# 第四章 2 光电效应

## 问题？

把一块锌板连接在验电器上，并使锌板带负电，验电器指针张开。用紫外线灯照射锌板，观察验电器指针的变化。

照射前

照射后

锌板

紫外线灯

这个现象说明了什么问题？

实验发现，若使锌板带负电，用紫外线灯照射后，验电器张开的指针夹角会变小，说明锌板带的负电荷变少了。

这意味着，紫外线会让电子从锌板表面逸出。照射到金属表面的光，能使金属中的电子从表面逸出。这个现象称为**光电效应**（photoelectric effect），这种电子常称为光电子。

## 光电效应的实验规律

1887年，赫兹在研究电磁波的实验中偶尔发现，接收电路的间隙如果受到光照，就更容易产生电火花。这就是最早发现的光电效应，也是赫兹细致观察的意外收获。

后来这一现象引起许多物理学家的关注。德国物理学家勒纳德、英国物理学家J. J. 汤姆孙等相继进行了实验研究，证实了这个现象。

下面我们用图4.2-1所示的电路研究光电效应中电子发射的情况与照射光的强弱、光的颜色（频率）等物理量之间的关系。

A

K

V

μA

光束

窗口

图 4.2-1 研究光电效应的电路图

如图4.2-1，阴极K和阳极A是密封在真空玻璃管中的两个电极，阴极K在受到光照时能够发射光电子。阴极K与阳极A之间电压*U*的大小可以调整，电源的正负极也可以对调。电源按图示极性连接时，闭合开关后，阳极A吸收阴极K发出的光电子，在电路中形成光电流。这导致电压*U*为0时电流*I* 并不为0。

科学家通过实验发现了以下规律。

存在截止频率 当入射光的频率减小到某一数值 *ν*c 时，光电流消失，这表明已经没有光电子了。*ν*c 称为**截止频率**（cutoff frequency）或极限频率。这就是说，当入射光的频率低于截止频率时不发生光电效应。

实验表明，不同金属的截止频率不同。换句话说，截止频率与金属自身的性质有关。

存在饱和电流 在光照条件不变的情况下，随着所加电压的增大，光电流趋于一个饱和值。也就是说，在电流较小时电流随着电压的增大而增大；但当电流增大到一定值之后，即使电压再增大，电流也不会再进一步增大了（图4.2-2）。

图 4.2-2 光电流与电压的关系

*I*

*U*

*U*c1

黄光（强）

蓝光

黄光（弱）

*U*c2

这说明，在一定的光照条件下，单位时间内阴极K发射的光电子的数目是一定的，电压增加到一定值时，所有光电子都被阳极A吸收，这时即使再增大电压，电流也不会增大。

实验表明，在光的频率不变的情况下，入射光越强，饱和电流越大。这说明，对于一定频率（颜色）的光，入射光越强，单位时间内发射的光电子数越多。

存在截止电压 如果施加反向电压，也就是阴极接电源正极、阳极接电源负极，在光电管两极间形成使电子减速的电场，电流有可能为0。使光电流减小到0的反向电压*U*c 称为截止电压。

截止电压的存在意味着光电子具有一定的初速度，初速度的上限*v*c 应该满足以下关系

*m*e*v*c2 = *eU*c

进一步的实验表明，同一种金属对于一定频率的光，无论光的强弱如何，截止电压都是一样的。光的频率*ν*改变时，截止电压*U*c 也会改变（图4.2-2）。这意味着，对于同一种金属，光电子的能量只与入射光的频率有关，而与入射光的强弱无关。

光电效应具有瞬时性 当频率超过截止频率 *ν*c 时，无论入射光怎样微弱，照到金属时会立即产生光电流。精确测量表明产生电流的时间很快，即光电效应几乎是瞬时发生的。

## 光电效应经典解释中的疑难

### 思考与讨论

人们知道，金属中原子外层的电子会脱离原子而做无规则的热运动。但在温度不很高时，电子并不能大量逸出金属表面，这是为什么呢？

这表明金属表面层内存在一种力，阻碍电子的逃逸。电子要从金属中挣脱出来，必须获得一些能量，以克服这种阻碍。

要使电子脱离某种金属，需要外界对它做功，做功的最小值叫作这种金属的**逸出功**（work function），用*W*0 表示。换句话说，电子要想从金属中脱离，至少要吸收*W*0 的能量。如下表所示，不同种类的金属，其逸出功的大小也不相同。

表 几种金属的截止频率和逸出功

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 金属 | 钨 | 钙 | 钠 | 钾 | 铷 |
| *v*c / 1014 Hz | 10.95 | 7.73 | 5.53 | 5.44 | 5.15 |
| *W*0 / eV | 4.54 | 3.20 | 2.29 | 2.25 | 2.13 |

当光照射金属表面时，电子会吸收光的能量。若电子吸收的能量超过逸出功，电子就能从金属表面逸出，这就是光电子。光越强，逸出的电子数越多，光电流也就越大。这些结论与实验相符。

但是，按照光的电磁理论，还应得出如下结论：

* 不管光的频率如何，只要光足够强，电子都可以获得足够能量从而逸出表面，不应存在截止频率；
* 光越强，光电子的初动能应该越大，所以截止电压*U*c 应该与光的强弱有关；
* 如果光很弱，按经典电磁理论估算，电子需要几分钟到十几分钟的时间才能获得逸出表面所需的能量，这个时间远远大于实验中产生光电流的时间。

这些结论都与实验结果相矛盾。光电效应中的一些重要现象无法用经典电磁理论解释，这引发了物理学家们的认真思考。

## 爱因斯坦的光电效应理论

对于光电效应的解释，爱因斯坦是在普朗克量子假说的基础上作出的。在这个假说的启发下，爱因斯坦在1905年发表了题为《关于光的产生和转化的一个试探性观点》的文章。他表示，普朗克关于黑体辐射问题的崭新观点还不够彻底，仅仅认为振动着的带电微粒的能量不连续是不够的。为了解释光电效应，必须假定电磁波本身的能量也是不连续的，即认为光本身就是由一个个不可分割的能量子组成的，频率为*ν* 的光的能量子为*hν*，其中，*h*为普朗克常量。这些能量子后来称为光子。

按照爱因斯坦的理论（图4.2-3），当光子照到金属上时，它的能量可以被金属中的某个电子全部吸收，金属中的电子吸收一个光子获得的能量是 *hv*，在这些能量中，一部分大小为*W*0 的能量被电子用来脱离金属，剩下的是逸出后电子的初动能，即

图 4.2-3 纪念爱因斯坦光电效应理论的邮票

*hν* = *E*k + *W*0

或

*E*k = *hν* − *W*0 （1）

式中*E*k 为光电子的最大初动能

*E*k=*m*e*v*c2

（1）式称为爱因斯坦光电效应方程。

从下面的讨论可以看出，爱因斯坦光电效应方程可以很好地解释光电效应实验中的各种现象。

这个方程表明，只有当 *hν*＞*W*0 时，光电子才可以从金属中逸出，*ν*c=就是光电效应的截止频率（图4.2–4）。

电子逸出

*v*c

*v*

*E*k

*O*

*W*0

图 4.2-4 光电效应的 *E*k -*ν* 图像

这个方程还表明，光电子的最大初动能*E*k 与入射光的频率*ν*有关，而与光的强弱无关。这就解释了截止电压和光强无关。

电子一次性吸收光子的全部能量，不需要积累能量的时间，光电流自然几乎是瞬时产生的。

对于同种频率的光，光较强时，单位时间内照射到金属表面的光子数较多，照射金属时产生的光电子较多，因而饱和电流较大。

### 思考与讨论

爱因斯坦光电效应方程给出了光电子的最大初动能 *E*k 与入射光的频率 *ν* 的关系。但是，很难直接测量光电子的动能，容易测量的是截止电压 *U*c 。

那么，怎样得到截止电压 *U*c 与光的频率 *ν* 和逸出功 *W*0 的关系呢？

利用光电子的初动能 *E*k = *eU*c 和爱因斯坦光电效应方程 *E*k = *hν* − *W*0，可以消去 *E*k，从而得到 *U*c 与 *ν*、*W*0 的关系，即

*U*c = *ν* －

对于确定的金属，其逸出功 *W*0 是确定的，电子电荷*e* 和普朗克常量 *h* 都是常量。上式中的截止电压 *U*c 与光的频率 *ν* 之间是线性关系，*U*c–*ν* 图像是一条斜率为 的直线（图4.2-5）。

图 4.2-5 某金属的 *U*c-*ν*图像

*ν* / 1014 Hz

4.0

4.5

5.0

0.8

0.6

0.4

0.2

0

1

5.5

6.5

6

7

*U*c / V

从1907年起，美国物理学家密立根开始以精湛的技术测量光电效应中几个重要的物理量。他的目的是：测量金属的截止电压*U*c 与入射光的频率*ν*，由此算出普朗克常量*h*，并与普朗克根据黑体辐射得出的*h*相比较，以检验爱因斯坦光电效应方程的正确性。

实验的结果是，两种方法得出的普朗克常量*h*在0.5%的误差范围内是一致的。这为爱因斯坦的光电效应理论提供了直接的实验证据。

爱因斯坦由于提出了光电效应理论而获得1921年的诺贝尔物理学奖。

## 康普顿效应和光子的动量

光可以与介质中的物质微粒发生散射，改变传播方向。1918～1922 年，美国物理学家康普顿在研究石墨对 X 射线的散射时，发现在散射的 X 射线中，除了与入射波长 *λ*0 相同的成分外，还有波长大于 *λ*0 的成分，这个现象称为**康普顿效应**（Compton’s effect）。康普顿的学生，中国留学生吴有训测试了多种物质对 X 射线的散射，证实了该效应的普遍性。

按照经典物理学的理论，入射的电磁波引起物质内部带电微粒的受迫振动，振动着的带电微粒进而再次产生电磁波，并向四周辐射，这就是散射波。散射的 X 射线频率应该等于带电粒子受迫振动的频率，也就是入射 X 射线的频率。相应地，X 射线的波长也不会在散射中发生变化。因此，康普顿效应无法用经典物理学解释。

康普顿用光子的模型成功地解释了这种效应。他的基本思想是：光子不仅具有能量，而且具有动量，光子的动量 *p* 与光的波长 *λ* 和普朗克常量 *h* 有关。这三个量之间的关系式为

*p* = （2）

早在爱因斯坦 1916 年的一篇关于辐射问题的论文中就提出了光子具有动量。

在康普顿效应中，当入射的光子与晶体中的电子碰撞时，要把一部分动量转移给电子，因而，光子动量可能会变小（图4.2–6）。从（2）式看，动量*p*减小，意味着波长*λ*变大，因此，这些光子散射后波长变大。

图 4.2–6 光子既有能量也有动量

电子

碰撞前

碰撞后

基于这个假定的理论结果与实验符合得很好。康普顿效应让人们对光子有了更深入的认识。康普顿因此获得了1927年的诺贝尔物理学奖。

## 光的波粒二象性

众所周知，在麦克斯韦的电磁理论建立之后，人们认识到光是一种电磁波，从而光的波动说被普遍接受，人们不再认为光是由粒子组成的。而爱因斯坦的光电效应理论和康普顿效应理论表明，光在某些方面确实会表现得像是由一些粒子（即一个个有确定能量和动量的“光子”）组成的。也就是说，光电效应和康普顿效应重新揭示了光的粒子性。当然，此时人们对光的粒子性的认识，是以最新的实验和量子理论为基础的，已经和牛顿时代的光的粒子说根本不同，其深度远远超出后者。人们意识到，光既具有波动性，又具有粒子性。换句话说，光具有**波粒二象性**（wave-particle dualism）。此后，又经过一系列探索，人们最终建立了比较完善的，能统一描述光的波动性和粒子性的理论——量子电动力学。

从牛顿时代光的微粒说、惠更斯和托马斯·杨的光的波动说，到麦克斯韦的光的电磁理论，再到爱因斯坦的光子理论乃至量子电动力学，人类对光的认识构成了一部科学史诗。

## 练习与应用

1．在光电效应实验中，如果入射光的波长确定而强度增加，将产生什么结果？如果入射光的频率增加，将产生什么结果？

2．金属A在一束绿光照射下恰能发生光电效应，现用紫光或红光照射时，能否发生光电效应？紫光照射A、B 两种金属都能发生光电效应时，为什么逸出金属表面的光电子的最大速度大小不同？

3．铝的逸出功是4.2 eV，现在将波长为200 nm 的光照射铝的表面。

（1）求光电子的最大初动能。

（2）求截止电压。

（3）求铝的截止频率。

4．根据图4.2–1所示的电路，利用能够产生光电效应的两种（或多种）频率已知的光来进行实验，怎样测出普朗克常量？根据实验现象说明实验步骤和应该测量的物理量，写出根据本实验计算普朗克常量的关系式。

5．在日常生活中，我们不会注意到光是由光子构成的，这是因为普朗克常量很小，每个光子的能量很小，而我们观察到的光学现象中涉及大量的光子。如果白炽灯消耗的电功率有15%产生可见光，试估算60 W的白炽灯泡1 s内发出可见光光子数的数量级。