

中華科學叢書第四種

半導體裝置

著者：James J. Brophy

譯者：李述忠

臺灣中華書局印行

21
61

半 導 體 裝 置

著 者 *James J. Brophy*
譯 者 李 述 忠

臺灣中華書局印行

中華民國六十二年十月三版

中華科學叢書第四種

半導體

裝置(全一冊)

基本定價壹元正

著者 James J. Brophy
譯者 李述忠

中華科學叢書編輯委員(以姓氏筆劃爲序)

伍法岳	沈君山	沈慶春	李天培
林多標	吳京生	吳家璋	吳錦鑑
夏道師	浦大邦	許翼雲	趙曾珏
劉鑒	劉全生	鄭伯昆	錢致榕
瞿樹元			

發行者 中華書局股份有限公司代表 熊鈍生

印刷者 臺灣中華書局印刷廠

發行處 臺灣中華書局

臺北市重慶南路一段九十四號

臺北市雙園街六〇巷九〇號

臺北市重慶南路一段九十四號



甲書

(敬·廠)

中華科學叢書序

近代物理學，可溯源於十九世紀末年之氣體導電、X光、放射性等之研究。六十餘年來，基本物理中劃時代之發展，如一九〇〇年之量子論，一九〇五年之相對論，一九一三年之原子結構理論，一九二四——一九二八年間之量子力學，一九三幾年之原子核物理，一九三九年之原子核分裂。一九四六年介子之發現，及近十餘年來之基本粒子物理及物理學中之對稱定律等。常言「一日千里」，實不足以形容物理學發展之迅速。即從事一部門物理研究工作之學者，對其他部門之新發展亦時感脫節。故各國各部門科學皆有專書及期刊，由各門專家著述，對各部門工作之結果及發展之情形，作綜合性之報告、檢討及分析。此類著作，不僅便利同儕而已。

年來國人對科學及技術於建國之重要，了解漸深，一般青年，對科學、工程技術之興趣亦日趨濃厚。然限於環境，時或有望洋興嘆之感。增強在臺學校中科學教程，固為一基本工作，但以中文著述，介紹科學之新發展，為學校課外之補充讀物實為一極重要、極有意義之事。

我國留美學耆：伍法岳、沈君山、沈慶春、李天培、林多標、吳京生、吳家瑋、吳錦鋐、夏道師、浦大邦、劉鑒、劉全生、錢致榕、瞿樹元諸先生有鑑於此，曾決定從事科學叢書之編譯，各就其專長，選定寫作部門，目前除計劃於近期內陸續出版關於基本粒子、天文漫談、物理定律的特性，半導體裝置，現代物理等等外，尚有液態氦、高能加速器等陸續出版，並擬擴大科學部門，廣邀各方面學者專家從事著述。

叢書編輯委員會諸君，皆年青學者，學有專長，茲能熱心從事著述，為我國科學教育及青年效勞；而中華書局亦以服務精神發行科學叢書。筆者年來對我國科學教育，未嘗忘懷，祇以力不從心，無善可述，茲聞此叢書行將陸續出版，謹向國人介紹，並致個人欽佩喜慰之感。

吳 大 猷

一九六六年十月

XXXXXXXXXXXX:

譯 者 序

XXXXXXXXXXXX:

本世紀來，科學突飛猛晉，僅就半導體物理學而言，十餘年前，人們對它們的性質、用途等尚不了解，但是今天已經幾乎成爲日常生活所必需；不論家庭中或工、商業上，隨時隨地都在使用半導體裝置。因此要每一個人都具備一些這方面的知識也不爲過。尤其現在臺灣正在發展工業，提倡科學。關於半導體的研究發展也就更形重要。

本書是一本工業上的小冊子，祇是簡單地介紹半導體裝置的基本原理以及某些實用裝置。用非學術性的筆法敘述半導體的物理性質，各種裝置及它們的用途。爲使讀者易於了解起見，本書採用意譯而非語譯，若讀者閱讀了這本小冊子之後，能夠對半導體有一個通盤的概念，並能對它發生興趣，譯者就別無所求了。

本書在翻譯過程中，蒙林多樑教授及劉鑒教授在百忙中加以指正，譯者無任感激，謹此致謝。

李 述 忠

中華民國五十七年六月



著 者 序



一個學術上的題材，同時具有科學的研究價值，而又在商業上具有其重要性的實不常見。而這同一個學術題材能够輕易地被了解及解釋，而不需要高深的科學根基則更爲罕有。然而近年來衆所矚目的半導體電子學 (semiconductor electronics) 及半導體裝置 (semiconductor devices) 恰具有這種特性。

半導體裝置，特別是電晶體 (transistor)，在商業上的價值，已經激使半導體的研究與技術，達到某種地步，而在物理學、電子學、化學、和研究材料的科學 (material science) 等方面廣泛地導致許多問題，因此即使對半導體方面，並不直接發生興趣的學生、工程師、及科學家們，在半導體裝置工業方面有點了解，也是十分重要的。同樣地，許多商人也感覺到他們需要些半導體裝置方面的知識，因爲半導體在商業上也十分重要。爲了這種目的，在研究半導體時，我們不需要進到那種適合於一個做研究工作的科學家所要求的細節，以及那種深度。

許多種類的半導體線路，都已經製備成了工程另件的樣子，只要很少的錢就能買到。爲了有助於了解電子線路的作用，我們鼓勵初學者去組合並操作這些線路。但

要了解半導體的作用，却需要知道一些半導體內部操作過程 (internal process) 的知識。本書企圖廣製成半導體的那些物質的特性，來敘述半導體裝置的作用。以補足這種需要。它推演的步驟是非數學的，而以晶體能帶理論 (Band Theory) 為基礎。這種能帶理論在概念上能使人滿意，同時只要略為有一點原子構造方面的知識，就能够了解這種理論。不論什麼時間什麼地方，只要可能，半導體的特性，都由各種裝置的直接測量來加以解釋，而讀者只要花很少的錢，就能重做這種種的實驗。

本書若能促使某些讀者作進一步的正式研究，而使其他讀者能够了解半導體物理學的美，作者就感到十分滿足了。

作者感激許多同伴們，本書中的許多題材取自他們的出版物。特別是 W. D. Brennan, J. W. Dally, M. Epstein 和 R. J. Robinson 仁慈地供給了很多特殊的技術數據。作者也樂於指出 Arthur Kip 的幫助，以他的編輯才能提供了許多寶貴的意見。

James J. Brophy

半導體裝置目錄

譯者序.....	1
著者序.....	2
第一章 半導體電子學.....	1
第二章 固體中的電子.....	5
原子構造	
能量帶	
金屬，絕緣體與半導體	
費爾米能階	
第三章 半導體.....	14
電子及空穴	
外廩半導體	
晶體內雜質所構成的能階	
晶體的生成	
半導體物質	
第四章 簡單半導體裝置.....	35
光導體	
紅外線探測器	
靜電攝影術	
磁強計	
電子冷却	
溫差發電機	
熱變電阻器	
荷變計	

第五章 p-n 接頭裝置.....50

p-n 接頭
參變二極管
琴納氏二極管
整流器
光電池
太陽電池
電晶體
漸成接頭電晶體
合金接頭電晶體
高臺電晶體
平板電晶體
四層裝置
實驗測定

第六章 特種裝置.....81

接頭雷射
光電晶體
電子發光
隧道二極管
複雜接頭
累積線路
薄膜電晶體
音響放大器

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

第一章 半導體電子學

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

你

現在手中所拿的這本書，其大小約相當於一具六晶體超外差收音機，只不過幾年之前，這種同式的收音機却有你座下的椅子那麼大。這種體型上驚人的縮減，乃由於電晶體的發展而致。所謂電晶體是一種極小的半導體裝置，它具有把極微弱的電訊放大的性能。其他如可置於耳中的助聽器，可吞入腹中以供醫學用途的無線電發送機 (radio transmitter) 等許多極微小的電子裝置，也多利用電晶體來製造。

這種種縮形上的成就雖然驚人，但絕對沒有把半導體裝置及電晶體的全部重要性都包含在內。假定我們現在有這樣的一個問題，那就是我們要把電訊自太空的人造衛星上遞送回來。則無線電發送機必須要造得够小，同時還要可以長時間操作而不必去管它，此外它的能量也必須要利用太空的唯一能源——太陽來供給。這時我們就可以利用電晶體及太陽電池來解決這問題。電晶體及太陽電池全是用半導體製成的裝置。前者可用來製造極小的無線電發送機，後者則能够把太陽能直接轉換成電能以供給所需的能量。事實上，有些極早期的人造衛星就是利用這些裝置的，而在經過了五年之久的時間後，它們依然能够把電訊送回地面。

如果我們瞭解這些東西只不過經過人們廣泛的研究了二十年左右，那麼就會更加驚奇（電晶體發明於 1948 年）。雖然在電晶體發明之前，某些半導體裝置，如氧化銅整流器，Se 整流器及 Se 光電池，已經在商業上佔有一席之地，但是半導體電子學的時代，却必須從電晶體問世後才開始計算。由於電晶體在商業上的重要性所引致的在半導體方面的廣泛研究，現在已經導致許多同樣重要也同樣驚人的新型半導體裝置。

到底是些什麼因素使得電晶體及半導體裝置如此重要呢？讀者們看完本書之後將會得到滿意的答案。它們最重要的優點是形體小，操作生命期長，所需能量少及變通性極大。形體小的價值我們已經討論了一部份了，現在我們再看幾個例子。半導體內各種重要操作過程，全部發生在一小塊固體物質中，許多限制縮形的因素，如複雜的機械結構、真空裝置等半導體都不需要。這種種必需的構造，只要改變它們的化學成分就能達成，這種改變成分的步驟，可由幾種精細，但處理並不困難的過程來完成。因此使得它們的體積可以用公厘（mm）而非用吋來測度。

○ 半導體內的作用物質是一些固體中具運動性（mobile）而容易控制的電子。當有外電場或電訊時，電子會因之而運動。半導體內，可動電子（mobile electron）的數量，恰好够多而可資利用；與之相較，導體內有太多的可動電子，而絕緣體內則付缺如。半導體與導體的主要區別，即在室溫時，溫度的熱效應使半導體內產生少量可動電子，而導體內則多量的可動電子早已存在。正因導體

內自由電子太多，致使外電場無法深透固體內部而，絕緣體則不含自由電子，因而在大部份實際情況下不呈電性。

半導體生而具有可動電子，這些電子永遠可資利用，同時永遠也用不完。因此半導體裝置的生命期相當地長。可資利用的電子僅需極少的能量即可產生，因此半導體裝置作用時需電能極少。在能源受限制（如衛星中的電訊發送機、助聽器等）及一些極複雜的裝置如電子計算機，若耗能量太大則會產生大量的熱），這一特性極為重要。

由以上的討論可見，半導體裝置的重要特性，來自半導體物質本身，因此本書中將先討論半導體物質，然後再談論各種裝置。因為晶體內化學雜質及其表面所附着的化學物質，能夠對半導體的可動電子數產生極大的影響，所以半導體晶體，在使用前必須高度精煉，同時也必須小心保護，不使其表面為外物所沾染。半導體的另一特性是對溫度極為敏感，相當小的溫度增加，即可能使其不能正常操作，這可能是它最大的缺點，但是如果採用適當的設計及物質，可以把操作性能大為增廣。

就因為半導體必須純度極高及非常完美。因此人們對它的了解也較其他物質為佳，這不是十分有趣嗎？為了簡單起見，理論上的研討多限於理想晶體，而僅有半導體物質方能製備理想晶體用於實驗研究作為理論的驗證，結果理論與實驗極為符合。這種吻合甚至包括了許多需要在數學上詳加演算的細節。不過實用的半導體本身結構簡單，使我們不必假借數學演算，而可了解它們重要的性能。

由於半導體及其裝置已被如此廣泛地研究，其收穫不僅限於我們對半導體的智識，而在了解一般固體方面得到的許多進展也是無法估計的。事實上，半導體工業所使用的技術與方法，已經成功地用於許多其他物質，並解決了許多固體物質的問題。因此，它除了使電子工藝產生了一次革命性的變動外，對固態科學貢獻亦大。從電晶體的三位發明人：John Bardeen, Walter Brattain 及 William Shockley 得到諾貝爾獎金事可知此一事實。

半導體電子學的範圍，一般包括使用半導體裝置的電子線路的設計，這些裝置的操作和半導體物質的特性。後面的數章內將特別強調最後兩點，因為在了解半導體裝置科學性質，這兩點極其重要，（以別於它們在工程上的用途。）對於線路方面，讀者可以低廉的價格買到多種電子線路組合來加以利用。若想完全了解半導體電子學，必須從這些裝置的內部作用着手，而這一點則有賴於對半導體物質的直接研究。



第二章 固體中的電子



何 謂半導體呢？第一章中我們曾把這問題解答了一部份：半導體是一種固體物質，其內部

所含可動電子的數量比導體中要少，但却比絕緣體多得多。我們都知道，在物體中，電子的運動導致電流。銅、銀、鐵等物質含有許多可動電子，所以這些物質是良導體。反過來說，如玻璃、木材、橡皮等物質，電子不能在其體內自由運動，於是它們不能傳導電流而成為絕緣體，誠如其名，半導體恰座落在以上二者之間。它的導電性比絕緣體為佳，但遠不及金屬物質，因此我們也可稱它為“半絕緣體。”

一切固體都由原子構成，而電子又是構成原子的成分之一，所以固體中都含有電子。既然如此，為什麼固體不全是導體呢？這是因為絕緣體內的電子全被它們各別歸屬的原子所緊密束縛住了。於是這些電子就不能夠在固體中自由運動而不能導電。在金屬內，每個原子都有一個或數個電子會脫離其母體的束縛，而在固體內自由運動，於是它成為優良導體。物質中有沒有這種流動電子存在，全由組成這物質的原子的種類，及它們的組成情況而定。這就是說物質的電性質 (electrical properties) 因原子構造及晶體結構 (crystal structure) 而定。

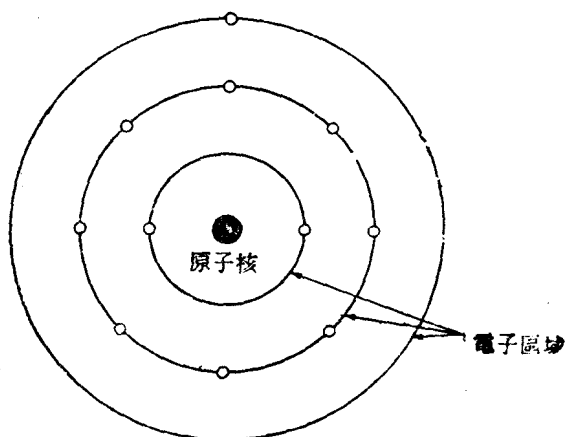


圖 2-1 鈉原子的構造

原子構造 (Atomic structure)

圖 2-1 是典型原子—鈉—的原子構造。在它的中心，是一個質量較大並帶正電的原子核。許多帶負電的電子則環繞着這個原子核而運動。事實上，這些電子有點像太陽系中的行星般座落在環繞原子核的區域內。這種比喻當然並非完全恰當，因為原子的物性與一般所見巨觀世界中的情形相差很大。由於原子核帶正電，而且電子又在不斷地運動，這些電子就被吸引而停留在一些穩定區域 (stable zone) 內。接近核的電子被緊密束縛着，外層的電子所受的束縛力則較小。若想把一個電子移到很遠的地方需要能量來作功，束縛力的大小，可由這種所需的能量來決定。把內層電子移動到遠處所需的能量較大。圖 2-2a 中的曲線表示這種事實。從曲線上的一點到水平線間的距離，表示所需能量的大小。(如 E 所示) 圖

中所繪原子核及電子的大小並無意義，只是幫助我們想像一個球狀的電子滑落到一個原子核位於底部的洞中而已。

電子在原子中有一種特性，就是它們所具的能量，必須是某些定值時它們才穩定。圖 2-2a 的水平線表示相當於圖 2-1 的不同能量區域 (energy zone)。這些水平線 (代表能階) 表示在接近原子核的區域中，那些電子的能態 (energy state) 是穩定的。曲線代表電子在原子中的束合能 (binding energy)，這種圖形通稱能階圖 (energy level diagram) 它在原子物理及固態物理學中研究電子性質方面用途極大。

因原子而異，臨近原子核的能階，可以具有一個或多個電子。但電子具有另一種特性，那就是一個固定的能階所能具有的電子數是一定的。考慮氫、氦、鋰諸原子，我們極易明白這個事實。氫原子有一個電子，在正常狀況下，它多停留在最低的能階中，氦原子有兩個電子，全在最低的能階中。但在有三個電子的鋰原子中，其中一個電子必須停留在次高的能階中。這是因為最低的能階中至多只能含有兩個電子，於是第三個電子就被排斥，而不得不停留在較高的能階中。第二個能階中最多可以有八個電子 (見圖 2-1)，愈高的能階，所能具有的電子數就愈多。任何原子中，電子均依各能階所能容納的數量而儘先佔據最低的能階。較高的能階中，則沒有電子存在。若受到外力的影響，原子中會有一個或數個電子，從最低的能態被推送到較高的能態去，這時我們就稱這個原子是在受激態 (excited state)。2-2a 能階圖中的黑