

國立交通大學

電信工程研究所

碩士論文

縮小化功率放大器輸出級平面式巴倫濾波器

1896

Miniaturized planar balun filter for power amplifier  
output stage

研究生：林士峰

指導教授：張志揚 博士

中華民國 九十九 年 七 月

# 縮小化功率放大器輸出級平面式巴倫濾波器

## Miniaturized planar balun filter for power amplifier output stage

研 究 生 : 林士峰

Student :Shih-Feng Lin

指 導 教 授 : 張志揚 博 士

Advisor : Dr. Chi-Yang Chang



A Thesis

Submitted to Institute of Communication Engineering

College of Electrical and Computer Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Master of Science

in

Communication Engineering

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十九 年 七 月

# 縮小化功率放大器輸出級平面式巴倫濾波器

研究生：林士峰

指導教授：張志揚 博士

國立交通大學電信工程研究所



本論文為設計一個巴倫(balance to unbalance transformer)作為功率放大器的輸出級，對於要把一個功率放大器的平衡訊號轉換為單端訊號的輸出級裝置來說，傳統的方法均為使用一平面電感式變壓器形式之輸出級，其中中央抽頭式變壓器型式易有高磁場耦合，在單晶片系統上，不論是 VCO 與 PA 都會產生磁場耦合的雜訊效應，例如互調訊號(inter-modulation signal)、注入鎖定(injection lock)、注入牽引(injection pulling)等干擾。為了解決這樣的情況，於是我們朝著巴倫式的輸出級作研究，以公式分析並推演出不對稱耦合線(asymmetric coupled line)所該有的寬與間隔，並以折疊式佈局以期更小的面積，還有之後量測電路也是考量整體計畫，的一個重點。根據這個方法，也可以在各板材，各頻率上設計想要的縮小化 balun。

# Miniaturized planar balun filter for power amplifier output stage

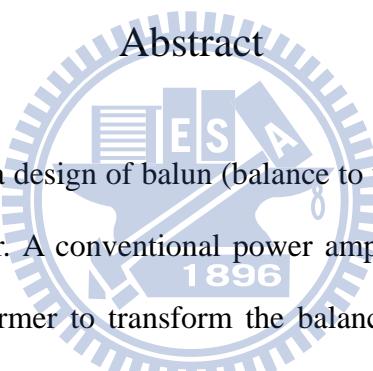
Student: Shih-Feng Lin

Advisor: Dr. Chi-Yang Chang

Institute of Communication Engineering

National Chiao Tung University

## Abstract



This thesis introduces a design of balun (balance to unbalance transformer) as an output of a power amplifier. A conventional power amplifier output network uses a center-tapped spiral transformer to transform the balanced signal to a single ended signal with specific impedance transformation ratio. The center-tapped spiral transformer always comes with a strong magnetic coupling with nearby spiral inductors. For the SOC (System On Chip), both VCO and power amplifier are interfered by noise from magnetic coupling, such as inter-modulation signal, injection lock, injection pulling. To solve this problem, a novel balun filter for power amplifier output network is proposed in this thesis. An analytical method is developed to calculate the width and gap of the asymmetric coupled-line with respect to balun filter specifications. A folded layout is applied to meet the smaller size. Measuring is also a critical issue in the project. The proposed balun filter can be applied to any substrate at any frequency.

# Acknowledgement

## 誌謝

時光荏苒，兩年的時光匆匆流縱，碩士生涯雖有崎嶇至此也算圓滿結束，對於我的指導教授張志揚博士，心中只有滿溢的感謝，老師對於研究的專業，總是能夠在我研究遭遇困難及瓶頸時給予我最精準最又最精闢的指導，處事踏實又懂得享受生活的人生哲學，老師給我們研究生做了一個最好的榜樣；孟慶宗博士則是我人生中另一個貴人，從專題開始接受孟教授的指導，著實受益良多，並且在我人生迷失方向、心急迷惘的時候，孟教授大方且有力的幫忙我、協助我，讓我能重新回到軌道，我能從交大電信研究所畢業，要特別感謝張教授和孟教授。同時也感謝孟教授能來作為口試委員，還有同是口試委員的邱煥凱教授和鍾世忠教授，各位口試委員都以精準的眼光和專業能力給了研究上的和論文上的建議，讓我的論文能夠更加的完備，很感謝他們。

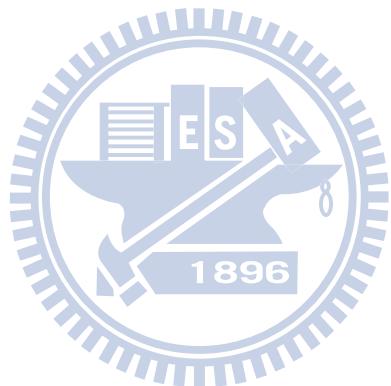
對於能成為 916 實驗室的一員我滿懷感謝，實驗室的學長姐、學弟妹和同學們都是我不論研究上還是生活上的好夥伴，博班學長益廷、昀緯、哲慶、建育、正憲；96 級學長姐耿宏、忠傑、如屏、殿靖；98 級學弟妹鵬達、懿萱、維欣、宛蓉；97 級同學揚達、聖智、姍潔、德裕。有了大家在，讓我的研究生活精彩非凡，特別感謝益廷和昀緯學長，以他們深厚的知識與經驗許多次的為我解惑。希望大家都還能時常相聚。還要謝謝 red bull 紅牛能量飲料，在我趕論文的夜晚都能給我很多精神上的支持。

最後也是最重要的，我最感謝我的家人，家中父母親總不吝惜長途電話費，讓我能聽到他們聲音，了解家鄉近況，一解思鄉之愁；哥哥士鈞給了我許多長遠的建議，並時常提醒我可能遇到的問題，且能像朋友一樣和我討論解決，他是我的榜樣；妹妹欣儒總是給我予我支持，並且在我回家時熱烈歡迎我。沒有家人的支持，就沒有現在的我，我很感謝。

# 目錄

摘要 .....	i
Abstract .....	ii
誌謝 .....	iii
目錄 .....	iv
圖目錄 .....	vi
表目錄 .....	viii
Chapter 1 簡介 .....	1
1.1 研究動機與簡介 .....	1
1.2 文獻探討 .....	2
Chapter 2 微帶線與耦合線 .....	10
2.1 微帶線平行耦合線的特性 .....	10
2.1.1 對稱耦合線的奇模電容與偶模電容 .....	12
2.1.2 奇模電容與偶模電容與阻抗之關係 .....	15
2.2 單線與耦合線的雜散電容 .....	16
2.2.1 單條傳輸線的雜散電容 .....	17
2.2.2 耦合傳輸線的雜散電容 .....	18
Chapter 3 平面式巴倫輸出級 .....	22
3.1 簡介 .....	22
3.2 巴倫濾波器設計理論 .....	23
3.2.1 主要電路架構 .....	23
3.2.2 等效電路推演 .....	25
3.3 電路模擬結果 .....	29

3.4 量測與佈局 .....	38
3.5 Rogers R04003 板材的實作 .....	40
Chapter 4 結論與未來工作 .....	46
4.1 結論 .....	46
4.2 未來工作 .....	46
參考文獻 .....	48



# 圖目錄

圖 1.1 (a) SiGe 功率級之輸出端變壓器匹配之等效電路。(b) SiGe 功率級之輸出端變壓器匹配之佈局。 . . . . .	3
圖 1.2 (a) 功率級使用自耦變壓器之輸出端等效電路。(b) 輸出端自耦變壓器之佈局，其中各對應點請參考(a)。 . . . . .	4
圖 1.3 [3] 中之 3-3.6GHz VCO，(a)等校電路，(b)佈局圖。 . . . . .	5
圖 1.4 [4] 中之 5-5.4GHz VCO，(a)等效電路，(b)佈局圖。 . . . . .	6
圖 1.5 (a)系統方塊圖，(b)晶片佈局圖，(c)利用磨薄基板以改善電路之間的耦合(耦合較強時輸出頻譜出現歪斜現象)。 . . . . .	8
圖 1.6 (a) 功率放大器與 VCO 之間的耦合現象將破壞 VCO 之頻譜 (b)功率放大器與 VCO 之間的電感磁耦現象的量測情境（將晶片切割以消除基板耦合，因此只剩下電磁耦合） (c) (b)圖中不同距離之下之量測結果。 . . . . .	9
圖 2.1 一段傳輸線耦合線的交互感應區電容示意圖。 . . . . .	11
圖 2.2 對稱耦合線的(a)偶模激發與 (b)奇模激發之電容。 . . . . .	13
圖 2.3 對稱耦合線的電容示意圖 (a)偶模 (b)奇模。 . . . . .	14
圖 2.4 單條微帶傳輸線的(a)電場示意圖(b)等效電容示意圖。 . . . . .	17
圖 2.5 (a)對稱傳輸線的交互作用區，(b)-(c)偶模激發的電場分布圖與電容示意圖(d)-(e)奇模激發的電場分布圖與電容示意圖。 . . . . .	18
圖 3.1 功率放大器輸出端 balun 的電路基本結構。 . . . . .	23
圖 3.2 二階阻抗轉換濾波器之電路示意圖。 . . . . .	24
圖 3.3 此為圖 3.2 電路之響應。 . . . . .	24
圖 3.4 二階阻抗轉換濾波器之實際等效電路。 . . . . .	25
圖 3.5 此為圖 3.4 之等效電路。 . . . . .	25

圖 3.6(a)耦合線之等效情況(b)單線之等效情況(c)故非對稱耦合線相當於 a、b 並聯。 .....	26
圖 3.7 有磁牆之對稱耦合線之等效電容分布。 .....	27
圖 3.8 等效電路 $\theta \neq 90$ 度時的情形。 .....	27
圖 3.9 計算諧振腔的斜率參數。 .....	28
圖 3.10 此 Balun 的響應(a)DC Bias open circuit(b)Amplitude 響應(c)相位響應。 .....	30
圖 3.11 此 Balun 的響應(a)DC Bias short circuit(b)amplitude 響應(c)相位響應。 .....	31
圖 3.12 (a)sonnet 所模擬之 coupled line balun 之電路示意圖(b)電磁模擬軟體輸出 SNP 檔由 ADS 匯入之電路(c)balun 之 amplitude 與相位響應。 .....	33
圖 3.13 (a) coupled line balun 使用標準 $0.18\mu\text{m}$ CMOS 製程 metal 6 金屬(b)balun 的 amplitude 與相位響應。 .....	34
圖 3.14 (a)HFSS 模擬 meander coupled line balun(b)響應圖。 ....	36
圖 3.15 (a)改良的 coupled line balun(b)amplitude 與相位響應。 ..	37
圖 3.16 預想之 Balun 佈局圖。 .....	38
圖 3.17 Balun 輸出級取代傳統變壓器式輸出級。 .....	39
圖 3.18 balun 量測磁場耦合量示意圖。 .....	40
圖 3.19 在 R04003 板材上之電路佈局。 .....	41
圖 3.20 以 R04003 所製作之巴倫濾波器。 .....	42
圖 3.21 巴倫濾波器的 EM 模擬響應。 .....	43
圖 3.22 實際製作電路量測之響應。 .....	44

# 表目錄

表 3.1 巴倫濾波器輸出級之設計規格。……………23



# Chapter 1

## 簡介

### 1.1 研究動機與簡介

近幾年來，CMOS 製程技術被極為有效的廣泛應用於無線通訊 IC 電路的設計，當然尺寸的考量與成本是其中一個優勢，但它的高度整合的特性才是最大的好處，能在相同的製程上整合各種數位與類比電路以實現『系統單晶片(SOC)』的目標，目前技術已達到單晶片整合基頻、射頻、記憶體、電源管理…等電路。但是在射頻/微波晶片之中，若想將功率放大器放入晶片中，則整合上會遇到許多困難，電路間的干擾會變得非常的嚴重，因為整個射頻接收機被整合在一起的緣故，尤其是功率放大器，它的電流很大產生的電磁、基板干擾也大，因此對其他電路如低雜訊放大器(LNA)、混頻器(MIXER)、尤其是壓控震盪器(VCO)等產生干擾，例如互調訊號(inter-modulation signal)、注入鎖定(injection lock)、注入牽引(injection pulling)等干擾。

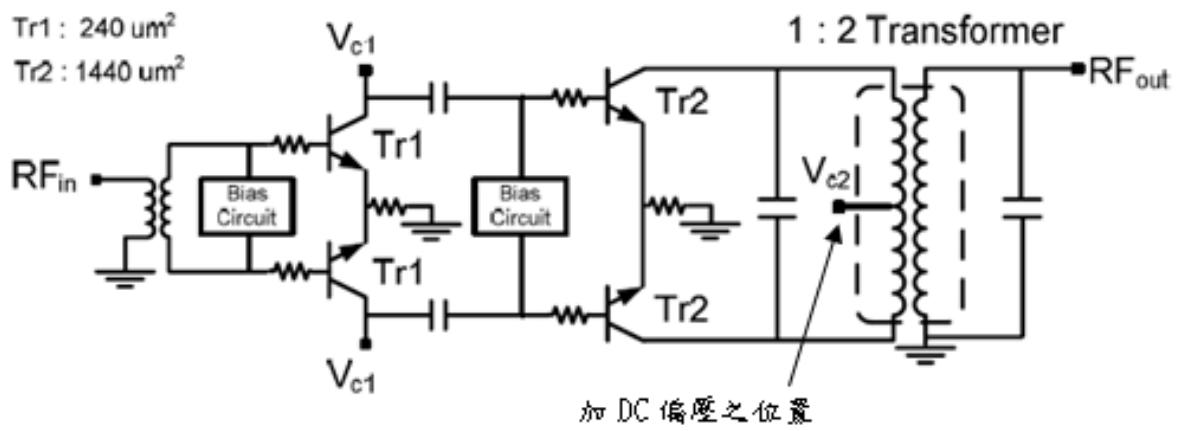
現今，因為傳統 CMOS 製程技術下之功率電晶體大都是操作在低電壓與高電流的狀況之下，因而其輸出阻抗很低。傳統常見的功率放大器輸出級都是把一個中央抽頭電感式的變壓器接到汲極(drain 極)上，適當的設計變壓器初、次級圈的圈數比與繞線法可以同時達到阻抗匹配、DC choke、與推挽到單端之轉換(即 balun 的功能)，可謂一舉數得之設計。但是因為變壓器是一個磁性耦合的元件，因此正常操作之下磁場非常強，在沒有高導磁係數材料作為磁通(magnetic flux)之通路時，磁場會對周圍的電感、或變壓器產生嚴重的互耦，磁場會遠遠的散佈出去。因此即便是使用一些

防治方法截斷基板雜訊的耦合，磁場耦合仍是沒有辦法降低。

有鑑於上面所述的理由，這個研究將著重在功率放大器輸出級平面式中央抽頭變壓器與周邊電感之磁場互耦現象的改善。在本論文研究中，我們將設計一種新的輸出 balun 電路，具有傳統平面式中央抽頭輸出變壓器的所有功能，即：阻抗匹配、DC choke、與推挽到單端之轉換等三項功能，並且能有效改善與周邊電感(尤其是壓控振盪器諧振腔之電感)之耦合。

## 1.2 文獻探討

首先先討論常見的功率放大器的輸出端，即為一中央抽頭變壓器。圖 1-1，為一傳統 CMOS 或 SiGe 功率放大器輸出端之匹配網路設計[1]，從圖中可以看出它是二個渦狀電感(spiral inductor)纏繞在一起的電路。圖 1-2，則為最近有人提出的使用自耦變壓器(autotransformer)方式形成的輸出端匹配網路[2]，同樣也是數個渦狀電感纏繞在一起而成。如果觀察圖 1-3[3]及 1-4[4]，這是一個傳統 CMOS 的壓控震盪器(VCO)，整個震盪器最醒目(最佔面積)的部份也是由數個渦狀電感(spiral inductor)纏繞在一起的電路，當將圖 1-1 或 1-2 與圖 1-3 或 1-4 兩種電路擠在同一晶片之上，無可避免的一定會產生極強的磁場互耦。於是例如互調訊號(inter-modulation signal)、注入鎖定(injection lock)、注入牽引(injection pulling)等干擾均會出現甚而導致 VCO 失效。



(a)



圖 1.1 (a) SiGe 功率級之輸出端變壓器匹配之等效電路。(b) SiGe 功率級之輸出端變壓器匹配之佈局。

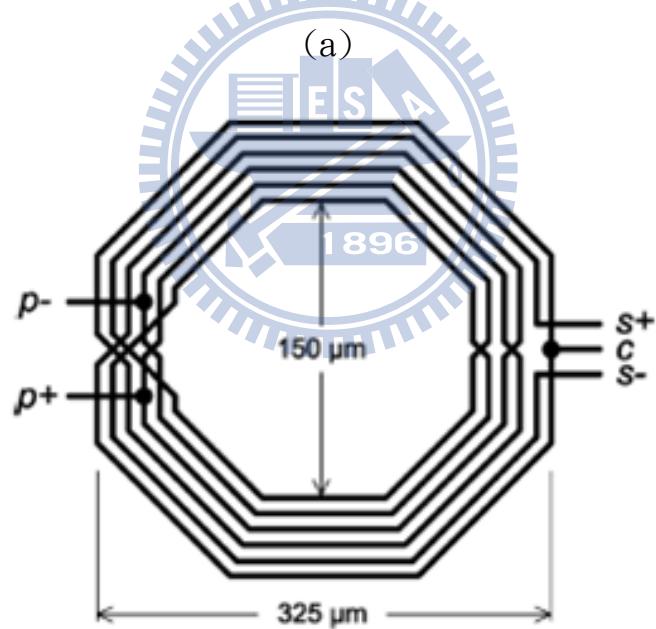
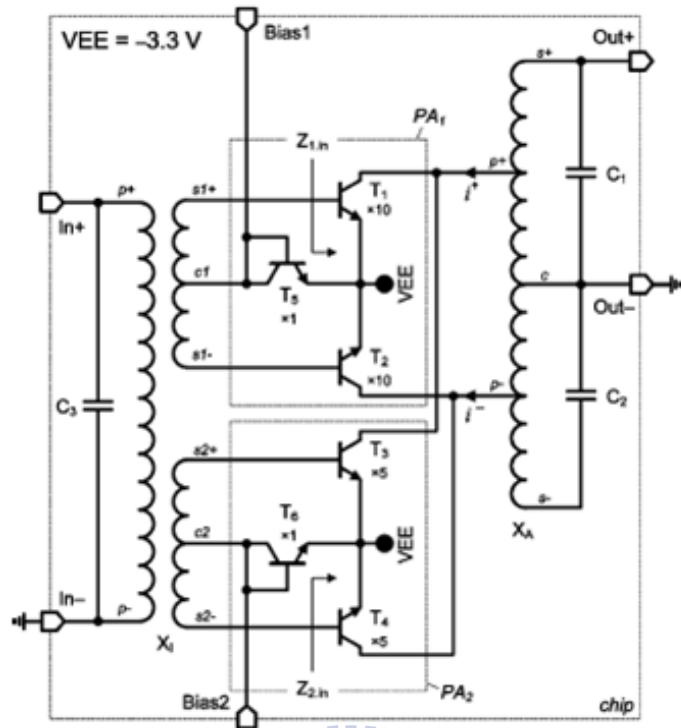
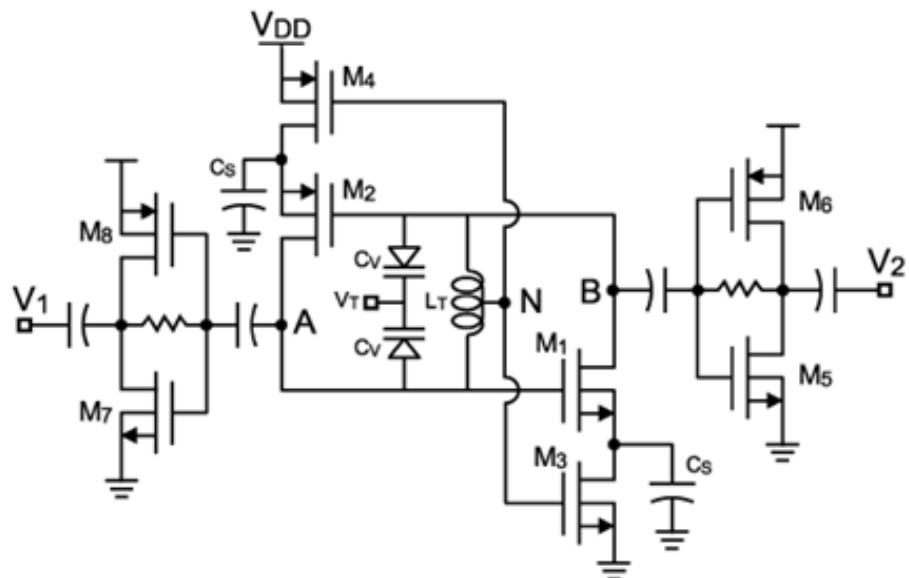


圖 1.2 (a) 功率級使用自耦變壓器之輸出端等效電路。(b) 輸出端  
自耦變壓器之佈局，其中各對應點請參考(a)。



(a)

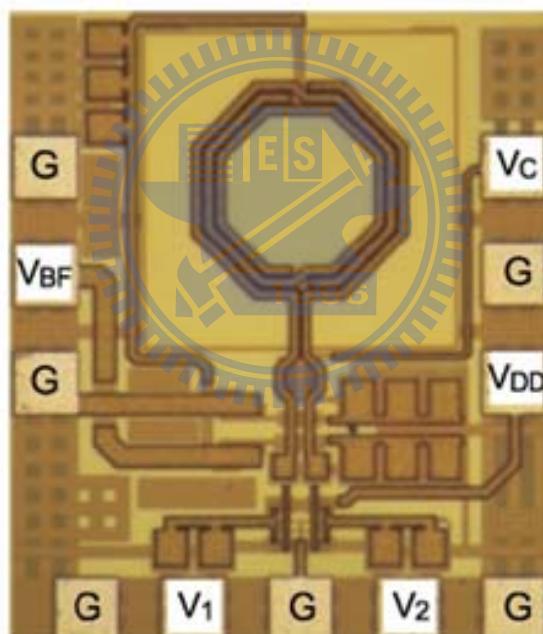
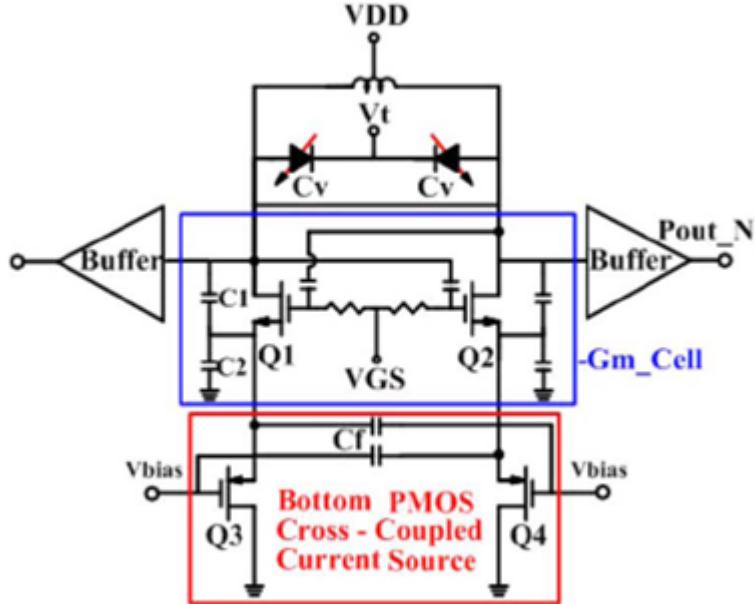
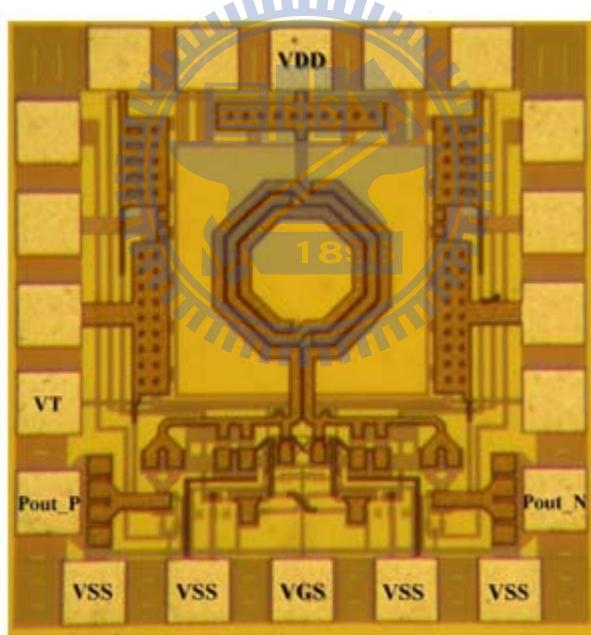


圖 1.3 [3] 中之 3-3.6GHz VCO，(a)等校電路，(b)佈局圖。



(a)



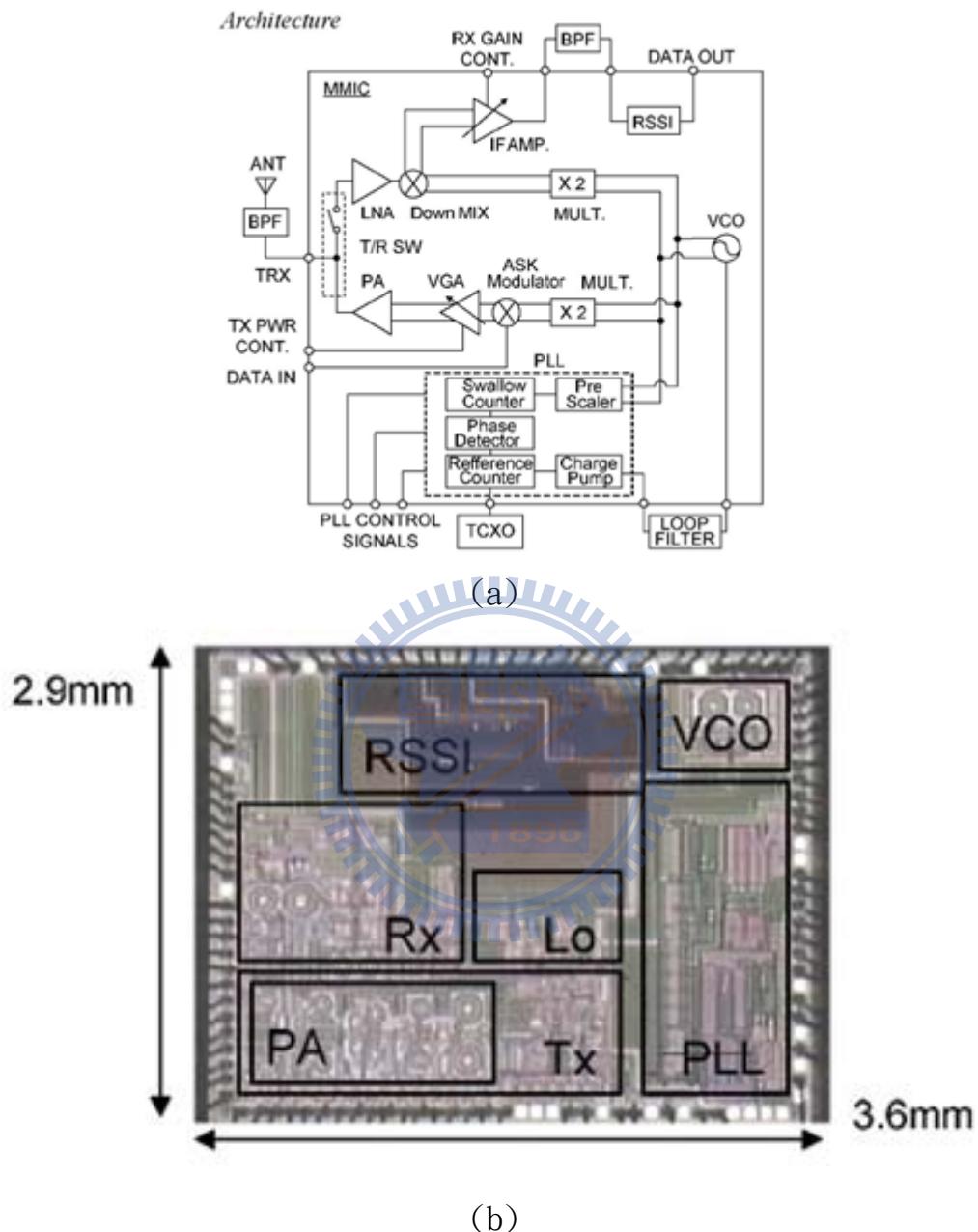
(b)

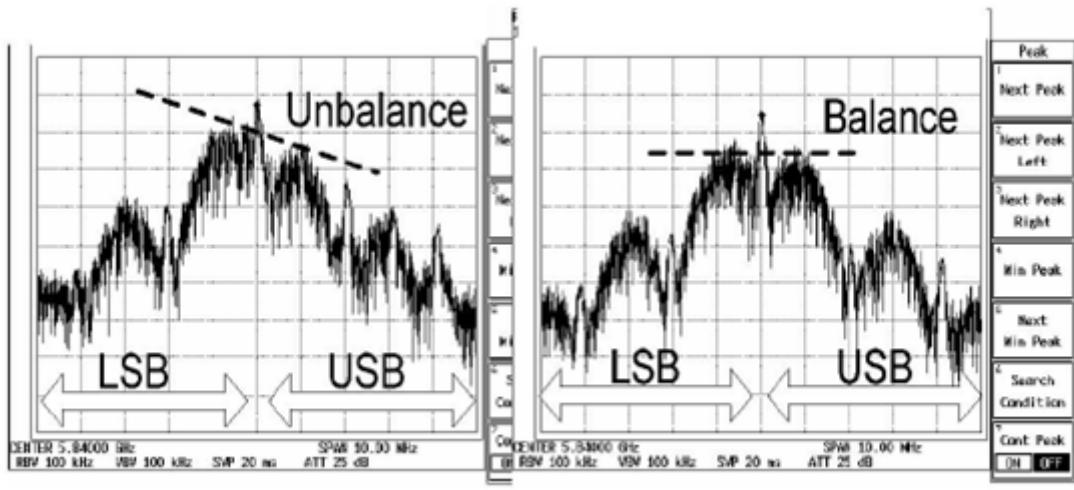
圖 1-4 [4] 中之 5-5.4GHz VCO，(a)等效電路，(b)佈局圖。

至於二種電路之間的相關影響，概述如下：

[5]中敘述了一個 5.8GHz SiGe 收發機系統，圖 1-5(a)、(b)顯示其系統架構圖與晶片佈局，既使在佈局上把功率放大器(測試功率為 13dBm，功

率並不算很大)與壓控震盪器放在晶片最遠的兩個角落，但其輸出頻譜仍出現歪斜現象如圖 1-5(c)所示。



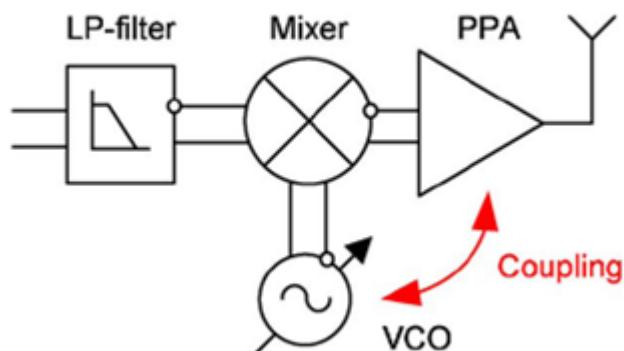


基板厚  $300 \mu\text{m}$       基板厚  $127 \mu\text{m}$

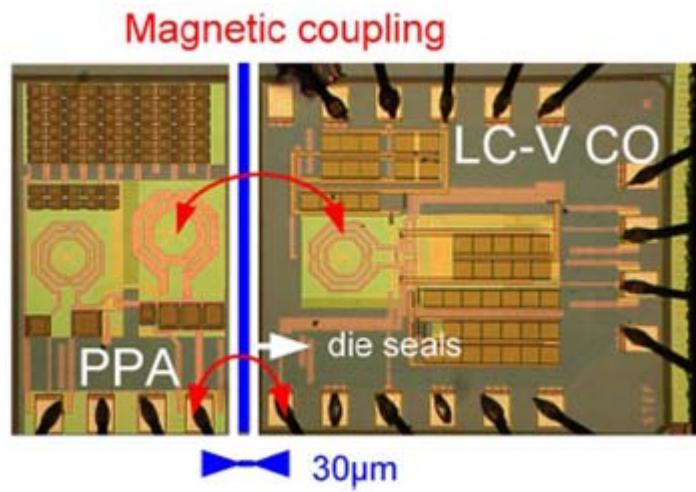
(c)

圖 1.5 (a)系統方塊圖，(b)晶片佈局圖，(c)利用磨薄基板以改善電路之間的耦合(耦合較強時輸出頻譜出現歪斜現象)。

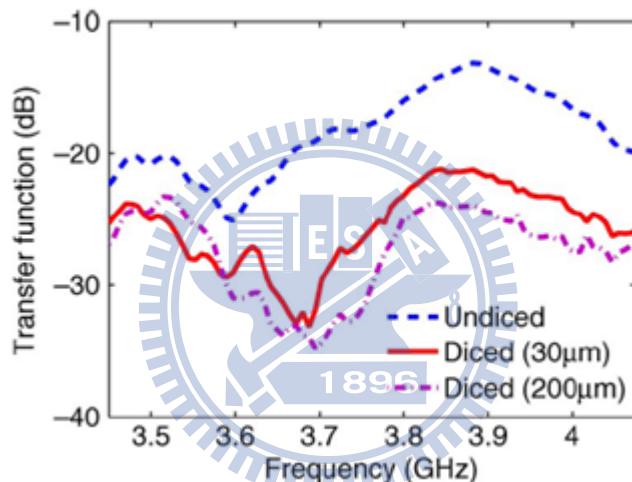
另外有一篇探討有關功率放大器與 VCO 之間電感相互耦合的論文[6]，基本上作者利用量測的方法，直接量測二組電感之間的耦合，為了觀察磁耦效應文中並將基板切開以防止基板耦合，再以量測的方式測量兩組線圈之間不同距離下的耦合，圖 2-6 顯示其量測結果。



(a)



(b)



(c)

- 圖 1.6 (a) 功率放大器與 VCO 之間的耦合現象將破壞 VCO 之頻譜  
 (b) 功率放大器與 VCO 之間的電感磁耦現象的量測情境（將晶片切割以消除基板耦合，因此只剩下電磁耦合）  
 (c) (b)圖中不同距離之下之量測結果。

# Chapter 2

## 微帶線與耦合線

在微波頻率中使用的傳輸線可簡單分為兩個分類：TEM 模（或準 TEM 模）傳輸線與非 TEM 模傳輸線，當訊號傳導在一個微帶結構，若電磁場是分佈在一個不均勻的金屬中，則傳輸模式為準 TEM 模。對於要測定一個對稱的 TEM 或準 TEM 模耦合傳輸線中的一些重要的特性（例如特性阻抗、相位速度）我們可以將範圍縮小，探討耦合線模組中跟基板還有激發模態的電容即可。而且 TEM 模（或準 TEM 模）之傳輸線的導體損耗可以由特性阻抗和一些幾何的參數決定，本章討論的是一段微帶線對稱平行耦合線。

### 2.1 微帶線平行耦合線的特性

傳輸線之間的耦合可以用自身電容與相互電容來解釋，因此我們首先探討耦合傳輸線的等效電容。圖 2.1 為一段耦合傳輸線共用一段地的相關電容示意圖，若  $Q_1$  和  $Q_2$  為導體 1 和導體 2 電荷量， $V_1$  和  $V_2$  為導體 1 和導體 2 之電壓，其中  $Q_1$  跟  $Q_2$  可以用下列公式表示：

$$Q_1 = C_a V_1 + C_m (V_1 - V_2) = (C_a + C_m) V_1 - C_m V_2 \quad (2.1)$$

$$Q_2 = C_m (V_2 - V_1) + C_b V_2 = -C_m V_1 + (C_b + C_m) V_2 \quad (2.2)$$

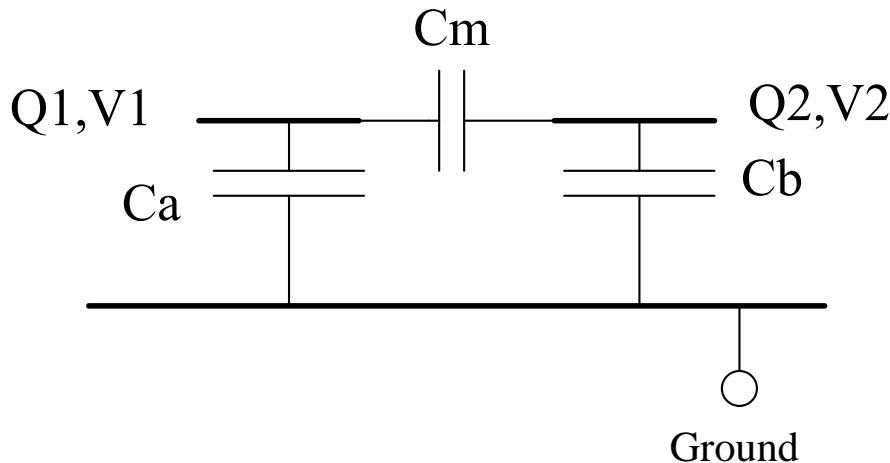


圖 2.1 一段傳輸線耦合線的交互感應區電容示意圖。

兩條傳輸線耦合線的電容矩陣表示為：

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$C_{11}$ 與 $C_{22}$ 是被定義為傳輸線 1 和傳輸線 2 的自身電容，電容矩陣也表示了兩條傳輸線之間電荷與電壓的關係：

$$Q_1 = C_{11}V_1 + C_{12}V_2 \quad (2.4)$$

$$Q_2 = C_{21}V_1 + C_{22}V_2 \quad (2.5)$$

因此耦合線的電容矩陣可以表示成：

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_a + C_m & -C_m \\ -C_m & C_b + C_m \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

耦合線的電感矩陣則給定為：

$$[L] = \mu_0 \epsilon_0 [C_0]^{-1} \quad (2.7)$$

其中  $[C_0]$  為在標準介電常數的介質中傳輸線的電容矩陣。

### 2.1.1 對稱耦合線的奇模電容與偶模電容

對於一段對稱的耦合線，他們之間的電容矩陣可以用偶模電容和奇模電容來表示，

#### 偶模激發

一段均勻的耦合傳輸線交互作用區就如圖 2.2(a)所示，在此情況下，圖 2.1 中的  $C_m$  被分開成兩個值為  $2C_m$  的電容串聯，當偶模激發時，兩條傳輸線是相等並同相的電位 ( $V_1 = V_2 = V_e$ )，由於幾何結構，可以很明顯的推測出有相同電位的兩條傳輸線也會有相同的電量，( $Q_1 = Q_2 = Q_e$ )，把  $C_e$  用  $Q_e/V_e$  表示，則(2.1)式和(2.2)式可簡化為：

$$C_a = C_b = \frac{Q_e}{V_e} = C_e \quad (2.8)$$

#### 奇模激發

在奇模激發中，兩條傳輸線有著相等但反相的電位 ( $V_1 = -V_2 = V_o$ )，就如圖 2.2(b)所示，如果結構是對稱的，那相等但反相的電位在兩條傳輸線上就會產生相等但反相的電量 ( $Q_1 = -Q_2 = Q_o$ )，若將  $C_o$  表示成  $Q_o/V_o$ ，

則(2.1)式和(2.2)式可簡化為：

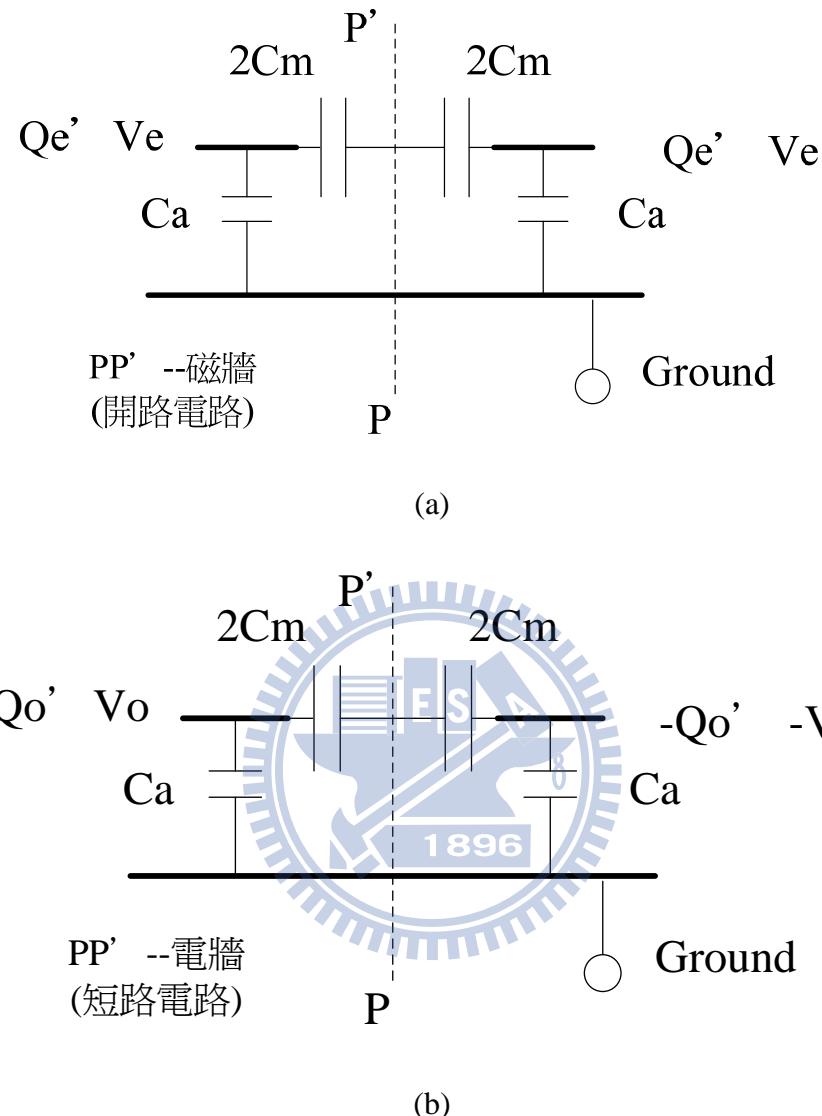


圖 2.2 對稱耦合線的(a)偶模激發 與 (b)奇模激發之電容。

$$Q_o = (C_a + 2C_m)V_o \quad (2.9)$$

將(3.8)式的 $C_a$ 代入(3.9)式中，我們可以發現

$$C_m = \frac{C_o - C_e}{2} \quad (2.10)$$

因此當我們知道了偶模電容和奇模電容，便可利用(3.8)式和(3.10)式求出 $C_a$ 、 $C_b$ 跟 $C_m$ ，電容矩陣也可以用(3.6)式求得。在偶模激發狀態中，中間的 $PP'$ 平面為一磁牆(開路電路)就如圖 2.3(a)所示，這樣子等效可以有效的簡化分析耦合線的問題。而在奇模中電容的等效就像是中間有一道電牆如圖 2.3(b)所示，這讓奇模電容的測定可以簡化為中間有電牆時的傳輸線電容的測定。

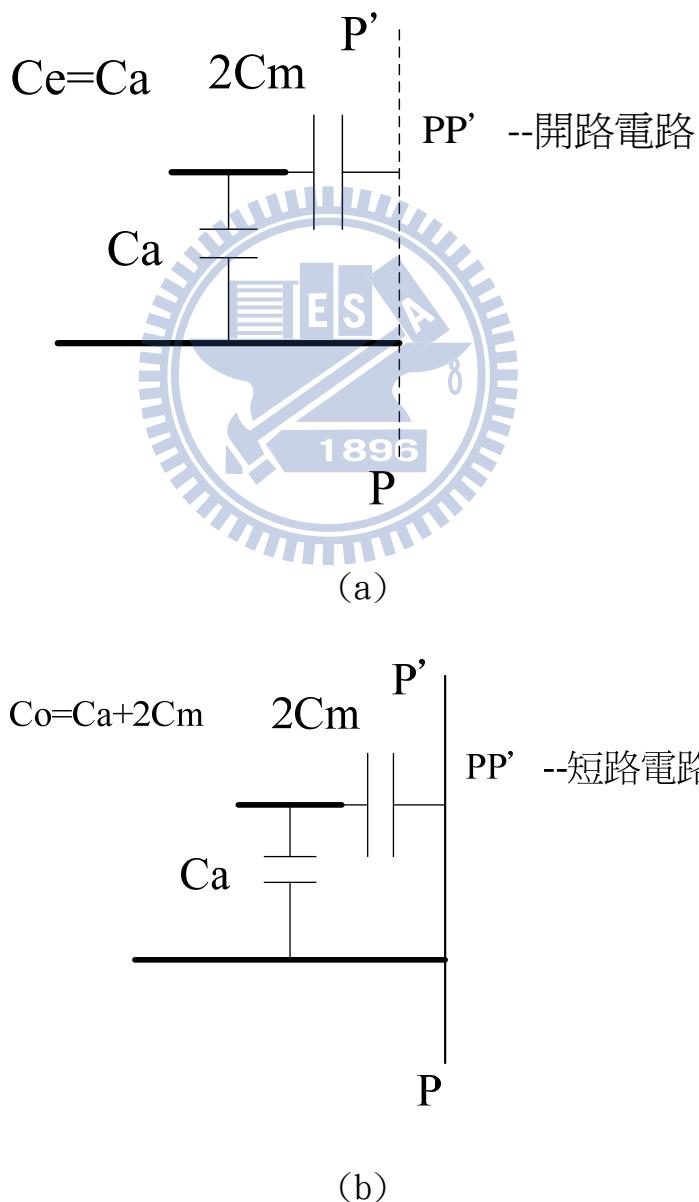


圖 2.3 對稱耦合線的電容示意圖 (a)偶模 (b)奇模。

## 2.1.2 奇模電容與偶模電容與阻抗之關係

奇模與偶模的電容與阻抗的關係則是：

$$Z_{0e} = \frac{1}{v_{pe}C_e} = \frac{\omega}{\beta_e C_e}$$

(2.11)

和

$$Z_{0o} = \frac{1}{v_{po}C_o} = \frac{\omega}{\beta_o o}$$

(2.12)

$Z_{0e}$ 和 $v_{pe}$ 分別為偶模的特性阻抗和相速，而 $Z_{0o}$ 和 $v_{po}$ 則為奇模的如果傳輸線是被放置在一段介電常數為 $\epsilon_r$ 的均勻介質中，那麼奇模與偶模的相速就會相等，並表示為：

$$v_{pe} = v_{po} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

(2.13)

然而，如果介質並不均勻的話，奇模與偶模的相速就會有差異出現，如果是在不均勻介質中，相速的表示為：

$$v_{pe} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{ree}}}$$

(2.14)

和

$$V_{po} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_{reo}}} \quad (2.15)$$

其中  $\epsilon_{ree}$  和  $\epsilon_{reo}$  為偶模與奇模的等效介電常數，可以用下列公式測定：

$$\epsilon_{ree} = \frac{C_0}{C_{0e}} \quad (2.16)$$

和

$$\epsilon_{reo} = \frac{C_0}{C_{0o}} \quad (2.17)$$

這代表了我們可以用  $C_{0e}$  和  $C_{0o}$  來代替相對介電常數，上述公式可以簡化為：

$$Z_{0e} = \frac{1}{c\sqrt{C_e C_{0e}}} \quad (2.18)$$

和

$$Z_{0o} = \frac{1}{c\sqrt{C_o C_{0o}}} \quad (2.19)$$

## 2.2 單線與耦合線的雜散電容

至此我們討論了耦合線一般情況的電容，但很多時候，我們必需設想更多有關組成結構電容的要素，這幫助我們了解並分析問題。例如平面傳輸線，總電容可以被拆成平行板和雜散電容。以下討論單條傳輸線和耦合傳輸線的情況。

### 2.2.1 單條傳輸線的雜散電容

單條微帶傳輸線的電場分布如圖 2.4(a)所示，由於微帶線有限的寬度，因此場的分布不僅僅是在帶狀導體之下，也會延伸到周圍的區域，這就是所謂的「邊緣場」。由帶狀導體之下直接產生的電容，我們所稱之為「平行板電容」，而由邊緣場所產生的電容則稱為「雜散電容」，所有電容的可以用圖 2.4(b)來表示，並且以公式表示成：

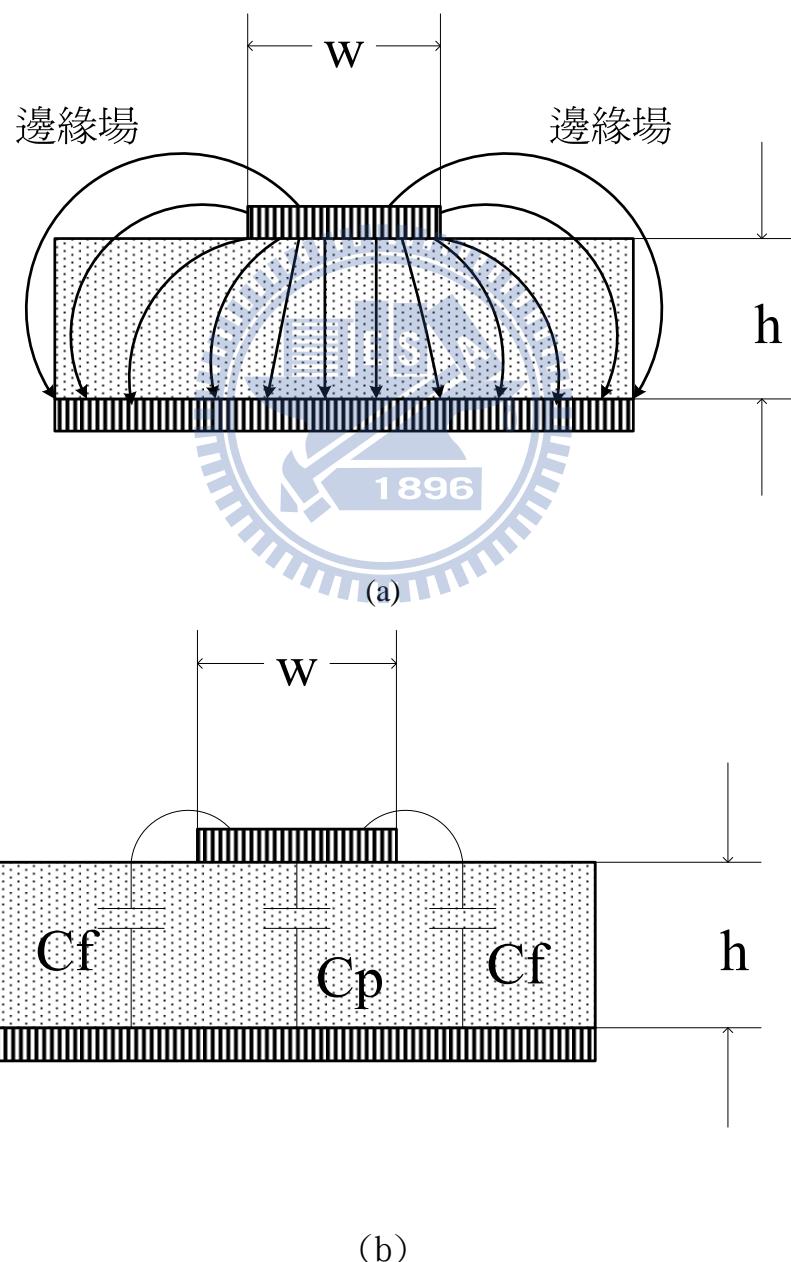


圖 2.4 單條微帶傳輸線的(a)電場示意圖(b)等效電容示意圖。

$$C = C_p + 2C_f \quad (2.20)$$

$$C_p = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r W}{h} \quad (2.21)$$

$C_p$ 表示平行板電容，而  $C_f$ 則代表了因為微帶線邊緣所產生的雜散電容，一旦 $C_f$ 知道了，則可經由(2.20)式與(2.21)式知道全部電容。相反的，如果我們知道了一條微帶線的特性阻抗和等效介電常數，則總電容 $C$ 就可以用(2.22)式求得，並使用(2.20)式和(2.21)式則 $C_f$ 也可求得。

$$Z_0 = \frac{\sqrt{\epsilon_{re}}}{cC} = \frac{1}{c\sqrt{CC_0}} = \frac{1}{c\sqrt{\epsilon_{re}}C_0} = \frac{Z_{0a}}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2.22)$$

## 2.2.2 耦合傳輸線的雜散電容

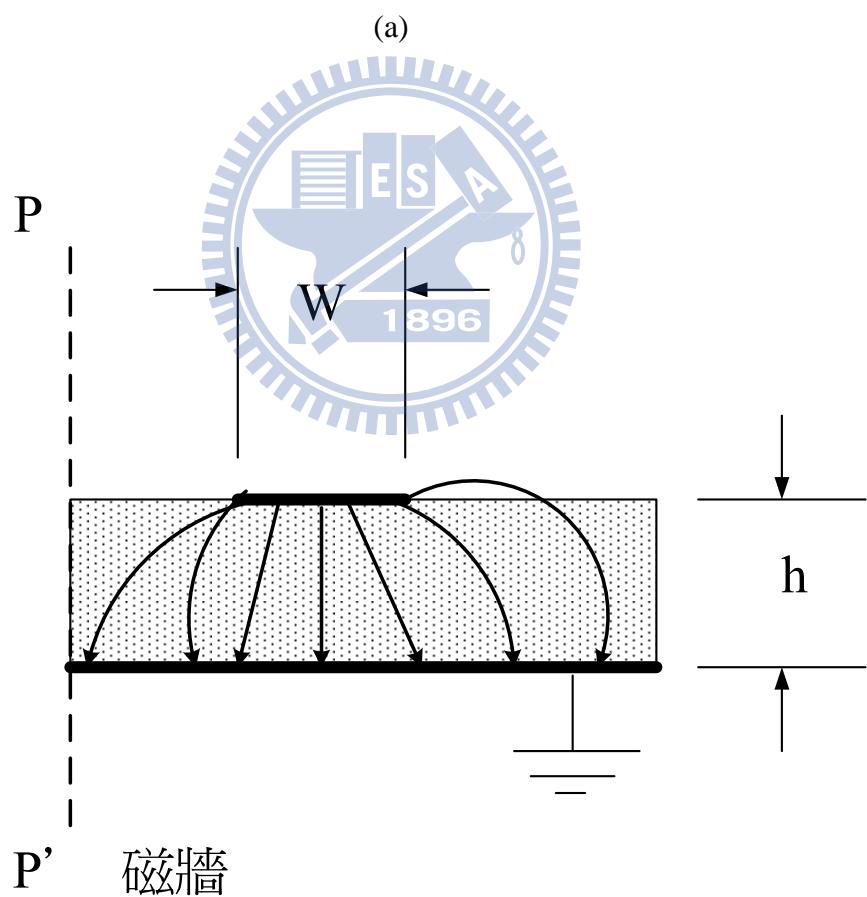
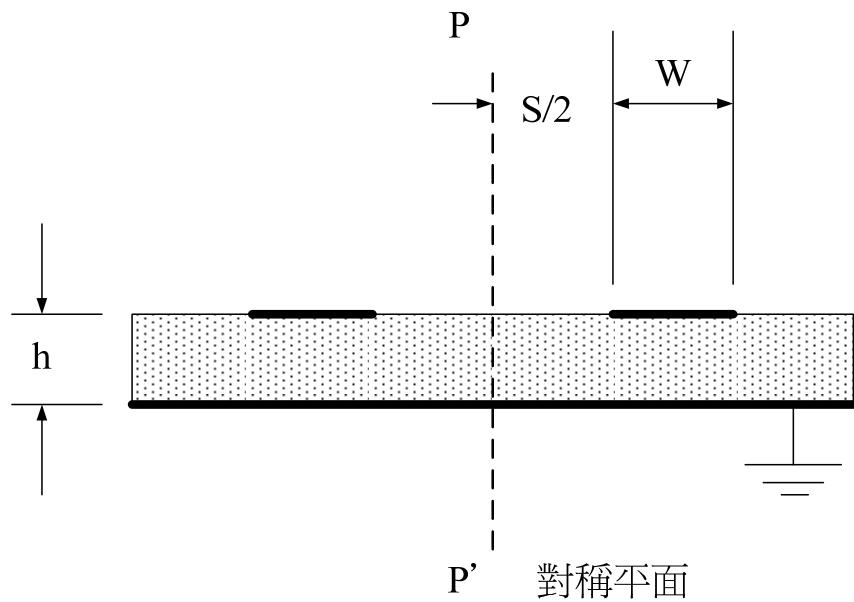
一個交互作用區的耦合線如圖 2.5(a)所示，圖 2.5(b)則表示了一個偶模激發的半結構電場分布，在這種情況， $PP'$ 平面的法線電場為零，因為此時 $PP'$ 平面為一磁牆，而偶模耦合線的電容也就可以表示為如圖 2.5(c)所示，公式則為：

$$C_e = C_p + C_f + C_{fe} \quad (2.23)$$

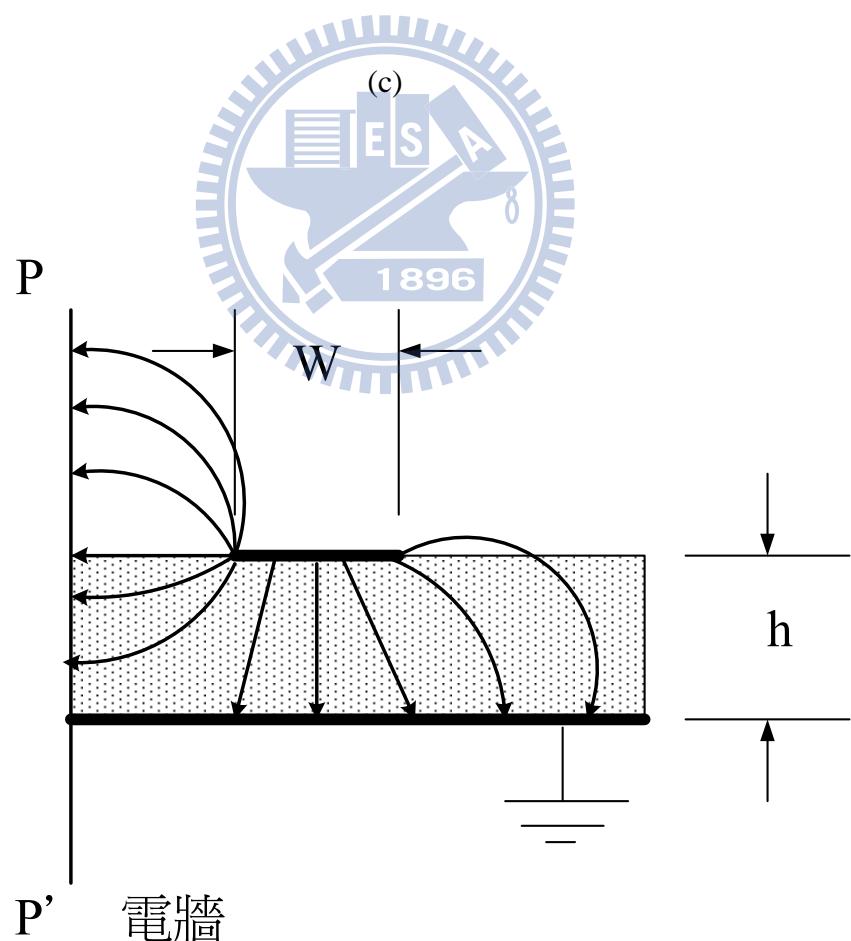
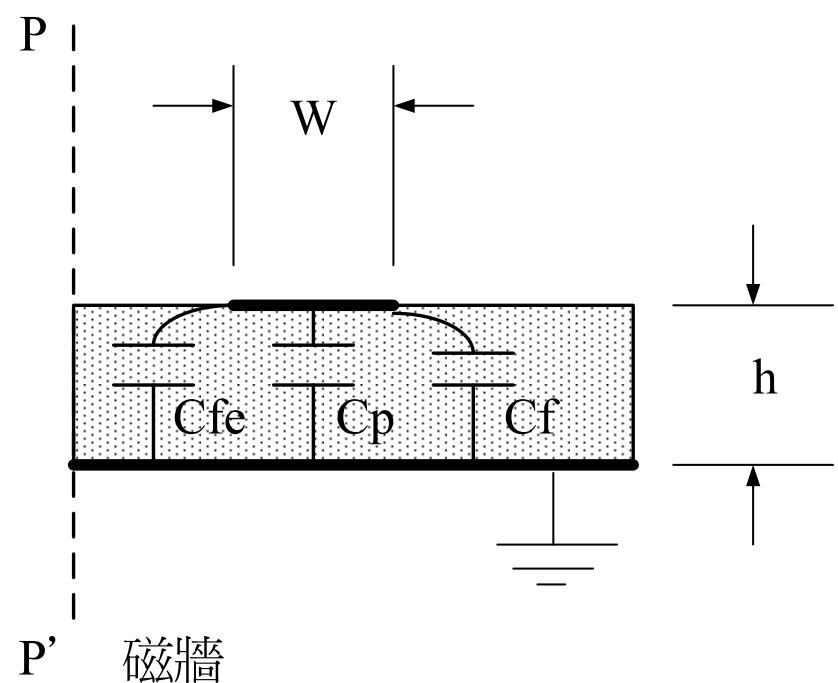
其中 $C_p$ 即為(2.21)式的平行板電容，如果此耦合線的兩條線並不很窄的話，則 $C_f$ 可假設為與此耦合線相同線寬之單條傳輸線的雜散電容的值。

奇模激發的電場分布圖如圖 2.5(d)所示，其中 $PP'$ 平面的切線電場值為零，因為此時 $PP'$ 平面為一電牆，而公式為：

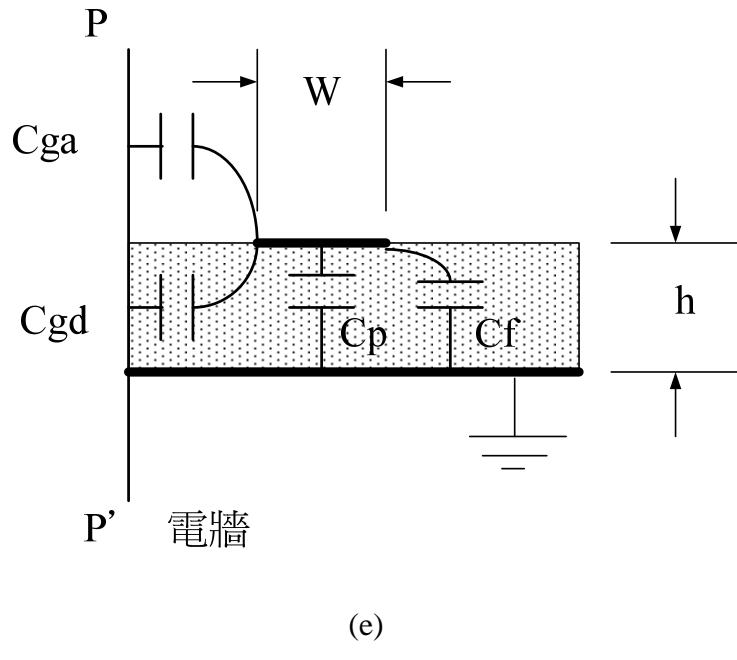
$$C_o = C_p + C_f + C_{fo} \quad (2.24)$$



(b)



(d)



(e)

圖 2.5 (a)對稱傳輸線的交互作用區，(b)-(c)偶模激發的電場分布圖與電容示意圖(d)-(e)奇模激發的電場分布圖與電容示意圖。

其中  $C_{f0}$  代表了耦合線內側邊緣的雜散電容，當兩條導線中間的空間很小時 ( $S/2$  跟基板厚度  $h$  比較起來相對很小時)，內側邊緣的電場都終止於  $PP'$  平面，這種情況可以用圖 2.5(e)表示，公式則寫為：

$$C_o = C_p + C_f + C_{f0} = C_p + C_f + C_{ga} + C_{gd} \quad (2.25)$$

而  $C_{f0}$  雜散電容由兩個並聯電容所組成  $C_{ga}$ 、 $C_{gd}$ ：

$$C_{f0} = C_{ga} + C_{gd} \quad (2.26)$$

奇偶模的特性阻抗和相速均可從與結構有關的平行板電容和雜散電容來得知，相反的，若知道奇偶模的特性阻抗和相速，對應的雜散電容也就被決定了。

# Chapter 3

## 平面式巴倫輸出級

### 3.1 簡介

對於在系統單晶片(System on chip)中，功率放大器與壓控震盪器的感應線之間的磁場耦合所造成的雜訊效應，在第一章中有詳細描述，並且提供一些目前的解決方案。其中包括如[5]將基板磨薄，並且把功率放大器與壓控震盪器佈局在系統單晶片中最遠的兩個角落；又如[6]的將基板裁切出來去分析跟解決。

在本章節將介紹，不同於在基板解決磁場耦合的雜訊效應，而從更根本的一兩個渦狀纏繞電感式輸出級的結構去著手改善，考慮原本的電感式輸出級響應，要有阻抗匹配以及推挽至單端的功能，而其中推挽至單端很直觀的就讓人想到巴倫(balun—balance to unbalance transformer)，所以基本架構就從平面式耦合線巴倫濾波器出發，任何電路在晶片裡，有一項考慮因素變的特別的重要，就是尺寸大小，尤其想要把微波電路安置在標準  $0.18\mu\text{m}$  CMOS 製程是更是一項具挑戰性的研究。

理論上若能使用縮小化功率放大器輸出級平面式巴倫濾波器來取代傳統電感式變壓器輸出級，由於耦合線巴倫濾波器並無纏繞線圈，所以並不會產生太大的磁場耦合，也就可以解決晶片系統中因為磁場耦合而造成的雜訊效應，若能再更進一步縮小化，讓平面式巴倫輸出級較傳統變壓器輸出級的尺寸更小，就能再讓晶片能更有效的利用空間，以節省晶片的面積成本。

## 3.2 巴倫濾波器設計理論

對於我們設計的巴倫濾波器輸出級，設計規格如表 3.1：

1	頻率	2.5-2.7GHz
2	損耗	<2dB
3	相位不平衡	5 度
4	尺寸	$<700 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$

表 3.2 巴倫濾波器輸出級之設計規格。

### 3.2.1 主要電路架構

新的電路架構取代傳統中央抽頭變壓器方式的功率大器輸出端的匹配電路，主要電路架構如圖 3.1 所示。

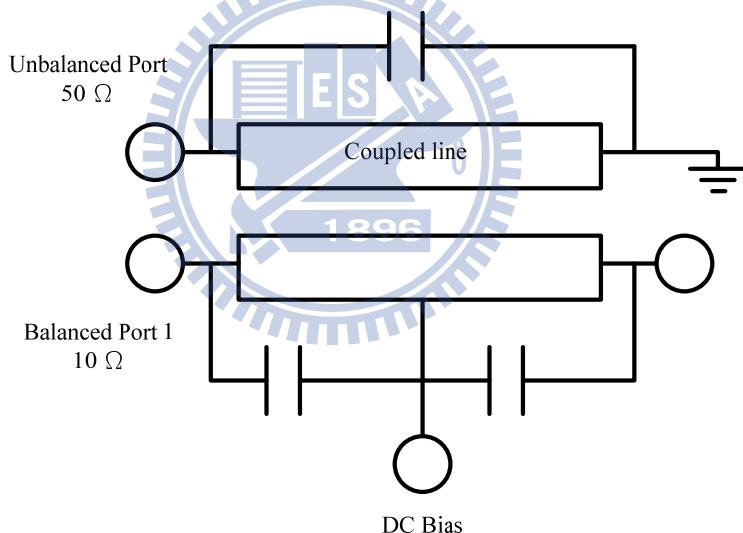


圖 3.1 功率放大器輸出端 balun 的電路基本結構。

圖 3.1 基本上為一個二階的阻抗轉換濾波器(阻抗由  $50\Omega$  轉換至  $20\Omega$ )，經由正確適當的設計可以用很短的傳輸線達到濾波器的功能，因為使用耦合線與電容器取代中央抽頭變壓器，所以渦狀電感之間高磁耦現象將可大幅降低。

在設計上一開始，我們先從二階阻抗轉換濾波器起頭，圖 3.2 顯示二

階阻抗轉換濾波器的等效電路。可以看出接地點雖不同但其模擬結果與將來平衡式結構(圖 3.10, 3.11)相去不遠。是一個簡單、易懂的初始設計。

按照濾波器理論，因為埠阻抗一邊是  $50\Omega$ 、一邊是  $20\Omega$ ，因此中間的耦合線應該是非對稱耦合線(asymmetric coupled line)，這樣才能達到理想匹配。我們將會推演發展出這個濾波器的等效電路模型，以利爾後類似電路的設計。

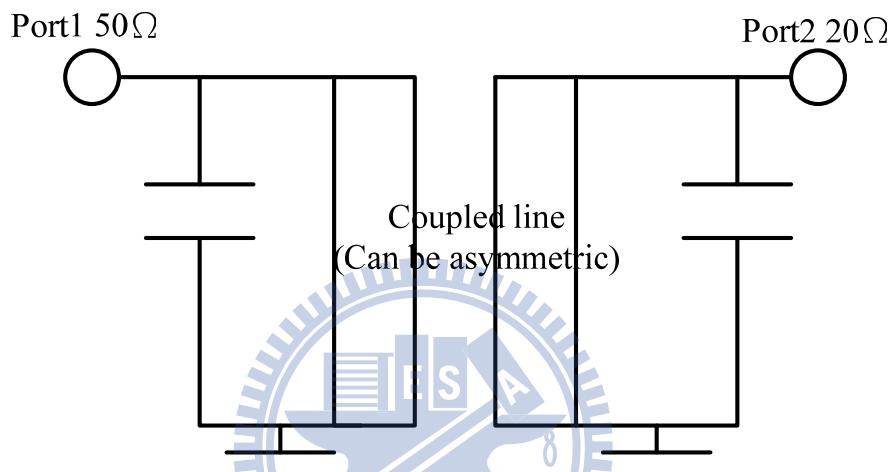


圖 3.2 二階阻抗轉換濾波器之電路示意圖。

初步模擬的濾波器響應圖，如圖 2-3 所示

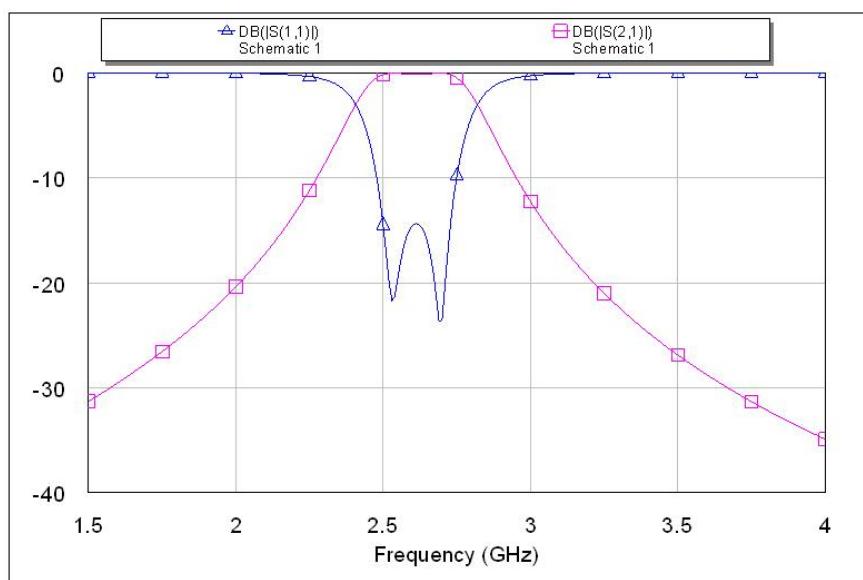


圖 3.3 此為圖 3.2 電路之響應

圖 3.2 的不對稱耦合線(asymmetric coupled line)可以用圖 3.4 的電路來實現，將耦合線中阻抗較低、線寬較寬的一邊，等效為一對稱耦合線並聯另一段傳輸線。

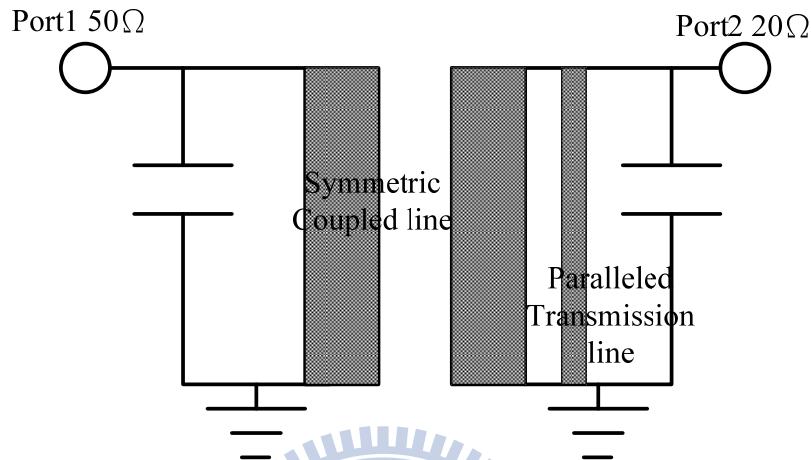


圖 3.4 二階阻抗轉換濾波器之實際等效電路。

### 3.2.2 等效電路推演

圖 3.4 又可利用耦合傳輸線理論進一步形成含導納反轉器(susceptance inverter)之電路，因此可以發展出濾波器合成之理論，將來能夠極快速的將電路初始架構計算出來。

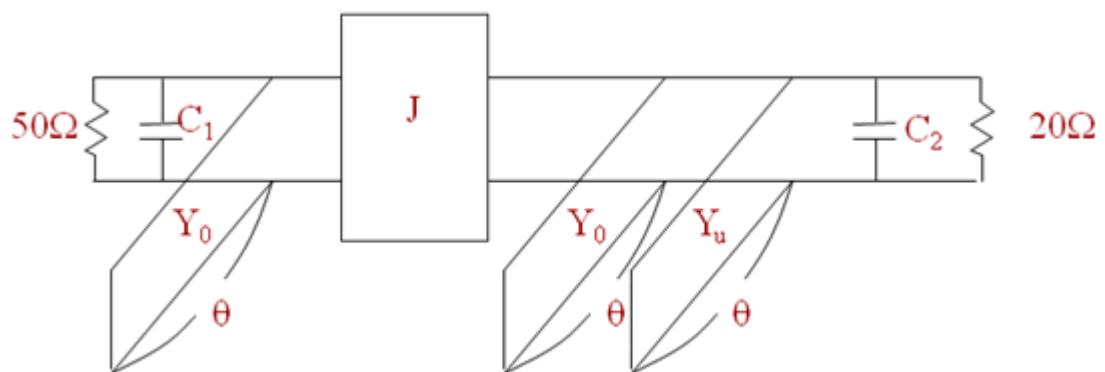


圖 3.5 此為圖 3.4 之等效電路。

$$Y_{0o} = Y_0 + J \tan \theta \quad (3.1)$$

$$Y_{0e} = Y_0 - J \tan \theta \quad (3.2)$$

圖 3.5 之中兩個電長度為  $\theta$ ，特徵導納為  $Y_0$  之短路傳輸線中間夾一個值為  $J$  的導納反轉器，可以等效成圖 3.4 中之對稱傳輸線，圖 3.5 為一個二階濾波器，一旦濾波器的規格確定則可以經由計算得到其中的參數數值，再轉換成圖 3.4 的電路。

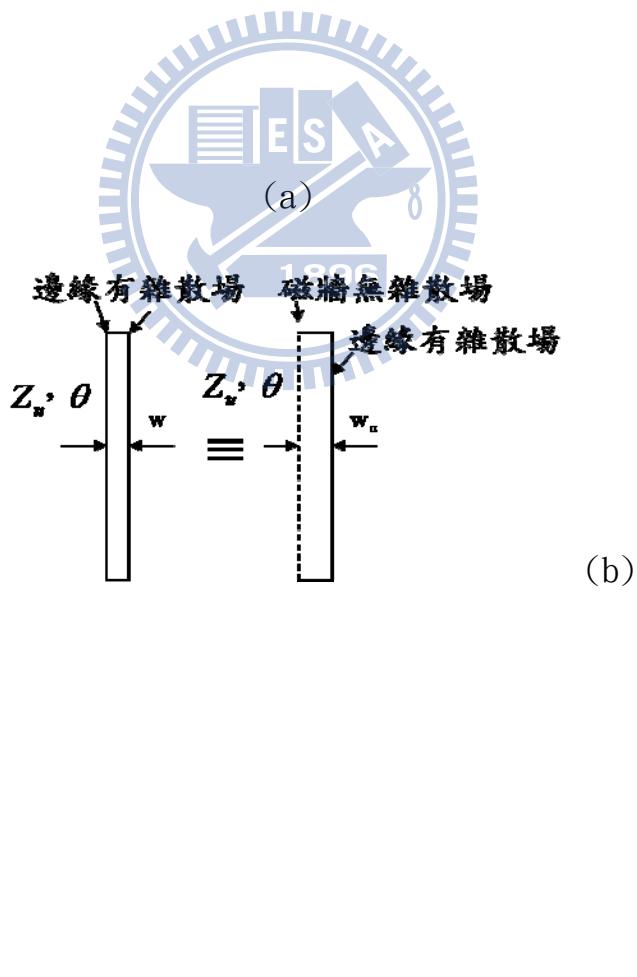


圖 3.6(a)耦合線之等效情況(b)單線之等效情況(c)故非對稱耦合線  
相當於 a、b 並聯。

從圖 3.6 可以推演出，若以磁牆將非對稱耦合線中阻抗較低的一條切開，則相當於一個對稱耦合線並聯一段傳輸線，使得等效電路成立。加入磁牆的對稱耦合線，其中等效電容的分布如圖 3.7。

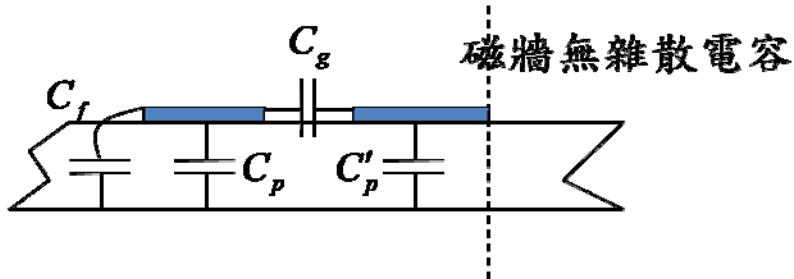


圖 2-7 有磁牆之對稱耦合線之等效電容分布。

其中  $C_p$ 、 $\bar{C}_p$  表平板電容， $C_f$  表微帶線邊緣雜散電容， $C_g$  表二微帶線之間的 Gap capacitance，以這四種有磁牆的對稱耦合線之等效電容，可以寫出以下公式：

$$Y_{oe} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{ree}^{\frac{3}{2}}}{120 \pi} (C_p + C_f) \quad (3.3)$$

$$Y_{oo} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{ree}^{\frac{3}{2}}}{120 \pi} (C_p + C_f + 2C_g) \quad (3.4)$$

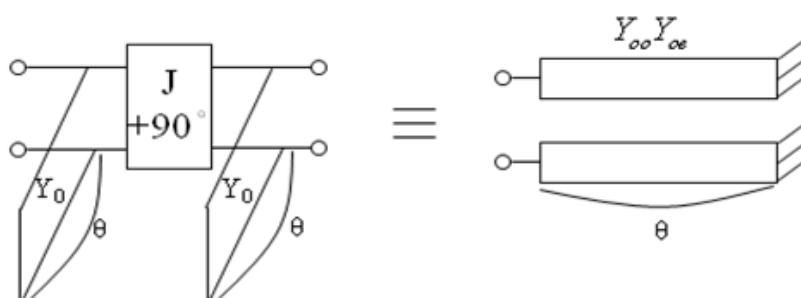


圖 3.8 等效電路  $\theta \neq 90$  度時的情形。

$\Theta = 90$  度時， $Y_{oo}$  以及  $Y_{oe}$  發散。其中  $\varepsilon_{ree}$  和  $\varepsilon_{reo}$  為偶模與奇模的等效介電常數。藉由 ABCD 矩陣的相等，可以求出圖 3.8 的公式，再代入圖 3.5 之等效電路，由給定的頻寬與 return loss level 可以計算出圖 2-5 中各電路元件的電性參數，再經由  $Y_{oo} = Y_0 + j \tan \theta$  (3.1)； $Y_{oe} = Y_0 - j \tan \theta$  (3.2)二式可計算出奇模與偶模導納。

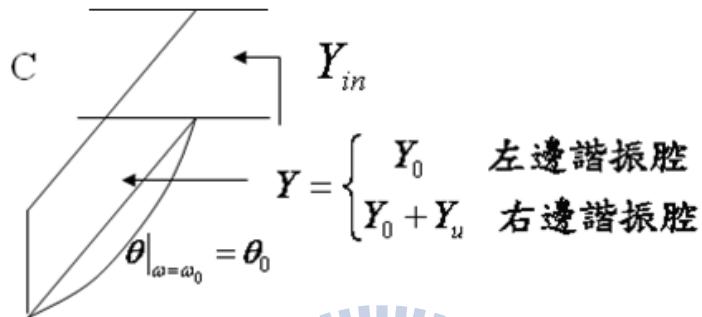


圖 3.9 計算諧振腔的斜率參數。

$$\theta_0 = \beta_0 l \text{ at } \omega = \omega_0 ; \quad \beta_0 = \frac{\omega_0}{v}$$
(3.5)

$$Y_{in} = j\omega C - jY \cot \theta = jB$$
(3.6)

$$Y_{in}|_{\omega=\omega_0} = j\omega_0 C - jY \cot \theta_0 = 0$$
(3.7)

$$b = \frac{\omega_0}{2} \frac{dB}{d\omega} \Big|_{\omega=\omega_0} = \frac{\omega_0 C}{2} + Y \frac{\theta_0}{2} \csc^2 \theta_0$$
(3.8)

(3.8)式的  $b$  為 susceptance slope parameter。

由諧振腔的斜率參數，給定濾波器的比例頻寬  $w$ ，可以計算求出低通濾波器離型的參數值： $g0, g1, g2, g3$ 。

$$\frac{1}{50} = J_{s1} = \sqrt{\frac{b_1 w}{g_0 g_1 50}}$$

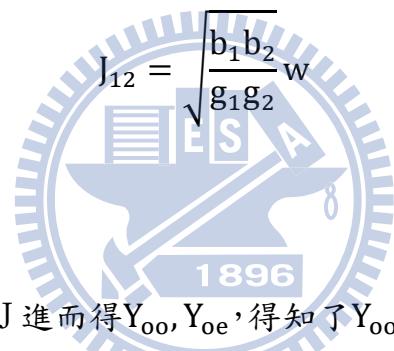
(3.9)

由上式計算出  $b_1$  再經圖 2-9 的(1)(2)可得  $Y$  與  $C$ 。

$$\frac{1}{20} = J_{2L} = \sqrt{\frac{b_2 w}{g_2 g_3 20}}$$

(3.10)

由上式計算出  $b_2$  再經圖 2-9 的(1)(2)可得  $Y$  與  $C$ 。

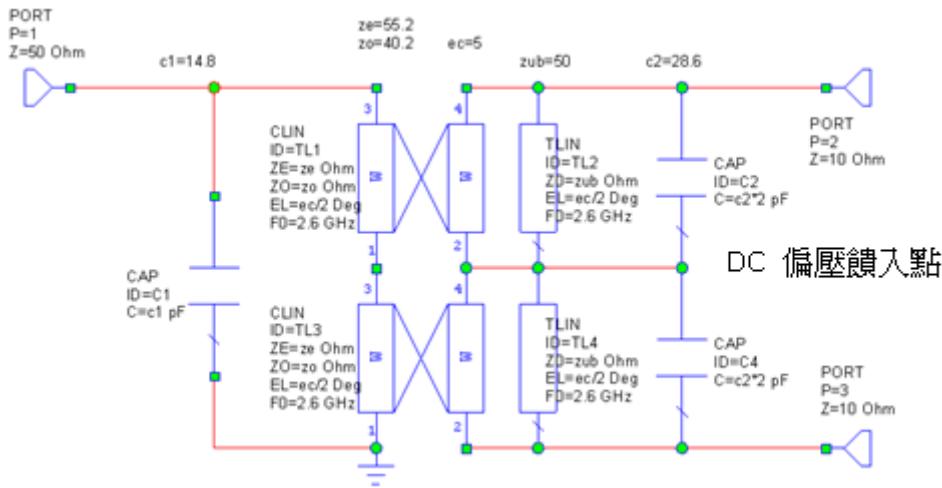


$$J_{12} = \sqrt{\frac{b_1 b_2}{g_1 g_2}} w$$

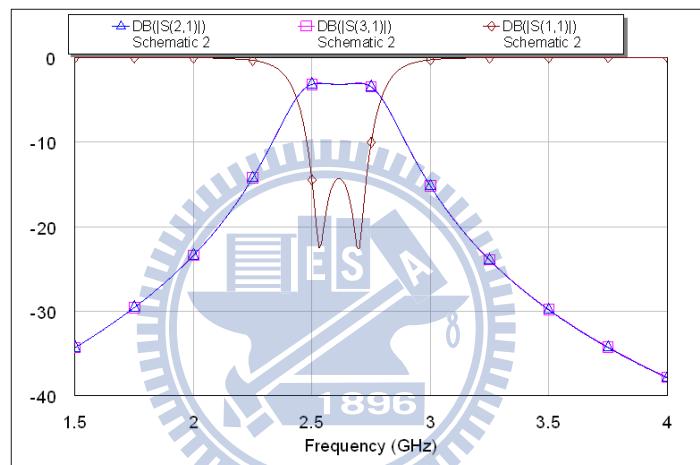
(3.11)

由上式可以計算出  $J$  進而得  $Y_{oo}$ ,  $Y_{oe}$ , 得知了  $Y_{oo}$ ,  $Y_{oe}$  後即可求出  $Z_{oo}$ ,  $Z_{oe}$ , 有了  $Z_{oo}$ ,  $Z_{oe}$  後, 即可推出在不同板材上, 不對稱耦合線的各項參數, 並在模擬軟體上進行理想狀態的模擬。

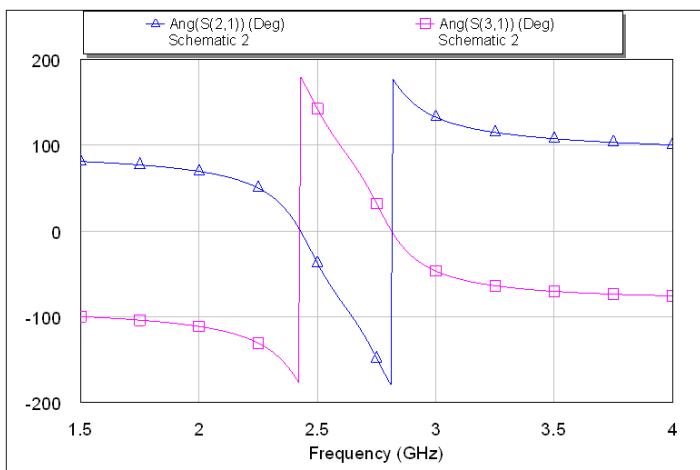
### 3.3 電路模擬結果



(a)

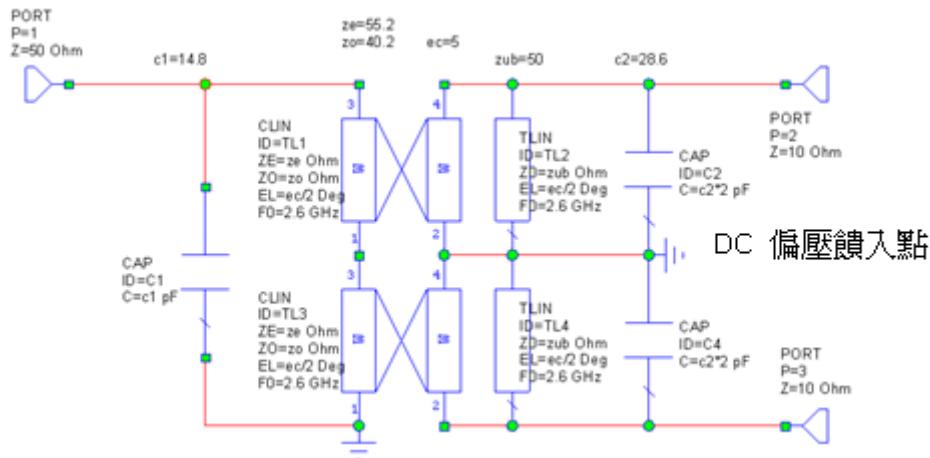


(b)

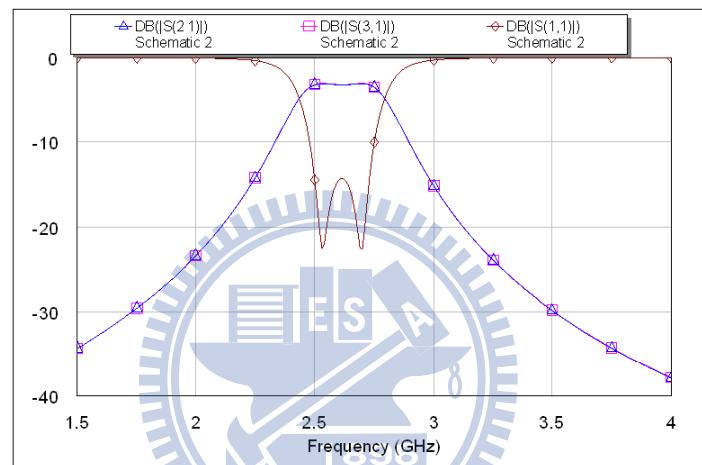


(c)

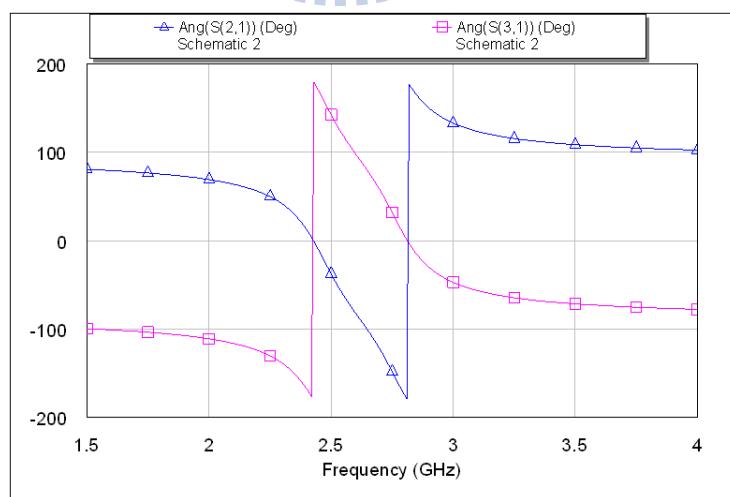
圖 3.10 此 Balun 的響應(a)DC Bias open circuit(b)Amplitude 響應(c)相位響應。



(a)



(b)

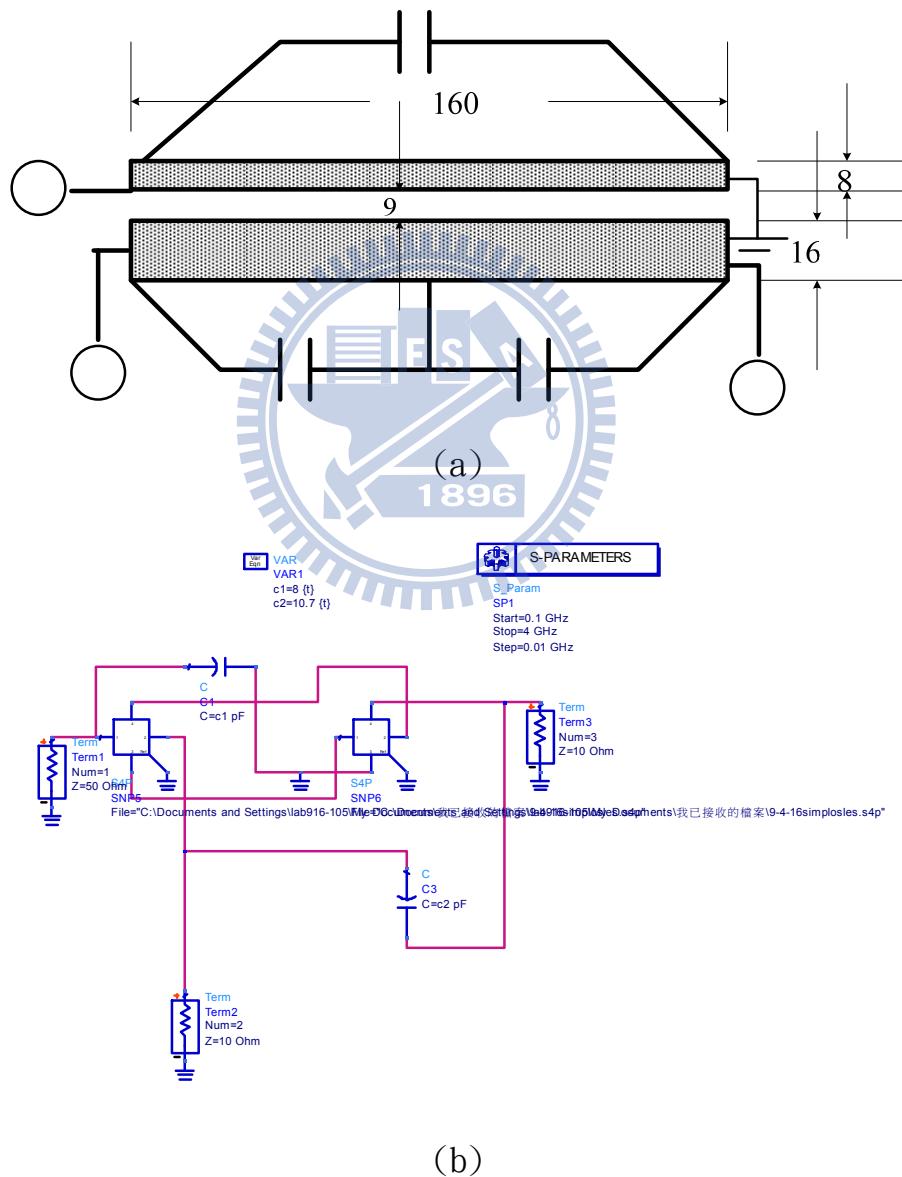


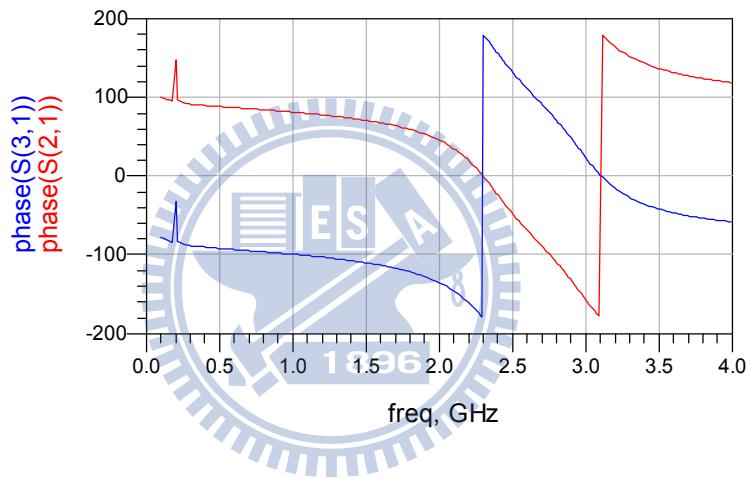
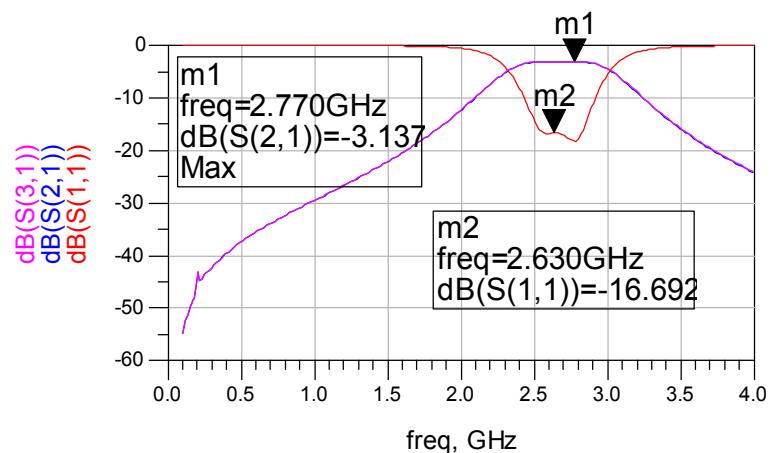
(c)

圖 3.11 此 Balun 的響應(a)DC Bias short circuit(b)amplitude 響應(c)相位響應。

比對圖 3.10 與圖 3.11 可以發現不論 DC 偏壓饋入點是短路或開路，這個 balun 變壓器的輸出均不受影響，無論是振幅的平衡度與相位差均有幾近理想的表现。同時其耦合線的電長度(electrical length)只有  $5^\circ$ ，小型化的效果相當好，也因此可應用在 CMOS 製程中節省成本。

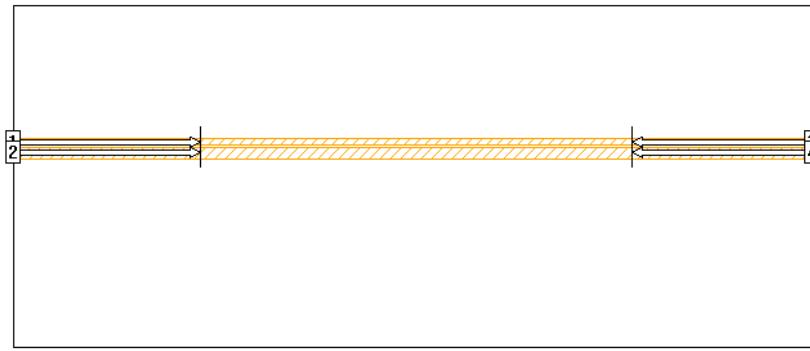
在作過理想狀態的模擬後，我們就開始著手進行標準  $0.18 \mu\text{m}$  CMOS 製程下的尺寸設計與電磁模擬，基於縮小尺寸原則我們先以較窄較細的 coupled line 來做嘗試，結果如下：



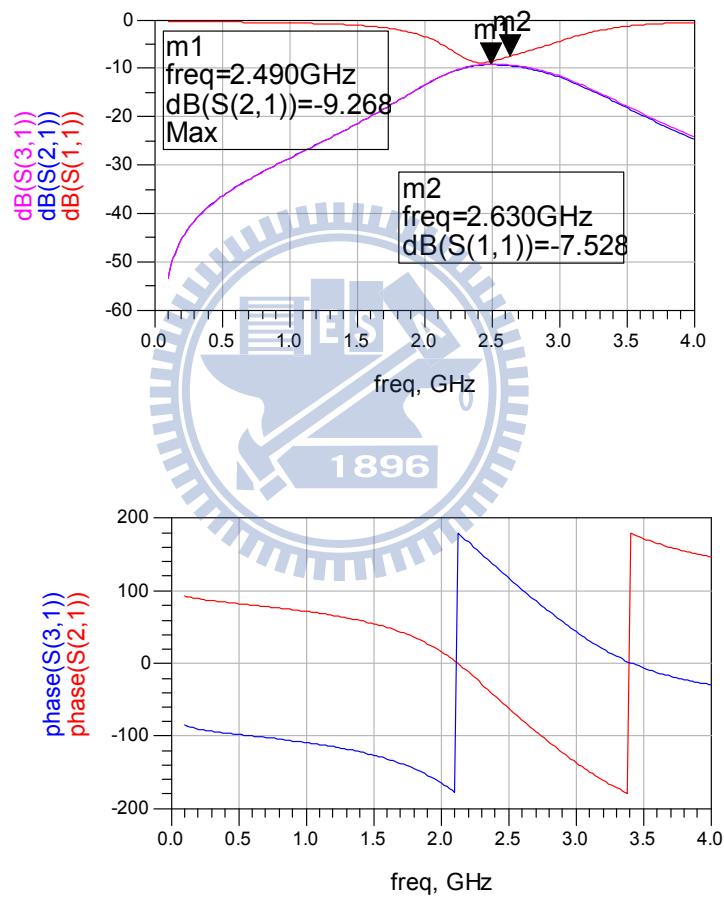


(C)

圖 3.12 (a)sonnet 所模擬之 coupled line balun 之電路示意圖(b)  
電磁模擬軟體輸出 SNP 檔由 ADS 匯入之電路(c)balun 之 amplitude 與相位  
響應。



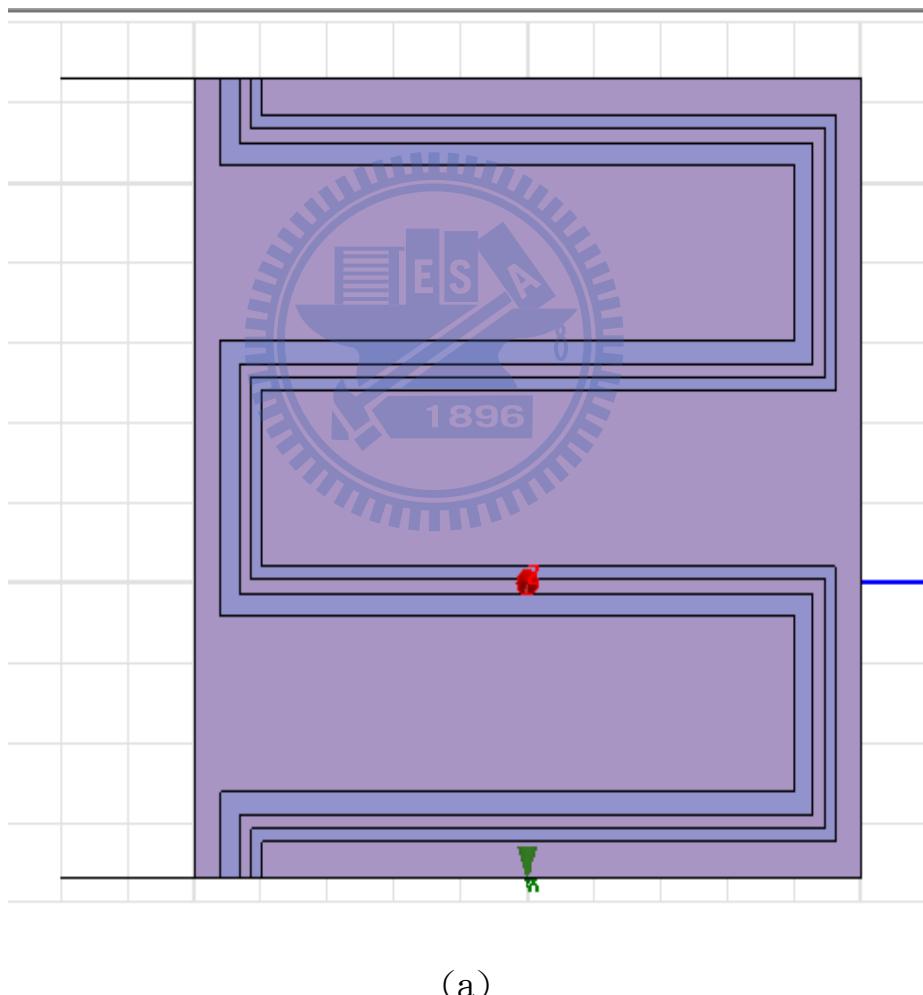
(a)



(b)

圖 3.13 (a) coupled line balun 使用標準  $0.18 \mu\text{m}$  CMOS 製程 metal 6 金屬(b)balun 的 amplitude 與相位響應。

在 Lossless 的金屬中，四個 port 都以 de-embedded 的方式從 Box 拉至參考平面，Balun 的響應良好，不但頻寬、loss 都有達到甚至超出目標，相位也是一直維持 differential 的  $180^\circ$  相位差；但在加入了屬於標準  $0.18\ \mu\text{m}$  CMOS 製程中 Metal 6 金屬的 loss 後，Balun 的響應開始走樣，不但 loss 極高(高出單純因金屬非完美所造成的 loss)，連原本預期的 two dips 也變成 one dip。原本預想加入的 meander 方式，不但可以縮小面積，又可增加 couple 量，也在 ansoft HFSS 上模擬，響應也如 sonnet 上有 loss 之 metal 6 的 balun 的響應。



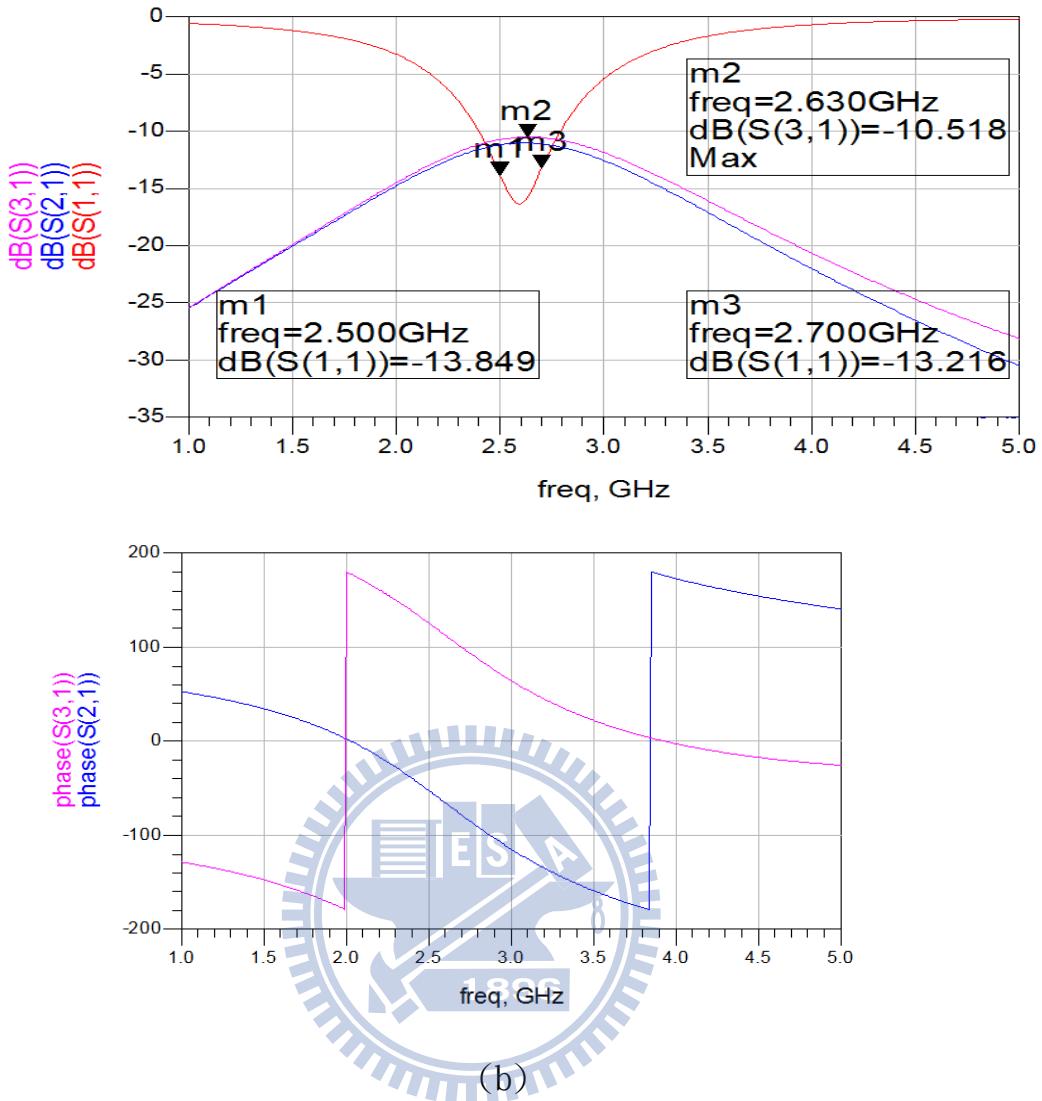
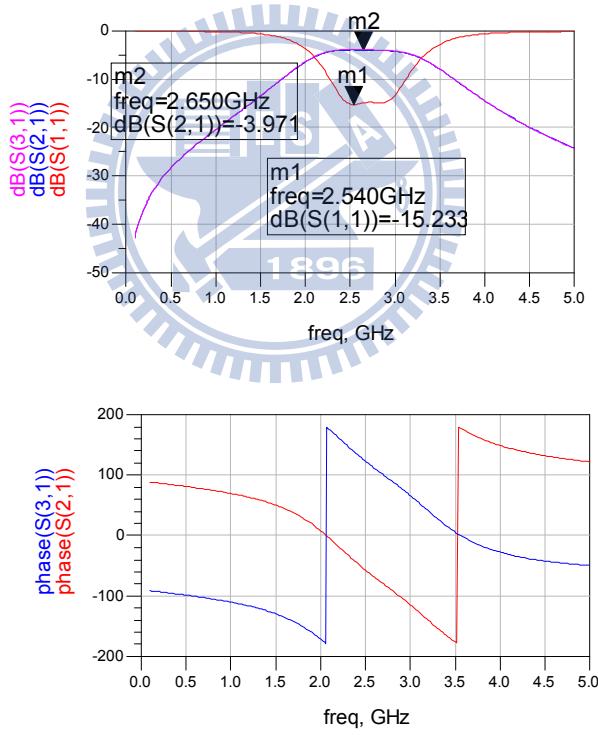
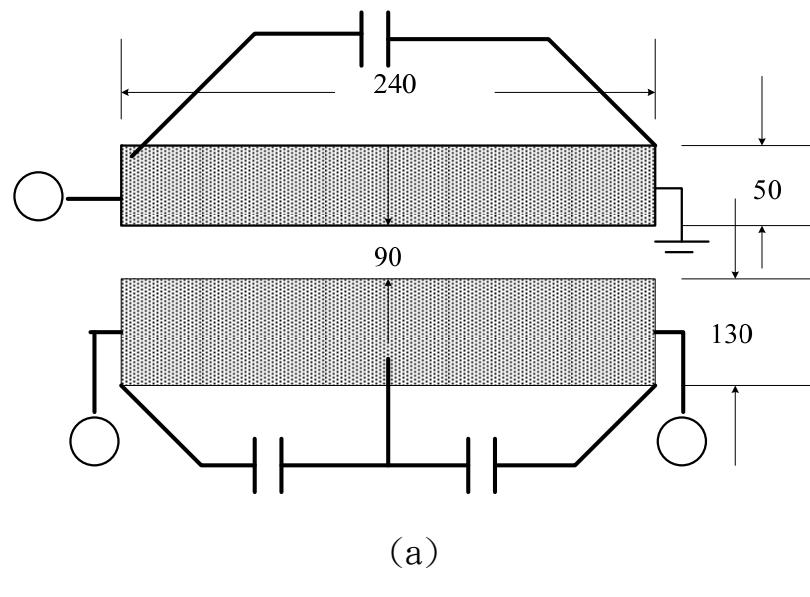


圖 3.14 (a)HFSS 模擬 meander coupled line balun(b)響應圖。

為了解決此問題，我們考慮了一些因素與解決方法，也將這套理論，推演實作在標準  $0.18\mu\text{m}$  CMOS 製程以外的板材(pcb 板、ceramic 板)上，但在其他板材上即使加上金屬 loss 也不會如標準  $0.18\mu\text{m}$  CMOS 製程中加上 metal 6 金屬 loss 那樣變化巨大，因此，可以推測出原因為 Balun 中 coupled line 的線寬太細，與基板厚度太接近，因此金屬線的歐姆耗損太大，於是在改良之後，我們將 coupled line 尺寸調整成較寬，可以看到如圖 的模擬，既使加上標準  $0.18\mu\text{m}$  CMOS 製程 metal 6 的金屬 loss，仍然是維持一個如預期的響應：



(b)

圖 3.15 (a)改良的 coupled line balun(b)amplitude 與相位響應。

### 3.4 量測與佈局

若考慮到 balun 的佈局，由於此 coupled line balun 為不對稱的 coupled line，故 meander 過後，細線與粗線哪一條在內哪一條在外也是需要斟酌的；此 balun 是連接在 PA 後端的輸出級裝置，與 PA 相接的 Port 即為兩個  $10\Omega$  的 differential port，故我們將兩端是  $10\Omega$  port 的線也就是較粗的線放內側（如圖 2-16），並以 meander 的程度來控制，控制兩個  $10\Omega$  port 最後的距離，會跟兩 PA 的兩個 differential 輸出同距，即可在之在要接上 PA 的實際應用中，省去許多麻煩。

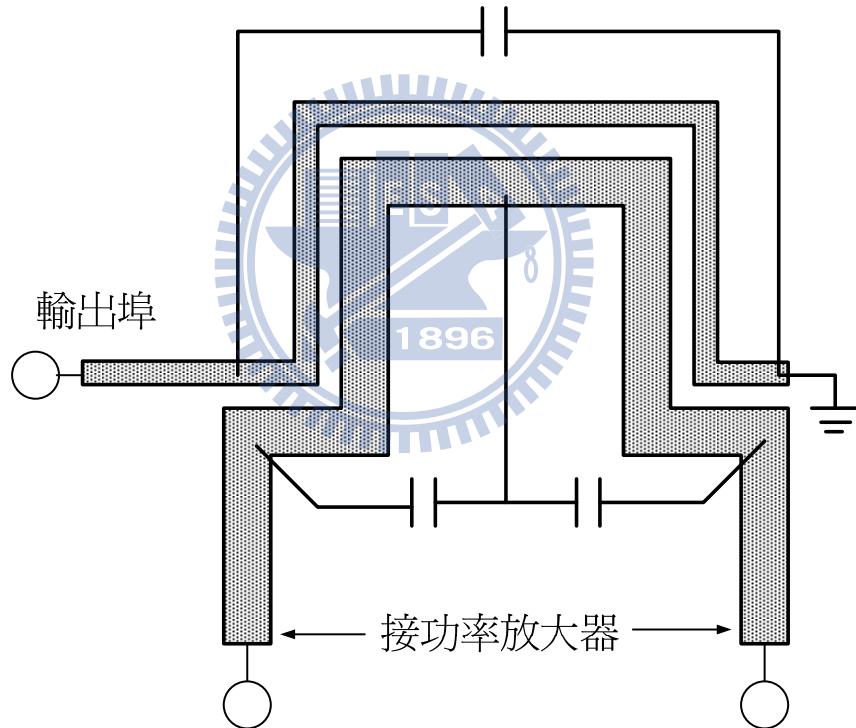


圖 3.16 預想之 Balun 佈局圖。

再考慮到此 balun 出來之後的量測，需著重在此 balun 比傳統平面變壓器形式輸出級較低的磁場耦合的重點，如圖 2-16 所示 Balun 所取代的傳統變壓器輸出級，不但效能符合預期要求，磁通量(magnetic flux)也較傳統的輸出級低。

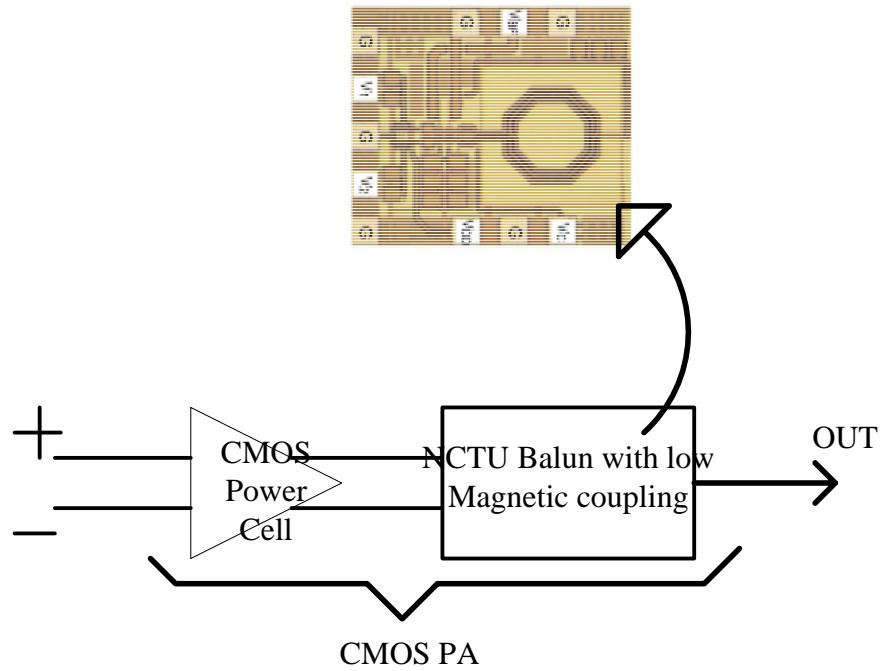


圖 3.17 Balun 輸出級取代傳統變壓器式輸出級。

為了要比較磁場耦合量，在量測時我們將兩個  $10\Omega$  也就是接到 Power Amplifier 輸出的 port，接上  $20\Omega$  的電阻來將之 terminal，測試訊號將從  $50\Omega$  端輸入作為 port 1，並在周圍不限定某處，擺放一個傳統平面式變壓器輸出級 chip，它的輸出視為 port 2，依此量測  $S_{21}$ ，即可看 Balun 式輸出級的磁場耦合量。從 chip 要拉出接電阻，或是接下針的 pad，都是以打線的方式拉出，接上電阻或 ceramic 板的 cpw 下針電路。

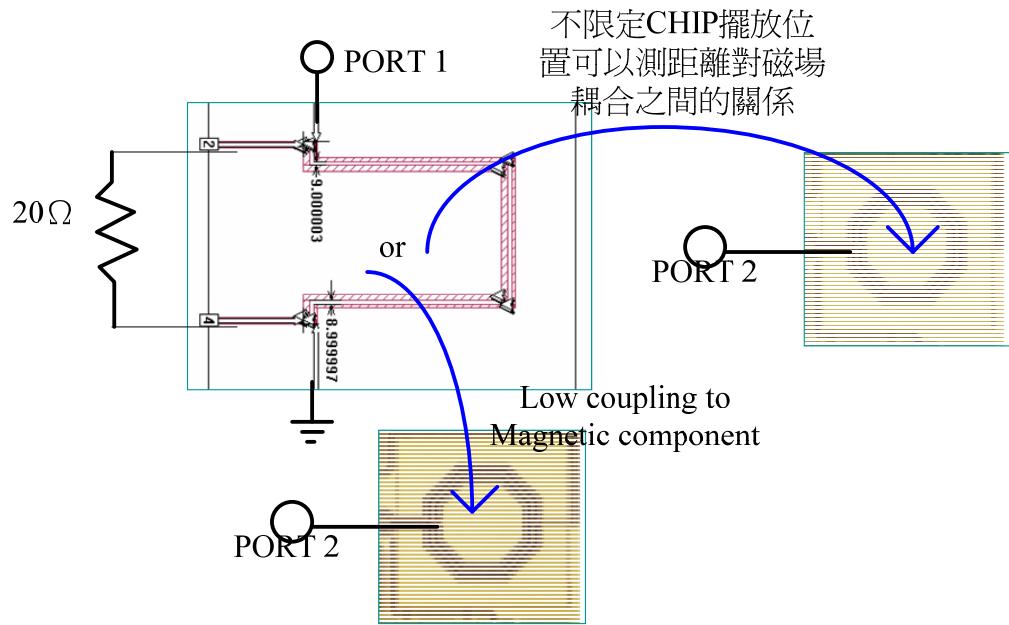


圖 3.18 balun 量測磁場耦合量示意圖。

### 3.5 Rogers RO4003 板材的實作

為了印證縮小化功率放大器輸出級平面式巴倫濾波器理論，因此我們在 R04003 板子上實作，以期達到在各種板材上都能實現縮小化輸出級平面式巴倫濾波器，電路佈局如圖 3.19：

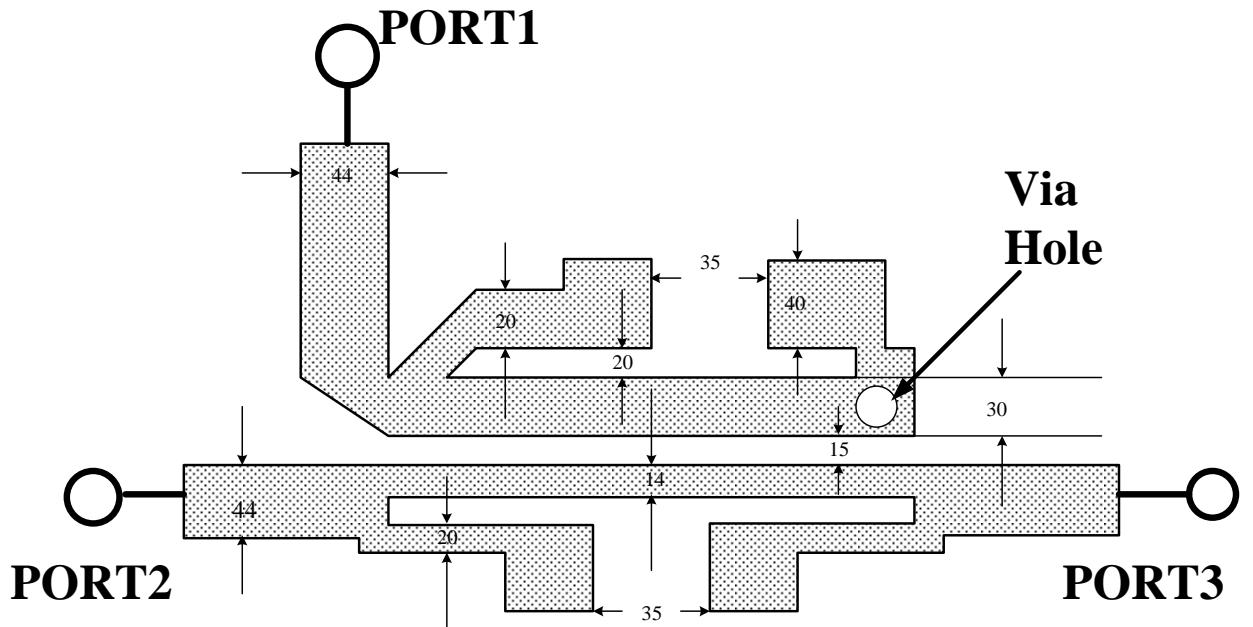


圖 3.19 在 RO4003 板材上之電路佈局。

由於縮小化巴倫濾波器能將電路縮的很小，若製作中心頻率為 2.6GHz 的巴倫濾波器，整段耦合線將會非常短，短到無法在 RO4003 板材上實現，所以我們將中心頻調整到 550MHz，並且將兩個差動埠設計為  $50\Omega$ ，這樣整段耦合線才夠長而不至於讓拉出要接電容的傳輸線產生不希望的耦合。當兩個差動埠(port2, port3)各為  $50\Omega$  時，仍是要使用前面所敘述的不對稱耦合線的計算理論，因為兩個  $50\Omega$  的差動埠會其實是串聯變  $100\Omega$ ，所以我們可以看到耦合線的寬度是設計成匹配  $50\Omega$  跟  $100\Omega$ 。實際電路製作出來為圖 3.20。

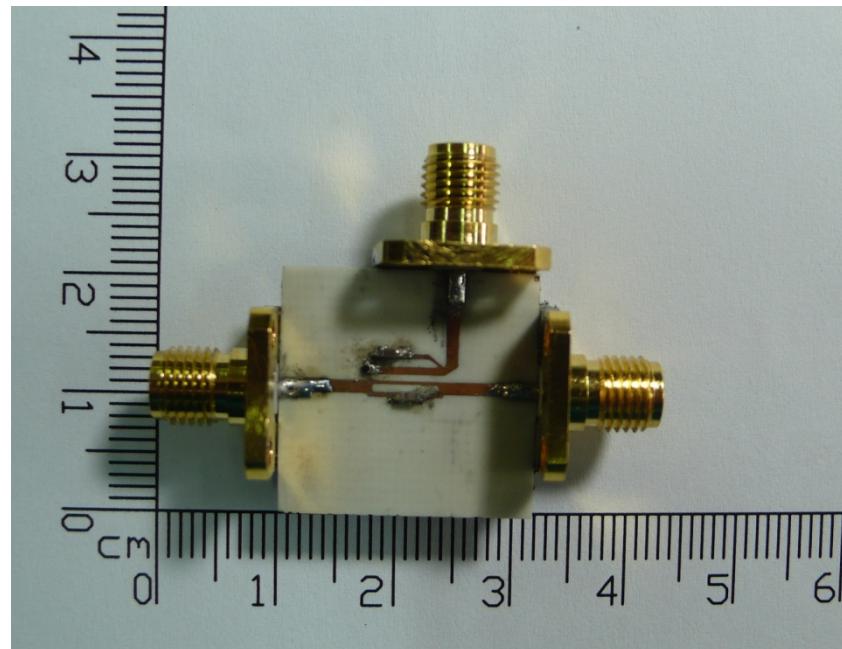


圖 3.20 以 R04003 所製作之巴倫濾波器。

由圖 3.20 我們可以看出，縮小化的巴倫實作出來後，的確是非常小尺寸的電路，即使は 550MHz 這麼低的中心頻率，也能讓整個電路壓縮成極小的尺寸，耦合線的寬度分別為 30mils 和 14mils, gap 寬度為 15mils，電容選用 0603 的 20pF 和 25pF，使用 SONNET 的 EM 模擬如圖 3.21。

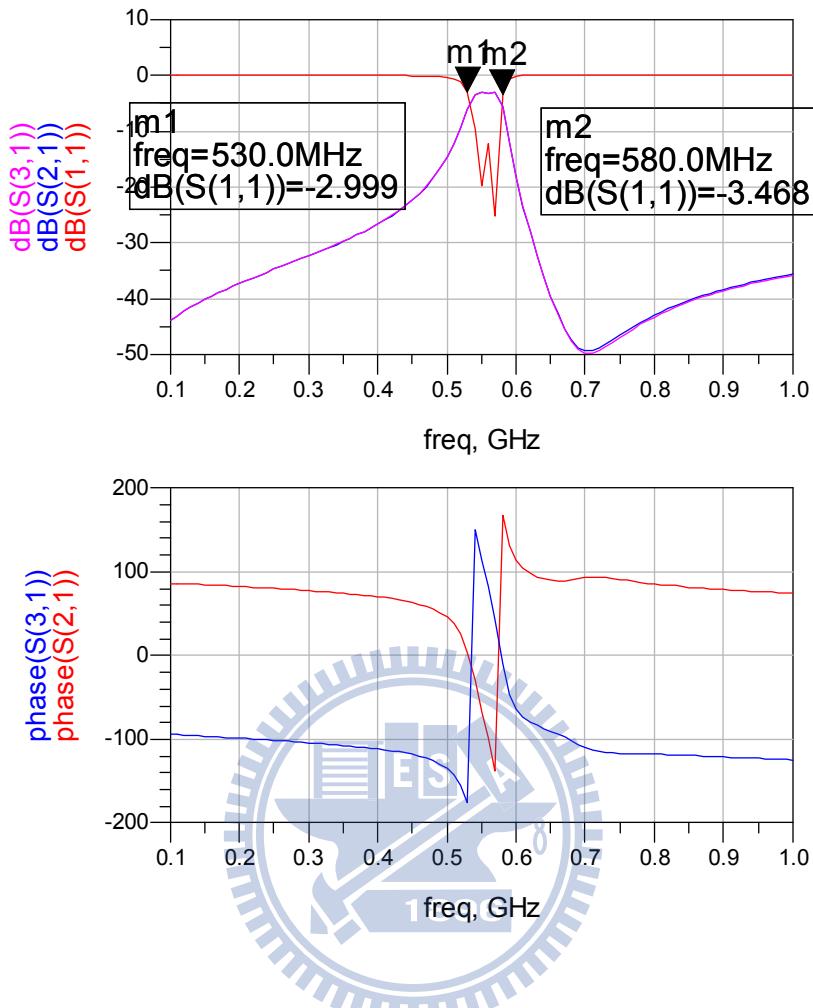


圖 3.21 巴倫濾波器的 EM 模擬響應。

可以看出，頻寬大約有 9%，由於用的是無損耗的金屬，故損耗在二分之一的正常損耗-3dB，相位除了在零點(由於拉傳輸線至埠 1，電感性的傳輸線與電容共振而產生)附近有點亂掉，在通帶中則是維持完美的 180 度相位差。實際量測圖如圖 3.22 所示。

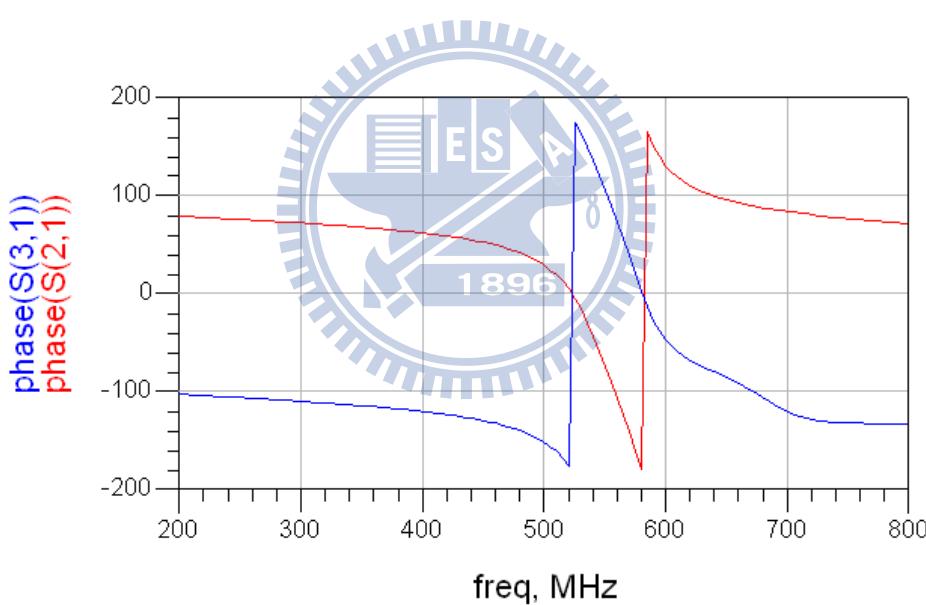
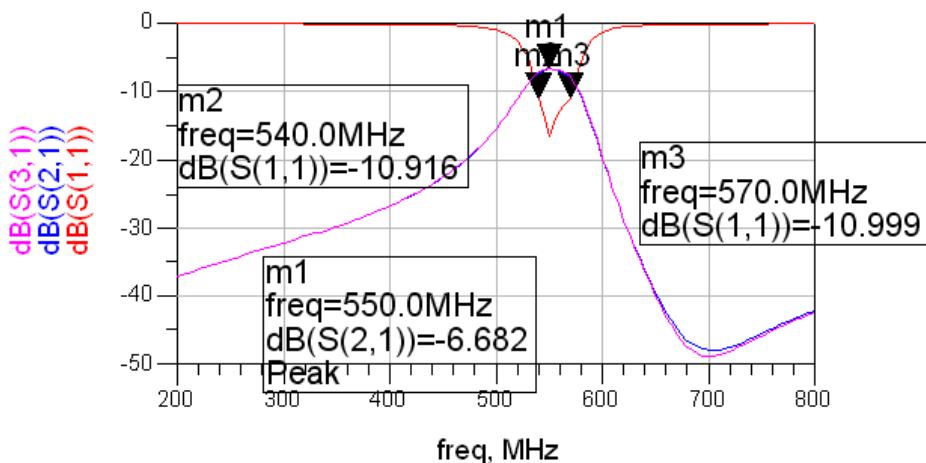


圖 3.22 實際製作電路量測之響應。

這組電路是使用 Agilent E5071B 4-port network analyzer 量測，由於我們可以看到通帶的中心頻率是正確的落在 550MHz， $S_{11}$  也看的出有兩段下沉，但因為損耗較大，似乎快連成一個下沉了， $S_{21}$  和  $S_{31}$  幾乎是

相同的，相位也都在通帶中有很好的相差 180 度的表現，在零點處也如預期有點混亂，只是損耗較大，比原本一定會有的-3dB 又再多了-3dB，除了金屬本身的損耗，頻寬變小也是損耗增加的原因，原本 9%的頻寬變到約 6%，估計是由電容值不準確所造成的誤差，電容本身就有的±數百分比的誤差加上頻率影響，造成電容值不準確，以致頻寬變窄，損耗增加。



# Chapter 4

## 結論與未來工作

### 4.1 結論

綜觀目前對於單系統晶片的電感型式輸出級磁場耦合極高導致雜訊之解決方法，大多沒有完善的解決，而只是力求將之降低。而縮小化功率放大器輸出級平面式巴倫濾波器的目標是從根本原因做起，改善幅度應該是超越先前的解決方法，目前使用理論製作出的電路還可以符合設計規格，但未來仍有許多改進方向可以繼續前進，以期求更乾淨的完全消除磁場耦合效應所造成的雜訊。在 R04003 板材上所製作的巴倫濾波器可以看出，雖然對電容值比較敏感，但實際響應是可以達到，若能更準確的掌握電容值，絕對可以製作出更好響應的巴倫濾波器來取代傳統渦狀電感式變壓器輸出級。

### 4.2 未來工作

在製作縮小化功率放大器輸出級平面式巴倫濾波器時，有些方針可以作為未來改進的方向。首先是縮小化是永遠嫌不夠的，在晶片製程中寸土寸金，若能愈做愈小的確是對經濟效應的一大改善；再來是電容的敏感度，這或許要從基礎結構下手，但若能讓電路敏感度下降，則製作上必定可以

更加簡易，更好掌握；在試過微帶線的巴倫製作後，共平面波導(Coplanar Waveguide)的製作方式也許更適合在晶片上製作微波電路，因為最上層的 metal 6 比起下層的 metal 1 到 metal 5 有著更好的導電度；最後則是當真的要在單系統晶片(SOC)上銜接功率放大器，也是要做一些接軌和佈局的考量。



## 參考文獻

- [1] H. Seol, C. Park, D. H. Lee, M. P. and S. Hong, “**A 2.4-GHz HBT power amplifier using an on-chip transformer as an output matching network**,” in *2008 International Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S*, pp. 875–878, June 2008.
- [2] V. A. Solomko and P. Weger, “**A fully integrated 3.3–3.8-GHz power amplifier with autotransformer balun**,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 57, no. 11, pp. 2160–2172, Nov. 2009.
- [3] M. -D. Wei, S. -F. Chang, and S. -W. Huang, “**An amplitude-balanced current-reused CMOS VCO using spontaneous transconductance match technique**,” *IEEE Wireless and Component Letters*, vol. 19, no. 6, pp. 395–397, June 2009.
- [4] J. -A. Hou and Y. -H. Wang, “**A 5 GHz differential colpitts CMOS VCO using the bottom PMOS cross-coupled current source**,” *IEEE Wireless and Component Letters*, vol. 19, no. 6, pp. 401–403, Oct. 2009.
- [5] S. Shinjo, K. Tsutsumi, K. Nakajima, H.-O. Ueda, K. Mori, M. Hieda, J. Koide, M. Inoue, and N. Suematsu, “**5.8GHz ETC SiGe-MMIC transceiver having improved PA-VCO isolation with thin silicon substrate**,” in *2006 International Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S*, pp. 2039–2042, June 2006.
- [6] S. Bronckers, G. Vandersteen, L. De Locht, M. Libois, G. Van der Plas, and Y. Rolain, ”**Experimental analysis of the coupling mechanisms between a 4 GHz PPA and a 5–7 GHz LC-VCO**,” *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 8, pp. 2706–2713, Aug. 2009.Dae-won Lew, Jun-Seok

- Park, Dal Ahn, Nam-Kee Kang, Chan Sei Yoo, and Jae-Bong Lim, “**A design of the ceramic chip balun using the multilayer configuration**,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 49, no. 1, Jan 2001.
- [7] B. Preetham Kumar, G. R. Branner and Donald G. Thomas,Jr, “**A reduced size planar balun structure for wireless microwave and RF applications**,” in *Proc. Of the 38<sup>th</sup> Midwest Symposium on Circuits and Systems*.pp. 526-529, August 1995.
- [8] Ching-Wen Tang, Jyh-Wen Sheen, and Chi-Yang Chang, “**Chip-type LTCC-MLC balun using the stepped impedance method**,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 49, no. 12, Dec 2001.
- [9] Shih-Ming Wang, Chin-Hsiung Chen, Chi-Yang Chang , “**A study of meandered microstrip coupler with high directivity**”, in *Microwave Symposium Digest, 2003 IEEE MTT-S International*, Vol. 1, 2003
- [10] S. Shinjo, K. Tsutsumi, K. Nakajima, H.-O. Ueda, K. Mori, M. Hieda, J. Koide, M. Inoue, and N. Suematsu, “**5.8GHz ETC SiGe-MMIC transceiver having improved PA-VCO isolation with thin silicon substrate**,” in *2006 International Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S*, pp. 2039–2042, June 2006.
- [11] S. Bronckers, G. Vandersteen, L. De Locht, M. Libois, G. Van der Plas, and Y. Rolain, ”**Experimental analysis of the coupling mechanisms between a 4 GHz PPA and a 5–7 GHz LC-VCO**,” *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 8, pp. 2706–2713, Aug. 2009
- [12] David M. Pozar.; **Microwave engineering**, 3<sup>rd</sup> ed., John Wiley& Sons Inc., 2005
- [13] Rajesh Mongia, Inder Bahl, Prakash Bhartia; **RF and microwave coupled-line circuit**, Artech House, Inc., 1999.