

第 1 章

电路基础理论

1.1 内容提要

在本章中,你将看到以下内容:

- 基本电路理论的回顾
- 导体、绝缘体、半导体材料
- 如何制造半导体材料
- 两种半导体材料——P 型和 N 型
- PN 结的重要性
- 利用电场制作开关
- 串联两个互补型开关
- 用互补型开关设计一个控制电路
- 如何设计逻辑电路

.....

1.2 引言

大家应该已经熟悉本章前几页所涉及的大部分电路概念以及集成电路(IC)的思想。因此,下面作一个简单的回顾,仅供参考。

集成电路的绝大部分功能都是通过控制电流来实现的,例如控制电流变化、开关电流、或者利用电流产生电压,而这些操作许多是通过**半导体**完成的。

不像普通灯的开关仅有开和关两种状态,半导体开关可以有开、关以及介于开关之间的一些状态,这种半导体开关称为**晶体管**。

在本章中,我们将首先基于半导体材料构建晶体管,然后再利用晶体管组成逻辑电路。

芯片的设计首先是从工艺研发团队开始的,然后是电路设计人员,最后是你——版图工程师。

版图工程师在新的芯片设计制造过程中是必不可少的。如果你具有更丰富的知识、更强的创造性和更高的效率,那么你可以为你的公司节省数百万美元,因为你所设计的芯片在第一次流水后的性能甚至比预期的还要好,或者你设计的芯片版图比其他人员设计的版图尺寸小,或者在芯片生产之前找到并改正那些致命的错误。

一个优秀的版图工程师是公司的宝贵财富,特别是作为芯片产品流水前最后一道工序的执行者。

本书的一些说明

- 图形中垂直方向为材料的宽度,水平方向为材料的长度。
- 如果没有特别说明,电流的流向为自左向右。
- 文中仅用代词“他”和“它”,这并不存在对女性的不尊重。
- 图示仅起到说明作用,为了简便起见,文中的图形与实际工艺制备的图形有所差别。
- 读者可以带着幽默感来读本书,应该在读书和工作中保持乐观的心态,探索那些未知的东西。

1.3 基本电路回顾

下面给出一些基本的电路理论供读者参考,我们认为读者已经熟悉基本的电路公式和概念,因此仅作一些简单的概述,如果需要更加详细的论述请查阅参考书目。

1.3.1 同性相斥,异性相吸

“异性相吸”是非常普遍的现象,具有相反极性的物质相互吸引,而相同极性的物质相互排斥。例如,带有正电荷的原子将会吸引带负电荷的原子;带正电荷的原子排斥带正电荷的原子,而且不论它们之间是否存在一定距离。

异性相吸。

如果这一神奇的自然规律消失了,那么本书提到的所有电路也就

无法工作了。

我很想弄明白相隔一定距离的电子为什么会相互吸引和排斥，弄明白这一现象的根本原因。一个小小的电子怎么会对它周围的电子有“想法”的呢？实际上，正负电荷没有什么区别，仅仅是电子的数量不同而已，但它们怎么会知道这些呢？它们又不会计数。

为什么我们看不到重力？磁铁也不应该工作啊！以前的宇宙到底是怎样的？为什么航空小姐的纸托蛋糕里面需要奶白色的填充物呢？这真是一个迷茫的世界。—Judy

1.3.2 基本单位

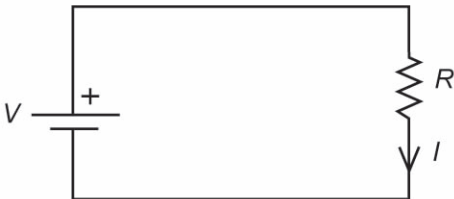


图 1-1 包含电压、电阻和电流的电路示意图。

电压：符号 V ，单位为伏特(V)。
电阻：符号 R ，单位为欧姆(Ω)。
电流：符号 I ，单位为安培(A)。

千米(km)	$\frac{1000}{1}$	1000	$1e^3$
米(m)	$\frac{1}{1}$	1	1
厘米(cm)	$\frac{1}{100}$	0.01	$1e^{-2}$
毫米(mm)	$\frac{1}{1000}$	0.001	$1e^{-3}$
微米(μm)	$\frac{1}{1,000,000}$	0.000001	$1e^{-6}$
纳米(nm)	$\frac{1}{1,000,000,000}$	0.000000001	$1e^{-9}$
皮米(pm)	$\frac{1}{1,000,000,000,000}$	0.000000000001	$1e^{-12}$
飞米(fm)	$\frac{1}{1,000,000,000,000,000}$	0.000000000000001	$1e^{-15}$

1.3.3 串联公式

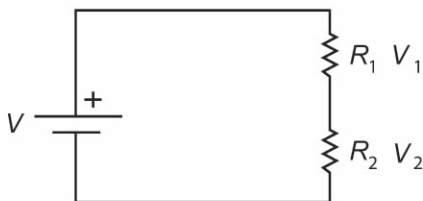


图 1-2 两电阻串联示意图。

串联电路的总电压：

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \dots \quad (\text{V})$$

串联电路的总电阻：

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (\Omega)$$

1.3.4 并联公式

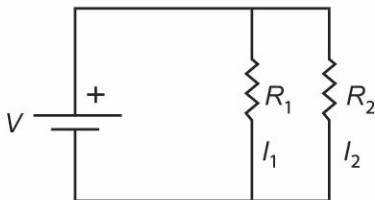


图 1-3 两电阻并联示意图。

并联电路的总电流：

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots \quad (\text{A})$$

并联电路的总电阻：

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad (\Omega)$$

1.3.5 欧姆定律

简单地说,欧姆定律是指电压等于电流与电阻的乘积。

$$V = IR \quad (\text{V})$$

上述关系式可有如下变形：

$$I = V/R \quad (\text{A})$$

$$R = V/I \quad (\Omega)$$

下图给出的三角形可以帮助大家更好地记忆欧姆定律。

- 三角形的顶角始终是电压。
- 三角形的两个底角始终是电流和电阻。
- 看着这个三角形回忆公式。
- 用一个手指盖住希望得到的符号。
- 剩下的两个符号就自动形成想要得到的公式。

难道你不希望所有的公式都如此容易吗？

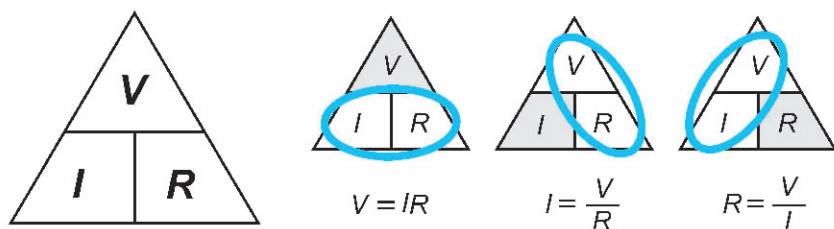


图 1-4 记忆欧姆定律的三角形方法。

1.3.6 基尔霍夫定律

基尔霍夫电压定律：在一个闭环回路中的电压降之和等于该电路外加总电压，也就是说，输入电压的总量等于电路中所有的电压降。

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \dots \quad (V)$$

基尔霍夫电流定律：流出一个节点的所有电流等于流入该节点的所有电流之和。

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots \quad (A)$$

这意味着，电路中的任何节点只要有电流流入和流出，则流入、流出的总量一定相等。例如，不可能存在流入的电流量比流出的多的情况。

仅仅去读这些定律是相当枯燥的，但是它们可以转换成代数方程，利用这些方程，我们可以计算未知参量。

这些定律都是非常重要的，利用这些定律解决了许多问题。另外，我们还可以在晚宴上引用这些别致的名字。

还可以考虑把电容和电感等效为电阻，只不过该电阻值对跨接其上的电压的频率敏感。

试试看

1. 利用欧姆定律完成下表。

电压(V)	电流(A)	电阻(Ω)
5.2	0.25	
12		200
	0.003	3

2. 把下面的数据转化为以微米为单位的数据。

- (1) 0.025 英寸
- (2) 2500 纳米
- (3) 5,000,000,000 飞米
- (4) 0.00045 米

3. 电阻 A 和电阻 B 并联, A 的阻值为 100Ω , B 的阻值为 200Ω , 那么总电阻是多少? 如果两个电阻都是 200Ω 呢? 如果两个电阻都是 100Ω 呢? 如果两个电阻都是 $x\Omega$ 呢?

4. 已知一个闭环回路的电压源电压为 12V, 该电路中有三个元器件, 一个压降为 6V, 另一个为 4V, 请问第三个元器件的压降为多少? 如果有人怀疑你的计算结果, 你会拿什么来作为你的证据呢?

答案

1.

电压(V)	电流(A)	电阻(Ω)
5.2	0.25	20.8 Ω
12	0.06A 或 60mA	200
0.009V 或 9mV	0.003	3

2. (1) $25 \times 25.4 = 635$ 微米
(2) 2.5 微米
(3) 5 微米
(4) 450 微米

3. $R_A=100\Omega$, $R_B=200\Omega$:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{100} + \frac{1}{200}, \quad R = 66.67\Omega$$

$R_A=200\Omega$, $R_B=200\Omega$:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{200} + \frac{1}{200}, \quad R = 100\Omega$$

$$R_A = 100\Omega, R_B = 100\Omega:$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{100} + \frac{1}{100}, \quad R = 50\Omega$$

$$R_A = x\Omega, R_B = x\Omega:$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{x} + \frac{1}{x}, \quad R = 0.5x\Omega$$

4. 电源电压必须等于电压降之和。

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 \quad (\text{V})$$

$$12 = 6 + 4 + V_3 \quad (\text{V})$$

第三个元件的电压降为 2V。大家应该引用基尔霍夫定律来作为计算的依据。

1.3.7 电路单元符号

以下是电路中常用的一些元器件符号。

常用符号

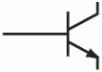
	电阻		可变直流电流
	灯		直流电源
	晶体管开关		交流波形发生器
	节点		你好
	电感		二极管(整流器)
	电压源		NPN晶体管
	电容		PNP晶体管

图 1-5 常用符号。

1.4 导体、绝缘体和半导体

导体中含有大量的自由电子,可以在电压的作用下自由运动,就像是一个电子海洋。

绝缘体中没有自由电子,电子被原子紧紧地束缚,不能自由运动。正是由于这些电子不可动,绝缘体几乎是不导电的。

半导体是位于导体边缘的绝缘体,它的导电不像绝缘体那么困难,因此称之为半导体(semi 是部分的意思)。例如,提高半导体的温度可以增强导电能力。其实也可以称之为半绝缘体(semiinsulator),但没有人喜欢在一个单词中连续出现两个 i,故取名为半导体(semiconductor)了。

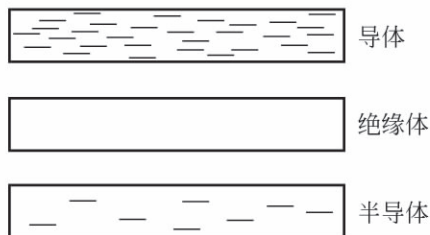


图 1-6 材料的自由电子数量与导电能力之间的关系。

如果找到一种方法可以随意地控制材料的导电或不导电,那么利用该材料就可以为我们做很多有用的事情。可以利用它来开关电子器件,或根据设定的模式来实现逻辑功能。如果我们能够通过某个给定的电路控制它导电的话,应用领域就可能变得无限宽广了,这也就是半导体材料所能给我们的巨大能量。

在理解半导体特性之前,需要对构成半导体材料的原子性质作一些了解。我们主要关心能够以一种可控的方式移动电子。首先回顾一下基本的原子理论。

原子理论指出电子只能存在于原子核周围的某个能量状态,该能量状态称为**能级**。这些能级就像卫星围绕地球旋转的轨道。我相信大家以前对电子的能级已经有所了解。

电子从一个能级跃迁到更高的能级,需要获得能量,也就是给它一个作用力。当我们给电子施加能量,它就会跃迁到邻近有效的能级上,一旦电子位于一个正确的能级之上,我们便可利用它来导电。

根据电子的能级或能带可以对电子进行分类。那些紧密排列的

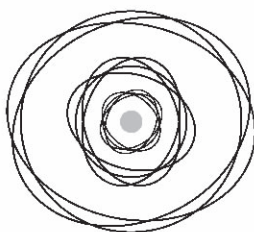


图 1-7 在获得能量之前,电子始终位于自己的能级之上。

电子处于价带之中;而那些具有足够的能量可以自由运动的电子则位于导带,导带中的电子可以形成电流。

在导体中,导带和价带不是相互接触就是相互交叠,在某一时刻你看到电子被原子所束缚,而下一时刻,这个电子又会跃迁到导带之中,这意味着导体中的电子可以很容易地运动,从而可以导电。当导体上加上电压后,它就会导电。

在绝缘体中,导带和价带离得非常远,把一个电子从价带激发到导带需要很高的能量。实际上,如此高的能量在电子跃迁到导带之前就已经把绝缘体材料毁坏了。这也就是为什么在绝缘体中看不到自由电子的原因。

在半导体中导带和价带距离较近,仅仅需要较小的能量就可以使电子跃迁到导带,因此,半导体材料很容易变成了导体材料。

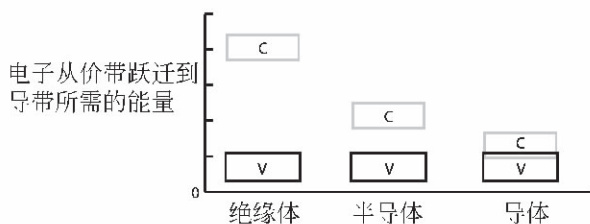


图 1-8 半导体价带中的电子可以容易地受激跃迁到导带中,而绝缘体中的电子就十分困难。

1.5 半导体材料

硅的导带和价带之间的能量差较小,因此使硅中的电子跃迁到更高的能级参与导电并不是特别困难的事情,这使得硅成为常用的集成电路制备材料。

更幸运的是硅材料非常丰富。在地球的任何一个沙滩上,它都以二氧化硅(SiO_2)的形式存在。硅原子和氧原子通过**共价键**紧密地结合在一起,这种结构使任何电子都无法脱离原子核。图 1-9 中的直线代表共价键。

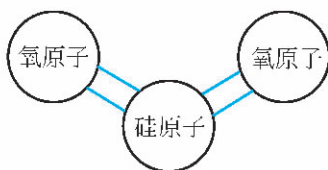


图 1-9 两个氧原子结合一个硅原子形成 SiO_2 。

现在做个比喻,如果我们将二氧化硅分子不加保护地遗留在一个品德不好的邻居家,第二天回来的时候就会发现分子上的两个氧原子被剥离了,仅仅留下了硅原子。在实验室中也可以做这个实验。

一旦剥离了氧原子,我们就可以使硅原子组成非常大的晶体,就像钻石一样,这便是纯净硅,它的电子很容易脱离原子核的束缚,大家在接下来的讨论中可以看到这一点。

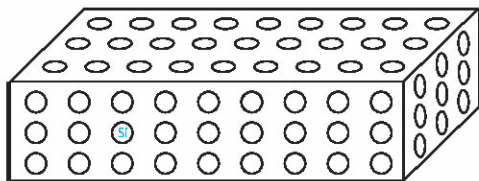


图 1-10 硅原子形成的完美晶体。

在绝对零度附近,电子被硅原子紧紧束缚。随着晶体温度的上升,晶体中的原子开始振动,当温度升高到室温时,原子振动更加剧烈,一些电子可以获得足够的热能而跃迁到导带之中。

如果我们在室温下测量纯净硅的电阻,会发现它的值还是很高的。但是,随机的热激发会产生导带电子,故纯净硅也存在一定的导电性。

事实上,纯净硅未加处理时的导电能力很弱。为了利用硅材料来制造有用的器件,纯净硅中必须加入少量经过选择的杂质材料,使硅在一定的温度下具有更多的自由电子。通过控制杂质的剂量,可以很好地控制导电能力。

引入杂质的过程称为**掺杂**,在后面的章节中我们将介绍不同的掺杂方法,用来掺杂的材料称为**掺杂物**。