

高等学校教学用书



电子与离子变换器

(工业电子学原理)

第二卷 离子仪器

И. Л. 卡加諾夫著

清华大学电真空器件教研组译

本書系根据苏联国立动力出版社 (Государственное энергетическое издательство) 1955 年出版的卡加諾夫 (И. Л. Каганов) 所著“电子与离子变换器(工業电子学原理)” [Электронные и ионные преобразователи (основы промышленной электроники)] 第二卷譯出。原書經苏联高等教育部多科性及机器制造高等工業学校主管司审定为动力高等学校、电工高等学校以及动力系和电工系用的教科書。

原書共分三卷。第二卷講述离子器件, 其中第一章講述离子管的基本过程及它的一般規律; 第二章講述充气二極管; 第三章講述開流管; 第四章講述汞弧管。

本書也可供在工業电子学方面工作的工程师参考。

本書第一章由馬瑞霖翻譯, 孟昭英和陆家和校訂, 第二、三章由陆家和翻譯, 馬瑞霖校訂, 孟昭英抽校和审閱, 第四章由陆家和翻譯, 南京工学院閔詠川校訂。

电子与离子变换器

(工業电子学原理)

第二卷 离子仪器

И. Л. 卡加諾夫 著

清华大学电真空器件教研組譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺 7 号

(北京市書刊出版業營業許可証出字第 054 号)

京华印書局印刷 新华書店發行

統一書号 15010·623 開本 850×1168¹/₃₂ 印張 14¹/₂ 插頁 4 字數 341,000 印數 0001—3,000

1958 年 4 月第 1 版 1958 年 4 月北京第 1 次印刷 定價 (10) 洋 2.50

第二卷目录

序	vi
第一章 离子管的基本过程及它的一般规律	1
1-1. 离子管的性质及它的分类标志	1
1-2. 带电粒子、光子和气体原子相互作用的过程	4
1-3. 电荷在气体中运动的规律	14
1-4. 自持放电的伏安特性曲线	27
1-5. 自持放电的发生(着火)过程及着火电压	30
1-6. 在稳定放电光柱中的过程	39
1-7. 决定表征放电光柱中的过程的参量的实验方法	52
1-8. 放电的熄灭。消电离过程	62
第二章 充气二极管	67
2-1. 构造及作用原理	67
2-2. 充气二极管泡壳中气体或蒸汽的密度	70
2-3. 弧光放电的结构及阴极附近的现象	74
2-4. 在低压强充气二极管中的放电光柱及阳极区	83
2-5. 低电压充气二极管(吞茄)中的过程	89
2-6. 充气二极管的伏安特性	93
2-7. 在电极上及在放电中的功率损耗。充气二极管的温度情况	98
(a) 阴极上的功率平衡及阴极的温度情况	98
(b) 在阳极变成热的功率及阳极的温度情况	102
(B) 管壁和气体的温度	108
2-8. 放电的着火时间	108
2-9. 弧光放电的熄灭。反电流	114
2-10. 反电流对阳极吸气的影响及对逆弧的发展的影响	121
2-11. 充气二极管的型式及参量	128
2-12. 充气二极管的构造	132
2-13. 保证热阴极充气管得到良好的真空性能及电性能的工艺操作	137
第三章 闸流管	140
3-1. 闸流管的结构和栅极工作原理	140
3-2. 闸流管在直流和交变阳极电压下的应用	146

3301731

3-3.	柵極的起始着火特性曲綫	151
3-4.	柵極在周期的导电期間的工作情况	159
3-5.	电弧熄灭后柵極封閉作用的恢复	164
3-6.	过渡到閘流管稳定工作情况后的着火特性的移动	176
3-7.	閘流管中的电压降及功率損耗溫度情况	182
3-8.	正向电压和反向电压的極限值	187
3-9.	双柵閘流管	192
3-10.	磁控閘流管	193
3-11.	在負特性閘流管中的放电發展時間	195
3-12.	正特性的閘流管。氬閘流管	198
3-13.	閘流管的型式和参量	206
3-14.	閘流管的結構	213
第四章	汞弧管	223
4-1.	構造及作用原理	223
4-2.	蒸汽的压强和密度	229
4-3.	汞弧管中的电弧及陰極附近的过程	235
4-4.	在放电光柱中的过程的特性	241
4-5.	陽極附近的电位降落和电流密度	251
4-6.	汞弧管的伏安特性	260
4-7.	电弧的串燃	265
4-8.	当蒸汽密度不足时电弧中的过程。电弧的断裂	270
4-9.	陰極的热情况	279
4-10.	陽極的热情况	285
4-11.	凝結表面和管壳的冷却結構	288
4-12.	蒸汽受电弧加热的情況	298
4-13.	点火系统和励弧系統	300
4-14.	励弧底稳定性	306
4-15.	着火电位和电弧在陽極間的轉移	310
4-16.	借柵極控制电弧的着火时刻	314
4-17.	在引燃管中电弧的点燃	329
4-18.	汞弧管中的反电流	344
4-19.	汞弧管中的逆弧	350
4-20.	汞弧管的类型及典型功率曲綫	362
4-21.	汞弧管的構造	373
	(a)玻璃励弧管	375
	(b)抽气型金屬多陽極励弧管	378

(B)金屬可拆卸型單陽極汞弧管	382
(F)金屬無泵勵弧管	386
(A)引燃管	397
4-22. 高电压汞弧管	408
4-23. 可拆卸抽气型汞弧管的真空系統	415
4-24. 真空的量測和抽气系統的自动化	424
4-25. 冷却系統	428
4-26. 汞弧管的化成和陽極的老練	494
参考書目	487

第一章 离子管的基本过程 及它的一般规律

1-1. 离子管的性质及它的分类标志

在电子管里电子是唯一的载流者；与电子管不同，在离子管里，除了电子以外(电子仍然是主要的载流者)还有正离子参加这个过程(正离子就是缺少一个或数个电子的原子或分子)。在放电区里离子的作用主要地可归结为补偿电子的空间电荷，这就使得有可能在较小的管压降下通过较大的电流，从而使得器件有高的效率(见第一章，第1-4节)。正离子是由电子使气体(蒸汽)的原子或分子电离而产生的，这些气体(蒸汽)是在尽量抽走空气以后充到管内去的。

离子管里有时充以惰性气体(氦、氖、氩、氪、氙)，有时也充以汞蒸汽。当汞从引入管内的汞滴的表面蒸发(如在热阴极器件中所遇到的)或者从汞阴极表面蒸发时管内就充满汞蒸汽。某些类型的离子管也充以氙气。

根据充气的种类可以将器件分为汞汽管与充气管。

选择以上举出的气体或汞蒸汽来充到管内去是由于它们不与器件的电极和玻璃起化学反应，此外，又因为它们不形成(或很少形成)负离子。

充到管内气体或蒸汽的密度对于电流在其中通过气体的条件有决定性的影响。在气体或蒸汽密度小的情况下，电子才能有较大的自由位移，才能在上述小的管压降下，使电子积累足以使气体原子(分子)电离所必需的能量。

汞汽管通常是在压强不超过几微米及几十微米汞柱下工作。气体密度小的充气管通常在压强不超过十分之几的毫米汞柱下工作，只是在较稀少的情况下这压强才达到几个及几十毫米汞柱。低压强的离子管是属于真空器件的类型。

除了电真空型的离子管外（制造它们时必需事先在它的工作空间得到真空），敞开在空气中放电的器件也有一些应用。

气体的压强是离子管分类的第一个标志。

另一个分类的标志是放电的形式。

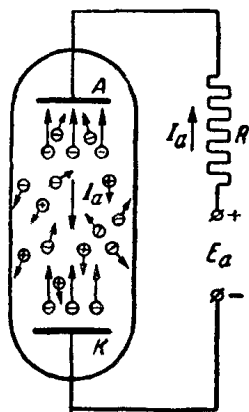


圖 1-1. 在簡單的直流电压电路中的离子管。

根据放电的形式我们把离子管分为两个基本的类别：a) 自持放电器件；b) 非自持放电器件。在 a) 类器件里电子是在离子的作用下从阴极发射出来的（离子是从放电区间跑向阴极的），因此电子发射所必需的能量是从放电本身所获得的。在 b) 类器件，阴极的发射是和电子管的一样，通常是倚靠外部电流源将阴极加热（热阴极器件）。在各种自持放电中特别重要的有两种：a) 辉光放电；b) 弧光放电。

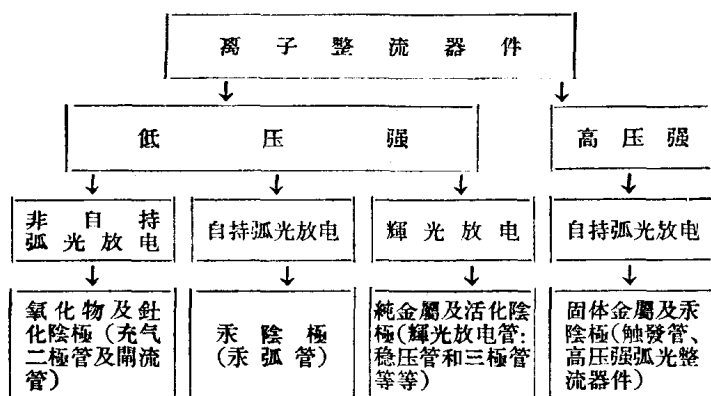
辉光放电的特征是阴极电流密度小和在阴极附近的电压降落比较大（数量级为百伏），而弧光放电则相反，它的特征是阴极电流密度大和阴极位降相当小（不超过 20—30 伏）。

非自持放电在热阴极弧光整流器件中用得最多。在这种器件中，如在电子管一样，阴极是由局外电流源加热的。

器件的阴极的类别是重要的分类标志。被采用的阴极有：a) 具有干净的表面或活化表面的固体金属做的冷阴极；b) 氧化物或钍化过的加热阴极；B) 汞阴极。

上述三个标志就是建立下列作为整流器件的离子管（即指容許电流單方向通过或优先向一方向通过的器件）的簡單分类表的基础。

离子整流器件分类表



在物理性質方面与离子整流器件相类似的还有其他型式的离子管，如气体放电的輻射源放电器，此外还有为分析物質的化学成分的分析仪（質譜仪）等等。

用作整流器件的离子管，除了基本的外还可以用一系列的补充分类标志来区别它們，如 a) 管内工作陽極的数目；б) 有沒有控制柵；в) 管壳的材料（玻璃、金屬）；г) 器件的冷却系統等等。

上表所列器件的整流性質是根据以下的特性，即只有陰極能够發射电子（在正常工作情況下）。因而，如果器件接在交流电压迴路內，則只当陽極对陰極為正时，器件才容許在小的电压降落下通过大的电流。在相反的極性时管内电流（反电流）小到几可忽略。

现有的充气二極管及閘流管其电流（平均值）是在十分之几安到几十安之間，容許的反电压从几十伏到几万伏。特別型式的高压充气二極管及閘流管电压做到几十万伏。电流負載能力的極限主要是受被加热的陰極的發射性質的限制。汞陰極沒有这个对电

流的限制,因此汞弧管在容許的反电压范围(从几百伏到3—10千伏)内一个管的电流可以达到几千安。高压汞弧管的电压可以从几万伏到几十万伏,但电流(平均值)通常不超过几百安。

辉光放电管是属于小功率离子管的类型。电流不超过几十毫安。这些器件主要是用作稳压管及脉冲继电器。

到目前为止高压离子整流器件的应用还有限。虽經長期地嘗試設計高电压、大电流的高压弧光整流器件,但至今尚未能制出寿命及效率能滿足要求的器件。

1-2. 帶电粒子、光子和气体原子 相互作用的过程

离子管中的物理現象是帶电粒子、光子(光的量子)和气体原子間相互作用(或称之为基本的相互作用)的总和。因此在全面地考虑管内过程之前先說明这些相互作用的性質和規律性。

在气体放电中最常見的粒子間的基本的相互作用是电子与气体(或蒸汽)的中性原子(或分子)相碰撞。

气体原子的状态可以用它的“能譜”来表征。这个“能譜”由原子内所有的粒子来决定,但我們感兴趣的是价电子,即組成原子外壳的电子的能量,因为下面所考虑的过程主要是由这些电子参加。

圖 1-2 画出了一个原子的某一个价电子的各种可能能級的圖。每一条綫代表电子的一个可能的能态。提高电子的能量相当于原子有較高的位能儲藏。最低的能級 W_0 对应于最稳定的原子状态,在那里可以停留無限久。这状态称为常态。当从外界傳給原子額外的能量时,电子就接受这能量,并且把它的能級提高到 W_1 、 W_2 或 W_3 等等。这些能級称为激發能級。根据量子力学的定

律氣體的原子電子不可能有與指出的能級不一致的中間能級。在激發狀態下原子停留極短的時間（約 10^{-8} 秒）就重新過渡為常態或另一較低能級的激發狀態（某些情況例外，將述於後）。在過渡時原子用光子的形式輻射出先前得到的額外的能量。但是也存在這樣的能級，若無外因促進（如與別的粒子或管壁相碰撞）不能從該能級過渡。這些能級稱為亞穩能級。當重新與氣體的其他粒子或管壁相碰撞時，原子在亞穩狀態的居留就停止。算出的亞穩原子的平均壽命是介於 10^{-3} 到 1 秒之間。因為亞穩原子存在的期間顯著地較正常的激發原子長，這些亞穩原子在放電中起着特別的作用（將見於下）。

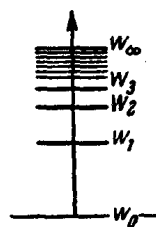


圖 1-2.
原子能級圖。

當能量超過最大可能的激發能級時，電子就與原子完全脫離關係。原子缺少了電子就變為正離子。這過程稱為原子的電離。激發及電離的過程屬於非彈性碰撞。若碰撞時粒子總動能由於內能（位能）相應的變化而變化，則這些碰撞稱為非彈性碰撞。此外還有彈性碰撞。後者理解為粒子的這樣的相互作用，即粒子部分地交換能量而它們的動能的總和保持不變。這時原子內部的狀態也是不變的。圖 1-3, a 就表示這個過程。圖的左邊指出相互作用的粒子在碰撞前的狀態，而右邊是碰撞以後的狀態。原子被虛拟地表示為原子核及沿外殼轉動的價電子的形式。

電子在碰撞前速度為 v ，而碰撞後減為 v_1 。不單只速度的大小改變它的方向也同時改變。原子的速度在彈性碰撞時增加不多。在某一定量的氣體里的原子總體的速度的提高意味著氣體溫度整個地提高。

在每次作彈性碰撞時電子給予原子的相對能量可由下面關係式來決定[參考書目 1]。

$$\kappa = \frac{2m_e}{m}(1 - \cos \theta), \quad (1-1)$$

式中 m_e 是电子的质量;

m 是原子的质量;

θ 是碰撞后电子速度方向变化的角度。

考虑到电子与原子碰撞的次数很大,我们可以认为,每次碰撞平均说来电子能量损失的分额等于:

$$\kappa = 2 \frac{m_e}{m}. \quad (1-2)$$

由于电子的质量远小于原子的质量,如从表 1-1 所看到的, κ 的数值是十分小的。

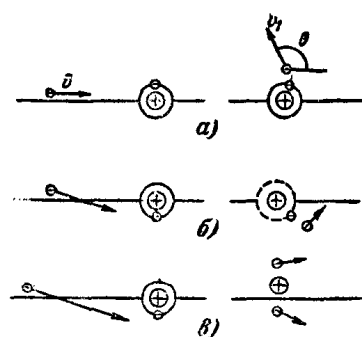


圖 1-3. 基本的相互作用圖。

表 1-1. 彈性碰撞时电子所損失的能量的份額的平均值

气 体	κ
H ₂	11.05×10^{-4}
He	2.78×10^{-4}
Ne	5.55×10^{-5}
Ar	2.78×10^{-5}
Kr	1.34×10^{-5}
Xe	8.56×10^{-6}
Hg	5.5×10^{-6}

电子和气体粒子間的彈性碰撞的規律与彈性球碰撞的規律之間的相似点是有条件的(这些相似点是这类过程之所以称为彈性碰撞的原因),因为电子与原子間的相互作用实际上是电动力的过程,从本質上說所談的是电子与原子外壳电子間的相互的电磁作用。

圖 1-3, b 及 c 表示非彈性碰撞。用圖 1-3, b 來說明激發过程。用增大的軌道(圖上用虛綫画的圓)来虚拟地表示过渡到激發状态的原子。用圖 1-3, c 來說明气体原子电离的过程。由于电离

的結果,除了原始電子,還出現了正離子及第二個電子。

為了發生激發與電離,電子應具有某一最小的能量。為了激發原子所必需的能量稱為激發能。這能量通常是以電子伏特計算,或者簡單地把它看作“伏特”而稱之為激發電位 U_s , 因為這能量是屬於一個電子的。一個電子直接電離一個常態原子所必需的最小能量稱為電離電位 U_i 。

表 1-2 列出了一系列我們感興趣的氣體的電離電位及激發電位的數值。這些數值指出: 電子應該在電場中經過多大的電位差才能在碰撞時激發或電離未激發的原子。

激發原子的位能比中性原子的位能高出的數值為激

發電位 U_s , 而電離所形成的離子的位能比中性原子的位能高出的數值為電離電位 U_i 。

原子的能級改變時所產生的輻射的波長決定於原子的開始及最終的能態。當原子從激發狀態直接過渡到常態時所產生的輻射稱為諧振輻射。在發生諧振輻射時, 從一個原子輻射的能量子(光子)可以激發另一個原子。非諧振輻射時這種激發是不可能的, 這就是兩種輻射的區別。諧振輻射提高了放電中激發原子的濃度。表 1-2 除了列出對應於諧振能級的激發電位 U_s 外還列出了最小的亞穩激發電位 U_m 。亞穩原子再碰撞時它將過渡到常態或被電離決定於這些亞穩原子是失去或者得到能量。放電中亞穩原子的存在, 正如同有顯著的諧振激發原子濃度一樣, 具有實際的意義, 因為這時原子電離的幾率可以得到二級或幾級的提高(累積電

表 1-2. 最小的亞穩激發電位 U_m 、諧振激發電位 U_s 及電離電位 U_i (伏特)

氣 體	U_m	U_s	U_i
H ₂	—	11.1	15.4
He	19.72	20.86	24.5
Ne	16.57	16.62	21.5
Ar	11.49	11.56	15.7
Kr	9.86	9.98	14.0
Xe	8.28	8.39	12.1
Hg	4.66	4.86	10.4

离)。累积电离时,参与电离过程的电子的平均能量降低了。降低的程度决定于累积电离的次数与直接电离的次数之间的比例。为了从数值上表示当两种形式的电离存在时电子的平均能量,时常引入有效电离电位 U_i 的概念。这有效电离电位的数值是在亚稳激发电位 U_m 与电离电位 U_i 之间。

在分子性的气体放电中,还可能有另一种的激发形式,它的特征是分子中电子的振动能的改变。

当定量地考虑电子与气体原子相互作用的数目时,常利用平均自由路程(决定电子在重新碰撞之间所走的平均路程) λ_e 或 λ_e 的倒数,这倒数称作有效截面,后者指示出一个电子在 1 厘米的路程中平均所发生的相互作用的数目。

全(或总)有效截面 Q_e (决定电子在 1 厘米路程中与气体原子相互作用的总数)可用下式求出

$$Q_e = \frac{1}{\lambda_e} = \frac{1}{4\sqrt{2}\lambda_m}, \quad (1-3)$$

式中 λ_m 为热运动下气体原子的平均自由路程。

原子的平均自由路程 λ_m 可从单位体积中的分子浓度 n 和原子半径 a (认为原子所占的体积为球形)按已知的气体运动论的公式求得

$$\lambda_m = \frac{1}{\pi a^2 n} = \frac{1}{qn}, \quad (1-4)$$

式中 $q = \pi a^2$ 是气体原子(或分子)的截面。

单位体积中的粒子浓度 n 与压强 p 的关系为

$$n = \frac{p}{kT}, \quad (1-5)$$

式中 k 是波尔兹曼常数 $= 1.38 \times 10^{-16}$ 尔格/度,从(1-4)及(1-5),我们得到了计算原子的平均自由路程的式子

$$\lambda_m = \frac{k}{q} \cdot \frac{T}{p}. \quad (1-6)$$

將(1-4)及(1-6)代入(1-3)即得

$$Q_e = \frac{qn}{4\sqrt{2}} = \frac{1}{4\sqrt{2}} \cdot \frac{q}{k} \cdot \frac{p}{T} \quad (1-7)$$

用(1-7)式可以說明“有效截面”这个名称的产生。实际上, gn 就是單位体积中所有的原子(分子)的总截面。如果, 將所有这些分子紧紧地(沒有空隙地)排列在 1 厘米² 的面积上, 这样排得的面积的数目將等于 $Q_m \left(= \frac{1}{\lambda_m} \right)$ 。当把这些面积均匀地布置在 1 厘米的長度上, 則每面积之間的距离是 λ_m 。这就是說原子在 1 厘米的路程中和另一原子碰撞 Q_m 次。

确定“有效截面”这名称的原理可以推广到一切其他的基本的相互作用, 但那时要考虑到实际的自由路程。例如, 电子的自由路程为原子的 $4\sqrt{2}$ 倍, 因而总有效截面就是原子的 $4\sqrt{2}$ 分之 1。

列于表 1-3 的 λ_{e0} 及 Q_{e0} 的数值給出了在各种气体里电子的平均自由路程及总有效截面的数值的概念, 表內的总有效截面是在气体压强 $p=1$ 毫米汞柱、温度 $T=273^\circ \text{K}$ (0°C) 下按(1-7)式算出的。这里也列出了所考虑的气体的直径(虚拟的)。

表 1-3. 計算的原子(分子)的等效直径(虚拟的) $2a$ 的数值、
电子的平均自由路程 λ_{e0} 及 1 毫米汞柱与 273°K 下的总有效截面 Q_{e0} 的数值

气 体	$2a$ 厘米	λ_{e0} 厘米·毫米汞柱	Q_{e0} 厘米·毫米汞柱
H ₂	2.3×10^{-8}	7.53×10^{-2}	13.2
He	1.9×10^{-8}	7.41×10^{-2}	13.5
Ne	2.3×10^{-8}	6.57×10^{-2}	15.2
Ar	2.8×10^{-8}	4.38×10^{-2}	22.7
Kr	3.2×10^{-8}	2.08×10^{-2}	48
Xe	3.5×10^{-8}	1.5×10^{-2}	67
Hg	3.6×10^{-8}	2.76×10^{-2}	36

对应于压强为 1 毫米汞柱温度为 0°C 的气体密度通常用作建

立函数表的出发点，这些函数表表示气体放电中各类相互作用的强度。

利用表中 λ_{e0} 及 Q_{e0} 的数值可求得气体在任何压强及任何温度下的 Q_e 与 λ_e ，求时可应用下式：

$$\lambda_e = \frac{\lambda_{e0}}{p_0} \quad (1-8)$$

及
$$Q_e = Q_{e0} p_0, \quad (1-9)$$

这里 p_0 是折合到 0°C 时气体的压强，可用下式算出 p_0 ：

$$p_0 = p \frac{273}{T}, \quad (1-10)$$

式中 p 及 T 为气体的实际压强及绝对温度。

总有效截面 Q_e 决定电子在 1 厘米的路程中与原子所作的一切形式的相互作用的总数，它等于分有效截面（对应于个别的相互作用的形式如弹性碰撞、激发及电离等）的总和。由于粒子间的电磁的相互作用和电子的波动性，实际的总有效截面及分有效截面决定于参与碰撞的电子的总速度（能量）。

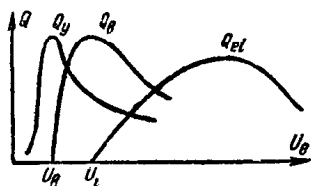


圖 1-4. 彈性與非彈性碰撞的有效截面與電子能量的關係。

圖 1-4 上的典型曲線族指出有效截面與電子速度間的關係的大概情形。這裡橫軸是電子的能量（用等效伏特），而縱軸是彈性碰撞時、激發時、及電離時的有效截面（ Q_y 、 Q_g 、 Q_{el} ）。

從曲線可以看到，當電子速度小時只發生彈性碰撞，隨着達到激發電位 U_g 之後，激發的有效截面（幾率）開始增加。同時，彈性碰撞的有效截面開始減小。而在電子得到足以電離的能量（ U_i ）之後，電離幾率開始增加。同時彈性碰撞及激發的幾率開始減少。

為了判定我們感興趣的氣體的有效截面的具體數值，我們來看一看用實驗方法所找出的 Q 對於 U_e 的關係。

圖 1-5, *a* 是用實驗所得的惰性氣體的彈性碰撞時有效截面 Q_{y0} 與電子速度間的关系的曲線族, 圖 1-5, *b* 是汞蒸汽的。

圖中橫坐標的量正比于電子的速度, 后者是从下式算出的:

$$v_e = 5.95 \times 10^7 \sqrt{U_e}, \quad (1-11)$$

式中 U_e 是電子在電場中所經過的電位差(伏);

v_e 是速度(厘米/秒)。

在我們感興趣的速度範圍內, 惰性氣體彈性碰撞的有效截面由一條具有兩支的曲線(最初上升, 到最大后下降)來決定; 而在汞蒸汽只有下降的一支, 后者為實際目的可以足夠準確地近似于雙曲線 $Q_{y0} = \frac{300}{\sqrt{U_e}}$, 即圖 1-5, *b* 里用虛線畫出的曲線。

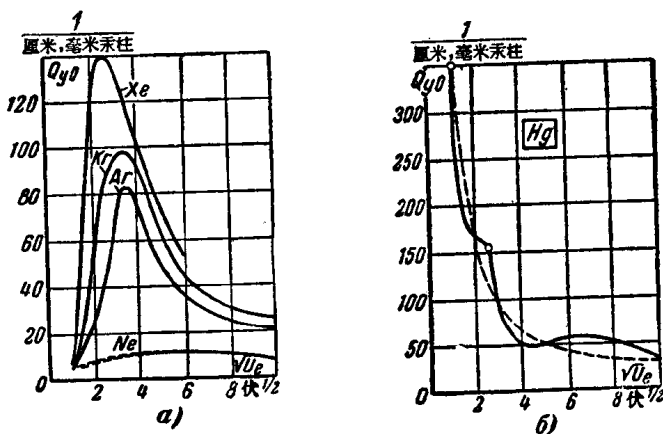


圖 1-5. 彈性碰撞的等效截面, 與電子速度的关系 (a) 惰性氣體 (b) 汞汽。

至于激發过程的有效截面通常是根據激發原子過渡到常態或從較高的激發能級過渡到較低的能級時的輻射強度來判斷。用圖 1-6, *a* 里汞的兩種激發能級的 Q_{e0} 曲線當作例子來說明在激發过程里有效截面隨着電子能量的变化的一般情形。曲線上標出了輻射的電磁波的波長。曲線的起始部分與橫軸的交點是激發電位。

圖 1-6, *b* 指示出在壓強為 1 毫米汞柱, 溫度為 0°C 時, 三種惰

性气体、汞汽及氙的电离有效截面与电子能量间的关系。曲线的起点就是表 1-2 的电离电位。

如果基本气体包含别的气体的混杂物，而这些混杂气体的电离电位低于基本气体原子的亚稳激发电位，那末电离条件就有显著的改变。在这种情形下基本气体的原子首先激发到亚稳能级，它们再电离混杂气体的原子(别宁格效应)。决定这两个过程的有效截面比电子直接电离混杂物或直接电离基本气体原子的有效截面要大很多。例如，为了降低氙的电离电位，可以将氙(它的电离电位是 15.7 伏)或氩(它的电离电位是 14 伏)混到氙中去(按表 1-2 氙的亚稳激发电位是 16.57 伏)。为了得到别宁格效应，很低的混杂气体的浓度就足够(以千分之几来计量)。

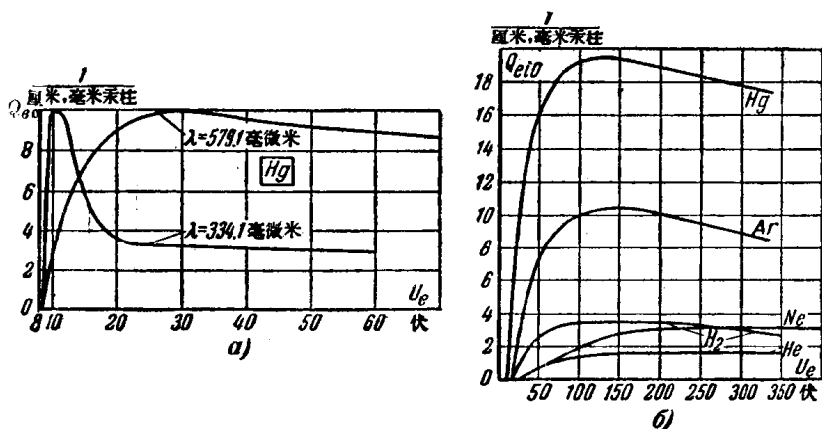


圖 1-6. (a) 汞的兩種激發能級的有效截面和(b)惰性气体的电离时的有效截面与电子能量间的关系。

除了电子电离原子以外，光电离(即用辐射能的量子来电离原子)或热电离也都是可能的。

当原子与光子相互作用时原子是被激发或是被电离决定于原子所接收的光子。这里直接的电离与累积电离都是可能的，它决定于量子的能量(辐射频率)。为了直接光电离，要求具有高能量的