

电 子 器 件

〔英〕F. R. 康纳 著

王 正 译

内 容 简 介

本书是 F. R. 康纳撰写的“无线电技术与通信专题介绍”丛书之七, 是专门介绍电子器件的专业性普及读物。书中扼要介绍了各种固态器件和真空器件, 以及作为理解这些器件的基础的初级原子论, 半导体理论和电动力学。为了帮助理解概念, 列举了不少例题并给出了一定数量的习题, 这些题目大都是从英国的有关考卷中选取的。

本书内容浅显、概念清楚、通俗易懂, 适合于自学无线电技术和电子器件等课程的读者阅读, 亦可作为无线电类大、中专学生和工程技术人员的学习参考书。

F. R. Connor

ELECTRONIC DEVICES

Edward Arnold, 1979

电 子 器 件

[英] F. R. 康纳 著

王 正 译

责任编辑: 李 立

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1985 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1985 年 3 月第一次印刷 印张: 5

印数: 0001—14,400 字数: 108,000

统一书号: 15031·642

本社书号: 4014·15-7

定 价: 0.95 元

前 言

本书是介绍“电子器件”这一重要课题的著作。近年来这方面的著作甚多，特别是在固态器件领域内。但是，本书只着重介绍真空器件和固态器件的基本概念。另外，为了帮助读者掌握有关基本概念，书中还提供了许多从过去的试卷中选取的例题，以便清楚地说明有关基础理论的应用。

本书第一部分主要介绍某些初级原子论和半导体理论，以便于读者理解许多电子器件的物理原理。然后研究固态器件这个重要领域，重点是这些器件的原理和应用。接着在尽可能广泛的领域里讨论真空器件，因为这些器件的知识对于许多应用仍然是必要的。最后，以一组附录作为结束，它们对某些器件作了更多的理论探讨，这是为希望进一步研究这些问题的读者而写的。此外还简单介绍了某些新近出现的器件，例如碰撞雪崩渡越时间 (Impact) 二极管和电荷耦合器件 (CCD)。

本书对下列学生十分有用：他们或者准备通过伦敦大学的考试，或者准备考取全国学术评选委员会颁发的学位，或者准备通过工程学会委员会的考试，或者准备取得其他证书，诸如全国通用的高级执照，全国有效的高级学位证书。本书也适用于工业界中那些需要一本基础知识常用书以帮助其实际工作的工程师。

F. R. 康纳

本丛书的另几册是:

- | | |
|---------|-------|
| 1. 信号 | 4. 天线 |
| 2. 网络 | 5. 调制 |
| 3. 波的传输 | 6. 噪声 |

目 录

第一章	绪论	1
第二章	原子论	6
2.1	基本粒子	6
2.2	玻尔理论	7
2.3	波动力学	10
2.4	周期表	15
第三章	半导体理论	18
3.1	导体和绝缘体	18
3.2	半导体	20
3.3	费米-狄拉克分布	26
3.4	霍耳效应	30
3.5	pn 结	34
第四章	固态器件	40
4.1	半导体二极管	40
4.2	结型晶体管	48
4.3	场效应晶体管	54
4.4	脉泽	61
4.5	激光器	65
第五章	电动力学	72
5.1	电子运动	72
5.2	电子聚焦	80
5.3	电子发射	82
第六章	真空器件	90
6.1	热离子器件	90
6.2	显示器件	97

6.3 光子器件	100
6.4 微波器件	105
习题	113
答案	119
参考文献	120
附录	122
A. 元素表	122
B. Schrödinger 方程	123
C. 费米-狄拉克分布	124
D. pn 结二极管	127
E. 结栅 FET 方程和绝缘栅 FET 方程	130
F. 微波二极管	133
G. 双腔速调管和反射速调管	136
H. 专题讨论	137
索引	143

第一章 绪 论

电子学这个学科包括一个难于精确定义的广阔知识领域。它起源于“电子”这一专门术语，主要研究电子的运动，因此，本书主要涉及各种真空器件和固态器件的研究和应用。

电子器件经过一百年来的发展，已经有了很大的进步，对工业和社会产生了深刻的影响。在工业方面，它导致电子工业的大规模建立，这是世界特别是欧美工业化国家发展和繁荣的关键。在社会方面，电子器件已渗透到包括教育、商业和社会福利在内的几乎所有人类活动部门。而且，其影响波及全世界，而在通信领域中的影响尤为重要。现在，通过在各个技术领域内使用计算机，电子器件在解决今天人类面临的问题上起着不可缺少的作用。

从历史上说，电子器件的发展是十九世纪末期以来一系列重大发现的结果。第一个发现是爱迪生 1883 年在研究碳丝灯的发光时作出的。他在设法延长灯丝寿命的过程中，发现在灯丝与靠近它的“正”阴极之间的真空内有电流通过。这种现象称为爱迪生效应，后来导致弗来明在 1904 年做出以其整流特性闻名的二极管。弗来明用这种二极管作为无线电波检波器。

1906 年，de Forest 在弗来明的二极管内加上一个栅极而发明三极管，开辟了无线电通信进一步发展的道路。这首先是由于三极管可以对电信号进行放大，后来又用它来产生振荡。它还推动了接收设备和发射设备中使用的各种真空器件的发展，并导致各种充气管的出现，特别是用于高功率场合例

如雷达和工业控制的闸流管的出现。

但是，接之而来的主要进展却出现在一个后来称之为固态电子学的完全不同的领域。这个新领域的基础是 1900 年前后由于某些具有整流性能的材料，如氧化铜，硅和硫化铅的发现而奠定的。整流效应的实质直到许多年后才弄清楚。

Bardeen 和 Brattain^[1] 关于其电导率介于金属和绝缘体之间并且与温度有关的半导体的研究工作，导致 1948 年点接触型晶体管和 1951 年 Shockley, Sparks 和 Teal^[2] 的结型晶体管的出现。这两种晶体管的示意图示如图 1。

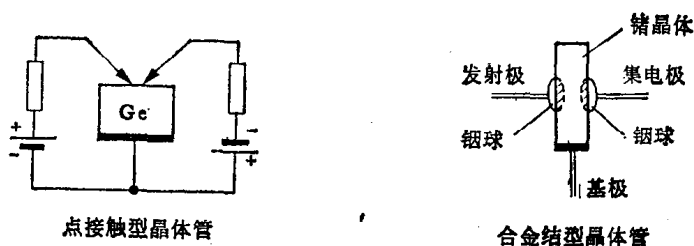
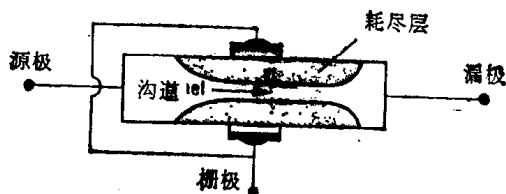


图 1

真空器件的导电性由带负电荷的所谓电子引起；与此不同，结型晶体管则依靠带负电的电子和带正电的空穴两者的运动。它基本上由一块半导体材料如锗或硅构成。在两个外区域之间分出一个薄的具有给定电导率的中心区域，这两个外区域对中心区域有方向相反的导电性。这种 pnp 型或 npn 型器件含有电子和空穴，加上一个小电压，这些电子和空穴就能通过晶格结构而运动。

所以，晶体管的特性类似于三极管，它有三个电极，分别叫做发射极、基极和集电极。这种器件与真空三极管相比有很大的优点，因为它尺寸小，无需加热功率，也不需要真空，并且只需很小的直流电压。因此，它在许多低功率应用中大量

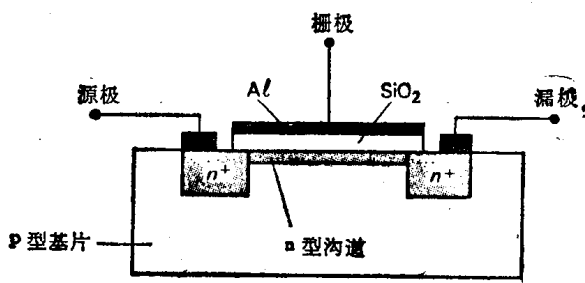
地取代了真空器件,极大地推动了电子工业的发展。而且,开辟了一大批新的固态器件,近年来还制出了图 2 所示的单极型晶体管或称场效应晶体管 (FET)^[3]。



结型 FET

图 2

在 FET 中,由栅电压对沟道施加“场效应”来控制载荷子在源极与漏极之间流动。栅电压决定了耗尽层的宽度,因而决定了控制通过器件的电流的沟道宽度。两种 FET 变型是图 2 所示的结栅 FET (JFET) 和图 3 所示的绝缘栅 FET (IGFET)。绝缘栅 FET 在效果上象真空五极管,具有与之类似的特性。



绝缘栅 FET

图 3

这门技术的现状是晶体管在许多电子部门例如通信和计算机中得到了大量的应用。通信和计算机的发展又激励着人们进一步研究所谓微电子学。近年来在材料和技术方面取得

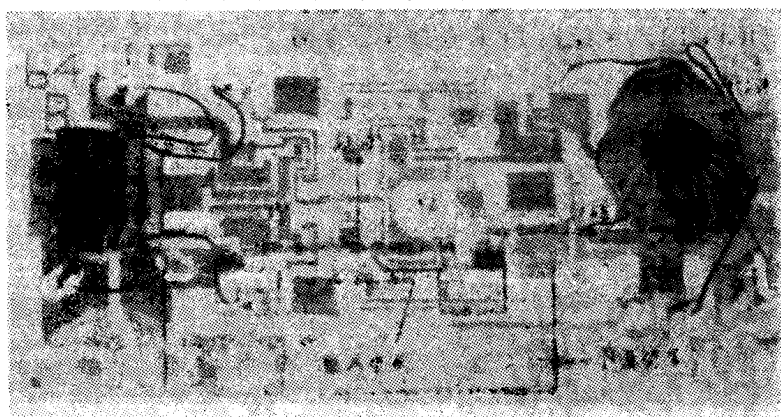
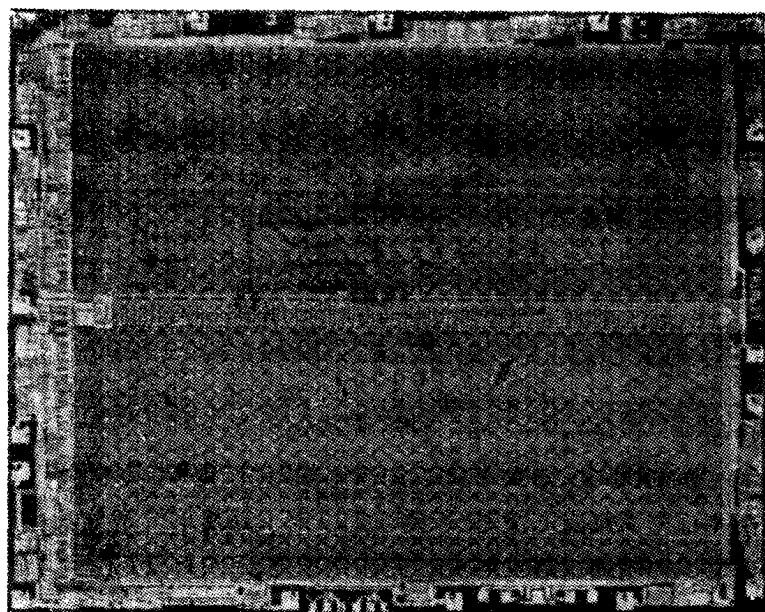


图 4

上图单片 4K 随机存取存储器

下图射频线性混合放大器

了重大进展,可以将许多元件例如晶体管、电阻器和电容器全部造在同一块材料或基片上,这叫做集成电路 (IC)^[4]。两种

主要类型的集成电路是单片集成电路和混合集成电路,如图4的例子所示。

这种硅集成电路得到迅速发展主要是由于采用了平面晶体管工艺。将扩散处理与平板印刷技术结合起来,可以在一块尺寸约为 $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 的小硅片上造出几个电路。对于在一个小基片上安设更多电路的不断增长的要求进一步导致大规模集成电路 (LSI) 的出现,实际上这已经是在制造子系统而不再是电路了,典型的例子是微处理器^[5]。

第二章 原子论

物质是由元素组成的，而元素又是由原子构成的。原子可以视作保持该元素的物理化学同一性之元素的最小部分。迄今已经识别出 105 种元素(见附录 A)，所有这些元素的原子都是由叫做质子、中子和电子的各种大量的基本粒子构成的。

1911 年卢瑟福用实验证明，原子是由一个称为原子核的带正电的中心体和在圆形轨道上围绕它旋转的带负电荷的电子组成的。现在知道，原子核主要由带正电荷的称为质子的粒子和一些称为中子的中性粒子组成。原子整个看来是电中性的，因为原子核中的正电荷 Ze 等于旋转电子的负电荷 $-Ze$ ，这里 Z 是元素的原子序数而 $-e$ 是电子的负电荷。图 5 是氢原子的示意图。

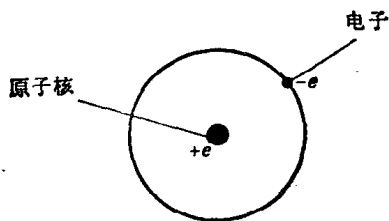


图 5

2.1 基本粒子

有关质子的实验数据指出，其质量为 $1.672 \times 10^{-27}\text{kg}$ ，正

电荷为 $1.602 \times 10^{-19}\text{C}$ (库仑), 直径约为 $6 \times 10^{-15}\text{m}$. 原子核中质子的数目决定了它的原子序数 Z , 对于最轻的元素氢, $Z = 1$, 而对于重放射性元素铀, $Z = 92$.

除氢以外, 在原子核中还存在与质子数目大致相等的中子. 中子的质量是 $1.675 \times 10^{-27}\text{kg}$, 约等于质子的质量, 但不带电荷. 中子在原子核中的确切作用尚不清楚, 但是看来它们可能提供一个结合力, 把质子与原子核维系在一起.

与前述粒子不同, 电子却是已知的最轻粒子, 其质量为 $9.11 \times 10^{-31}\text{kg}$, 带负电荷 $1.602 \times 10^{-19}\text{C}$. 它的直径约为 $5.6 \times 10^{-19}\text{m}$, 所以尺寸大致与质子或中子相同. 但是, 由于惯性小, 它在电子学中起着极其重要的作用, 其特性既象粒子, 又象波. 这叫做波-粒二象性, 因此电子的“尺寸”就不太好定义.

除了这些粒子以外, 还有其他两种“粒子”即光子和空穴, 对于理解某些物理现象也是重要的. 光子一般可以看成带有电磁能量 $W = hf$ 的波包或量子, 这里 h 是普朗克常数, f 是辐射频率. 例如光波的能量就是由光子或量子传输的. 但是, 空穴的特性就象一个尺寸与电子相同但具有正电荷的粒子. 它以失去一个电子的形式出现于晶格结构中, 这将在第三章中讨论.

2.2 玻尔理论

卢瑟福的经典理论所依据的事实是, 带正电荷的原子核与带负电荷的电子之间的库仑力被作用于旋转电子上的向外离心力所平衡. 但是, 在这种情况下, 被加速的电子将辐射能量, 能量的损失将使它们沿螺旋线落到原子核上.

为了解决这个困难, 玻尔在 1913 年提出如下假设:

1. 原子具有某些能态，电子在一些稳定的轨道上旋转而不辐射。电子在稳定轨道上的角动量是 $h/2\pi$ 的整数倍，这里的 h 是普朗克常数。

2. 电子可以通过吸收电磁能从低能态 W_1 向高能态 W_2 运动，或辐射电磁能而从高能态向低能态运动，吸收或辐射电磁能的频率为 $f = (W_2 - W_1)/h$ 。

玻尔的假设构成了早期物质量子论的基础。量子论起源于 1901 年，当时普朗克证明电磁辐射是以量子形式按方程 $W = hf$ 发射的。玻尔的理论用量化能态和量子数的概念进一步发展了这个思想。

例 1. “玻尔原子模型是有助于将原子物理学的基本原理形象化的一个概念。”

作为理解现代电子器件的基础，现在简单讨论这个模型的局限性。

假定电子动量与轨道周长的乘积是普朗克常数的整数倍。确定氢原子头两个电子轨道的半径，再计算电子在其中每一个轨道上的总能量，并以电子伏表示。

(C. I. E)

解 玻尔原子模型将电子视作粒子，强调原子的轨道结构。但是，它的主要限制是，没有考虑根据波动力学导出的电子的波特性。因此，由于波-粒二象性，现在强调能级而不是轨

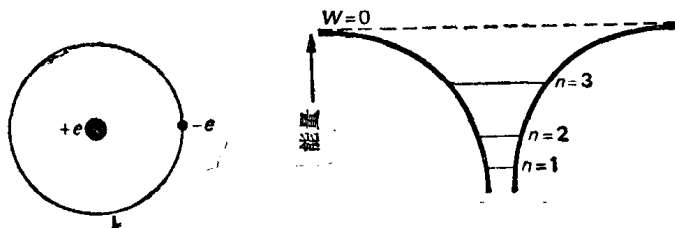


图 6

道,这对解释象半导体二极管、晶体管和脉泽 (maser, 微波激励器)这类电子器件的作用是很有用的。而且,在隧道二极管一类器件中,用现代量子论可以很容易地解释“隧道效应”。

对于图6所示的氢原子,库仑引力等于电子的离心力。另外,我们还有 $mvr = nh/2\pi$, 其中 $n = 1$ 和 $n = 2$ 分别对应于第一轨道和第二轨道。因此

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{mv^2}{r} = \frac{n^2 h^2}{4\pi m r^3}$$

或

$$r = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2}$$

如果 r_1, r_2 分别是第一轨道和第二轨道的半径,则

$$r_1 = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2}$$

$$r_2 = \frac{4h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2}$$

这样,如果 W 是原子的动能与势能的总和,则对于旋转电子,动能是 $\frac{1}{2} mv^2$, 位能是使电荷 $-e$ 从无穷远移到离原子核的距离为 r 处库仑力所作的功。因此

$$\text{动能} = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$\text{位能} = \int_{\infty}^r \frac{e^2 dr}{4\pi\epsilon_0 r^2} = - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

于是

$$W = \frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = - \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

如果 W_1, W_2 分别是取第一轨道和第二轨道时的总能量,则我们得到

$$W_1 = - \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_1} = - \frac{m e^4}{8\epsilon_0^2 h^2}$$

$$W_2 = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_2} = -\frac{me^4}{32\epsilon_0^2 h^2}$$

代入 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$, $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$, $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ 和 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F}\cdot\text{m}^{-1}$, 则得到

$$W_1 = -21.62 \times 10^{-19} \text{J} = -13.5 \text{eV}$$

$$W_2 = -5.41 \times 10^{-19} \text{J} = -3.38 \text{eV}$$

2.3 波动力学^[7]

电磁辐射既象波又象粒子。这种波-粒二象性 1924 年经 de Broglie 推广到其他粒子, 如电子、原子和一般的物质。他证明, 象电子这类具有质量 m 并以速度 v 运动的粒子可以按照 de Broglie 方程

$$\lambda = h/mv$$

或

$$\lambda = h/p$$

与波长 λ 联系起来, 这里 p 是电子的动量, h 是普朗克常数。

这个结果用于原子电子学时, 证明了玻尔关于稳定轨道的理论是正确的, 还证实了 λ 的整数倍关系

$$n\lambda = 2\pi r$$

及

$$\lambda = h/p$$

或

$$nh/p = 2\pi r$$

和

$$pr = nh/2\pi = n\hbar$$

它说明了玻尔的假设, 即电子的角动量是量子化的。

1927年 Schrödinger 进一步推导出物质的波特性和, 现在称为“波动力学”。因为粒子的精确特性是不知道的, 所以用一个波函数 ψ 将它表为一个概率波, 这个 ψ 是 Schrödinger 的著名波动

方程的解,在附录 B 中推导出这方程为

$$\nabla^2\psi + \frac{8\pi^2m}{h^2}(W - V)\psi = 0$$

其中, W 是总能量, V 是势能, 而 ∇^2 是拉普拉斯算子。

物质波的不确定性是根据 1927 年 Heisenberg 提出的测不准原理给出的。这个原理指出, 粒子的位置不确定性 Δx 与其动量不确定性 Δp 有下面的关系

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$

当以能量不确定性 ΔW 和时间不确定性 Δt 表示时, 它就变成

$$\Delta W \Delta t \geq \hbar$$

根据波动力学, 一个电子的精确位置是不可能知道的, 所以电子轨道的概念以能级的方式给出。Schrödinger 方程的解仅仅表示电子占据某个能级的概率, 许多现有的量子论都是在遵守测不准原理和泡利在 1925 年提出的所谓泡利“不相容原理”的条件下研究这些能级的计算。按照不相容原理, 在一个原子中不可能有两个电子具有相同的一组量子数, 这在下节中被用来确定原子的电子层结构。

【说明】

另一种由 Heisenberg 提出的采用矩阵的方法叫做“矩阵力学”^[7], 也得到类似的结果。因此, 有时也采用术语“量子力学”^[8]来代替“波动力学”或“矩阵力学”。

例 2. 一个势能为零的粒子位于一个边高为无穷大而宽为 d 的位阱中, 如图 7(a) 所示。求它的波函数的表达式, 并证明能量是量子化的。

解 假定距离取为 x 轴, 那么这粒子的 Schrödinger 方程成为

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2mW\psi}{h^2} = 0$$