

光电效应 及其应用

甘景忠

福建教育出版社



光电效应及其应用

甘景慧

福建教育出版社

光电效应及其应用

甘 景 慧

福建教育出版社出版

福建省新华书店发行

福建教育出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 1/32开本 3.625印张 75千字

1983年6月第一版 1983年6月第一次印刷

印数：1——2,700册

书号：7159·811 定价：0.32元

前 言

自从1887年H·赫兹发现光电效应迹象，1890年德国人埃尔斯特和盖泰尔合作制成世界上第一个钠汞合金光电管以来，已经将近一百年了。在这近百年的历史过程中，光电效应在理论上不断得到了发展，应用上也越来越广泛。事实证明，当光电效应走出实验室后，就以很强的生命力展现在人类面前，到今天它已经被广泛地应用于各个科学技术领域：从地下资源的勘测到地面工厂的自动控制，从卫星的自动跟踪到宇宙飞行器的制导等等，到处都显示了它的威力。利用光电效应原理制成的光电接收器——光电器件，已经成为人们进行生产、科学试验和娱乐等必不可少的设备。

但是，人类的认识是没有止境的。时至今日，光电效应的理论并不是已经很完善，光电效应的应用并不是不能再推广，而是有许多课题急待人们去研究。特别在我国，光电效应的研究与应用的历史并不很长，只是在五十年代初才开始研制光电阴极，1957年才开始生产光电管，六十年代初才开始研制并生产多级光电倍增管。因此，需要广大科技人员和业余爱好者去学习、掌握、应用与发展它，使它更好地为人类造福。

本书着重于光电效应的基本原理与过程的物理实质的阐

述，这是为了帮助读者能够把所学的知识灵活地应用于实践之中。本书在第一章里对光本性的研究史作了系统的介绍，从中可以看到，作为光电效应之源的光，人们在走过了多少曲折的道路之后，才认识到了它的本性。知道了这一点，将会鼓舞我们去学习前辈的刻苦钻研和百折不挠的科学探索精神。第二章至第五章分别阐述了三种光电效应及其相应的光电器件。通过这些章节，将使读者在了解光电效应的基本理论和掌握光电器件的一般原理的基础上提高实际应用能力。

本书在叙述上，力求深入浅出，通俗易懂，以便对不同文化水平的读者，都会有所帮助。

由于编者水平所限，难免存在错误与不妥之处，请读者批评指正。

编 者

1982年8月

目 录

第一章 光量子史话

- § 1—1 光量子说的支柱——热辐射公式的导出
- § 1—2 光量子说的提出——经典量子论的问世
- § 1—3 光量子说的证实——外光电效应的发现
- § 1—4 光电发射的研究——光电效应初露锋芒

第二章 外光电效应与光电阴极

- § 2—1 光学辐射
- § 2—2 能带浅说
- § 2—3 外光电效应概论
- § 2—4 光电阴极

第三章 光电管与光电倍增管

- § 3—1 光电管的分类及结构
- § 3—2 光电管的工作原理
- § 3—3 光电管的特性及参量
- § 3—4 光电倍增管概述

第四章 内光电效应与光敏电阻

- § 4—1 内光电效应概论
- § 4—2 硒光敏电阻
- § 4—3 光敏电阻的特性
- § 4—4 光敏电阻灵敏面的致冷装置

第五章 阻挡层光电效应与光伏电池

- § 5—1 阻挡层光电效应概论
- § 5—2 光电流是怎样形成的
- § 5—3 光伏电池举例
- § 5—4 光敏二极管及光敏三极管
- § 5—5 “三种光电效应”小结

第六章 应用举例

- § 6—1 光控继电器
- § 6—2 有声电影
- § 6—3 光电传感器和光电印刷术
- § 6—4 夜视仪器
- § 6—5 电视图象的获得

第一章 光量子史话

本章以光量子说的发展历史为线索，向读者介绍在学习光电效应之前所必须具备的基础知识。

本章首先指出经典的电磁波理论与绝对黑体的实验结果是相矛盾的。为此，普朗克引入能量子假设，从而解决了这一矛盾。爱因斯坦在此基础上又提出了光量子假设，这一假设与光电效应的实验结论是完全吻合的，这就证实了光量子说的正确性；康普顿关于伦琴射线的散射实验则更进一步地揭示了光量子的实在性。

最后，在量子论的基础上叙述光电发射的研究简史。

§ 1-1 光量子说的支柱——热辐射公式的导出

由于光的电磁波理论所得到的一系列结果（如干涉、衍射、偏振等）都能够很好地和实验结果相符合，所以说经典理论在一定程度上反映了物质世界的客观规律。

然而，经典物理学被应用在热辐射的问题时却遭受了严重的失败。它不能用来解释热辐射现象的许多实验规律。为了理解热辐射规律，人们引进了能量量子化的假设，从而开辟了微观物理学的新领域。

日常经验告诉我们，当固体被炽热到足够高的温度时，

便开始发出可见光。而处于较低温度时，它们也以所谓热波（即电磁波）的形式辐射出能量。众所周知，可见的电磁波和热波的差别仅是波长的长短不同而已，在本质上是没有什么差别的。辐射能是由于构成物体的分子、原子和电子运动状态的改变而引起的。物体在任何温度下有能量辐射的现象称为热辐射。

实验指出，热辐射和温度密切相关。物体辐射出的总能量是随着温度的上升而急剧地上升，而辐射出的能量对波长 (λ) 的分布也和温度有关。按波长的分布也不是对所有的物质都是相同的。实验结果表明：在单位时间内，从单位面积上所发射的、而波长在 λ 和 $\lambda + d\lambda$ 范围内的辐射能量 dE_λ 与 λ 、 T （ T 表示绝对温度）有关，且与 $d\lambda$ 成正比，即

$$dE_\lambda = I(\lambda, T) d\lambda,$$

式中的 $I(\lambda, T)$ ，随物体的温度 T 和所取的波长 λ 而变，称为某物体在温度 T 时发出波长为 λ 的辐射能的发射本领。对于各种不同的物体，特别是不同情况（如粗糙程度等）的表面，发射本领 $I(\lambda, T)$ 的量值是不同的。

当辐射能射到某一不透明物体表面上时，一部分能量被物体所吸收，另一部分能量从表面上反射出去（如果物体是透明的，还有一部分能量被透射出去）。被吸收的能量和入射总能量的比值，称为该物体的吸收系数；被反射出来的能量和入射总能量的比值，称为该物体的反射系数。物体的吸收系数和反射系数也是随物体的温度和入射辐射能的波长而变的，所以我们以 $a(\lambda, T)$ 和 $r(\lambda, T)$ 分别表示某物体在温度 T 时对于波长在 λ 和 $\lambda + d\lambda$ 范围内的辐射能的吸收系数和反

射系数。对于各种不同的物体,特别是各种不同的表面,吸收系数和反射系数的数值也是不同的。根据定义,吸收系数和反射系数都是纯数,而对于不透明的物体来说,它们的总和为1,即

$$\alpha(\lambda, T) + r(\lambda, T) = 1。$$

如果有一物体,它在任何温度时对于任何波长的吸收系数都等于1,那么这物体就称为绝对黑体。显然绝对黑体的吸收系数 $\alpha_0 = 1$,而反射系数 $r_0 = 0$ 。

古斯塔夫·基尔霍夫研究了各种材料的物体的辐射性质与吸收性质,并于1859年总结出一个普遍的规律,这一规律被后人称为基尔霍夫定律,它的叙述是:任何物体在某一温度下对某一波长的发射本领和吸收系数的比值都相同,它等于绝对黑体在同一温度下的发射本领。即

$$\frac{I_1(\lambda, T)}{a_1(\lambda, T)} = \frac{I_2(\lambda, T)}{a_2(\lambda, T)} = \dots\dots\dots = I_0(\lambda, T),$$

式中 $I_1(\lambda, T)$ 、 $I_2(\lambda, T)$ 、……和 $a_1(\lambda, T)$ 、 $a_2(\lambda, T)$ 分别为物体 A_1 、 A_2 、……的发射本领和吸收系数。而 $I_0(\lambda, T)$ 为绝对黑体的发射本领(绝对黑体的吸收系数为1),称为基尔霍夫定律的普适函数。如果知道了普适函数 $I_0(\lambda, T)$,只要测定某物体的吸收系数即可根据基尔霍夫定律计算出该物体的发射本领 $I(\lambda, T)$ 。这样便可解决一系列的实际问题。基尔霍夫在提出定律的同时强调指出测定这个函数是一件极端重要的事。如何测定函数 $I_0(\lambda, T)$ 这是当时科学界密切关心的问题。例如,弗里德里希·帕邢曾经这样评述过:“我认为,函数 $I_0(\lambda, T)$ 的测量很重要,应该为此配备一位教授。”但

是，在当时的条件下要测定它，并不是一件轻而易举的事，因为会遇到相当大的困难。

在自然界中，绝对黑体是没有的，吸收系数最大的是煤烟和黑色珐琅质，但对太阳光线来说，这些物体的吸收系数 $\alpha(\lambda, T)$ 也不超过 0.99。然而我们可以做出一种物体，使它在任何温度下能够吸收辐射能量的百分比达到接近于 100%，这种物体便是绝对黑体的模型，1883 年俄国物理学家海里逊首先制成并应用这种绝对黑体的模型。这种模型是用吸收系数 $\alpha(\lambda, T)$ 为任意值的不透明材料作成的一个空心容器，容器上开一个小孔，当射线穿入小孔后，将在空腔内发生多次反射。每反射一次就被容器的内表面吸收一部分能量。设射线进入小孔时的能量为 1，经过 n 次反射后再由小孔射出容器外时的能量将变为 $(1-\alpha)^n$ ，如果小孔的面积比容器内表面的总面积小得很多，则 n 值就会很大，因而 $(1-\alpha)^n$ 之值可以非常之小。这小孔就非常近似于绝对黑体，能把射进小孔内的一切射线几乎全部吸收掉。如果将此物体的内腔加热，则从小孔发射出来的辐射也和绝对黑体的辐射几乎一样。有了绝对黑体的模型，就可通过一定的实验装置来测定绝对黑体的发射本领即基尔霍夫定律的普适函数。测量结果如图一 1 所示。图中横坐标表示波长（以 10^{-4} 厘米为单位），纵坐标表示绝对黑体的发射本领（以尔格

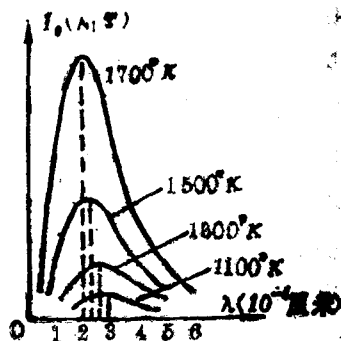


图1-1 绝对黑体的发射本领
随波长分布曲线

· 厘米⁻¹为单位)。

现在剩下的主要问题就是如何从理论上找出符合曲线的函数式 $I_0 = f(\lambda, T)$ ，也就是绝对黑体发射本领与绝对温度及辐射波长的关系式。19世纪末曾有许多物理学家在经典物理学的基础上来求这个公式，但是，这种尝试都遭到了失败。其中最典型的是维恩公式和瑞利—金斯公式。在这方面，帕邢和维恩作出了先驱性的成就，他们密切合作的结果便是1896年得出的维恩辐射定律。帕邢用下面一些话向凯泽尔报告了他们协作的成果：

“此外，我还可以高兴地告诉您，我相信我找到了基尔霍夫定律中的普适函数 I_0 。从我的观察中，我测定了绝对黑体的发射本领

$$I_0 = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot e^{-C_2/\lambda T},$$

由此式可得出 $\lambda_{\max} T = \text{常数}$ ，以及总辐射 $= T^a$ ； C_1 和 C_2 是两个常数， a 的值为5.5，就这个值来说在实验数据经过更周密的计算之后可能会有所修正……由于W·维恩从理论上也导出了相同的式子，只是其 $a = 5.0$ ，因而就给这个等式更加增添了意义。我把〔我的〕等式寄给他之后，他写信给我说，他在早些时候已经得出了同样的结果。我们现在将联名发表我们关于这等式的各个基本论点；很可能已经发现了与真正的定律相当接近的一个近似。”

维恩从理论上导出他的式子时，曾经作了一些假设，辐射按波长的分布必须类似于麦克斯韦的分子速度分布。维恩的辐射公式在以后的几年中为进一步测量所证实，并且到1900

年中期，一直被看做是一个以实验为基础的表达式；只是它的推导不是无懈可击的。

维恩公式在波长较短的方面与实验曲线比较接近，但是在波长很长的方面却与实验曲线相差较大。为解决这一矛盾，瑞利和金斯把分子物理学中的能量按自由度均分原则应用到电磁辐射上来，于1900年6月提出如下的公式（称为瑞利—金斯公式）：

$$I_0(\lambda, T) = C\lambda^{-4}T.$$

式中 C 为一常数。上式在波长很长的情况下与实验曲线还比较相近，但是在短波紫外光区方面，按此公式， I_0 将趋向无穷大，完全与实验曲线不符，物理学史中把它称为紫外区的灾难。

维恩公式（不适用于长波）和瑞利—金斯公式（不适用于短波）都是用经典物理学的方法来研究热辐射所得的结果，显然它们都与实验结果不符，它们明显地暴露了经典物理学中的主要缺陷。

§ 1—2 “光量子说”的提出——经典量子论的问世

前节末已经说过，瑞利—金斯公式按低频说极好，按高频说不对，可是维恩公式按高频说不能再好了，按低频说却实在不能令人满意，两个公式各只对了一半。简单地说，在柏林那位理论物理学教授马克斯·普朗克（21岁就取得博士学位）开始他那一系列重大的研究工作时，这个领域中的事态就是这样。

普朗克起初仅作些纯猜测。他在各方面滥用上述两个有缺点的公式，试一试它们的效果。他象小学生做数学习题一样，先偷看一下书末的答案（绝对黑体发射本领的实验曲线），然后拼凑解题过程。他发现这道习题很难做，心里十分懊丧。长时间的研究毫无结果，因此他相信只有放弃经典物理学的观点，才能有希望挽救局面。这个重大信念使他产生了力量，他发狂似地全力攻克这个问题，仅仅几个星期后他就找到了答案（引入量子假设，导出热辐射的普朗克公式）。这答案非常不合公认的传统（传统公认能量是连续的），因此不易被人们所接受，甚至包括他自己在内也是半信半疑的。在漫长的十七个不平静的年头中，他受到各方面的抨击，他自己也因此而陷入了极端苦闷的处境中。可是，十七年后他却获得了诺贝尔奖金，获奖的理由是他提出的“量子说”。

普朗克在提出他的能量子假设时，他的心情是动荡不安的。如果读者想要知道普朗克在提出能量子假设时的心理活动及精神状态，可从普朗克给他的朋友罗伯特·威廉斯·伍德的信中得知：

“一言而蔽之，我所做的事情可以简单地叫做孤注一掷的举动。我生性喜欢平和，不愿进行任何吉凶未卜的冒险。然而到那时为止，我已经为辐射和物质之间的平衡问题徒劳地奋斗了六年。我知道这个问题对于物理学是至关重要的，我也知道能量在正常光谱中的分布的那个表达式。因此，一个理论上的解释必须以任何代价非把它找出不可，不管这代价有多高。我非常清楚，经典物理学是不能解决这个问题

的，而且按照它，所有能量最终将从物质转变为辐射。为了防止这一点，就需要有一个新的常数来保证能量不会分解。而使人认识到如何能够做到这点的唯一途径，是从一个确定的观点出发。摆在我面前的这个观点，是维持热力学的两条定律。我认为，那两条定律必须在任何情况下都保持成立。至于别的一些，我就准备牺牲我以前对物理定律所抱的任何一个信念。玻耳兹曼曾经说明过怎样用统计平衡来建立热力学平衡，而如果我们把这方法用于物质和辐射之间的平衡问题，则就会发现，能量连续地向辐射转变可以通过这样一个假设来防止，即那个能量开始时不得不在一个个量子中集中在一起。这纯粹是一个形式上的假设，我实际上并没有对它想得太多，而只是想到，要不惜任何代价得出一个积极的结果来。”

信中所说的“孤注一掷的举动”指的是他对热辐射公式的推导；“我实际上并没有对它想得太多”，是指引进量子而言的。

据说在本世纪初，普朗克有一次在格吕内瓦尔德作长时间散步的时候，他对爱子埃尔温说起，他成功地作出了“牛顿以来物理学最伟大的发现之一”。这个故事是维尔纳·海森伯讲的。海森伯对这故事有这样报道：

回忆起那些日子，他的儿子埃尔温·普朗克说道，当他父亲在格吕内瓦尔德散步时，他的父亲很兴奋，始终滔滔不绝地谈论他的研究成果。据说，他这样告诉儿子一件事，我现在所发现的那个东西要末荒诞无稽，要末也许是牛顿以来物理学最伟大的发现之一。

普朗克对他儿子解释道，他感觉到，要么做出了一个头等重要的发现，它或许可以与牛顿的发现相媲美，要么可能会证明他大错而特错。

由于普朗克从事了二十年的热力学研究并对当时还被许多人误解的熵的意义有着明晰的认识，对他从事这项工作是很利便的。普朗克认为，问题的核心不在于强度公式本身，而在于把它和辐射能量、频率和熵之间的关系明确地联结起来。

终于，普朗克于1900年10月19日在德国物理学会上报告了以他的名字命名的普朗克公式，尽管好些人表示怀疑，但后来却愈来愈多地在经验上得到了证明。普朗克又于1900年12月14日在德国物理学会上报告了这一公式的推导。量子论就是从这一天开始的。普朗克公式

$$I_{\lambda}(\lambda, T) = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

式中 c 是光速， k 是玻尔兹曼恒量， e 是自然对数的底， h 为一个普遍恒量称为普朗克恒量，其量值为：

$$h = 6.624 \times 10^{-27} \text{ [尔格] [秒]}$$

当 $\lambda T \gg 1$ 或 $\lambda T \ll 1$ 的不同条件下，从普朗克公式可以分别得到瑞利—金斯公式和维恩公式。

普朗克公式与实验结果的相符合，解决了黑体辐射规律中 $I_{\lambda}(\lambda, T)$ 公式的问题。但是更重要的是，为了导出这个公式，普朗克却不得不作出一个与经典物理学完全矛盾的假设，称为普朗克能量量子假设。普朗克假设：辐射物质中具有带电的线性谐振子（如分子、原子的振动可视为线性谐振

子),由于带电,它们能够和周围的电磁场交换能量。而这些谐振子,并不象经典物理学中所叙述的可以具有任意的能量,而只可能处于某些特殊的状态,在这些状态中,它们的能量是某一最小能量 ϵ 的整数倍,即

$$\epsilon, 2\epsilon, 3\epsilon, \dots, n\epsilon, \quad n \text{ 为正整数,}$$

频率为 ν 的谐振子的最小能量为

$$\epsilon = h\nu,$$

式中 h 为一普遍恒量,也就是普朗克恒量。在放射或吸收的时候,振子从这些状态中之一,飞跃跨过中间的那些状态达到其它一个状态。根据这个能量子假设,普朗克推得了绝对黑体辐射的普朗克公式。

在能量观点上,普朗克的量子假设与经典物理学有着本质上的不同。在经典的热力学理论和电磁波理论中,能量的观念是连续的,能量以连续的方式被物体所放射或吸收。按照普朗克的量子假设,能量的观念是不连续的,存在着能量的最小单元(能量子 $h\nu$),物体放射或吸收的能量必须是最小单元的整数倍,并且以一份一份不连续的方式来进行的。

从普朗克公式可以推导出斯忒藩—玻尔兹曼定律和维恩—葛利定律(它们都是热辐射的基本定律)。量子假设不但圆满地解释了热辐射现象,还被其他物理学家发展推广,逐渐形成了近代物理学中极重要的量子理论。这些物理学家中成就最突出的要算是爱因斯坦。

前面已经提到过普朗克的能量子假设在当时很少人能接受。分立的能量变化的思想实在是太新奇了。由于他从辐射测量中测定的电的基本量比大多数当时直接测得的量值要高