

高等学校试用教材

# 电 子 线 路

第 一 册

南京工学院无线电工程系  
《电子线路》编写组编

人 民 教 育 出 版 社

# 前 言

一九七〇年我们编写了《电子线路》讲义，作为我院无线电技术专业试用的教材。在此基础上，根据一九七七年全国高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议上“电子线路”小组讨论修订的编写大纲作了较大的修改和补充，编写成本书。

根据编写大纲的要求，本书加强了以下两个方面的内容：第一，半导体器件的工作原理；第二，同一类型电路的共同物理本质及其分析方法。电子线路所涉及的分析方法主要有非线性电路的各种近似分析方法和反馈电路的分析方法。

由上述考虑，本书不按工作频率的高低来分类，而按分析方法相同的电路归类，例如小信号放大电路、功率放大电路、正弦波振荡电路、频率变换电路等，以便联系对比，讲清电路的物理本质和分析方法。同时还注意介绍各种新的电路技术，使学生开阔思路。

我们期望，通过本书的学习，学生能掌握电子线路的分析方法，较深刻地认识各种电路的物理本质，这样，他们才能适应电子技术迅速发展的需要。

本书的编写组由谢嘉奎、陈永彬、陈笃信担任主编，成员有：吴林如、林福华、祝宗泰、李潜生、陈子敏、谢洪贻、彭沛、邹家驷。其中陈笃信、谢洪贻、林福华、陈子敏还做了大量的具体工作。

北京工业学院俞宝传教授担任本书的主审，进行了认真细致的审阅，并提出了许多宝贵的意见。

北京工业学院、华中工学院、成都电讯工程学院、西安交通大学、华南工学院、重庆大学、浙江大学、北方交通大学、北京航空学

院、国防科学技术大学、合肥工业大学、大连工学院、大连海运学院、上海科技大学、南京邮电学院、南京航空学院、清华大学、中国科学技术大学等有关同志参加了本书的审稿会议，他们也都提出了宝贵的意见。

在编写本书时，我院吴伯修教授进行了指导。在教材中还引用了我院田良、沈永朝、詹宏英、周文兴、周寿根等同志编写的讲义。

成都电讯工程学院魏志源同志为本书编写了“负反馈放大器的另一种分析方法”的附录。

我们对上述的单位和个人表示深切谢意。

限于编者的水平，本书对分析方法的介绍还不够系统；各种具体电路的工作过程及工程设计方法的介绍还嫌太多。此外，还有不少缺点和错误，恳请读者批评指正。

南京工学院无线电工程系

《电子线路》编写组

1979年1月

# 第一册 目 录

引言 .....	1
----------	---

## 第一篇 半导体器件原理及放大电路分析基础

### 第一章 半导体二极管的基本特性

内容提要 .....	6
§ 1-1 概述 .....	6
§ 1-2 本征半导体 .....	8
1-2-1 半导体的晶体结构 .....	8
1-2-2 半导体中电子的能级与能带 .....	11
1-2-3 本征激发产生自由电子-空穴对 .....	13
1-2-4 导体、半导体和绝缘体的区别 .....	15
1-2-5 费米-狄拉克分布函数 .....	16
1-2-6 本征载流子浓度 .....	18
1-2-7 本征半导体的迁移率和电阻率 .....	20
§ 1-3 <i>N</i> 型和 <i>P</i> 型半导体 .....	23
1-3-1 <i>N</i> 型半导体 .....	23
1-3-2 <i>P</i> 型半导体 .....	26
§ 1-4 非平衡状态下的半导体 .....	29
1-4-1 非平衡载流子的扩散 .....	30
1-4-2 载流子空间电荷的中和 .....	32
1-4-3 载流子扩散方程 .....	33
§ 1-5 <i>PN</i> 结 .....	38
*1-5-1 <i>PN</i> 结的制造工艺 .....	38
1-5-2 <i>PN</i> 结阻挡层形成的物理过程 .....	42
1-5-3 内建电位差 $V_D$ 与掺杂浓度的关系 .....	44
1-5-4 用泊松方程求阻挡层宽度 .....	48
1-5-5 <i>PN</i> 结电流与电压关系 .....	52
1-5-6 <i>PN</i> 结电容 .....	61

1-5-7	<i>PN</i> 结的击穿 .....	66
1-5-8	<i>PN</i> 结的温度特性 .....	70
*1-5-9	载流子在中性区内的漂移运动 .....	73
§ 1-6	半导体二极管 .....	76
1-6-1	半导体二极管的伏安特性 .....	76
1-6-2	半导体二极管是一种非线性元件 .....	78
1-6-3	二极管的交流等效电路 .....	81
1-6-4	包含有非线性元件的直流电路的图解法 .....	83
1-6-5	半导体二极管的分类及参数 .....	87
附录	泊松方程的推导 .....	89
	复习思考题 .....	90
	参考文献 .....	92

## 第二章 半导体三极管的基本特性

内容提要 .....	93
§ 2-1 概述 .....	93
§ 2-2 三极管的放大作用 .....	95
2-2-1 三极管中三个电流的测量结果 .....	95
2-2-2 三极管的放大作用 .....	96
2-2-3 三极管具有放大作用的条件 .....	97
§ 2-3 三极管的电流分配关系 .....	100
2-3-1 三极管的三种连接方式 .....	100
2-3-2 共基极接法的电流分配关系 .....	101
2-3-3 共发射极接法的电流分配关系 .....	115
2-3-4 共集电极接法的电流分配关系 .....	118
§ 2-4 三极管的伏安特性曲线及其物理解释 .....	119
2-4-1 共基极伏安特性曲线 .....	120
2-4-2 共发射极伏安特性曲线 .....	127
§ 2-5 三极管的分类和参数 .....	136
2-5-1 三极管的分类 .....	136
2-5-2 三极管的制造工艺简介 .....	137
2-5-3 三极管共基 T 型交流等效电路 .....	141
2-5-4 三极管的主要参数 .....	155
2-2-5 三极管的温度特性 .....	160

附录 半导体器件型号命名方法 .....	161
复习思考题 .....	163
参考文献 .....	163

### 第三章 放大器基础

内容提要 .....	164
§ 3-1 放大器的基本概念 .....	165
3-1-1 放大器的功能 .....	165
3-1-2 放大器的主要技术指标 .....	166
3-1-3 放大器的基本电路 .....	171
§ 3-2 放大器的图解分析法 .....	177
3-2-1 静态工作点和直流负载线 .....	177
3-2-2 交流工作状态 .....	180
3-2-3 放大器的能量关系 .....	183
3-2-4 交流负载线 .....	186
3-2-5 负载线与工作点的正确选择 .....	188
§ 3-3 半导体三极管交流等效电路 .....	190
3-3-1 $T$ 参数物理模型 .....	191
3-3-2 网络参数模型 .....	193
§ 3-4 放大器的等效电路分析法 .....	205
3-4-1 用 $T$ 参数等效电路分析放大器 .....	205
3-4-2 用 $H$ 参数等效电路分析放大器 .....	215
3-4-3 三种基本组态放大器比较 .....	223
§ 3-5 放大器的频率特性 .....	226
3-5-1 放大器中频段增益 .....	226
3-5-2 放大器低频端频率特性 .....	227
3-5-3 放大器高频端频率特性 .....	232
3-5-4 对数频率特性——波特图 .....	236
§ 3-6 直流工作点的稳定 .....	240
3-6-1 温度对半导体三极管的影响 .....	241
3-6-2 分压式偏置稳定电路 .....	243
3-6-3 双管直接耦合偏置电路 .....	250
3-6-4 其他直流工作点稳定电路 .....	252
§ 3-7 多级小信号放大器 .....	255
3-7-1 多级小信号放大器的基本问题 .....	255

3-7-2	耦合方式问题	256
3-7-3	组态选择问题	257
3-7-4	总增益与单级增益	259
3-7-5	总频率特性与单级频率特性	262
3-7-6	直流工作点的选择	265
3-7-7	防止多级放大器自激的问题	267
	复习思考题	269
	参考文献	270

## 第四章 反馈放大器

	内容提要	271
§ 4-1	放大器的反馈和反馈的分类	272
4-1-1	放大器的反馈	272
4-1-2	负反馈的分类	275
§ 4-2	电流串联负反馈	284
4-2-1	负反馈的物理过程	284
4-2-2	增益和增益稳定性	287
4-2-3	输入电阻和输出电阻	298
4-2-4	频率响应特性	301
4-2-5	对非线性失真的影响	306
§ 4-3	电压并联负反馈	307
4-3-1	电压并联负反馈的一般分析	307
4-3-2	电压并联负反馈电路举例	314
§ 4-4	电压串联负反馈	318
4-4-1	电压串联负反馈的一般分析	318
4-4-2	二级式电压串联负反馈电路	323
4-4-3	单级电压串联负反馈——共集电路	328
§ 4-5	电流并联负反馈	334
4-5-1	电流并联负反馈的一般分析	334
4-5-2	二级式电流并联负反馈电路	338
4-5-3	单级电流并联负反馈——共基电路	346
§ 4-6	负反馈电路小结及反馈的其他问题	350
4-6-1	四种负反馈电路特性的总结	350
4-6-2	负反馈放大器稳定性的初步讨论	353
附录	反馈放大器的另一种分析方法	361

复习思考题	381
参考文献	383

## 第五章 场效应管及其电路

内容提要	384
§ 5-1 结型场效应管	384
5-1-1 场效应管的由来	384
5-1-2 沟道变化与结型场效应管的特性	388
5-1-3 结型场效应管的结构和工艺	395
§ 5-2 金属氧化物半导体场效应管	397
5-2-1 $N$ 沟道 MOS 管中沟道的形成	398
5-2-2 $N$ 沟道增强型 MOS 管的特性曲线	402
5-2-3 $N$ 沟道耗尽型 MOS 管	405
5-2-4 $P$ 沟道 MOS 场效应管	407
§ 5-3 场效应管的符号、特性、参数和安全使用	411
5-3-1 场效应管的符号和特性	411
5-3-2 主要参数	411
5-3-3 场效应管的安全使用	415
§ 5-4 场效应管基本电路	417
5-4-1 三种基本组态及其等效电路	417
5-4-2 场效应管的偏置方式	424
§ 5-5 共源阻容耦合放大电路	432
5-5-1 单级阻容耦合放大器	432
5-5-2 实用线路举例	437
§ 5-6 场效应管的其他特点和应用	438
5-6-1 场效应管其他特点	438
5-6-2 场效应管的几种特殊应用	440
复习思考题	442
参考文献	443
第一册 名词索引	444



# 引 言

电子线路是指包含有电子器件的电路。常用的电子器件有半导体二极管和三极管、场效应管、电子管等。根据电子器件的特性,电子线路具有下列两个基本性质。

其一,电子线路都是包含有源器件的,大部分电子线路具有功率放大作用,即当输入信号通过电子线路时,其输出信号功率将大于输入信号功率。该输出功率是网络内部的电源(大部分是直流电源)所提供的,电子器件的作用在于将电源提供的功率部分地变换为输出信号功率。我们把具有这种变换作用的电子器件称为有源器件,含有这种器件的网络称为有源网络。普通的电阻、电容、电感、变压器等元件没有这种变换作用,信号通过由这些元件所组成的网络时,输出信号功率恒小于(或等于)输入信号功率。因此,这些元件称为无源元件,由它们所组成的网络称为无源网络。

其二,电子器件的特性是非线性的,称为非线性器件,即它们的电流随电压变化的特性不呈线性关系,不满足欧姆定律。如果将电子器件看成为等效的电阻或电抗,那么该电阻或电抗值将随着加在其上的电压或通过其间的电流大小而变化,而不是恒定的数值。

非线性器件与普通的线性元件不同。当单频正弦信号加到该器件时,其输出不仅含有原信号频率的分量,而且,还有平均分量及信号频率的各次谐波分量。当两个不同频率的正弦信号(设为 $f_1$ 和 $f_2$ )同时加到该器件时,其输出不仅含有原信号频率的分量,还有许多组合频率分量,例如: $2f_1$ 、 $3f_1$ 、 $2f_2$ 、 $3f_2$ 、 $f_1 \pm f_2$ 、 $f_1 \pm 2f_2$ 、 $2f_1 \pm f_2$ 、 $3f_1 \pm f_2$ 。我们将这种作用称为非线性器件

的频率变换作用。含有这种器件的电路称为非线性电路。而由普通的电阻、电容、电感等元件所组成的线性电路没有频率变换作用。

由于电子线路具有上述的两个基本性质，它们能够实现无源、线性电路所无法实现的电路功能。归纳起来，电子线路能够实现如下的电路功能：

一是放大不同形状、频率和强度的信号。根据信号和负载的特点，可以有各种放大器。例如：根据输入信号强弱的不同有小信号放大器和功率放大器；根据频段的不同有直流放大器、低频放大器、高频放大器等；根据负载性质的不同有谐振放大器和非谐振放大器等…。

二是对信号进行各种频率变换。根据不同的频率变换作用，可以有各种调制器、解调器、变频器、倍频器、分频器、整流器等。

三是综合利用电子器件的放大作用和频率变换作用实现各种反馈控制。根据不同的要求，可以有各种振荡器以及各种用途的反馈控制电路。

电子线路作为有源、非线性电路，无论其工作原理或分析方法都与无源、线性电路不同。就分析方法而言，涉及到两方面的内容：一是非线性电路在各种条件下的近似分析方法；二是反馈电路（包括线性反馈电路和非线性反馈电路）的分析方法。

通过本书的学习，应达到下列要求：

- 1) 了解半导体管、场效应管、电子管等电子器件的基本原理，掌握它们的主要参数及运用特性。
- 2) 掌握放大电路、振荡电路、频率变换电路的工作原理和工程设计基础。
- 3) 掌握非线性电路在各种条件下的近似分析方法以及反馈

电路的分析方法。

电子技术的广泛应用，推动着电子线路的发展，其主要特点：一是新器件不断出现，特别是集成电路的迅速发展，引起了电子线路的革命性变革，打破了器件和电路的界限，改善了电路性能，扩大了电路功能；二是广泛采用电子线路的计算机辅助分析和设计，改变了以往电子线路定性分析、定量估算、实验调整的设计方法。为了适应电子线路上述发展的要求，本书加强了半导体器件原理和电子线路的分析方法。

电子线路的种类繁多，根据无线电技术类的教学计划，本书仅限于讨论集中参数的模拟电路。关于脉冲电路、数字电路、分布参数电路分别划归“脉冲及数字电路”和“微波技术与天线”课程介绍。电子线路的计算机辅助分析和设计也另设专门课程介绍。此外，在学习本书时，应有线性电路和信号分析的基础。

按照各种电路的分析方法和功能的不同以及考虑到由浅入深、分散难点、便于自学的要求，将全书分为七篇，现简述如下：

第一篇是半导体器件原理及放大电路分析基础。介绍了半导体器件物理基础，半导体二极管、三极管、场效应管的工作原理及小信号运用时的物理模型，放大电路的基本概念和主要性能指标。在分析方法上，以简单阻容耦合放大电路为例，着重介绍了图解法和小信号等效电路法的基础，并讨论了线性反馈电路的基本分析方法。

第二篇是小信号放大电路，包括直流放大器、集成运算放大器、小信号谐振放大器和宽频带放大器。它们虽然都是含有非线性器件的电路，但其共同的特征是小信号工作。对于小信号，非线性器件可以近似用线性小信号等效电路来表示，因此在讨论放大电路的交流特性时可等效为线性电路，并可采用大家熟悉的线性电路的分析方法。

这一篇还讨论了对弱信号放大电路性能有很大影响的内部起伏噪声。

第三篇是功率放大电路，包括非谐振功率放大器和谐振功率放大器。这类放大电路都是大信号工作，要求在非线性器件安全工作的条件下，充分发挥器件的潜力，高效率地输出信号功率。因此在分析这类放大电路时，必然涉及到器件的非线性特性及其极限运用参数。对于谐振功率放大器，采用图解法，其实质是解非线性代数方程；对于非谐振功率放大器，在严格分析时必须解非线性微分方程，本篇仅介绍了工程上采用的准线性的近似分析法。

第四篇是正弦振荡电路，包括振荡原理和正弦振荡器，它的功能是产生各种频率的正弦振荡。这种电路的分析涉及到正反馈和非线性效应。本篇着重讨论了振荡的基本原理，以线性和准线性的方法讨论了起振条件和平衡条件，并初步介绍了非线性微分方程的求解方法。

第五篇是频率变换电路，包括振幅调制及解调电路；角度调制及解调电路；混频、倍频和分频电路；参量电路，这类电路都是利用了非线性器件的频率变换作用。本篇着重介绍了电阻性非线性器件的频率变换电路。对这类电路的严格分析也必须求解非线性微分方程。本篇仅介绍了折合参数的近似分析方法，并以几种近似函数来表示器件的伏安特性。此外，还介绍了电抗性非线性器件的频率变换作用。

锁相环等反馈控制电路是综合地应用了非线性器件的放大作用和频率变换作用所构成的反馈电路，所以本篇专门设立一章。

第六篇是整流稳压电路，包括整流及电源变换电路、直流稳压电路。本篇是前一篇的延续，它们也是一种频率变换和反馈控制电路。但是作为电源设备，我们专门列为一篇。根据电源的要求，本篇从工程观点讨论了电路原理和设计方法。

最后在第七篇介绍了电子管的工作原理及其组成的基本电子线路。

为使本书具有较大适应性,编写时,取材较为丰富,许多内容有其独立性,因此除注明\*号的内容可以不选用外,还可根据情况加以取舍。

# 第一篇 半导体器件原理及放大 电路分析基础

## 第一章 半导体二极管的基本特性

### 内 容 提 要

在各种电子线路中半导体二极管得到广泛的应用。半导体二极管的基本特性是单向导电，它的核心是  $PN$  结。本章在介绍半导体物理知识的基础上，重点讨论  $PN$  结的各种特性。这不仅是掌握半导体二极管工作原理所必需的，并且也为学习半导体三极管、集成电路等器件打下基础。

本章还结合二极管的伏安特性，初步介绍了非线性元件的概念及分析方法。

### § 1-1 概 述

在各种电子设备中，常用的半导体二极管主要有三种：

- 1) 把交流电变换成直流电的电源设备中用的整流二极管。
- 2) 广播收音机和电视接收机等设备中用的检波二极管。
- 3) 电子计算机和脉冲数字电路中用的开关二极管。它们的外形见图 1-1-1。

在电路中，二极管符号如图 1-1-2。二极管的正极用  $\oplus$  表示，

负极用 $\ominus$ 表示。一只二极管的正负极可以从外形标志上识别,或者用实验方法测定。

二极管的主要特性是单向导电,这可以由图1-1-3所示的实验来说明。图1-1-3a二极管外加正向电压(二极管的正极接直流电源的正端,负极接电源的负端),电路中电流较大,指示灯亮。图1-1-3b把直流电源反接,二极管外加反向电压,电路中的电流很小,灯不亮。图1-1-3c把二极管换成10欧电阻,在电源的两种接法下,灯都亮。二极管只能允许一个方向的电流顺利流过的特性称为单向导电性。

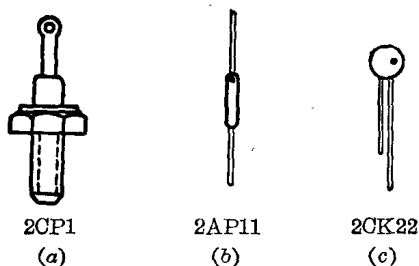


图1-1-1 几种半导体二极管的外形图

- (a) 整流管; (b) 检波二极管;  
(c) 开关二极管



图1-1-2 二极管的电路符号

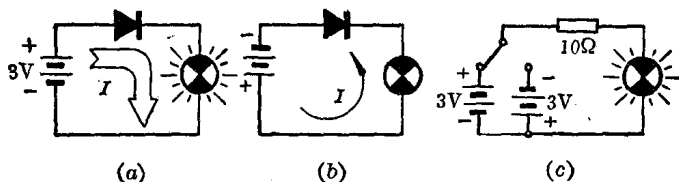


图1-1-3 二极管单向导电性实验

- (a) 正向电压时电流大,灯亮; (b) 反向电压时电流很小,灯不亮;  
(c) 电阻没有单向导电性

利用二极管的单向导电性可以组成整流器、检波器以及开关电路等。这些内容将在本课程和其他课程的有关章节中详细讨论。

本章所讨论的二极管是由一个PN结焊上两根引线,再加上

外壳封装而构成的(图 1-1-4)。二极管的单向导电性是由  $PN$  结决定的,所以  $PN$  结是这类二极管的核心。 $PN$  结是由  $P$  型半导体和  $N$  型半导体(统称杂质半导体)有机地结合在一块半导体中形成的。杂质半导体是由纯净半导体(又称本征半导体)材料中掺入某种特定元素(称杂质)形成的。因此为了掌握  $PN$  结的特性,就得先了解本征半导体和杂质半导体以及有关的半导体物理基础知识。

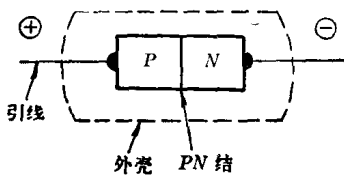


图 1-1-4 二极管的组成

了掌握  $PN$  结的特性,就得先了解本征半导体和杂质半导体以及有关的半导体物理基础知识。

本章首先介绍本征半导体和杂质半导体的特性,再讨论  $PN$  结的特性,最后介绍二极管的特性、参数和图解法等。

本章首先介绍本征半导体和杂质半导体的特性,再讨论  $PN$  结的特性,最后介绍二极管的特性、参数和图解法等。

## § 1-2 本征半导体

### 1-2-1 半导体的晶体结构

我们周围的所有物质,按它们导电能力的差别可以分为导体、半导体和绝缘体三类。大家都熟悉的铜、铝和银等金属的导电性能很好,它们都是导体。铜和铝是电线芯线的材料。橡胶、塑料和石蜡等物质的导电性能很差,它们都是绝缘体。橡胶和塑料是电线外表层的材料。半导体材料的导电性能介于导体和绝缘体之间。在自然界中属于半导体的物质有很多种,目前用来制造半导体器件的材料主要有硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。

根据原子物理的理论,原子是由带正电荷的原子核和分层围绕原子核转动的电子组成。原子核所带的正电荷量与所有电子的负电荷量数值相等,整个原子保持电中性。元素周期表中的原子序数就是单个原子中的电子数。电子分层情况取决于主量子数  $n$  和副量子数  $l$ 。主量子数  $n$  决定了电子所在的壳层,副量子数  $l$  决



定了在同一壳层内电子所在的分层。 $n$ 的取值是正整数 1、2、3... $n$ ,  $l$ 的取值为 0、1、2... $(n-1)$ 。在  $l$  分层上可以容纳的电子数为  $2(2l+1)$ , 所以在  $n$  壳层上可容纳的最多的电子数为

$$Z_n = \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = \frac{2+2(2n-1)}{2} n = 2n^2$$

通常  $n=1、2、3、4$  等的壳层分别称为  $K、L、M、N$  层 ( $K$  层  $Z_n=2$ ,  $L$  层  $Z_n=8$ ,  $M$  层  $Z_n=18$ )。  $l=0、1、2、3$  的分层分别称为  $s、p、d、f$  分层。在元素周期表中, 半导体材料硅的原子序数是 14, 锗的原子序数是 32。这两种原子的电子分布情况见表 1-1。

表 1-1 硅原子和锗原子的电子分布

	$n=1$ ( $K$ 层)			$n=2$ ( $L$ 层)			$n=3$ ( $M$ 层)			$n=4$ ( $N$ 层)			
	$l=0$ ( $s$ 分层)	$l=0$ ( $s$ 分层)	$l=1$ ( $p$ 分层)	$l=0$ ( $s$ 分层)	$l=1$ ( $p$ 分层)	$l=2$ ( $d$ 分层)	$l=0$ ( $s$ 分层)	$l=1$ ( $p$ 分层)	$l=2$ ( $d$ 分层)	$l=3$ ( $f$ 分层)			
硅 <sub>14</sub>	2	2	6	2	2								
锗 <sub>32</sub>	2	2	6	2	6	10	2	2					

或写成:

硅—— $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^2$

锗—— $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 3d^{10}, 4s^2, 4p^2$

它们的原子结构模型如图 1-2-1。外壳层中的电子数决定这一元

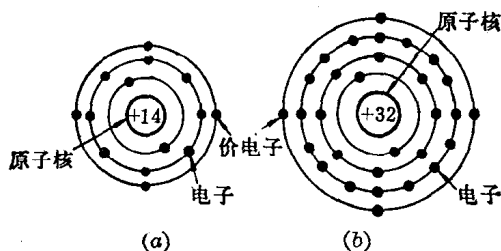


图 1-2-1 硅和锗的原子结构模型图

(a) 硅; (b) 锗