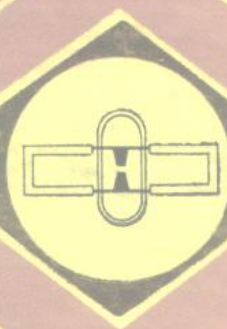


天线开关管设计手册



國防工業出版社

C73.45524

709

天线开关管设计手册

电子管设计手册编辑委员会 编



国防工业出版社

1111029

内 容 简 介

本书较系统地叙述了气体放电天线开关管的工作原理、设计方法、制造工艺和测量技术。全书共分八章，第一章叙述了天线开关管的工作原理；第二、三、四、五章叙述了各种类型的天线开关管的设计方法；第六章叙述了天线开关管的专用制造工艺；第七章叙述了天线开关管各种参量的测量；第八章叙述了雷达整机对天线开关和天线开关管的要求。

本书可供从事气体放电天线开关管研制和生产的人员阅读，也可供气体放电天线开关管使用人员和高等院校有关专业师生参考。

0418/1-18

天线开关管设计手册

电子管设计手册编辑委员会 编

责任编辑 刘树兰

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张11¹/₈ 插页2 280千字

1983年6月第一版 1983年6月第一次印刷 印数：0,001—4,800册

统一书号：15034·2474 定价：1.90元

序 言

天线开关管是随着雷达对快速转换开关的需要而发展起来的，目前已有气体放电、铁氧体和半导体等三种类型。

本手册仅讨论气体放电天线开关管。手册中比较详细而具体地描述了各种气体放电天线开关管的工程设计、工艺制造和参量测试方法，并简要地叙述了它们的工作原理。但是为了提高设计水平，仅有公式、图表和曲线还是远远不够的，因此手册中还专门描述了微波气体放电的产生、发展、维持和熄灭的物理过程，以及微波同等离子体相互作用的特性。

天线开关管应用于雷达的天线开关中，是天线开关的重要组成部分，并且决定了天线开关的主要性能。因此，本手册也简要叙述了天线开关的类型、工作原理以及对天线开关管的要求。

本手册是在第四机械工业部的领导和组织下进行的。参加本手册编写和审订的主要人员有王仁道、杨靖、柯锦松、高文奎、李泐、王庭绍、唐良芬、陈起刃、王忠中、丁明生、金庭兴、李煊、唐敬贤、张志良等，全书最后由杨靖、李煊整理。

在本手册的编写过程中，得到了有关单位的大力支持和帮助，许多同志付出了辛勤的劳动，在此谨致谢意。由于编写人员水平有限，手册中还可能存在不少错误和不妥之处，望广大读者批评指正。

目 录

第一章 微波气体放电概述	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 等离子体的概念及一般特性	2
§ 1.3 微波场作用下等离子体中的电流	6
§ 1.4 微波场作用下等离子体中的电子位移 和电子能量	11
§ 1.5 微波在等离子体中的传播	17
§ 1.6 天线开关管中微波气体放电的发生、 增长和维持	22
1.6.1 着火功率	24
1.6.2 波尖能量和漏过功率	32
§ 1.7 天线开关管中微波气体放电的功率损耗	43
§ 1.8 天线开关管中微波气体放电的消电离	53
§ 1.9 天线开关管中的微波噪声	67
1.9.1 天线开关管中微波噪声和管内参量的关系	69
1.9.2 设计保护放电管时对噪声比的考虑	71
§ 1.10 天线开关管充气的综合考虑	72
第二章 窄频带天线开关管	76
§ 2.1 窄频带天线开关管的分类	76
§ 2.2 窄频带天线开关管的等效电路	78
§ 2.3 外腔式天线开关管腔体的近似计算	84
第三章 宽频带天线开关管	95
§ 3.1 谐振窗的设计计算	96
3.1.1 结构形式	97
3.1.2 等效电路	98

3.1.3	空气介质矩形窗的计算	100
3.1.4	空气介质圆角窗的计算	103
3.1.5	固体介质窗的计算	105
3.1.6	Q_{L2} 值的测量	108
3.1.7	小结	109
§ 3.2	谐振隙	110
3.2.1	谐振隙的作用	110
3.2.2	谐振隙的结构形式	111
3.2.3	谐振隙的设计	112
3.2.4	实验数据	118
§ 3.3	宽频带保护管的设计	122
3.3.1	整管的考虑	122
3.3.2	等效电路	123
3.3.3	最平坦响应保护管的设计	126
3.3.4	宽频带保护管的最佳特性设计	128
3.3.5	参差调谐的影响及谐振元件间连接线 长度的修正	135
§ 3.4	宽频带阻塞放电管	137
3.4.1	引言	137
3.4.2	参量	137
3.4.3	结构	138
3.4.4	等效电路	139
3.4.5	阻塞放电管的设计	140
3.4.6	阻塞放电管 Q_{L1} 值及归一化电导 G 的测量	149
第四章	同轴型天线开关管	152
§ 4.1	同轴型天线开关管接收状态下的设计	154
4.1.1	耦合窗的设计	155
4.1.2	隙缝的设计	157
4.1.3	整管计算	162
4.1.4	管内填充介质的影响	166
§ 4.2	同轴型前置保护放电管发射状态下的 设计	167

4.2.1	耦合窗的设计	168
4.2.2	管内结构的设计	169
4.2.3	管体结构的设计	174
4.2.4	充气	174
§ 4.3	同轴型保护放电管发射状态下的设计	177
4.3.1	耦合窗的设计	177
4.3.2	充气	178
4.3.3	减少波尖能量与漏过功率的方法	179
§ 4.4	同轴型阻塞放电管的设计	182
4.4.1	同轴型阻塞放电管的结构	183
4.4.2	同轴型阻塞放电管大驻波比的核算	184
§ 4.5	同轴型插入式放电管简介	185
第五章	插入式宽频带天线开关管	189
§ 5.1	插入式前置天线开关管	191
5.1.1	前置保护放电管的结构	191
5.1.2	提高前置保护放电管功率的方法	195
5.1.3	减小前置保护放电管电弧损耗和恢复 时间的方法	199
5.1.4	前置保护放电管的着火功率	206
§ 5.2	插入式保护放电管	207
5.2.1	不带引燃电极的保护放电管	208
5.2.2	带引燃电极的保护放电管	209
5.2.3	脉冲衰减放电管	211
§ 5.3	插入式天线开关管的工作寿命	212
5.3.1	提高插入式前置保护放电管工作寿命 的方法	213
5.3.2	提高插入式保护放电管的寿命	214
§ 5.4	插入式天线开关管的抗流装置	215
第六章	天线开关管的制造工艺	220
§ 6.1	窄频带天线开关管的盘状封接工艺与 宽频带天线开关管的谐振密封接工艺	220
6.1.1	窄频带天线开关管的盘状封接工艺	220

6.1.2	宽频带天线开关管谐振窗的封接工艺	225
§ 6.2	管体的焊接	227
6.2.1	管体的软焊	227
6.2.2	管体的硬焊	229
§ 6.3	排气	234
§ 6.4	引燃极的制造	235
6.4.1	引燃极工作点的选择	235
6.4.2	引燃极的材料	237
6.4.3	引燃极的制造工艺	238
§ 6.5	窄频带天线开关管的寿命	242
6.5.1	寿命试验方法	242
6.5.2	窄频带天线开关管的损坏原因	243
6.5.3	延长窄频带天线开关管寿命的方法	243
§ 6.6	宽频带天线开关管的寿命	244
6.6.1	宽频带天线开关管的损坏原因	244
6.6.2	延长宽频带天线开关管寿命的方法	245
§ 6.7	放射性同位素在天线开关管中的应用	248
第七章	天线开关管的测量	250
§ 7.1	高 Q 管谐振频率、调谐范围及无载品质因数的测量	250
7.1.1	谐振频率的测量	250
7.1.2	调谐范围的测量	251
7.1.3	无载品质因数的测量	251
§ 7.2	阻塞放电管归一化等效电导和归一化等效电纳的测量	253
7.2.1	测量方法一	253
7.2.2	测量方法二	254
7.2.3	测量方法三	254
§ 7.3	阻塞放电管低功率电压驻波比的测量	255
7.3.1	等指示度法	255
7.3.2	功率衰减法	257

§ 7.4 孪生管低功率参量的测量	257
7.4.1 电压驻波比的测量	258
7.4.2 相对相位差的测量	259
7.4.3 总插入损耗的测量	260
§ 7.5 宽频带保护放电管和前置保护放电管 电压驻波比及通频带的测量	260
7.5.1 直接法测量宽频带保护放电管的电压驻 波比	260
7.5.2 采用扫频仪测量宽频带放电管的电压驻 波比	262
7.5.3 宽频带放电管通频带的测量	262
§ 7.6 相对相位移的测量	263
7.6.1 相位计法	263
7.6.2 电桥法	263
7.6.3 测量线法	264
§ 7.7 总插入损耗的测量	265
7.7.1 替代法	266
7.7.2 功率反射法	267
§ 7.8 引燃回路特性的测量	268
7.8.1 引燃电流的测量	268
7.8.2 引燃时间的测量	269
7.8.3 弛张振荡的测量	269
7.8.4 引燃损耗的测量	269
7.8.5 引燃噪声的测量	270
§ 7.9 总漏过功率的测量	270
7.9.1 保护放电管总漏过功率的测量	271
7.9.2 孪生保护放电管总漏过功率的测量	272
7.9.3 前置保护放电管总漏过功率的测量	272
7.9.4 总漏过功率测量误差分析	273
§ 7.10 波尖能量的测量	277
7.10.1 窄脉冲法	277
7.10.2 变脉冲宽度法	278

7.10.3	滤波器法	279
§ 7.11	直接耦合功率的测量	279
7.11.1	用仿真保护放电管测量直接耦合功率	280
7.11.2	低功率模拟	280
7.11.3	用正规放电管测量直接耦合功率	280
§ 7.12	最小着火功率的测量	281
7.12.1	最小着火功率测量方法之一	281
7.12.2	最小着火功率测量方法之二	282
§ 7.13	电弧损耗的测量	282
7.13.1	替代法测量电弧损耗	283
7.13.2	降低功率法测量电弧损耗	284
§ 7.14	恢复时间的测量	285
7.14.1	幅度恢复时间的测量	285
7.14.2	相位恢复时间的测量	294
§ 7.15	阻塞放电管高功率电压驻波比的测量	295
7.15.1	高功率测量线法	296
7.15.2	反射计法	296
§ 7.16	同轴型放电管短路面偏移的测量	297
7.16.1	高功率测量线法	297
7.16.2	抵消法	297
§ 7.17	高功率模拟测量	298
7.17.1	行波谐振腔	298
7.17.2	采用行波谐振腔测量放电管高功率参量	301
第八章	天线开关概述	304
§ 8.1	雷达对天线开关及放电管的要求	304
§ 8.2	天线开关的工作原理	306
8.2.1	分支式天线开关	306
8.2.2	平衡式天线开关	321
8.2.3	其它型式天线开关	334
附录		339
附录 I	常用物理常数表	339
附录 II	主要符号表	340

第一章 微波气体放电概述

§ 1.1 引言

本章所要讨论的气体放电，就激励它的频率范围而言，一般是指几百兆赫到几百千兆赫；就波段范围而言，是在分米波、厘米波和毫米波段内。这些范围的放电称为“微波气体放电”，有时也称为“超高频气体放电”。这种放电最常见于雷达的天线开关管之中。

微波气体放电具有自己的若干特性，它在许多方面不同于直流放电和低频放电。

(1) 微波气体放电在外观上是比较均匀的，没有直流放电那样的明显的放电区域，如各种暗区和辉纹，尤其在低气压放电的情况更是如此。

(2) 在微波气体放电中，放电电极只起辅助的作用。在极限情况下，电极和放电区域可以完全隔离开，产生所谓“无电极高频放电”。而在直流放电和低频放电中，放电电极则是不可缺少的。

(3) 在微波气体放电中，离子相对于电子而言，可以看作是不动的，它们从微波场中获得的能量和电子相比是可以忽略不计的。从而在放电中起着决定作用的是电子。在直流和低频放电中除电子的作用外，离子也起着重要的作用，它会使电极加热和溅散。

(4) 在微波气体放电中，电子的浓度可以达到十分高的数值，一般可达 10^{14} 个/厘米³ 以上，其电流密度的数量级为 10^5 安/厘米² 左右。而在直流和低频放电中要达到这样的数量级是相当困

1111029

难的。

但是微波气体放电中的等离子体却和其他放电类型的等离子体一样，具有它们的共同的特性。本章首先叙述气体放电等离子体的概念和一般特性，然后讨论它在微波场的作用下所产生的高频电流和电子所获得的能量，从而得出等离子体的高频电导率和高频介电常数。这两个物理量是讨论天线开关管各个热参量的基础。此外，本章还研究了指数上升的微波场作用下气体放电的产生条件和过程，讨论了微波放电窗在波导的不同部位的电弧损耗，叙述了等离子体的消电离机理，从而给出了恢复时间的表达式。

§ 1.2 等离子体的概念及一般特性

等离子体是指电离了的气体，又称为物质的第四态（物质的四态为固态、液态、气态和等离子体态）。组成等离子体的粒子有电子、正离子、负离子、中性的和激发的原子或分子等。等离子体的形式是多种多样的，天线开关管窗口的放电薄层及管内放电隙的放电发光区仅是其中的一种。

近几十年来，由于受控热核反应、气体放电激光、天体物理以及各种气体放电器件的研究都涉及到等离子体这一领域，所以等离子体物理作为一门崭新的学科被人们所重视，对于它内部的复杂规律也随着理论和实验的深入而逐步地被人们所认识。但是，等离子体是一种相当复杂的物质，它在很多方面不同于物质的前三态。到目前为止，人们对它的内在规律性的认识还远远不够。

等离子体可以简单地理解为高度电离的气体，在极限情况下，所有的中性气体粒子可以全部电离，但在通常放电的情况下，电离度只有百分之一到千分之一，甚至更低。任何气体在气压为 760 托，温度为 0°C 时，单位体积（即一立方厘米）内将有 2.38×10^{19} 个气体分子，这就是罗密斯特常数。如在管子中充以气压为 7.6 托的气体，则在温度为 0°C 时，气体的粒子密度为

2.38×10^{17} 个/厘米³。这时, 如由于放电而产生的电子浓度 $n_e = 10^{15}$ 个/厘米³, 则电离度 δ 为百分之一; 如 $n_e = 10^{14}$ 个/厘米³, 则电离度为千分之一。可见, 在一般的等离子体中, 电子和离子相对于中性的气体粒子而言仍然是少数。但是等离子体的特性却在很大的程度上取决于电子和离子的运动特性。

等离子体的主要特性表现在以下几个方面。

(1) 电中性

从宏观来看, 等离子体内各处的电子浓度及负离子浓度之和与正离子的浓度相等, 对外不表现出电的特性, 这就是电中性。但是, 所取体积的线长度小到某个距离时, 由于在该体积中带电粒子很少, 正负带电粒子的数目就不完全相等, 它们对外所产生的电场就不能互相屏蔽掉, 于是电中性就被破坏了。这个距离叫做德拜屏蔽距离, 或称德拜长度, 它的表达式为

$$h = \left(\frac{kT}{4\pi n_e e^2} \right)^{1/2} = 6.92 \left(\frac{T}{n_e} \right)^{1/2} \text{ [厘米]} \quad (1.1)$$

式中 n_e ——电子浓度 (个/厘米³);

e ——电子的电量;

T ——动力温度 (K);

k ——玻尔兹曼常数。

如果动力温度 T 近似以电子温度 T_e 来计算, 并设 $T_e = 2 \times 10^4$ K, $n_e = 10^{14}$ 个/厘米³, 则 $h = 9.8 \times 10^{-5}$ 厘米。

德拜长度的另一重要意义在于, 它粗略地给出了在等离子体和固体表面接触时所产生的屏蔽层厚度。

(2) 外加电场和磁场的影响

在外加电场和磁场的作用下, 等离子体中的带电粒子 (电子和离子) 将产生各种不同的运动, 其运动方程 (忽略粒子间的碰撞效应) 为

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q \left(\vec{E} + \frac{1}{c} \vec{v} \times \vec{B} \right) \quad (1.2)$$

式中 m ——带电粒子的质量;

$\vec{v}$ ——带电粒子运动的速度;

q ——带电粒子的电量;

$\vec{E}$ ——外加电场强度;

$\vec{B}$ ——外加磁感应强度。

当 $B = 0$ 时, 带电粒子将以等加速度 $\vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m}$ 运动。如 $E = 1000$ 伏/厘米, 则电子的 $a = 5.86 \times 10^9$ 厘米/秒²。

当 $E = 0$ 时, 若带电粒子的初始速度垂直于磁场, 则粒子将绕磁力线作圆周运动, 其回旋半径 $r = \frac{m v c}{q B}$, 回旋角频率 $\omega_c = \frac{q B}{m c}$, 回旋频率 $\nu_c = \frac{\omega_c}{2 \pi}$ 。对于电子, $r_e = 2.21 \times 10^{-2} \sqrt{T_e} / B$ 厘米, $\nu_{ce} = 2.8 \times 10^6 B / \text{秒}$ 。如 $T_e = 2 \times 10^4 \text{ K}$, $B = 500$ 高斯, 则 $r_e = 6.25 \times 10^{-8}$ 厘米, $\nu_{ce} = 1.4 \times 10^9 / \text{秒}$ 。

当 E 和 B 同时存在时, 又分两种情况。当 $\vec{E} // \vec{B}$ 时, 粒子将沿 $\vec{E}$ 和 $\vec{B}$ 的方向作螺旋线的前进运动; 当 $\vec{E} \perp \vec{B}$ 时, 粒子将沿 $\vec{E}$ 和 $\vec{B}$ 的垂直方向作漂移运动。

(3) 等离子体振荡

前面已经指出, 在小于德拜长度的范围内, 等离子体的电中性就被破坏了, 因而等离子体内的任何一点都存在着电场。由于这种微观场的存在, 引起了等离子体中带电粒子的振荡。对于电子, 当它们离开了以正离子为中心的平衡位置时就建立起电场, 而该电场力图将电子拉回到原来的平衡位置, 到达平衡位置后, 电子不会停止运动, 而是向相反方向作惯性运动, 因而就产生了电子振荡。这种振荡的微小功率是可以用适当的接收机接收到的。

等离子体的振荡频率为

$$f_p = \frac{\omega_p}{2 \pi} = \sqrt{\frac{n e^2}{\pi m}} \quad (1.3)$$

式中 n ——带电粒子的浓度;

m ——带电粒子的质量。

对于电子, $f_p = 8.97 \times 10^3 \sqrt{n_e}$, n_e 为电子浓度, 单位为个/厘米³。

表 1.1 给出了电子振荡频率 f_p 和相应波长与电子浓度的关系。

表 1.1 等离子体中电子振荡的频率和波长

电子浓度 (个/厘米 ³)	振荡频率 (赫)	相应波长 (厘米)
10^{14}	8.97×10^{10}	0.33
10^{13}	2.84×10^{10}	1.06
10^{12}	8.97×10^9	3.33
10^{11}	2.84×10^9	10.6
10^{10}	8.97×10^8	33.3

(4) 等离子体的介电常数

众所周知, 所有的绝缘体, 如纸、云母、玻璃、油脂和聚四氟乙烯等, 它们的介电常数都大于 1; 干燥的空气和真空, 介电常数等于 1。而等离子体的介电常数却小于 1, 甚至可以为负值, 它随等离子体中带电粒子的浓度而变化。如果忽略电子和中性粒子的碰撞, 且不计离子的影响, 等离子体的介电常数可表示为

$$\epsilon = 1 - \frac{4\pi n_e e^2}{m_e \omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = 1 - \frac{f_p^2}{f^2} \quad (1.4)$$

式中 ω 、 f ——外加场的角频率和频率;

ω_p 、 f_p ——等离子体中电子振荡的角频率和频率。

等离子体的介电常数 ϵ 和电子浓度、外加场频率的关系示于表 1.2 中。

表 1.2 等离子体的介电常数

电子浓度 (个/厘米 ³)	等离子体频率 (赫)	外加场频率 (赫)	介电常数 ϵ
10^{14}	8.97×10^{10}	3×10^9	-893
10^{13}	2.84×10^{10}	3×10^9	-8.6
10^{12}	8.97×10^9	3×10^9	-7.9
10^{11}	2.84×10^9	3×10^9	0.10
10^{10}	8.97×10^8	3×10^9	0.91

ϵ 为正时表示这种频率的波能够在等离子体中传播, ϵ 为负时表示这种频率的波不能在等离子体中传播, 而是被反射。这一点对于设计天线开关管来说是十分重要的, 我们将在下一节中更详细地讨论它。从式 (1.4) 可知, 当 $f = f_p$ 时, $\epsilon = 0$, 这时产生所谓谐振现象。由于这种谐振特性, 等离子体可以将这种频率的外加场加以放大, 这就是等离子体用于微波放大和振荡的物理基础。

(5) 等离子体内部的物理过程

等离子体虽然是由电子、正负离子、中性粒子和激发粒子所组成的, 但它并不是这几种粒子的机械混合物。各种粒子之间存在着相互的作用力, 如库仑力、极化力。带电粒子由于热运动及外加场的作用, 粒子之间将发生碰撞, 于是产生电离、复合、分离、附着和电荷交换等现象。从能量交换的观点来看, 由于碰撞效应, 使外加的电磁场能变为等离子体内部的电离能、热能和光的辐射能等。等离子体的这些内在物理现象对于设计天线开关管和其他放电管都是很重要的。我们在讨论天线开关管的热参量时再详细地研究。

§ 1.3 微波场作用下等离子体中的电流^[1, 5]

让我们考虑等离子体中带电粒子和中性粒子之间存在着碰撞的情况, 这种碰撞效应就像有一个摩擦力作用于运动的带电粒子上。若以 g 表示摩擦系数, 并假定外加场 $E = E_0 \sin \omega t$, 其中 ω 为外加微波场的角频率, t 为时间, E_0 为微波场的幅值, 则带电粒子的运动方程为

$$m \frac{d^2 X}{dt^2} + g \frac{dX}{dt} = e E_0 \sin \omega t \quad (1.5)$$

式中 m ——带电粒子的质量;

X ——粒子的位移。

积分此式可得粒子的运动速度为

$$v = \frac{dX}{dt} = \left[\frac{eE_0\omega}{m\left(\omega^2 + \frac{g_e^2}{m_e^2}\right)} + v_0 \right] e^{-\frac{g}{m}t} + \frac{eE_0}{m\left(\omega^2 + \frac{g_e^2}{m_e^2}\right)} \left(-\frac{g}{m} \sin\omega t - \omega \cos\omega t \right) \quad (1.6)$$

式中 v_0 为带电粒子的初速度，即 $t = 0$ 时的速度。从该式可知，带电粒子的运动速度具有前进的分量和振荡的分量。前者由于摩擦力的作用将随时间而指数地衰减。因而经过一段时间之后，带电粒子的运动将变为稳定的振荡运动。

设通过等离子体的高频电流主要是由电子产生的，则通过的电流密度为

$$J = 4\pi n_e e v_e = 4\pi n_e e \frac{dX}{dt} = \frac{4\pi n_e e^2 E_0}{m_e \left(\omega^2 + \frac{g_e^2}{m_e^2} \right)} \times \left(\frac{g_e}{m_e} \sin\omega t - \omega \cos\omega t \right) \quad (1.7)$$

式中 n_e ——电子浓度；

m_e ——电子质量；

g_e ——与电子和中性粒子的碰撞相对应的摩擦系数。

由此可见，通过等离子体的高频电流密度 J 可以分为两个分量：第一个分量的相位与外加微波场的相位是一致的，称为高频电流的有功分量，或称为高频传导电流；第二个分量的相位与外加场的相位相差 $\frac{\pi}{2}$ ，称为高频电流的无功分量，或称为位移电流。其表达式分别为

$$\begin{aligned} J_{\text{有功}} &= \frac{4\pi n_e e^2 E_0}{m_e \left(\omega^2 + \frac{g_e^2}{m_e^2} \right)} \frac{g_e}{m_e} \sin\omega t \\ &= \frac{4\pi n_e e^2 E_0 g_e}{m_e^2 \omega^2 + g_e^2} \sin\omega t = \frac{4\pi n_e e^2 g_e}{m_e^2 \omega^2 + g_e^2} E \end{aligned} \quad (1.8)$$