

邮 电 高 等 学 校 教 材

半 导 体 电 路

上 册

(修 订 本)

南 京 邮 电 学 院

郭 祥 诤 主 编



人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

本书是《半导体电路》一书的上册。共七章。主要讲解半导体器件的基本原理、特性及半导体电路的分析计算；包括半导体二极管和三极管、放大器基础、场效应管及其放大电路、放大器的频率特性、负反馈放大器、集成运算放大器，以及窄带放大器等。每章都有小结、例题，最后附有习题。

邮 电 高 等 学 校 教 材 半 导 体 电 路 上 册 (修订本)

南京邮电学院 郭祥沅主编

责任编辑：刘惠云

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：850×1168 1/32 1985年11月第二版
印张：16 20/32 页数：266 1985年11月河北第1次印刷
字数：436千字 印数：78,001—84,000册

统一书号：15045·总2329—无682

定价：3.40元

前 言

本书是根据邮电部1981年颁发的部属高等院校电子电路教学大纲、在1979年人民邮电出版社出版的《半导体电路》一书基础上修改、补充而成的。1984年8月经邮电部高等院校《通信技术基础》教材编审委员会审定为邮电部高等院校教材。

全书共十二章，分上、下两册。上册主要讲解半导体器件的基本原理和特性，以及线性半导体电路的分析计算，包括半导体二极管和三极管，放大器基础，场效应管及其放大电路，放大器的频率特性，负反馈放大器，集成运算放大器和窄带放大器，共七章。下册主要讲解非线性半导体电路的分析计算，包括非线性电路的分析基础，功率放大器，正弦波振荡器，调制、解调及其电路和整流与稳压电路，共五章。书中每章均附有一定的例题、习题和小结。

参加本书编写工作的有钱秀珍、王汝君、孙志万、万国芸等同志，由郭祥沅同志定稿。翁培德同志参加了全书的讨论和修订。

北京邮电学院、长春邮电学院、重庆邮电学院、西安邮电学院、武汉邮电科学研究所和南京邮电学院的编委会委员以及有关评阅教师对书稿作了认真地审阅，并提出了宝贵的意见，对此表示衷心的感谢。

编 者

1984年10月

目 录

第一章 半导体二极管和三极管	(1)
1-1 半导体的导电特性	(1)
1-1-1 本征半导体	(1)
1-1-2 P型半导体和N型半导体	(5)
1-1-3 载流子的漂移运动和扩散运动	(8)
1-1-4 非平衡载流子的分布	(11)
1-2 PN结特性	(13)
1-2-1 PN结的基本原理	(13)
1-2-2 PN结的电流方程	(16)
1-2-3 PN结电容	(22)
1-3 半导体二极管及其特性参数	(25)
1-3-1 二极管的伏安特性	(26)
1-3-2 二极管直流电阻和交流电阻	(29)
1-3-3 二极管的参数和类型	(32)
1-4 晶体管的工作原理和特性	(34)
1-4-1 晶体管的放大作用	(35)
1-4-2 晶体管的电流分配	(39)
1-4-3 晶体管各极电流公式	(44)
1-4-4 晶体管的特性曲线	(47)
1-4-5 晶体管的参数	(54)
1-4-6 温度对晶体管参数的影响	(60)
1-4-7 晶体管的种类和特点	(62)
本章小结	(67)
附 录	(69)
习 题	(70)

第二章 放大器基础	(74)
2-1 放大电路的基本分析方法	(74)
2-1-1 单管放大电路的组成及其工作原理	(74)
2-1-2 放大电路的图解分析法	(82)
2-1-3 晶体管的 h 参数等效电路	(89)
2-1-4 放大电路的等效电路分析法	(95)
2-1-5 h 参数等效电路的简化	(100)
2-2 工作点的稳定	(108)
2-2-1 静态工作点变动的的原因及其影响	(109)
2-2-2 分压式电流负反馈偏置的放大电路	(111)
2-2-3 分压式电流负反馈偏置放大电路的设计计算	(114)
2-2-4 工作点稳定的其它方式	(117)
2-3 几种基本的单元放大电路	(122)
2-3-1 射极输出器(共集放大电路)	(122)
2-3-2 共基放大电路	(125)
2-3-3 共射、共集、共基三种放大电路的性能比较	(128)
2-3-4 高输入电阻的放大电路	(129)
2-3-5 变量器耦合放大电路	(136)
2-3-6 直接耦合双管放大电路	(140)
2-4 多级放大器	(145)
2-4-1 级间耦合方式	(145)
2-4-2 多级放大器的组成	(147)
本章小结	(148)
习 题	(150)
第三章 场效应管及其放大电路	(163)
3-1 结型场效应管	(163)
3-1-1 工作原理	(163)

3-1-2	特性曲线	(166)
3-2	绝缘栅场效应管	(170)
3-2-1	耗尽型MOS管的工作原理	(171)
3-2-2	增强型MOS管的工作原理	(172)
3-2-3	MOS管的类型	(174)
3-3	场效应管参数和等效电路	(174)
3-4	场效应管的特点和安全使用	(179)
3-4-1	场效应管的安全使用	(179)
3-4-2	场效应管的特点	(181)
3-5	场效应管放大电路	(182)
3-5-1	场效应管的三种连接方式	(182)
3-5-2	场效应管放大器的偏置电路	(182)
3-5-3	场效应管共源放大电路	(187)
3-5-4	场效应管源极输出器	(188)
*3-5-5	场效应管与晶体管混合的跟随器	(189)
本章小结		(192)
习 题		(193)
第四章	放大器的频率特性	(197)
4-1	放大器的频率响应	(197)
4-1-1	频率响应和频率失真	(197)
4-1-2	放大器的频带	(200)
4-1-3	放大倍数的分贝 (或奈培) 数	(201)
4-2	网络函数和频率响应	(205)
4-2-1	网络函数和零点、极点	(205)
4-2-2	极点或自然频率的求法	(208)
4-2-3	频率特性的近似图示法	(211)
4-3	单级RC耦合晶体管放大器的低频段频率特性	(227)
4-4	单级RC耦合晶体管放大器的高频段频率特性	(244)
4-4-1	晶体管的混合 π 型等效电路	(245)

4-4-2	高频段的频率特性	(252)
4-5	RC耦合多级放大器的频率特性	(260)
4-5-1	中频段的电压增益	(260)
4-5-2	低频段的频率特性	(261)
4-5-3	高频段的频率特性	(262)
*4-6	变量器耦合放大器的频率特性	(266)
4-6-1	变量器的频率特性	(267)
4-6-2	输入变量器耦合放大器的频率特性	(268)
4-7	射极输出器的频率特性	(277)
4-7-1	低频段频率特性	(277)
4-7-2	高频段频率特性	(279)
4-8	展宽频带的方法	(282)
4-8-1	共射放大电路增益与带宽的关系	(282)
4-8-2	采用电抗元件补偿高频特性	(283)
4-8-3	组合电路展宽频带	(287)
*4-9	放大器的阶跃响应	(289)
本章小结		(293)
习 题		(294)
第五章	负反馈放大器	(302)
5-1	负反馈放大器的基本概念	(303)
5-1-1	负反馈放大器的方框组成	(303)
5-1-2	负反馈放大器的电路形式及其判别	(304)
5-1-3	负反馈放大器的基本关系式	(309)
5-2	负反馈对放大器特性的影响	(314)
5-2-1	负反馈使增益稳定性提高	(314)
5-2-2	负反馈可展宽放大器的频带	(316)
5-2-3	负反馈减小放大器的非线性失真	(318)
5-2-4	负反馈对噪声的影响	(321)
5-2-5	负反馈对放大器输入电阻和输出电阻的影响	

.....	(323)
5-2-6 负反馈放大器特性小结	(328)
5-3 负反馈放大器的分析计算方法	(329)
5-3-1 直接电路分析法和方框图法	(329)
5-3-2 反馈网络对基本放大器的负载作用	(330)
5-3-3 负反馈放大器的分析计算步骤	(335)
5-4 电流串联负反馈放大器	(336)
5-5 电压并联负反馈放大器	(341)
5-6 电压串联负反馈放大器和电流并联负反馈放大器	(347)
5-6-1 单级电压串联负反馈放大器	(347)
5-6-2 两级电压串联负反馈放大器	(348)
5-6-3 电流并联负反馈放大器	(349)
5-7 混合负反馈放大器	(350)
5-8 负反馈放大器的自激及其防止	(355)
5-8-1 自激的概念	(355)
5-8-2 自激的条件	(357)
5-8-3 防止负反馈放大器自激的方法	(361)
*5-9 负反馈放大器的频率响应和时域响应	(369)
5-9-1 单极点负反馈放大器的频率响应和时域响应	(369)
5-9-2 双极点负反馈放大器的频率响应和时域响应	(370)
5-9-3 三极点负反馈放大器的频率响应和时域响应	(376)
本章小结	(378)
习 题	(379)
第六章 集成运算放大器	(388)
6-1 集成电路的分类和特点	(388)

6-1-1	集成电路的主要类型	(388)
6-1-2	集成电路的特点	(390)
6-2	直流放大器的概念	(391)
6-2-1	级间耦合问题	(391)
6-2-2	零点漂移	(392)
6-3	差动放大器	(393)
6-3-1	差动放大器的基本工作原理	(393)
6-3-2	差动放大器的其它形式	(399)
6-3-3	差动放大器性能的改进	(404)
6-3-4	差动放大器的转移特性	(408)
6-3-5	差动放大器的失调和零点漂移	(410)
6-4	BG301 线性组件的电路及其工作原理	(416)
6-5	集成运算放大器的改进电路	(420)
6-5-1	差动输入电路	(420)
6-5-2	中间级	(422)
6-5-3	输出级电路	(424)
6-5-4	恒流源偏置电路	(426)
6-5-5	F007 (5G24) 组件的工作原理	(430)
6-5-6	4E325 线性组件简介	(432)
6-6	运算放大器的工作原理	(435)
6-6-1	基本放大电路	(435)
6-6-2	运算放大器的误差分析	(440)
6-7	运算放大器的应用	(449)
6-8	几个应用中的问题	(457)
6-8-1	运算放大器的选用	(458)
6-8-2	运算放大器的相位补偿	(458)
6-8-3	运算放大器的阻塞现象	(460)
本章小结		(461)
习 题		(462)

第七章 窄带放大器	(470)
7-1 LC 并联谐振电路基本特性	(472)
7-1-1 谐振曲线和通用谐振方程	(472)
7-1-2 有载时电路的品质因数和通用谐振方程	(476)
7-2 LC 调谐放大器	(478)
7-2-1 调谐放大器的主要技术要求	(478)
7-2-2 简单的LC调谐放大器	(480)
7-2-3 采用部分接入电路的LC调谐放大器	(486)
7-2-4 多级LC单调谐放大器	(493)
7-2-5 双调谐电路放大器	(495)
7-2-6 LC 调谐放大器的稳定性与中和电路.....	(498)
7-3 RC 选频放大器	(501)
7-3-1 双T型选频网络	(502)
7-3-2 RC 选频放大器的组成和特性.....	(505)
本章小结	(510)
习 题	(513)

第一章 半导体二极管和三极管

半导体电路中除了有电阻、电容等元件外，还有二极管、三极管等半导体器件。因此要学习和掌握半导体电路，就必须对半导体器件的基本特性有所了解。

本章主要介绍半导体的导电机理，PN结的特性，三极管电流放大原理以及二极管、三极管的特性和参数。

1-1 半导体的导电特性

自然界中的物质，按导电能力的大小分为导体、半导体和绝缘体三类。金、银、铜和铝等金属的导电性能很好，导电率在 $10^5 S/cm$ 以上，它们都是导体。橡胶、塑料、有机玻璃等物质的导电性能很差，导电率在 $10^{-14} S/cm$ 以下，它们都是绝缘体。半导体的导电性能则介于导体和绝缘体之间，导电率一般为 $10^{-9} \sim 10^2 S/cm$ 。自然界中属于半导体的物质很多，目前常用的半导体材料有硅（Si）、锗（Ge）和砷化镓（GaAs）等。

1-1-1 本征半导体

1. 本征半导体的自由电子和空穴

在研究半导体的导电方式之前，先来看看半导体的原子结构。我们知道，任何元素的原子都是由原子核和分层围绕原子核运动的电子所组成。原子核中的正电荷量与所有核外电子的负电荷量数值相等，整个原子保持电中性。半导体材料硅的原子序数是14，锗是

32, 它们的原子结构模型如图1-1-1(a)(b)所示。由图可见, 硅和锗元素外层都有四个价电子, 它们都是四价元素。为简化起见, 常常把内层电子和原子核看作一个整体, 并用它们的净电荷量来表示, 称为惯性核。这样, 硅和锗原子都可以用带有四个正电荷量的惯性核和四个价电子来表示如图1-1-1(c)所示。

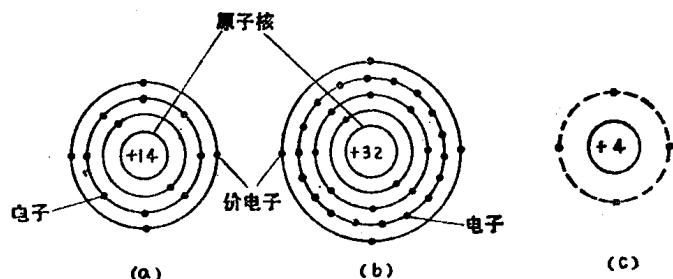


图 1-1-1 硅和锗的原子结构模型

硅或锗材料从原子的排列形式看是晶体结构。纯净的硅或锗材料称为本征半导体, 它们提炼成单晶体后, 原子就排列成具有对称性的周期性点阵。在晶体中, 由于原子间的距离很近, 价电子不仅受到自己原子的吸引, 而且还受到相邻原子的作用, 这就产生了电子运动轨道的交叠, 晶体中的价电子就不再局限于围绕自身原子运动, 它可以由一个原子转移到相邻的原子上去, 因此在硅和锗晶体中, 二个相邻原子各有一个价电子为二个原子所共有, 这种情况称为价电子的共有化, 而这两个价电子则组成了“共价键”。图1-1-2是锗晶体二维的结构示意图, 图中小黑点代表二个相邻原子共有的价电子, 电子边上的连线表示共价键。每个原子从四周原子取得四个价电子, 组成外层八个价电子的稳定状态。

在绝对零度 ($T=0^{\circ}\text{K}$) 和没有外界影响的情况下, 半导体内的价电子全部束缚在共价键中, 因此不存在能自由运动的电子。但是当半导体的温度升高或者受到光线照射时, 共价键中的价电子从外界获得能量, 有一部分将挣脱共价键的束缚成为自由电子; 同时在共价键中留下了相同数量的空位, 称之为空穴, 图1-1-3中用空

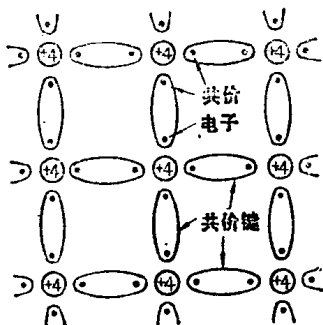


图 1-1-2 锗晶体结构示意图

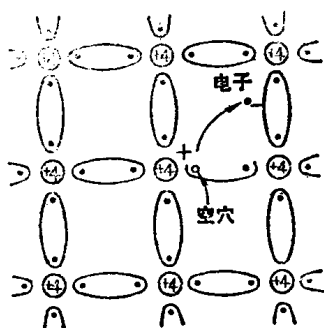


图 1-1-3 电子空穴对

心小圆圈即表示此种空穴。空穴产生后，邻近共价键中的价电子就很容易过去填补，这时空穴便转移到邻近的共价键上去了，而后，新的空穴又被其相邻的价电子填补，这样的过程持续下去，就相当于一个空穴在晶体中移动。显然，共价电子从一处到另一处填补空穴位置的运动与带正电荷的粒子作反方向运动的效果相同。因此，可以把空穴看作带正电荷的粒子，它的电荷量等于电子的电荷量。由此可见，半导体中有自由电子和空穴两种载流子参加导电，这是与导体迥然不同的。

2. 载流子的激发和复合

在一定温度下，由于热能的作用，本征半导体中会不断地产生自由电子，同时则出现数量相等的空穴。自由电子和空穴总是成对产生，常称为电子——空穴对。这种由热能产生电子——空穴对的现象，叫做热激发。自由电子和空穴在运动中又可能重新结合而一起消失，称为复合。在一定温度下，电子——空穴对的激发和复合达到动态平衡，这时，在半导体中热激发和复合虽然继续不断地进行，但电子——空穴对则维持一定的数目，这种状态叫做热平衡。

半导体中载流子的多少用浓度（单位体积中载流子的数目）来表征。本征半导体在热平衡条件下自由电子和空穴的浓度相等，若 $\overline{P}$ 和 $\overline{n}$ 分别表示空穴和自由电子的平衡浓度，则

$$\overline{P} = \overline{n} = n_i$$

n_i 称为本征载流子浓度，其值与温度、材料有关。图 1-1-4 为硅和锗晶体的本征载流子浓度与温度的关系曲线。温度愈高，价电子获得的能量愈大，载流子浓度愈大；同样的温度下，不同材料的 n_i 也不相等，例如在室温 300°K 时，锗的本征载流子浓度约为 $2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ，硅为 $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ，这是因为硅原子的价电子距核较近，它挣脱共价键束缚所需要的能量比锗大。所以在相同温度时，锗晶体中有更多的价电子激发为自由电子，其浓度也就比硅要高出千余倍。但不论硅或锗，它们的载流子数与原子密度相比还是很少的，例如硅的原子密度为 $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ，那么室温下大约每 3×10^{12} 个硅原子才有一个价电子挣脱共价键，而室温下金属中所有的价电子几乎都成了自由电子，所以纯净半导体的导电性能比金属差得多。

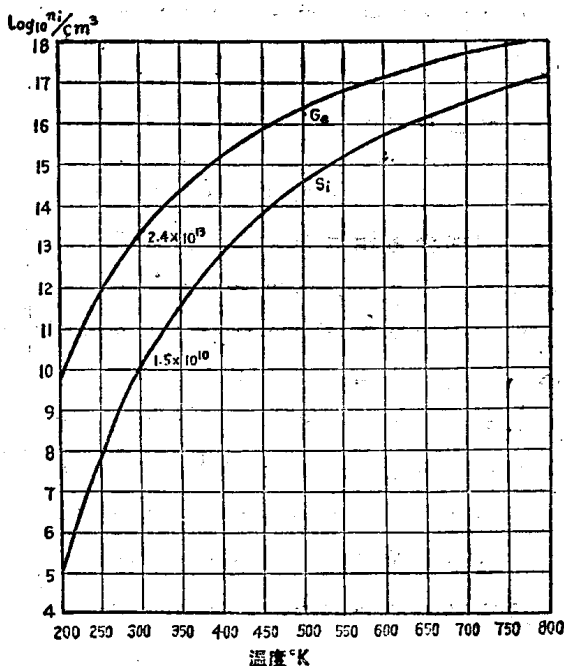


图 1-1-4 n_i 与温度的关系

1-1-2 P型半导体和N型半导体

在本征半导体中人为地掺入少量的其它元素（称为杂质）就可以制成N型或P型半导体，它们统称为杂质半导体。半导体器件都是采用杂质半体制成的。

1. N型半导体

在本征半导体中掺入少量的五价元素如磷、砷、锑等便成为N型半导体。例如在硅单晶中掺入微量的磷（P）元素，此时，掺入的磷原子将在晶体中代替某些硅原子的位置如图1-1-5(a)所示。由于磷是五价元素，有五个价电子，其中四个价电子与相邻的四个硅原子的价电子形成共价键，尚剩下一个价电子。这个电子，只受原子核吸引而不受共价键的束缚，因此该电子易于受激而成为自由电子，在室温下此类电子所获得的热能就足以挣脱磷原子核的吸引而变成自由电子，磷原子则因失去一个电子而成为带正电的磷离子，这称为杂质的电离过程。由于在室温下杂质原子都能电离，因此自由电子浓度增加，而磷离子与其它的硅原子一样，被束缚在固定的晶格上，虽然它带有正电但不能象空穴那样起导电作用。磷一类五价元素能施放出电子，所以这类杂质称为施主杂质，电离后的正离子称为施主离子。

在掺杂半导体中，杂质电离和热激发是同时存在的。但是杂质电离与热激发不同，热激发使自由电子和空穴成对产生，而杂质电离，仅产生一种载流子，对磷一类施主杂质，它只产生电子载流子，由于杂质浓度一般都大于本征载流子浓度，例如掺入的施主杂质磷的浓度通常为 10^{18}cm^{-3} ，则杂质电离后电子的浓度也约为 10^{18}cm^{-3} ，要比本征载流子浓度 $1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 大得多，因而在掺入磷一类施主杂质的半导体中，电子浓度比空穴浓度要大得多，所以通常就称它为N型（或电子型）半导体。在N型半导体中自由电子是

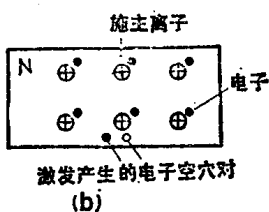
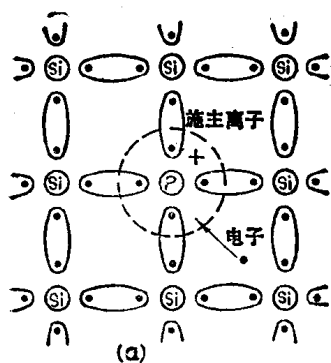


图 1-1-5 N型半导体

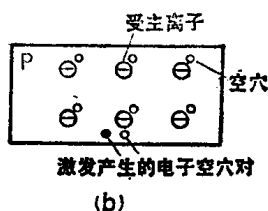
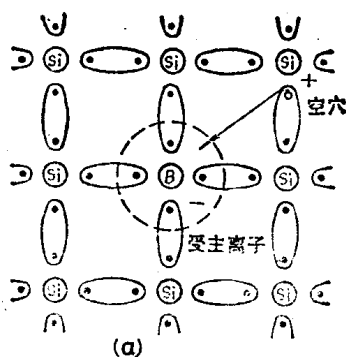


图 1-1-6 P型半导体

多数载流子（简称多子），空穴则是少数载流子（简称少子），为简化起见，N型半导体也可形象地以图1-1-5(b)表示。

2. P型半导体

在本征半导体中掺入少量的三价元素如硼、镓、铝等便成为P型半导体。例如在硅中掺入少量的硼元素（B），由于硼是三价元素，有三个价电子，硼原子代替硅原子的位置时，只能和三个相邻硅原子的价电子构成共价键，第四个相邻的硅原子则不能构成完整的共价键，见图 1-1-6(a)，它缺少一个电子，也就是出现了一个空位，这个空位极易接受其它硅原子共价键中的电子，使硼原子成为带负电的离子，而原来的共价键因缺少一个电子，形成了空穴。如图中的空心小圈所示。硼一类的三价元素起着接受电子的作用，故称为受主杂质，电离后的负离子则称为受主离子。掺有受主杂质的半导体中，空穴的浓度远大于自由电子的浓度，故空穴成为

多数载流子，自由电子则为少数载流子，这种半导体称为P型（或空穴型）半导体，它可简化成图1-1-6(b)。

实际上在本征半导体中很可能同时掺进两种杂质。这时，半导体的类型决定于浓度较大的杂质。假定受主杂质多于施主杂质，空穴抵消一部分电子后仍为多数载流子，这时得到P型半导体，反之，则得到N型半导体。这个现象称为杂质的补偿作用，在制造工艺上非常有用。

3. 平衡载流子浓度

不管是本征半导体还是掺杂半导体，在未受到电场或高能辐射等外界影响时称半导体处于平衡状态。在平衡状态下的半导体中，其载流子之间有以下两个关系：

(1) 热平衡条件

可以证明，无论掺杂程度如何，当温度一定时，两种载流子浓度的乘积保持一定，它等于该温度下，本征载流子浓度的平方，即

$$\overline{p} \overline{n} = n_i^2 \quad (1-1)$$

或

$$\begin{cases} \overline{p}_n \overline{n}_n = n_i^2 & (\text{对N型半导体}) \\ \overline{p}_p \overline{n}_p = n_i^2 & (\text{对P型半导体}) \end{cases}$$

例如N型硅半导体中掺入的施主杂质浓度 $N_D = 1.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，这时自由电子的浓度也近似为 $1.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，因为硅材料室温下 $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ，根据(1-1)式计算得到空穴的浓度为 $1.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ，比本征载流子浓度要低得多。空穴浓度大大下降的原因是N型半导体自由电子浓度大大增加，而使空穴和自由电子复合机会大为增加的缘故。图1-1-7示出了在平衡状态下这种N型半导体与本征半导体的载流子浓度分布的比较。可以看出，掺入微量杂质后，多数载流子的浓度比本征半导体的载流子浓度大大增加，从而使半导体的导电性能大大增强。

(2) 电中性条件