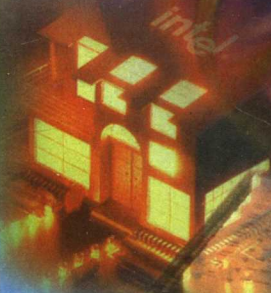


高等学校
电子信息类 规划教材

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

18

2

高等学校
电子信息类 规划教材

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

内 容 提 要

本书以光电子技术及其应用为主要内容,第一章到第三章介绍了光电子技术应用中核心光源——激光器产生激光的基本理论基础和典型的激光器件,第四、五章介绍了光电子技术应用中的基本单元激光技术和主要光学元件,第六章较详细地介绍了光电子技术应用中的光电探测元件和技术,第七章介绍了有关光纤通信和光纤传感应用中的光纤传输基础,第八章介绍了光电子技术在精密测量、光学全息及光信息处理、激光通信、光纤传感、光盘技术、激光工业加工等诸方面的应用。

本书可以作为电子信息类(非光电子技术)专业本科生限定选修课的教材,光电子技术专业本科生任选课的教材,也可以作为从事光电子技术及应用的工程技术人员的参考书。

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出版
(成都建设北路二段四号) 邮编 610054

西南财经大学印刷厂印刷

四川省新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 20.625 字数 470 千字
版次 2000 年 8 月第一版 印次 2000 年 8 月第一次印刷

印数 1—500 册

标准书号 ISBN 7—81065—494—2/TN·284

定价:24.60 元

出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作,根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》,我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社,各专业教学指导委员会,在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上,根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求,编制了《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报,经各学校、出版社推荐,由各专业教学指导委员会评选,并由我部教材办协商各专指委、出版社后,审核确定的。本轮规划教材的编制,注意了将教学改革力度较大、有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需、尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时,选择了一批对学科发展具有重要意义,反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划,以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足,希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议,以不断提高教材的编写、出版质量,共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

前 言

本书系按电子工业部制定的《1996~2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由全国高校光电子技术专业教学指导委员会审定并推荐出版的。责任编委是华中理工大学兰信钜教授，上海交通大学陈英礼教授担任主审。

光电子技术是研究从红外波、可见光、紫外光、X射线直至 γ 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。1960年激光器的诞生，推动了光电子技术的飞速发展，使得光电子技术逐渐成为高新科学技术领域内的先导和核心，在科学技术、国防建设、工农业生产、交通、邮电、天文、地质、医疗、卫生等国民经济的各个领域内都获得了愈来愈重要的应用，特别是正逐渐进入人们的家庭。

随着光电子技术的发展和在各个领域内的广泛应用，特别是对于涉及、从事光电子技术应用的非光电子技术专业的人员，需要有一本实用的、较系统的专业教材。本书就是为电子信息类(非光电子技术)专业本科生的“光电子技术及其应用”课程及光电子技术专业本科生的相关课程编写的教材。全书共分八章，较全面系统地介绍了有关激光产生的基本理论基础，典型的激光器件，光电子技术应用中的基本单元激光技术和主要光学元件，光电子技术应用中的光电探测元件和技术，有关光纤通信和光纤传感应用中的光纤传输基础，以及光电子技术在精密测量、光学全息及光信息处理、激光通信、光纤传感、光盘技术、激光工业加工等诸领域内的应用。在本书的编写上，根据非光电子技术专业本科生的专业基础特点，着重于基本概念和物理模型，尽量避免繁杂的数学推导。为扩大学生的知识面，有利于学科交叉，本书取材广泛，并尽可能反映光电子技术的最新进展。此外，在每一章末还备有一些思考题和参考文献，以帮助读者自学和进一步研究。

本书由西安电子科技大学石顺祥和过巴吉编写，其中，石顺祥编写第三、四、七、八章，过巴吉编写第一、二、五、六章。在编写过程中得到了全国高校光电子技术专业教学指导委员会的指导和支 持，也得到了西安电子科技大学激光教研室老师的热情帮助，责任编委兰信钜教授和主审陈英礼教授对本书提出了许多宝贵意见，在此谨向他们表示诚挚的感谢。由于编写水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，殷切期望广大读者批评指正。

编 者

1999年11月

目 录

出版说明

前言

第一章 光的本性

- § 1.1 光的波动性 (1)
- § 1.2 电磁波谱 (3)
- § 1.3 光的相干性 (4)
- § 1.4 光的能量及量度单位 (6)
- 思考题 (14)
- 参考文献 (14)

第二章 激光的产生及特性

- § 2.1 激光器的组成 (15)
- § 2.2 激光工作物质的增益特性 (16)
- § 2.3 光学谐振腔及激光模式 (24)
- § 2.4 激光器的输出特性 (34)
- § 2.5 激光特性 (40)
- § 2.6 高斯光束及光学变换 (43)
- 思考题 (55)
- 参考文献 (56)

第三章 典型激光器

- § 3.1 激光器的分类 (57)
- § 3.2 固体激光器 (58)
- § 3.3 气体激光器 (70)
- § 3.4 染料激光器 (84)
- § 3.5 半导体激光器 (88)
- 思考题 (97)
- 参考文献 (98)

第四章 激光基本技术

- § 4.1 几种物理效应 (99)
- § 4.2 光调制及光调制器 (105)
- § 4.3 激光偏转技术 (114)
- § 4.4 调Q脉冲技术 超短脉冲技术 (118)
- § 4.5 选模技术 (132)
- § 4.6 稳频技术 (137)
- § 4.7 倍频技术 (142)
- 思考题 (147)
- 参考文献 (148)

第五章 光电子技术应用中的光学元件

- § 5.1 光的传播规律 (149)

§ 5.2	反射器	(153)
§ 5.3	法布里-珀罗标准具	(157)
§ 5.4	光栅	(159)
§ 5.5	偏振器	(163)
§ 5.6	波片	(167)
§ 5.7	滤光器	(168)
§ 5.8	光隔离器及环流器	(171)
	思考题	(174)
	参考文献	(175)
第六章 光探测技术		
§ 6.1	光电探测器的物理效应和光电转换定律	(176)
§ 6.2	光电探测器的特性参数和噪声	(182)
§ 6.3	光电发射探测器——光电倍增管	(186)
§ 6.4	光电导探测器	(190)
§ 6.5	光电池	(194)
§ 6.6	光电二极管	(198)
§ 6.7	直接探测	(211)
§ 6.8	光频外差探测	(213)
	思考题	(221)
	参考文献	(221)
第七章 光纤传输基础		
§ 7.1	光波导与光纤	(222)
§ 7.2	光在光波导中的传播原理	(223)
§ 7.3	光在光纤中的传播原理	(227)
§ 7.4	光纤的传输特性	(234)
§ 7.5	特殊光纤	(238)
§ 7.6	光纤耦合及光纤无源器件	(244)
	思考题	(255)
	参考文献	(256)
第八章 光电子技术应用		
§ 8.1	精密测量	(257)
§ 8.2	光学全息及光信息处理	(266)
§ 8.3	激光通信	(283)
§ 8.4	光纤传感技术	(294)
§ 8.5	光盘技术	(303)
§ 8.6	激光在工业加工中的应用	(307)
§ 8.7	光电子技术的其它应用	(314)
	参考文献	(321)

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(Newton)为首的微粒说,他们认为光是直线传播的微粒流。另一种是以惠更斯(Huygens)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光学现象,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。但是他们臆想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(Planck)常数, ν 是光的频率。于是,光的波动理论告诉我们,光是频率为 ν 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辩证地统一起来,就能令人满意地解释目前发生的各种光学现象。现在已有把光的波粒二重性统一地描述的理论,那就是在量子力学基础上建立起来的量子电动力学。

那么要问,现在人们对光的本质是否已完全彻底的认识了,回答是否定的。譬如近代巷理实验发现, γ 射线的光子可以变成两个带相反电荷的电子和阳电子,这表明光子与电子之间存在着某种联系;又如现在人们提出一个非常有意义的问题,那就是光子是否像原子和分子那样,具有内部结构?由此可见,人们对光的本质的认识,还远远没有完结。伴随着科学技术的不断进步,人们将从不断涌现出来的新现象和规律的研究中,逐步深化对光的本质的认识。

§ 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(Maxwell)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

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

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; ω 为光波的角频率($\omega = 2\pi\nu$); \mathbf{k} 为

表征光波传播方向的波矢量,其大小(称为波数)为 $k=2\pi/\lambda$; 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相位差的光波相遇时,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

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

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分振动。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

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

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

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

§ 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、 γ 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,则称其为电磁波谱。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($10^{12}\text{Hz}\sim 10^{16}\text{Hz}$),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}cm 到 1mm 。可见光是人眼可以看到的各种颜色的光波,波长范围从 $0.4\mu\text{m}$ 到 $0.76\mu\text{m}$ 。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是 $0.76\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ (相应的频率范围是 $4\times 10^{14}\text{Hz}\sim 3\times 10^{11}\text{Hz}$)。在红外技术领域,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)。

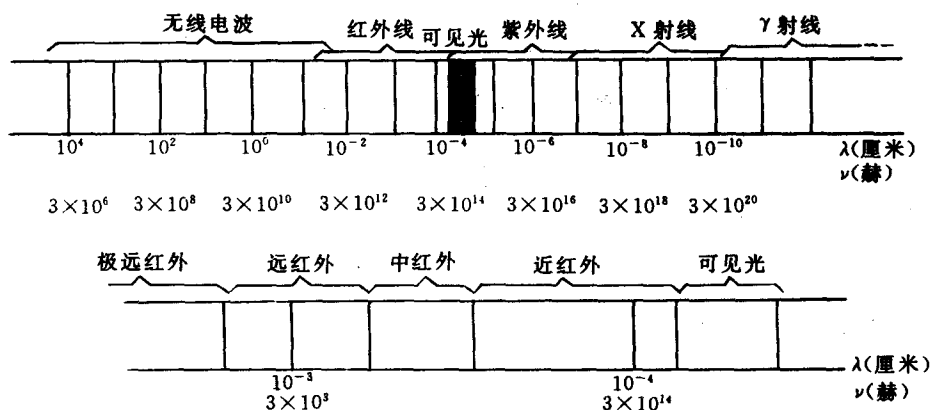


图 1-1 电磁波谱

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 ϵ_r 和 μ_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, ϵ_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、衍射和偏振特性以外, 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指在不同空间点、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。光的相干有时间相干和空间相干。

所谓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, 或者说是指沿着光传播方向, 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 c 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。

对于空间相干性的实验可以利用图 1-2(b) 所示的双孔干涉实验进行。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 Δx , 则干涉效应变差。若固定光源到双孔的距离 R , 改变两孔的间隔, 则干涉效应将产生变化, 随着孔间距离增大, 干涉条纹逐渐变得模糊。实验表明, 在双孔屏上存在着一个以 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

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

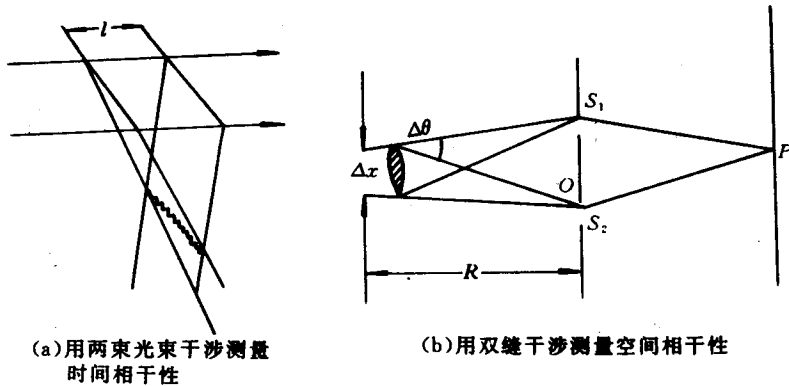


图 1-2 (a)用两束光束干涉测量时间相干性
(b)用双缝干涉测量空间相干性

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傅里叶展开时,相当于在频带宽度 $\Delta\nu$ 内的一系列正弦波的叠加,波列的持续时间 τ_c 与 $\Delta\nu$ 之间有如下的关系:

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

τ_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)中所示的双孔干涉实验中,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、光源距双孔距离有关,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 ΔV ，它被定义为相干体积，即

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

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，由于普通光源处于激发态的原子自发地、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，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，有关激光的特性将在第二章介绍。

§ 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 ϵ 为介电系数， μ 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、X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 $E = h\nu$ ，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 ν 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 $E=h\nu$ 外,还具有动量 p_ν 。现在我们求光子动量 p_ν 的表示式。由相对论质能关系

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

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

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

式中 λ 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,它所产生的光压为每平方厘米 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。辐出度的单位是瓦/米²。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_n

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

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

式中 Ω 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

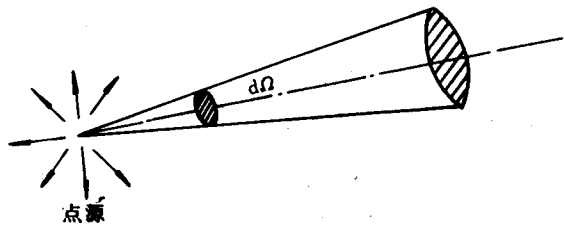


图 1-3 辐射强度的定义

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 (2π 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 θ 的方向上发射辐射时,则由于在 θ 方向上看到面积元 dA 的表观面积为 $dA\cos\theta$, 所以, dA 向 θ 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²·球面度。一般来说,辐射亮度与球面上的位置及观测的方向 θ 有关。

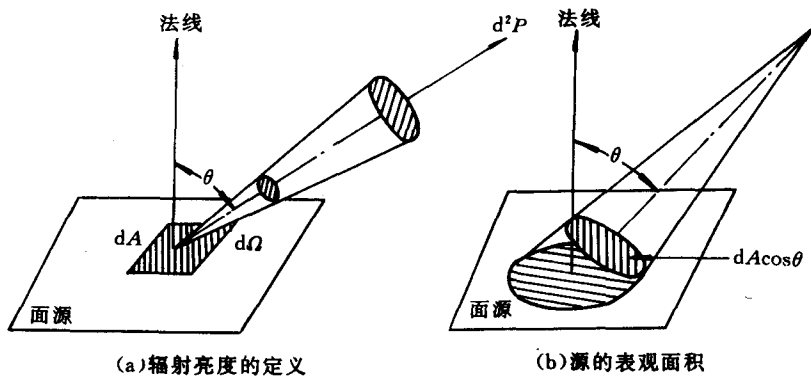


图 1-4 (a) 辐射亮度的定义
(b) 源的表观面积

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²。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 λ 到 $\lambda+d\lambda$ 的波长间隔内的辐射功率为

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

若 $d\lambda$ 足够小,式中 dP 可称为波长为 λ 的单色辐射功率,用 dP_λ 表示。在一个有限波长范围 $\lambda_1 \sim \lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$ 内的辐射功率叫做该波长间隔 $\Delta\lambda$ 的辐射功率,用 $P(\Delta\lambda)$ 表示,其定义为

$$P(\Delta\lambda) = P(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_\lambda d\lambda \quad (1-29)$$

如果 $\lambda_1 = 0, \lambda_2 \rightarrow \infty$, 则

$$P = \int_0^\infty P_\lambda d\lambda \quad (1-30)$$

称为全辐射功率。

(二) 基本光度学量

如前所述,光度学涉及的是电磁辐射中能引起视觉响应的那部分辐射场。所以光度学量是辐射度量学量的特例。在研究方法上和概念上基本相同,并且光度学量与辐射度量学量是一一对应的。但是应当指出,辐射度量学量度量的是电磁辐射场的能量,而光度学量度量的是光场产生的视觉响应。下面我们先来简单介绍一下基本光度学量及其单位,然后说明它们与辐射量之间的关系。

历史上曾用烛光作为光强度的单位,并把它作为光度学的基本单位,即其它光度学量的单位都由它定义出来。在科学技术发展过程中,对烛光采取过不同的规定。1977年国际计量委员会决定选择光通量的单位作为光度标准。光通量相应于辐射度量学中的辐射通量(功率),单位是流明。其定义如下:定义波长为 555nm 的单色辐射功率为 0.0015 瓦的光通量为一流明(lm)。之所以选择 555nm 的波长,是因为人眼白昼视觉在这个波长上最灵敏。当然,流明的定义不仅适用于白昼,也适用于黑夜的任何情况下的眼睛视觉。

光通量用 P_v 表示。由它出发,按与辐射度量学同样定义方法,可以定义出光度学中的其它量,如光出射度,用 M_v 表示;光强度,用 I_{Ω_v} 表示;光亮度,用 L_v 表示;光照度,用 E_v 表示。相应的定义式和单位分别为

光出射度 M_v :

$$M_v = \frac{\partial P_v}{\partial A} \quad \text{流明 / 米}^2 \text{ (勒克司)}$$

一个流明/米² 又叫一勒克司。

光强度 I_{Ω_v} :

$$I_{\Omega_v} = \frac{\partial P_v}{\partial \Omega} \quad \text{流明 / 球面度 (坎德拉)}$$

一流明/球面度又叫一坎德拉。