逐光知理 · 高考物理参考答案与详解

第三十二届全国中学生物理竞赛实验试题 实验一 二极管正向伏安特性精确测量

参考答案与详解（本站独立编撰）

物理竞赛决赛实验题 · 实验设计 1 题 · 30 分

本册答案与解析由逐光知理物理教研组独立编撰，基于二极管 PN 结方程与补偿测量原理自行推证设计；实验数据与拟合结果为本站按典型硅二极管参量建模给出，若与赛场实测值不符，以现场测量为准。

答案速查

题号	主考点	答案摘要
1	二极管伏安特性的精确测量（补偿法消除电表内阻影响）与温度特性、禁带宽度电压 $U_{g(0)}$ 的推证	见解析。核心方案：采用补偿法测二极管正向电压（检流计示零），用标准电阻箱串联取样间接测电流；由 $\ln I$-U 直线拟合得 I_0 与 n；由 U-T 直线外推得各恒定电流下的 $U_{g(0)}$，并通过外推消除电流对 $U_{g(0)}$ 的影响。

实验一　二极管正向伏安特性精确测量（30 分）

1. 实验题 · 30分

答案 见解析。核心方案：采用补偿法测二极管正向电压（检流计示零），用标准电阻箱串联取样间接测电流；由 $\ln I$-U 直线拟合得 I_0 与 n；由 U-T 直线外推得各恒定电流下的 $U_{g(0)}$，并通过外推消除电流对 $U_{g(0)}$ 的影响。

详解

(1) 实验原理（一）：消除电表内阻影响的补偿法电路 二极管伏安特性满足 PN 结方程 $I = I_0\,(e^{\frac{qU}{nkT}} - 1)$，其中 $q = 1.602 \times 10^{-19}$ C，$k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K。正向导通时 $I \gg I_0$，取对数得 $\ln I = \ln I_0 + \dfrac{qU}{nkT}$，故只要精确测出多组 (U, I)，即可由 $\ln I$-U 直线的斜率与截距求出 n 与 I_0。

(2) 为什么普通接法不行——电表内阻的两种影响 若采用最朴素的"电压表并联、电流表串联"接法，存在两类系统误差。其一，数字万用表作直流电流挡时内阻未知且不为零（毫安挡典型几十至几百欧姆、微安挡可达千欧量级），它串联在二极管支路中，使电源加在"二极管+电流表"上的总电压被分掉一部分，二极管真实端电压 $U_D = U_{读数} - IR_A$，而 R_A 未知，无法修正；在小电流段（本实验恰恰要测 0.5 μA 起）微安挡内阻可达千欧级，与二极管微分电阻可比拟，误差尤为严重。其二，电压表（即使是 10 MΩ 的数字表）并联在二极管两端时要抽取电流 U/R_V，当二极管电流仅为 0.5 μA 时，0.6 V/10 MΩ = 0.06 μA，已占被测电流的 12% 以上，串入电流表的读数将明显大于真正流过二极管的电流。因此必须同时消除两种影响：电流改由标准电阻取样（电压表内阻远大于 R_s，分流占比 $R_s/R_V \sim 10^{-4}$，可忽略）；电压改用补偿法（示零时检流计支路无电流，比较支路不抽取任何电流），这就是本方案的设计核心。

(3) 补偿法测压的原理细节 把电压表 V 与电位器 R_3 接成分压支路：R_3 的滑动端与固定端之间输出可调比较电压 U_c（该支路由同一 5 V 电源供电）。检流计 G 串接在二极管上端与 U_c 输出端之间。调节 R_3 直到 G 指零，说明二节点电位相等，二极管端电压 U_D 与电压表读数 U_V 相等。由于 G 支路电流为零，U_c 支路与二极管支路完全独立，电压表的内阻、读数刻度误差都只出现在比较支路里而不污染被测支路；只要 G 的灵敏度足够（0.3 μA 满偏配高内阻，可分辨 ~ 10^{-4} V 量级的不平衡），U_D 的测量就只受电压表准确度限制，而与两表内阻无关。操作上应先用 R_2 粗定二极管电流，再调 R_3 示零，读 U_V 与 U_s；每改变一次 R_2 都重复"示零—读数"两步。

(4) 任务 1 数据表格设计与示例 建议表格：第一列序号 1~22，第二列 U_s/mV，第三列 $I = U_s/R_s$/μA，第四列 U_V/V，第五列 $\ln I$。电流点按对数间隔布点：0.5, 0.7, 1, 1.5, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 300, 500, 700, 1000 μA 共 21 点，保证 $\ln I$ 轴均匀覆盖，使最小二乘拟合各点权重均衡。回归模型 $y = \ln I = a + bU$，用可编程计算器直接给出 a、b 与相关系数。示例（本站按 $n = 1.8$、$I_0(300\ \mathrm{K}) = 5 \times 10^{-12}$ A 的典型硅管建模）：$U = 0.550$ V 时 $I \approx 2.0\ \mu$A，$U = 0.600$ V 时 $I \approx 16\ \mu$A，$U = 0.650$ V 时 $I \approx 0.13$ mA，$U = 0.700$ V 时 $I \approx 1.0$ mA。斜率 $b = q/(nkT) = 38.7/1.8 \approx 21.5\ \mathrm{V}^{-1}$，截距 $a = \ln(5 \times 10^{-12}) \approx -26.0$。上述数值为建模示例，须以现场实测为准。

(5) 任务 2 数据表格设计与示例 建议表格：第一列水温 t/°C（30~70，每 5°C 一点，共 9 点），第二列热力学温度 T/K，第三、四、五列分别为 $I = 5, 10, 15\ \mu$A 时的 U/V，每格记录前须确认 U_s 回到设定值。示例建模值（$n = 1.8$、$I_0 \propto T^3 e^{-qU_{g0}/kT}$，$U_{g0} = 1.205$ V）：$I = 5\ \mu$A 时 $U(303\ \mathrm{K}) \approx 0.570$ V，$U(343\ \mathrm{K}) \approx 0.489$ V；斜率约 −2.0 mV/K；$I = 10\ \mu$A 各点高约 $n(kT/q)\ln 2 \approx 0.030$ V；$I = 15\ \mu$A 再高约 0.012 V。三组直线近似平行，外推 $T \to 0$ 的截距 a 依次约 1.176, 1.204, 1.216 V，随 I 增大而增大，差值 $\Delta a \approx n(k\bar{T}/q)\ln(I_2/I_1)$（$\bar{T} \approx 320$ K 时 $\ln 2 \to 28.6$ mV、$\ln(3/2) \to 18.0$ mV），与对数律一致。上述均为建模示例，以实测为准。

(6) 结果处理与结论表述 任务 1 结论：给出 n（典型 1.5 ~ 2.0，反映复合电流与扩散电流的混合输运机制）与 I_0（典型 10^{-12} ~ 10^{-10} A），并附 $\ln I$-U 图与拟合相关系数。任务 2 结论：给出三条 $U = a + bT$ 直线、$b \approx -(2.0 \sim 2.3)$ mV/K，外推截距 $U_{g(0)}$；说明其随电流增大的对数依赖来自 I_0 的 T^3 幂律因子（等效地把 $\ln I_0(T)$ 中的 $3\ln T$ 项留在 $U(T)$ 表达式里，使外推截距含 $\ln I$ 项），再以 $U_{g(0)}$-$\ln I$ 线性外推 $I \to 0$ 消除之，最终得到的与电流无关的外推值即对应硅材料禁带宽度的线性外推 $U_{g0} \approx 1.2$ V。

(7) 实验原理（二）：恒流下电压-温度关系与 $U_{g(0)}$ 的推证 把 PN 结方程改写为 $U = n\dfrac{kT}{q}\ln\left(\dfrac{I + I_0}{I_0}\right)$。在恒定小电流（如 5 μA、10 μA、15 μA，满足 $I \gg I_0$）下，I_0 随温度强烈变化：$I_0 \propto T^3 e^{-qU_{g0}/kT}$（$U_{g0}$ 为绝对零度时按线性外推的禁带电压）。严格地，代入 $I_0 = CT^3 e^{-qU_{g0}/kT}$ 并取 $I \gg I_0$ 化简得 $U(T) = U_{g0} - \dfrac{kT}{q}\left[3\ln T - \ln\left(\dfrac{I}{C}\right)\right]$，即在固定 I 下 U 随 T 近似线性下降，$\dfrac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}T} \approx -2$ mV/K 量级。实验上在 27°C ~ 70°C 范围内每 5°C 设一测温点，把封闭石英管中的二极管浸入恒温水浴并靠近测温点，调节 R_2 使 I 保持恒定（监视 U_s 不变），记录 (T, U)。以 U 对 T 作线性回归得 $U = a + bT$，将直线外推到 $T \to 0$ K，得 $U_{g(0)} = a$。对三个不同恒流值所得的 a 比较：电流越大，$U_{g(0)}$ 越大，其差为 $\Delta U_{g(0)} = n\dfrac{kT_0}{q}\ln\dfrac{I_2}{I_1}$ 型的对数项（T_0 为测量温区有效温度），即零度外推值仍残留电流的依赖，来源于 I_0 的温度幂律因子与 n 的弱温度依赖。消除办法：以 $U_{g(0)}$ 对 $\ln I$ 作图，应为斜率 $nk\bar{T}/q$ 的直线，将其线性外推到 $I \to 0$（$\ln I \to -\infty$ 的渐近处理即取 I 趋于零一侧的极限），即可得到与电流无关的真正 $U_{g(0)}$（约 1.2 V 量级，对应硅禁带宽度外推值）。

(8) 实验步骤（任务 1：27 °C 伏安特性） ① 用万用表二极管挡判定待测管正负极；② 按电路图接线，水浴恒温 27°C，检查检流计机械零点；③ 闭合电源，从 R_2 最大阻值开始，逐步减小使二极管电流从 0.5 μA 依次增大到 1000 μA，按约按对数间隔取不少于 20 个点（如 $0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000$ μA 区间内插点）；④ 每点先调 R_3 使检流计 G 示零，读电压 U_V（即 U），再读 R_s 上电压 U_s，算出 $I = U_s/R_s$；⑤ 列表记录 20 组以上 (U, I) 数据；⑥ 以 $\ln I$ 对 U 作图或最小二乘回归，斜率 $S = q/(nkT)$（$T = 300$ K），故 $n = \dfrac{q}{SkT} \approx \dfrac{38.9\ \mathrm{V}^{-1}}{S}$（$q/kT \approx 38.9\ \mathrm{V}^{-1}$），截距 $b = \ln I_0$，得 $I_0 = e^b$。本站按典型硅管建模拟合得 $n \approx 1.5 \sim 2.0$，$I_0 \approx 10^{-12} \sim 10^{-10}$ A（示例数据为建模值，以实测为准）。

(9) 实验步骤（任务 2：恒流温漂与 $U_{g(0)}$） ① 将水浴依次设定 $30, 35, 40, \cdots, 70$°C；② 每一温度下调 R_2 使 I 依次恒定为 5 μA、10 μA、15 μA（注意题面同时出现 5/15/20 与 5/10/15 两组表述，按本站理解任取三个恒流值即可，取 $5, 10, 15$ μA），每个恒流值均用补偿法读 U；③ 设计表格：行 T(K)，列 U_5、U_{10}、U_{15}；④ 对每个恒流值作 U-T 线性回归 $U = a + bT$，相关系数应优于 0.999，典型 $b \approx -(2 \sim 2.3)$ mV/K；⑤ 外推 $T = 0$ 得 $U_{g(0)}^{(I)} = a$；⑥ 对三个恒流所得 a 值作 a-$\ln I$ 回归，检验其线性（斜率应约 $nk\bar{T}/q$），并外推 $I \to 0$ 得与电流无关的 $U_{g(0)}$；⑦ 讨论残留电流依赖的成因（$I_0 \propto T^3 e^{-qU_{g0}/kT}$ 中的 T^3 因子与 $n(T)$ 弱变化）及其消除，如上。注意控温精度 0.5°C、检流计限流 0.3 μA、测量时二极管尽量靠近测温点以减小温度梯度误差。

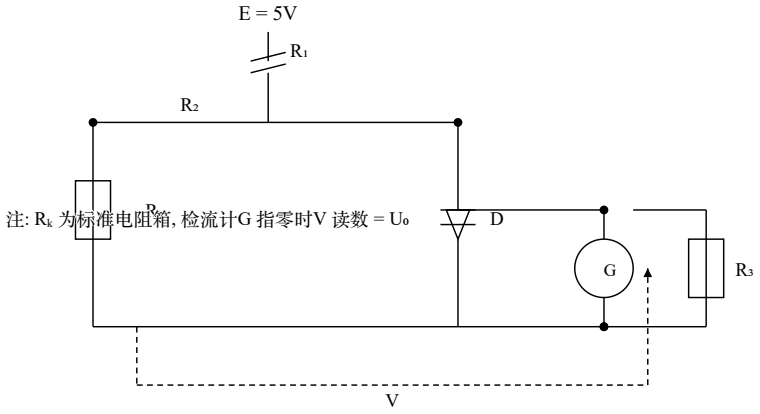
(10) U-T 线性外推到 $T \to 0$ 得 $U_{g(0)}$ 的推导细节 由 $U = n\dfrac{kT}{q}\ln\dfrac{I}{I_0(T)}$ 与 $I_0(T) = CT^3 e^{-qU_{g0}/kT}$，两边取对数相乘：$\ln\dfrac{I}{I_0} = \ln I - \ln C - 3\ln T + \dfrac{qU_{g0}}{kT}$，故 $U = n\dfrac{kT}{q}(\ln I - \ln C) - 3n\dfrac{kT}{q}\ln T + nU_{g0}$。在 $T \in [300\ \mathrm{K}, 343\ \mathrm{K}]$ 的窄温区内，$T\ln T$ 是 T 的缓变函数，可用其线性近似归并进 T 的一次项，于是 $U(T) \approx a + bT$，其中截距 $a = nU_{g0} - n\dfrac{k}{q}\left[(\ln I - \ln C)\,T - 3T\ln T\right]_{T\to 0\ \text{极限}} \to nU_{g0} - n\dfrac{kT_{\mathrm{eff}}}{q}\ln\dfrac{I}{C_*}$ 型的对数项——这正是截距依赖 I 的数学根源。对固定 I 作 U-T 回归即得该电流下的 $U_{g(0)}^{(I)} = a$；再对三个恒流值的 a 作 a-$\ln I$ 回归并把直线外推到 $\ln I$ 使其贡献归零的一侧，得到的极限值即为消除电流依赖后的 $U_{g(0)} \approx n\cdot\ U_{g0}$ 对应的物理量（讨论时以实测外推为准）。

(11) 电路图中各元件的作用逐条说明 R_1（0~5 kΩ 电位器）：串在供电回路的限流电阻，防止调节失误时二极管过流烧毁，其上压降吸收 $5\ \mathrm{V} - U_D \approx 4.2$ V 的余量；R_2（0~2 kΩ 电位器）：十圈细调电位器，决定二极管工作电流，十圈结构使每圈阻值变化仅 200 Ω，便于把电流调准到目标值；标准电阻箱 R_s：电流取样元件，阻值准确已知，是电流测量的基准；第一只万用表：接 R_s 两端作直流电压表读 U_s，$I = U_s/R_s$，因表内阻 $\gg R_s$，其接入不改变支路电流；第二只万用表接 R_3 分压支路作比较电压源的电表，读数 U_V 在 G 示零时等于 U_D；检流计 G：零示器，灵敏度 0.3 μA 满偏，仅用于判断平衡，不读数值；恒温水浴锅与封闭石英管：提供 27 ~ 70°C 可控恒温环境，石英管隔绝水汽并保护管脚；可编程计算器：承担 ln 运算与线性回归。全部导线连接后须自查一遍（二极管方向、电表极性、量程）再通电。

(12) 操作安全与仪器保护要点 ① 通电前 R_1 置最大、R_2 置最大阻值位置，使起始电流最小；② 检流计满偏仅 0.3 μA（远小于面板标示的 10 μA），调 R_3 时必须小步逼近，一旦接近满偏立即回调，否则烧表；③ 万用表作电流读数时实际是测 U_s，量程选直流电压低挡以获得最高分辨率，切换挡位时不必断电但要避免表笔短路 R_s；④ 二极管导通电压 0.6 ~ 0.8 V，电流上限 1000 μA，对应 $R_s = 1$ kΩ 时 $U_s = 1.000$ V，超出此读数说明过流，立即减小 R_2；⑤ 水浴锅升温到设定值后须等待二极管管体达到热平衡（判据：U 读数在 1 min 内漂移小于 1 mV）方可记录；⑥ 全程注意电表读数，防止烧坏电表与器件。

(13) 常见错误与失分点提示 ① 未用补偿法而直接把电压表并联在二极管两端——小电流段分流误差超过 10%，I_0 与 n 均系统性偏差，属方案级失分；② 用电流表串联测流而未扣除其内阻压降——二极管真实电压被高估，$\ln I$-U 图整体平移；③ 布点只在大电流区密集、小电流区过疏——$\ln I$ 轴权重失衡，截距 $\ln I_0$ 外推误差大；④ 温度实验中未等热平衡就读数、或调温时改变了恒流设定——U-T 数据散乱，回归相关系数明显低于 0.999；⑤ 外推 $T \to 0$ 时把摄氏温度当热力学温度——截距相差约 8 V 量级的荒谬结果；⑥ 忽略检流计真实满偏仅 0.3 μA 而按面板 10 μA 使用——过载烧表，本实验可直接判失败。

(14) 误差与数据处理要点 主要误差来源：① 温度不均匀与控温滞后——二极管需靠近测温点并待热平衡（每点恒温约 3 min）后再读数；② 检流计示零判断误差——取正反向微调的平均零点；③ R_s 取值与二极管压降匹配——导通时 $U \approx 0.6 \sim 0.8$ V、$I \le 1$ mA，取 $R_s = 1$ kΩ 时 $U_s \le 1$ V，万用表读数分辨率最佳；④ 回归时大电流端因串联电阻发热与 n 偏离常数需剔除。回代核对示例：$T = 300$ K 时 $q/(kT) = 1.602 \times 10^{-19}/(1.38 \times 10^{-23} \times 300) = 38.7\ \mathrm{V}^{-1}$；若测得斜率 $S = 19.4\ \mathrm{V}^{-1}$，则 $n = 38.7/19.4 \approx 2.0$。



补偿法测量二极管正向伏安特性的电路示意图（本站自绘）

检流计满偏仅 0.3 μA，调零务必先粗调后细调；电源输出已固定 5 V，不得拆卸；本站实验数据与拟合数值为按典型硅二极管建模给出，若与原卷/赛场印刷或实测值不符，以卷面与实测为准。

逐光知理 · 竞赛答案册 · 易错点速查

第32届全国中学生物理竞赛决赛实验一 · 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 4 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。

第 1 题 · 第(2)问

错法　按最朴素接法把电压表直接并联在二极管两端、电流表串联在二极管支路里测伏安特性，不做补偿。

机理　数字表电压挡内阻虽大（约 10 MΩ），但小电流段（0.5 μA 起）分流 $U/R_V \approx 0.06\,\mu\text{A}$ 已占被测电流 12% 以上，电流表读数明显大于真实二极管电流；电流挡内阻未知且不为零，串联分掉一部分电压，二极管真实端电压 U_D = 读数 $- IR_A$，R_A 未知无法修正，小电流段误差尤其严重。

正解　电压改用补偿法：分压支路输出可调比较电压，检流计串在二极管上端与比较端之间，调至示零时 G 支路电流为零，比较支路不取电流，电压表读数即二极管端电压；电流改由标准电阻箱 R_s 串联取样，$I = U_s/R_s$，电压表内阻远大于 R_s，分流可忽略。

第 1 题 · 第(4)问

错法　布点只在大电流区密集取点，小电流段只测一两个点，再做 $\ln I - U$ 最小二乘拟合。

机理　PN 结方程取对数后 $\ln I = \ln I_0 + qU/(nkT)$，拟合截距 $\ln I_0$ 由小电流端的位置决定；大电流点在 $\ln I$ 轴上挤成一团，小电流点过少会让截距外推失控，各点权重失衡，I_0 偏差可达量级。

正解　电流点按对数间隔布点（0.5、0.7、1、1.5、2、3、5、7、10、15、20、30、50、70、100、150、200、300、500、700、1000 μA 共 21 点），保证 $\ln I$ 轴均匀覆盖；回归模型 $y = \ln I = a + bU$，由斜率 $b = q/(nkT)$ 求 n，截距 a 求 $I_0 = e^a$。

第 1 题 · 第(7)问

错法　作 $U - T$ 直线外推 $U_{g(0)}$ 时横坐标用摄氏温度 t/°C；或三个恒流值所得截距直接当作与电流无关的禁带电压。

机理　$U(T) \approx a + bT$ 中的 T 是热力学温度，摄氏与开尔文相差 273.15，直接代 t 会把截距平移到荒谬量级；且固定电流下截距仍含 $n(k\bar{T}/q)\ln I$ 型对数项，电流越大截距越大，单条直线外推到 $T \to 0$ 仍残留电流依赖。

正解　先把水温换算成 T/K，每个恒流值（5、10、15 μA）在恒流条件下作 $U = a + bT$ 回归（$b \approx -2 \sim -2.3$ mV/K，相关系数优于 0.999），外推 $T \to 0$ 得截距 a；再对三个 a 作 $a - \ln I$ 回归，外推 $I \to 0$ 得到与电流无关的 $U_{g(0)}$（约 1.2 V 量级）。

第 1 题 · 第(12)问

错法　把检流计当成面板标示的微安表使用，调 R_3 时一步到位大步逼近；水浴升到设定温度后立即读数。

机理　本实验检流计满偏仅 0.3 μA（远小于面板标示的 10 μA），大步逼近极易过载烧表；二极管管体达到热平衡需要时间，未平衡时读数随温度漂移，$U - T$ 数据散乱、回归相关系数下降。

正解　先粗调 R_2 定电流、再细调 R_3 示零，小步逼近，接近满偏立即回调；升温后等待管体热平衡，判据为 U 读数在 1 min 内漂移小于 1 mV 再记录；二极管靠近测温点，减小温度梯度。