

# 微波半导体器件

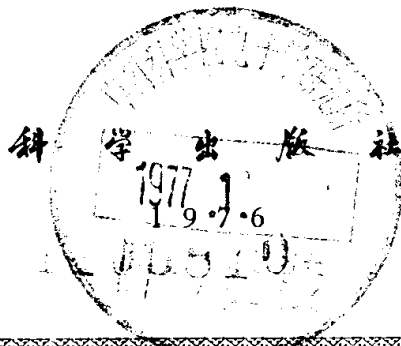
[日] 植之原道行 编著

科学出版社

3.733  
1.11

# 微波半导体器件

〔日〕植之原道行 编著  
魏策军 邢益荣 译



DH07/21

## 内 容 简 介

本书是根据1971年日本电子学进展丛书之二《マイクロ波半導体デバイス》翻译的。全书内容共分七章：第一章阐述微波半导体器件的基础；其余第二至第七章依次分析变容管器件、肖特基二极管器件、隧道二极管器件、雪崩二极管器件、砷化镓体效应器件和晶体管器件的工作原理、线路性能和各种应用实例的电路结构；此外也简明扼要地介绍了有关的微波半导体元件的基本原理和主要特性。

本书的主要对象是研制微波半导体器件的工作人员，但也可供从事微波半导体元件和微波装置方面工作的人员参考。

植之原道行 编著

マイクロ波半導体デバイス

日本電気株式会社

1971

## 微波半导体器件

〔日〕 植之原道行 编著

魏策军 邢益荣 译

\*

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1976年11月第一版 开本：787×1092 1/32

1976年11月第一次印刷 印张：8 1/16

印数：0001—23,220 字数：183,000

统一书号：15031·96

本社书号：471·15—7

定价：0.80元

## 译 者 序

在半导体器件领域中，微波器件是最早发展起来的器件之一。从人们在无线电通讯中利用矿石检波器开始，经过几十年，特别是经过五十年代和六十年代的发展，微波半导体器件已经成为半导体器件中的一个重要组成部分。今天，它正在广泛地应用于地面通讯、人造卫星、宇宙飞船、导弹、雷达、导航、电子对抗和遥测系统等各种设备之中。在接收系统方面，可以说微波半导体器件基本上已经能够取代体积大、重量大、功耗大和寿命短的真空管器件了。

从五十年代到六十年代，随着半导体材料以及元件和器件技术的不断发展，用变容管作成的低噪声参量放大器和高效率的倍频器，用隧道二极管作成的宽带低噪声放大器，以及用肖特基二极管作成的宽带低噪声混频器等微波半导体器件相继实用化，它的应用范围也日益扩大。近几年来，具有高频大功率等优点的雪崩二极管和砷化镓体效应二极管进展很快，从而大大提高了微波装置全固体化的可能性，它的实现是微波半导体器件领域中当前最为迫切的任务。这也是六十年代微波半导体器件迅速发展的重要标志。

本书较全面、较有系统地介绍了微波半导体器件，可以作为我们研制微波半导体器件的借鉴，并对发展微波半导体元件和微波装置也有一定的参考价值。

译稿曾由王守武同志校阅，特此致谢。但由于译者水平有限，翻译中的缺点和错误在所难免，希望读者批评指正。

一九七二年十一月

## 本书所用单位符号表

|     |               |      |                    |
|-----|---------------|------|--------------------|
| 厘米  | cm            | 欧姆   | $\Omega$           |
| 毫米  | mm            | 姆欧   | $\text{M}\Omega$   |
| 微米  | $\mu\text{m}$ | 毫姆欧  | $\text{m}\Omega$   |
| 秒   | S             | 微微法  | pF                 |
| 微秒  | $\mu\text{S}$ | 亨利   | H                  |
| 毫微秒 | nS            | 毫微亨  | nH                 |
| 微微秒 | pS            | 高斯   | G                  |
| 赫兹  | Hz            | 瓦特   | W                  |
| 千赫  | kHz           | 毫瓦   | mW                 |
| 兆赫  | MHz           | 分贝   | dB                 |
| 千兆赫 | GHz           | 分贝毫瓦 | dBm                |
| 伏特  | V             | 电子伏特 | eV                 |
| 千伏  | kV            | 绝对温度 | $^{\circ}\text{K}$ |
| 毫伏  | mV            | 摄氏温度 | $^{\circ}\text{C}$ |
| 安培  | A             | 频率带宽 | BW                 |
| 毫安  | mA            | 均方根值 | r.m.s              |
| 微安  | $\mu\text{A}$ |      |                    |

# 目 录

译者序

本书所用单位符号表

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| <b>第一章 微波半导体器件的基础</b> ..... | 1  |
| 1.1 微波半导体器件的发展过程 .....      | 1  |
| 1.2 微波半导体元件的概况 .....        | 6  |
| 1.2.1 变容管 .....             | 7  |
| 1.2.2 非线性电阻二极管 .....        | 9  |
| 1.2.3 隧道二极管 .....           | 10 |
| 1.2.4 雪崩二极管 .....           | 11 |
| 1.2.5 体效应二极管(耿氏二极管) .....   | 14 |
| 1.2.6 微波晶体管 .....           | 17 |
| 1.3 微波半导体器件的品质因子 .....      | 17 |
| 1.3.1 半导体元件的品质因子 .....      | 18 |
| 1.3.2 微波半导体器件的品质因子 .....    | 19 |
| 1.4 增益-带宽积 .....            | 20 |
| 1.5 噪声系数 .....              | 22 |
| 1.6 功率-频率极限 .....           | 23 |
| <b>第二章 变容管器件</b> .....      | 25 |
| 2.1 曼利-罗威功率关系式 .....        | 25 |
| 2.1.1 非反转情况 .....           | 26 |
| 2.1.2 反转情况 .....            | 27 |
| 2.1.3 倍频器 .....             | 27 |
| 2.2 参量放大器 .....             | 28 |
| 2.2.1 参量放大器的分析 .....        | 29 |
| 2.2.2 参量放大器的谐振电路 .....      | 36 |

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| 2.2.3 参量放大器的实例 .....           | 38        |
| 2.3 倍频器 .....                  | 40        |
| 2.3.1 变容管倍频器 .....             | 40        |
| 2.3.2 倍频器分析的概念 .....           | 42        |
| 2.3.3 倍频电路的结构 .....            | 46        |
| 2.3.4 倍频器的噪声 .....             | 51        |
| 2.3.5 倍频器的不稳定性 .....           | 52        |
| 2.3.6 变容管频率变换器 .....           | 54        |
| 2.4 频率调制器 .....                | 57        |
| 2.4.1 包含变容管的谐振电路 .....         | 57        |
| 2.4.2 频率调制器的实例 .....           | 58        |
| <b>第三章 肖特基二极管器件 .....</b>      | <b>61</b> |
| 3.1 肖特基二极管 .....               | 62        |
| 3.1.1 等效电路与寄生元件 .....          | 62        |
| 3.1.2 砷化镓肖特基二极管的结构 .....       | 63        |
| 3.1.3 砷化镓肖特基二极管的静态特性 .....     | 65        |
| 3.2 接收混频器 .....                | 66        |
| 3.2.1 肖特基二极管与点接触二极管的比较 .....   | 68        |
| 3.2.2 理论 .....                 | 68        |
| 3.2.3 具体测量方法 .....             | 77        |
| 3.2.4 具体实例 .....               | 79        |
| 3.3 检波器和调制器 .....              | 84        |
| 3.3.1 低功率检波器 .....             | 84        |
| 3.3.2 大信号检波器与调制器 .....         | 86        |
| 3.4 肖特基变容管器件 .....             | 87        |
| 3.4.1 肖特基二极管与扩散型变容二极管的比较 ..... | 87        |
| 3.4.2 肖特基变容管器件 .....           | 87        |
| <b>第四章 隧道二极管器件 .....</b>       | <b>88</b> |
| 4.1 隧道二极管的概况 .....             | 88        |
| 4.1.1 电压-电流特性 .....            | 88        |
| 4.1.2 静态特性 .....               | 89        |

|            |                 |            |
|------------|-----------------|------------|
| 4.2        | 等效电路及其应用        | 90         |
| 4.2.1      | 等效电路            | 90         |
| 4.2.2      | 频率特性            | 93         |
| 4.2.3      | 稳定条件            | 95         |
| 4.3        | 放大器             | 98         |
| 4.3.1      | 放大器的结构类型        | 99         |
| 4.3.2      | 环形器型放大器         | 101        |
| 4.3.3      | 实例              | 108        |
| 4.4        | 振荡器及其应用         | 110        |
| 4.4.1      | 振荡器             | 110        |
| 4.4.2      | 同步牵引振荡器及其应用     | 115        |
| 4.5        | 其他应用            | 117        |
| 4.5.1      | 接收混频器           | 117        |
| 4.5.2      | 其他              | 117        |
| <b>第五章</b> | <b>雪崩二极管器件</b>  | <b>119</b> |
| 5.1        | 二极管的特性          | 120        |
| 5.1.1      | 有源部分的等效电路       | 120        |
| 5.1.2      | 工作特性            | 121        |
| 5.2        | IMPATT 振荡器      | 125        |
| 5.2.1      | 振荡器的一般理论        | 125        |
| 5.2.2      | 串联电阻 $R_s$ 的影响  | 127        |
| 5.2.3      | 实际的 IMPATT 振荡器  | 130        |
| 5.2.4      | IMPATT 振荡器的稳定方法 | 139        |
| 5.3        | TRAPATT 振荡器     | 148        |
| 5.4        | 放大器             | 151        |
| 5.4.1      | 放大器的特性          | 151        |
| <b>第六章</b> | <b>砷化镓体效应器件</b> | <b>154</b> |
| 6.1        | 耿氏二极管的结构与特性     | 155        |
| 6.1.1      | 结构              | 155        |
| 6.1.2      | 准静态特性           | 156        |
| 6.2        | 基本的工作模式         | 158        |



|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 6.2.1      | 空间电荷增长波模式 ( $n_0L < 10^{12} \text{cm}^{-2}$ )    | 158        |
| 6.2.2      | 空间电荷积累层模式 ( $n_0L \geq 10^{12} \text{cm}^{-2}$ ) | 162        |
| 6.2.3      | 偶极层模式 ( $n_0L > 10^{12} \text{cm}^{-2}$ )        | 164        |
| 6.3        | 振荡器  | 166        |
| 6.3.1      | 振荡模式   | 166        |
| 6.3.2      | 耿氏振荡器  | 176        |
| 6.3.3      | 限累振荡器  | 188        |
| 6.4        | 放大器  | 191        |
| 6.4.1      | 两端放大器  | 192        |
| 6.4.2      | 行波放大器  | 193        |
| 6.4.3      | 注入同步放大器  | 196        |
| 6.5        | 其他应用   | 198        |
| <b>第七章</b> | <b>晶体管器件</b>                                     | <b>201</b> |
| 7.1        | 微波晶体管的结构和等效电路                                    | 201        |
| 7.2        | 晶体管放大器   | 203        |
| 7.2.1      | 微波晶体管的小信号特性                                      | 203        |
| 7.2.2      | 晶体管放大器的具体实例                                      | 217        |
| 7.3        | 晶体管功率放大器   | 226        |
| 7.3.1      | 晶体管功率放大器的设计                                      | 226        |
| 7.3.2      | 功率放大器的具体实例                                       | 228        |
| 7.4        | 晶体管振荡器和倍频器                                       | 233        |
| 7.4.1      | 振荡器  | 233        |
| 7.4.2      | 倍频器  | 235        |
|            | 参考文献   | 237        |

# 第一章 微波半导体器件的基础

所谓器件一词,在电子学领域里已经广泛使用几十年了.可是,至今在各个国家中关于这个词的含义并不完全相同,以致器件与元件两者之间难以严格区别.

在本书中,我们把那些单单靠接通电源并不能发挥一定功能,而只有接到外电路中去才能发挥某种功能的东西,称为元件;把那些不管其形态如何,可以是具有元件的形态,也可以是电路的组合物,但都能发挥某种功能的东西,称为器件.就是说,作为部件单元的振荡器、放大器和频率变换器,或者环行器和隔离器等等,都称为器件.此外,把由多个器件和其它电路组合成具有一种或多种功能的东西,称为装置或整机.

## 1.1 微波半导体器件的发展过程

微波半导体器件中,最早出现的是用点接触二极管所作的检波器和混频器.自从利用放电方法产生微波的时代开始,就使用了二极管检波器.而在第二次世界大战中发展起来的雷达和战后发展起来的微波通讯中,二极管检波器和混频器已经成为其它器件所不能代替的必不可少的器件,因此对它们的了解比较多,并且在实用化方面做了大量的研究.但是长时期以来,仅仅有点接触型二极管作为唯一的微波半导体元件.而其它微波半导体器件的研制,并专门从微波电子管中分离出来,是直至五十年代中期才得以实现.

当然,并不是说,那个时期对微波半导体器件没有什么需

求。众所周知,现在的微波电子管的可靠性是相当高的了,但在五十年代,微波电子管的可靠性还不高,体积也大,它需要高电压,并且调整复杂,因此迫切要求对微波晶体管和新的半导体器件进行研制,人们对此寄予很大期望。可是,由于当时半导体理论与技术还不够完备,不能满足这些要求。后来,随着晶体管技术与外延单晶生长技术的不断进展,才获得了高质量的p-n结二极管。于是在1955年前后便开始了着眼于二极管结电容的非线性的研究。

为了增大通讯距离和雷达的有效探测距离,有两种方法:加大发射功率和提高接收机的灵敏度。考虑到噪声的干扰,增加发射功率是最可靠的方法。但发射功率增大到一定程度时,对增大功率所需的费用将呈指数性的增长。同时,从理论上讲,输出功率也是有限度的,而且功率的增大使生命的危险性也随之增大。另一方面,增大接收机的灵敏度则往往便宜得多。为了增加接收机的灵敏度,可以增大天线面积以增大接收的信号电平,也可以减少接收机内部的噪声。但是增大天线面积的方法,存在着与增大发射功率相类似的问题。

目前,最高灵敏度的微波接收机是以混频器作为第一级的外差式接收机。可是,即使是窄带接收机,噪声系数也大约有10dB,而宽带的接收机则为15dB左右。微波电子管的噪声系数远大于10dB。因此,那怕是能得到6dB\*的噪声系数,也是很有意义的。为此,就进行了低噪音行波管和交叉场放大管的研究,但其效果都不太理想。后来找到了另一个办法,就是将早已知道的参量效应应用于微波放大。

\* 除了宇宙卫星通讯、对空雷达及天文电波观测等之外,微波的传播都是平行于地面的,因而进入天线的噪声,不可避免地存在着来自地面的热噪声和工业噪声,即使噪声系数在3dB以下也不会提高接收灵敏度。加上在超多路通讯中,由于信道滤波器特性的不完善而发生的交调失真,也会使灵敏度降低3dB左右,所以对于噪声系数低于6dB的情况,灵敏度不会得到太大的改善。

从前，所使用的有源元件都是把直流能量变为交流能量来进行放大的，因此直流的成分不可能为零，也就是说存在电阻的成分，并且内部包含着散粒噪声源。对于电子管，由于有来自热阴极的电子注入，意味着内部包含有相当于阴极温度的热噪声源。如果利用完全是电抗性的、并且非线性较大的元件，也可以把能量从一个频率变换到另一个频率，由于电抗本身并不消耗能量，这就说明电抗并不具有噪声源。所以，利用参量效应有可能实现没有附加噪声的放大。

变容管作为参量放大器的研究，就是在这种背景下从1957年开始的。它的发展速度很快，已经成为在室温工作下噪声最低的放大器了。但是变容管总是具有一定的串联电阻，同时由于在空闲电路中，若没有负载电阻是不能放大的，故显而易见，要获得无噪声的放大器是不可能的。电子器件的技术工作者，正是由于变容管和参量放大器的出现和发展，而大批地被吸引到研究微波半导体器件的行列中来。

采取变容管的参量放大器作为低噪声放大器，并不是独自发展起来的，伴随着它而相继发展的还有其它多种器件，直到六十年代的末期，才清楚地看出，变容管参量放大器最为优越。当时较为重视的还有红宝石脉泽(maser)，其次是具有宽带性能的低噪声行波管，还有利用电子束的参量放大管和利用铁氧体而被称为脉巴的参量放大器等等。此外，隧道二极管的放大器也以噪声低、频带宽、体积小和价格低等优点而引人注目。这样，对微波放大器的研究一时显得很活跃。若能详细地描写当时的具体情况，就会很好认识到：充分了解整机的要求和元件的性能极限，是器件获得进展的重要因素。因此，元件、器件和整机等各方面人员的密切协作，对研制器件来说是何等的重要！但遗憾的是，由于篇幅所限，不能在这里一一追述了。

应该明确指出的一点是,在研制器件时,光追求最高的性能指标,并不一定具有很大的实用价值。这是因为,在各自的应用范围里具有各自的特征,对整机来说,常常要求最佳的成本-性能比来作为制作器件的准绳。从下面的事实也可了解这一点:即实际的整机几乎都没有必要使用最高性能的器件。还应指出,所谓成本并不光是器件本身的价格,而且还必须包括器件附属品的价格和保养费等等。

参量放大器需要一个频率比信号频率更高的泵浦源,这是使整机费用高昂的重要原因。当初,仅有速调管可适合作泵浦源,它的可靠性差、成本高,而且还要求价格昂贵的电源,这样泵浦源就占了放大器成本费的一大半。而与此不同,隧道二极管就不需要泵浦源,这无疑是一个大优点。在五十年代末期,开始研究用变容管作为高效率的倍频器,它不仅可作为泵浦源,而且还可作为一般的高可靠性的微波源。在初期,它是微波电子管作为起始源,但使用微波电子管并不是根本的解决办法,因而,研制高功率微波晶体管就变得很迫切需要的了。

变容管倍频器是高效率的。不过,当倍频次数提高时,总的效率并不太高。同时,对于高效率的倍频器来说,由于二极管的相互干扰多,产生了调整困难和寄生振荡障碍等问题,所以,对于由直流源直接产生微波的振荡器的需求就越来越迫切。到了六十年代初期,许多技术工作者开始在这方面寻求各种可能性而从事于固体振荡器的研究,但都没找到新的有实用意义的振荡器。直至1963年,国际商业机械公司的耿氏在研究砷化镓的电子迁移率随高电场变化时,发现了当电场大于 $3000\text{ V/cm}$ 左右时可以发生微波的电流振荡。这个现象一发现,很多人便投到这项研究中来,而且进展很快,至今,耿氏二极管已经达到实用化的阶段了。

在耿氏二极管被发现之前，贝尔电话实验室的里德在1958年发表了利用  $pnin^+$  结构的半导体元件中所产生的雪崩现象和载流子在  $i$  区的渡越时间效应，使其产生负阻而获得微波振荡的理论。但是，由于它要求非常高水平的半导体工艺，使里德二极管的实现花费了很长的时间。当耿氏二极管的原理尚未清楚的时候，也有人认为，耿氏效应的机构与其说是体效应，不如说是近于里德效应。为了证实这种看法，对  $p-n$  结二极管加上超过雪崩击穿电压的偏压来进行产生微波振荡的实验。贝尔电话实验室的德洛赫发现了，在许多的硅二极管当中，有的二极管实现了微波振荡。经理论上的探讨，弄清了  $p-n$  结二极管也是以与里德二极管相类似的方式产生振荡的。后来，它作为现在的碰撞雪崩渡越时间 (IMPACT Avalanche and Transit Time) 二极管 (简称为 IMPATT 二极管) 之一而得到了发展。

关于耿氏二极管和 IMPATT 二极管，我们将分别在第五章和第六章中详细地介绍。这两种管的器件都非常重要，由于这些器件技术和相应的元件工艺的迅速进展，目前，已经奠定了作为固体振荡器的牢固基础。这两种器件各有长处，也各有短处，它们将适用于哪种系统和领域，目前虽然还不清楚，但是，最后确定各自的应用范围而进行研究的时期已经到来。耿氏二极管与 IMPATT 二极管也能作放大器用，但由于它们是两端负阻二极管，随负载与电源的变动其特性都会有很大的变化，这是一个缺点。此外，作为线性放大器，就它们的噪声系数与输出功率来说也是不够理想的。这样一来，对晶体管那样的四端放大器的需求就增大了。因此，现在也正在继续对接近其特性极限时的微波晶体管进行研究。在过去五年多的时间里，从 2GHz 波段到 4GHz 波段的晶体管已经实用化，而 6GHz 波段的晶体管也日趋接近实用的程度。但

是,即使有现在的先进工艺,要实现 6GHz 波段以上的晶体管的实用化,还是非常困难的. 场效应晶体管,特别是砷化镓的管子有可能在更高的波段实现其实用化,人们正为此而尽最大的努力.

最后简单提一下肖特基二极管. 虽然,最早出现的点接触二极管也是肖特基二极管的一种. 但是,在金属与半导体接触面上形成势垒的肖特基势垒二极管,无论是作为非线性电阻二极管或变容管使用,还是作为雪崩二极管使用,在现代微波半导体器件中都起着非常重要的作用. 由于肖特基二极管的发展,混频器的噪声系数大为改善. 目前,肖特基二极管混频器已经得到了相当好的噪声系数,并在准毫米波和毫米波波段,它是噪声最低的器件. 今后,随着这一波段的开辟与发展,肖特基二极管器件必将成为一种非常重要的器件.

## 1.2 微波半导体元件的概况

前节虽已提及了各种的微波半导体元件,但为了方便对这些元件知识不很熟悉的人,以及为了容易理解第二章以后所阐述的器件起见,这里再对主要的微波半导体元件作一些基础性的扼要说明. 若需要了解更详细的元件机理和结构以及元件的制作工艺,建议阅读本书末尾所列举的参考文献.

微波半导体元件按其功能来分类时,可分为:

- (1) 变容管
- (2) 非线性电阻二极管
- (3) 开关二极管
- (4) 隧道二极管(江崎二极管)
- (5) 体效应二极管(耿氏二极管)
- (6) IMPATT 二极管(雪崩二极管)

(7) 晶体管等。

### 1.2.1 变容管

在 n 型半导体上生长一层同一材料的 p 型半导体，或者在 n 型半导体中扩散 p 型杂质，由 n 型变化至 p 型的界面处就形成 p-n 结。这样的 p-n 结型二极管以及在半导体上蒸发或镀上金属的肖特基二极管，当加上负偏压来使用时，就称为变容管。

为了说明变容管结电容与电压的关系，我们取图 1.1 所示的 p-n 结模型，图中 $\oplus$ 为施主， $\ominus$ 为受主， $-$ 为电子， $+$ 为空穴。当外加电压为零时 [图(a)]，由于 p 区的空穴多，n 区的电子多，它们就各自横跨过结面而扩散，以使其密度趋向于均

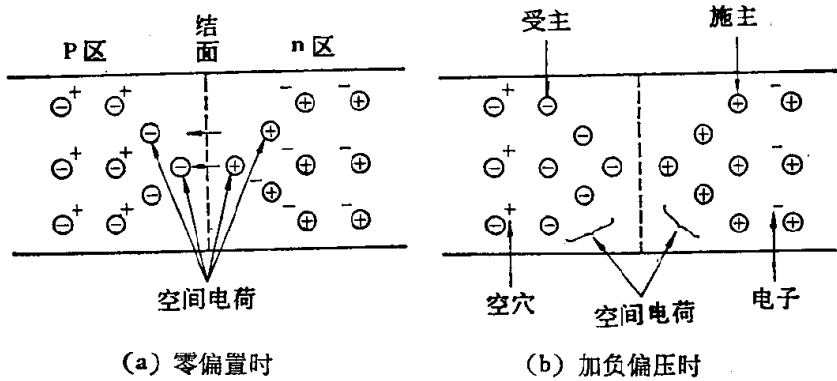


图1.1 p-n 结附近的电荷分布

匀分布，也就是说，在结面附近的电子和空穴趋向于相互复合。在均匀的半导体中，施主与电子，或受主与空穴的数目刚好相等，处于平衡状态，所以没有空间电荷。但是，在 p-n 结中，电子和空穴扩散与复合时，复合了的只是电子和空穴，施主与受主并不能移动而留了下来，故这时是处于不平衡状态，这些施主和受主形成了空间电荷。而一旦存在空间电荷，就会产生电场，该电场的方向是阻止电子和空穴进一步扩散的。



因此当电场达到一定的值，使扩散电流的大小与漂移电流的大小相等时\*，就达到了平衡。这样一来，当偏压为零时二极管的电流也为零。这时的内部电位称为扩散电位或势垒电位，相应的电压称为内建电压。

其次，当二极管加上负电压时 [图(b)]，电子和空穴都分别向离开结面的方向移动，这样，与电子和空穴呈不平衡状态的施主和受主的数目增加，因而空间电荷也就增加。但是，因为施主和受主的位置是固定的，故结面附近的电场分布，等效于在平行电极之间插入介电常数为半导体介电常数的绝缘物（长度  $l$ ）并使其电极上分布有电荷  $Q$  的情况，其等效长度  $l$  是电压的函数，负电压越大， $l$  也越大，而势垒电容（也称结电容或耗尽层电容）就越小。

势垒电容由下式表示：

$$C_b = C_0 / \left(1 - \frac{V}{\phi}\right)^m \quad (1.1)$$

上式中  $C_0$  为零电压时的电容， $V$  为外加电压（负的时候为正值）， $\phi$  为扩散电位， $m$  为由结面附近的杂质分布所决定的常数。对突变结， $m = 1/2$ ；对缓变结， $m = 1/3$ ；对超突变结， $m$  为大于  $1/2$  的任意值。

在变容管中， $n$  区和  $p$  区的电阻率不能作得非常小，因此串联电阻  $R_s$  不可能为零。为了减小  $R_s$ ，当提高杂质浓度而减小电阻率时，耗尽层的宽度就很快地变窄，致使电子能够由于隧道效应而通过耗尽层。利用这一现象的就是后面将要叙述的隧道二极管，它是不能作变容管用的。对于变容管来说， $R_s$  能小至何种程度，是决定变容管性能的一个因素，这将在

---

\* 原书此处为“使扩散的数目与复合的数目相等时”，这恐是误。因凡扩散的电子和空穴最后总是复合了，故扩散的数目与复合的数目应永远相等。

——译者注