

光学检测原理与技术

杨性愉 编著



内蒙古大学学术丛书

内蒙古大学出版社

前 言

本书是编者以近年来为物理系高年级本科生和研究生讲授“光学检测”课程的讲义为基础，结合从事光学检测方面的科研实践编写而成的。本书的内容注重于阐明基本原理和物理概念，同时又着眼于技术的实际应用。

本书重点介绍各种光谱仪器的原理、结构、性能，光谱检测方法和光辐射检测、微弱光信号检测技术。全书共分七章：第一章为光学检测的物理基础；第二章介绍光学检测中常用的电光源和激光光源；第三、四、五章介绍各种分光光谱仪和干涉光谱仪的原理、结构、性能及光谱检测方法；第六章介绍各种光辐射探测器；第七章介绍微弱光信号检测技术。本书内容尽可能地反映了目前正在发展中的先进的光学检测技术，可以使读者在掌握光学检测主要内容的基础上对光学检测当前的研究水平和今后的发展方向有所了解。

本书可作为高等院校光电子学、物理电子学及物理、应用物理专业研究生和高年级本科生的专业基础课教材，亦可供从事与光学检测研究有关的科技人员参考。

本书承冯启元教授审阅全稿并提出许多宝贵的意见，编者对此表示衷心的感谢。编者还想借此机会对沈寿春、母国光、巴恩旭先生给予的指导表示衷心的感谢，对李润林高级工程师给予的帮助表示衷心的感谢。作者在编写本书的过程中参考和引用了许多文献、专著，得到很多同志的帮助，黄永明、陈京珍同志绘制了本书的插图，宋晓琴同志协助校对，为此深表谢意。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中的错误及不当之处必定不少，热忱希望读者批评、指正。

编者

1994, 9

目 录

第一章 光学检测的物理基础 ... (1)

§ 1.1 光的性质 (1)

1.1.1 电磁波谱 (1)

1.1.2 光的特性 (1)

1.1.3 光的本质 (3)

§ 1.2 光的发射和吸收 (4)

1.2.1 两种不同形式的光的发射 (4)

1.2.2 光的吸收、受激发射和自发发射 (6)

1.2.3 热辐射 (8)

§ 1.3 激光 (11)

1.3.1 粒子数反转 (11)

1.3.2 激光器的组成 (13)

1.3.3 激光振荡的阈值条件 (16)

1.3.4 增益饱和与稳定态的建立 (18)

1.3.5 激光器的振荡模式 (20)

1.3.6 激光的特性 (22)

§ 1.4 光与物质的相互作用 (24)

1.4.1 光的反射和折射 (24)

1.4.2 光的吸收 (27)

1.4.3 光的色散 (31)

1.4.4 光的散射 (35)

§ 1.5 原子分子光谱 (36)

1.5.1 原子分子光谱概述 (36)

1.5.2	单位与换算	(41)
1.5.3	光谱线的展宽和线型	(43)
§1.6	光电效应	(50)
1.6.1	光电子发射效应	(50)
1.6.2	光电导效应	(52)
1.6.3	光伏效应	(53)
§1.7	辐射度学量和光度学量及单位	(54)
第二章	光源	(60)
§2.1	常用电光源	(60)
2.1.1	热光源	(60)
2.1.2	气体放电灯	(61)
§2.2	常用激光光源	(66)
2.2.1	氦氖激光器	(66)
2.2.2	二氧化碳激光器	(71)
2.2.3	氮分子激光器	(78)
2.2.4	准分子激光器	(80)
2.2.5	氩离子激光器	(83)
2.2.6	红宝石激光器	(86)
2.2.7	掺钕钇铝石榴石激光器	(88)
2.2.8	钕玻璃激光器	(90)
2.2.9	半导体激光器	(91)
2.2.10	染料激光器	(94)
第三章	单色仪	(102)
§3.1	色散棱镜	(102)
§3.2	平面衍射光栅	(112)
§3.3	凹面光栅	(122)
§3.4	单色仪的基本结构类型	(128)

§ 3.5	单色仪的基本特性	(134)
§ 3.6	双单色仪	(145)
第四章 分光光谱仪		(150)
§ 4.1	发射光谱仪	(150)
4.1.1	摄谱仪和光电直读光谱仪	(150)
4.1.2	发射光谱仪的光源和聚光系统	(152)
4.1.3	发射光谱仪的主要技术性能	(163)
§ 4.2	分光光度计	(169)
4.2.1	紫外—可见分光光度计	(169)
4.2.2	红外分光光度计	(172)
4.2.3	原子吸收分光光度计	(174)
4.2.4	荧光分光光度计	(178)
4.2.5	激光喇曼分光光度计	(180)
4.2.6	分光光度计的主要性能	(189)
第五章 干涉光谱仪		(198)
§ 5.1	法布里—珀罗干涉仪	(198)
5.1.1	平面法布里—珀罗干涉仪	(198)
5.1.2	共焦球面法布里—珀罗干涉仪	(213)
§ 5.2	傅里叶变换光谱仪	(217)
§ 5.3	干涉选择调幅光谱仪	(224)
第六章 光辐射探测器		(239)
§ 6.1	光辐射探测器概述	(239)
6.1.1	光辐射探测器的分类	(239)
6.1.2	光辐射探测器的性能参数	(240)
6.1.3	辐射噪声 (光子噪声)	(246)
6.1.4	光辐射探测器的噪声	(246)
6.1.5	探测器的最小可探测功率	(251)

7·3·2	Boxcar 平均器的工作方式	(378)
7·3·3	Boxcar 平均器的性能	(381)
7·3·4	基线取样与双通道 Boxcar 平均器	(387)
7·3·5	数字多点平均器.....	(389)
7·3·6	取样积分器的应用.....	(391)
§7·4	光子计数器	(394)
7·4·1	光子计数方法的基本原理.....	(395)
7·4·2	用于光子计数器的光电倍增管.....	(398)
7·4·3	光子计数系统.....	(408)
7·4·4	误差来源和处理方法.....	(414)
7·4·5	光子计数方法的信噪比.....	(421)
7·4·6	光子计数器的应用.....	(424)
§7·5	光学多道分析仪	(426)
7·5·1	光学多道检测概述.....	(427)
7·5·2	光学多道探测器.....	(429)
7·5·3	光学多道分析仪的结构、功能和使用	(442)
7·5·4	光学多道分析仪的应用.....	(452)

第一章 光学检测的物理基础

§ 1.1 光的性质

1.1.1 电磁波谱

电磁波也称电磁辐射,其重要的特征参数是波长(或频率、波数)。整个电磁波谱按波长排列可以划分成许多不同名称的波段,如图 1—1 所示。

属于光辐射范围内的有紫外辐射、可见光和红外辐射,其波谱总称为光学波段。可见光有不同的颜色,实质上是波长不同的光在人眼中所引起的不同感觉。可见光的波长范围约为 $0.38\sim 0.78\mu\text{m}$ 。红外辐射的波长范围约为 $0.78\sim 300\mu\text{m}$,红外辐射又可按波长划分为近红外($0.78\sim 3.00\mu\text{m}$)、中红外($3\sim 30\mu\text{m}$)及远红外($30\sim 300\mu\text{m}$)辐射。紫外辐射的波长范围约为 $0.01\sim 0.38\mu\text{m}$,紫外辐射又可按波长划分为近紫外($0.20\sim 0.38\mu\text{m}$)、真空紫外($0.01\sim 0.20\mu\text{m}$)辐射。

1.1.2 光的特性

光学是一门有悠久历史的学科,几何光学、波动光学和量子光学从不同的方面来研究光的特性。光的主要特性有:

1. 光在介质中的传播服从费马原理。费马原理指出:光从空间的一点到另一点是沿着光程为极值的路径传播的。或者说,光

沿光程值为最小、最大或常量的路径传播。费马原理和下述几何光学的基本定律是一致的。

(1) 光的直线传播定律: 在均匀介质中, 光沿直线传播。即在均匀介质中, 光线为一直线。

(2) 光的独立传播定律: 不同方向或由不同物体发出的光线的相交, 对每一光线的独立传播不发生影响。

(3) 光的反射和折射定律: 当光线由一介质进入另一介质时, 光线在两个介质的分界面上被分为反射光线和折射光线。对于这两条光线的进行方向, 可分别由反射定律和折射定律来表述。反射定律的内容是, 入射光线、法线和反射光线在同一平面内, 并且反射角等于入射角。折射定律的内容是, 入射光线、法线和折射光线在同一平面

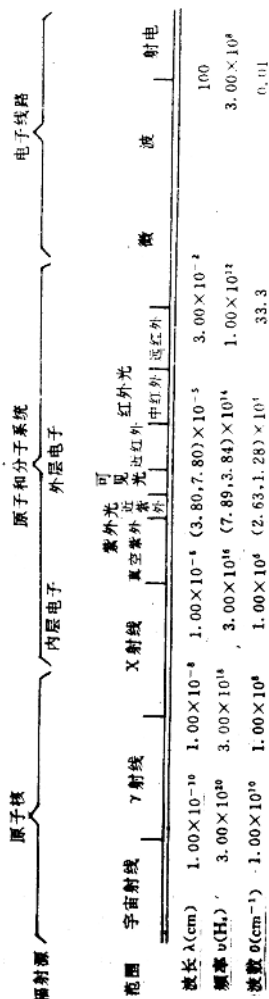


图 1-1 电磁波谱图

内，并且入射角的正弦与折射角的正弦之比，是一个取决于两介质光学性质及光的波长的常数。

2. 光的干涉：对于满足相干条件的两个或两个以上的光波，在它们相交的区域，可以发生光强度增加或减小的现象。光的干涉是光的波动性的一种表现。

3. 光的衍射：光在前进过程中，无论是波面受到障碍屏的限制，还是波面上各处的振幅分布不均匀，光的传播行径都与几何光学有差异。光的衍射是光的波动性的一种表现。

4. 光的偏振：光是横电磁波，在与光束传播方向相垂直的平面内，如果电矢量在各个方向上都是相等的，则该光束是各向同性的自然光；如果电矢量不再是各向同性的，这就是偏振光。例如，由自然光在两透明介质分界面上产生的反射光和折射光将不再是各向同性的，有不同的偏振状态。光的偏振是光的波动性的一种表现。

5. 光子：根据光的粒子学说，认为光是由粒子所组成。光的粒子具有能量，物质吸收或发射的光的能量是不连续的，这种能量的最小单位称为光子。光子的能量与光的频率成正比。即

$$E=h\nu=h\frac{c}{\lambda} \quad (1-1)$$

式中 $h=6.6256\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$ ，称为普朗克常数。可以看出，不同波长的光子具有不同的能量。波长愈长，光子能量愈小；波长愈短，光子能量愈大。

1.1.3 光的本质

光既然在某些实验中表现出波的性质，而在另一些实验中表现出粒子的性质，那么，光就应同时具有波的性质和粒子的性质，即光的波、粒二象性。这种二象性在表示光子能量的(1-1)式中表现得特别明显。等号的左边表示微粒的性质，即光子的能量

E; 等号的右边则表示波动的性质, 即电磁波的频率 ν 和波长 λ 。这两种性质通过普朗克常数 h 定量地联系了起来。显然, 这种联系决不是偶然的。

实验还进一步证明, 实物粒子 (例如电子) 也具有波粒二象性, 粒子的动量和波长可以用德布罗意方程式

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (1-2)$$

联系起来。

这样, 不仅光有波粒二象性, 客观的实物也有波粒二象性, 波粒二象性是普遍的。从统计的观点来看, 波在某时刻和空间某点的“强度” (振幅绝对值的平方) 就是该时刻在该点找到粒子的“几率”。但是, 光既不是经典物理学中的波, 也不是经典物理学中的粒子, 也不是这样和那样的混合物。

电磁波的波长愈短, 其粒子性表现得愈明显; 波长愈长, 其波动性表现得愈明显。例如, γ 射线的波长极短, 在处理它的问题时, 往往可以把它当作粒子看待, 不必考虑它的波动性。无线电波的波长很长, 我们就可以把它当作波, 用波动方程处理它, 无需考虑它的粒子性。对于光学检测所涉及的光学波段, 光的粒子性和波动性都表现得很明显, 因此, 可以根据问题的性质, 或者把它当作粒子, 或者把它当作波。

§ 1·2 光的发射和吸收

1·2·1 两种不同形式的光的发射

物体发射光能有两种不同形式。第一种形式, 物体在发射辐射过程中不改变内能, 只要通过加热来维持它的温度, 辐射就可继续不断地进行下去。这种辐射称热辐射或称温度辐射。任何物

体，固体、液体、甚至相当厚的气体都发射这种辐射。温度低（如室温）的物体，辐射不可见的红外光。加热到 500°C 左右，开始辐射一部分暗红的可见光。温度更高，波长较短的辐射丰富起来，大约在 1500°C 时开始发出白光，其中还有相当多的紫外光，热辐射的光谱是连续光谱，不同波长的能量随波长连续改变。

第二种形式，物体在发射辐射过程中不能仅用维持其温度来使辐射继续下去，而要依靠其它一些激发过程来获得能量以维持辐射。这种辐射称为“发光”（luminescence）。维持“发光”的来源是多种多样的，但也不外乎下列几方面：

1. 物体中的原子或离子受到被电场加速的电子的轰击，使原子中的电子受到激发。当它由激发状态回到正常状态时，就会发出辐射，这一过程称电致发光。如稀薄的气体或蒸气在放电管中所发出的辉光，就是这种过程。

2. 物体被光照射或预先被照射而引起它自身的发射，称光致发光。荧光和磷光是属于这一类。荧光是在光照停止后几乎立即消失，激发态寿命约在 $10^{-9}\sim 10^{-8}\text{s}$ 。而磷光则能持续一段时间，其寿命约为 $10^{-3}\sim 10\text{s}$ 。

3. 由于化学反应而发光称化学发光。例如磷或腐物中的磷在空气中被缓慢氧化而发光。

4. 物体加热到一定温度也会发射辐射，称热发光。本生火焰中放入钠或钠盐就能发出钠的黄光。热发光和热辐射不同，后者在任何温度下都在进行，而前者要达到一定温度后才产生，达到一定温度，火焰中的粒子（原子、分子、离子、电子）有足够的动能去碰撞钠原子，使钠原子激发。

当然上面所提的几种过程并不是绝然分得很清楚的。化学发光也可能是由于化学反应产生足够的热能或电能而引起的，电弧中同时存在电激发与热激发。但是它们共同的特点都是非平衡辐射，不能仅用温度来描述；它们的光谱主要是线光谱、带光谱，但

也有连续光谱（例如弧柱中的固体质点及炽热的电极头所发出的就是连续光谱）。

1·2·2 光的吸收、受激发射和自发发射

具有能级 E_1 和 E_2 的原子（离子或分子，下同），当能级间符合跃迁选择定则时，处于高能态 E_2 的原子可发射光，处于低能态 E_1 的原子则可吸收光，如图 1—2 所示。光的频率由玻尔关系式给出

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (1-3)$$

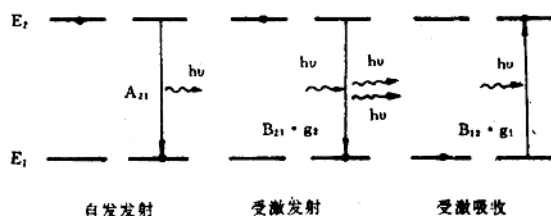


图 1—2 光的吸收、受激发射和自发发射

原子总是力图使自己的能量状态处于最低值，基态的能量最低，所以它处于基态最稳定。如果一个外来光子的能量 $h\nu$ 正好等于 $E_2 - E_1$ ，当它照射到能量为 E_1 状态的原子上时，则此原子就会吸收光子的能量使自己处于 E_2 的激发态。这种情况通常叫做光的受激吸收，简称光的吸收。一个原子每秒内吸收一个光子的几率为 dP_{12}/dt ，与入射的能量为 $h\nu$ 的光子数密度成正比，即正比于入射光谱能量密度 $\rho(\nu)$ ，可表示为

$$\frac{d}{dt}P_{12}=B_{12}\rho(\nu) \quad (1-4)$$

常数 B_{12} 称为受激吸收的爱因斯坦系数。

原子被激发到较高能级 E_2 上后，并不稳定，它必然还要跃迁到较低的能级上去。这种完全没有受到外界的作用，仅由其本身运动所导致的向低能级的跃迁称为自发跃迁。伴随这种跃迁的光辐射称为自发辐射。这种自发辐射跃迁完全是随机发生的、与外界条件无关的统计现象。日常所接触到的各种普通光源，如电灯、日光灯、高压汞灯、氙灯等等发出来的光，都是由自发辐射跃迁而产生的。在一个由大量原子组成的系统中，由于许多原子都各自独立地、彼此无关地进行自发辐射，所以发出光的方向既不一致，初相位也不同。因此，普通光源发出的光是向四面八方发射的，相干性也很差。一个分子每秒内自发发射一个 $h\nu$ 光子的几率，取决于分子的结构和所选择的跃迁 $E_2 \rightarrow E_1$ ，而与外辐射场无关，即有

$$\frac{d}{dt}P_{21}=A_{21} \quad (1-5)$$

A_{21} 称为自发发射爱因斯坦系数或自发跃迁几率。

导致原子从高能级向低能级跃迁的另一个原因是外来光子的带动。如果一个具有 $h\nu_{21}$ 能量的光子照射到已经处于 E_2 激发态的原子上，它就会诱使原子从高能级 E_2 跃迁到低能级 E_1 上去，同时辐射出一个光子。这种辐射称为受激辐射。

由受激辐射跃迁所产生的光子与外来光子有着完全相同的特征：它们的频率是一致的，它们的位相是一致的，它们的传播方向也是一致的。这种受激辐射的发光机制有两个明显的特点：一是原子系统中各发光中心是互相关联的，二是发生一次受激辐射，光子数目就增加一倍，这就是所谓受激放大，这两个特点是和自发辐射有根本区别的。通过受激辐射引起光的放大是激光最基本的概念之一。与式 (1-4) 相似，一个原子每秒内受激发射一个

光子的几率为

$$\frac{d}{dt}P_{21} = B_{21}\rho(\nu) \quad (1-6)$$

常数 B_{21} 称为受激发射的爱因斯坦系数。

可以求出三个爱因斯坦系数 B_{12} , B_{21} 和 A_{21} 之间的关系为

$$B_{12} = \frac{g_2}{g_1} B_{21} \quad (1-7)$$

$$A_{21} = \frac{8\pi h \nu^3}{C^3} B_{21} \quad (1-8)$$

式中 g_i 是能态 E_i 的统计权重。式 (1-7) 表明, 当能级 E_1 和 E_2 的统计权重相等时, 受激发射和吸收的几率相等。

1.2.3 热辐射

1. 辐射度和吸收率

由于外界热量传递给物体而发生的辐射, 称为热辐射。热辐射是一种能达到平衡状态的辐射。在研究热平衡辐射所遵从的规律时, 我们假定物体在发射能量和吸收能量的过程中仅有“热”状态的改变。

(1) 辐射度 $M_\lambda(\lambda, T)$

每单位面积的辐射体, 在温度 T , 属于波长 λ 的每单位波长间隔, 所发出的辐射通量, 称为物体的辐射度 (单色辐射度), 即

$$M_\lambda(\lambda, T) = \frac{d\Phi_\lambda}{d\lambda dA} \quad (1-9)$$

式中 $d\Phi_\lambda$ 为元表面 dA 在波长 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 间隔内的辐射通量, $M_\lambda(\lambda, T)$ 是辐射体的温度 T 和辐射波长 λ 的函数。

(2) 吸收率 $\alpha(\lambda, T)$

在波长 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 间隔内被物体吸收的通量与入射通量之比, 称为物体的吸收率, 即

$$\alpha(\lambda, T) = \frac{d\Phi'_\lambda(\lambda)}{d\Phi_\lambda(\lambda)} \quad (1-10)$$

$\alpha(\lambda, T)$ 是辐射体的温度 T 和辐射波长 λ 的函数, 是一个无量纲的量。

2. 基尔霍夫定律

处于热平衡状态的物体, 其辐射度 $M_\lambda(\lambda, T)$ 和吸收率 $\alpha(\lambda, T)$ 的比值与物体的性质无关, 只是波长 λ 及温度 T 的普适函数。下式是基尔霍夫定律的数学表达式

$$\frac{M_\lambda(\lambda, T)}{\alpha(\lambda, T)} = f(\lambda, T) \quad (1-11)$$

显然, 对于一定波长在一定温度下, 这个比值是与物体性质无关的常数。

3. 黑体

能够在任何温度下全部吸收任何波长的辐射的物体称为绝对黑体, 简称黑体。黑体的吸收率与波长和温度无关, 是等于 1 的常数, 即 $\alpha(\lambda, T) = 1$ 。从 (1-11) 式可知黑体的辐射度 M_{lb} 等于普适函数 $f(\lambda, T)$ 。由此可得

$$M_{\text{lb}}(\lambda, T) = \frac{M_\lambda(\lambda, T)}{\alpha(\lambda, T)} = f(\lambda, T) \quad (1-12)$$

因为一般的物体其 $\alpha(\lambda, T) < 1$, 所以 $M_{\text{lb}}(\lambda, T) > M_\lambda(\lambda, T)$ 。这表明, 对于任何波长, 物体的辐射度永远小于在同一温度下的黑体的辐射度。物体的辐射度 $M_\lambda(\lambda, T)$ 与黑体辐射度 $M_{\text{lb}}(\lambda, T)$ 之比称为该物体的发射率 $\epsilon(\lambda, T)$, 由 (1-12) 式可得

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{M_\lambda(\lambda, T)}{M_{\text{lb}}(\lambda, T)} = \alpha(\lambda, T) \quad (1-13)$$

这表明任何具有强吸收的物体必定发出强的辐射。

在自然界中, 并不存在完全理想的黑体。实际工作时, 黑体可以用表面涂黑的球形或柱形空腔来人为地实现。

4. 普朗克辐射公式

普朗克从辐射能量量子化的假设出发, 导出了黑体辐射能量分布的数学表达式

$$M_{\lambda b}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1} \quad (1-14)$$

$$M_{\nu b}(\nu, T) = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (1-15)$$

式中 c 为光速, k 为玻尔兹曼常数。这两个式子都称为普朗克公式, 只不过 (1-14) 式以波长 λ 为变量, (1-15) 式以频率 ν 为变量, 二者是等价的。

普朗克公式能正确解释已有的一切实验数据。在辐射测量中, 黑体是标准辐射源, 其辐射功率必须用普朗克公式来计算。

从普朗克公式可以导出维恩定律和斯忒藩-玻尔兹曼定律。

(1) 维恩定律 温度增加时, 黑体辐射能量分布曲线的极大值向短波方向移动, 即

$$\lambda_m T = 2896 (\mu\text{m} \cdot \text{K}) \quad (1-16)$$

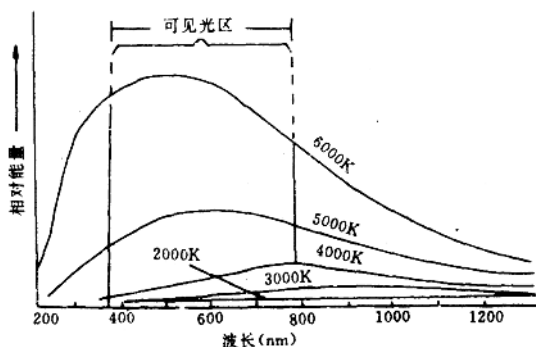


图 1-3 黑体辐射的相对光谱能量分布

式中 λ_m 为黑体辐射能量分布曲线极大值相应的波长, 用 μm