

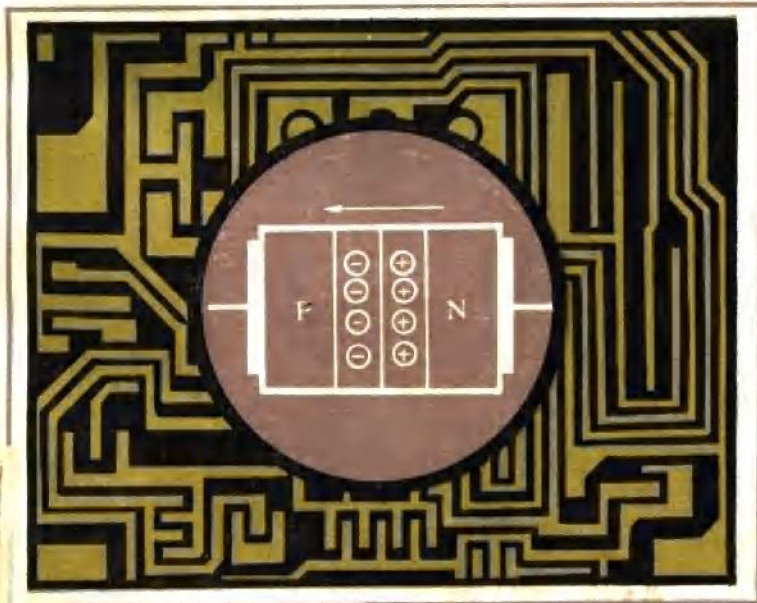


电子工业工人初级技术培训教材

半 导 体 专 业

半导体器件基础

电子工业半导体专业工人技术教材编写组



上海科学技术文献出版社

电子工业工人初级技术培训教材——半导体专业

半 导 体 器 件 基 础

电子工业半导体专业
工人技术教材编写组

*

上海科学技术文献出版社出版
(上海市武康路2号)

新华书店上海发行所发行
上海市印刷十二厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 9.75 字数 235,000

1984年3月第1版 1984年3月第1次印刷

印数: 1—56,800

书号: 15192·266 定价: 1.00 元

《科技新书目》55-287

出版说明

为了更好地落实中共中央、国务院《关于加强职工教育工作的决定》，迅速提高我国电子工业半导体专业青壮年工人的技术水平，受电子工业部委托，在中国电子器件工业总公司的领导下，我们按照部颁《电子工业半导体专业工人初级技术理论教学计划、教学大纲》的要求，编写了《半导体器件工艺》、《半导体化学》、《半导体器件基础》、《半导体器件线路》、《钳工知识》五本初级专业技术理论教材。

这套教材是电子工业工人初级技术培训统编教材，可作为半导体专业四级以下(包括四级)青壮年工人的技术培训用书，也可作为具有一定半导体生产知识的工人、干部的自学丛书。

本教材在编审过程中，得到了上海市半导体器件工业公司的大力支持，并得到了八七八厂、七四二厂、常州半导体厂等单位的密切配合。高级工程师车运洪、俞钟钰、孙义芳等同志对教材的编写作了许多具体的指导，王儒全、何明章同志负责本教材的整理加工工作。在此一并表示感谢。

《半导体器件基础》由于国雄及叶尚杰同志编写，李永增同志审定。

由于半导体工业所涉及的科学技术知识十分广泛，时间又很仓促，编审人员水平有限，缺点和错误在所难免，恳切希望广大读者提出宝贵意见。

电子工业半导体专业工人技术教材编写组

一九八三年四月

前 言

本书为从事半导体器件制造和研究的职工进行技术培训的统编教材之一。

本课程为半导体器件的基础理论课。本书编写的目的是使职工掌握一定的理论知识，以进一步提高操作技能和分析问题的能力。

半导体技术是本世纪出现的一项新技术。随着半导体技术日新月异的发展，半导体器件已经进入了科学技术的各个领域，在家庭生活中也越来越多地出现半导体电子产品。可以肯定地说，在四个现代化的进程中，半导体器件将担任愈来愈重要的角色。

本书尽量避免复杂的数学推导和公式，在叙述上也尽量做到通俗易懂。第一章至第四章是半导体物理的一些基础理论知识，以后各章为器件介绍，主要分二极管和晶体管、集成电路、微波器件、光敏器件四个方面。在学习时可根据需要有所侧重或选择。每章附有思考题，以供练习之用。

限于编者的水平，错误之处在所难免，恳切希望大家批评指正。

编 者 1983.6.

主要参数符号

A	面积	D_n	电子扩散系数
A_e	发射结面积	D_p	空穴扩散系数
A_b	基区面积	d	隧道长度
A_c	集电结面积	E	电子能量、电场强度
A_v	电压增益	E_+	价带顶电子能量
BV_R	PN 结反向击穿电压	E_-	导带底电子能量
BV_{EB0}	eb 结反向击穿电压	E_F	费米能级
BV_{CB0}	cb 结反向击穿电压	E_{Fm}	金属费米能级
BV_{CE0}	ce 极之间的击穿电压	E_{Fn}	N 型半导体费米能级
BV_{DS}	漏源击穿电压	E_{Fp}	P 型半导体费米能级
b	基极	E_g	禁带宽度
C	电容	E_n	施主杂质能级
C_c	集电结电容	E_p	受主杂质能级
C_e	发射结电容	e	发射极
C_D	扩散电容	f	频率
C_T	势垒电容	f_m	最高振荡频率
C_{GD}	栅漏电容	f_T	特征频率
C_{GS}	栅源电容	f_a	共基极截止频率
C_{TC}	集电结势垒电容	f_b	共发射极截止频率
C_{Te}	发射结势垒电容	g_m	跨导
c	集电极	G	栅极
D	杂质扩散系数	G_p	功率放大系数

h	普朗克常数	N_a	施主杂质浓度
h_{FE}	共发射极直流电流放大系数	n_0	平衡时的载流子浓度
I	电流	Δn_0	非平衡电子浓度
I_E	发射极电流	P_{cm}	集电极最大耗散功率
I_B	基极电流	P_{ni}	输入噪声功率
I_C	集电极电流	P_{no}	放大后输出噪声功率
I_{EBO}	发射结反向电流	P_{si}	输入信号功率
I_{CBO}	集电结反向电流	P_{so}	放大后输出信号功率
I_{CEO}	ce 极之间的穿透电流	p	价带空穴浓度
I_F	正向电流	p_0	平衡时的空穴浓度
I_R	反向电流	Δp_0	非平衡空穴浓度
I_S	反向饱和电流	p	电子电荷
I_z	稳压电流	R_g	信号源内阻
I_{ZM}	最大稳压电流	R	电阻
I_{ne}	发射结电子电流	r_e	发射极等效电阻
I_{no}	集电结电子电流	r_b	基区电阻
I_{pe}	发射结空穴电流	r_c	集电极等效电阻
I_r	基区复合的空穴电流	r_{cs}	集电极串联电阻
I_{cm}	最大工作电流	R_T	热阻
k	波尔兹曼常数	T	绝对温度、周期
L_n	电子扩散长度	T_j	结温
L_p	空穴扩散长度	T_{jm}	最高结温
n	导带电子浓度	t	时间
N_F	噪声系数	t_d	延迟时间
N_a	受主杂质浓度	t_r	上升时间
n_i	本征载流子浓度	t_s	存贮时间
		t_f	下降时间

V	电压		数
V_{cc}	电源电压	γ	发射效率
V_{DD}	MOS 电路电源电压	ε	介质介电常数
V_F	正向压降	η	基区输运系数
V_R	反向电压	μ	迁移率
V_{EB}	eb 极之间电压	μ_n	电子迁移率
V_{CB}	cb 极之间电压	μ_p	空穴迁移率
V_{CE}	ce 极之间电压	ν	光子频率
V_{CEB}	ce 极饱和压降	ρ	电阻率
V_{DS}	漏源电压	ρ_e	发射区电阻率
V_{GS}	栅源电压	ρ_b	基区电阻率
V_P	夹断电压	ρ_c	集电区电阻率
V_T	开启电压	σ	电导率
V_{OM}	最高工作电压	τ	非平衡载流子寿命
\bar{v}	载流子平均漂移速度	τ_e	发射结延迟时间
W	基区宽度	τ_b	基区渡越时间
W_m	金属脱出功	τ_d	势垒区渡越时间
W_n	N型半导体逸出功	τ_c	集电结延迟时间
W_p	P型半导体逸出功	τ_n	电子寿命
α	共基极电流放大系数	τ_p	空穴寿命
β	共发射极电流放大系		

目 录

第一章 半导体的基本知识	(1)
第一节 导体、绝缘体和半导体	(1)
第二节 半导体的一些特性	(2)
第三节 原子的基本结构	(3)
第四节 电子的能级与能带	(6)
第五节 导体 绝缘体和半导体的能带	(9)
小 结	(11)
思考题	(11)
第二章 半导体晶体和晶格缺陷	(12)
第一节 多晶体和单晶体	(12)
第二节 晶面和晶向	(13)
第三节 锗和硅的晶体结构	(15)
第四节 半导体的晶格缺陷	(17)
第五节 产生位错的原因	(20)
第六节 位错对半导体器件的影响	(21)
小 结	(22)
思考题	(23)
第三章 半导体的导电机构	(24)
第一节 半导体中的载流子	(24)
第二节 电阻率、电导率和迁移率	(26)
第三节 本征半导体和平衡载流子	(29)
第四节 半导体中的杂质和导电类型	(30)
第五节 多数载流子和少数载流子	(34)
第六节 杂质的补偿原理	(36)
第七节 什么是非平衡载流子	(36)

第八节	复合与寿命	(38)
第九节	载流子的运动	(39)
第十节	半导体表面	(43)
小 结		(46)
思考题		(47)
第四章	PN 结的简单理论	(49)
第一节	什么是 PN 结	(49)
第二节	PN 结的能带	(53)
第三节	PN 结的单向导电原理	(56)
第四节	PN 结电容	(61)
第五节	PN 结的击穿	(64)
第六节	形成 PN 结的几种方法	(70)
小 结		(72)
思考题		(73)
第五章	半导体二极管	(74)
第一节	二极管的构造	(74)
第二节	二极管的特性曲线和主要参数	(77)
第三节	金属与半导体接触	(81)
第四节	几种典型的二极管	(89)
小 结		(102)
思考题		(102)
第六章	晶体管的基本原理	(103)
第一节	晶体管的一般介绍	(103)
第二节	晶体管的放大原理	(105)
第三节	晶体管的特性曲线	(114)
第四节	晶体管的等效电路	(123)
第五节	晶体管的参数	(125)
第六节	晶体管的几种基本结构	(153)
小 结		(157)
思考题		(158)

第七章	场效应晶体管	(160)
第一节	场效应管的基本结构和符号	(160)
第二节	结型场效应管的基本工作原理	(162)
第三节	结型场效应管的输出特性曲线	(163)
第四节	结型场效应管的主要参数	(168)
第五节	MOS 场效应管的基本工作原理	(169)
第六节	MOS 场效应管的输出特性曲线	(171)
第七节	MOS 场效应管的主要参数	(175)
第八节	MOS 场效应管制造中应注意的问题	(177)
小 结		(178)
思考题		(179)
第八章	半导体光电器件	(180)
第一节	半导体的光电效应	(180)
第二节	光敏电阻	(182)
第三节	光敏二极管和光敏三极管	(186)
第四节	发光二极管	(193)
第五节	太阳能电池	(198)
第六节	半导体激光器	(201)
小 结		(205)
思考题		(205)
第九章	微波半导体器件	(207)
第一节	什么叫微波	(207)
第二节	微波二极管	(207)
第三节	微波双极型晶体管	(217)
第四节	微波场效应晶体管	(218)
第五节	微波半导体器件的封装	(219)
小 结		(221)
思考题		(222)
第十章	半导体集成电路	(223)
第一节	集成电路的概念	(223)

第二节	半导体集成电路的优越性.....	(227)
第三节	怎样制造双极型半导体集成电路.....	(229)
第四节	双极型集成电路.....	(244)
第五节	MOS 集成电路	(262)
小 结	.....	(271)
思考题	.....	(272)
第十一章	其他半导体器件	(273)
第一节	半导体整流器.....	(273)
第二节	可控硅整流器.....	(277)
第三节	单结晶体管.....	(284)
第四节	磁敏二极管.....	(288)
小 结	.....	(290)
思考题	.....	(290)
附录	.....	(291)

第一章 半导体的基本知识

半导体与导体、绝缘体的能带结构是不同的，所以，它们的导电能力也不一样。半导体具有一些独特的性能，利用这些特性可制成各种用途的半导体器件。这就是半导体受到广泛重视的原因。

为了说明能带的概念，我们必须从原子的基本结构讲起。只有掌握能带的概念，才能理解半导体的导电机理和PN结的工作原理。

第一节 导体、绝缘体和半导体

导体和绝缘体都是大家很熟悉的物质。导体具有良好的导电性能，也就是说，很容易传导电流。金属一般都是导体，例如金、银、铜、铁、铝等。绝缘体的导电性能极差，几乎不传导电流。绝缘体有橡胶、玻璃、陶瓷、塑料等。

在自然界还存在着一些导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。它们的导电性能既不如导体那么好，又不象绝缘体那样差，这种物质我们就叫它为半导体。目前主要的半导体有硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)。另外，许多金属氧化物和金属硫化物都属于半导体，例如氧化亚铜、硫化铅、硫化镉等。

物质的导电能力一般用它的电阻率 ρ 来表示。电阻率是指长1厘米，截面积为1平方厘米的物质的电阻值，单位是欧姆·厘米。电阻率越小，说明物质的导电性能越好。反之，电阻率越

大,导电性能越差。导体的电阻率一般在 10^{-4} 欧姆·厘米以下;绝缘体的电阻率在 10^9 欧姆·厘米以上。半导体的电阻率介于两者之间,为 $10^{-3}\sim 10^8$ 欧姆·厘米。

当然,单从半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间这一点来说,它还不至于引起人们如此重视,也不会得到如此广泛的应用。现在,半导体之所以成为人们的“宠儿”,是因为它具有一些独特的性能。它与导体、绝缘体有着“质”的区别。

第二节 半导体的一些特性

半导体有许多奇异的特性。其中主要包括以下三个方面:

(1) 温度的变化能显著地改变半导体的导电能力。我们知道,导体的电阻率随着温度的升高而增大。但半导体恰恰相反,它的电阻率随着温度的升高而减小,例如硅在 200°C 时的电阻率要比室温时减小几千倍。有的半导体这种变化更为显著。自动控制用的许多热敏元件(如热敏电阻等)就是利用半导体的这种特性制成的。

(2) 半导体受到外界某些作用(如光照)后其导电能力大大增加。例如硫化镉受光照后导电能力可提高几十倍到几百倍。利用半导体的这种特性可以制成自动控制用的各种光电器件(如光敏三极管、光敏电阻等)。

(3) 在纯净的半导体中加入微量(千万分之一)的某些其他元素(这个过程我们通常称之为掺杂),可以使它的导电能力成百万倍地提高。这是半导体的一个最突出也是最重要的特性。如果我们在原子密度为 $5\times 10^{22}/\text{厘米}^3$ 的硅中掺进大约 $5\times 10^{15}/\text{厘米}^3$ 的磷原子,此时硅中磷原子所占的比例为 10^{-7} (即仅占千万分之一),而硅的导电能力却提高了几十万倍。

由此可见,虽然掺进的杂质原子(我们把掺进半导体中的其他元素原子称为杂质原子)含量甚微,但它们对半导体的导电能力却起了决定性的作用。于是,人们利用半导体的这种性质制成了性能比电子管更优越的新型器件——半导体二极管和晶体管。另外,也正是由于半导体的这种特性,在制造半导体器件的过程中,对工作环境要求特别严格,以防有害杂质进入半导体而破坏器件的参数。这里要指出的是,上面所讲的半导体都是非常纯净的。只有非常纯的半导体才具有以上这些特性。以半导体材料硅、锗为例,哪怕纯度已达到99.99%,还不能具有上述特性。通常我们要求达到9个“9”以上的纯度,也就是达到99.9999999%以上。

第三节 原子的基本结构

为了了解半导体导电的内在机理,我们必须先从原子的基本结构讲起。

通过对物质结构的研究,人们发现:任何物质都是由原子组成的,而原子又由原子核和围绕它运转的电子所组成,如图1-1(a)所示。电子带负电并且在运转时具有固定的轨道。不同的轨道表示电子所具有的能量各不相同。每个电子只能在自己的轨道上运转,即只具有某个固定的能量。这些电子与原子核的关系就象许多人造卫星围绕着地球运转一样。但这仅仅是个比喻,实际上,电子围绕原子核运转的情况与人造卫星是不一样的。电子以一定的几率出现在原子核外围的一定区域内,我们所说的“轨道”是指电子出现几率最大的那部分区域。这样,电子运转的“轨道”实际上是呈云状,我们称为电子云,如图1-1(b)所示。为了方便起见,我们在这里把电子云看作如图1-1(a)那样的轨道。

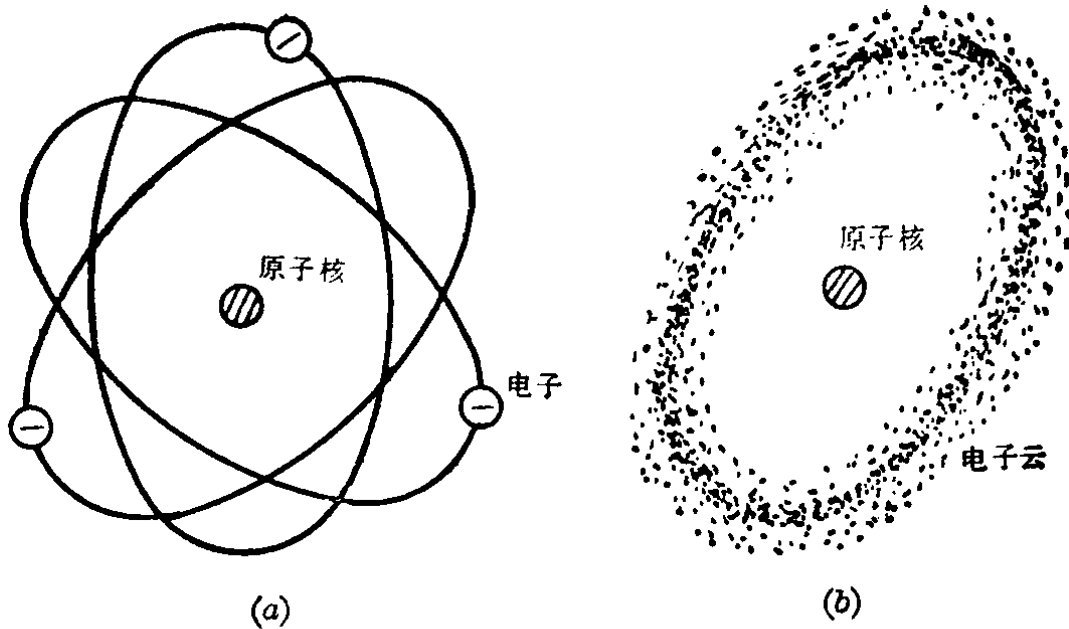


图 1-1 原子结构模型图

原子非常小，例如，1 亿个氢原子排列起来约只有 1 厘米长。原子核是带正电的，它的正电荷数正好与电子所带的负电荷数总数相等，因此整个原子是呈中性的。由于相反的电荷相互吸引，所以原子核和电子之间有一个吸引力，使得每个电子都被限定在它们各自的轨道上，不能任意离开原子核。

原子核由带正电荷的质子和中性的中子组成。各种元素原子之间的差别主要在于原子核所带的正电荷数(或核外电子数)不同。一个原子所具有的质子数(也就是原子核所带的正电荷数)称为原子序数，例如：硅的原子序数为 14，就是说每个硅原子核有 14 个质子，因而在核外有 14 个电子；锶的原子序数为 38，也就是说每个锶原子核有 38 个质子而核外有 38 个电子。

现在，让我们再来看看电子是怎样围绕原子核而分布的。任何元素的原子，它们的电子都是从里到外一层一层分布的，而且每层的电子数是一定的。如果把 n 作为层数，则每层的电子数最多不能超过 $2n^2$ 个。例如第一层($n=1$)，也就是最靠近原子核的那一层，只能容纳 2 个电子；第二层($n=2$)最多只能容

纳 8 个电子；第三层 ($n=3$) 最多只能容纳 18 个电子；第四层 ($n=4$) 最多只能容纳 32 个电子……，依次类推。电子分布的原则是，填满了里层再填外层，最外层的电子数不能超过 8 个（只有一个电子层的原子，该层电子数不能超过 2 个）。所以，最外层往往会出现电子数不足 8 个而留下“空位”的现象。例如硅原子有 14 个电子，第一层 2 个，第二层 8 个，第三层只有 4 个，还留下 4 个“空位”。又如锗原子有 32 个电子，而它的最外层（第四层）也只有 4 个电子，留下 4 个“空位”。图 1-2 为硅和锗的原子结构示意图。

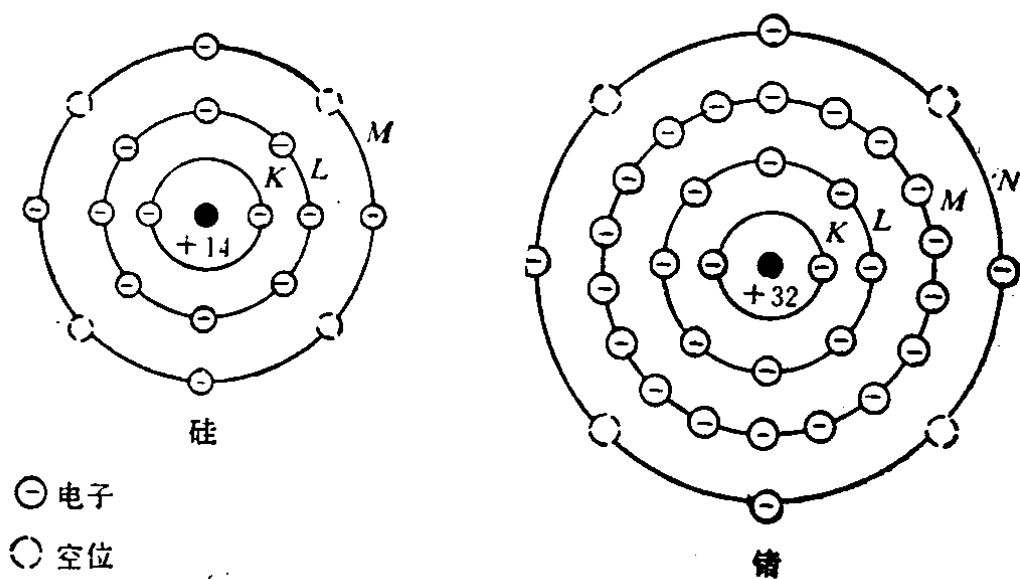


图 1-2 硅和锗的原子结构示意图

电子的层数可用 1、2、3、4…… 来表示，也可用 K 、 L 、 M 、 N …… 表示。在原子中，由于内层电子靠原子核近，受原子核的吸引力强，所以不易离开原子而自由活动。最外层电子离原子核最远，它们脱离原子核所需要的能量最小，所以容易离开原子核而成为自由电子。我们把最外层的电子称为价电子。元素的化学性质是由其原子最外层的电子数来决定的。一种元素的原子最外层有几个价电子，我们就称这种元素为几族元素。例如硅、锗原子最外层有 4 个价电子，所以称它们为四族元素。同样，磷(P)、

砷(As)、锑(Sb)最外层有5个价电子,就称它们为五族元素;硼(B)、铝(Al)、镓(Ga)最外层有3个价电子,就称它们为三族元素。

显然,如果原子最外层失去一个电子,则原子核的正电荷数就大于核外电子的负电荷数。原子的电中性一旦受到破坏,便显示带正电。我们称这种失去电子的原子为正离子。同样,如果原子最外层增加了一个电子,原子便成了一个带负电的负离子。原子变成离子的过程称为电离。

第四节 电子的能级与能带

一、什么叫能级

上面我们提到,电子围绕原子核是按层分布的,每个电子的能量(或运转的轨道)是固定的。在原子中,最外层电子离原子核最远,原子核对它的吸引力最小,而靠近原子核的那层电子,原子核对它的吸引力最大。所以,如果第一层的电子要跳到第二层,它就必须花去一定的能量来克服原子核对它的引力。如果这个电子的能量很小,不足以克服原子核的引力,那它只能在第一层运转。可见,只有能量较大的电子才能从第一层跳到第二层。所以第二层上电子的能量大于第一层上电子的能量。依次类推,越是外层上的电子能量越大。

在物理学中,常常用能量图来描述电子在不同轨道上所具有的能量。如果把电子所具有的能量由低到高依次用线条画出来,那末就可以看出,它们的能量是一级级地增加上去的,如图1-3所示。

图1-3的右边是电子运转轨道的示意图,左边是电子的能量图。图中 E_K 、 E_L 、 E_M 、 E_N 分别表示电子处于K、L、M、N各层上所具有的能量。我们把这些标志电子能量高低的线条称为