
光学测量

李富铭 刘一先 编



上海科学技术文献出版社

光 学 测 量

李富铭 刘一先 编

责任编辑：孙建越

*

上海科学技术文献出版社出版

(上海市武康路2号)

新华书店上海发行所发行

上海商务印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 12 插页 1 字数 293,000

1986年8月第1版 1986年8月第1次印刷

印数：1—2,300

书号：15192,460 定价：2.45元

《科技新书目》122—226

序 言

本书是我们根据近年来讲授“光学测量”课程和从事有关科研实践编写而成的。书中不仅系统地介绍了经典光谱仪器的性能和光谱测量方法以及各种类型的辐射能量探测器，同时还编入了近年来国内外最新发展的各种光学测量仪器和测量方法。由于篇幅的限制不可能做到面面俱到，但我们尽量做到把能反映最先进水平的测量技术编入书中，如第四章中的光学多道探测器和微通道光电倍增管，第五章中的波长计，第六章中微弱信号检测的各种仪器和方法，第七章中的光声光谱测量技术，以及第八章中用于时间分辨率光谱的各种测量技术等，这些最新发展起来的光学仪器和光学测量技术不仅对工业生产部门具有实用价值，而且对科研部门开拓新的研究领域也是极其有益的。

本书可作为高等院校激光专业学生的教材，教材是按60学时内容编写的，其中有的内容是供同学课外阅读用，课堂上教授的具体内容各校可根据本校的具体情况增删。

我们在编写本书的过程中，个别章节是参考了我校何鸣皋同志编写的“实验光谱学”讲议的内容，对此表示衷心感谢。

由于我们水平所限，加之时间仓促，书中定有不少缺点和错误，敬请读者批评指正。

编 者

一九八六.二.于复旦

目 录

第一章 光源

- §1.1 光辐射的基本物理量(1)
 - 1.1.1 辐射度量和单位(1)
 - 1.1.2 光度量和单位(4)
 - 1.1.3 黑体辐射(6)
- §1.2 常用光源(9)
 - 1.2.1 汞灯(9)
 - 1.2.2 钠灯(11)
 - 1.2.3 金属卤化物灯(12)
- §1.3 辐射标准光源(13)
 - 1.3.1 绝对黑体(13)
 - 1.3.2 钨带灯(14)
 - 1.3.3 直流碳弧(18)
- §1.4 激光器(19)
 - 1.4.1 激光光源的优点(19)
 - 1.4.2 几种常用的激光器简介(20)

第二章 常用光谱仪器

- §2.1 光谱仪器的基本特性(25)
- §2.2 棱镜光谱仪(26)
 - 2.2.1 棱镜(26)
 - 2.2.2 棱镜光谱仪的结构(35)
 - 2.2.3 棱镜光谱仪的分类(37)
 - 2.2.4 棱镜摄谱仪的色散率(38)

2.2.5	光谱仪的分辨本领	(39)
2.2.6	光谱仪的聚光本领	(40)
2.2.7	棱镜光谱仪中光谱线的弯曲	(41)
2.2.8	棱镜摄谱仪的各种类型	(42)
§2.3	光栅光谱仪	(43)
2.3.1	平面光栅	(44)
2.3.2	光栅划线形状与光强分布的关系——闪耀光栅	(49)
2.3.3	凹面光栅	(52)
2.3.4	光栅光谱仪的装置	(54)
§2.4	光谱仪的照明	(59)
§2.5	单色仪与双单色仪	(65)
2.5.1	单色仪	(65)
2.5.2	双单色仪	(78)

第三章 干涉光谱仪

§3.1	法布里-珀罗干涉仪	(88)
3.1.1	光强分布	(88)
3.1.2	法布里-珀罗干涉仪的色散率和色散范围	(93)
3.1.3	法布里-珀罗干涉仪的分辨本领	(94)
3.1.4	法布里-珀罗干涉摄谱仪	(97)
3.1.5	光电记录干涉条纹方法	(98)
3.1.6	法布里-珀罗干涉仪的聚光本领	(101)
§3.2	共焦法布里-珀罗干涉仪	(102)
3.2.1	共焦法布里-珀罗干涉仪的结构和基本特性	(102)
3.2.2	平面法布里-珀罗干涉仪和共焦法布里-珀罗干涉仪的性能比较	(104)
§3.3	双折射滤光器	(107)
3.3.1	晶体的双折射现象	(107)
3.3.2	双折射滤光器的性能	(108)
§3.4	傅里叶变换光谱仪	(112)
3.4.1	基本原理	(113)

3.4.2 傅里叶光谱仪的结构	(114)
§3.5 光栅光谱仪与干涉光谱仪性能的比较	(117)
3.5.1 光谱分辨本领和聚光本领	(117)
3.5.2 波长测量的精密度和准确度	(121)

第四章 光辐射探测器

§4.1 辐射能量的探测方法及其基本特性	(123)
4.1.1 探测方法	(123)
4.1.2 探测过程	(124)
4.1.3 光电和热电探测器的基本特性	(126)
§4.2 外光电效应型光探测器	(129)
4.2.1 光电子发射	(129)
4.2.2 光电发射材料及特性	(131)
4.2.3 光电管	(136)
4.2.4 光电倍增管	(142)
4.2.5 微通道板光电倍增管	(160)
§4.3 内光电效应型光探测器	(167)
4.3.1 光导管	(167)
4.3.2 光生伏打效应型光探测器	(173)
§4.4 辐射热电偶	(191)
§4.5 热释电探测器	(193)
§4.6 光学多道探测器	(195)

第五章 光谱线的波长及强度测量

§5.1 波长测量	(202)
5.1.1 标准波长	(202)
5.1.2 干涉仪测量波长	(204)
5.1.3 用棱镜光谱仪测量波长	(208)
5.1.4 利用光栅光谱仪测量波长	(210)
§5.2 波长计	(211)

§5.3 光谱能量分布的测量	(215)
5.3.1 光源相对光谱能量分布的测量	(215)
5.3.2 光源绝对光谱能量分布的测量	(217)

第六章 微弱信号的检测

§6.1 抑制噪声的基本思想	(221)
§6.2 锁相放大器	(223)
§6.3 取样积分器	(233)
§6.4 相关器	(241)
§6.5 单光子计数器	(248)

第七章 光声光谱测量技术

§7.1 光声光谱技术的原理	(259)
§7.2 光声信号的产生	(262)
7.2.1 光的吸收	(262)
7.2.2 声音的激发	(264)
7.2.3 凝聚态物质中光声信号的产生	(269)
§7.3 光声信号的检测	(272)
7.3.1 电容式麦克风	(273)
7.3.2 压电传感器	(279)
§7.4 光声系统的最佳设计	(283)
7.4.1 一般考虑	(283)
7.4.2 介绍几种常用的光声池结构	(286)
§7.5 照明光束的产生和调制方法	(289)
§7.6 光声光谱技术的应用	(292)
7.6.1 粉末样品性能的研究	(292)
7.6.2 样品表面性质的研究	(294)
7.6.3 大气污染监测	(296)
附录1 光声系统设计的实例	(298)
附录2 CO 激光跃迁波数与波长表	(301)

附录3 CO₂ 激光跃迁波数与波长表(307)

第八章 时间分辨光谱测量技术

§8.1 超短光脉冲的产生(311)

 8.1.1 锁模的基本概念(311)

 8.1.2 锁模技术(316)

§8.2 单个脉冲的选取(328)

§8.3 超短光脉冲的测量(333)

 8.3.1 直接观察测量(333)

 8.3.2 相关测量(340)

 8.3.3 超高速快门和超高速照相机(356)

§8.4 超短光脉冲的应用(362)

 8.4.1 激光光谱学方面的应用(362)

 8.4.2 在生物物理学方面的应用(370)

第一章 光源

§1.1 光辐射的基本物理量

以能量(或功率)为单位来评价电磁辐射,定义为辐射量,属于辐射度学的研究范围。将辐射量与人眼的视觉特性相联系来评价电磁辐射,定义为光度,属于光度学的研究范围。与人眼的颜色视觉特性相联系来评价电磁辐射,定义为色度,属于色度学的研究范围。下面介绍与本书有关的光辐射基本物理量。

1.1.1 辐射度量 and 单位

1. 辐射能 Q_e

辐射能是一种传播着的电磁波的能量,当辐射能被物质吸收时,可以转换成其他形式的能量,如热能、电能等。量度辐射能的单位是 J (焦耳)。

2. 辐射通量 Φ_e

单位时间内流过面积元 dA 的辐射能量,称为通过这一面积元的辐射通量 Φ_e 。

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

式中, dQ_e 是在 dt 时间内流过面积元 dA 的辐射能量。 Φ_e 的单位是 W (瓦特)。

3. 辐射强度 I_e

点辐射源在给定方向上单位时间单位立体角内所辐射的能量,称为在这一方向的辐射强度 I_e 。

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad 1-2$$

式中, $d\Phi_e$ 为点辐射源在给定方向上立体角 $d\Omega$ 内的辐射能量。 I_e 的单位是 W/Sr (瓦特/球面度)。

对于点辐射源在整个空间的辐射通量 Φ_e , 可由上式求得

$$\Phi_e = \int I_e d\Omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi I_e(\varphi, \theta) \sin \theta d\theta \quad 1-3$$

如果辐射通量在空间分布是均匀的, 即 I_e 不随 φ 和 θ 而变, 那么,

$$\Phi_e = 4\pi I_e \quad 1-4$$

4. 辐射照度 E_e

投射在单位面积上的辐射通量称为辐照度 E_e 。

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad 1-5$$

式中, $d\Phi_e$ 是投射在面积元 dA 上的辐射通量值。 E_e 的单位是 W/m^2 (瓦特/米²)。

5. 辐射出射度 M_e

扩展辐射源单位面积所辐射的通量称为辐射出射度。

$$M_e = \frac{d\Phi_e^*}{dA^*} \quad 1-6$$

式中 $d\Phi_e^*$ 是扩展源元表面 dA^* 在各方向上 (2π 立体角内) 所发出的总的辐射通量。 M_e 的单位是 W/m^2 (瓦特/米²)。

6. 辐射亮度 L_e

扩展辐射源在给定方向上单位立体角、单位投影面积内发出的辐射通量, 称为在该方向的辐射亮度 L_e 。对于非自发光表面也可以类似定义。

$$L_e = \frac{d\Phi_{e\theta}}{d\Omega dA \cos\theta} \quad 1-7$$

式中， θ 角是面积元 dA 的法线 N 与给定方向的夹角； $d\Phi_{e\theta}$ 为给定方向上 $d\Omega$ 立体角内 dA 辐射的通量。

L_e 称为面辐射元在 θ 角方向上的辐射亮度， L 的数值与扩展辐射表面的性质有关，并且随方向而变。 L 单位是 $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Sr}$ (瓦特/米²·球面度)。

1. 光谱辐射量(辐射量的光谱密度)

辐射源所辐射的能量往往由许多不同波长的单色辐射所组成，因此需要对某一波长的单色光的辐射能量作出相应的定义。

若在波长 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 间隔内的辐射通量为 $d\Phi_\lambda$ ，则

$$d\Phi_\lambda = \Phi_\lambda d\lambda \quad 1-8$$

式中 Φ_λ 为给定波长 λ 下的单色辐射通量或光谱辐射通量，它是波长的函数。

相应的光谱辐射照度 E_λ 及光谱辐射亮度 L_λ 分别定义为

$$E_\lambda = \frac{dE_\lambda}{d\lambda} \quad 1-9$$

$$L_\lambda = \frac{dL_\lambda}{d\lambda} \quad 1-10$$

其中 dE_λ 和 dL_λ 分别为 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 区间内的辐射照度及辐射亮度。对于不连续辐射源，具有线光谱或带光谱特征，其总辐射通量为

$$\Phi = \sum \Phi_\lambda \Delta\lambda \quad 1-11$$

如果是连续辐射源，则其总辐射通量为

$$\Phi = \int \Phi_\lambda d\lambda \quad 1-12$$

对于上述介绍的基本辐射度量和单色辐射度量的量、定义、单位和符号列于表 1-1 和表 1-2 中。

表 1-1 辐射度量 and 单位

量	符 号	定 义 式	SI 单 位	单位符号
辐射能	Q, Q_0		焦耳	J
辐射通量	Φ, Φ_0	$\Phi = dQ/dt$	瓦特	W
辐射强度	I, I_0	$I = dQ/d\Omega$	瓦特/球面度	W/Sr
辐照度	E, E_0	$E = d\Phi/dA$	瓦特/米 ²	W/m ²
辐射出射度	M, M_0	$M = d\Phi/dA$	瓦特/米 ²	W/m ²
辐射亮度	L, L_0	$L = d\Phi/d\Omega dA \cos\theta$	瓦特/球面度·米 ²	W/Sr·m ²

表 1-2 单色辐射度量 and 单位

量	符号	说 明	SI 单 位	单位符号
单色辐射通量	Φ_λ	$d\Phi/d\lambda$ 单色波长间隔 的辐射通量	瓦特/微米	W/ μm
单色辐射出射度	M_λ	$dM/d\lambda$ 单色波长间隔 的辐射出射度	瓦特/米 ² ·微米	W/m ² · μm
单色辐射照度	E_λ	$dE/d\lambda$ 单色波长间隔 的辐射照度	瓦特/米 ² ·微米	W/m ² · μm
单色辐射强度	I_λ	$dI/d\lambda$ 单位波长间隔 的辐射强度	瓦特/球面度·微米	W/Sr· μm
单色辐射亮度	L_λ	$dL/d\lambda$ 单位波长间隔 的辐射亮度	瓦特/米 ² ·球面度·微米	W/m ² ·Sr· μm

1.1.2 光度量和单位

我们在辐射度量学中介绍各个基本量 Φ_0, M_0, I_0, L_0 和 E_0 对整个电磁波谱都适用；而在光度学中的相应量 Φ_v, M_v, I_v, L_v 和 E_v 则只在光谱的可见波段 (0.38~0.77 μm) 才有意义。光度学是以人眼的视觉来评价电磁辐射能量的，因为人眼对各种

波长光线的视觉灵敏度不同，所以相同光能量的各种波长光线所产生的视觉不同。人眼对不同波长的相对光谱灵敏度曲线称为光谱光效率或视见函数。

国际照明委员会(CIE)公布的平均人眼光谱光效率曲线表示在图 1-1 中。其中实线为明视觉(圆锥体细胞视觉)，虚线为暗视觉(圆柱体细胞视觉)曲线。

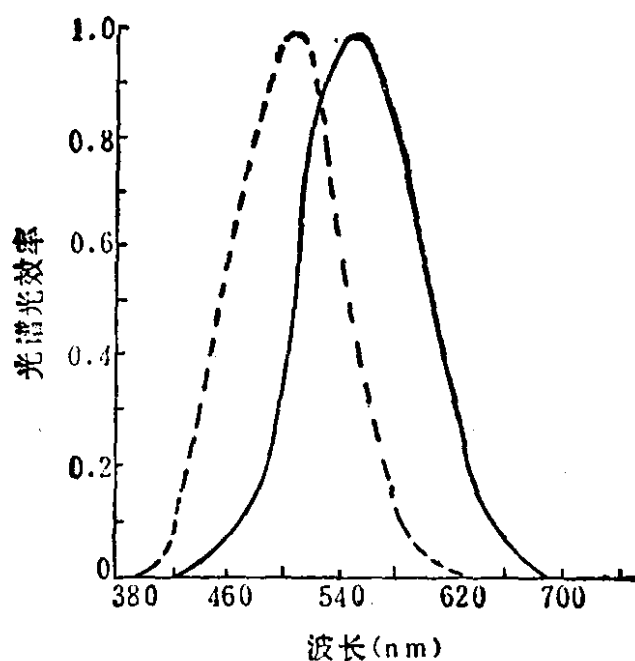


图 1-1 光谱光效率(视见函数)曲线

光度学的单位由光强所取的基本单位而定。光强的单位是 cd [坎(德拉)]。国际上通用的标准 cd 是以黑体辐射的亮度为基础的。

光通量的单位是 lm(流明)，它是光强为 1cd 的均匀点光源在单位立体角内发出的光通量，亦即在所有方向以 1cd 的光强均匀辐射的点光源，它的总光通量为 4π lm。

光照度的单位是 lx(勒克斯)，它相当于 1lm 的光通量均匀地射在 1m^2 面积上所产生的光照度。

光亮度的单位是 cd/m^2 (坎每平方米), 它相当于 1m^2 表面沿法线方向发出 1cd 光强的亮度。

人眼的明视觉曲线 $V(\lambda)$ 适用于大约 $1\text{cd}/\text{m}^2$ 以上的亮度水平, 暗视觉曲线 $V'(\lambda)$ 适用于 $0.001\text{cd}/\text{m}^2$ 以下的亮度水平。国际计量委员会采用明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 作为光度计量的标准。

对于红外或紫外区的电磁辐射, 虽然客观存在, 但人眼不能产生光的感觉, 所以它的光谱光效率等于零。在人眼可以感受的可见光区域, 由于眼睛对各个波长的灵敏度不同, 各个波段所产生的光感觉程度也不同, 因而按人眼的视觉特性 $V(\lambda)$ 来评价的辐射通量 Φ_e 即为光通量 Φ_v , 这两者的关系为

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad 1-13$$

式中 K_m 为明视觉的最大光谱光效率函数, 亦称为光功当量。按国际实用温标 IPTS-68 的理论计算值为

$$K_m = 680\text{lm}/\text{W} \quad 1-14$$

K_m 确定之后根据式 (1-13) 即可对光度量和辐射度量之间进行准确的换算。由此可进一步探讨辐射度和光度基准的统一。

1.1.3 黑体辐射

1. 基尔霍夫定律

由于外界热量传递给物体而发生的辐射, 称为热辐射。如果物体从周围物体吸收辐射能所得到的热量恰好等于自身辐射而减少的能量, 则辐射过程达平衡状态, 这称为热平衡辐射, 这时辐射体可以用一个固定的温度 T_0 来描述。在研究热平衡辐射所遵从的规律时, 我们假定物体发射能量和吸收能量的过程中, 除了物体的“热”状态有所改变外, 它的成分并不发生其他变

化。因此辐射能量的发出和吸收有特殊的意义。

(1) 辐射本领 $M_\lambda(\lambda', T_\theta)$

辐射本领是辐射体表面在单位波长间隔单位面积内所辐射的通量, 即

$$M'_\lambda(\lambda, T_\theta) = \frac{d\Phi_e}{d\lambda dA} \quad 1-15$$

式中 $d\Phi_e$ 为元表面 dA 在波长 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 间隔内的辐射通量。 $M'_\lambda(\lambda, T_\theta)$ 是辐射体的温度 T_θ 和辐射波长 λ 的函数。

(2) 吸收本领 $\alpha(\lambda, T_\theta)$

吸收本领 $\alpha(\lambda, T_\theta)$ 是在波长 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 间隔内被物体吸收的通量与入射通量之比, 它与物体的温度 T_θ 及波长 λ 有关, 定义式为

$$\alpha(\lambda, T_\theta) = \frac{d\Phi'_e(\lambda)}{d\Phi_e(\lambda)} \quad 1-16$$

式中, $d\Phi_e(\lambda)$ 是在波长 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 间隔内入射到物体上的通量, 而 $d\Phi'_e(\lambda)$ 则是在相应的波长间隔内物体吸收的通量。由上式可知 $\alpha(\lambda, T_\theta)$ 是一个无量纲的量。

根据以上所述, 基尔霍夫定律是: 处于热平衡状态的物体, 其发射本领 $M'_\lambda(\lambda, T_\theta)$ 和吸收本领 $\alpha(\lambda, T_\theta)$ 的比值与物体的性质无关, 只是波长 λ 及温度 T_θ 的普适函数。但是, 不同的物体其 $M'_\lambda(\lambda, T_\theta)$ 或 $\alpha(\lambda, T_\theta)$ 的差别可以很大。

2. 绝对黑体辐射

(1) 绝对黑体

定义吸收本领 $\alpha(\lambda, T_\theta) = 1$ 的物体为绝对黑体, 也称为完全辐射体。绝对黑体的辐射本领以 $M'_{\lambda b}(\lambda, T_\theta)$ 表示, 则

$$\frac{M'_\lambda(\lambda, T_\theta)}{\alpha(\lambda, T_\theta)} = M'_{\lambda b}(\lambda, T_\theta) \quad 1-17$$

因为一般的物体其 $\alpha(\lambda, T_\theta) < 1$, 所以 $M'_{\lambda b}(\lambda, T_\theta) > M'_\lambda(\lambda, T_\theta)$ 。

这表明：在同一温度 T_θ 中对任何波长，物体的辐射本领不会大于黑体的辐射本领。物体的辐射本领 $M'_\lambda(\lambda, T_\theta)$ 与绝对黑体辐射本领 $M'_{\lambda_b}(\lambda, T_\theta)$ 之比称为该物体的发射率 $\varepsilon(\lambda, T_\theta)$ ，由(1-17)式可得

$$\varepsilon(\lambda, T_\theta) = \frac{M'_\lambda(\lambda, T_\theta)}{M'_{\lambda_b}(\lambda, T_\theta)} = \alpha(\lambda, T_\theta) \quad 1-18$$

上式说明任何具有强吸收的物体必定发出强的辐射。

在自然界中，理想黑体是不存在的，吸收本领最多只有 0.96~0.99。实际工作时，黑体往往是用表面涂黑的球形或柱形空腔来人为地实现。

(2) 普朗克辐射公式

基于辐射过程能量量子化的概念，普朗克导出了与实验符合的黑体光谱辐射出度。

$$M'_{\lambda_b}(\lambda, T_\theta) = c_1 \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T_\theta} - 1)^{-1} \quad 1-19$$

式中， $c_1 = 2\pi hc^2 = (3.7415 \pm 0.0003) \times 10^{-16} \text{W} \cdot \text{m}^2$ ，

$$c_2 = \frac{hc}{k} = (1.43879 \pm 0.00019) \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}，$$

c 为光速，而 k 和 h 分别为玻尔兹曼常数及普朗克常数。

在短波区域或温度不高的情况下，如满足 $\lambda T_\theta \ll c_2$ ，则(1-19)式可以近似简化为

$$M'_{\lambda_b}(\lambda, T_\theta) = c_1 \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T_\theta} \quad 1-20$$

上式在黑体光谱能量分布曲线极大值的短波长的左方是近似适用的。从普朗克公式可以导出斯蒂芬-玻尔兹曼定律及维思定律。

根据(1-19)式，可以得到如图1-2所示的黑体辐射的相对光谱能量分布曲线(即光谱辐射出度按波长分布的曲线)。由图可知，随着温度的升高，曲线下的面积(即黑体的辐射出度

M_{λ}) 迅速增加, 峰值辐射的波长 $\lambda_{\text{峰}}$ 逐渐减小, 即逐渐移向短波。

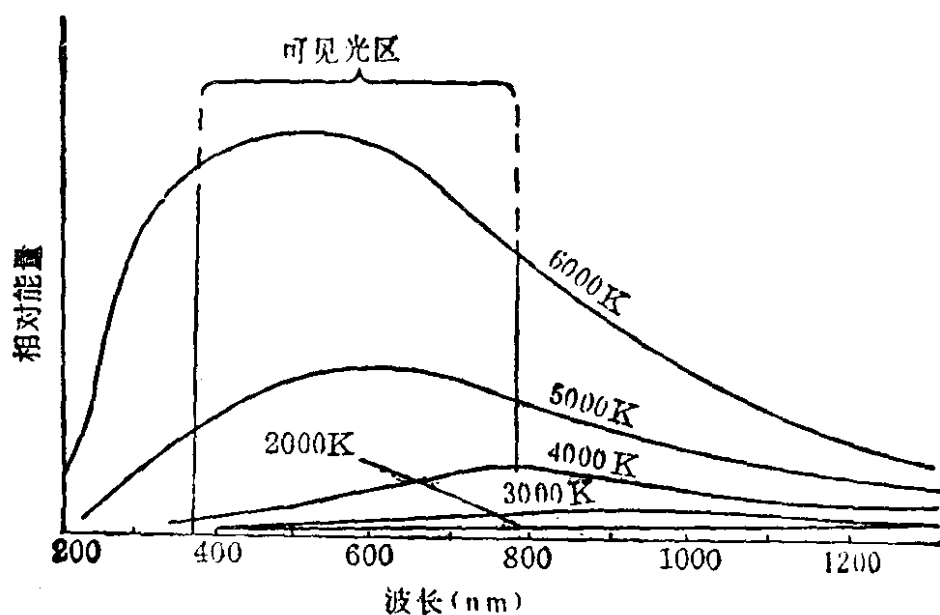


图 1-2 黑体辐射的相对能量分布

§1.2 常用光源

随着光源技术的发展, 可提供光谱分析用的光源品种也日趋增多, 现简单地介绍几种常用的光源。

1.2.1 汞灯

汞灯又称水银灯, 是利用汞蒸气放电发光而制成的灯。汞灯按汞蒸气压的不同可分低压、高压和超高压三种。

汞蒸气放电在可见光谱区主要集中于四组谱线, 黄色的 (5770 \AA 和 5791 \AA)、绿色的 (5641 \AA)、蓝色的 (4358 \AA) 和紫色的 (4047 \AA 和 4078 \AA)。此外, 在紫外光谱区和近红外光谱区也辐射一系列的谱线。高压和超高压的汞灯也辐射出红外光谱, 低压汞灯和高压汞灯的相对光谱能量分布表示在图 1-3 中。由图可知高压汞灯在紫外、和可见光区都有强辐射, 而低压汞灯则