

微光电视



内 容 简 介

本书主要介绍微光电视的原理、设计和应用。内容包括：辐射度与光度学、微光及其测量、人眼视觉与微光特性、光学系统、光电导摄像管、光电象增强器及其与视象管的耦合、微光摄像器件、微光摄像机、微光电视系统分析、微光电视的应用。本书是在多年来的理论和实践的基础上编著的。本书初稿由张兆扬同志做过删改和校订。

本书可供从事微光电视的研究、设计和应用的技术人员阅读，亦可供高等院校师生教学参考。

微 光 电 视

蒋先进、李润森、缪文定 编著
郑玉才、蔡夏保、马忠义

责任编辑 李 端

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 14¹/₄ 插页 2 375千字

1984年12月第一版 1984年12月第一次印刷 印数：0,001—5,600册

统一书号：15034·2710 定价：3.00元

目 录

绪论	1
0.1 引言	1
0.2 微光电视的定义	2
0.3 微光电视的基本特性	3
0.4 微光电视发展简史	6
第一章 辐射度学与光度学	8
1.1 电磁辐射与电磁波谱	8
1.2 辐射度量与单位	11
1.3 光度量与单位	14
1.4 朗伯定律	20
1.5 黑体辐射	23
1.6 色温与标准光源	29
1.7 光见度与发光效率	31
1.8 辐射度量与光度量的转换	35
第二章 微光及其测量	37
2.1 微光	37
2.2 夜天微光	39
2.3 海洋中的微光条件	51
2.4 夜间反射率	54
2.5 大气透射率	61
2.6 微光的测量	65
第三章 人眼视觉及其微光特性	73
3.1 人眼的构造与感光机理	73
3.2 人眼的屈光与调节	77
3.3 人眼视觉的基本特性	78
3.4 微光视觉与探测方程	89
3.5 人眼在微光下的调节与夜视能力的改善途径	96

第四章 光学系统	99
4.1 电视摄像物镜的基本性能	99
4.2 微光摄像物镜的特点	113
4.3 在应用中的一些特殊考虑	118
第五章 光电导摄像管	133
5.1 摄像器件概述	133
5.2 光电导摄像管的结构与特性	143
5.3 视象管的种类和性能比较	156
第六章 光电象增强器及其与视象管的耦合	176
6.1 象增强器的原理和特性	176
6.2 光电阴极	179
6.3 电子光学系统	183
6.4 荧光屏	188
6.5 光学纤维面板	190
6.6 单级增强器的性能和增强器的级联	191
6.7 微道板象增强管 (MCP)	194
6.8 透射式二次电子倍增象增强管	203
6.9 象增强器与视象管的耦合	206
第七章 微光摄像器件	210
7.1 超正析象管和分流直象管	210
7.2 二次电子传导摄像管 (SEC)	219
7.3 电子轰击导生电导摄像管 (EBIC)	224
7.4 固体摄像器件	240
7.5 微光摄像器件的性能比较和选用场合	255
7.6 微光摄像器件的发展前景	258
第八章 微光电视摄像机	265
8.1 光导型微光摄像机的组成和特点	265
8.2 视频预放器(或称前置放大器)	277
8.3 视频信号处理放大器	292
8.4 扫描和供电电路	319
8.5 同步机	337
8.6 硅靶管工作状态的选择和光导型微光摄像机的整机介绍	344
8.7 象增强器与光导管耦合的微光摄像机	348

8.8 典型的微光摄像机 (SEC、SIT、ISIT)	354
8.9 CCD微光摄像机	374
8.10 各类微光摄像机的性能比较及使用注意事项	380
第九章 微光电视系统分析	384
9.1 夜视系统的分类与基本参量	384
9.2 目标探测要求与距离公式	388
9.3 微光系统照度公式	398
9.4 环境条件的影响	400
9.5 微光电视系统的探测方程	408
9.6 分辨率、信噪比与面板照度的关系	411
9.7 视距估算与列线图	415
第十章 微光电视的应用	422
10.1 军用微光电视的特点和要求	422
10.2 战场侦察和指挥	425
10.3 航空电视	427
10.4 电视制导和跟踪	429
10.5 海军用微光电视系统	432
10.6 在空间技术上的应用	436
10.7 在公安上的应用	437
10.8 在其它方面的应用	438

绪 论

0.1 引 言

人的视觉在认识世界的过程中起着巨大的作用。有人曾做过统计，人们一天所接受的信息中，靠听觉得到的信息量占 20%，而靠视觉得到的信息量却占 60%，其余是通过嗅觉、味觉和触觉得到的。我国有句古语，叫做“百闻不如一见”，也正是强调了视觉在认识事物过程中的重要作用。

我们的祖先很早就提出了“千里眼”和“顺风耳”的幻想，他们的理想今天已经付诸实现。现代的无线电话言通讯和包括电视在内的图象通讯就是真正的“顺风耳”和“千里眼”。

近代电视技术的发展也已有半个世纪了。在这半个世纪中，提高图象的清晰度和摄像机的灵敏度一直是发展电视技术的两个重要课题。近十年来，由于光电子学和半导体工艺的飞速发展，以及发展空间技术的需要，在七十年代初，使这两方面都取得了重要突破：1970 年美国在地球资源卫星中使用了分辨率高达 $4500 \sim 10000$ TVL（电视线）的回束电视摄像管（RBV）；同一时期美国的阿波罗登月飞船里，应用了灵敏度高达 10^{-21}lx （勒克斯）的 SEC 管微光彩色摄像机。

长期以来，人类一直希望能克服夜幕的遮盖，在黑暗中观察事物，因为许多自然现象是在仅有微光的夜间发生的。人类的某些重要活动，例如，军事行动是在夜幕的掩护下进行的。但是，实验指出，普通人眼夜间的分辨能力仅为白天分辨能力的七十分之一。表 0-1 示出了对同一高对比度的细小物体人眼的分辨角（弧度）。因此，多年来，人们一直在积极寻求在微弱光照条件下，获取可靠信息的能力，也就是利用光电敏感系统。例如，微

表 0-1

亮度 (asb) ①	0.0001	0.0005	0.001	0.005	0.01	0.05	0.1
弧 度 分 r'	50	30	17	11	9	4	3
亮度 (asb)	0.5	1	5	10	100	500	1000
弧 度 分 r'	2	1.5	1.2	0.9	0.8	0.7	0.7

① asb即亚熙提。

光电视系统，能恢复人的视觉在夜间的分辨能力。但在七十年代以前进展缓慢。六十年代末、七十年代初，由于新型的微光器件 SEC(二次电子导电)摄象管，特别是 SIT(硅增强靶)摄象管的出现，使得电视技术终于在微光领域里得到了突破。它将在现代战争中起革新作用，因为微光电视系统不仅提高了战斗部队在夜间或曙、暮光下的可见度，还能大大提高战术武器或导弹的投掷精度。此外，由于它保密性强（因为它是一种被动夜视器件）以及图象信号便于传输和记录等优点，所以在陆、海、空各兵种中已广泛应用。除去军事用途以外，它还普遍地应用在公安保卫、天文、气象、医学以及其它科研和生产领域里。目前，微光电视已经成为应用电视和光电子学技术领域里一个极为重要的分支。可以预见，这个新技术必将对我国的四个现代化起积极的推动作用，并将得到迅速的发展。

0.2 微光电视的定义

1. 关于微光电视质的定义

微光电视，又常叫做低照度电视 (Low Light Level TV, 简称 LLLTV)，它的质的定义是：凡是在低于白天的照度下能产生高质量图象的电视系统，统称为微光电视系统。在这样的定义下，摄象机能在黎明曙光或黄昏的照度下 ($10^{-1}lx$) 工作的，能在 $1/4$ 月光下 ($1 \times 10^{-2}lx$) 工作的，以及能在星光照度以下 ($1 \times 10^{-4}lx$) 工作的都叫做微光电视摄象机，其组成的电视系统叫做微光电视系统。在地球表面上，自然光照度等级范围如图

0-1 所示。

2. 关于微光电视量的定义

微光电视量的定义是由投射到摄象管面板上的照度决定的。这个照度是以能够保证在监视器上得到优质的图象为前提的。摄象管面板照度的计算方法由下式计算：

$$E_A = \frac{E_o \rho \tau}{4F^2(1+m)^2} \quad (0-1)$$

式中， E_A ——摄象管面板上的照度，单位为lx或fc；

E_o ——景物照度，同样，单位为lx或fc；

ρ ——景物反射率；

τ ——透镜透光率；

F ——镜头光圈数；

m ——摄象管面板上象对景物的放大率。

例如，日出和日落时的环境照度约为10fc时，这时如果我们取物体的反射率为0.2（如草地或黄色土壤），镜头光圈为 $F=2$ ，其透镜透光率 $\tau=0.9$ 时，根据上式不难算出，此时摄象管的面板照度大约为0.0929fc（1lx）。

大多数白天用的摄象机要求最小的摄象管面板照度为0.1fc左右。所以，任何一种电视摄象机，只要它要求的摄象管面板照度低于0.1fc时，都叫做微光电视摄象机。

0.3 微光电视的基本特性

在单凭肉眼无法看清的环境照度下，微光电视有增强从目标反射来的光线的的能力，从而可以看清并确认目标。即它扩大了在低照度下的可见范围，并大大提高了使用者观察夜间目标的清晰度。但必须指出，在任何给定的距离上，通过器件观察到的景物，并不能达到在白天所观察到的同一图象的清晰度。这主要是由于低照度导致了景物对比度和清晰度的损失，并使光电系统的分辨率和对比度也下降了。此外，彩色也损失了。但是，低照度

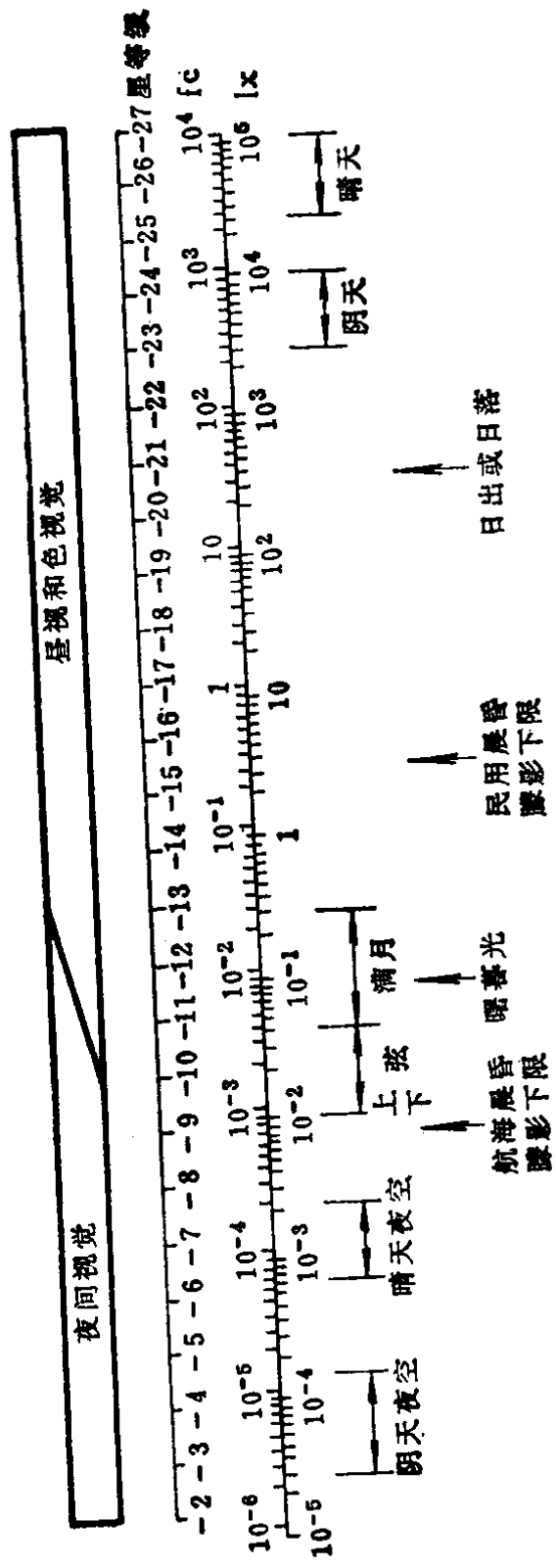


图0-1 自然光照度等级范围

fc—英尺烛光，照度单位。

所造成的这种图象质量的变坏并未严重到妨碍使用的程度。同时微光电视分辨目标的本领还受到气候条件的限制,在通过烟、雾、雪或雨时,它并不比肉眼或光学仪器更好些。然而,在不受大气条件限制的情况下,它确实大大提高了夜间的分辨能力,图 0-2 是肉眼、光学仪器、微光器件对目标分辨能力的比较。

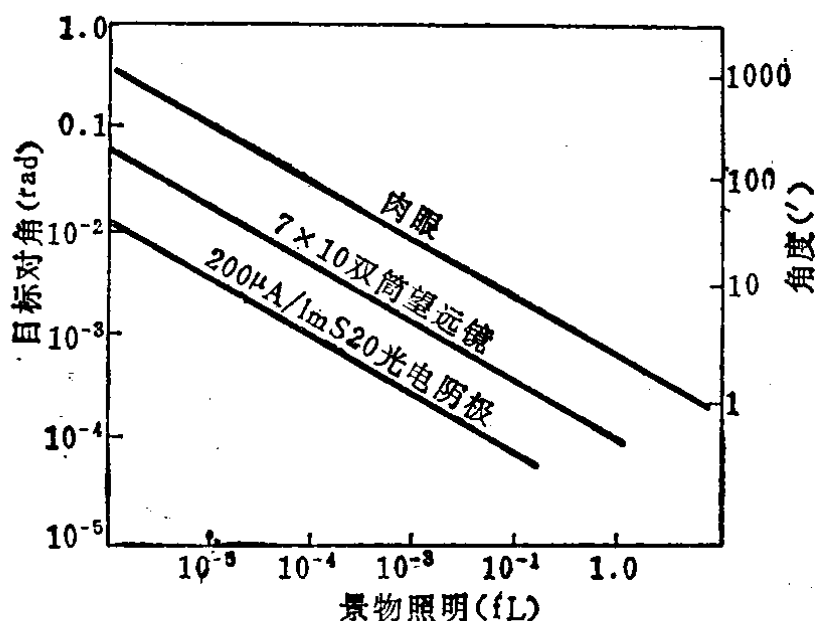


图0-2 肉眼与微光成象系统夜间分辨能力的比较
fL—英尺朗伯, 亮度单位。

微光电视系统显著地优于肉眼或用普通光学器件(如双筒望远镜)观察的主要原因如下:

(1) 电视摄像机的物镜可拥有远大于人眼瞳孔的集光孔径面积。透镜所收集到的光子数可达人眼的 1000·倍以上。

(2) 可以将光敏感面——高灵敏度的光电阴极面的面积做得比与其相对应的人眼视网膜的面积大得多。

(3) 做为第一检测器的光电阴极的量子效率可以大大超过视网膜。

(4) 在观察监视器荧光屏上的明亮图象时,观察者的眼睛能保持对光亮的良好适应性(即白天视觉),因而使人眼一直能保持较高的分辨力。同时,在适应黑暗环境时(夜间视觉)不需要有一个等待的适应时间。

(5) 在远距离观察的情况下, 微光电视比肉眼或其它光学器件具有更大的灵活性和适应性。

由于上述原因, 使得微光电视系统在低照度条件下能远远胜过人的视觉器官, 即人的眼睛。

0.4 微光电视发展简史

微光电视的历史大致上就是微光摄像器件的发展史。1946年发明的超正析摄像管能在 $10^{-2}lx$ 的环境照度下工作, 它就是一种最早的具有微光特性的器件。五十年代初采用了 S20 光电阴极, 使光电灵敏度提高 4 倍。五十年代中期, 因采用了新的薄膜金属氧化物靶, 信号的放大量又提高了 3~5 倍。以后利用象增强器与超正析摄像管的耦合 (简称 I-IO 或 IIO) 使光增益增大一个数量级。尽管由这种器件组成的微光电视系统尚存在信噪比不高、体积大、调整不便、易烧伤等缺点, 在五十年代中期到六十年代初期它却得到了广泛的应用。

六十年代初, 从超正析象管基础上发展起来的分流直象管达到了实用阶段。它的光电灵敏度提高到 $10^{-8} \sim 10^{-4}lx$, 信噪比从超正析象管的 34dB 提高到 46dB, 且动态范围大, 惰性低, 清晰度高。但体积更大, 调整也更麻烦。在此同时, 发展了带象增强器的二次电子传导 (ISEC) 摄像机, 它具有分流直象管摄像机相同数量级的光电灵敏度和惰性, 但体积较小, 操作上比较简单。这样, 在六十年代中期 ISEC 曾得到极广泛的应用。

SEC (二次电子传导摄像管) 管的最大缺点是容易烧伤, 而在七十年代初出现的硅增强靶摄像管 (简称 SIT, 又称 SEM、EBS 等), 不仅比 ISEC (带有象增强器的二次电子传导摄像管) 的增益高 20 倍, 并且在强曝光的情况下也不致于损坏靶, 就是说, 它具有良好的抗烧伤性能。它的分辨率与惰性也不亚于 SEC 管。如果与一个象增强器构成 ISIT (带有象增强器的硅增强靶摄像管) 管, 光电灵敏度又可增加一个数量级, 达到 $7 \times 10^6 \mu A/lm$ 。因此, SIT 和 ISIT 摄像机目前已得到了最广泛的应用。它们的出

现，在微光电视的发展过程中带有突破性质。

还应提及的是，在六十年代利用象增强器与摄像管的耦合，也可组成微光器件，特别是带三级增强器的 I^3V 以及稍后出现的由微道板增强器与视象管组成的 MCPV（微道板视象管），它们的光电灵敏度与ISIT管有相同的数量级。虽然其它性能低一些，但成品率高，价格低，损坏后可局部替换，因此至今仍有应用。1969年由美国贝尔实验室首先提出固体摄像器件，或叫做电荷耦合器件（简称CCD）。1973年由贝尔实验室和仙童公司制成 100×100 的CCD阵列。接着，1974年贝尔实验室又制成 256×288 的CCD阵列，同年，美国RCA公司制出 512×320 的CCD，并做出世界上第一台达到广播水平的固体电视摄像机。1976年美国德克萨斯仪器公司制成 400×400 的CCD，而到了1977年制成了 500×500 的CCD，目前，从1978年4月开始研制 800×800 的CCD阵列。从CCD出现不久，就提出了电子轰击电荷耦合器件的设想，并于1976年制成多种电子轰击电荷耦合器件（EBS-CCD），其灵敏度据外刊报道可达 $10^{-3} \sim 10^{-4}lx$ 。电子轰击型CCD实现了微光摄像器件的固体化、小型化。用纤维光学把高性能的象增强器和CCD耦合在一起即可得到光电灵敏度更高的 I-EBCCD。

从上述这段简要的发展史中，我们可以看出，微光电视技术的发展是极其迅速的。特别是最近的十年，人们在发展微光夜视技术方面又大大向前迈进了一步。

第一章 辐射度学与光度学

1.1 电磁辐射与电磁波谱

1.1.1 电磁辐射

由辐射源发出的能量以电磁波的形式在空间传播的现象称为电磁辐射。图 1-1 列出了波长从 $10^{-10}\mu\text{m}$ 到 10^5km 的全部电磁波谱。

漫长而连续的电磁波谱横跨了 24 个数量级的波长范围，而其中能为人眼直接感受的可见光只占很小一部分，其余绝大部分都是不可见辐射。

1.1.2 波谱区的划分与光学波谱

电磁波谱的各个波段，因波长不同，辐射的产生与探测方式就不同，从而有不同的特点。为便于研究，可以把电磁波谱划分为三个区：

长波区——波长 $\lambda \approx 1\text{mm} \sim 10^5\text{km}$ ，包括微波、无线电波与长波电振荡。

射线区——波长 $\lambda \approx 10^{-2} \sim 10^{-10}\mu\text{m}$ ，包括 X 射线、 γ 射线和宇宙射线。

光学区——波长 $\lambda \approx 10^{-2}\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ ，介于上述两大波谱区之间，包括红外线、可见光与紫外线三个波段，组成广义的光谱。把这三个波段统称为光谱，不仅因为它们的发射过程密切相关，许多辐射源的光谱曲线同时覆盖这三个波段，而且还因为它们有共同的实验技术，为了接收这些辐射并聚焦成像都要使用光学透镜。

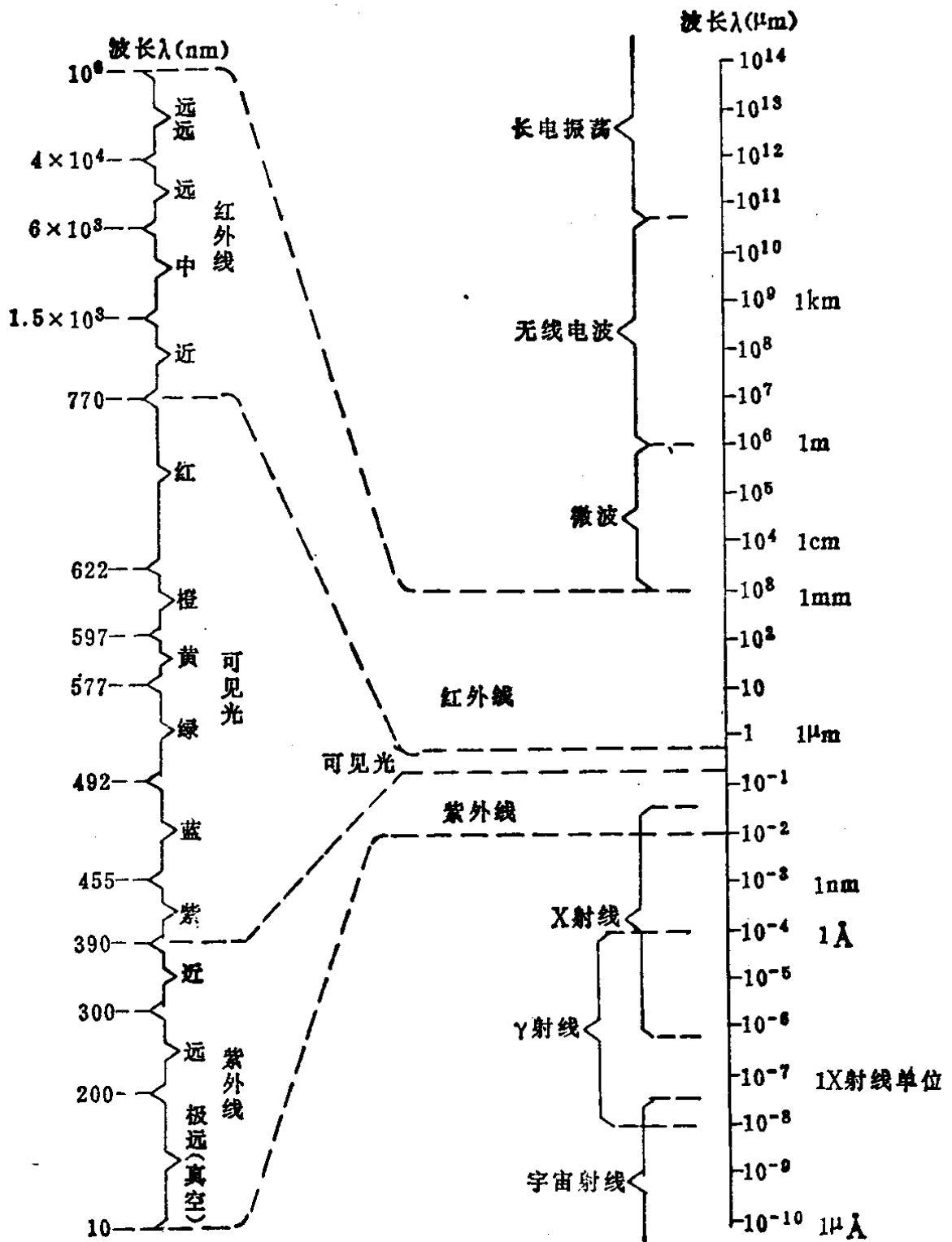


图1-1 电磁波谱

1.1.3 光学波谱区常用单位及其转换

波长 λ —— μm , $\text{\AA}$ (埃), $1\mu\text{m}=10^4\text{\AA}$ 。

频率 ν —— $\nu=c/\lambda$, c —— 真空中光速, $c=2.997925\times 10^8\text{m/s}\approx 3\times 10^8\text{m/s}$ 。

波数 σ —— 1cm 长度内包含的波长数 ($1/\text{cm}$)。

光子能量 ε —— 按照普朗克与爱因斯坦的理论, 光是以光量子形式发射的。光子的能量与频率成正比, 一个光子的能量为:

$$\varepsilon=h\nu=hc/\lambda \tag{1-1}$$

式中, h —— 普朗克常数, $h=6.626196\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$ (焦耳·秒)。

当用电子伏特 (eV) 表示光子能量时, 因为

$$1\text{eV的能量}=1.6021917\times 10^{-19}\text{J}$$

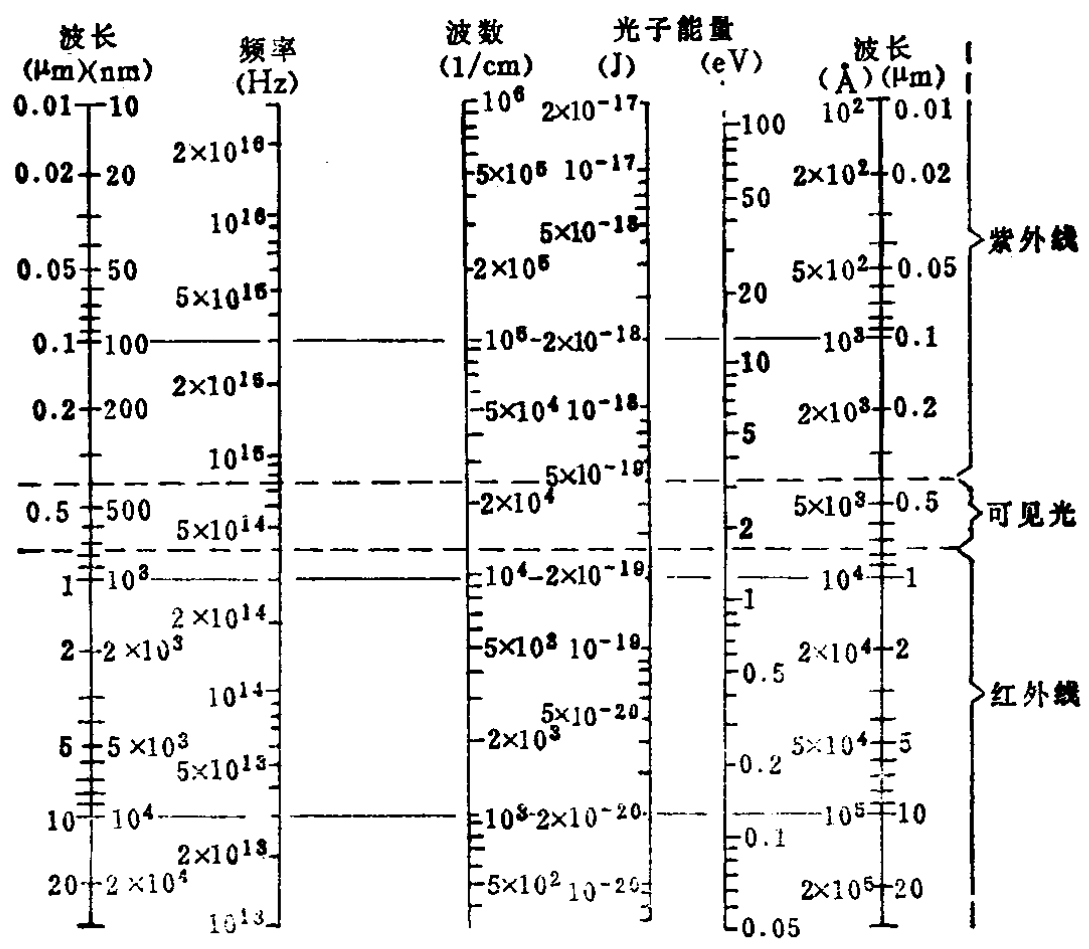


图1-2 光学波谱区常用单位转换图

所以

$$\epsilon = 1.24 / \lambda \text{ (eV)}$$

(1-1)'

此时波长 λ 单位为 μm 。

式 (1-1) 将光的波、粒二象性统一起来，可以直接由波长求出光子的能量。例如可见光的波长 $\lambda \approx 0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ ，其光子能量 $\epsilon \approx 3.2 \sim 1.6 \text{eV}$ 。

图 1-2 列出了光学波谱区的常用单位及其转换数值，用它可以方便地查出所需对应值。

1.2 辐射度量与单位

1.2.1 辐射度量的定义与单位

表 1-1 和 1-2 概括了辐射度量与单色辐射度量的名称、定义与单位。为与国际标准化一致，表中只列出了国际制单位 (SI 单位)。有关其它制的相应单位列于表 1-5、1-6 和 1-7 中。

表1-1 辐射度量与单位

名 称	代 号	定 义	SI 单 位	符 号
辐 射 能	Q, Q_e		焦 耳	J
辐射能密度	W, W_e	$W = \partial Q / \partial V$ 单位体积的辐射能	焦耳/米 ³	J/m ³
辐射通量	ϕ, ϕ_e	$\phi = \partial Q / \partial t$ 单位时间通过的辐射能	瓦	W
辐射通量面密度 辐射出射度	M, M_e	$M = \partial \phi / \partial A$ 单位面积发出的辐射通量	瓦/米 ²	W/m ²
辐射照度	E, E_e	$E = \partial \phi / \partial A$ 单位面积接收的辐射通量	瓦/米 ²	W/m ²
辐射强度	I, I_e	$I = \partial \phi / \partial \omega$ 点光源沿给定方向在单位立体角内传播的辐射通量	瓦/球面度	W/Sr
辐射亮度	L, L_e	$L = \partial^2 \phi / \partial \omega (\partial A \cos \theta) = \partial I / (\partial A \cdot \cos \theta)$ 单位投影面积上的辐射强度 (θ 为视线与光源表面法线的夹角, $\partial A \cos \theta$ 为投影面积)	瓦/球面度·米 ²	W/Sr·m ²

注：代号下标 e 表示辐射度量。

表1-2 单色辐射度量与单位

名称	代号	说 明	单 位	符 号
单色辐射通量	ϕ_λ	$\partial\phi/\partial\lambda$ 单位波长间隔的辐射通量	瓦/微米	$W/\mu m$
单色辐射通量	ϕ_ν	$\partial\phi/\partial\nu$ 单位频率间隔的辐射通量	瓦秒或瓦/赫	WS W/Hz
单色辐射出射度	M_λ	$\partial M/\partial\lambda$ 单位波长间隔的辐射出射度	瓦/米 ² ·微米	$W/m^2 \cdot \mu m$
单色辐照度	E_λ	$\partial E/\partial\lambda$ 单位波长间隔的辐照度	瓦/米 ² ·微米	$W/m^2 \cdot \mu m$
单色辐射强度	I_λ	$\partial I/\partial\lambda$ 单位波长间隔的辐射强度	瓦/球面度·微米	$W/Sr \cdot \mu m$
单色辐射亮度	L_λ	$\partial L/\partial\lambda$ 单位波长间隔的辐亮度	瓦/米 ² ·球面度·微米	$W/m^2 \cdot Sr \cdot \mu m$

1.2.2 单色与全色辐射

一个非受激辐射源发出的辐射通常包含一定的往往是连续的波长范围。图 1-3 为某一辐射源的辐射能光谱分布。

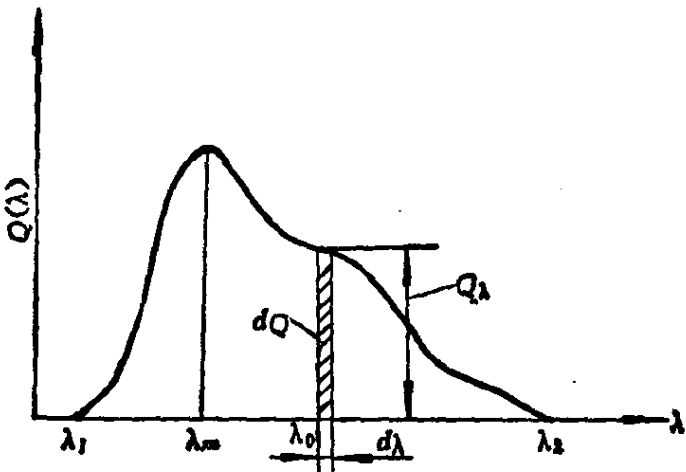


图1-3 辐射能的光谱分布曲线

单色辐射——给定波长 λ_0 的邻近微细波长间隔 $d\lambda$ 内的辐射能 dQ 称为单色辐射能，即图 1-3 中的矩形面积：

$$dQ = Q_\lambda d\lambda \tag{1-2}$$

其中， Q_λ 称为给定波长 λ 的单色集中度。