

姚杰
余秉才 编著

半导体器件物理

中山大学出版社

半导体器件物理
余永才 姚杰 编著

●
中山大学出版社出版发行
广东省新华书店经销
中山大学印刷厂印刷

●
787×1092毫米 32开本 16.625印张 37.2万字
1989年6月第1版 1989年6月第1次印刷
印数：1—1100册

ISBN 7-306-00145-0

C·14 定价：3.50元

内 容 提 要

本书内容共分三个部分：半导体双极型器件；单极型器件；半导体光电器件。

全书共分八章，第一章为PN结物理基础，第二至五章为双极型晶体管的放大原理、直流特性、频率特性和噪声特性、大电流和功率特性和开关特性等，第六章为半导体表面物理基础，第七章为MOS场效应晶体管，第八章为半导体光电器件。

本书可作为高等院校半导体专业学生和从事半导体器件工作的人员参阅。

前 言

本教材是为综合大学物理系半导体专业本科生而编写的，也可供其他院校各专业参考，是作者讲授《半导体器件物理》课时所编的讲义修改而成的。

人类第一只晶体管由巴丁和布拉丁发明（1947年）至今40多年了，在这期间半导体器件有了极其迅速的发展和广泛的应用，使人类的生活和科学技术的发展产生了深刻的变化，呈现出令人鼓舞的局面。

半导体器件的种类繁多，在有限的教学课时内不可能全部都讲，只能讲授其中部分最基本的内容，作为同学们今后继续学习其他半导体器件的基础。本书包括双极型器件（电子和空穴都参与电流传输），单极型器件（仅一种载流子参与电流传输）和光电器件。在讨论这些器件之前，分别介绍这些器件的物理基础。第一章是PN结物理基础，第二至五章是晶体管的工作原理和各种特性，第六章介绍半导体表面物理基础（作为单极型器件的物理基础），第七章是MOS场效应晶体管的工作原理和它的特性。第八章介绍半导体光电器件。

本书着重半导体器件的物理机构和物理图象的阐述以及必要的数学推导，文字叙述力图简明扼要，深入浅出。但由于作者水平所限，难免会有错漏之处，敬请读者指正。

编者 1988年4月

目 录

第一章 p-n结物理基础	
§ 1 热平衡p-n结	(1)
§ 2 p-n结空间电荷区	(5)
1. 耗尽层近似	(5)
2. 突变结近似和线性缓变结近似	(5)
3. 突变结的耗尽层	(7)
4. 线性缓变结的耗尽层	(11)
§ 3 p-n结势垒电容	(16)
1. 超突变结变容二极管	(31)
2. p-n结C-V特性的应用	(34)
§ 4 p-n结电流——电压特性	(34)
1. 理想的p-n结电流—电压特性	(36)
2. 理想的p-n结电流—电压特性与实验的偏离	(45)
3. 势垒区产生—复合过程对p-n结电流—电压特性的影响	(48)
4. 大注入理论	(53)
5. 载流子贮存和瞬态特性	(57)
§ 5 p-n结击穿	(65)
1. p-n结击穿的物理机构	(66)
2. 雪崩击穿理论	(73)
第二章 晶体管原理	(91)
§ 1 晶体管的放大作用	(91)
1. 晶体管的结构	(91)
2. 晶体管的电流传输	(95)

3. 晶体管直流短路电流放大系数	(97)
§ 2 晶体管的静态特性	(99)
1. 晶体管电流—电压特性	(99)
2. 晶体管直流短路电流放大系数 α_0 与晶体管材料 参数及结构参数的关系	(106)
3. 发射结空间电荷区复合和基区表面复合对晶 体管直流短路电流放大系数的影响	(108)
4. 晶体管直流特性曲线	(110)
§ 3 晶体管的直流参数	(115)
1. 反向截止电流	(116)
2. 晶体管的击穿电压参数	(119)
§ 4 晶体管的低频小信号特性	(130)
1. 晶体管低频小信号方程式和等效电路	(131)
2. 基区宽度调变效应对晶体管特性的影响	(135)
第三章 晶体管的频率特性	(141)
§ 1 晶体管交流短路电流放大系数与频率的关系	(141)
1. 晶体管交流短路电流放大系数的截止频率和 特征频率	(141)
2. β 随频率变化的物理原因	(143)
3. 电流放大系数的频率关系	(153)
§ 2 漂移晶体管	(155)
1. 缓变杂质分布基区的自建电场	(156)
2. 漂移晶体管中载流子的输运	(158)
3. 漂移晶体管共发射极电流放大系数	(164)
§ 3 截止频率和特征频率	(164)
1. 基区输运因子和基区截止频率	(165)
2. α 截止频率 f_α	(173)
3. β 截止频率 f_β	(175)
4. 特征频率 f_T	(177)

§ 4 晶体管的功率增益和最高振荡频率	(179)
1. 晶体管高频等效电路	(179)
2. 晶体管的功率增益和高频优值	(181)
3. 晶体管的最高振荡频率	(186)
§ 5 基极电阻	(186)
§ 6 晶体管的噪声特性	(190)
1. 晶体管的噪声源	(190)
2. 晶体管的噪声系数	(193)
3. 高频晶体管的噪声系数	(194)
第四章 晶体管的功率特性	(202)
§ 1 晶体管大注入工作对短路电流放大系数的影响	(202)
1. β_0 与 I_C 的关系	(202)
2. 大注入对基区输运因子 η 的影响	(205)
3. 大注入对发射效率 γ 的影响	(206)
4. 大注入情况下, 晶体管短路电流放大系数 β_0	(207)
§ 2 晶体管大注入对特征频率 f_T 的影响	(208)
1. f_T 与 I_C 的关系	(208)
2. 基区扩展效应	(209)
3. 基区扩展效应对晶体管特征频率 f_T 的影响	(215)
§ 3 发射极电流集边效应	(218)
§ 4 晶体管发射极单位周长的电流容量	(224)
§ 5 晶体管的 β 最大耗散功率	(226)
1. 耗散功率	(226)
2. 晶体管的热阻	(228)
3. 晶体管 β 最大耗散功率	(232)
§ 6 晶体管的二次击穿	(233)
1. 二次击穿	(233)
2. 二次击穿的物理机构	(235)

3. 防止二次击穿发生的措施	(237)
4. 安全工作区 (SOA)	(240)
第五章 晶体管的开关特性	(243)
§ 1 晶体管的开关作用与工作状态	(243)
§ 2 晶体管的饱和态和截止态	(246)
1. 晶体管的饱和态	(246)
2. 晶体管的截止态	(248)
§ 3 Ebers-Moll模型	(249)
1. Ebers-Moll模型方程式	(249)
2. 晶体管的工作状态	(253)
§ 4 晶体管的输入正向压降和饱和压降	(255)
1. 晶体管的输入正向压降 V_{BEs}	(255)
2. 饱和压降 V_{CES}	(256)
3. 高反压功率平面晶体管的饱和压降	(257)
§ 5 晶体管的开关时间	(264)
1. 延迟过程和延迟时间 t_d	(265)
2. 上升过程和上升时间 t_r	(267)
3. 超量贮存电荷的消失过程和贮存时间 t_s	(271)
4. 下降过程和下降时间 t_f	(276)
5. 晶体管的开关时间	(277)
6. 提高晶体管开关速度的途径	(278)
第六章 表面物理基础	(284)
§ 1 Si—SiO ₂ 系统的硅表面空间 电荷层的性质	(284)
1. 表面空间电荷层的形成、费米势和表面势	(284)
2. 表面空间电荷层的电场、电荷和电容	(287)
3. 表面空间电荷层的五种状态	(292)
4. 表面迁移率	(309)

§ 2 理想的MOS结构电容的C-V特性	(314)
1. 理想的MOS结构的电容——电压特性	(314)
2. 理想的MOS结构C-V的频率特性	(322)
§ 3 实际的MOS结构电容的C-V特性——功函数 绝缘层中电荷和界面陷阱电荷对C-V 特性的影响	(328)
1. 功函数差对MOS结构的C-V特性的影响	(329)
2. 绝缘层中电荷对C-V特性的影响	(338)
3. 界面陷阱电荷对C-V特性的影响	(345)
§ 4 Si-SiO ₂ 系统中的电荷和陷阱	(349)
1. SiO ₂ 层中的可动离子电荷	(350)
2. SiO ₂ 层中固定氧化物电荷	(353)
3. SiO ₂ 层中的陷阱电荷	(356)
4. 界面陷阱电荷	(358)
§ 5 非平衡状态下表面空间电荷层的特性	(365)
§ 6 表面对p-n结特性的影响	(370)
1. 表面空间电荷层对产生——复合电流的影响	(370)
2. 沟道效应	(371)
3. 沟道效应对p-n结特性的影响	(374)
第七章 MOS场效应晶体管	(381)
§ 1 MOS场效应晶体管的工作原理和种类	(383)
1. MOSFET的工作原理	(383)
2. MOSFET的种类	(385)
§ 2 MOSFET的伏安——特性	(388)
1. 输出特性和转移特性	(388)
2. MOSFET的伏——安特性方程的推导	(392)
3. 饱和区的输出特性不饱性的分析	(397)
§ 3 MOSFET的开启电压(阈电压)	(402)
1. 开启电压公式	(402)

2. 影响开启电压的因素	(407)
§ 4 MOSFET的直流参数	(417)
1. 沟道电导	(417)
2. 漏源饱和电流	(418)
3. 漏源击穿电压	(418)
4. 栅源击穿电压	(420)
§ 5 MOSFET的交流小讯号参数及其等效	
电路频率特性	(422)
1. 跨导	(422)
2. 漏——源输出电导	(425)
3. MOSFET频率特性	(426)
第八章 半导体光电器件	(435)
§ 1 发光过程中的激发与复合	(438)
1. 发光过程中的激发	(438)
2. 发光过程中的复合	(439)
§ 2 辐射复合与无辐射复合	(442)
1. 带间复合	(443)
2. 浅能级与能带间的复合	(444)
3. 施主—受主间复合	(446)
4. 激子复合	(447)
5. 等电子陷阱	(448)
6. 无辐射复合	(452)
§ 3 发光二极管	(455)
1. 发光材料	(455)
2. 发光二极管的结构	(464)
3. 发光二极管的特性参数	(467)
§ 4 p-n结光生伏特效应	(475)
1. p-n结光生伏特的物理过程	(475)
2. 光照下理想的p-n结I-V特性	(477)

§ 5 太阳能电池的结构与特性	(479)
1. 太阳能电池的结构	(479)
2. 太阳辐射与大气质量	(480)
3. 光电转换效率	(482)
4. 光谱响应	(486)
5. 辐照效应	(488)
§ 6 非晶态硅(a-Si)太阳能电池	(491)
1. 非晶态半导体薄膜高效率光电转换的条件	(491)
2. 非晶态半导体硅太阳能电池的结构	(493)
§ 7 光电二极管	(497)
1. 光电二极管的工作原理	(497)
2. 光谱响应	(499)
3. 响应时间	(507)
4. 光电二极管的噪声特性	(509)
5. 雪崩光电二极管	(512)
附录 I 常用的物理常数表	(515)
附录 II 几种半导体和二氧化硅的性质	(516)

第一章 $p-n$ 结物理基础

在各类型半导体器件中，以 $p-n$ 结为基本组成部分的结型器件应用最广。因此，深入地理解和掌握 $p-n$ 结的基本特性及其相关联的物理过程乃是掌握结型器件的工作原理，从而设计各种结型半导体器件的重要基础。

$p-n$ 结是 p 型半导体与 n 型半导体相互理想接触而产生的结构。在实际中，制造 $p-n$ 结是利用控制施主和受主掺杂的方法使一块单晶半导体的不同部分分别具有电子导电性和空穴导电性，这两种不同导电类型的半导体分界面附近就形成“ $p-n$ ”结结构。目前生产中常用的合金法、扩散法、离子注入法和外延生长法等工艺，是控制掺杂制造 $p-n$ 结的重要方法。

$p-n$ 结有非常丰富的物理内容，随着构成 $p-n$ 结的半导体材料、几何结构、制造工艺和工作条件不同，可以呈现不同的特性和实现不同的功能。本章着重讨论 $p-n$ 结的整流特性、 $p-n$ 结电容和电击穿等主要的特性，其他性能将结合器件原理进行分析讨论。

§1 热平衡 $p-n$ 结

热平衡 $p-n$ 结是在一定的温度下，不加偏压和没有任何外界激发的 $p-n$ 结。为了理解热平衡 $p-n$ 结的物理图象，我们讨论从 p 型与 n 型半导体开始接触直到系统达到热平衡所发生

的物理过程。

假设有两块均匀掺杂的 n 型和 p 型半导体，在室温下，施主和受主完全电离，它们的载流子浓度分别为：

$$n \text{ 型半导体 } \begin{cases} n_{n0} = n_i e^{(E_{Fn} - E_i)/kT} \\ p_{n0} = n_i e^{-(E_{Fn} - E_i)/kT} \end{cases} \quad (1-1)$$

$$p \text{ 型半导体 } \begin{cases} p_{p0} = n_i e^{(E_i - E_{Fp})/kT} \\ n_{p0} = n_i e^{-(E_i - E_{Fp})/kT} \end{cases}$$

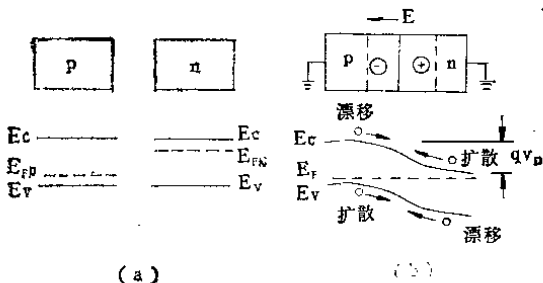


图1-1(a) 均匀掺杂的 p 型和 n 型半导体的简单能带图
(b) p - n 结空间电荷区的电场和热平衡 p - n 结能带

将 p 型和 n 型半导体进行理想的接触，在接触界面处存在大的载流子浓度差。 n 型区的电子向 p 型区扩散， p 型区的空穴向 n 型区扩散。但是，半导体的多数载流子是由杂质电离提供的。所以， n 型区的电子向 p 型区扩散的同时，在界面附

近出现带正电的电离施主，而在 p 型区的空穴向 n 型区扩散的同时，在界面附近出现带负电的电离受主。因此， n 型区和 p 型区交界面的两侧形成带正、负电荷的区域，称为“空间电荷区”，如图1-1(b)所示。空间电荷形成的电场叫做“自建电场”，电场方向从 n 型区指向 p 型区。自建电场对载流子的漂移作用刚好与载流子的扩散方向相反，抑制载流子的扩散趋势的发展。随着扩散的载流子数目增加，空间电荷数量也相应地增加，自建电场增强，直到自建电场对载流子的漂移作用与扩散作用相等，在 p - n 结空间电荷区内，载流子的漂移运动与扩散运动达到动态平衡， p - n 结就处于热平衡状态。由此可见，热平衡 p - n 结没有净电流流过。空间电荷区外的 n 型区与 p 型区是电中性的，因此，整个空间电荷区的正、负空间电荷数量相等。

对热平衡 p - n 结，可以利用图1-1(b)表示的能带图作进一步讨论。

我们知道，热平衡 p - n 结的漂移电流与扩散电流处于动态平衡，

$$J_p = q\mu_p p E - qD_p \frac{dp}{dx} = 0 \quad (1-2)$$

$$J_n = q\mu_n n E + qD_n \frac{dn}{dx} = 0 \quad (1-3)$$

由势能变化与电场的关系 $dE_i/dx = qE$ 和爱因斯坦关系 $D_p = kT\mu_p/q$ 代入(1-2)式得：

$$J_p = \mu_p p \frac{dE_i}{dx} - kT\mu_p \frac{dp}{dx} = 0 \quad (1-4)$$

由方程(1-1)的空穴浓度表示式 $p = n_i e^{(E_i - E_F)/kT}$ 代入

方程(1-4)得:

$$J_p = \mu_p p \frac{dE_F}{dx} = 0 \quad (1-5)$$

同理对方程(1-3)推导得:

$$J_n = \mu_n n \frac{dE_F}{dx} = 0 \quad (1-6)$$

因此,热平衡*p-n*结具有恒定的费米能级,如图1-1(b)所示。

在图1-1(a)表示的*p*型和*n*型半导体能带中,各自的费米能级位于禁带的不同位置,但热平衡*p-n*结具有恒定的统一费米能级 E_F ,必须要求空间电荷区的自建电势 V_D 与*n*型和*p*型半导体的费米能级之差相对应。 V_D 也称为接触电势差,而 qV_D 称为势垒高度。显然,热平衡*p-n*结的势垒高度等于*n*型和*p*型半导体费米能级之差:

$$qV_D = E_{Fn} - E_{Fp} \quad (1-7)$$

由方程(1-1)求得:

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_{p0} n_{n0}}{n_i^2} \quad (1-8)$$

对于均匀掺杂的突变*p-n*结,在室温下受主和施主完全电离, $p_{p0} \approx N_A$, $n_{n0} \approx N_D$,方程(1-8)变成:

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (1-9)$$

§2 p-n结空间电荷区

1. 耗尽层近似

空间电荷区中自建电场分布、电位分布和空间电荷区宽度都能够根据泊松方程计算：

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{dE}{dx} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon\epsilon_0} = -\frac{q}{\epsilon\epsilon_0}(N_D - N_A + p - n) \quad (1-10)$$

式中 ϵ 是相对介电常数（对于硅材料， $\epsilon=12$ ）， ϵ_0 是自由空间电容率（ $\epsilon_0=8.854 \times 10^{-14} F/cm$ ）。

要对方程（1—10）求解，必须知道空间电荷区内杂质分布函数。杂质分布可以根据制造p-n结的工艺条件作出合理的估计。至于载流子浓度 p 和 n ，在空间电荷区内，基本上被自建电场扫出区外，但在空间电荷区边缘，自建电场较弱，在一定的过渡区内，空间电荷被载流子补偿，但是，这个过渡区域只占空间电荷区的很小部分。为了简化计算，通常把这个过渡区忽略掉，认为空间电荷区内不存在载流子，空间电荷区与半导体电中性区有突变的边界，如图1-2所示。这种近似称为耗尽层近似。采用耗尽层近似，方程（1—10）简化为：

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon\epsilon_0}(N_D - N_A) \quad (1-11)$$

2. 突变结近似和线性缓变结近似

耗尽层近似虽然对泊松方程（1—10）作了简化，但

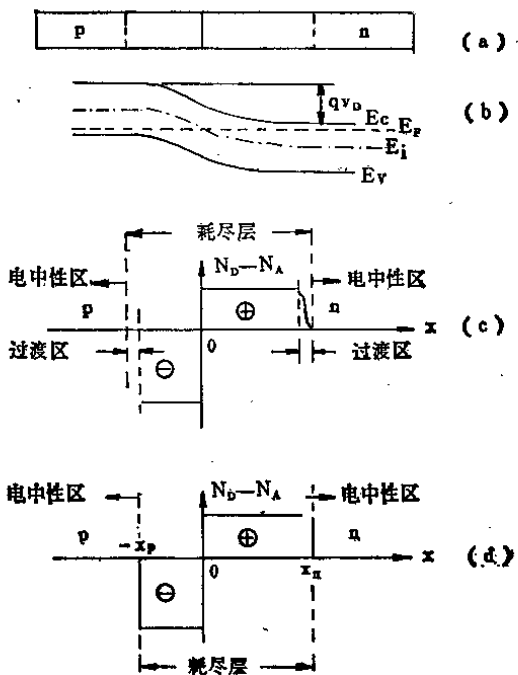


图1-2 (a) p-n结 (b) 热平衡p-n结能带
(c) 空间电荷分布
(d) 空间电荷分布的耗尽层近似