



半导体光电器件及其应用

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书是为适应光电技术的发展而编写的。全书共分四章，第一章简要介绍光和半导体的基础知识；第二章和第三章分别较详细地介绍各种电致发光器件和光敏器件的结构、工作原理、特性、参数以及使用方法；第四章在介绍光电耦合器的结构、特性和参数的同时，详细地介绍了发光器件和光敏器件的综合利用。书中介绍了大量的具有实用价值的单元电路，列出了必要的经验数据，可供进行电路设计参考。

本书可供从事半导体光电器件的研制、生产人员，从事自动化技术、光纤通信工作的工程技术人员和大专院校有关专业的师生参考，亦可供具有实践经验和初中以上文化水平的电气技术工人学习使用。

半导体光电器件及其应用

潘天明 编著

冶金工业出版社出版

（北京北河沿大街嵩祝院北巷38号）

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 12 字数 315

1985年9月第一版 1985年9月第一次印刷

印数00,001~6,500册

统一书号：15062·4217 定价2.50元

前 言

随着自动控制技术,特别是计算机技术和光纤通信技术的迅速发展,迫切要求提供体积小、耗电少、寿命长和抗干扰能力强的各种耦合、显示及传感元器件。利用半导体的光、电、磁特性制成的半导体光电器件,正是为满足这些要求而发展起来的,其种类繁多,用途广泛。

尽管半导体光电器件只是在最近二十年才迅速发展起来,但却已经在邮电通信、仪器仪表、计算机系统、遥控遥测系统,防火、防盗报警系统、自动控制机床、纺织机械、冶金、化工设备、交通运输以及民用电器等各方面占有一定位置。今后,随着科研、生产自动化程度的不断提高,计算机系统的进一步普及,半导体光电器件的应用,在工农业生产、国防、科研和民用工业等众多领域中,将具有越来越广阔的前景。

编写本书的目的,就是试图比较通俗、系统地介绍半导体光电器件及其使用方法,以推广应用半导体光电器件,促进我国自动化水平的提高。

在本书中,第一章介绍光和半导体的基本知识;第二章,重点介绍开发较晚而应用将最普遍的发光二极管,不仅详细地介绍它的结构、工作原理、特性、参数和使用方法,而且还用一定篇幅介绍它的典型制作工艺,以使读者对器件有较全面的了解;第三章,则重点介绍光电二极管,并且以它为基础,采用对比的方法,介绍其他几种光电器件;第四章,以光电耦合器件为中心,介绍光电器件的综合利用。

编写本书时,作者力图理论联系实际,使读者从熟悉器件的结构,工作原理、特性和参数入手,掌握器件的使用方法;尽量结合单元电路来介绍器件的基本使用知识,同时给出必要的经验数据,为使用者提供方便。

编写本书的过程中,曾得到陈一鸣同志的大力协助,在此表示衷心感谢。由于作者的专业知识和实践经验都不足,书中定有不受甚至错误之处,诚恳希望读者批评指正

潘天明

1983年5月

目 录

第一章 光和半导体的基础知识	1
第一节 光	1
一、光的性质	1
二、光的产生	4
三、光的度量及其单位	5
第二节 半导体基础	13
一、半导体的性质	13
二、能级和能带	15
三、费密能级	18
四、实用半导体的能带	19
五、P-N结的能带	21
六、半导体材料	22
第二章 电致发光器件	24
第一节 电致发光屏	24
一、粉末交流电致发光 (ACEL) 屏	24
二、粉末直流电致发光 (DCEL) 屏	30
三、薄膜电致发光屏	35
四、电致发光屏的应用	38
第二节 发光二极管 (LED)	44
一、概况	44
二、外形和结构	45
三、LED的发光原理	50
四、LED的制造工艺	64
五、LED的特性和参数	74
六、LED的应用	86
七、数字和字符显示装置的应用	99
第三节 激光二极管 (LD)	119
一、概述	119
二、工作原理	120

三、结构	124
四、特性	130
五、使用注意事项	138
六、应用	140
第三章 光敏器件	150
第一节 光敏电阻	150
一、原理	150
二、结构和特性	153
三、种类及派生器件	159
四、应用	166
第二节 光电二极管	171
一、结构和工作原理	172
二、主要参数和特性	182
三、应用	191
四、光电变换电路的参数计算	195
五、派生器件	203
第三节 光电三极管	209
一、原理和结构	210
二、主要参数和特性	211
三、类型和使用注意事项	213
四、应用电路	223
第四节 光电池	230
一、硅光电池的结构和工作原理	230
二、主要特性和参数	231
三、太阳能电源装置	237
四、缓变光信号的变换	243
五、脉动光信号的变换	253
六、光电池的实际应用	259
第五节 光控可控硅元件	264
一、概述	264
二、结构和工作原理	266
三、特性和参数	270

四、光触发方式	273
五、光控可控硅元件的应用	274
第四章 半导体光电器件的应用	279
第一节 光电耦合器	280
一、光隔离器	280
二、光传感器	283
三、光电耦合器的特性和主要参数	288
四、光电耦合器的使用注意事项	295
第二节 光电耦合器在电子电路中的应用	296
一、光电耦合器在放大器中的应用	296
二、光电耦合器在交直流稳压电源中的应用	301
三、光电耦合器在可控硅过零触发电路中的应用	304
四、光电耦合器在电子计算机中的应用	308
五、光电耦合器在脉冲数字电路中的应用	312
六、光电耦合器在其他电子电路中的应用	312
七、蓄电池自动充电电路	320
第三节 光电耦合器在检测装置中的应用	322
一、概述	322
二、物体位移检测器	326
三、无触点两位式温度控制器	329
四、移动物体的计数和控制装置	332
五、报警装置	333
六、模拟量的计算	333
七、高压电路中的光电互感器	336
第四节 半导体光电器件在光纤通信系统中的应用	345
一、光纤通信系统的组成	345
二、光纤通信用半导体激光器	348
三、光纤通信用发光二极管	352
四、光纤通信用光敏器件	353
五、光纤通信系统的应用实例	355
附表 1 发光二极管的参数	362
附表 2 半导体数码管的参数	364

附表 3	光电二极管的参数	365
附表 4	硅光电池的参数	367
附表 5	光电三极管的参数	368
附表 6	发光二极管-光电二极管型光电耦合器的参数...	370
附表 7	发光二极管-光电三极管型光电耦合器的参数...	371
参考文献		372

第一章 光和半导体的基础知识

第一节 光

光电子学是研究有关光子-电子相互转换的原理、器件（统称光电器件）及其应用的一门学科。光电器件主要有两类，即：

（1）光辐射器件（发光器件）。这是能把电能转换成光能的器件，其中包括发可见光或不可见光的辉光灯、荧光灯、钨丝灯、电弧灯、真空阴极射线管、电致发光屏、发光二极管、激光器等。

（2）光检测器件（光敏器件）。这是能把光能转换成电能的器件，其中包括依据光电导效应工作的光敏电阻；依据光生伏特效应工作的光电二极管、光电晶体管和光电池；依据光电子发射效应工作的光电管、光电倍增管、摄像管以及依据光电磁效应工作的光电磁检测器。

此外，液晶也是一种光电器件，在电场作用下，它对光线的反射率可以改变，从而使液晶呈现不同的颜色和透明度。

为了发挥光电器件的作用，光电子学除了研究光电器件本身外，还需研究必需的辅助元件，如光纤、透镜、光栅、光调制器、滤光器等等。

本书只介绍光电子学中的部分内容，即有关半导体的光电器件及其应用方面的知识。下面，先介绍一下有关光的一些基本知识。

一、光的性质

人类之所以会成为万物之灵的重要原因之一，就是学会了使用火，伴随着火进入人类生活的是光。太阳就是通过光的形式把能量送到地球的。光是人们不可缺少和最熟悉的，但要真正认清光的本质却不是一件容易的事情。人们经过长期的观察与研究，

才发现光具有两重性，即：波动性和粒子性。

(一) 波动性

1864年麦克斯韦确立了光是一种电磁波的理论。以后，人们利用这个理论可以很好地解释光的传播、干涉、反射和偏振等现象。

根据光是电磁波的理论可知，光和其他形式的电磁波一样，也具有传播速度、波长、频率、发射和吸收等特性。光在真空中的传播速度是 $C=2.99792\ 458 \times 10^8$ 米/秒，在大气中也近似如此。在实际计算中， C 可近似取为整数，即取 $C=3 \times 10^8$ 米/秒。

电磁波的三个基本参数，即速度、波长和频率的关系如下：

$$C = \lambda f \quad (1-1)$$

式中 λ ——电磁波的波长，米；

f ——电磁波的频率，赫；

C ——电磁波的传播速度，米/秒。

整个电磁波的频谱如图 1-1 所示。由此图可知，光是波长在10纳米～1毫米之间的电磁波，其中，真正能够为人眼觉察和辨识的只有380～760纳米的一段。这是国际上公认的可见光的界限，一般解释“光”时，就是指这一区域的光而言的。此外，还有红外线和紫外线所占据的区域，人眼已不能直接觉察到它的存在，因此，通常把红外线和紫外线称为不可见光。可见光和不可见光，统称为辐射光，而电磁波传播能量则统称为辐射。

在可见光中，不同波长的光给人的感受也不同，单一波长的光给人以“颜色”的感受。据此，又可将可见光分成各种单色光（见图1-1）。象太阳光这样的白光，就是由各种单色光组成的复合光。

(二) 粒子性

研究光与物质微粒的相互作用时，光的粒子性就显得特别重要。特别是研究半导体的发光机理时，既要考虑光的波动性，又要考虑光的粒子性。

从粒子性的观点看，电磁波都具有粒子流的性质，光就是由

具有零静止质量，并以光速移动的基本粒子所组成的，通常把这些基本粒子称为光子。

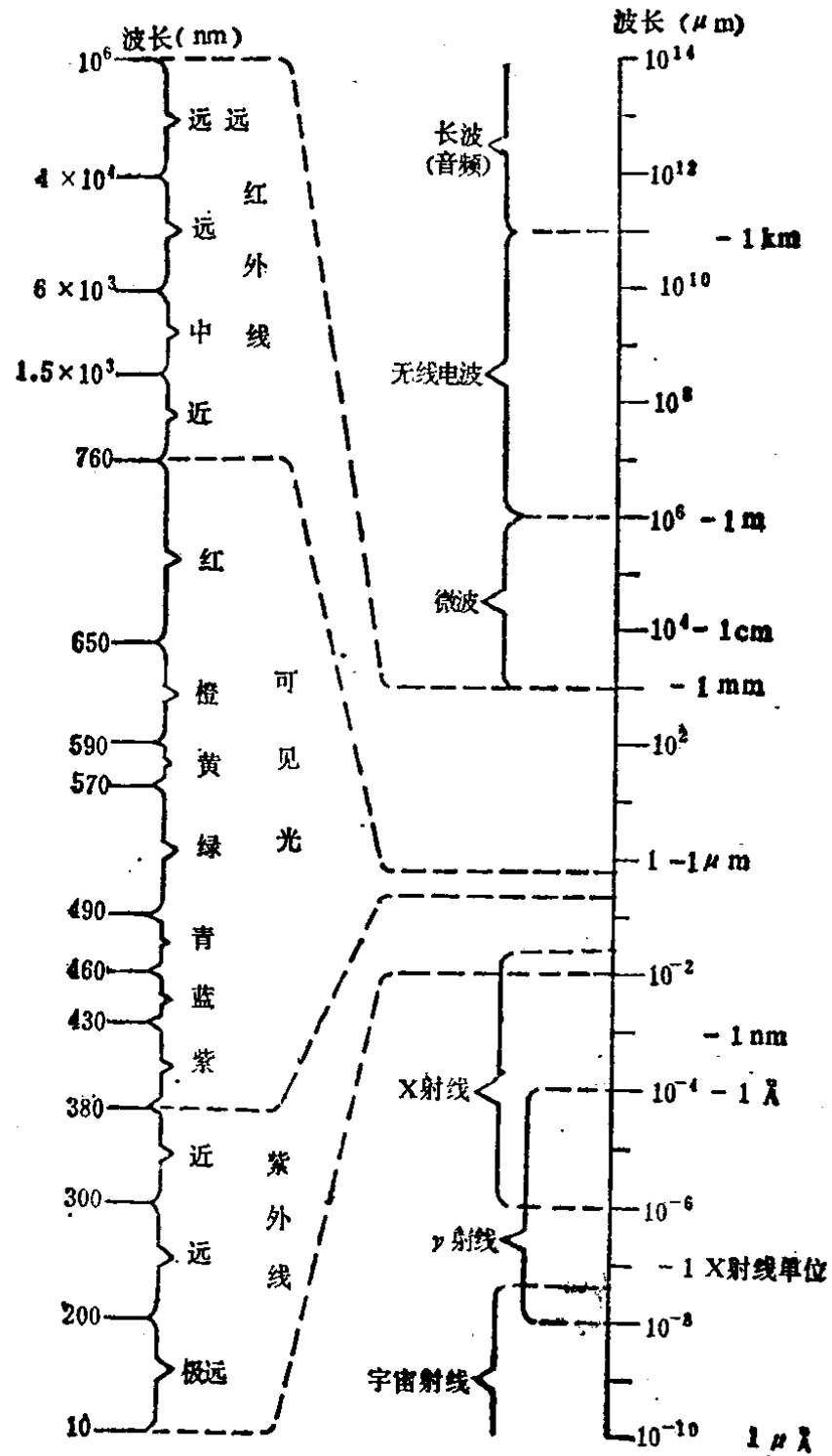


图 1-1 电磁波频谱^{[1][2]}

每个光子都具有固定的能量，其量值取决于光子的频率。单个光子的能量与频率之间的关系为

$$E = hf \tag{1-2}$$

式中 E ——单个光子的能量，电子伏；

h ——普朗克常数，其值等于 6.626176×10^{-34} 焦·秒或 4.13570×10^{-15} 电子伏·秒；

f ——光的频率，赫。

显然，由于频率，亦即波长不同，各种颜色光的光子能量是不同的。例如，可见光的光子能量为 $1.63 \sim 3.26$ 电子伏，其中，红光的光子能量最小，紫光的光子能量最大。功率为 1 瓦（即 6×10^{18} 电子伏·秒）的波长不同的可见光，大约相当于每秒发射 $(1.84 \sim 3.68) \times 10^{18}$ 个光子。

必须指出，光子所具有的能量就是光波中不可再分的最小能量，金属或半导体从光中吸收能量时，只能一个光子一个光子地吸收，不能吸收半个或几分之一个光子的能量。同样，物质发光时，也只能是一个光子一个光子地发出。光线就是光子流，强光表明单位时间内从光源射出的光子数多，弱光则表明射出的光子数少。这就是光的粒子性。

实践证明，眼睛对波长为 507 纳米的光最敏感，大约能感知到 100 个光子，其中能够为视觉所感知的实际光子数可能只有十个左右，其能量约等于 4×10^{-8} 焦〔7〕。

从已知的整个电磁波频谱来看，电磁波的波长越长，其所显示的波动性所占的地位比粒子性越突出。在无线电波或波长更长的区域，电磁波的波动性就占绝对优势，分析这些电磁波的产生、特性和传播等一系列问题时，均应以波动性为基础。反之，波长越短，显示出的粒子性所占的地位就越突出。因此，在 γ 射线或波长更短的区域，电磁波的粒子性就变为占优势。光是处于这两个波长区域之间的，因此，两重性就显得突出，研究光时，必须同时考虑波动性与粒子性这两方面。

二、光的产生

光辐射有平衡辐射和非平衡辐射两大类。平衡辐射是炽热物体的光辐射，所以又称为热辐射。它起因于物体的温度，只要物体的温度高于绝对零度，这个物体就处在该温度下的热平衡状态（严格地说，应是准平衡态），发出相应于这一温度的热辐射。

物体的温度低时，只辐射红外光；随着物体温度的升高，发出的光波之波长逐渐向可见光区扩展。热辐射光谱只决定于辐射体的温度及发射能力，是连续光谱。一般白炽灯的光辐射就属于平衡辐射。

发光是一种非平衡辐射。非平衡辐射是在某种外界作用的激发下，物体偏离原来的热平衡态而产生的光辐射。

激发是一个能量转移过程，一个系统在被激发时便从激发源得到能量，由低能态 E_1 跃迁到高能态 E_2 ；在系统由高能态回到低能态的过程中，由于能量必须守恒，故多余的能量便可能以光的形式释放出来，这就是激发发光。激发发光的波长，取决于系统在高、低能态时的能量差，即 $\Delta E = E_2 - E_1$ ， ΔE 正是发射出的光子所具有的能量，根据式1-2可得

$$\Delta E = hf = h \cdot C / \lambda$$

按激发方式不同，常见的物体发光类型有表1-1所示的几种。其中，电致发光将在下一章详述，届时也会涉及到光致发光的内容；至于其他几种发光，则限于篇幅，叙述从略。

表 1-1 物体的发光类型

发 光 类 型	激 发 方 式
摩擦发光	机械力
化学发光	化学反应
生物发光	生物过程
光致发光	光照射
电致发光	气体放电或固体受电作用
阴极射线发光	电子束轰击
放射线发光	核辐射线的照射
X射线发光	X射线的照射

三、光的度量及其单位〔2〕〔3〕〔5〕

为了定量地测量光的特性，必须统一规定一些测量项目、技术名词与度量单位。

众所周知，辐射是采用辐射度学的量来描述的。辐射度学的

量是只与客体有关的物理量。虽然光也是以辐射形式出现的,但是它不仅与客体有关,而且还与人的视觉有关,故一般可以用光度学的量来描述。光度学的量是一种生理物理量,属于心理物理学的范畴。

辐射度学的各量,在光波区域,与光度学的各量之间存在一一对应关系,两者之间相差一个与视觉有关的比例系数,即能见度 K_λ ,参见表1-2。

表 1-2 辐射度学量与光度学量的对应关系

辐 射 度 学 量			
量	符号, 式		单 位
辐射能量	W		J
辐射通量 (功率)	$P = \frac{dw}{dt}$		瓦 (= 焦耳/秒)
辐射强度	$J = \frac{dp}{d\omega}$		瓦/球面度
辐射照度	$H = \frac{dp}{dA}$		瓦/米 ²
辐射出射度	$M = \frac{dp}{dA}$		瓦/米 ²
辐射亮度 (辐射率)	$R = \frac{dJ}{dA'}$		瓦/米 ² ·球面度

光 度 学 量			
量	符号, 式	与辐射量的关系	单 位
光量	Q	$Q_{\lambda} = K_{\lambda} W_{\lambda}$	流明·秒①
光通量	$F = \frac{dQ}{dt}$	$F_{\lambda} = K_{\lambda} P_{\lambda} = K_{\lambda \max} \phi_{\lambda} P_{\lambda}$	流 明
发光强度 (光强)	$I = \frac{dF}{d\omega}$	$I_{\lambda} = K_{\lambda} J_{\lambda}$	坎德拉 (= 流明/球面度)
照度	$E = \frac{dF}{dA}$	$E_{\lambda} = K_{\lambda} H_{\lambda}$	勒克斯 (= 流明/米 ²)
光出射度 (发光度)	$L = \frac{dF}{dA}$	$L_{\lambda} = K_{\lambda} M_{\lambda}$	流明/米 ²
亮度 (发光率)	$B = \frac{dI}{dA'} = \frac{dF}{A \cos \theta d\omega}$	$B_{\lambda} = K_{\lambda} R_{\lambda}$	尼特 (= 坎德拉/米 ²)

① 光量过去曾用塔耳波特(talbot)作单位, 1塔耳波特 = 1流明·秒。

所谓能见度，就是指在 λ 这个波长下辐射出 1 瓦的功率（辐射通量），被标准观测者全部接受后他所承认的光功率（光通量）的大小，即 K_λ 等于光通量与辐射通量之比（单位是流明/瓦）。 K_λ 的另一意义是在波长 λ 下每瓦功率全部转换成光功率的理想转换效率。实际上，辐射总是包含各种波长的，各种波长的 K_λ 值都不一样。在波长 $\lambda = 555$ 纳米时，能见度最大，即 $K_{555} = K_{\lambda \max} = 680$ 流明/瓦。为了计算方便，采用归一化的办法，即用 $K_{\lambda \max}$ 来除其他波长的 K_λ ，得出波长为 λ 时的相对能见度 ϕ_λ ，即：

$$\phi_\lambda = \frac{K_\lambda}{K_{\lambda \max}}$$

显然， $\phi_\lambda \leq 1$ 。

这里引入 K_λ 和 ϕ_λ 的原因是，光辐射能量的大小，并不能直接表示人的眼睛所感受的光的强度，因为眼睛的能见度不仅与光辐射能量有关，而且还随光的波长改变而变化。如果功率不变而波长变动的光照到标准的人眼上，则光在人眼中产生的效应是不同的，亦即人眼对各种波长的光的相对能见度是不同的（见图1-2）。在标准光强下，眼睛的正中凹部是主要负责产生视觉的机构，这时的眼睛视觉称为日间视觉（明视觉）。在波长为555纳米左右时，人眼日间视觉的能见度最大。日间视觉可以辨别颜色，而且能分辨出细节。但是，在很弱的光强下，眼睛周边部分的视杆细胞则是最重要的视觉接收器，此时的眼睛具有所谓“微光视觉”（暗视觉）。在波长为507纳米左右时，人眼微光视觉的能见度最大，但分辨颜色和细节的能力大大下降。

眼睛对各种波长光的能见度，因人而稍异，并且与视觉有关。1931年国际照明委员会（C.I.E）公布了一批标准相对能见度（视见函数）值；示出了眼睛在 2° 视角下的日间视觉的能见度随波长变化的情况，这种变化是以在波长为555纳米时的能见度（最大值）作基准的，即把此时的能见度定为1。例如，国际照明委员会公布的相对能见度，在波长为510纳米时为0.503，而在波长为380纳米时则为 7.4×10^{-5} 。这就是说，给定波长为510纳

米的光所能产生的视觉约是波长为 555 纳米的相同光所能产生的视觉的一半；而波长为380纳米的光所能产生的视觉，则只为555 纳米的相同的光所能产生的视觉的7.4/100000。相对能见度的其他值可从表1-3中查得，或由图1-2中日间视觉曲线估算出来。

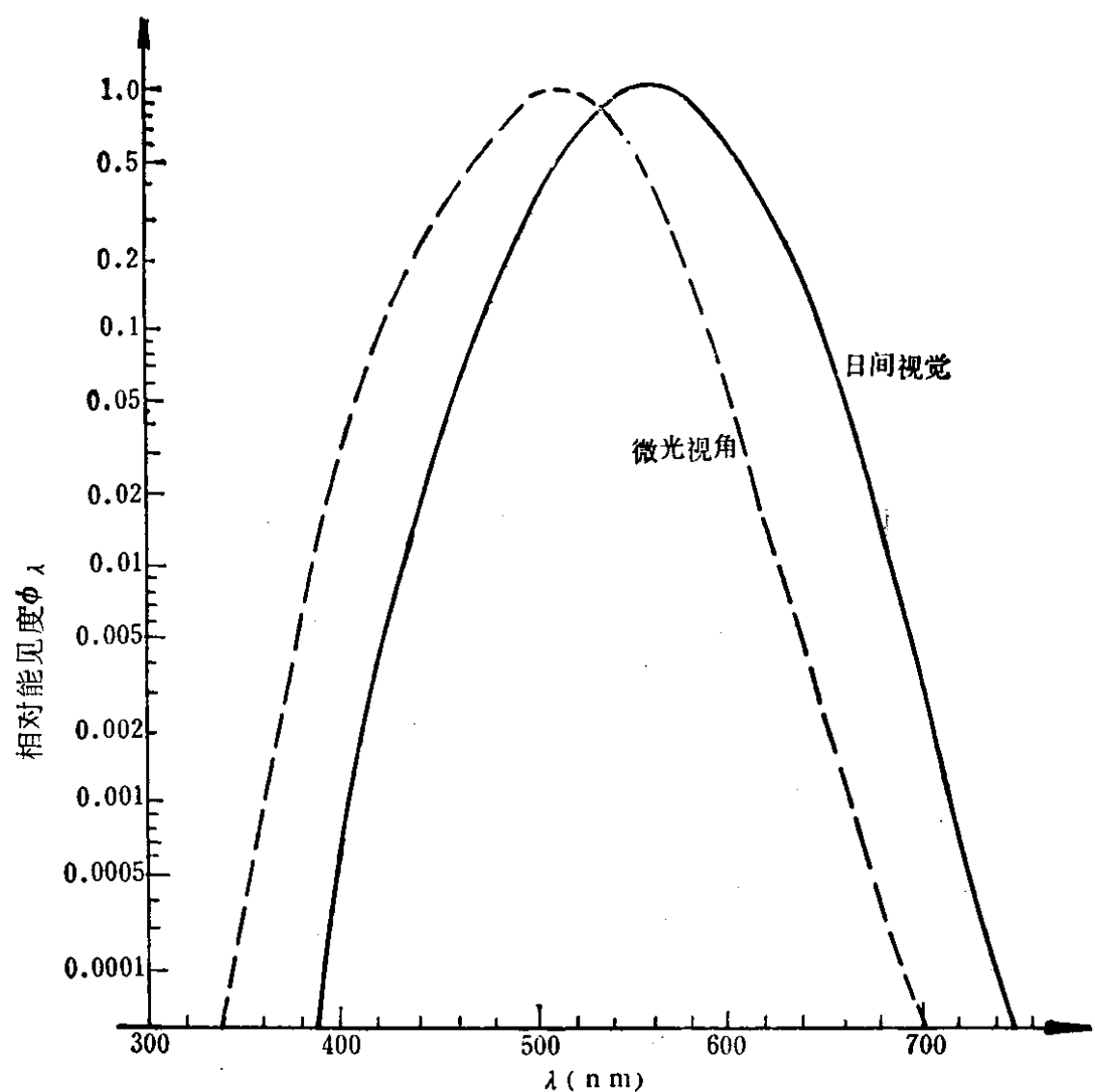


图 1-2 人眼的相对能见度与光的波长关系

下面，介绍光度学中的各量。

(一) 波长

光的波长一般以纳米① 为单位来表示，而不象无线电波那样，以米、厘米、毫米为单位来表示。1 纳米 = 10^{-6} 毫米 = 10^{-7} 厘米 = 10^{-9} 米。

①过去用埃表示，1 埃 = 0.1 纳米 = 10^{-10} 米。

表 1-3 光的波长与能见度的关系^{(2) (4)}

光波长 (纳米)	能见度 (流明/瓦)	相对能见度
380	0.0272	4×10^{-5}
390	0.13	1.9×10^{-5}
400	0.272	4×10^{-4}
410	0.816	1.2×10^{-3}
420	2.72	4×10^{-3}
430	7.89	1.16×10^{-2}
440	15.64	2.3×10^{-2}
450	25.84	3.8×10^{-2}
460	40.8	6×10^{-2}
470	61.88	9.13×10^{-2}
480	94.52	13.9×10^{-2}
490	141.44	20.9×10^{-2}
500	219.64	32.3×10^{-2}
510	342.04	0.503
520	482.8	0.710
530	586.16	0.862
540	648.72	0.954
550	676.6	0.995
555	680	1.0
560	676.6	0.995
570	647.36	0.952
580	591.6	0.870
590	514.76	0.757
600	429.08	0.631
610	342.04	0.503
620	259.08	0.381
630	180.2	0.265
640	119	0.175
650	72.76	0.107
660	41.48	6.08×10^{-2}
670	21.76	3.21×10^{-2}
680	11.56	1.71×10^{-2}
690	5.576	8.22×10^{-3}
700	2.788	4.09×10^{-3}
710	1.428	2.10×10^{-3}
720	0.714	1.05×10^{-3}
730	0.3536	5.22×10^{-4}
740	0.170	2.5×10^{-4}
750	0.0816	1.2×10^{-4}
760	0.0408	6×10^{-5}