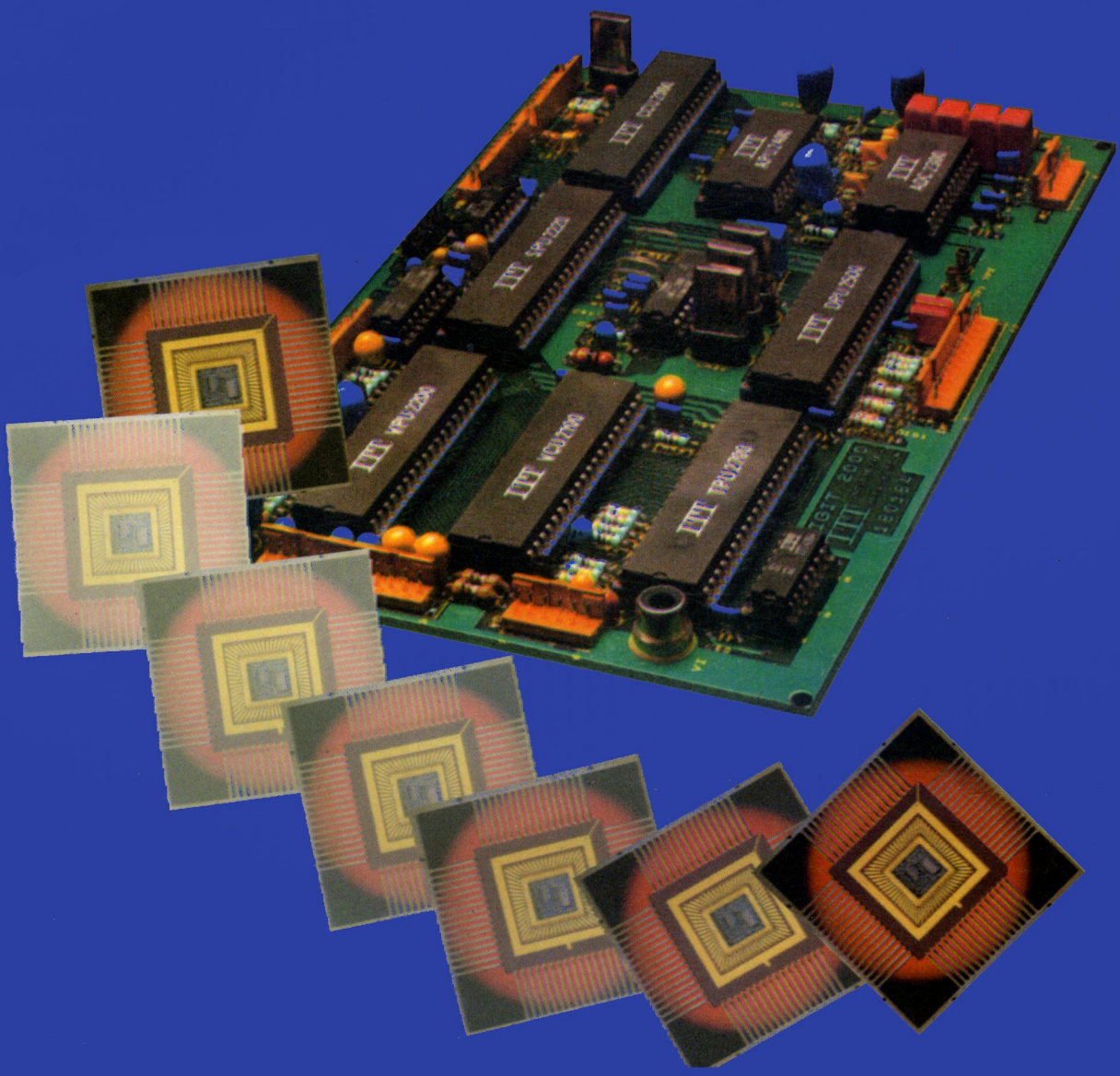
全国技工学校电子类通用教材

半导体物理与器件



中国劳动出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

全国技工学校电子类通用教材

半导体物理与器件

技工学校电子类专业教材编审委员会组织编写

中国劳动出版社

(京)新登字 114 号

内 容 简 介

本书是根据劳动部培训司、中国电子工业总公司教育局组织制定的《半导体物理与器件教学大纲》编写的技工学校电子类微电子器件专业通用教材。书中较系统地讲述了半导体物理的基本概念和半导体器件的基本工作原理，并适当介绍了近年发展的新型半导体器件。本书内容丰富，重点突出，深浅适宜。为便于复习，各章之后都有小结和习题。

本书也可作为电子类职业高中、企业中级技术工人培训教材，以及职工自学用书。

本书由天津电子仪表局职工大学傅连仲、天津中环电子元件公司尤志生编写，傅连仲主编；天津电子仪表局职工大学应之珑、天津电子仪表局田荣芬审稿，应之珑主审。

半导体物理与器件

技工学校电子类专业教材编审委员会组织编写

责任编辑　金龄

中国劳动出版社出版

（北京市惠新东街 1 号）

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

787×1092 毫米　16 开本　15 印张　367 千字

1993 年 11 月北京第 1 版　1993 年 11 月北京第 1 次印刷

印数：3000 册

ISBN 7-5045-1251-6/TN・024(课)　定价：8.00 元

说　明

1989年以来，由技工学校电子类专业教材编审委员会组织编写的技工学校电子类专业通用教材和实习教材相继出版。这套教材有：《数学》、《物理》、《制图》、《电子电路基础》、《电子测量与仪器》、《收录机原理调试与维修》、《无线电基础》、《微型电子计算机原理》、《操作系统》、《程序设计基础》、《微型计算机原理及应用》、《数字逻辑电路》、《BASIC 语言》、《PASCAL 语言》、《基本操作技能》、《电视机装配调试与维修》、《计算机操作实习》。为了进一步满足技工学校教学的需要，此次又组织编写了《电工基础》、《脉冲与数字电路》、《电视机原理调试与维修》、《无线电整机装配工艺基础》、《半导体物理与器件》、《录像机原理调试与维修》、《单片微型计算机原理与应用》等7种教材。

上述教材供二年制（招收高中毕业生）和三年制（招收初中毕业生）的技工学校电子类专业的学生使用，也适合工人培训和职工自学使用。

技工学校电子类专业教材编审委员会

1993年6月

前　言

电子工业部与我部密切配合，从1979年开始，共同组织编审出版了技工学校电子类专业教材。这是件具有现实意义和深远意义的工作。

职业技术教育是国家工业化和现代化的重要支柱。现代电子技术，特别是计算机技术的发明和发展，使人类社会发生了一场真正的革命。因此，衡量一个国家的国力是否强大，一定程度上已表现为在经济和社会各个领域中，科学技术尤其是电子技术应用的广度、深度和由此形成的实力。在今日中国的教育、科研、国防和经济领域里，电子技术的应用日益广泛，已有数以百万计的计算机在运转，而且数量还在不断增长。企业的生产管理和制造技术因此正在发生巨大的变革。但是，从传统的制造和管理方法向电子化、采用计算机控制技术过渡并非易事，主要是在安装和操作新设备上，实质上是在人员素质方面，遇到了不少困难。所以，编写新的教材，努力培养大批懂得现代电子技术的人才，已成为尽快提高劳动生产率、产品质量和管理水平的当务之急。实践证明，推动电子技术进步和提高劳动者素质，是密切结合、互相促进的，两者缺一不可。

我国已把提高劳动者素质，即培养提高技术工人和后备劳动者的技术业务素质，摆到非常重要的位置。因此，组织编审出版技工学校电子类专业教材是十分必要的。已经出版使用的电子类教材，从最初解决教材有无问题，到逐步提高质量、增编实习教材、重视加强基本技能训练，对培养中级电子技术工人起到了积极的作用。

我相信，在广大编审、出版工作者的共同努力下，在实践中，技工学校电子类专业教材将更加完善，成为有权威的、质量一流的教材。在此，我谨向电子工业部和全体编审人员，以及为教材的出版发行做出贡献的人们表示真诚的感谢。

中华人民共和国劳动部副部长　**令狐安**

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录

绪论 …… 1
第一章　量子物理基础 …… 3
§1-1　原子的结构 …… 3
§1-2　原子壳层结构 …… 5
§1-3　电子运动的轨道理论(玻尔理论) …… 9
本章小结 …… 12
习题 …… 13
第二章　晶体的结构与能带 …… 14
§2-1　晶体的结构 …… 14
§2-2　晶体中原子的结合 …… 19
§2-3　电子的共有化运动与能带 …… 20
§2-4　半导体晶体的缺陷 …… 23
本章小结 …… 24
习题 …… 25
第三章　半导体中的杂质 …… 26
§3-1　本征半导体 …… 26
§3-2　掺杂半导体 …… 28
§3-3　掺杂半导体在室温上下的载流子浓度 …… 31
§3-4　掺杂半导体的本征情况 …… 33
§3-5　费米能级 …… 35
本章小结 …… 38
习题 …… 39
第四章　半导体中载流子的迁移现象 …… 40
§4-1　金属自由电子论 …… 40
§4-2　半导体中载流子的运动 …… 43
§4-3　电子与空穴的迁移率 …… 47
本章小结 …… 49
习题 …… 49
第五章　非平衡载流子 …… 50
§5-1　非平衡载流子和非平衡少数载流子 …… 50
§5-2　非平衡载流子的复合与寿命 …… 51
§5-3　复合机理 …… 53

§5-4 非平衡载流子的扩散运动 …… 55
本章小结 …… 58
习题 …… 59
第六章 P-N结与半导体二极管 …… 60
§6-1 P-N结的形成与能带图 …… 60
§6-2 P-N结的电流电压特性 …… 64
§6-3 P-N结的电容效应与变容二极管 …… 70
§6-4 P-N结的击穿特性 …… 75
§6-5 开关二极管 …… 79
§6-6 二极管的结构与主要参数 …… 80
本章小结 …… 82
习题 …… 83
第七章 金属-半导体接触和半导体表面 …… 84
§7-1 金属-半导体接触 …… 84
§7-2 金属-半导体接触的整流特性 …… 86
§7-3 欧姆接触 …… 88
§7-4 半导体表面 …… 90
本章小结 …… 92
习题 …… 93
第八章 半导体的光电与电光效应及器件 …… 94
§8-1 半导体的光吸收和光电导 …… 94
§8-2 P-N结光生伏特效应和光电池 …… 97
§8-3 光敏电阻 …… 99
§8-4 P-N结的光产生与发光二极管 …… 101
§8-5 半导体激光器 …… 105
本章小结 …… 107
习题 …… 107
第九章 半导体的热磁声压电性质 …… 109
§9-1 半导体的热电效应与应用 …… 109
§9-2 半导体磁电效应 …… 110
§9-3 半导体的压阻效应 …… 112
§9-4 半导体载流子的相互作用 …… 113
§9-5 半导体的气敏特性 …… 114
本章小结 …… 115
习题 …… 115
第十章 晶体管的直流特性 …… 116
§10-1 晶体管的基本结构、分类及命名 …… 116
§10-2 晶体管的放大作用 …… 119
§10-3 载流子在晶体管内的传输 …… 122

§10-4 晶体管的特性曲线 …… 123
§10-5 反向电流 …… 128
§10-6 晶体管的击穿电压 …… 130
§10-7 晶体管的基极电阻 r_b、输入正向压降 V_{BES}、饱和压降 V_{CES} …… 134
本章小结 …… 136
习题 …… 137
第十一章 晶体管的频率特性 …… 139
§11-1 晶体管的电容 …… 139
§11-2 晶体管的交流特性 …… 142
§11-3 晶体管的交流电流放大系数 …… 149
§11-4 晶体管频率特性参数 …… 152
本章小结 …… 157
习题 …… 158
第十二章 晶体管的功率特性 …… 160
§12-1 晶体管最高工作电压 …… 160
§12-2 集电极最大电流 …… 162
§12-3 晶体管的最大耗散功率 …… 166
§12-4 二次击穿 …… 172
§12-5 晶体管的安全工作区 …… 175
本章小结 …… 175
习题 …… 177
第十三章 晶体管的开关特性 …… 179
§13-1 晶体管的开关作用 …… 179
§13-2 晶体管的开关过程 …… 180
§13-3 晶体管的开关时间参数 …… 183
本章小结 …… 185
习题 …… 185
第十四章 场效应管 …… 187
§14-1 结型场效应管 …… 187
§14-2 MOS 管 …… 193
§14-3 场效应管和晶体管的比较 …… 205
本章小结 …… 206
习题 …… 206
第十五章 新型特殊器件 …… 208
§15-1 晶闸管 …… 208
§15-2 半导体敏感器件 …… 210
本章小结 …… 216
习题 …… 217
实验一 晶体二极管的测量 …… 218

实验二　晶体管主要直流参数的测量…… 221
实验三　场效应管的测量…… 225

绪　论

半导体物理学是固体物理学的一个分支学科，主要研究半导体中原子状态和电子状态两个方面。前者是以晶体结构学和晶格力学为基础，后者则以固体电子论和能带理论为依据。主要内容包括：半导体的晶体结构、晶体生长方法及机理；半导体中各种类型的缺陷、杂质以及它们之间的相互作用；半导体中电子的能量状态；电子在外场作用下的输运特性；半导体的光学、热学性质；半导体的表面性质及其所发生的物理过程；各种粒子束（电子、离子、质子、中子或 α 粒子）和射线（X 射线、γ 射线、宇宙射线）与半导体的相互作用；半导体器件内部的电子运动过程等。

利用半导体材料制成的各种电子器件统称为半导体器件。人们很早以前就知道半导体这一类物质，在 20 世纪初期就制出了点接触矿石（就是半导体）检波器，但它的效率低、稳定性差。后来制出了真空二极管，天然的矿石检波器便被淘汰了。

约在 1930 年，用氧化亚铜制出了整流器，并在工业上得到了应用，这才促使人们开始重视半导体。

当无线电技术发展到微波领域后，电子管便显露出一系列缺点。首先，雷达技术的发展，对检波器的要求越来越高，人们发现晶体检波器的微波特性要比真空二极管理想得多，这使人们对半导体更加关注，推动了晶体检波器的研究工作。不久，制出了锗晶体检波二极管，它的微波特性比真空二极管好得多，而且克服了矿石检波器工作不稳定的缺点，因而得到了广泛的应用。晶体检波二极管的广泛应用，又促进了锗、硅半导体材料的制备和半导体理论等方面的研究，到 1948 年就制出了第一只晶体三极管（点接触晶体管），紧接着，1949 年建立了 P-N 结理论，1951 年用合金法制造出结型晶体三极管。这样，在人们面前展现出了半导体技术这个富有前途的新领域。

随着半导体理论、半导体工艺和半导体材料的不断发展，晶体管的品种不断增多，质量也不断提高。和电子管相比，晶体管具有许多优点。因此，40 多年来，半导体技术可以说是在突飞猛进地发展着，特别是在 1960 年前后发展起来的平面工艺，给半导体技术增添了新的活力。平面工艺采用外延、光刻和通过保护层上的窗孔进行扩散等技术，成功地解决了一系列半导体器件制造工艺上的重大问题，从而制造出高频大功率平面晶体管。

平面工艺的出现，还使得场效应晶体管的制造得以实现。场效应晶体管的特性曲线和电子管的相似，它的输入阻抗很高，噪声很低，具有一般晶体管所不具备的许多优点。

晶体管问世以来，围绕着如何提高晶体管的频率、功率、可靠性、稳定性和缩小体积、减轻重量、降低成本等问题，进行了大量的研究工作。客观的需要促使人们去实践、去创造更新的器件。于是，在 1962 年制出了集成电路。

集成电路是在平面工艺基础上发展起来的，就是把一个单元电路所需的晶体管、二极管、电阻、电容等元件制作在一块硅片上，从而打破了传统的技术，即各种功能的电路不再是大量分离元件松散的结合体。小巧玲珑的集成电路代替了笨重的电子管或晶体管电路及部分分机，

使电子设备向固体化、小型化方面大大前进了一步。

集成电路具有体积小、重量轻、可靠性高、性能好等优点，因而使它一开始就受到了极大的重视。在短短的30年间，在工作频率、开关速度、集成度、应用范围以及电路设计等方面，都有了很大的发展。

集成电路的品种很多，按工艺结构来分，有半导体集成电路、薄膜集成电路、厚膜集成电路和混合集成电路等。

按所体现的功能来分，集成电路又可分为数字集成电路和模拟集成电路两大类。数字电路以外的集成电路统称为模拟电路。模拟集成电路又可分为线性集成电路（如各种放大器）和非线性集成电路（如检波、混频、振荡电路等）。

此外，工作在微波波段的模拟电路，在工艺、结构上都有特色，自成一格，称为微波集成电路。它的频率范围可从300MHz到100×10^3MHz。

就构成有源元件的结构来分，集成电路又有双极集成电路和MOS集成电路。前者用双极晶体管（即一般的P-N-P、N-P-N晶体管），后者用MOS场效应晶体管。

如果按照集成的规模大小，则又可分为小规模集成电路（在单片硅片上集成10个以下门电路或100个以下晶体管的集成电路）、中规模集成电路（在单片硅片上集成10～100个门电路或100～1000个晶体管的集成电路）、大规模集成电路（在单片硅片上集成100～1000个门电路或1000～10000个晶体管的集成电路）、甚大规模集成电路（在单片硅片上集成1000～10000个门电路或10000～100000个晶体管的集成电路）和超大规模集成电路（在单片硅片上集成100000个以上门电路或100000个以上晶体管的集成电路）等几种。现在已可在单片硅片上集成几十万甚至数百万个晶体管了。

集成电路的历史虽不算长，但已取得很大的进展。目前，在电子计算机、军用通信设备、导弹、雷达和人造卫星中，已占有非常重要的地位。

近年来还出现了许多新型半导体器件，如雪崩二极管、体效应二极管、限累二极管、肖特基二极管以及变容二极管、隧道二极管、阶跃二极管、开关管、微波晶体管、半导体激光器等。

电子技术、航天技术、核技术称之为当今社会三大科学技术前沿，而微电子技术又是这三大技术的基础。可以说，微电子技术在一定程度上标志了一个国家的科学技术水平。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第一章　量子物理基础

半导体理论的基础是固体物理学和量子力学，因此在学习半导体物理之前，首先对固体物理学和量子力学的一些基本概念和重要理论应有了解。本章和下一章将对此作一简介。

本章主要介绍原子的核型结构、原子中电子的壳层结构、氢原子光谱的规律性、玻尔的氢原子理论。

§1-1　原 子 的 结 构

19 世纪末 20 世纪初，电子、X 射线和放射性的发现，证实了原子的存在，并进一步揭示了原子是具有复杂结构的粒子。

众所周知，原子是电中性的，它由带正电的原子核和带负电围绕着原子核运动的电子所组成。1911 年美国物理学家密立根用油滴实验测定了电子电荷，并证明了一切荷电物质都只能带有整数倍的基本电荷 e。实验测定，电子电荷（绝对值）及静止电子的质量分别为

$$e = 1.602 \times 10^{-19}(\mathrm{C})$$

$$m_e = 9.109 \times 10^{-31}(\mathrm{kg})$$

一、原子的核型结构

1911 年卢瑟福进行了著名的 α 粒子散射实验，最初发现了原子核的存在，证明了原子结构的行星模型。他认为原子具有与太阳系相类似的结构，在这个结构中，有一个带正电荷的中心体——原子核，它几乎占有全部原子的质量；电子围绕在核的四周旋转，如图 1-1 所示。原子核的半径比原子的半径小得多。实验测定，原子的直径在 10^{-10}m 量级，而原子核的直径约为 $10^{-15}\sim10^{-14}$m。原子核所带正电荷的电量与绕核旋转着的所有电子所带负电荷的电量相等，因而整个原子呈电中性。

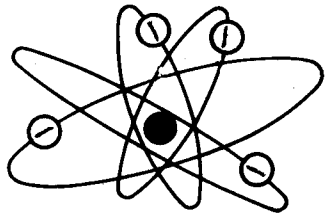


图 1-1　原子核式结构示意图

α 粒子散射实验除了证实原子的核型结构以外，还确定了不同的原子核含有不同的核电荷量。对于给定的元素来说，核电荷量等于 Ze，其中，Z 称为核电荷数，e 是电子电量的绝对值，也就是这一元素在门捷列夫元素周期表中的原子序数。

总之，原子由带正电的原子核与带负电的电子所组成，原子是呈电中性的。

二、氢原子的光谱规律

原子能发光，这是重要的原子现象之一。人们对原子结构的认识是和原子的光谱实验分不开的。当原子被火焰、电弧、电火花或其它方法激发就能发出不同波长或频率的光线，利用棱镜对这些光线的折射率进行观察和计算，便可把它们分成一系列按照波长排列的光谱线。线状光谱是这些谱线的总称。原子光谱都是线状光谱。每种元素都有自己的光谱，利用它就可以进行

元素的原子光谱分析。大多数金属的光谱都很复杂，包含很多谱线，例如铁，就有几千条之多。氢原子的光谱是其中最简单的一种。

19 世纪末，人们通过实验总结出氢原子光谱线系有明显的规律性，其规律为：

$$k = \frac{1}{\lambda} \approx R_H\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right) = T(m) - T(n) \tag{1-1}$$

式中 R_H——里德伯常数，实验测定 $R_H = 1.09677581 \times 10^7 m^{-1}$；

k——单位长度内所含有的波数，即波长 λ 的倒数，称为波数(m^{-1})。

上式中的参变量分别为 m 和 $n(n>m)$。R_H/m^2 和 R_H/n^2 称为光谱项，分别用 $T(m)$和 $T(n)$表示。对于给定的 m 来说，R_H/m^2 具有一定值，称为定项；R_H/n^2 为可变项，n 取一系列大于 m 的有序的正整数值。这样就给出了不同谱线的波数，这些谱线组成了一个谱线系。

当 $m=1$ 时，它的光谱在远紫外光区，称为赖曼系，可用下式表示：

$$k = R_H\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right), n = 2,3,4\cdots\cdots \tag{1-2}$$

当 $m=2$ 时，它的光谱在可见光区，称为巴耳末系，可用下式表示：

$$k = R_H\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right), n = 3,4,5\cdots\cdots \tag{1-3}$$

在红外光区的光谱线系有：

帕邢系：$m=3, n=4,5,6\cdots\cdots$

$$k = R_H\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right) \tag{1-4}$$

布喇喀系：$m=4, n=5,6,7\cdots\cdots$

$$k = R_H\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right) \tag{1-5}$$

普芳德系：$m=5, n=6,7,8\cdots\cdots$

$$k = R_H\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right) \tag{1-6}$$

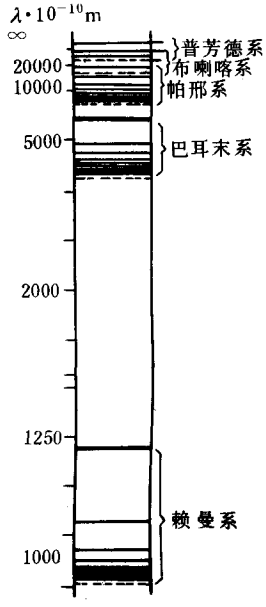


图 1-2 完整的氢原子光谱

图 1-2 示出完整的氢原子光谱。图中谱线的强度大致用线的宽度表示，虚线是谱线系的极限。

通过对氢原子光谱规律性的讨论，可以总结出如下几点：

(1)谱线的波数 k 由两个光谱项的差值决定；

(2)若前项保持定值，后项随 n 而变化，就给出了同一谱线系中各谱线的波数；

(3)改变定项的数值，就能给出不同的谱线系。

后面将看到，原子中的电子只能处于某些稳定的状态，简称定态。这些状态的能量是不连续的。处于定态的原子并不辐射能量，原子由某一定态突然跳到另一定态时会放出或吸收辐射。每一辐射的频率是和两个稳定态联系着的。从式(1-1)可以看出，氢原子光谱的谱线频率不是任意的，而是随着两个正整数(m 和 n)的改变作跳跃式的变化。这种不连续性不是偶然的，它是原子内在规律性的反映。

§1-2 原子壳层结构

元素的性质决定于原子的结构，也就是决定于原子中电子所处的状态。在多电子的原子中，电子的分布是分层次的，这种电子的层次叫做电子壳层。决定原子中电子的运动状态需四个量子数，下面首先对此进行简介。

一、四个量子数

1. 主量子数 n

它初步决定体系的能量，可取值为 $n=1,2,3\cdots\cdots$。

2. 角量子数 l

它决定电子轨道的动量矩，或者说，决定电子运动轨道的椭圆度。在碱金属和其它具有多电子的原子中，处于同一主量子数 n 而不同角量子数 l 状态的电子，其能量略有不同。角量子数可以取值为 $l=0,1,2,\cdots\cdots(n-1)$。

3. 磁量子数 m_l

它决定动量矩的空间方位，亦即决定电子运动轨道平面相对于外磁场方向的取向。在外磁场的作用下，处于同一主量子数 n 和同一角量子数 l，而磁量子数 m_l 不同的各种状态的电子，其能量亦有所不同。磁量子数可取值为 $m_l=0,\pm1,\pm2\cdots\cdots\pm l$。

4. 自旋量子数 m_s

它决定电子自旋动量矩在外磁场方向的投影。电子自旋方向只有顺时针和逆时针两种方向，通常用↑和↓分别表示。它只有二种取值的可能，即 $m_s=\pm\frac{1}{2}$。

以上各量子数数值间的关系说明四个量子数是相互联系、相互制约的。我们要正确描述核外电子的运动状态，就需要用四个量子数。因为这四个量子数的数值分别表示了电子在稳定运动状态下的能量、动量矩、动量矩的空间方位和自旋动量矩在空间某给定方向上的分量之值。

主量子数相同的电子分布在同一壳层内，主量子数相同而角量子数不同的电子分布在不同的次壳层(或称分壳层)内。一般来说，在不同的壳层中，主量子数 n 越小，能级就越低；而在不同的次壳层中，角量子数 l 越小，能量就越低。每一壳层只能容纳一定数量的电子，当电子超过限定数量时，这些电子必须填充到新的壳层上。

二、泡利不相容原理

为了说明各壳层最多可以容纳电子的数量为什么不相同，泡利于 1925 年提出了不相容原理：在一个原子中不能有两个或更多的电子处在完全相同的状态(即它们的四个量子数一一相同)。也就是说，一个原子中的任何两个电子不可能有完全相同的一组量子数 n、l、m_l 和 m_s。

运用不相容原理可以说明具有相同主量子数 n 的电子最多可以有多少个。

我们把 $n=1,2,3,4,5,\cdots\cdots$ 的壳层分别用 K、L、M、N、O……来表示，把 $l=0,1,2,3,4\cdots\cdots$ 的次壳层分别用 s、p、d、f、g……来表示。

由于 $n>l$，对于 K 壳层，$n=1$，只能有一个次壳层 s；对于 L 壳层，$n=2$，只能有两个次壳层 s、p；对于 M 壳层，$n=3$，只能有 s、p、d 三个次壳层。以此类推，当 n 给定后，l 有 n 个可能值：0，1，$2\cdots\cdots n-1$；当 n、l 均给定后，m_l 又共有 $(2l+1)$ 个可能值：$0,\pm1,\pm2\cdots\cdots\pm l$；当 n、l、m_l 都给定后，m_s 又有两个可能的值：$+\frac{1}{2}$ 和 $-\frac{1}{2}$。因此，具有同一个 n 值的电子数最多为

$$N=\sum_{l=0}^{n-1}2(2l+1)=2[1+3+5+\cdots+(2n-1)]$$

$$=2n^2 \tag{1-7}$$

可见，同一原子中具有相同主量子数 n 的电子不能超过 $2n^2$ 个。也就是说，原子中第 n 个壳层最多只能容纳 $2n^2$ 个电子。当各壳层达到了它所容许的最大电子数时，就称它们为满壳层或闭合壳层。表 1-1 列出了原子内各壳层和次壳层所能容纳的最多电子数。

表 1-1　　原子中各壳层和次壳层可容纳的最多电子数

n \ l	0 s	1 p	2 d	3 f	4 g	5 h	6 i	N
1 K	2	—	—	—	—	—	—	2
2 L	2	6	—	—	—	—	—	8
3 M	2	6	10	—	—	—	—	18
4 N	2	6	10	14	—	—	—	32
5 O	2	6	10	14	18	—	—	50
6 P	2	6	10	14	18	22	—	72
7 Q	2	6	10	14	18	22	26	98

三、能量最小原理

电子在排布时遵守能量最小原理，即每个电子趋向于占有最低能级。也就是说，当原子系统的总能量为最小时，原子最稳定。

因为能级基本上由主量子数 n 来决定，在多数情况下，n 越小，能级越低，电子离核越近，所以离核最近的壳层一般将首先被电子填满。但由于角量子数 l 对能级也有一定的影响，在有些情况下，能级高低的次序与主量子数的次序不一致，有些 n 大而 l 小的能级比 n 较小而 l 较大的能级要低。在这种情况下，电子将首先填充能量较低的壳层，这就出现了在前面一壳层尚未填满时，电子就填入下一壳层的现象。理论与实验都证明了原子能级的高低次序，图 1-3 示出电子填充各壳层的顺序：

1s，2s，2p，3s，3p，4s，3d，4p，5s，4d，5p，6s，4f，5d，6p，7s，6d

由此可以看出，4s 能级比 3d 能级低，5s 能级比 4d 能级低……。

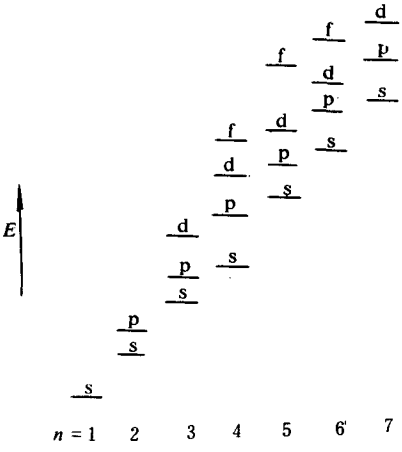


图 1-3　原子的量子态次序

根据泡利不相容原理和能量最小原理，就可以列出元素周期表中各元素的电子排布情况，如表 1-2 所列。

表 1-2　　各种元素原子中电子的壳层结构

原子序数	元素名称	K	L		M			N				O				P			Q
		1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	6s	6p	6d	7s
1	H 氢	1																	

续

原子序数	元素名称		K	L		M			N				O				P			Q
			1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	6s	6p	6d	7s
2	He	氦	2																	
3	Li	锂	2	1																
4	Be	铍	2	2																
5	B	硼	2	2	1															
6	C	碳	2	2	2															
7	N	氮	2	2	3															
8	O	氧	2	2	4															
9	F	氟	2	2	5															
10	Ne	氖	2	2	6															
11	Na	钠	2	2	6	1														
12	Mg	镁	2	2	6	2														
13	Al	铝	2	2	6	2	1													
14	Si	硅	2	2	6	2	2													
15	P	磷	2	2	6	2	3													
16	S	硫	2	2	6	2	4													
17	Cl	氯	2	2	6	2	5													
18	A	氩	2	2	6	2	6													
19	K	钾	2	2	6	2	6		1											
20	Ca	钙	2	2	6	2	6		2											
21	Sc	钪	2	2	6	2	6	1	2											
22	Ti	钛	2	2	6	2	6	2	2											
23	V	钒	2	2	6	2	6	3	2											
24	Cr	铬	2	2	6	2	6	5	1											
25	Mn	锰	2	2	6	2	6	5	2											
26	Fe	铁	2	2	6	2	6	6	2											
27	Co	钴	2	2	6	2	6	7	2											
28	Ni	镍	2	2	6	2	6	8	2											
29	Cu	铜	2	2	6	2	6	10	1											
30	Zu	锌	2	2	6	2	6	10	2											
31	Ga	镓	2	2	6	2	6	10	2	1										
32	Ge	锗	2	2	6	2	6	10	2	2										
33	As	砷	2	2	6	2	6	10	2	3										
34	Se	硒	2	2	6	2	6	10	2	4										
35	Br	溴	2	2	6	2	6	10	2	5										
36	Kr	氪	2	2	6	2	6	10	2	6										
37	Rb	铷	2	2	6	2	6	10	2	6			1							
38	Sr	锶	2	2	6	2	6	10	2	6			2							
39	Y	钇	2	2	6	2	6	10	2	6	1		2							
40	Zr	锆	2	2	6	2	6	10	2	6	2		2							
41	Nb	铌	2	2	6	2	6	10	2	6	4		1							
42	Mo	钼	2	2	6	2	6	10	2	6	5		1							
43	Tc	锝	2	2	6	2	6	10	2	6	5		2							
44	Ru	钌	2	2	6	2	6	10	2	6	7		1							
45	Rh	铑	2	2	6	2	6	10	2	6	8		1							
46	Pd	钯	2	2	6	2	6	10	2	6	10									
47	Ag	银	2	2	6	2	6	10	2	6	10		1							
48	Cd	镉	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2							

续

原子序数	元素名称		K	L		M			N				O				P			Q
			1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	6s	6p	6d	7s
49	In	铟	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	1						
50	Sn	锡	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	2						
51	Sb	锑	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	3						
52	Te	碲	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	4						
53	I	碘	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	5						
54	Xe	氙	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6						
55	Cs	铯	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6			1			
56	Ba	钡	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6			2			
57	La	镧	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6	1		2			
58	Ce	铈	2	2	6	2	6	10	2	6	10	1	2	6	1		2			
59	Pr	镨	2	2	6	2	6	10	2	6	10	3	2	6			2			
60	Nd	钕	2	2	6	2	6	10	2	6	10	4	2	6			2			
61	Pm	钷	2	2	6	2	6	10	2	6	10	5	2	6			2			
62	Sm	钐	2	2	6	2	6	10	2	6	10	6	2	6			2			
63	Eu	铕	2	2	6	2	6	10	2	6	10	7	2	6			2			
64	Gd	钆	2	2	6	2	6	10	2	6	10	7	2	6	1		2			
65	Tb	铽	2	2	6	2	6	10	2	6	10	9	2	6			2			
66	Dy	镝	2	2	6	2	6	10	2	6	10	10	2	6			2			
67	Ho	钬	2	2	6	2	6	10	2	6	10	11	2	6			2			
68	Er	铒	2	2	6	2	6	10	2	6	10	12	2	6			2			
69	Tm	铥	2	2	6	2	6	10	2	6	10	13	2	6			2			
70	Yb	镱	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6			2			
71	Lu	镥	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	1		2			
72	Hf	铪	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	2		2			
73	Ta	钽	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	3		2			
74	W	钨	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	4		2			
75	Re	铼	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	5		2			
76	Os	锇	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	6		2			
77	Ir	铱	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	7		2			
78	Pt	铂	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	9		1			
79	Au	金	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		1			
80	Hg	汞	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2			
81	Tl	铊	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	1		
82	Pb	铅	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	2		
83	Bi	铋	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	3		
84	Po	钋	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	4		
85	At	砹	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	5		
86	Rn	氡	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6		
87	Fr	钫	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6		1
88	Ra	镭	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6		2
89	Ac	锕	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6	1	2
90	Th	钍	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6	2	2
91	Pa	镤	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	2	2	6	1	2
92	U	铀	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	3	2	6	1	2
93	Np	镎	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	4	2	6	1	2
94	Pu	钚	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	6	2	6		2
95	Am	镅	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	7	2	6		2

需要全本请访问 www.ertongbook.com