



陈中伟 编著

物理学教程第四卷

光学和量子物理基础

上海交通大学出版社

0431

C65

378347

光学和量子物理基础

物理学教程 第四卷

陈中伟 编著

上海交通大学出版社

(沪)新登字205号

内 容 提 要

《物理学教程》是上海交通大学普通物理教研组编写的一套革新教材。全书分为力学、热学、电磁学、光学和量子物理基础四卷。

光学和量子物理基础为本教材的第四卷，内容包括光的电磁理论、光的干涉和衍射、光的偏振和双折射、辐射的量子性、量子物理基础、量子物理专题等六章。

本书可作为对物理课程有较高要求的（非物理专业）理工科大学的物理学教学用书，也可作为一般高等院校的教学参考书，并可供中学物理教师参考。

责任编辑 冯 颖
戴柏诚
封面设计 雨 风

D207/08

光学和量子物理基础

物理学教程第四卷

出版：上海交通大学出版社

(上海市华山路1954号 邮政编码：200030)

发行：新华书店上海发行所

印刷：常熟文化印刷厂

开本：850×1168(毫米)1/32

印张：9 字数：233000

版次：1994年8月 第1版

印次：1994年9月 第1次

印数：1—3500

ISBN7-313-01366-3/O.092

定 价： 5.90 元

目 录

第一章 光的电磁理论	1
§ 1.1 反射波和折射波	3
§ 1.2 反射定律和折射定律	6
§ 1.3 布儒斯特角	12
§ 1.4 透镜	17
选读材料 1. 全反射	21
选读材料 2. 光纤	26
小结	27
思考题	29
习题	31
第二章 光的干涉和衍射	35
§ 2.1 相干波与非相干波	35
§ 2.2 分割波阵面产生的两光束干涉	39
*§ 2.3 光矢量 相干长度 谱线宽度	47
§ 2.4 分解振幅产生的两光束干涉	50
§ 2.5 衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	69
§ 2.6 单缝的夫琅和费衍射	72
§ 2.7 圆孔的夫琅和费衍射 成像仪器的分辨率	78
§ 2.8 光栅衍射	82
*§ 2.9 双缝衍射	90
*§ 2.10 反射光栅 闪耀光栅	92
选读材料 3. 光束的空间相干性	94
选读材料 4. 迈克耳孙星体干涉仪	97
选读材料 5. x 射线的衍射	99

选读材料 6. 多缝的夫琅和费衍射	101
选读材料 7. 圆孔的菲涅耳衍射	105
小结	108
思考题	110
习题	112
第三章 光的偏振和双折射	121
§3.1 光的双折射	121
§3.2 晶体光学元件	126
*§3.3 线偏振光、圆偏振光的获得	130
§3.4 偏振光的干涉	133
§3.5 旋光现象	136
选读材料 8. 双折射的电磁理论	139
选读材料 9. 电光效应和磁光效应	144
小结	148
思考题	149
习题	150
第四章 电磁辐射的量子性	153
§4.1 热辐射	153
§4.2 光电效应	165
§4.3 康普顿效应	169
*§4.4 光电倍增管 用光子图像讨论多普勒效应	173
选读材料 10. 电磁相互作用	176
选读材料 11. 连续 x 射线谱的短波限	177
小结	178
思考题	179
习题	180
第五章 量子物理基础	182
§5.1 玻尔的氢原子理论	182
§5.2 德布罗意波	192

§ 5.3	测不准关系式	195
§ 5.4	波函数及其统计解释	199
§ 5.5	薛定谔方程	202
§ 5.6	一维无限深势阱	206
§ 5.7	势垒	211
§ 5.8	量子力学中的氢原子理论	216
*§ 5.9	正常塞曼效应	227
§ 5.10	电子自旋	229
	选读材料 12. 有限深势阱	232
	选读材料 13. 线性谐振子	234
	选读材料 14. 自旋-轨道耦合	235
	小结	237
	思考题	239
	习题	241
第六章	量子物理专题	243
§ 6.1	多电子原子	243
§ 6.2	激光	257
§ 6.3	固体中的电子状态	267
	习题答案	279

第一章 光的电磁理论

在光学发展史中，出现过两种波动理论。起先是惠更斯(Huygens)在17世纪后期提出，并经过菲涅耳(Fresnel)等人加以发展的机械波理论，它把光看作是机械振动在一种假想的特殊

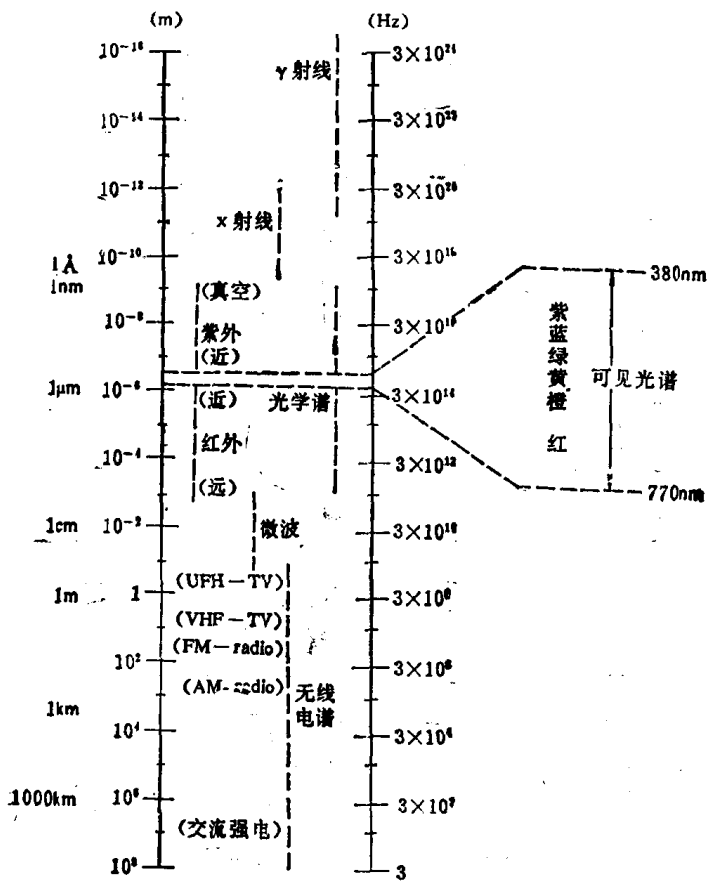


图 1-1

的介质“以太”中传播的波。后来在19世纪60年代，麦克斯韦(Maxwell)提出光的电磁波理论，认为光是一种电磁波，或者确切地说光波是电磁波谱中的一个频率段(或波长段)，参看图1-1电磁波谱。

麦克斯韦(1864年)把电磁学定律总结为方程组，从麦克斯韦方程组出发导出了电磁波的波动方程，预言了电磁波的存在，并指出电磁波在真空中的速度为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}, \quad (1-1)$$

由已知的 $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N}/\text{A}^2$ 得

$$c = 2.99794 \times 10^8 \text{m/s}.$$

这一数值和实验测定的真空中的光速数值非常接近(现在最精确的数据 $c = 2.997924562 \times 10^8 \text{m/s} \pm 1.1 \text{m/s}$)。这一事实启发了麦克斯韦提出著名的光的电磁波理论(当时麦克斯韦利用韦伯等的实验结果，计算出电磁波在真空中的传播速度为 $3.1074 \times 10^8 \text{m/s}$ ，而1848年斐索测出的光速是 $3.14858 \times 10^8 \text{m/s}$)。在麦克斯韦手中，光学理论成为电磁学理论的一部分，它可以普遍解释在两种介质的分界面上发生的反射和折射等现象，也能够满意地解释光的干涉、衍射和偏振等一大类光学现象。光的电磁理论推动了光学和整个物理学的发展，目前它仍然是现代光学的一个重要的基础。

但是，在19世纪末和20世纪初，当科学实验深入到微观领域时，在一些新的光学实验事实面前，例如荧光的波长比入射光波长为长，光电效应的实验规律等，光的电磁理论遇到巨大的、无法克服的困难，使光学的概念发生从连续到量子化的飞跃。爱因斯坦(Einstein)在1905年提出了光子理论，它完满解释了光与物质相互作用时表现出粒子性的实验事实。所以，光的本性既不是波也不是粒子。光具有波粒二象性，在许多方面主要表现出波动性，而在另一方面主要表现出粒子性。

在这一章里，我们讨论电磁波在两种各向同性均匀介质的分界面上发生反折和折射的理论，它也是几何光学的理论基础。光的干涉、衍射和偏振现象将放在第二、三章内讨论。关于光的量子理论将在第四章内讨论。

§ 1.1 反射波和折射波

电磁波传播到两种介质的分界面时，会产生反射波和折射波。电磁波的反射和折射现象，可以用麦克斯韦电磁理论透彻地加以阐明。为方便起见，我们先讨论单色平面电磁波垂直入射到两种不同介质的分界面的情形。单色波指该波为具有单一频率的简谐波，平面波指其波阵面为平面。沿着 z 轴正方向传播的单色平面电磁波^①的方程为

$$\begin{cases} E_x = E_0 \cos \omega \left(t - \frac{z}{u} \right), \\ B_y = B_0 \cos \omega \left(t - \frac{z}{u} \right), \end{cases}$$

式中电磁波在介质中的传播速度 u 决定于介质的性质，

$$u = \frac{c}{n} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}. \quad (1-2)$$

由于绝大多数介质都是非磁性的， μ_r 总是非常接近于 1，故介质的折射率 n (等于真空中电磁波速与介质中电磁波速的比值) 可表示为

$$n = \sqrt{\epsilon_r}. \quad (1-3)$$

注意在极性分子的介质(如水和乙醇)中， n^2 与静电介电常数 ϵ_r 相差甚多，这是因为在频率极高的电磁波的交变电场中，介电系数比静电的介电常数为小的缘故。实际上，介质的折射率随着电磁波的频率而变化，由此将产生的现象称为色散。

电磁波中，磁感应强度 B 与电场强度 E 的量值，按一定的规

^① 这里讨论线(平面)偏振波。

律成正比, 故

$$B_0 = \frac{1}{u} E_0 = \frac{n}{c} E_0. \quad (1-4)$$

如图 1-2 所示, $z=0$ 平面是两种各向同性均匀介质的分界面, 介质的折射率分别为 n_1 和 n_2 , 沿着 z 轴正向入射的电磁波方程为

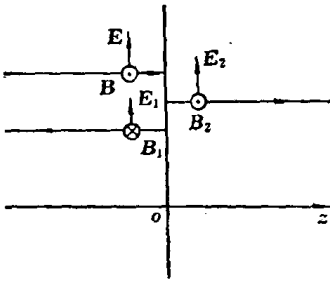


图 1-2

$$\begin{cases} E_x = E_0 \cos \omega \left(t - \frac{z}{u_1} \right) \\ = E_0 \cos (\omega t - k_1 z), \\ B_y = B_0 \cos \omega \left(t - \frac{z}{u_1} \right) \\ = B_0 \cos (\omega t - k_1 z), \end{cases}$$

式中 $u_1 = \frac{c}{n_1}, k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} = \frac{\omega}{u_1}, B_0 = \frac{n_1}{c} E_0.$

设反射波和折射波的电磁波方程分别为

$$\begin{cases} E_{1x} = E_{10} \cos (\omega t + k_1 z), \\ B_{1y} = -B_{10} \cos (\omega t + k_1 z), \end{cases}$$

式中 $B_{10} = \frac{n_1}{c} E_{10}.$

$$\begin{cases} E_{2x} = E_{20} \cos (\omega t - k_2 z), \\ B_{2y} = B_{20} \cos (\omega t - k_2 z), \end{cases}$$

式中 $k_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2} = \frac{\omega}{u_2},$

$$B_{20} = \frac{n_2}{c} E_{20}.$$

麦克斯韦方程组在分界面上的应用, 要求分界面两侧的电磁场满足一定的边界条件, 即切向的电场强度分量连续, 切向的磁场强度分量连续。由此必须满足

$$E_x + E_{1x} = E_{2x}, \quad (z=0 \text{ 处})$$

$$\frac{1}{\mu_1} (B_y + B_{1y}) = \frac{1}{\mu_2} B_{2y}$$

或

$$E_0 + E_{10} = E_{20}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{\mu_1}(B_0 - B_{10}) = \frac{1}{\mu_2}B_{20}. \quad (2)$$

利用关系式(1-4), 并注意到 $\mu_1 \approx \mu_0 \approx \mu_2$, (2)式可改写为

$$n_1 E_0 - n_1 E_{10} = n_2 E_{20}. \quad (3)$$

解式(1)、(3)得

$$\begin{cases} E_{10} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} E_0, \\ E_{20} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} E_0. \end{cases} \quad (1-5)$$

式(1-5)表示, 我们可由入射波的电场振幅来确定反射波或折射波的电场振幅。于是我们完全确定了反射和折射的电磁波方程。

从上述讨论可知, 反射波和折射波的产生是麦克斯韦电磁理论的必然结果。由介质的相对折射率 $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$, 完全可以确定各波

之间的振幅的相对大小。并且还看到, 在介质分界面两侧, 折射波和入射波的电场是同位相的。但是, 反射波的电场和入射波的电场则可能是同位相的, 也可能是位相差等于 π (即位相相反)。

这要看相对折射率 $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ 的大小, 当 $n_{21} > 1$ 时, 反射波的电场和

入射波的电场位相相反, 我们说经反射后电场有位相突变 π ; 当 $n_{21} < 1$, 反射波电场和入射波电场位相相同, 即反射后电场没有位相突变(注意, 对于磁场出现位相突变 π 的条件恰好与电场相反, 这是反射的必然结果。想一下, 为什么?)。

[例 1-1] 当电磁波垂直入射到折射率为 n_1 和 n_2 介质的分界面时, 从单位面积分界面上发出的反射波能量占入射波能量的比率(称为反射率)等于多少? 从单位面积分界面上发出的折射波能量占入射波能量的比例(称为透射率)等于多少?

[解] 当电磁波垂直入射到分界面上, 单位时间内单位面积分界面上接受的入射波能量, 它恰好等于入射波的平均能流密度,

$$\langle S \rangle = \frac{1}{2} E_0 H_0 = \frac{1}{2\mu_0} E_0 B_0 = \frac{n_1}{2\mu_0 c} E_0^2.$$

同理, 单位时间内从单位面积分界面上发出的反射波能量, 它等于反射波的平均能流密度,

$$\langle S_1 \rangle = \frac{1}{2} E_{10} H_{10} = \frac{1}{2\mu_0} E_{10} B_{10} = \frac{n_1}{2\mu_0 c} E_{10}^2, \text{ 所以}$$

$$\text{反射率 } R = \frac{\langle S_1 \rangle}{\langle S \rangle} = \frac{E_{10}^2}{E_0^2} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \text{ (垂直入射时)}. \quad (1-6)$$

而垂直射入射时, 单位时间内从单位面积分界面上发出的折射波能量, 它等于折射波的平均能量密度,

$$\langle S_2 \rangle = \frac{1}{2} E_{20} H_{20} = \frac{1}{2\mu_0} E_{20} B_{20} = \frac{n_2}{2\mu_0 c} E_{20}^2, \text{ 所以}$$

$$\text{透射率 } T = \frac{\langle S_2 \rangle}{\langle S \rangle} = \frac{n_2 E_{20}^2}{n_1 E_0^2} = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} \text{ (垂直入射时)}. \quad (1-7)$$

讨论:

$$R + T = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 + \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} = 1,$$

即入射到单位面积分界面上的电磁波能量, 它转化为反射波的能量和折射波的能量, 并且遵从能量守恒定律。

又, 例如光波垂直入射到真空 ($n_1 = 1$) 与折射率 $n_2 = 1.50$ 的玻璃分界面时, 反射率

$$R = \left(\frac{1 - 1.50}{1 + 1.50} \right)^2 = 0.040,$$

即反射率为 4.0%, 透射率为 96.0%。

当光波由玻璃垂直射向与真空的分界面时, 其反射率与由真空垂直射向与玻璃的分界面时的相等。

§ 1.2 反射定律和折射定律

现在我们来讨论一般的情形, 即单色平面电磁波倾斜地入射

到两种各向同性均匀介质的分界面上，这时所发生的反射和折射现象的规律。

一、反射定律和折射定律

对于光，先有反射与折射的实验定律。对于各种波动，反射和折射的基本定律可以从惠更斯原理推导得出。然而，从电磁波的理论，不但可以得到电磁波的反射和折射的基本定律，还可得到反射波或折射波的振幅与位相等各个细节。

设平面 P 为两种介质的分界面， \hat{N} 为分界面法线方向单位矢， \hat{u}_i 为入射波传播方向的单位矢，则 \hat{N} 与 \hat{u}_i 所决定的平面称为入射面， \hat{u}_i 与 \hat{N} 的夹角 θ_i 为入射角。入射波的一系列波阵面与分界面的交线是一系列垂直于入射面的平行线，如图 1-3 所示。

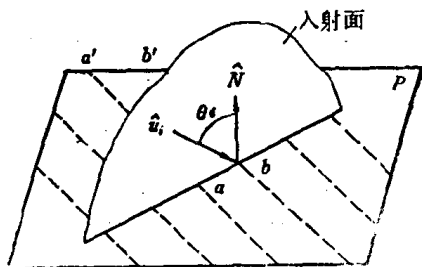


图 1-3

设这一系列入射电磁波的波阵面之间，位相差依次为 2π ，则这组交线是等距的平行线，距离 $ab = \frac{\lambda_1}{\sin \theta_i}$ 。

在任一交线 aa' 上所有各点，入射波的电场(或磁场)有同一位相。电磁场在分界面上应满足的边界条件要求 aa' 线上所有各点，反射波的电场(或磁场)有同一位相，折射波的电场(或磁场)有同一位相。即 aa' 直线也应是反射波的波阵面与分界面的交线，并且也是折射波的波阵面与分界面的交线。所以反射波的传播方向的单位矢 \hat{u}_r 、折射波的传播方向的单位矢 \hat{u}_t ，它们均在入射面内。 \hat{u}_r 与 \hat{N} 夹角 θ_r (反射角)， \hat{u}_t 与 \hat{N} 的夹角 θ_t (折射角) 则应满足 $ab = \frac{\lambda_1}{\sin \theta_r} = \frac{\lambda_2}{\sin \theta_t}$ ，参看图 1-4。

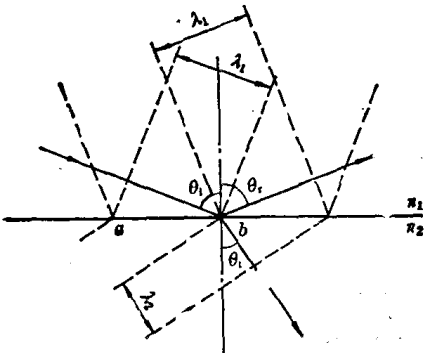


图 1-4

由此可见,入射波、反射波和折射波之间必须满足:

- (1) 有相同的频率;
- (2) 反射波的传播方向 \hat{u}_r 、折射波的传播方向 \hat{u}_t 都在入射面内;
- (3) 反射角等于入射角:

$$\theta_r = \theta_i; \quad (1-8)$$

$$(4) \quad n_2 \sin \theta_t = n_1 \sin \theta_i, \quad (1-9)$$

即入射角的正弦与折射角的正弦之比等于常数,这常数是介质 2 对介质 1 的相对折射率。这条折射定律又称斯涅耳 (Snell) 定律。

上面解释了反射和折射的实验定律。下面讨论反射波的振幅、折射波的振幅与入射波的振幅之间的关系。为此必须区分两种情形:

1. 横向电偏振 (TE 偏振)

若入射电磁波的电场 E 垂直于入射面 (这时 E 与分界面平行), 磁场 H 平行于入射面 (与分界面有一角度), 如图 1-5(a) 所示, 称为横向电偏振。这时边界条件应是

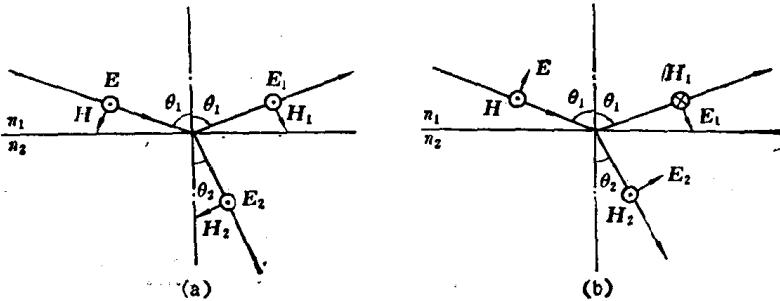


图 1-5

$$\begin{cases} E + E_1 = E_2, \\ -H \cos \theta_1 + H_1 \cos \theta_1 = -H_2 \cos \theta_2. \end{cases}$$

2. 横向磁偏振(TM 偏振)

若入射电磁波的磁场 H 垂直于入射面(这时 H 平行于分界面), 电场 E 平行于入射面, 如图 1-5(b) 所示, 称为横向磁偏振, 应满足的边界条件为

$$\begin{cases} E \cos \theta_1 + E_1 \cos \theta_1 = E_2 \cos \theta_2, \\ H - H_1 = H_2. \end{cases}$$

注意, 当入射角 θ 趋近于零, 横向电偏振与横向磁偏振的区别消失, 图 1-5(b) 中, E_1 和 H_1 正方向的规定中已考虑到这一点(可能与其他作者规定得不同)。

由上述边界条件以及电磁场量值之间的关系式(1-4)可解出:
横向电偏振:

$$E_{10} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} E_0, \quad (1-10a)$$

$$E_{20} = \frac{2 n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} E_0. \quad (1-10b)$$

横向磁偏振:

$$E_{10} = \frac{-n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} E_0, \quad (1-11a)$$

$$E_{20} = \frac{2 n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} E_0. \quad (1-11b)$$

利用斯涅耳定律, 以上关于电场的振幅关系式还可表示为

$$r_{\perp} = \left(\frac{E_{10}}{E_0} \right)_{TE} = -\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}, \quad (1-12a)$$

$$t_{\perp} = \left(\frac{E_{20}}{E_0} \right)_{TE} = \frac{2 \cos \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}, \quad (1-12b)$$

$$r_{//} = \left(\frac{E_{10}}{E_0} \right)_{TM} = -\frac{\operatorname{tg}(\theta_1 - \theta_2)}{\operatorname{tg}(\theta_1 + \theta_2)}, \quad (1-13a)$$

$$t_{//} = \left(\frac{E_{20}}{E_0} \right)_{TM} = \frac{2 \cos \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2) \cos(\theta_1 - \theta_2)}, \quad (1-13b)$$

式(1-12)和(1-13)称为菲涅耳公式。

*二、反射率和透射率

在单位面积分界面上,反射波的能量与入射波的能量之比,称为能量反射率,简称反射率;折射波的能量与入射波的能量之比,称为能量透射率,简称透射率。

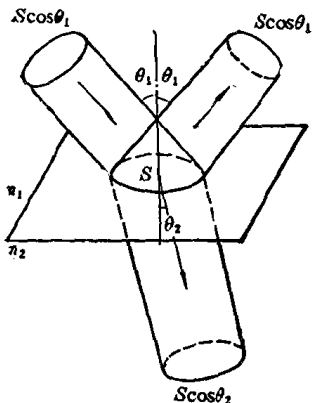


图 1-6

参看图 1-6, 投射到单位面积分界面上的入射波, 其波束的截面积等于 $\cos \theta_1$, 从单位面积分界面发出的反射波的波束截面积、折射波的波束截面积则分别等于 $\cos \theta_1$ 、 $\cos \theta_2$ 。所以反射波的能量与入射波的能量之比, 即反射率为

$$R = \frac{E_1 H_1 \cos \theta_1}{E H \cos \theta_1} = \left(\frac{E_1}{E} \right)^2 = \left(\frac{E_{10}}{E_0} \right)^2, \quad (1-14)$$

将菲涅耳公式(1-12a)、(1-13a)代入上式, 得电场垂直于入射面的 TE 波的反射率为

$$R_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)}, \quad (1-15)$$

电场平行于入射面的 TM 波的反射率为

$$R_{//} = \frac{\text{tg}^2(\theta_1 - \theta_2)}{\text{tg}^2(\theta_1 + \theta_2)}, \quad (1-16)$$

而折射波的能量与入射波的能量之比, 即透射率为

$$\begin{aligned} T &= \frac{E_2 H_2 \cos \theta_2}{E H \cos \theta_1} = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} \left(\frac{E_2}{E} \right)^2 \\ &= \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} \left(\frac{E_{20}}{E_0} \right)^2. \end{aligned} \quad (1-17)$$

由菲涅耳公式(1-12b)、(1-13b), 得 TE 波及 TM 波的透射率分别为

$$T_{\perp} = \frac{4 n_2 \cos \theta_2}{n_1} \cdot \frac{\cos \theta_1 \sin^2 \theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)}, \quad (1-18)$$

$$T_{//} = \frac{4 n_2 \cos \theta_2 \cos \theta_1 \sin^2 \theta_2}{n_1 \sin^2(\theta_1 + \theta_2) \sin^2(\theta_1 - \theta_2)} \quad (1-19)$$

[例 1-2] 试证明：入射到分界面上的电磁波能流等于反射电磁波的能流与折射电磁波的能流之和。

[解] 以 TE 偏振为例，反射率与透射率之和为

$$\begin{aligned} R_{\perp} + T_{\perp} &= \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} + \frac{4 n_2 \cos \theta_2 \cos \theta_1 \sin^2 \theta_2}{n_1 \sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \\ &= \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2) + 4 \sin \theta_1 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \\ &= 1. \end{aligned}$$

$R + T = 1$ ，表示反射波的能流与折射波的能流的总和，它等于入射波的能流，即满足能量守恒定律。

(TM 偏振留作习题请读者自行验证。)

[例 1-3] 证明电磁波垂直入射到分界面时($\theta_1 \rightarrow 0$)，由式(1-15)、式(1-16)给出相等的反射率。

[解] 当 $\theta_1 \rightarrow 0$ 时，则由折射定律 $\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1$ 得 $\theta_2 \rightarrow 0$ ， $\cos \theta_1 \rightarrow 1$ ， $\cos \theta_2 \rightarrow 1$ 。故当垂直入射时

$$\begin{aligned} R_{\perp} &= \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} = \left[\frac{\sin \theta_1 \cos \theta_2 - \cos \theta_1 \sin \theta_2}{\sin \theta_1 \cos \theta_2 + \cos \theta_1 \sin \theta_2} \right]^2 \\ &= \left[\frac{\sin \theta_1 - \sin \theta_2}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2} \right]^2 = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2, \\ R_{//} &= \frac{\text{tg}^2(\theta_1 - \theta_2)}{\text{tg}^2(\theta_1 + \theta_2)} = \left[\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\cos(\theta_1 - \theta_2)} \cdot \frac{\cos(\theta_1 + \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \right]^2 \\ &= \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} = R_{\perp}. \end{aligned}$$

由此可见，当 $\theta_1 \rightarrow 0$ 时，TE 波、TM 波的反射率趋于同一数值，它与式(1-6)给出的相同。

[例 1-4] 试分析说明，当光掠射于水面时有强的反射光。

[解] 掠射指入射角 θ_1 接近于 90° ， $\cos \theta_1 \rightarrow 0$ 。

对于 TE 偏振，反射率