



刘全宝 陆安定 编

半导体二极管与三极管

科学技术出版社

半導體二極管與三極管

劉全寶 陸安定 編

科學技術出版社

內 容 提 要

本書首先簡單闡述了半導體的物理性質；接着介紹半導體二極管與三極管的構造、作用原理及性能，並介紹幾種常用的半導體二極管與三極管的參數和討論了它們在電路中常見的應用；最後還用電子管電路來配合說明半導體管的電路。

本書可供無線電工作者及具有高中以上程度的物理和無線電愛好者閱讀。

半導體二極管與三極管

編 者 劉全寶 陸安定

*

科 學 技 術 出 版 社 出 版

(上海南京西路2004號)

上海市書刊出版業營業許可證出 079 號

大眾文化印刷廠印刷 新華書店上海發行所總經售

*

統一書號：15119·663

開本 787×1092 1/32 ·印張 2 3/4 ·字數 54,000

1958 年 5 月第 1 版

1958 年 5 月第 1 次印刷 ·印數 1—8,000

定價：(10) 0.36 元

序

半导体物理学是一门年轻的科学,由于最近十年的迅速发展,无论在理论上、在实际应用上都有着重大的成就。另一个标志着半导体发展的进步道路的特点,乃是实验和理论的密切联系。目前半导体和半导体管已被广泛地应用在无线电技术、电子计算机、自动控制等各方面。

在一定程度上,利用半导体制成的半导体管成功地代替了普通二极电子管与三极电子管,而且它愈来愈显示出比电子管有着更优越的性能。

本书除了简明地阐述半导体的物理性质,还介绍半导体二极管与三极管的构造、作用原理及其性能,介绍几种常用的半导体二极管与三极管的参数,并讨论了它们在电路中常见的应用。

到目前为止,关于半导体物理的具有完整而严格的理论还没有建立起来,因此在讨论半导体管的若干性能时,我们只能通过典型的实验结果和理论分析来加以说明。

本书主要读者对象是无线电工作者及具有高中以上程度的物理学和无线电爱好者。要深入阐明半导体管的作用原理,必须从能级及费密级观点出发来详细讨论它的性能,这样在理

論上說是比較完整了些；然而要說明導帶、滿帶以及施主、受主等問題時，必定要從介紹量子跳躍等概念着手，因此需要涉及統計力學和量子力學。本書為了使讀者易于理解，我們採用了從晶體的點陣結構着手來講；同時在解釋半導體管的作用原理時，也用了能量的觀點來加以說明。

最後我們誠懇地希望讀者對本書提出批評和建議。

編者 1957年11月

目 錄

序

第一章 緒言	1
第二章 半導體	3
1. 導體、半導體及絕緣體	3
2. 物質的电子導電	4
3. 晶体的点陣結構	6
4. 半導體的空穴導電	8
5. 雜質對半導體導電率的影响	10
第三章 半導體二極管	12
1. 半導體的整流作用	12
2. 点触式半導體二極管	19
3. 点触式半導體二極管的应用	25
4. 面触式半導體二極管	30
5. 苏联制造的半導體二極管	32
第四章 半導體三極管	39
1. 半導體的放大作用	39
2. 点触式半導體三極管	42
3. 面触式半導體三極管	51
4. 半導體三極管的嘈声	59
5. 半導體三極管与电子管的比較	60
6. 高頻高功率半導體三極管	64
7. 半導體三極管的应用	68
8. 苏联制造的半導體三極管	76
参考文献	81

第一章 緒 言

半导体物理学是最近二三十年才迅速发展起来的一门新颖的科学，其发展过程和无线电技术有不可分割的关系。

在电子管发明以前，人们早已在利用半导体，如无线电矿石收音机中所采用的检波器就是由天然的矿石——半导体——和金属弹簧相接触所组成的。这种矿石以黄铁矿、红锌矿或黄铜矿等制成。但这一类天然的半导体所制成的检波器是不稳定的，它经不起机械的震动，并且每次使用的时候都必需在矿石上寻找灵敏点。天然矿石存在着这些缺点，因此当电子管问世以后，天然矿石很快就被电子管所取代。

随着无线电技术发展，无线电所使用的电磁波频率范围也越来越宽，尤其在无线电定向技术兴起以后，迫切要求人们解决频率很高的微波范围内的技术问题。但在普通电子管各极之间不可避免地存在着较大的极间电容，电子越过电极需要一定的渡越时间，在微波频率，这些因素严重地影响了机器的正常工作。为了解决电子管所存在的这些缺点，科学家们创造了用硅半导体所组成的二极管。这些二极管基本上没有电子管所存在的缺点，并且体积较电子管小、用电节省。而且它有更大的一个优越性，就是使用寿命很长。除了上述优点以外，锗、硅二极管与天然矿石检波器不同，它们具有很高的机械强度和稳定的工作特性。从此以后，半导体管在无线电技术上的应用被人们

重視起來，而且促使科學家們進一步對半導體的本質作更深入的研究。

人們在研究半導體過程中，又發現它具有放大電壓的特性，利用這種特性終於制成了點觸式鉻放大管（鉻三極管）。

這種利用半導体制成的二極管及三極管習慣上稱它們為半導體二極管及三極管，（或稱晶體二極管及三極管）。

到目前為止，半導體二極管和三極管已在無線電技術中獲得了廣泛的應用，因而使無線電技術向前推進一步。現在越來越多地吸引着人們的注意。它們除了作為整流器、檢波器、高頻放大器、低頻放大器、調制器、振盪器以外；同樣也被應用在各種特殊電路，如電子計算機、自動控制、等各種儀器中。

應該指出，半導體二極管和三極管，現在正處於迅速發展的時期。自從點觸式二極管和三極管發明以後，又有面觸式晶體二極管和三極管的產生。雖然在目前產品中還存在着某些缺點，如雜音較大、功率輸出較小等，但是這些缺點在不久的將來是可以設法改進的。

半導體物理學的發展，對無線電技術開辟了一條新的道路。要使潛在於半導體中的豐富無比的可能性，轉變成現實的成績，還需要物理學家和工程師們更多的、更密切合作的工作。

第二章 半導體

1. 導體、半導體及絕緣體

在十九世紀及二十世紀初葉的電工學中，稱金屬為導體，介質為絕緣體。而在最近幾十年來物理學和電工學的互相充實和發展，使電工材料中又產生了半導體材料。

根據不同的電導率，我們可以把物質區分為導體、半導體與絕緣體三種。有的文獻中用電導率的倒數電阻率來表示物質的導電性能。電阻率是指截面積為 1 平方公分、長為 1 公分物質的電阻值。它的單位是歐·公分³。導體、半導體與絕緣體的電阻率如表 2-1 所示。

表 2-1 各種物質的電阻率

名 稱	電 阻 率 (歐·公分 ³)
導 體	$10^{-6} \sim 10^{-3}$
半 導 體	$10^{-3} \sim 10^3$
絕 緣 體	$10^3 \sim 10^{20}$

金屬與它的合金均屬於導體。最常用的絕緣體有橡膠、膠木、石英、玻璃等。屬於半導體的有許多化合物，如氧化物、硫化物、碳化物等；元素中硅、硒、鍺、碲等均具有半導體的特性。

半導體與金屬之間除了電導率不同以外，其電導率對溫度變化的關係也有顯著的差別。對金屬導體來說，當溫度下降的時候，它的電導率就上升；半導體就相反，當溫度下降的時候它

的電導率也隨着下降。而且另一個不同之處是半導體電導率的變化受溫度的影響極大，當溫度接近絕對零度的時候，半導體的電導率亦漸漸降低趨近於零，成為絕緣體。

此外人們又發現當金屬觸針與半導體相接觸，或者將不同類型的半導體相接觸在一起的時候，可以使它產生整流作用和放大作用。這種性能是半導體所特有的，由於這種特性人們就能夠利用半導体制成二極管與三極管。

為了使我們能對半導體的整流、放大作用有明晰的概念，必需對固體的導電機構，尤其是半導體的導電機構有一定程度的了解。本章以下幾節將從物質的电子導電、半導體的點陣結構及空穴導電性能開始來說明它的整流及放大作用。

2. 物質的电子導電

我們都知道物質是由原子所構成的，原子內部含有帶正電荷的原子核，及帶負電荷的电子。原子核的直徑在 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ 公厘之間，电子環繞着原子核作複雜軌迹的旋轉運動。在正常情況下，每個原子中电子的數目等於該原子在門捷列夫周期表上的原子序數。為了使我們容易理解這些电子運動的規律起見，可以用行星圍繞着恒星運動的情形來想像。原子核相當於恒星，电子相當於行星。在原子核周圍有許多相互間隔着一定距離的軌道，所有电子只能在這些固定的軌道上運動，並且各條軌道上最多能容納的电子數目也有一定規定。這些軌道從相距原子核最近的一層起，依次定各為 K 、 L 、 M 、 N 、 $\dots$ 層，每層能容納的最多电子數目如表 2-2 所示。

所有各種元素都根據門捷列夫周期表上所規定的电子數

目, 依着表 2-2 原則, 从 K 層依次向远离原子核的各層分布开去。

表 2-2 原子中每層軌道能容納的最多电子数目表

層 数	軌 道 名 称	最 多 电 子 数
1	K	2
2	L	8
3	M	18
4	N	32
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
n	$\vdots$	$2n^2$

例如鈉原子具有 11 个电子, 其中 10 个电子分别依次填满了 K 層及 L 層, 剩下來的一个电子只得在 M 層上运动。因为 M 層最多可以容納 18 个电子, 在此情况下 M 層为未填满的層。被填满層上的电子称为内电子, 未被填满層上的电子称为价电子。如鈉原子就有 10 个内电子和 1 个价电子。价电子距原子核最远, 束縛力也最弱; 如果它在接受了外來能量(如热能或光能)以后, 就可能跳到距原子核更远的軌道上去。例如上述鈉原子 M 層上的一个电子跳到 N 層或 O 層上去。鈉原子構造与各 K 、 L 、 M … 層軌道示意圖如圖 2-1 所示。这时跳到 N 或 O 層上的电子处于激發状态。如果外來的能量很大, 也可能使价电子完全脱离原子核的束縛而处于电离状态。这些不受原子核束縛而能自由行动的电子称为 [自由电子]。

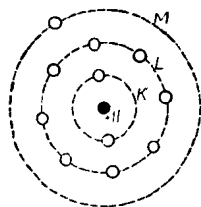


圖 2-1 鈉原子結構圖

当很多原子結合成固体的时候, 由于原子与原子間的相互作用及原子热运动的結果, 也会有自由

电子產生。

在絕緣體中自由电子的數目很少，可以忽略不計，所以在受到外加電壓以後，原子內部並不產生反應。金屬導體則不然，每立方公分中含有 $10^{22} \sim 10^{23}$ 個自由电子，它們沒有被固定的原子核所束縛，而能在金屬中自由運動，當外加電勢加在金屬導體上以後，這些自由电子就沿着導體向着一定的方向（向正電極的方向）移動。电子的移動就造成了電流，這種導電方式就稱為[电子導電]。

半導體的自由电子數目介於導體和絕緣體二者之間，在 30°C 時，矽的自由电子數每立方公分中有 6.8×10^{10} 個；鎢的自由电子數每立方公分中有 2.5×10^{13} 個。所以半導體的电子導電性能較絕緣體強，但是比導體為弱。

談到溫度與电子導電性能的關係，金屬導體的自由电子數目與環境溫度無關，电子導電的導電率與溫度成反比的關係，溫度升高，金屬的導電率降低。半導體的情況就不同了，在絕對溫度零度時，所有價电子都被各固有的原子核所束縛，不能自由流動，所以在絕對溫度零度時，半導體的電導率等於零；當溫度逐漸升高時，部分电子由於原子熱運動的結果，就脫離了固定原子核的束縛，變成了自由电子，它的導電率就漸漸升高了。因此溫度越高，半導體电子導電的能力也就越強。

3. 晶體的點陣結構

在導電方式方面，半導體除了上節所述的自由电子參與的[电子導電]以外；還有所謂[空穴]也能參與導電，這種導電方式稱為[空穴導電]。這種特殊的空穴導電在實用上有着非常重大

的意義。下面將通過具體的例子來說明半導體的空穴導電的性能。

為了解釋空穴導電的原理，首先要了解半導體的內部結構，進一步說明它的導電機構。硅和鍺是二種典型的具有半導體性質的元素，也是很重要的半導體材料。在目前所有的半導體二極管與三極管都是用鍺或硅來製造的，因此用鍺的晶體結構為例子來說明半導體的導電機構是頗適當的。

如同其他固體一樣，鍺是由許多微小的晶體所組成的，在微小的晶體里，鍺原子按着嚴格的規律排列着。按門捷列夫周期表上規定，鍺原子具有四個價電子，每一鍺原子的一個價電子與另一個鍺原子的一個價電子組成一個電子對，這電子對存在於二鍺原子之間，並且依靠它們才把原子與原子互相结合在一起，這種結合的方式，稱為「共價鍵」的結合。由於鍺原子有四個價電子，所以在鍺晶體中每一個鍺原子與相鄰四個鍺原子以共價鍵的方式互相结合着。形成一個穩定的原子根，帶有四個正電荷。共價鍵以二個電子組合所形成的電子束縛最為穩定，多增一個電子或減少一個電子，束縛力也就隨之減小，其形成的結構也就不穩定了。

圖 2-2 表示鍺原子的結構圖，圖中圓球表示原子實，球與球之間圓柱代表共價鍵，圖中每個原子被距離相等的四個鄰近原子依靠共價鍵相结合着。原子所在位置稱為結點。這一種結合的結

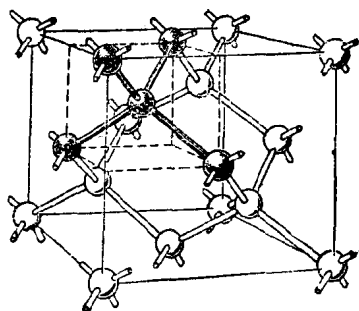


圖 2-2 鍺晶體的點陣結構

構形式,我們称之为鉅晶体的[点陣結構]。圖中黑球及黑圓柱体部分組成一个單元,称为[原子根]。

为了說明方便起見,可以把鉅晶体的点陣結構表示到平面上來,如圖 2-3 所示。其共价鍵是以二条直線來表示的,每一个

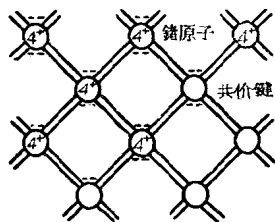


圖 2-3 鉅晶体点陣結構平面圖

电子的鍵用一条直線來代表,因为相鄰二原子間共价鍵中有二个电子在一起,所以用二条直線來表示。在圖中每个原子和相鄰四个原子相結合,共是八条綫,即表示有八个电子起作用,其中四个是自己的,另外四个各屬于一个相鄰的原子。

在理想情况下,所有价电子都用来組成了共价鍵。換言之,在晶体点陣結構中每个結点上都有原子,既無空余結点,也沒有剩余电子,这种点陣結構的晶体称为[理想晶体]。

4. 半導體的空穴導電

現在假定有一具有高能量的粒子(例如光子)打击在晶体結構上,如圖 2-4 所示。圖中粒子撞击晶体的共价鍵以后,粒子的能量使共价鍵中的电子从共价鍵中釋放出來,运动到相距原來共价鍵很远的地方去。由于晶体中其他各处的共价鍵都是完整的,因此这个被釋放出來的电子就成为一

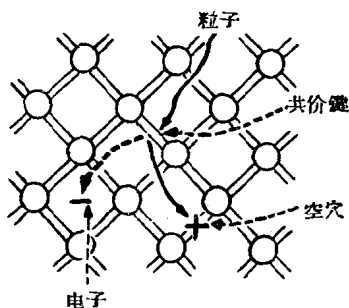


圖 2-4 电子与空穴在晶体中作雜乱运动

个自由电子。这自由电子由于受到粒子的能量,所以它在晶体中作雜乱的运动,其运动的軌迹如圖中虛綫所示。

在自由电子產生的同时,共价鍵中就剩下了一个空余着的位置,这空的位置被称为[空穴]。

在共价鍵中,电子被釋放以前原子是中和的;当电子被釋放以后,原子中减少了一个負电荷,因此在空穴的地方相当有一个正电荷存在着。在它鄰近鍵中帶有負电荷的电子就有可能跑來填补这一个空穴,使空穴移到鄰近的一个鍵上去,这样空穴連續位移,如同自由电子一样。空穴也在晶体中作雜乱的运动,如圖中实綫所表示。圖中正号代表空穴,負号代表电子。

但如在鍺晶体二端加上电压,那末上面所述的自由电子受了电場的作用,將向着一定方向运动,如圖 2-5 所示。由于运动就產生了电流。同样,空穴在电場作用的影响下,向着与电子相反的方向运动(因为空穴相当于一个正电荷,所以它在受电場作

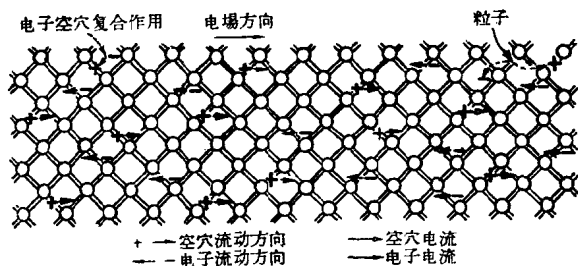


圖 2-5 在电場中的电子电流和空穴电流

用以后,其运动方向与电子运动方向相反)。因此空穴的移动在晶体中也形成了一个反方向的电流,这电流称为[空穴电流](如圖所示)。各种半导体在电場中都会產生[电子电流]和[空穴电流],它們組成了半導体的总电流。

我們自然会想到被破坏的共价键决不止一个,那么被释放的自由电子和空穴很可能会相遇,这时自由电子就填补了空穴,恢复了原来的情况,这种作用称为电子和空穴的[复合作用]。电子在自由释放时所得到的能量,就在该时释放出来。电子空穴复合作用如图 2-5 中虚线箭头所示。

5. 雜質对半導體導電率的影响

在純粹半導體中,由于高能量質点撞击或热运动結果所產生的电子和空穴数目将是相等的,这一点从上文說明中是很容易理解的。但在实用場合我們往往需要只具有电子導电或空穴導电性能的半導體。为了达到这个目的,我們在純粹的半導體中摻入一定量的异类元素。这种异类元素称为[雜質]。雜質的別类及数量决定了半導體的導電率及其導电方式。

例如在鍺晶体中摻入了一定量砷,此时在鍺晶体中的若干原来由鍺原子所占的位置就被砷原子所占据了。砷原子具有五个价电子,而在現在情況下,砷原子中只有四个价电子与鄰近的四个鍺原子合成了共价键。剩下的一个价电子与砷原子間的束

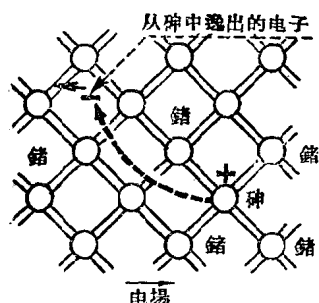


圖 2-6 摻有雜質砷的鍺晶体結構

縛力很弱,由于热运动結果,它很容易脱离砷原子核,在晶体中自由移动。这样就在晶体中產生了自由电子。而失去了一个价电子的砷原子就剩下一个不移动的正电荷。摻有雜質砷的鍺晶体結構如图 2-6 所示。所以砷在鍺中起着陰性作用,使晶体內电子数目

多于空穴数目,受了电場影响以后,依靠电子导电,电子流动方向与电場方向相反,如圖所示。这种主要靠电子导电的半导体称为[n 型]半导体。这种供給半导体自由电子的雜質称为[施性雜質]。

如果在鍺晶体中掺入雜質硼,因为硼只有三个价电子,所以它不能与周圍四个鍺原子完成完整的鍵結構,而有一个空穴存在着,因此在鄰近鍵中的电子就可能來填满这个空穴。失去电子的鄰近鍵中產生了一个空穴,如同上文所述,这空穴可以在晶体中自由移动。而硼現在就剩下一个不移动的負电荷。掺有雜質硼的鍺晶体結構如圖 2-7 所示。所以硼在鍺晶体中起着陽性作用,使晶体內空穴数目多于电子数目,受了电場影响以后,依靠空穴导电;空

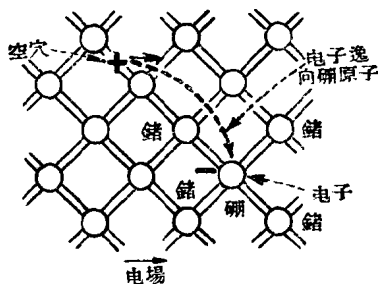


圖 2-7 掺有雜質硼的鍺晶体結構

穴流动方向与电場方向相同,如圖所示。这种主要靠空穴导电的半导体称为[p 型]半导体。这种供給半导体空穴的雜質称为[受性雜質]。