

求真物实·学业领航

光学期末复习

Bilibili~@南窗鹧鸪

Updated: 2026.01.02



第一排从左至右：牛顿、惠更斯、菲涅尔
第二排从左至右：托马斯·杨、麦克斯韦、爱因斯坦

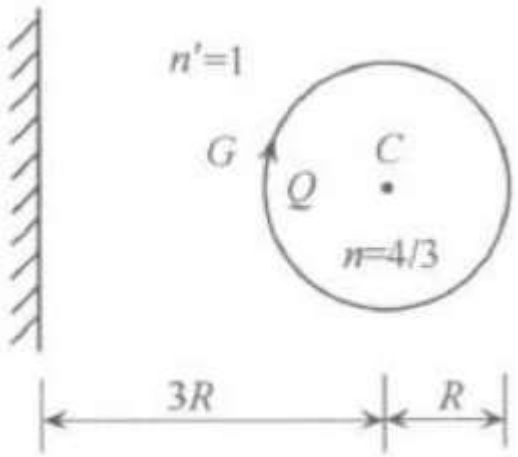
目录

1 几何光学
2 干涉
3 衍射
4 偏振与晶体光学
5 色散、散射与吸收
6 量子光学

几何光学

鱼缸的多次成像

在直立的平面镜前放置一个半径为 R 的球形玻璃鱼缸，缸壁很薄，其中心距镜面 $3R$，缸中充满水，远处一观察者通过球心，并以镜面垂直的方向注视鱼缸。一条小鱼在离镜面最近处以速度 v 沿缸壁游动。求观察者看到的鱼的两个像的相对速度。水的折射率 $n=\frac{4}{3}$。

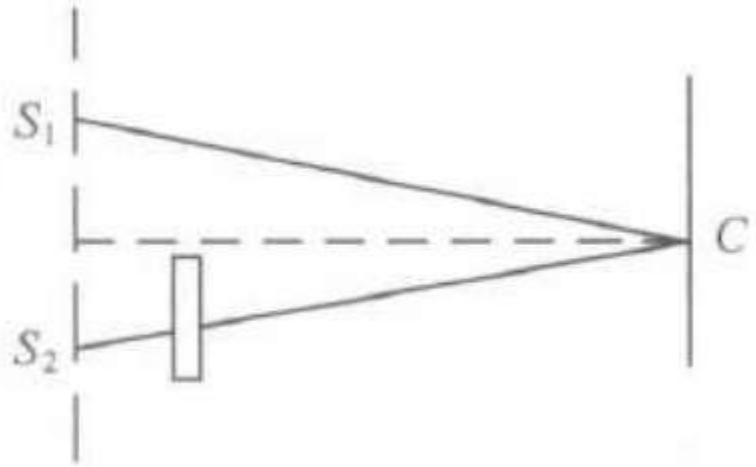


干涉

折射率的测量

利用双缝干涉装置测量水的折射率：如图所示，在单色光杨氏双缝实验的一个光路中放置一个装有水的薄壁容器，容器的长度可调节，容器壁对光程的影响可忽略。将容器的长度从0开始缓慢增加至 d，使得光屏中心处首次由亮条纹变成暗条纹。写出水的折射率表达式。已知光的波长为λ。

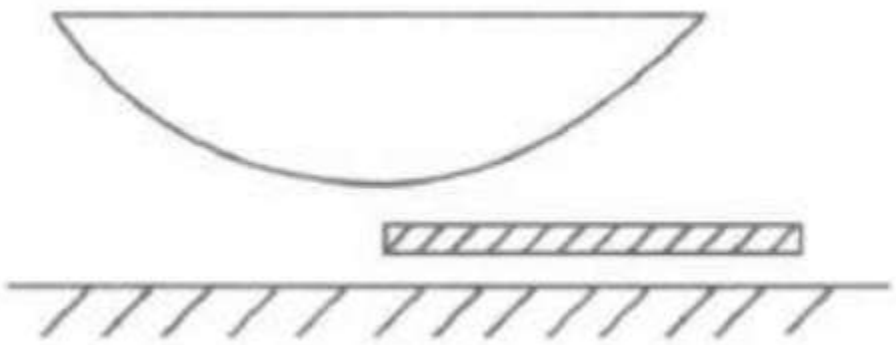
【思考】这种测量方法得到折射率精确度高吗？利用本题的原理，给出一种可降低测量误差的数据处理方式。



折射率的测量

利用迈克尔孙干涉仪测量空气的折射率：在迈克尔孙干涉仪的一臂放入一长度为 $l = 5.00\ \mathrm{cm}$ 的透明容器，容器壁与光束垂直。若缓缓把空气抽空，将看到等倾条纹在中心陷入49.5个。已知激光波长为5890 Å，求空气的折射率。

利用牛顿环测量空气的折射率：如图所示，一半径为 R 的凸透镜放置在玻璃砖上方，凸透镜的顶点距玻璃砖高度为 H。在玻璃砖插入一厚度为 d 的透明片，使其恰好覆盖了凸透镜与玻璃砖之间一半的空间。玻璃砖上的干涉条纹是怎样的？如何通过干涉条纹得到透明片的折射率？给出折射率 n 的计算公式，已知光的波长为 λ。



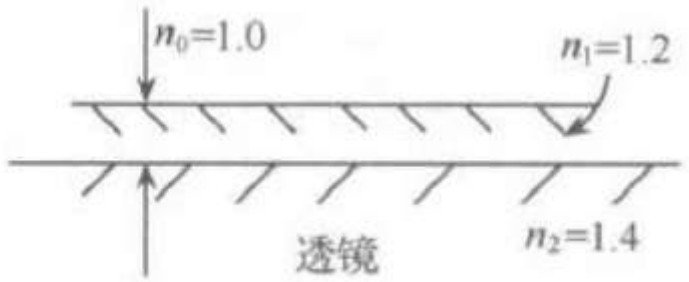
法布里-珀罗腔的选频作用

法布里-珀罗腔是光学实验中常用的选频装置。在实验中，我们可以通过控制法-珀腔的腔长、折射率、反射层的反射率，将白光转化为特定波长的单色性强的光。

1. 一般来说，仅用一个法-珀腔无法同时得到单一特定波长且单色性强的光，结合相关公式解释其原因。
2. 一束白光依次经过两个法-珀腔。第一个法-珀腔反射层的反射率$R_1 = 0.99$，腔长$d_1 = 0.25\ \mu\mathrm{m}$，折射率$n_1 = 2.0$；第二个法-珀腔反射层的反射率$R_2 = 0.80$，$d_2 = 0.125\ \mathrm{mm}$，$n_2 = 1.665$。求最终出射光的波长及不确定度。
3. 利用上一问中得到的单色性较好的单色光，将光束射入迈克尔逊干涉仪中，可以实现长度的精密测量。此装置测量长度的最大量程为多少？移动迈克尔逊干涉仪的测量臂，条纹从最清晰到达到最大量程的过程中，共可以看见几次清晰的条纹？

增透膜的设计

为减少对 $\lambda = 5000\,\text{Å}$ 光的反射，一透镜上镀了折射率为 1.2 的薄膜，透镜玻璃的折射率为 1.4。
(1) 使反射光的强度减到最小时镀层的最小厚度是多少？
(2) 在上面的例子中反射光的强度很小但不是零，解释之。需要改变什么，改变多少，才能使反射光强度降为零？注：当光从折射率为 n_1 的介质射入折射率为 n_2 的介质，反射系数为 $\left[(n_2 - n_1)/(n_2 + n_1)\right]^2$。

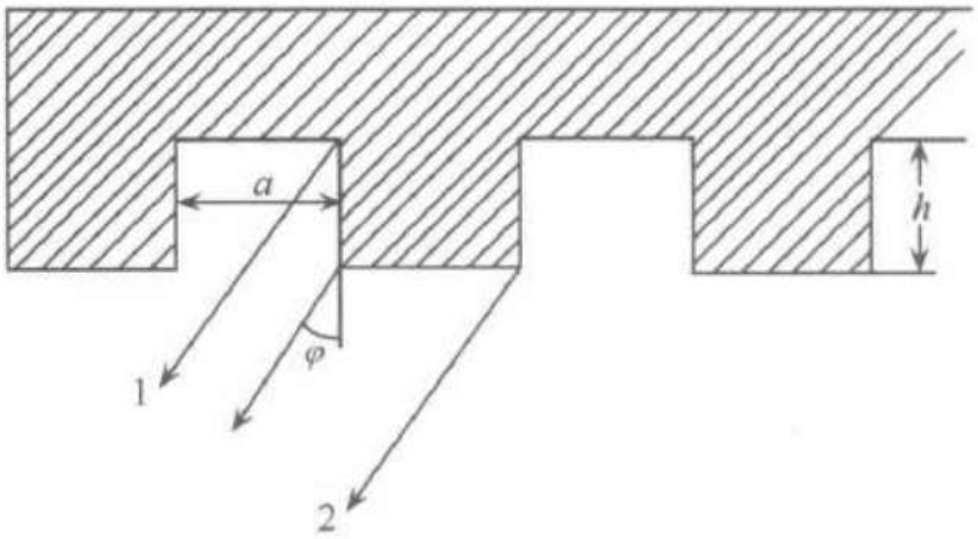


衍射

*类相控阵列的题目，略。

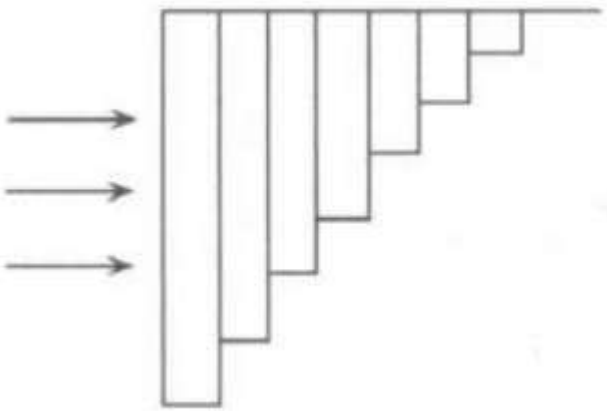
“凹凸光栅”的夫琅禾费衍射

一个透明的周期性物体其横截面如图，用单色平面波垂直照明，考虑透射后衍射光分布。设周期为 d，凸部和凹部宽度都为 $a = d/2$。在给定折射率 n 的条件下，适当选取凹陷深度 h，使得第一级主极大有最大强度。试问零级主极大的强度 I_0 有多大？



迈克尔逊阶梯光栅

迈克耳孙阶梯光栅是由10块 $n = 1.5$、厚度 $d = 2\,\mathrm{cm}$ 的玻璃片组成的玻璃片堆，相邻玻璃片错开约 $1\,\mathrm{mm}$。是否可以利用此光栅发现氢原子谱线 $H_\alpha(\lambda = 6563\ \text{Å})$ 的双线结构？已知双线的波长差 $\Delta\lambda = 1.4 \times 10^{-9}\,\mathrm{cm}$。



菲涅尔衍射与半波带

单色平面光波波长 $\lambda = 5000\,\text{Å}$，正入射到如图所示的衍射屏上，$r_1 = \sqrt{2}\,\text{mm}, r_2 = 1\,\text{mm}$，轴上观察点离衍射屏$2\,\text{m}$，计算观察点处的振幅和强度。



汇聚透镜对能量的汇聚作用

焦距 $f = 50\,\mathrm{cm}$、直径 $D = 5\,\mathrm{cm}$ 的凸透镜，将 $\lambda = 6328\,\text{Å}$ 的 He–Ne 激光束聚焦，光束界面直径 $D_1 = 2\,\mathrm{cm}$，求焦点处光强是激光束入射光强的多少倍？并估计焦点光斑的大小。

照相机的衍射斑与散焦斑

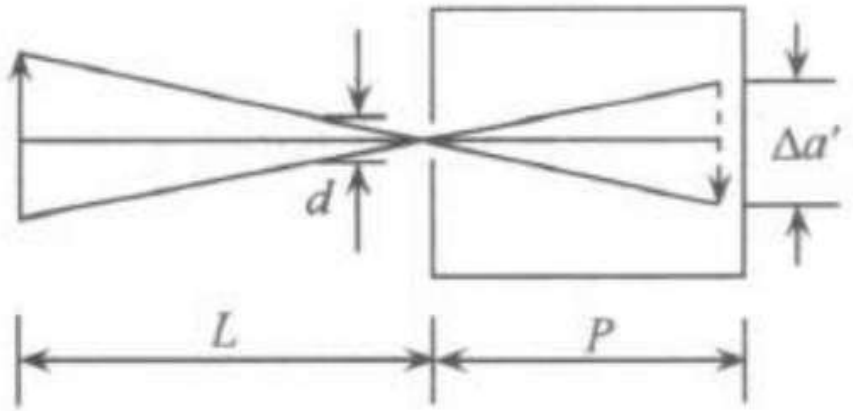
一个良好的照相机，焦距 60 mm，对 15 m 处的物精确地聚焦，孔径多大时，可见光的衍射斑粗略地与一星体（位于无限远）散焦斑相等？

针孔照相机的分辨性能

一个由暗盒组成的针孔照相机，其小孔直径为 d，其暗盒中像成在小孔后距离为 P 的感光胶面上，物体位于小孔前 L 处，所用光的波长为 λ。

（1）估计成像清晰时小孔直径的大小。

（2）若使用（1）中算出的小孔，试问物体上两点之间的最小距离 D 为多大时，该两点的像是可分辨的？



显微镜的分辨性能

一显微镜物镜的数值孔径 $\mathrm{N.A.}=0.65$，物与物镜之间为空气，对人眼最灵敏的黄绿光的波长为 $\lambda=550\ \mathrm{nm}$。

（1）试求显微镜的最小分辨距离；

（2）换用油浸物镜，油的折射率 $n=1.6$，仍用黄绿光，试问最小分辨距离变为多少？

（3）仍用普通物镜，但改用 $\lambda=420\ \mathrm{nm}$ 的光，试问最小分辨距离变为多少？

（4）为充分利用第（2）问的分辨本领，试问显微镜的放大倍数（视角放大率）应设计为多大？设人眼瞳孔直径为 $2.5\ \mathrm{mm}$。

常见光学元件的分光性能

根据以下数据比较光栅、棱镜、法布里-珀罗腔三者的分光性能：(1) 分辨本领；(2) 色散本领；(3) 自由光谱范围。

光栅：宽度 $D = 5\,\mathrm{cm}$　刻线密度 $\frac{1}{d} = 600$ 条/mm

棱镜：底边 $b = 5\,\mathrm{cm}$　顶角 $\alpha = 60°$　折射率 $n = 1.5$　色散率 $\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}\lambda} = 0.6 \times 10^3/\text{Å}$

法布里-珀罗腔：腔长 $h = 5\,\mathrm{cm}$　反射率 $R = 0.99$

偏振与晶体光学

晶体偏振器与波晶片

正交尼科耳棱镜 N_1 与 N_2 之间插入一晶片，其主截面与第一个尼科耳棱镜 N_1 夹角 $\theta = 15°$。晶片对波长为 λ 的光的 o 光、e 光折射率分别为 n_{o} 和 n_{e}。若一束波长为 λ 的自然偏振光依次射入该装置，透过第二个尼科耳光强极大，求晶片的最小厚度以及透射光与入射光光强之比。已知 $\lambda = 0.600\ \mu\mathrm{m}$，$n_o = 1.543$，$n_e = 1.552$。

偏振光的调制（一）

一强度为 I_0 的右旋圆偏振光垂直通过 $\lambda/4$ 片（此 $\lambda/4$ 片由方解石做成，o 光和 e 光在晶片中的光程差正好是 $\lambda/4$），然后再经过一块主截面相对于 $\lambda/4$ 片向右旋转 $15°$ 的尼科耳棱镜，求最后出射的光强（忽略反射吸收等损失）。

偏振光的调制（二）

两晶片由相同材料制成。第一块晶片厚度为 d，其快、慢轴均平行于晶片表面。第二块晶片为四分之一波片，两晶片的快轴夹角为 $45°$。波长为 λ 的单色线偏振光垂直照到第一块晶片，相继透过两晶片。入射光偏振方向与 $\frac{1}{4}$ 波片的快轴一致。求从第二块晶片透出的光的偏振状态。

偏振光的检验

用一偏振片检验椭圆偏振光时，透过偏振片的光强将随偏振片的旋转角度变化。对于已设定的坐标系统，已知合成为该椭圆偏振光的两个垂直振动之间的相位差为 δ。

（1）试导出透射光强随偏振片旋转角度变化的普遍公式；

（2）试确定椭圆偏振光长、短轴的方位以及相应的透射光强的极大值和极小值。

含偏振片的杨氏双缝干涉实验

如图所示，在杨氏干涉实验装置中，以单色自然光照射小孔 S，幕上将出现杨氏干涉条纹，在中央附近干涉极大的强度相对均匀，在较大范围内则将表现出单缝衍射的影响。

（1）若在 S 后放置一偏振片 P，试问幕上的干涉条纹是否变化？

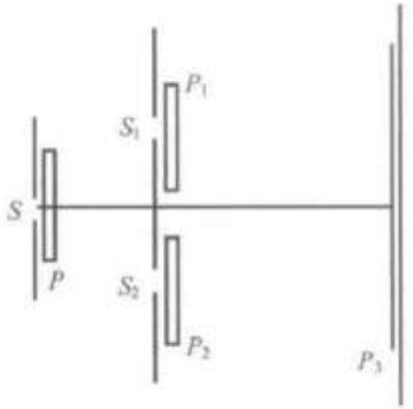
（2）若在双孔 S_1 和 S_2 后再各加一偏振片 P_1 和 P_2，且使 P_1 和 P_2 的透光轴与 P 的透光轴各夹 $45°$ 角。试问幕上的光强分布如何？

（3）若第（2）问中偏振片 P_1 与 P 的透光轴平行，P_2 与 P 的透光轴夹角为 θ，幕上的干涉条纹是否变化？

（4）若在幕上还放置一偏振片 P'，其透光轴与 P 的透光轴平行，试问幕上的光强分布如何？

（5）在第（4）问中，若 P' 与 P 的透光轴相互垂直，试问幕上的条纹分布有何变化？

（6）在第（4）问中，若去掉偏振片 P，试问幕上的光强分布如何？



波晶片的“滤波”作用

一块厚度为 $0.04\ \mathrm{mm}$ 的方解石晶片，其光轴平行于表面，将它插入正交偏振片之间，且使主截面与第一偏振片的透振方向成 θ 角（$\theta \neq 0°, \neq 90°$）。试问哪些光不能透过该装置？已知方解石的 $n_o = 1.658,\ n_e = 1.486$。

偏振光的干涉（一）

强度为 I_0 的单色平行光通过正交尼科耳棱镜N_1, N_2。现在两尼科耳棱镜之间插入一$\lambda/4$片，其主截面与第一尼科耳棱镜的主截面成 $60°$ 角。求出射光的强度（忽略反射、吸收等损失）。

偏振光的干涉（二）

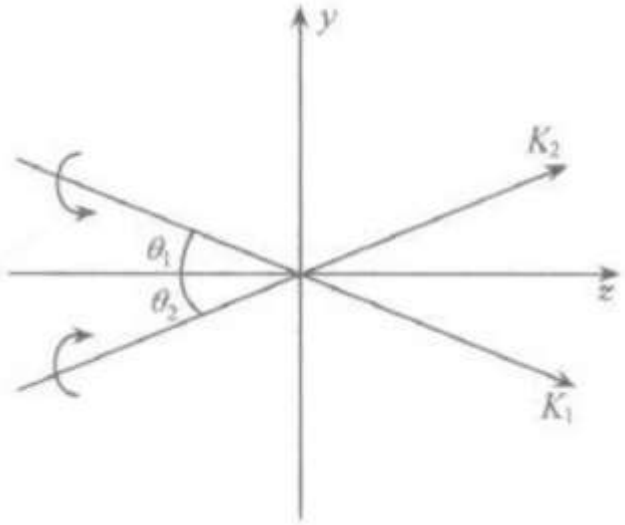
在偏振光干涉的装置中，两尼科耳棱镜的主截面夹 $60°$ 角，两者之间插入一顶角 $\alpha = 30'$ 的石英尖劈，其光轴平行于表面，尖劈的主截面与两尼科耳棱镜的主截面都成 $30°$ 角。以波长为 $589.3\ \mathrm{nm}$ 的钠黄光垂直入射。求：

（1）透射光的光强分布；

（2）干涉条纹的反射度。已知石英的折射率 $n_o = 1.54424$，$n_e = 1.55335$。

偏振光的干涉（三）

如图所示，两束同频率的平行光与 z 轴的夹角分别为 θ_1 和 θ_2，它们分别为左旋圆偏振光和右旋圆偏振光，光强分别为 I_1 和 I_2，同时沿 yz 平面入射到位于 xy 平面的屏幕上。试求屏幕上的干涉强度分布和反衬度。



克尔效应

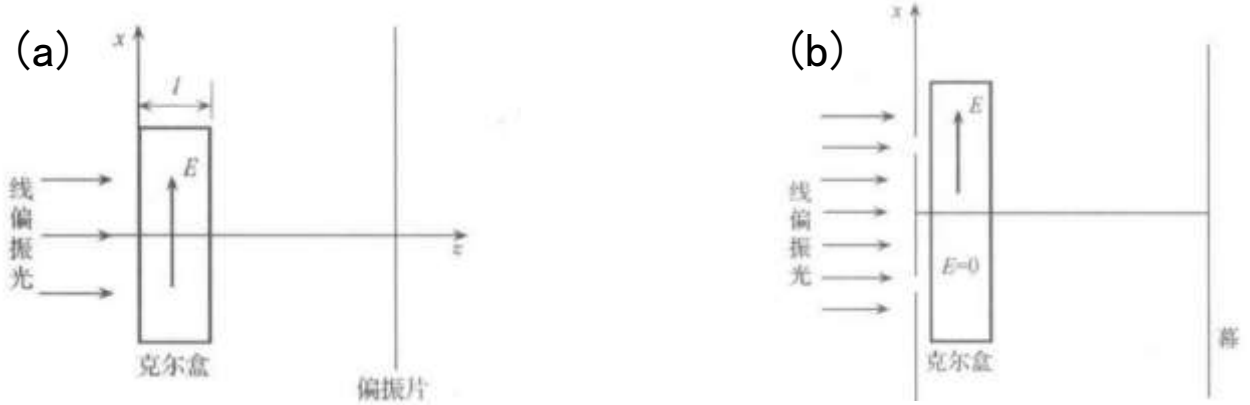
波长 $\lambda = 500\,\mathrm{nm}$ 的线偏振光沿 z 方向传播，其电矢量振动方向与 x 轴夹 $45°$ 角，通过一克尔盒，盒长 $l = 1.0\,\mathrm{cm}$，盒内介质在 x 方向的电场作用下变为各向异性，主折射率之差为

$$n_x - n_y = KE^2$$

式中 E 为电场强度，比例系数 $K = 2.5 \times 10^{-6}\,\mathrm{m^2/V^2}$，$n_x$ 和 n_y 分别是振动方向为 x 和 y 时的折射率。

（1）如图(a)所示，在克尔盒后放置一偏振片，其偏振化方向与入射光的振动方向垂直。试求透过偏振片的光最强时电场强度 E 的最小值。

（2）如图(b)所示，将上述克尔盒放置在杨氏干涉装置的双缝之后，克尔盒的上半部加 x 方向的电场，下半部的电场强度保持为零。连续改变上半部的电场强度，幕上干涉条纹的反衬度将出现周期性的变化。忽略光在克尔盒中的折射偏离。试求反衬度 $\gamma = 0$ 和 $\gamma = 1$ 时对应的电场强度。

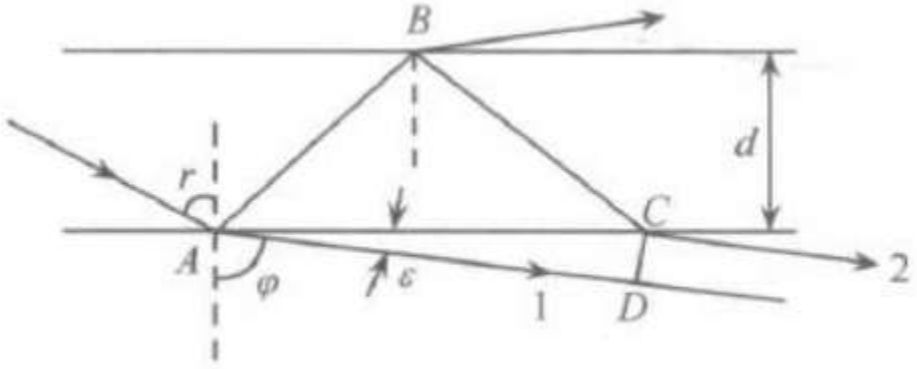


色散、散射与吸收

陆末-格尔克板

陆末-格尔克板（Lummer–Gehrcke plate）是一种利用多次反射实现高色散和高分辨率的光学干涉元件，常用于光谱分析。

1. 如图所示，陆末-格尔克板的厚度为 d，折射率为 n。考虑到物质的色散，求板的角色散本领。光束的出射角 ε 可以认为是小的。
2. 陆末-格尔克板长 $L = 30\ \mathrm{cm}$，厚 $d = 1\ \mathrm{cm}$，折射率 $n = 1.52$。试对氢原子谱线H_β计算色散区域和分辨本领。已知 $\lambda = 4961\ \text{Å}$，$\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}\lambda} = 9.6 \times 10^{-6}\text{Å}^{-1}$。



量子光学

光/电子探测的分辨率

如果要观测一个大小为2.5 Å的物体，可用
（1）光子的最小能量是多少？
（2）电子的最小能量是多少？

光子与电子的碰撞

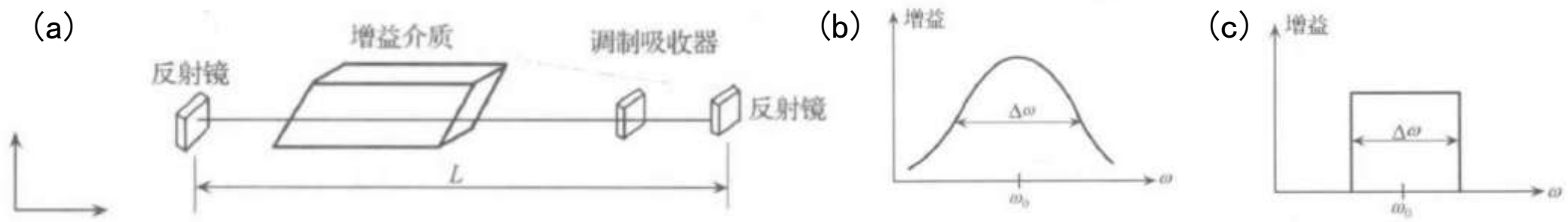
一个光子“迎头”“击中”一个静止的电子，并沿着入射方向反冲回来。若该电子以βc离开，且$\beta \ll 1$，试证电子最终动能与光子的最初能量之比恰好是β（把问题当非相对论处理）。

锁模激光器产生超短脉冲

研究瞬间现象的超短光脉冲是一种新技术，正在广泛地应用到物理学各领域中去。超短脉冲是用模式锁定的激光器产生的，本题就要研究这种方法。

锁模激光器是一个由横向尺寸为 d 的平面镜组成的一个长 L 的光学腔（图a），放大介质（可以是固体、液体或气体）特征是具有某种增益谱（图b），只有在这个谱带内光才被放大。为简化计算，假定其具有矩形增益谱（图c）。具体地考虑钕玻璃，其 $\omega_0 = 1.8 \times 10^{15}\ \mathrm{s}^{-1}$，$\Delta\omega = 6 \times 10^{12}\ \mathrm{s}^{-1}$，并取激光器长为 $L = 150\ \mathrm{cm}$。

（1）试求出此腔内的两相邻纵向模的频率间隔 $\Delta\omega_L$，此处忽略色散以及调制吸收器的影响，为简单起见取放大介质折射率为 1。



锁模激光器产生超短脉冲

（2）矩形的增益谱将导致所有在它增益频率范围内模具有相等的振幅，假定每个模的强度为 I_0，问当不同模之间相位差 ϕ_n 是随机分布时，总强度为多少?

（3）若在腔中插入一调制吸收器，则可以使所有模式的相位锁定为一致的值，从而使这些行波相长干涉，产生出光脉冲。试找出在相位锁定或模式锁定时强度与时间的关系。脉冲宽度、间隔、峰值强度(用 I_0 表示)分别为多少？只考虑一种偏振光。

* 以下与题目无关,但可作为你的参考材料. 调制吸收器具有与时间有关的吸收系数,如 $a = a_0 + a_2 \cos \omega t$，任何腔模与此调制器相位不同则被削减,因此只有锁定相位的模被放大。

* 2018年， Gérard Mourou、 Donna Strickland因啁啾脉冲放大（CPA）技术获得诺贝尔物理学奖，锁模激光器即为CPA的种子光源。

参考文献：魏志义,王兆华,滕浩,等.啁啾脉冲放大技术——从超快激光技术到超强物理世界[J].物理,2018,47(12):763-771.

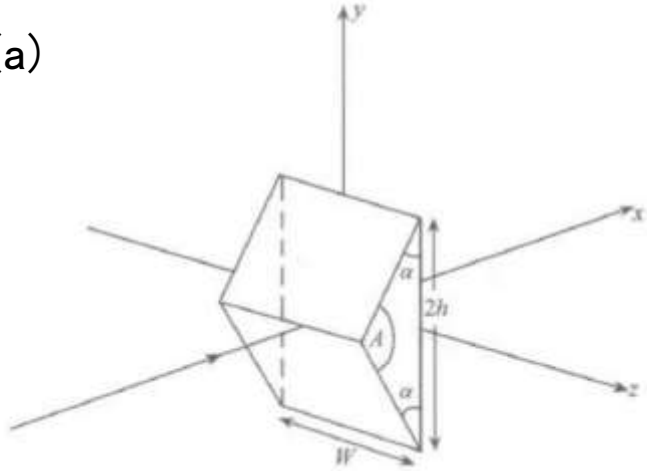
光镊技术

阿瑟·阿什金因“光镊技术”被授予2018年诺贝尔物理学奖。下面，我们在普通物理的范围内，以光场中的棱镜为例，理解光镊技术的原理。

激光对透明棱镜的作用力。一束强激光通过小的透明物体时，由于折射作用而对物体产生相当的作用力。为对此有所理解，取一个很小的玻璃三棱镜，其顶角为 $A=\pi-2a$，底边长为 $2h$，厚度为 W，折射率为 n，密度为 ρ。

设该棱镜处在一束沿水平 x 轴方向传播的激光之中（本题自始至终假定棱镜不发生转动，即其顶角总是对准激光束射来的方向，它的两个三角形侧面总是平行于 xy 平面，底面总是平行于 yz 平面（图a）。周围空气的折射率取为 $n_a=1$，并设棱镜各面均镀有防反射膜，确保不发生反射。

(a)

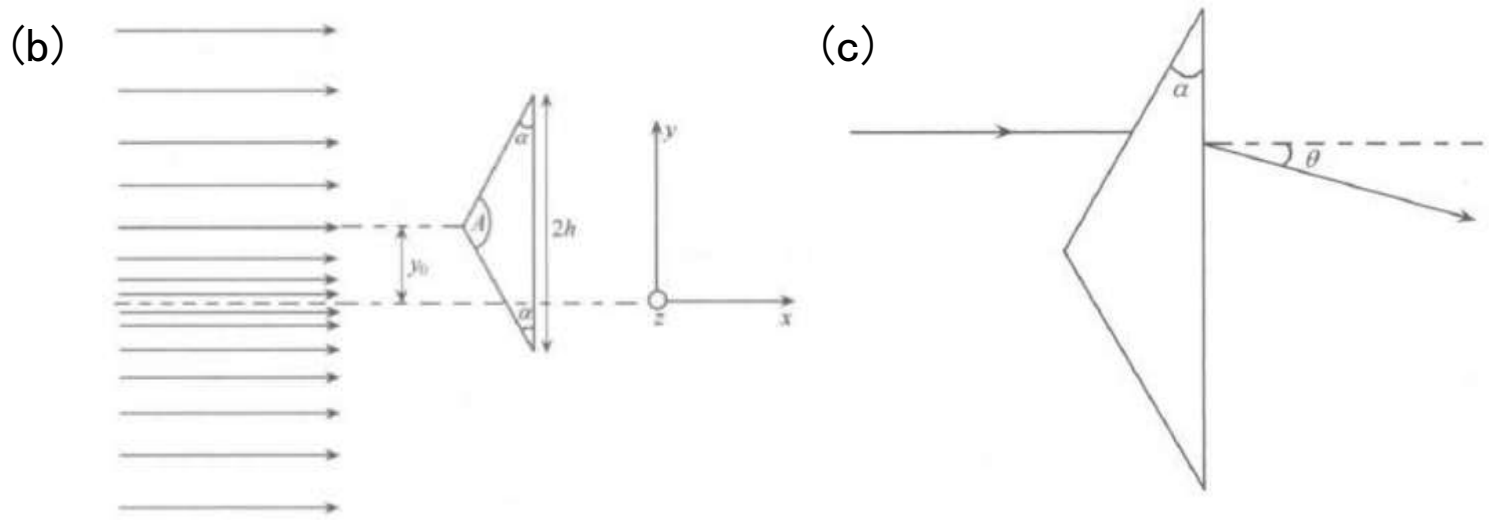


光镊技术

激光束的强度沿 z 轴方向均匀分布，但是从 x 轴开始，沿 y 轴正、负方向的光强按线性关系减弱。在 $y=0$ 处强度最大，其值为 I_0，而到 $y=\pm 4h$ 处，光强降为零（图b）。（光的强度即为每单位面积的功率，单位是 $\mathrm{W/m^2}$。）

（1）在激光射到棱镜上表面时，参考题图c，试求偏转角 θ（用 α 和 n 表示）。

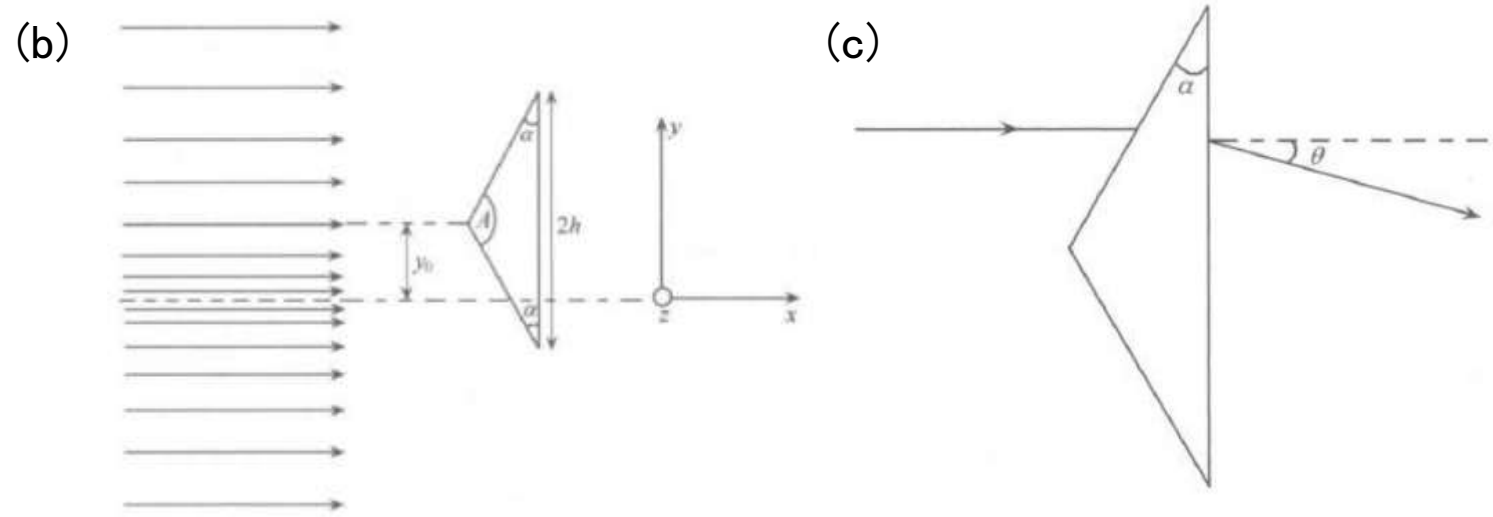
（2）将棱镜顶端由原来的位置 x 轴处沿 y 轴方向平移 y_0 量，且设 $|y_0|\leq 3h$，试用 I_0、θ、h、W 和 y_0 来表达激光作用在棱镜上的净作用力的 x、y 分量，做图表示出作用力在水平方向（x 轴方向）和竖直方向（y 轴方向）的分量随位移 y_0 的变化关系。



光镊技术

（3）设激光束在 z 方向的宽度为 $1\ \mathrm{mm}$，在 y 方向的宽度为 $80\ \mu\mathrm{m}$，棱镜的参量为 $a = 30°$，$h = 10\ \mu\mathrm{m}$，$n = 1.5$，$W = 1\ \mathrm{mm}$，$\rho = 2.5\ \mathrm{g/cm^3}$。当棱镜的顶端位于激光束对称面以下的 $y_0 = -h/2 (= -5\ \mu\mathrm{m})$ 处时，需要多少瓦的激光束功率才能使棱镜克服重力（朝 $-y$ 方向）的作用处于平衡状态？

（4）用与（3）中相同的棱镜和激光束，在没有重力的条件下做实验，且设定 $I_0 = 10^8\ \mathrm{W/m^2}$。移动棱镜使其顶端静止地处于 $y_0 = h/20$ 的位置，而后释放棱镜，它将发生振动，试求振动周期。



激光冷却原子

“激光冷却原子”的成功实验获得了1997年诺贝尔物理学奖。以下，我们在普通物理的范畴内研究其原理。为了高精度地研究孤立原子的性质，必须使它们几乎静止下来并能够在一个小的空间区域里停留一段时间。近年来一种被称为“激光致冷”的方法可以实现这一目的。其原理如下：

在一真空室内，一束准直的 Na^{23} 原子束（固体样品在 $10^3\,K$ 高温下蒸发得到）受一束高强度激光照射，如图a。选定激光频率，使速度为 v_0 的钠原子可对激光光子发生共振吸收。原子吸收光子后跃迁到能量为 E、能级宽度为 Γ 的第一激发态，如能级图（图b）。这时其速度有如下改变：

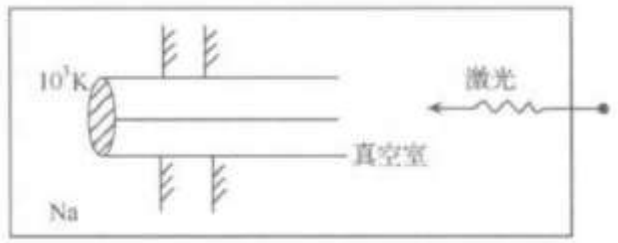
$$\Delta v = v_1 - v_0$$

随后该原子又发射光子并回到基态。在此过程中原子速度改变量为

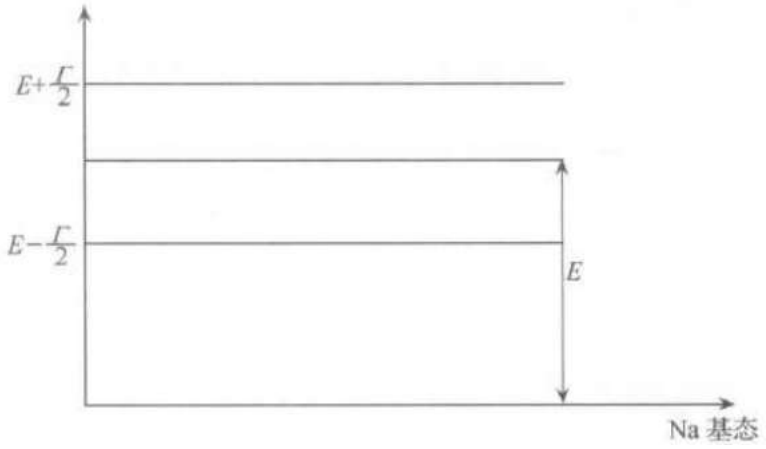
$$\Delta v' = v_1' - v_1$$

运动方向偏转为 φ，如图c。

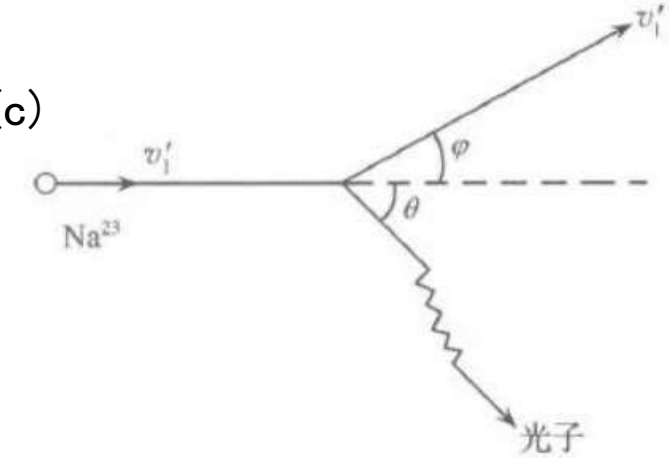
(a)



(b)



(c)



激光冷却原子

这一先吸收后发射的过程可进行多次。如不考虑偏转，把吸收和发射都当成沿直线方向，则原子速度的改变量达到某量 Δv 后，便不能再对频率为 ν_i 的激光发生共振吸收。这时需改变激光频率，使原子在新的速度下共振吸收，继续减慢其速度，直到近似静止。

作为过程的第一步近似，可以忽略原子的所有其他相互作用过程，只考虑光的吸收和再发射。并设激光很强，所以原子在基态的停留时间实际上可以不计。具体数据为

$$E = 3.36 \times 10^{-19}\,\mathrm{J}, \Gamma = 7.0 \times 10^{-27}\,\mathrm{J}$$

$$m_p = 1.67 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}, k = 1.38 \times 10^{-23}\,\mathrm{J/K}$$

k 为玻尔兹曼常量。

（1）为使原子束中动能等于该温度下原子平均动能的原子共振吸收光子，激光频率 ν 应为多少？经第一次吸收过程后，原子速度改变量 Δv_1 为多少？

（2）在多大速度间隔内 Δv_0 原子均可吸收第 1 问中所算出频率的光子？

（3）经过一次光子发射后，原子相对于发射前运动方向的最大偏转角 $\varphi_{\max}$ 是多少？

（4）若保持频率不变，原子速度减少量 Δv 最多能达到多少？

（5）为使初速度为 v_0 并沿直线运动的原子按第 1 问中所述方式减速，最后降到速度几乎为零，需经历多少次吸收事件？

（6）如一次吸收后伴随一次发射，但不考虑发射引起的速度变化。试问完成第（5）问所要求的减速过程需要多少时间？在这段时间内原子走过的路径 Δs 为多少？