

最新增訂本

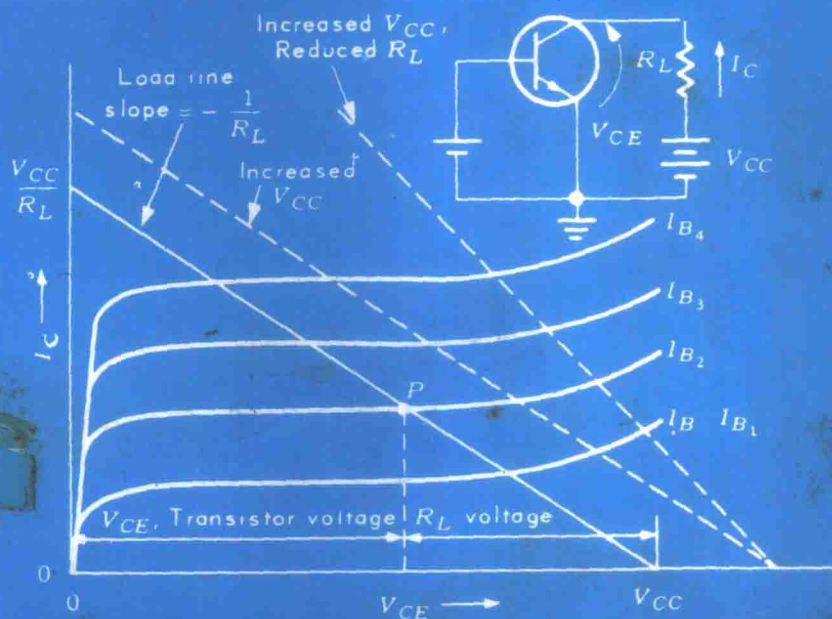
電晶體電路

(全集)

TRANSISTOR
CIRCUIT
APPROXIMATIONS



Albert Paul Malvino, Ph. D. 原著



羅拔書局印行

最新增訂本

電晶體電路

全 集

羅拔書局印行

電晶體電路全集

編譯者：陳 虔
出版兼：羅 拔 書 局
發行

澳門大馬路381號二樓F座

印刷者：振興印刷公司
澳門龍崙街152號地下

H. K. \$ 28.00

原序

我們使用電晶體時，必須瞭解所接觸之裝置並非十分精確可靠，這是由於電晶體的特性使然。例如：電晶體的重要參數之一的電流增益 β （亦用 h_{fe} 表示），我們若改換同一型號的電晶體， β 的變化最少也在2：1範圍內。因為有此種變化，所以不可能精確預測該電晶體在某特定電路內究竟如何工作。而且， β 還會隨其周圍溫度之變動而變動，更使另一不準確度加入電路工作之中。

為消除電晶體電路所發生的大幅變化，可使用負回授或其他類似技術，減少其增益，以獲致較高的穩定工作。使用此一方法處理，電路工作幾與電晶體特性無關。換言之，使用足夠之負回授來穩定工作， β 之精確值及其他電晶體的特性已不重要。

簡言之，由於電晶體之精確特性不易獲知，我們想以精確公式來分析電晶體電路之值已受到限制。如果考慮電晶體之容許誤差，則可適當地使用近似解以分析多種不同的電晶體電路。本書大部份着重在理想電晶體近似解。所謂近似解即僅保留電晶體重要特徵的解法。應用近似解可使新手很快把握住電晶體電路如何工作。此一簡易近似解，適於大多數我們所遇到的電晶體之使用。

本書較後數章是討論理想電晶體近似解所摒除之一些二階效應。最後一章涉及 h 參數解法，因為此一技巧，至少在理論上，可求得較精確的答案。

本書可供初級學院或技術專校之電子技術人員的講授教材。對需求一本既實用而又淺易的電晶體書籍之電子界人士而言，本書最為適用。本書份量適合每週三小時教學之用，先修課目應具有代數與基本電學知識。

我很感謝時間系統公司（Time System Corp.）的梅好謀（Daniel J. Mindheim）先生，對我撰寫本書時之指正，及愛美斯研究中心（Ames Research Center）的布如斯（Clifford Burrous）先生，仔細核閱最後書稿並提供許多有價值之建議。

阿伯特·波爾·馬爾維諾
(A.P. MALVINO)

增訂本全集序

「電晶體電路」一書由於內容切合高工及五專相關科系程度，先後被採作教科書者多達六十餘校，故自發行以來屢經再版，誠洛陽爲之紙貴。而唯一遺憾的是當年原著者 *Malvino* 博士未能將特殊半導體等有關資料列入書內。正值譯者爲此應如何增訂方始不負國內讀者們殷切期望之時，欣見原著者之增訂本問世。

增訂本係就原書第十四章後，增列“場效電晶體”、“特殊二極體”、“閘門裝置”及“光電裝置”四章合併成十八章之一完整巨著。前十四章部份，除增添些許習題問題外，內文則無隻字之更改。

本書譯成中文本「電晶體電路」，早有上、下冊及其合訂本之分，上冊爲前八章，下冊自第九章至第十四章，今將增訂之第十五章至第十八章添入合併成「增訂本全集」。

譯 者 識

目 錄

第一章 半導體物理

1—1 鎢與矽原子.....	1
1—2 鎢與矽晶體.....	2
1—3 純質鎢與矽之導電.....	3
1—4 電洞觀念.....	5
1—5 外質半導體.....	7

第二章 $p \cdot n$ 接頭二極體

2—1 $p \cdot n$ 接頭.....	13
2—2 $p \cdot n$ 接頭之整流性質.....	15
2—3 半導體二極體之電流電壓特性.....	17

第三章 大信號二極體近似解

3—1 理想二極體.....	25
3—2 實際二極體之第二近似解.....	31
3—3 實際二極體之第三近似解.....	34
3—4 利用二極體近似解.....	37
3—5 逆向電流近似解.....	38
3—6 齊納三極體.....	40
3—7 齊納二極體第二近似解.....	44

第四章 小信號二極體近似解

4—1 重疊定理.....	53
4—2 重疊定理用於電路中.....	55
4—3 二極體交流電阻.....	63
4—4 二極體交流電阻公式.....	65
4—5 使用重疊定理於二極體電路.....	70
4—6 逆向區域之二極體電容.....	75

第五章 共同基極近似解

5—1 術語與綫路符號.....	85
------------------	----

2 目 錄

5-2	電晶體之偏壓.....	87
5-3	共同基極電晶體電流電壓特性.....	89
5-4	電晶體之 Alpha.....	92
5-5	理想電晶體.....	94
5-6	使用重疊定理分析共同基極電路.....	100
5-7	複雜交流等效電路.....	103
5-8	共同基極分析公式.....	109
5-9	電壓與電流記號.....	118

第六章 共同射極近似解

6-1	共同射極連接電流電壓特性.....	127
6-2	電晶體之 Beta.....	130
6-3	理想共同射極電晶體.....	131
6-4	電晶體基極偏壓.....	135
6-5	電晶體射極偏壓.....	138
6-6	分析共同射極電晶體電路.....	144
6-7	射極偏壓與電壓增益.....	150
6-8	電源電阻效應.....	154
6-9	真空管與電晶體之轉換.....	157

第七章 共同集極近似解

7-1	共同集極連接基本觀念.....	169
7-2	導出共同集極公式.....	171
7-3	達靈頓 (Darlington) 一對.....	181

第八章 大信號工作

8-1	直流負載綫.....	189
8-2	負載線解釋交流信號.....	197
8-3	交流負載綫.....	200
8-4	獲得最大未剪波信號.....	206
8-5	p-n-p 負載綫.....	210
8-6	共同射極連接之負載綫.....	213
8-7	共同集極連接之負載綫.....	217
8-8	陰極隨耦器交流負載綫.....	220

第九章 偏壓安排

9-1	β 靈敏度之觀念.....	229
-----	---------------------	-----

9-2	基極偏壓	231
9-3	射極回授之基極偏壓	234
9-4	集極回授之基極偏壓	238
9-5	集極與射極回授之基極偏壓	243
9-6	二電源供給之射極偏壓	247
9-7	單一電源供給之射極偏壓	253
9-8	靈敏度之比較	260
9-9	接地點之位置	261
9-10	P-N-P 位晶體之偏壓	264

第十章 交流工作

10-1	共同射極工作	277
10-2	共同射極電路之交流分析	279
10-3	射極回授	288
10-4	共同集極工作	296
10-5	共同基極工作	300
10-6	信號電源電阻效應	304
10-7	穩定信號電源至輸出之電壓增益	307
10-8	P-N-P 工作	312
10-9	接地點	313
10-10	最大信號輸出能力	314

第十一章 串 級

11-1	電阻電容交流	327
11-2	二級回授	334
11-3	電感交連	340
11-4	變壓器交連	342
11-5	調諧放大器	347
11-6	直接交連放大器	350

第十二章 溫度效應

12-1	射極接頭電阻之改變	361
12-2	β 之改變	363
12-3	V_{BE} 之改變	364
12-4	基極接地電路之洩漏電流	367
12-5	射極接地之洩漏電流	372
12-6	穩定因素	375

第十三章 頻率響應

13-1	電阻電容交連放大器之響應	387
13-2	典型共同基極級之低頻截止	388
13-3	共同基極級之高頻截止	392
13-4	共同射極放大器低頻截止	396
13-5	電晶體截止頻率	400
13-6	基極分佈電阻	403
13-7	共同射極級高頻限制	405
13-8	串級響應	409

第十四章 h 參數

14-1	h 參數觀念	417
14-2	網路之輸入阻抗	423
14-3	使用 h 參數之電壓增益	427
14-4	電晶體之 h 參數	429
14-5	理想共同集極電晶體之 h 參數	432
14-6	理想共同射極電晶體之 h 參數	436
14-7	h 參數之轉換	441
14-8	對 h 參數之實際觀察	443

第十五章 場效電晶體

15-1	接頭場效電晶體	449
15-2	JFET 洩極曲線組	450
15-3	JFET 的偏壓	453
15-4	JFET 的交流操作	456
15-5	源極隨耦器	459
15-6	空乏-增強型 MOSFETs	460
15-7	增強型 MOSFETs	464
15-8	MOSFETs 的偏壓	465
15-9	MOSFETs 電路的交流分析	467
15-10	FET 與雙極電晶體的對比	469

第十六章 特殊二極體

16-1	變抗二極體	477
16-2	步級回復二極體	479
16-3	蕭特基二極體	482

16—4	反向二極體.....	483
16—5	透納二極體.....	484
16—6	p-i-n 二極體.....	486

第十七章 閘門裝置

17—1	理想閘門.....	495
17—2	四層二極體.....	500
17—3	矽控整流器 (SCR).....	505
17—4	其他類的 SCR.....	512
17—5	矽控開關 (SCS).....	513
17—6	Diac.....	515
17—7	Triac.....	516
17—8	單接頭電晶體 (UJT).....	518
17—9	UJT 電路.....	522

第十八章 光電裝置

18—1	光射二極體.....	531
18—2	光射二極體的排列.....	533
18—3	雷射二極體.....	534
18—4	光電阻.....	539
18—5	光二極體.....	540
18—6	光電晶體.....	542
18—7	光偵測器的排列.....	545
18—8	光隔離器.....	546
	參考書目.....	553
	問題答案.....	555
	希臘符號.....	569
	索引.....	572

第一章 半導體物理

本書全篇主旨在於討論各種電路中電晶體(*transistor*)的應用情形，然而最要緊的是在開始討論之前，我們必須考慮一些原子理論(*atomic theory*)的基本觀念，在本章中我們討論半導體(*semiconductor*)，自由電子(*free electron*)，電洞(*hole*)，與摻雜(*doping*)，這些資料將使我們很容易瞭解電晶體如何實際工作。我們將發展出若干簡單的近似解法，以對這些電路給與快速而簡易的分析。

1-1 鍺(*germanium*)及矽(*silicon*)原子

本節我們研究鍺(*Ge*)與矽(*Si*)之原子結構，因為這些物質在製造電晶體時將廣泛使用。

我們大都知道所有物質均由原子所構成，而原子包括原子核(*nucleus*)及環繞其周圍旋轉之電子。假如我們檢視一隔離之鍺原子，就會發現原子核中含有32個質子(*protons*)，此原子在正常狀態時，有32個電子環繞着原子核旋轉，並且這些旋轉之電子，其分配有固定之圖形與位置，通常稱為殼層(*shells*)。

圖1-1(a)用符號說明一鍺原子，中心為原子核，有32個質子，旋轉之電子分配於不同之殼層，依下列之型式：

$$2, 8, 18, \dots, 2n^2$$

n 為殼層數，換言之，第一殼層有電子2個，第二殼層有8個，第三殼層有18個，最後4個電子在第四殼層，或稱外部(*outer*)殼層。由類似之途徑，我們可發現一單獨之矽原子，其原子核中有14

2 電晶體電路

個質子，當此原子在正常狀態，有14個旋轉之電子，如圖1-1(b)所示，第一殼層包含2個電子，第二殼層包含8個電子，4個剩餘電子在矽原子之第三或外部殼層。

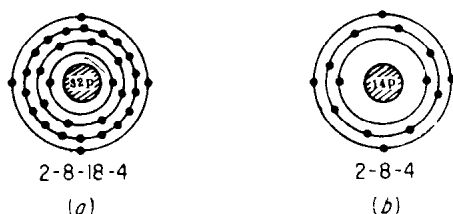


圖 1-1 (a)鎢 (b)矽

我們主要興趣在於鎢與矽原子之外部殼層，所以我們簡化這些原子之圖形。圖1-2(a)僅顯示鎢原子之外部殼層，而此圖之內部稱為鎢核 (*germanium core*)，包括原子核與內部殼層。同理，矽原子可如圖1-2(b)，顯示矽核由外部殼層之四個電子環繞着。

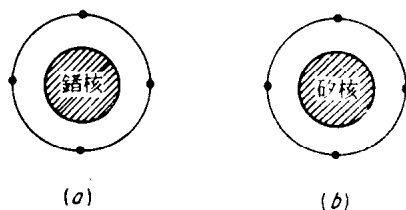


圖 1-2 (a)鎢與(b)矽之外部殼層

1-2 鎢與矽晶體(crystal)

上節我們討論單獨之鎢與矽原子，現在討論多個鎢及矽原子如何組合形成一固態之鎢與矽。

讓我們首先考慮鎢，一單獨之鎢原子外部殼層包含四個電子，此殼層不完整 (*incomplete*)，有八個電子才穩定。由實驗之事實得知，鎢原子彼此間之組合，每一原子外部殼層都要有八個電子。

爲完成此現象，原子之排列使其結構成爲晶體 (*crystal*)。當我們檢視純鎢之晶體時，會發現每一原子周圍有四個毗連原子 (*neighboring atoms*)，實際上與中心原子共同均分電子。

圖 1-3 使此觀念更爲清楚，中心原子外部殼層共有八個電子，其中四個電子屬於中心原子，另外四個電子由毗連的其他四個原子所供給，因爲每一個毗連原子，實際上與中心原子共用一個外部殼層電子，而每一毗連原子也有四個鄰居，所以晶體內之每一原子其外部殼層有八個電子。

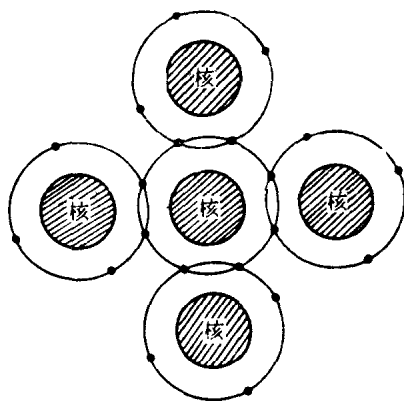


圖 1-3 晶體內之原子

據此類推，許多數量之矽原子結合形成晶體，每一原子有四個鄰居，共用電子，故每一矽原子外部殼層共有八個電子。

我們將接受實驗之事實，鎢及矽原子之外部殼層電子數，一直到含有八個電子爲止，否則均屬不完整。當少於八個電子時就有原子吸力存在，直至足夠之電子被加入到外部殼層完成八個電子。一旦外部殼層含有八個電子，這些電子被原子緊密束縛住，除非施加外力，不能夠脫逃。

1-3 純鎢與矽之導電

4 電晶體電路

晶體之銻或矽傳導電流情形如何？如欲回答此問題，考慮圖 1-4 (a)，顯示純銻之晶體連接於電池兩端，當溫度為絕對零度時我們發現電路中無電流，理由是晶體內無自由電子，所以電子被晶體中原子緊密束縛住：個別原子之內部殼層電子被隱匿得很好，對於電流通沒有貢獻；而外部殼層電子亦被原子緊密束縛而不能流通，故在絕對零度時銻晶體為絕緣體。

當溫度上升，熱能 (*thermal energy*) 加入銻晶體，此能量可實際移出一些外部殼層電子，使之可利用成為電流。被擊出外部殼層之電子稱做自由電子，在圖 1-4 (b) 中，自由電子用負號表示。這些電子可自由移動，受電池影響它們移向左邊，建立電流，此一電流通常很小，因為只有少數自由電子由熱能產生。

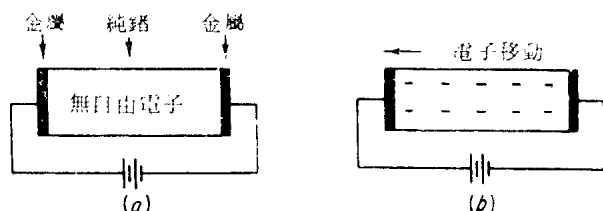


圖 1-4 (a)絕對零度與(b)高溫時之導電

當然，如溫度增加更高，更多之電子從外部殼層釋放出來，結果產生更大電流。在室溫 (25°C 左右) 時，我們發現如考慮銻為導體則電流量太小，如仍繼續稱為絕緣體，電流又太大。因此，我們稱銻晶體為半導體。

至於矽晶體之電流行為與銻晶體相同，在絕對零度所有電子被其原子緊密束縛，矽晶體如同絕緣體。當溫度上升，一些電子被擊出外部殼層，成為可利用之電流。不過矽之外部殼層電子較銻束縛得緊，結果矽原子較銻原子需要較多之熱能才能移出外部殼層電子。因此，我們注意矽與銻間之一項重要差異：在相同溫度時，矽晶體之自由電子較銻晶體為少。

1-4 電洞觀念

在討論半導體時，有一重要之電洞 (*hole*) 觀念，爲使此概念更爲清晰，可注意圖 1-5。一典型之銻原子 (或矽) 與四個毗連原子，如前所示，熱能可使電子從原子外部殼層移出，當此一現象發生時，釋放之電子成爲自由電子，可移動至晶體結構之其它部份，此離開之電子在外部殼層產生一空位，稱爲電洞。電洞行爲與正值電荷相似，會吸引與捕捉附近之電子。

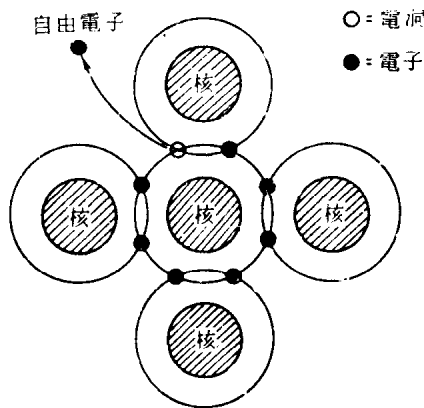


圖 1-5 產生電洞

在純銻或矽之晶體中，熱能產生相同數量之自由電子與電洞，自由電子在整個晶體結構內隨意漂流，偶然地，一自由電子與電洞接近至某一程度時即被電洞所吸引與捕捉，當此一情形發生時，電洞消失，自由電子成爲束縛電子 (*bound electron*)，此自由電子移向電洞之行爲稱之再結合 (*recombination*)。

在任何一瞬間，晶體內有下列事件發生：

- 1 藉熱能而產生自由電子與電洞。
- 2 自由電子與電洞之再結合。

6 電晶體電路

3 一些自由電子與電洞存在於二階段之間；此即，它們先前產生但並沒有再結合。這些自由電子與電洞，在再結合之前所存在的平均時間 (*average time*) 稱為生命期 (*life time*)。

實際上在半導體中可能有兩部份電流；其一為自由電子之移動，另一為電洞之移動。自由電子之移動在 1-3 節已簡短的討論過，並由圖 1-4 予以說明。

電洞同樣移動。為瞭解其如何發生，可注意圖 1-6，在最右邊顯示一單一之電洞，電洞之緊鄰位置 *A* 處為一束縛電子，此束縛電子受電洞吸引，移向電洞。當此現象發生時，原有電洞消失，在 *A* 處產生一新電洞。在 *A* 處之新電洞現在可吸引並捕捉在 *B* 處之束縛電子，因而形成，*A* 處之電洞消失，而 *B* 處出現一新電洞。此程序可繼續進行，束縛電子如箭頭所示隨意移動。因此，電洞由一原子移至另一原子處。注意：電洞移動方向與束縛電子相反。

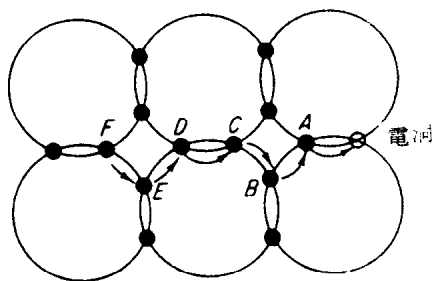


圖 1-6 電洞移動

無電場時，電洞隨意移動，即電洞可在所有方向移動，因此在任何方向，無淨電流。假如電場存在於晶體內，在電場方向產生淨電流，例如圖 1-7 電池連接在純半導體兩端，熱所產生之電洞與自由電子各以正負號表示。因為電池極性關係，自由電子移向左邊，電洞移向右邊。當然有一些電洞與自由電子再結合，但是自由電子與電洞繼續由熱能產生，所以在任何時間內，均有一些自由電子與電洞能夠參加電流活動。

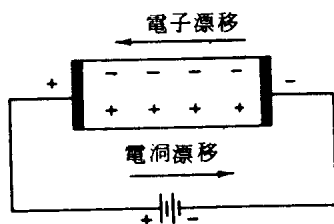


圖 1-7 電流部份

注意圖 1-7 之兩部份電流，自由電子向左邊漂移為此電流之一部份。當電子到達半導體左端，它們被金屬板吸收，進入電池正端。同時，電池負端向半導體右端注入自由電子，而維持一連續之自由電子活動。電洞向右邊移動為此電流之第二部份。當電洞到達半導體右端，電池中之電子與這些電洞結合，成為束縛電子。同時，在晶體內部由熱能產生新電洞，因此可維持連續電洞活動。

嚴格說來，電洞並非正電荷，而係原子外部殼層產生的空位。但因許多實驗，如霍爾效應 (*Hall effect*)，指出電洞移動，且其行為如同正電荷。因為這種理由，我們用正號代表電洞，並想像它為正電荷。

1-5 外質(extrinsic)半導體

在純質半導體內，由熱能所產生之自由電子與電洞數量太少，無任何實用價值。但可由摻雜程序增加自由電子與電洞數量。此即意味我們可在鍺與矽晶體中加入雜質原子 (*impurity atom*)。半導體被摻雜稱為外質半導體；半導體仍為純質，或未被摻雜，稱為本質半導體 (*intrinsic semiconductor*)。

一種摻雜純鍺 (或矽) 之方法，首在熔解以破壞晶體之結構，而後摻入少量之外部殼層為五個電子的元素 (為磷—*phosphorus*，砷—*arsenic* 和銻—*antimony* 等，此處稱之謂雜質元素)。假設