1. （3 分）

当介电材料厚度未知时，利用霍尔效应也可以获得材料载流子浓度，进而求得转角 θ，装置如题图所示。实验上在磁场（垂直转角双层石墨烯）$B=0.500\,T$ 时，测得不同栅压下霍尔电阻 $R_{xy}=K/V_g$，如题表所示。利用最小二乘法线性拟合计算系数 K 等于 _____ Ω · V。

图待补

00 T、V_{xx}、V_{xy}、I、V_g、石墨烯/介电材料/石墨电极

图 2.5.1：转角双层石墨烯电输运测试电路

R_{xy}/Ω	-421.75	-853.84	-1406.36	1686.03	793.38	488.60
V_g/V	-3.000	-2.000	-1.000	1.000	2.000	3.000

2.5.2. （5 分）

上题中当 $V_g=46.1\,V$ 时，电阻达到极大值（对应满填充状态），计算器件的转角 θ 等于 _____ 度。