

内 容 简 介

本书是参照原高等学校工科电工教材编审委员会审订的《电子线路(I)(II)教学大纲》(草案)有关线性电子线路部分编写的,全书包括晶体二极管的基本特性、晶体三极管的基本特性、场效应管的基本特性、基本放大电路、负反馈放大器、放大器的频率响应、小信号带通放大器、集成运算放大器、集成运算放大器的应用。书中编入较多的例题和习题,部分习题附有答案。

本书可作为高等学校无线电技术类专业“线性电子线路”课程的教材,也可供从事电子技术工作的科技人员参考。

本书经原高等学校工科电工教材编审委员会电子线路编审小组委托魏志源副教授主审,张肃文教授复审,同意作为试用教材出版。

高等学校试用教材

线性电子线路

阎凤坛 王 周 卞祖富 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京第二新华印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 17.875 字数 432 000

1987年10月第1版 1987年10月第1次印刷

印数 00 001—5 145

书号 15010·0880 定价 3.55元

前 言

本书参照原高等学校电工教材编审委员会 1980 年 6 月审订的《电子线路(I)(II)教学大纲》(草案)有关线性电子线路部分,经过几年来的教学实践,在北京工业学院电子工程专业原《线性电子线路》讲义的基础上编写的。

考虑到近年来电子技术的发展,在编写过程中,力图贯彻集成电路为主的原则。为此,本书一方面适当压缩了原大纲规定的某些分立元件电路的内容,如低频功率放大器从原来占一章的篇幅压缩到一节,并结合集成运算放大器输出级进行讨论;另一方面,适当增加了原大纲没有规定的集成运放应用电路,如模拟乘法器、有源滤波器和电压比较器等内容。

计算机辅助分析(CAA)开辟了电子线路分析的新途径,为了适应它的发展,本书在压缩原大纲规定的某些半导体物理基础内容的同时,增加了进行计算机辅助分析所需要的器件模型。

本书可作为无线电技术类专业《线性电子线路》课程的教材。全部内容可在 80 学时内授完。重点放在基本概念、基本原理和基本分析方法上。在进行电路分析时,主要采用忽略次要因素的工程近似方法,这不但使分析简化,突出基本概念,而且易于得出反映电路主要性能的明确结论。

根据几年来的教学实践,为了巩固和加深学生对基本概念的理解,增强分析问题和解决问题的能力,本书编入了较多的例题和习题。

本书第一、二、三、四章由阎凤坛编写,第五、六章由王周编写,第七、八、九章由卞祖富编写。

本书经原高等学校工科电工教材编审委员会电子线路编审小组委托魏志源副教授主审，张肃文教授复审，他们都提出了许多宝贵意见。这些意见对本书的编写帮助很大，在此表示衷心的感谢。

在编写过程中，我院俞宝传教授给予热情地指导和帮助，审阅了全书的初稿，提出了许多修改意见。同时，还得到教研室同志们的大力支持和帮助，在此一并致谢。

由于编者水平有限，书中缺点和错误一定不少，恳请读者不吝指正。

编 者

1986年10月

目 录

第一章 晶体二极管的基本特性	1
§ 1-1 半导体物理基础.....	1
1-1-1 本征半导体.....	1
1-1-2 杂质半导体.....	9
1-1-3 半导体中的漂移电流和扩散电流.....	12
§ 1-2 PN 结.....	17
1-2-1 动态平衡时的 PN 结.....	17
1-2-2 PN 结的单向导电性.....	23
1-2-3 PN 结的击穿.....	31
1-2-4 PN 结电容.....	34
§ 1-3 晶体二极管.....	37
1-3-1 二极管的结构.....	37
1-3-2 二极管的伏安特性.....	33
1-3-3 二极管的主要参数及小信号模型.....	40
习题.....	42
参考文献.....	44
第二章 晶体三极管的基本特性	45
§ 2-1 概述.....	45
§ 2-2 三极管在放大区的工作原理.....	47
2-2-1 三极管内部载流子的传输过程.....	47
2-2-2 三极管各极直流电流传输关系.....	49
§ 2-3 埃伯尔斯-莫尔(Ebers-Moll)模型.....	53
2-3-1 埃伯尔斯-莫尔模型的建立.....	53
2-3-2 三极管外加电压对各极电流的控制作用.....	58
§ 2-4 三极管的伏安特性曲线.....	63
2-4-1 共发射极伏安特性曲线.....	63

2-4-2 共基极伏安特性曲线	70
2-4-3 三极管的结电容和 EM_2 模型	74
2-4-4 三极管的主要参数及温度特性	76
习题	80
参考文献	82
第三章 场效应管的基本特性	83
§ 3-1 绝缘栅场效应管	83
3-1-1 增强型 MOS 场效应管	83
3-1-2 耗尽型 MOS 场效应管	94
§ 3-2 结型场效应管	99
3-2-1 结型场效应管的结构和工作原理	99
3-2-2 结型场效应管的伏安特性曲线	100
§ 3-3 场效应管的主要参数及模型	105
3-3-1 场效应管的主要参数	105
*3-3-2 场效应管的模型	107
§ 3-4 VMOS 场效应管	109
习题	111
参考文献	113
第四章 基本放大电路	114
§ 4-1 放大器的基本原理和分析方法	114
4-1-1 放大器的基本原理	114
4-1-2 放大器的基本分析方法	121
§ 4-2 晶体管的小信号模型	132
4-2-1 混合 π 模型	132
4-2-2 H 参数模型	140
4-2-3 Y 参数模型	146
§ 4-3 基本放大电路的性能分析	147
4-3-1 放大器的主要性能指标	147
4-3-2 共发射极放大电路	151
4-3-3 共集电极放大电路	155

4-3-4 共基极放大电路	159
4-3-5 三种组态放大器的性能比较	162
§ 4-4 晶体管放大器的偏置电路	165
4-4-1 温度对静态工作点的影响	165
4-4-2 稳定工作点的偏置电路	167
§ 4-5 场效应管放大电路	171
4-5-1 场效应管偏置电路	171
4-5-2 场效应管的小信号模型	174
4-5-3 场效应管放大器的性能分析	175
§ 4-6 多级小信号放大器	181
4-6-1 放大器噪声的基本概念	181
4-6-2 多级放大器构成的基本问题	186
4-6-3 多级放大器的增益	191
习题	194
参考文献	209
第五章 负反馈放大器	210
§ 5-1 反馈的基本概念	210
5-1-1 放大电路中的反馈	210
5-1-2 负反馈放大器的方框图和基本反馈方程式	212
5-1-3 负反馈放大器的四种类型	215
5-1-4 反馈性质和类型的判别	218
§ 5-2 负反馈对放大器性能的影响	222
5-2-1 输入电阻	222
5-2-2 增益及其稳定性	224
5-2-3 输出电阻	227
5-2-4 减小非线性失真	230
§ 5-3 负反馈放大器的分析方法	232
5-3-1 电压并联负反馈放大器	232
5-3-2 电流串联负反馈放大器	235
5-3-3 负反馈放大器的拆环法则	239
§ 5-4 负反馈放大电路的分析与计算	240

5-4-1	电流串联负反馈放大电路	240
5-4-2	电压并联负反馈放大电路	243
5-4-3	电压串联负反馈放大电路	245
5-4-4	电流并联负反馈放大电路	248
	习题	252
	参考文献	258
第六章	放大器的频率响应	259
§ 6-1	概 述	259
6-1-1	放大电路的频率响应	259
6-1-2	放大电路的阶跃响应	262
§ 6-2	频率响应的分析方法	263
6-2-1	传递函数与极零点	264
6-2-2	频率响应曲线	269
6-2-3	系统的上、下限频率	280
§ 6-3	三种基本组态放大电路的频率响应	285
6-3-1	共发射极放大电路的频率响应	285
6-3-2	共集电极放大电路的频率响应	299
6-3-3	共基极放大电路的频率响应	302
§ 6-4	宽频带放大电路	307
6-4-1	组合电路	307
6-4-2	高频补偿电路	309
§ 6-5	负反馈放大电路的频率响应和稳定性	312
6-5-1	负反馈对放大电路频率特性的影响	313
6-5-2	负反馈放大电路的稳定性和相位补偿	320
	习题	331
	参考文献	337
第七章	小信号带通放大器	338
§ 7-1	引 言	338
7-1-1	特性与功能	338
7-1-2	主要技术指标	339

7-1-3 构成框图	340
§ 7-2 单调谐回路带通放大器	341
7-2-1 电路	341
7-2-2 小信号等效电路	343
7-2-3 性能分析	346
7-2-4 中心频率相同的多级单回路带通放大器	354
7-2-5 稳定性问题	357
§ 7-3 集中选频式带通放大器	365
附录一 Y 参数与混合 π 参数的换算关系	370
附录二 一些国产晶体管的 Y 参数	371
习题	372
参考文献	374
第八章 集成运算放大器	375
§ 8-1 概述	375
8-1-1 集成电路与运算放大器	375
8-1-2 直流放大器的特殊问题	376
8-1-3 集成运放的构成框图和电路符号	377
§ 8-2 集成化元件的结构特点	378
8-2-1 几种集成化元件结构简介	378
8-2-2 集成化元件的工艺结构特点	382
8-2-3 模拟集成电路的电路结构特点	382
§ 8-3 差分放大电路	383
8-3-1 工作原理	383
8-3-2 基本性能分析	386
8-3-3 差值特性	396
8-3-4 传输特性	401
8-3-5 失调与温度漂移特性	409
§ 8-4 电流源电路	415
8-4-1 基本电流源	415
8-4-2 带有缓冲级的镜象电流源	417
8-4-3 补偿电流源	418

8-4-4	抗电源电压变化的电流源	418
8-4-5	比例电流源	420
8-4-6	微电流源	421
8-4-7	有源负载	423
§ 8-5	单端化与电平移动电路	424
8-5-1	单端化	424
8-5-2	电平移动电路	426
§ 8-6	输出级	428
8-6-1	互补推挽输出级	428
8-6-2	准互补推挽输出级	431
8-6-3	功率、效率和管耗	434
§ 8-7	集成运放的整体电路	438
8-7-1	集成运放的性能参数	438
8-7-2	第一代集成运放 F004 (5G23) 简介	442
8-7-3	第二代集成运放 F007 (5G24) 简介	443
8-7-4	第三代集成运放 4 E325 简介	446
8-7-5	第四代集成运放简介	450
附录一	半导体集成电路型号命名方法 (GB3430-82)	456
附录二	部分国产集成运算放大器的系列、品种	457
附录三	部分国产集成运放参数规范表	458
	习题	460
	参考文献	470
第九章	集成运算放大器的应用	472
§ 9-1	应用原理	472
9-1-1	基本工作方式	472
9-1-2	理想化集成运放器件的基本特性	473
9-1-3	理想运算放大器的一般分析	474
9-1-4	非理想运算放大器的误差分析	478
§ 9-2	模拟运算器	489
9-2-1	加法运算器	489
9-2-2	积分运算器	491

9-2-3	微分运算器	501
9-2-4	对数与反对数运算器	502
9-2-5	乘法运算器	509
§ 9-3	交流耦合放大器	511
9-3-1	交流耦合放大器的特点和基本电路	511
9-3-2	基本交流耦合放大器的频率响应	513
9-3-3	高输入阻抗交流耦合放大器	516
9-3-4	交流电压跟随器	517
§ 9-4	有源滤波器	518
9-4-1	有源滤波器的特点和分类	518
9-4-2	一阶有源滤波器	522
9-4-3	VCVS型二阶有源滤波器	524
9-4-4	无限增益多路负反馈型二阶有源滤波器	528
9-4-5	状态变量型二阶有源滤波器	530
9-4-6	高阶滤波器的构成	533
§ 9-5	比较器	533
9-5-1	过零比较器	534
9-5-2	电平检测器	537
9-5-3	具有滞回特性的比较器	540
9-5-4	窗口比较器	545
	习题	549
	参考文献	559

第一章 晶体二极管的基本特征

半导体器件及其电路是现代电子设备的重要组成部分。半导体器件,如晶体二极管、三极管和场效应管等,具有体积小、重量轻、使用寿命长和耗电少等优点,广泛应用于现代广播、电视、通信和雷达等电子设备中。集成电路的出现,并迅速向高度集成化方向发展,使电子设备在微型化和可靠性方面向前推进了一大步,引起了整个科学技术领域和电子工业的巨大变革。

本章首先简要地介绍半导体物理基础知识,接着讨论PN结的物理特性、晶体二极管的特性和参数。

§ 1-1 半导体物理基础

大家知道,世间存在着许多不同的物质,如果按导电能力的强弱来分,可分为导体、半导体和绝缘体三类:很容易传导电流的物质称为导体,金属一般都是导体,如金、银、铜、铝等,电阻率在 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下;几乎不传导电流的物质称为绝缘体,如陶瓷、云母、橡胶和塑料等,电阻率在 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上;导电能力介于导体与绝缘体之间的物质称为半导体,目前制造半导体器件最常用的材料有硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。

1-1-1 本征半导体

一、半导体的晶体结构与能带

1. 原子结构与晶体结构

众所周知,物质是由中性原子组成,而原子是由带正电的原子核与带负电的分层绕核运动的电子组成。原子核所带正电荷量,等于核外电子所带负电荷量(一个电子电荷量为 $q = 1.6 \times 10^{-19}$ 库

仑)的总和,因此整个原子呈电中性。元素周期表中的原子序数,表示原子核外的电子数。物质不同,原子序数也不同,如硅的原子序数是14,锗为32,这表明硅和锗核外的电子数分别为14和32个。图1-1-1表示硅和锗原子结构的平面模型。

原子的最外层电子称为价电子,硅和锗原子最外层都只有四个价电子,属于四价元素。因为元素的化学性质取决于价电子数目,半导体的导电性能又与价电子有关,所以当我们主要关心原子的价电子时,常把原子的平面结构模型进行简化,即把原子核与各内层电子看成一个整体,称为惯性核,外层只画出价电子。这样硅和锗的惯性核都只相当于带四个正电荷,核外都只有四个价电子,因而硅和锗原子结构的简化模型是相同的,如图1-1-1(c)所示。

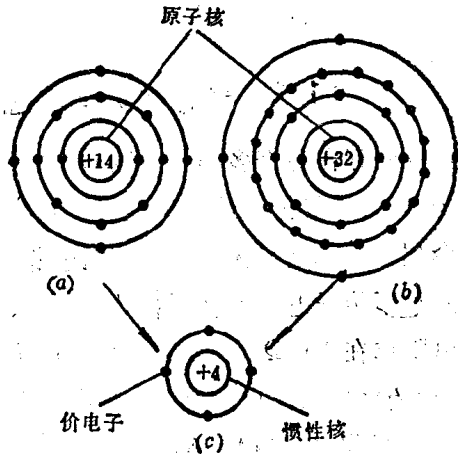


图 1-1-1 硅和锗原子结构模型

(a) 硅; (b) 锗; (c) 简化模型

物质是由原子(分子或离子)组成,固体物质按其内部结构不同可分为晶体和非晶体两类。原子(分子或离子)有规则排列的物质称为晶体,如硅、锗和大部分金属等都可形成晶体结构;原子(分子或离子)无规则排列的物质称为非晶体。硅和锗晶体内相邻原

子之间是靠共价键结合的，所谓共价键，就是相邻两个原子通过共用电子对所形成的结合形式。

硅和锗晶体中，每个原子有四个价电子，它与相邻的四个原子组成四个共价键。图 1-1-2 是硅和锗晶体共价键结构平面示意图。

晶体又分单晶和多晶两种，整块晶体内各局部晶格排列方向完全一致的称为单晶，各局部晶格排列方向不完全一致的称为多

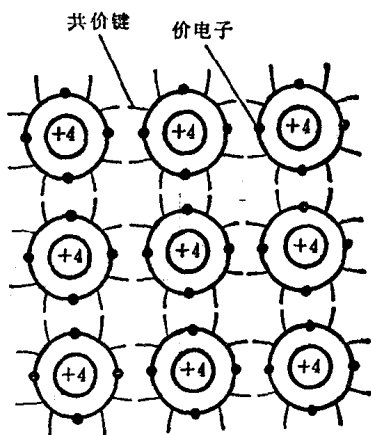


图 1-1-2 硅和锗晶体结构示意图

晶。纯净的、结构完整的半导体称为本征半导体。由于目前制造半导体器件的材料大多为晶体结构，所以半导体管又称晶体管。

2. 能级与能带

在孤立原子中，绕核运动的电子，有的离核近一些，受核束缚较强，动能较小，处于较低的能量状态；有的离核远一些，受核束缚较弱，动能较大，处于较高的能量状态。原子中电子的运动和它所对应的能量状态，并不是连续任意取值的，只能取一些特定的能量值。原子中电子正常运动所对应的特定能量值，称为电子的能级。价电子运动状态所对应的能量值称为价电子能级，各内层电子运动状态所对应的能量值称为内层电子的能级。电子获得足够的能量，可以从较低的能级跃迁到较高的能级，这种现象称为激发。价电子获得足够的能量跃迁到的更高的能级称为激发能级。如果把原子中从内到外各层电子所对应的能级，用一组从低到高排列的横线表示，便得到图 1-1-3(a) 所示的能级图（各内层电子所对应的能级未画出）。

大量的原子结合成晶体后，由于原子密度很大（如硅为 5×10^{22}

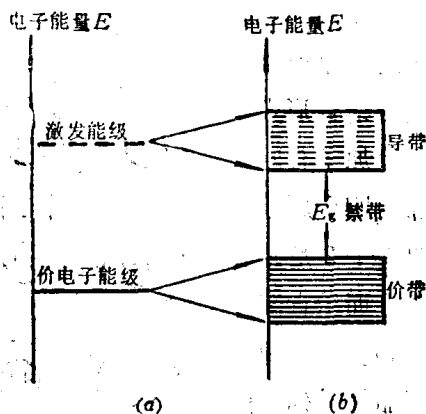


图 1-1-3 能级与能带图

(a) 能级图; (b) 能带图

cm^{-3} , 锗为 $4.4 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$), 原子之间相距很近, 致使相邻原子的外层电子轨道发生交迭, 这些电子不仅受自身原子的作用, 还受相邻原子的作用。这样一些电子可能从自身原子转移到相邻原子的对应轨道上运转, 进而还可能依次转移到更远的原子上去, 电子的这种运动可以在整个晶体内进行, 因而它们不再属于某个原子所特有, 而为整个晶体所共有, 晶体中电子在相邻原子的对应轨道上这种转移运动, 称为共有化运动。价电子离核最远, 受核束缚最弱, 共有化运动也最明显。当然, 价电子不获得足够的能量, 仍不能挣脱共价键的束缚。

在晶体中, 大量密集原子相互影响的结果, 使原来分属不同原子的价电子, 在共有化运动中, 它们的速度和动能也出现差异, 因而对应的能级也出现微小的差别。这一点还可用原子理论中的泡利不相容原理来说明, 根据这一原理, 晶体中不可能有两个或两个以上的电子处于相同的状态。就是说, 原来在各孤立原子中处于相同能级的电子, 组成晶体后, 它们就处于能量稍有差别的不同能级了。通常把这种能量差别极微、分布在一定能量区间的密集能

级称为能带。由此可见，对应孤立原子中的一个能级，组成晶体后便分裂为一个能带。

在晶体中，价电子所对应的能带称为价带。价电子获得能量挣脱共价键的束缚，变为晶体内的自由电子时所对应的能带称为导带。价带与导带之间的能量区间称为禁带，其宽度用 E_g 表示。晶体的能带结构如图 1-1-3(b) 所示。因为内层电子一般不参加导电，故图中省略了各内层电子所对应的能带。

物质的内部结构不同，它们的能带结构和禁带宽度也不同。例如，一般金属导体的价带与导带之间没有禁带，通常它的价电子都能变为自由电子；而绝缘体的禁带很宽（一般为 10eV ①左右），价电子很难跃过禁带变为自由电子；半导体的禁带宽度介于金属导体与绝缘体之间，并与温度有关。例如，在室温 $T=300\text{K}$ 时，硅的 $E_g=1.1\text{eV}$ ，锗的 $E_g=0.72\text{eV}$ ；在 $T=0\text{K}$ 时，禁带宽度用 E_{g0} 表示，硅的 $E_{g0}=1.21\text{eV}$ ，锗的 $E_{g0}=0.785\text{eV}$ 。

二、本征激发和两种载流子导电

本征半导体在绝对温度零度并无外界激发条件下，晶体内的价电子都束缚在共价键上，没有自由电子，半导体不能导电。当温度上升（或受光照）时，一部分价电子获得能量挣脱共价键的束缚，变为自由电子，同时在共价键上留下与它数量相等的“空位”，这种现象称为本征激发，如图 1-1-4(a) 所示。这个过程反映在能带图上，就是一部分价电子获得大于禁带宽度 E_g 的能量，从价带跃迁到导带，变为自由电子，同时在价带中留下空能级，如图 1-1-4(b) 所示。通常把共价键上留下的“空位”称为空穴。可见，本征激发将对产生自由电子和空穴。

① 电子伏是能量单位，它表示一个带电量为 1.6×10^{-19} 库仑的电子，在真空中通过 1 伏特电位差所获得的能量，用 eV 表示。 $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ (焦耳)。

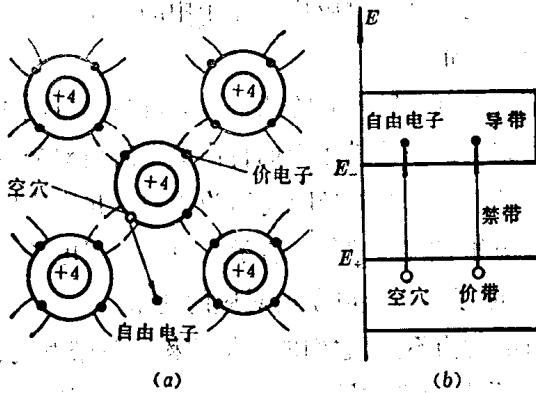


图 1-1-4 本征激发过程

(a) 晶体结构; (b) 能带图

没有外加电场时,自由电子在晶体中作无规则的热运动,不会形成宏观电流;外加电场后,自由电子在电场作用下,出现定向运动,因而形成电流。这种自由电子定向运动形成的导电现象称为电子导电,其导电能力正比于自由电子浓度(即单位体积中的自由电子数,用 n 表示),自由电子浓度 n 愈大,导电能力愈强。

除电子导电外,半导体中另一种导电机构,就是空穴导电。图 1-1-5 表示半导体中一相邻的价电子,当本征激发使 2 处的价电子变为自由电子时,便在原处留下一个空位,在电场作用下,相邻原子的价电子很容易从 3 处转移过来填补 2 处的空位,因而空位就转移到 3 处,依此类推,便形成了价电子依次填补空位的定向运动。因为原子失掉一个价电子相当于带一个正电荷,所以带负电荷的价电子定向运动,完全可以用带正电荷的空穴反方向运动来等效。这种由空穴定向运动形成的导电现象称为空穴导电。

应强调指出,虽然空穴导电实质是由价电子定向运动形成的,但是,如果没有空穴的出现,价电子是不可能导电的。因为当共价键上为价电子所填满没有空穴时,即使价电子仍可在晶体内运动,

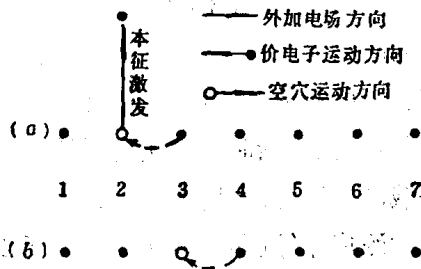


图 1-1-5 空穴导电示意图

但这种运动也只能互相改换它们之间的位置,不能形成定向运动。所以,只有出现空穴,价电子才能参加导电,而且空穴浓度(单位体积的空穴数,用 p 表示)愈大,导电能力愈强。这里引入空穴的概念,正是为了反映价电子的导电能力正比于空穴浓度而不是正比于价电子浓度的客观事实,而且空穴导电是反映价电子在共价键束缚作用下的定向运动,它和已挣脱共价键束缚的自由电子导电是完全不同的。

半导体中的自由电子和空穴都是运载电荷形成电流的粒子,故统称为载流子。

三、本征载流子浓度

如前所述,半导体的导电能力主要取决于载流子浓度。本征激发使自由电子和空穴成对出现,这一过程又称载流子产生。与此同时,自由电子在热运动中又可能与空穴相遇,自由电子释放出能量,恢复共价键结构,使自由电子与空穴成对消失,这一过程称为载流子复合。很明显,如果载流子的产生率(在单位体积内每秒产生的载流子数)大于复合率(在单位体积内每秒复合消失的载流子数),则载流子浓度增大;反之,载流子浓度减小。

在一定温度下,虽然载流子的产生与复合过程同时进行,但是产生率与复合率相等,这种情况称为动态平衡或热平衡。如果温