



湖南大学出版社  
图书出版基金资助项目

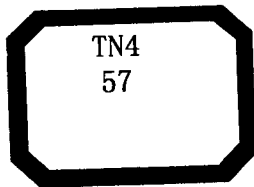
# 微电子器件基础

曾云 编著

湖南大学出版社



湖南大学出版社  
图书出版基金资助项目



TN4

57

# 微电子器件基础

曾云 编著

湖南大学出版社

## 内 容 提 要

本书是作者在十余年讲授《微电子器件基础》课程的基础上总结、修订、补充而编著的,是作者多年授课经验和从事相关科研工作成果的总结。书中重点介绍PN结二极管、结型晶体管和MOS场效应晶体管这三种基本微电子器件的工作原理和基本特性,并阐述器件特性与结构、材料与工艺参数之间的依赖关系。书中还简要介绍了一些代表性的其他器件如特殊二极管、晶闸管、光电器件和电荷耦合器件等。

本书可作为大学本科相关课程的教材,也可供微电子领域的科技及相关专业人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

微电子器件基础/曾云编著. —长沙:湖南大学出版社,

2005. 11

ISBN 7 - 81053 - 999 - X

I. 微... II. 曾... III. 微电子技术—电子器件

IV. TN4

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第128559号

## 微电子器件基础

Weidianzi Qijian Jichu

作 者: 曾 云 编 著

责任编辑: 李继盛

封面设计: 张 毅

出版发行: 湖南大学出版社

社 址: 湖南·长沙·岳麓山

邮 编: 410082

电 话: 0731-8821691(发行部), 8821274(编辑室), 8821006(出版部)

传 真: 0731-8649312(发行部), 8822264(总编室)

电子邮箱: [press@hnu.cn](mailto:press@hnu.cn)

网 址: <http://press.hnu.cn>

印 装: 望城县湘江印刷厂

总 经 销: 湖南省新华书店

开本: 880×1230 32开 印张: 11

字数: 317千

版次: 2005年12月第1版 印次: 2005年12月第1次印刷

印数: 1~4 000册

书号: ISBN 7-81053-999-X/TN-22

定价: 20.00元

版权所有, 盗版必究

湖南大学版图书凡有印装差错, 请与发行部联系

# 序

1948年晶体管的发明和1958年集成电路的诞生,导致了电子学的革命,开创了先进的微电子技术和微电子学新领域。40多年来,微电子技术以惊人的速度发展,已成为当代信息技术乃至整个高科技体系的支撑技术,它导致工业结构的变革、技术的革命,改变了人类社会的生产生活方式,对整个社会带来了不可估量的深远影响。我国从20世纪90年代以来,微电子工业迅猛发展,已跻身于微电子工业大国。因此,培养、造就大批微电子专业人才,是高等院校的重要任务。

微电子器件是电子技术的基础,也是大学电子科学与技术专业和其他相关专业的一门基础课程。微电子器件发展日新月异,涵盖面宽,种类繁多。作为基础教学用书,应突出基础性、典型性和实用性,使之能起到举一反三的作用。曾云教授的《微电子器件基础》一书正是顺应这一教学要求而编写的一本教材。

曾云教授长期从事微电子器件的教学与科研工作,讲授微电子专业电子器件课程十余年,先后编写了三稿电子器件讲义,有丰富的教学经验,本书就是在他编写的教学讲义的基础上,经过修改、补充编写而成的。书中主要介绍PN结二极管、结型晶体管和MOS场效应晶体管这三种基本微电子器件的工作原理和器件的基本特性,并阐述器件特性与结构、材料和工艺参数之间的依赖关系。书中还概括介绍了一些有代表性的其他器件如特殊二极管、晶闸管、光电器件和电荷耦合器件的内容。本书深入浅出,条理清楚,概念突出,结构严谨,是一本实用的好教材,同时也可作为微电子科学技术工作人员的参考书。

中国科学院院士 郑有炘

2005年10月8日

# 前 言

自从晶体管和集成电路发明以来,微电子科学技术迅速发展,已经“改变了世界”。电子器件理论是电子科学与技术最基础和最重要的专业知识之一,晶体管是最重要和应用最多的电子器件,由其发展和组成的集成电路已广泛应用于计算机、通信等许多科技领域,推动着科学技术的发展。微电子器件基础是电子科学与技术专业的核心专业课程之一,作者编著本书作为教材以适应电子器件理论教学的需要,为相关领域的科学研究人员和工程技术人员提供参考。教学中可根据需要和课时选用部分章节。

该书对双极型晶体管、金属-氧化物-半导体场效应管和一些其他器件的结构、原理、特性和参数,在宏观和微观、定性和定量上进行详细讨论,分析器件内部载流子运动和电荷变化的规律,找出器件特性与结构、材料、工艺的关系,深入了解器件的本质,为微电子器件的研究、设计、制造和应用奠定理论基础。

作者在编著本书过程中,参考了大量的相关教材和文献资料,选用了一些研究成果和图表数据,这些参考文献不在书中一一列举,而统一将目录列于书末。本书由湖南大学出版社出版基金资助出版,特此表示衷心感谢。

理论和技术不断发展,而作者水平有限,本书如存在需要完善之处,热忱欢迎读者赐予宝贵意见。

曾 云

2005年10月于长沙岳麓山

# 主要符号表

$A$	结面积	$BV_{CBO}$	发射极开路,集电极与基极间的击穿电压
$A_C$	集电结面积	$A_E$	发射结面积
$BV_{CEO}$	基极开路,集电极与发射极间的击穿电压	$BV_{CES}$	基极短路时,集电极与发射极间的击穿电压
$BV_{EBO}$	集电极开路,发射极与基极间的击穿电压	$C$	比热容
$C_0$	零偏势垒电容	$C_D$	PN结扩散电容
$C_{DS}$	MOSFET漏源电容	$C_{GS}$	MOSFET栅源电容
$C_n$	管壳寄生电容	$C_p$	延伸电极电容
$C_{ox}$	MOSFET氧化层的电容	$C_T$	PN结势垒电容,晶体管的热容
$d$	MOSFET沟道厚度	$D_n$	电子扩散系数
$D_{nb}$	基区电子扩散系数	$D_p$	空穴扩散系数
$D_{pc}$	集电区空穴扩散系数	$D_{pc}$	发射区空穴扩散系数
$E_C$	导带底能量	$E_F$	费米能级
$E_i$	本征能级	$E_{Fn}$	电子费米能级
$E_{Fp}$	空穴费米能级	$E_g$	禁带宽度
$E_{SB}$	二次击穿触发能量	$E_V$	价带顶能量
$f_M$	最高振荡频率	$f_T$	特征频率
$f_a$	共基极截止频率	$f_\beta$	共射极截止频率
$G$	产生率	$g$	电导
$g_D$	PN结电导, MOSFET的增量电导	$g_m$	MOSFET的跨导
$G_P$	晶体管功率增益	$G_V$	晶体管电压增益
$h_{FE}$	共射极电流增益	$I_0$	PN结反向饱和电流
$I_B$	晶体管基极电流	$i_b$	基极交流电流
$I_{BS}$	临界饱和基极电流	$I_{BX}$	过驱动基极电流

$I_C$	晶体管集电极电流	$i_c$	集电极交流电流
$I_{CBO}$	发射极开路,集电极与基极间反向电流	$I_{CEO}$	基极开路,集电极与发射极间反向电流
$I_{CM}$	晶体管集电极最大电流	$i_D$	PN 结瞬态电流 MOSFET 漏极瞬态电流
$I_{DS}$	MOSFET 的漏源电流	$I_{DSS}$	MOSFET 的漏源饱和电流
$I_E$	晶体管发射极电流	$i_e$	发射极交流电流
$I_{EBO}$	集电极开路,发射极与基极间反向电流	$I_F$	PN 结正向电流
$I_G$	空间电荷区产生电流	$I_{nc}$	NPN 晶体管集电结收集电流
$I_{nc}$	NPN 晶体管发射区注入基区电子电流	$I_{pc}$	NPN 晶体管基区注入发射区的空穴电流
$I_R$	PN 结反向电流	$I_{SR}$	表面复合电流
$I_{SB}$	二次击穿临界电流		
$I_{VB}$	基区体内复合电流	$J_G$	基区扩展效应临界电流密度
$J_E$	基区电导调制效应临界电流密度	$j_n$	电子电流密度
$j_{nb}$	基区电子电流密度	$j_{nc}$	到达集电结电子电流密度
$j_{nc}$	发射区注入基区电子电流密度	$j_p$	空穴电流密度
$j_{pc}$	通过集电结空穴电流密度	$j_{pe}$	基区注入发射区空穴电流密度
$j_R$	反向电流密度	$K_{pm}$	最大功率增益
$K_V$	电压增益	$L$	MOSFET 的沟道长度
$L_e$	发射极条长	$L_{eff}$	有效沟道长度
$L_n$	电子扩散长度	$L_{nb}$	基区电子扩散长度
$L_p$	空穴扩散长度	$L_{pc}$	集电区空穴扩散长度
$L_{pe}$	发射区空穴扩散长度	$M$	倍增因子
$m$	超相移因子,杂质分布指数	$n$	电子浓度,变容二极管指数
$N_A$	受主杂质浓度	$N_B$	基区杂质浓度
$N_{DC}$	衬底杂质浓度		
$N_C$	导带底有效态密度,集电区杂质浓度	$N_D$	施主杂质浓度
$N_{eff}$	有效杂质浓度	$n_i$	本征载流子浓度

$n_n$	N 区平衡电子浓度	$n_p$	P 区平衡电子浓度
$n_{p0}$	P 型基区平衡电子浓度	$N_s$	扩散层表面浓度
$N_V$	价带顶有效态密度	$p$	空穴浓度
$P_C$	晶体管的耗散功率	$P_D$	直流电源供给晶体管的功率
$p_n$	N 区平衡空穴浓度	$p_{n0}$	N 型发射区空穴浓度
$p_{n0}$	N 型集电区空穴浓度	$P_O$	晶体管的输出功率
$p_p$	P 区平衡空穴浓度	$P_{SB}$	晶体管二次击穿临界功率
$q$	电子电量	$Q_B$	晶体管基区存储电荷
$Q_{BX}$	基区超量存储电荷	$Q_{CX}$	集电区超量存储电荷
$Q_{ox}$	MOSFET 氧化层中的电荷电量	$Q_X$	超量存储电荷
$R$	净复合率	$r_b$	基极电阻
$r_{cs}$	集电极串联电阻	$R_D$	MOSFET 漏区串联电阻
$r_e$	发射区体电阻	$R_g$	MOSFET 的有效沟道电阻
$R_s$	MOSFET 源极串联电阻	$R_T$	晶体管的热阻
$R_{\square B}$	基区扩散区方块电阻	$R_{\square b}$	基区方块电阻
$R_{\square e}$	发射区方块电阻	$S$	晶体管的饱和深度, 表面复合速度
$S_b$	基极金属电极条宽	$S_e$	发射极条宽
$S_{eb}$	基极与发射极间的距离	$S_{eff}$	发射极有效条宽
$t$	扩散时间	$t_d$	晶体管延迟时间, 载流子穿过势垒区时间
$t_f$	晶体管下降时间	$T_{jm}$	晶体的最高结温
$t_{off}$	晶体管关断时间	$t_{on}$	晶体管开启时间
$t_{ox}$	MOSFET 栅氧化层厚度	$t_r$	晶体管上升时间
$t_s$	PN 反向恢复时间, 晶体管存储时间	$V_A$	PN 结外加电压
$V_B$	PN 结击穿电压	$V_{BC}$	集电结电压
$V_{BE}$	发射结电压	$V_{BS}$	MOSFET 源与衬底间反偏电压
$V_C$	集电结偏置电压	$V_{CE}$	集电极与发射极之间的电压
$V_{CES}$	晶体管的饱和压降	$V_D$	PN 结接触电势差
$V_{DS}$	MOSFET 漏源电压	$V_{DSS}$	MOSFET 饱和漏源电压
$V_E$	发射结偏置电压	$V_{EA}$	厄尔利电压
$V_F$	PN 结正向电压	$V_{FB}$	平带电压



$V_{GS}$	MOSFET 的栅源电压	$V_j$	PN 结实际压降
$V_m$	金属半导体功函数差	$V_P$	MOSFET 的夹断电压
$V_{PB}$	基区穿通电压	$V_R$	PN 结反向偏置电压
$V_{SB}$	晶体管二次击穿临界电压	$V_s$	半导体表面势
$V_T$	MOS 场效应管阈值电压	$W$	电子电位能
$W_b$	基区宽度	$W_C$	集电区厚度, MOSFET 栅下沟道电荷区厚度
$x_j$	PN 结结深	$x_{jc}$	集电结结深
$x_{jc}$	发射结结深	$x_m$	耗尽层宽度
$y$	导纳	$\alpha$	晶体管共基极电流放大系数, 吸收系数
$\alpha_0$	共基直流电流放大系数	$\alpha^*$	集电区倍增因子
$\alpha_i$	电离率	$\alpha_c$	集电结衰减因子
$\alpha_j$	杂质浓度梯度	$\alpha_R$	共基极反向电流放大系数
$\beta$	共发射极电流放大系数	$\beta_0$	共射直流电流放大系数
$\beta_R$	共射极反向电流放大系数	$\beta^*$	基区输运系数
$\gamma$	发射效率	$E$	电场强度
$E_b$	基区自建电场强度	$E_{mb}$	雪崩击穿临界电场强度
$\eta$	电场因子, 晶体管的转换效率	$\mu_n$	电子迁移率
$\mu_p$	空穴迁移率	$\rho$	电荷密度
$\sigma_n$	电子电导率	$\sigma_p$	空穴电导率
$\tau$	载流子寿命	$\tau_B$	晶体管基极时间常数
$\tau_b$	载流子通过基区的平均时间	$\tau_C$	晶体管集电极时间常数
$\tau_c$	集电极延迟时间	$\tau_{cs}$	晶体管集电区过饱和时间常数
$\tau_E$	晶体管发射极时间常数	$\tau_e$	发射效率延迟时间
$\tau_n$	电子寿命	$\tau_{nb}$	基区电子寿命
$\tau_p$	空穴寿命	$\tau_{pc}$	集电区空穴寿命
$\tau_{pc}$	发射区空穴寿命	$\tau_x$	晶体管过饱和时间常数
$v_s$	载流子极限饱和和漂移速度	$\phi$	电位, 电势
$\psi_F$	费米势	$\varphi_m$	金属功函数
$\varphi_s$	半导体功函数	$\omega$	频率
$\epsilon$	半导体介电系数	$\epsilon_0$	真空介电常数
$\epsilon_{ox}$	氧化层介电常数		

# 目 次

## 第 1 章 PN 结二极管

第 1 节 PN 结杂质浓度分布 .....	(1)
1 突变结 .....	(1)
2 缓变结 .....	(2)
第 2 节 平衡 PN 结 .....	(4)
1 空间电荷区 .....	(4)
2 能带图 .....	(5)
3 接触电势差 .....	(8)
4 载流子浓度 .....	(8)
第 3 节 PN 结空间电荷区电场和电位分布 .....	(10)
1 突变结 .....	(11)
2 线性缓变结 .....	(13)
3 耗尽层近似讨论 .....	(15)
第 4 节 PN 结势垒电容 .....	(16)
1 突变结势垒电容 .....	(17)
2 线性缓变结势垒电容 .....	(18)
第 5 节 PN 结直流特性 .....	(19)
1 PN 结非平衡载流子注入 .....	(20)
2 PN 结反向抽取 .....	(21)
3 准费米能级和载流子浓度 .....	(22)
4 直流电流电压方程 .....	(24)
5 影响 PN 结直流特性的其他因素 .....	(29)
6 温度对 PN 结电流电压的影响 .....	(37)
第 6 节 PN 结小信号交流特性与开关特性 .....	(39)
1 小信号交流特性 .....	(39)

2 开关特性·····	(44)
第7节 PN结击穿特性·····	(47)
1 基本击穿机构·····	(47)
2 雪崩击穿电压·····	(49)
3 影响雪崩击穿电压的因素·····	(55)
习题一·····	(59)

## 第2章 特殊二极管

第1节 变容二极管·····	(61)
1 PN结电容和变容二极管·····	(61)
2 电容电压特性·····	(63)
3 变容二极管基本特性·····	(66)
4 特殊变容二极管·····	(71)
第2节 隧道二极管·····	(73)
1 隧道过程的定性分析·····	(73)
2 隧道几率和隧道电流·····	(75)
3 等效电路及特性·····	(78)
4 反向二极管·····	(79)
第3节 雪崩二极管·····	(79)
1 崩越二极管工作原理·····	(80)
2 崩越二极管的特性·····	(83)
3 几种崩越二极管·····	(85)
4 俘越二极管·····	(88)
5 势越二极管·····	(92)
习题二·····	(95)

## 第3章 晶体管的直流特性

第1节 晶体管基本结构与放大机理·····	(96)
1 晶体管结构与杂质分布·····	(96)
2 晶体管放大机理·····	(98)

第2节 晶体管直流电流电压方程	(101)
1 均匀基区晶体管	(101)
2 缓变基区晶体管	(105)
第3节 晶体管电流放大系数与特性曲线	(109)
1 电流放大系数	(109)
2 特性曲线	(112)
3 电流放大系数理论分析	(115)
4 影响电流放大系数的其他因素	(117)
第4节 晶体管反向电流与击穿电压	(121)
1 晶体管反向电流	(121)
2 晶体管击穿电压	(123)
第5节 晶体管基极电阻	(128)
1 梳状晶体管基极电阻	(128)
2 圆形晶体管基极电阻	(131)
习题三	(133)

## 第4章 晶体管频率特性与开关特性

第1节 晶体管频率特性理论分析	(135)
1 晶体管频率特性参数	(135)
2 共基极电流放大系数与截止频率	(136)
3 共射极电流放大系数与频率参数	(142)
第2节 晶体管高频参数与等效电路	(146)
1 交流小信号电流电压方程	(146)
2 晶体管Y参数方程及其等效电路	(148)
3 晶体管h参数方程及其等效电路	(151)
4 晶体管高频功率增益和最高振荡频率	(153)
第3节 晶体管的开关过程	(155)
1 开关晶体管静态特性	(155)
2 晶体管的开关过程	(156)
3 晶体管的开关参数	(158)

第4节 Ebers-Moll模型和电荷控制方程 .....	(159)
1 Ebers-Moll模型及等效电路 .....	(159)
2 电荷控制方程 .....	(161)
第5节 晶体管开关时间 .....	(163)
1 延迟时间 .....	(163)
2 上升时间 .....	(164)
3 存储时间 .....	(166)
4 下降时间 .....	(170)
习题四 .....	(172)

## 第5章 晶体管的功率特性

第1节 基区电导调制效应 .....	(174)
1 注入对基区载流子分布的影响 .....	(174)
2 大注入对电流放大系数的影响 .....	(178)
3 大注入对基区渡越时间的影响 .....	(180)
4 大注入临界电流密度 .....	(181)
第2节 有效基区扩展效应 .....	(182)
1 注入电流对集电结空间电荷区电场分布的影响 .....	(182)
2 基区扩展 .....	(184)
第3节 发射极电流集边效应 .....	(187)
1 基区横向压降 .....	(187)
2 发射极有效条宽 .....	(189)
3 发射极单位周长电流容量 .....	(190)
4 发射极金属条长 .....	(190)
第4节 晶体管最大耗散功率 .....	(191)
1 耗散功率和最高结温 .....	(191)
2 晶体管的热阻 .....	(193)
3 晶体管最大耗散功率 .....	(195)
第5节 晶体管二次击穿和安全工作区 .....	(196)
1 二次击穿现象 .....	(196)

2 二次击穿的机理和防止二次击穿的措施 .....	(197)
3 晶体管的安全工作区(SOA) .....	(201)
习题五 .....	(202)

## 第6章 晶闸管

第1节 晶闸管基本结构与工作原理 .....	(203)
1 基本结构及静态分析 .....	(203)
2 工作原理 .....	(205)
3 电流电压特性 .....	(208)
第2节 晶闸管导通特性 .....	(211)
1 定性描述 .....	(211)
2 导通特性曲线的不同区域 .....	(213)
3 影响导通特性的其他因素 .....	(215)
第3节 晶闸管阻断能力 .....	(216)
1 反向阻断能力 .....	(216)
2 正向阻断能力 .....	(217)
3 表面对阻断能力的影响 .....	(217)
第4节 晶闸管关断特性 .....	(218)
1 载流子存储效应 .....	(219)
2 改善关断特性的措施 .....	(220)
第5节 双向晶闸管 .....	(222)
1 二极管晶闸管 .....	(222)
2 控制极结构及触发 .....	(223)
习题六 .....	(226)

## 第7章 MOS场效应晶体管

第1节 MOSFET的结构、分类和特性曲线 .....	(227)
1 MOSFET的结构 .....	(227)
2 MOSFET的类型 .....	(229)
3 MOSFET的特性曲线 .....	(232)

第 2 节	MOSFET 的阈值电压 .....	(235)
1	阈值电压的定义 .....	(235)
2	理想 MOSFET 阈值电压 .....	(236)
3	MOSFET 阈值电压 .....	(237)
第 3 节	MOSFET 电流电压特性 .....	(238)
1	线性工作区电流电压特性 .....	(239)
2	饱和工作区电流电压特性 .....	(240)
3	击穿区 .....	(241)
4	亚阈值区的电流电压关系 .....	(242)
第 4 节	MOSFET 的二级效应 .....	(243)
1	迁移率变化效应 .....	(244)
2	衬底偏置效应 .....	(244)
3	体电荷变化效应 .....	(246)
第 5 节	MOSFET 的频率特性 .....	(247)
1	增量参数 .....	(248)
2	小信号特性与等效电路 .....	(251)
3	截止频率 .....	(252)
第 6 节	MOSFET 的功率特性 .....	(254)
1	MOSFET 的极限参数 .....	(254)
2	功率 MOSFET 的结构 .....	(256)
第 7 节	MOSFET 的温度特性 .....	(260)
1	温度对载流子迁移率的影响 .....	(260)
2	温度对阈值电压的影响 .....	(260)
3	温度对漏源电流的影响 .....	(261)
4	温度对跨导和漏导的影响 .....	(262)
第 8 节	MOSFET 的小尺寸特性 .....	(262)
1	短沟道效应 .....	(262)
2	窄沟道效应 .....	(266)
3	等比例缩小规则 .....	(268)
习题七	.....	(268)

## 第8章 光电器件与电荷耦合器件

第1节 光电效应	(270)
1 半导体的光吸收	(270)
2 半导体光电效应	(272)
第2节 光电池	(275)
1 基本结构和主要参数	(275)
2 PN结光电池	(277)
3 异质结光电池	(283)
4 金属-半导体结光电池	(289)
5 太阳能电池	(292)
第3节 光敏晶体管	(294)
1 光敏二极管	(294)
2 光敏三极管	(302)
3 光敏场效应管	(305)
4 光控可控硅	(307)
第4节 电荷耦合器件	(309)
1 工作原理	(309)
2 输入与输出	(313)
3 基本特性	(315)
4 CCD摄像器件	(319)
习题八	(321)

## 附录

一、常用物理常数表	(323)
二、锗、硅、砷化镓、二氧化硅的重要性质(300 K)	(323)
三、硅与几种金属的欧姆接触系数 $R_c$	(324)
四、锗、硅电阻率与杂质浓度的关系	(325)
五、迁移率与杂质浓度的关系	(325)
六、扩散结势垒宽度和结电容曲线	(326)
参考文献	(327)



# 第 1 章 PN 结二极管

PN 结是结型半导体器件的心脏,在制造晶体二极管、晶体三极管和场效应晶体管等结型器件时,其主要工艺就是制造性能良好的 PN 结。因此,深入地了解 and 掌握 PN 结的基本理论是学习晶体管等结型器件的基础。本章先分析 PN 结的杂质浓度分布、空间电荷区和能带图;在此基础上,讨论 PN 结的直流、交流和击穿等特性。

## 第 1 节 PN 结杂质浓度分布

在一块 N 型(或 P 型)半导体单晶片上,用适当的方法(如合金法、扩散法、外延生长法、离子注入法)掺入 P 型(或 N 型)杂质,使半导体单晶片内的不同区域分别具有 P 型和 N 型的导电类型,形成 PN 结。其结构如图 1-1 所示。下面简单介绍合金法和扩散法制造 PN 结的杂质分布情况。

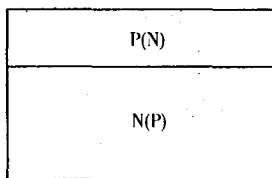


图 1-1 PN 结基本结构

### 1 突变结

由合金法形成的 PN 结杂质浓度分布如图 1-2 所示,衬底 N 区中杂质浓度  $N_D$  均匀分布,再结晶形成的 P 区中杂质  $N_A$  也是均匀分布,在 N 区与 P 区的交界处杂质浓度近似为  $N_A$  突变为  $N_D$ ,具有这种杂质分布的 PN 结称为突变结。如交界处的位置在  $x_j$ ,则突变结的杂质分布可表示为

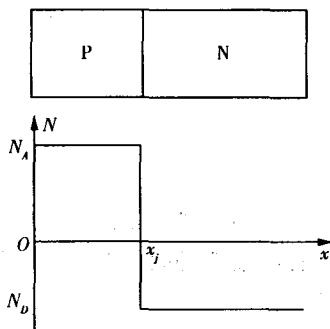


图 1-2 合金结的杂质分布