



微波半导体器件 及其应用

上海人民出版社

73, 733

111

微波半导体器件 及其应用

上海无线电^{十七}厂_{二十六}译

上海(人民)出版社

内 容 提 要

本书较全面地介绍了微波半导体器件的原理, 以及一些能有效地工作的电路原理。

全书包括: 半导体物理; 微波二极管和电路; 微波晶体管 and 电路; 目前趋势等五大部分。重点介绍通信、雷达及其他微波领域所采用的实验器件和电路。对 $p-n$ 结变容二极管、 $p-i-n$ 二极管、体效应砷化镓二极管等新型半导体器件都作了较具体的分析, 同时列举了这些器件的具体尺寸和几何形状, 以及设计的具体要求和工艺上的具体问题。

本书可供从事微波方面工作的科研、教学、生产人员参考。

MICROWAVE SEMICONDUCTOR DEVICES AND THEIR CIRCUIT APPLICATIONS

H. A. Watson

McGraw-Hill Book Co., 1969

微波半导体器件及其应用

〔美〕H. A. Watson

上海无线电^{十七}厂译
_{二十六}

上海人民出版社出版

(上海绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 六安地区印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 19 字数 253,000

1975年2月第1版 1975年2月第1次印刷

印数 1—15,000

统一书号: 15171·132 定价: 1.50 元

译者说明

在无产阶级文化大革命和批林批孔运动推动下，我国电子工业发展迅速，微波半导体器件的应用越来越广泛，促进了微波半导体器件的进一步发展。

我们是工厂里从事微波器件设计、制造和电路工作的工人、技术人员，在毛主席革命路线的指引下，为了赶超世界先进水平，遵照伟大领袖毛主席“洋为中用”的教导，对国外的有关技术资料进行了分析和比较。这本“微波半导体器件及其应用”是我们集体翻译，由上海科技大学无线电系和复旦大学物理系的有关教师校对。

这是一本专业性较强的技术书籍，它较系统地归纳了近期国外微波半导体器件方面的设计、制造和应用成果，为查阅和比较国外这方面的资料提供了方便；其次，该书在原理叙述方面较为全面，关于设计、制造和应用的介绍较为具体，对实际工作有一定参考价值。但微波半导体器件还在不断发展中，该书所归纳的内容有一定局限性，尤其是在应用方面，介绍的内容还不广泛。

在译文中，对原书的明显谬误，作了删节和改正；对引证的参考资料作了集中编排，对一般性参考资料作了必要的删减。

由于我们水平所限，译文中难免有错误或不妥之处，希望读者提出批判指正。

译者

主要符号表

A	面积		密度; N_a = 施主原子密度
\AA	埃(1 埃 = 10^{-8} 厘米)	n	导带中电子密度; 二极管电流-电压关系式 $I = I_s(e^{eV/nkT} - 1)$ 中的系数
B	带宽	P	电功率; 晶体动量
b	归一化电纳	p	动量; 价带中空穴密度
C	电容	Q	电荷; 谐振电路或谐振腔的 Q 值; Q_0 = 平均储存电荷; Q_B = 击穿时的储存电荷; \bar{Q} = 动态品质因数; $Q_{m,n} = q$ 的傅里叶分量
c	光速	q	瞬时电荷; q_0 = 二极管正向偏压在势垒电位时的储存电荷
I	电通量密度; 扩散系数	R	电阻
E	电场强度	r	半径; 归一化电阻; r'_0 = 基极欧姆电阻
$-e$	电子电荷	S	倒电容; $S_0, S_1, S_2 \dots$ 是变容管与时间有关的倒电容按傅里叶级数展开的系数
F	噪声指数; 力	T	绝对温度, 其单位是 K
f	频率; f_c = 截止频率; $f_{\text{最大}}$ = 最大振荡频率	t	时间
G	电导; 功率增益	U	晶体管的单向作用功率增益
g	归一化电导; 结内杂质密度梯度; g_1 = 电压增益	u	速度
h	普朗克常数; $\hbar = h/2\pi$	V	电压; 位能; V_0 = 直流偏压; V_B = 击穿电压; $V_{m,n} = v$ 的傅里叶系数
I	电流; $I_{m,n} = i$ 的傅里叶系数	v	$\text{Re } V e^{j\omega t}$ = 瞬时电压, 式中, V 是一个具有大小、相位及电压量纲的向量 (在第八章中采用了 $v = 2 \text{Re } V e^{j\omega t}$)
i	$\text{Re } I e^{j\omega t}$ = 瞬时电流, 这里 I 是一个具有大小、相位和电流量纲的向量 (在第八章中采用了 $i = 2 \text{Re } I e^{j\omega t}$)	W	能量; 功; 一个粒子的总能量; 厚度; W_f = 费米能量; W_g = 禁带
J	电流密度		
j	$\sqrt{-1}$		
K	晶体管增益-带宽优值		
k	玻耳兹曼常数; 波数		
L	电感; L_c = 混频二极管的变频损耗长度		
M	雪崩倍增因子; M_m = 噪声测度		
MAG	最大可用功率增益		
N	电子状态密度; N_0 = 受主原子		

II 主要符号表

	宽度; W_0 = 导带底的能量; W_1 = 价带顶的能量		间变化的电容系数
w	耗尽层厚度; w_0 = 基区厚度; w_1 = 集电极耗尽层厚度	ϵ	介质的介电常数; ϵ_r = 相对介电常数; ϵ_0 = 自由空间的介电常数
X	电抗	e	自然对数的底
x	归一化电抗; 线性距离	η	效率
Y	导纳	θ	热阻
y	归一化导纳	λ	波长
Z	阻抗; Z_0 = 特性阻抗	μ	迁移率; 微($=10^{-6}$); 介质的磁导率; μ_r = 相对磁导率; μ_0 = 自由空间的磁导率
z	归一化阻抗	ν	电磁辐射频率
α	衰减常数; 电子电离系数; $\alpha = h_{fb}$ = 小信号共基极电流增益; α_0 = 直流共基极电流增益	ρ	电阻率; 电荷密度
β	e/kT ; 空穴电离系数; 小信号共发射极电流增益; β_0 = 直流共发射极电流增益	σ	电导率
γ	发射效率; 载流子转移系数; 变容管电容与电压关系式中的幂数: $C/C_{\text{最小}} = [(\phi - V_B)/(\phi - V)]^\gamma$	τ	载流子寿命; 时间常数; τ_1 = 弛豫时间
Γ	C_1/C_0 , 式中, C_1 和 C_0 都是变容二极管按傅里叶级数展开随时	ϕ	势垒电位或扩散电位
		Ψ	时间有关的波函数
		ψ	定态波函数; 静电位
		ω	角频率 = $2\pi f$
		φ	相应于费米能级的静电位 = W_f/e

目 录

译者说明	
主要符号表	i

第一部分 导 论

第一章 微波半导体器件的原理和功能	2
1.1 器件的分类与用途	2
1.2 器件的结构	7
1.3 晶体管技术在发展新型微波二极管中的作用	13

第二部分 半导体物理

第二章 薛定谔波动方程和原子的电子结构	16
2.1 薛定谔波动方程	16
2.2 自由粒子	20
2.3 定态	25
2.4 原子的电子结构和周期表	33
第三章 半导体晶体	38
3.1 共价键和半导体晶体结构	38
3.2 晶格振动	45
3.3 硅晶体	51
3.4 半导体晶体内的缺陷	55
第四章 半导体的电导	60
4.1 粒子在一维周期性能带中的运动	61
4.2 三维晶体中电子的能量	71
4.3 电子和空穴; 施主和受主	76
4.4 迁移率和电阻率	81
4.5 非平衡载流子密度	88
第五章 $p-n$ 结理论	91
5.1 $p-n$ 结的能带图	92
5.2 空间电荷区的电位和电场分布	96
5.3 $p-n$ 结的伏-安特性	101

II 目 录

5.4 空间电荷层的电容	104
5.5 扩散电容和电荷储存	105
5.6 雪崩击穿	110
第六章 半导体表面状态及欧姆接触	120
6.1 空间电荷区理论	121
6.2 表面能态	129
6.3 表面的测量	130
6.4 硅-二氧化硅表面的某些性质	131
6.5 表面状态对器件影响	134
6.6 欧姆接触	136

第三部分 微波二极管和电路

第七章 变容二极管	140
7.1 变容管晶片电学参量的定义	140
7.2 优值	144
7.3 变容二极管特性	146
7.4 变容二极管晶片的电学参量	152
7.5 变容管特性的详细计算	162
7.6 电荷贮存电容和快反向二极管	176
7.7 毫米波变容二极管	179
第八章 变容管的应用	185
8.1 曼利-罗功率关系式	185
8.2 参量放大器	190
8.3 参量放大器的设计方案	209
8.4 谐波发生器	219
8.5 上变频器	247
第九章 $p-i-n$ 二极管	263
9.1 典型的 $p-i-n$ 二极管	264
9.2 i 层	265
9.3 等效网络	268
9.4 在反向偏压下的行为	270
9.5 在正向偏压下的行为	271
9.6 从一种偏压状态转向另一种偏压状态的开关作用	272
9.7 二极管阻抗的计算	274
9.8 $p-i-n$ 二极管的功率限制	281

9.9 材料和设计对二极管特性的影响	285
9.10 一种特殊的 $p-i-n$ 二极管	288
第十章 微波开关、限幅器和移相器	292
10.1 微波二极管开关	293
10.2 开关的设计原理	300
10.3 固体微波限幅器	308
10.4 可变衰减器	316
10.5 微波移相器	318
第十一章 肖脱基势垒器件	332
11.1 肖脱基势垒的物理学	333
11.2 肖脱基势垒变阻管的设计和性能	343
11.3 肖脱基势垒变容管的设计和特性	352
11.4 MOS 变容二极管	359
第十二章 检波二极管、混频二极管及电路	362
12.1 检波与混频二极管的特性	363
12.2 二极管封装	366
12.3 检波器	368
12.4 混频器原理	373
12.5 接收机的噪声指数	378
12.6 实际混频器的例子	380
第十三章 隧道二极管	388
13.1 隧道二极管伏-安特性	389
13.2 等效电路及其特性	398
13.3 隧道二极管结构	403
13.4 材料和器件的关系	409
第十四章 隧道二极管电路	414
14.1 隧道二极管稳定性的讨论	415
14.2 隧道二极管放大器的增益和带宽	431
14.3 隧道二极管的噪声性能	434
14.4 大信号效应	436
14.5 两种隧道二极管放大器的描述	438
14.6 隧道二极管振荡器	441
14.7 隧道二极管变频器	448
14.8 反向二极管检波器和混频器	450
第十五章 雪崩渡越时间微波二极管	454

iv 目 录

15.1 小信号运用	455
15.2 大信号运用	472
15.3 噪声	479
15.4 展望	483
第十六章 体砷化镓器件	487
16.1 n 型砷化镓的体内性质	488
16.2 小信号线性理论	495
16.3 非线性的大信号理论	502
16.4 样品的制备	513
16.5 放大器	517
16.6 振荡器	519

第四部分 微波晶体管和电路

第十七章 微波晶体管	530
17.1 一种特殊的微波晶体管	530
17.2 半导体晶片的设计	536
17.3 最佳化器件晶片的性能	549
17.4 工艺考虑	553
17.5 封装设计	561
17.6 性能与特性	562
第十八章 4 千兆赫晶体管放大器	576
18.1 设计原理	576
18.2 设计细节和制造技术	579

第五部分 当前趋向

第十九章 当前微波半导体器件的趋向	584
19.1 性能	584
19.2 寿命和可靠性	592

附 录

附录 A 若干半导体、金刚石和铜的物理特性	594
附录 B 载流子速度分布及爱因斯坦关系	595
附录 C 物理常数表	596

第一部分

导 论

第一章 微波半导体器件的原理和功能

五十年代中期以来,随着晶体管工艺和器件在发展新品种中的应用,以及有关这方面技术的不断发展,微波半导体器件的数量与品种得到了极大的增长。本章叙述各类器件的基本原理及其功能、特性和用途,作为入门向导。

微波二极管按两种交迭的分类:

1. 按器件的特性类型分为:非线性电阻(变阻管);非线性电抗(变容管);可控阻抗(等离子体或 $p-i-n$ 二极管);负阻和具有其他可用特性的二极管等。

2. 按器件的结构分为:点接触; $p-n$ 结;肖脱基势垒;金属绝缘体半导体(MIS)或金属-氧化物-半导体(MOS)二极管;隧道二极管;反向二极管; $p-i-n$ 等离子体二极管;阶跃恢复二极管;碰撞雪崩渡越时间二极管和体效应(耿氏效应)负电阻二极管等。

这些二极管在不同电路中(例如:下变频、检波、上变频、调制、开关、振荡和放大等)各有其特殊作用。下面将对不同类型的器件作简要比较,以说明其具体特性和优点。

近年来,鉴于日益能精确地控制电极尺寸,致使晶体三极管进入了微波频率的领域。因此,也把晶体管特性包括在内作概括比较。

1.1 器件的分类与用途

变 阻 管

许多微波二极管的作用就在于它们的非线性电流-电压特性。

这一特性普通可用下列近似式表示其指数关系:

$$I = I_s (e^{eV/nkT} - 1) \quad (1.1)$$

根据这个关系, 把它们称为变阻管(可变电阻)。利用这种非线性可制作变频器。如果把二极管作得很小, 其分布电容就极小, 这样就能把它用作微波接收机前端的混频器。从三十年代后期开始, 由于这类点接触二极管具有相当良好的信号——噪声比, 多年来一直是微波接收器的一种较好的元件。直到最近, 才有可能用其他器件来替代它, 并使这方面的性能得到更好的改进。

主要以变阻特性工作的器件包括: 大部分点接触二极管, 反向二极管和大部分的肖脱基势垒二极管。

变阻管主要的工程应用是: 下变频, 检波, 低噪声接收, 高速限幅或整流, 信号检测。以前也曾用作于上变频, 调制, 谐波发生, 但在这些应用中, 它已大大落后于更新型的器件(变容二极管和等离子体二极管)。

变 容 管

充电-电压特性的非线性, 即电容的非线性, 是某些更新型的二极管的主要特征, 因此称之为变容管(可变电抗器)。一个加反向偏压二极管的可变电容通常遵循下述关系:

$$C = C_0 / (1 - V/\phi)^\gamma \quad (1.2)$$

式中, V 为所加的电压(由于反偏置, 所以是负的); ϕ 为近似于二极管接触电位的参数。参数 γ 取决于半导体材料的掺杂分布, 对突变结, γ 约为 $1/2$; 对缓变结, γ 约为 $1/3$ 。这里的一个突出的优点是这种二极管十分接近于一个理想的无损耗非线性元件。

由于变容管的非线性性能, 因而很快就适应微波的要求, 又由于其损耗比变阻管低得多, 所以变容管适宜在下述四个方面中应用。

谐波发生 在损耗低到 $1 \sim 2$ 分贝/倍频程时, 这种谐波倍频器使制作全固体化微波发生器成为可能, 并有足够功率供微波接收机或小型通讯发射机工作。

4 导 论

调制或上变频。变容管变频器与变阻管的明显差别，前者变频同时还有增益，而不是损耗。按极粗略的一级近似，当再生影响小时，功率增益近似等于输出与输入频率之比，即等于 $f_{\text{出}}/f_{\text{入}}$ 。因此，当代的混频被划分为两类：当频率向上移时（上变频），宜选用变容管作为非线性混频元件；但当频率向下移时（下变频），变阻管仍是较适宜的混频元件。

低噪声放大 通常，在变容管变频器中，再生效应很大，可能产生复杂的负阻效应，并得到放大，这就是所谓“参量”放大器的基础，它实际上是一个再生调制器。这类放大器，利用了低损耗变容管作混频元件，它对信号频率 s 和下边带波 $s-b$ （其中 b 为“拍频”或“泵”振荡器的频率）进行混频时存在的再生作用。

如果非线性元件损耗很低，放大过程的噪声也可以是极低的。所以，尽管这类放大器是复杂的，但是在极低噪声的微波接收机中却常选用它。虽然放大器也可用作为反射负阻型，这样的输入及输出频率都是 s ，但仍然会有下边带频率 $s-b$ ，对此频率，电路必须有电阻损耗才能保证所需的再生。下边带频率，除吸收功率外，别无其他作用，有时极不确切地称为空闲频率。事实上，这个空闲频率却与产生放大的再生作用是密切相关的。

值得注意，把空闲频率写成 $s-b$ ，是为了强调其在实际上是一个负数之故。由于 $s-b$ 是负数这一事实，使下边带非常不同于上边带。电抗的表示符号相反，电抗反馈变为再生，而不是负反馈，因而信号频谱倒置了（详见第八章）。

因此，要获得电抗型放大，必须具备下列三种特征：

1. 非线性元件的损耗必须小，因此非线性阻抗必须是电抗。非线性电阻本身就能起变频作用，但不产生增益。
2. 由于它的作用是一个再生调制器，所以必须有空闲频率。在空闲频率的终端必定有适当的损耗；有时就利用二极管的剩余电阻来达到这一目的。
3. 空闲频率必须是泵源的下边带频率。上边带频率 $(s+b)$ 不起再生作用。

脉冲发生与脉冲形成 当利用少数载流子储存获得非线性电容时,二极管的功率容量可能很小而损耗较大,但电容的非线性可能极大(与所加电压呈指数关系)。这类二极管,由于在脉冲状态下具有瞬态特性,常称之为阶跃恢复或急变二极管,适合作为脉冲发生、脉冲形成和直接产生高次谐波的元件。

变容二极管还有一些其他用途,如作电子调谐元件,它是利用其电压与电容间的相互关系来控制网络的电抗。这也可以制成保护装置和开关。在这类用途中,设计良好的 $p-i-n$ 等离子体二极管虽比变容二极管能控制更大的功率,但变容管的优越性在于:只须稍微改变直流偏压就能调谐它的电容。

可控阻抗二极管 ($p-i-n$)

变阻管与变容管的阻抗都是非线性的。从施加电压来确定其阻抗值这一含义上理解,这种阻抗可以认为是“可控”的。但仍有必要用一个词来描述宽间隔 $p-i-n$ 二极管中经常见到的有用特性,把它称之为可控阻抗。这类宽间隔二极管的电导几乎正比于其所储存的少数载流子密度,但储存的分布只对低频率作出响应;在微波频带内载流子不能很快地进入、移出空间电荷层而具有显著的变化。这类二极管在微波波段内是一种准线性阻抗,其值由直流或低频偏压来控制。

可控阻抗二极管至少可在四类用途中选用:(1)微波开关;(2)微波保护装置;(3)微波功率调制器;(4)控制信号幅度用的可变损耗器。

微波开关 当把反向偏压改为正向时,二极管从一个小电容改变为一个近似于一个短路的大电导。例如:在反向偏压条件下,二极管电容为 0.5 微微法,但在 100 毫安的正向偏流时,就成为 2~5 姆欧的电导。把它安装在一个适当阻抗电平的微波电路中,在上述两种条件下,这种二极管都是一只低损耗开关。可以用这种开关来制作大功率数字移相器。

$p-i-n$ 微波开关承受功率的容量与增益都是相当大的。在二

极管内的电荷云比足够输送微波电流所需的量还要多，而且在不会被耗尽的范围内，微波电流可能十分大，远大于低频控制电流。再者，如果间距宽，反向偏压也可能大，但电容仍然是小的。因此，能用这种二极管制成可以承受数千瓦微波功率的开关，并且基本上不会使微波功率由于开关引起非线性失真。如果要求低速开关时，开关的功率可以十分小（典型小于 0.1 瓦）。功率增益（即高频的受控功率与低频的控制功率比）约为 30~40 分贝。

当要求快速开关时，可控阻抗等离子体 $p-i-n$ 二极管仍是一种很好的元件，但必须把空间电荷层作得更薄，使功率和增益都较低。功率与速度乘积（通常用功率与频带乘积）和增益与速度乘积（增益与频带乘积）在速度提高时都趋为常数。

微波保护装置 开关的一个特殊用途就是作保护装置。常在象雷达双工器（收发转换开关）之类的应用中使用。在这种场合，用同一根天线分别发射大功率脉冲或接收低电平脉冲。此处开关只在偏压的某一个方向传送大功率；而在另一个方向要求低噪声。已制成的大功率 $p-i-n$ 二极管，能对超出 1 兆瓦的功率起保护作用，而同时又能在一个周期里几微秒的有效部分时间内完成开关作用。为了要达到这两种极端情况所要求的性能，二极管必须要“过度激励”，比在同等功率低速开关所需要的电压与电流大得多。易言之，当要求一定高速度时，增益则较小；器件的特性是用一种增益带宽乘积来表征的。

微波功率调制器 这种调制器也可以利用 $p-i-n$ 二极管的特性。当然，在这种情况下，二极管的速度必须高到足以跟得上调制信号，而且最好没有象利用“过度激励”时所引起的那样非线性。但增益仍然是可观的，而在减少射频交调失真方面，有时就比变阻管或变容管调制器较优越。

控制信号振幅的可变损耗器 这些装置同样也是利用器件的大功率、高增益和低失真等优点。这些优点是可控阻抗等离子体二极管所固有的。

负 阻

作为放大或只作振荡使用时,目前至少有三类负阻二极管,它们分别与隧道、碰撞电离雪崩渡越时间和体效应有关。从下面详细讨论的某些条件来看,隧道二极管输出功率很低,因此最好用于低噪声放大。由于功率低,隧道二极管被排出振荡器行列之外,即使是在低功率接收机中也不能采用。其他两种类型的功率容量大得多,足以用作超外差接收机的本机振荡器和小型发射机。后两种器件,就是在低电平的应用中,它们的噪声电平似乎仍然显得过高,但仍可能用作功率放大器。

1.2 器件的结构

在概括地介绍了现代微波二极管已达到的各类特性后,下面对实现这些性能的结构特征作简要的初步评述。

$p-n$ 结

在晶体管的应用中, $p-n$ 结的作用是够熟悉了。在某些微波二极管中, $p-n$ 结也是很适宜选用的元件。微波应用中利用了电容-电压特性(变容管)、载流子注入特性(等离子体 $p-i-n$ 开关管)、载流子的等速注入和退出(等离子体 $p-i-n$ 开关、阶跃恢复变容管)、反向击穿电压(电压调整管、雪崩渡越时间振荡管)和通过薄结的隧道效应(反向二极管、负阻隧道二极管)。奇怪的是,在微波二极管中 $p-n$ 结电流-电压的非线性却利用得较少,因为肖脱基势垒二极管相应的非线性比较急剧,而且“启动”电压也较低。

肖脱基势垒

1938年,对多数载流子整流性能进行的分析而发展成了肖脱基势垒的扩散理论。但是以后提出的二极管理论与一般结构的特