

微波半导体器件
基本原理

国防工业出版社

微波半导体器件 基本原理

詹励宾 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书着重从物理概念上较通俗易懂地介绍了各种微波半导体器件的基本原理、主要性能参数以及目前发展水平。可供从事半导体器件制造和应用的工人和技术人员阅读参考。

微波半导体器件 基本原理 (只限国内发行)

詹励宾 编

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可出字第 074 号

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

*

787×1092¹/₃₂ 印张 3¹/₄ 67 千字

1975年7月第一版 1975年7月第一次印刷 印数：00,001—20,000册
统一书号：15034·1436 定价：0.28元

目 录

1	引言	5
2	变容二极管	9
2.1	P-n 结的电容	9
2.1.1	p-n 结的势垒	9
2.1.2	外加偏压时势垒的变化	12
2.1.3	p-n 结的电容	14
2.2	各种杂质分布的 p-n 结势垒电容	16
2.2.1	突变结的势垒电容	16
2.2.2	线性缓变结的势垒电容	18
2.2.3	杂质分布为 $N_D = Bx^m$ 的势垒电容	20
2.3	变容二极管	21
2.3.1	参放变容二极管	21
2.3.2	调谐变容二极管	22
2.3.3	阶跃恢复二极管	25
2.4	参放变容二极管的主要参数	26
2.5	变容二极管发展水平	30
3	雪崩二极管	33
3.1	雪崩二极管产生微波振荡的基本原理	33
3.1.1	里德二极管	33
3.1.2	载流子在强电场作用下的饱和漂移速度	34
3.1.3	感应电流	36
3.1.4	雪崩区延时与漂移区延时的结合产生振荡	37
3.2	雪崩二极管的结构	42
3.2.1	$p^+ - n - i - n^+$ 结构	42
3.2.2	$p - i - n$ (或 $p - v - n$) 结构	43
3.2.3	$p - n - n^+$ 结构	44
3.3	高效率模式	44

3.4	雪崩二极管发展水平	46
3.5	噪声问题	47
4	隧道二极管	49
4.1	什么是隧道效应	49
4.2	隧道结的特点	50
4.3	隧道二极管的基本原理	52
4.4	反向二极管	56
4.5	隧道二极管发展水平	59
5	p-i-n二极管	60
5.1	p-i-n二极管的开关原理	61
5.1.1	高阻抗态(关态)	61
5.1.2	低阻抗态(开态)	63
5.2	p-i-n二极管的主要参数	67
5.3	p-i-n二极管发展水平	70
6	肖特基势垒二极管	72
6.1	金属-半导体接触	72
6.1.1	功函数	72
6.1.2	金属-半导体接触(热平衡状态)	74
6.1.3	外加偏压下的金属-半导体接触	77
6.2	肖特基势垒二极管的基本工作原理	78
6.3	肖特基势垒二极管的特点	83
6.4	肖特基势垒二极管发展水平	84
7	体效应二极管	86
7.1	什么是体效应	86
7.2	砷化镓的能带结构与负阻效应	87
7.2.1	砷化镓的能带结构	87
7.2.2	砷化镓的负阻效应	89
7.3	耿氏二极管的基本工作原理	91
7.4	体效应器件的各种工作模式	95
7.5	限累二极管	99
7.6	体效应二极管发展水平	102

微波半导体器件 基本原理

詹励宾 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书着重从物理概念上较通俗易懂地介绍了各种微波半导体器件的基本原理、主要性能参数以及目前发展水平。可供从事半导体器件制造和应用的工人和技术人员阅读参考。

微波半导体器件

基本原理

(只限国内发行)

詹励宾 编

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可証出字第 074 号

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

*

787×1092¹/₃₂ 印张 3¹/₄ 67 千字

1975年7月第一版 1975年7月第一次印刷 印数：00,001—20,000册

统一书号：15034·1436 定价：0.28元

目 录

1	引言	5
2	变容二极管	9
2.1	P-n 结的电容	9
2.1.1	p-n 结的势垒	9
2.1.2	外加偏压时势垒的变化	12
2.1.3	p-n 结的电容	14
2.2	各种杂质分布的 p-n 结势垒电容	16
2.2.1	突变结的势垒电容	16
2.2.2	线性缓变结的势垒电容	18
2.2.3	杂质分布为 $N_D = Bx^m$ 的势垒电容	20
2.3	变容二极管	21
2.3.1	参放变容二极管	21
2.3.2	调谐变容二极管	22
2.3.3	阶跃恢复二极管	25
2.4	参放变容二极管的主要参数	26
2.5	变容二极管发展水平	30
3	雪崩二极管	33
3.1	雪崩二极管产生微波振荡的基本原理	33
3.1.1	里德二极管	33
3.1.2	载流子在强电场作用下的饱和漂移速度	34
3.1.3	感应电流	36
3.1.4	雪崩区延时与漂移区延时的结合产生振荡	37
3.2	雪崩二极管的结构	42
3.2.1	$p^+-n-i-n^+$ 结构	42
3.2.2	p-i-n(或 p-v-n) 结构	43
3.2.3	p-n-n ⁺ 结构	44
3.3	高效率模式	44

3.4	雪崩二极管发展水平	46
3.5	噪声问题	47
4	隧道二极管	49
4.1	什么是隧道效应	49
4.2	隧道结的特点	50
4.3	隧道二极管的基本原理	52
4.4	反向二极管	56
4.5	隧道二极管发展水平	59
5	p-i-n二极管	60
5.1	p-i-n二极管的开关原理	61
5.1.1	高阻抗态(关态)	61
5.1.2	低阻抗态(开态)	63
5.2	p-i-n二极管的主要参数	67
5.3	p-i-n二极管发展水平	70
6	肖特基势垒二极管	72
6.1	金属-半导体接触	72
6.1.1	功函数	72
6.1.2	金属-半导体接触(热平衡状态)	74
6.1.3	外加偏压下的金属-半导体接触	77
6.2	肖特基势垒二极管的基本工作原理	78
6.3	肖特基势垒二极管的特点	83
6.4	肖特基势垒二极管发展水平	84
7	体效应二极管	86
7.1	什么是体效应	86
7.2	砷化镓的能带结构与负阻效应	87
7.2.1	砷化镓的能带结构	87
7.2.2	砷化镓的负阻效应	89
7.3	耿氏二极管的基本工作原理	91
7.4	体效应器件的各种工作模式	95
7.5	限累二极管	99
7.6	体效应二极管发展水平	102

1 引 言

近几年来，各种雷达、导航设备、全球通信系统、电子对抗设备、遥测系统、导弹制导设备、微波通信系统等等，得到了迅速的发展，在现代军事电子学设备中，占有极为重要的地位。使这些微波整机固体化是提高其战术和技术性能的一个有效途径。由于这一要求便推动了固体（半导体）微波器件的发展，而固体微波器件的发展又带来了微波整机由部分固体化发展到全固体化，以至如今出现了全集成化的整机。

近几年来，单个半导体器件总的发展趋势是向着高频率、大功率、高效率和低噪声的方向发展。目前在微波领域中已经出现了好多种微波半导体二极管。本书就准备对这些微波二极管的基本原理作一个粗略的介绍。

微波二极管有三种基本的微波功能：微波功率的发生（这里将放大与倍频包括在内）、微波功率的控制与微波功率的接收。所以，按其功能可将微波二极管分为三族，见表 1-1。

可以做微波功率源的微波二极管有雪崩二极管、体效应二极管（包括限累二极管），还有变容二极管倍频器。隧道二极管也可以产生微波振荡，其噪声较低，但功率很小，只有几毫瓦到几十毫瓦。雪崩二极管、体效应二极管都是最近几年研究发展起来的新固态源器件，其共同特点是功率较大、

表1-1 微波二极管

微波二极管	功率发生	振荡器	—雪崩二极管、体效应二极管、隧道二极管
		噪声源	—雪崩二极管
		倍频器	—变容二极管
		放大器	—雪崩二极管、体效应二极管、隧道二极管、变容二极管
	功率控制	开关	—p-i-n二极管、肖特基势垒二极管、变容二极管、隧道二极管
		衰减器	—p-i-n二极管
		调谐	—变容二极管
		限幅器	—p-i-n二极管
	功率接收	检波器	—肖特基势垒二极管、点接触二极管、隧道二极管、反向二极管
		混频器	—肖特基势垒二极管、点接触二极管、隧道二极管、反向二极管
		功率整流	—肖特基势垒二极管

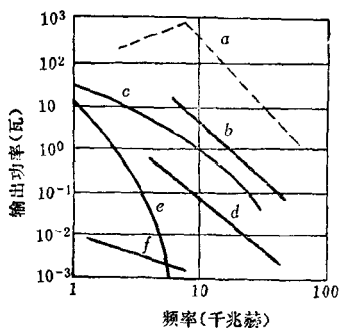


图1-1 固体微波振荡器件的输出功率与频率的关系

- a—脉冲砷化镓体效应振荡器； b—雪崩二极管振荡器；
 c—变容二极管谐波发生器； d—砷化镓体效应振荡器；
 e—晶体管振荡器； f—隧道二极管振荡器。

效率较高。雪崩二极管较之体效应二极管有较大的连续输出功率和较高的效率，并有较好的抗辐射能力；但也有它本身固有的缺点，即噪声较大。限累二极管在1966年才研制成

功，由于它可以产生很高的脉冲功率，并且工作频率在毫米波段，因此，作为毫米波功率源发展很快。国外已有用这几种固态源器件作本机振荡和参量放大器的泵源。图 1-1 给出了各种固体微波振荡器件的输出功率与频率的关系。

半导体微波功率控制器件有 $P-i-n$ 二极管、变容二极管、肖特基势垒二极管等。这些器件具有损耗低、功率控制容量大、开关速度快、可靠性高等优点，因而受到很大的重视而迅速发展起来了。

在接收方面，低噪声的固体接收器件的出现对提高接收机的灵敏度起了很大的作用。这其中有点接触二极管、肖特基势垒二极管、隧道二极管（包括反向二极管）。变容二极管用于参量放大器中完成接收机的高放功能，也是一个重要的低噪声接收器件（微波能量的放大在表 1-1 中被归入功率发生一项内）。

表 1-1 将微波二极管分成这样三族是相对而言，只是从它们的微波功能上划分的。而且就是从微波功能来划分也还是没有包括完全的，因为一种器件往往有多种功能，而且还在发展，不断出现新的应用，例如变容二极管作为振荡器应用，金属与半导体接触的肖特基势垒二极管作为变容二极管、雪崩二极管应用等等。

从结构方面来看，在这些微波二极管中，有的是 $P-n$ 结器件（例如雪崩二极管、变容二极管），有的是金属-半导体的表面势垒器件（例如肖特基势垒二极管），有的则是无结器件（例如体效应二极管）。从工作原理来看，有的是利用势垒区的雪崩效应（例如雪崩二极管），有的是利用势垒区的电容（例如变容二极管），有的是利用势垒区的隧道效应

(例如隧道二极管),有的则是利用材料的体效应(例如体效应二极管)。从载流子角度来看,有的利用少数载流子工作(大多数器件如此),有的则利用多数载流子工作(例如隧道二极管、肖特基势垒二极管)。因此,显然存在着微波二极管的其它分类方法,这里不专门讨论。

为了便于叙述,我们将不按照某种分类,而是按 p-n 结器件、金属-半导体结器件、体效应器件的次序来介绍这些二极管。

2 变容二极管

自从1958年第一次提出半导体二极管可能作为变电容微波器件应用以来,至今变容二极管已经获得了很快的发展,在微波领域中得到了广泛的应用,例如参量放大器、倍频器、分频器、电调谐、限幅器等等。其中典型的应用是作参量放大器。近年来,随着半导体微波功率源(雪崩二极管振荡器、体效应振荡器)的迅速发展,使参量放大器泵源的体积大为减小,功耗显著降低,因此,参量放大器是一种很有发展前途的低噪声微波放大器。而参量放大器的核心元件就是变容二极管。

2.1 p-n 结 的 电 容

顾名思义,变容二极管(也简称变容管)的意思就是指这种二极管的电容(即p-n结电容)是可以随外加偏压而改变的,而且它的电容和外加偏压之间存在着非线性关系。也就是说,变容二极管是一个非线性电容。那么,p-n结的电容是怎么产生的呢,它与外加偏压之间又是怎样一种关系呢,本节与下节就来讨论这些问题。

2.1.1 p-n 结的势垒

在一个p-n结交界面的两边,在p型区域中存在着很多空穴,而电子则很少(故空穴称为多数载流子,电子称为少数载流子);相反地,在n型区域中存在着很多电子,空穴

则很少（相应地电子称为多数载流子，空穴称为少数载流子）。 $p-n$ 结两边的杂质离子和载流子示于图 2-1 中，为了简化图画，少数载流子没有画出来。所以，在 p 区与 n 区之间存在着电子浓度和空穴浓度的差别；这种载流子浓度的差别（也称为载流子浓度梯度）就引起载流子的扩散。于是，在靠近 $p-n$ 交界面的 n 区中的电子就向 p 区扩散，并同 p 区中的空穴复合掉，而在 n 区留下一些带正电的施主离子；同样，在靠近 $p-n$ 交界面的 p 区中的空穴就向 n 区扩散，并同 n 区中的电子复合掉，而在 p 区留下一些带负电的受主离子，如图 2-2 所示。这些正负离子我们称它们为空间电荷，这样，在 $p-n$ 交界面两侧就形成了一个空间电荷区。由于空间电荷区的一边集中了正电荷，另一边集中着负电荷，正负电荷之间就存在一个电场，其方向由 n 区一边指向 p 区一边，见图 2-2。

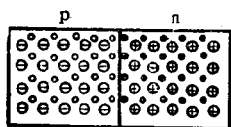


图2-1 $p-n$ 结两边的杂质离子和载流子

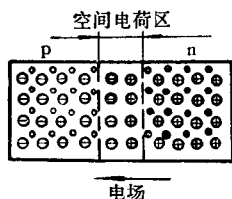


图2-2 空间电荷区的形成

空间电荷区的这个电场对电子和空穴的扩散运动起着阻碍的作用。因为，由于扩散运动而进入空间电荷区的电子和空穴都要受到这个电场的作用力，这个力的作用是迫使它们各自返回原来的区域。电场对载流子的这种作用叫做漂移作

用。漂移作用同扩散作用是互相矛盾的两个方面：扩散作用要使电子从 n 区向 p 区扩散，空穴从 p 区向 n 区扩散，而漂移作用则阻碍这种扩散，它要迫使电子返回 n 区，空穴返回 p 区。

在过程的开始阶段，扩散作用超过漂移作用。随着扩散过去的电子和空穴数目的增加，积累的正负空间电荷也就增多，空间电荷区展宽，电场增强，电场对载流子的漂移作用也就逐渐增强。到后来，漂移作用增强到这种程度，即这时有多少个电子从 n 区向 p 区扩散过去，同时也就有同样数目的电子被电场拉回到 n 区去；空穴也是如此。载流子的扩散运动和漂移运动相等而抵消，这时的 $p-n$ 结处于动平衡（或称热平衡）状态中。这时在 $p-n$ 交界面的两侧就建立了一个相对稳定的空间电荷区，空间电荷区中的电场就称为内建电场。

内建电场对电子和空穴扩散的阻碍作用也可以用势垒的概念来描述。根据电学原理知道，既然空间电荷区存在着电场，则区域内各处的电势是不相同的，电子在区域内各处的电势能也不相同。电子从 n 区跑向 p 区要克服电场的阻碍力，所以 p 区的电子势能就比较高， n 区的电子势能就比较低，在整个区域内电子的势能是逐渐变化的，如图 2-3 所示。形象化一些来说，电子在 n 区能量比较低，它跑向 p 区时要爬上一座电势能的“高

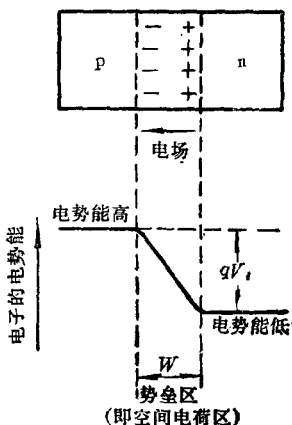


图2-3 $p-n$ 结的势垒

在 n 区能量比较低，它跑向 p 区时要爬上一座电势能的“高

坡”，这个能量上的“高坡”就叫做 P-n 结的势垒。有了势垒，电子的扩散运动就受到阻碍。

空穴带正电荷，符号和电子相反，它的电势能的高低也和电子相反，P 区电势能低，n 区电势能高。空穴从 P 区跑向 n 区也要爬上一个势垒，因而它的扩散运动也就受到阻碍。

因为在空间电荷区存在着势垒，所以空间电荷区又常称做势垒区。在 P-n 结处于热平衡的时候，势垒区的宽度用 W

表示，势垒的高度用 qV_i ，其中 q 是电子电荷， V_i 叫做内建电势差，也叫做接触电势差。

由于空间电荷区存在着势垒，因而 P-n 结的能带发生弯曲，如图 2-4 所示的那样。

P 区的导带底 E_c 比 n 区的导带底 E_c 高出一段 qV_i ，相应地 P 区的价带顶 E_v 也要比 n 区的价带顶 E_v 高出一段 qV_i ，禁带宽度保持不变，在势垒区内能带弯曲的样子和电子的电势能曲线是一致的。

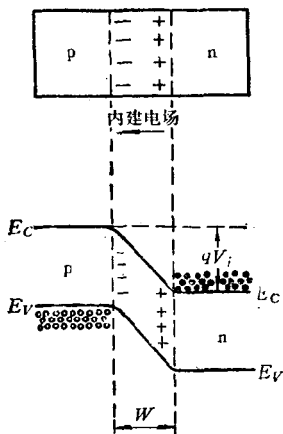


图2-4 p-n结的能带

2.1.2 外加偏压时势垒的变化

上面讨论的是没有外加偏压（也即零偏压）时的情形。当有偏压加在 P-n 结上时，势垒将发生相应的变化。

先讨论正向偏压的情形。因为势垒区里只有带正负电荷的杂质离子，载流子是极少的，是一个高电阻区，所以外加偏压差不多全部降落在这个区域。如果加的是正向偏压，它