

第 23 届 CPHOS 物理竞赛联考

实验试题

本试题于 2024 年 9 月 5 日 8:00 发布，最后更新于 2024 年 9 月 4 日 23:08。

CPHOS 物理竞赛联考是开放性公益性的考试，有意向参与的教师和学生可以关注“CPHOS”微信公众号进行报名，报名后方可参与联考。请使用“CPHOS 物理竞赛联考”微信小程序完成答题卡上传、阅卷、成绩查询等操作。联系方式见试题末尾。

答题卡上传

2024/9/5 16:00 - 2024/9/9 10:00

阅卷

2024/9/10 12:00 - 2024/9/14 18:00

非正式成绩

2024/9/14 20:00

成绩申诉

2024/9/14 20:00 - 2024/9/15 18:00

正式成绩

2024/9/15 22:00

考生须知

1. 实验试题共 6 页，实验答题卡共 2 页，答题时间 60 分钟，试题满分 80 分。
2. 请在答题卡的指定答题区域内答题，试题和草稿纸上的内容将不会作为评分参考，不可申请答题卡加页。
3. 若发现试题存在问题，请向领队（教练）反映，由其转达至相关微信群聊。
4. 试题答案及相关分析均会在官方网站 www.cphos.cn 上发布。

A. 光栅实验（45 分）

光栅又称衍射光栅，狭义上，由大量等宽等间距的平行狭缝构成的光学器件称为光栅。光栅与数码科技与传统印刷的技术结合，能在特制的胶片上显现不同的特殊效果。在平面上展示出栩栩如生的立体世界，电影般的流畅动画片段。光栅与棱镜一样，是重要的分光元件，它可以把入射光中不同波长的光分开，利用光栅分光制成的单色仪和光谱仪已广泛应用。下面我们将通过各种方法测量光栅的光栅常数。

1. 分光计测量光栅常数

实验仪器：分光计一台（包括平行光管、望远镜、载物台等结构），光栅（标称值 2000 线/mm）（光学面置于塑料凹槽内，由左右两个平行螺丝卡在凹槽内，如图 a.1），正三棱镜一个（用于调平分光计），钠光灯（钠光光源为双线光源，波长 $\lambda_1 = 589.0 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 589.6 \text{ nm}$ ，通常无法辨别时取平均值作为钠光波长），汞光灯。

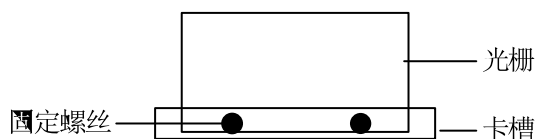


图 a.1 光栅示意图

A.1 (20 分)

A.1.1 虽然已经通过三棱镜将分光计调整至工作状态，但将光栅放置在载物台上时，分别出现了以下两个意外现象，请分别给出原因，并一同说明如何调节，为表述清晰，需同时画出光栅在载物台上的摆放位置。

(1) 打开望远镜中的绿色光源，希望通过光栅面看到反射像，但在自准直方向附近旋转望远镜，找不到反射像。

(2) 打开汞光灯，将其放置在平行光管后方，平行光管的光正入射在光栅上，发现其光谱线虽然竖直，但随着望远镜逐渐向左、右侧偏离自准直方向时，光谱线均逐渐偏下。

A.1.2 通过上问的操作，已经使谱线达到可观测状态，但是通过光栅反射的绿十字像有多重像使之模糊不清，且每个重影亮度相近。实验员列举了以下原因，请在其中选择出产生上述现象的合理的原因。

- A 绿色光源不是单色光，通过光栅反射发生了色散。
- B 光栅在螺钉力矩的作用下产生了弯曲。
- C 光栅上有污渍，使光栅的一部分无法反射光线。
- D 望远镜物镜对绿色光存在非理想成像的现象。

A.1.3 给出 $k = 1$ 级谱面的最小偏向角法利用钠光灯测量光栅的光栅常数 d 的原理，说明是否需要测量更高级 $(|k| \geq 2)$ 谱面，并给出理由。

A.1.4 除了光栅可以将各个波长的光分开外，三棱镜也可以通过色散分离不同波长的光，且当使用三棱镜分光时相较于光栅颜色更鲜艳明亮，请说明理由。

2. 激光与光栅滤波

当光源、衍射元件（如光栅、多缝、单孔等）与凸透镜依次排开时，光源经过凸透镜所成像的位置称为衍射元件的频谱面，这是因为在这个面上经过衍射元件的平行衍射光会汇聚干涉，展现衍射元件的空间频率信息。此时这个面上的衍射图样称为夫琅禾费衍射图样。此时借助空间滤波器在频谱面上滤掉或通过一些位置上的光，将携带部分信息的光通过并使用凸透镜成像汇聚，则将得到不同的“像”，此处成为衍射元件的像平面，这个过程就是空间滤波。

实验仪器：He-Ne 激光器一台，光具座一台，扩束镜一只，光阑（孔径可调）三个，凸透镜（ $f_1 \sim f_2 \sim f_3$ ）三只，光栅一个（ $a \sim 4d/5$ ），空间滤波器一个，偏振片两只，光强探测器一个（窗口大小约为 $d/3$ ），卷尺一把，刻度尺一把。

A.2 测定光栅常数 1 (18 分)

实验者认为光强探测器移动范围有限，无法探测足够多的衍射点，因此选择在墙面上呈现出光栅的夫琅禾费衍射图样来测定光栅常数。让平行光正入射到光栅上，在墙面上将呈现出连续的红点，表 a.1 是实验者测得红点位置的数据：

表 a.1 光栅实验数据表

$L = 428.7\text{cm}, \lambda = 632.8\text{nm}$

i	-5	-4	-3	-2	-1	0
x/cm	0.00	1.73	3.50	5.36	7.11	8.90
						0
i	1	2	3	4	5	
x/cm	10.66	12.43	14.19	15.93	17.73	

L 为光栅与墙面间的距离， i 为衍射级数。

A.2.1 画出实验装置图，并说明保证等高共轴的条件下，如何利用光阑确定其中元件的横向位置达到要求。

A.2.2 在答题卡上绘制并填充表格，并利用线性拟合计算出光栅常数。

提示：理论上认为 $\pm n$ 级与0级的距离是相等的，因此拟合函数应为 $y = kx$ 而非 $y = kx + b$ 。拟合系数 k 应当满足 $\Sigma(kx_i - y_i)^2$ 取极小值。

A.2.3 假设另有一个光栅是光栅常数为 d ，透光部分宽度为 a 的透射光栅，用激光直接正入射照射光栅，获得了如图 a.2 的衍射图，纵轴为相对光强，横轴为检测位置。定性估计激光直径 D 的范围，用本问中字母表示。

已知多缝衍射公式（ N 为缝数）：

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\sin N\beta}{\sin \beta} \right)^2$$

$$\alpha = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}, \quad \beta = \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}$$

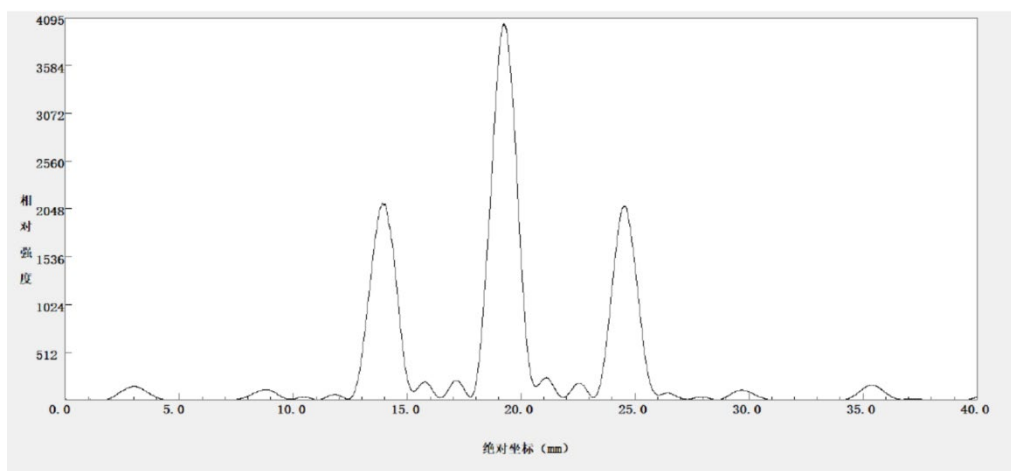


图 a.2 衍射图样

A.3 测定光栅常数 2（7 分）

如果确实光强探测器线度不够，且没有足够远的屏幕承接夫琅禾费衍射，我们也可以利用空间滤波测定光栅常数。使用空间滤波器，只通过 ± 1 级的衍射光，再使用光强探测器测量像平面上的光强分布，即可计算出光栅常数。

A.3.1 说明偏振片的作用。

A.3.2 实验中，光栅后方透镜焦距为 f_1 ，频谱面后方焦距 f_2 ，光强分布为空间周期为 δ 的明暗条纹，光栅、 f_1 之间的间距为 x_0 ，写出光栅常数的表达式。

A.3.3 比较使用空间滤波器和直接成像测量光栅像得到光栅常数两种方法的优劣。

B.迈克尔逊干涉仪实验 (35 分)

1.迈克尔逊干涉仪的调节

M-干涉仪是一种分振幅双光束的干涉仪。它的光路如图 b.1。从光源 S 发出的一束光射到一平行平面玻璃板 G1 上, G1 板的表面镀有半反射膜, 一般镀金属银, 这个半反射膜将一束光分为两束, 一束为反射光 I, 一束为透射光 II, 二者强度近于相等, 因而此板称为分束板。当激光束以 45° 角射向 G1 时, 被它分为互相垂直的两束光, 它们分别垂直射到反射镜 M1 和 M2 上, 经反射后这两束光再回到 G1 的半反射膜上, 又重新会集成一束光。由于反射光 I 和透射光 II 为两相干光束, 因此, 我们可在 E 方向观察到干涉条纹。G2 为一补偿板, 其物理性能与几何形状皆与 G1 全同(但不镀反射膜), G2 与 G1 平行, G2 的作用是补偿 G1 的玻璃板对光束中不同波长光波的色散, 从而保证光束 I 和 II 中不同波长的光线在观察屏 E 上一处相遇时的光程完全相等。

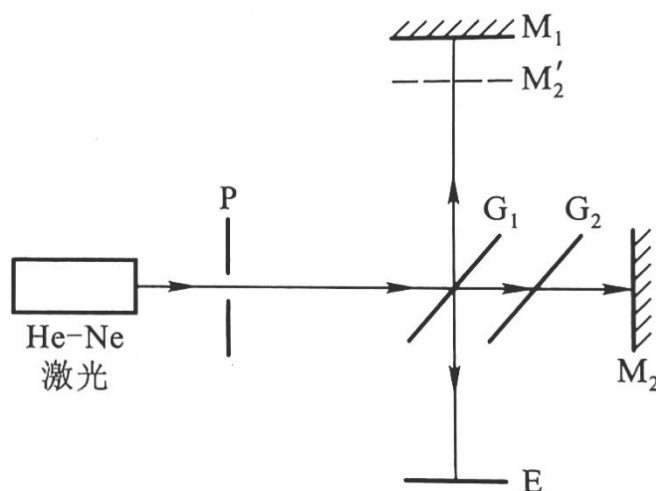


图 b.1 迈克尔逊干涉仪示意图

B.1 (7 分)

B.1.1 为了使补偿板能达到补偿光程的作用, 分束板的膜应镀在哪个表面? (左上/右下)

B.1.2 把分束板与补偿板连同其共同支架一起拆下, 利用远处的日光灯管, 依据光的反射原理将两板调节水平, 即可调节分束板和补偿板平行。请给出调节方法并画出调节光路图。

2.测定汞黄光双线的波长差

汞黄光含有两条谱线, 且其波长差远小于波长, 用这样的汞黄光去照明 M-干涉仪, 由于波长 λ_1 和 λ_2 分别各产生一套自己的干涉条纹, 而总强度是这两套条纹的非相干叠加。

B.2 (10 分)

B.2.1 视场中干涉条纹的可见度随光程差 (移动 M1 镜时) 如何变化?

在等光程附近, 单方向缓慢移动粗调手柄, 改变光程差, 可多次看到“拍”的现象及条纹可见度为零的点。依次记下可见度为零时, M1 镜的位置读数 d , 填入表格 b.1。

B.2.2 请根据表格数据给出 $\Delta\lambda$ 的测量公式, 并用最小二乘法拟合得 $\Delta\lambda$ 。

表 b.1 拍测量数据表

 $\lambda = 578.00 \text{ nm}$

拍的节点	1	2	3	4	5	6	7
d_i/mm	52.001	52.079	52.169	52.240	52.317	52.394	52.475

3. 白光等倾干涉

由于白光的相干长度很短，只有一到两个波长，即使将 M1 调节到和 M2 严格垂直也不会观察到白光等倾条纹，这是因为光源上一点经 M1、M2 成的虚像间隔太小以至等倾条纹半径太大，远远超出了视场范围。要想观察到白光的等倾干涉条纹，可以在 M2 镜前放置一个玻璃砖。

调节到等光程附近，在光路中加入一个玻璃砖 P。

B.3 (3 分)

B.3.1 由于白光干涉只能在零光程差附近观察到，为了抵消 P 引起的光程差，M1 要进一步朝_____移动。(上/下)

B.3.2 简述为什么加入玻璃砖可以看到白光等倾条纹。

在实验中发现，不加入玻璃砖，而是使分束板和补偿板不平行，也能观察到白光的等倾条纹。

B.4 (8 分)

B.4.1 将 δ 倾角造成的影响近似为一个类似玻璃板造成的效果，计算倾角为 δ 时的造成的 Δ_0 。

B.4.2 解释条纹为什么是椭圆形而不是正圆（提示：横方向的额外光程差与 θ^2 正相关，纵方向的额外光程差与 θ^2 负相关）。

为了研究条纹的颜色特征，需要考虑色散的因素，对照明光我们约定一个中心波长，其对应的波数为 k_0 ，设光源的归一化光谱函数为 $I(p)$ ，其中 $p = k - k_0$ 。根据柯西公式，

$$n(p) = A + \frac{B}{(2\pi)^2} (k_0 + p)^2 + \frac{C}{(2\pi)^2} (k_0 + p)^4$$

因为 C 很小，忽略第三项，再令 $n_0 = A + \frac{B}{(2\pi)^2} k_0^2$ ， $\Delta n = \frac{B}{(2\pi)^2} k_0^2$ ，则，

$$n(p) = n_0 + \Delta n \left(2 \frac{p}{k_0} + \frac{p^2}{k_0^2} \right)$$

仍然将 δ 倾角造成的影响近似为一个等厚玻璃砖，再将 Δ_0 近似到 n 的一阶项：

$$\Delta_0 \approx d_0 + d_1 n$$

计算得某一波长的光源衬比度近似为，

$$\gamma(x) \approx \sqrt{\frac{\pi k_0}{6 \Delta n d_1}} f\left(\frac{-k_0(x + 2 \Delta n d_1)}{6 \Delta n d_1}\right)$$

其中 $f(p)$ 为此波长的光的归一化光谱函数（在 $p = 0$ 处取极大值）， x 为 M_1 偏离原零光程差位置的长度，以远离分束板为正方向。

B.5 (7 分)

B.5.1 对于 M1 镜的位置存在一个分界点 x_0 ，在此处条纹暗纹较黑、亮纹没有明显颜色，当 $x > x_0$ 时暗纹位置偏绿、亮纹位置偏红，而当 $x < x_0$ 时条纹呈现暗纹位置偏红、亮纹位置偏绿。请根据公式解释该原因。

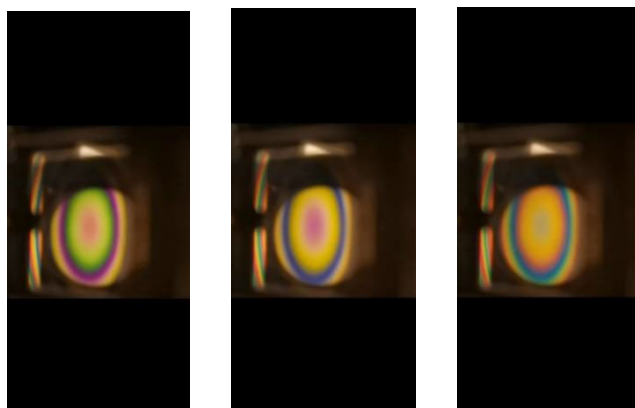
B.5.2 将三幅图中的 x 从大到小排序。

图 b.2 实测图，从左至右为 (A) (B) (C)

备注：(A) 从外到内依次为亮条纹、红色暗条纹、亮条纹

(B) 从外到内依次为亮条纹、暗条纹（黑色）、亮条纹

(C) 从外到内依次为亮条纹、绿色暗条纹、亮条纹

版权信息

命题人

胡仕豪 王天齐

审题人

龚炳瑞 肖亦铖

联系方式

微信公众号
CPHOS官方网站
www.cphos.cn

CPHOS 论坛

邮箱

service@cphos.cn

微信小程序

CPHOS 物理竞赛联考