

Optoelectronic technology & applications

光电子 技术及应用

亢俊健 贾丽萍 朱月红 尹立杰 编著

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内容简介

本书从光电子技术实际应用的角度出发,阐述光电子技术的基础理论,研究光电子器件的原理、结构及特性,结合具体仪器设备,剖析光电子技术和器件的典型应用。内容涉及激光光源、光探测器、光传感器和光电子仪器系统,以及半导体激光器老化筛选与寿命测试、产品稳定性、性能评价等光电子技术热点研究领域的最新成果。

本书注重实用,内容新颖、系统,适合光信息科学与技术、电子科学与仪器、应用物理、测控技术与仪器等相关专业本科生和研究生的教学使用,也可作为光电子工程方面的科研人员和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光电子技术及应用/亢俊健,贾丽萍,朱月红,尹立杰编著. —天津:天津大学出版社,2007.6

ISBN 978-7-5618-2452-8

I. 光... II. ①亢... ②贾... ③朱... ④尹... III. 光电子技术 IV. TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 056619 号

出版发行 天津大学出版社
出版人 杨欢
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
网 址 www.tjup.com
短信网址 发送“天大”至 916088
印 刷 天津泰宇印务有限公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm × 260mm
印 张 12.5
字 数 312 千
版 次 2007 年 6 月第 1 版
印 次 2007 年 6 月第 1 次
印 数 1 - 1 500
定 价 20.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

光电子技术在现代科技、经济、军事、文化和医学等领域发挥着越来越重要的作用,在产生巨大能量、提高信息容量、高速并行传输和处理、非接触高精度检测、精密加工和传感方面,都取得了令人瞩目的成就。由能量光电子技术和信息光电子技术所支撑的光电子产业逐步成为国民经济的支柱性产业,也是竞争激烈、发展最快的高新技术产业。

本书从工程角度出发,尽量避开繁杂深奥的理论和公式,力求深入浅出地阐述光电子技术的基本理论、技术和典型应用。全书共分为6章。首先阐述光电子技术的基本理论,然后按照从光源到光信息的采集、传递及处理的顺序,逐一介绍常用光源、半导体激光器、光信号探测器以及微弱光信号检测技术等所涉及的器件基本原理、特性和参数评价等内容,特别注重光电子技术应用领域所需要的知识。此外,还详细介绍了半导体激光器泵浦固体激光器、半导体激光器参数测试仪、光释光测年仪、光纤光栅传感系统等几种常用的光电子仪器系统。

半导体激光器泵浦固体激光器(Diode Pumped Solid State Laser)的种类很多,可以是连续的、脉冲的、调Q的以及加倍频混频等非线性转换的,是激光学科的重点发展方向之一。它在激光打标、激光微加工、激光印刷、激光显示技术、激光医学和科研等领域都有广泛的用途,具有很大的市场潜力。本书重点介绍了半导体激光器泵浦Nd:YAG晶体激光器、半导体激光器泵浦倍频晶体产生蓝绿激光的激光器。

半导体激光器参数测试系统是用来测量半导体激光器主要性能参数和特性指标的仪器。半导体激光器参数测试系统通过给受试半导体激光器提供不同的工作电流,采集受试半导体激光器的各种参数信号,计算并输出该半导体激光器的光电转换特性、伏安特性以及光谱特性。

光释光测年仪是光释光断代的设备,由光源、激发室、光子计数、数据分析及数据处理等部分组成。在光释光断代的操作中,由于样品对光敏感,工作必须在黑暗的条件下进行,即使是在暗室中采用的红灯也被禁止。

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性,用紫外激光直接写入法在单模光纤的纤芯内形成的空间相位光栅。利用光纤光栅制作的传感器具有许多其他传感器无法比拟的优点。目前,光纤光栅已经用于温度、应变、压力、加速度、位移等物理量的测量,还可以进行多个物理量的准分布式测量,成为大型结构长期健康监测的最佳选择。

湖南大学文建国教授和北京西图尼光电公司徐小红博士审阅了本书,并提出了宝贵的修改意见;石家庄经济学院刘泰峰教授、王广祥副教授、李明亮老师、李聚光老师,中国地质大学安海忠教授,中国科学院北京半导体研究所左方和苏美开博士为本书耗费了大量心血;刘宇星同学为本书绘制了大量的图件,在此一并感谢。

由于作者水平和时间所限,错误与不当之处在所难免,殷切希望各位读者批评指正。

编者

2007年3月

目 录

第 1 章 光电子技术的理论基础	(1)
1.1 光的基本性质	(1)
1.1.1 光的波粒二重性	(1)
1.1.2 单色波的干涉与衍射	(3)
1.1.3 光的吸收与散射	(3)
1.2 物体的受激辐射原理	(4)
1.2.1 基尔霍夫定律	(4)
1.2.2 实际物体的热辐射	(4)
1.3 光电子度量学基础理论	(6)
1.3.1 基本辐射量	(6)
1.3.2 光谱量与非光谱量	(7)
第 2 章 光源的基本特性	(9)
2.1 光源的相干性	(9)
2.1.1 时间相干性	(9)
2.1.2 空间相干性	(10)
2.2 光源基本特性参数	(10)
2.2.1 辐射效率和发光效率	(10)
2.2.2 光谱功率分布	(11)
2.2.3 空间光强分布	(11)
2.2.4 光源的色温	(11)
2.2.5 光源的颜色	(12)
第 3 章 半导体激光器	(13)
3.1 激光器的工作原理	(13)
3.1.1 激光器工作条件	(13)
3.1.2 激光的模式	(14)
3.2 半导体的光发射原理	(15)
3.2.1 半导体的能带结构	(15)
3.2.2 半导体受激发射原理	(16)
3.3 半导体激光器的工作特性	(17)
3.3.1 $P-I$ 特性	(17)
3.3.2 光谱特性	(18)
3.3.3 LD 的调制特性	(18)
3.4 半导体激光器的可靠性	(19)
3.4.1 可靠性的数学表征	(19)

3.4.2	可靠性筛选	(20)
3.5	结型激光器	(21)
3.5.1	阈值性质	(22)
3.5.2	光谱性质	(22)
3.5.3	光强分布	(23)
3.5.4	输出功率和转换效率	(23)
3.5.5	激光器的温升和热阻	(24)
3.6	异质结激光器	(24)
3.6.1	同质结与异质结	(24)
3.6.2	双异质结激光器	(25)
3.7	发光二极管	(26)
3.7.1	LED 的特性参数	(28)
3.7.2	几种典型的发光二极管	(30)
3.8	典型的半导体激光器	(31)
3.8.1	分布反馈式激光器	(31)
3.8.2	分布布拉格反射式激光器	(32)
3.8.3	量子阱激光器(QW-LD)	(33)
3.8.4	垂直腔面发射激光器	(33)
3.9	光纤激光器	(34)
3.9.1	光纤激光器原理	(34)
3.9.2	包层泵浦光纤激光器技术	(34)
3.9.3	拉曼光纤激光器技术	(35)
3.9.4	新型的光纤激光器技术	(36)
第4章	光探测器	(40)
4.1	半导体材料中的光吸收	(40)
4.1.1	本征吸收	(40)
4.1.2	晶格振动吸收	(41)
4.1.3	自由载流子的光吸收	(42)
4.1.4	激子吸收	(42)
4.1.5	杂质吸收	(43)
4.2	光探测的基本物理效应	(44)
4.2.1	光电效应	(44)
4.2.2	光热效应	(45)
4.3	光探测器分类	(45)
4.3.1	光电子发射探测器	(45)
4.3.2	光电导探测器	(46)
4.3.3	光伏探测器	(46)
4.3.4	热释电探测器	(47)
4.4	光电探测器的性能参数	(47)

4.4.1	光电探测器的工作条件	(47)
4.4.2	响应方面的性能参数	(48)
4.4.3	噪声方面的参数	(49)
4.5	噪声的统计特性	(50)
4.5.1	噪声的概率分布	(50)
4.5.2	噪声的功率谱密度	(51)
4.5.3	噪声的相关函数	(52)
4.5.4	常见噪声的统计特性	(53)
4.6	光探测器的噪声	(55)
4.6.1	散粒噪声	(55)
4.6.2	热噪声	(56)
4.6.3	产生 - 复合噪声	(56)
4.6.4	温度噪声	(57)
4.6.5	电流噪声($1/f$ 噪声)	(57)
第 5 章	光传感器	(58)
5.1	光敏传感器	(58)
5.1.1	光电管	(58)
5.1.2	光电倍增管	(59)
5.1.3	光敏电阻	(59)
5.1.4	光敏二极管	(60)
5.1.5	光敏三极管	(61)
5.1.6	光电池	(63)
5.1.7	光电耦合器件	(63)
5.1.8	热释电红外线传感器	(63)
5.2	光纤传感器	(63)
5.2.1	光纤传感器的分类	(65)
5.2.2	光纤传感器的应用	(67)
5.3	光纤光栅传感器	(83)
5.3.1	光纤 Bragg 光栅传感器	(84)
5.3.2	啁啾光纤光栅传感器	(86)
第 6 章	光电子系统	(88)
6.1	半导体激光器泵浦固体激光器	(88)
6.1.1	固体激光工作物质	(88)
6.1.2	半导体激光器泵浦固体激光器	(89)
6.2	半导体激光器参数测试仪	(92)
6.2.1	参数测试原理及方法	(93)
6.2.2	LD 参数测试系统	(102)
6.2.3	LD 参数测试评价	(115)
6.2.4	LD 老化和寿命测试系统模型	(121)

6.2.5 LD 老化和寿命测试系统设计	(124)
6.3 光释光测年仪	(142)
6.3.1 光释光测年原理	(143)
6.3.2 光释光测年方法	(143)
6.3.3 光释光测年仪	(146)
6.3.4 测试结果	(167)
6.4 光纤光栅传感系统	(174)
6.4.1 光纤光栅传感技术原理	(175)
6.4.2 光纤光栅传感网络分析仪	(183)
6.4.3 光纤光栅传感技术水平	(186)
参考文献	(188)

第1章 光电子技术的理论基础

光电子技术最早出现于20世纪50年代。它集中了固体物理、导波光学、材料科学、微细加工和半导体科学技术的科研成就,将电子技术与光子技术自然结合,研究相干光波的产生及其与物质的相互作用。它是光电子学理论为基础,以光电子元器件为主体,综合利用光、电、机、计算机和材料科学等技术,实现具有一定功能的实用仪器、设备和系统的技术,是对光电子学的工程研究和应用。

光电子技术的蓬勃发展源于第一束激光的出现。早在1916年,爱因斯坦就提出了受激辐射理论,预言了在一定条件下“受激辐射”现象的存在。直到1960年,人们才解决了受激辐射材料、元器件和装置等种种技术问题,制造出第一台红宝石激光器。激光是物体在受激辐射过程中产生并被放大的光,其英文名是 laser,音译为“镭射”。

本章主要介绍从事光电子技术研究所需的基本理论,包括光的本性、受激辐射理论以及度量学基本原理。

1.1 光的基本性质

1.1.1 光的波粒二重性

19世纪60年代,麦克斯韦根据电磁学现象的经验规律,应用矢量分析的数学手段,得出了电磁场方程组

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

及均匀各向同性物质方程

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} \\ \mathbf{E} &= \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中: \mathbf{E} 为电场强度矢量; \mathbf{D} 为电位移强度矢量; \mathbf{H} 为磁场强度矢量; ρ 为自由电荷密度; \mathbf{J} 为自由电荷电流密度; ϵ 为介电常数(亦称电容率); μ 为磁导率; σ 为电导率。真空中的介电常数和磁导率为

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2) (\text{F}/\text{m}) \quad (1-2)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{C}^2 (\text{H}/\text{m}) \quad (1-3)$$

在光学问题中,传播媒质是电介质, $\rho=0, \mathbf{J}=0, \mu_r=1$ 。直角坐标系中,运算符 $\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} +$

$j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$, i, j, k 分别为 x, y, z 坐标轴的单位矢量。

经过运算可推导出电磁场波动方程

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} - \epsilon\mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} &= 0 \\ \nabla^2 \mathbf{H} - \epsilon\mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

这里, $\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 。

由麦克斯韦方程组推出, 电磁波在真空中的传播速度与光速极为接近。此麦克斯韦预言, 光为电磁波, 从而建立了光的经典电磁理论。现在已知, 无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线、 γ 射线等都是电磁波, 只是它们的频率(或波长)不同。其中, 红外线、可见光和紫外线这三部分合称光辐射, 本书称为光频电磁波。

经典电磁理论在处理有关光的传播问题上获得巨大成功, 但无法解决光与物质的相互作用的问题。20世纪初, 爱因斯坦建立了光的量子理论, 认为光不仅是一种电磁波, 而且是一种粒子, 是由一份一份的光量子——光子组成的, 以速度 c 运动的光子流。光的粒子属性和波动属性(波长、频率、偏振等)之间存在着密切的联系。

1. 光子的能量 E

光子的能量 E 与光波的频率 ν 的对应关系为

$$E = h\nu$$

其中, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, 称为普克朗常数。可见, 光子的能量与频率成正比。在无线电波段, 由于频率低, 相应电磁场量子能量很小, 量子性不明显, 主要表现为波动性; 在光频段, 由于频率高, 对应光子能量大, 表现出明显的量子性。

2. 光子的质量 m 与动量 P

光子的运动质量

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} \quad (1-5)$$

不同频率的光子质量不同, 频率越高, 质量越大。

光子动量大小可表示为

$$P = mc = \frac{h\nu}{c^2} \cdot c = \frac{h\nu}{c}$$

与波长的关系为 $P = \frac{h}{\lambda_0}$, 即与波长成反比。频率越高, 波长越短, 相应的光子动量越大。

3. 光子的简并度 \bar{n}

光子的运动状态完全由位置坐标 (x, y, z) 和动量 (P_x, P_y, P_z) 确定, 描述三维运动粒子运动状态的空间称为六维相空间。在这六维空间中, 一个光子状态占有的相空间元为 h^3 , 称之为相格, 它是相空间中可用实验区分的最小尺度。光子的某一运动状态只能定域在一个相格中, 但是不能确定它在相格内部的位置。同一相格内的光子不可区分, 具有相同的运动状态。

同一相格中的光子平均数目 \bar{n} 称作光子的简并度, 是表征光特征的一个重要物理量。通常接触到的光源所发出的光的光子的简并度 $\bar{n} \leq 1$, 激光器所发出的光的光子的简并度 $\bar{n} \geq 1$ 。

因此,普通光源在很宽的频率范围以及全空间方位上发光,光分布在大量的光子状态中,即使光能量比较大,平均到一个光子状态中的光子数目也微乎其微。相反,激光器只在特定方向上和频率上发光,光子分布在少数甚至单一的光子状态中,平均到一个光子状态中的光子数目巨大。

1.1.2 单色波的干涉与衍射

光的干涉现象描述的是有限个光束的叠加。具有相同频率和振幅矢量,但传播方向和初始相位不同且相差恒定的两列单色光波

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= E_0 e^{i(\omega t - k_1 \cdot r + \varphi_1)} \\ E_2 &= E_0 e^{i(\omega t - k_2 \cdot r + \varphi_2)} \end{aligned} \right\} \text{在空间相遇时会发生干涉现象,}$$

即两列波相遇的空间各点强度恒定,不同点强度不同,在叠加区域出现强度稳定的强弱分布现象。因为两列光波的偏振方向相同,所以总电场 $E = E_1 + E_2$ 。其干涉条纹的走向一定在两个波矢角平分线方向。所谓的干涉条纹走向是指合成光强相等点的空间取向,记录了光波的相位信息。

光的衍射现象描述无限个光束叠加时所产生的现象,光可以绕过障碍物偏离直线传播而进入障碍物的几何阴影区,在观察屏幕上出现光强分布不均匀的现象。衍射现象主要由障碍物的线度与光波长大小之比决定。当障碍物的线度远大于光波长时,光表现为直线传播;当二者大小可以比拟时,直线传播不再成立而出现衍射现象。衍射光强分布携带着孔栏的几何信息,因此可以通过衍射光强分布提取出孔栏的几何信息。

1.1.3 光的吸收与散射

光通过物质(包括固体、液体和气体物质)时,光频电磁波与组成物质的分子、原子发生作用,使光波的特性发生改变。光的吸收是指一部分光能被物质中的分子或原子吸收变为物质的热能;散射是光能重新发生空间分布的情况。在光学性质均匀的介质中或两种折射率不同的均匀介质界面上,光的直射、反射或折射,仅存在于给定的一些方向上,其余方向上光强等于零,沿光束的侧向看不到光。但当光束通过光学性质不均匀的物质时,入射光空间分布将发生变化,从侧向也可以看到光,此类现象就是散射。

无论是光的吸收还是散射,从能量角度讲,均会使光强产生衰减。其衰减规律由布格尔(P. Bouguer)定律描述。假设强度为 I_0 的光通过长度为 L 的介质,则在距离 z 处由于介质的作用光强衰减变为 I ,在距离 $z + dz$ 处变为 $I - dI$,即在 dz 距离内光强减少 dI ,如图 1.1 所示。

依据基本的物理考虑有: $-dI = \alpha I dz$ 成立,其中 $\alpha = -\frac{dI}{I dz}$,是介质的衰减系数(1/m),表示在单位距离上光强减少的百分比。如果介质均匀衰减,则 α 与 z 无关。若 $z = L$,则通过长度是 L 的介质后,光强度变化为

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} = I_0 e^{-\alpha L} = I(L) \quad (1-6)$$

这就是描述光波衰减的布格尔指数定律。由于衰减是由光吸收和光散射两个独立的物理过程共同产生的,故 $\alpha = \alpha_a + \alpha_s$,其中的 α_a 、 α_s 分别称为吸收系数和散射系数。实验证明,所有物质对某些频率范围内的光是透明的,而对另一些频率范围内的光是不透明的。物质对光能的吸收分为一般吸收和选择性吸收,图 1.2 展示了介质材料(如石英)、金属材料及半导体材料在不同电磁波谱区的吸收特性。显然石英对可见光的吸收甚微,对红外光却强烈地吸收;半

导体材料在可见光区有强烈的吸收,在红外光区却吸收很小。

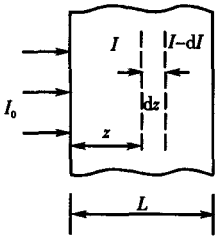


图 1.1 光的衰减描述

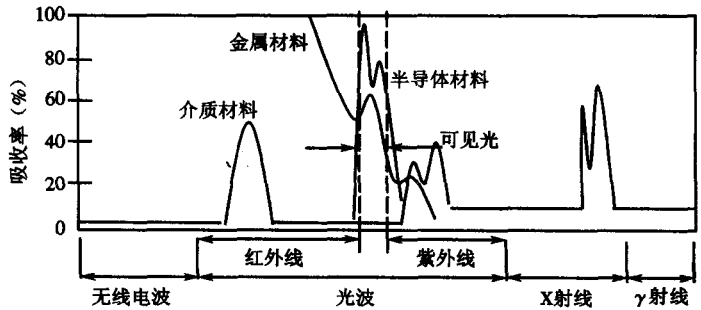


图 1.2 介质、金属、半导体材料的吸收特性

1.2 物体的受激辐射原理

物体的辐射分成两种,即热辐射和“发光”辐射。任何物体只要温度高于热力学温度 0 K (或 $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$),就不断地发射电磁波,属于自发的电磁辐射。常温(或温度低时)物体的辐射主要集中在红外波段,表现为热现象,因而称为热辐射。物体温度达到 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时,开始发射部分暗红色的可见光;温度更高时,发射波长更短,在 $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,物体发射带有相当多紫光成分的白光。热辐射的辐射光谱是连续的,与物体的温度和表面特征有关。

“发光”辐射通过借助其他外来激发过程获得能量产生电磁辐射,包括:电致发光——物体中的原子在经电场加速的电子作用下,被激发到激发状态,当它返回到正常状态时所产生的辐射;光致发光——物体被光照射而引起的自身发射;化学发光——由于化学反应引起发光;热发光——物体被加热到一定温度后引起发光。“发光”辐射的基本特征是非平衡发射,其光谱是带状光谱和线光谱。

1.2.1 基尔霍夫定律

任何物体都在不断地吸收辐射和发射辐射。当物体从外界吸收辐射的能量恰好等于本身因发射辐射而减少的能量时,物体处于热平衡状态。基尔霍夫定律解释了热平衡状态下,物体吸收特性和发射特性之间的关系。

基尔霍夫定律指出:在一定温度下,物体对波长 λ 的光吸收率 $\alpha(\lambda, T)$ 与该物体发射出该波长 λ 的光的辐射度 $M(\lambda, T)$ 成正比,且比例系数 $f(\lambda, T)$ 对任何物体都一样。数学形式表示为

$$\frac{M_1(\lambda, T)}{\alpha_1(\lambda, T)} = \frac{M_2(\lambda, T)}{\alpha_2(\lambda, T)} = \dots = f(\lambda, T) = E(\lambda, T) \quad (1-7)$$

式中的下标 1, 2, ... 表示不同的物体的代号, $E(\lambda, T)$ 为投射到物体表面的辐照度。该式表明任何物体的光谱辐出度和光谱吸收率的比例系数与物体本身性质无关。

1.2.2 实际物体的热辐射

如果某一物体的光谱的吸收率 $\alpha(\lambda, T) = 1$, 即任何波长的入射辐射都能被完全吸收,这

样的物体称为绝对黑体,其辐射为连续光谱。此时一定有

$$E(\lambda, T) = f(\lambda, T) = \frac{M_b(\lambda, T)}{1} \quad (1-8)$$

式中: $M_b(\lambda, T)$ 是黑体的光谱辐出度。1900年 Plank 给出了其理论公式:

$$M_b(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1} \quad (1-9)$$

令 $C_1 = 2\pi hc^2$, $C_2 = \frac{hc}{k_B}$, 则式(1-9)可表示为

$$M_b(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (1-10)$$

其中

$$\begin{aligned} C_1 &= 2\pi hc^2 = 3.7415 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \\ C_2 &= \frac{hc}{k_B} = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (1-11)$$

并将 C_1 、 C_2 分别称为黑体第一辐射常数和第二辐射常数。

物体的发射率定义为温度为 T 的实际物体的辐射能量与同温度黑体的相应辐射量的比值。实际物体与黑体不同,其吸收率不等于 1,因此实际物体的光谱辐出度

$$M_A(\lambda, T) = \alpha_A(\lambda, T) M_b(\lambda, T) \quad (1-12)$$

只要测量出物体的吸收率(物体的吸收率等于其发射率),就可以计算出光谱辐出度。

实际中经常用到半球发射率,定义为物体单位面积向半球空间的辐射功率(即辐出度)与同温度下黑体的输出度之比,即

$$\epsilon(T) = \frac{M(0, -\infty, T)}{M_b(0, -\infty, T)} = \frac{\int_0^\infty M(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4} \quad (1-13)$$

引入半球光谱发射率 $\epsilon(\lambda, T)$, 并结合基尔霍夫定律和黑体概念可得

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{M(\lambda, T)}{M_b(\lambda, T)} = \alpha(\lambda, T) \quad (1-14)$$

任何物体的半球光谱发射率等于该物体在同温度下的光谱吸收率,与该物体在同温度下的全吸收率也相等,即

$$\epsilon(T) = \frac{M(T)}{\sigma T^4} = \alpha(T) \quad (1-15)$$

在许多实际应用中,特别是大多数红外系统中,系统响应的并非半球内的辐射功率,而是辐射源规定方向上的一个小立体角内的辐射功率。定义物体的方向发射率为在与辐射源表面法线方向成 θ 角方向的小立体角内测量的发射率。当 $\theta = 0$ 时,称作法向发射率,定义为

$$\epsilon(\theta, T) = \frac{L(\theta, T)}{L_b(T)} \quad (1-16)$$

式中: $L(\theta, T)$ 和 $L_b(T)$ 分别是实际物体和黑体在相同温度下的辐射亮度。对黑体来说, $\epsilon_b(\theta, T) = \epsilon_b(T) = 1$ 。实际物体的方向发射率由其方向辐射亮度决定,物体的方向光谱发射率定义为

$$\epsilon(\theta, \lambda, T) = \frac{L(\theta, \lambda, T)}{L_b(\lambda, T)} \quad (1-17)$$

它表示物体在指定 θ 方向辐射的本领。

根据辐度学定义,一个面辐射源的辐出度 M 与方向亮度 $L(\theta)$ 的关系是

$$M = \int_{2\pi\text{球面}} L(\theta) \cos \theta d\Omega = L \int_{2\pi\text{球面}} \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi = L \cdot \pi \quad (1-18)$$

$$M(\lambda) = L(\lambda) \cdot \pi$$

将 $L(\theta) = L$, 亮度与方向无关的辐射源称作朗伯源。朗伯体的半球发射率 $\epsilon(T)$ 、方向发射率 $\epsilon(\theta, T)$ 和法向发射率 $\epsilon(0, T)$ 相等。

凡具有温度的物体都能产生热辐射,其辐射能由原子、分子的热运动能量转变而来。为了维持辐射,需由外界提供能量。热辐射光源是使发光物体升温到足够高而发光的光源,在辐射过程中不改变自身的原子、分子的内部状态,辐射光谱是连续光谱。根据物体的光谱发射率 $\epsilon(\lambda)$ 的变化率,辐射体分为三类:黑体、灰体和选择辐射体。

①黑体或普朗克辐射体。对于任意波长,发射率都是 1,即 $\epsilon_b(\lambda, T) = \epsilon_b = 1$ 。绝对黑体是一种理想热辐射源。

②灰体。 $\epsilon(\lambda) = \epsilon < 1$ 。在热成像技术最常用的波段范围(8 ~ 14 μm)内,多数物体可以当作灰体来处理。

③选择辐射体。 $\epsilon(\lambda) \neq$ 常数,黑体辐射定律不再适用。在有限的光谱区间内,也可以把选择性辐射体当黑体处理。

1.3 光电子度量学基础理论

辐射度量学是研究各种电磁辐射能量计量的科学,与光度学一起对各类光源的光辐射进行了定量描述。在光学中与能量有关的量有两类:一类是物理的辐射度量学,是建立在物理测量基础上的表示辐射能大小的量;另一类是生理的光度量学,通过光通量、光强、亮度、照度等量,表示人眼对光的敏感程度,即对辐射能的视觉反应。虽然它们都是衡量光源和光电探测器性能的重要参数,但是在光电子应用中所涉及的包括可见光在内的各种波段电磁辐射量的计算和测量,应采用不受主观视觉限制的辐射度量方法。

1.3.1 基本辐射量

辐射度量学的基本物理量主要有以下几个。

①辐射能 Q 。:以电磁波形式发射、传输、接收的能量,单位为 J(焦耳)。

②辐射通量 Φ 。:单位时间内通过某截面的所有波长的总电磁辐射能,即单位时间发射、传输、接收的辐射能,是辐射能的时间变化率。

③辐射强度 $I_e(\theta, \varphi)$ 。:描述点辐射源(或辐射源面元)的辐射功率在不同方向上的分布。某方向上的辐射强度,等于该方向单位立体角内的辐射通量。

④辐射亮度 B_e 。:即辐射率,在给定点沿某一给定方向的辐射亮度,等于该方向单位立体角内通过单位投影面积的辐射通量。

⑤辐射度 M_e 。:即辐射出射度,发光面上某点的辐射度等于该点周围单位面积的辐射通量。

⑥辐照度 L_e : 被照在某点的辐照度等于该点周围单位面积的辐射通量。

上述各个物理量的单位与符号见表 1-1 所示。

表 1-1 辐射度量学基本物理量的单位与符号

量的名称	符号	单位名称	单位代码	
			国际	中文推荐
辐射能	Q_e	焦耳	J	焦
辐射通量	Φ_e	瓦特	W	瓦
辐射强度	I_e	瓦特每球面度	W/sr	瓦/球面度
辐射亮度	B_e	瓦特每平方米球面度	W/(m ² ·sr)	瓦/(米 ² ·球面度)
辐射度	M_e	瓦特每平方米	W/m ²	瓦/米 ²
辐照度	L_e	瓦特每平方米	W/m ²	瓦/米 ²

1.3.2 光谱量与非光谱量

1. 光谱光视效率

人眼能够感知波长在 0.38 ~ 0.78 μm 之间的辐射。人眼对各种光波长的相对灵敏度,称为光谱光视效率或视见函数。在可见光范围内,人眼对不同波长光的感光灵敏度不同:对绿光最灵敏,对红、蓝光的灵敏度较低。受视觉生理和心理作用的影响,不同的人对不同波长的感光灵敏度也不相同。

2. 光度量

辐射度量是客观物理量。不同波长而量值相同的辐射度量引起人眼的视觉不同,这种差异是辐射度量无法描述的。光度学是以人的视觉为基础,对光辐射进行测量的科学。其基本物理量与辐射度量一一对应,是体现人眼视觉特性的光辐射的定量描述,主要有以下几个。

①光能 Q_v : 与辐射能的大小、人眼的视觉灵敏度成正比,是按人眼的感觉强度进行度量的辐射能。

②光通量 Φ_v : 单位时间内通过某截面的所有光波长的光能,单位是 lm(流明)。

③发光强度 I_v : $I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$, 单位是 cd(坎德拉), 1 cd = 1 lm/sr。规定频率为 540×10^{12} Hz(对应于空气中的 555 nm 波长,是人眼最敏感的波长)的单色辐射光在给定方向上的辐射强度为 $\frac{1}{683}$ W/sr 时,该方向上的发光强度为 1 cd。

④光出射度 M_v 和光亮度 B_v : $M_v = \frac{d\Phi_v}{dS}$, 单位是 lm/m²; $B_v = \frac{d^2\Phi_v}{dS \cos \theta d\Omega}$, 单位为 cd/m²。

⑤光照度 L_v : $L_v = \frac{d\Phi_v}{dS}$, 单位为 lx, 1 lx = 1 lm/m²。

3. 光源的辐射效率与发光效率

一切能产生光辐射的辐射源都是光源,人造光源是人为地将各种形式的能量(电能、热能、化学能)转化成光辐射的器件。光是电磁波,在电磁波谱中人们常把对应于真空中的波长为

0.38 ~ 0.78 μm 内的电磁辐射称作光辐射。光辐射的波段范围以及与射线区(X 射线以下)、长波区(微波、无线电波以上)之间的关系如图 1.3 所示。

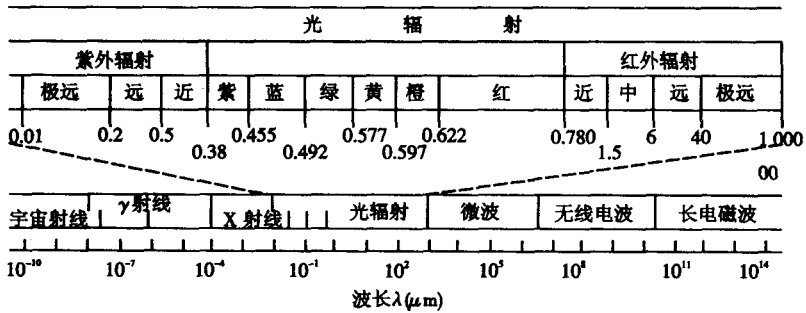


图 1.3 电磁波谱

在波长范围($\lambda_1 \sim \lambda_2$)内,光源发出的辐射通量与所输入的电功率之比为该光源在规定光谱范围内的辐射效率,即

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda) d\lambda}{P}$$

发光效率是光源发射的光通量与所输入的电功率之比,即

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P} = \frac{K_m \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{P}$$

单位是 lm/W(流明每瓦)。

常用电光源(电能转化成光辐射能)的发光效率如表 1-2 所示。

表 1-2 常见光源的发光效率

光源种类	发光效率(lm/W)	光源种类	发光效率(lm/W)
普通钨丝灯	8 ~ 18	高压汞灯	30 ~ 40
卤钨灯	14 ~ 30	高压钠灯	90 ~ 100
普通荧光灯	35 ~ 60	球形氙灯	30 ~ 40
三基色荧光灯	55 ~ 90	金属卤化物灯	60 ~ 80

第2章 光源的基本特性

光源就是把其他形式的能转换成光能的装置。为了维持发光,必须补充能量,根据补充能量的形式和方式,可将光源分为热光源和发光光源两类。

热光源是利用物体的热辐射原理制成。辐射源中的原子或分子在辐射过程中不会改变内部运动状态,因辐射而损失的能量由外界提供的热量补充,辐射体加热到一定温度时会产生热致发光。热致发光主要发生在稀薄气体中,其光谱为线光谱或带光谱。

发光光源在工作过程中,辐射源的原子或分子从外界吸收能量后,内部运动状态发生变化,过渡到能量较高的激发态,处于激发态的原子或分子回到较低的能量状态时,向外辐射能量,即发光。按照补充能量的形式,可将发光光源分为:光致发光光源——依靠入射光补充能量;电致发光光源——依靠放电补充能量;化学发光光源——依靠物质内部化学变化释放出来的化学能补充能量;热致发光——依靠输入的热量改变原子或分子的内部运动状态。

在光电子系统中光源是重要的组成部分,选用光源时,要充分考虑到光源的各种特性,包括光源的相干性、发光效率、光谱特性、空间光强分布以及光源的色温等。

在具体应用中选择光源时,除了要考虑光源本身的基本工作原理和特性外,还要考虑外部环境,如温度、震动等对它的影响。

2.1 光源的相干性

相干波满足三个条件:振动方向相同、频率相同和相位差恒定。满足这三个相干条件的光源称为相干光源。实际光源发出的光波是包含多种频率成分的复色波,是由光源中大量原子的能量发生变化时辐射出来的。由原子自发辐射的发光是断续的,且任意两次发光彼此独立,互不相关,没有任何规律。因此由任意两光源或同一普通光源的两点所发出的光波,不满足相干条件,两束光在空间某处的叠加只是强度的相加,而不能产生干涉现象。只有同时满足时间相干性和空间相干性时,两光束之间才会产生干涉现象。

2.1.1 时间相干性

两束光的时间相干性是由光源发射的光振动波列长度决定的。由同一个光源分割出的两束光满足相干条件,但是经不同传输路径后,到达同一个空间点进行叠加时,只有在两列光振动之间的光程差小于光振动波列长度时,才会发生干涉现象。如果两光路之间的光程差超过波列长度时,则不会产生干涉。两束光产生干涉现象的最大光程差为光源相干长度 l_c ,它是衡量光源相干性能的一个指标,定义为

$$l_c = \tau_c c \quad (2-1)$$

其中 $\tau_c = 1/\Delta\nu$ ($\Delta\nu$ 是光波频宽),是相干时间。 l_c 用波长表示为

$$l_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (2-2)$$

光源的相干长度是由光源单色性所决定的波列长度。光波走完波列长度所需要的时间是

相干时间。从实用的角度讲,要获取好的相干性,必须设法改善其单色性。普通光源通过窄带滤光片改善单色性的同时还会减弱光强。激光器具有良好的单色性和方向性,是理想的相干光源。从表 2-1 的准单色光源谱线宽度和相干长度数据表可知,激光器的相干长度可达几千米,所以利用激光器可以在很大的光程差下产生干涉。

表 2-1 准单色光源谱线宽度和相干长度

光源	谱线 λ (nm)	谱线宽度 $\Delta\lambda$ (nm)	相干长度 l_c
氩-86	606.78	0.000 47	≈ 77 cm
钠	589.3	0.6	≈ 0.06 cm
汞	546.1	0.01	≈ 3 cm
氦氖激光	632.8	10^{-8}	≈ 36 km

2.1.2 空间相干性

空间相干性是用来描述普通光源在多大的范围内发出的光,在空间某处汇合时能形成可见的干涉现象。空间相干性与光源宽度有关,要能观察到干涉条纹,必须对光源大小进行限制,因为实际光源有一定大小,光源上的每一点发出的光波都对干涉场产生影响。在杨氏双缝干涉实验中,设光源宽度为 h ,光源与夹缝之间的距离为 d ,两个夹缝之间的距离为 a ,则由光源任一点辐射出的光波经双缝后在观察屏上形成干涉条纹,不仅要求光源宽度 $h \leq$ 光源与夹缝之间的距离 d ,而且还要满足 $\frac{ah}{2d} < \frac{\lambda}{2}$ 。

2.2 光源基本特性参数

在光电子技术系统中,光源起着关键性的作用,直接决定了光电子系统检测的成功与否。随着光源技术的发展,可提供光电探测用的光源品种日益增多,通常采用以下基本特性参数描述光源的品质。

2.2.1 辐射效率和发光效率

在给定波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内,光源发出的辐射通量与产生这些辐射通量所需的电功率之比,称为该光源在规定光谱范围内的辐射效率,即

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda) d\lambda}{P} \quad (2-3)$$

式中: $\Phi_e(\lambda)$ 为光源的光谱辐射通量, P 为所需的电功率, η_e 为光源辐射效率。如果光电测量系统的光谱范围为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$, 那么应尽可能选用 η_e 较高的光源。

相应地,对于可见光范围,某一光源的发光效率

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P} = K_m \frac{\int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{P} \quad (2-4)$$