

GUANG DIAN ZI JI SHU

光电子技术

JI CHU

基础

work

主编：张铁强 郑咏梅

吉林人民出版社



光电子技术基础

江苏工业学院图书馆
藏书章

主编 张铁强 郑咏梅

吉林人民出版社

光电子技术基础

主 编:张铁强 郑咏梅 责任编辑:包兰英

封面设计:蓝 玫

吉林人民出版社出版 发行

(中国·长春市人民大街7548号 邮政编码:130022)

印 刷:北京市朝教印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:16 字 数:425千字

标准书号:ISBN 7-206-03164-1/T·16

版 次:2005年7月第2版 印 次:2005年7月第1次印刷

印 数:1 000册 定 价:39.40元

如发现印装质量问题,影响阅读,请与印刷厂联系调换。

前 言

光电子技术是在六十年代激光器问世之后,电子技术与光学技术自然结合的产物。它不仅拓展了传统电子技术的功能,并使之有更强的适应性。尽管微电子技术依然是信息技术的主要支柱,但是,由于电子在回路中的传输受到回路分布参数延迟效应的局限,难以突破纳秒的门槛,因而难于承受更高速信息流的传输。光无论在自由空间或在波导回路中,都能保持以光的速度传播,因此在高速运行的信息系统中,用光子作为信息的载体就会大大提高信息系统容量。由此而言,光电子技术在未来信息高技术领域中将占据极为重要的地位,成为推动新一轮信息技术革命的生力军。

新的光学现象发现以及无线电电子学向着光频方向的扩展,使传统的光学技术发生日新月异的变化。许多电子学中行之有效的技术方法,例如放大、振荡、编码、调制、变频等都相继移植到光学技术中;许多电子学的有源、可控器件或单元电路功能也已经或正在采用光学方法实现,而且随着激光、薄膜和微电子技术的进展,这些光学器件正趋于集成化。可以肯定,未来的信息技术不会是单纯的电子世界,光子和电子的结合可以创造出更加丰富多采,无比绚丽的新天地。

光电子技术包括光子与物质(电子)相互作用所引发的诸多物理效应及其应用,主要可以分为能源和信息两个方面。作为能源技术的应用有激光同位素分离、激光核聚变、激光热处理与加工、激光化学、太阳能电池和激光武器等;在信息技术方面主要包括了光子在信息载入、传输、交换、存储、处理与读出再现的完整过程。

目前,有关光电子技术的论著和教材,往往注重于光辐射场与物质相互作用及光波导理论,需要较深的数学和物理基础,因此难以为工程技术专业本科生所接受。本书以光电子学基本概念理解为导向,从满足实际工程应用需要为目标,力求以工程专业本科生的前二年课程为基础,体现光电子技术的基础理论与应用的结合。鉴于此目的,本书共七章:第一章介绍光电子学的物理基础和常用的光源;第二章阐述激光的基本原理和典型的激光器。第三章讨论光辐射在波导和光纤中的传输规律;第四章介绍光辐射的变频和有关调制方法;第五章和第六章简述光辐射的探测器件与检测方法;最后一章是介绍光电子技术的几种典型应用例子。

本书可作为大学电子信息类专业、应用物理专业本科生的教材和研究生的教学参考书,也可供有关科研人员和工程技术人员参考。

本书的前言、第四章、第七章由张铁强编写,第一章、第三章、第五章、第六章的部分内容由郑咏梅编写,千庆姬编写了第二章,姜永恒编写了第六章的部分内容,林晓珑同志精心绘制了部分插图,全书由张铁强修改、稿。

吉林工业大学申铨国教授对本书进行了认真细致审阅。本书得到吉林工业大学教材建设基金的资助,对吉林工业大学教务处等部门的大力支持,在此深表敬意。

因编者水平有限,本书难免存在缺点和错误,殷切期望广大读者提出批评指正。

编者

1999年4月

目 录

第一章 光电子技术物理基础.....	(1)
§ 1.1 光辐射的描述与基本性质	(1)
§ 1.2 半导体物理基础.....	(13)
§ 1.3 半导体光电转换原理.....	(20)
§ 1.4 常用光源.....	(28)
习题与思考题	(38)
第二章 激光原理与激光器	(40)
§ 2.1 光与物质作用的基本过程.....	(40)
§ 2.2 激光形成原理.....	(45)
§ 2.3 激光的模式与性质.....	(50)
§ 2.4 激光束的传输与透镜变换.....	(55)
§ 2.5 激光器.....	(62)
习题与思考题	(68)
第三章 介质光波导与光纤	(69)
§ 3.1 平面波导光线光学理论分析.....	(69)
§ 3.2 平面波导电磁理论分析.....	(72)
§ 3.3 光纤中光辐射的传输.....	(82)
§ 3.4 光纤的色散与损耗.....	(92)
§ 3.5 光纤束.....	(96)
习题与思考题.....	(101)
第四章 光辐射的变频与调制.....	(103)
§ 4.1 光辐射变频的基本原理	(103)
§ 4.2 光辐射的频率转换与参量效应	(110)
§ 4.3 光辐射调制原理	(121)
§ 4.4 电光调制	(126)
§ 4.5 声光调制	(135)
§ 4.6 磁光调制	(141)
§ 4.7 光束偏转	(147)
习题与思考题.....	(150)
第五章 光辐射探测器件.....	(151)
§ 5.1 光辐射探测器的特性参量	(151)
§ 5.2 光电探测器原理	(160)
§ 5.3 热探测器原理	(172)
§ 5.4 其它几种形式光电探测器	(178)

§ 5.5 光电耦合器件	(186)
习题与思考题	(190)
第六章 光辐射的变换和检测方法	(192)
§ 6.1 光电变换的基本形式和类型	(192)
§ 6.2 时变非相干光信号的检测方法	(195)
§ 6.3 空间分布非相干光信号的检测方法	(202)
§ 6.4 相干光信号的检测方法	(210)
第七章 光电子技术典型应用	(219)
§ 7.1 光纤通信系统	(219)
§ 7.2 光纤传感原理与应用	(225)
§ 7.3 光电子信息处理应用	(233)
§ 7.4 激光精密测量	(240)
参考文献	(246)

第一章 光电子技术物理基础

光电子技术所涉及的内容同光和物质的基本物理性质以及它们之间的相互作用密切相关。因此本章着重介绍两个方面的内容：一是简要叙述光辐射的基本性质和描述光辐射的基本物理量；二是介绍半导体光辐射及光电转换的基本概念和原理。

§ 1.1 光辐射的描述与基本性质

根据物理学的观点，光辐射具有两种属性，即：波动性与粒子性。一般在讨论光传播时常将其视为电磁波，甚至在一定范围内，可以采用光的直线传播理论来对其进行描述；在研究光辐射与物质相互作用时，通常将光辐射视为粒子流。

1.1.1 光辐射及光子能量公式

光辐射是一种电磁波。一般认为波长 $10\text{nm} \sim 1\text{mm}$ ，或频率 $3 \times 10^{16} \sim 3 \times 10^{11}\text{Hz}$ 范围内的电磁波是光辐射，如图 1-1 所示。

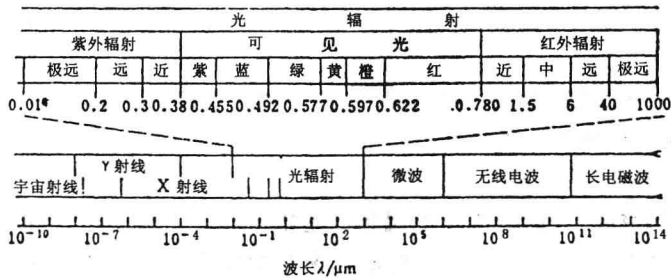


图 1-1 电磁辐射波谱

一般将光辐射看成是由三部分组成：紫外辐射、可见光和红外辐射。通常认为波长小于 390nm 的是紫外辐射，波长 $390 \sim 770\text{nm}$ 的属于可见光，波长大于 770nm 的是红外辐射。可见光是指能引起肉眼视觉的光辐射。可见光又分为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七种颜色光。红外及紫外辐射波段又可分为远、中、近三部分或远远、远、中、近四部分。表 1-1 列出了光辐射波谱的划分。

表 1-1

光辐射波谱划分

波 段 /nm	辐 射 名 称
100~280	紫外线——C ^①
280~315	紫外线——B
315~380	紫外线——A

波 段/nm	辐 射 名 称
380~440	可见光——紫色
440~460	可见光——蓝色
460~495	可见光——青色
495~540	可见光——绿色
540~600	可见光——黄色
600~640	可见光——橙色
640~750	可见光——红色
750~1400	红外线——A
1400~3000	红外线——B
3000~10 ⁴	红外线——C

注：①表中 A、B、C 代表相应光辐射中的近、中、远部分。

人们一般说的光是指可见光。对于光学或光电子学来说，光辐射不仅是可见光，而且还包括紫外和红外辐射。因此，光辐射与光的含义严格讲是有区别的。

爱因斯坦理论指出，在研究光辐射或吸收的时候，应把光视为光子流。每个光子的能量 ϵ 与频率 ν 成正比例，即

$$\epsilon = h\nu \quad (1.1-1)$$

式中， h 为普朗克常数， $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ； ν 为频率，也可表示为光速与波长之比，即 $\nu = c/\lambda$ ， $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。因此式(1.1-1)又可表示为

$$\epsilon = \frac{hc}{\lambda}$$

按上式由可见光的波长范围即可得可见光光子的能量范围为 3.2~1.6eV。

1.1.2 光辐射的波动特性

一、波动方程

光辐射是电磁波，因此它服从电磁场的基本规律。一般而论，空间中的电磁场用电场强度 E 和磁场强度 H 表示，介质对光辐射场的响应引用电位移矢量 D 和磁感应强度 B 反映。对空间中任一点，各场量之间的关系由麦克斯韦方程表示，即

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (1.1-2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1.1-3)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.1-4)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1.1-5)$$

式中 J 是传导电流密度， ρ 是自由电荷密度。各场量之间还存在如下关系，即

$$J = \sigma E \quad (1.1-6)$$

$$P = \epsilon_0 \chi E \quad (1.1-7)$$

$$D = \epsilon E = \epsilon_0 E + P \quad (1.1-8)$$

$$B = \mu H \quad (1.1-9)$$

式中 P 是介质的电极化强度， σ 、 χ 、 ϵ 、 μ 分别是介质的电导率、电极化率、介电系数和磁导率， ϵ_0 、 μ_0 是真空中介电常数与磁导率。

对无源($\rho=0$)非磁性介质,对(1.1-2)~(1.1-9)式进行整理,得到如下微分方程

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + \mu \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = -\mu \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} \quad (1.1-10)$$

这是普遍形式的波动方程。方程右边两项起着“源”的作用,分别是极化电荷和传导电流引起。对于导体, $-\mu_0 \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t}$ 这一项起主要作用,方程的解将说明电磁波在金属中的强烈衰减和在表面处有强烈反射;对于绝缘体($\mathbf{J}=0$), $-\frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2}$ 起主要作用,它将导致电磁波的散射、吸收、色散,在强光情况下(这时(1.1-7)式不成立),将引起非线性光学效应;对于半导体,两项都要考虑。

在均匀介质(或 ϵ 是位置缓变函数)中,且不考虑介质的吸收损耗($\sigma=0$),于是(1.1-10)式写成

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1-11)$$

同理,对磁场 \mathbf{H} 亦有

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1-12)$$

对于谐光波场,场量 \mathbf{E}, \mathbf{H} 可以写成

$$\begin{cases} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}) \exp(i\omega t) \\ \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}(\mathbf{r}) \exp(i\omega t) \end{cases} \quad (1.1-13)$$

将上式代入(1.1-11)和(1.1-12)两式中,则有

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \omega^2 \mu \epsilon \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0 \\ \nabla^2 \mathbf{H}(\mathbf{r}) + \omega^2 \mu \epsilon \mathbf{H}(\mathbf{r}) = 0 \end{cases} \quad (1.1-14)$$

式中 ω 是谐光波场的圆频率。上式是标准的亥姆霍兹方程。

另外,在描述光辐射的传播时,通常引入波数 k 、波长 λ 和介质折射率 n ,即

$$k = \omega^2 \mu \epsilon = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.1-15)$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (1.1-16)$$

式中 ϵ_r, μ_r 是相对介电系数和相对磁导率,且 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r, \mu = \mu_0 \mu_r$ 。而光辐射在介质中传播速度 v 是

$$v = \frac{c}{n} = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \quad (1.1-17)$$

式中, $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ 是光在真空中传播速度。

由方程(1.1-14)式可以解出均匀介质中光辐射的波函数。一般来讲,比较常用的是平面波和球面波形式的解。

在均匀无吸收介质中,沿着波矢 \mathbf{k} 方向传播的平面波表达式是

$$\begin{cases} \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0 \exp(-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \\ \mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}_0 \exp(-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \end{cases} \quad (1.1-18)$$

式中 E_0 、 H_0 是常矢量, 这里写的是重振幅部分, 略去了谐振时间因子。相应于点光源产生的光辐射的球面波波函数表达式是

$$\left. \begin{aligned} E(\mathbf{r}) &= \frac{E_0}{r} \exp(ikr) \\ H(\mathbf{r}) &= \frac{H_0}{r} \exp(ikr) \end{aligned} \right\} \quad (1.1-19)$$

式中 r 是场点到源点的距离。

二、偏振态

以平面波为例, 将(1.1-18)式代入(1.1-2)~(1.1-5)式中, 并取 $\rho=0$, 得到

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{K} \cdot \mathbf{E} &= 0 \\ \mathbf{K} \cdot \mathbf{H} &= 0 \\ \mathbf{K} \times \mathbf{E} &= \frac{\mu_0 c}{n} \mathbf{H} \\ \mathbf{K} \times \mathbf{H} &= -\epsilon_0 c n \mathbf{E} \end{aligned} \right. \quad (1.1-20)$$

推导中利用 $n^2 \approx \epsilon_r$, \mathbf{K} 是波矢 k 的单位矢量。这些关系式表明 \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 相互正交, 并垂直于光的传播方向。这种光波称为横电磁波(TEM), 而且, 电场量与磁场量的大小有如下关系

$$\sqrt{\epsilon} E = \sqrt{\mu} H \quad (1.1-21)$$

我们进一步考察光波的偏振态, 即光波电场矢量 \mathbf{E} 的端点沿空间特征点运行的曲线轨迹。为简略起见, 设光波是在无损介质中沿 z 轴传播, 电矢量端点坐标是 (E_x, E_y) , 由(1.1-13)、(1.1-18)式, 并取波函数实部, 有

$$\begin{aligned} E_x &= E_{ox} \cos(\omega t - \frac{\omega}{c} n z + \delta_x) \\ E_y &= E_{oy} \cos(\omega t - \frac{\omega}{c} n z + \delta_y) \end{aligned} \quad (1.1-22)$$

式中 E_{ox} 、 E_{oy} 是正数, δ_x 、 δ_y 里两分量的初始位相。电矢量端点轨迹方程是

$$\left(\frac{E_x}{E_{ox}} \right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{oy}} \right)^2 - 2 \frac{E_x E_y}{E_{ox} E_{oy}} \cos \delta = \sin^2 \delta \quad (1.1-23)$$

$$\text{式中} \quad \delta = \delta_y - \delta_x \quad (1.1-24)$$

δ 是两分量的相位差。

方程(1.1-23)是一椭圆方程, 这说明在一般情况下, 光波电矢量端点随时间描绘的轨迹是椭圆。椭圆的转向分为右旋和左旋, 前者对应于 $\sin \delta > 0$, 而后者对应于 $\sin \delta < 0$ 的情况。在特殊的情况下, 椭圆偏振退化为线偏振与圆偏振。具体地讲, 当

$$\delta = m\pi \quad m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (1.1-25)$$

时, 椭圆方程(1.1-23)式化为

$$\frac{E_y}{E_x} = (-1)^m \frac{E_{oy}}{E_{ox}} \quad (1.1-26)$$

(1.1-26)式是直线方程, 对应是线偏振光。而当

$$\delta = \pm \frac{\pi}{2}, E_{ox} = E_{oy} \quad (1.1-27)$$

时, (1.1-23)式化为

$$E_x^2 + E_y^2 = E_0^2 \quad (1.1-28)$$

(1.1-28)式是圆方程, 对应是圆偏振光。

在一般情况, 光源发出的光辐射的电场振动方向是任意取向的, 称之为非偏振光。对于一般的热光源, 例如太阳和白炽灯所发出的光, 包含着各个方向的电场矢量, 没有那个方向比其它方向占优势。即: 在所有可能方向上, 电场矢量的振幅都相等, 这种光称为自然光。由自然光得到偏振光的过程称为起偏, 相应使用的器件称为起偏器。起偏器也可以用来检验一束光是否是偏振光, 这时称之为检偏器。

起偏的方法较多, 比较典型的方法和器件有如下几种:

(1) 二向色性与偏振片。

二向色性是指某些物质对不同方向偏振光有不同吸收作用的性质, 利用这一性质可以人工制造获得线偏振光的器件。人造偏振片是把聚乙烯醇薄膜在碘溶液中浸泡后, 在高温下拉伸 3~4 倍, 再烘干制成。浸泡过的聚乙烯醇经拉伸后, 碘-聚乙烯醇分子沿着拉伸方向规则地排列, 形成一条条导电长链。碘中具有导电能力的电子能够沿着长链方向运动。入射光波电场的沿长链方向的分量推动电子, 对电子做功而被强烈吸收; 而垂直于长链方向的分量不对电子做功, 能够直接通过, 于是透过光成为线偏振光, 并将这个方向称为偏振片偏振化方向。

对入射到偏振片上的线偏振光, 由偏振片透出的光强度 I 是

$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad (1.1-29)$$

式中 I_0 是入射光强度, α 是入射线偏振光振动方向与偏振片偏振化方向之间夹角。这个关系称为马吕斯定律。

(2) 双折射与偏振棱镜

光在各向异性介质中传播时, 对应两个不同的偏振方向, 光有两种不同的折射率。所以一旦光束进入这种介质时, 一般情况下会分成两束偏振方向不同的光, 向两个方向折射, 这种现象称为双折射。

各向异性介质存在一种特殊方向, 沿这一方向传播的光波, 其折射率与偏振方向无关, 称这一方向为晶体或介质的光轴。只有一个光轴的晶体称为单轴晶体, 例如方解石、石英及磷酸二氢钾 KDP 等; 有两个光轴的晶体, 称为双轴晶体, 例如云母、晶体硫磺等。各向同性的立方晶体, 折射率与方向无关。

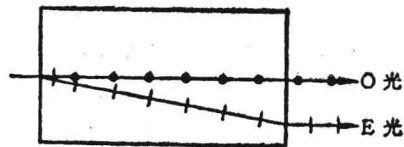


图 1-2 由双折射晶体产生的
双折射现象

证明双折射的一种简易方法, 是让一细束非偏振光垂直照射到具有平行侧面的方解石晶体上, 如图 1-2 所示。可以发现, 光束被分解成两部分, 称为寻常光或 o 光的部分直接通过晶体并遵循斯涅耳定律; 另一部分称为非寻常光或 e 光, 当它通过晶体时分开, 然后又在与原方向平行的方向上透射出来。若入射光的方向平行或垂直于光轴, 就不会发生上述情况。又发现, 寻常光和非寻常光的偏振方向互相垂直。

利用惠更斯作图法,我们能够十分简单地解释上述光线通过各向异性晶体时的传播现象。考虑晶体内某一均匀辐射的点光源,经过短时间后,如图 1-3a 和 b 所示,将出现两个波面。

在图 1-3a、b 中,都有一个球形波面。并且发现,在球形波面上,光的偏振具有电场矢量垂直于光轴(图中用 $\cdot\cdot\cdot\rightarrow$ 表示)的特点。于是这种偏振光的传播速度在各方向上都相同(即晶体有各向同性的特点),这就是上述的寻常光。对于寻常光,晶体具有普通的折射率 n_o 。

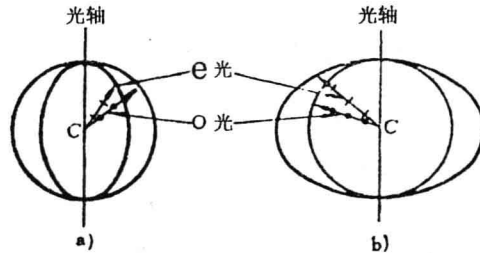


图 1-3 光通过单轴晶体的惠更斯图解分析

a) 正单轴晶体中 e 光和 o 光波阵面 b) 负单轴晶体中 e 光和 o 光波阵面

另一个波面是一个旋转的椭球面,椭球面的一个轴平行于光轴。这种波面由与寻常光相垂直的偏振光,即非寻常光(由 $\cdot\cdot\cdot\rightarrow$ 表示)所形成。由图可看出,非寻常光的速度与方向有关。沿着光轴方向,其速度与寻常光相同,两个波面相接。在与光轴垂直的方向上,非寻常光的速度或者为最大值(图 1-3b 的负晶体中),或者为最小值(图 1-3a 的正晶体中)。即对非寻常光而言,正晶体的折射率 $n_o \leq n_e$; 负晶体的折射率 $n_o \geq n_e$ 。

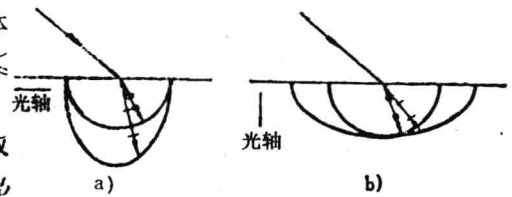


图 1-4 平面偏振光入射到负晶片的双折射现象

a) 光轴平行于晶体表面 b) 光轴垂直于晶体表面

图 1-4 为平面偏振光入射到负晶片的双折射现象,图 a 为其光轴平行于晶体表面;图 b 为光轴垂直于晶体表面两种特殊情况,平面偏振光入射到具有平行切割表面的晶片上所产生的双折射现象。图面为主截面,所谓主截面就是垂直通过晶体的一对平行表面且包含光轴的截面。由图可见,对于非垂直的入射光波,在晶体中将形成两束分开的光,即垂直于主截面偏振的 o 光和平行于主截面偏振的 e 光。图 1-5 为垂直入射光照射到垂直于光轴切割的晶片上时, o 光和 e 光将不分开,且透射光的偏振状态与入射光相同。另一方面,图 1-6 为对于平行于光轴切割的晶体, o 光和 e 光将以互相垂直的偏振和不同的相位从晶片上透射出来。因为它们是相干光,根据它们的相对幅度和相位差,两垂直振动波将产生平面的、球面的或者是椭球偏振光。

一般场合下,当光轴与表面为任意夹角以及入射光为任意偏振光时,将产生两束透射光,即 o 光和 e 光。然而,当入射光为平行或者垂直于主截面的平面偏振光时,就只能透射出一束平面偏振光。形成一束透射光的入射光的两个振动方向,称之为晶体的优惠方向或

晶体的快轴和慢轴。对正晶体而言,与 o 光振动方向相应的方位是快轴,与 e 光振动方向相应的方位是慢轴。对负晶体而言,情况正好相反。如上所述,沿着光轴入射光,透射光的偏振状况与入射光的相同,它不存在优惠方向问题。

(3) 波片

对一块厚度一定的平面晶片,通过适当切割,使晶片表面与晶体的一个光轴平行,这样晶片称为波片。

对如图 1-6 中所示的晶体切片,若使 o 光与 e 光之间产生 $\frac{\pi}{2}$ 相位差,就称它为 $1/4$ 波片。 $\pi/2$ 的相位差等效于 $|n_o d - n_e d| = \lambda/4$ 的光程差, d 是晶片的厚度。例如,对于钠光,石英的厚度 d 应是 $0.0164mm$ 。当平面偏振光入射到 $1/4$ 波片上时,一般情况下,透射出来的是椭圆偏振光,椭圆的轴平行于晶片的优惠方向。但若入射光的偏振平面与晶片的优惠方向的交角是 45° ,则透射出圆偏振光。用类似的方法,可以制造出半波片和全波片。上述几种波片常用于光调制装置中。

三、光的干涉

若将光源发出的光分为若干束,然后使之在一定区域内相遇发生迭加。在一定条件下人们发现迭加区内的光强是在极大值与极小值之间变化。极大值超过各光束光强度简单之和,而极小值又可能为零。这种现象称为光的干涉,其中强度极值轨迹称为干涉条纹。

下面简单考虑双光束干涉的光强度分布。如图 1-7 所示,两束沿 r_1, r_2 方向传播的同频率单色平面光,在空间 P 点相遇,则各自在 P 点处产生的光振动是

$$E_1(P) = E_{10} e^{ikr_1} e^{-i\omega t}$$

$$E_2(P) = E_{20} e^{ikr_2} e^{-i\omega t}$$

而光波在 P 点合成振动是

$$E(P) = E_1(P) + E_2(P)$$

合成强度是

$$I(P) = |E(P)|^2 = E(P) \cdot E^*(P) \\ = I_1(P) + I_2(P) + 2E_{10} \cdot E_{20} \cos[k(r_2 - r_1)]$$

式中, $I_1(P) = |E_1|^2, I_2(P) = |E_2|^2$, 是两光束各自单独在 P 点产生光强度。若取两光波振动方向平行,则

$$I(P) = I_1(P) + I_2(P) + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\delta \quad (1.1-30)$$

式中

$$\delta = k(r_2 - r_1) \quad (1.1-31)$$

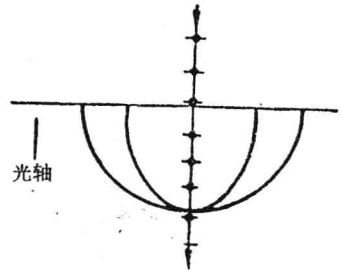


图 1-5 垂直入射光通过晶片表面垂上于光轴切割晶体的情况

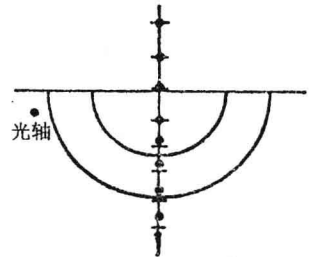


图 1-6 垂直入射光通过晶片表面平行于光轴切割晶体的情况

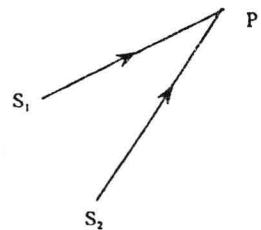


图 1-7 双光束干涉示意

是两光波在相遇点的位相差。显然,在 P 点产生极值条件是

$$\delta = \begin{cases} (2m+1)\pi & \text{极小值} \\ 2m\pi & \text{极大值} \end{cases} \quad m=0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (1.1-32)$$

从上面讨论中看到,光束发生相干的条件是:①两光波有相同频率;②两光波振动的方向一致;③两光波在相遇点位相差 δ 恒定或为零。

光的干涉虽然不难实现,但并非任意两光波相遇都能满足相干条件。一般而言,获得相干光的方法有两种:一种叫波阵面分割法;一种叫振幅分割法。波阵面分割法就是用某种方法将点光源发射的光波的波阵面分割成两个或若干区域,然后再在空间某处合成,在迭加区内出现干涉,例如杨氏双缝干涉,菲涅尔双面镜干涉等。振幅分割法是利用薄膜的两个表面反射,将一束光分成两束或若干束反射或透射光,使之在某区域相遇迭加,产生干涉,例如平板干涉,薄膜干涉等。

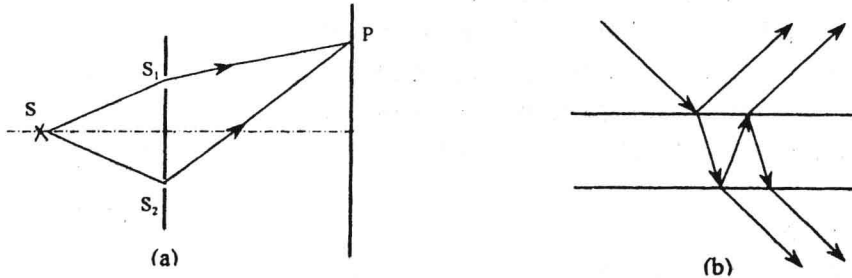


图 1-8 典型干涉形式
(a)分波面 (b)分振幅

四、光的干涉

光的衍射是光波动性的表现。一般而言,可以将衍射现象理解为光能量的传播不再遵从几何光学模型的一种现象。所谓几何光学模型,概括地讲就是光线在均匀各向同性介质中是沿直线传播的模型。

那么在什么情况下,光能量传播不再遵守几何光学模型呢?一般来讲,可归纳为两种可能情况:一种是当光波波面受到限制时,可以观察到衍射现象。例如小孔衍射、多缝衍射等。另一种情况是:当波面上各处振幅分布不均匀时,也将产生衍射。例如激光束的传播(取为 TEM_{00} 模),在束腰 W 处为平面,在波面 W_1 、 W_2 处为球心在 O_1 、 O_2 处的球面,显然波面的法线族不是直线,违背光线直线传播规律。

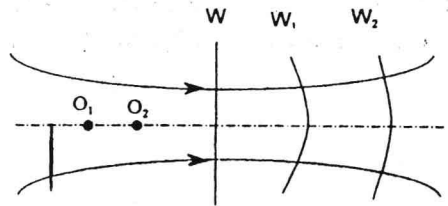


图 1-9 TEM_{00} 模激光束传播

按照光源和考察点到障碍物的距离,可将衍射区分为菲涅尔衍射(光源和考察点到障碍物的距离为有限远)和夫琅和费衍射(光源考察点距离障碍物无限远)。

以半径为 R 的圆孔的夫琅和费衍射为例,平行单色光照射圆孔,通过圆孔后的衍射光由透镜聚焦到焦面上,得到的衍射图样是:中心光强最大,四周有若干个极小和次极大

光强形成的圆环。此衍射图样的中心亮斑称为爱里斑,其直径对圆孔中心的半张角 θ_0 是

$$\theta_0 = \frac{0.61\lambda}{R} \quad (1.1-33)$$

式中 λ 是入射光波长,爱里斑大小决定了光学系统的分辨本领。

另一类很有意义的衍射现象是光栅衍射。光栅是由大量相互平行的细狭缝组成的结构。设每个狭缝宽为 a ,相邻两狭缝间隔为 d (称为光栅常数),则光栅衍射光强度分布为

$$I = I_0 \left(\frac{\sin\beta}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\sin \frac{1}{2} N\delta}{\sin \frac{1}{2} \delta} \right)^2 \quad (1.1-34)$$

式中, $\beta = k \cdot \frac{a}{2f} x$, k 是光波波数, f 是透镜焦距, N 是光栅组成狭缝总数, $\delta = kd \sin\theta$ 。图 1-11 给出 $N=4, d=3a$ 的光栅衍射光强分布示意图。其中衍射光强极大值位置由下式表示

$$d \sin\theta = m\lambda \quad m=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.1-35)$$

m 称为干涉级次。

1.1.3 光辐射的度量

为了对光辐射进行定量化描述,需要引入计量光辐射的物理量。不同波长区域用以计量光辐射的物理量也不相同。用来计量紫外、可见和红外光辐射的物理量定义为辐射度量;用来计量能引起人眼感觉程度光辐射的物理量定义为光度量。两类量在物理概念上是不同的,但所用的符号是一一对应的。为了区别起见,在对应的物理量符号的右下脚以“ e ”表示辐射度物理量,标以“ v ”表示光度物理量。

对于各种波长的光辐射,不管人眼是否能看见,它们的能量和功率的单位必须同其它形态的能量——机械、热、电能等的单位一样,采用焦耳(J)、瓦特(W)。但是,对于能引起人眼视觉的光辐射,也应当根据光辐射对人眼的生理作用,制订一套必要的量和单位。所以,对于同一光辐射,有一套反映其客观物理实质的辐射度学的单位,又有一套反映其对人眼生理作用的光度学单位。这两套单位的名称尽管迥然不同,但采用的术语应当是完全平行的。此外,为了统一起见,这里根据 1981 年《国际单位制 SI》,以及 1982 年颁布的《中华人民共和国国家标准 GB3102.6-82》来定义光辐射的单位。

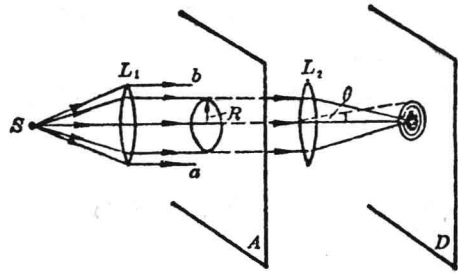


图 1-10 圆孔衍射

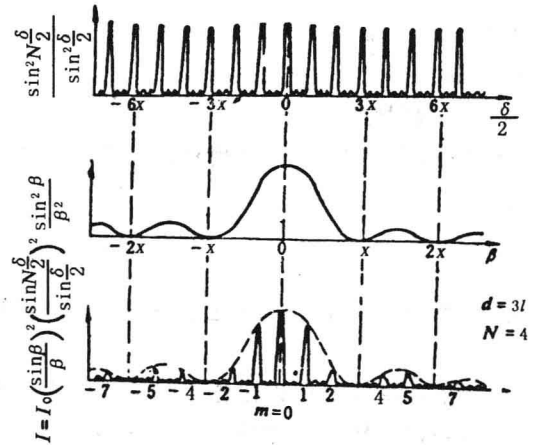


图 1-11 光栅衍射的光强分布

下面对这两套量和单位作简单介绍。

一、辐射量

1. 辐射能与辐射通量

辐射能是发射或传输的电磁波(主要指紫外、可见光及红外辐射)能量。当辐射能被物质吸收时,可以转换成其它形式的能量,如电能、热能等。辐射能一般用符号 Q_r 表示,其单位是焦耳(J)。

辐射通量即辐射功率 Φ_r 。定义为单位时间内通过某一面积的辐射能量,即

$$\Phi_r = \frac{dQ_r}{dt} \quad (1.1-36)$$

式中 dQ_r 表示在时间间隔 dt 内通过某一面积元 dS 的能量。辐射通量的单位是瓦特(W)或焦耳·秒⁻¹($J \cdot s^{-1}$)。

2. 辐射出射度

辐射出射度是用来反映物体辐射能力的物理量。它定义为辐射体单位面积产生的辐射通量,以 M_r 表示,即

$$M_r = \frac{d\Phi_r}{dS} \quad (1.1-37)$$

式中 $d\Phi_r$ 是辐射体面积元 dS 向一切方向发出的辐射通量。辐射出射度的单位是瓦特·米⁻²($W \cdot m^{-2}$)。

3. 辐射强度

辐射强度定义为:辐射源在给定方向上发射的在单位立体角内的辐射通量,用 I_r 表示,即

$$I_r = \frac{d\Phi_r}{d\omega} \quad (1.1-38)$$

式中 $d\Phi_r$ 是辐射体向 $d\omega$ 立体角辐射出来的辐射通量。辐射强度的单位是瓦特·球面度⁻¹($W \cdot sr^{-1}$)。

显然,如果一个放在各向同性均匀介质中的点辐射体向所有方向辐射的总辐射通量是 Φ_r ,则该点辐射体在各方向上的辐射强度 I_r 是常量,即

$$I_r = \frac{\Phi_r}{4\pi} \quad (1.1-39)$$

4. 辐射亮度

辐射亮度表示辐射体在某一给定方向上的辐射性质。它决定于辐射体的性质,并随方向改变。辐射亮度定义为辐射体在给定方向上的辐射强度与在该方向上投影面积的比值,用 L_r 表示,即

$$L_r = \frac{I_r}{dS \cdot \cos\theta} = \frac{d\Phi_r}{dS \cdot \cos\theta \cdot d\omega} \quad (1.1-40)$$

式中 dS 是辐射体的表面元, θ 是表面法线与给定方向夹角,如图 1-12 所示。辐射亮度的单位是瓦特·米⁻²·球面度⁻¹($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$)。

一般辐射体的辐射强度同空间方向有关,但是有些辐射体的辐射强度在空间方向上的分布满足下述规律,即

$$I_e = I_{e0} \cos \theta \quad (1.1-41)$$

式中 I_{e0} 是面积元 dS 沿法线方向的辐射强度。符合上式规律的辐射体称为余弦辐射体。

将 (1.1-41) 式代入到 (1.1-40) 式, 得到余弦辐射体的辐射亮度为

$$L_e = \frac{I_{e0}}{dS} = L_{e0} \quad (1.1-42)$$

即它的辐射亮度是均匀的, 与方向角 θ 无关。若将 (1.1-42) 式代入到 (1.1-40) 式中, 得到余弦辐射体的面积元 dS 向半空间的辐射通量 Φ_e 为

$$\Phi_e = L_{e0} \int \cos \theta \cdot d\omega \cdot dS = L_{e0} \pi dS \quad (1.1-43)$$

其辐射出射度为

$$M_e = L_{e0} \pi \quad (1.1-44)$$

5. 辐射照度

辐射照度定义是: 在接受面上单位面积接收到的辐射通量, 用 E_e 表示, 即

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (1.1-45)$$

式中 $d\Phi_e$ 是接收面上面积元 dS 收到的辐射通量。辐射照度的单位是瓦特·米⁻² ($W \cdot m^{-2}$)。值得注意的是: 不要把辐射照度 E_e 与辐射出射度 M_e 相混淆, 二者的单位尽管相同, 但两者的物理含义是不相同的。

6. 单色辐射度量

对单色光辐射, 可以采用上述类似的物理量表示, 只不过均定义为单位波长间隔内对应的辐射度量, 其名称和单位见表 1-2。

表 1-2 单色辐射度量和单位

度量名称	符号	定义式	单位名称	单位符号
光谱辐射通量	$\Phi_{e,\lambda}$	$d\Phi_e/d\lambda$	瓦·微米 ⁻¹	$W \cdot \mu m^{-1}$
光谱辐射出射度	$M_{e,\lambda}$	$dM_e/d\lambda$	瓦·米 ⁻² ·微米 ⁻¹	$W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$
光谱辐射照度	$E_{e,\lambda}$	$dE_e/d\lambda$	瓦·米 ⁻² ·微米 ⁻¹	$W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$
光谱辐射强度	$I_{e,\lambda}$	$dI_e/d\lambda$	瓦·球面度 ⁻¹ ·微米 ⁻¹	$W \cdot sr^{-2} \cdot \mu m^{-1}$
光谱辐射亮度	$L_{e,\lambda}$	$dL_e/d\lambda$	瓦·米 ⁻² ·球面度 ⁻¹ ·微米 ⁻¹	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-2} \cdot \mu m^{-1}$

二、光度量

光度学的物理量是可以与辐射度学的基本物理量 $Q_e, \Phi_e, I_e, M_e, L_e, E_e$ 对应的 Q_v, I_v, M_v, L_v, E_v 来表示, 其定义完全是一一对应。表 1-3 列出了光度学的基本物理量的定义和单位。

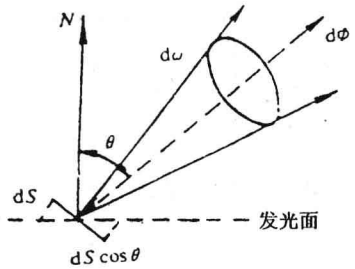


图 1-12 亮度定义图示