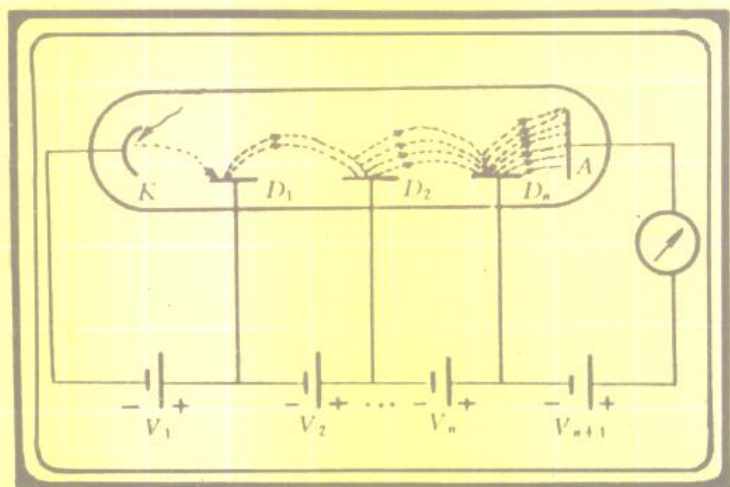




高等学校 规划教材  
工科电子类



# 光电子

## 技术及其应用

石顺祥 过巴吉 编著

电子科技大学出版社

TN2

S57

441078

# 光电子技术及其应用

电子科技大学出版社

1994. 11.

[川]新登字 016 号

D201/11

## 光电子技术及其应用

石顺祥 过已吉 编著

\*

电子科技大学出版社出版

(成都建设北路二段四号) 邮编 610054

四川省棉麻公司印刷厂

四川省新华书店经销

\*

开本 787×1092 1/16 印张 18.6 字数 433 千字

版次 1994 年 11 月第一版 印次 1994 年 11 月第一次印刷

印数 1—1000 册

标准书号 ISBN 7-81016-864-9/TN·175

定价:10.85 元

## 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等学校“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,以“全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是以通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

机械电子工业部电子类  
专业教材办公室

## 前 言

本教材系按机械电子工业部的工科电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,由电子物理与器件教材编审委员会激光与红外编审小组征稿并推荐出版。责任编辑为魏光辉。

本教材是为非光电子技术专业的工科院校本科《光电子技术及其应用》课程编写的教材。全书共九章,较全面系统地介绍了激光产生的物理基础,激光的特性,典型激光器件,激光基本技术,光电子应用中的光学元件,光电探测,光纤以及激光在工业加工、光纤传感、通讯、干涉计量、全息术等方面的应用。目的是扩大学生的知识面,利于学科交叉,以便充分利用光电子技术为其它学科的发展服务。

本课程的参考学时为 50 学时。考虑到非光电子技术专业学生的特点和可接受性,本教材着重讲解基本概念和基础知识,尽量避免繁杂的数学推导,在章末备有思考题和参考书,以帮助读者更好地掌握有关知识和深入提高。本教材还可作为非光电子技术专业人员参考。

本教材由西安电子科技大学石顺祥、过巴吉合编而成。第四、五、六、八章由石顺祥执笔,第一、二、三、七、九章由过巴吉执笔,并由天津大学李昱同志审阅。在编写过程中,激光与红外编审组的同志对本教材提出了许多宝贵的意见,在此一并表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

一九九三年九月

# 引 言

什么是光电子技术?光电子技术是研究从红外波、可见光、紫外光、X射线直至 $\gamma$ 射线波段范围内的光波电子技术,是研究运用光子和电子的特性,通过一定媒介实现信息与能量转换、传递、处理及应用的科学,人们认为,光电子技术是光学和电子学发展的高级阶段,也是高技术领域内的先导和核心。它是以光电子学为理论基础,以光电子元、器件为主体,综合利用光、电、机、计算机和材料技术,以实现具有一定功能的而且实用的仪器、设备和系统。

和电子技术相比,光电子技术具有频谱宽、信息容量大、传输速度快、抗电磁干扰能力强的特点。

众所周知,光电子技术已渗透到各行各业,它已在科学技术、军事装备、工农业生产、交通、邮电、天文、地质、医疗、卫生等国民经济各个部门发挥着重要的作用。人们认为,它对国民经济各个领域的影响是很深远的,它所产生的经济效益远远超过光电子产业本身的产值。例如,理论上一根光纤用作载波,可传输100亿个电话线路;用光作成的计算机比现有计算机速度快1000倍以上;用计算机控制的排字,15分钟就可完成24小时的排字量等。在能源开发和节能方面,用激光分离同位素已取得显著进展,它的耗电量仅为传统的同位素分离方法(扩散法)的二十四分之一、这样就有可能利用激光分离同位素的方法替代提取核燃料铀的传统方法,估计每年可节约资金几十亿美元。

当前研究超快现象(如生命过程、光合作用机理的研究、血卟啉衍生物中有选择地吸收的机理研究等)的唯一方法,就是利用激光技术。所以激光已成为一种崭新的独特的科学研究的测量手段。激光也是研究超精细能级结构,光与物质相互作用过程的重要手段,并因此派生出诸如非线性光学、激光光谱学等新的学科分支和激光生物学、激光化学等新的边缘学科。这些学科的发展,可能在遗传学、视觉过程、光合作用等方面取得重要突破,有可能引起某些基础科学的变革,从而可能出现一系列具有实用价值的新的应用。

光电子技术现在也已成为提高现代武器装备性能的重要手段,如军舰、坦克、飞机、火炮等这些常规武器和导弹、卫星等这些尖端技术以及红外搜索、跟踪、瞄准、测距、制导、激光雷达、激光陀螺和激光致盲武器等技术,都要求发展和使用光电子技术。

以上列举的一些事实足以说明光电子技术的重要性,也就是为什么发达国家对发展光电子技术和产业十分重视的原因所在。

# 目 录

## 引言

### 第一章 光的本性

- § 1.1 光的波动性..... (1)
- § 1.2 电磁波谱..... (2)
- § 1.3 光的相干性..... (4)
- § 1.4 光的能量及量度单位..... (6)

### 第二章 激光产生的基本原理

- § 2.1 光的自发辐射与受激辐射..... (15)
- § 2.2 光谱线加宽..... (17)
- § 2.3 介质的增益和增益饱和..... (22)
- § 2.4 光的受激放大和振荡..... (24)
- § 2.5 光学谐振腔及激光模式..... (26)
- § 2.6 激光器的振荡特性..... (35)

### 第三章 激光输出特性与高斯光束

- § 3.1 激光器的输出特性..... (38)
- § 3.2 激光特性..... (44)
- § 3.3 高斯光束及其光学变换..... (47)

### 第四章 典型激光器

- § 4.1 激光器的分类..... (60)
- § 4.2 固体激光器..... (60)
- § 4.3 气体激光器..... (71)
- § 4.4 染料激光器..... (84)
- § 4.5 半导体激光器..... (88)

### 第五章 激光基本技术

- § 5.1 几种物理效应..... (97)
- § 5.2 光调制及光调制器..... (103)
- § 5.3 激光偏转技术..... (112)
- § 5.4 短脉冲技术(调Q技术、锁模技术)..... (116)
- § 5.5 选模技术..... (129)
- § 5.6 稳频技术..... (135)
- § 5.7 倍频技术..... (139)

### 第六章 光电子技术应用中的光学元件

- § 6.1 光的传播规律..... (146)
- § 6.2 反射器..... (150)

§ 6.3	法布里-珀罗标准具 .....	(154)
§ 6.4	光栅 .....	(156)
§ 6.5	偏振器 .....	(160)
§ 6.6	波片 .....	(164)
§ 6.7	滤光器 .....	(165)
§ 6.8	光隔离器及环流器 .....	(168)
<b>第七章 光探测技术</b>		
§ 7.1	光电探测器的物理效应和光电转换定律 .....	(173)
§ 7.2	光电探测器的特性参数和噪声 .....	(179)
§ 7.3	光电发射探测器——光电倍增管 .....	(183)
§ 7.4	光电导探测器 .....	(186)
§ 7.5	光电池 .....	(189)
§ 7.6	光电二极管 .....	(193)
§ 7.7	直接探测 .....	(202)
§ 7.8	光频外差探测 .....	(204)
<b>第八章 光波导与光纤</b>		
§ 8.1	光波导与光纤 .....	(213)
§ 8.2	光在光波导中的传播原理 .....	(214)
§ 8.3	光纤及其特性参量 .....	(217)
§ 8.4	光纤的传输特性 .....	(223)
§ 8.5	特殊光纤 .....	(227)
§ 8.6	光纤耦合及光纤无源器件 .....	(233)
<b>第九章 光电子技术应用</b>		
§ 9.1	干涉计量 .....	(246)
§ 9.2	全息技术应用 .....	(253)
§ 9.3	光纤传感技术 .....	(259)
§ 9.4	激光通信 .....	(271)
§ 9.5	光盘技术 .....	(279)
§ 9.6	激光在工业加工方面的应用 .....	(282)
§ 9.7	光电子技术的其它应用 .....	(288)



# 第一章 光的本性

光是我们最熟悉的现象之一,我们的周围是一个充满光的世界,没有光人类就没法生活。那么,光是什么?光的本质是什么?这个问题很早就引起了人们的关注,并且为此激烈地争论了几个世纪。

对于光的本质的认识,早在17世纪就形成了两种对立的学说。一种是以牛顿为首的微粒说,他们认为光是直线传播的微粒。另一种是以惠更斯为首的波动说,他们认为光是在以太中传播的波动。这两种学说都可以解释一定的现象,但又显示不出那种理论更优越。在当时由于牛顿在科学界的威望极高,加之微粒说能较自然地说明光的直进现象,一时占了上风,致使惠更斯的波动说被忽视,甚至被遗忘近百年。

到了19世纪,人们发现了光的干涉、衍射和偏振等现象,这些现象都是波动的特征,与微粒说格格不入,人们开始想起了惠更斯的波动说。但是他们臆造的传播光的以太介质使得这种波动说仍不能确切描述光的本质。直到19世纪中,电磁理论的发展才确认光是一种电磁波,而不是惠更斯的机械波。19世纪末,在研究黑体辐射过程中,普朗克首先提出了光波能量是不连续的,这种量子叫做光量子或光子,它的能量为

$$E = h\nu$$

式中 $h$ 是普朗克常数, $\nu$ 是光的频率。于是,光的波动理论告诉我们,光是以频率为 $\nu$ 的电磁波,而量子理论则说明一定频率的光对应一定能量的光子,它们之间有上面给出的关系,这就是光的波、粒二重性。至此,将光的波动性和粒子性辨证地统一起来,就能令人满意地解释目前发生的各种光学现象。但是,人类对光的本质的认识仍不能说已经最后完成,认识还将继续深化。

## § 1.1 光的波动性

光是一种电磁波,它具有电磁波的一切特性,并且,这些特性可以从电磁场的基本方程,即众所周知的麦克斯韦方程组推导出来。求解方程组,可以得到光波具有不同的传播形式:平面波、球面波和柱面波。平面光波的波动表示式为

$$\begin{aligned} E(\mathbf{r}, t) &= E_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \\ H(\mathbf{r}, t) &= H_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中 $E_0$ 和 $H_0$ 分别为光波场的电场强度和磁场强度振幅; $\omega$ 为光波的角频率( $\omega = 2\pi\nu$ ); $\mathbf{k}$ 为光波沿传播方向的波矢量,其大小(称为波数)为 $k = 2\pi/\lambda$ ; $\mathbf{r}$ 为空间坐标。为了运算的方便,常把波动表示式写成复数的形式

$$\begin{aligned} E(\mathbf{r}, t) &= E_0 \exp[-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] \\ H(\mathbf{r}, t) &= H_0 \exp[-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] \end{aligned} \quad (1-2)$$

可以证明,平面光波具有横波特性,其电矢量的振动方向垂直于波的传播方向,且 $E(\mathbf{r}, t)$ 和 $H(\mathbf{r}, t)$ 的相位相同、振动方向互相垂直。由于光效应是由电场强度矢量引起的,所以,光波

可以只用电场描述。

光的波动性主要表现在它具有干涉、衍射及偏振等特性。

众所周知,当频率相同、振动方向相同、相位相同或具有固定位相差的光波相遇时,在相遇的区域内产生干涉现象。光的干涉现象在日常生活中也经常会遇到,例如,肥皂泡和水面上的油膜所呈现的美丽色彩就是光波干涉的结果。又如,用两片窗玻璃片擦干净以后再贴在一起并压紧,有的地方就会出现不规则的彩色条纹,这也是光波干涉的结果。

光的衍射也是光的波动性的主要标志之一。它有两个主要特点,即(1)光波传播方向会变,经障碍物后会在某种程度上绕到其几何阴影区域中去。(2)在几何阴影区附近,波的强度会有起伏。但在日常生活中所见者,多为光的直线传播和反射、折射等现象,而极少发现光绕到障碍物后面去的衍射现象。这是因为:只有当障碍物的尺寸与波长相近时,衍射现象才较显著。一般在空气中无线电波的波长在  $10\sim 10^3$  米的范围,可闻声波的波长是  $10^2\sim 10$  米的范围,因此其衍射现象极为常见。而光波波长在可见光区是  $0.4\sim 0.7$  微米,故其衍射现象少见。

在上面的表示式中,电磁波均采用矢量表示,它给出了光波电磁场的振动方向。如果电场振动方向漫无规则,则该光为自然光或非偏振光;如果电场矢量具有一定的规则,则称为偏振光。若光波电场矢量沿一直线反复振动,称为线偏振光。线偏振光的振动方向与传播方向构成的平面叫振动面。包含传播方向在内,并与振动面垂直的平面叫偏振面。线偏振光也叫平面偏振光。由于线偏振光的电场矢量总是沿着一个方向,因此可将波动表示式写成标量形式

$$E(r, t) = E_0 \exp[-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] \quad (1-3)$$

若光波电矢量端点随时间变化所描绘的轨迹是一个椭圆,称之为椭圆偏振光。在特殊情况下,电场矢量端点轨迹是一个圆,称之为圆偏振光。

与一切振动一样,光振动也可以分解为两个互相垂直的光振动。反之,由两个方向互相垂直的光振动也可以合成得到任意取向的振动。

如果光波是由点源发出的,则该光波是球面波,它的表示式为

$$E(r, t) = \frac{E_1}{r} \exp[-i(\omega t - kr)] \quad (1-4)$$

式中  $E_1$  是距点源单位距离处的电场强度。

如果光波是由一无限长的线光源发出的,它的波阵面具有柱面的形式,其波动表示式可写为

$$E(r, t) = \frac{E_1}{\sqrt{r}} \exp[-i(\omega t - kr)] \quad (1-5)$$

## § 1.2 电 磁 波 谱

自从 19 世纪人们证实了光是一种电磁波后又经过了大量的实验,进一步证实了 X 射线(伦琴射线)、 $\gamma$  射线等都是电磁波。但是,它们的频率(或波长)范围差别很大。如果按其频率(或波长)的次序排列成如图 1-1 所示的谱,则称其为电磁谱。通常所说的光学区域(或光

学频谱)包括紫外线、可见光和红外线。由于光的频率极高( $10^{12} \sim 10^{16}$ Hz),数字很大,使用起来很不方便,所以通常用波长表征,光谱区域的波长范围约从  $10^{-7}$  厘米到 1 毫米。可见光是人眼可以看到的各种颜色的光波,波长范围从 0.4 微米到 0.76 微米。相应的各色光的波长范围为:红色,  $0.76\mu\text{m} \sim 0.63\mu\text{m}$ ; 橙色,  $0.63\mu\text{m} \sim 0.6\mu\text{m}$ ; 黄色,  $0.60\mu\text{m} \sim 0.57\mu\text{m}$ ; 绿色,  $0.57\mu\text{m} \sim 0.50\mu\text{m}$ ; 青色,  $0.50\mu\text{m} \sim 0.45\mu\text{m}$ ; 蓝色,  $0.45\mu\text{m} \sim 0.43\mu\text{m}$ ; 紫色,  $0.43\mu\text{m} \sim 0.40\mu\text{m}$ 。紫外线和红外线不能引起视觉。红外线波段的波长范围从  $0.76\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ (相应的频率范围是  $4 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{11}$ Hz)。在红外技术领域中,由于不同波长的红外线在地球大气层中的传播特性不同,通常它可以分为如下几个波段,  $0.76\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$  为近红外波段;  $3\mu\text{m} \sim 6\mu\text{m}$  为中红外波段;  $6\mu\text{m} \sim 15\mu\text{m}$  为远红外波段;  $15\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$  为极远红外波段。有时根据红外辐射产生的机理不同,也可将红外线划分为:近红外波段,  $0.76\mu\text{m} \sim 2.4\mu\text{m}$ (相应于原子能级间跃迁); 中红外波段,  $2.5\mu\text{m} \sim 25\mu\text{m}$ (相应于分子振动—转动能级间的跃迁); 远红外波段,  $25\mu\text{m}$  以上(相应于分子转动能级间的跃迁)。

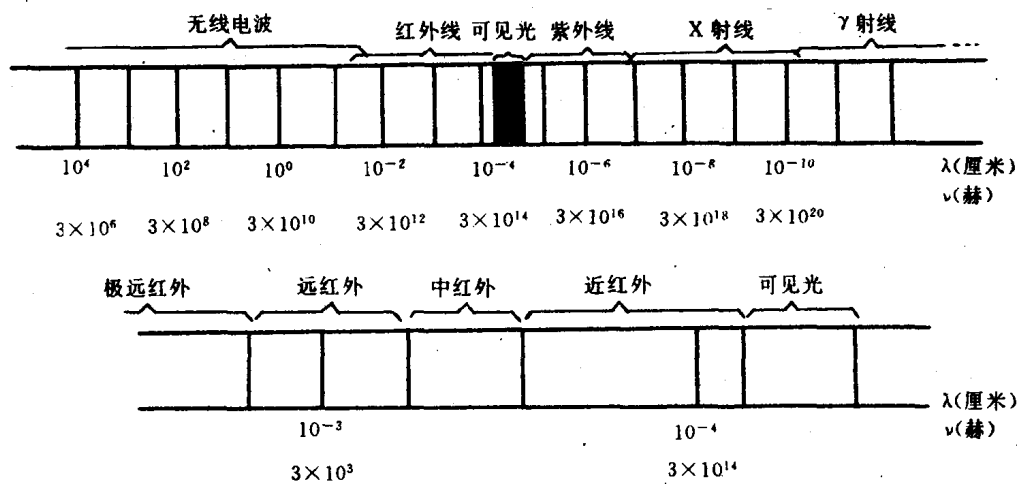


图 1-1 电磁波谱

在上述电磁波谱中的所有电磁波,虽其波长范围不同,产生方法及其与物质间的相互作用各不相同,但其本质相同,都遵守同样的反射、折射、干涉、衍射、偏振规律,在真空中的传播速度都为  $c = 2.9979 \times 10^8 \text{m/s}$ 。如果将电磁波在真空中的传播速度与介质中的传播速度相比,可以得到传播介质的绝对折射率为

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (1-6)$$

式中  $\epsilon_r$  和  $\mu_r$  分别为介质的相对介电常数和相对导磁率。在自然界中,除了铁磁物质外,大多数物质的磁性都很弱,  $\mu_r \approx 1$ , 因此上式变为

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (1-7)$$

这个关系称为麦克斯韦关系。对于一般物质来说,  $\epsilon_r$  或  $n$  都是频率的函数,具体关系形式取决于物质的结构。

## § 1.3 光的相干性

光的波动性,除我们已熟悉的干涉、绕射和偏振特性以外,还有一个很重要的特性,即光的相干性。

### 一、光的相干性

一提到光的相干性问题,有些比较熟悉无线电波的读者似乎感到是一个新问题,其实这是一种误解。相干性问题,在无线电波段中同样存在,只是由于无线电频率比较低,它们的相干性非常好,因此没有就该问题进行专门讨论的必要,习惯成了自然。对于光波来说,虽然它也是电磁波,但由于它的频率高,在一般情况下,它们的相干性较差,因此在那些与相干性有关的应用中,必须认真地讨论这个问题。

所谓光的相干性就是不同空间点、不同时刻的光波场的某些特性(例如光波场的相位)之间的相关性。其中,时间相干性是指同一空间点上,两个不同时刻光波场之间的相干性,或者说是沿着光传播方向,离光源不同距离的两点,在同一时刻光波场之间的相干性。从原理上,可以在光路上两点通过两个分束器取出部分光,考察信号间的相关效应。如果两个信号相关,则可以由一点的光电场(振幅、相位)确定另一点的光电场(振幅、相位)。或者等效地说,可以由空间一点某时刻的光电场确定另一时刻的光电场。

所谓空间相干性是指在同一时刻、垂直于光传播方向上的两个不同空间点上的光波场之间的相干性。如果两个信号相关,即可由一个空间点的光电场确定另一空间点的光电场。

在实验上,时间相干性的测量如图 1-2(a)所示,通过放在光路中的倾斜反射镜所反射的部分光进行干涉实验。改变两镜间的距离时,干涉条纹将产生变化。当镜间距离增加到某一长度  $L_c$  时,干涉效应消失,这个长度称为相干长度。因为光传播速度为常数,相应该长度有一个光的传播时间  $t_c = L_c/c$ ,它称之为相干时间,光波在该相干时间内是时间相干的。 $t_c$  愈大,光的时间相干性愈好。

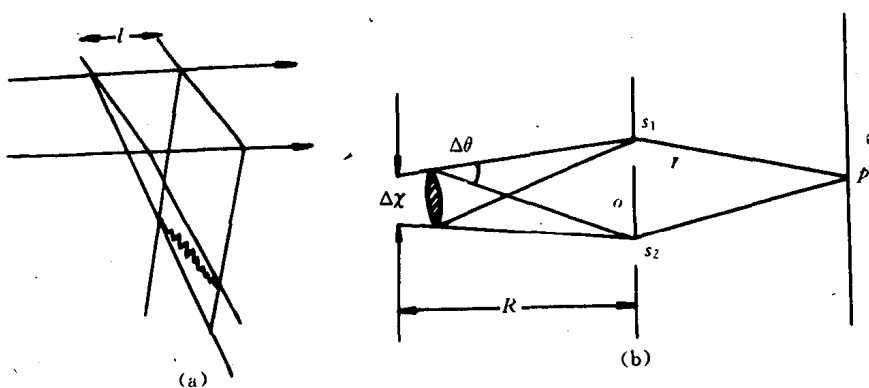


图 1-2 (a)用两束光束干涉测量时间相干性  
(b)用双缝干涉测量空间相干性

对于空间相干性的实验可以利用图 1-2(b)所示的双缝干涉实验进行。如果实验用的光

源是一个理想点光源,则在屏上会看到清晰的干涉条纹。如果光源有一定的大小  $\Delta x$ ,则干涉效应变差。若固定光源到双缝的距离  $R$ ,改变两缝的间隔,则干涉效应将产生变化,随着缝间距离增大,干涉条纹逐渐变得模糊。实验表明,在双缝屏上存在着一个以  $o$  点为对称中心的面积  $A_c$ ,只要  $s_1$  和  $s_2$  在  $A_c$  之外,就不能产生干涉现象。这一面积  $A_c$  叫做相干面积。 $A_c$  愈大,则该光的空间相干性愈好。

通过分析, $s_1$  和  $s_2$  处的场具有明显相干性的条件是

$$\Delta x \Delta \theta \leq \lambda \quad (1-8)$$

式中  $\Delta \theta$  是两缝间距对光源的张角。上式表明,光源愈小,则具有空间相干性的张角  $\Delta \theta$  愈大。

## 二、光源的相干性

我们所遇到的光源大致可以分为两类:普通光源(热光源)和激光光源。对于普通光源,光是由处于高激发态的原子(分子或离子)自发地跃迁到低能态时发射出来的。其发射过程并非无限延续,而是间断地发射极短的光波列,某个原子被激发几次,它就自发地发射几个间断波列。这些波列一般相隔很远(与每一个波列的持续时间相比),并且在时间上是随机的。因此,某原子发出的一些波列之间没有恒定的相位关系,它们是不相干的,不可能产生干涉现象。

因为一个长度有限的波列按付里叶展开时,相当于在频带宽度  $\Delta \nu$  内有一系列正弦波的迭加,波列的持续时间  $\tau_c$  与  $\Delta \nu$  之间有如下的关系:

$$\tau_c \Delta \nu = 1 \quad (1-9)$$

$\tau_c$  也称为相干时间。该关系指出光源发出的波列频带愈窄,单色性愈好,则相干时间愈长,时间相干性愈好。而对于普通光源来说,它们产生波列的频带很宽,单色性很差,所以时间相干性也很差。只有对光源采取滤光措施,提高其单色性,才可能改善输出光的时间相干性。

对于普通光源,除了从一个原子不同时刻发出的光波列间没有固定的相位关系外,由于处在激发态的各个原子之间彼此无关,所以不同原子所发出的光波之间,也没有固定的相位关系。所以断定,从一个原子发出的光与任一其它原子发出的光之间是不相干的。正因如此,在图 1-2(b)中所示的双缝干涉实验中,由于光源有一定的大小,所以不同地方受激原子发出的光是不相干的,导致干涉效应很差。进一步分析表明,某光源发出的光的相干面积  $A_c$  与光源尺寸、光源距双缝距离有关,并且光源尺寸愈小,相干面积  $A_c$  愈大。因此,可以在普通光源前放置一个光阑,缩小有效光源的尺寸,以改善其空间相干性。光阑尺寸愈小,空间相干性愈好。

## 三、光子的相干性

现在利用光子的概念再来说明光的相干性。由(1-8)式,它可写成

$$(\Delta x)^2 \leq \left(\frac{\lambda}{\Delta \theta}\right)^2 \quad (1-10)$$

该式的意义是:如果要求传播方向限于立体角  $(\Delta \theta)^2$  之内的光波是相干的,光源的面积  $(\Delta x)^2$  必须小于  $(\lambda/\Delta \theta)^2$ 。因此  $(\lambda/\Delta \theta)^2$  就是光源的相干面积。现在把光源的相干面积作为底面,以相干长度为高,限定一个空间  $\Delta V$ ,它被定义为相干体积,即

$$\Delta V = c t_c \cdot (\Delta x)^2 = \frac{c}{\Delta \nu} \left(\frac{\lambda}{\Delta \theta}\right)^2 \quad (1-11)$$

可以证明,在相干体积内的光子具有相同的状态,即处于同一光子态,属于同一光子态的光子是相干的。

综上所述,由于普通光源受激的原子自发地、随机地发光(大量光波列的组合),所以发射光的振幅、相位随着时间随机地起伏变化,其时间、空间相干性都很差。通常将这类光源叫做 Chaotic 光源,相应的光叫 Chaotic 光。尽管可以利用针孔限制光源的有效尺寸或用滤光器限制其波长范围,以获得较好的相干性,但是所得到的光强非常弱。因此,用此法获得相干光的代价非常高,实用性低。

与此相反,60 年代出现的激光器,因其受激原子的发光不是自发地、随机地进行的,而是受激发射,因此激光的时间、空间相干性非常好。直接利用激光器作光源即可得到很好的干涉图形。激光为相干光,称激光器为相干光源。有关激光的特性,以后将专门介绍。

## § 1.4 光的能量及量度单位

### 一、光的能量

前面已经指出光具有波、粒二重性。由电磁理论证明,伴随着光波的传播,光的能量也不断地向空间传播。单位时间通过垂直于传播方向的单位面积的电磁能量称为辐射强度矢量或玻印亭矢量  $S$ , 并且有

$$S = E \times H \quad (1-12)$$

它描述了光的电磁能量的传播特性。由于光的频率为  $10^{14}$  赫兹的量级,所以  $S$  值变化极快,人眼和其它任何接收器都不可能接收到  $S$  的瞬时值,只能接收  $S$  的平均值。对于平面光波来说,在一个周期内的平均值为

$$\bar{S} = \frac{1}{T} \int_0^T S dt = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E^2 \quad (1-13)$$

式中  $\epsilon$  为介电系数, $\mu$  为导磁率。在实际应用中,通常把辐射强度的平均值  $\bar{S}$  称为光强度,即单位时间通过垂直光的传播方向单位面积的能量,以  $I$  表示。

另外,有许多现象,如光电效应、伦琴射线的散射以及光作用下进行的化学反应(光化反应)等现象和实验规律,都表明与光的波动理论的基本概念相矛盾,必须考虑光的微粒性,即光由光子所组成。每个光子的能量  $E=hc\nu$ ,光的频率不同,光子的能量也不同。根据光的量子理论,光波传输的能量就是由许多单个光子组成的光子流的能量。

设频率为  $\nu$  的光束的强度为  $I$ ,光束的光子密度为  $n$ (单位体积内的光子数),则

$$I = nh\nu c \quad (1-14)$$

或

$$n = I/(h\nu c) \quad (1-15)$$

### 二、光子的动量和光压

光子除具有能量  $E=hc\nu$  外,还具有动量  $p$ 。现在我们求光子动量  $p$  的表示式。由相对论质能关系

$$E = m_0 c^2 / (1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2} \quad (1-16)$$

和动量的表示式

$$p = mv = m_0 v / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (1-17)$$

可得

$$m_0^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2 \quad (1-18)$$

因为光子的静止质量  $m_0 = 0$ , 所以由上式可得

$$p = h\nu/c = \frac{h}{\lambda} \quad (1-19)$$

式中  $\lambda$  是光的波长。

既然单个光子具有动量, 自然, 光子流也具有动量, 设光子流单位体积内的能量为  $w$ , 则与单位体积相对应的光子流的动量  $p$  为

$$p = n \frac{h\nu}{c} = \frac{w}{c} \quad (1-20)$$

式中  $n$  是单位体积内的光子数。动量  $p$  的方向指向光的传播方向。这样, 当在真空中沿某一方向传输的光子流入射到物体表面时, 部分光子流被吸收, 光子流的动量发生改变, 这表明物体受到一定的力的作用, 垂直于物体单位面积的作用力就是作用在该物体上的光压  $P_{\text{光压}}$ 。如果物体表面的反射系数为  $R < 1$ , 则可证明

$$P_{\text{光压}} = (1 + R)w \quad (1-21)$$

考虑到  $w = nh\nu = I/c$ , 所以

$$P_{\text{光压}} = \frac{I}{c}(1 + R) \quad (1-22)$$

因为光的传输速度非常大, 所以对于各种实际上可得到的光能流而言, 光压都很小, 例如晴天直射的日光被完全吸收时, 它所产生的光压为平方厘米 0.4 毫克, 所以觉察它是十分困难的。

### 三、光能量的量度单位

由于历史上的原因, 人们早先对电磁辐射中的可见光进行了比较充分的研究, 引进了光通量、光强、亮度、照度等光度学量, 用以描述不同情况下人眼对光的敏感程度。但是, 由于这些光度学量是以人眼对可见光刺激所产生的视觉为基础的, 所以它受到了主观视觉的限制, 不是客观的物理学描述方法。在光电子技术及其应用中, 经常要遇到的是包括可见光在内的各种波段电磁辐射量的计算和测量, 显然不能再采用光度学量, 必须采用不受人们主观视觉限制、建立在物理测量基础上的辐射度量学量。光度学量可视为辐射度量学量的特例。

#### (一) 基本辐射量

常用的辐射量很多, 其中最基本的有五个, 即

##### 1. 辐射功率

辐射功率又叫辐射通量, 它是发射、传输或接收辐射能量的时间变化率, 单位是瓦, 其定义为

$$P = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (1-23)$$

式中  $Q$  是辐射能量。由于辐射能量还是波长、面积、立体角等许多因素的函数，所以辐射功率用辐射能量对时间的偏微商定义。类似地，对其它辐射量也由偏微商定义。

## 2. 辐(射)出(射)度 $M$

辐出度又叫辐射通量密度，它是描写面源辐射特性的量，其数值是源的单位面积向半球空间发射的辐射功率，其定义为

$$M = \frac{\partial P}{\partial A} \quad (1-24)$$

式中  $A$  是辐射源面积。辐出度的单位为瓦/米<sup>2</sup>。由于源面积发射不一定均匀，所以面上各点附近单位面积发射的功率也不一样，故  $M$  通常是源上位置的函数。

## 3. 辐射强度 $I_o$

辐射强度是为了描写点源辐射的功率在空间不同方向上的分布情况而引入的量，所谓点源，顾名思义，是源尺寸很小的辐射源。实际上，确定点源首要的不是辐射源真实的物理尺寸大小，而是它相对观察者(或探测器)所张的角。例如，距地球遥远的星星，其物理尺寸可能很大，但相对地面上的观察者所张的角度来说，它完全可以看成一个点。一般来说，只要观测距离比源本身的最大尺寸大 10 倍以上，并且观测装置是不带光学系统的简单探测器，就可以将辐射源视为点源。如果观察装置采用光学系统，则判别标准由探测器的尺寸和辐射源在探测器表面上的成象尺寸决定，若象比探测器小，则可将辐射源视为点源。

辐射强度是点源在单位立体角内发射的辐射功率，因此它是辐射功率在某个方向上角密度的量度，如图 1-3 所示，它的定义为

$$I_o = \frac{\partial P}{\partial \Omega} \quad (1-25)$$

式中  $\Omega$  是点源所张的立体角。辐射强度的单位是瓦/球面度。

## 4. 辐射亮度

辐射亮度是为描述扩展源辐射功率在空间和源表面上的分布情况而引入的量。辐射亮度又叫面辐射强度或辐射率。

所谓扩展源是指尺寸很大的辐射源。实际上同一个辐射源既可以看作点源，又可以看作扩展源。例如喷气式飞机的尾喷口，在 1 公里以上的距离

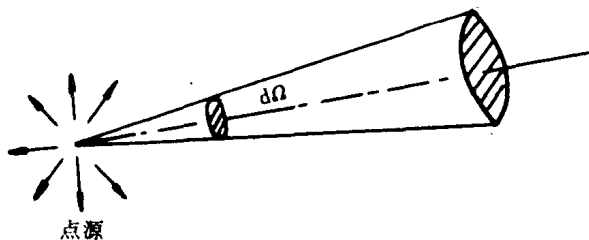


图 1-3 辐射强度的定义

观测时，可以看作一个点源，而在三米距离观察时，表现为一扩展源。当采用光学系统观测时，光辐射源的象比探测器大或者说辐射源充满光学系统的视场，则该辐射源叫做扩展源。

扩展源在某个方向上的辐射亮度是它在该方向上的单位表观面积向单位立体角内发射的辐射功率。如图 1-4 所示，如果在扩展源表面上某点附近的一个小面积元  $dA$  向半球空间 ( $2\pi$  球面度) 发射的辐射功率为  $dP$ ，当我们考虑该面积元向与面积元法线夹角为  $\theta$  的方向上发射辐射时，则由于在  $\theta$  方向上看到面积元  $dA$  的表观面积为  $dA \cos\theta$ ，所以， $dA$  向  $\theta$  方向  $d\Omega$



立体角内发射的辐射功率可以看作是由源的表观面积元  $dA\cos\theta$  发出的辐射功率,表示为

$$L = \frac{\partial^2 P}{\partial A \partial \Omega \cos\theta} \quad (1-26)$$

辐射亮度的单位是瓦/米<sup>2</sup>球面度。一般来说,辐射亮度与球面上的位置及观测的方向  $\theta$  有关。

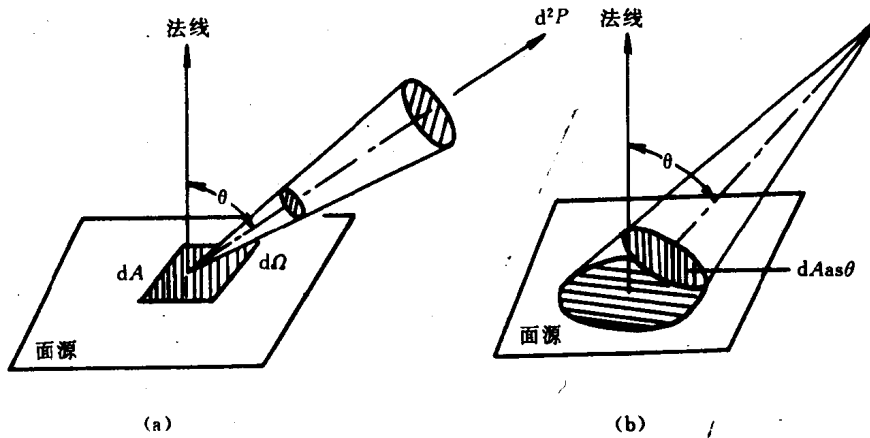


图 1-4 (a)辐射亮度的定义  
(b)源的表观面积

### 5. 辐照度 $E$

以上讨论的各个辐射量都是描述辐射源发射特性的量。为了描述受照表面接收辐射功率的分布情况,引入辐射照度这个量。

假设辐射源投射到被照表面某点附近小面积  $dA$  上的辐射功率为  $dP$ ,则被照表面该点的辐照度  $E$  为

$$E = \frac{\partial P}{\partial A} \quad (1-27)$$

其意义表示投射被照面上单位面积上的辐射功率,其单位为瓦/米<sup>2</sup>。虽然它与辐出度的单位相同,但两者的物理意义不同。辐出度是离开辐射源表面的辐射功率密度,它包括了源向整个半球空间发射的辐射功率。而辐照度则是入射到被照表面上的辐射功率密度,它可以包括一个或几个源投射来的辐射功率。 $E$  除与被照面上的位置有关外,还与辐射源的特性及被照明面与源的相对位置有关。

上面所给出的几个基本辐射量只考虑了辐射功率的空间分布特性。实际上任何一个辐射源发出的辐射或投射到一个表面上的辐射功率,都有一定的频率分布特征(即光谱特征),故对于所讨论过的辐射量均可定义相对应的光谱辐射量。

此外,在光电子技术及其应用中,还常遇到单色辐射量,某波长间隔辐射量和全辐射量等。这里仅以辐射功率为例进行说明,其它量的情况完全类似。

由光谱辐射功率的意义可知,在波长为  $\lambda$  到  $\lambda+d\lambda$  的波长间隔内的辐射功率为

$$dP = P_\lambda d\lambda \quad (1-28)$$