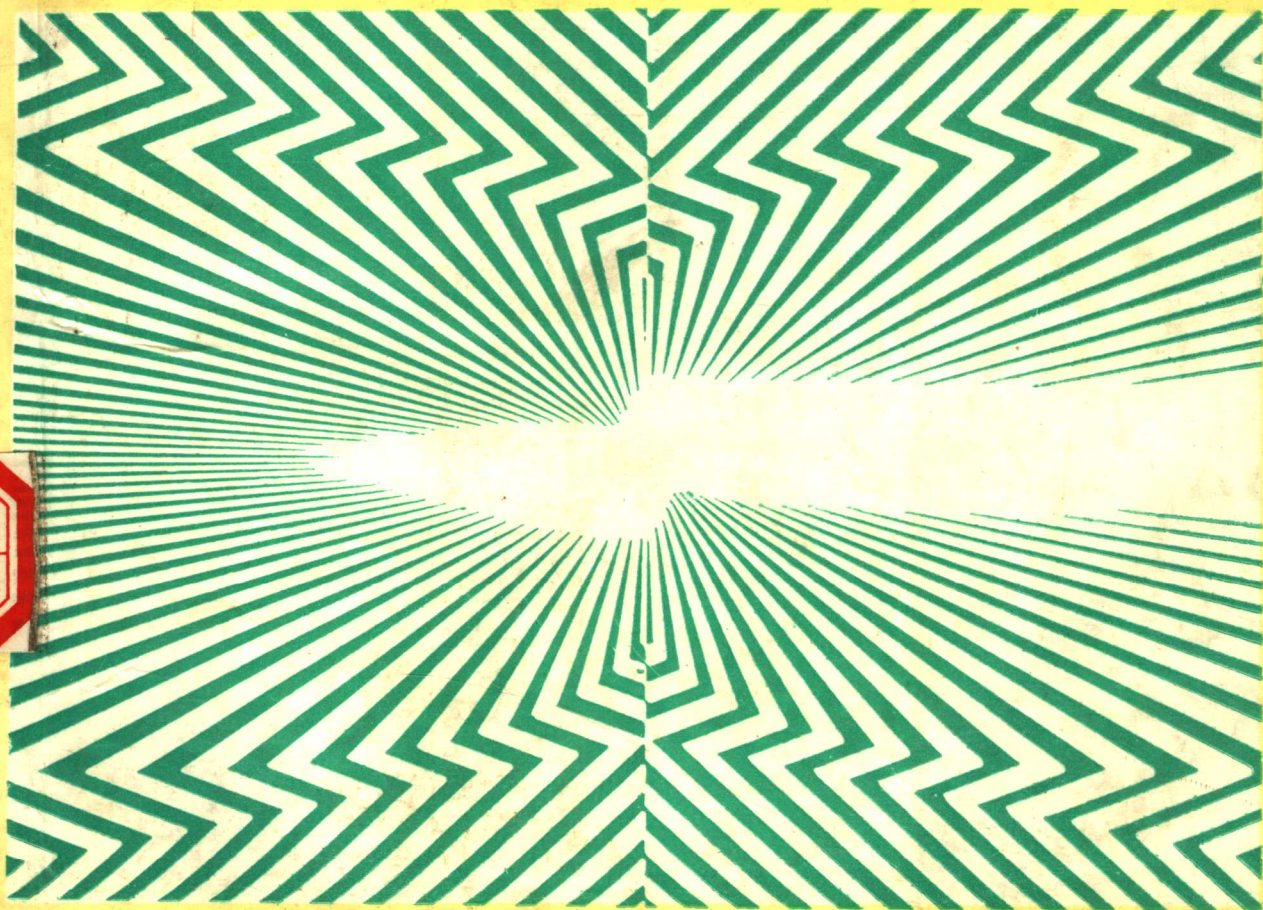


# 光 电 子 学

申铨国 张铁强 主编



兵器工业出版社

# 光 电 子 学

申铨国 张铁强 主编

兵器工业出版社

(京)新登字049号

## 内 容 简 介

本教材较系统地叙述了光电子学的主要内容,包括半导体光辐射与光电转换原理、光辐射在介质光波导和光纤中的传输规律和有关现象、非线性光学的基本概念和理论、光辐射的调制、光辐射的探测与噪声,以及光电子学的应用及其发展。

本教材注重物理概念和理论的阐述,并注意由浅入深、理论联系实际,力求反映光电子学最前沿的课题。每一章节编入了一定数量的例题、习题和思考题。

本书可作为大学光电子技术、应用物理等专业本科生或研究生的教材或教学参考书,也可供有关科研人员和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

光电子学/申铨国,张铁强主编. —北京:兵器工业出版社,1994.

ISBN 7-80038-786-0

I. 光… II. ①申… ②张… III. 光电子学-概论 IV. TN201

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第02515号

## 光电子学

申铨国 张铁强 主编

\*

兵器工业出版社 出版

(北京市海淀区车道沟10号)

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

通县向阳印刷厂印装

\*

开本: 787×1092 1/16 印张: 21.5 字数: 528.84千字

1994年8月第1版 1994年8月第1次印刷

印数: 1—1500 定价: 10.25元

ISBN 7-80038-786-0/TN·35(课)

## 出版说明

遵照国务院国发[1978]23号文件精神,中国兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵总教材编审室成立以来,在广大教师的积极支持和努力下,在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下,已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务,共出版教材211种。这批教材出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革、提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要,特别是国防现代化培养人才的需要,反映国防科技的先进水平,达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求,我们以提高教材质量为主线,完善编审制度、建立质量标准、明确岗位责任,建立了由主审审查、责编委复审和教编室审定等5个制度,并根据兵工类专业的特点,成立了九个专业教学指导委员会和两个教材编审小组,以加强对兵工类专业教材建设的规划、评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材,全面提高质量,适当发展品种,力争系统配套,完善管理制度,加强组织领导”的“八五”教材建设方针,兵总教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上,于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划,共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的。专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑,对编写大纲进行了审查,认为符合兵工专业培养人才要求,符合国家出版方针。这批教材的出版必将为兵工专业教材的系列配套,为教学质量的提高和培养国防现代化人才,为促进兵工类专业科学技术的发展,都将起到积极的作用。

本教材由申铨国、张铁强主编,经中国兵器工业总公司夜视及激光技术专业教学指导委员会复查,兵总教材编审室审定。

限于水平和经验,这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处,希望使用本教材的单位和广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1993年11月

## 前 言

本教材是编者在《光电子学》讲义的基础上，重新修改补充后，经机械电子工业部光电技术教学指导委员会评审并推荐作为统编教材出版的。

本教材学时数为60学时，内容共分八章。第一章介绍半导体光辐射与光电探测原理；第二、三、四章分别阐述光辐射在均匀介质和晶体、介质光波导和光纤中的传输规律和有关现象；第五章重点介绍光波频率变换、参量振荡和光学双稳态等非线性光学的基本概念和理论；第六章讲授电光、声光、磁光效应及其对光波的调制；第七章简述光辐射的探测与噪声；最后一章介绍光电子学在光纤通信、光纤传感器、集成光学、光折变效应及应用、光学神经网络等领域里的应用及最新发展动态。本书的先修课是物理光学、电磁场理论和量子光学。

本教材在内容选取和编排上，注重物理概念的阐述，注意由浅入深，理论联系实际，并力求反映光电子学最新研究课题。在主要章节里编入了一定数量的例题，在每一章末附有适量的思考题和习题，以帮助学生加深理解有关内容。

本书可作为大学光电子技术、应用物理等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。

本书的前言和第三、四、八章由申铨国编写，第一、二、五、六、七章和习题由张铁强编写，钟江帆编写了部分章节和思考题，全书由申铨国修改、定稿。

吉林大学费浩生教授对本书进行了认真细致的审阅，并提出了许多宝贵意见；长春光机学院马俊芝教授为本书责任编辑，给予了多方面热情帮助；吉林工大林晓珑同志精心绘制了大部分插图。在此编者向这些同志表示诚挚的感谢。

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

1993年5月

# 目 录

## 前 言

<b>第一章 半导体的光辐射与光电转换</b> .....	( 1 )
§1.1 光辐射及发光源.....	( 1 )
§1.2 半导体的光吸收与光辐射.....	( 9 )
§1.3 半导体的光电转换原理.....	( 20 )
§1.4 半导体发光源.....	( 29 )
习题与思考题.....	( 40 )
参考文献.....	( 41 )
<b>第二章 光辐射的传播</b> .....	( 42 )
§2.1 波动方程与光线方程 .....	( 42 )
§2.2 光辐射传播的电磁理论 .....	( 49 )
§2.3 光辐射在晶体中的传播 .....	( 54 )
习题与思考题 .....	( 66 )
参考文献 .....	( 67 )
<b>第三章 介质光波导</b> .....	( 68 )
§3.1 平面光波导光线光学理论分析 .....	( 68 )
§3.2 平面光波导电磁理论分析 .....	( 72 )
§3.3 波导中能量的传输与损耗 .....	( 82 )
§3.4 带状介质光波导 .....	( 86 )
§3.5 光波导的耦合模理论 .....	( 92 )
§3.6 光波导器件 .....	( 104 )
习题与思考题 .....	( 112 )
参考文献 .....	( 113 )
<b>第四章 光学纤维</b> .....	( 114 )
§4.1 光纤中光线的传播 .....	( 114 )
§4.2 阶跃折射率光纤中光传播的电磁理论 .....	( 121 )
§4.3 渐变折射率光纤的WKB分析方法 .....	( 133 )
§4.4 光纤的色散 .....	( 140 )
§4.5 光纤的损耗和光学特性 .....	( 146 )
习题与思考题 .....	( 154 )
参考文献 .....	( 155 )
<b>第五章 光辐射的频率变换与非线性光学</b> .....	( 156 )
§5.1 非线性光学效应 .....	( 156 )
§5.2 二次非线性光学效应及其变频作用 .....	( 161 )
§5.3 光学倍频变换 .....	( 170 )
§5.4 光学升频变换与参量效应 .....	( 179 )

§5.5 三次非线性光学效应及其变频作用 .....	(188)
§5.6 光学孤粒子 .....	(201)
习题与思考题 .....	(201)
参考文献 .....	(202)
<b>第六章 光辐射的调制 .....</b>	<b>(203)</b>
§6.1 电光调制的物理基础 .....	(203)
§6.2 电光延迟与调制 .....	(216)
§6.3 电光器件与应用 .....	(224)
§6.4 声光调制的物理基础 .....	(232)
§6.5 声光器件和应用 .....	(244)
§6.6 磁光效应及其调制应用 .....	(251)
习题与思考题 .....	(259)
参考文献 .....	(260)
<b>第七章 光辐射的探测与噪声 .....</b>	<b>(261)</b>
§7.1 光辐射探测器件的特性参量 .....	(261)
§7.2 光电探测器原理 .....	(270)
§7.3 热探测器基本原理 .....	(283)
§7.4 光辐射的探测 .....	(289)
习题与思考题 .....	(296)
参考文献 .....	(297)
<b>第八章 光电子学应用及其发展 .....</b>	<b>(299)</b>
§8.1 光通信系统 .....	(299)
§8.2 集成光学概要 .....	(306)
§8.3 光纤传感器 .....	(314)
§8.4 光折变效应及其应用 .....	(319)
§8.5 光人工神经网络 .....	(326)
参考文献 .....	(336)

# 第一章 半导体的光辐射与光电转换

任何一种光电系统或光电器件的评价和使用都离不开特定的光辐射源(光源)与光辐射探测器。所以,光辐射和光电转换的原理的研究是光电子学的基本研究内容之一。

本章将重点介绍半导体光辐射及光电转换的基本概念和原理,以及在光电子技术中比较典型的半导体光辐射源。

## §1.1 光辐射及发光源<sup>(1)(2)(3)</sup>

### 1.1.1 光辐射

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。

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 $390\text{nm}$ 的是紫外辐射,波长 $390\sim 770\text{nm}$ 的属于可见光,波长大于 $770\text{nm}$ 的是红外辐射。

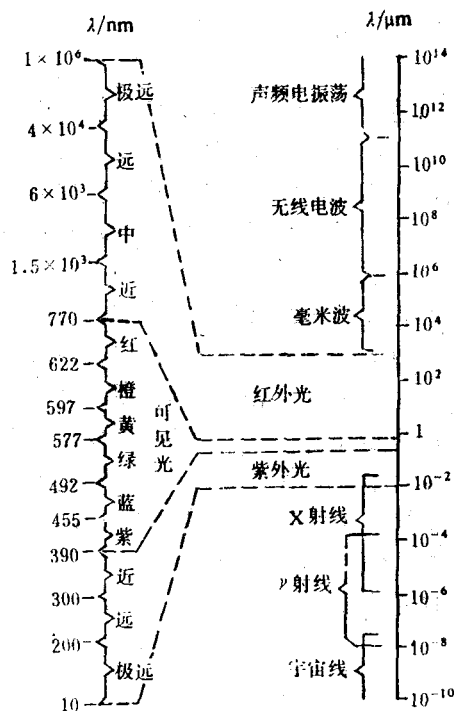


图1-1 电磁辐射波谱

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 <sup>①</sup>
280~315	紫外线——B
315~380	紫外线——A
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 <sup>6</sup>	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。

### 1.1.2 光辐射的计量

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，不管人眼是否能看到，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，又有一套反映其对入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。

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<sub>e</sub>表示，其单位是焦耳(J)。

辐射通量即辐射功率 $\Phi$ 。定义为单位时间内流过某一面积的辐射能量，即

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1.1-1)$$

式中 $dQ_e$ 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 $M_e$ 表示，即

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (1.1-2)$$

式中 $d\Phi_e$ 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 $I_e$ 表示，即

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega} \quad (1.1-3)$$

式中 $d\Phi_e$ 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 $\Phi_e$ ，则该点辐射体在各方向上的辐射强度 $I_e$ 是常量，即

$$I_e = \frac{\Phi_e}{4\pi} \quad (1.1-4)$$

### 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 $L_e$ 表示，即

$$L_e = \frac{I_e}{dS \cdot \cos\theta} = \frac{d\Phi_e}{dS \cdot \cos\theta \cdot d\omega} \quad (1.1-5)$$

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

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

$$I_e = I_{e0} \cos\theta \quad (1.1-6)$$

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(1.1-6)式代入到(1.1-5)式，得到余弦辐射体的辐射亮度为

$$L_e = \frac{I_{e0}}{dS} = L_{e0} \quad (1.1-7)$$

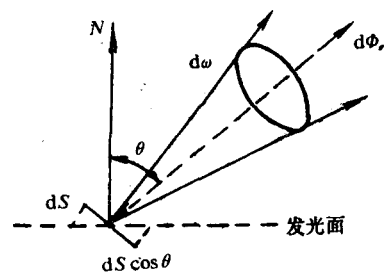


图1-2 亮度定义图示

即它的辐射亮度是均匀的，与方向角 $\theta$ 无关。若将(1.1-7)式代入到(1.1-5)式中，得到余弦辐射体的面积元 $dS$ 向半空间的辐射通量 $\Phi_e$ 为

$$\Phi_e = L_{e,0} \int \cos\theta \cdot d\omega \cdot dS = L_{e,0} \pi dS \quad (1.1-8)$$

其辐射出射度为

$$M_e = L_{e,0} \pi \quad (1.1-9)$$

### 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

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (1.1-10)$$

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<sup>-2</sup>( $W \cdot m^{-2}$ )。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 <sup>-1</sup>	$W \cdot \mu m^{-1}$
光谱辐射出射度	$M_{e,\lambda}$	$dM_e/d\lambda$	瓦·米 <sup>-2</sup> ·微米 <sup>-1</sup>	$W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$
光谱辐射照度	$E_{e,\lambda}$	$dE_e/d\lambda$	瓦·米 <sup>-2</sup> ·微米 <sup>-1</sup>	$W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$
光谱辐射强度	$I_{e,\lambda}$	$dI_e/d\lambda$	瓦·球面度 <sup>-1</sup> ·微米 <sup>-1</sup>	$W \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$
光谱辐射亮度	$L_{e,\lambda}$	$dL_e/d\lambda$	瓦·米 <sup>-2</sup> ·球面度 <sup>-1</sup> ·微米 <sup>-1</sup>	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$

## 二、光度量

光度学的物理量可以用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 $Q_v, \Phi_v, I_v, M_v, L_v, E_v$ 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。

表1-3 光度量及其单位

名称	符号	定义式	单位名称	单位符号
光能	$Q_v$		流明·秒	$lm \cdot s$
光通量	$\Phi_v$	$dQ_v/dt$	流明	$lm$
光出射度	$M_v$	$d\Phi_v/dS$	流明·米 <sup>-2</sup>	$lm \cdot m^{-2}$
光照度	$E_v$	$d\Phi_v/dS$	勒克司(流明·米 <sup>-2</sup> )	$lx$
光强度	$I_v$	$d\Phi_v/d\omega$	坎德拉(流明·球面度 <sup>-1</sup> )	$cd$
光亮度	$L_v$	$I_v/(dS \cdot \cos\theta)$	坎德拉·米 <sup>-2</sup>	$cd \cdot m^{-2}$

光度量的单位是国际计量委员会(CIPM)规定的，在这里作简要说明：

①光度量的所有单位是由光强度的基本单位推导出来。1979年CIPM规定光强度的单位是坎德拉(Cd)。它的定义是“一个光源发出频率为 $540 \times 10^{12} Hz$ 的单色辐射，若在一定方向

上的辐射强度为  $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ ，则该光源在该方向上的光强度为  $1 \text{ Cd}$ 。

②光通量的单位是流明(lm)。它是光强度为  $1 \text{ Cd}$  的均匀点光源在单位立体角内发出的光通量。

③光照度的单位是勒克司(lx)。它是  $1 \text{ lm}$  光通量均匀地照射在  $1 \text{ m}^2$  面积上产生的光照度。

④光亮度单位是坎德拉·米<sup>-2</sup> ( $\text{Cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )。它是从  $1 \text{ m}^2$  表面沿其法线方向发出  $1 \text{ Cd}$  的光强度的亮度。

辐射度和光度量之间的关系可以用光谱光视效率和光视效率表示。

光谱光视效率描述某一波长的单色光的光谱辐射通量可以产生多少相应的光谱光通量。即光谱光视效率定义为同一波长下测得的光通量与辐射通量的比值，用  $K_\lambda$  表示，即

$$K_\lambda = \frac{\Phi_{v\lambda}}{\Phi_{e\lambda}} \quad (1.1-11)$$

单位是流明·瓦<sup>-1</sup> ( $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ )。

实验表明，在波长  $0.555 \mu\text{m}$  或光频  $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$  处有最大光视效率。其数值是  $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 。由此定义相对光谱光视效率  $V_\lambda$  (也称为视见函数) 为

$$V_\lambda = \frac{K_\lambda}{K_m} \quad (1.1-12)$$

显然  $V_\lambda \leq 1$ 。图1-3给出了明视觉(日间视觉)和暗视觉(夜间视觉)条件下  $V_\lambda$  随  $\lambda$  的变化曲线。表1-4 是人眼对不同波长的相对光谱光视效率  $V_\lambda$  的数值。

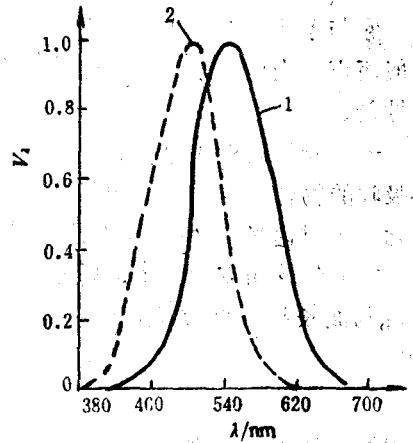


图1-3 相对光谱光视效率曲线  
1—明视觉 2—暗视觉

表1-4 相对光谱光视效率数值

光的颜色	$\lambda/\mu\text{m}$	$V_\lambda$	光的颜色	$\lambda/\mu\text{m}$	$V_\lambda$
紫	0.360	0.00000	黄	0.570	0.95200
	0.380	0.00004		0.590	0.75700
	0.410	0.00121	橙	0.610	0.50300
	0.430	0.01160		0.630	0.26500
蓝	0.450	0.03800	0.650	0.10700	
青	0.470	0.09098	红	0.670	0.03200
	0.490	0.20802		0.690	0.00821
绿	0.510	0.50300		0.710	0.00209
	0.530	0.86200		0.740	0.00025
黄	0.550	0.99495		0.770	0.00003
	0.555	1.00000		0.790	0.00000

光视效率描述给定的辐射体辐射通量能够产生多少相应的光通量，用  $K$  表示，即

$$K = \frac{\int_0^\infty \Phi_{e\lambda} K_m V_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{e\lambda} d\lambda} \quad (1.1-13)$$

显然，它与辐射体所包含的光谱成分有关。

### 1.1.3 光辐射源

能发射紫外、可见及红外辐射的器件称作辐射源，而仅能发射可见光的器件称为光源。但是在实际使用中，常常把二者混同起来，将凡能产生光辐射的辐射源统称为光源。

光源有自然光源，如太阳、天空、月亮、行星等，也有人造光源。人造光源是人为地把各种形式的能量(如电能、热能、化学能等)转换成光辐射的器件。其中，电光源是(由电能产生光辐射器件)主要的人造光源。电光源又可以区分为热辐射光源(如白炽灯、卤钨灯等)与发光辐射光源(如气体放电灯、电致发热屏等)。此外，人造光源中另一比较重要的光源是激光光源。它与上述光源的主要差别表现为单色性好、极好的方行性、高亮度和非常好的相干性。一般而言，光电子学所用的光源着重于单色性、高脉冲性、指向性、波长可调和高能量密度等性能。

一种光辐射性质已被完全了解的光辐射源是黑体。所谓黑体是指能把投射过来的辐射全部吸收的物体，同时它的辐射出射度也是最大的。显然，这是一种理想的模型。引用黑体的概念对于讨论光源(特别是对热辐射源)是有实际意义的。

1900年普朗克建立了辐射能量的量子理论，并利用这个理论导出了黑体光谱辐射出射度  $M_{\circ B}$  与波长  $\lambda$  和温度  $T$  之间的关系，即

$$M_{\circ B}(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (1.1-14)$$

式中  $k_B$  是玻尔兹曼常数， $h$  是普朗克常数， $T$  是绝对温度， $c$  是真空中光速。此式就是著名的普朗克公式。如果  $\lambda$  以米为单位代入，得到的光谱辐射出射度单位是  $W \cdot m^{-2}$ ，然后再把其转化成  $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$  的合理单位。

(将1.1-14)式同(1.1-9)式比较，显然黑体是余弦辐射体。所以，黑体光谱辐射亮度  $L_{\circ B}(\lambda, T)$  和光谱辐射强度  $I_{\circ B}(\lambda, T)$  分别是

$$L_{\circ B}(\lambda, T) = \frac{2c^2 h}{\lambda^5} \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (1.1-15)$$

$$I_{\circ B}(\lambda, T) = \frac{2c^2 h dS \cdot \cos\theta}{\lambda^5} \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (1.1-16)$$

图1-4是黑体光谱辐射出射度随  $\lambda$ 、 $T$  变化曲线。从中可见，随着温度上升，曲线下的面积(即黑体的辐射出射度  $M_{\circ B}$ )迅速增加，并且峰值光谱辐射出射度波长向短波方向移动。

利用普朗克公式，可以得到两条极为有用的规律：

#### 1. 维恩位移定律

对(1.1-14)式取  $\lambda$  的导数，并令其等于零，可以求出不同温度时，黑体最大光谱辐射出射度的峰值波长  $\lambda_m$  为

$$\lambda_m T = \frac{hc}{5k_B} = 2897 \mu m \cdot K \quad \text{峰值波长} \quad (1.1-17)$$

这就是维恩位移定律。将此式代入(1.1-14)，得到与这一温度对应的最大光谱辐射出射度为

$$M_{\circ B}(\lambda_m T) = 1.309 \times 10^{-15} T^5 (W \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot K^{-5}) \quad (1.1-18)$$

我们举几个典型的数值例子。红外摄像管可摄取人体的热辐射图像，因此摄像管对人体

辐射的峰值波长应有高灵敏度。若简单地把人体看成是温度为  $T=310\text{K}$  的黑体，其峰值波长为

$$\lambda_m = \frac{2897}{310} = 9.35 \mu\text{m}$$

所以，摄像管在此波长处应有最大灵敏度。

在温度  $2856\text{K}$  (测量硅光电探测器的光电流灵敏度所采用溴钨灯的色温) 时，黑体的峰值波长为

$$\lambda_m = \frac{2897}{2856} = 1.01 \mu\text{m}$$

而在  $6000\text{K}$  (太阳温度) 时，黑体的峰值波长为

$$\lambda_m = \frac{2897}{6000} = 0.48 \mu\text{m}$$

## 2. 斯忒藩-玻尔兹曼定律

如果将式(1.1-14)对所有的波长积分，得到黑体的辐射出射度是

$$M_{\text{eB}}(T) = \int_0^{\infty} M_{\text{eB}}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (1.1-19)$$

式中  $\sigma$  是斯忒藩-玻尔兹曼常数，数值是

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3 c^2} = 5.67 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \quad (1.1-20)$$

就光电子学常用的几个温度而言： $T_1=300\text{K}$  (室温)， $M_{\text{eB}}=460\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ； $T_2=2856\text{K}$  (钨丝白炽灯的色温)， $M_{\text{eB}}=3.77 \times 10^6 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ； $T_3=6000\text{K}$  (太阳的表面温度)， $M_{\text{eB}}=7.36 \times 10^7 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

实际上，在我们周围的自然辐射体及人造辐射源中不存在任何黑体，任何辐射体或多或少的都能反射一定比例的入射辐射。这时可以引入光谱发射率来反映实际辐射体的辐射特性。光谱发射率定义为实际光辐射体的光谱辐射出射度  $M_e(\lambda, T)$  和相同温度的黑体的光谱辐射出射度  $M_{\text{eB}}(\lambda, T)$  的比值。用  $\epsilon_e(\lambda, T)$  表示，则

$$\epsilon_e(\lambda, T) = \frac{M_e(\lambda, T)}{M_{\text{eB}}(\lambda, T)} \quad (1.1-21)$$

$\epsilon_e(\lambda, T) < 1$ 。 $\epsilon_e$  的数值不仅依赖于波长和温度，有时也同发射的角度有关。但是，对于大多数常见物体， $\epsilon_e$  与发射角度的依赖关系基本上可以忽略。

在引用光谱发射率之后，实际辐射体的光谱辐射出射度可以写成

$$M_e(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \epsilon_e(\lambda, T) \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (1.1-22)$$

实际辐射体可以分成灰体和选择性辐射体。如果某一辐射体的光谱发射率随波长改变，那么这种辐射体就是选择性辐射体。如果辐射体具有连续辐射光谱，且强度随波长分布与黑体的分布相似，那么这种辐射体就是灰体。显然，对于灰体有  $\epsilon_e(\lambda, T) = \epsilon_e(T)$ 。在相同温度下，灰体辐射与黑体辐射的峰值波长是相同的，如图1-5所示。因此，对一般灰体，与(1.1-18)式相当的关系式是

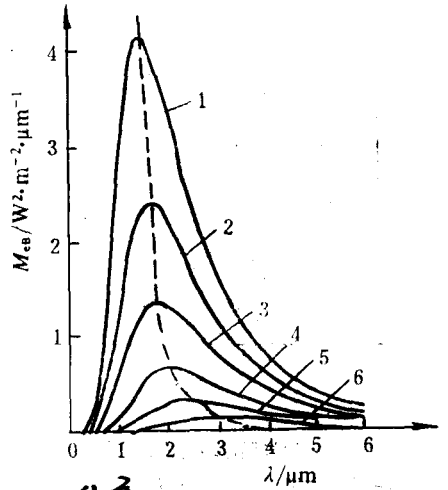


图1-4 黑体辐射的功率谱

1—2000K 2—1800K 3—1600K  
4—1400K 5—1200K 6—1000K

积分, 总的出射度

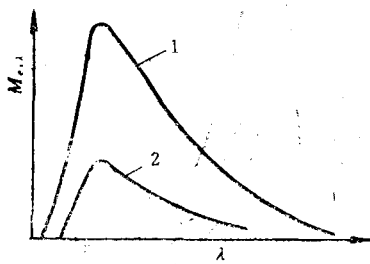


图1-5 灰体与黑体辐射分布比较

1— $T$ 温度黑体 2— $T$ 温度灰体

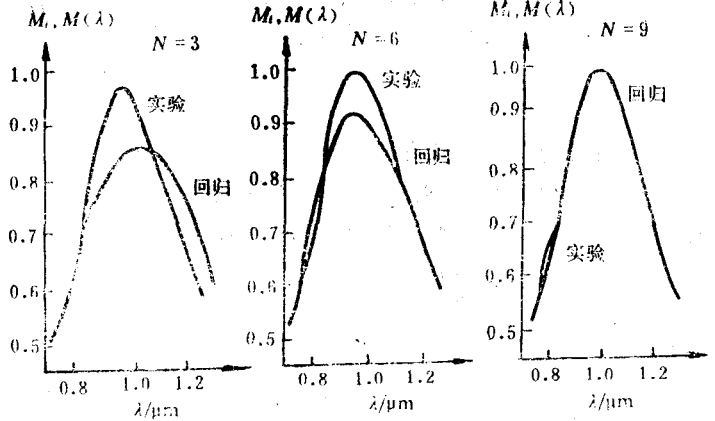


图1-6 溴钨灯光谱辐射出射度拟合曲线

$$M_e(T) = \epsilon_e(T) \sigma T^4 \quad (1.1-23)$$

利用拟合曲线的方法可以确定光辐射源的光谱辐射出射度函数<sup>[4]</sup>。方法是：对给定的光辐射源，可以采用各种方法测定各波长采样点的辐射出射度，得到一组离散点的集合。然后利用最小二乘法原理，通过计算机进行数据处理，并进行曲线拟合比较，最终得到该实际光辐射源的光谱辐射出射度。图1-6是50W溴钨灯的实测曲线与设定的回归函数曲线的拟合情况。图示表明：只要选择合适的回归次数 $N$ ，总可以确定出与实际测量值分布相当接近的该辐射源的光谱辐射出射度的函数关系式。

例1：温度为2856K的溴钨灯，其灯丝面积是 $2\text{mm} \times 4\text{mm}$ （视为黑体），确定其辐射出射度、辐射亮度、辐射通量。若在距其30cm处放一面积为 $10\text{mm}^2$ 的功率计，计算功率计上接收到的辐射照度。

解：因为将其视为黑体，所以由斯忒藩定律得

$$M_e(T) = \sigma T^4 = 5.67 \times 10^{-8} \times 2856^4 = 3.77 \times 10^6 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$$

黑体也是余弦辐射体。如果设定此光源是双面的，于是有

$$L_e = \frac{M_e}{2\pi} = \frac{3.77 \times 10^6}{2\pi} = 6.01 \times 10^5 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

$$\Phi_e = M_e \cdot S = 3.77 \times 10^6 \times 2 \times 4 \times 10^{-6} = 30.16 \text{W}$$

$$I_e = \frac{\Phi_e}{4\pi} = \frac{30.16}{4\pi} = 2.4 \text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$$

光源面积较其到功率计的距离要小得多，可视其为点光源，那么在功率计上接收到的辐射通量是

$$\Phi'_e = I_e \cdot \frac{S'}{r^2} = 2.4 \times \frac{10 \times 10^{-6}}{30^2 \times 10^{-4}} = 2.6 \times 10^{-4} \text{W}$$

而产生的照度是

$$E'_e = \frac{\Phi'_e}{S'} = \frac{2.6 \times 10^{-4}}{10 \times 10^{-6}} = 26 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$$

## §1.2 半导体的光吸收与光辐射<sup>[6][9][10][13]</sup>

半导体的光吸收与光辐射是两个相反过程，它构成光与半导体中电子相互作用的基本内容。在半导体光吸收过程中，价带电子吸收光子从价带跃迁到导带。这个过程既决定于光的性质，也决定于半导体能带结构。

半导体的光辐射是光吸收的逆过程，是指半导体向外发出光辐射的现象。光辐射可以是因光子激发，电子从导带跃迁到价带而发射一个同激发光子相同的光子，即产生受激辐射，也可以是电子通过自发辐射发射一个光子，从导带跃迁到价带。我们利用量子力学微扰理论讨论半导体光吸收与光辐射的基本规律，并说明二者的关系。

### 1.2.1 半导体的光吸收

半导体对光的吸收机构可以有这么几种情况：如果入射光子能量 $h\nu$ 大于半导体禁带宽度 $E_g$ ，电子从价带跃迁到导带，相应光吸收属于本征吸收；如果光子能量小于但接近于 $E_g$ ，则可以产生激子，引起杂质能级与有关能带之间的跃迁或杂质能级之间的跃迁，相应的光吸收过程属于激子吸收和杂质吸收；此外，对 $h\nu < E_g$ 的光子入射，还可以引起导带电子和价带空穴的带内跃迁，这是红外区的自由载流子吸收。在这些光吸收过程中，对光电变换比较重要的是价带电子跃迁到导带产生的本征吸收，以及与杂质有关的吸收。

#### 一、本征吸收

由于半导体能带结构的限制，只有光子的能量满足于 $h\nu \geq E_g$ 才可能产生本征吸收现象。因此，本征吸收存在一个长波限。长波限对应的波长应满足下式，即

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad (1.2-1)$$

式中 $h$ 是普朗克常数， $c$ 是真空中光速， $E_g$ 是半导体的禁带宽度。在表1-5中列出了一些比较重要的半导体材料的禁带宽度的数值<sup>[9]</sup>，从表中看到，本征吸收一般处在紫外及可见光区，有时也包括近红外区。

表1-5 几种半导体材料的主要物理参数

半 导 体	$E_g/eV$		$\mu/m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ 300k		$\epsilon_r$
	300k	0k	电 子	空 穴	
Ge	0.67	0.74	0.38	0.18	16.3
Si	1.11	1.16	0.145	0.05	11.8
GaSb	0.67	0.91	0.4	0.14	11.7
GaAs	1.35	1.53	0.85	0.04	12.9
GaP	2.24	2.40	0.03	0.015	10.2
InSb	0.17	0.24	8.0	0.045	18.7
InAs	0.35	0.44	3.3	0.045	12.5
InP	1.35	1.42	0.45	0.015	14
CdSe	1.74	1.84	0.065		10
PbS	0.37	0.29	0.09	0.062	170
PbTe	0.30	0.19	0.17	0.088	400

理论分析指出：电子从价带到导带的跃迁必须服从一定的选择定则，这表现为能量与动



量守恒。如果跃迁过程中只涉及光子和电子，与第三者无关，则称为直接跃迁；如果涉及第三者，例如声子(晶格振动的能量子)，则称为间接跃迁。于是，可以将半导体相应地区分为直接带隙半导体和间接带隙半导体。前者实现直接带间跃迁的几率大，如GaAs、GaSd、InP等化合物半导体和铊、镉、铅等硫属化合物；后者实现间接带间跃迁几率大，如Ge、Si一类半导体。

### 1. 直接跃迁

受光照的半导体中的电子从价带能级 $E_i(\mathbf{k}_i)$ 向导带能级 $E_f(\mathbf{k}_f)$ 直接跃迁，如图1-7所示。跃迁几率可以根据量子力学中的微扰理论得出<sup>[8]</sup>，即

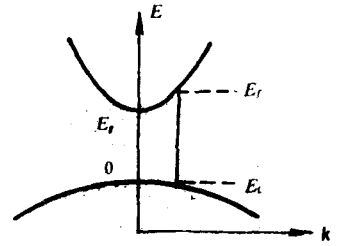


图1-7 直接跃迁

$$A_{fi} = \frac{2\pi}{\hbar} |F_{fi}|^2 \delta[E_f(\mathbf{k}_f) - |E_i(\mathbf{k}_i)| - h\nu] \quad (1.2-2)$$

式中 $F_{fi}$ 是跃迁矩阵元。式中的 $\delta$ 函数表明，只有满足如下能量守恒条件，即

$$h\nu = |E_f(\mathbf{k}_f)| - |E_i(\mathbf{k}_i)| \quad (1.2-3)$$

这时才可能发生直接跃迁。此外，这个跃迁还应满足动量守恒条件，即

$$\hbar\mathbf{k}_f - \hbar\mathbf{k}_i = \text{光子动量} \quad (1.2-4)$$

式中， $\mathbf{k}_f$ 、 $\mathbf{k}_i$ 分别是电子吸收光子后、前的波矢。由于光子动量与能带中的电子动量相比小得多，所以上式近似地写成

$$\mathbf{k}_f = \mathbf{k}_i = \mathbf{k} \quad (1.2-5)$$

这说明直接跃迁过程中，电子波数保持不变。

对于抛物线型的简单能带结构有

$$E_f - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e}, \quad E_i = -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_h}$$

因而

$$h\nu - E_g = \frac{\hbar^2 \hbar^2}{2} \left( \frac{1}{m_e} - \frac{1}{m_h} \right) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_r} \quad (1.2-6)$$

式中 $1/m_r = 1/m_e + 1/m_h$ ， $m_e$ 、 $m_h$ 是电子和空穴的质量， $m_r$ 是折合质量。在 $\mathbf{k}$ 空间中，在 $\mathbf{k} \sim \mathbf{k} + d\mathbf{k}$ 之间的状态数目可以按下式计算

$$\rho_{cv}(h\nu) d(h\nu) = \frac{8\pi k^2}{(2\pi)^3} dk = \frac{(2m_r)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} (h\nu - E_g)^{1/2} d(h\nu) \quad (1.2-7)$$

光的吸收系数 $\alpha$ 与 $A_{fi}$ 和 $\rho_{cv}(h\nu)$ 成比例，即

$$\alpha_1(h\nu) = K A_{fi} \rho_{cv}(h\nu) = A_1 (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (1.2-8)$$

式中 $K$ 、 $A_1$ 是常数，理论计算得到 $A_1$ 的表达式是

$$A_1 \approx \frac{e^2 (2m_r)^{3/2}}{nch^2 m_e} \quad (1.2-9)$$

式中 $e$ 是电子电量， $n$ 是折射率。若取 $m_e = m_h = m_0$ 。（ $m_0$ 是自由电子质量），取 $n=4$ ，得到如下近似式

$$\alpha_1(h\nu) \approx 2 \times 10^4 (h\nu - E_g)^{1/2} \text{cm}^{-1} \quad (1.2-10)$$