

# 电子器件的噪声

[美] L. D. 斯莫林 H. A. 豪斯 著

罗继起 许文星 译

王 志 刚 校

## 內 容 簡 介

本书系統地闡述了热电子器件与固体电子器件的噪声理論、物理現象和产生噪声的机理。簡要地討論了消除各种噪声的方法，并提出了低噪声行波管和低噪声晶体管放大器的設計要点。

本书可供从事电子学工程的科学技术人員参考，也可作为高等院校的教学参考书。

NOISE IN ELECTRON DEVICES

[美] L. D. Smullin H. A. Haus

THE TECHNOLOGY PRESS OF M. I. T. 1959

电子器件的噪声

罗继起 許文星 譯

王志剛 校

国防工业出版社 出版

北京新华书店出版业营业許可証出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168  $\frac{1}{32}$  印張 12  $\frac{9}{16}$  323 千字

1965 年 10 月第一版 1965 年 10 月第一次印刷 印数：0,001—2,200 册

統一书号，15034·954 定价：(科七) 2.10 元

# 目 录

第一章 热电阴极的散粒噪声 .....	C. F. 夸特 (11)
1. 空间电荷限制电子流的稳态情况 .....	12
2. 阴极表面电子流的噪声性质 .....	23
3. 运用单速近似式求空间电荷对噪声的降低 .....	28
4. 小渡越角二极管的空间电荷限制噪声 .....	35
5. 在高频下, 当渡越时间不小时关于发射噪声的讨论 .....	43
参考文献 .....	52
第二章 电子管中的低频噪声(閃变效应) .....	A. 范特赛尔 (54)
1. 引言 .....	54
2. 閃变噪声的理论 .....	57
3. 电子管尺寸和工作条件的影响 .....	67
4. 阴极材料的影响, 中毒 .....	72
5. 其它类型阴极中的噪声 .....	76
6. 理论现状 .....	79
参考文献 .....	85
第三章 讯号与噪声沿电子注的传播 .....	H. A. 豪斯 (86)
1. 讯号沿电子注传播的分析 .....	86
2. 微波放大器的矩阵表示法 .....	102
3. 电子注中的噪声 .....	122
4. 可获得的最低噪声系数 .....	142
附录 从电压-电流形式体系到渡形式体系的变换 .....	157
参考文献 .....	158
第四章 栅控电子管中的噪声 .....	塔 尔 培 (161)
1. 栅控电子管中的噪声源 .....	161
2. 有噪声源的网路计算 .....	193
3. 电子管噪声的测量 .....	208
参考文献 .....	219

<b>第五章 低噪声行波管</b> .....	<b>R. W. 彼得(222)</b>
1. 电子注型放大器中产生噪声的各种原因 .....	223
2. 行波管的噪声理论 .....	227
3. 低噪声电子枪 .....	238
4. 附加噪声的成因 .....	272
5. 电子注噪声和放大器噪声系数的测量方法 .....	287
6. 低噪声行波管的设计、制造和性能 .....	295
参考文献 .....	305
<b>第六章 半导体噪声</b> .....	<b>A. 范特赛尔(309)</b>
1. 引言 .....	309
2. 由于迁移的载流子产生的散粒噪声 .....	313
3. 由于扩散的载流子产生的散粒噪声 .....	323
参考文献 .....	341
<b>第七章 晶体管中的噪声</b> .....	<b>W. H. 奉格(342)</b>
1. 面接触型晶体管的扩散理论 .....	344
2. 扩散-复合噪声.....	354
3. $1/f$ 表面噪声.....	362
4. 低噪声晶体管放大器的设计 .....	385
5. 辐照噪声 .....	390
参考文献 .....	402

# 电子器件的噪声

[美] L. D. 斯莫林 H. A. 豪斯 著

罗继起 许文星 译

王 志 刚 校

## 內 容 簡 介

本书系統地闡述了热电子器件与固体电子器件的噪声理論、物理現象和产生噪声的机理。簡要地討論了消除各种噪声的方法，并提出了低噪声行波管和低噪声晶体管放大器的設計要点。

本书可供从事电子学工程的科学技术人員参考，也可作为高等院校的教学参考书。

NOISE IN ELECTRON DEVICES

[美] L. D. Smullin H. A. Haus

THE TECHNOLOGY PRESS OF M. I. T. 1959

电子器件的噪声

罗继起 許文星 譯

王志剛 校

國防工業出版社 出版

北京書刊出版業營業許可証出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

國防工业出版社印刷厂印装

850×1168  $1/32$  印張 12  $9/16$  323 千字

1965 年10月第一版 1965 年10月第一次印刷 印数：0,001—2,200册

統一書号，15034·954 定价：(科七) 2.10元

# 目 录

第一章 热电阴极的散粒噪声 .....	C. F. 夸特(11)
1. 空间电荷限制电子流的稳态情况 .....	12
2. 阴极表面电子流的噪声性质 .....	23
3. 运用单速近似式求空间电荷对噪声的降低 .....	28
4. 小渡越角二极管的空间电荷限制噪声 .....	35
5. 在高频下, 当渡越时间不小时关于发射噪声的讨论 .....	43
参考文献 .....	52
第二章 电子管中的低频噪声(閃变效应) .....	A. 范特赛尔(54)
1. 引言 .....	54
2. 閃变噪声的理论 .....	57
3. 电子管尺寸和工作条件的影响 .....	67
4. 阴极材料的影响, 中毒 .....	72
5. 其它类型阴极中的噪声 .....	76
6. 理论现状 .....	79
参考文献 .....	85
第三章 讯号与噪声沿电子注的传播 .....	H. A. 豪斯(86)
1. 讯号沿电子注传播的分析 .....	86
2. 微波放大器的矩阵表示法 .....	102
3. 电子注中的噪声 .....	122
4. 可获得的最低噪声系数 .....	142
附录 从电压-电流形式体系到渡形式体系的变换 .....	157
参考文献 .....	158
第四章 栅控电子管中的噪声 .....	塔 尔 培(161)
1. 栅控电子管中的噪声源 .....	161
2. 有噪声源的网路计算 .....	193
3. 电子管噪声的测量 .....	208
参考文献 .....	219

<b>第五章 低噪声行波管</b> ..... R. W. 彼得(222)	
1. 电子注型放大器中产生噪声的各种原因 .....	223
2. 行波管的噪声理论 .....	227
3. 低噪声电子枪 .....	238
4. 附加噪声的成因 .....	272
5. 电子注噪声和放大器噪声系数的测量方法 .....	287
6. 低噪声行波管的设计、制造和性能 .....	295
参考文献 .....	305
<b>第六章 半导体噪声</b> .....	A. 范特赛尔(309)
1. 引言 .....	309
2. 由于迁移的载流子产生的散粒噪声 .....	313
3. 由于扩散的载流子产生的散粒噪声 .....	323
参考文献 .....	341
<b>第七章 晶体管中的噪声</b> ..... W. H. 奉格(342)	
1. 面接触型晶体管的扩散理论 .....	344
2. 扩散-复合噪声.....	354
3. $1/f$ 表面噪声.....	362
4. 低噪声晶体管放大器的设计 .....	385
5. 辐照噪声 .....	390
参考文献 .....	402



## 序 言

噪声是任何不希望有的声音。推广言之，噪声是有用頻带以内任何不希望有的干扰，如任何傳輸通路或器件中不希望有的电波。当这种干扰系由其他装置产生时，則称为干涉。

国际物理学和电子学辞典。

D. Van Nostrand 公司

1955年夏，麻省工学院举办了一个为期两周的电子器件噪声特別課程。这是工学院每年夏季举办的涉及許多不同領域的一系列类似集中課程中的一个。这些課程的目的在于使技术工作者掌握各專業領域内的最新进展。課程由工业部門和学院的专家讲授。

在計劃这个課程的时候，我們感到在过去几年中对于热电子器件和固态电子器件中的噪声的了解，無論是定性的还是定量的，都有了重大的进展。这些进展是如此迅速，以致只有在每个細小領域内的少数专家才熟悉各自专业的現况。因此，我們感到把有关噪声的各种意見提出介紹并加以比較可能会起到良好的效果。

研究电子器件噪声的历史差不多与器件本身一样长。第一次对散粒噪声的定量分析是在1918年由肖特基 (Schottky) 完成的。其次是在1930年由諾尔斯 (North)，腊克 (Rack) 和西班牙克 (Spence) 向前推进了一大步；他們解釋了热电子器件中空間电荷对噪声的降低作用，并指出了有限渡越時間的效应。然而当时对低噪声放大器发展的动力还不大。广播波段和高頻波段无綫电通訊几乎不需要超灵敏的接收机，因为极限噪声是由接收机以外的天电产生的。只有在无綫电的通訊頻率推向甚高頻范围

以至更高的频率以后，这时天电已不再重要，低噪声的设计才显得迫切需要。同样，直到伺服机构和仪表控制的现代世纪到来以前，除了在研究实验室以外，在低频几乎无需低噪声放大器。在第二次世界大战中，随着无线电、雷达以及自动武器控制和导向的发展，频谱发生了爆炸性的扩展，这就大大增加了人们对噪声现象和低噪声器件的设计的兴趣。

即使随便浏览一下下面的内容也会看出：要用一个绝妙的方程来描述所有的噪声现象乃是不可能的。在不同的理论中所遇见的一些差异是由于器件之间的差异所产生的。行波管、三极管和晶体管的物理结构相差如此之大，以致对这些器件中的电流控制方法的数学描述毫无相似之处。再加上噪声物理过程不尽相同，这就使我们不可能提出一个统一的噪声理论。此外，电子注中散粒噪声的表现与閃变 ( $1/f$ ) 噪声等不同。尽管有这许多差异，在读完本书的内容以后显然可以看出：在讨论各种器件的噪声时，所用的许多数学方法和物理概念是共同的。

对于使用者来说，几乎一切种类的噪声都是同样讨厌的，因为它们干扰了对所需讯号的检波。但是并不是所有的噪声都具有同等的基本重要性。以微音效应和感应哼声为例。原理上，通过正确的设计可以将它们降低到任意低的电平。而另一方面，约翰逊 (Johnson) 噪声，散粒噪声，以及  $1/f$  噪声却具有基本的下限。这里将只讨论后几种噪声。除了它们的基本性质之外，这些噪声都具有一个非常重要的特点：它们全是时间的不规则的逗留函数。处理这种函数的数学工具已经得到充分发展，可以直接应用于噪声分析。

噪声具有实际意义的电气器件几乎包括了所有的元件：电阻器（金属的和合成的）、电容器、铁心电感器、金属线连接器、固体（晶体）二极管、放大器（热电子的和固体的）、振荡器、机电换能器、电光换能器以及电声换能器。根据时代的潮流或当时的问题，文献中总有一些文章讨论这类器件中的某一个或全部

的噪声。从最严格的意义来说，所有这些器件全是“电子”器件。然而，我们将按照“电子器件”这个词更为常规的意义从它们当中选出很小一部分进行讨论。

在灵敏的放大器或换能器中出现的噪声蒙蔽了微弱的讯号，从而限制了器件的极限有效灵敏度。另一方面，噪声也可能发生在大讯号器件、放大器或振荡器中。在这些器件中，噪声输出表现为对所需讯号的调制，并且通常正比于所需讯号的强度。这是不希望有的，因为它可能隐蔽了必要的微小调制或在多路系统中产生串话。在这两类噪声之中，这里只讨论前面的一种，即小讯号放大器的噪声。对于振荡器和大讯号噪声的基本性质或定量性质，目前了解的还比较少。

在小讯号放大器和换能器这一类中，我们只选择小讯号电子和固态的电讯号放大器来讨论，即普通的电子管（在所有频率）、晶体管以及热电子和固态二极管（它们当然不是放大器而是放大器的基本构造元件）。因此，像光电摄像管、正摄像管、图象放大器等这样一些技术上重要的器件都不在这里讨论。我们之所以作这种选择是因为夏季课程的时间有限。在这样短的时间内，如果要使讲课的内容不只是一些随随便便的描述，那就只能涉及少数几个题目。我们所作的具体的选择是为了尽可能介绍一个完整的情况。我们感到这个介绍可以充作一个背景，以便了解像正摄像管这一类既包含热电子元件又包含固态元件的电子管中的更复杂的噪声现象。

这本书中包括的题目与夏季课程的组成内容是一致的。它们包括由于热电子发射而产生的噪声的一般问题，微波管中噪声的一般电路概念，在设计某些低噪声行波管和空间电荷控制电子管过程中所遇到的问题的详细的工程解，半导体噪声，半导体二极管和晶体管的噪声行为，以及低噪声晶体管的电路设计原理。

热电子器件和固态器件中的噪声源可以分为两种基本类型：

1. 散粒噪声，约翰逊噪声，分配噪声等等，对它们的机理可

以說已基本了解，而它們的困难完全屬於数学性质的。

2. 閃變噪声，它的真正物理性质还没有完全了解。現在正在研究如何把电子管参数变化、材料变化等效应与所产生的噪声的大小和种类相关联，从而最終有可能把噪声同少数基本的物理过程联系起来。

上面关于第一类噪声（散粒噪声等）的說法决不能解釋为在这方面没有什么重大的工作需要进行了。說这些噪声过程已經“了解”指的是我們已經知道它的基本来源。它們是阴极的不規則的电子发射，在固体中則是載流子的不規則的产生和消亡过程。因此，这种噪声可以用电子之間的庫侖相互作用来减弱。至少，在热电子器件中，看来不牵涉到其它的基本物理过程。但是，由于現有的数学方法极为复杂，仍然有許多重要的問題只有模糊地了解。結果，只能在把問題作了极大的理想化以后，才能求得定量的理論解。因此，我們必須反过来借助于实验来决定所做的近似計算是否合适，并且揭示数学上所沒有发现的新的行为方式。

对未来研究工作将有强烈影响的一个重要工具是大型数字計算机。田炳耕用数字計算机計算空間电荷对散粒噪声的高頻降低效应的开拓工作，也許只不过是随着工程师們越来越熟悉大型計算机的性能在这方面所做的工作的一个例子。在可以用数字計算机解决的問題之中，有最低电位区域的非綫性行为，电子注中的非片层流的效应以及电子注有限截面对噪声的效应等等。

在目前的发展情况下，只要明确了內部噪声源之后，我們就可以預知一般热电子放大器可能具有的最佳噪声系数，并且确实可以在紙上計算出，至少在原理上，預知如何进行此项最佳化工作。因此，好像在这方面几乎没有进一步实验的余地了。可是实际上，为了在最寬的頻帶內和最寬的工作参数範圍內获得最低的噪声系数，在电路設計上当然还有許多工作要做。然而，更重要地，在研究基本噪声的过程中还有大量工作要做，这些工作必然是实验工作。因此，我們还不精确地知道使用热电子阴极的电子

注型器件的极限噪声系数有多大。几年以前，利用阴极上的电流调制噪声和速度调制噪声不相关的假设，预计行波管的极限噪声系数大约是6分贝。从那时以来，已经做出了噪声系数低于4分贝的行波管。但仍然不知道这种噪声的降低是由于存在相关关系抑或是由于噪声源的强度刚好比原来预计的差那么一点儿的缘故。在建立了计算极限噪声系数的新的固体理论基础以前，人们很难满足于即使是4分贝这样低的噪声系数。因此，在电子注加速电路、外电路、以及阴极材料的设计上，还可能继续进行积极的实验，以期从已经得到的相当好的性能中再减去一两个分贝。

晶体管放大器在它存在的短短几年中已经获得了长足的发展。在低频，晶体管的噪声性能已经可以同最好的热电子放大器进行较量。在高于几兆赫的频率，它们的放大能力仍然受到限制，因此还不可能讨论它们在这个频率范围的极限噪声性能。晶体管设计的成就受到所用材料的质量和结或整流接点的严格几何构形的许多限制，所以在目前这个初期阶段，还不能对极限噪声性能作出认真的预计。

一部当今出版的论述电子器件噪声的书，至少应该提到脉泽放大器。氨脉泽和固态脉泽有可能成为基本上没有噪声的放大器。事实上，最近的测量<sup>●</sup>已经表明，由氨注贡献的噪声只相当于绝对温度为几十度的有效温度。唯一可测量的噪声似乎是由于电路（此电路不是超冷却的）的约翰逊噪声所造成的。固态脉泽放大器表现了同样低的噪声行为，它的带宽有可能比氨脉泽大得多<sup>●</sup>。因此，在不太久的未来，有可能制造出有效噪声温度只有几度（°K）的放大器件。目前，这些器件还必须要在液态氮的温度下工作，因此，在许多地方无疑还不能取代那些基于热电子发射阴极或基于电子和空穴流动的常规放大器。到头来，也许每一类器件会适得其所，兼有这个用途的经济、性能以及成本等方面的最佳

● 内部报告，J. C. Helmer 和 M. W. Muller, Varian Associates, Inc.

● 内部报告，J. W. Meyer 和 A. L. McWhorter, M. I. T. 林肯实验室。

因素。同样，参量放大器在大部分超高频波段甚至在微波频率上已经显示出它的低噪声性能。其最重要的是使用电子注或可变电容，固态二极管的那些类型。对这种器件已经按照本书叙述的电子注和面结型二极管器件的基本原理进行了详尽的分析。因此，虽然没有介绍这些器件（参量放大）的增益机理，但是它们的噪声机理与电子注器件和面结型二极管中所讨论的机构完全相同。

我们希望这里介绍的材料能够让学生了解实际讨论的器件中的噪声现象，并且希望他们能够不是十分困难地把基本分析工具应用于其他器件。这里必须指出，熟悉电子注噪声的理论行为并不能保证制造出安静的行波管。此外，在解决制造低噪声器件的问题时，还必须应用大量的专业技能和具有相邻科学的锻炼。如果通过学习这本书，能够使一个人分析某些给定器件的噪声性能，或者把低噪声性能的要求写成为被设计器件的组成元件的详细规范，最后，如果它能刺激某些人来研究我们在这方面仍然面临的许多悬而未决的科学问题的话，那么这本书的准备就是有价值的。

这本书是许多作者的产品，因此，论述的重点决不会一致。编者在力所能及的范围内试图在全书中使用统一的符号。不过，在许多情况下，在一个专门领域中已经建立了一套不同于相邻领域的习惯名称或术语。书中所使用的符号在引入时都给以定义。我们希望这不会给读者造成不便。在所有理论推导中都采用 MKS 制国际单位，但在许多实例中常量是用厘米和高斯来计算的，书中均予以标明。书中所引用的参考书大部取自美国和英国的文献。

L. D. 斯莫林

H. A. 豪斯

1958.12.

# 第一章

## 热电阴极的散粒噪声

C. F. 夸特(Quate)

### 引言

在大多数利用电子注的射頻放大器中，阴极表面的不規則电子发射是主要的噪声源。在这些放大器中，阴极或者是运用在“溫度限制”范围，或者是运用在“空間电荷限制”范围。前者，所有的发射电子均被阳极吸收；后者，則仅有一小部分发射电子被阳极吸收。在溫度限制情况下，电子注的噪声由噪声电流和噪声速度两部分組成。噪声电流是純散粒噪声；噪声速度是按麦克斯韦分布所描述的发射速度平均值的偏差来計算的。在空間电荷限制情况下，速度噪声与电流噪声将由于最低电位区域的作用而降低。下面我們將以大部分篇幅討論这种現象。

我們將只論述由两个无穷大平行平面組成的一維二极管問題。其中的一个平面是发射电子的阴极，另一个平面是阳极，阳极相对于阴极而言維持一个正电位。我們首先将根据福萊(Fry)和其他人的著作<sup>(1-4)</sup>来考虑这种一維二极管空間电荷限制电子流的直流或稳态情况。这个工作以及关于几个由麦克斯韦分布函数决定的起伏参量的討論，将作为噪声計算的導論。为了簡化起見，我們首先用一个近似的“单速”模型来討論空間电荷限制电子流的噪声問題，以便深入了解低頻范围的情况，在这个范围内，由于最低电位点的存在使得噪声电流必然小于散粒噪声。此后，我們將借助于諾尔斯<sup>(5)</sup>(North)的解来討論实际的多速电子流問題，在这里仍旧是限于阴极到阳极是小渡越角的低頻問題。

在比較高的頻率時，渡越角不再是很小的了，我們將利用勞韋林(Llewellyn)與皮特遜<sup>[6]</sup>(Peterson)給出的一維電子流方程。這些方程只限於在一個定瞬時，在電子注中的一個定點上，僅僅具有單一速度的電子流問題。在靠近最低電位點附近的區域里，不同初速的電子之間的渡越時間另散可能是射頻周期的很大一部分，因而單一速度的近似計算就極其勉強。由於這個臨界區域內的電子注具有多速特性，所以至今還沒有對噪聲問題做出嚴格的分析。然而，假如我們認為最低電位點以外的一個平面作為輸入邊界，在這個平面上，電子的平均速度已經達到了幾倍於由熱能作用產生的初速，那麼單速方程是有效的。於是，噪聲問題便成為一個決定此輸入平面上的噪聲速度與電流起伏的問題，在此平面以外可以利用單速方程。羅賓遜<sup>[7]</sup>(Robinson)，瓦特金<sup>[8]</sup>(Watkins)和芬奈雷<sup>[9]</sup>(Whinnery)已經得到了計算輸入條件的一些近似式。我們將討論這些文獻的一部分，並且指出它們的答案與實驗得到的結果是相當接近的。然而我們相信，嚴格的解必須利用計算機才能得出。田炳耕利用“蒙特卡羅”(Monte Carlo)法沿這條途徑已經解決了一個問題，他的結果的摘要將作為這一章的結論介紹給大家。

## 1. 空間電荷限制電子流的穩態情況

### 單速近似

對於平行平面二極管中的空間電荷限制電子流來說，可以想見的最簡單的模型是契爾得(Child)所用的模型。他忽略了電子的初速度，並且用“單速”模型來獲得電流對電壓的 $3/2$ 次方定律。我們將寫出推導契爾得定律的步驟，因為涉及多速電子流的更嚴格的推導將用相同的方式進行。很明顯，在許多情況下，這個方程是計算二極管中電位分布的足夠好的近似式。

我們在解泊松(Poisson)方程的時候，規定陰極表面輸入處的電位和電位梯度均為零。



$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} = \frac{J_0}{\epsilon_0 v}, \quad (1.1)$$

式中  $J_0$  是电流密度,  $\rho$  是电荷密度 (由  $-J/v$  得到),  $\epsilon_0$  是自由空间的介质常数,  $v$  是电子在点  $x$  的速度。能量方程告诉我们:

$$v^2 = -2\frac{e}{m}V, \quad (1.2)$$

式中  $e$  是一个负数, 代表电子的电荷,  $m$  表示电子的质量。

假如我们以  $2(dV/dx)$  乘式 1.1 并运用式 1.2, 经一次积分后, 可以得到

$$\frac{dV}{dx} = \left( \frac{4J_0}{\epsilon_0 \sqrt{\frac{-2e}{m}}} \right)^{1/2} V^{1/4}. \quad (1.3)$$

二次积分后可得到

$$J_0 = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{-2e}{m}} \frac{V^{3/2}}{x^2} = 2.33 \times 10^{-6} \frac{V^{3/2}}{x^2}. \quad (1.4)$$

此式是大家熟悉的契尔得定律表示式, 这个式子说明了在一个二极管模型中电流的变化情况, 其中电子在一给定点上仅仅具有单一速度, 并以零初速离开阴极表面。

### 多速电子流

在实际的二极管中, 阴极表面电子的热能给予电子以按麦克斯韦定律分布的初速度, 而由于这种多速模型电子流的缘故, 在阴极附近必定存在一个负的电位梯度。否则, 所有的发射电子都会到达阳极, 电子注电流将不受阳极电压的控制。因此, 二极管中的电位分布必定如图 1.1 所示。在阴极

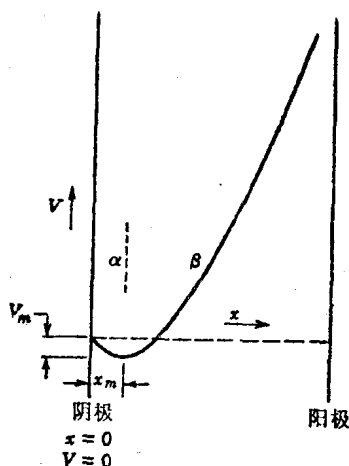


图1.1 具有有限发射速度的平行平面二极管中的电位分布。