

半导体电子学

科学出版社

73.6
352

半 导 体 电 子 学

周 孔 章 译

科 学 出 版 社

1961

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО, 1959

0028/04
內容簡介

原书是1957年3月在以 A. C. 波波夫命名的无线电和电信学会举办的全苏半导体电子学讲习班上所进行的演讲的原文。

书中的主要内容是：半导体器件工作的物理基础，低频线路和直流放大器，高频和脉冲线路。

本书可供科学工作者、工程师和高等学校师生阅读之用。

半导体电子学

周孔章译

*
科学出版社/出版 (北京朝阳门大街117号)
北京市书刊出版业营业许可出字第061号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总经售

*
1961年9月第一版 书号：2401 字数：240,000
1961年9月第一次印刷 开本：850×1168 1/32
(京) 00001—15,000 印张：29 1/8

定价：1.10 元

序

本論文集是以 A. C. 波波夫命名的全苏无綫电和电信学会在 1957 年春为半导体电子学講習班所举办的講座的講稿。

这个講習班的任务是向其學員介紹半导体及其特殊性中的現象的基本物理知識,以及在各种綫路(低頻的、高頻的和脉冲的)中应用半导体器件的問題。

講座由三部分組成:

1. 半导体器件工作的物理基础。
2. 低頻綫路及直流放大器。
3. 高頻和脉冲綫路。

半导体講習班的講座按其內容說來是供下列人員之用的:

1. 从事或接触半导体器件应用的广大工程技术工作者。
2. 其他專門机构的工程技术人員, 这些專門机构要求按其专业在各种綫路中掌握半导体器件的应用。

演講的原文在 1958 年春准备付印时曾經作者审查并修改。但是,在半导体电子学发展得这样迅速的情形下,許多新的問題在本书的篇幅中自然不可能得到应有的反映。

关于本书內容方面的批評和愿望請寄交下列地址: Москва, центр, ул. Герцена, 10, Центральное правление всесоюзного научно-технического общества радиотехники и электросвязи им. А. С. Попова.

目 录

序言.....	(i)
基本的物理概念.....	Е. И. 加尔彼林(1)
半导体的电性能.....	Н. А. 彼宁(28)
半导体二极管.....	Н. Е. 斯克沃佐娃(37)
半导体三极管.....	Я. А. 费多托夫(50)
半导体三极管作为放大线路的元件.....	Е. И. 加尔彼林(106)
半导体三极管放大线路的供电电路的稳定.....	В. И. 格沃尔强(131)
直流放大器.....	А. Г. 菲利波夫(147)
跟踪系统放大器中的半导体三极管.....	Ю. И. 科涅夫(167)
高频半导体放大器.....	А. А. 庫利科夫斯基(191)
面结合型三极管的过渡与频率-相位特性.....	Т. М. 阿加哈年(219)
半导体三极管视频放大器.....	Т. М. 阿加哈年(238)
面结合型三极管的启动和张弛线路.....	Б. Н. 康农諾夫(251)
半导体直流电压变换器.....	Г. С. 崔金(266)
半导体器件的电压稳定器.....	Б. Н. 康农諾夫(275)

基本的物理概念

Е. И. 加尔彼林 (Гальперин)

引 言

由于有可能在科学和技术的各个领域内应用半导体器件，引起了半导体技术的蓬勃发展。

半导体温差电偶所发挥出的较大温差电动势，开辟了直接将热能变成电能以及获得发热与致冷的途径。半导体光电元件的灵敏度很高，因而在有成效地直接将太阳能变成电能方面，提出了新的可能性。近几年中弄清楚了，许多化学反应的催化剂按其本质说来就是半导体。半导体二极管和三极管已经获得极其广泛的应用。在发明半导体三极管以后的八年之内，半导体三极管已经令人信服地显示出了它和电子管相竞争的能力，并为设备小型化开辟了新的可能性。

由于半导体三极管和电子管的工作机构有着重大区别，简单搬用研究电子管线路的经验不总是可能和合理的，而且常常有可能发现不了只是半导体器件线路所具有的特点。

合理的应用半导体器件要求通晓其工作的物理原理。而要学习这些器件工作的物理原理，如果不通晓有关固体导电的理论又是不可能的。

以量子力学为基础的近代固体物理可以说明，为什么具有依次相同原子间距的固体在电性能方面有着这样大的差别。

为了了解为什么在某一类固体(金属)中有电流发生，而在另一类固体(电介质)中不发生电流，首先必须知道电子在原子中的运动规律。

1. 原子的电子壳层

任何元素的原子都由带正电的原子核和电子所组成，电子在原子核周围形成一系列半径逐渐增大的壳层。电子的大小约为 10^{-13} 厘米；原子核大小的数量级为 10^{-12} 厘米；原子的电子壳层的延伸度等于 10^{-8} 厘米。

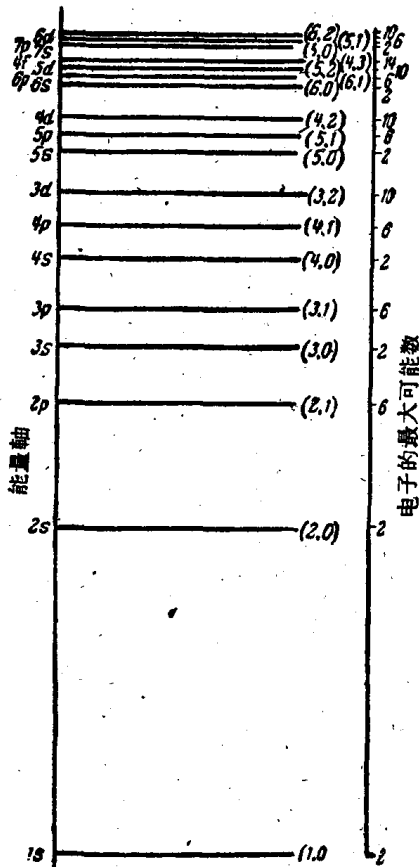


图1 能级图

原子核与电子间及电子与电子间的相互联系有着其微观的特殊规律性，在这些规律性中主要的是量子化和泡利原理，即电子状态的不相容原理。

按照古典力学的规律，质点可以具有不同的能量值，并沿任意轨道围绕引力中心而运动。轨道的半径决定于离心力和向心力平衡的条件，而这又是与引力中心和质点的能量对比有关的。由于电子在原子中运动的制约性，它们服从量子力学的规律，量子力学排斥了电子具有任何能量值的可能性。原子中的电子只可能具有完全确定的能量值，这些能量值彼此相差一有限值。所以，电子只能沿着完全确定的

的轨道围绕原子核而运动，这些轨道决定于其能量。确切地说，由于电子的波动特性，其运动不是沿轨道进行，而是在某一区域内进行，而轨道是电子在这区域中的最大可能位置。

量子力学証明,服从量子化的不仅是能量,还有电子在原子中运动的某些其他特性:軌道动量力矩,这个力矩在給定方向上的投影,以及电子的固有机械力矩(自旋)。后者是与质点围绕其自己的軸綫旋轉有关的机械力矩的量子类比。

原子中每一个确定的运动状态对应于一个能級。每一个軌道对应于严密确定的电子能量或能級;这些能級的总和形成原子中的电子能譜。这个能譜由一系列为禁区所分开的綫所組成。如果說,电子处在某一能級上,就指的是电子处在原子中某一确定的运动状态,这个状态是在能量标尺上用这个能級所描述的。

泡利原理是另一特殊的規律性,这个原理排斥了处在每一状态中的电子数多于两个的可能性。同时,只有在固有动量力矩(自旋的)是反向的条件下,两个电子才可能处在同一状态下。泡利原理决定电子在复杂原子中的分布。

利用能量图是研究电子軌道的最簡單方法;許可的运动状态的能量,或軌道,用水平綫沿垂直的能量标尺画出。每一能級的位置决定于电子的能量,电子能量又与数 n 及为数 l 所决定的围绕原子核的动量力矩有关。这些数通常称为: n ——主量子数, l ——軌道量子数。这两个数都是正整数,而且对于給定的 n , l 可以采取从 0 到 $(n-1)$ 的数值。

因此,如果用这两个数 n 和 l 来标记能級,就得到如下的能級:

对于 $n = 1, l = 0$ ——能級 $(1,0)$;

$n = 2, l = 0, 1$ ——能級 $(2,0), (2,1)$;

$n = 3, l = 0, 1, 2$ ——能級 $(3,0), (3,1), (3,2)$ 。

图 1 所示就是某些化学元素的能級图。还有另外一种用得相当普遍的标记能級的方式,在其中 l 的数值照如下方式用字母来代替:

$l: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6,$

字母: $s, p, d, f, g, h, i.$

在这个系統中,能級分別这样来标记:能級 $(1,0)$ 用 $1s$ 标记,能級

(3,2)用 $3d$ 标记, 以及等等。图 1 中列出了能级的两种记法。在具有一定 l 的轨道上, 最大可能的电子数等于 $2(2l + 1)$, 即

$l =$	0	1	2	3	
轨道上最大可能的电子数等于	2	6	10	14	

这些数字示出在图 1 左边, 并称为能级的退化度。

从图 1 看出, 能级图由一系列的邻近能级所组成, 这些邻近的能级形成能级组, 或者称为壳层, 壳层彼此之间以很宽的间隔分开。照例, 能级是按照主要的轨道力矩来分组的, 只有异常的能级 d 和 f 除外, 能级 d 和 f 具有较大的能量, 因而离开具有同一主量子数的那些能级较远。这种情况就使得, 具有较小的 n 的能级 d , f 反而比具有较大的 n 和较小的 l 的能级隔得更远一些。例如, 能级 $3d$, 即 (3, 2) 比能级 $4p$, 即 (4, 1) 更远一些; 能级 $4f$, 即 (4, 3) 比能级 $5d$, 即 (5, 2) 更远一些; 而能级 $5d$, 即 (5, 2) 又比能级 $6s$, 即 (6, 1) 更远一些; 以及等等。

由泡利原理所决定的电子能级图, 可以说明元素在门捷列夫周期系*中位置的次序。

在门捷列夫周期系中, 每一元素和上一元素不同之处就在于, 其电子壳层多包含一个电子。在第一个元素氢的原子中含有一个电子, 这个电子处在最低的能级 $1s$ 上。次一元素氦的电子壳层含有两个电子, 它们也处在最低的能级 $1s$ 上并具有不同的自旋取向。

在锂的原子中, 其壳层由三个电子组成, 只有两个电子能处于最小能量的状态并位于能级 $1s$ 上。第三个电子(按照泡利原理)不可能处在同一能级上, 因而位于次一能级 $2s$ 上, 能级 $2s$ 分布

* 参看 6 页的表: 对于金属(用粗体字表示)列出了在相应温度下的电阻率, 单位为微欧姆·厘米。对于某些典型的半导体, 在小圆圈中示出了禁带的电子伏特数。

在第二組能級中。

因此,根据泡利原理将电子充滿在元素原子的能級中,就可以决定元素化学性質的周期性。門捷列夫表中每一个周期对应于壳层中一个确定的能級組。組中的元素数决定于該壳层的能級組中的最大可能电子数。第一組包含只具有一个能級 $1s$ 的元素。氫(一个电子)和氦(两个电子)的电子壳层占据这个能級。

对应于第二个壳层的第二个周期由能級 $2s$ 和 $2p$ 組成,在其中可有不多于八个的电子,因而,这个周期只能含有八个元素(从鋰到氬)。

处在完全被充滿的能級組的状态下的电子,与原子核結合得特別牢固;不参与原子間化学鍵的形成。它們称为內电子。

处在未被充滿的能級組的电子,离开原子核較远,与原子核間的相互作用也比內电子为弱。

元素的原子价决定于外面未被充滿的壳层的电子数。属于門捷列夫表中同一族的元素的原子具有同样多的价电子。所以,每一族中各元素具有相同的原子价和相似的化学性質。例如,在第1族元素中只含有一个价电子,在第2族元素中含有两个价电子,以及等等。

第0族对应于能級中空的能量状态完全被充滿,在第0族元素中不含有价电子。将能級图(图1)和門捷列夫周期表相比較可以指出,对于具有同样化学性質的同一族元素,其外面的电子能級具有相同的 l , 所不同的只是 n 之值。因此,元素化学性質的周期性是以量子規律性为基础的。

当两个原子相遇时,电场使得外电子的运动特性有重大的改变,因而,在一定条件下发生化学結合,形成了分子。当化合时,元素力图或者是完全給出价电子,或者是使电子数增加到壳层完全被充滿。

量子力学也可以决定可能的分子結構和可能的化合物。例如,氫分子只可能是 H_2 , 在这种情形下具有相反自旋的两个电子将壳层完全充滿。孤独的氫原子由带正电的原子核——質子和沿

門捷列夫元素周期系

族	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	0	
1	H (1)						(H)		He (2)	
2	Li (3) 9.43 (217°)	Be (4) 5.88 (0°)	B (5) ①	C (6)	N (7)	O (8)	F (9)		Ne (10)	
3	Na (11) 4.3 (0°)	Mg (12) 4.6 (20°)	Al (13) 2.82 (20°)	Si (14) ②	P (15) ③	S (16) ④	Cl (17)		Ar (18)	
4	K (19) 6.1 (0°)	Ca (20) 4.6 (20°)	Sc (21)	Ti (22) 5.5 (20°)	V (23) 2.6 (20°)	Cr (24) 1.30 (28°)	Mn (25)	Fe (26) 2.9 10 (20°)	Co (27) 9.8 (20°)	Ni (28) 7.8 (20°)
	Rb (37) 1.69 (20°)	Sr (38) 5.8 (20°)	Y (39) 5.70 (86°)	Zr (40) 4.0 (20°)	Nb (41) 13.2 (20°)	Mo (42) 5.17 (20°)	Tc (43)	Ru (44) 7.64 (20°)	Rh (45) 4.69 (20°)	Pd (46) 11.0 (20°)
5	Ag (47) 1.59 (20°)	Cd (48) 7.6 (20°)	In (49) 9.06 (20°)	Sn (50) 11.5 (20°)	Sb (51) 41.7 (20°)	Te (52) ③	J (53)			Xe (54)
6	Cs (55) 20.8 (8°)	Ba (56) 3.9 60 (20°)	La (57) 1.8 (20°)	Hf (58) 7.2 32.8 (20°)	Ta (59) 15.5 (20°)	W (60) 5.5 (20°)	Re (61) 18.9 (0°)	Os (62) 7.6 9.5 (20°)	Ir (63) 6.10 (0°)	Pt (64) 10 (20°)
	Au (79) 2.44 (20°)	Hg (80) 25.5 (-38.2°)	Tl (81) 18.3 (25°)	Pb (82) 22 (20°)	Bi (83) 120 (20°)	Po (84)	At (85)			Rn (86)
7	Fr (87)	Ra (88)	Ac (89)	(Th)	(Pa)	(U)				

* 錳系元素

57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce (28%)	Pr (18%)	Nd (20%)	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tu	Yb	Lu	

** 錒系元素

90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	E	Fm	Mv

其軌道圍繞原子核旋轉的一個電子所組成(圖2)。

在氫分子中，兩個靠近的原子的存在大大改變了電子運動的特性，而兩個原子結合成一個整體，氫分子中原子核和電子的可能布置之一示於圖3中。

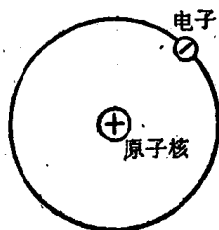


圖2 氫原子

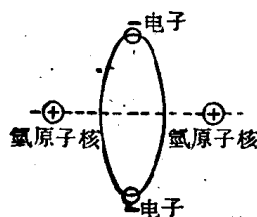


圖3 氫分子

因此，看得出，電子在分子中的運動特性不同於在孤獨原子中的運動。

電子在原子中按能級的通常分布是使得原子具有最小的（在所有的可能值中）能量，也就是電子力圖位於最靠近原子核的軌道上。原子要處在這種未激發的狀態下，直到有任何外部作用給予它以額外的能量為止。

當吸收光綫或原子與另外的原子碰撞時，任何電子都可以從它通常所在能級轉移到一個未被占據的較高能級上，結果形成激發原子。

在電子相反轉移的情形下，原子發光或者是在碰撞過程中將能量以熱能的形式交與另外的原子，即以無規則運動動能的形式交與另外的原子。在獲得極高能量的情形下，電子可以完全脫離原子，在這種情形下就說是游離狀態。這時，由於沒有電子與電子殼層及原子核的相互作用，已不是單獨的能級；電子開始象通常的基本質點一樣不遵守微觀的規律。

在原子的游離狀態下電子是自由的；它不受原子的約束而可不依賴於原子而移動（以任何速度）；並具有任何能量。

2. 固體中電子的能量狀態

未受畸變形式的單個原子的性質出現在氣體中，在氣體中原

子間的相互作用是極微小的。在固体中邻近的原子相当接近，以致外部壳层互相接触甚至彼此重迭。在这种情形下，与电子相作用的不仅有原子本身的原子核，而且有邻近原子的原子核。由于电子受这些原子核的吸引，它在原子中所受束縛將減弱，因而区分原子的位垒高度將減小。結果，电子的运动特性大大改变，形成了集体軌道而不是单个原子的軌道，且同样的能級联合成整个固体的总能級。这也引起电子能譜的改变。

电子不仅与单个原子有相互作用，而且与大多数原子有相互作用，这就使得，第一，能級发生位移，第二，能級扩展为能带。不象单个原子的狹窄能級，其中只能容納不多于两个电子，在固体中形成寬的能带，能带中的能級数等于給定固体中的原子数。同时，在固体的能量图中能級排列的次序可以不符合于在原子中能級排列的次序。在固体中电子按照泡利原理重新排列，以使得能譜中所有低的能級都被占据。

作为例子，我們来研究鋰金属形成的过程。設最初鋰原子相隔較大的距离。图 4 中繪出了鋰原子的电子能級，其中在低能級

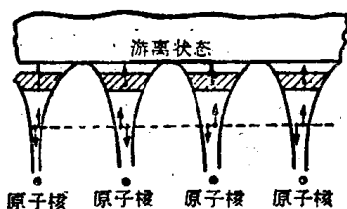


图 4

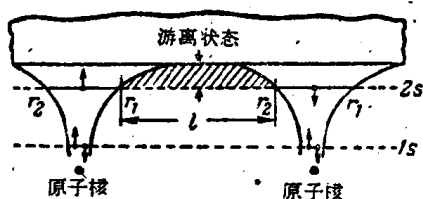


图 5 鋰的电子能級图

$1s$ 上有两个电子，而在次一能級 $2s$ 上有一个电子。曲綫表示电子在原子中的位能，决定于原子核对电子的靜电引力。如果电子的运动按照古典物理的規律来进行，它离开原子核的距离就不可能超出相应的能級与位能曲綫的交点之外，即不可能超出点 r_1 和 r_2 (轉弯点) 之外，在这些点处电子的全部能量將变为位能。

实际上(考虑了微观規律)价电子可以离开原子核并超出古典的轉弯点，但不大于一厘米的亿万分之一。

如果原子間相隔距離較大，則只有在游離狀態下電子才可能從一個原子轉移到另一個原子。當原子接近時，如圖 5 所示，由於鄰近原子核的影響，電子與其原子核的束縛減弱，區分原子的位壘高度將較小。顯然，鄰近原子對價電子和內電子的影響是不同的。

鄰近原子對內部殼層（其軌道很小）的電子影響不大，因為這些電子離開它們比本身原子核要遠得多。故固体中內電子的狀態與孤獨原子中內電子的狀態相差很少。原子核與其內電子一起在固体中就象是一個整體——該元素的離子。

價電子離開原子核很遠，與原子核的束縛較弱，其他原子對它們的影響很大，——要知道在固体中鄰近原子間的距離具有和價電子尺寸相同的數量級。在晶体中真正的原子間距下，對於價電子的位壘高度很小，而其寬度等於 10^{-8} 厘米；因為電子可以離開古典的轉彎點同樣的距離，故電子不僅有可能經位壘上面從一個原子進入另一原子，而且有可能穿過位壘。這種轉移稱為隧道效應，這是純粹的量子現象。由於隧道效應，價電子在固体中變為共有化的。

晶体中價電子共有化的實現，不是由於鄰近原子電場作用使原子游離的結果，而是由於隧道效應使電子從原子向原子運動的結果。

再以鋰為例來看有 N 個原子的固体的構成。在這種情形下，因為每一原子在低能級上具有兩個電子，而原子數等於 N ，故有 $2N$ 個電子處在第一個能級上，而 N 個電子處在第二個能級上。

當原子接近到等於原子間距時，就形成兩個能帶：低能帶，由 N 個能級組成並含有 $2N$ 個電子；高能帶，也由 N 個能級組成但含有 N 個電子。

圖 6 表示隨著原子之間的距離的減小，能級如何變成能帶的情形。低能帶很少發生變化，其平均能級仍然保留不變。最大的改變果然是發生在上面的價電子帶。一個能級向上位移，其他的在下，而價電子能級變為能帶，由 N 個彼此接近的能級所組成。

对应于这些能级的状态的差别已经不在于电子在那一个原子中移动，而在于电子的能量值及其沿晶体运动的速度。靠近晶体中所形成的能带的底部和顶部这个速度接近于零，而对于接近于能带中间的状态则为最大值。

在真实的原子间距 d_0 之下，基本的能级 E_1 实际上不改变，而价电子能级 E_2 变为宽的能带。能带内中间的粗线是这样来作出的，即在任何原子间距之下，在其上及下都有 $N/2$ 个能级。

因为系统的最稳定状态应该是使得其全部能量为最小值，而在每一能级上可能有两个电子，故锂晶体中的 N 个价电子将位于低的半个能带上，每一能级上两个电子。同时，从图上看出，晶体中一个价电子能级占有的平均能量 $\bar{e}_2$ 小于锂原子中的价电子能量 E_2 。在晶格中锂原子接近时所发生的这个价电子能量的减少，大于锂离子释放的静电能量。所以，当锂原子接近时其整个系统的能量减少，锂晶体中的结合力就是以这点为先决条件的。在其他金属中也有同样性质的结合力(所谓金属结合力)。

在图 6 的左边示出了对于原子间距 d_0 的基本能级和价电子能带。阴影部分的能级为电子所占据，空白部分的能级则是空着的。但是，价电子虽然在晶体中运动，由于其运动的杂乱无章它们

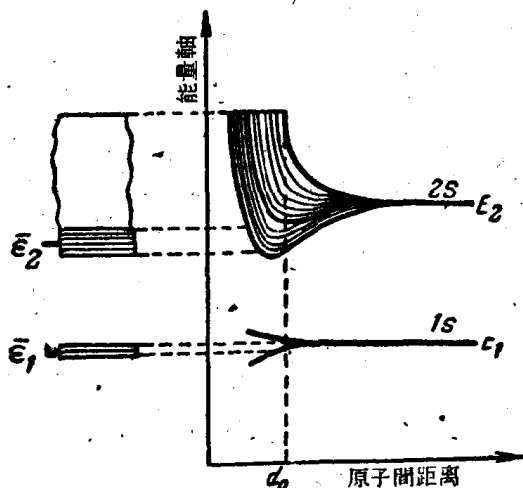


图 6 锂的价电子能级的分裂及其在锂晶体中变为能带的情形

并不产生电流。要发生电流必须将运动加以整理。场力应当加速沿某一方向运动的电子，而减慢沿相反方向运动的电子。但电子的加速或减慢会不可避免地引起其能量的改变，也就是从某一能级转移到另外的能级。例如，在锂中这是可能的，因为价电子带的部分能级是空着的。当加以电场时电子按能级重新分布，发生电子运动沿一定方向的整理，即发生电流。

在其他金属中也有同样性质的电流。价电子能带只部分地被充满，是决定金属导电性能的共同情况。未被占据的能级直接与占据能级毗连，因而电场可以加速和减慢电子，将其从某一能级转移到另外的能级。

在离子晶体，例如食盐 NaCl 中，则完全是另外一种情形。钠的电子壳层由 11 个电子组成，其中 10 个为内电子，1 个为价电子(图 7)。氯中有 17 个电子：10 个内电子，7 个价电子。因此，在第三组能级中，钠原子中只有一个电子，而氯原子有七个电子。因为在第三组能级中可以容纳八个电子，故在氯原子的第三组能级中有一个空闲位置。

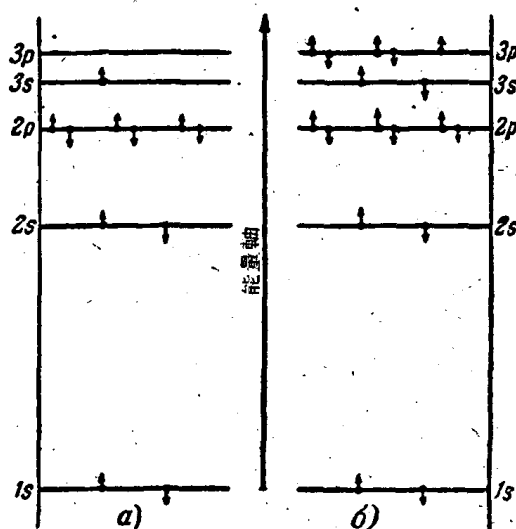


图 7 电子在原子中的能谱

a——钠； b——氯

当由 N 个钠原子和 N 个氯原子形成晶体时(图8), 钠的价电子能级分裂并重迭, 电子沿钠原子运动形成电子能带。氯的价电子能级同样因电子沿氯原子位移变成电子能带。由于稳定状态要求最小的能量而氯的价电子能级位置低, 故钠的 N 个价电子转移到 $N/2$ 个位置低的能级, 这些能级对应于沿氯的阵点运动的状态。同时, 氯的能带完全被充满, 而钠的能带是完全空闲的。所以, NaCl 晶体不是由 Na 原子和 Cl 原子组成, 而是由 Na^+ 和 Cl^- 离子组成。这些离子的静电吸引保证了晶体中的结合。古典物理不能解释为什么形成离子, 为什么价电子从 Na 原子转移到 Cl 原子。只有近代的固体量子理论才给出这个问题的解答。

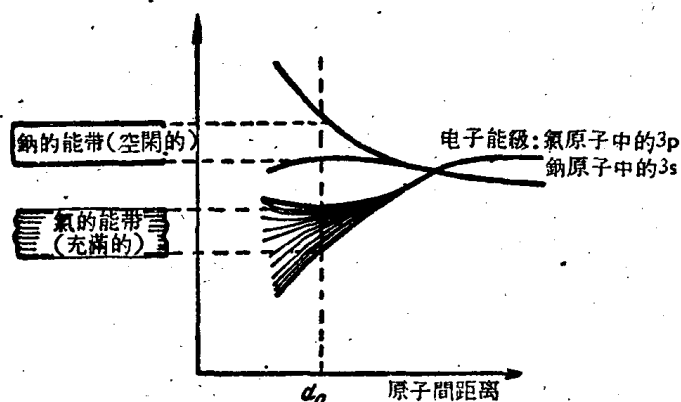


图8 由钠和氯原子中的价电子能级形成 NaCl 晶体的能级

由于在能带中没有自由的能级, 电场不能将价电子的运动加以整理, 即不能产生电流。要产生电流必须加速某一些电子, 减慢其他电子, 即将电子转移到另外的能级状态。但这是不可能的, 因为氯能带的每一能级上已经有最大可能的电子数(两个)。因此, 电场不能在离子晶体中产生电流, 即离子晶体是电介质。所研究的、锂金属和简单食盐离子晶体的电子结构的例子, 指出了金属和电介质在电阻方面有着重大差别的原因。

3. 金 属

金属恒具有部分充满的电子能带, 自由的未充满的能级与其