

最新世界名著

(大學參考書)

微波半導體裝置 及其電路應用

瓦特森原著

陳龍美 郭雙發譯



國家科學委員會補助

國立編譯館出版

復興書局印行

最新世界名著

微波半導體裝置及其電路應用

瓦特森 (H. A. Watson) 原著

貝耳電話實驗室 (Bell Telephone Laboratories)

陳龍英 郭雙發 譯

譯權所有人 國立編譯館

補助機關 國家科學委員會

印行者 復興書局

序 言

微波半導體裝置及其電路能達成許多有用之功能。微波訊號可由此產生放大、檢定、交換、調變及限制，並能將紋波除去。訊號之諧波可得而產生，使某頻率之功率能轉換至其倍頻之功率。此外，微波二極體能將兩微波訊號混頻，而產生其和或差之頻率，因而可將攜有訊息之訊號的頻率變高或變低。功能互異時，裝置及電路之設計亦不相同。

本書之目的為敘述在微波半導體電路中，加以有效運用所需之裝置與電路原理，並說明限制了裝置及電路工作之物理與技藝上的困難。

第一章比較半導體的電學性質、物理結構及電路功能，並對微波半導體裝置作一概述，而指出各型之優點。第二至六章複習半導體晶體、半導體之電學傳導、及正負接面理論等物理，這些內容可作爲了解其後各章討論裝置應用之基礎。第七至十六章敘述二極體原理及限制，微波二極體電路及其功能。第十七及十八章敘述微波電晶體原理及微波電晶體放大器。最後，於十九章中總結各種裝置的能力及其電路，並討論最近將來之發展方向。

此書乃針對與微波固態電路或微波半導體裝置發展有關之人士而寫。著者已盡力將所述之題材依最邏輯且最有益的次序加以組織，但由於涉及範圍太廣，故只能選取其中一部份分別於各章中敘述，各有關題材的已出版參考書目則於註釋中或各章之末表明。

著者承貝耳電話實驗所的同事對原稿熱心指教，至爲感綑，同時亦感謝數次打聽原稿的各位祕書。

所有的著者在書寫原稿時尚爲貝耳電話實驗所之技術研究員。現

2 微波半導體裝置及其電路應用

在上原氏 (M. Uenohara) 在日本川崎電氣株式會社之中央研究實驗所。

瓦特森 (H. A. Watson)

主要符號索引

A	面積
Å	單位埃
B	頻帶寬度
b	歸一化之電納
C	電容
c	光速
D	電通量密度；擴散常數
E	電場強度
-e	電子之電荷
F	雜訊度；力
f	頻率； f_c = 截止頻率； f_{max} = 擴盪之最大頻率
G	電導；功率增益
g	歸一化電導；接面處雜質密度之梯度； g_1 = 電壓增益
h	蒲朗克常數； $\hbar = h/2\pi$
I	電流； $I_{m,n} = i$ 之傅立葉係數
i	$\text{Re}Ie^{j\omega t}$ = 電流瞬間值，其中 I 為相位量表示電流之大小，相位及因次（第八章使用 $i = 2\text{Re}Ie^{j\omega t}$ ）
J	電流密度
j	$\sqrt{-1}$
K	電晶體增益——頻帶寬度優值
k	波茲曼常數；波數
L	電感； L_o = 二極體混頻器之轉換損耗

Handwritten note: $\mu = 15 \times 10^3$

2 微波半導體裝置及其電路應用

- l 長度
- M 崩潰倍增因數； M_m = 雜訊度量
- MAG 最大可得功率增益
- N 電子能態密度； N_a = 受體原子密度； N_d = 施體原子密度
- n 導帶內電子密度；二極體電壓電流關係中之係數：
 $I = I_s (\epsilon^{qv / I^* k T} - 1)$
- P 電功率；晶體動量
- P 動量；價帶內電洞密度
- Q 電荷；諧振電路或諧振腔之品質度量； Q_0 = 平均儲藏電荷；
 Q_B = 崩潰時儲藏電荷； $\hat{Q}$ = 動態品質因數； $Q_{m,n} = q$ 之傅立葉係數
- q 電荷瞬間值； q_ϕ = 二極體順向偏壓時在能障處之儲藏電荷
- R 電阻
- r 半徑；歸一化電阻； r_b' = 阻性基極電阻
- S 倒電容； $S_0, S_1, S_2, \dots$ 為變抗二極體其依時而變之倒電容之傅氏展項係數
- T 溫度，°K
- t 時間
- U 電晶體單向功率增益
- u 速度
- V 電壓；位能； V_0 = 直流偏壓電壓； V_B = 崩潰電壓； $V_{m,n} = v$ 之傅氏係數。
- v $\text{Re} V e^{j\omega t}$ = 電壓瞬間值，其中 V 為相位量，表示電壓之大小、相位及因次（第八章使用 $2\text{Re} V e^{j\omega t}$ ）
- W 粒子之能量、功、總能量；厚度； W_r = 費米能階之能量；
 W_g = 禁制能隙寬度； W_0 = 導帶底處能量； W_v = 價帶頂處之

	能量
w	空乏層厚度 w ； w_b ＝基極厚度； w_c ＝集極空乏層厚度
X	電抗
x	歸一化電抗；直線距離
Y	導納
y	歸一化導納
Z	阻抗； Z_0 ＝特性阻抗
z	歸一化阻抗
α	衰減常數；電子之電離係數； $\alpha=h_{fb}$ ＝小訊號共基電流增益； α_0 ＝直流共基電流增益
β	e/kT ；電洞之電離係數；小訊號共射電流增益； β_0 ＝直流共射電流增益
γ	射極效率；載體移轉係數；變抗體電容對電壓指數： $C/C_{min} = [(\phi - V_B)/(\phi - V)]^\gamma$
Γ	C_1/C_0 ，其中 C_1 及 C_0 為變抗二極體隨時間而變之電容的傅氏展開係數
ϵ	介電質之導電係數； ϵ_r ＝相對介電常數； ϵ_0 ＝自由空間之導電係數
e	自然對數之底
η	效率
θ	熱電阻
λ	波長
μ	移動度；微米之符號；介質之導磁係數； μ_r ＝相對導磁係數； μ_0 ＝自由空間之導磁係數
ν	電磁輻射之頻率
ρ	電阻係數；電荷密度

4 微波半導體裝置及其電路應用

σ	電導係數
τ	載體活期；時間常數； τ_1 =鬆弛時間
ϕ	障壁電位或擴散電位
Ψ	時變波函數
ψ	定態波函數；靜電電位
ω	$2\pi f$ =角頻率
φ	w_f/e =費米能階之對應靜電電位

目 次

序言

主要符號索引

第一編 導 論

第一章	微波半導體裝置之原理及功能	1
1.1	裝置作用	1
1.2	裝置結構	6
1.3	促成新微波二極體的電晶體技術	12

第二編 半導體物理

第二章	薛洛丁格波方程式與原子之電子結構	15
2.1	薛洛丁格波方程式	16
2.2	自由粒子	20
2.3	定態	25
2.4	原子之電子結構與週期表	32
第三章	半導體晶體	38
3.1	共價鍵與半導體晶體結構	38
3.2	格子振動	45
3.3	矽晶體	51
3.4	半導體晶體內之缺陷	56
第四章	半導體的電學傳導	61
4.1	粒子運動於具週期性位能之一維空間	62

2	微波半導體裝置及其電路應用	
4.2	三維晶體之電子能量	72
4.3	電子及電洞；施子及受子	77
4.4	移動度及電阻係數	86
4.5	非平衡載子密度	90
第五章	p-n 接面理論	94
5.1	p-n 接面的能帶圖	96
5.2	空間電荷區電位及電場的分佈	100
5.3	p-n 接面的電壓電流特性	105
5.4	空間電荷層電容	108
5.5	擴散電容及電荷儲存	110
5.6	擊離崩潰	115
第六章	半導體表面與歐姆接觸	127
6.1	空間電荷區之理論	128
6.2	表面能態	136
6.3	表面之測量	138
6.4	矽——二氧化矽表面的一些性質	140
6.5	表面對裝置的效應	144
6.6	歐姆接觸	147

第三編 微波二極體及電路

第七章	變容二極體	149
7.1	變容體晶片電學參數的定義	149
7.2	優值	152
7.3	變容二極體之定性	156
7.4	變容體晶片的電學參數	163
7.5	變容體特性的詳細計算	175

7.6	電荷儲存電容和突返二極體	191
7.7	釐米波變容二極體	194
第八章	變容體應用	199
8.1	門萊——羅拂功率關係式	199
8.2	參數放大器	205
8.3	參數放大器之設計考慮	227
8.4	諧波產生器	238
8.5	揚升轉換器	272
第九章	p-i-n 二極體	287
9.1	典型二極體的說明	288
9.2	i-層	290
9.3	等值網絡	292
9.4	逆向偏壓的作用	295
9.5	順向偏壓的作用	296
9.6	由一種偏壓狀態換至另一種偏壓狀態	298
9.7	二極體阻抗的計算	299
9.8	應用 p-i-n 二極體的功率限制	308
9.9	二極體的材料和設計對特性的效應	313
9.10	一個特別的 p-i-n 二極體	315
第十章	微波交換器，限制器與移相器	319
10.1	微波二極體交換器	320
10.2	交換器設計原理	327
10.3	固態微波限制器	336
10.4	可變衰減器	344
10.5	微波移相器	346
第十一章	肖特基障裝置	362

4 微波半導體裝置及其電路應用

11.1 肖特基障之物理	363
11.2 肖特基障變阻體的設計和性能	376
11.3 肖特基障變容體的設計和性能	386
11.4 金氧半變阻體	394
第十二章 檢波器及混頻器二極體及電路	396
12.1 檢波器和混頻器二極體的特性	397
12.2 二極體封裝	401
12.3 檢波器	402
12.4 混頻器原理	408
12.5 接收機雜訊度	414
12.6 混頻器實例	417
第十三章 透納二極體	425
13.1 透納二極體電流——電壓特性	426
13.2 等效電路和特性確定	437
13.3 透納二極體構造	443
13.4 材料和裝置之關係	450
第十四章 透納二極體電路	455
14.1 透納二極體的穩定度考慮	456
14.2 透納二極體放大器的增益及帶寬	474
14.3 透納二極體的雜訊性能	477
14.4 大訊號效應	479
14.5 兩種透納二極體放大器之描述	481
14.6 透納二極體振盪器	485
14.7 透納二極體變頻器	493
14.8 反向二極體檢波器與混頻器	496
第十五章 離崩波時微波二極體	500

15.1 小訊號操作	501
15.2 大訊號操作	521
15.3 雜訊	530
15.4 展望	536
第十六章 本體砷化鎵裝置	538
16.1 n-型砷化鎵的本體性質	539
16.2 小訊號線性理論	547
16.3 非線性大訊號理論	555
16.4 樣品製造	568
16.5 放大器	571
16.6 振盪器	574

第四編 微波電晶體和電路

第十七章 微波電晶體	583
17.1 一種特殊的微波電晶體	584
17.2 半導體晶片設計	589
17.3 最佳化裝置晶片的能力	604
17.4 技術上的考慮	608
17.5 包裝設計	616
17.6 性能和特性確定	618
第十八章 一個4秊赫的電晶體放大器	634
18.1 設計原理	634
18.2 設計細節和製作技術	636

第五編 目前的趨勢

第十九章 微波半導體裝置目前的趨勢	642
--------------------------	------------

6	微波半導體裝置及其電路應用	
19.1	性能	642
19.2	壽命和可靠度	651
附錄 A	一些半導體、鑽石、和銅的物理性質	654
附錄 B	載子速度的分佈和愛因斯坦關係式	655
附錄 C	物理常數表	658
索引		659

第一編 導 論

第一章 微波半導體裝置之原理及功能

賴德 (R. M. Ryder)

自本世紀五十年代中期起，由於電晶體技術、材料及知識應用於生產新型微波半導體裝置，使得其數量與種類大為增加。本章內容屬於介紹性質，指出各種裝置的基本原理及所導致的功能性質與用途。微波二極體是依兩種重複的分類法作一概觀：

1. 依裝置作用的型式而分：二極體可有非線性電阻(變阻體)、非線性電抗(變抗體)、可控阻抗(電漿或 p-i-n 二極體)、負電阻及其他有用之特性。

2. 依結構而分：點接觸、p-n 接面、肖特基 (Schottky) 障、金屬——絕緣體半導體或金屬——氧化物半導體(金絕半 (MIS) 或金氧半 (MOS) 二極體)、透納 (tunnel) 二極體、反向二極體、p-i-n 或電漿二極體、突返 (step-recovery) 二極體、擊離渡時 (impatt) 二極體及甘恩效應 (Gunn-effect) 負電導二極體均屬此類之重要者。

在不同的電路功能——如降變換、檢波、升變換、調變、交換、功率產生及放大中，各二極體依其效用互相競爭。本章內將作簡短的比較，以說明各型的特性與優點。

近年來由於電極大小的控制愈為精密，電晶體已侵入微波頻率的領域，因此其大略性質的比較亦在此章提及。

1.1 裝置作用

變阻體

許多微波二極體由於其非線性電流電壓特性而有用途，其特性通常可近似表示為如下的指數函數：

$$I = I_s (e^{qV/nkT} - 1) \quad (1.1)$$

因此，這些二極體稱為**變阻體** (varistors) (可變電阻)。這種非線性可利用作為移頻器。如果二極體做得很小，分佈電容甚小，即可在微波接收機的前端作為混波器。自本世紀三十年代之後期開始，由於這類點觸 (point-contact) 二極體有較好的信號雜音比，許多年來，在微波接收上已成為常用的元件。直到最近方有其他裝置的使用可在這一方面與之競爭，甚或更加有所改進。

主要利用變阻特性而運用的裝置包括大多數的點觸二極體、反向二極體及大多數的肖特基障二極體。

變阻體主要有用的功能包括頻率降變換、檢波、低雜音接收、高速截割或整流及感測。以往變阻體亦應用於頻率升變換、調變及諧波產生，但這些應用方面已經被許多較新的裝置 (變抗體及電漿二極體) 所超越。

變抗體

變抗體

電荷電壓特性的非線性，亦即電容的非線性是某些較新二極體的重要特點，因此稱之為**變抗體** (varactors) (可變電抗)。通常在逆向偏壓下的二極體其可變電容有如下的關係：

$$C = C_0 / (1 - V/\phi)^r \quad (1.2)$$

其中 V 為所加電壓 (因係逆向偏壓故為負值)， ϕ 為參數，近似於二極體兩端的接觸電位。參數 r 隨半導體物質的摻雜剖面而定，陡接面 r 值近於 $1/2$ ，斜接面則為 $1/3$ 。在此有一極重要的優點：即此類二極體可甚接近於理想的無損耗非線性元件。

由於變抗體之非線性 够快到可追隨微波且損耗亦較變阻體低甚多，故變抗體為下列四種應用中常用的元件。

諧波產生：由於頻率每增二倍損耗低於1到2分貝 (dB/octave)，所以這種諧波倍增益已能做到全固態的微波產生器，而其功率足約使微波接收機或小通信型發射機工作。

調變或升變換：變抗移頻器與變阻移頻器的絕大差異為可在移頻時獲得增益而非損耗。當再生效應小時，由粗略的初步近似法可得功率增益趨近於輸出頻率與輸入頻率之比，即 f_{out}/f_{in} 。因此今日的混波器已分為兩類。當頻率升移（升變換）時，仍宜使用變阻體作為混波元件；但當頻率降移（降變換）時，仍宜使用變抗體作為混波元件。

低雜音放大：變抗移頻器的再生效應常很大，可能產生複雜的負電阻效應，因而得到放大。此即所謂「參變」放大器所本者，實際上此即一再生調變器。這種放大器係利用當混波元件為低損耗變抗器及混波係在信號頻率 s 及低旁帶 $s-b$ 之間（ b 為「拍」——或稱「激升」振盪器的頻率）時所存在之再生效應。

若此非線性元件之損耗足够低，則雜音的放大即可甚低，因此，此種元件儘管複雜仍常用於低雜音微波接收機中。雖然此放大器可作為反射負電阻，因而輸入及輸出頻率俱為 s ，但低旁帶 $s-b$ 仍然存在，電路必在此頻率有一阻性損耗而造成所需的再生。低旁帶看起來一無是處，只能吸收功率，有時稱為閒者頻率 (idler frequency)，這是不公平的。實際上「閒者頻率」與造成放大的再生有極大的關聯存在。

注意，閒者頻率寫作 $s-b$ 係為強調此實際上為負數，因為 $s-b$ 為負值使得低旁帶與高旁帶大相迥異。電抗符號因而反號，抗性回授變為再生性而非退化性，且信號譜亦反向（詳盡的討論見第八章）。