

中等专业学校教学用书

电子管及其设计基础

下 册

南京无线电工业学校编



国防工业出版社

中等专业学校教学用书

电子管及其设计基础

下 册

南京无线电工业学校编



国防工业出版社

內 容 簡 介

本書按無線電中等專業學校“電子管及其設計基礎”課程的教學大綱編寫而成。

全書共分十五章：第一、二兩章討論電子理論基礎和電子發射；第三章討論電子管陰極及其計算和設計；第四章至第九章討論兩極管和各類型帶柵極電子管以及它們的基本計算；第十章至十五章討論特种電子管，其中包括超高頻電子管、光電管、電子束管、倫琴管、不放電器件及半導體器件等。

本書供無線電中等專業學校“電真空器件製造”專業的学生作教本用。對從事電真空器件製造的技術人員也是一本可參考的書籍。

全書分上、下兩冊印出。上冊包括第一章至第五章；下冊包括第六章至第十五章。

本書下冊由史世平同志編寫。

0580/05

*

國防工業出版社

北京市書刊出版業營業許可証出字第 074 號
機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

*

787×1092 1/25 印張 97/25 184 千字

1959 年 8 月第一版

1959 年 8 月第一次印刷

印數：0,001—6,250 冊 定價：(10) 1.10 元

NO. 3051

目 录

第六章 四極管	169
6-1 概述	169
6-2 四極管的簡化。等效电位	171
6-3 四極管中的电流分配，板極电流的計算	172
6-4 四極管的靜态特性曲綫。負阻效应	174
6-5 四極管的靜态参量	177
6-6 消除負阻效应的方法。束射四極管	179
第七章 五極管	182
7-1 概述	182
7-2 五極管的抑制柵極	183
7-3 五極管的等效电位。五極管的电流分配	184
7-4 五極管的特性和参量	185
7-5 五極管的結構特点。低頻放大五極管与高頻放大 五極管	189
7-6 变 μ 管	192
第八章 多柵管与复合管	195
8-1 板流双重控制的电子管。混頻管	195
8-2 多柵变頻管	199
8-3 复合管	202
8-4 电子束調諧指示管	203
8-5 电子管內部噪声	205
第九章 振蕩管	210
9-1 概述	210
9-2 他激电子管振蕩器	210
9-3 自激电子管振蕩器	216
9-4 振蕩管的参量，結構特点及类型	217

9-5	強力振蕩管.....	220
9-6	脈沖振蕩管.....	225
9-7	脈沖調制管.....	230
9-8	水冷陽極的計算.....	233
9-9	風冷陽極的計算.....	238
第十章	超高頻電子管	243
10-1	概述	243
	I 靜電控制的超高頻電子管.....	244
10-2	極間電容和引綫電感對電子管工作的影響	244
10-3	電子在極間的渡越時間對電子管工作的影響	247
10-4	超高頻下電子管中的能量損耗	253
10-5	靜電控制的米波管	254
10-6	靜電控制的分米波管和厘米波管	258
	II 動態控制的超高頻電子管.....	263
10-7	電子的群聚原理	264
10-8	直射式速調管	266
10-9	反射式速調管	272
10-10	電子調諧.....	277
10-11	磁場對電子流的控制原理.....	278
10-12	多腔磁控管的結構.....	279
10-13	多腔磁控管的工作原理.....	283
10-14	多腔磁控管的工作特性和效率.....	285
10-15	綫卷式行波管.....	288
10-16	空間電荷波行波管.....	292
10-17	返波管.....	298
第十一章	光電器件	300
11-1	概述	300
11-2	光電管的結構和光電陰極	300
11-3	光電管的特性和參量	302

11-4	光电倍增器	306
11-5	光敏电阻	309
11-6	光电池的工作原理、結構和特性	311
11-7	光电变换器	313
第十二章 电子束管		316
12-1	概述	316
12-2	电子光学基本原理	317
12-3	静电控制和磁控制的电子束管	323
12-4	电子示波管	331
12-5	电视显像管	335
12-6	电视发送管	340
第十三章 倫琴管 (X光管)		350
13-1	倫琴射线的产生。抑制倫琴射线和标識倫琴射线	350
13-2	倫琴射线的性質及其实际运用	357
13-3	电子倫琴管及其特性	359
13-4	倫琴管的分类和結構特点	362
13-5	倫琴管的保安装置	366
13-6	倫琴管的运用。倫琴整流管	367
第十四章 半导体器件		370
14-1	概述	370
14-2	p-n 結。晶体二極管	370
14-3	晶体三極管	377
14-4	晶体三極管的参数和特性	383
14-5	特种晶体管	387
第十五章 不放电器件		390
15-1	稳流器	390
15-2	稳压器	391

第六章 四極管

6-1 概 述

从三極管的討論中可以看到三極管有下列一些缺点：

1. 板極加速電場的作用不大，板極電流受了空間電荷的限制，因而必須應用高的板極電壓，才能產生足夠大的等效電壓，獲得所需要的板流。
2. 由於等效電壓低，跨導 S 不能達到足夠大的數值。
3. 高放大系數的要求與左特性的要求相矛盾，使得三極管作放大應用時，得到無畸變放大的直線運用範圍縮小。
4. 相當大的板極和柵極間電容使得三極管難於供高頻放大之用。

為了克服這些缺點人們提出了四極管的建議，它在控制柵極與板極間加進另一個柵極（圖6-1），這個電極加了大約是30~100%板極電壓的高電位。這樣由於第二柵極電位的作用增強了控制柵極表面的等效電位，可以在低板壓下獲得足夠大的板流和跨導值，並且第二柵極減弱了板極電場對陰極表面空間電荷的作用，減低了板壓對板流的控制作用，使電子管的放大系數增大。

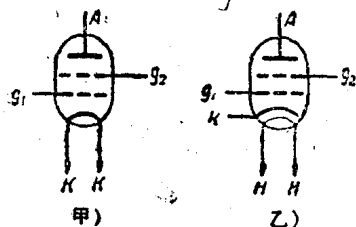


圖6-1 四極管的表示符號：

甲—直接式陰極；乙—間熱式陰極。

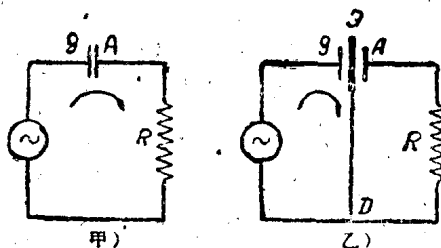


圖6-2 屏柵作用原理圖。

此外，第二柵極把板極和控制柵極屏蔽起来，結果大大降低了电子管的跨路电容 (C_{ag1}) 和輸入电容，使这种电子管有利于高频的工作。为了清楚地了解第二柵極的屏蔽原理，我們討論圖 6-2 所示的綫路。在圖中，板極与柵極用两块平行薄片 A 和 g 代替。

在电容 C_{ag} 的綫路里，連接一个交流电 动势 E ；这样在綫路里連接的安培計讀数

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(-\frac{1}{\omega C_{ag}}\right)^2}}$$

現在我們在 A 和 g 間安放另一薄片 9 并将它連接到綫路中如圖 6-2 乙所示。那么 A 和 g 之間就有了两个串联的电容 C_{ag} 和 C_{A9} ，由于电路的右一部分被導綫 $9D$ 短路，因此电流将不通过电容 C_{A9} （安培計的讀数等于零）。在这个电路中没有电流，可以說是將 A 和 C 間的电容作用減到零。薄片 9 遮断了 A ， g 間的电力綫使 A 与 g 互相屏蔽起来。

四極管就是利用这种屏蔽的方法。在管内控制柵極与板極間装了一个具有恒定高电位的靜电屏蔽。当然这种屏蔽絕不能用整塊导体作成，因为这样电子就不能到达板極。通常这个屏蔽做成螺旋柵極形状，繞得很密，每厘米有 20 匝柵絲把控制柵極与板極隔开，因此它又称为屏柵極。

有了屏柵極，电子管内板柵間电容可由三極管的 2~4 微微法減少到 0.02~0.03 微微法，这样小的电容，在很大程度上消灭了板極回路与柵極回路間的互相耦合，因此使这种电子管可以較好地应用在高頻放大器中。

現代四極管已很少用，几乎都被五極管和束射四極管所代替，这是因为这些管克服了四極管的严重缺点——負阻效应所致。但是分析四極管的工作原理及屏柵極在管內的屏蔽作用对研究五極管和束射四極管仍有極大帮助，所以在下面的几节中我們將專門討論四極管的等效电位，电流分配及其特性和参量。

6-2 四極管的簡化。等效电位

四極管中的電場分布決定於板極、第一柵、第二柵三個電極上的电位，因此各電極上電流的流通是這三個電極电位的函數。

陰極電流值決定於加在陰極與第一柵間的總和电位，和三極管一樣，在四極管第一柵表面各點电位並不相同，但是為了計算陰極電流方便起見，我們仍可以用加在位於第一柵的實面等效板極上的等效电位來代替第一柵、第二柵和板極的作用。這個等效电位的數值我們可以用簡化三極管的類似方法求得。

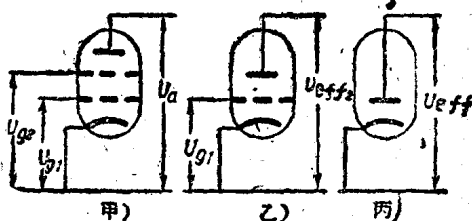


圖6-3 四極管簡化成等效二極管：

甲—四極管；乙—等效三極管；

丙—等效二極管。

板極和第二柵的總和作用可以用加在位於第二柵表面的等效板極的 U_{eff2} 來代替，這樣四極管先簡化成三極管（圖 6-3），而

$$U_{eff2} = U_{g2} + D_2 U_a \quad (6-1)$$

式中 D_2 是板極通過第二柵的滲透率。

然後再把這三極管簡化成等效二極管，總的等效电位

$$U_{eff} = U_{g1} + D_1 U_{eff2} \quad (6-2)$$

式中 D_1 是屏柵極通過第一柵的滲透率。

把 (6-1) 代入 (6-2) 可以求得四極管的等效电位方程：

$$U_{eff} = U_{g1} + D_1 U_{g2} + D_1 D_2 U_a \quad (6-3)$$

式中 $D_1 D_2 = D$ 是四極管的總滲透率，它表征了四極管板極對陰極表面電場的靜電作用。因為 D_1 和 D_2 值總是小於 1，因此 $D \ll 1$ 。這表明四極管板極電場對陰極表面空間電場的作用很微弱。在一定的第一柵電壓下等效电位主要決定於第二柵電壓 U_{g2} ，因此四極管的等效电位可以簡化為

$$U_{eff} \approx U_{g1} + D_1 U_{g2} \quad (6-4)$$

因此四極管的陰極電流也主要決定於第二柵壓，把二分之三次方定律用於等效二極管可以求得四極管陰極電流：

$$I_k = g U_{eff}^{3/2} \approx g (U_{g1} + D_1 U_{g2})^{3/2} \quad (6-5)$$

式中係數 g 由四極管第一柵與陰極的幾何尺寸決定。

6-3 四極管中的電流分配，板極電流的計算

四極管在一般情況，第一柵都工作於負電壓下沒有第一柵流，因此陰極電流主要分配在第二柵和板極上，此時第一柵可看作供給四極管總電流的陰極。和三極管中討論的電流分配的規律相似，這兩個電流的比值決定於這二個電極上的電壓比值及其幾何尺寸。

板極和第二柵上的電流分配與正柵三極管內的電流分配一樣。當陽極電壓大於第二柵壓時，電流分配是直接截獲情況，此時的電流分配係數

$$\frac{I_a}{I_{g2}} = K = C_1 \sqrt{\frac{U_a}{U_{g2}}} \quad (6-6)$$

C_1 是決定於幾何尺寸的係數，對平板電極

$$C_1 = \frac{P-d_g}{d_g} \left(\frac{X_g}{X_a} \right)^{2/3} \quad (6-7)$$

對圓筒電極

$$C_1 = \frac{P-d_g}{d_g} \left(\frac{r_g}{r_a} \right)^{1/3} \quad (6-8)$$

若板極電壓低於第二柵電壓，那麼除了電子被第二柵直接截獲外，還有一部分電子在第二柵和板極空間受到空間電荷的拒斥而返轉第二柵極。

在返轉情況下，板流和第二柵流的分配規律決定於第二柵和板極空間的拒斥電場，要使電子從第二柵到板極的運動中受到拒斥而返回第二柵極，必須使第二柵與板極間的拒斥電位差大於或等於電子到第二柵前所經過的加速電位差。可以認為電子通過第二柵的速度決定於第二柵的電壓 U_{g2} 。因為板壓總是大於零，第

二栅与板极间的电位差总是小于第二栅压，这样以垂直板极方向朝板极运动的电子不至于失去全部速度将到达板极，只有那些沿与垂直板极方向成一角度运动的电子可能失去向板极方向的分量速度，结果返回第二栅极，这些情况从圖 6-4 中可以看得很清楚。

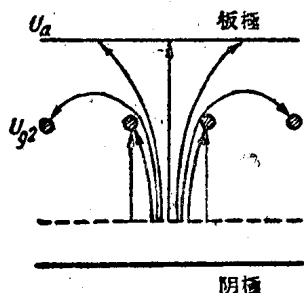


圖6-4 四極管中电子在返轉情况的运动軌迹。

也可以用类似正栅在三极管返轉情况的电流分配公式来计算四极管中电子向第二栅返轉的电流分配系数。

必須指出四极管中的电流分配，可能受第二栅和板极上二次电子发射的影响引起很大的变化。二次电子从低电位的电极过渡到高电位的电极，结果使低电位电极的总电子流减少，而高电位电极的电子流增加。因此，电流的分配规律只可以在較低的电极正电位下（那时一次电子能量不足，二次电子发射不显著）进行实验的研究。

当板极电压低于第二栅压，足以引起二次电子发射的情况下，从板极发出的二次电子在电场作用下轉移到二栅，使板流降低，第二栅流增大。这样，在电子管动态工作时将相应地使板压增大，造成到达板极的一次电子速度的增大，引起二次发射时系数的升高。结果板压将不断地随板流的降低而提高，甚至使电流分配轉变到第二栅的直接截获情况。

这种由于二次电子使电子管内各电极电流发生变化的现象称为打拿效应。

四极管中如果第一栅压为負值，那末板流可以簡單計算如下：

因为

$$I_a + I_{g2} = I_k$$

又

$$\frac{I_a}{I_{g2}} = K$$

所以

$$I_a = \frac{K}{1+K} I_k \quad (6-9)$$

四極管陰極電流值由 (6-5) 式求得，所以

$$I_a = \frac{K}{1+K} g (U_{g1} + D_1 U_{g2})^{3/2} \quad (6-10)$$

如果第一柵是正電壓（例如四極管在振盪器綫路中工作時），那麼電流分配情況比較複雜。此時必須計算第一柵和位於第二柵表面的“屏柵板極”間的電流分配係數 $K_1 = \frac{I'_{g2}}{I_{g1}}$ ，它是 U_{eff2}/U_{g1} 比值和第一柵與第二柵幾何尺寸的函數。因為“屏柵板流” I'_{g2} 等於板流與第二柵之和

$$\text{并且} \quad I_K = I'_{g2} + I_{g1}$$

$$\text{所以} \quad I'_{g2} = \frac{K_1}{1+K_1} I_K, \quad I_{g1} = \frac{1}{1+K_1} I_K$$

再計算板流與屏柵流間的分配，可得板流公式

$$I_a = \frac{K}{1+K} I'_{g2} = \frac{K}{1+K} \cdot \frac{K_1}{1+K_1} I_K = \frac{K}{1+K} \cdot \frac{K_1}{1+K_1} g U_{eff}^{3/2} \quad (6-11)$$

6-4 四極管的靜態特性曲綫。負阻效應

如上所述四極管的板流與各柵極電流決定於各電極上的電壓。表征這些電流與某一電壓的關係（其他兩電壓恒定）稱為四極管的靜態特性。

可以利用圖 6-5 所示的綫路作出四極管的各項靜態特性曲綫。

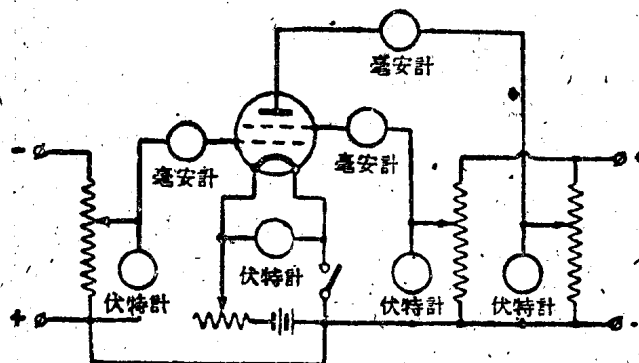


圖6-5 四極管連接綫路。

首先讓我們研究板流和屏栅电压間的关系。圖 6-6 画出了在恒定但不同板压下，CO-124 型四極管的 I_a-U_{g2} 曲綫。可以看出，如果 $U_{g2}=0$ ，那么电子差不多不流向板極；因为此时板極和屏栅極的等效电位 $U_{eff2}=U_{g2}+D_2U_a \approx 0$ 。

要产生板流并使之增大，屏栅極必須供給正电位，这样板極电路不仅有电流 I_a ，而且屏栅电路也有电流 I_{g2} ，这两个电流的比值，决定于它們相应电压的比值。

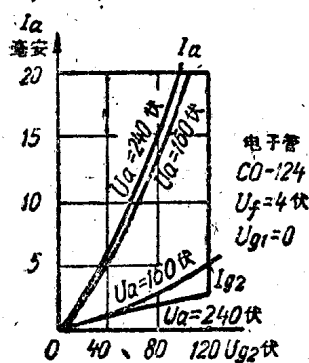


圖6-6 四極管 I_a-U_{g2}

$I_{g2}-U_{g2}$ 曲綫。

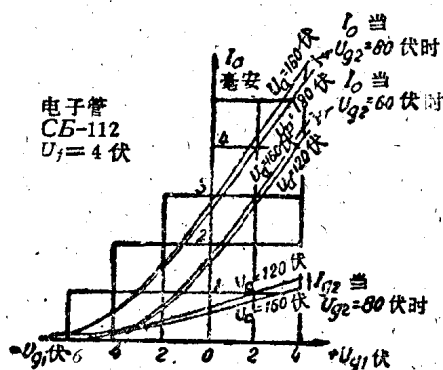


圖6-7 四極管 I_a-U_{g1}

$I_{g2}-U_{g1}$ 曲綫。

其次，我們討論板流、屏栅流与控制栅压間的关系。它們可用恒定不同板压下的 I_a-U_{g1} ， $I_{g2}-U_{g1}$ 曲綫来表示，但是由于四極管板流与屏栅流还受屏栅压的影响，因此必須在不同屏栅压下画出几組这种特性曲綫。圖 6-7 表示了电子管 CE-112 在屏栅压为 80 与 60 伏，而板压分别为 160 与 120 伏时画出的特性曲綫。曲綫的形状指出，屏栅压对于板流的影响远大于板压，当屏栅压增加 20 伏时，板流的增加及特性曲綫的左移比板压增加 40 伏还要大得多。原因是屏栅压的增大削弱了阴極附近的空間电荷作用，使阴極电流增大，而板压的增加只是改变阴極电流在板極与屏栅極之間的电流分配。当板压增加时 I_a-U_{g1} 特性曲綫向左移动很小，原因是板压对截止栅压几乎没有影响，这里不像二極管那样，

特性曲线互相保持平行，而是板压增加，曲线变得陡些分散成扇形。

产生扇形分开的原因：第一是在一定屏栅压下增加板压，改变了阴极电流在板极与屏栅极之间的分配，使阴极电流有更大的部分跑向板极，在这情形下当控制栅压增加时，阴极电流增大，随着板流也相应增长。第二是由于屏极的二次电子，当板压增加时有更多的二次电子跑向板极。

显然，特性曲线的左移不仅与板压有关，也决定于屏栅压。至于屏栅流，它也有相应的变化，原因与上述相同。

最后我们谈一谈对四极管有很大意义的 I_a-U_a 特性曲线。它表示了恒定第一栅及屏栅电压下，板流与板压间的关系。图6-8画出了四极管典型的

I_a-U_a 曲线，在这图上同时还画出 $I_{g2}-U_a$ 曲线。图上表明，曲线可以分做三段：第一段，板流随板压的增加而急剧上升；第二段，当板压增加时，板流出现下降现象；第三段，

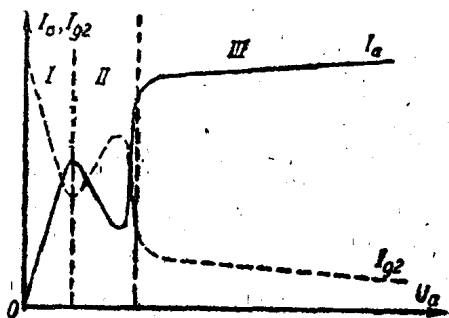


图6-8 四极管 I_a-U_a 曲线。

板流随板压的增加作不显著的增長。

在第一段板流的快速增长是由于在返转情况当板压增加时，电流分配系数迅速增大所致。在这一段因为板压低，到达板极电子的能量还小，不足引起显著的二次发射，因此二次电子对电流分配还没有甚么影响。

当到达板极的电子具有足够大的能量时，将产生显著的二次发射，并且二次电子发射的数量将随板压的增大而加多。如果此时第二栅压高于板压，那么由板极发出的二次电子将转移到第二栅，使第二栅流加大，板流减小。因此在第二段随着板压的增加

出现了板流的下降，这种现象称为四极管的负阻效应。

再加与板压便进入第三段，此时板压接近于第二栅压，由板极出发的二次电子将仍返回板极，对电流分配没有甚么影响。当板压大于第二栅压时，电流分配进入直接截获情况，此时板流随板压的增加作微弱的增长，因此曲线显得比较平坦。

一般四极管当板压加到约 40 伏左右就进入第三段，也就是此时板压的增加对四极管的等效电位已不发生甚么影响，阴极电流不随板压的增加而加大，可以把板流和屏栅流之和看作恒定不变的。

负阻效应在很大程度上限制了四极管的应用，在电子管动态工作情况，板压可能低于第二栅压而进入第二段的负阻区，引起许多不良的现象，如板极回路激起寄生振荡，使被放大信号产生畸变等等。因此现代四极管仅作大功率振荡之用。

6-5 四极管的静态参量

和三极管类似，表征四极管屏栅压固定时，板流、板压和控制栅压间变化联系的静态参量有跨导、内阻和放大系数。

和三极管不同，四极管参量不仅受到板压和控制栅压变化的影响，还受到这些电压变化所相应引起电流分配变化的影响。

下面分别讨论四极管的这些参量。

跨导 四极管在板压和第二栅压恒定时，若控制栅压变化 ΔU_{g1} 时引起板流变化 ΔI_a 。那么跨导可以写成

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_{g1}} \quad (6-12)$$

控制栅压变化 ΔU_{g1} ，引起阴极电流变化 ΔI_k ，后者分配在板极和第二栅极上，所以

$$\Delta I_k = \Delta I_a + \Delta I_{g2} \quad (6-13)$$

因此

$$\Delta I_a = \frac{K}{1+K} \Delta I_k \quad (6-14)$$

这样可以求得跨导

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_{g1}} = \frac{K}{1+K} \cdot \frac{\Delta I_k}{\Delta U_{g1}} = \frac{K}{1+K} S_k \quad (6-15)$$

式中 $S_k = \frac{\Delta I_k}{\Delta U_{g1}}$ 称为阴极电流的跨导，它由下式计算

$$S_k = 3.49 \times 10^{-6} \frac{F_{g1}}{X_{g1}^2} U_{eff}^{1/2} \quad (6-16)$$

将 (6-16) 式代入 (6-15) 式求得

$$S = \frac{K}{1+K} 3.49 \times 10^{-6} \frac{F_{g1}}{X_{g1}^2} U_{eff}^{1/2} \quad (6-17)$$

若 $2.33 \times 10^{-6} \frac{F_{g1}}{X_{g1}^2}$ 以 g 表示，跨导公式可以改写成

$$S = \frac{3}{2} \cdot \frac{K}{1+K} g U_{eff}^{1/2} \quad (6-17a)$$

可以看出四极管的跨导和电流分配有很大关系，在其他条件相同时，电流分配系数愈大，则跨导愈大。因此，在设计四极管时应力求减小第二栅流。在束射四极管和五极管还采用第一栅与第二栅栅丝对齐的办法来减小第二栅流，这些问题我们以后还要详细讨论。

内阻 四极管的内阻表示第一栅压与第二栅压恒定时，板压变化 ΔU_a 与引起板流变化 ΔI_a 之比

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \quad (6-18)$$

四极管的内阻很高，这是由于板压对板流影响受屏栅极削弱的缘故，它的数值大约是几十万欧姆。

放大系数 四极管的放大系数表示维持板流恒定时，板压的变化与第一栅压变化的比值

$$U = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_{g1}}, \quad I_a, U_{g2} = \text{常数} \quad (6-19)$$

三极管在负栅压下，板流的变化仅由于阴极电流的变化所致。但是在四极管中，由于板压和第一栅压的变化所引起板流的变化还有另外的原因。例如要维持板流不变，当第一栅压增加时必须降低板压，其中第一栅压的增加使电子管阴极电流上升，而板压的变化所引起板流的变化是由于电流在板极和第二栅极间的重新分配所致，并没有引起阴极电流的变动。由于板极的渗透率

小，靠板压的变化，不足以补偿第一栅压变化所引起等效电位的变化，因此四极管又不可能在等效电位维持不变情况下，维持板流不变。

如果增大第一栅压 ΔU_{g1} ，并且要维持等效电位不变，那么板压必须降低 δU_a ，而且

$$\Delta U_{g1} = D \delta U_a \quad (6-20)$$

由此得到

$$\frac{\delta U_a}{\Delta U_{g1}} = \frac{1}{D} \quad (6-21)$$

数值 $\frac{1}{D} = \mu_0$ 称为静电放大系数。实际上，维持板流不变而增大第一栅压时，板压应减少的数值 ΔU_a 小于 δU_a ，因为板流的减小主要由于电流重新分配所致与等效电位的降低关系很小。因此

$$\frac{\Delta U_a}{\Delta U_{g1}} < \frac{\delta U_a}{\Delta U_{g1}}, \quad \text{即 } \mu < \mu_0$$

也就是四极管的真正放大系数比由渗透率概念算出的静电放大系数小。

四极管的放大系数值比三极管大很多，可达 700~1000 左右。

上述这些参量和三极管一样可以利用三点法测量求得，测量栅极电压的变化应尽可能取得小些（大约 0.1~0.2 伏）。此外，这三个参量还符合 $SR_i = \mu$ 的关系。

6-6 消除负阻效应的方法。束射四极管

要消除四极管中的负阻效应，必须阻止二次电子从板极跑向第二栅。如果在板极和第二栅极间能够建立起低于板极电压的最低电位（图 6-9），那么，我们就可以在板极附近得到一个减速场，它能阻止运动缓慢的二次电子从板极跑向第二栅，但同时又能让一次电子到达板极。可以引用不同的方法，达到这个目的。有一种方法采用增加第二栅与板极距离的办法来产生最低电位，图 6-10 画出了不同距离下的电位分布。可以看出，距离愈大，最低电位愈低，并且离开板极也愈远，对抑制板极二次电子到第二栅愈有利，可是由于这种方法将使电极尺寸增大，没有实用价值。