

晶体管原理与设计

(上册)

半导体专业用

湖南大学半导体教研室编

1975·9

晶体管原理与设计

(上册)

目 录

绪 论

- | | |
|-----------------|---|
| 一、本课程的主要研究对象 | 1 |
| 二、本课程的主要内容 | 2 |
| 三、关于如何学习这门课程的问题 | 9 |

第一章 P-N结原理

- | | |
|------------------------|-----|
| § 1.1 平衡P-n结及其势垒高度 | 14 |
| § 1.2 正向偏置P-n结 | 21 |
| § 1.3 反向偏置P-n结 | 49 |
| § 1.4 P-n结的电流方程及其局限性 | 61 |
| § 1.5 P-n结的隧道效应 | 65 |
| § 1.6 P-n结势垒区中的电场及势垒厚度 | 75 |
| § 1.7 P-n结的电容效应 | 90 |
| § 1.8 P-n结的击穿特性 | 102 |

附 录 球形单边突变结击穿电压 的理论计算

126

第二章 晶体管的直流特性

- | | |
|---------------------------|-----|
| § 2.1 均匀基区晶体管的电流放大系数 | 130 |
| § 2.2 缓变基区晶体管的电流放大系数 | 136 |
| § 2.3 势垒复合和表面复合对电流放大系数的影响 | 153 |

§ 2.4.	如何在实践中提高电流放大系数	156
§ 2.5.	晶体管的特性曲线	160
§ 2.6.	晶体管的反向截止电流	165
§ 2.7.	晶体管的击穿电压和穿透电压	170

第三章 晶体管的低频小信号特性

§ 3.1	概 述	178
§ 3.2	晶体管中的体电阻	178
§ 3.3	晶体管低频小信号工作时的特性方程 和等效电路	197

第四章 晶体管的高频特性

§ 4.1	晶体管的交流电流放大系数 和频率特性概述	218
§ 4.2.	晶体管短路电流放大系数随频率 变化的初步分析	221
§ 4.3.	引起短路电流放大系数下降和电 号延迟的四个因素	227
§ 4.4.	晶体管的截止频率和特征频率的公式	248
§ 4.5.	怎样提高晶体管的特征频率	275

附录 4.1	均匀基区晶体管基区输运系数 和基区截止频率的理论计算	282
--------	-------------------------------	-----

附录 4.2.	平面型晶体管基区输运系数 和基区截止频率的理论计算	293
---------	------------------------------	-----

绪 论

一、本课程的主要研究对象：

随着晶体二极管和晶体三极管在国民经济及国防建设各部门的应用日益广泛，人们对于晶体管也越来越熟悉，对于晶体管的了解也日益深入。正如大家所熟悉的半导体收音机，就是由几个晶体三极管、二极管以及一些电阻、电容等电子元件按照一定的规律相互连结起来而组成的。它已经成为宣传马列主义，毛泽东思想的有力工具。在国民经济中的自动控制设备，无线电广播设备，计算机，国防事业中无线电通讯，制导，卫星导航电子系统和设备中都使用着成千上万个晶体管（或集成电路）。对于这些电子系统，设备及元件的生产和研究，主要是利用电子元件相互联系规律，为我们服务的。为了寻找更合理地使用晶体管的方案以及充分发挥晶体管的潜力，使之更多更好地用于社会主义建设和国防事业，人们进行了大量的科学实验及理论研究，形成了“晶体管电路”这门学科。

但是，对于晶体管应用的研究并不是孤立的，晶体管的应用往往提供了对于晶体管性能考核指标的要求，因此，有必要根据这些要求生产出合格的晶体管，一支小小的晶体管是通过一定的工艺过程生产出来的，例如，锗晶体管主要是用合金法或扩散合金法生产出管芯的，硅 $n-p-n$ 型晶体管是利用多次反复的氧化，光刻，扩散等所谓“ $n-p-n$ 工艺”生产出管芯，然后，进行引线封装，就生产出了供我们用的晶体管，究竟如何选择合理的工艺，如何控制工艺条件以生产出高成品率，高质量，各种类型的晶体管呢？这也是非常重要的问题，对于这一套生产工艺的研究，就形成了“晶体管工艺”（主要是 $n-p-n$ 工艺学）这门学科。

上述两方面都是称为我们直接认识的，但是，“感觉到了的东西，我们不能立刻理解它，只有理解了的东西，才能更深刻地感觉它”。因此，我们的认识有待于深化，例如，我们不禁要问：为什么晶体管会有如此广泛，而且是越来越广泛的用途。如何正确合理地使用一支晶体管？为什么通过一系列工艺流程能够生产出各种类型的晶体管？如何选择和准确地控制工艺参数，以提高成品率和产品质量？为什么在晶体管的生产中会出现这样或那

样的问题影响产品质量？等等这一系列的问题，都需要我们去解决。

为了解决这些问题，我们必须遵照毛主席的：“事物发展的根本原因，不在事物的外部而在事物的内部，在于事物内部的矛盾性。”唯物辩证法认为外因是变化的条件，内因是变化的根据，外因通过内因而起作用”。弄有英教导，由表及里地深入研究晶体管内部的矛盾运动。例如，在应用晶体管时，在各级板所加的一定的电压会引起晶体管内部发生怎样的矛盾运动，而使晶体管能起放大或开关作用？为什么会发生这些运动？又如，为什么工艺条件会对晶体管的各种参数有很大的影响？如何设计和生产出符合参数要求的晶体管等？都需要我们深入到晶体管内部，主要是晶体管内部去进行分析研究，这就是本课程的任务。

可以说：本课程的主要任务是研究在一定的外界条件（如电的和热的）作用下，晶体管内部载流子运动和电荷变化的规律性，寻找晶体管各种参数与其内部载流子运动之间互相联系的规律，从而，为设计和生产出符合参数要求的各种高质量晶体管提供必需的基础。因此，本课程的研究对象主要是一块小小的半导体晶体管中微观载流子运动的规律性及其与外界条件的联系。

当然，上述三个方面的研究绝不是可以相互割裂，截然分开的，而恰好相反，这三个方面学科内容的内在联系是非常密切的。例如，作为半导体器件生产者来说，当然要知道晶体管中基本的内在矛盾运动以及解决这些矛盾的途径（采用合理的工艺措施和设计方案），也要了解其运用情况，基本的使用电路，以便更好的了解晶体管各种参数指标的意义和要求，甚至与使用者共同确定参数指标，使得既能满足使用的要求，又不致于对晶体管提出过于苛求的指标要求。就半导体器件生产本身而言，如果只知道晶体管的工艺而不知道各个工艺参数对晶体管性能的影响，则无法选择合理的工艺参数，合理的工艺流程生产晶体管，当工艺中晶体管参数不合要求时也无法调整工艺参数；相反，如果只懂得晶体管原理及设计，而不知道工艺水平，工艺途径，则再好的设计方案也可能变成脱离生产实际的一纸空文。可见，晶体管原理与晶体管的工艺三方面的联系就更为密切了。

二 本课程的主要内容：

我们翻开“半导体器件手册”就可以看出，半导体器件的种

类型非常繁多的，但是，大体上可以分为半导体二极管与半导体三极管，集成电路和其他元件四大类。这些半导体元件都各有不同的参数指标，这些参数指标都是根据使用者对这些元件的要求而提出的，而元件生产单位就根据参数指标的要求，采用合理的设计方案及工艺措施，生产出各种各样的半导体元件，形成了不同参数指标的，不同型号的二极管、三极管及其他元件。

下面列出了几种晶体管的不同的参数指标。

3AX21-24 低频小功率管

1. 主要用途: 3AX21~3AX24 系 PNP 合金型锗管
用于低频放大。

2. 电参数:

参数符号		单位	测试条件	型 号	
				3AX21	3AX24A
直 流 参 数	I_{CEO}	μA	$V_{CB} = -10V$	≤ 12	≤ 12
	I_{EB0}	μA	$V_{EB} = -6V$	≤ 12	≤ 12
	I_{CE0}	μA	$V_{CE} = -6V$	≤ 325	≤ 550
	h_{FE}		$V_{CE} = -1V, I_E = 50\mu A$		
交 流 参 数	h_{ie}	$k\Omega$	$V_{CB} = -6V$	$0.6 \sim 4.5$	$0.6 \sim 4.5$
	h_{fe}		$I_E = 1mA$	$30 \sim 85$	$35 \sim 150$
	h_{re}	$\times 10^{-4}$	$f = 1KHz$	≤ 22	≤ 22
	h_{oe}	μV		≤ 80	≤ 80
	f_{α}	MHz	$V_{CB} = -6V$ $I_E = 1mA$		≥ 1
	N_F	dB	$V_{CB} = -2V$ $I_E = 0.5mA$ $f = 1KHz$	≤ 15	≤ 15
	BV_{CBO}	V		≥ 30	≥ 30
	BV_{CED}	V	$I_C = -1mA$	≥ 12	≥ 12
	BV_{EB0}	V		≥ 12	≥ 12
	I_{CM}	mA		30	50*
	P_{CM}	mW		100	100
	T_{jM}	$^{\circ}C$		75	75

*: 在脉冲或开关线路中的最大峰值电流。

3DG6 高频小功率管

1. 主要用途: 3DG6A~6D 系 NPN 外延平型硅管, 用于高频放大, 中频放大及振荡电路中。

2. 电参数:

参数符号	单位	测试条件	型号	
			3DG6A	3DG6C
直流参数	I_{CBO}	μA $V_{CB} = 10V$	≤ 0.1	≤ 0.01
	I_{EBO}	μA $V_{EB} = 1.5V$	≤ 0.1	≤ 0.01
	I_{CEO}	μA $V_{CE} = 10V$	≤ 0.1	≤ 0.01
	V_{BES}	V $I_B = 1mA$ $I_C = 10mA$	≤ 1.1	≤ 1.1
	h_{FE}	$V_{CB} = 10V$ $I_C = 3mA$	$10 \sim 200$	$20 \sim 200$
交流参数	f_T	MHz $V_{CE} = 10V$ $I_C = 3mA$ $f = 30MHz$	≥ 100	≥ 250
	K_p	dB $V_{CB} = 10V$ $I_C = 3mA$ $f = 100MHz$	≥ 7	≥ 7
	C_{ob}	PF $V_{CB} = 10V$ $I_C = 3mA$ $f = 5MHz$	≤ 4	≤ 3
极限参数	BV_{CBO}	V $I_C = 100\mu A$	30	45
	BV_{CEO}	V $I_C = 200\mu A$	15	20
	BV_{EBO}	V $I_E = -100\mu A$	4	4
	I_{CM}	mA	20	20
	P_{CM}	mW	100	100
	T_{jM}	$^{\circ}C$	150	150

3DK4 开关三极管

1. 主要用途: 3DK4 ~ 4C 系 NPN 外延平型硅管, 用于饱和与非饱和高速开关电路中。

2. 电参数:

参数符号	单位	测试条件	型 号	
			3DK4	3DK4B
直流参数	I_{CBO}	MA $V_{CB} = 10V$	≤ 1	≤ 1
	I_{CEO}	MA $V_{CE} = 10V$	≤ 10	≤ 10
	$V_{CE(sat)}$	V $I_B = 50mA$	≤ 1	≤ 1
	$V_{BE(sat)}$	V $I_C = 500mA$	≤ 1.5	≤ 1.5
	β_{FE}	$V_{CE} = 1V, I_C = 500mA$	20 ~ 200	20 ~ 200
交流参数	f_T	MHz $V_{CE} = 10V, I_C = 50mA$ $f = 30MHz$ $R_L = 5\Omega$	≥ 100	≥ 100
	C_{ob}	PF $V_{CB} = 10V$ $f = 5MHz, I_E = 0$	≤ 15	≤ 15
开关参数	t_{on}	ns $V_{CE} = 26V, V_{BE} = 1.5V$ 脉冲幅度 = 7.5V 脉冲宽度 = 1.5μs	50	50
	t_{off}	ns 脉冲重复频率 = 1.5kHz	100	100
极限参数	BV_{CBO}	V $I_C = 100\mu A$	20	60
	BV_{CEO}	V $I_C = 200\mu A$	15	45
	BV_{EBO}	V $I_E = -100\mu A$	4	4
	I_{CM}	mA	300	300
	P_{CM}	mW 不加散热板	700	700
	T_{jM}	°C	175	175

3DA30 高频大功率管

1. 主要用途: 3DA30A ~ 3DA30D 系 NPN 外延并
 型硅管, 用于高频功率放大, 振荡及中速
 开关电路中。

2. 电参数:

参数符号	单位	测试条件	型号	
			3DA30B	3DA30D
直流参数	I_{CBO}	$V_{CB} = 24V$	≤ 1	≤ 1
	I_{CEO}	$V_{CE} = 24V$	≤ 5	≤ 5
	$V_{BE(sat)}$	$I_C = 4A, I_B = 400mA$	≤ 2.5	≤ 2.5
	$V_{CE(sat)}$		≤ 1.5	≤ 1.5
	h_{FE}	$V_{CE} = 5V, I_C = 4A$	≥ 20	≥ 20
交流参数	f_T	$V_{CE} = 24V, I_C = 2A$ $f = 30MHz$	≥ 50	≥ 80
	K_p	$V_{CE} = 24V, I_C = 2A$ $f = 20MHz$	≥ 9	≥ 10
	C_{ob}	$V_{CB} = 24V, I_E = 0$ $f = 5MHz$	≤ 150	≤ 150
	P_o	$V_{CE} = 24V, I_C = 2A$ $f = 20MHz$	≥ 16	≥ 20
极限参数	BV_{CBO}	$I_C = 5mA$	60	80
	BV_{CEO}	$I_C = 10mA$	50	70
	BV_{EBO}	$I_E = -5mA$	4	4
	I_{CM}		6	6
	P_{CM}	加散热板 300 X 300 X 4mm ³	50	50
	T_{jM}	$^{\circ}C$	175	175
	R_T	$^{\circ}C/W$	1.2	1.2

从晶体管的参数表可以看出：不同型号的晶体管，各有不同的参数要求，可用于不同的电路之中。但是，它们可分为直流参数，交流参数，开关参数和极限参数四类。

对于半导体器件制造者来说，不仅应该了解这些参数的意义及要求，更重要的是应该掌握这些参数与晶体管的材料参数，结构参数及工艺有什么关系，以便在生产实践中采用合理的设计方案和工艺措施，提高晶体管的参数指标，生产出符合使用要求的各种各样的晶体管来，满足社会主义建设和国防事业的需要。

本课程的主要任务是通过晶体管在一定的外界条件下，其中载流子运动规律的分析，找出影响晶体管各种参数指标的内在因素（晶体管的材料参数和结构参数），以便为我们提高晶体管的质量，生产出各种型号的晶体管提供一定的理论根据和工艺途径。

为了叙述的方便起见，本课程将分以下内容进行讨论：

(1) P-N结原理：

因为P-N结是晶体管的心脏，所以，首先对P-N结加以讨论。本章主要是讨论P-N结的电流特性、电容特性和击穿特性，并对隧道二极管及反射二极管的原理也作一简要介绍。

(2) 晶体管的直流特性：

主要是讨论晶体管的放大性能，漏电流性能和击穿性能，为提高开关参数提供理论基础。

(3) 晶体管的低频小信号特性及高频特性。

介绍晶体管低频小信号性能，以及当高频运用时性能变坏的原因，推出决定截止频率和特征频率的因素，指出提高晶体管特征频率的途径。

(4) 高频大功率晶体管：

高频特性和功率特性这对矛盾是晶体管中的主要矛盾，本章着重介绍晶体管的大电流效应以及如何解决这对矛盾的途径，以便生产出更高频率和更大功率的晶体管。

(5) 晶体管的开关特性：

晶体管作为开关广泛地应用于电子技术之中，本章将着重分

析影响晶体管开关特性的主要因素，提出缩短开关时间的主要途径。

(6)，此外，还将简单介绍晶体管的噪声性能及降低噪声的方法。

(7)，从上述的讨论，我们将会看到：晶体管中存在着各种各样的矛盾，在提高晶体管的某些性能参数指标的同时，将会影响某些其他的参数，因此，在生产实践中往往要根据具体情况的具体要求，着重满足那些要求较高的参数指标，而兼顾其他指标，这样，就生产出了各种各样的晶体管，如低频大功率管主要是满足功率参数指标，微波低噪声小功率管主要是满足频率和噪声参数指标，开关管则主要是设法缩短开关时间。在本课程中，我们将以典型产品为例，分析其主要矛盾，介绍几种管型的设计考虑。

(8)，由于MOS场效应晶体管的应用也日益广泛，特别是由于其特有的优点，在大规模集成电路中MOSFET集成电路占有很大的比例，所以，在本课程中也将对MOSFET作一些简单介绍。

(9) 晶体管的稳定性及可靠性问题是关系到电子设备是否能可靠地工作的重大问题，产品质量的问题是一个重大的问题，因此，我们将在课程的最后加以简单的介绍。

三. 关于如何学习这门课程的问题：

从上述的本课程的研究对象及主要内容可以看出，本课程的主要内容都是研究晶体管中微观载流子的运动的规律性，这些微观粒子虽然不能为我们感觉器官所直接感知，但是，它们的运动是客观存在的，是有规律性的，当然，也是一定能被我们认识和掌握，从而，能用以为我国的社会主义建设和国防事业服务的。人们多年来的实践都证明了，客观物质的运动不论多么复杂，都是能够被人们所认识的。

那么，我们应当如何来研究和掌握这些客观规律呢？毛主席

教导我们：“思想上政治上的路线正确与否是决定一切的。”因此，我们应该有一个正确的宇宙观，有一条正确的认识路线，必须用马列主义，毛泽东思想为武器，去分析和解决问题，用唯物辩证法来指导我们整个学习过程。

关于如何学习这门课程的问题，下面简单地谈一谈我们的一些粗浅看法。

(1)、要从时间和空间上去把握载流子的运动：

列宁教导我们：“世界上除了运动着的物质，什么也没有，而运动着的物质只有在空间和时间内才能运动。”因此，我们研究晶体液中载流子的运动，也必须研究它的状态（例如，非平衡，或者受平衡载流子的浓度）随着空间和时间是如何变化的，只有这样，我们才能够认识和掌握载流子运动的客观规律性，我们将会看到，整个课程的内容都离不开这条基本原理。

(2)、要从事物之间的相互联系和相互作用中去了解事物的运动，认识它们之间的因果关系。

毛主席在《矛盾论》中指出：“和形而上学的宇宙观相反，唯物辩证法的宇宙观主张从事物的内部，从一事物对他事物的关系去研究事物的发生，即把事物的发生看做是事物内部的必然的自己的运动，而每一事物的运动都和他周围其他事物互相联系着和互相影响着。事物发生的根本原因，不是在事物的外部而是在事物的内部，在于事物内部的矛盾性。任何事物内部都有这种矛盾性，因此，引起了事物的运动和发生，事物内部的这种矛盾性是事物发生的根本原因，一事物和他事物的互相联系和互相影响则是事物发生的第二位的原因。”

晶体液中载流子的运动总是在一定外界条件的作用下引起的，因此，我们在了解晶体液中载流子运动的特定形式及其运动规律时，还必须弄清楚引起这种运动的外部原因，才能正确地把握住这种运动，从而创造外界条件来控制载流子的运动，以便为我们所利用。

马克思主义还认为：原因和结果这两个观念，只有在应用于一定的个别场合时才有其本身的意义，可是，只要我们把这种个别场合放在它和世界整体的总联系中来考察，这两个观念就汇合在一起，并交织在普遍相互作用的概念中，在这种相互作用中，原因和结果经常交换位置，在此时或此地是原因，在彼时或彼地

就成了结果，反之亦然，而且，原因和结果也是相互作用着的，原因产生结果，结果又会影响自己的原因。因此，我们在认识晶体管中载流子运动的因果规律时还必须注意具体条件和因果之间的相互作用。

(3) 要注意抓住在特定情况下的主要矛盾和矛盾的主要方面，同时，要正确处理次要矛盾。

毛主席教导我们：“在复杂的事物的发展过程中，有许多矛盾存在，其中必有一种是主要的矛盾，由于它的存在和发展，规定或影响着其他矛盾的存在和发展。”“因此，研究任何过程，如果是存在着两个以上矛盾的复杂过程的话，就要用全力找出它的主要矛盾。”

晶体管中载流子存在着各种各样的矛盾运动以及影响其运动的各种外部和内部因素，我们在研究载流子运动时，就要注意找出在具体条件下，决定晶体管性质的主要的运动形式以及影响这种运动的主要因素，加以具体的分析。我们将看到：晶体管的理论，总是在一定的假设条件下，抓住主要因素，排除了某些次要因素，把问题简化，然后，进行分析研究而得出的接近客观实际的近似的理论。

频率和功率之间的矛盾是晶体管中存在着一对主要矛盾，在本课程中，我们将着重分析和解决这对矛盾。

(4) 要正确理解和处理实践与理论的关系，树立实践第一的观点。

毛主席教导我们：“感觉到了的东西，我们不能立刻理解它，只有理解了的东西才能更深刻地感觉它。感觉只解决现象问题，理论才解决本质问题。”

“要完全地反映整个的事物，反映事物的本质，反映事物的内部规律性，就必须经过思维作用，将丰富的感觉材料加以去粗取精，去伪存真，由此及彼，由表及里的改造制作工夫，造成概念和理论的系统，就必须从感性认识跃进到理性认识。”

本课程的目的之一就是要在工农兵学员已有的感性认识的基础上，对于晶体管内部的矛盾运动进行理论的分析，使我们对于晶体管的“全部的，本质的，内部联系的东西”有一定的理性认识。

然而，“认识的能动作用，不但表现于从感性的认识到理性

的认识是能动的飞跃，更重要的还须表现于从理性的认识到革命的实践这一飞跃。抓住了世界的规律性的认识，必须把光再回到改造世界的实践中去，再回到生产的实践，革命的阶级斗争和民族斗争的实践以及科学实验的实践中去。“所以，学习本课程的最终目的是为了更有效地指导生产实践和科学试验。但是，任何理论都是在一定的条件下，甚至经过一系列的假说，抓住主要因素，忽略次要因素，然后，经过分析，推理，判断而得出的接近于实际的近似理论。特别是对开研究微观载流子运动的晶体液理论更是如此。因此，我们在运用理论的同时，这些理论的真理性还受到实践的检验。”实践是检验真理的唯一标准。“在运用理论时：一方面要注意理论的近似性及其适用范围，另一方面要注意根据具体的实际条件对理论加以修改，补充，使之进一步完善，使理论得到发展，这样，人们的认识就比较地达到了高一级的程度。

总之，“通过实践而发现真理，人通过实践而证实真理和发展真理。从感性认识而能动地发展到理性认识，又从理性认识而能动地指导革命实践，改造主观世界和客观世界，实践，认识，再实践再认识。这种形式，循环往复以至无穷，而实践和认识在每一循环的内容，都比较地达到了高一级的程度。这就是辩证唯物论的全部认识论，这就是辩证唯物论的知行统一观。”

(5)，要正确处理物理与教学的关系。

对于影响晶体液中载流子运动的因素及其相互联系，我们不能只停留在定性的分析方面，还必须注意到它们之间的数量关系。毛主席教导我们要“胸中有数”。这是说，对情况和问题一定要注意到它们的数量方面，要有基本的数量分析。”

教学工具是用来描述事物之间相互联系规律性及数量关系的，也是我们认识客观世界的一种工具，因此，在本课程中，我们将运用一定的教学工具，以加深对开载流子运动的理解。

但是，任何的数学抽象都不是凭空产生的，不是人们头脑中固有的，而是从实践中总结出来的对客观事物的反映，特别是在本课程中，教学工具直接与客观事物相联系，直接描述明确的物理过程和物理概念。因此，我们在学习过程中，应该着重掌握教学的物理实质，才能真正使教学工具为我们所掌握和利用。

本讲义是供我队丰身体专业工农兵学员，在参加了一段时间

的硅平面晶体管生产实践”，并且学习了“半导体集成电路”（上册）（上海无线电十九厂与复旦大学合编）及“半导体材料及物理”课程后，有了进一步掌握晶体管的基本理论，参考了其他兄弟院校的讲义而编写的。

由于我们各方水平的限制，特别是对于马列主义、毛泽东思想学习得不行，掌握和运用唯物辩证法的水平很低，所以，在科学知识的论述及用唯物辩证法加以分析弄方子，难免出现缺点和错误，我们恳切地希望工农兵学员及其他同志提出批评指正。我们表示最深切的感谢！

编者 一九七五年九月

第一章 P-N结原理

§1.1 平衡P-n结及其势垒高度

1.1~1 平衡P-N结的形成及其特点:

我们已经知道,当我们用一定的工艺方法使一块半导体的一部分是P型的,而另一部分是N型的,则在P型区和N型区交界面附近电子和空穴(在室温下,它们在做热运动),由于其浓度梯度的存在,就产生了电子向P型区的扩散流和空穴向N型区的扩散流。然而,由于它们都是带电荷的,而且它们运动的结果,在N型区边界附近留下了^{正电荷的施主杂质离子,在P型区边界附近留下带负电荷的受主杂质离子},从而形成了一个“自建”的“漂移场”,使电子和空穴沿着与扩散流相反的方向漂移,形成了扩散运动和漂移运动的矛盾,这实际上是一个“自建的过程”。

起始时,扩散到对方的载流子不多,留下的离子电荷不多,离子电荷所形成的漂移场不够强,因此,扩散流起主要作用。但是,随着扩散的继续进行,扩散到对方的载流子及离子电荷越来越多,漂移场也越来越强,漂移流也逐渐增加。这样的变化趋势的发展,总会出现漂移流与扩散流相等的时刻,这时候,两种因素共同作用的结果,形成了动态的平衡,不呈现载流子向哪个方向的宏观流动。我们称此时达到了热平衡状态,这种P-n结称为热平衡P-n结,或简称为平衡P-n结。

平衡P-n结具有如下特点:

a. 在交界面附近的一定空间内出现了正(或负)的离子电荷,而且根据电中性条件,正离子电荷的总量等于负离子的总量。这个区域叫做空间电荷区。

b. 正负离子电荷产生一个自建电场,使得电子和空穴在N型区和P型区的能量不相同,形成了一个势垒。势垒有一定的高度 V_D ,因此,空间电荷区又叫做势垒区,在势垒区以外的区域是电中性的。存在势垒的区域有一定的厚度。

图1.1示出了势垒区的情况。