

第 1 章 光电技术基础

光电技术的基本理论是建立在光的波粒二象性之上的。光是以电磁波方式传播的粒子。几何光学依据光的波动性研究了光的折射与反射规律,得到了许多关于光的传播、光学成像、光学成像系统和像差等理论。物理光学依据光的波动性成功地解释了光的干涉、衍射等现象,为光谱分析仪器、全息摄影技术奠定了理论基础。然而,光的本质是物质,它具有粒子性,又称为光量子或光子。光子具有动量与能量,并分别表示为

$$p=h\nu/c, E=h\nu$$

式中, $h=6.626\times10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$, 为普朗克常数; ν 为光的振动频率(s^{-1}); $c=3\times10^8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 为光在真空中的传播速度。

光的量子性成功地解释了光与物质作用时所引起的光电效应,而光电效应又充分证明了光的量子性。

图 1-1 所示为电磁波按波长的分布及各波长区域的定义,称为电磁波谱。电磁波谱的频率范围很宽:从宇宙射线到无线电波($10^2\sim10^{25}\text{Hz}$)。光辐射仅仅是电磁波谱中的一小部分,它包括的波长区域从几纳米到几毫米,即 $10^{-9}\sim10^{-3}\text{m}$ 量级。只有波长为 $0.38\sim0.78\mu\text{m}$ 的光才能引起人眼的视觉感,故称这部分光为可见光。

光电敏感器件的光谱响应范围远远超出人眼的视觉范围,一般从 X 光到红外辐射甚至于远红外、毫米波的范围。特种材料的热电器件具有超过厘米波光谱响应的范围,即人们可以借助于各种光电敏感器件对整个光辐射波谱范围内的光信息进行光电变换。

电磁波名称	λ (m)
宇宙射线	10^{-14}
	10^{-13}
γ 射线	10^{-12}
	10^{-11}
X 光	10^{-10}
	10^{-9}
紫外辐射	10^{-8}
	10^{-7}
可见光谱	10^{-6}
红外辐射	10^{-5}
	10^{-4}
毫米波	10^{-3}
厘米波	10^{-2}
无线电波	10^{-1}
	10^0
	10^1
	10^2

图 1-1 电磁波谱

1.1 光辐射的度量

为了定量分析光与物质相互作用所产生的光电效应,分析光电敏感器件的光电特性,以及用光电敏感器件进行光谱、光度的定量计算,常需要对光辐射给出相应的计量参数和量纲。光辐射的度量方法有两种:一种是物理(或客观)的计量方法,称为辐射度学计量方法或辐射度参数,它适用于整个电磁辐射谱区,对辐射量进行物理的计量;另一种是生理(主观)的计量方法,是以人眼所能见到的光对大脑的刺激程度来对光进行计量的方法,称为光度参数。光度参数只适用于 $0.38\sim0.78\mu\text{m}$ 的可见光谱区域,是对光强度的主观评价,超过这个谱区,光度参数没有任何意义。

辐射度参数与光度参数在概念上虽不一样,但它们的计量方法却有许多相同之处,为学习

和讨论方便,常用相同的符号表示辐射度参数与光度参数。为区别它们,常在对应符号的右下角标以“e”表示辐射度参数,标以“v”表示光度参数。

1.1.1 与光源有关的辐射度参数与光度参数

与光源有关的辐射度参数是指计量光源在辐射波长范围内发射连续光谱或单色光谱能量的参数。

1. 辐能和光能

以辐射形式发射、传播或接收的能量称为辐(射)能,用符号 Q_e 表示,其计量单位为焦耳(J)。

光能是光通量在可见光范围内对时间的积分,以 Q_v 表示,其计量单位为流明秒(lm·s)。

2. 辐通量和光通量

辐通量或辐功率是以辐射形式发射、传播或接收的功率;或者说,在单位时间内,以辐射形式发射、传播或接收的辐能称为辐通量,以符号 Φ_e 表示,其计量单位为瓦(W),即

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1-1)$$

若在 t 时间内所发射、传播或接收的辐射能不随时间改变,则式(1-1)可简化为

$$\Phi_e = Q_e/t \quad (1-2)$$

对可见光,光源表面在无穷小时间段内发射、传播或接收的所有可见光谱,其光能被无穷短时间间隔 dt 来除,其商定义为光通量 Φ_v ,即

$$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt} \quad (1-3)$$

若在 t 时间内发射、传播或接收的光能不随时间改变,则式(1-3)简化为

$$\Phi_v = Q_v/t \quad (1-4)$$

Φ_v 的计量单位为流(明)(lm)。

显然,辐通量对时间的积分称为辐能,而光通量对时间的积分称为光能。

3. 辐出(射)度和光出度

对面积为 A 的有限面光源,表面某点处的面元向半球面空间内发射的辐通量 $d\Phi_e$ 与该面元面积 dA 之比,定义为辐出度 M_e ,即

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1-5)$$

M_e 的计量单位是瓦(特)每平方米 [W/m^2]。

由式(1-5)可得,面光源 A 向半球面空间发射的总辐通量为

$$\Phi_e = \int_{(A)} M_e dA \quad (1-6)$$

对于可见光,面光源 A 表面某一点处的面元向半球面空间发射的光通量 $d\Phi_v$ 与面元面积 dA 之比,称为光出度 M_v ,即

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (1-7)$$

其计量单位为勒(克司)[(lx)或(lm/m²)]。

对均匀发射辐射的面光源有

$$M_v = \Phi_v / A \quad (1-8)$$

由式(1-7)可得,面光源向半球面空间发射的总光通量为

$$\Phi_v = \int_{(A)} M_v dA \quad (1-9)$$

4. 辐强度和发光强度

对点光源在给定方向的立体角元 $d\Omega$ 内发射的辐通量 $d\Phi_e$ 与该方向立体角元 $d\Omega$ 之比,定义为点光源在该方向的辐强度 I_e ,即

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (1-10)$$

辐强度的计量单位为瓦每球面度(W/sr)。

点光源在有限立体角 Ω 内发射的辐通量为

$$\Phi_e = \int_{\Omega} I_e d\Omega \quad (1-11)$$

各向同性的点光源向所有方向发射的总辐通量为

$$\Phi_e = I_e \int_0^{4\pi} d\Omega = 4\pi I_e \quad (1-12)$$

对可见光,与式(1-10)类似,定义发光强度为

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad (1-13)$$

对各向同性的点光源向所有方向发射的总光通量为

$$\Phi_v = \int_{\Omega} I_v d\Omega \quad (1-14)$$

一般点光源是各向异性的,其发光强度分布随方向而异。

发光强度的单位是坎德拉(candela),简称为坎[cd]。1979年第十六届国际计量大会通过决议,将坎德拉重新定义为:在给定方向上能发射 540×10^{12} Hz 的单色辐射源,在此方向上的辐强度为 $(1/683)$ W/sr,其发光强度定义为 1cd。

由式(1-14)可得,对发光强度为 1cd 的点光源,向给定方向 1sr(球面度)内发射的光通量定义为 1lm(流明)。发光强度为 1cd 的点光源在整个球空间所发出的总光通量为

$$\Phi_v = 4\pi I_v = 12.566 \text{ lm}$$

5. 辐亮度和亮度

光源表面某一点处的面元在给定方向上的辐强度除以该面元在垂直于给定方向平面上的正投影面积,称为辐亮度 L_e ,即

$$L_e = \frac{dI_e}{dA \cos \theta} = \frac{d^2 \Phi_e}{d\Omega dA \cos \theta} \quad (1-15)$$

式中, θ 为所给方向与面元法线之间的夹角。辐亮度 L_e 的计量单位为瓦每球面度平方米 $[\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)]$ 。

对可见光, 亮度 L_v 定义为: 光源表面某一点处的面元在给定方向上的发光强度, 除以该面元在垂直给定方向平面上的正投影面积, 即

$$L_v = \frac{dI_v}{dA \cos \theta} = \frac{d^2 \Phi_v}{d\Omega dA \cos \theta} \quad (1-16)$$

L_v 的计量单位是坎德拉每平方米 (cd/m^2)。

若 L_e, L_v 与光源发射辐射的方向无关, 且可由式 (1-15)、式 (1-16) 表示, 则这样的光源称为余弦辐射体或朗伯辐射体。黑体是一个理想的余弦辐射体, 而一般光源的亮度与方向有关。粗糙表面的辐射体或反射体及太阳等是一个近似的余弦辐射体。

余弦辐射体表面某面元 dA 处向半球面空间发射的通量为

$$d\Phi = \iint L \cos \theta dA d\Omega$$

式中, $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ 。

对上式在半球面空间内积分

$$d\Phi = L dA \int_{\varphi=0}^{2\pi} d\varphi \int_{\theta=0}^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta = \pi L dA$$

由上式得到余弦辐射体的 M_e 与 L_e 、 M_v 与 L_v 的关系为

$$L_e = M_e / \pi \quad (1-17)$$

$$L_v = M_v / \pi \quad (1-18)$$

6. 辐效率与发光效率

光源所发射的总辐通量 Φ_e 与外界提供给光源的功率 P 之比称为光源的辐效率 η_e ; 光源发射的总光通量 Φ_v 与提供的功率 P 之比称为发光效率 η_v 。即

$$\eta_e = \Phi_e / P \times 100\% \quad (1-19)$$

$$\eta_v = \Phi_v / P \times 100\% \quad (1-20)$$

辐效率 η_e 无量纲, 发光效率 η_v 的计量单位是流明每瓦 ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$)。

对限定在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内的辐效率为

$$\eta_{e,\Delta\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda} d\lambda}{P} \times 100\% \quad (1-21)$$

式中, $\Phi_{e,\lambda}$ 称为光源辐通量的光谱密集度, 简称为光谱辐通量。

1.1.2 与接收器有关的辐射度参数及光度参数

从接收器的角度讨论辐射度与光度的参数, 称为与接收器有关的辐射度参数及光度参数。接收器可以是探测器, 也可以是反射辐射的反射器, 或两者兼有的器件。与接收器有关的辐射度参数与光度参数有以下两种。

1. 辐照度与照度

将照射到物体表面某一点处面元的辐通量 $d\Phi_e$ 除以该面元的面积 dA 的商, 称为辐照度

e_e , 即

$$e_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1-22)$$

e_e 的计量单位是瓦每平方米 (W/m^2)。

若辐通量是均匀地照射在物体表面上的, 则式 (1-22) 可简化为

$$E_e = \Phi_e / A \quad (1-23)$$

注意, 不要把辐照度 E_e 与辐出度 M_e 混淆起来。虽然两者单位相同, 但定义不一样。辐照度是从物体表面接收辐通量的角度来定义的, 辐出度是从面光源表面发射辐射的角度来定义的。

本身不辐射的反射体接收辐射后, 吸收一部分, 反射一部分。若把反射体当做辐射体, 则光谱辐出度 $M_{er}(\lambda)$ (下标 r 代表反射) 与辐射体接收的光谱辐照度 $E_e(\lambda)$ 的关系为

$$M_{er} = \rho_e(\lambda) E_e(\lambda) \quad (1-24)$$

式中, $\rho_e(\lambda)$ 为辐射度光谱反射比, 是波长的函数。

将式 (1-24) 对波长积分, 得到反射体的辐出度

$$M_e = \int \rho_e(\lambda) E_e d\lambda \quad (1-25)$$

对可见光, 用照射到物体表面某一面元的光通量 $d\Phi_v$, 除以该面元面积 dA 的商, 称为光照度 e_v , 即

$$e_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$$

或表示为

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A} \quad (1-26)$$

E_v 的计量单位是勒(克司) (lx)。

对接收光的反射体, 同样有

$$m_v(\lambda) = \rho_v(\lambda) E_v(\lambda) \quad (1-27)$$

或者

$$M_v(\lambda) = \int \rho_v(\lambda) E_v(\lambda) d\lambda \quad (1-28)$$

式中, $\rho_v(\lambda)$ 为光度光谱反射比, 是波长的函数。

2. 辐照量和曝光量

辐照量与曝光量是光电接收器接收辐射能量的重要度量参数。光电器件的输出信号大小与所接收的入射辐射能量有关。

将照射到物体表面某一面元的辐照度 E_e 在时间 t 内的积分称为辐照量 H_e , 即

$$H_e = \int_0^t E_e dt \quad (1-29)$$

H_e 的计量单位是焦(耳)每平方米 (J/m^2)。

如果面元上的辐照度 E_e 与时间无关, 则式 (1-29) 可简化为

$$H_e = E_e t \quad (1-30)$$

与辐照量 H_e 对应的光度量是曝光量 H_v , 它定义为物体表面某一面元接收的光照度 E_v 在时间 t 内的积分, 即

$$H_v = \int_0^t E_v dt \quad (1-31)$$

H_v 的计量单位是勒秒($\text{lx} \cdot \text{s}$)。

如果面元上的光照度 E_v 与时间无关,则式(1-31)可简化为

$$H_v = E_v t$$

上面讨论的辐射量度参数和光度参数的基本定义与基本计量公式,都是对辐射源发出的辐射能量的度量,是从不同角度来定义的,为了便于学习掌握这些参数,将其汇总成如表 1-1 所示的辐射度量与光度量的定义。

表 1-1 辐射度量与光度量的定义

辐射度参量				光度参量			
量的名称	量的符号	量的定义	单位符号 (单位名称)	量的名称	量的符号	量的定义	单位符号 (单位名称)
辐能	Q_e		J [焦]	光量	Q_v		$\text{lm} \cdot \text{s}$ [流秒]
辐通量 (辐功率)	Φ_e	$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$	W [瓦]	光通量 (光功率)	Φ_v	$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt}$	lm [流]
辐出度	M_e	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	W/m^2 [瓦每平方米]	光出度	M_v	$M_v = \frac{\Phi_v}{A}$	lm/m^2 [流每平方米]
辐强度	I_e	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	W/sr [瓦每球面度]	发光强度	I_v	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	cd [坎]
辐亮度	L_e	$L_e = \frac{I_e}{dA \cos \theta}$ $= \frac{d^2 \Phi_e}{d\Omega dA \cos \theta}$	$\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$ [瓦每球面度平方米]	光亮度	L_v	$L_v = \frac{I_v}{dA \cos \alpha}$ $= \frac{d^2 \Phi_v}{d\Omega dA \cos \theta}$	cd/m^2 [坎每平方米]
辐照度	E_e	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	W/m^2 [瓦每平方米]	光照度	E_v	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$	lx [勒]
辐照量	H_e	$H_e = \int_0^t E_e dt$	J/m^2 [焦每平方米]	曝光量	H_v	$H_v = \int_0^t E_v dt$	$\text{lx} \cdot \text{s}$ [勒秒]

1.2 光谱辐射分布与量子流速率

1.2.1 光源的光谱辐射分布参量

光源发射的辐射能在辐射光谱范围内是按波长分布的。光源在单位波长范围内发射的辐射量称为辐射量的光谱密度 $X_{e,\lambda}$, 简称为光谱辐射量, 即

$$X_{e,\lambda} = \frac{dx_e}{d\lambda} \quad (1-32)$$

式中, 通用符号 $X_{e,\lambda}$ 是波长的函数, 代表所有的光谱辐射量, 如光谱辐通量 $\Phi_{e,\lambda}$ 、光谱辐出度 $M_{e,\lambda}$ 、光谱辐强度 $I_{e,\lambda}$ 、光谱辐亮度 $L_{e,\lambda}$ 、光谱辐照度 $E_{e,\lambda}$ 等。

同样,以符号 $X_{v,\lambda}$ 表示光源在可见光区单位波长范围内发射的光度量,称为光度量的光谱密集度,简称为光谱光度量,即

$$X_{v,\lambda} = \frac{dX_v}{d\lambda} \quad (1-33)$$

式中, $X_{v,\lambda}$ 代表光谱光通量 $\Phi_{v,\lambda}$ 、光谱光出射度 $M_{v,\lambda}$ 、光谱发光强度 $I_{v,\lambda}$ 或光谱光亮度 $E_{v,\lambda}$ 等。

光源的辐射度参量 $X_{e,\lambda}$ 随波长 λ 的分布曲线,称为该光源的绝对光谱辐射分布曲线。该曲线任一波长 λ 处的 $X_{e,\lambda}$ 除以峰值波长 $\lambda_{\max}$ 处的光谱辐射量最大值 $X_{e,\lambda_{\max}}$ 的商 X_{e,λ_r} ,称为光源的相对光谱辐射量,即

$$X_{e,\lambda_r} = X_{e,\lambda} / X_{e,\lambda_{\max}} \quad (1-34)$$

相对光谱辐射量 X_{e,λ_r} 与波长 λ 的关系称为光源的相对光谱辐射分布。

光源在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内发射的辐通量为

$$\Delta\Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda} d\lambda$$

若积分区间范围为 $\lambda_1 = 0 \sim \lambda_2 \rightarrow \infty$,得到光源发出的所有波长的总辐通量为

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} d\lambda = \Phi_{e,\lambda_{\max}} \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda_r} d\lambda \quad (1-35)$$

光源在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 之间的辐通量 $\Delta\Phi_e$ 与总辐通量 Φ_e 之比称为该光源的比辐射 q_e ,即

$$q_e = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} d\lambda} \quad (1-36)$$

式中, q_e 没有量纲。

1.2.2 量子流速率

光源发射的辐射功率是每秒发射光子能量的总和。光源在给定波长 λ 处,将 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 范围内发射的辐通量 $d\Phi_e$ 除以该波长 λ 的光子能量 $h\nu$,就得到光源在 λ 处每秒发射的光子数,称为光谱量子流速率 $dN_{e,\lambda}$,即

$$dN_{e,\lambda} = \frac{d\Phi_e}{h\nu} = \frac{\Phi_{e,\lambda} d\lambda}{h\nu} \quad (1-37)$$

光源在波长 λ 在 $0 \sim \infty$ 范围内发射的总量子流速率为

$$N_e = \int_0^{\infty} \frac{\Phi_{e,\lambda} d\lambda}{h\nu} = \frac{\Phi_{e,\lambda_{\max}}}{hc} \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda_r} \lambda d\lambda \quad (1-38)$$

对可见光区域,光源每秒发射的总光子数为

$$N_v = \int_{0.38}^{0.78} \frac{\Phi_{e,\lambda}}{hc} \lambda d\lambda \quad (1-39)$$

量子流速率 N_e 或 N_v 的计量单位为辐射元的光子数每秒(1/s)。

1.3 物体热辐射

物体通常以两种不同形式发射辐射能量。

(1) 热辐射。凡高于绝对零度的物体都具有发出辐射的能力,其光谱辐射量 $X_{e,\lambda}$ 是波长 λ 和温度 T 的函数。温度低的物体发射红外光,温度升高到 500°C 时开始发射一部分暗红色光,升高到 1500°C 时开始发白光。物体靠加热保持一定温度使内能不变而持续辐射的辐射形式,称为物体热辐射或温度辐射。凡能发射连续光谱,且辐射是温度函数的物体,叫做热辐射体,如一切动植物体、太阳、钨丝白炽灯等均为热辐射体。

(2) 发光。物体不是靠加热保持温度使辐射维持下去,而是靠外部能量激发的辐射,称为发光。发光光谱是非连续光谱,且不是温度的函数。靠外界能量激发发光的方式有电致发光(气体放电产生的辉光)、光致发光(日光灯内 Hg 蒸气发射的紫外光激发管壁上的荧光物质发出可见的荧光)、化学发光(磷在空气中缓慢氧化发光)、热发光(火焰中的钠或钠盐发射的黄光)。发光是非平衡辐射过程,发光光谱主要是线光谱或带光谱。

1.3.1 黑体辐射定律

1. 黑体

能够完全吸收从任何角度入射的任意波长的辐射,并且在每一个方向上都能最大限度地发射任意波长辐射能的物体,称为黑体。显然,黑体的吸收系数为 1,发射系数也为 1。

黑体只是一个理想的温度辐射体,常被用做辐射计量的基准。在有限的温度范围内可以制造出黑体模型。例如,一个开有小孔的密封空腔恒温辐射体,空腔的内壁涂有黑色物质,使其反射系数极小,小孔的孔径远小于腔体的直径,并将空腔辐射体置于恒温槽内,使其在工作中保持腔体的温度不变,该空腔体可近似为黑体。当从任意方向入射的辐射进入小孔时,在空腔内要经过多次反射才能从小孔射出。然而,空腔内的黑色物质的反射系数极小,经过多次反射后,反射出去的辐射能已经极低,绝大部分入射进来的辐射能都被空腔体吸收,因而空腔体的吸收系数很高,接近于 1。被空腔体吸收的能量都转变为热能,引起腔体的温升。腔体处于恒温槽内,所吸收的辐射能只能以温度辐射的方式通过小孔向外发出任何(连续波谱)波长的辐射。

2. 普朗克辐射定律

黑体为理想的余弦辐射体,其光谱辐出度 $M_{e,s,\lambda}$ (角标“s”表示黑体)由普朗克公式表示为

$$M_{e,s,\lambda} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (1-40)$$

式中, k 为玻耳兹曼常数, h 为普朗克常数, T 为绝对温度, c 为真空中的光速。

式(1-40)表明,黑体表面向半球空间发射波长为 λ 的光谱,其辐出度 $M_{e,s,\lambda}$ 是黑体温度 T 和波长 λ 的函数,这就是普朗克辐射定律。

黑体光谱辐亮度 $L_{e,s,\lambda}$ 和光谱辐强度 $I_{e,s,\lambda}$ 分别为

$$L_{e,s,\lambda} = \frac{2c^2 h}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)}, \quad I_{e,s,\lambda} = \frac{2c^2 h A \cos \theta}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (1-41)$$

图 1-2 绘出了黑体辐射的相对光谱辐亮度 L_{e,s,λ_r} 与 λ 、 T 关系曲线。图中每一条曲线都有一个最大值,最大值的位置随温度升高向短波方向移动。

3. 斯忒藩-玻耳兹曼定律

将式(1-40)对波长 λ 求积分,得到黑体发射的总辐出度为

$$M_{e,s} = \int_0^\infty M_{e,s,\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (1-42)$$

式中, σ 是斯忒藩-玻耳兹曼常数,它由下式决定

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5.67 \times 10^{-8} (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$$

由式(1-42)可知 $M_{e,s}$ 与 T 的四次方成正比,这就是黑体辐射的斯忒藩-玻耳兹曼定律。

4. 维恩位移定律

将式(1-40)对波长 λ 求微分后令其值等于零,则可以得到峰值光谱辐出度 M_{e,s,λ_m} 所对应的波长 λ_m 与绝对温度 T 的关系为

$$\lambda_m = 2898/T \quad (\mu\text{m}) \quad (1-43)$$

可见,峰值光谱辐出度所对应的波长与绝对温度的乘积为常数。当温度升高时,峰值光谱辐出度所对应的波长向短波方向移动,这就是维恩位移定律。

将式(1-43)代入式(1-40),得到黑体的峰值光谱辐出度

$$M_{e,s,\lambda_m} = 1.309T^5 \times 10^{-15} \quad (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-5})$$

以上三个定律统称为黑体辐射定律。

例 1-1 假设将人体作为黑体,正常人体体温为 36.5℃。

计算:(1) 正常人体所发出的辐出度;(2) 正常人体的峰值辐射波长及峰值光谱辐出度 M_{e,s,λ_m} ;(3) 人体发烧到 38℃ 时的峰值辐射波长及发烧时的峰值光谱辐出度 M_{e,s,λ_m} 。

解 (1) 人体正常的绝对温度 $T = 36.5 + 273 = 309.5 (\text{K})$, 根据斯忒藩-玻耳兹曼辐射定律,正常人体所发出的辐出度为

$$M_{e,s} = \sigma T^4 = 520.3 (\text{W}/\text{m}^2)$$

(2) 由维恩位移定律,正常人体的峰值辐射波长为

$$\lambda_m = 2898/T = 9.36 (\mu\text{m})$$

峰值光谱辐出度为 $M_{e,s,\lambda_m} = 1.309T^5 \times 10^{-15} = 3.72 (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1})$

(3) 人体发烧到 38℃ 时的峰值辐射波长为

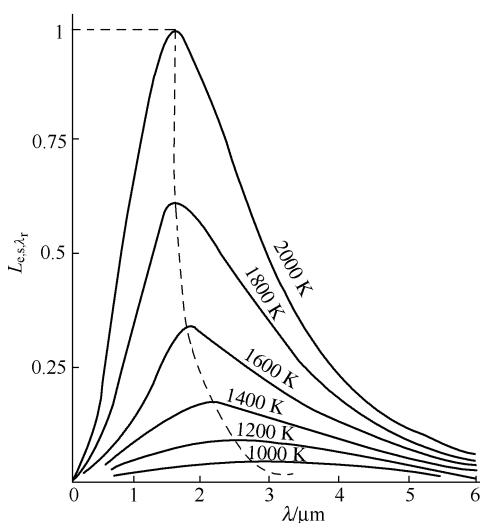


图 1-2 L_{e,s,λ_r} 与 λ 、 T 的关系曲线

$$\lambda_m = \frac{2898}{T} = 2898 / (273 + 38) = 9.32 (\mu\text{m})$$

发烧时的峰值光谱辐出度为

$$M_{e,s,\lambda_m} = 1.309T^5 \times 10^{-15} = 3.81 (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1})$$

可见人体温度升高,发出的光谱辐射峰值波长变短,峰值光谱辐出度增大。可以根据这些特性,用探测辐射的方法遥测人的身体状态。

例 1-2 当标准钨丝灯为黑体时,试计算它的峰值辐射波长、峰值光谱辐出度和它的总辐出度。

解 标准钨丝灯的温度 $T_w = 2856 \text{ K}$, 因此它的峰值辐射波长为

$$\lambda_m = 2898 / T = 2898 / 2856 = 1.015 (\mu\text{m})$$

$$\begin{aligned} \text{峰值光谱辐出度为 } M_{e,s,\lambda_m} &= 1.309T^5 \times 10^{-15} = 1.309 \times 2856^5 \times 10^{-15} \\ &= 248.7 (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}) \end{aligned}$$

$$\text{总辐出度为 } M_{e,s} = \sigma T^4 = 5.67 \times 10^{-8} \times 2856^4 = 3.77 \times 10^4 \text{ W/m}^2$$

1.3.2 辐射体的分类

辐射体按其辐射的本领可分为黑体和非黑体。实际上,绝大多数辐射体都是非黑体。非黑体包括灰体和选择性辐射体,也有混合辐射体。

(1) 灰体

若辐射体的光谱辐出度 $M_{e,\lambda}$, 与同温度黑体的光谱辐出度 $M_{e,s,\lambda}$ 之比, 是一个与波长无关的系数 ε , 则称该辐射体为灰体。系数

$$\varepsilon = \frac{M_{e,\lambda}}{M_{e,s,\lambda}} < 1 \quad (1-44)$$

称为灰体的发射率。

如图 1-3 所示, 灰体的光谱辐射分布与黑体的光谱辐射分布形状相似, 最大值的位置也一致, 因此常将热辐射体按灰体或黑体进行计算。

(2) 选择性辐射体

凡不服从黑体辐射定律的辐射体, 称为选择性辐射体。其光谱发射率 $q(\lambda)$ 是波长的函数, 辐射分布曲线可能有几个最大值。例如, 磷砷化镓发光二极管就属于选择性辐射体。

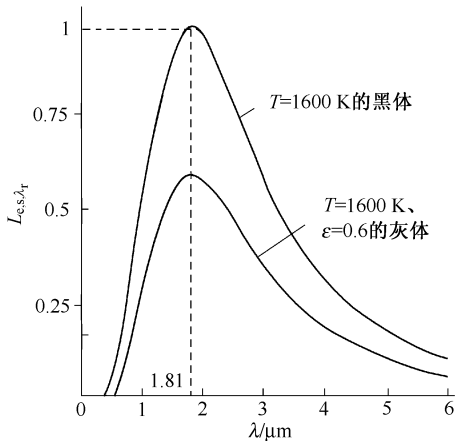


图 1-3 黑体与灰体的光谱辐射分布

1.4 辐射度参数与光度参数的关系

辐射度参数与光度参数是从不同角度对光辐射进行度量的参数, 这些参数在一定光谱范围内(可见光谱区)经常相互使用, 它们之间存在着一定的转换关系; 有些光电传感器件采用光度参数标定其特性参数, 而另一些器件采用辐射度参数标定其特性参数。因此讨论它们之间的转换是很重要的, 掌握了这些转换关系, 就可以对用不同度量参数标定的光电器件灵敏度等特性参数进行比较。

1.4.1 人眼的视觉灵敏度

物体发射的光或反射的光通过人眼到达视网膜上产生实物感,这是由光刺激视网膜的锥状细胞或柱状细胞所导致的结果。锥状细胞只对光亮度超过 10^{-3}cd/m^2 的光才敏感,敏感的光谱范围为 $0.38\sim 0.78\mu\text{m}$,在 $0.555\mu\text{m}$ 处最为敏感,且能分辨出各种颜色。锥状细胞的这种视觉功能称为白昼视觉或明视觉。当亮度低于 10^{-3}cd/m^2 时,锥状细胞不敏感,而柱状细胞起作用。柱状细胞敏感的光谱范围为 $0.33\sim 0.73\mu\text{m}$,在 $0.507\mu\text{m}$ 处最为敏感,但不能分辨颜色。柱状细胞的这种视觉功能称为夜间视觉或暗视觉。

用各种单色辐射分别刺激正常人(标准观察者)眼的锥状细胞,当刺激程度相同时,发现波长 $\lambda_m=0.555\mu\text{m}$ 处的光谱辐亮度 L_{e,λ_m} 小于其他波长处的光谱辐亮度 $L_{e,\lambda}$ 。定义

$$V(\lambda) = L_{e,\lambda_m} / L_{e,\lambda} \quad (1-45)$$

为正常人眼的明视觉光谱光视效率。

图 1-4 所示为人眼的明视觉光谱光视效率 $V(\lambda)$ 与波长 λ 的关系曲线。

对正常人眼的柱状细胞,以微弱的各种单色辐射刺激时,发现在相同刺激程度下,波长 $\lambda'_m=0.507\mu\text{m}$ 处的光谱辐亮度 $L_{e,507\mu\text{m}}$ 小于其他波长 λ 处的光谱辐亮度 $L_{e,\lambda}$ 。定义

$$V'(\lambda) = L_{e,507\mu\text{m}} / L_{e,\lambda} \quad (1-46)$$

为正常人眼的暗视觉光谱光视效率。 $V'(\lambda)$ 也是一个无量纲的相对值,它与波长的关系如图 1-4 中的虚线所示。

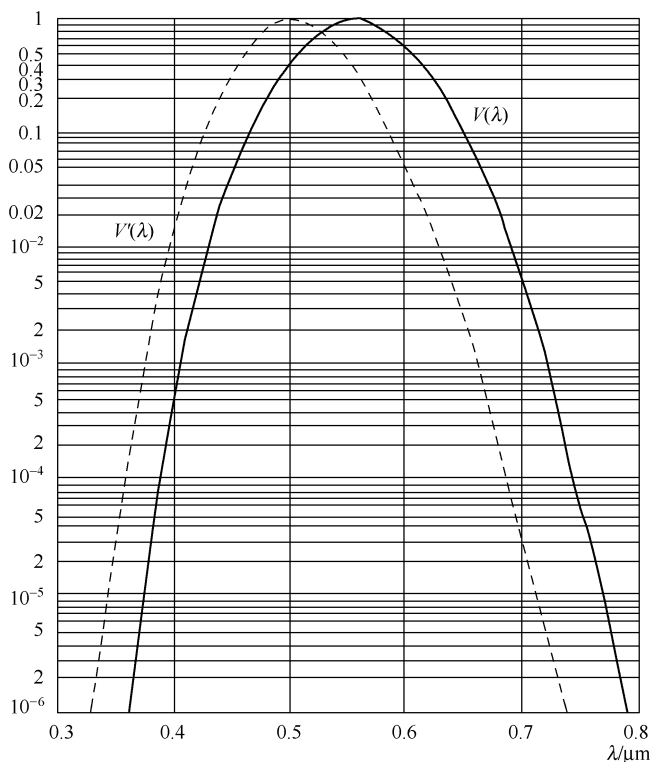


图 1-4 正常人眼的 $V(\lambda)$ 、 $V'(\lambda)$ 与 λ 的关系曲线

1.4.2 人眼的光谱光视效能

无论是锥状细胞还是柱状细胞,单色辐射对其刺激的程度与 $V(\lambda)L_{e,\lambda}$ 成正比。如果用各种波长的混合辐射刺激时,刺激程度遵守叠加原理,且与 $\int_{\lambda} V(\lambda)L_{e,\lambda} d\lambda$ 成正比。

所谓辐射对人眼锥状细胞或柱状细胞的刺激程度,是从生理上评价所有的辐射参量 $X_{e,\lambda}$ 与所有的光度参量 $X_{v,\lambda}$ 、 $X'_{v,\lambda}$ 的关系。对于明视觉,刺激程度平衡条件为

$$X_{v,\lambda} = K_m V(\lambda) X_{e,\lambda} \quad (1-47)$$

式中, K_m 为人眼的明视觉最灵敏波长 λ_m 的光度参量对辐射度参量的转换常数,其值为 683 lm/W 。

同样,对于暗视觉,有

$$X'_{v,\lambda} = K'_m V(\lambda) X_{e,\lambda} \quad (1-48)$$

式中, K'_m 为人眼的暗视觉最灵敏波长 λ'_m 的光度参量对辐射度参量的转换常数,其值为 1725 lm/W 。

令

$$K(\lambda) = X_{v,\lambda} / X_{e,\lambda} = K_m V(\lambda) \quad (1-49)$$

$$K'(\lambda) = X'_{v,\lambda} / X_{e,\lambda} = K'_m V(\lambda) \quad (1-50)$$

式中, $K(\lambda)$ 、 $K'(\lambda)$ 分别称为人眼的明视觉和暗视觉光谱光视效能。

由式(1-49)、式(1-50)可知,在人眼最敏感的波长 $\lambda_m = 0.555 \mu\text{m}$ 、 $\lambda'_m = 0.507 \mu\text{m}$ 处,分别有 $V(\lambda_m) = 1$ 、 $V'(\lambda'_m) = 1$,这时 $K(\lambda_m) = K_m$ 、 $K'(\lambda'_m) = K'_m$ 。因此, K_m 、 K'_m 分别称为正常人眼的明视觉最大光谱光视效能和暗视觉最大光谱光视效能。

图 1-5 所示为正常人眼的 $K(\lambda)$ 、 $K'(\lambda)$ 与 λ 的关系曲线。

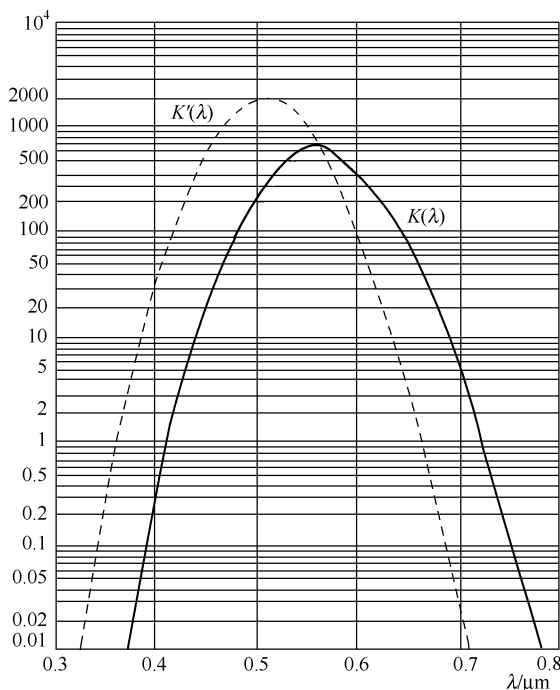


图 1-5 正常人眼的 $K(\lambda)$ 、 $K'(\lambda)$ 与 λ 的关系曲线

根据式(1-49)和式(1-50),可以将任何光谱辐射量转换成光谱光度量。

例 1-3 已知某 He-Ne 激光器的输出功率为 3 mW ,试计算其发出的光通量。

解 He-Ne 激光器输出的光为光谱辐射,根据式(1-47)可以计算出它发出的光通量为

$$\Phi_{v,\lambda} = K_m V(\lambda) \Phi_{e,\lambda} = 683 \times 0.24 \times 3 \times 10^{-3} = 0.492 (\text{lm})$$

表 1-2 所示为正常人眼的 $V(\lambda)$ 、 $V'(\lambda)$ 及 $K(\lambda)$ 与 λ 的数值关系。

表 1-2 正常人眼的 $V(\lambda)$ 、 $V'(\lambda)$ 及 $K(\lambda)$ 与 λ 的数值关系

$\lambda (\text{nm})$	$V(\lambda)$ ($L_v = 10 \text{cd/m}^2$)	$V'(\lambda)$	$K(\lambda)$ (lm/W)	$\lambda (\text{nm})$	$V(\lambda)$ ($L_v = 10 \text{cd/m}^2$)	$V'(\lambda)$	$K(\lambda) (\text{lm/W})$
380	0.000 0	0.000 6	0.000 0	575	0.915 4	0.164 5	625.22
390	0.000 1	0.002 2	0.068 3	580	0.870 0	0.121 2	594.21
395	0.000 2	0.004 4	0.136 6	585	0.816 3	0.093 6	557.53
400	0.000 4	0.009 3	0.273 2	590	0.757 0	0.065 5	517.03
405	0.000 6	0.017 0	0.409 8	595	0.699	0.045 0	474.62
410	0.001 2	0.034 8	0.816 9	600	0.631 0	0.033 2	430.97
415	0.002 2	0.065 7	1.502 6	605	0.566 8	0.024 6	387.12
420	0.004 0	0.096 6	2.732	610	0.503 0	0.015 9	343.55
425	0.007 3	0.148 2	4.985 9	615	0.441 2	0.011 7	301.34
430	0.011 6	0.199 8	7.922 8	620	0.381 0	0.007 4	260.22
435	0.023 0	0.264 0	11.474	625	0.321 0	0.005 4	219.24
440	0.016 8	0.328 1	15.709	630	0.265 0	0.003 3	180.99
445	0.029 8	0.391 6	20.353	635	0.217 0	0.002 5	148.21
450	0.038 0	0.455	25.954	640	0.175 0	0.001 5	119.53
455	0.048 0	0.511	32.784	645	0.138 2	0.001 2	94.391
460	0.060 0	0.567	40.980	650	0.107 0	0.000 7	73.081
465	0.073 9	0.618	50.474	655	0.081 6	0.000 5	55.733
470	0.091 0	0.670	62.153	660	0.061 0	0.000 3	41.663
475	0.112 6	0.732	76.906	665	0.044 6	0.000 2	30.412
480	0.139 0	0.793	94.937	670	0.032 0	0.000 1	21.856
485	0.166 3	0.849	111.55	675	0.023 0	0.000 09	15.846
490	0.208 0	0.904	142.06	680	0.017 0	0.000 07	11.611
495	0.258 6	0.943	176.62	685	0.011 9	0.000 06	8.128
500	0.323 0	0.982	220.61	690	0.008 2	0.000 04	5.601
505	0.407 3	0.999	278.19	695	0.005 7	0.000 03	3.893
510	0.503 0	0.997	343.54	700	0.004 1	0.000 02	2.800
515	0.608 2	0.966	415.40	705	0.002 9	0.000 01	1.981
520	0.710 0	0.935	484.93	710	0.002 1	0.000 009	1.434
525	0.793 2	0.873	541.76	715	0.001 5	0.000 008	1.024 5
530	0.862 0	0.811	588.75	720	0.001 0	0.000 005	0.683
535	0.914 9	0.731	624.88	725	0.000 7	0.000 004	0.478
540	0.954 0	0.650	651.58	730	0.000 5	0.000 003	0.342
545	0.980 3	0.566	669.54	735	0.000 4	0.000 002	0.273
550	0.995 0	0.481	679.59	740	0.000 3	0.000 001	0.205
555	1.000 0	0.406	683.00	750	0.000 1	0.000 000 8	0.068 3
560	0.995 0	0.328 8	679.59	760	0.000 06	0.000 000 4	0.041 0
565	0.978 6	0.268 3	668.38	770	0.000 03	0.000 000 2	0.020 5
570	0.952 0	0.207 6	650.72	780	0.000 02	0.000 000 1	0.013 7

根据发光强度的定义,明视觉最大光谱光视效能 $K_m = 683 \text{ lm/W}$;暗视觉最大光谱光视效能 $K'_m = 1725 \text{ lm/W}$ 。

K_m 的倒数定义为光的最小力学当量 $M_{\min}$,即

$$M_{\min} = 1/K_m = 1.46 \text{ mW/lm}$$

其他波长的光的力学当量均大于 $M_{\min}$ 。

1.4.3 辐射体光视效能

一个热辐射体发射的总光通量 Φ_v 与总辐通量 Φ_e 之比,称为该辐射体的光视效能 K ,即

$$K = \Phi_v / \Phi_e \quad (1-51)$$

对发射连续光谱辐射的热辐射体,由上式及式(1-52)可得总光通量为

$$\Phi_v = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (1-52)$$

将式(1-35)、式(1-52)代入式(1-51),得到

$$K = \frac{K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} d\lambda} = K_m V \quad (1-53)$$

式中, V 为辐射体的光视效率。

在光电信息变换技术领域常用色温为 2856 K 的标准钨丝灯作为光源,测量硅、锗等光电器件光的电流灵敏度等特性参数。标准钨丝灯的发光光谱的分布如图 1-6 所示。

图中的曲线分别为标准钨丝灯的相对光谱辐射分布 X_{e,λ_r} 、人眼明视觉光谱光视效率 $V(\lambda)$ 和光谱光视效率与相对光谱辐射分布之积 $V(\lambda)X_{e,\lambda_r}$,积分 $\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} X_{e,\lambda_r} V(\lambda) d\lambda$ 的结果为 $X_{e,\lambda_r} V(\lambda)$ 曲线所围的面积 A_1 ,而积分 $\int_0^{\infty} X_{e,\lambda_r} d\lambda$ 的值为面积 A_2 。因此,由(1-53)可得标准钨丝灯的光视效能为

$$K_w = K_m \cdot \frac{A_1}{A_2} = 17.1 (\text{lm/W})$$

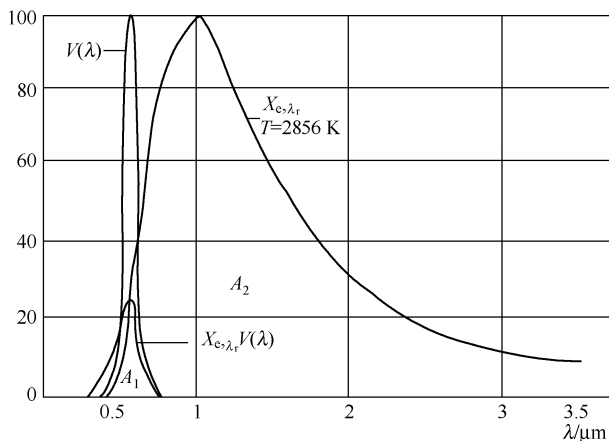


图 1-6 $T = 2856 \text{ K}$ 的标准钨丝灯的发光光谱

由式(1-51),已知某种辐射体的光视效能 K 和辐射量 X_e ,就能够计算出该辐射体的光度量 X_v ,该式是辐射体的辐射量和光度量的转换关系式。例如,对于色温为 2856 K 的标准钨丝灯其光视效能为 17 lm/W ,当标准钨丝灯发出的辐通量 $\Phi_e = 100 \text{ W}$ 时,其光通量 $\Phi_v = 1710 \text{ lm}$ 。

由此可见,色温越高的辐射体,它的可见光的成分越多,光视效能越高,光度量也越高。白炽钨丝灯的供电电压降低时,灯丝温度降低,灯的可见光部分的光谱减弱,光视效能降低,此时用照度计检测出的光照度将显著下降。

1.5 半导体对光的吸收

1.5.1 物质对光吸收的一般规律

光波入射到物质表面上,用透射法测定光通量的衰减时,发现通过路程 dx 的光通量变化 $d\Phi$ 与入射的光通量 Φ 和路程 dx 的乘积成正比,即

$$d\Phi = -\alpha\Phi dx \quad (1-54)$$

式中, α 称为吸收系数。物质对光的吸收示意图如图 1-7 所示。利用初始条件 $x=0$ 时 $\Phi=\Phi_0$, 解上式的微分方程, 可以找到通过 x 路程的光通量为

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha x} \quad (1-55)$$

当光在物质中传播时,透过的能量衰减到原来能量的 e^{-1} 时所通过的路程 x_α 的倒数等于该物质的吸收系数 α , 即

$$\alpha = 1/x_\alpha \quad (1-56)$$

另外,根据电动力学理论,平面电磁波在物质中传播时,其电矢量和磁矢量都按指数规律 $e^{-\frac{\omega\mu x}{c}}$ 衰减。而能流密度正比于电矢量 $E_Y = E_0 e^{-\frac{\omega\mu x}{c}} e^{j\omega(t - \frac{nx}{c})}$ 和磁矢量 $H_Z = H_0 e^{-\frac{\omega\mu x}{c}} e^{j\omega(t - \frac{nx}{c})}$ 的乘积,其实数部分为辐通量,它是传播路径 x 的函数。即

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\frac{2\omega\mu x}{c}} \quad (1-57)$$

式中, μ 称为消光系数。

由此可以得出

$$\alpha = 2\omega\mu/c = 4\pi\mu/\lambda \quad (1-58)$$

该式表明,若消光系数 μ 是与光波波长无关的常数,则吸收系数 α 与波长成反比。半导体的消光系数 μ 与入射光的波长无关,表明它对愈短波长的光吸收愈强。普通玻璃的消光系数 μ 也与波长 λ 无关,因此,它们对短波长辐射的吸收比长波长强。

当不考虑反射损失时,吸收的光通量应为

$$\Phi = \Phi_0 - \Phi = \Phi_0(1 - e^{-\alpha x}) \quad (1-59)$$

1.5.2 半导体吸收光的规律

半导体对光的吸收可分为本征吸收、杂质吸收、激子吸收、自由载流子吸收和晶格吸收。

(1) 本征吸收

在不考虑热激发和杂质的作用时,半导体中的电子基本上处于价带中,导带中的电子数很少。当光入射到半导体表面时,原子外层价电子吸收足够的光子能量,越过禁带,进入导带,成为可以自由运动的自由电子。同时,在价带中留下一个自由空穴,产生电子-空穴对。如图 1-8 所示,半导体价带电子吸收光子能量跃迁入导带,产生电子-空

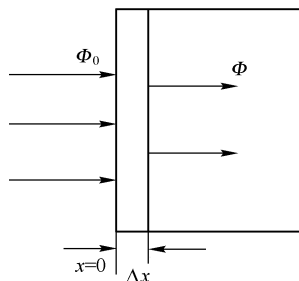


图 1-7 物质对光的吸收示意图

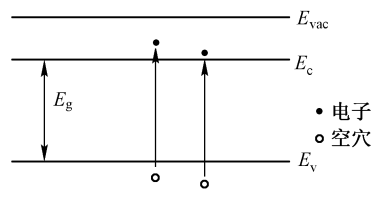


图 1-8 本征吸收

穴对的现象称为本征吸收。

显然,发生本征吸收的条件是光子能量必须大于半导体的禁带宽度 E_g ,这样才能使价带 E_v 上的电子吸收足够的能量跃入到导带低能级 E_c 之上,即

$$h\nu \geq E_g \quad (1-60)$$

由此,可以得到发生本征吸收的光波长波限为

$$\lambda_L \leq \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g} (\mu\text{m}) \quad (1-61)$$

只有波长短于 λ_L 的入射辐射才能使器件产生本征吸收,改变本征半导体的导电特性。

(2) 杂质吸收

N 型半导体中未电离的杂质原子(施主原子)吸收光子能量 $h\nu$ 。若 $h\nu \geq \Delta E_D$ (施主电离能),杂质原子的外层电子将从杂质能级(施主能级)跃入导带,成为自由电子。

同样,P 型半导体中,价带上的电子吸收能量 $h\nu > \Delta E_A$ (受主电离能)的光子后,价电子跃入受主能级,价带上留下空穴。相当于受主能级上的空穴吸收光子能量跃入价带。

这两种杂质半导体吸收足够能量的光子,产生电离的过程称为杂质吸收。

$$\text{显然,杂质吸收的长波限} \quad \lambda_L \leq \frac{1.24}{\Delta E_D} (\mu\text{m}) \quad (1-62)$$

$$\text{或} \quad \lambda_L \leq \frac{1.24}{\Delta E_A} (\mu\text{m}) \quad (1-63)$$

由于 $E_g > \Delta E_D$ 或 ΔE_A ,因此,杂质吸收的长波限总要长于本征吸收的长波限。杂质吸收会改变半导体的导电特性,也会引起光电效应。

(3) 激子吸收

当入射到本征半导体上的光子能量 $h\nu$ 小于 E_g ,或入射到杂质半导体上的光子能量 $h\nu$ 小于杂质电离能(ΔE_D 或 ΔE_A)时,电子不产生能带间的跃迁成为自由载流子,仍受原来束缚电荷的约束而处于受激状态。这种处于受激状态的电子称为激子。吸收光子能量产生激子的现象称为激子吸收。显然,激子吸收不会改变半导体的导电特性。

(4) 自由载流子吸收

对于一般半导体材料,当入射光子的频率不够高,不足以引起电子产生能带间的跃迁或形成激子时,仍然存在着吸收,而且其强度随波长增大而增强。这是由自由载流子在同一能带内的能级间的跃迁所引起的,称为自由载流子吸收。自由载流子吸收不会改变半导体的导电特性。

(5) 晶格吸收

晶格原子对远红外谱区的光子能量的吸收,直接转变为晶格振动动能的增加,在宏观上表现为物体温度升高,引起物质的热敏效应。

以上五种吸收中,只有本征吸收和杂质吸收能够直接产生非平衡载流子,引起光电效应。其他吸收都程度不同地把辐射能转换为热能,使器件温度升高,使热激发载流子运动的速度加快,而不会改变半导体的导电特性。

1.6 光电效应

光与物质作用产生的光电效应分为内光电效应与外光电效应两类。被光激发所产生的载

流子(自由电子或空穴)仍在物质内部运动,使物质的电导率发生变化或产生光生伏特的现象,称为内光电效应。而被光激发产生的电子逸出物质表面,形成真空中的电子的现象,称为外光电效应。内光电效应是半导体光电器件的核心技术,外光电效应是真空光电倍增管、摄像管、变像管和像增强器的核心技术。本节主要讨论内光电效应与外光电效应的基本原理,这是光电技术的重要基础。

1.6.1 内光电效应

1. 光电导效应

光电导效应可分为本征光电导效应与杂质光电导效应两种。本征半导体或杂质半导体价带中的电子吸收光子能量跃入导带,产生本征吸收,导带中产生光生自由电子,价带中产生光生自由空穴。光生电子与空穴使半导体的电导率发生变化。这种在光的作用下由本征吸收引起的半导体电导率发生变化的现象,称为本征光电导效应。

如果通量为 $\Phi_{e,\lambda}$ 的单色辐射入射到如图 1-9 所示的光电导体上时,波长 λ 的单色辐射全部被吸收,则光敏层单位时间(每秒)所吸收的量子数密度为

$$N_{e,\lambda} = \frac{\Phi_{e,\lambda}}{h\nu bdl} \quad (1-64)$$

光敏层每秒产生的电子数密度为

$$G_e = \eta N_{e,\lambda} \quad (1-65)$$

式中, η 为半导体材料的量子效率。

在热平衡状态下,半导体的热电子产生率 G_t 与热电子复合率 r_t 相平衡。因此,光敏层内电子总产生率为

$$G_e + G_t = \eta N_{e,\lambda} + r_t \quad (1-66)$$

在光敏层内除产生电子与空穴外,还有电子与空穴的复合。导带中的电子与价带中的空穴的总复合率为

$$R = K_f(\Delta n + n_i)(\Delta p + p_i) \quad (1-67)$$

式中, K_f 为载流子的复合几率, Δn 为导带中的光生电子浓度, Δp 为导带中的光生空穴浓度, n_i 与 p_i 分别为热激发电子与空穴的浓度。

同样,热电子复合率 r_t 与导带内热电子浓度 n_i 及价带内空穴浓度 p_i 的乘积成正比,即

$$r_t = K_f n_i p_i \quad (1-68)$$

在热平衡状态下,载流子的产生率应与复合率相等,即

$$\eta N_{e,\lambda} + K_f n_i p_i = K_f(\Delta n + n_i)(\Delta p + p_i) \quad (1-69)$$

在非平衡状态下,载流子的时间变化率应等于载流子的总产生率与总复合率的差,即

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta n}{dt} &= \eta N_{e,\lambda} + K_f n_i p_i - K_f(\Delta n + n_i)(\Delta p + p_i) \\ &= \eta N_{e,\lambda} - K_f(\Delta n \Delta p + \Delta p n_i + \Delta n p_i) \end{aligned} \quad (1-70)$$

下面分两种情况进行讨论。

(1) 在微弱辐射作用下,光生载流子浓度 Δn 远小于热激发电子浓度 n_i ,光生空穴浓度 Δp

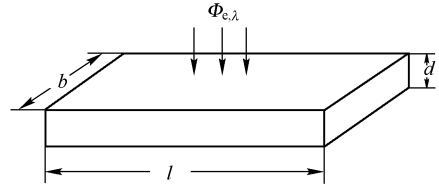


图 1-9 光电导体

远小于热激发空穴的浓度 p_i , 并考虑到本征吸收的特点: $\Delta n = \Delta p$, 因此式(1-70)可简化为

$$\frac{d\Delta n}{dt} = \eta N_{e,\lambda} - K_f \Delta n (n_i + p_i)$$

利用初始条件: $t=0$ 时, $\Delta n=0$, 解微分方程得

$$\Delta n = \eta \tau N_{e,\lambda} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (1-71)$$

式中, $\tau = 1/K_f(n_i + p_i)$, 称为载流子的平均寿命。

由式(1-71)可见, 光激发载流子浓度随时间按指数规律上升, 当 $t \gg \tau$ 时, 载流子浓度 Δn 达到稳态值 Δn_0 , 即达到动态平衡状态, 有

$$\Delta n_0 = \eta \tau N_{e,\lambda} \quad (1-72)$$

光激发载流子引起半导体电导率的变化为

$$\Delta \sigma = \Delta n q \mu = \eta \tau q \mu N_{e,\lambda} \quad (1-73)$$

式中, μ 为电子迁移率 μ_n 与空穴迁移率 μ_p 之和。

$$\text{半导体材料的光电导为} \quad g = \Delta \sigma \frac{bd}{l} = \frac{\eta \tau q \mu bd}{l} N_{e,\lambda} \quad (1-74)$$

$$\text{将式(1-64)代入式(1-74)得到} \quad g = \frac{\eta q \tau \mu}{h \nu l^2} \Phi_{e,\lambda} \quad (1-75)$$

由式(1-75)可以看出, 在弱辐射作用下的半导体材料的光电导与入射辐通量 $\Phi_{e,\lambda}$ 成线性关系。

$$\text{对式(1-75)求导可得} \quad dg = \frac{\eta q \tau \mu}{h \nu l^2} d\Phi_{e,\lambda}$$

由此可得半导体材料在弱辐射作用下的光电导灵敏度为

$$S_g = \frac{dg}{d\Phi_{e,\lambda}} = \frac{\eta q \tau \mu \lambda}{h c l^2} \quad (1-76)$$

可见, S_g 为与材料性质有关的常数, 与光电导材料两电极间长度 l 的平方成反比。为提高光电导器件的光电导灵敏度 S_g , 需要将光敏电阻的形状制造成蛇形。

(2) 在强辐射作用下, $\Delta n \gg n_i$, $\Delta p \gg p_i$, 式(1-70)可以简化为

$$\frac{d\Delta n}{dt} = \eta N_{e,\lambda} - K_f \Delta n^2$$

利用初始条件: $t=0$ 时, $\Delta n=0$, 解微分方程得

$$\Delta n = \left(\frac{\eta N_{e,\lambda}}{K_f} \right)^{1/2} \tanh \frac{t}{\tau} \quad (1-77)$$

式中, $\tau = 1/\sqrt{\eta K_f N_{e,\lambda}}$, 为强辐射作用下载流子的平均寿命。

显然, 在强辐射情况下, 半导体材料的光电导与入射辐通量间的关系为

$$g = q \mu \left(\frac{\eta bd}{h \nu K_f l^3} \right)^{1/2} \Phi_{e,\lambda}^{1/2} \quad (1-78)$$

为抛物线关系。

$$\text{对式(1-78)进行微分得} \quad dg = \frac{1}{2} q \mu \left(\frac{\eta bd}{h \nu K_f l^3} \right)^{1/2} \Phi_{e,\lambda}^{-1/2} d\Phi_{e,\lambda} \quad (1-79)$$

上式表明, 在强辐射作用的情况下半导体材料的光电导灵敏度不仅与材料的性质有关, 而且与