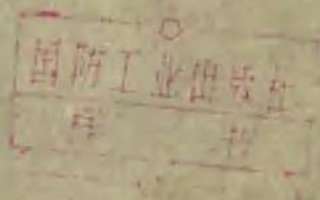


晶体管电路

上册

成都电讯工程学院编



国防工业出版社



晶体管电路(上册)

成都电讯工程学院 编

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

解放军七二二六厂印刷 内部发行

787×1092 1/16 印张 27 637 千字

1979年7月第一版 1979年7月第一次印刷 印数1—25,000册

统一书号: N15034(四教001) 定价2.75元

内 容 介 绍

本书分上下两册，上册包括绪论，晶体二极管和晶体三极管作用原理，线性放大电路的基础知识，负反馈放大器，直流放大器，宽频带放大器，低频功率放大器和整流与稳压电路等内容。附有拉氏变换，网络函数等三个附录。下册包括谐振放大器，正弦振荡器，频率变换电路，脉冲电路，场效应管及其电路等内容。电子管及其电路一章作为下册附录。

本书阐述了晶体管作用原理，着重论述了其外部特性和参数，对晶体管电路的基本概念，基本原理和分析方法作了比较深入的讨论，对于运算放大器等线性集成电路的原理和应用，在有关章节作了介绍。各章均附有复习思考题和习题。

本书可作为高等学校半导体器件专业或其它专业的教材或参考书，也可作为从事电子工业的科技工作者的参考读物。

前 言

本书系工科电子类“半导体器件”专业统编教材之一。

全书分为上下两册，可供 200 学时教学用。有些带 * 号的选修内容和小字排印的内容，使用者可根据具体情况决定取舍。

本书由成都电讯工程学院 304 教研室编写。上册由黄嵩如同志主编，其中第 1、7 两章由李福权同志执笔。下册由周宗大同志主编，其中第 9、10 两章由张崇国同志执笔，第 11 章由李福权同志执笔，第 12 章和电子管及其电路（附录）由田吉庆同志执笔。叶玉林同志参加了部分稿件的审校工作。

本书由浙江大学范华民同志主审，西安交通大学叶治政同志和南京工学院宋焕明同志参加了审稿工作。西安交通大学的沈尚贤教授，成都电讯工程学院的杨光壁同志，分别看过原稿的部分章节。所有上述同志对原稿提出了许多宝贵的意见，编者表示衷心感谢。

由于编写时间紧迫，同时受到编者水平的限制，书中难免有不少缺点和错误，恳切地希望读者提出批评指正。

编 者

一九七九年三月

上册 目 录

绪 论	(1)
第一章 晶体二极管和三极管	(4)
§ 1.1 半导体基本知识	(4)
1.1.1* 晶体的能带理论	(4)
1.1.2 本征半导体的导电机构	(10)
1.1.3 n 型和 p 型半导体	(12)
§ 1.2 pn 结	(13)
1.2.1 pn 结的形成	(13)
1.2.2 pn 结的伏安特性	(15)
1.2.3 pn 结电容	(17)
1.2.4 pn 结的击穿	(18)
§ 1.3 晶体二极管	(19)
1.3.1 晶体二极管概述	(19)
1.3.2 二极管的特性曲线和参数	(20)
1.3.3 二极管的等效电路	(23)
§ 1.4 晶体三极管	(23)
1.4.1 晶体三极管的基本结构	(23)
1.4.2 晶体管的工作原理——电流分配关系和放大作用	(23)
§ 1.5 晶体三极管的特性曲线	(27)
1.5.1 晶体管的三种连接方式	(27)
1.5.2 晶体管的静态特性曲线	(28)
1.5.3 晶体管的参数	(32)
1.5.4 温度对晶体管参数的影响	(37)
§ 1.6 晶体管小信号等效电路	(39)
1.6.1 $\langle h \rangle$ 参数等效电路	(39)
1.6.2 晶体管混合 π 参数及其等效电路	(44)
1.6.3 混合 π 等效电路参数与 $\langle h \rangle$ 参数的关系	(50)
1.6.4 晶体管的几个频率参数	(52)
复习思考题	(58)
习题	(59)
第二章 线性放大电路的基础知识	(62)
§ 2.1 概述	(62)

2.1.1	放大器的用途和增益	(62)
2.1.2	线性放大和三极管的线性运用	(63)
2.1.3	晶体管的能量转换作用	(65)
§ 2.2	两种基本放大电路及其工作原理	(66)
2.2.1	RC 耦合放大器	(67)
2.2.2	变压器耦合放大器	(71)
2.2.3	并联馈电和串联馈电	(73)
§ 2.3	放大器的基本分析方法	(74)
2.3.1	图解分析法	(74)
2.3.2	《 h 》参数等效电路法	(79)
2.3.3	两种分析方法的比较	(87)
§ 2.4	工作点稳定电路	(87)
2.4.1	晶体管参数变动对 Q 点的影响	(88)
2.4.2	发射极自偏稳定电路	(90)
2.4.3	电压负反馈偏置稳定电路	(96)
2.4.4	双管直接耦合放大电路	(97)
2.4.5	基极补偿电路	(98)
2.4.6	线性集成电路的偏置技术	(100)
§ 2.5	放大器的频率响应	(102)
2.5.1	线性失真和频率响应特性	(102)
2.5.2	放大器的增益函数	(106)
2.5.3	频率响应特性的简捷作图法	(108)
§ 2.6	RC 耦合放大器的频率响应特性	(112)
2.6.1	RC 放大级的等效电路	(113)
2.6.2	中频段的频率响应特性	(114)
2.6.3	低频段的频率响应	(114)
2.6.4	高频段的频率响应	(122)
2.6.5	多级放大器的带宽	(128)
	复习思考题	(129)
	练习题	(131)
第三章	负反馈放大器	(137)
§ 3.1	概说	(137)
3.1.1	反馈放大器的一些定义和基本关系	(137)
3.1.2	负反馈放大器电路的分类	(139)
3.1.3	环路电压传输系数和电流传输系数	(140)
§ 3.2	负反馈对放大器性能的影响	(142)
3.2.1	负反馈对放大倍数的稳定作用	(142)
3.2.2	负反馈对非线性失真系数和信噪比的改善	(144)

3.2.3 负反馈对放大器输入阻抗的影响·····	(146)
3.2.4 负反馈对放大器输出阻抗的影响·····	(147)
3.2.5 负反馈对频率响应的改善·····	(150)
§ 3.3 两种基本负反馈放大级的经典分析·····	(151)
3.3.1 单级串联电流负反馈放大电路·····	(151)
3.3.2 单级并联电压负反馈放大电路·····	(154)
§ 3.4 几种常用负反馈电路的分析·····	(158)
3.4.1 单级负反馈放大器·····	(159)
3.4.2 两级串联电压负反馈放大器·····	(165)
3.4.3 三级负反馈放大器·····	(166)
§ 3.5 负反馈放大器的稳定问题·····	(168)
3.5.1 反馈深度与放大器级数的关系·····	(169)
3.5.2 尼奎斯特稳定判别准则·····	(175)
3.5.3 增益和相位安全边际·····	(177)
§ 3.6 负反馈放大器的稳定补偿网络·····	(178)
3.6.1 主导一极点补偿·····	(180)
3.6.2 极点—零点补偿·····	(181)
3.6.3 相位超前补偿·····	(182)
3.6.4 电源去耦滤波器·····	(184)
§ 3.7* 一般反馈理论·····	(186)
3.7.1 回归比, 回归差和闭环放大倍数·····	(186)
3.7.2 应用一般反馈理论计算放大电路·····	(191)
复习思考题 ·····	(196)
练习题 ·····	(197)
第四章 直流放大器 ·····	(202)
§ 4.1 概说·····	(202)
§ 4.2 单端直接耦合放大电路·····	(203)
4.2.1 两管电路·····	(203)
4.2.2 级间耦合电路·····	(205)
§ 4.3 直流放大器的零点漂移·····	(208)
4.3.1 零点漂移的折合计算·····	(208)
4.3.2 温度引起零点漂移的计算·····	(209)
4.3.3 减小零点漂移和输出电压变动的一些考虑·····	(211)
§ 4.4 差动放大器·····	(211)
4.4.1 差动放大器的工作原理·····	(212)
4.4.2 差动放大器的基本特性·····	(218)
4.4.3 差动放大器的改进电路·····	(225)
4.4.4 差动放大器的应用举例·····	(230)

§ 4.5 线性集成电路中的几种特殊电路	(231)
4.5.1 集成电路中的元器件	(232)
4.5.2 恒流源电路	(234)
4.5.3 有源负载电路	(237)
4.5.4 双端输出转变为单端输出电路	(237)
4.5.5 电平位移电路	(239)
§ 4.6 运算放大器	(242)
4.6.1 概述	(242)
● 4.6.2 差动运算放大器的一些基本特性	(244)
4.6.3 集成运算放大器电路分析举例	(251)
4.6.4* 运算放大器参数的测量	(257)
4.6.5 运算放大器的稳定问题	(261)
§ 4.7 调制型直流放大器	(266)
4.7.1 调制型直流放大器的工作原理	(267)
4.7.2 调制器	(268)
4.7.3 解调器	(271)
复习思考题	(275)
练习题	(277)
第五章 宽频带放大器	(280)
§ 5.1 概述	(280)
5.1.1 宽频带放大器的, 特点和信号	(280)
5.1.2 时间法和频率法之间的关系	(281)
§ 5.2 单级宽频带放大器	(284)
5.2.1 共发射极宽带放大器	(284)
5.2.2 发射极电容高频补偿电路	(287)
5.2.3 用电感补偿高频的特性的 RC 放大电路	(289)
5.2.4 低频补偿电路	(293)
5.2.5* RC 放大级的阶跃特性	(295)
§ 5.3* 多级宽频带放大器	(302)
5.3.1 交替负反馈放大器	(303)
5.3.2 “共射-共基”放大电路	(305)
§ 5.4 集成宽带放大器	(307)
复习思考题	(309)
练习题	(309)
第六章 低频功率放大器	(311)
§ 6.1 概述	(311)
§ 6.2 晶体管的工作状态	(311)
§ 6.3 晶体管的安全运用	(313)

6.3.1	晶体管集电极的安全工作区	(313)
6.3.2	集电极损耗 P_{CM} 和热稳定	(313)
6.3.3	晶体管的二次击穿	(316)
§ 6.4	功率放大器的非线性失真	(317)
6.4.1	非线性失真同信号源内阻的关系	(317)
6.4.2	非线性失真系数	(317)
§ 6.5	甲类功率放大器	(320)
6.5.1	工作情况的分析	(320)
6.5.2	集电极回路的功率关系	(321)
§ 6.6	推挽功率放大器	(323)
6.6.1	推挽电路的工作原理	(323)
6.6.2	投影偏置	(325)
6.6.3	功率和效率	(326)
§ 6.7	单端输出推挽功率放大器	(329)
6.7.1	单端推挽电路的工作原理	(329)
6.7.2	分负载式倒相输入的单端推挽电路	(330)
6.7.3	互补单端推挽电路	(332)
6.7.4	复合管等效互补单端推挽电路	(334)
§ 6.8	集成音频功率放大器	(335)
6.8.1	集成功率放大器的输出级电路	(336)
6.8.2	集成功率放大器典型电路的应用	(337)
§ 6.9	输出级的保护电路	(339)
6.9.1	限流和过压保护电路	(339)
6.9.2	二次击穿保护电路	(341)
	复习思考题	(342)
	练习题	(342)
第七章	整流电路与稳压电源	(346)
§ 7.1	概述	(346)
§ 7.2	整流电路	(346)
7.2.1	单相半波整流电路	(346)
7.2.2	单相全波整流电路	(350)
7.2.3	单相桥式整流电路	(353)
7.2.4	倍压整流电路	(354)
§ 7.3	平滑滤波器	(357)
7.3.1	电容滤波器	(358)
7.3.2	Ⅱ型滤波器	(363)
7.3.3	有源滤波器	(364)
§ 7.4	稳压电路	(365)

7.4.1 硅稳压管稳压电路	(366)
7.4.2 串联型晶体管稳压电路	(371)
7.4.3* 开关式晶体管稳压电路	(386)
7.4.4 集成电路稳压电路	(387)
§ 7.5* 可控硅控制电路	(389)
7.5.1* 可控硅元件	(389)
7.5.2 可控硅整流电路的主回路	(392)
7.5.3 控制(触发)电路	(395)
7.5.4 可控硅交流调压电路	(400)
复习思考题	(401)
练习题	(402)
附录 I 拉氏变换	(405)
附录 II 网络函数	(413)
附录 III 具有最佳幅-频特性和最佳相-频特性的传输函数	(415)
主要参考书刊	(418)

符 号 规 则

(1) 采用国家标准符号和尽量采用国际通用符号。

(2) 大写字母用来表示直流量值, 交流量复数值、有效值和最大值(如 P 、 I 、 V); 小写字母用来表示随时间变化的量值或增量(如 p 、 i 、 v)。直流, 包括直流加交流的量值, 采用大写字母下标; 交流量值, 采用小写字母下标。例如:

	交 流 量 值	直流及直流加交流量值
瞬 时 值	v_{be}	V_{BE}
复 数 值	V_{be}	
有 效 值	$V_{be(rms)}$	$V_{BE(RMS)}$
最大值(峰值)	V_{bem}	V_{BEM}
平 均 值	$V_{be(av)}$	$V_{BE(AV)}$
直 流 值		V_{BE}

(3) 对于电路元件和器件参数也尽可能使用上面规则。例如, 直流电阻用 R 表示, 器件的交流动态电阻用 r 表示, h 参数用 $\langle h \rangle$ 表示。但电容和电感只有大写形式。

① 在不会引起误会的情况下, 下标 rms 可以省略, 如 $V_{be(rms)}$ 写成 V_{be} 。

绪 论

晶体管电路知识是研究电子科学和从事电子工业生产者必备的基础知识，晶体管电路是电子科学各专业，其中也包括半导体器件专业的一门必修的技术基础课。

电子科学是一门发展快，渗透力强，应用面广的科学，电子技术的广泛应用引起了二十世纪的技术革命。我国建国三十年来，电子科学的各个方面取得了巨大的进展，培养了大量人材，解决了许多重大科学研究和技术课题。导弹核武器的试验成功，人造卫星的准确回收等，都标志着我国电子科学技术发展的新水平。但是，由于国际电子科学技术近期的迅猛发展，我国的电子科学技术同世界先进水平相比还有一定的差距，为了适应四个现代化的需要。我们还得提高电子科学技术水平。

从应用方面来说，电子技术广泛应用于国防，工农业和国民经济的各个领域，而比较集中的是作为传输和处理信息的电子系统，其中包括计算机、电视、通讯、人造卫星、雷达、广播等。电子线路应该是泛指包括这些电子系统的整机和其它单元电路。整机总是由单元电路^①按不同规律组成，由于整机的多样性和专业性，所以我们这门课程只着重讨论分析各种基本单元电路，如放大、振荡、整流稳压、脉冲电路等。

电子线路中包含的有源元件，可以用电子管，也可以用晶体管，由于晶体管的优越性，当前的电子设备一般以使用晶体管为主。本书的主要内容就是讨论分析以晶体管作有源元件的电路。

自从晶体三极管发明以来，半导体科技的发展主要是促使电子技术向小型化迈进。这种小型化每前进一步，则显示出半导体器件的性能更优越，质量更好，可靠性更高，价格更便宜，应用更为广泛深入。小型化的过程已经历了分立晶体管，小规模集成电路，中规模集成电路，大规模集成电路，目前正在大规模集成电路的基础上进入超大规模集成电路崭新的阶段。电子计算机的发展最典型的标志了小型化的成就。第一代电子计算机是用电子管制成的，它有几十吨重，占满了很大的一间房间。第二代用分立晶体管，第三代用集成电路，第四代用大规模集成电路。现在用大规模集成电路制成的同样的电子计算机只有打字机那么大。进一步发展用超大规模集成电路将有可能把它装进口袋里。随着向小型化进展的同时使计算机的可靠性提高了，价格下降了，计算速度也提高了。这是因为电路减少了大量的人工焊接点，节约了大量的管壳封装等工艺，减少了互连线的延迟时间等。

随着小型化的发展，电子线路整机的研制与器件的关系愈益不可分割。初期的晶体管是分立元件，在电子线路中主要是以其小的特点取代了电子管的作用。由于平面工艺的发展，解决了有源元件与无源元件的工艺相容性问题，在集成电路中器件和构成线路的其它元件包含在一个芯片上。例如微处理器，它是和原先晶体三极管差不多大小的一种大规模集成电路。

^① 线路、电路本来是通用的，但有的把集成电路简称为电路。为避免混淆，本书中仍然采用线路，电路通用，而集成电路则加上“集成”二字。

路。一个晶体三极管所组成的线路只能把一个信息放大，而一个微处理器却可以把输入的信息根据判断作复杂的运算和处理。它具备有多方面的功能，可以完成一个系统中部件的作用。也就是说，它相当于许多单元线路组合的作用。因此，从事半导体器件研究和生产的工作者，不但必须深入研究半导体器件，而且必须对线路具有比较广泛的知识。这样才能同系统和整机的线路设计者有共同的语言，才能对电路的实施和改进有更多的主动权。关于集成电路虽然有另外的专门课程讨论，但集成电路是在分立元件晶体管线路的基础上发展起来的，两者的基本工作原理是一致的，当然，集成电路又有它本身的一些特点。为了进行对比，在本教材的各章中在讨论了分立元件单元线路之后，对线性集成电路的工作原理及其特点也作了必要的介绍和分析。为以后进一步学习和研究集成电路打下一定的基础。

从上面的论述可见，不论是分立元件的整机还是集成电路的部件，其基础都是单元线路，下面对单元线路作些共性的分析。

各种单元线路的形式及它们的功能虽然各不相同，但从线路的组成及作用来看，它们具有一些共性。首先是各种单元线路都是由三部分组成，如图 1 所示，其中包含有晶体管（三

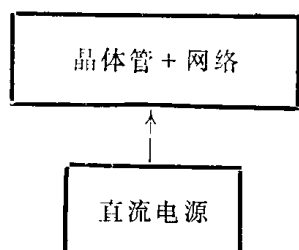


图 1 单元线路方块图

极管或二极管），无源网络（一般是线性网络）和直流电源。除特殊情况外，网络总是由电阻 R 、电容 C 和电感 $L(M)$ 等元件（不一定都要包含这三种元件）组成。从外部特性看，这些网络是服从欧姆定律的线性网络。第二、各种单元线路都是能量变换线路，它们把直流电源所提供的直流电能，变成所需要的交变形式（通常称为信号）的电能^①。其中晶体管是起能量变换作用的关键性元件，是有源元件。对于负载阻抗来说，晶体管就是交变信号源。第三、从外部特性看，一般地说，晶体管是不服从欧姆定律的，它是一个非线性元件，由它所构成的线路就是非线性线路。但是当信号很小时，只运用晶体管外部特性的较直部分时，就可以把晶体管看作线性元件，而线路也就转化为线性线路。

晶体管线路中所使用的直流电源，除干电池、蓄电池和太阳能等电源外，多数情况是利用整流器将 50 赫的交流电变为所需要的直流电源。相对于电子管来说，晶体管需要的是低电压，大电流，对直流电源的要求比较严格，一般多采用稳压（直流）电源以进行供电。

通过对各种单元线路共性的介绍，我们可以看到，尽管一个单元线路非常简单，也包含了不少的矛盾。各种单元线路中都包含有线性元件与非线性元件，包含有记忆元件和非记忆元件，包含有有源元件与无源元件，包含有直流电源与交（变）流电源和它们各自产生的电流。这些都彼此构成矛盾对，这还只是问题的一个方面，是晶体管线路矛盾的普遍性。除此之外，各种单元线路还有它们本身各自的用途，各自的特点，这就产生了矛盾的特殊性，也正是由于它们各自的特殊矛盾才最终决定了它们之间性质的差别。

① 整流线路等则是起相反的变换作用，把交变电能为直流电能。

半导体器件专业的同学学习“晶体管电路”这门课程，要求能掌握分析电子线路的一些基本方法和基本理论。并能用以分析分立元件所构成的各种单元线路和线性集成电路的基本工作原理，为实施电路方案，改进产品提供一定的基础。同时本门课程是一门实践性很强的课程，要求通过实验和各种实践的途径，能掌握晶体管线路及其元件的测试方法。为后续课程和今后从事生产、科研等工作打下较为扎实的基础。

第一章 晶体二极管和三极管

晶体二极管和三极管是《晶体管电路》的关键元件，其原理和特性是分析晶体管电路的基础，必须熟练地掌握。本章先介绍半导体材料和半导体器件的基本结构 pn 结，从 pn 结的基本特性出发，讲述半导体二极管和双极型三极管的工作原理，着重讨论管子的外特性和应用参数，以及常用的小信号等效电路等。

§ 1.1 半导体基本知识

按照电阻率分类，固体可划分为：金属、半导体与绝缘体。在室温时金属与合金的电阻率在 10^{-4} 欧姆·厘米以下，绝缘体的电阻率在 10^{10} 欧姆·厘米以上，半导体的电阻率介于两者之间，通常在 10^{-3} 到 10^0 欧姆·厘米范围内。

虽然电阻率的范围是半导体的一个重要标志，然而电阻率并不是区分半导体与非半导体的唯一标准。事实上半导体还有一些其它的重要特性。

首先，半导体的导电能力随温度升高而迅速增加。与导体金属相比，主要有两个区别。第一，半导体电阻率的温度系数是负的，而金属则是正的，也就是说，当温度升高时，半导体的电阻率会迅速减小，而金属的电阻率却会增大。第二，半导体电阻率随温度的变化很大，而金属的电阻率的变化则要小得多。以纯净的半导体硅为例，当温度从 30°C 降低到 20°C 时，其电阻率增加一倍，而金属铜，即使温度上升 100°C ，电阻率的增加也不到一半。

其次，半导体的导电能力随所含的微量杂质而发生十分显著的变化。一般材料（例如化学试剂）纯度达到 99% 或 99.9% 就认为是很高了，此时剩余的 1% 或 0.1% 的杂质，通常不会影响物质原来的特性。而对半导体来说，情况就不同了。纯净的硅室温时的电阻率为 214,000 欧姆·厘米。如果在纯硅中以每一百万个硅原子掺入一个杂质原子的比例掺入杂质（例如磷原子），此时硅的纯度虽然仍高达 99.9999%，但其电阻率却从 214,000 欧姆·厘米一下子降低到 0.2 欧姆·厘米，几乎降低一百万倍！

第三，半导体的导电能力随光照而发生显著变化。例如一个沉积在绝缘基片上的硫化镉薄膜，其暗电阻为几十兆欧。当受光照后，电阻可能下降到只有几十千欧，阻值改变了几百倍。实际上这样的硫化镉薄膜就是一个光敏电阻。

此外，半导体的导电能力还会随电场、磁场等的作用而改变。

综上所述，我们看到半导体就是这样一种有时能导电，有时又不能很好地导电，容易受热、光、电、磁和杂质等作用影响而显著地改变特性的固体材料。

1.1.1* 晶体的能带理论

那么为什么半导体的导电性能会有上述这样一些特点呢？半导体的导电机构是怎样的呢？为了解释半导体的外部导电现象，人们进行了大量的工作，逐步总结了一套理论，称为

能带理论。能带理论较完满地解释了许多实验现象，并且根据能带理论所作的许多推断，在后来的实践中又获得了证实，因此能带理论是目前认识物体导电机构的有效总结。下面我们只能作一些简单的介绍。

锗和硅是典型的半导体材料，所以今后我们就以它们的特性作为讨论的基础。

1. 量子化原理

人们发现，原子中的电子绕核运动时，它的能量只能取一系列不连续的特定值。

以氢原子为例，氢原子是一个最简单的原子，它的原子核带一个正电荷，核外有一个绕核运动的电子。如果我们把电子刚好脱离原子核的束缚而成为自由电子时的能量取为零，则由实践得到的氢原子中电子可以取的特定值是

$$E_n = -\frac{mq^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} \quad (1.1.1) \quad (1) \text{ ①}$$

其中 m 是电子的质量($m=9.11 \times 10^{-31}$ 千克)， h 称为普朗克常数($h=6.63 \times 10^{-34}$ 焦/秒)， q 是电子电荷的数值($q=1.602 \times 10^{-19}$ 库)， ϵ_0 称为介电常数($\epsilon_0=8.849 \times 10^{-12}$ 法/米)， n 称为主量子数，可取1、2、3……等正整数，每一个 n 值对应于氢原子中电子可取的一个能量值。把以上已知量代入(1.1.1)式中计算，可得

$$E_n \approx -\frac{13.6}{n^2} \text{eV (电子伏)} \quad (1.1.2)$$

1 电子伏为一个电子电荷经 1 伏特电位变化时所增加的能量。 $1\text{eV}=1.6 \times 10^{-19}$ 焦耳。

把 $n=1, 2, 3, \dots$ 代入，就可以算出 $E_1, E_2, E_3, \dots$ 的数值。这些数值都是负的，表示电子的这些运动状态的能量都低于自由电子的能量。当 $n \rightarrow \infty$ 时， $E_\infty = 0$ ，所以 E_∞ 就对应于电子刚好挣脱原子核的束缚，成为自由电子时的能量。

如果以能量为纵坐标，把这些电子可取的能量排列起来，就得到一个能量的阶梯，如图 1.1.1 所示。这个能量阶梯的每一级就是氢原子中电子可取的一个能量特定值，称为能级。图 1.1.1 也就称为氢原子的电子能级图。

原子中电子的能量只能取一系列不连续的特定数值、通常把这一规律称为电子能量的量子化。

在图 1.1.1 所示的氢原子能级中， $n=1$ 的 E_1 能量最小， $E_2, E_3, \dots$ 的能量都要大一些。由于一个系统

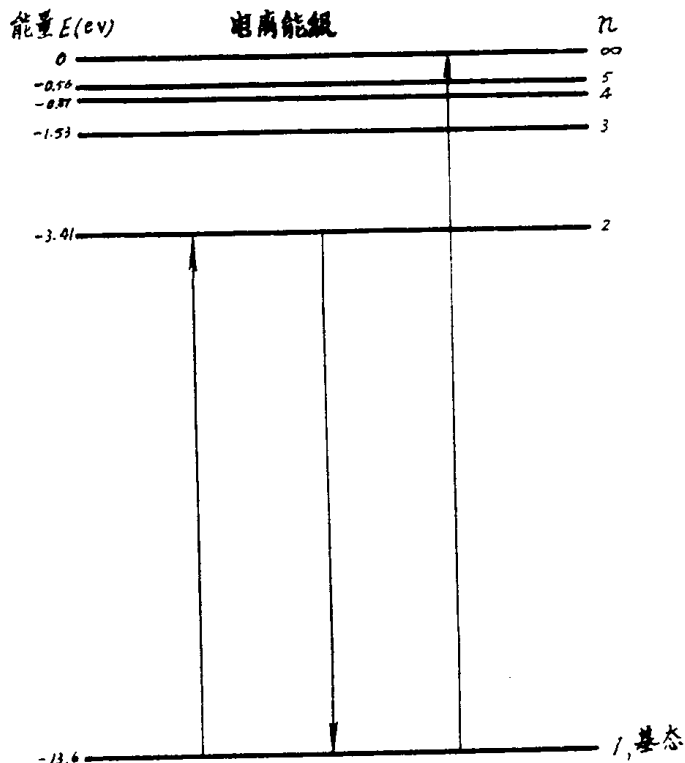


图 1.1.1 氢原子的电子能量

① 方括号 [] 内的数字表示参考书目的序号，以下同。

的状态总以能量最小的为稳定（称为能量最小原理），因而在正常状态下，氢原子中的电子一般就处在最低的 E_1 能级上，通常把电子处于 E_1 能级的状态称为“基态”。当外界以一定的方式给电子以能量时，电子可能吸收能量而从低能级跃迁到高能级上去。电子处在高能级的状态就称为激发态。处在高能级的电子是不稳定的，在一定的条件下它可能放出能量重新跳回到低能级上来。例如图 1.1.1 最左边的箭头就代表电子吸收能量由基态到 E_2 能级的跃迁；中间的箭头代表电子放出能量由 E_2 能级跳回到基态的跃迁；最右的那个箭头表示电子由基态到 $n = \infty$ 自由电子状态的跃迁，这种跃迁称为电离。

由于微观粒子具有粒子与波的两重特性，因此电子不象地球绕太阳旋转那样，有一个完全确定的轨道，它的“轨道”则是以一定的几率分布在原子核外围的一定区域中。这两种情况的对照见图 1.1.2，其中(a)为地球的轨道，(b)为电子运动的区域。

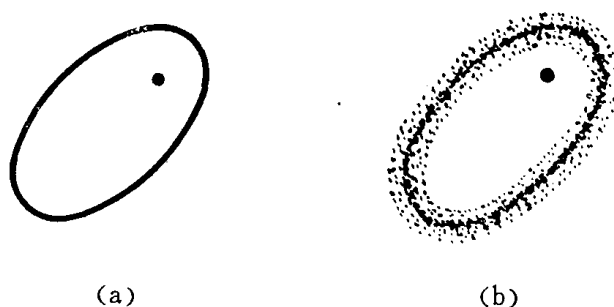


图 1.1.2 电子和地球运动“轨道”的对照

上述电子轨道分布在一定区域的几率，也可以用图 1.1.3 来表示。从图中可以看到， $1s$ (s 表示电子壳层，下面即将介绍) 电子出现在 r_1 的几率最大， $2s$ 电子出现在 r_2 的几率最大。然而，无论是 $1s$ 还是 $2s$ 电子都有相当的几率在 r_1 或 r_2 以外的其它区域中出现。以分布几率的概念代替完全确定的位置，这是微观粒子运动规律的一个特点。但是一般讨论电子运动的时候，为了方便起见，仍旧用“轨道”这个词，不过要注意的是这里“轨道”所代表的是电子出现几率较大的那一部分区域。

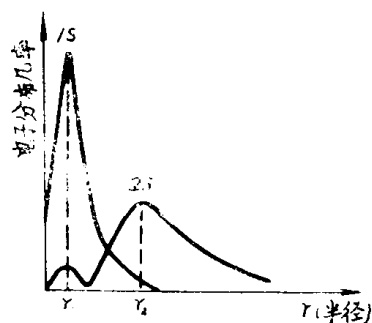


图 1.1.3 原子中电子的径向分布

对于一个具有多个电子的复杂原子来说，由于它的每一个电子除了受原子核的作用之外，还受其它电子的作用，因此其能级分布情况与只有一个电子的氢原子不同。进行详细研究表明，电子运动状态需要四个量子数来描述。这四个量子数是：

$n = 1, 2, 3 \dots$ ，称为主量子数，近似地表示电子的总能量；

$l = 0, 1, 2, 3, \dots, (n-1)$ ，称为角量子数，表示电子轨道动量的大小；

$m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm l$ ，称为磁量子数，表示电子轨道角动量的空间方向；

$m_s = \pm \frac{1}{2}$ ，称为自旋量子数，表示电子自旋角动量的空间方向。

原子中不可能有四个量子数都相等的两个或两个以上的电子，这叫做“泡利不相容原理”。因此，根据不相容原理，在一个具有多电子的复杂原子中这些电子不能同时都处在同

一个能级中。因为一个能级可能具有两个自旋量子数不同的电子，所以一个能级有两个状态，简称态。对于原子的基态来说，它的电子必然首先填充能量最低的能级，而当能量低的能级已经填满时，就按能量由小到大的次序，分别填满其余的能级。与此相应，从电子的运动轨道看，它将首先填满距核较近的各个轨道。这些轨道按主量子数的不同，分成各个壳层，用字母 $K, L, M, N, \dots$ 来表示 $n=1, 2, 3, 4, \dots$ 的电子壳层，在每一壳层中又按角动量的不同分成许多次壳层，用字母 $s, p, d, f, \dots$ 来表示 $l=0, 1, 2, 3, \dots$ 的电子次壳层。我们把原子中的电子壳层的分布列于表 1.1.1 中。表中只列出前面四个电子壳层，对于所有的化学元素需要七个壳层。

表 1.1.1 电子壳层和次壳层

壳 层	K		L		M			N		
n	1		2		3			4		
l	0	0	1	0	1	2	0	1	2	3
次 壳 层	s	s	p	s	p	d	s	p	d	f
m_l	0	0	$0, \pm 1$	0	$0, \pm 1$	$0, \pm 1, \pm 2$	0	$0, \pm 1$	$0, \pm 1, \pm 2$	$0, \dots \pm 3$
电 子 数	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14
	2	8		18			32			

具体说来，与 $n=1, l=0, m_l=0, m_s=\pm\frac{1}{2}$ 相对应的，有二个能态，叫做 $1s$ 态；与 $n=2, l=0, m_l=0$ 和 $m_s=\pm\frac{1}{2}$ 相对应的，有两个能态，构成 $2s$ 次壳层；与 $n=2, l=1, m_l=-1, 0, +1$ 和 $m_s=\pm\frac{1}{2}$ 相对应的，有 6 个能态，称为 $2p$ 次壳层。因此，如表 1.1.1 所列，在 L 壳层的电子总数为 $2+6=8$ 个。用类似的方式，我们可以证实一个 d 次壳层，最多含有 10 个电子数，一个 f 次壳层最多含有 14 个电子数，等等。

例如半导体材料硅共有 14 个电子，它们在依次填满第一层和第二层之后，在第三层还有 4 个电子，分别处在 $3s$ 和 $3p$ 能级上。由于元素最外壳层上电子的数目决定此元素的化学性质，称为价电子，所以硅有 4 个价电子，是第四族的元素。锗共有 32 个电子，它们在依次填满一、二、三层之后，在第四层也有 4 个电子，也是第四族元素。我们用上标表示在一个指定壳层上电子的数目，那么对于四族元素可以得到表 1.1.2 所列电子壳层结构的组态。

表 1.1.2 IV 族元素的电子组态

元 素	原 子 序	组 态
C	6	$1s^2 2s^2 2p^2$
Si	14	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
Ge	32	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$
Sn	50	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^2$