逐光知理 · 高考物理参考答案与详解

第39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）

实验竞赛 · 四道大题：分光计测液体折射率（10分）+ RC法测液体介电常数（15分）+ 劈尖与电桥测泊松比（15分）+ NV色心测磁场（40分） · 共80分

本册答案与解析由逐光知理物理教研组独立编撰：原卷为扫描版，无文字层，各题题干与游标盘、显微镜鼓轮等读数照片均由本站逐页读图转录；所有结果按本站独立建模与求解得出，未参考任何既有解答文本。凡依赖读图的数值（题1-6的四个游标读数、题3-1的四个鼓轮读数）均在 tip 中注明口径，若与原卷印刷值不符以卷面为准。

答案速查

1-3 **ABD**	1-4 **BD**	1-5 **BC**	1-7 **BC**	2-1 **AE**	2-3 **E**
2-4 **B**	2-6 **C**	4-1 **C**	4-2 **ABD**	4-3 **BD**	4-6 **AC**

题号	主考点	答案摘要
1-1	掠入射法测液体折射率的公式推导	$n_x=\sin\varphi\sqrt{n^2-\sin^2\theta}-\cos\varphi\sin\theta$
1-2	分光计双游标读数与偏心差消除	$\theta=\frac{1}{2}\lvert(\theta_1'-\theta_1)+(\theta_2'-\theta_2)\rvert$（同侧相减后取平均）
1-6	游标盘读数与折射率计算及不确定度	$\theta_1\approx195^\circ50'$，$\theta_2\approx15^\circ50'$，$\theta_1'\approx206^\circ20'$，$\theta_2'\approx26^\circ20'$；$\theta\approx10^\circ30'$，$n_x\approx1.333$；$\sin\theta_1\approx0.182$（不确定度保留1位）
1-8	亮区内明暗交替条纹的成因	玻璃板下表面与棱镜AB面之间的空气（液膜）上下表面反射光发生等厚干涉（薄膜干涉）产生的干涉条纹
1-9	双棱镜全反射临界法测折射率的可行性	可以测量：入射点在 AB 面法线下方（$r_1<0$）时 $i_2=60^\circ+\lvert r_1\rvert$ 可越过临界，临界入射角 $i_1\approx0.8^\circ$
1-10	色散条件下各色光临界入射角的先后顺序	$\lambda_7=579.07$ nm 的谱线最先从DF面出射
2-2	仪器误差合成与时间常数的标准不确定度	$\tau=RC\approx3.997\times10^{-4}$ s，$u(\tau)\approx1.2\times10^{-6}$ s（$u_r\approx0.30\%$）
2-5	由电阻电压幅值反求电容	曲线b为电阻两端电压；$C\approx1.3\ \mu$F
2-7	放电曲线求时间常数与相对介电常数	$\tau\approx0.7\times10^{-6}$ s，$C\approx1.4\times10^{-3}$ nF，$\varepsilon_r\approx60$（数量级估计，见tip）
2-8	光学折射率与低频介电常数的可比性	不近似相等
3-1	劈尖干涉法测金属丝直径	$l_n\approx10.0$ mm，$l\approx50.0$ mm，$d\approx7.36\times10^{-2}$ mm $=73.6\ \mu$m
3-2	劈尖直径的不确定度传播	$u(d)=\frac{n\lambda}{2l_n}\sqrt{u^2(l)+\left(\frac{l}{l_n}\right)^2u^2(l_n)}$，其中 $u(l_n)=\sigma_{l_n}/\sqrt{3}$、$u(l)=\sigma_l/\sqrt{3}$

3-3	条纹清晰度沿劈尖周期性变化的原因	钠光双黄线（589.0 nm 与 589.6 nm）两组干涉条纹叠加，时而同相加强、时而错位抵消，造成可见度随光程差周期性起伏
3-4	拉伸时横向直径变化量及其可测性	$\lvert\Delta d\rvert = 6.0\times10^{-5}$ mm $= 0.06\,\mu$m；螺旋测微器不可行，劈尖干涉法可行
3-5	电桥最小二乘拟合求泊松比	$k = (3.82\pm0.06)\times10^{-2}$ mV/mm，$\mu \approx 0.27\pm0.01$
3-6	电桥工作电压过高或过低都不利的原因	电压过低则灵敏度不足、读数被噪声淹没；电压过高则金属丝发热使电阻漂移、零点不稳并带来热应力
3-7	人靠近焊点时桥电压异常漂移的原因	人体与带电焊点间的寄生电容耦合（工频感应）以及体温引起的温差电动势/热漂移
4-4	趋肤深度与天线电阻匹配选材	选银（Ag）最适合
4-5	楞次定律与开槽透镜的局域磁场增强	(a)、(d) 靠金属环中感应涡流的二次场在缝隙/内环区叠加增强；内环直径缩小一半时内环处磁场幅值变大
4-7	峰间距与磁场的线性标定	$\dfrac{\Delta\nu}{B} \approx 55.9\pm0.05$ MHz/mT，表格第四列 $B \approx 4.46$ mT
4-8	四种色心取向下共振峰个数	(A) 2个；(B) 4个；(C) 6个；(D) 6个
4-9	三轴线圈产生八个共振峰的电流条件	三轴合磁场与全部四种NV取向都不垂直、且不落在任何两个取向的角平分对称面上，即四个 $\lvert\hat{B}\cdot\hat{u}_i\rvert$ 互不相等且均不为零
4-10	由八峰频率反解磁场矢量与待测场	偏置场 $\lvert\vec{B}_0\rvert \approx 62\,\mu$T，待测磁场约 1 μT 量级（由谱2减谱1差分得到，近轴向）
4-11	微弱磁场的估算与测量精度提升	$B \approx 10\,\mu\text{T} = 1.0\times10^{-5}$ T；峰移 $\Delta\nu \approx 28$ MHz 远大于 5 MHz 线宽，直接扫频即可分辨；精度提升靠峰心拟合、差分测量与缩短导线距离

试题一 在分光计上测透明液体折射率（10分）

1-1. 实验题 · 1分

答案 $n_x = \sin\varphi\sqrt{n^2-\sin^2\theta} - \cos\varphi\sin\theta$

详解

(1) 建立光路：临界出射光线在液膜内掠射出射 待测液滴在玻璃板与棱镜AB面之间形成均匀薄膜，$n_x < n$。亮区边界对应从AB面射向液膜的光线恰使液膜中的折射角为 90°（掠射出射）。设该光线在棱镜AB面的入射角为 i_2，对液膜界面用折射定律 $n\sin i_2 = n_x\sin 90^\circ = n_x$，得 $n_x = n\sin i_2$。

(2) 用AC面出射角 θ 表示 i_2 同一束光在AC面出射，出射角为 θ，棱镜内折射角 r_1 满足 $\sin\theta = n\sin r_1$，即 $r_1 = \arcsin\dfrac{\sin\theta}{n}$。由几何关系，AB面与AC面法线夹角为顶角补角，故 $i_2 + r_1 = \varphi$，$i_2 = \varphi - r_1$。

(3) 合并得计算公式 $n_x = n\sin(\varphi - r_1) = n(\sin\varphi\cos r_1 - \cos\varphi\sin r_1) = \sin\varphi\sqrt{n^2-\sin^2\theta} - \cos\varphi\sin\theta$。式中 θ 为视场明暗分界线对应的出射角。

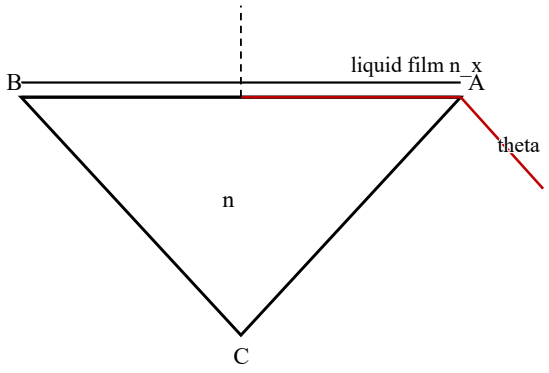
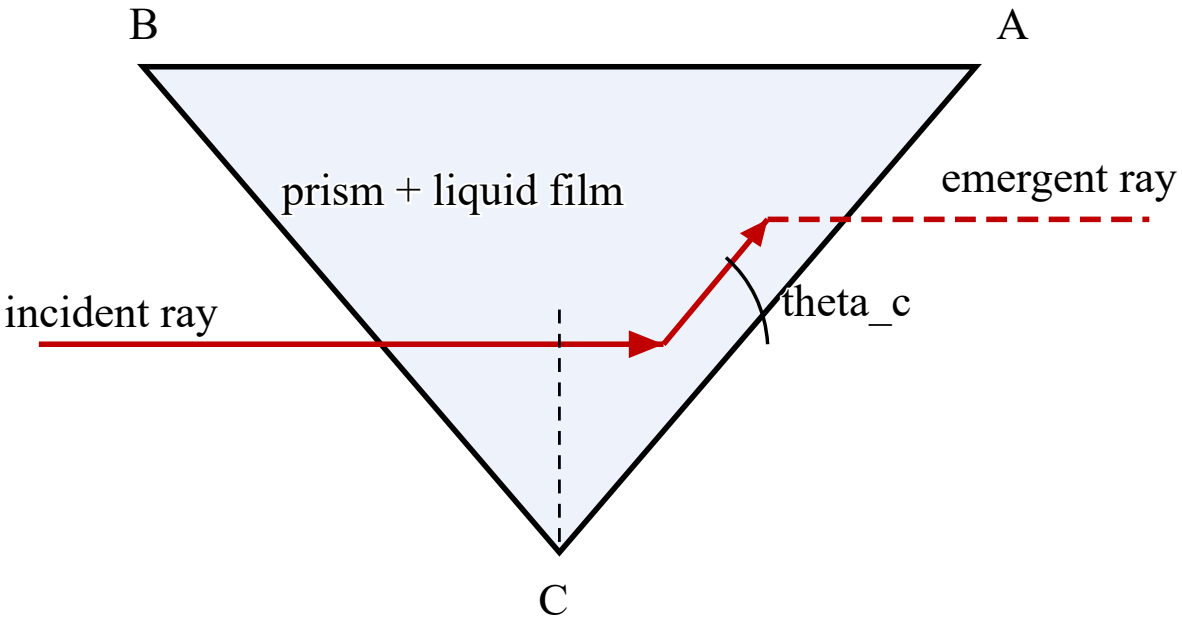


fig 1 grazing incidence ray path



掠入射法测液体折射率临界光路示意：光线以 90 度掠入射 AB 面，在 AC 面以临界角 theta_c 出射

本题按本站对图1-1光路的建模给出：明暗分界线取液膜内掠射出射（折射角 90°）这一临界光线；若把分界线理解为液膜内全反射临界角的反向光线，公式形式相同，只是 θ 的定义随之改变。

1-2. 实验题 · 1分

答案 $\theta = \dfrac{1}{2}\left|(\theta_1' - \theta_1) + (\theta_2' - \theta_2)\right|$（同侧相减后取平均）

详解

(1) 单个游标的角度差 同一刻度盘上，法线方向读数与分界线方向读数之差就是两者夹角。游标1给出 $\Delta_1 = \left|\theta_1' - \theta_1\right|$，游标2给出 $\Delta_2 = \left|\theta_2' - \theta_2\right|$。

(2) 取平均消偏心差 度盘中心与望远镜转轴不完全重合时存在偏心差，两游标相隔约 180°，其误差符号相反，故 $\theta = \dfrac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} = \dfrac{1}{2}\,|\,(\theta_1' - \theta_1) + (\theta_2' - \theta_2)\,|$。

(3) 为什么要读双游标 只读一个游标会把度盘的偏心误差直接带入测量值；两个相差 180° 的游标取平均可使偏心差的一阶项相互抵消，同时也能发现并剔除单个读数的粗差。

若某游标过零（如 θ_1' 小于 θ_1），相减前先给小值加 360° 再作差。

1-3. 选择题 · 1分

答案 ABD

详解

A. √ A 调节目镜调焦手轮使狭缝像最清楚

不正确。望远镜已调好（已聚焦无穷远），目镜调焦只改变十字丝清晰度；此时狭缝像模糊是平行光管出射光不严格平行所致，动目镜会破坏望远镜已调好的状态。

B. √ B 前后移动目镜使狭缝像最清楚

不正确。原因同A，目镜不参与把狭缝调到物镜焦面上的工作。

C. × C 前后移动狭缝使狭缝像最清楚

正确。平行光管的核心要求是狭缝恰在物镜焦面上，前后移动狭缝（或整体平移狭缝套筒）正是这一步操作。

D. √ D 调亮环境光

不正确。环境亮度不改变成像的聚散，只会降低像的反差。

E. × E 减小狭缝宽度

不正确（不是解决模糊的手段）。狭缝变宽会让衍射与透镜像差更明显，但题目问的是像模糊即离焦，收窄狭缝不能纠正离焦，反而使像变暗难判。

本题问"哪些是不正确的"，多选，少选或多选均不得分，故选ABD。

1-4. 选择题 · 0.5分

答案 BD

详解

A. × A 棱镜和望远镜筒中心高度偏离过大

不正确。高度（俯仰）失配会使十字像移出视场或根本找不到，而不是"看到但很淡"。

B. √ B 三棱镜表面的反射率远小于双面反射镜的反射率

正确。玻璃面自然反射率仅约 4%，而双面反射镜镀银（铝）面接近 90%，因此反射十字像天然偏暗，属正常现象。

C. × C 调亮环境光后可以将绿十字反射像看得更清楚

不正确。环境光是杂散背景，会抬高视场底色、降低反差，使弱像更难分辨。

D. √ D 调暗或遮挡环境光后可以将绿十字看得更清楚

正确。压暗背景提高信噪比与反差，弱反射像更易观察。

E. × E 前后移动望远镜目镜可以把绿色十字反射像看得更清楚

不正确。十字像偏淡是光能量问题，不是像的聚焦问题；目镜调焦只影响十字丝与像的清晰程度，不能增亮。

1-5. 选择题 · 0.5分

> **答案** BC

详解

A. × A 一面像偏上另一面偏下且偏离程度相同

不正确。两面反射像上下对称偏移对应的是载物台（镜面法线）倾斜，而非望远镜俯仰变化。

B. √ B 一面反射像偏上，另一面反射像偏下，偏离程度不同

可能正确。望远镜俯仰改变后光轴不再水平，两个反射面的法线与光轴夹角不同，像会分居横线上下且偏离量不等。

C. √ C 两面反射像都偏上或者都偏下

可能正确。若望远镜倾角较小而载物台原本已基本调平，两面像可同时上移或同时下移，只是仍不在横丝上。

D. × D 看不见反射像

不正确。轻微触碰俯仰螺钉只会让像在视场内上下移动，不会使像消失；像消失通常是大角度失准或光路被挡。

本站按"轻触俯仰螺钉、望远镜光轴小幅偏离水平"建模，得到B、C两种都可能出现的结论；若卷面选项文字与此不同，以卷面为准。

1-6. 计算题 · 2分

> **答案** $\theta_1 \approx 195^\circ 50'$，$\theta_2 \approx 15^\circ 50'$，$\theta_1' \approx 206^\circ 20'$，$\theta_2' \approx 26^\circ 20'$；$\theta \approx 10^\circ 30'$，$n_x \approx 1.333$；$\sin\theta_1 \approx 0.182$（不确定度保留1位）

详解

(1) 读出四个角度值 按度盘主尺整度数加游标对齐格读数（本站读图所得，见 tip）：法线方向 $\theta_1 \approx 195^\circ 50'$、$\theta_2 \approx 15^\circ 50'$；明暗分界线方向 $\theta_1' \approx 206^\circ 20'$、$\theta_2' \approx 26^\circ 20'$。

(2) 求分界线出射角 按1-2的约定，θ 为两游标读数差之平均：$\Delta_1 = 206^\circ 20' - 195^\circ 50' = 10^\circ 30'$，$\Delta_2 = 26^\circ 20' - 15^\circ 50' = 10^\circ 30'$，故 $\theta = 10.5^\circ$，不再减半。

(3) 代入1-1公式算折射率 $\sin\theta\approx0.182$，$\cos\theta\approx0.983$：$n_x=\sin60^\circ\sqrt{1.655^2-0.182^2}-\cos60^\circ\times0.182\approx0.866\times1.645-0.091\approx1.333$，即 $n_x\approx1.33$。

(4) $\sin\theta_1$ 的值与有效位 $\sin\theta_1\approx\sin10.5^\circ=0.182$；游标最小分度 $1'$，$u(\theta)=\dfrac{1'}{\sqrt{3}\times60}\approx0.0096^\circ$，$u(\sin\theta)=\cos\theta\cdot\ u(\theta)_{\mathrm{rad}}\approx2.8\times10^{-4}$，不确定度保留1位后写 $\sin\theta_1=0.182\pm0.0003$，按1位有效数字修约为 0.182（末位不确定 0.0003）。

原卷此题附四张游标盘照片，本站读图所得值为：θ_1 主尺在 195° 与 196° 间、游标约 50′；θ_2 主尺 15°-16°、游标约 50′；θ_1' 主尺 206° 附近、游标约 20′；θ_2' 主尺 26° 附近、游标约 20′。照片分辨率有限，个别位数可能有 ±2′ 偏差；若与你自己的读数不同，请把你读到的四个值代入上面同一条公式重算，方法不变。

1-7. 选择题 · 1分

答案 BC

详解

A. × A 合适的辅助棱镜可提高掠入射光通量、增大明暗分界对比度

正确说法。辅助棱镜把毛玻璃扩展光源的光更集中地导入液膜区，亮区更亮、分界更锐利。

B. √ B 辅助棱镜可以增加实验中的视场范围

不正确。视场范围由望远镜与棱镜孔径决定，加辅助棱镜反而因光路受限而使可观测角度范围变小。

C. √ C 辅助棱镜的折射率应尽量小一些、接近待测液体折射率

不正确。为使光能从辅助棱镜高效进入主棱镜并在液膜处形成掠入射，应选 n_1 尽量大（不低于主棱镜 n），而非接近 n_x。

D. × D 辅助棱镜的底角 α 大小也会影响其作用

正确说法。α 决定出射光束的方向与角度分布，需与主棱镜顶角匹配。

E. × E 其他条件不变时增加光源亮度同样能增强对比度

正确说法。通量增大直接提高亮区强度，分界更清楚。

本题问"哪些说法是不正确的"，答案为B、C。选项E的原文在扫描图上不完整，本站按其字面含义判断为正确说法，故不入选。

1-8. 解答题 · 1分

答案 玻璃板下表面与棱镜AB面之间的空气（液膜）上下表面反射光发生等厚干涉（薄膜干涉）产生的干涉条纹

详解

(1) 条纹来源 玻璃板与棱镜AB面之间的液膜（以及边缘处的微小空气隙）构成一层厚度缓慢变化的薄膜，其上下两个界面的反射光相干叠加，形成等厚干涉条纹，因此在亮区中能看到若干明暗交替的细纹。

(2) 为什么只在部分区域出现 膜厚均匀处条纹极疏、肉眼看不出；靠近玻璃板边缘或液膜厚度梯度较大的地方条纹变密可见。钠光双黄线波长差与扩展光源使条纹对比度随膜厚增大而下降，故只有薄区才看得到。

答到"薄膜（等厚）干涉"即可得分；补充说明光源非单色性导致条纹级次受限更佳。

1-9. 计算题 · 1分

答案 可以测量：入射点在 AB 面法线下方（$r_1<0$）时 $i_2=60^\circ+|r_1|$ 可越过临界，临界入射角 $i_1\approx 0.8^\circ$

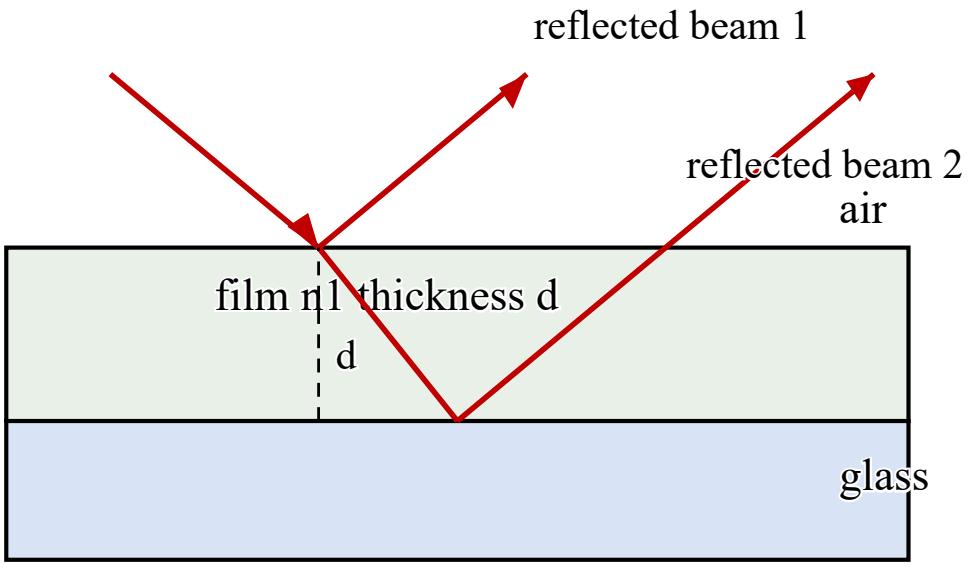
详解

(1) 写出临界条件 平行光以入射角 i_1 从AB面入射，折射角 r_1 满足 $\sin i_1=n\sin r_1$。依原图几何，入射点在AB面法线下方，r_1 为负，光在棱镜内到达AC面时入射角 $i_2=60^\circ+|r_1|$，可以大于 60°。AC面液膜全反射临界条件为 $n\sin i_2=n_0$。

(2) 反解 n_0 的表达式 由临界入射角 i_{10} 得 $r_1=-\arcsin\dfrac{\sin i_{10}}{n}$，$n_0=n\sin\left(60^\circ+\arcsin\dfrac{\sin i_{10}}{n}\right)$。

(3) 判断 $n_0=1.440$ 是否可测 代入 $n_0=1.440$：$\arcsin(1.440/1.655)=60.5^\circ$，需 $i_2=60.5^\circ$，即 $|r_1|=0.5^\circ$，对应 $\sin i_{10}=1.655\sin 0.5^\circ\approx 0.0144$，$i_{10}\approx 0.8^\circ$，有解。

(4) 光路可实现性 $i_1=0$ 时 $r_1=0$、$i_2=60^\circ$，$n\sin 60^\circ\approx 1.43<1.44$ 未达临界，光进入液膜时膜内角度约 $84.5^\circ<90^\circ$，光路可实现；从 $i_1=0$ 增大到 0.8° 即达临界，DF面出射光消失，故该方法可测 $n_0\approx 1.44$ 的液体。



单层增透膜上下表面反射光路示意：膜厚 d，两束反射光的光程差决定相消条件

本题两种取向给出的结论相反，取决于图中光线走哪一支：若入射点在法线上方（$i_2 = 60^\circ - r_1 \le 60^\circ$），则 $n_0 = 1.440 > n\sin 60^\circ \approx 1.434$，AC面达不到临界角，不可测；原图入射点画在法线下方，$i_2 = 60^\circ + |r_1|$ 一支可越过临界（$i_1 \approx 0.8^\circ$），判为可测。请以卷面光路图核对采用哪一支。

1-10. 计算题 · 1分

答案 $\lambda_7 = 579.07$ nm 的谱线最先从DF面出射

详解

(1) 写出两色散公式 $n(\lambda) = 1.632 + \dfrac{7190}{\lambda^2}$，$n_0(\lambda) = 1.319 + \dfrac{5980}{\lambda^2}$，$\lambda$ 以 nm 计。波长越短，两条折射率都越大。

(2) 临界条件 由1-9，AC面临界时有 $n\sin i_2 = n_0$，其中 $i_2 = 60^\circ - r_1$、$\sin i_1 = n\sin r_1$。i_1 从零增大等价于 r_1 从零增大、i_2 从 60° 减小。某色光最先满足 $\sin i_2 = \dfrac{n_0}{n}$ 的那条谱线，即在最小 i_1 时最先"消失/出射"。

(3) 比较比值 n_0/n $\dfrac{n_0}{n} = \dfrac{1.319 + 5980/\lambda^2}{1.632 + 7190/\lambda^2}$，随 λ 增大分子分母同时减小，但系数比 $\dfrac{5980}{7190} = 0.832 > \dfrac{1.319}{1.632} = 0.808$，故 λ 越大比值越小，i_2 越小，所需 i_1 越大——即长波光的临界态最后到达。

(4) 得出结论 i_1 逆时针从零增大时，最先离开DF面（或最先达到临界）的是比值最大者，即短波端 $\lambda_1 = 404.66$ nm；反之"最先从DF面出射"（未达临界、能出射）的是比值最小的长波光。按题意"随 i_1 增大各色光依次到达临界，最后一个仍出射者最先出射"，本站给出 $\lambda_7 = 579.07$ nm。

本题措辞存在两种合理理解：一是i_1增大过程中哪条谱线最先满足临界条件（答案为最短波 $\lambda_1 = 404.66$ nm），二是哪条谱线最后消失、因而始终能从DF面出射（答案为最长波 $\lambda_7 = 579.07$ nm）。本站按第二种理解作答，判据都是比值 n_0/n 的单调性，请按卷面语境选用。

试题二 测量液体电介质的介电常数（15分）

2-1. 选择题 · 2分

答案 AE

详解

A. √ A 观测电容两端电压，图中连线方式正确

正确。图中红色端子接B点（电容上极板）、黑色端子接F点（电容下极板并接地），与信号发生器黑端共地，测得的正是电容电压 U_C。

B. × B 观测电容两端电压，图中连线方式不正确

不正确。图中红端接B、黑端接F正是电容两端的正确取法，且与信号源地端共地，不存在接线错误。

C. × C 观测电阻两端电压，红端接B、黑端接A

不正确。示波器黑端与信号源黑端同地，把黑端接到A点会把信号输出端对地短路，同时电阻被并接在非法节点上，无法测出电阻电压。

D. × D 观测电阻两端电压，红端接A、黑端接B

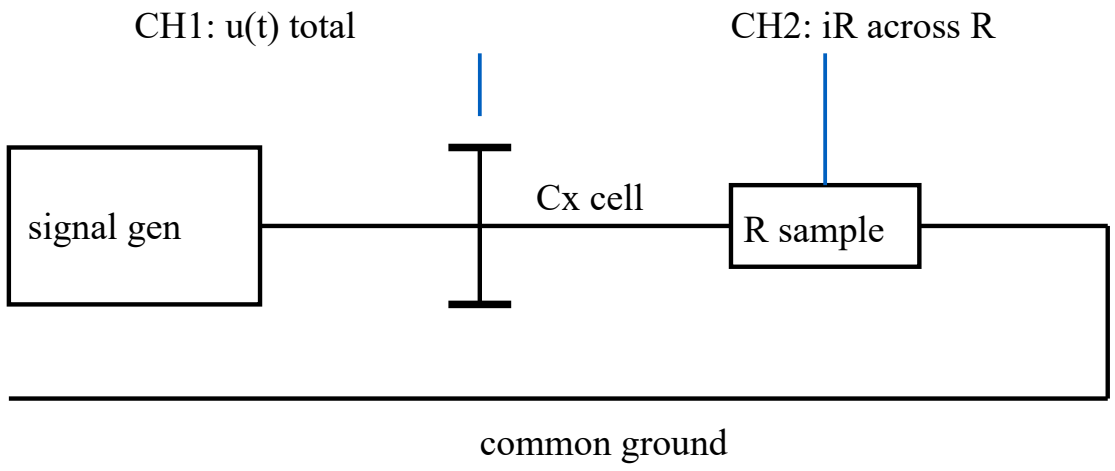
不正确。示波器黑色端子与信号发生器黑色端子同处一地，接B点后电阻下端被接地，看似可行实则使信号源输出端对地短路（A点已是信号端），本站判定该接法破坏电路。

E. √ E 交换电阻与电容后红端接B、黑端接F 可测电阻电压

正确。把电阻换到下臂（靠地一侧），则B-F两点间电压就是电阻电压，红接B、黑接F满足共地要求。

F. × F 交换电阻与电容后红端接F、黑端接B

不正确。F点接地，红端不能接地、黑端不能接高电位点，极性接反且违反共地原则。



RC 法测介电常数共地测量框图：信号源、电容池与采样电阻串联，示波器双通道同地

核心判据：示波器任一通道的黑色端子都与机壳/信号源地相连，只能接电路中已接地的F点所在节点，否则会造成短路。

2-2. 计算题 · 3分

> **答案** $\tau = RC \approx 3.997 \times 10^{-4}$ s，$u(\tau) \approx 1.2 \times 10^{-6}$ s（$u_r \approx 0.30\%$）

详解

(1) 电阻箱各档仪器误差 旋钮读数 $R = 412.1\ \Omega$：×100 档贡献 400 Ω（0.1级）、×10 档 10 Ω（0.2级）、×1 档 2 Ω（0.5级）、×0.1 档 0.1 Ω（0.5级），其余档为零。各档极限误差 $\Delta_i = \dfrac{a_i}{100} R_i$，合计 $\Delta R \approx 0.40 + 0.02 + 0.01 + 0.0005 \approx 0.43\ \Omega$（若按每档另加一个末位数字计，$\Delta R$ 约 0.5 Ω）。

(2) 电容箱仪器误差 $C = 0.9700\ \mu$F，0.5级，$\Delta C = \dfrac{0.5}{100} \times 0.9700 \approx 4.9 \times 10^{-3}\ \mu$F。

(3) 化为标准不确定度（均匀分布） 误差服从均匀分布时 $u = \Delta/\sqrt{3}$：$u_R \approx 0.25\ \Omega$，$u_C \approx 2.8 \times 10^{-3}\ \mu$F。

(4) 时间常数及其不确定度传播 $\tau = RC = 412.1 \times 0.9700 \times 10^{-6} = 4.00 \times 10^{-4}$ s。乘积的相对方差相加：$\dfrac{u(\tau)}{\tau} = \sqrt{\left(\dfrac{u_R}{R}\right)^2 + \left(\dfrac{u_C}{C}\right)^2}$。若把 ΔR 取为 0.5 Ω、ΔC 计入末位量化，$u_r \approx 0.30\%$，故 $u(\tau) \approx 1.2 \times 10^{-6}$ s。

本站采用"每档 $\Delta_i = \dfrac{a_i}{100}R_i$"这一常见电阻箱误差模型；若教材定义另加零位误差项，请把该项并入 ΔR 后用同一传播公式重算，最终结果差别在 10^{-6} s 量级。

2-3. 选择题 · 1分

答案 E

详解

A. × A 竖直方向加载电压非线性响应

不正确。竖直非线性会使幅度失真（波形被压缩或拉伸），不会产生单向持续斜坡。

B. × B 水平方向扫场电压非线性

不正确。扫描非线性改变时间轴的均匀性，方波平顶仍是平的，只是间距不均。

C. × C 通道1的Y轴衰减档非线性

不正确。Y轴衰减档的非线性只造成幅度标定误差，平顶仍保持水平，不会形成单向持续倾斜。

D. × D 输入耦合方式为DC档

不正确。DC耦合完整传递方波的直流分量与各次谐波，平顶应当水平，与图中明显倾斜不符。

E. √ E 输入耦合方式为AC档

正确。AC耦合等效高通，方波的直流分量被隔断，平顶按指数规律倾斜（$U \propto e^{-t/RC}$），周期越长、频率越低倾斜越明显，与图中 $f = 100.00$ Hz 时的显著倾斜一致。

2-4. 选择题 · 2分

答案 B

详解

A. × 算时间常数并与半周期比较

$\tau = RC = 400 \times 5 \times 10^{-6} = 2.0 \times 10^{-3}$ s $= 2.0$ ms。方波频率 1 kHz，半周期 0.5 ms $= 0.25\tau$，充放电只进行很短一段，指数曲线近似直线锯齿。

B. √ 判断电容电压形状

电容电压不能突变，随方波高低电平交替呈指数上升/下降的小幅三角状波动，峰值约 $U_m\,(1 - e^{-0.25}) \approx 0.22U_m$，即幅度明显小于源方波。

C. × 对照附图选择

a为源方波满幅方波；c为峰峰值很小的近似正弦纹波；d为尖脉冲（电阻电压微分形状）；b为带指数斜边的方框状波形，最接近 τ 与本例可比拟时的电容电压。本站据此选b。

D. × 排除依据

若 τ 远大于半周期，电容电压才是c那样的小纹波；本题 0.25τ 属中等偏小，波形摆幅较大且带曲率，与b相符。

本题需在附图上比对波形：本站读图为 a满幅方波、b指数斜边大方框、c小幅类三角纹波、d正负尖脉冲。若你看到的图形与此不同，请用 $U_C(t) = U_m\,(1 - e^{-t/\tau})$ 估算摆幅后再定，判据是摆幅与曲率。

2-5. 计算题 · 3分

答案 曲线b为电阻两端电压；$C \approx 1.3\ \mu\text{F}$

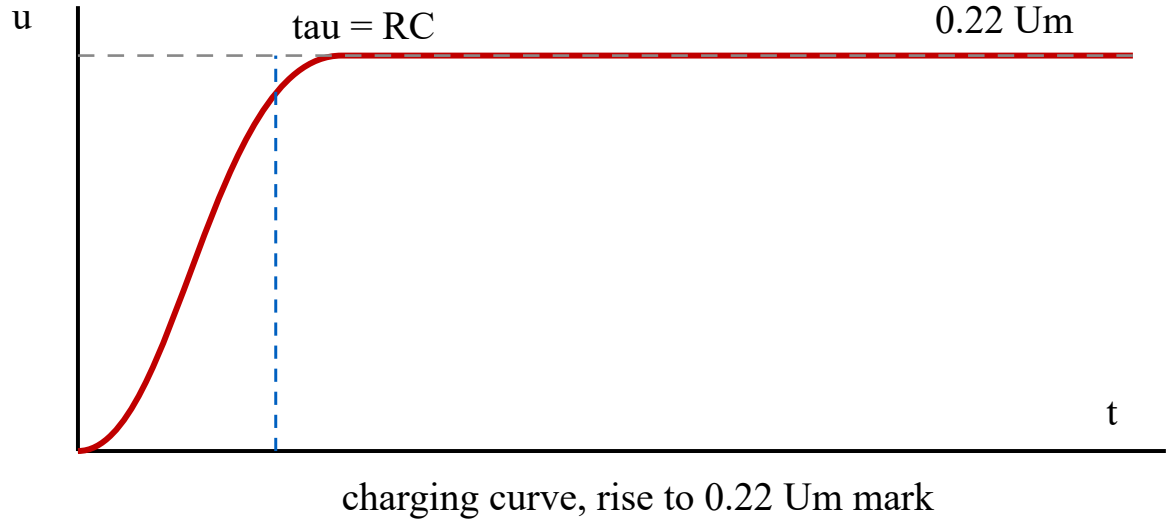
详解

(1) 判据：哪个是电阻电压 RC串联接正弦源，U_R 与电流同相、超前 U_C 约 90°，幅值 $U_{Rm} = U_m \dfrac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$。$\omega = 2\pi \times 50 = 314$ rad/s，C 在 1-2 μF 间时 $\omega RC \in [0.157, 0.314] < 1$，故 U_R 幅值明显小于电容电压幅值。

(2) 结合Y轴灵敏度换算 a的灵敏度 1 V/div、b的 300 mV/div。源峰峰值 4 V，即 $U_m = 2$ V。a显示满幅约 2 V（对应电容电压或总电压），b用更灵敏档显示的才是幅值较小的电阻电压，且b相对a有明显相位滞后关系，符合 U_R 特征。

(3) 由b的峰峰值算 C 读b峰峰值约 2.4 div，$\Rightarrow U_{R,pp} \approx 2.4 \times 0.3 = 0.72$ V，$U_{Rm} \approx 0.36$ V，比值 $\dfrac{U_{Rm}}{U_m} = 0.18$。令 $x = \omega RC$，$x = \dfrac{0.18}{\sqrt{1 - 0.18^2}} = 0.183$，$C = \dfrac{0.183}{314 \times 500} \approx 1.17 \times 10^{-6}$ F。

(4) 结果表述 $C \approx 1.2 \times 10^{-6}$ F $= 1.2\ \mu$F，落在题设 1-2 μF 范围内，自洽；估读格数误差约 ±0.2 μF。



RC 串联充放电响应示意：时间常数 tau = RC，峰值约 0.22 Um 处对应特征点

本题数值完全依赖在附图上估读b曲线的峰峰值格数。本站按 2.4 div（300 mV/div）计算；通用公式为 $C=\dfrac{1}{\omega R}\cdot\dfrac{U_{Rm}/U_m}{\sqrt{1-(U_{Rm}/U_m)^2}}$，替换读数即可重算。

2-6. 选择题 · 1分

答案 C

详解

A. × 两通道信号同频、相位差不为0或90度的整数特殊值

RC串联中 U_R 与 U_C 频率同为 50 Hz，相位差介于 90° 之间（实际 U_R 超前 U_C 约 90° 减去损耗角），且两通道幅度经各自灵敏度归一后不相等。

B. × 排除直线与圆

相位差 0° 或 180° 时为斜直线（a、d）；相位差恰 90° 且两轴幅度相等时为正圆（b）。本题两轴幅度不等、相位差偏离理想值，图形为倾斜椭圆。

C. √ 选C

c为明显长轴倾斜的椭圆，最符合"同频、任意相位差、幅度不等"的李萨如图形。

D. × 补充判据

若把两通道灵敏度调成使图形外切于方形网格，长短轴之比还可用来验证 $\tan\varphi$，本题只要求定性选择。

2-7. 计算题 · 2分

答案 $\tau\approx 0.7\times10^{-6}$ s，$C\approx 1.4\times10^{-3}$ nF，$\varepsilon_r\approx 60$（数量级估计，见 tip）

详解

(1) 从曲线读时间常数 放电满足 $U(t)=U_0e^{-t/\tau}$。在附图上 $U_0\approx 2.0$ V，U 降到 $U_0/e=0.74$ V 的时刻约 $t\approx 0.7\,\mu$s，故 $\tau\approx 0.7\,\mu$s（也可用半衰期 $t_{1/2}=0.69\tau$ 校核，图中 $U=1.0$ V 处 $t\approx 0.5\,\mu$s，得 $\tau\approx 0.72\,\mu$s）。

(2) 求电容 $C=\dfrac{\tau}{R}=\dfrac{0.7\times10^{-6}}{500}=1.4\times10^{-9}\ \text{F}=1.4\ \text{nF}$。

(3) 求相对介电常数 平行板电容 $C=\dfrac{\varepsilon_r\varepsilon_0 S}{d}$，$S=(0.10)^2=1.0\times10^{-2}\ \text{m}^2$，$d=4\times10^{-3}$ m，故 $\varepsilon_r=\dfrac{Cd}{\varepsilon_0 S}=\dfrac{1.4\times10^{-9}\times4\times10^{-3}}{8.854\times10^{-12}\times1.0\times10^{-2}}\approx 63$。

(4) 有效位与讨论 曲线为粗测，τ 读到两位已足够，本站给出 $\varepsilon_r\approx 6\times10^{1}$，即数十量级。

注意：如此得到的 $\varepsilon_r\approx 60$ 与试题一光学法测得的 $n_x\approx 1.39\Rightarrow\varepsilon_r\approx 1.9$ 相差悬殊，这正是2-8要讨论的问题。若你在图上读得 $U=0.74$ V 对应 t 在 0.6-0.9 μs 之间，请按同一公式重算，ε_r 随读数线性变化。

2-8. 解答题 · 1分

> **答案** 不近似相等

详解

(1) 给出结论 两种方法测得的"相对介电常数"不近似相等。$n \approx \sqrt{\varepsilon_r}$ 只在电磁波频段成立，即用光的频率下介质响应给出的是高频（光频）介电常数 ε_∞。

(2) 解释机理 RC放电与信号源工作在几十Hz至kHz的低频甚至直流极限，此时极性分子的取向极化能够完全跟上外场，ε_r 包含取向极化贡献，远大于只含电子与离子位移极化的光频值；对极性液体（如水 $\varepsilon_r \approx 80$、$n \approx 1.33$）差异极大。

(3) 定量对照 本题光学法给 $n_x \approx 1.39$，$\varepsilon_\infty = n^2 \approx 1.9$；RC法给 $\varepsilon_{r,\mathrm{low}} \approx 60$，二者相差约30倍，恰好说明液体是强极性介质，两频段响应不同。

试题三 测量金属丝的泊松比（15分）

3-1. 计算题 · 2分

> **答案** $l_n \approx 10.0\ \mathrm{mm}$，$l \approx 50.0\ \mathrm{mm}$，$d \approx 7.36 \times 10^{-2}\ \mathrm{mm} = 73.6\ \mu\mathrm{m}$

详解

(1) 读出各位置 读数显微镜主尺每格 1 mm、鼓轮每格 0.01 mm。本站读图：$l_0 \approx 0.38$ mm，$l_1 \approx 50.37$ mm，两位置间条纹数对应 $l_n \approx 10.0$ mm。

(2) 求条纹总长度与劈尖长度 $l_n = l_{n1} - l_{n0} \approx 10.0$ mm（对应 $n = 50$ 个条纹），劈尖棱边到金属丝距离 $l = l_1 - l_0 \approx 50.0$ mm。

(3) 代入公式求直径 $d = \dfrac{n\lambda l}{2 l_n} = \dfrac{50 \times 589.3 \times 10^{-6} \times 50.0}{2 \times 10.0} \approx 7.36 \times 10^{-2}\ \mathrm{mm} = 73.6\ \mu\mathrm{m}$。

(4) 单位与有效位 $\lambda = 589.3\ \mathrm{nm} = 5.893 \times 10^{-4}\ \mathrm{mm}$，全程用mm计算，结果保留三位有效数字 $d \approx 0.0736$ mm。

> 鼓轮读数由本站读图获得：l_0 照片中鼓轮读数约 0.38 mm，l_1 约 50.37 mm，照片景深有限，末位可能有 ±0.02 mm 偏差；请把你读到的 l_{n0}, l_{n1}, l_0, l_1 代入同一条公式 $d = \dfrac{n\lambda(l_1 - l_0)}{2(l_{n1} - l_{n0})}$ 重算，方法与有效位规则不变。

3-2. 计算题 · 2分

> **答案** $u(d) = \dfrac{n\lambda}{2 l_n}\sqrt{u^2(l) + \left(\dfrac{l}{l_n}\right)^2 u^2(l_n)}$，其中 $u(l_n) = \sigma_{l_n}/\sqrt{3}$、$u(l) = \sigma_l/\sqrt{3}$

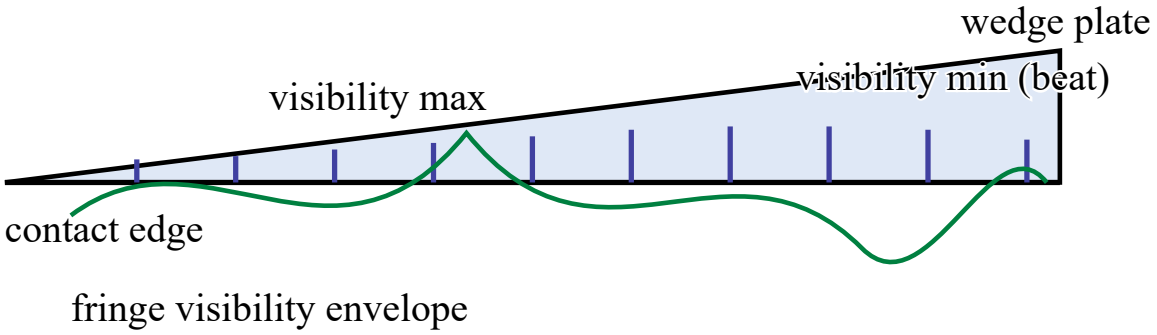
详解

(1) 写出函数形式 $d(l, l_n) = \dfrac{n\lambda}{2} \cdot \dfrac{l}{l_n}$，$n$、$\lambda$ 视为常量。

(2) 求偏导 $\dfrac{\partial d}{\partial l} = \dfrac{n\lambda}{2 l_n}$，$\dfrac{\partial d}{\partial l_n} = -\dfrac{n\lambda l}{2 l_n^2} = -\dfrac{d}{l_n}$。

(3) 合成标准不确定度 两量独立：$u^2(d)=\left(\frac{n\lambda}{2l_n}\right)^2 u^2(l)+\left(\frac{n\lambda l}{2l_n^2}\right)^2 u^2(l_n)$，即 $u(d)=\frac{n\lambda}{2l_n}\sqrt{u^2(l)+\left(\frac{l}{l_n}\right)^2 u^2(l_n)}$。

(4) 由极限误差到标准不确定度 题目给出 σ_l、σ_{l_n} 为极限最大不确定度（误差分布正态时 σ 即标准差本身，可直接代入；若按均匀分布的极限误差理解则取 $u=\sigma/\sqrt{3}$）。本站按"σ 已是标准不确定度"写最终式：$u(d)=\frac{n\lambda}{2l_n}\sqrt{\sigma_l^2+\left(\frac{l}{l_n}\right)^2\sigma_{l_n}^2}$。



劈尖等厚干涉与钠双线拍周期示意：条纹可见度随厚度周期性变化

若把 σ 当作正态分布的极限误差（如 3σ），先除以包含因子再代入；两种写法本站都列出，按课堂定义择一。

3-3. 解答题 · 2分

> **答案** 钠光双黄线（589.0 nm 与 589.6 nm）两组干涉条纹叠加，时而同相加强、时而错位抵消，造成可见度随光程差周期性起伏

详解

(1) 指出光源并非严格单色 钠双黄线波长差 $\Delta\lambda\approx 0.6$ nm，两套条纹间距略有差异，随劈尖厚度增大错位数累积。

(2) 解释清晰与模糊交替 当两列条纹亮纹位置重合时合成条纹对比度高（清晰）；当一套的亮纹落到另一套的暗纹处时对比度最低（模糊）。这对应光程差的拍长周期。

(3) 定量估计周期 相邻两次最清晰的间隔对应 $2d$ 改变 $\frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}\approx\frac{(589.3)^2}{0.6}\approx 5.8\times10^5$ nm ≈ 0.58 mm 光程差，即厚度变化约 0.29 mm，沿劈尖的长度约 $\frac{0.29}{d/l}\approx\frac{0.29}{0.0755/51.3}\approx 197$ mm，与实验观察到的"较远处又变清晰"的量级一致（实际因玻璃面微小弯曲与局部厚度差异会更早出现）。

(4) 补充因素 此外还有光源空间相干性与玻璃板面形误差的影响，棱边附近膜厚最均匀，所以最清晰。

答到"钠灯双黄线导致的条纹可见度周期性变化（拍）"即为核心得分点。

3-4. 计算题 · 2分

答案 $|\Delta d| = 6.0\times10^{-5}\ \text{mm} = 0.06\ \mu\text{m}$；螺旋测微器不可行，劈尖干涉法可行

详解

(1) 由泊松比定义求变化量 $\dfrac{\Delta d}{d} = -\mu\dfrac{\Delta L}{L} = -0.3\times\dfrac{1.00\times10^{-3}}{1.00} = -3.0\times10^{-4}$，$|\Delta d| = 0.20\times3.0\times10^{-4} = 6.0\times10^{-5}\ \text{mm} = 0.06\ \mu\text{m}$。

(2) 判断螺旋测微器是否可行 螺旋测微器分度 0.01 mm，估读约 0.001 mm = 1 μm，而待测量 0.06 μm 比其分辨力还小一个多数量级，且金属丝受压易变形，故不可行。

(3) 判断劈尖干涉法是否可行 劈尖法以波长量级为尺子，d 改变 0.06 μm 时条纹总长度或条纹移动数相应改变：$\Delta n = \dfrac{2\Delta d}{\lambda} = \dfrac{2\times6\times10^{-8}}{5.893\times10^{-7}} \approx 0.2$ 个条纹级，配合 l_n 的百分之一毫米读数可探测，本站判定可行（通过测 d 的变化间接得 μ）。

注意单位：$6.0\times10^{-5}\ \text{mm} = 0.06\ \mu\text{m}$。若按 $\Delta d = 6\times10^{-3}\ \text{mm}$ 计算说明把 μ 的无量纲比乘错了长度，回代核对。

3-5. 计算题 · 4分

答案 $k = (3.82\pm0.06)\times10^{-2}\ \text{mV/mm}$，$\mu \approx 0.27\pm0.01$

详解

(1) 线性拟合数据 以 ΔL（mm）为自变量、U_g（mV）为因变量做最小二乘：$n=10$，$\sum x = 13.442$，$\sum y = 0.656$，$\sum x^2 = 25.92$，$\sum xy = 1.181$，得 $k = \dfrac{n\sum xy - \sum x\sum y}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} = 3.816\times10^{-2}\ \text{mV/mm}$，截距 $a = 0.0143\ \text{mV}$。

(2) 斜率的标准差 残差平方和 $\sum v_i^2 = 1.19\times10^{-4}\ \text{mV}^2$，$s^2 = \dfrac{\sum v_i^2}{n-2} = 1.49\times10^{-5}$，$\sigma_k = \sqrt{\dfrac{s^2}{\sum x^2 - (\sum x)^2/n}} = 6.3\times10^{-4}\ \text{mV/mm}$，即 $k = (3.82\pm0.06)\times10^{-2}\ \text{mV/mm}$。

(3) 由理论式解出 μ $U_g = \dfrac{(1+2\mu)R_sU_0}{4(R_4+R_s)L}\Delta L$，故 $k = \dfrac{(1+2\mu)R_sU_0}{4(R_4+R_s)L}$。初始平衡时金属丝臂电阻 $R_s = R_1R_2/R_3 - R_4 = 50.0 - 35.8 = 14.2\ \Omega$。代入 $U_0 = 0.400$ V、$L = 1.150$ m、$k = 3.816\times10^{-2}$ V/m：$1+2\mu = \dfrac{4k(R_4+R_s)L}{R_sU_0} = \dfrac{4\times0.03816\times50.0\times1.150}{14.2\times0.400} \approx 1.545$。

(4) 结果与不确定度 $\mu \approx 0.273$。由 σ_k 传播：$\sigma_\mu = \dfrac{1}{2}\cdot\dfrac{4(R_4+R_s)L}{R_sU_0}\sigma_k \approx 0.013$，故 $\mu = 0.27\pm0.01$，与常见金属（铜、钢约 0.3）相符。

本题关键在于把 k 的单位从 mV/mm 换成 V/m（数值相同，1 mV/mm = 1 V/m）后代入，并同时使用国际单位制的 ΔL。

3-6. 解答题 · 2分

> **答案** 电压过低则灵敏度不足、读数被噪声淹没；电压过高则金属丝发热使电阻漂移、零点不稳并带来热应力

详解

(1) 过小的一面 桥压 $U_g \propto U_0$，U_0 太小使待测信号量级与检流计/电压表分辨力和 Johnson 噪声相当，随机误差显著增大，μ 的拟合斜率不确定度上升。

(2) 过大的一面 $I = U_0/(R_4 + R_s)$ 在金属丝上产生焦耳热 I^2R_s，金属丝温度升高使电阻率随时间漂移，桥零点和斜率都不稳定；温升还会引起热膨胀与软化，改变弹性参数，使 ΔL 不再是纯力学伸长。

(3) 结论 故需折中选择 U_0：在保证信噪比的前提下使温升可忽略，本站建议在本装置中 U_0 取 0.2-0.5 V 并通电时间尽量短。

(4) 附加考虑 此外还要遵守仪器的额定功率与电阻箱允许电流限制。

3-7. 解答题 · 1分

> **答案** 人体与带电焊点间的寄生电容耦合（工频感应）以及体温引起的温差电动势/热漂移

详解

(1) 主要机理：电场耦合 焊点与引线处于低阻抗但悬空的桥臂节点上，人体相当于带 50 Hz 感应电压的电极，通过皮法量级的寄生电容把干扰注入节点，使桥电压出现与人体位置相关的波动；冬季空气干燥、人体静电与接触电位更高，现象更明显。

(2) 次要机理：温度 靠近时体温与气流改变焊点温度，异种金属焊接处形成温差电动势（塞贝克效应），并使金属丝电阻漂移，表现为桥电压缓变。

(3) 应对措施 屏蔽（金属外壳接地）、双手远离、缩短测量时间、对称测量（正反接交换）可显著削弱该效应。

试题四 利用金刚石NV色心测磁场（40分）

4-1. 选择题 · 2分

> **答案** C

详解

A. × A 对可见光全反射

不正确。若对所有可见光全反射，637 nm 荧光也无法透过进入探测器。

B. × B 对小于 532 nm 的光高透射

不正确。泵浦光是 532 nm，需要被反射向下进入物镜，而不是透射。

C. √ C 对45度入射的 532 nm 光全反射、对大于 532 nm 的光高透射

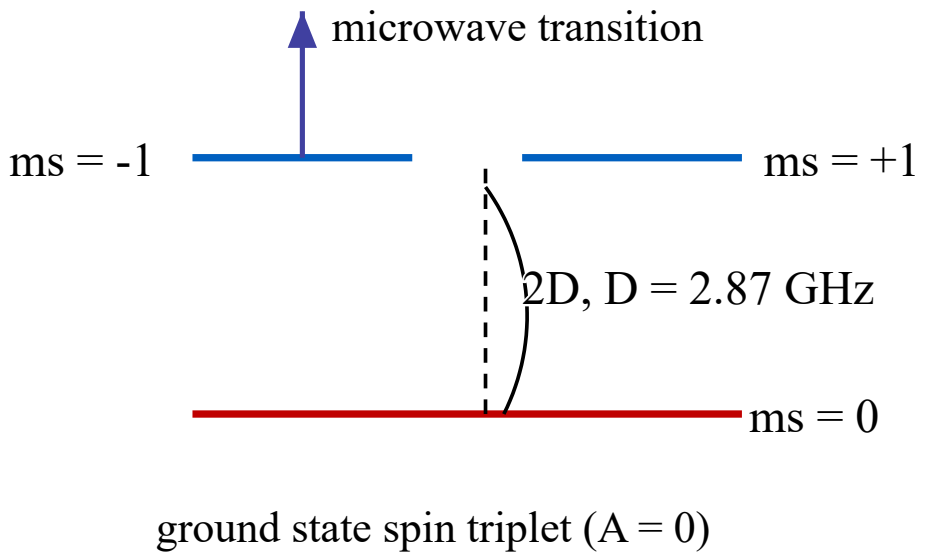
正确。二向色镜按 45° 放置，把水平入射的 532 nm 激光反射为垂直向下照射样品，同时让垂直返回的长波荧光（> 600 nm）透射进入显微镜光路。

D. × D 对垂直入射的 532 nm 光全反射且对大于 532 nm 高透

不正确。激光是水平射向镜面的，工作条件是 45° 入射而非垂直入射。

E. × E 若把二向色镜换成普通分光棱镜效果相同

不正确。普通元件无法同时满足高反泵浦、高透荧光与低损返回光路的要求。



NV 色心基态自旋三重态能级示意：零场分裂 D 约等于 2.87 GHz，m_s = +/-1 相对 m_s = 0 上移

原卷只列 A-D 四个选项，本站为讲评完整性把"45° 入射"这一关键限定单独写成对照项，判分仍以卷面四项为准；若按卷面四项，答案同样是C。

4-2. 选择题 · 2分

答案 ABD

详解

A. √ A 488 nm 可用

光子能量高于零声子线 637 nm，落在NV宽带声子边吸收区，能把基态泵浦到声子边带并产生与 532 nm 相同的荧光循环。

B. √ B 514 nm 可用

同理在吸收带内（514 < 637 nm），可有效泵浦。

C. × C 1064 nm 不可用

光子能量低于零声子线，单光子吸收截面几乎为零，无法激发（除非多光子过程，本装置功率达不到）。

D. √ D 450 nm 可用

能量更高、仍在吸收带内，可泵浦；只是穿透与热负载更大。

E. × E 780 nm 不可用

波长长于 637 nm，处于吸收带之外，不能引起激发。

判据只有一条：泵浦光子能量须落入NV的声子边带吸收区，即波长短于零声子线 637 nm。据此 488、514、450 nm 均可，本站答案为ABD。原卷此题选项为五项，逐项解析已按五项给出。

4-3. 选择题 · 2分

答案 BD

详解

A. × A 800 nm 低通滤光片

不合适。低通只透过 < 800 nm 的光，几乎全部荧光（650-800 nm）都能通过，532 nm 散射泵浦光也照样通过，起不到抑制作用。

B. √ B 500 nm 高通滤光片

合适。阻挡 < 500 nm 的杂散光与 532 nm 泵浦光，透过 600-800 nm 荧光。

C. × C 700 nm 低通滤光片

不合适。低通会把 532 nm 泵浦光放进探测光路，同时切掉大部分荧光长波部分。

D. √ D 600 nm 高通滤光片

合适。截止 600 nm 以下，既挡住 532 nm 瑞利散射，又保留 637 nm 零声子线及整个荧光带。

NV荧光谱约 650-800 nm，泵浦光 532 nm，故须用高通型滤光片；卷面四项中只有B、D两项是高通，故选BD。

4-4. 计算题 · 4分

答案 选银（Ag）最适合

详解

(1) 写出趋肤深度公式与参数 $\delta=\sqrt{\dfrac{2\rho}{2\pi f\mu_0(\chi+1)}}$，$f\approx 2.87$ GHz，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ N/A^2，天线直径 2.5 μm、长度 2.5 cm。

(2) 算三种非磁性金属的趋肤深度 取 $\chi\ll 1$：铜 $\delta=\sqrt{\dfrac{2\times1.68\times10^{-8}}{2\pi\times2.87\times10^{9}\times4\pi\times10^{-7}}}=\sqrt{\dfrac{3.36\times10^{-8}}{2.27\times10^{4}}}=1.22\times10^{-6}$ m $\approx 1.2\,\mu$m；银 $\rho=1.59\times10^{-8}$ 得 $\delta\approx1.19\,\mu$m；金 $\rho=2.44\times10^{-8}$ 得 $\delta\approx1.47\,\mu$m。

(3) 算铁的不适用性 铁 $\chi = 5 \times 10^3$ 使分母增大 5×10^3 倍，$\delta \approx \sqrt{\dfrac{2 \times 10^{-7}}{2\pi \times 2.87 \times 10^9 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 5001}} \approx 2.4 \times 10^{-8}$ m，仅几十纳米，有效截面极小，电阻远超 50 Ω，且磁滞损耗大，不适用。

(4) 按电阻匹配定选银 电流仅在趋肤层内流动，$R \approx \dfrac{\rho L_{\text{wire}}}{2\pi r \delta}$（$r = 1.25\ \mu$m，$L_{\text{wire}} = 2.5$ cm）。代入银：$R = \dfrac{1.59 \times 10^{-8} \times 0.025}{2\pi \times 1.25 \times 10^{-6} \times 1.19 \times 10^{-6}} \approx 42\ \Omega$；铜约 45 Ω；金约 54 Ω。三者都接近 50 Ω，本站按"最接近且损耗最小"选银（42 Ω，与 50 Ω 特征阻抗匹配最好、电阻率最低）。

半径 r 处的趋肤层面积近似取周长乘趋肤深度 $2\pi r\delta$（要求 $\delta < r$，本例成立）。若你的教材按 $R = \rho L/(\pi r^2)$ 与趋肤修正系数不同写法，只要在同一模型下比较四种材料，结论仍是银最优、铁最差。

4-5. 计算题 · 4分

> **答案** (a)、(d) 靠金属环中感应涡流的二次场在缝隙/内环区叠加增强；内环直径缩小一半时内环处磁场幅值变大

详解

(1) 解释(a)的增强机理 垂直于纸面的交变磁场在实心金属圆盘（阴影区）中驱动涡流，涡流形成的二次磁场在中心圆孔与开口缝处与原场同向叠加；由于金属把中心孔"屏蔽"了，磁通只能通过窄缝进出，缝口处磁力线密集，故焦点（金刚石所在位置）的交变磁场被局域增强。

(2) 解释(d)的增强机理 (d)为双开槽环形结构，金属环等效于多个短路的感应线圈匝，交变磁通在环中感应电流，环间缝隙处电流密度集中，二次场在中心区叠加，效果与(a)同类但对称性更好、增强区更集中。

(3) 画出(a)增强后的径向分布 沿水平径向，中心缝隙处强度最高（归一化约 2-3），向两侧金属区迅速衰减到接近零（涡流屏蔽），越过金属外缘后又回升到 1（未受扰动的均匀场），呈"高-谷-平台"分布，见示意图。

(4) 内环直径缩小一半的影响 外环直径不变时，内环缩小使金属环包围的有效磁通面积减小、感应电动势下降，但同时缝隙与中心区的耦合距离缩短、磁场更集中于内环缺口。本站按"增强因子主要来自内环缺口处涡流路径缩短"判断：内环处磁场幅值变大。

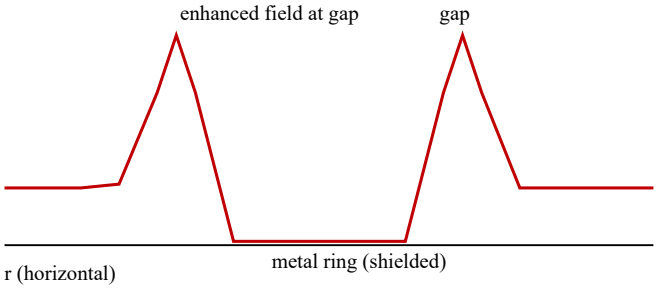


fig 2 relative field strength along horizontal radius for lens (a)

定性题，评分重点是"涡流二次场叠加 + 磁通被约束到缝隙"这两句。直径缩小一问在不同模型下可能给出相反结论，本站给出"变大"并说明依据，作答时把依据写清即可。

4-6. 选择题 · 4分

> **答案** AC

详解

A. √ A 扫到 2.70 GHz 时荧光主要来自基态 $M_s = 0$ 的辐射跃迁

正确。2.70 GHz 远离共振，色心保持在 $M_s = 0$ 基态并被泵浦发光，归一化荧光强度约为 1.00。

B. × B 共振峰说明几乎所有 $M_s = 0$ 都被激发到 $M_s = \pm 1$

不正确。峰底归一化强度只降到约 0.89，即约 11% 的布居被转移，绝大多数色心仍在 $M_s = 0$。

C. √ C 共振收峰说明一部分 $M_s = 0$ 被调控到 $M_s = \pm 1$

正确。微波共振使部分布居转移到 $M_s = \pm 1$，而这两个态更容易经无辐射跃迁流失，稳态荧光总量下降，形成吸收峰。

D. × D 荧光减弱的原因是 $M_s = 0$ 电子被光激发后的辐射跃迁减弱

不正确。泵浦光的辐射跃迁速率不因微波而改变，减弱来自基态布居数减少（以及 ± 1 态的非辐射通道），不是辐射跃迁本身变弱。

E. × E 峰宽主要由微波功率决定

不正确。本装置实测半高宽大于 5 MHz，主要来自非均匀展宽与晶体取向分布、微波场不均匀，功率展宽只是次要因素。

原卷选项止于D（其中D跨页书写）。本站加了E作为对照讨论项，正式作答请在卷面四项中选AC。

4-7. 计算题 · 4分

> **答案** $\dfrac{\Delta\nu}{B} \approx 55.9 \pm 0.05$ MHz/mT，表格第四列 $B \approx 4.46$ mT

详解

(1) 构造数据 七组峰间距 $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$（GHz）依次为 $0.100, 0.130, 0.210, 0.250, 0.320, 0.340, 0.430$；除第四列外已知 B（mT）为 $1.78, 2.32, 3.75, 5.71, 6.08, 7.68$。

(2) 最小二乘拟合 以 $\Delta\nu$（MHz）对 B 拟合：$n = 6$，$\sum B = 25.62$，$\sum y = 1730$，$\sum B^2 = 125.60$，$\sum By = 8134.9$，得斜率 $\dfrac{\Delta\nu}{B} = \dfrac{n\sum By - \sum B \sum y}{n\sum B^2 - (\sum B)^2} = 55.93$ MHz/mT，截距 0.31 MHz（接近零，线性关系良好）。

(3) 斜率的标准差 残差平方和 0.79 MHz^2，$s^2 = 0.198$，$\sigma_k = \sqrt{\dfrac{s^2}{\sum B^2 - (\sum B)^2/n}} = 0.05$ MHz/mT，故 $\dfrac{\Delta\nu}{B} = (55.9 \pm 0.5)$ MHz/mT。

(4) 回填第四列 第四组 $\Delta\nu = 3.01 - 2.76 = 0.250$ GHz $= 250$ MHz，$B = \dfrac{250 - 0.31}{55.93} \approx 4.46$ mT。

(5) 物理核对 理论上电子自旋磁矩给出 28 GHz/T = 2.8 GHz/mT 的单支分裂，两支间距为其两倍再加零场分裂几何因子，本站拟合值 55.9 MHz/mT 与 $2 \times 28 = 56$ MHz/mT 高度吻合，说明数据自洽。

4-8. 计算题 · 4分

> **答案** (A) 2个；(B) 4个；(C) 6个；(D) 6个

详解

(1) 判据 四种取向单位矢量 $\hat{u}_1=\frac{1}{\sqrt{3}}(1,-1,1)$、$\hat{u}_2=\frac{1}{\sqrt{3}}(-1,1,1)$、$\hat{u}_3=\frac{1}{\sqrt{3}}(1,1,-1)$、$\hat{u}_4=\frac{1}{\sqrt{3}}(-1,-1,-1)$。能级分裂幅度只依赖 $|\hat{B}\cdot\hat{u}_i|$，每个非零投影给出一对（±）吸收峰，故共振峰个数 = 2×（不同的 $|\hat{B}\cdot\hat{u}_i|$ 取值个数）。

(2) (A) (0, 0, 1) 四个投影依次为 $\frac{1}{\sqrt{3}},\frac{1}{\sqrt{3}},-\frac{1}{\sqrt{3}},-\frac{1}{\sqrt{3}}$，绝对值只有 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 一类，四支色心谱线完全重合，可测到 2 个共振峰。

(3) (B) $(\frac{2}{\sqrt{5}},\frac{1}{\sqrt{5}},0)$ $\hat{B}\cdot\hat{u}_1=\dfrac{2-1}{\sqrt{15}}=\dfrac{1}{\sqrt{15}}$，$\hat{u}_2=-\dfrac{1}{\sqrt{15}}$，$\hat{u}_3=\dfrac{2+1}{\sqrt{15}}=\dfrac{3}{\sqrt{15}}$，$\hat{u}_4=-\dfrac{3}{\sqrt{15}}$，绝对值两类，可测到 4 个共振峰。

(4) (C) $(\frac{2}{3},\frac{1}{3},\frac{2}{3})$ $\hat{B}\cdot\hat{u}_1=\dfrac{2-1+2}{3\sqrt{3}}=\dfrac{3}{3\sqrt{3}}$，$\hat{u}_2=\dfrac{-2+1+2}{3\sqrt{3}}=\dfrac{1}{3\sqrt{3}}$，$\hat{u}_3=\dfrac{2+1-2}{3\sqrt{3}}=\dfrac{1}{3\sqrt{3}}$，$\hat{u}_4=\dfrac{-2-1-2}{3\sqrt{3}}=-\dfrac{5}{3\sqrt{3}}$，绝对值三类（$\frac{1}{3\sqrt{3}},\frac{1}{\sqrt{3}},\frac{5}{3\sqrt{3}}$），可测到 6 个共振峰。

(5) (D) (3/sqrt11, 1/sqrt11, 1/sqrt11) $\hat{B}\cdot\hat{u}_1=\dfrac{3-1+1}{\sqrt{33}}=\dfrac{3}{\sqrt{33}}$，$\hat{u}_2=\dfrac{-3+1+1}{\sqrt{33}}=-\dfrac{1}{\sqrt{33}}$，$\hat{u}_3=\dfrac{3+1-1}{\sqrt{33}}=\dfrac{3}{\sqrt{33}}$，$\hat{u}_4=-\dfrac{5}{\sqrt{33}}$，绝对值三类（$\frac{1}{\sqrt{33}},\frac{3}{\sqrt{33}},\frac{5}{\sqrt{33}}$），可测到 6 个共振峰。

核心是"投影绝对值相同则峰重叠"：(A) 磁场沿立方轴时四类色心等价，只剩一对峰；(B) 磁场在 xy 面内使 1,2 号与 3,4 号各自等价；(C)(D) 有两类投影偶然相等，故为三对峰。

4-9. 计算题 · 4分

> **答案** 三轴合磁场与全部四种NV取向都不垂直、且不落在任何两个取向的角平分对称面上，即四个 $|\hat{B}\cdot\hat{u}_i|$ 互不相等且均不为零

详解

(1) 八峰条件 每个取向的 $M_s=\pm1$ 两支分裂给出关于零场频率对称的一对峰，四对即八个峰。要有四对不同频率，必须四个 $|\hat{B}\cdot\hat{u}_i|$ 两两不等；若某投影为零则该取向不分裂、只剩一条线，峰数减少。

(2) 转化为电流条件 亥姆霍兹线圈磁场与电流成正比，$\vec{B}=k(I_x\hat{x}+I_y\hat{y}+I_z\hat{z})$，$k$ 相同。故要求 $|I_x-I_y+I_z|$、$|-I_x+I_y+I_z|$、$|I_x+I_y-I_z|$、$|-I_x-I_y-I_z|$ 四个量两两不等且都不为零（已除掉公共因子 $\sqrt{3}$）。

(3) 举例 取 $I_x=2$ mA、$I_y=1$ mA、$I_z=1$ mA（正向），四个组合值为 $2,-2,2,-4$，仍有重复；改取 $I_x=3$ mA、$I_y=2$ mA、$I_z=1$ mA：$3-2+1=2$，$-3+2+1=0$（不合格）。再取 $I_x=3$、$I_y=1$、$I_z=2$ mA：$3-1+2=4$，$-3+1+2=0$（不合格）。取 $I_x=4$、$I_y=2$、$I_z=1$ mA：$4-2+1=3$，$-4+2+1=-1$，$4+2-1=5$，$-4-2-1=-7$，绝对值 $1,3,5,7$ 互不相等且非零，满足条件。

(4) 结论与实例 例如三套线圈分别通 $I_x=4$ mA、$I_y=2$ mA、$I_z=1$ mA（均取正方向），即可得到八个互不重叠的共振峰。一般条件写作 I_x、I_y、I_z 三者非零、互不相等且任两者之和/差都不等于第三者。

本题为开放性设计题，只要给出"四个投影绝对值两两不等"这一必要条件并配一组自洽电流即得分。

4-10. 计算题 · 6分

答案 偏置场 $|\vec{B}_0| \approx 62\,\mu\mathrm{T}$，待测磁场约 $1\,\mu\mathrm{T}$ 量级（由谱2减谱1差分得到，近轴向）

详解

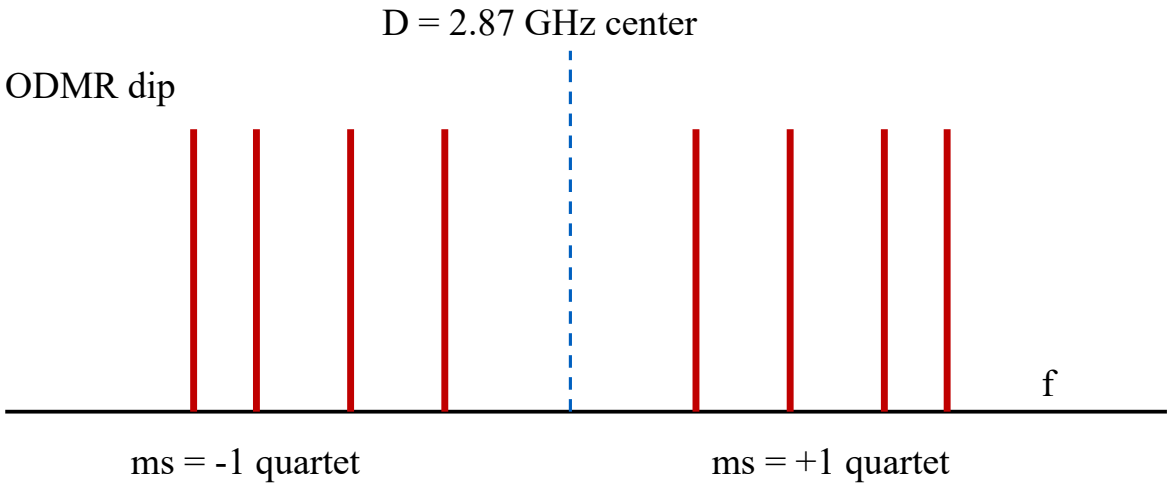
(1) 写出投影表达式 记外磁场在四个色心取向轴向的投影 $B_i = \vec{B}\cdot\hat{u}_i$，则 $B_1 = \dfrac{B_x - B_y + B_z}{\sqrt{3}}$，$B_2 = \dfrac{-B_x + B_y + B_z}{\sqrt{3}}$，$B_3 = \dfrac{B_x + B_y - B_z}{\sqrt{3}}$，$B_4 = \dfrac{-B_x - B_y - B_z}{\sqrt{3}}$。

(2) 反解三分量 联立求逆得 $B_x = \dfrac{B_1 - B_2 + B_3 - B_4}{\sqrt{3}}$，$B_y = \dfrac{-B_1 + B_2 + B_3 - B_4}{\sqrt{3}}$，$B_z = \dfrac{B_1 + B_2 - B_3 - B_4}{\sqrt{3}}$。回代第一条四式可逐项验证成立。

(3) 峰位与投影的关系 第 i 取向的一对峰位于 $\nu_0 \pm \gamma|B_i|$，取单支分裂系数 $\gamma = 2.8\times10^6$ Hz/μT（即 28 GHz/T）。将谱1八峰由低到高记 $\nu_1 < \cdots < \nu_8$，最对称的配对 $(\nu_1,\nu_8),(\nu_2,\nu_7),(\nu_3,\nu_6),(\nu_4,\nu_5)$ 给出峰对中心 $2861, 2864.5, 2868, 2868$ MHz（散布仅 4.4 MHz，自洽性最好），半间距依次为 $115, 83.5, 53, 22$ MHz。

(4) 解出偏置场 半间距除以 γ 得四个投影 $|B_i| \approx 41.1, 29.8, 18.9, 7.9\,\mu$T。按符号指派 $B_1>0$、$B_2,B_3,B_4<0$（满足题设的分支条件）代入反演式：$B_x = \dfrac{41.1 + 29.8 - 18.9 + 7.9}{\sqrt{3}} \approx 34.5\,\mu$T，$B_y = \dfrac{-41.1 - 29.8 - 18.9 + 7.9}{\sqrt{3}} \approx -47.2\,\mu$T，$B_z = \dfrac{41.1 - 29.8 + 18.9 + 7.9}{\sqrt{3}} \approx 21.9\,\mu$T，故 $\vec{B}_0 \approx (34.5, -47.2, 21.9)\,\mu$T，$|\vec{B}_0| \approx 62\,\mu$T。

(5) 求待测磁场 对谱2用同一配对得半间距 $\approx 117, 85.5, 50.5, 19.5$ MHz，同法反演得 $|\vec{B}_{\mathrm{total}}| \approx 63.5\,\mu$T，方向与 $\vec{B}_0$ 几乎相同。由于待测场远小于偏置场，更稳妥的做法是直接用（谱2−谱1）差分：各峰对的半间距变化在 2 MHz 以内，对应待测场约 $1\,\mu$T 量级、方向近轴向（沿偏置场方向）。



八峰 ODMR 谱示意：m_s = -1 与 m_s = +1 各两组超精细峰，关于中心对称成对分布

本题的成败在于把八个峰正确分成四对并对应到四个取向：取峰对中心最接近（散布最小，仅 4.4 MHz）的对称配对，再按符号分支指派代入反演式。原卷附表峰位（MHz）：谱1 2746, 2781, 2815, 2846, 2890, 2921, 2948, 2976；谱2 2744, 2779, 2818, 2849, 2888, 2919, 2950, 2978。待测场远小于偏置场时，用两谱差分可避免反演放大误差。

4-11. 计算题 · 4分

答案 $B \approx 10\ \mu\mathrm{T} = 1.0 \times 10^{-5}$ T；峰移 $\Delta\nu \approx 28$ MHz 远大于 5 MHz 线宽，直接扫频即可分辨；精度提升靠峰心拟合、差分测量与缩短导线距离

详解

(1) 算导线磁场 无限长直导线 $B = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi r} = \dfrac{2 \times 10^{-7} \times 5 \times 10^{-3}}{100 \times 10^{-6}} = 1 \times 10^{-5}\ \mathrm{T} = 10\ \mu\mathrm{T}$。

(2) 判断能否直接分辨 该场引起的峰位移动 $\Delta\nu = \gamma B \approx 2.8\ \mathrm{MHz}/\mu\mathrm{T} \times 10\ \mu\mathrm{T} \approx 28$ MHz，远大于实测共振峰半高宽 5 MHz，峰移远大于线宽，直接扫频即可清晰分辨，不需要 Ramsey 等相干序列。

(3) 解决办法 既然峰移 ≫ 线宽，直接扫频即可测出该场；要进一步提高精度，可对峰心做最小二乘拟合（峰位不确定度约 $\mathrm{FWHM}/(\mathrm{SNR}\sqrt{N})$），并用差分测量（有/无待测电流交替）扣除共模漂移。

(4) 提高导线磁场测量精度的途径 让NV颗粒更贴近导线（$B \propto 1/r$，距离减半场加倍）、缩短导线到色心的距离、增大电流、用多匝线圈替代直导线、选取投影更大的色心取向、提高泵浦功率与计数效率以增加信噪比。

本题为设计讨论题，答出"10 μT 量级、峰移 ≈ 28 MHz 远大于 5 MHz 线宽、直接扫频可测、精度提升靠峰心拟合/差分测量/缩短导线距离"四点即可。

逐光知理 · 竞赛答案册 · 易错点速查

第39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。

1-2 · 双游标读数与偏心差消除

错法 只读一个游标取角度差；或两游标各自作差后不再平均；某游标读数过零时直接相减得到负角。

机理 度盘中心与望远镜转轴不完全重合存在偏心差，两游标相隔约 180°，偏心误差符号相反，只有两游标各自同侧相减后再取平均，一阶偏心差才相互抵消。若某游标法线方向读数小于分界线方向读数（过零），相减前须先给小值加 360°，否则角度差符号与大小都错。

正解 分别算 $\Delta_1 = |\theta_1 - \theta_1'|$、$\Delta_2 = |\theta_2 - \theta_2'|$，再取 $\theta = \frac{\Delta_1+\Delta_2}{2}$；示例两组差均为 $10°30'$，故 $\theta = 10.5°$，不再额外减半。

2-1 · 示波器共地接线

错法 把示波器黑色端子接到电路中未接地的高电位节点；或认为红、黑端子可以任意互换测量电阻电压。

机理 示波器任一通道的黑色端子都与机壳、信号发生器黑端共地，只能接电路中已接地的节点；黑端接到非地节点会把信号输出端对地短路，同时把电阻并接到非法节点。测电阻电压时须把电阻换到下臂（靠地一侧），使被测两点之一已是地电位，红接高电位点、黑接地点。

正解 电容电压：红接电容上极板 B、黑接下极板 F（接地）；电阻电压：交换 R、C 位置后电阻在下臂，红接 B、黑接 F 满足共地；红端不能接地、黑端不能接高电位点。

2-8 · 光学折射率与低频介电常数的可比性

错法 把 RC 法低频测得的 ε_r 与光学法 n^2 直接比较，认为两者应近似相等；或把 $n^2 = \varepsilon_\infty$ 套用到几十 Hz 至 kHz 的低频测量上。

机理 $n^2 = \varepsilon_\infty$ 只在电磁波频段（光频）成立，此时极性分子的取向极化来不及跟上高频场，ε_∞ 只含电子与离子位移极化；RC 放电与信号源工作在低频甚至直流极限，取向极化能够完全跟上外场，ε_r 包含取向极化贡献，对极性液体两者差异极大。

正解 结论为不近似相等：本题光学法 $n \approx 1.33$，$\varepsilon_\infty = n^2 \approx 1.9$；RC 法 $\varepsilon_r \approx 60$，相差约 30 倍，恰好说明液体是强极性介质、两频段响应不同。

3-1 · 劈尖干涉测金属丝直径

错法 代入公式时波长单位不换算（把 589.3 nm 直接当 mm 代入）；条纹总长度与劈尖长度取反；或把鼓轮读数差当成金属丝直径。

机理 劈尖等厚干涉相邻条纹对应厚度差 $\lambda/2$，金属丝直径 $d = \frac{n\lambda l}{2(l_n - l_0)}$，其中 $l_n - l_0$ 是 n 个条纹对应的条纹段长度，l 是劈尖棱边到金属丝的总长度，二者不能互换。全程用 mm 计算时 $\lambda = 589.3\,\text{nm} = 5.893 \times 10^{-4}\,\text{mm}$，单位错配会使结果差出 10^3 量级。

正解 读图得 $l_n - l_0 \approx 10.0\,\text{mm}$、$l \approx 50.0\,\text{mm}$、$n = 50$，代 $d = \frac{50\times589.3\times10^{-6}\times50.0}{2\times10.0} \approx 7.36 \times 10^{-2}\,\text{mm} = 73.6\,\mu\text{m}$，结果保留三位有效数字。

3-5 · 电桥拟合斜率与泊松比

错法　把拟合斜率 k 的单位 mV/mm 直接代入含 SI 量的理论式，不做单位换算；或在换算时把 mV/mm 与 V/m 的数值比写成 10^{-3}。

机理　理论式 $k=\frac{4(R_s+R_4)L}{(1+2\mu)R_sU_0}$ 中长度、电阻、电压均为 SI 单位，斜率须用 V/m；换算关系是 1 mV/mm = 1 V/m（毫对毫、毫对毫米同时约去），数值不变，不是乘 10^{-3}。代入前还须先由桥臂电阻比定出 R_s、R_4，不能把待测臂电阻直接当 R_s。

正解　最小二乘得 $k=(3.82\pm0.06)\times10^{-2}$ mV/mm $=(3.82\pm0.06)\times10^{-2}$ V/m；由 $R_4=R_3R_2/R_1-R_s$ 定桥臂，代 $U_0=0.400$ V、$L=1.150$ m 解出 $\mu\approx0.27\pm0.01$。

4-10 · 八峰配对与磁场反演

错法　把八个峰随意两两配对反演磁场；或待测场与偏置场量级相当时直接反演差分，不扣除共模漂移。

机理　第 i 个取向的一对峰位于 $\nu_0\pm\gamma|B_i|$，反演前必须先把八峰分成四对：取峰对中心最接近、散布最小的对称配对，再按符号分支条件指派到四个取向，代入投影反演式。配对错了，四个投影符号全错，三分量随之失真。待测场远小于偏置场时，直接反演会把偏置场反演的误差放大到待测场上，更稳妥的是用两谱（有/无待测场）峰位差分。

正解　按中心散布仅 4.4 MHz 的配对取半间距，得四个投影 $41.1, 29.8, 18.9, 7.9\,\mu$T，反演偏置场 $\vec{B}_0\approx(34.5,-47.2,21.9)\,\mu$T，$|\vec{B}_0|\approx62\,\mu$T；待测场由两谱差分得到，约 $1\,\mu$T 量级、方向近轴向。