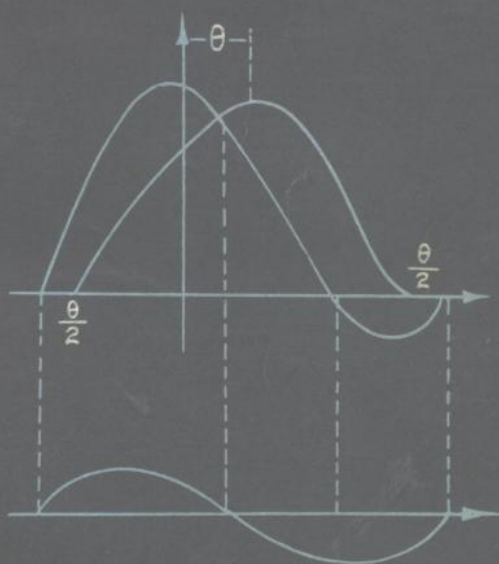


[德] H.G. 翁格尔 W. 哈特 著

高频半导体 电子学



科学出版社

高频半导体电子学

[德] H. -G. 翁格尔 W. 哈特 著

王蕴仪 译

科学出版社

1981

内 容 简 介

本书较为系统、全面、深入地介绍了高频面结型晶体管、PN 结变容二极管、PIN 二极管、肖特基二极管、MIS 变容二极管、高频场效应晶体管、雪崩渡越时间二极管和转移电子器件的基本机理、特性、设计方法以及应用这些器件的电路理论和技术，并简要说明制作这些器件所采用的材料、结构和工艺。此外，还介绍了电声微波放大器的基本理论和电路。

本书可供从事研制微波半导体器件和电路的科技人员参考，亦可作为大专院校有关专业的教学参考书。

H. -G. Unger W. Harth
HOCHFREQUENZ-HALBLEITERELEKTRONIK
S. Hirzel Verlag Stuttgart, 1972

高 频 半 导 体 电 子 学

〔德〕H. -G. 翁格尔 W. 哈特 著

王蕴仪 译

责任编辑 魏玲

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

石家庄地区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1981 年 9 月第 一 版	开本: 787×1092 1/32
1981 年 9 月第一次印刷	印张: 15 1/2 插页: 1
印数: 0001—5,750	字数: 354,000

统一书号: 15031·359

本社书号: 2256·15—7

定价: 2.40 元

译 者 的 话

自从五十年代参量放大器问世以来，微波半导体器件与电路的研究工作有了很大的发展，目前它已成为一门新兴的学科，而且还在迅速发展之中。《高频半导体电子学》一书对已有的各种微波半导体器件的物理基础、工作特性、设计方法以及应用这些器件的电路理论和技术作了全面而深刻的分析。它不是简单的资料综合而是一本自成系统的、理论性较强的著作。译者希望《高频半导体电子学》一书的翻译出版，将对我国微波半导体器件与电路的科研、教学和生产有所裨益。

中国科学院半导体研究所何希哲同志曾对译稿进行校阅，在此谨致谢意。由于译者水平所限，译文中难免有错误和不妥之处，切望读者指正。

王 蕴 仪

一九八〇年于南京工学院

原 序

电子技术领域中的第一个半导体器件是晶体检波器。原始的点接触检波器在 1900 年前后已经用于接收高频振荡，因此高频电子学已经具有比较长的历史。随着在通信、无线电导航以及雷达技术方面的广泛应用，高频技术借助于电子学而取得进展。最初是电子管起了重要作用。但是近二十年来，它日益被半导体器件所代替，因此今天半导体电子学在高频技术领域已经占了统治地位。利用半导体器件，高频系统可以更简单、更可靠，同时寿命更长。并且使许多高频电路有可能小型化和集成化。总之，高频设备因此将变得更小、更轻、更经济和更可靠。

本书对半导体器件及其电路按照它们的实际意义依次进行研究，它们的实际意义通常是和它们发展的成熟程度有关的。本书中首先论述有着多方面应用的功率较高的双极 NPN 晶体管，接着是 PN 结二极管。PN 结二极管在高频技术领域不仅用作耗尽层变容管或阶跃变容管，也可以两者混合使用。在结构和应用方面和阶跃变容管相近的是 PIN 二极管。此外，采用肖特基二极管的晶体检波器是一种可靠的高频器件，并仍旧主要用作接收检波器和混频器。

上述半导体器件在高频技术领域内已经比较成熟了，而另一些器件还没有发展到可以确定其高频应用范围的程度。属于此类器件的有：用作高频变容管的 MIS 二极管，用作高频放大器的耗尽型场效应晶体管和 MOS 场效应晶体管，用于振荡和放大的雪崩渡越时间二极管和耿氏器件，以及电声

放大器。为了考虑到未来的发展，本书对这些较新器件的物理基础、高频性能以及在高频电路中的实际应用也作了详细的论述。

在研究各种电路和器件时，对于固有的高频效应，即载流子和波的渡越时间效应、由于串联电阻损耗和扩散产生的衰减以及寄生电感和电容的影响给予了特别的注意。因此研究内容集中在高频技术的高频段，即100MHz以上。尽管如此，本书的论述仍旧可以应用于整个高频范围，即从无线电广播技术所用的中波、短波和超短波，无线电定向通讯和雷达技术所用的微波，直至波导通信用的毫米波。

本书以不伦瑞克工业大学电子技术（特别是高频技术）、电子学以及电物理学课程的三学期的讲授内容为基础写成。但是其中亦吸收了不伦瑞克工业大学高频技术研究所的一系列研究成果，并且对于某些器件和电路作了一些新的阐述。

对于读者仅要求具有半导体电子学的基础知识。因此所有学过电子技术和物理学的读者都能理解本书的内容。本书亦适合于自学和专业训练，并可供从事科研、生产和应用的工程技术人员和物理学工作者作为手册使用。为此，本书介绍了所有为了研制半导体器件或者将这些器件应用于高频系统的电路中所必需的知识。它不仅阐述了有关器件和电路的物理基础、作用原理和性能，而且还写入了有关频率、功率、热灵敏度以及保真度的极限。这些对于工程技术人员和物理学工作者都是必须了解的。

本书第一章至第七章由 H.-G. 翁格尔教授编写，第八章至第十章由 W. 哈特教授编写。

H.-G. 翁格尔 W. 哈特

目 录

译者的话

原序

概论	1
第一章 高频面结型晶体管	7
1.1 普通面结型晶体管的截止频率	7
1.2 条带形平面晶体管	12
1.3 高频晶体管的等效电路和截止频率	18
1.4 高频晶体管的功率和频率极限	29
1.4.1 电压-频率极限	29
1.4.2 电流-频率极限	31
1.4.3 功率-频率极限	32
1.4.4 增益-频率极限	33
1.5 晶体管作为高频放大器时的散射参量	35
1.6 晶体管放大器的匹配电路	39
1.7 利用定向耦合器的晶体管并联电路	47
1.8 高频放大器的稳定性	48
1.9 前置放大器	52
1.10 功率放大器	54
参考文献	56
第二章 PN 结变容二极管	57
2.1 耗尽层电容	59
2.2 电荷储存	64
2.3 阶跃二极管的电荷控制模型	66
2.4 寿命和漂移时间的测量	71
2.5 漂移场与漂移时间的关系	75

2.6 PN 结变容二极管的工艺和性能	79
参考文献	83
第三章 变容二极管的应用	84
3.1 参量放大器	84
3.1.1 功率增益	86
3.1.2 参量放大器的噪声	89
3.1.3 参量放大器的带宽	93
3.1.4 用于参量放大器的二极管和电路	95
3.2 倍频器	100
3.2.1 利用耗尽层变容管倍频	102
3.2.2 利用理想阶跃二极管倍频	111
3.2.3 利用实际阶跃二极管倍频	119
3.2.4 倍频器电路	126
3.3 上变频器	133
3.3.1 参量上变频器	134
3.3.2 功率上变频器	139
参考文献	147
第四章 PIN 二极管	149
4.1 PIN 二极管的反向阻抗	151
4.2 PIN 二极管的正向阻抗	154
4.3 接通过程	157
4.4 切断过程	161
4.5 PIN 二极管的设计	164
4.6 PIN 二极管开关和移相器	165
4.7 开关定理	169
4.8 最大开关功率	170
4.9 开关和调制损耗	176
4.10 开关的频率响应	179
4.11 通带衰减具有低通特性的传输式开关	180
4.12 通带衰减具有带通特性的传输式开关	182
4.13 多路开关	186

4.14	渡越时间开关和色散相位调制器	187
4.15	在 PIN 开关中控制电压和直流电压的引入	189
4.16	PIN 二极管脉冲发生器	190
4.17	PIN 二极管倍频器	198
	参考文献	203
第五章	肖特基二极管	205
5.1	金属-半导体结的能带结构	206
5.2	肖特基结的电流-电压特性	213
5.2.1	镜像力	219
5.2.2	声子散射和反扩散	220
5.2.3	量子力学反射和隧道过程	221
5.3	肖特基二极管作为高频变阻管	224
5.4	肖特基变阻管作为高频检波器	227
5.5	变阻管作为接收混频器	235
5.6	肖特基二极管作为高频变容管	256
	参考文献	258
第六章	MIS 变容二极管	260
6.1	能带结构和电容-电压特性	261
6.2	MIS 变容二极管的控制极限	271
6.3	界面效应	275
6.4	MIS 变容二极管的特性模型和截止频率	284
6.5	利用 MIS 变容二极管作倍频器	290
6.6	利用 MIS 变容二极管作参量放大器	297
6.7	利用 MIS 变容二极管作上变频器	301
	参考文献	303
第七章	高频场效应晶体管	305
7.1	耗尽型场效应晶体管	308
7.1.1	内部场效应晶体管的静态特性	309
7.1.2	完整的耗尽型场效应晶体管的高频等效电路	317
7.1.3	频率极限	324
7.1.4	场效应晶体管的设计	325

7.2 增强型 MOSFET	328
7.2.1 内部 MOSFET 的静态特性	329
7.2.2 完整的 MOSFET 的高频等效电路	338
7.2.3 频率极限和 MOSFET 的设计	343
7.3 场效应晶体管中的高频噪声	345
7.3.1 耗尽型场效应晶体管中的热噪声	345
7.3.2 增强型 MOSFET 中的沟道热噪声	349
7.4 高频应用	352
7.4.1 共源电路的导纳参数	352
7.4.2 功率增益和稳定性	353
7.4.3 场效应晶体管放大器的噪声系数	358
7.4.4 非线性失真	361
7.4.5 共栅电路和共源-共栅电路	362
参考文献	364
第八章 雪崩渡越时间二极管	366
8.1 基本理论	366
8.1.1 倍增效应	366
8.1.2 漂移速度	367
8.2 雪崩渡越时间二极管的工作原理	368
8.3 小信号理论	371
8.3.1 稳态解	372
8.3.2 准静态小信号近似	373
8.3.3 普遍的小信号理论	377
8.4 大信号理论	380
8.4.1 电流非线性	381
8.4.2 振荡工作状态下的起振特性和工作点	384
8.4.3 输出功率和效率	389
8.4.4 高效率振荡模式	390
8.5 材料选择、结构形式和应用	395
8.5.1 材料性能	395
8.5.2 雪崩渡越时间二极管的设计	399

8.5.3 结构形式	400
8.5.4 应用	403
参考文献	404
第九章 转移电子(耿氏)器件	406
9.1 基本理论	406
9.2 空间电荷的不稳定性	409
9.3 小信号理论	412
9.3.1 稳态解	412
9.3.2 小信号阻抗(反射放大器)	414
9.3.3 行波放大器	418
9.3.4 横向尺寸的影响	420
9.4 瞬动力学	425
9.4.1 累积畴	425
9.4.2 偶极畴	428
9.5 振荡器工作模式	434
9.5.1 偶极畴延迟模	435
9.5.2 偶极畴猝灭模	436
9.5.3 限制空间电荷积累的振荡模式(LSA 工作模式)	437
9.5.4 工作模式综述	441
9.6 材料选择、结构形式和应用	442
9.6.1 材料选择	442
9.6.2 结构形式	443
9.6.3 应用	444
参考文献	448
第十章 电声微波放大器(声子放大器)	450
10.1 基本理论	450
10.2 小信号理论	452
10.3 材料选择、结构形式和应用	457
10.3.1 材料选择	457
10.3.2 结构形式	457
10.3.3 应用	459

参考文献	460
附录	461
A.1 最大单向增益	461
A.2 四端网络参量和功率增益	464
A.3 具有变换四端网络的电路的传输参量	468
A.4 稳定圆和绝对稳定性	469
A.5 半导体材料硅、砷化镓和锗在 300 K 的一些特性	471
重要符号表	474

概 论

高频电子学是高频技术的一个分支。一般说，高频技术是研究快速过程的工程科学。它研究快速过程的原理、伴随快速过程出现的特殊问题，这些问题在理论上和实际上的解决方法以及应用快速过程去达到预定的结果或实现某种功能。

在这里，“快”当然只是一个相对的概念，我们最好用运动过程中的渡越时间来确定它。如果粒子或场通过一个装置的渡越时间与过程的持续时间相比不是很小，那么我们就称之为快速过程。

例如，在摄影时曝光时间很短，以至于可以和打开以及关闭快门所用的时间相比拟，我们就必须用快速过程去描述它。在这里，快门的渡越时间取决于快门零件的惯性。

载流子也具有惯性，因而总是以有限的速度运动，通常这个速度主要是受渡越空间阻力的限制，例如当载流子在晶体的实际上是无规则的晶格中运动时就是这样。

同样地，场和波也只能以有限的速度传播，而且电磁场的最高速度为光速。

由此可见，“快”的概念涉及到完全不同的时间间隔，这个时间间隔取决于过程是机械的还是电的。如果所研究的是一个周期性过程或者我们通过傅里叶分析将一个变化过程分解为振荡频谱，那么此过程的周期或者其基波的周期就是这个过程持续时间的量度，同时基频就是快到什么程度的量度。

按照这一量度,在普通力学中,从 100 Hz 就已经开始进入高频技术的领域。在声学中,声速决定渡越时间,从 300 Hz 到 1 kHz 也已经开始进入高频技术的领域。在电工技术范畴内,光速对于场和波是决定性的,高频技术的范围实际上是从 300 MHz 才开始的。因为在这个频率,自由空间的电磁波波长恰好为 1 米,因而和周围设备的尺寸具有相同的数量级。

高频电子学的范畴主要也是在 300 MHz 以上,因为它是高频电工技术的一个分支。但是必须考虑到,高频电子学首先是研究载流子的运动,例如电子在真空或气体中的运动以及电子或空穴在固体中的运动。在普通电子学范畴内,研究由于这些载流子运动而产生的全部效应并使之应用于器件或实际电路中。

但是这些载流子现在已不再是以光速运动。在真空中,电子仅仅以平均热速度从阴极发出,这个速度决定于阴极的温度。虽然电场能够使电子加速,但是电子速度通常仍远低于光速。在充气电子管中,电子或离子和气体分子互相碰撞。因此它的平均速度决定于气体密度。

在固体中,载流子的运动同样地受到阻碍,甚至更加严重。由于载流子和晶格的热扰动或恒定的扰动相互作用,在相当低的电场下,它们实际上很快就达到一个平均的漂移速度,这个速度仅仅决定于晶体的晶格及其扰动。在常用的半导体中,在室温及正常掺杂的情况下,饱和漂移速度约为 10^7 cm/s。半导体器件中的载流子通常以扩散的形式运动,而且其速度远低于饱和漂移速度。

纵然如此,如果我们一定要象在高频技术中那样对于高频电子学给出一个频率界限,我们就必须彻底改变关于器件大小的概念。当频率为 300 MHz 时,为了使固体中载流子扩

散或漂移所需要的渡越时间可以和振荡周期相比拟，则渡越距离只能是零点几毫米。但是近代的固体工艺可以很好地控制这样的尺寸，并且有可能实现小型化。因此，300 MHz 也是高频电子学的自然界限。

将相同的判别标准应用于真空管，300 MHz 也可以作为高频电子学的自然界限：在真空管工艺中，虽然尺寸不能象固体工艺做得那么小，但是通过强电场的加速作用，电子在真空中可以达到较高的速度。因此高频电子学频率下限的定义是普遍成立的。

总之，关于高频电子学领域可以综述如下：电子学是电工技术的特殊领域，它研究真空、气体和固体中载流子运动而产生的效应，并将这些效应应用于实际的器件和电路中。高频电子学是电子学的一个分支，它研究快速过程或振荡的器件和电路，载流子在器件中的渡越时间可以和过程的持续时间或振荡周期相比拟。其界限通常为 300 MHz。

在高频器件中，载流子有限的渡越时间首先表现出明显的害处。但是也有许多器件直接利用渡越时间效应去实现特定的功能。在真空管范畴内，经典的例子是栅控电子管。其中，电子渡越时间是有害的。相反的例子是渡越时间电子管，如速调管、磁控管和行波管，它们的工作原理基于电子有限的渡越时间。

在半导体器件范围内，相应的例子一方面是晶体管，另一方面是雪崩渡越时间二极管。晶体管的高频性能受到少数载流子通过基区的扩散时间的影响。而雪崩渡越时间二极管只有利用载流子有限的漂移时间才可能产生振荡。

我们对高频技术和高频电子学所作的定义并不完全适合于实际情况。在高频情况下，许多电器件，特别是电子器件的工作状态受到寄生耗能元件和寄生储能元件的影响，前者如

半导体的体电阻*、引线和接触电阻；后者如内部电容、布线电容和引线电感。特别是内部电容，大多数和体电阻及接触电阻串联，它的充放电电流流过电阻时将电能变换为热能，而且频率越高，充放电电流就越大，消耗的电能也就越多。因此除载流子的渡越时间外，寄生电阻的充放电损耗也限制了器件的工作频率范围。虽然通过选择合适的结构形式及尺寸可以减小寄生电阻，但是即使我们完全消除了接触电阻和引线电阻，对于半导体器件来说，半导体有源区的电阻无论如何总是存在的。在这个电阻上的热损耗使器件的正常功能限制在一定频率范围内，在这个频率范围内，半导体仍然是导电的，因此传导电流密度 σE 大于位移电流密度 $\omega \epsilon E$ 。所以有源半导体的介质弛豫频率 $\omega_r = \sigma / \epsilon$ 是半导体器件的频率上限。但是从频率为 $\omega_r / 100$ 开始，半导体损耗就已经很明显并影响器件的功能。考虑到这种特殊的高频效应，高频范围应从 $\omega_r / 100$ 开始。对于施主浓度 $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的硅来说，电导率仅为 $\sigma = 0.2 \text{ s/cm}$ ， $f_r = 30 \text{ GHz}$ 。因此在这种典型情况下，如同由渡越时间条件所得到的高频电子学的自然界限一样，高频范围也是从 300 MHz 开始。

电子学的特殊器件一部分具有控制或放大作用，或者甚至产生振荡，例如通过反馈。其中也有一部分器件是非线性的，不仅有耗能元件，即非线性电阻，而且也有储能元件，例如非线性电容。

按照载流子的运动场合不同，即在真空中、气体中或晶体中运动，分别有真空管、气体放电管和半导体器件。在本书中，我们打算只研究高频半导体器件及其电路。考虑到近代

* 在本书中，“体电阻”一词指的是接触电极和半导体有源区之间的半导体无源区的欧姆电阻。体电阻与接触电阻之和叫做串联电阻。相应地，这个无源区叫做体区。——译者注

技术的发展, 半导体器件正普遍地代替电子管。目前已发展到只有在高频情况下, 同时又必须产生或放大高功率时还仍旧采用电子管。随着半导体技术的进一步发展, 可以预料, 电子管将在这种最后的应用中再次被半导体器件所取代。

编写本书的另一个观点是电子学向集成电路方向发展。在普通电子学中集成电路现在已经占统治地位。在这种电路中, 电子器件和无源的线性元件结合成一体。它们用相同的工艺过程制造出来, 用类似的材料构成并具有相近的结构。同样, 在高频电子学范畴内, 集成电路也越来越多地被采用。为了避免寄生效应, 电子器件应尽可能和电路集成在一起, 在高频电子学中, 将器件和电路分别加以处理是不适宜的。因此我们将结合每一种器件研究与其适合的电路。由于这样处理在内容系统性方面产生的不足之处, 将在概念的理解和重要的实际结果方面得到弥补。

一般参考文献

在各章的参考文献中仅仅列入直接引用其结果的文献来源。对于高频半导体电子学一般的和深入的阐述包含在下面的书籍和专题论文中:

- [1] Penfield, P. Jr., und Rafuse, R. P.: Varactor applications. MIT Press, Cambridge, Mass. 1962.
- [2] Steiner, K. H., und Pungs, L.: Parametrische Systeme. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1965.
- [3] Bosch, B. G.: Gunn-Effekt-Elektronik. Die Telefunkenhöhre, Heft 47, 13—102(1967).
- [4] Watson, H. A.: Microwave semiconductor devices and their applications. McGraw Hill Book Co., New York 1969.
- [5] Sze, S. M.: Physics of semiconductor devices. J. Wiley & Sons, New York 1969.
- [6] Carroll, J. E.: Hot electron microwave generators, Edward Arnold