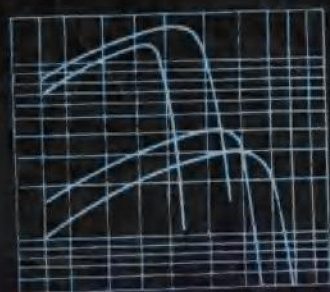


汤定元 糜正瑜等编著



光电器件概论

上海科学技术文献出版社

内 容 简 介

本书是系统介绍紫外——红外波段工作的光电器件专著全。书共分七章,第一章为光电器件的物理学导引,为非物理学专业的读者介绍光电器件的物理基础。其余各章基本上按波段划分,分别介绍光电器件的工作原理、结构、性能参数和使用方式。最后在附录中列出了国内一些生产厂、研究所的最新光电器件产品。

本书是由长期从事光电器件研究工作的有影响的专家执笔,注重实用。可供从事光电子技术、红外技术等专业的科研、生产及应用的科技人员、高校教师、高年级本科生和研究生使用参考;也可供使用光电器件的其它专业的读者参考。

光电器件概论

汤定元 糜正瑜等

*

上海科学技术文献出版社出版发行

(上海市武康路2号)

新华书店经销

昆山市亭林印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 16.625 字数 443,000

1989年10月第1版 1989年10月第1次印刷

印数: 1—3,200

ISBN 7-80513-400-6/T·136

定 价: 9.80 元

《科技新书目》196—308

前 言

利用光电效应把光信息(光能)转变成电信息(电能)的各种器件,通称为光电器件。这里的“光”包括紫外、可见及红外三个电磁波段,通常总称为光学波段。

在激光出现之前,物理学中对光电效应的研究,导致多种具有重要实用意义的、把光信息转变成电信息的光电器件。激光的出现,显示出大量的可能应用,激起了人们的研究热情。其成果之一是,创造出多种把电信息(电能)直接转变成光信息(光能)的电光器件。于是在光与电这两种能量形式之间,有了对称的、互为转换的两类器件:光→电器件和电→光器件,它们的巧妙组合,可以获得数量极大的各种各样的应用。这两类器件再加上光的控制与处理器件、显示器件,就构成了具有广泛应用的光电子技术的基础部件。光电子技术已经有了广泛的应用,还孕育着更多更重要的可能应用。因而受到各国科技界的重视,纷纷把它作为今后一段时期内重点发展的项目。我国的科学技术规划也以光电子技术作为重点发展的项目之一。我们编写这本书,全面介绍光电子技术的一个重要部分——光电器件,也就是希望能对我国的光电子技术的发展有所裨益。

光电子技术的科学基础之一就是近年来发展起来的光电子学。光电子学以研究物质中电子与光子的相互作用为主要任务。光电器件及与其有关的物理研究,就是其中的主要内容之一。因而本书也是光电子学的重要参考读物之一。

光电器件的用途主要有两类:其一是用来察觉微弱光信号的存在和测量光信号的强弱,这里主要考虑的是器件探测微弱光信号的能力。作这一用途的器件,通常被称为“探测器”,或者严格地

称作“辐射探测器”。其二是在自动控制中作为光电转换器，这里主要考虑的是光电转换效能。除这两类主要用途外，还有一些特殊用途。例如，把光电器件作为电源看待，称为光电池。专为转换太阳光能而设计的光电器件，就称为太阳电池。对它们，主要考虑的是光能转变成电能的转换效率。

光电器件所依据的物理基础主要是固体的光电效应，就是固体中决定其电学性质的电子系统直接吸收入射光能，使固体的电学性质发生改变的现象。例如，光电子发射效应、光电导效应、光生伏特效应等等。这里强调“直接”两字。固体中也有一些过程不是电子系统直接吸收光能，而是间接地把光信息转变成电信息，其中主要的是物体吸收光能，其直接效果是它的温度上升，温度的上升再引起电子系统的运动的改变，即引起物体的电学性质的改变。例如：金属或半导体的电阻随温度的变化，温差电偶两端的温度差引起的电动势，某些电介质的自发电极化随温度而变化等等。这些热效应都曾被用来制成性能良好的辐射探测器。被称作热敏型辐射探测器的这些器件虽然不属于光电器件的范畴，但由于它们在红外技术中占有重要地位，其作用又与光电器件的作用相同，因而也把它包括在本书的范围内。

光电器件和热敏型器件又通称为光传感器，辐射探测器则是一个通称。这些不同的名称实际上所指的是同一物理实体，最多不过是考虑的着眼点不同而已。在通称之下有很多品种。它们的研制和生产分属于不同的技术领域，不同的技术领域有着不同的命名习惯。因而各种光电器件缺乏统一的命名规则，甚至同一器件在不同的技术领域有不同的名称，这种状况恐怕难以改变，因此本书也不求统一。各作者所用的器件名称，一律保留，谨在此作一说明。

本书的编写着眼于实用，除简要地介绍各种光电器件的工作原理及特性参数外，也介绍器件的设计考虑和应用方式，并汇集了各种商品器件(或实验室器件)的最新的特性参数。全书分七章。

第一章为光电器件的物理学导引，为非物理学专业的读者介绍光电器件的物理基础。其余各章基本上按波长划分介绍各种光电器件。第二和第三章介绍利用光电子发射效应而发展出来的光电管及成象器件。由于发射现象的特性，这类器件适用于紫外及可见光，近红外区最多用到 $1.3\ \mu\text{m}$ 。第四和第五章介绍响应波段在近红外的半导体光电器件，以硅光伏器件为主。第四章介绍硅光电二极管及三极管，第五章则介绍近红外光电器件的几种特殊类型。第六章介绍各种红外探测器的原理、概况、特性参数及其测量技术以及探测器的应用技术。最后第七章介绍固态成象器件。该章所涉及的响应波长范围原则上包括第二至第六各章所涉及的波长范围。但从目前的技术发展水平来看，比较成熟的还只有响应于可见及近红外的硅电荷耦合器件。因而第七章以介绍硅电荷耦合器件为主。对其它各种形式的固态成象器件，仅作原理性的简略介绍。

本书是集体写作，各作者来自不同的技术领域。各人的写作带有各自的特色，使用的术语也不一致。这是集体写作带来的特点。本书不强求统一。特别是术语，各专业有各自的习惯用语。这里统一了，反而可能引起读者在其它方面的不便。为了弥补这一缺陷，在第一章中，我们对有关辐射及光电器件的术语作了一些说明。本书各章依次由汤定元、何叔嵎、陈伟秀、高啟安、童斐明、陈祖培、方家熊、董亮初等同志执笔，由汤定元糜正瑜同志担任正、副主编。书稿经陈继述同志审阅。

作者对中国科学院上海技术物理研究所的领导和第一、三、六、十研究室以及红外物理开放研究实验室对本书的支持表示衷心的感谢。

由于作者、编者的学术水平有限，书中的错误及不当之处必定不少，敬请读者指正。

目 录

前 言	
第一章 光电器件的物理学导引	1
§ 1.1 光的特性、产生、传播及转化	1
1.1.1 光的特性	2
1.1.2 光的本质	2
1.1.3 光的产生	4
1.1.4 热辐射	6
1.1.5 激 光	9
1.1.6 光在媒质中的传播及转化	11
§ 1.2 固体的光电效应	15
1.2.1 光电导效应	16
1.2.2 光生伏特效应	23
1.2.3 光电子发射效应	30
1.2.4 光扩散效应	32
1.2.5 光磁电效应	32
1.2.6 光子牵引效应	33
§ 1.3 光电器件的噪声	35
§ 1.4 光度学及辐射度学的单位	43
§ 1.5 光电器件的特性参数	47
§ 1.6 成象器件及外差探测	48
参考资料	51
第二章 光电管和光电倍增管	52
§ 2.1 金属和半导体的光电发射	52
2.1.1 金属的光电发射	52
2.1.2 半导体的光电发射	54
§ 2.2 光电阴极	57

2.2.1	光电阴极的主要参量	57
2.2.2	银氧铯阴极	61
2.2.3	铋银氧铯阴极	63
2.2.4	单碱锑化物阴极	64
2.2.5	双碱锑化物阴极	66
2.2.6	多碱锑化物阴极	66
2.2.7	负电子亲和势阴极	68
§ 2.3	光电管与光电倍增管的工作原理及设计考虑	75
2.3.1	光电管的工作原理与设计考虑	75
2.3.2	光电倍增管的工作原理与设计考虑	78
§ 2.4	光电管与光电倍增管的性能参数与测试	82
2.4.1	光电管的特性	82
2.4.2	光电倍增管的性能参数与测试	85
§ 2.5	典型产品及应用	97
2.5.1	典型产品	97
2.5.2	应用	102
	参考资料	114
第三章	摄像管、变象管和象增强器	116
§ 3.1	摄像管的结构和工作原理	116
§ 3.2	摄像管的特性参数与测试	118
3.2.1	灵敏度	118
3.2.2	分辨力	119
3.2.3	光谱响应特性	120
3.2.4	光电转换特性(γ)及灰度	121
3.2.5	惰性	122
§ 3.3	各种类型摄像管	123
3.3.1	注入型和阻挡型靶摄像管	123
3.3.2	硅二极管列阵摄像管	127
3.3.3	二次电子传导摄像管(SEC)和硅电子倍增摄像管(SEM)	129
3.3.4	热释电摄像管	130
3.3.5	单管彩色摄像管	131
3.3.6	摄像管的近期进展	134

§ 3.4	变象管和象增强器	137
3.4.1	变象管、象增强器的工作原理和结构	137
3.4.2	变象管、象增强器的特性参数和测试	141
§ 3.5	象增强器的发展	147
3.5.1	近贴管和倒象管	148
3.5.2	负电子亲和势光电阴极和第三代象增强器	156
§ 3.6	X 射线象增强器	158
3.6.1	结构和工作原理	158
3.6.2	参数及其测试	159
3.6.3	X 射线象增强器的发展	163
§ 3.7	特殊象管	164
3.7.1	用于图象放大、旋转的象增强器	164
3.7.2	空间光调制管	166
3.7.3	二维微光检测管	167
3.7.4	条纹管	169
§ 3.8	应 用	173
3.8.1	在医学上的应用	173
3.8.2	在超高速摄影上的应用	178
	参考资料	183

第四章 硅光电二极管和三极管

§ 4.1	引 言	184
§ 4.2	$P-N$ 结光电二极管	184
4.2.1	$P-N$ 结光电二极管的工作原理	184
4.2.2	$P-N$ 结光电二极管的特性参数及其设计考虑	190
4.2.3	几种典型的 $P-N$ 结光电二极管	196
§ 4.3	光敏三极管	204
4.3.1	光敏三极管的工作原理	204
4.3.2	光敏三极管的主要特性参数及其设计考虑	205
§ 4.4	光电二极管和光敏三极管的工作模式和使用要点	211
4.4.1	应用基础知识	211

4.4.2	基本应用电路	220
4.4.3	国内外典型产品介绍	224
第五章	近红外光伏器件的几种应用	234
§ 5.1	太阳电池	234
5.1.1	太阳电池的转换效率	234
5.1.2	提高太阳电池转换效率的途径	238
5.1.3	太阳电池的材料与结构	243
5.1.4	太阳电池的主要特性及测试	251
§ 5.2	光纤通信用的光接收器	255
5.2.1	III-V 族化合物半导体光二极管	256
5.2.2	II-VI 族化合物半导体光二极管	259
§ 5.3	半导体色敏器件	261
5.3.1	半导体色敏器件的工作原理	262
5.3.2	半导体色敏器件的检测电路	265
5.3.3	半导体色敏器件的应用	267
§ 5.4	光耦合器	268
§ 5.5	光传感器的应用及实例	286
5.5.1	光传感器应用概述	286
5.5.2	光传感器应用实例	290
	参考资料	296
第六章	红外探测器	298
§ 6.1	红外探测器的发展史	298
§ 6.2	半导体光电探测器	301
6.2.1	光电导型探测器	304
6.2.2	光伏型探测器	320
6.2.3	其它光电探测器	333
§ 6.3	热敏型辐射探测器	346
6.3.1	基本工作原理	349
6.3.2	热释电探测器	358
6.3.3	热敏电阻红外探测器	384
§ 6.4	红外探测器的特性参数及其测量	391

6.4.1	特性参数的定义	391
6.4.2	测量响应率和噪声的标准替代法	396
6.4.3	噪声等效功率和探测率的测量	401
6.4.4	响应率和噪声的简易测试法	401
6.4.5	单色探测率测量	402
6.4.6	响应时间常数测量	404
6.4.7	探测器阻抗测量	408
6.4.8	光敏面尺寸及列阵探测器的串音检测	409
6.4.9	外差噪声等效功率测量	411
6.4.10	红外探测器的可靠性因子	412
	参考资料	414
第七章	固态成象器件	420
§ 7.1	CCD 成象器件	421
7.1.1	金属—绝缘体—半导体(MIS)结构的性质	421
7.1.2	CCD 的工作原理	428
7.1.3	线列 CCD 的工作原理	433
7.1.4	面阵 CCD 的工作原理	439
§ 7.2	CCD 成象器件的特性参数及其测量	441
7.2.1	转移效率	442
7.2.2	不均匀度	446
7.2.3	暗电流	448
7.2.4	响应率	450
7.2.5	光谱响应	452
7.2.6	噪 声	455
7.2.7	调制传递函数	458
7.2.8	动态范围与线性度	462
7.2.9	功 耗	463
§ 7.3	其他固态成象器件	465
7.3.1	电荷注入器件(CID)	465
7.3.2	电荷耦合光电两极管器件(CCPD)	467
7.3.3	自扫描光电两极管阵列器件	469
7.3.4	电荷扫描器件(CSD)	471

7.3.5 红外焦平面阵列器件	473
§ 7.4 固态成象器件的应用与国外典型产品	479
7.4.1 线列 CCD 成象器件的应用	479
7.4.2 国外典型产品	485
参考资料	504
附录 产品介绍	506

第一章 光电器件的物理学导引

§ 1.1 光的特性、产生、传播及转化

人眼能感觉的光,实质上是电磁波的一种。电磁波也称电磁辐射,其重要的特征参数是波长(或频率)。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。紫光的波长最短,红光的波长最长,人眼能感觉到的光,其波长约为 $0.40\sim 0.75\mu\text{m}$,波长为 $0.75\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ 属于红外辐射,是一种“不可见的光”,必须借助光电器件才能察觉。红外辐射又可按波长划分为近红外、中红外及远红外辐射。从远红外辐射向长波方向数去,即为毫米波、微波、无线电波,甚低频的无线电波的波长最长可达 10^5m 。

波长为 $0.40\mu\text{m}$ 以下直到 $0.0001\mu\text{m}$ 的电磁波称为紫外辐射,这也是一种“看不见的光”,其中 $0.18\sim 0.0001\mu\text{m}$ 波段又称真空紫外。再向短波方向数去就是X射线、 γ 射线,其最短波长可达到 10^{-17}m 。

整个电磁波谱按波长排列,包括22个数量级。电磁波谱之所以划分成许多不同名称的波段,主要是由于各波段的电磁波的产生、传输及检测等技术各不相同,研究方法不同,自然地形成了不同的科学技术领域。紫外、可见及红外辐射所用的研究方法大体相同,因而总称为“光学波段”。

按照最通用的字典上的注解,“光是能引起视感的电磁波”。为了严格起见,我们把“不可见的光”称为“辐射”、如红外辐射、紫外辐射,有时省去“辐射”两字。“光”字则专指可见光,但是一些复合名词,如“光学”、“光子”、“激光”等保持不变,其中“光”字广指整个光学波段的辐射,象“光子”一词甚至可用于整个电磁波谱。

1.1.1 光的特性

光是最早得到科学研究的自然现象之一，它的一些特性早就被人们所认识。主要的有：

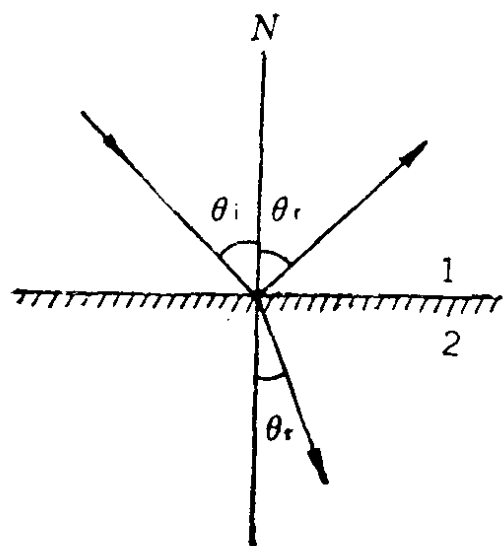


图 1.1.1 光的反射及折射

(1) 光按直线前进，有一定的速度，真空中的光速 $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

(2) 光在传播中碰到两种媒质的交界面时会发生反射(图 1.1.1)，入射光线和反射光线在同一平面内。入射角 θ_i 与反射角 θ_r 相等。

(3) 光线从第一媒质进入第二媒质时(图 1.1.1)，前进方向将发生改变。入射角 θ_i 与折射角 θ_r 的关系服从“折射定律”：

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r. \quad (1.1.1)$$

式中 n_1, n_2 分别为第一和第二媒质的“折射率”，它是光在真空中的传播速度与在该种媒质中的传播速度之比。在一般实验中，第一媒质是大气， $n \approx 1$ ，与真空的相近。

(4) 符合一定条件的两束光相遇时，可以发生强度增加或减小的现象，称为光的“干涉”。

(5) 光速前进过程中遇到极小的障碍物时，也能绕过去，称为光的“衍射”，或“绕射”。

(6) 在与光束传播方向相垂直的平面内，如有办法检测的话，则可发现一般光束是各向同性的。但是当光束以一定的角度入射到玻璃片(或其它媒质)时，反射光和透射光在垂直平面内将不再是各向同性，这种现象称为偏振。

1.1.2 光的本质

在十七世纪末及十八世纪初，对光的本质有两种看法：一种

认为光是由微粒组成,另一种认为光是波动.前者是由牛顿提出,几乎统治了整个十八世纪.在这个时期内,1.1.1节中光的特性,(4)、(5)、(6)条先后被发现,但微粒论难以解释这些特性,而波动论的解释却很自然.因而到十九世纪初,波动论取得胜利,建立了完整的理论.后来的实验也证明了光是电磁波,其主要特征参数为波长 λ 或频率 ν ,两者的关系为:

$$\lambda\nu=c, \quad (1.1.2)$$

c 是光速.

光是横电磁波,其电场和磁场的振动方向相互垂直,且又都与光的传播方向相垂直,电场和磁场的振幅之间有一定的关系.光对电子的作用主要取决于电场,磁场的作用可忽略不计.因此通常讨论光对电子的作用时,只需考虑光波中的电场振动.光在传播过程中,光能密度和功率都与电场振幅的平方成正比.如果电场振动不再是各向同性,这就是“偏振光”.若仅在一个方向上有电场振动,则称为线偏振光.

但是在十九世纪末期,研究光与实物相互作用时,发现很多实验事实无法用光的波动性来解释.因此1900年,普朗克提出了一个革命性的假设:光只能以完全一定份量的能量被吸收或被发射.这一能量份量 E 与光的频率成正比,即

$$E=h\nu. \quad (1.1.3)$$

式中 $h=6.6256\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$,称为普朗克常数.这个能量单元就叫做量子,光的量子又称光子.量子论在解释经典物理学无法解释的实验事实方面,取得了极大的成功,从而开创了二十世纪的近代物理学.

按照量子论的假设,光以一定的能量份量 $h\nu$ 起作用.这个份量虽小但不是无限小,与光的波动具有连续能量是两个迥然不同的概念.因此光子具有粒子的性质.那么“光”究竟是粒子还是波?这个问题曾使物理学家迷惑了一段时间.但按照辩证唯物主义的观点,任何自然现象的性质,不管其矛盾性和复杂性如何,只要它

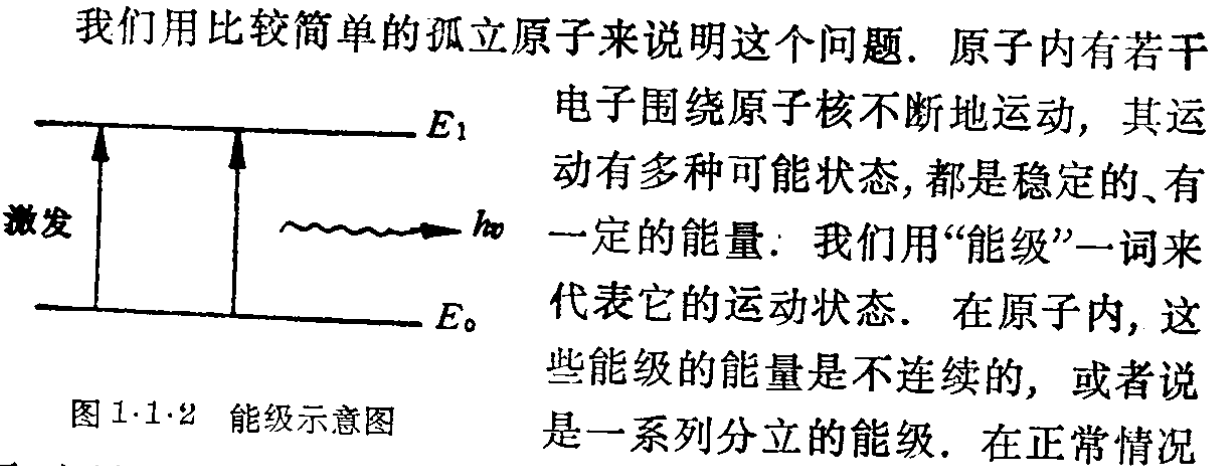
确实存在,就必须包括在物质的概念之内。光既然在某些实验中表现出波的性质,而在另一些实验中表现出粒子的性质。那么,光就应同时具有波的性质和粒子的性质。而从整体来说,它既不是经典物理学中的波,也不是经典物理学中的粒子,也不是这样和那样的混合物。

大量的实验事实表明:电磁波的波长愈短,其粒子的性质表现得愈明显;波长愈长,波的性质表现得愈明显。例如, γ 射线是波长极短的电磁波,在处理它的问题时,往往完全可以把它当作粒子看待,不必考虑它的波动性质。无线电波是波长很长的电磁波,我们完全可以把它当作波看待,用波动方程处理它,无需考虑它的粒子性。

对于本书所涉及的光学波段,粒子性和波动性都表现得很明显。因此,在处理问题时,可以根据问题的性质,或者把它当作粒子,或者把它当作波。

1.1.3 光的产生

光是从实物中发射出来的。因为实物是由大量的各种带电粒子组成的,粒子在不断地运动。当它们的运动受到骚扰时就可能发射出电磁波。



下,电子总是处在能量最低的运动状态,称作“基态”。图1.1.2代表其中的两个运动状态, E_0 为电子的基态。如果有外来的激励,把合适的能量传递给电子,电子就可能进入激发态 E_1 。这个过程是瞬时完成的,所以用“跃迁”一词来称呼它。电子在激发态的运

动只能维持很短的一段时间,很快就要回到基态去,在这个“向下”跃迁的过程中必须把多余的能量($E_1 - E_0$)释放出来.在极大多数情况下,这多余的能量是以光子的形式发射出来.光子的频率为:

$$\nu = \frac{E_1 - E_0}{h}. \quad (1.1.4)$$

因为原子中有很多可能的能级,因而原子受激励后能发射出多种频率的光.这些频率是分立的,用适当的仪器可以把它们显示出来.分立的线状光谱,称为“原子光谱”,其中每一条谱线代表一个频率的光.

任何一块很小的物体都包含大量的原子,采用适当的激励,使小块物体先升华成蒸汽,汽态中的原子都是互不相关的,可以看成是许多孤立的原子.受激励的每个原子都可能发射出光子,大量的光子的总和即为肉眼所能看到或仪器所能测量到的电磁辐射.各个原子发射光子的过程基本上是互相独立的,即使是完全相同的两个能级之间的跃迁,光子发射的时间也有先有后.原子在发射光子时取向也有各种可能,因而光子可向各个方向发射,其电场的振动方向也有各种可能.因此,这小块物体受激励后发射出来的光没有单一的发射方向.用透镜等使其变为平行光后,其电场的振动虽垂直于发射方向,但各个方位都具有同等机会.位相也是混乱的,这样的光就是非相干的“自然光”.

在固体中,情况就更复杂,固体包含着大量互相连系着的原子.原子与原子之间的相互作用使能级发生迁移.对孤立原子中的某一能级来说,有 N 个原子就有 N 个这样的能级.当 N 个原子聚集成固体时,原子间的相互作用使这 N 个能级弥散开,成为能量各不相等的 N 个能级.由于 N 是个极大的数值,而弥散的程度不大,因而实质上固体中电子的能级是一片能量连续的“能带”.电子在两个能量连续的能带之间的跃迁,其跃迁能量也必然是连续的.所以固体在受激励后发射出来的光是连续的光谱,而

不是分立的谱线。同样，固体发射出来的光也都是非相干的自然光。

使气体或固体得到激励的方法很多。如施加电场，辐射照射，加热等等，其中物体受热所发射的辐射称为“热辐射”。鉴于本书讨论的范围，这里将对热辐射作较详细的介绍。

1.1.4 热辐射

热辐射是一种能达到平衡状态的辐射，达到热平衡时的辐射就是所谓黑体辐射。考虑图 1.1.3 所示的密闭空腔，不管腔壁是什么材料做的，如果加热使它保持在恒定温度 T_0 ，那么腔内壁上任一面元 A 发射出来的辐射，总是落在腔壁的另一部分。落在那里的辐射，有一部分被吸收，其余部分又被反射到腔壁的其它部分。因此，不管是从腔壁哪一部分发射出来的辐射，最后总是进入腔壁。在热平衡条件下，任何一面元发射出来的辐射，在频率与强度等方面，总是等于它所吸收的辐射，否则就不是热平衡了。在热平衡条件下，空腔内所有的辐射就必定具有稳定不变的性质，它与腔壁材料的性质无关，仅与腔壁的平衡温度有关。

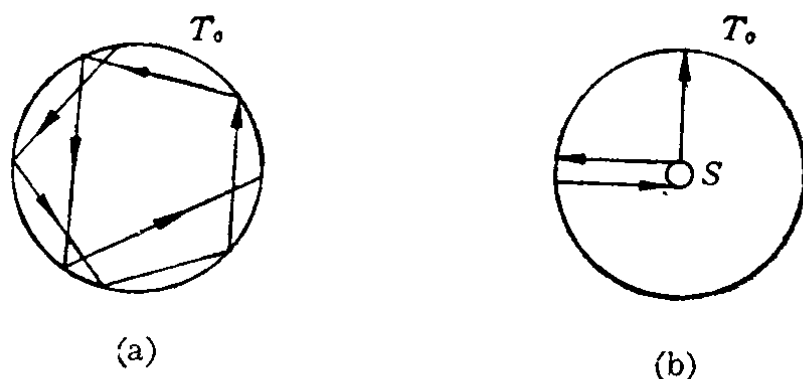


图 1.1.3 空腔辐射示意图

如果空腔内有一个小物体 S (图 1.1.3b)，不管它是什么材料，在热平衡条件下，物体 S 表面所发射的辐射，无论是在频率与强度等各方面，都必定与它所吸收的辐射相等。如果投射到它表面的“辐射照度”为 $E(\text{W}/\text{cm}^2)$ ，物体对辐射的吸收比为 α ，它的