

GUANGXUE XITI SIKAO TI JIEDA

GUANGXUE XITI SIKAO TI JIEDA

光学

习题思考题解答

钟锡华 骆武刚 邓淑琴 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

光学习题思考题解答/钟锡华,骆武刚,邓淑琴编著. —北京:北京大学出版社, 2006. 11

ISBN 7-301-10790-0

I. 光… II. ①钟… ②骆… ③邓… III. 光学-高等学校-解题
IV. O43-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 062029 号

书 名: 光学习题思考题解答

著作责任者: 钟锡华 骆武刚 邓淑琴 编著

责任编辑: 孙 琰 聂一民

标准书号: ISBN 7-301-10790-0/O · 0698

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021
出版部 62754962

电子邮箱: zpup@pup.pku.edu.cn

印刷者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

890 毫米×1240 毫米 A5 14.875 印张 426 千字

2006 年 11 月第 1 版 2006 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 24.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子邮箱:fd@pup.pku.edu.cn

作者前言

呈现于读者面前的这本《光学习题思考题解答》，是与《光学》（赵凯华、钟锡华编著，北京大学出版社出版，1984）配套的一本教学参考书。本书包含了 326 道习题和 197 道思考题的解答，与《光学》中的题目基本保持一致，稍有变动。《光学》曾获“国家教委全国高等学校优秀教材奖”国家级优秀奖（1988），至今仍被许多高校用做教材，也被不少科研院所选做研究生入学考试的指定参考书目。北京大学出版社时有接到读者来电，询问如何能获得《光学》的题解资料。在犹豫多年之后，我们还是决定将这本《光学习题思考题解答》付梓出版。愿它在分析、解决基础光学中众多问题时，能成为读者的一个好帮手。

钟锡华

于北京大学物理学院

2006 年 8 月 7 日 · 丙戌立秋

目 录

习 题 解 答

第一章 几何光学	(3)
§ 1 几何光学基本定律	(3)
§ 2 惠更斯原理	(16)
§ 3 费马原理	(19)
§ 4 成像	(20)
§ 5 共轴球面组傍轴成像	(24)
§ 6 薄透镜	(31)
* § 7 理想光具组理论	(37)
§ 8 光学仪器	(45)
* § 9 光阑	(50)
* § 10 像差	(57)
§ 11 光度学基本概念	(61)
* § 12 像的亮度、照度和主观亮度	(66)
第二章 波动光学基本原理	(71)
§ 1 定态光波与复振幅描述	(71)
§ 2 波前	(74)
§ 3 波的叠加和波的干涉	(76)
§ 4 两个点源的干涉	(78)
§ 5 光的衍射现象和惠更斯-菲涅耳原理	(88)
§ 6 菲涅耳圆孔衍射和圆屏衍射	(90)
§ 7 夫琅禾费单缝和矩孔衍射	(96)
§ 8 光学仪器的像分辨本领	(104)
§ 9 光的横波性与五种偏振态	(107)

§ 10 光在电介质表面的反射和折射 菲涅耳公式	(111)
第三章 干涉装置 光场的时空相干性	(124)
§ 1 分波前干涉装置 光场的空间相干性	(124)
§ 2 薄膜干涉(一)——等厚条纹	(133)
§ 3 薄膜干涉(二)——等倾条纹	(144)
§ 4 迈克耳孙干涉仪 光场的时间相干性	(145)
§ 5 多光束干涉 法布里-珀罗干涉仪	(150)
第四章 衍射光栅	(161)
§ 1 多缝夫琅禾费衍射	(161)
§ 2 光栅光谱仪	(172)
* § 3 三维光栅——X射线在晶体上的衍射	(177)
第五章 傅里叶变换光学	(183)
§ 1 衍射系统的屏函数和相因子判断法	(183)
§ 2 正弦光栅的衍射	(190)
§ 3 阿贝成像原理与相衬显微镜	(200)
* § 4 夫琅禾费衍射场的标准形式	(204)
* § 5 傅里叶变换 δ 函数	(207)
* § 6 空间滤波和信息处理	(219)
* § 7 点扩展函数与光学传递函数	(226)
第六章 全息术照相	(235)
§ 1 全息照相的过程与特点	(235)
§ 2 全息照相的原理	(235)
* § 3 全息术应用简介	(245)
* § 4 傅里叶全息图及其应用举例	(245)
第七章 光在晶体中的传播	(246)
§ 1 双折射	(246)
§ 2 晶体光学器件	(255)
§ 3 圆偏振光和椭圆偏振光的获得和检验	(258)
§ 4 偏振光的干涉及其应用	(259)

§ 5 旋光	(277)
第八章 光的吸收、色散和散射	(285)
§ 1 光的吸收	(285)
§ 2 色散	(285)
§ 3 群速	(291)
§ 4 光的散射	(293)
第九章 光的量子性	(296)
§ 1 热辐射	(296)
§ 2 光的粒子性和波粒二象性	(301)
§ 3 玻尔原子模型与爱因斯坦辐射理论	(308)
§ 4 激光的产生	(311)
§ 5 激光器对频率的选择	(311)
§ 6 激光的特性及应用	(312)

思考题解答

第一章 几何光学	(315)
§ 1 几何光学基本定律	(315)
§ 2 惠更斯原理	(320)
§ 3 费马原理	(321)
§ 4 成像	(321)
§ 5 共轴球面组傍轴成像	(323)
§ 6 薄透镜	(324)
* § 7 理想光具组理论	(328)
§ 8 光学仪器	(328)
* § 9 光阑	(330)
* § 10 像差	(330)
§ 11 光度学基本概念	(332)
* § 12 像的亮度、照度和主观亮度	(332)
第二章 波动光学基本原理	(334)
§ 1 定态光波与复振幅描述	(334)

§ 2	波前	(335)
§ 3	波的叠加和波的干涉	(339)
§ 4	两个点源的干涉	(341)
§ 5	光的衍射现象和惠更斯-菲涅耳原理	(345)
§ 6	菲涅耳圆孔衍射和圆屏衍射	(350)
§ 7	夫琅禾费单缝衍射和矩孔衍射	(359)
§ 8	光学仪器的像分辨本领	(365)
§ 9	光的横波性与五种偏振态	(367)
§ 10	光在电介质表面的反射和折射 菲涅耳公式	(369)
第三章	干涉装置 光场的时空相干性	(385)
§ 1	分波前干涉装置 光场的空间相干性	(385)
§ 2	薄膜干涉(一)——等厚条纹	(387)
§ 3	薄膜干涉(二)——等倾条纹	(395)
§ 4	迈克耳孙干涉仪 光场的时间相干性	(396)
§ 5	多光束干涉 法布里-珀罗干涉仪	(399)
第四章	衍射光栅	(403)
§ 1	多缝夫琅禾费衍射	(403)
§ 2	光栅光谱仪	(410)
* § 3	三维光栅——X射线在晶体上的衍射	(415)
第五章	傅里叶变换光学	(416)
§ 1	衍射系统的屏函数和相因子判断法	(416)
§ 2	正弦光栅的衍射	(416)
§ 3	阿贝成像原理与相衬显微镜	(417)
* § 4	夫琅禾费衍射场的标准形式	(426)
* § 5	傅里叶变换 δ 函数	(428)
* § 6	空间滤波和信息处理	(428)
* § 7	点扩展函数与光学传递函数	(431)
第六章	全息照相	(434)
§ 1	全息照相的过程与特点	(434)
§ 2	全息照相的原理	(434)

* § 3	全息术应用简介	(439)
* § 4	傅里叶全息图及其应用举例	(439)
第七章	光在晶体中的传播	(440)
§ 1	双折射	(440)
§ 2	晶体光学器件	(443)
§ 3	圆偏振光和椭圆偏振光的获得和检验	(445)
§ 4	偏振光的干涉及其应用	(451)
§ 5	旋光	(455)
第八章	光的吸收、色散和散射	(457)
§ 1	光的吸收	(457)
§ 2	色散	(457)
§ 3	群速	(457)
§ 4	光的散射	(457)
第九章	光的量子性 激光	(459)
§ 1	热辐射	(459)
§ 2	光的粒子性和波粒二象性	(460)
§ 3	玻尔原子模型与爱因斯坦辐射理论	(463)
§ 4	激光的产生	(463)
§ 5	激光器对频率的选择	(463)
§ 6	激光的特性及应用	(463)

习 题 解 答

第一章 几何光学

§ 1 几何光学基本定律

1. 太阳与月球的直径分别是 $1.39 \times 10^6 \text{ km}$ 和 $3.5 \times 10^3 \text{ km}$, 设日全食时太阳到地面的距离为 $1.50 \times 10^8 \text{ km}$, 月球到地面的距离为 $3.8 \times 10^5 \text{ km}$. 试计算地面上能见到的日全食区域的面积. (可把该区域的地面视为平面.)

解 忽略地球大气层对阳光的折射, 按照光的直线传播定律作几何投影(如图 1-1 所示), 则地面上出现日全食的区域是半径为 d 的圆.

由相似三角形的比例关系

$$\frac{QB'}{QB} = \frac{A'B'}{AB}$$

得

$$\frac{H}{H-h} = \frac{R-d}{R-r},$$

故

$$d = R - \frac{H(R-r)}{H-h}.$$

以 $R = 0.695 \times 10^6 \text{ km}$, $r = 1.75 \times 10^3 \text{ km}$, $H = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$, $h = 3.8 \times 10^5 \text{ km}$ 代入上式, 可得

$$d = 1.6 \times 10^3 \text{ km}.$$

所以日全食区域的面积为

$$S = \pi d^2 = 7.8 \times 10^6 \text{ km}^2.$$

2. 如图 1-2 所示为一种液面激光控制仪. 当液面升降时, 反射光斑移动, 为不同部位的光电转换元件所接收, 变成电信号输入控制系统. 试计算液面升高 Δh 时反射光斑移动的距离 Δs .

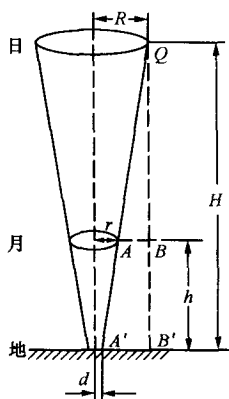


图 1-1

解 按光的反射定律作光路于图 1-2, 则由图可得反射光线的位移量为

$$\Delta s = \overline{OB} = \overline{OO'} \sin 2(\pi/2 - i).$$

又

$$\overline{OO'} = \Delta h / \cos i,$$

于是得

$$\Delta s = 2\Delta h \sin i.$$

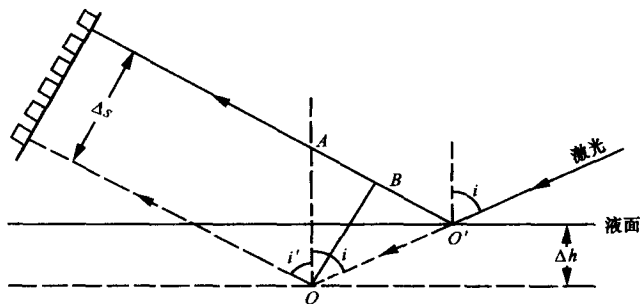


图 1-2

3. 由立方体的玻璃切下一角制成的棱镜称为四面直角体棱镜 (见图 1-3(a)). 证明从斜面射入的光线经其他三个面反射后, 出射光线的方向总与入射光线相反. 设想一下, 这样的棱镜可以在什么场合发挥作用.

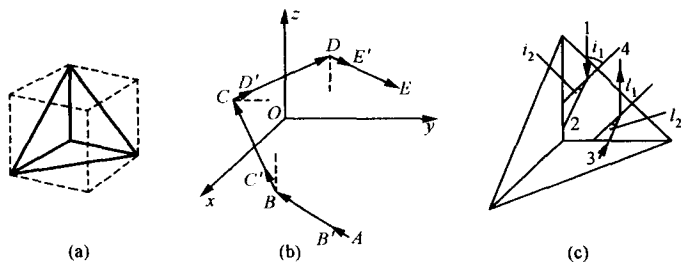


图 1-3

证 从斜面入射的光线经三个直角面反射后仍从斜面出射, 其间光线共经历了三个直角面的三次反射和斜面往返的二次折射. 证

明出射光线和入射光线方向相反,可分两步进行:

(1) 先证明任意一根经三个直角面反射以后的光线总是和入射光线平行且方向相反.

用矢量的概念证明这个结论比较简单. 如图 1-3(b) 所示, 设三个直角面分别为 Oxy 平面、 Oxz 平面和 Oyz 平面, 入射光线 AB 先后经三个平面反射后出射光线为 DE . 并设 $\vec{AB}'$, $\vec{BC}'$, $\vec{CD}'$, $\vec{DE}'$ 分别为光线 AB, BC, CD, DE 的单位矢量, 则

$$\vec{AB}' = (\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma).$$

式中 α, β, γ 为 $\vec{AB}'$ 的方向角. 由于 $\vec{BC}$ 为 $\vec{AB}$ 经 Oxy 平面的反射线, 根据反射定律显然有

$$\vec{BC}' = [\cos\alpha, \cos\beta, \cos(\pi - \gamma)].$$

同理,

$$\begin{aligned}\vec{CD}' &= [\cos\alpha, \cos(\pi - \beta), \cos(\pi - \gamma)], \\ \vec{DE}' &= [\cos(\pi - \alpha), \cos(\pi - \beta), \cos(\pi - \gamma)] \\ &= (-\cos\alpha, -\cos\beta, -\cos\gamma).\end{aligned}$$

因此

$$\vec{AB}' = -\vec{DE}',$$

即光线 AB 和 DE 反向平行.

(2) 再证明斜面的出射光线和入射光线平行且方向相反.

如图 1-3(c) 所示, 设光线 1 以入射角 i_1 入射到斜面上, 其折射光线 2 的折射角为 i_2 . 则根据 (1) 的证明, 光线 2 经三个直角面反射后的光线 3 必以入射角 i_2 入射到斜面上, 再次折射后的光线 4 的折射角也必为 i_1 . 因此出射光线 4 必和入射光线 1 反向平行.

由 (1), (2) 证明可知, 经直角四面体棱镜两次折射和三次反射的出射光线和入射光线方向相反. 如果入射光线 (即入射面) 垂直于某个直角交棱, 则此时光线只经过两次折射和两次反射, 但显然可见出射光线与入射光线方向相反的结论仍然成立.

四面直角体棱镜又叫直角锥棱镜. 直角锥棱镜的出射光线与入射光线方向相反, 这一特性可以有效地被利用来进行远距离激光测距. 设想登月飞船把一个由多只直角锥棱镜组成的反射器送到月球表面, 则地球上许多国家就可以选择反射器中的某些直角锥作为自

$$= \pi - 2\alpha - \beta + i'_3. \quad (3)$$

逐步以 i'_3, i_3, i'_2, i_2 代入式③得

$$\begin{aligned} i_4 &= \pi - 2\alpha - \beta + i_3 \\ &= \pi - 2\alpha - \beta + (\alpha - i'_2) \\ &= \pi - \alpha - \beta - i'_2 \\ &= \pi - \alpha - \beta - (-\pi + 2\alpha + \beta + i'_1) \\ &= 2\pi - 3\alpha - 2\beta - i'_1 \\ &= -i'_1. \end{aligned}$$

又根据折射定律有

$$\sin i_1 = n \sin i'_1, \quad \sin i'_4 = n \sin i_4,$$

于是得

$$i_1 = -i'_4,$$

式中 n 为棱镜的折射率. 因此偏向角为

$$\begin{aligned} \delta &= \pi - \angle 4 \\ &= \pi - \left[2\pi - \left(2\alpha + \frac{\pi}{2} + i'_4 + \frac{\pi}{2} + i_1 \right) \right] \\ &= 2\alpha + i'_4 + i_1 \\ &= 2\alpha. \end{aligned}$$

可见,偏向角恒等于 2α ,它与入射角 i_1 和折射率 n 均无关,即与波长也无关. 这种棱镜虽然使光受到两次折射,但仍无色散,因此可用于要求无色散的光路偏转系统.

5. 试证明: 当一条光线通过平行平面玻璃板时,出射光线方向不变,只产生侧向平移. 当入射角 i_1 很小时,位移为

$$\Delta x = \frac{n-1}{n} i_1 t,$$

式中 n 为玻璃板的折射率, t 为其厚度.

证 对平行平板上下表面分别两次运用折射定律,并考虑到平板上下是同一介质,便可证明最后出射光线与初始入射光线的方向一致.

如图 1-5 所示,根据几何关系可得侧向位移量为

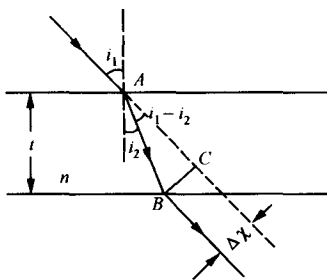


图 1-5

$$\begin{aligned}\Delta\chi &= \overline{AB}\sin(i_1 - i_2) \\ &= \frac{t}{\cos i_2}(\sin i_1 \cos i_2 - \cos i_1 \sin i_2) \\ &= t\left(\sin i_1 - \frac{\cos i_1 \sin i_2}{\cos i_2}\right).\end{aligned}\quad (1)$$

利用折射定律

$$\sin i_1 = n \sin i_2,$$

式①可改写为

$$\Delta\chi = t \sin i_1 \left(1 - \frac{\cos i_1}{n \cos i_2}\right).$$

在 $i_2 < i_1 \ll 1$ 的条件下,取小角近似

$$\sin i_1 \approx i_1, \quad \cos i_1 \approx \cos i_2 \approx 1,$$

于是有

$$\Delta\chi \approx \frac{n-1}{n} i_1 t.$$

6. 证明: 光线相继经过几个平行分界面的多层媒质时, 出射光线的方向只与入射方向及两边的折射率有关, 与中间各层媒质无关.

证 因为界面都是平行的, 所以光线在同一层媒质中上界面的折射角与下界面的入射角相等. 如图 1-6 所示, 由折射定律有

$$\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1,$$

$$\sin i_3 = \frac{n_2}{n_3} \sin i_2 = \frac{n_1}{n_3} \sin i_1,$$

$$\vdots$$

$$\sin i_k = \frac{n_{k-1}}{n_k} \sin i_{k-1} = \frac{n_1}{n_k} \sin i_1.$$

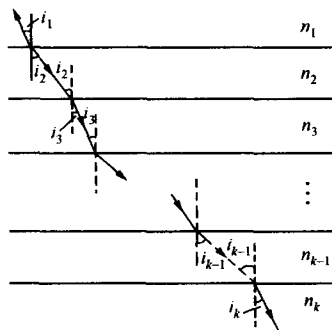


图 1-6

由此可见, 最后出射光线的方向只与当初入射方向及两边介质的折射率有关.

7. 顶角 α 很小的棱镜称为光楔. 证明: 光楔使近轴入射的光线产生偏向角 $\delta = (n-1)\alpha$. (其中 n 是光楔的折射率.)

证 由于光线垂直入射,故光线在第一个界面不发生折射,仅在第二个界面有折射.如图 1-7,根据折射定律

$$n \sin i_2 = \sin i'_2$$

以及几何关系 $i_2 = \alpha$, 故

$$n \sin \alpha = \sin i'_2.$$

当 $\alpha \ll 1$ 时,有

$$\sin \alpha \approx \alpha, \quad \sin i'_2 \approx i'_2,$$

则上式可写成

$$n\alpha = i'_2.$$

所以偏向角为

$$\delta = i'_2 - i_2 = n\alpha - \alpha = (n-1)\alpha.$$

这个近似公式在干涉、衍射、偏振中经常要用到,我们应当记住它.

8. 如图 1-8 所示是一种求折射线方向的追迹作图法. 例如,为了求光线通过棱镜的路径,如图 1-8(b) 所示. 可如图 1-8(a) 以 O 点为中心作两圆弧,半径分别正比于折射率 n, n' (设 $n > n'$). 作 OR 平行于入射光线 DE , 作 RP 平行于棱镜第一界面的法线 $N_1N'_1$, 则 OP 的方向即为第一次折射后光线 EF 的方向. 再作 QP 平行于第二界面的法线 $N_2N'_2$, 则 OQ 的方向即为出射光线 FG 的方向, 从而 $\angle ROQ = \delta$ 为偏向角. 试论证此法的依据.

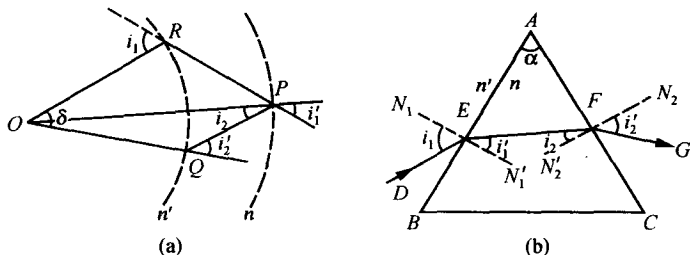


图 1-8