

# 光 电 信 号 检 测

吴 杰 编

哈尔滨工业大学出版社

## 内 容 简 介

本书主要介绍光电信号检测的物理基础，光探测器的基本原理与性能，光电信号的检测方法与处理技术和典型光电信号检测系统。

本书可作为高等工科院校有关专业本科生的光电信号检测技术教材，也可供从事光电子技术工作的研究人员、工程技术人员及高等院校其他有关专业的师生参考。

## 光 电 信 号 检 测

吴 杰 编

\*

哈尔滨工业大学出版社出版  
新华书店首都发行所发行  
哈尔滨市外文印刷厂印刷

\*

开本787×1092 1/16 印张 18.75 字数397 000

1990年12月第1版 1990年12月第1次印刷

印数 1—2500

ISBN 7-5603-0278-5/0·27 定价4.05元

# 目 录

<b>第一章 光辐射物理基础</b> .....	( 1 )
§1.1 光辐射的度量.....	( 1 )
§1.2 温度辐射与物体的辐射特性.....	( 3 )
1.2.1 温度辐射与黑体辐射定律.....	( 3 )
1.2.2 人工黑体及其辐射特性.....	( 7 )
1.2.3 通用辐射源及其发光特性.....	( 9 )
1.2.4 目标辐射与背景辐射.....	( 10 )
§1.3 受激辐射与激光器.....	( 11 )
1.3.1 受激辐射和吸收.....	( 12 )
1.3.2 激光的形成及其特点.....	( 12 )
1.3.3 常见激光器系统及其特性.....	( 15 )
§1.4 辐射在传输媒质中的衰减.....	( 20 )
1.4.1 表征辐射在媒质中衰减的物理量.....	( 20 )
1.4.2 大气特性及其对辐射传输的影响.....	( 21 )
1.4.3 材料对光辐射的反射、吸收和透射特性.....	( 26 )
§1.5 辐射传输的电磁理论.....	( 30 )
1.5.1 辐射在自由空间和均匀介质中的传播.....	( 30 )
1.5.2 辐射在无限均匀导电媒质中的传播.....	( 31 )
1.5.3 辐射在不连续媒质界面的传输.....	( 33 )
1.5.4 高反射膜与增透膜.....	( 34 )
§1.6 光辐射的调制.....	( 37 )
1.6.1 调制的形式及其主要特性.....	( 37 )
1.6.2 调制盘.....	( 44 )
1.6.3 电光调制器.....	( 53 )
1.6.4 声光调制器.....	( 58 )
<b>第二章 光辐射探测器</b> .....	( 61 )
§2.1 探测器的性能参数及测量.....	( 61 )
2.1.1 探测器的性能参数.....	( 61 )
2.1.2 探测器性能参数的测量.....	( 66 )
§2.2 随机过程和探测器噪声.....	( 67 )
2.2.1 噪声随机过程的描述及其统计性质.....	( 68 )
2.2.2 随机过程的自相关函数及其功率谱.....	( 71 )
2.2.3 高斯噪声和白噪声.....	( 76 )

2.2.4	光电系统中常见噪声的产生机制	( 80 )
2.2.5	探测器噪声的测量	( 86 )
2.2.6	探测器噪声对探测器灵敏度的限制	( 88 )
§ 2.3	光电检测的统计性质和响应过程	( 91 )
2.3.1	光电检测的统计性质	( 91 )
2.3.2	光电检测的泊松计数统计	( 92 )
2.3.3	光电检测的条件泊松计数统计	( 96 )
2.2.4	光电检测过程的时间统计	( 97 )
2.2.5	光电检测过程的均值和方差	( 99 )
§ 2.4	光电子发射探测器	( 100 )
2.4.1	光电子发射与光电阴极	( 100 )
2.4.2	光电二极管	( 102 )
2.4.3	光电倍增管 (PMT)	( 105 )
2.4.4	通道电子倍增器和微通道板	( 110 )
§ 2.5	半导体光电探测器	( 113 )
2.5.1	光电导探测器 (PC)	( 113 )
2.5.2	光伏探测器 (PV)	( 121 )
§ 2.6	热探测器	( 127 )
2.6.1	热探测器对光辐射的温度响应	( 128 )
2.6.2	测辐射热电偶	( 130 )
2.6.3	测辐射热敏电阻探测器	( 132 )
2.6.4	热释电探测器	( 134 )
§ 2.7	成象电荷耦合器件 (CCD)	( 137 )
2.7.1	电荷耦合器件的工作原理	( 137 )
2.7.2	电荷耦合器件的主要性能参数	( 139 )
<b>第三章</b>	<b>光辐射直接检测与外差检测</b>	<b>( 141 )</b>
§ 3.1	直接检测	( 141 )
3.1.1	光探测器的平方律特性	( 141 )
3.1.2	直接检测系统的信噪比和灵敏度分析	( 142 )
3.1.3	强度调制光的直接检测	( 144 )
§ 3.2	外差检测	( 145 )
3.2.1	外差检测的基本原理	( 146 )
3.2.2	外差检测系统的信噪比和灵敏度分析	( 146 )
3.2.3	光外差检测的条件	( 151 )
3.2.4	三频外差检测	( 154 )
3.2.5	外差检测与直接检测的性能比较	( 157 )
<b>第四章</b>	<b>光电检测信号的前置放大和滤波</b>	<b>( 159 )</b>
§ 4.1	前置放大电路和器件噪声	( 159 )

4.1.1 放大器的噪声	(159)
4.1.2 电路元件的噪声	(165)
4.1.3 前置放大器的低噪声设计	(179)
4.1.4 实用低噪声前置放大器	(184)
§ 4.2 有源滤波器的构成和电路设计	(189)
4.2.1 有源滤波器的传输函数	(190)
4.2.2 二阶有源滤波器的构成方法	(193)
4.2.3 二阶有源滤波器的电路设计	(194)
<b>第五章 光电信号的最佳检测</b>	<b>(200)</b>
§ 5.1 维纳滤波器	(200)
5.1.1 维纳滤波器	(200)
5.1.2 物理上可实现的维纳滤波器	(202)
§ 5.2 匹配滤波器	(205)
§ 5.3 相关检测	(208)
5.3.1 相关检测的原理	(208)
5.3.2 锁相放大器	(210)
§ 5.4 积累检测	(217)
5.4.1 积累检测的原理	(217)
5.4.2 门积分器的原理分析	(223)
5.4.3 采样积累器的使用参数	(226)
5.4.4 多点积累检测	(229)
§ 5.5 光电检测信号的最大后验估值	(236)
5.5.1 最大后验概率 (MAP) 估值的原理	(236)
5.5.2 多模接收机中的最大后验参量估值	(238)
5.5.3 具有背景噪声的单色光场计数强度的 MAP 估值	(240)
5.5.4 正弦强度调制的高斯相位角 MAP 估值	(240)
5.5.5 正弦强度调制的频率 MAP 估值	(241)
§ 5.6 光电检测信号的最大似然估值	(242)
5.6.1 高斯信号的最大似然估值	(243)
5.6.2 稳态光强的最大似然估值	(244)
5.6.3 光电信号振幅的最大似然估值	(245)
5.6.4 光电信号的相位估值—锁相环路	(246)
§ 5.7 光子计数技术	(248)
5.7.1 光子计数的原理	(248)
5.7.2 光子计数系统的测量误差	(252)
<b>第六章 典型光电信号检测系统</b>	<b>(254)</b>
§ 6.1 测辐射计与温度探测系统	(254)
§ 6.2 激光测距系统	(258)



6.2.1 单脉冲激光测距仪.....	(258)
6.2.2 重复脉冲激光测距.....	(259)
6.2.3 连续波相位测距.....	(261)
§ 6.3 方位探测、搜索跟踪系统.....	(264)
6.3.1 搜索跟踪系统的距离方程.....	(264)
6.3.2 跟踪系统中的位标器.....	(266)
6.3.3 误差信号的提取.....	(267)
§ 6.4 热成象系统.....	(269)
6.4.1 热成象系统概述.....	(269)
6.4.2 红外电荷耦合器件成象系统.....	(270)
§ 6.5 激光多普勒测速系统.....	(273)
§ 6.6 傅立叶变换红外光谱仪.....	(279)
§ 6.7 光学多道分析器 (OMA).....	(283)
6.7.1 多色仪.....	(284)
6.7.2 硅靶光导摄像管及摄像机.....	(285)
6.7.3 OMA 系统的数据采集和处理.....	(288)
<b>参考文献</b> .....	(291)

# 第一章 光辐射物理基础

光辐射是电磁波辐射的一部分，其辐射波长在  $0.1\mu\text{m}$  至  $1000\mu\text{m}$  之间，频率范围为  $3 \times 10^7$  至  $3 \times 10^{16}\text{Hz}$ 。通常，光辐射又分为紫外辐射（波长范围在  $0.1$  至  $0.4\mu\text{m}$  之间）；可见光辐射（波长范围在  $0.4$  至  $0.8\mu\text{m}$  之间）和红外光辐射（波长范围在  $0.8$  至  $1000\mu\text{m}$  之间）。习惯上还把波长为  $0.8$  至  $3\mu\text{m}$  的红外辐射称为近红外辐射；波长为  $3$  至  $6\mu\text{m}$  的红外辐射称为中红外辐射；波长为  $6$  至  $20\mu\text{m}$  的红外辐射称为远红外辐射；而波长为  $20$  至  $1000\mu\text{m}$  的红外辐射称为极远红外辐射。

本章讨论光辐射的度量，光辐射产生及其传输的基本规律，介绍典型的光辐射源，常用光学材料的性质以及光辐射调制的原理和方法。

## § 1.1 光辐射的度量

在研究光辐射的产生、传输和探测等现象时，不可避免地涉及到许多辐射量的度量，这就需要了解它们的定义、相互间关系和辐射量的计算方法。

表 1.1.1 列出了光辐射基本度量的名称、符号、定义和单位。由于历史上的原因，对于可见光辐射的度量，已经建立了一整套光度学的概念和光度量方法，它是以人眼对入射光辐射刺激所产生的视觉为基础的，只适用于可见光波段，因此不是客观的物理学描述方法。而辐射度学的概念和方法，建立在物理测量系统基础之上，不受主观视觉的限制，因此，辐射度学的概念和方法，适用于整个的电磁波谱范围。为了正确理解和使用的方便，表 1.1.2 列出了与辐射度量相对应的光度量的名称、符号、定义和单位。

表 1.1.1 基本辐射度量的名称、符号、定义和单位

名称	符号	意 义	定义式	单 位
辐射能量	$Q$	以电磁波的形式发射、传输或接收的能量		J
辐射能密度	$w$	辐射场单位体积中的辐射能	$w = \frac{\partial Q}{\partial V}$	$\text{J/m}^3$
辐射功率	$P$	单位时间内发射、传输、或接收的辐射能	$P = \frac{\partial Q}{\partial t}$	W
辐射度	$M$	辐射源单位表面积向半球空间发射的辐射功率	$M = \frac{\partial P}{\partial A}$ $= L \cos \theta d\Omega$	$\text{W/m}^2$
辐射强度	$I$	点辐射源在某方向单位立体角的辐射功率	$I = \frac{\partial P}{\partial \Omega}$	$\text{W/sr}$

续表 1.1.1

辐射亮度	$L$	扩展辐射源在某方向上单位投影面积和单位立体角内发射的辐射功率	$L = \frac{\partial^2 P}{\partial \Omega \partial A \cos \theta}$ $= \frac{\partial I}{\partial A \cos \theta}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{sr}$
辐射照度	$E$	入射到单位接收表面上的辐射功率	$E = \frac{\partial P}{\partial A}$ $= L \cos \theta d\Omega$	$\text{W/m}^2$
光子辐射度	$M_q$	辐射源单位表面积每秒向半球空间发射的光子数	$M_q = \frac{M}{h\nu}$	$1/\text{m}^2 \cdot \text{s}$
光谱辐射功率	$P_\lambda$	在指定波长 $\lambda$ 处单位波长间隔的辐射功率	$P_\lambda = \frac{\partial P}{\partial \lambda}$	$\text{W}/\mu\text{m}$
光谱辐射度	$M_\lambda$	在指定波长 $\lambda$ 处单位波长间隔的辐射度	$M_\lambda = \frac{\partial M}{\partial \lambda}$	$\text{W/m} \cdot \mu\text{m}$
光谱辐射强度	$I_\lambda$	在指定波长 $\lambda$ 处单位波长间隔的辐射强度	$I_\lambda = \frac{\partial I}{\partial \lambda}$	$\text{W}/\text{sr} \cdot \mu\text{m}$
光谱辐射亮度	$L_\lambda$	在指定波长 $\lambda$ 处单位波长间隔的辐射亮度	$L_\lambda = \frac{\partial L}{\partial \lambda}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$
光谱辐射照度	$E_\lambda$	在指定波长 $\lambda$ 处单位波长间隔的辐射照度	$E_\lambda = \frac{\partial E}{\partial \lambda}$	$\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$
光谱光子辐射度	$M_{q\lambda}$	在指定波长 $\lambda$ 处单位波长间隔的光子辐射度	$M_{q\lambda} = \frac{\partial M_q}{\partial \lambda}$	$1/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \mu\text{m}$

表 1.1.2

光度量的名称、符号、定义和单位

名称	符号	意义	定义式	单位
光能量	$Q$	以电磁波形式发射、传输或接收的光能量		$\text{lm} \cdot \text{s}$
光能密度	$\omega$	单位体积中的光能量	$\omega = \frac{\partial Q}{\partial V}$	$\text{lm}/\text{s} \cdot \text{m}^3$
光通量	$F$	单位时间内发射、传输或接收的光能量	$F = \frac{\partial Q}{\partial t}$	$\text{lm}$
面发光度	$M$	面光源单位表面积向半球空间发射的光通量	$M = \frac{dF}{dA}$	$\text{lm}/\text{m}^2$
光强度	$I$	点光源在某方向单位立体角发射的光通量	$I = \frac{\partial F}{\partial \Omega}$	$\text{lm}/\text{msr} = \text{cd}$
光亮度	$L$	面光源在某方向上单位投影面积和单位立体角内发射的光通量	$L = \frac{\partial^2 F}{\partial \Omega \partial A \cos \theta}$	$\text{lm}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} = \text{nt}$
光照度	$E$	入射到单位接收表面上的光通量	$E = \frac{\partial F}{\partial A}$	$\text{lm}/\text{m}^2 = \text{x}$

包含波长从 0 到  $\infty$  全部光辐射的度量称为全波辐射量。对指定波长附近单位波长间隔内的辐射量，称为光谱辐射量。如光谱辐射功率：



$$P_\lambda = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta P}{\Delta\lambda} \right) = \frac{\partial P}{\partial \lambda} \quad [\text{W}/\mu\text{m}] \quad (1.1.1)$$

它表征在指定波长  $\lambda$  处单位波长间隔内的辐射功率。与此相似，可定义其它各光谱辐射量及单位，如表 1.1.1。

采用单位时间发射或接收的光量子数定义的各辐射量，称为光子辐射量，并以脚标  $q$  表示。如光子辐射度  $M_q$  就是辐射源单位面积在单位时间内向半球空间发射的光量子数。对于单色光辐射，其光谱光子辐射度为：

$$M_{q\lambda} = \frac{M_\lambda}{h\nu} \quad [1/\text{m}\cdot\text{s}] \quad (1.1.2)$$

对于全波长光子辐射度：

$$M_q = \int_0^\infty M_{q\lambda} d\lambda = \int_0^\infty \frac{M}{h\nu} d\nu \quad (1.1.3)$$

其它各光子辐射量和光谱光子辐射量的定义和单位与此类同。

可见光辐射的光度量与辐射度量有类似的定义方法，但有不同的度量单位，如表 1.1.2 所示。在许多情况下，可以将可见光的能量特性转换为辐射能量特性。光谱光通量  $F(\lambda)$  与光谱辐射功率  $P(\lambda)$  间的关系是：

$$F(\lambda) = P(\lambda) \cdot K(\lambda) \quad (1.1.4)$$

其中  $K(\lambda)$  是眼睛的光谱灵敏度。通常人眼对  $\lambda = 0.555\mu\text{m}$  的绿光最敏感，具有最大灵敏度  $K_m(\lambda)$ ，所以又定义视见函数

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m(\lambda)} \quad (1.1.5)$$

视见函数  $V(\lambda)$  也称光效函数。 $V(\lambda)$  随人而异，一般取多数人正常眼睛  $V(\lambda)$  的算术平均值做为通用值。不同的明亮与黑暗视见情况， $V(\lambda)$  也不相同，所以又规定了明视与暗视情况下的视见函数。前者是光亮度大于  $3\text{nt}$  时人眼的平均视见函数，后者是光亮度小于  $0.01\text{nt}$  时的平均视见函数，如图 1.1.1 所示。

由图可以看出，在明视情况下，当波长为  $0.555\mu\text{m}$  时， $V(\lambda) = 1$ ， $1\text{W}$  的辐射功率，相当于  $683\text{Lm}$ 。而对  $0.555\mu\text{m}$  以外的光辐射， $1\text{W} = 683 \cdot V(\lambda)\text{Lm}$ 。

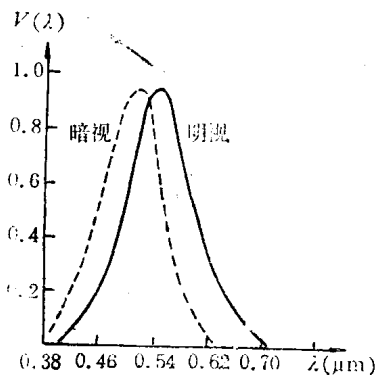


图 1.1.1 视见函数曲线

## § 1.2 温度辐射与物体的辐射特性

### 1.2.1 温度辐射与黑体辐射定律

任何具有一定温度的物体都能转换本身的热能为辐射能，这种辐射称为温度辐射，也叫热辐射，物体本身称为温度辐射体。温度辐射体所发出的电磁波谱，是连续波谱。

任何温度辐射体能够辐射能量，也能吸收辐射能量。温度为 $T$ 的物体吸收入射辐射功率的比率，称为物体对辐射的吸收率，在热平衡状态下，物体发射的辐射功率等于吸收的辐射功率。亦即：

$$M = \alpha E \quad (1.2.1)$$

式中 $M$ 是物体的辐射度， $\alpha$ 是它的吸收率， $E$ 是表面辐射照度。由上式可直接写出：

$$\frac{M}{\alpha} = E \quad (1.2.2)$$

它表明，物体的辐射度与其吸收率的比值等于辐射源在它上面的辐照度，而与物体本身的性质无关，这就是基尔霍夫定律。式(1.2.2)表明，吸收率越大的物体，辐射度也越大，所以好的辐射吸收体，必然也是好的辐射发射体。

能够完全吸收入射辐射功率并具有最大辐射强度的物体称为绝对黑体，简称黑体。黑体是被理想化的物体，自然界中实际并不存在。自然界中所有具有一定温度的物体都是温度辐射体，但不能完全吸收入射辐射的功率，因此称它为非黑体。非黑体与同温度黑体的辐射度之比，称为物体的发射率，或称为发射本领，即

$$\varepsilon(T) = M_{\text{非黑体}}(T) / M_{\text{黑体}}(T) \quad (1.2.3)$$

物体的发射率与材料的性质及其表面状态有关，随物体本身的温度和辐射波长 $\lambda$ 而改变，并随观测的方向而有不同。对指定波长处单位波长间隔内物体的发射率称为光谱发射率，如果包括整个波长范围，则叫做全波发射率。对观测方位包括整个半球空间的 $\varepsilon_{\lambda}(T)$ ，称为半球发射率；对于某方位 $(\theta, \varphi)$ 很小立体角内观测得到的 $\varepsilon_{\theta, \varphi}(T)$ ，称为方向发射率。

发射率不随波长变化且小于1的物体叫做灰体。灰体的发射率 $\varepsilon$ 也称做黑度，自然界中很多物体都可看做为灰体。发射率随波长变化的物体称为选择辐射体，在特定光谱波段，选择辐射体也可近似看做为灰体。

为了弄清一定温度下物体温度辐射功率随辐射波长变化的关系，瑞利(Rayleigh)、金斯(Jeans)等人沿用经典振子模型和经典统计方法导出了瑞利——金斯公式，它给出了低频波段温度辐射时辐射度与波长的正确关系，但在高频波段则与事实严重不符。普朗克(Planck)利用量子化模型和量子统计原理，导出了完全符合实际规律的普朗克公式，揭示了辐射与物质相互作用过程中辐射度与温度以及辐射波长间的依赖关系，奠定了黑体热辐射的理论基础。根据普朗克黑体辐射定律，可计算任何温度及波长范围内的黑体辐射量。

#### (一) 绝对黑体的光谱辐射度 $M_{b\lambda}$ ——普朗克辐射定律

为了确定绝对黑体在某一温度 $T$ 时的光谱辐射度 $M_{b\lambda}$ 解析表达式，普朗克假定辐射场存在很多个带电谱振子，每个谱振子的能量 $\varepsilon$ 是最小能量 $\varepsilon_0 = h\nu$ 的整数倍。其中 $h$ 为普朗克常数， $\nu$ 为谱振子的频率。伴随着电磁波的发射或吸收，谱振子可以从一个能量状态跃迁到另一个能量状态。普朗克还假定，谱振子的能量分布满足玻尔兹曼统计分布，即：

$$P(E) = P_0 e^{-E/kT} \quad (1.2.4)$$

这里  $P(E)$  是分布几率,  $E = ne_0$  是状态能量,  $K$  是玻尔兹曼常数,  $K = 1.38 \times 10^{-23}$  ( $\text{J} \cdot \text{k}^{-1}$ )。

由此可得到谐振子的平均能量  $\bar{e}$  为:

$$\begin{aligned} \bar{e} &= \left[ \sum_{n=0}^{\infty} ne_0 e^{-ne_0/KT} \right] / \left[ \sum_{n=0}^{\infty} e^{-ne_0/KT} \right] \\ &= hv / (e^{hv/KT} - 1) \end{aligned} \quad (1.2.5)$$

考虑一个腔壁损耗很小的大腔体, 设腔尺寸为  $L_x$ 、 $L_y$  和  $L_z$  的平行六面体。腔内谐振子的振动模式满足麦克斯韦方程:

$$\nabla^2 E = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (1.2.6)$$

并且  $K_x^2 + K_y^2 + K_z^2 = 4\pi^2\nu^2/c^2$ ,

$$K_x L_x = K_y L_y = K_z L_z = n\pi$$

满足上述方程和边界条件的驻波解为:

$$E = E_0 \sin K_x x \sin K_y y \sin K_z z \sin 2\pi\nu t$$

由此, 可定义一个  $K$  空间, 在  $K$  空间内允许的振动模式发生在  $K_x = n\pi/L_x$ ,  $K_y = n\pi/L_y$  和  $K_z = n\pi/L_z$  等点处, 若空间的体积为  $V = L_x L_y L_z$ , 则在  $K$  空间点的密度为  $\rho_k = L_x L_y L_z / \pi^3 = V/\pi^3$ , 如图 1.2.1 所示。

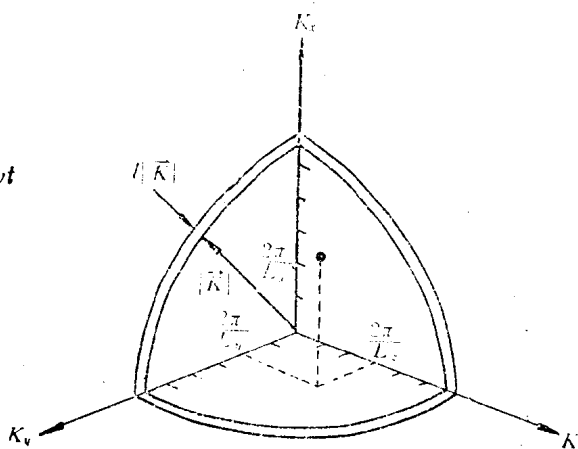


图 1.2.1  $K$  空间的模式分布

由于  $|\vec{K}| = 2\pi\nu/c$ , 因此, 在  $K$  空间第一象限内的球壳上的点就代表着频率为  $\nu = |\vec{K}|c/2\pi$  的所有模式, 于是可求得某一频率范围  $d\nu$  内的模式数目:

$$\begin{aligned} dN &= \rho_k \cdot \frac{1}{8} (4\pi |\vec{K}|^2) dK \\ &= \frac{\pi}{2} \left( \frac{V}{\pi^3} \right) \left( \frac{2\pi\nu}{c} \right)^2 \frac{2\pi}{c} d\nu \\ &= \frac{4\pi V}{c^3} \nu^2 d\nu \end{aligned} \quad (1.2.7)$$

考虑到每一模式允许有两个独立且相互垂直的偏振方向, 因此诸多振子在频率范围  $d\nu$  内的稳定振动频率数目

$$dn = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} d\nu \quad (1.2.8)$$

将  $dn$  乘以谐振子各个能量状态的平均能量  $\bar{e}$ , 即由式 (1.2.8) 乘以式 (1.2.7) 并除

以腔体积  $V$ ，就可以得到腔体单位频率范围的辐射能量密度，

$$d\omega_{b\nu} = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{V^3 d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (1.2.9)$$

由于辐射能在各方向均匀地以光速  $c$  向周围空间传播，所以分配到单位立体角中的能量为  $c\omega_{b\nu}/4\pi$ ，又由于绝对黑体是朗伯辐射体，光谱辐射度  $M_{b\nu}$  与光谱辐射亮度  $L_{b\nu}$  间满足关系  $M_{b\nu} = \pi L_{b\nu}$ ，而腔体单位频率、单位面积、单位立体角中传播的辐射功率为  $L_{b\nu} = c\omega_{b\nu}/4\pi$ ，故：

$$M_{b\nu} d\nu = \frac{2\pi}{c^2} \cdot \frac{h\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu \quad (1.2.10)$$

利用关系  $\nu = c/\lambda$ ，上式还可以写为：

$$M_{b\lambda} d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} d\lambda \quad (1.2.11)$$

或写为：

$$M_{b\lambda} d\lambda = c_1 \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1} d\lambda \quad (1.2.12)$$

式中  $M_{b\lambda}$  —— 黑体的光谱辐射度 [W/m<sup>2</sup>·μm]；

$\lambda$  —— 波长 [μm]；

$T$  —— 绝对黑体的温度 [K]；

$h$  —— 为普朗克常数，

$$h = 6.626196 \times 10^{-34} \text{ [W} \cdot \text{s}^2 \text{]}；$$

$K$  —— 玻尔兹曼常数，

$$K = (1.38054 \pm 0.00018)$$

$$\times 10^{-2} \text{ [W} \cdot \text{s/K]}；$$

$c$  —— 真空中的光速，

$$c = (2.997925 \pm 0.00003)$$

$$\times 10^8 \text{ [m/s]}；$$

$c_1$  —— 第一辐射常数，

$$c_1 = 2\pi hc^2 = (3.7415 \pm 0.0003)$$

$$\times 10^8 \text{ [W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2 \text{]}；$$

$c_2$  —— 第二辐射常数，

$$c_2 = hc/K = (1.43879 \pm 0.00019) \times 10^4 \text{ [}\mu\text{m} \cdot \text{K]}。$$

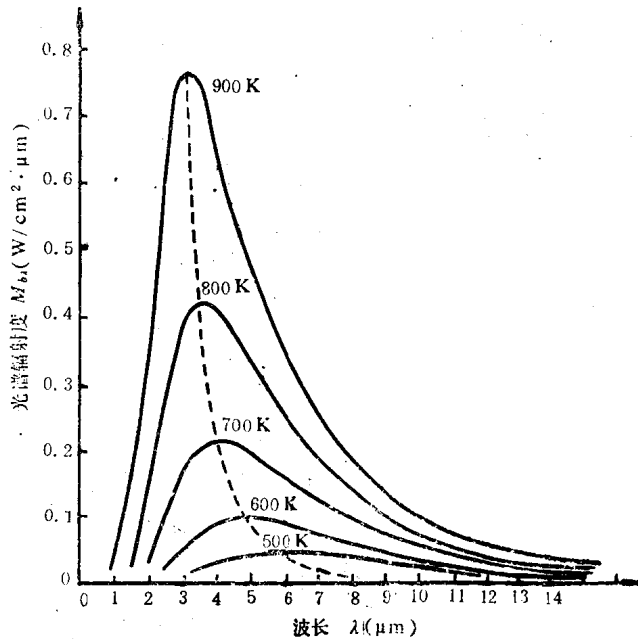


图 1.2.2 黑体辐射  $M_{b\lambda} \sim \lambda$  关系曲线

式 (1.2.10) 至 (1.2.12) 即为著名的黑体辐射普朗克公式。它给出了黑体辐射的光谱分布函数，图 1.2.2 是几种温度时的  $M_{b\lambda} \sim \lambda$  关系曲线。

(二) 绝对黑体全波积分辐射度——斯蒂芬-玻尔兹曼定律。

由普朗克绝对黑体光谱辐射度公式 (1.2.11)，对全波长  $\lambda$  从  $0 \rightarrow \infty$  积分可得到绝对黑体的全波积分辐射度的表达式，此即斯蒂芬-玻尔兹曼定律：

$$M_b = \int_0^{\infty} M_{b\lambda} d\lambda = c_1 \int_0^{\infty} \frac{d\lambda}{\lambda^5 (e^{-c_2/\lambda T} - 1)}$$

$$= \frac{c_1 \pi^4}{15c_2^4} T^4 = \sigma T^4 \quad (1.2.13)$$

其中  $\sigma$  称为斯蒂芬-玻尔兹曼常数， $\sigma = c_1 \pi^4 / 15c_2^4 = (5.6697 \pm 0.0029) \times 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4]$ ； $T$  为绝对温度 [K]； $M_b$  的单位是  $\text{W}/\text{cm}^2$ 。

式 (1.2.13) 说明，随温度  $T$  的升高，绝对黑体的辐射全波长能量密度将急剧增加。

(三) 绝对黑体光谱辐射度峰值波长与温度的关系——维恩位移定律

由式 (1.2.12)，令  $dM_{b\lambda}/d\lambda = 0$ ，可得：

$$\lambda_m T = b = (2897.8 \pm 0.4) [\mu\text{m} \cdot \text{K}] \quad (1.2.14)$$

此式说明，绝对黑体辐射最大值相应的波长随温度升高而向短波方向移动。将式 (1.2.14) 代入式 (1.2.11) 可求得黑体的光谱辐射度峰值公式：

$$M_{b\lambda_m} = bT^5 \quad (1.2.15)$$

其中常数  $b = 1.2862 \times 10^{-11} [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{K}^5]$ 。

### 1.2.2 人工黑体及其辐射特性

自然界中虽然没有绝对黑体，但可制造出接近绝对黑体的人工黑体。图 1.2.3 是一个典型的腔型人工黑体辐射源的结构示意图，它由腔体芯、腔体电加热绕组、测量与控制腔体温度的铂电阻温度计和控制电路等几部分组成。

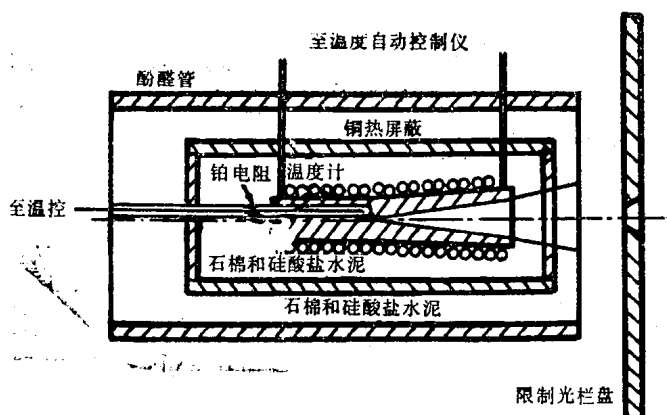


图 1.2.3 腔型人工黑体辐射源的结构

腔型人工黑体的腔芯通常采用具有氧化层的不锈钢或石墨、陶瓷、铜等材料制成，腔壁的发射率  $\epsilon$  一般在 0.8 以上，腔芯的内壁多采用球形、圆柱形或圆锥形，但以圆锥形为多，腔芯外面绕有电热镍铬丝，并包有薄石棉布和硅酸盐水泥等保温材料。腔底插入铂电阻温度计或热电偶用以指示腔底温度，并通过电子电路控制腔芯温度。

人工黑体的有效发射率  $\epsilon_0$  与腔体形状、腔体开口大小、腔壁发射率  $\epsilon$  以及腔体控温精度有关。很多研究者根据热辐射的传递规律，在一定的假设条件下，采用不同的处理方法导出了人工黑体的有效发射率  $\epsilon_0$  的表达式，其中被大家广为使用的典型表示式，是

古费 (Gouffé) 的理论计算结果。其表达式为:

$$e_0 = \frac{\varepsilon \left[ 1 + (1 - \varepsilon) \left( \frac{A}{S_i} - \frac{A}{S_0} \right) \right]}{\left( \varepsilon \left( 1 - \frac{A}{S_i} \right) + \frac{A}{S_i} \right)} = \varepsilon'_0 (1 + k) \quad (1.2.16)$$

式中  $\varepsilon'_0 = \varepsilon / \left[ \varepsilon \left( 1 - \frac{A}{S_i} \right) + \frac{A}{S_i} \right]$ ,

$$K = (1 - \varepsilon) \left( \frac{A}{S_i} - \frac{A}{S_0} \right);$$

$e_0$ ——黑体的有效发射率;

$\varepsilon$ ——腔壁材料的发射率;

$A$ ——腔口开孔面积 ( $\text{cm}^2$ );

$S_i$ ——包括腔口面积在内的腔内壁总面积 ( $\text{cm}^2$ );

$S_0$ ——垂直于腔口平面方向, 直径等于腔口平面到腔底最深点的等效球体表面积 ( $\text{cm}^2$ )。

对于球形腔体,  $S_i = S_0$ ,  $k = 0$ ; 对其它形状的腔体,  $k$  可正可负, 但接近于零。由于腔体开口面积和腔内壁总面积与开口的半径  $r$  以及腔长  $L$  有关, 因此不同形状的腔体有效发射率不同, 图 1.2.4 给出了计算球形腔、圆柱腔和圆锥腔人工黑体有效发射率的图解方法。图的下半部给出了  $A/S$  作为  $L/R$  的函数的曲线。对某种形状腔体,

查出  $A/S$  值, 再向上作垂线与腔壁的  $e$  值曲线相交, 然后由此点向左作水平线, 便可查出  $e'_0$  的值, 将  $e'_0$  乘以  $(1 + k)$  便得到  $e_0$  的值。

由古费公式得到的一个重要结论是:  $L/R$  越大,  $e_0$  越大; 对相同的  $L/R$  值, 球形腔体的  $e_0$  最大, 圆柱腔次之, 圆锥腔最小。但圆锥腔易于加工和均匀加热, 因此多被采用。

腔形黑体的主要特点是有效发射率高, 其缺点是视场小、造价高, 不宜附加在仪器上使用, 常作为实验室中校准辐射源使用。附加在仪器上作为相对标准的黑体, 多采用平面型黑体。平面型黑体由蜂窝列阵空腔制成, 总面积可以做的较大。典型的平面型黑体采用铝蜂窝空腔元, 每个单元腔宽几 mm, 深二十几 mm, 壁厚只有

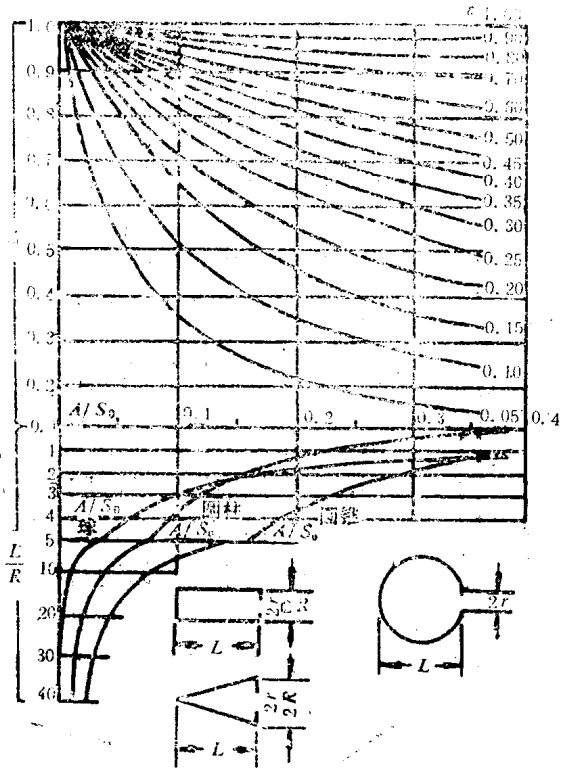


图 1.2.4 腔体有效发射率  $e'_0$  的图解计算

0.05mm, 用高比辐射率黑漆涂黑, 整个列阵有可高达 0.99 的有效比辐射率。平面型黑体采用温差电阻件的电流源加热或致冷腔列阵, 由热电偶测量它的温度, 改变温度组件的电流脉冲宽度可以保持所需要的控温精度。

### 1.2.3 通用辐射源及其发光特性

除了黑体以外, 能斯特炽热灯、硅碳棒和各种金属蒸气放电光源是常用的人工辐射源。这些人工辐射源的一般结构和辐射特性简述如下。

#### (1) 能斯特炽热灯

能斯特炽热灯由耐热材料如氧化锆、氧化钇、氧化钍或氧化铍等制成, 通常做成圆柱形或管形结构, 管子两端由铂引线将其与工作电源相联。因为材料的电阻率在环境温度时很大, 工作电压不足以使其点燃, 因此需要采用外加火焰或附加电加热的方法实现热起动, 使之发出热辐射。能斯特灯起动后, 由于它的负电阻温度特性会使电流增加, 为避免灯管烧坏, 电源电路中需设置限流器。

能斯特灯的工作色温为 1500~1950K, 辐射波长在中红外至远红外之间, 是实验室中常用的一种辐射源。

#### (2) 碳化硅棒

利用碳化硅棒或管, 使其通电发热, 工作色温可达 1500K 左右, 主要发射  $15\mu\text{m}$  以下的热辐射。碳化硅棒长几 cm, 在直径 6~8 mm, 直接通电, 不用预热, 使用方便。

#### (3) 钨丝灯

钨丝灯广泛应用于光度测量、光辐射测量、光谱测量、感光学、高温测定等许多方面, 其工作温度高达 3300K, 在可见光波段辐射选择性好。若在玻泡内充以惰性气体, 并加装红外透射窗口, 也可作为近红外  $3\mu\text{m}$  以内的辐射源。图 1.2.5 是它的光谱辐射特性。

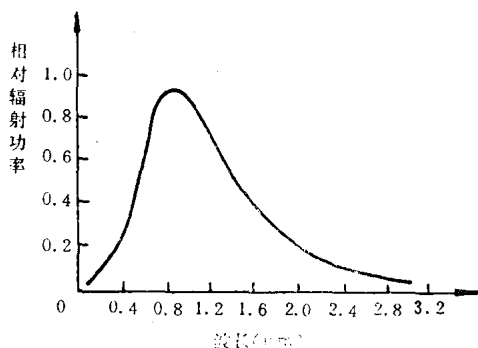


图 1.2.5 钨灯的光谱辐射特性

#### (4) 金属蒸气灯和放电光源

这是一类将金属蒸气封闭起来的放电光源, 常用的有水银灯、钠光灯、紫外灯和光谱灯等。它们是电流通过气体媒质时产生放电现象的辐射源。

气体的放电过程有辉光放电和弧光放电两种。辉光放电过程发生在低气压情况。气体或金属蒸气的辉光放电辐射光谱是一些不连续的线状或带状光谱。低压钠光灯(发出波长为  $589\mu\text{m}$  的黄光)和低压水银灯(发出  $253.7\mu\text{m}$

的紫外谱线)都是典型的辉光放电光源。当气压较高时, 放电电流密度和粒子浓度增大, 由辉光放电转变为弧光放电。工作在弧光放电情况下的高压水银灯, 随气压的增大, 可见光与红外成分的谱线都有所增加, 甚至形成一系列尖峰连续光谱。充以氩、氦、氖、氙等惰性气体的高压放电灯应用也很广泛, 它们可以获得较宽的光谱范围, 甚

至接近太阳的光谱。高压汞灯就常被人们称之为小太阳。图 1.2.6 至图 1.2.9 是几种典型金属蒸气灯的放电辐射光谱。

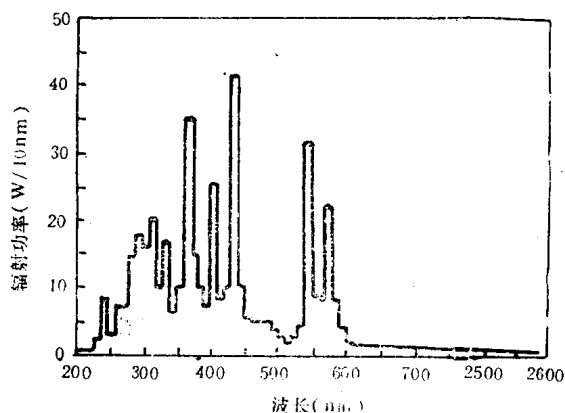


图 1.2.6 毛细管汞灯的光谱能量分布

在大气中石墨电极间通电产生的弧光放电伴随着强烈的弧光辐射，弧间电子的高速运动撞击电极可产生高达  $3\ 800\sim 4\ 000\text{K}$  的高温，其辐射光谱十分接近相应温度的黑体辐射。

#### 1.2.4 目标辐射与背景辐射

探测目标或识别对象的辐射称为目标辐射，探测目标或识别对象以外的辐射称为背景辐射。目标辐射一般具有较明显的稳定性，而背景辐射则往往具有突出的随机特点。

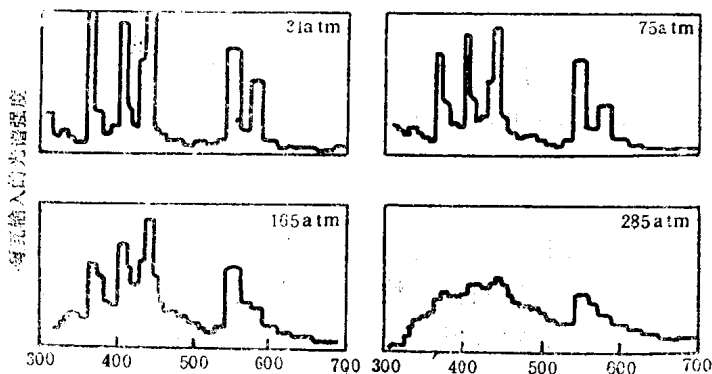


图 1.2.7 有连续区域背景的高压汞灯的发射光谱

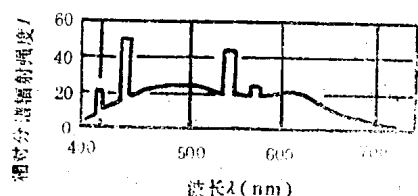


图 1.2.8 日光灯的光谱分布

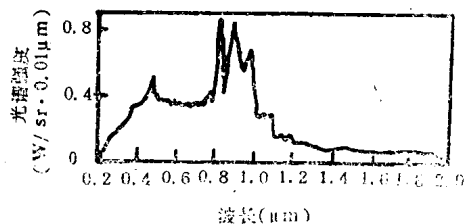


图 1.2.9 直流汞灯的光谱分布

目标辐射的光谱分布和空间分布取决于辐射体的材料、表面状态、外形、温度和表面发射率，由于目标的复杂性，对于特定目标的辐射特性要作具体的分析和估计，没有确定的统一规则，但多数目标都可看做是灰体。

各类飞机、导弹、火箭、汽车等都是很重要的温度辐射源，它们的发动机机壳、喷气尾管以及高速飞行器的外皮都有很强的辐射度，但不同的目标，辐射的强度和分布有很大的差别。螺旋桨飞机发动机的外壳温度较低 ( $80\sim 100\text{℃}$ )，排气尾管部分温度较高 ( $650\sim 800\text{℃}$ )，而喷气飞机的尾焰和火箭、导弹的排气喷管，则有很强的辐射 (温



度可高达1900K)。

人体目标的辐射率也是很高的。在 $4\mu\text{m}$ 以上波长时人体皮肤的比辐射率平均值可达0.99，但是皮肤温度是皮肤和周围环境之间辐射交换的复杂函数，皮肤温度为 $32^\circ\text{C}$ 时，大约有32%的辐射能量处在 $8\sim 13\mu\text{m}$ 波长，仅有1%的辐射能量处于 $3.2\sim 4.8\mu\text{m}$ 波段，而穿着衣服时这些数值则会降低。

天空和地面是主要的背景辐射源。

天空背景辐射主要取决于太阳和星空的辐射以及大气层对太阳光的散射和自身辐射。太阳是一个接近6000K黑体的辐射源，辐射峰值波长为 $0.48\mu\text{m}$ 。在大气层外地球和太阳的平均距离处，与太阳辐射相垂直的表面上的太阳辐射照度为 $1353\text{W}/\text{m}^2$ ，通常把它称为太阳常数。图1.2.10是地球大气层以外的太阳光谱辐射照度和海平面的太阳光谱辐射照度。图中同时标出了相应5900K黑体的光谱辐射分布以及大气对太阳光谱的吸收。天空行星体的辐射是它们的固有温度辐射和漫反射太阳辐射两部分分量的总和。大气密度较大的金星、地球和火星的温度辐射比较稳定，而大气稀薄或完全没有大气的行星和卫星，由于周期性温度变化很大，因此辐射功率以及反射太阳的辐射有周期性很大的变化，并且与其表面状态和时间有关。

地面辐射，在小于 $3\mu\text{m}$ 的光谱区，以对太阳辐射的漫反射和大气散射为主，地表面的自身温度辐射可以忽略；在大于 $4\mu\text{m}$ 的光谱区，地面的自身辐射起主要作用。

图1.2.11是不同地面物在 $1\sim 6\mu\text{m}$ 的光谱辐射亮度。在夜间，由于没有太阳辐射，只有地面的热辐射，地球相当于一个280K的灰体，因此，地面热辐射的峰值波长约为 $10\mu\text{m}$ 。

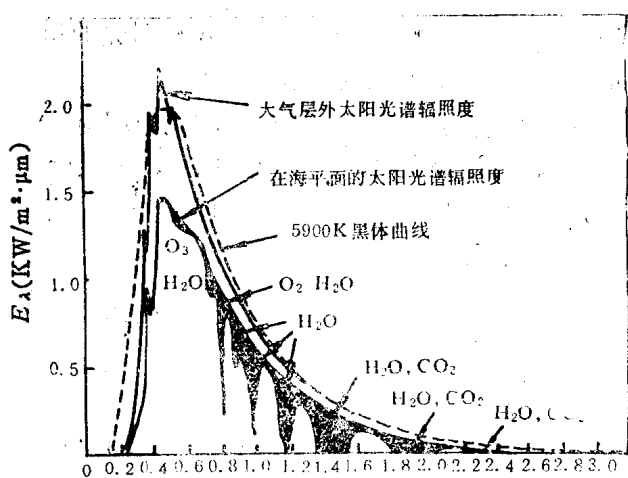


图 1.2.10 太阳的光谱辐射分布

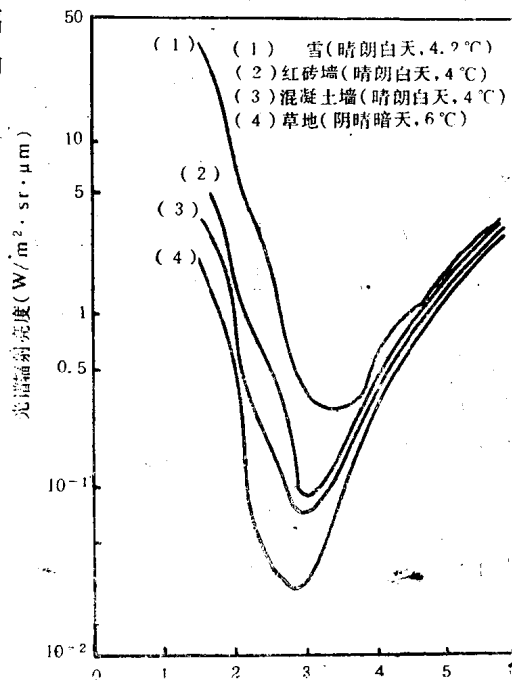


图 1.2.11 地面物 $1\sim 6\mu\text{m}$ 的光谱辐射

### § 1.3 受激辐射与激光器

在一定温度下，物体的高能态原子能够自发地跃迁为低能态，并伴随有光辐射发