

离子管的計算与 設計基础

C. B. 斯維奇尼科夫講

人民教育出版社

73.
659



离子管的計算与設計基础

C. B. 斯維奇尼科夫講
南京工学院无綫电系 譯

人民教育出版社

本书系根据苏联专家斯维奇尼科夫(С. В. Свечников)在南京工学院无线电系工作时所编写的讲义“离子管的计算与设计基础”(Основы расчёта и проектирования ионных приборов)的底稿译出的。

本书共分三部分:第一部分为非自持弧光放电管,讲述充气二极管和整流管;第二部分为自持弧光放电管,讲述励弧管和引燃管;第三部分为辉光放电管和晕光放电管。

本书先对有关器件进行一般的介绍,从而指出计算和设计时的主要依据。书中除了理论分析外,还给出了必要的经验公式,在必要时还给出了示范计算。本书的特点是由浅入深、理论结合实际。

本书可作为高等工业学校电真空器件专业的教学参考书,对于这方面的科学研究人员和工程技术人员也有参考价值。

离子管的计算与设计基础

С. В. 斯维奇尼科夫讲

南京工学院无线电系译

人民教育出版社出版

高等学校教学用书编辑组
北京宣武门内大街27号

(北京市书刊出版业营业登记证出字第2号)

京华印书局印装 新华书店发行

统一书号 15010·911 开本 850×1168 印张 11⁷/₁₆ 插页2

字数 369,000 印数 0001—7,500 定价(7) 1.76

1960年7月第1版 1960年7月第1次印刷

目 录

課程的实质与内容

第一部分 非自持弧光放电管

第一章 充气二极管	4
§ 1. 充气二极管的作用原理和构造	4
§ 2. 选择所充气体媒质种类和气体或蒸汽压强的大小	14
§ 3. 阴极	38
§ 4. 阳极	95
§ 5. 放电中功率的损耗和管壳的温度	125
§ 6. 管子的整流强度和逆弧几率	139
§ 7. 高电压充气二极管的计算与设计特点	155
§ 8. 试制充气二极管的基本原理	169
第二章 闸流管	176
§ 1. 闸流管的工作原理和结构	176
§ 2. 选择闸流管内的气体种类及其压强	198
§ 3. 按照闸流管的静态特性来计算它的栅极	207
§ 4. 闸流管的消电离参量和特性	234
§ 5. 设计和计算脉冲闸流管的某些特点	253

第二部分 自持弧光放电管

第一章 励弧管	286
§ 1. 自持弧光放电管的基本特点	286
§ 2. 励弧管	295
§ 3. 阴极的计算	317
§ 4. 蒸汽密度和凝結面的计算	327
§ 5. 阳极-栅极部件	345
§ 6. 励弧管内的电压降以及它的伏安特性	357
§ 7. 汞弧管的冷却情况	364
第二章 引燃管	375
§ 1. 引燃管的结构特点	375
§ 2. 在引燃管中引燃极的工作状态及其参量	382

03993

第三部分 辉光放电管和量光放电管

§ 1. 冷阴极管的类型.....	395
第一章 辉光放电管.....	399
§ 1. 辉光放电的基本规律性.....	399
§ 2. 选择辉光放电管内的气体种类及其压强.....	406
§ 3. 辉光放电管的阴极.....	417
第二章 量光放电管.....	435
§ 1. 量光放电的基本规律性.....	435
§ 2. 量光放电稳压管的某些特性和参量.....	441
参考书目.....	448

課程的實質與內容

現代電子學具有非常廣泛的可能性來解決各種不同的實際任務。在電子學技術資料的庫藏里，氣體放電管也同電子器件和半導體器件一樣占着一個主要地位。隨着近幾年來大功率變換技術、脈沖電子學、遙控繼電系統及其他技術的發展，氣體放電管在現代工業電子學中的作用將有更大的增長。在所有這些方面的應用，氣體放電管的基本用途是在電力電路中具有高的效率和在控制電路中具有大的功率放大系數的條件下進行信號的定向發送。應用氣體放電管的多樣性就決定了其型號和結構的多樣性。

每一種型號的氣體放電管，按照其功用，都有自己結構上的特點和在生產過程中必須加以保證的特性。

作為電路元件的氣體放電管的特性，決定於當通有電流時在放電空間中每一部分所發生的物理過程和這些過程間的相互關係，這裡包括陰極、陽極和管壁。屬於這方面的物理過程有電極和器壁的吸氣和放氣、電離和復合過程、形成空間電荷、電子發射、輻射及熱交換。這些過程的特性主要取決於管子及其部件的結構和工藝。管子的參量取決於電極和外壳的材料及材料加工的方法，電極的形狀和位置，所充氣體種類和氣體的純度及壓強，最後也取決於整個管子的幾何形狀。如果管子內放有輔助電極（柵極、過濾器、金屬屏、點火陽極等等），則過程還要複雜。在計算管子時，考慮所有這些影響是不可能的。因此當試制離子管時，基本的和主要的力量還是用於實驗及根據經驗選擇參量及工作情況。可是，電子學的理論基礎知識能使我們有可能選擇正確的途徑來解決具體任務，使能夠最完善和最明確地來描述應當解決的問題，使實驗探索達到最少程度。

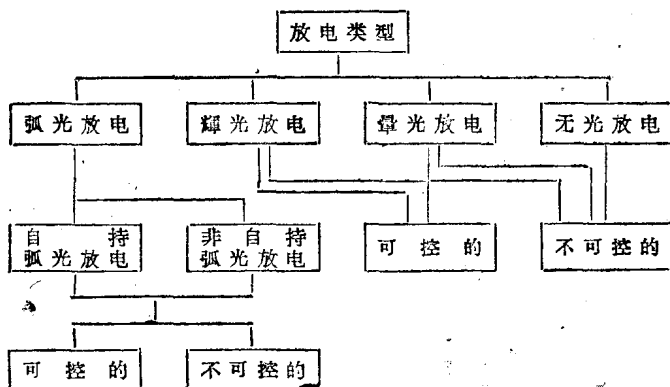
根据这点,对于离子管的計算与設計基础,应该理解为理論計算基础,它使我們有可能近似地計算管子和管子的各个部件。同时可达到的近似程度决定于每个具体場合。

有时只能限于定性分析和一般估計各參量对管子特性的影响。在某些場合,能够进行較彻底的計算而得到很符合实验的数值結果。通常,在計算时,要应用大量的經驗公式、經驗数据及图表。

由上所述可以看出,为了实际掌握气体放电管的計算方法和分析,必須要了解管子本身的特性和結構,了解真空中和气体中电子現象的物理学,了解电真空技术和电真空制造工艺,同时也必須了解其在物理学的相邻部分:气体运动理論和热学。

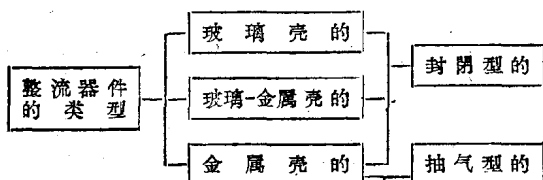
气体放电管的計算分为电的、热的、和結構上的計算。用电的計算来确定作为电路元件的管子特性,用热的計算来确定管子的效率、損耗及尺寸。結構計算是从結構剛度、机械强度、能否实际做出、簡單和价廉等出发点来檢驗管子結構。管子的參量决定于所有計算的数据。最終的答案經常是折中的。因此,分为电的、热的和結構的計算在很大程度上是人为的。可是,在許多場合,它能簡化計算和使計算有系統。

气体放电管的計算及設計包括确定气体的种类和压强;确定阴极、阳极和栅极部件的結構和參量;确定管壳的大小和形状;計算電位曲綫



和伏安特性曲綫；確定管子的击穿強度和冷卻情況。在計算前可以提出決定管子運用特點的專門要求（頻率特性，脈沖特性，溫度條件等等）。上面列出了用于氣體放電管中的放電類型分類表。

氣體放電類型的多樣性決定了離子管的多樣性，而每一種離子管在其結構、特性及應用範圍方面是各不相同的。可是，不管是何種離子管，都可按基本結構標志而歸于下面分類表中的類型之一：



發生在氣體放電管的放電空間中的過程的複雜性和多樣性就使得它們的計算發生困難。可是，在頗多場合計算還是可能的。

從上述內容可看出，以下所寫材料不是嚴格的計算方法。理論所給的近似通常是很粗糙的。可是，積累和總結計算與設計離子管的經驗對順利發展這一知識領域是有利的和必要的。

第一部分 非自持弧光放电管

第一章 充气二极管

§ 1. 充气二极管的作用原理和构造

充气二极管是最简单的气体放电二极管，它的作用原理是基于在惰性气体或汞蒸汽内的非自持弧光放电。管内的压强根据管子型号可以在几个毫米到十分之几和百分之几毫米汞柱高范围内变动。这时，其上限为低电压管，工作电压小于 500 伏，管内充惰性气体（一般为氩气），气压为 10 毫米汞柱高 $P > 1$ 毫米汞柱高，此即所谓番茄管；其下限为中等电压和高电压管，电压范围从 1.5—15 千伏到数百千伏。高压充气二极管内充汞蒸汽或惰性气体，压强 $P \approx 10^{-1} - 10^{-2}$ 毫米汞柱高，上限属于充惰性气体氦、氩或二者的混合气体，下限是充汞蒸汽。工作电压不超过 15 千伏，工作温度范围的下限小于零度（ $-20 - +60^\circ\text{C}$ ）的管子通常充气体。通常，所有工作电压超过 10 到 15 千伏的充气二极管都充汞蒸汽，这就决定了管子的工作温度范围为 15 到 35°C 。

在充气二极管的玻璃内（图 1）放了二个电极：冷的阳极和作为电子发射体的热阴极。热阴极的热电子发射即是维持管内弧光放电的因素。这决定了充气二极管的整流性质，因为只有当阳极相对于阴极为正时，气体放电空间才成为导电的。

充气二极管内阴极做成激活阴极，对于小功率及中等功率的管子做成直热式的；对于大功率的管子，做成有高发射效率的间热式的。在番茄管中，阴极的材料为敷钽的钨，其效率为 300—400 毫安/瓦。这种阴极易于中毒和在强烈的离子轰击下容易失去发射性能。在高电压充

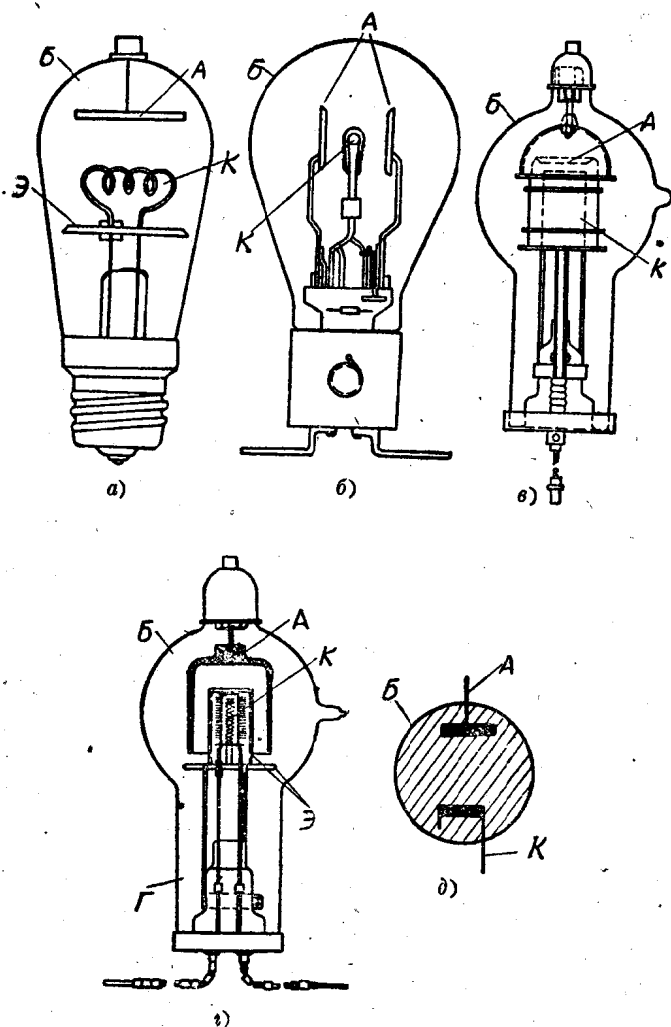


图 1. 充气二极管的典型结构。

a—开式结构；b—开式双阳极结构；c—半掩式结构；d—闭式结构；

e—充气二极管在电路内的符号表示法；A—阳极；K—阴极；Э—屏；

B—管壳；Г—管颈。

气二极管中,阴极做成敷氧化物的,即在鎳鉬合金做成的基金属上敷氧化物,这种阴极的发射效率可达150—200毫安/瓦。为了提高阴极的发射效率,在大功率充气二极管内应用了热屏,见图1, θ 和 ι 。热屏的效果是很大的,使有可能把整个阴极的发射效率提高1—1.5倍。在大电流的气体放电管中,为了增加阴极的工作表面,阴极做成具有翼片的,翼片通常焊在阴极的圆筒部分,或者是水平的(横翼阴极)或者是垂直的(纵翼阴极)。

作为充气二极管内阳极的材料常用鎳或石墨。阳极或者做成平板形的(开式结构),或者做成碗形的,后者部分地或全部罩在阴极上。碗形阳极结构为半掩式的(图1, θ)和全掩式的(图1, ι)。充气二极管的半掩式和全掩式的结构使得可将阳极或阴极最大限度地靠近,得到小的等离子区,增加阳极的表面积,同时保证在阳极附近有负的电位降。为了提高阳极的辐射本领,其外表面黑化或打毛。

充气二极管的外壳形状取决于所充气体。当充汞时,汞蒸汽的压强最主要是决定于放入管壳内汞滴的温度。随着气体媒质压强的变化,管子的工作特性会根本改变。由于周围媒质的温度在变动及为了保护汞点不受燃着的放电电弧的热和热阴极的热的作用,管子的正常工作情况要求限制汞滴温度的波动。在大功率的充气二极管中,这个任务由延长细袖形的管壳下部来解决,见图1, θ 和 ι ,该部分称为管颈。与此相反,管壳的上部要有很好开展的球形面。管颈被金属屏与管子的放电部分隔离开,因此管颈部分的温度通常不超过40—50°C,而在这时,管壳球形部分的工作温度可能达到150—200°C左右。管子的工作情况是这样的,汞滴在管颈底部,在那里由于较低的温度,汞蒸汽使该部空间饱和。在上部被阴极和电弧加热的体积中,空间的蒸汽未达饱和,因为其气压同于颈部,而温度则要高出很多。

每次改变汞滴的温度时,玻壳部分和管颈间的气体媒质都应立起平衡。在这时,玻壳的热平衡应使汞蒸汽压强的改变不超过允许的范围。

当充气二极管内充惰性气体时,情况就不同了。此时,充气二极管玻壳内是充入一定量的气体。因此,管内气体的平均密度在很宽的温度范围内保持不变,故起汞贮藏作用的管颈(上面讨论过的情况)就没有必要了。在这情况下,管壳的形状和大小主要决定于管子的绝缘强度和温度情况。

工作电压为几十万伏的高电压充气二极管就有不同于上述的结构。这样的充气二极管(图 2)。是玻壳型的,其阳极—阴极间的工作空间被镍筒或石墨圆筒分隔开来,这些圆筒称为插入环。这些插入环紧连着玻壳壁,以消除长迴路放电,同时在熄弧期间起着消电离面的作用。每一个插入环有穿过玻璃的引出线,因此为了减少击穿的可能性,相邻二个插入环的引线由不同的方向引出。

在插入环间的空间处,管壳有膨胀部分,其目的是防止沿玻璃内表面的飞弧。

充气二极管的每一段都接上电容分压器,其作用在于使电位在不导电周期内均匀分布于插入环间。充气二极管和电容分压器平着从各方面固定于绝缘架上,这绝缘架也同样地放入带有绝缘壁内充有变压器油的罩内。应用油介质可减小管子尺寸,但不降低管子的绝缘强度。

充气二极管的阳极是镍做的,具有圆滑边和底的圆筒形。阴极是氧化物直热式型的,带有热屏(图 2, δ)。热屏与阴极绝缘,在这情况,它有自己的单独的引出线。

高电压充气二极管所允许经受的电压取决于分段数。分段数愈多,充气二极管能经受的许可电压就愈高。相邻二分段间的电压不应超过 15 到 25 千伏。

当分段数很多时,在高电压充气二极管内极为重要的问题是降低着火电压。着火电压应尽量小。为了降低着火电压,在电容分压器电路内预先可考虑放有空气放电器,其击穿距离为 0.1—0.2 毫米。放电器可接上充气二极管的随便那一段。可是,如果把它接上从阴极算起

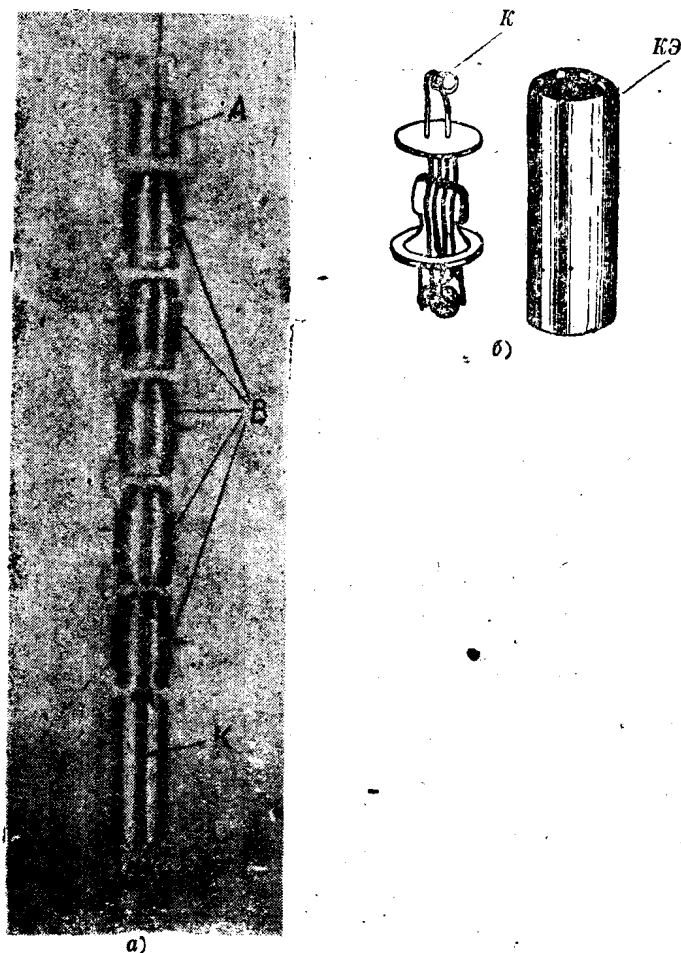


图 2. 高压充气二极管。

a—外形；*б*—阴极部件；*A*—阳极，*K*—阴极；*KЭ*—阴极屏；*B*—插入环。

的第一段，则其效果就很差了。

当有了放电器，高电压充气二极管在许可工作电压大于 100 千伏时的着火电压就在 1.5 到 2 千伏间。

电容分压器与放电器一起是整个管子不可缺少的一部分，须按照

管子的特性来计算。

影响高电压充气二极管特性的因素，最主要的为管子的形状、大小、金属电极的加工质量，以及在给定汞蒸汽的压强下选择得最小的极间距离。

充气二极管主要的用途是在交流电变换成直流电的电路中当作整流元件进行工作。因此，作为整流元件的充气二极管，其基本特性应是整流效率和电导，它们应尽可能大。

整流效率，在第一次近似中，可以用下面关系式决定：

$$\eta_e = \frac{U_0}{\Delta U_e} \quad (1)$$

在这关系式中， U_0 和 ΔU_e 相当于管子能经受的反电压和电弧燃着期间管子上的电压降。从(1)式可以看出，为了提高 η_e 必须要增大 U_0 和降低 ΔU_e 。小的 ΔU_e 决定了整流器有高的电导，正如下式决定：

$$\sigma = \frac{I_a}{\Delta U_e} \quad (2)$$

这里 I_a ——充气二极管的阳极电流。

现在这样的高电压充气二极管具有最大的效率，当 U_0 为几十万伏或几万伏时，管子的 ΔU_e 不超过 40—50 伏。充惰性气体具有较高气压的番茄管具有最大的向阴极表面的电导。

整个整流管的效率和它的电导是阴极发射效率的函数，因此也就是耗于加热功率 P_h 的函数。管子的热平衡和它的寿命与加热损耗功率有关，且寿命随着阴极温度的增加而减少。当设计和计算充气二极管时，应当非常认真地注意这点，每次都要按照技术条件来选择最好的方案。

气体放电管，特别是充气二极管的特性和性质，在许多方面都是决定于当电流通过放电气体时在管子的极间空间内所发生的物理过程。当分析气体放电管的特性时，首先要把管子当作电路的元件。因此，决

定管子气体放电空间的电导的过程就作为电现象而出现。当电流，通过管子时发生在极间空间的这些电现象，在管子的电位分布曲线得到了反映，这曲线表明了沿极间空间电场的电位变化（相对于阴极）。因此电位分布曲线可给定为 $\Delta U = f(l)$ 的关系式，这里的 l 是从阴极到气体放电空间中要确定电场的该点的距离。

分析电位曲线使有可能决定一系列管子的参量和特性，以及允许更深入到决定电流通过管子的现象的物理方面。充气二极管的典型电位曲线援引于图3。曲线1属于中等电压和高电压充气二极管的情形，而曲线2和3相当于雪茄管——低电压充气二极管。

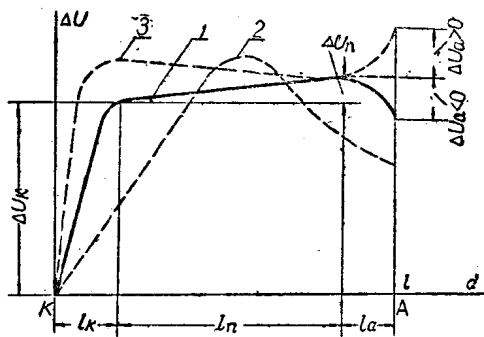


图3：充气二极管的电位曲线。

1—中等电压和高电压充气二极管的电位曲线，气压 $P < 0.1$ 毫米汞柱高；

2, 3—低压充气二极管的电位曲线，气压 > 0.1 毫米汞柱高。

在所充气压小于 10^{-2} 毫米汞柱高的中等电压和高电压充气二极管的电位曲线上显出三个特性区域：阴极位降 ($\Delta U_k, l_k$)，电弧的正柱 ($\Delta U_n, l_n$) 和阳极位降 ($\Delta U_a, l_a$)。

很显然，整个管子电压降决定于气体放电空间的各区域的电压降之和：

$$\Delta U_e = \Delta U_k + \Delta U_n + \Delta U_a. \quad (3)$$

同时，对曲线1来讲，以下关系式是成立的：

若 $l_n \neq 0$ ，则

$$l_n \gg l_k, l_a; l_k < l_a \quad (4)$$

$$\text{及} \quad \Delta U_k \approx U_i \gg \Delta U_n; \Delta U_a; \Delta U_e \gg \Delta U_k. \quad (5)$$

阴极位降约等于充于管内的气体的电离电位 U_i , 大约为几十伏。这电压降是整流器上电压降的基本部分。

阴极位降决定于靠近阴极的等离子区末端的离子的正空间电荷。这个正电荷区域位于阴极表面很近的地方 $l_k \ll \lambda_e \approx 0.1$ 厘米, λ_e 为电子平均自由程。因此, 阴极附近的电场就增加得显著降低电子从阴极里出来的逸出功。

阴极附近离子云的平衡决定于电离的强度。所以, 如果要求从阴极出来的电流密度大于热电子发射电流密度, 即 $j_k > j_r$, 则 $E_k > 0$ 和 $\Delta U_k > 0$ 。前一个不等式的程度愈深, 则阴极位降愈大, 阴极附近的电场愈强, 逸出功的降低就愈厉害。可是随着 ΔU_k 的增加, 来到阴极的离子的能量就增加, 则阴极溅射的可能性就增加。阴极的温度愈高, 溅射的可能性也愈大。在正常的工作情况, 经常须做到这个不等式 $\Delta U_k < \Delta U_{kp}$, ΔU_{kp} 为阴极开始强烈溅射的临界电位。设计和计算充气二极管时, 当所充气体已定, 这个不等式应当用适当的阴极结构及其参量来加以保证。在充气二极管使用过程中, ΔU_k 的增加就证明或者管子的工作情况不正确, 或者阴极发射有损失, 或者由于漏气或管子的电极和管壁吸收气体使气体压强改变。

充气二极管的高电导决定于在工作的管子内有形成的等离子区, 即电弧正柱。等离子区可以用气体体积内有着二种符号的自由带电粒子来说明, 这种粒子处于动态平衡, 能够携带电流。在等离子区内的带电粒子的浓度与中性的分子或原子相比是不大的, 通常不超过 $10^9 \sim 10^{12}$ /厘米³, 这相当于中性原子的千分之几和十万分之几。可是, 为了保证等离子区的高电导, 这样的电荷浓度已足够了。虽然等离子区有高电导, 但在等离子区内仍旧存在不大的纵向电场, 电场值决定于必须用电离来补偿从等离子区走向管壁和电极的离子数。 E_k 的值通常不

超过十分之几伏/厘米,同时随气压减小而减小。因此在正柱区内功率的损失是不大的,为充气二极管内放电功率的百分之几。

从图3曲线1可以看出,在充气二极管内阳极位降可以大于零,小于零或等于零。 ΔU_a 的符号决定于阳极附近处综合的放电条件,特别是阳极的大小、形状,材料和温度。在所有其余条件都相同的情况下, ΔU_a 取决于阳极电流密度 j_a 。在第一次近似中,可以用以下不等式来估计阳极位降的符号:

$$\begin{aligned} \text{当 } j_e < j_a, \Delta U_a > 0; \\ \text{当 } j_e > j_a, \Delta U_a \leq 0, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 j_e ——到阳极的不规则电子流的密度。可是,应该记住,不等式(6),甚至在最简单的平板阳极情况也不是经常做到的。

影响 ΔU_a 符号和数值的第二个因素是从等离子区走向阳极面的离子流。如果这个离子流小,则在阳极附近形成负的空间电荷。因为在 $\Delta U_a \approx 0$ 时阳极面附近的电离几率小,所以从等离子区而来到阳极的离子是由于漂移和扩散。为了使散向管壁的离子减至最小,必须使阳极的形状是促使离子聚集,而不是使它散开。由上述可看出,为了减小 ΔU_a ,阳极应有很好的开展面,其表面附近的电场应当促使离子聚集。将阳极做成碗形就能同时满足这二个要求,这种结构对于大电流大功率充气二极管说是具有代表性的。

④ 在番茄管内,即气压约为10毫米汞柱高的充气二极管内,正柱和阴极区就混在一起,在电位曲线上就出现特性最大值(图3曲线2,3),这是由于在较高气压下电子自由程较小而引起的,因此,当电离区移向阳极时就产生累积电离。从阴极发射出来的电子,在小的自由程情况下,不能在一个自由程内积累足够的电离能量。为了这点,就要求几个自由程。因此,电离中心就离开阴极。在电离中心处离子浓度最大,所以使曲线 $\Delta U = f(l)$ 的最大值移向阳极一面。等离子区直接与阳极连接。由于气体密度稍大,离子从等离子区出来向管壳壁扩散就遇到困难。