

「38-GHz 無線收發系統關鍵元組件技術」子計畫二：
單面濾波器 (1/3)，(2/3)，(3/3)
Uniplanar Filters (1/3)，(2/3)，(3/3)

計畫編號：NSC 90-2219-E-002-003

NSC 91-2219-E-002-016

✓ NSC 92-2219-E-002-003

執行期限：90年8月1日至93年7月31日

主持人：陳俊雄 國立台灣大學電機系教授

計畫參與人員：林祐生、王琦學、嚴育盟、張振元、辜偉志、池榮聖、
許旻舜、鄧卜華、吳昭篁、潘峻宏、翁瑋廷、郭宗男

一. 中文摘要

(關鍵詞：單面結構、濾波器。)

為配合發展毫米波無線通訊收發系統，本研究特研發數種低通及帶通單面濾波器，以建立相關收發系統之關鍵元組件技術。本研究將提出數種新型縮小化單面濾波器結構，以達成電路短小輕薄的目的。

本研究的內容包括：設計用等效電路模型的建立，分析用電腦軟體程式集的完成，再結合理論分析與實驗量測，進行低通及帶通單面濾波器各種特性之詳盡探討。

第一年研究，利用共面波導容易串接與並接的特性，以四分之一波長($\lambda/4$)串接開路截線與 $\lambda/4$ 並接短路截線的交錯結合方式，進行帶通濾波器的設計工作，並在較低的2.4GHz操作頻率，完成兩種截線型共面波導帶通濾波器的研製及詳盡探討工作。

第二年研究，將在共面波導之信號線與接地線上，蝕刻而形成開路截線與短路截線，以

產生所需之電感值與電容值，並適當組合上述截線，設計出低通與高通之共面波導濾波器，最後再將低通與高通結構串接起來，進而完成串接型共面波導帶通濾波器的設計。

第三年研究，提出一種小型化共面波導平行耦合帶通濾波器，利用集總元件來實現阻抗或導納反轉器，並引入交互耦合，可於止帶實現兩個傳輸零點來增進濾波器截止率，並縮小一半的電路面積。進而於38GHz的操作頻率，完成兩種平行耦合共面波導帶通濾波器的研製及詳盡探討工作。

Abstract

(Keywords: Uniplanar structure, filter.)

The purpose of this investigation is to develop and study several lowpass and bandpass uniplanar filters so as to establish the key component technologies for millimeter-wave wireless communication systems. The goal is to establish suitable equivalent circuit models for practical design and associated computer

software for theoretical analysis. In this study, novel reduced-size uniplanar filters are proposed and investigated in detail. Specifically, various properties of proposed uniplanar filters are carefully examined, both theoretically and experimentally.

In the first-year research, novel coplanar-waveguide (CPW) bandpass filters are proposed, by suitably incorporating the $\lambda/4$ series open stubs and $\lambda/4$ shunt short stubs into a CPW structure. Specifically, two CPW bandpass filters with center frequency at 2.4GHz are implemented and carefully examined.

In the second-year research, novel CPW lowpass and highpass filters are first proposed, by suitably incorporating the open and short stubs in the strip and ground portions of a CPW structure. Next by cascading these lowpass and highpass filter structures, a novel CPW bandpass filter is implemented and carefully examined.

In the third-year research, novel compact CPW parallel-coupled bandpass filters are proposed. By introducing additional lumped-elements to realize J- or K-inverters between the coupled-line sections, along with the cross-coupling effect, the proposed filter may achieve two transmission zeros at upper and lower stopbands with only half the circuit area of the conventional ones. Specifically, novel CPW bandpass filters with center frequency at around 38GHz are implemented and carefully examined.

二. 緣由與目的

隨著電信產業的快速成長，無線通訊技術的進展甚為迅速，頻帶的需求也更形殷切，促

使通訊系統往更高頻段發展，相關硬體電路也朝短小輕薄的目標邁進。

單面單晶微波積體電路 (Uniplanar monolithic microwave integrated circuit) 的構想，首由 Hirota 及 Ogawa 等人提出。單面電路的元、組件及導體，僅佔用基板的單一平面，而具有以下的優點：串聯與並聯主、被動元、組件容易，易於加接直流偏壓，因此可簡化積體電路的製程，大幅降低電路的價格。

連接單面電路元、組件的要件為單面傳輸線 (Uniplanar transmission lines)，依結構可分成：共面波導 (Coplanar waveguide, 簡稱 CPW)、槽線 (Slotline, SL)、及共面帶線 (Coplanar stripline, CPS)。共面波導、槽線、及共面帶線之導體部分均共用同一平面，三者經適當組合，可簡化積體電路架構及製程，也可改善電路特性，因此於單晶微波及毫米波積體電路的發展過程中，頗受世人的注意。

濾波器是微波及毫米波無線通訊系統中之一重要組件，過去有關微波濾波器的研究工作，較偏重於以矩形金屬波導 (Rectangular metallic waveguide)、帶線 (Stripline)、以及微帶線 (Microstrip line) 為基礎的濾波器，因具有精確的設計公式可供使用，而廣泛地應用於微波電路中。

隨著毫米波無線通訊系統的開發，以共面波導、槽線、共面帶線等為基礎的單面電路及系統，也普受世人的重視，而開發出各種型式的單面濾波器。

構成濾波器的要件為：電容 (C)、電感 (L)、及 LC 所組成的串、並聯共振電路。在

毫米波頻段，因研製集總型電容及電感不易，均以截線(Stub)來形成L、C的效應，而開發出各種實用的單面截線或共振器(Uniplanar stubs or resonators)，可作為發展單面濾波器的基礎。

已開發單面濾波器依耦合方式，可分為端邊或縫隙耦合型(End or gap coupled)，側邊或邊緣耦合型(Side or edge coupled)，端側邊耦合型(End/side coupled)，寬端邊耦合型(Broadside/end coupled)，以及背墊導體耦合型(Backed-conductor coupled)等數種。若依結構分類又可分為：截線型(Stub type)，階段阻抗型(Stepped-impedance type)，以及集總元件型(Lumped-element type)等各類。另在單面濾波器電路中，加入二極體或電晶體，也開發出可調式濾波器(Tunable filters)。

濾波器頻寬與結構之耦合方式息息相關。端邊耦合型濾波器之耦合量較小，其頻寬較小；寬端邊耦合型及背墊導體耦合型濾波器之耦合量較大，其頻寬也較大；側邊耦合型濾波器之耦合量在上述兩種之間，頻寬則為中等。

以往所發展的單面濾波器，均用到四分之一波長($\lambda/4$)或二分之一波長($\lambda/2$)的截線或共振器，所佔面積較大，因此有研發縮小化單面濾波器的必要。

為配合總計畫「38-GHz 無線收發系統關鍵元組件技術」的開發工作，本子計畫的目標為：完成兩種「單面濾波器」的設計、研製、及分析工作，而擬開發結構有「低通濾波器」及「帶通濾波器」兩種。為密切配合收發系統之其他元組件，擬研發「低通濾波器」之規格為：通帶(Passband) 0~4.5 GHz，植入損失

(Insertion loss) < 1dB，I/O 回波損失 (Return loss) > 15 dB，帶拒值(Band rejection) 在 5.5 GHz 為 15 dB 並在 6.5 GHz 為 30 dB；而「帶通濾波器」之規格為：通帶 37-40 GHz，植入損失 < 2 dB，I/O 回波損失 > 12 dB，帶拒值在 32.5 GHz 為 40 dB。

三. 研究方法與結果

1. 共面波導低通濾波器

低通濾波器的研究，主要於第二年完成。對於共面波導低通濾波器的設計，首先分別在共面波導之信號線與接地線上蝕刻出數段槽線，這些槽線形成開路截線與短路截線以產生想要的電感值與電容值，例如在圖一(a)信號線上的槽線形成一短路截線，可以等效為電感 L_1 ，在接地線上的槽線形成一開路截線，可以等效為電容 C_2 。

當然，我們也要考慮高低阻抗線的效應，這是由於電流分佈隨著信號線在不連續處的寬度改變，也會有電容或電感的效應產生。在我們提出的結構中，信號線的信號輸入端可視為一低阻抗線，等效於電路中的電容 C_1 ，而從信號線延伸到接地線的細長金屬線可視為一高阻抗線，等效於電路中的電感 L_2 。

由上述可知，我們所提出的結構亦可視為是由數種不同型式的截線所組合而成，因此在 1998 年[1]和 1999 年[2]，Hettak 等人以共面波導結構，提出了許多種不同的串聯與並聯元件與其等效電路，讓研究者可以利用來組合出各式各樣的濾波器，且具有結構緊密與低植入損耗的特性。

另外我們利用全波模擬軟體 Sonnet 來分析圖一(a)之結構，饋入傳輸線為 50 Ω ，模擬

與量測的結果如圖一(b)所示。整個結構製作在氧化鋁基板上 ($\epsilon_r = 9.9$, $h = 0.38\text{mm}$, $\tan \delta = 0.005$)。在結構中兩輸入端的改變是為了方便下針量測。

圖一(b)中，我們可以看到雖然通帶區中的 $|S_{21}|$ 和 $|S_{11}|$ 符合規格，但止帶區的 $|S_{21}|$ 在 5.5GHz 時大約為 -7dB，顯然衰減程度不符合規格。

因此，我們將圖一(a)的低通濾波器結構作一週期性的串接，如圖二所示。其模擬與量測結果相當吻合；圖中通帶區中的 $|S_{21}|$ 和 $|S_{11}|$ 仍符合規格，且我們可以看到止帶區的 $|S_{21}|$ 在 5.5GHz 時，已經可達到 -15dB，而在 6.5GHz 亦可達到 -30dB。所以只要串接兩個低通濾波器，就已足夠符合規格，而所應用的觀念即是週期結構的止帶衰減特性。

2. 共面波導帶通濾波器

關於帶通濾波器的研究，分別於第一、二、三年，完成截線型、串接型、及平行耦合型三種共面波導帶通濾波器。

2.1 截線型

由基本微波電路之理論可知， $\lambda/4$ 並接短路截線，可以等效為一個 LC 並聯的共振器， $\lambda/4$ 串接開路截線，可以等效為一個 LC 串聯的共振器。透過共面波導結構易於串聯與並聯截線的特性，我們可以採取串並接截線之交錯方式，來實現 LC 串並聯共振器組成的帶通濾波器結構。相較於只能實現並接截線的微帶線結構，共面波導結構可以省略截線間的反轉器，進而縮小電路面積。

第一年的研究，利用最近發展的串接截線 [1]、[3] 及並接截線 [1]、[2]，來開發共面波導帶通濾波器。

共面波導 $\lambda/4$ 並接短路截線佈局圖與模擬及實驗結果如圖三所示，中心頻率設計在 2.4 GHz，由模擬與實驗結果可以看出這種結構具有帶通響應。

共面波導 $\lambda/4$ 串接開路截線佈局圖與模擬及實驗結果如圖四所示，同樣也可以看出這種結構具有帶通響應。

接著利用上述的兩種截線結構，來完成二階與三階共面波導帶通濾波器。

二階共面波導帶通濾波器的佈局如圖五所示，其模擬及實驗結果如圖七所示。本濾波器是一個串/並的結構，其中心頻率設計在 2.4GHz，頻寬也約為 2.4GHz，而頻寬的調整，可以藉由控制串接與並接截線的阻抗來達成，決定阻抗之公式如下：

$$Z_s = \frac{4g_k R_0}{\pi\Delta}, \quad Z_p = \frac{\pi\Delta R_0}{4g_k}$$

其中 Z_s 、 Z_p 分別為串接截線與並接截線之特徵阻抗， Δ 為比例頻寬， R_0 為輸入及輸出埠阻抗， g_k 為濾波器低通原型電路之元件值。

三階共面波導帶通濾波器的佈局如圖六所示，其模擬及實驗結果如圖八所示，中心頻率及頻寬與二階濾波器相近，但是濾波器的選擇性與平坦度都比二階的設計要好，濾波器的面積約只佔半個波長，比傳統以二分之一波長共振器設計的三階濾波器，要小了一倍以上。

2.2 串接型

從早期到近幾年的文獻中，共面波導帶通濾波器，大多數都是以耦合線[4]、槽線[5]以及開路或短路截線[6]的觀念，來設計想要的頻率響應。在第二年的研究中，我們提出一個不同的設計方法，就是利用低通濾波器串接高通濾波器去設計一新型的帶通濾波器[7]。此觀念和 Hettak 等人所提出的組合元件之概念相同，只是我們更提高一個層次，將串聯和並聯的元件再次簡化為低通元件與高通元件。此概念與 Hettak 等人所提方法的最大差別，在於利用低通元件與高通元件的頻率響應，可事先掌握我們想要的帶通濾波器之頻率響應。

首先，我們設計一具共面波導低通濾波器，其結構、模擬、與量測結果如圖九所示。圖九顯示全波模擬與實驗以及等效電路的 S 參數均相當吻合。注意此結構製作在 FR4 基板上 ($\epsilon_r=4.3$, $h=1.6\text{mm}$, $\tan \delta=0.022$)。

接下來我們設計一高通濾波器，其設計方法及步驟都與低通濾波器相同。我們設計高通濾波器的主要目的，是希望能與低通濾波器串接後，組合成一個新式的帶通濾波器。

圖十(a)為共面波導高通濾波器的結構與等效電路模型圖。其中，在信號線的輸入端為一低阻抗線，可等效為一電容 C_s 接地，接著串聯一條細長的高阻抗線，可等效為電感 L_s ，然後再串聯一開路截線，可等效為另一電容 C_a ；而在接地線中，共有三段高阻抗線，其中兩段各串聯一間隙到地，可等效為一電感 L_a 串聯一電容 C_b ，另一段則可等效為電感 L_b 到地。圖十(b)顯示全波模擬與實驗以及等效電路的 S 參數均相當吻合。

最後，我們將低通與高通的結構串接起來，得到一串接型帶通濾波器，如圖十一所

示。其中，我們忽略圖十一中傳輸線 d_g 的效應。圖中亦顯示全波模擬與實驗以及等效電路的 S 參數均相當吻合。如同前一節所述之串接型低通濾波器設計，根據系統規格，亦可將組成此帶通濾波器之低通與高通結構作週期性串接，來增進濾波器的選擇性。

2.3 平行耦合型

第三年的研究，為進一步改善帶通濾波器於止帶的截止率，吾人提出一種新式平行耦合共面波導帶通濾波器[8]，可達到縮小電路面積，並於高頻與低頻止帶產生兩個傳輸零點的效果。

傳統平行耦合帶通濾波器並不具有傳輸零點，藉由引入交互耦合，可產生一個傳輸零點[9]、[10]，若再進一步利用集總元件來形成阻抗反轉器[11]、[12]，則可於低頻及高頻止帶各產生一個傳輸零點，而大幅改善濾波器之止帶截止率。

圖十二(a)為本研究所提新式平行耦合二階濾波器之電路模型，係於傳統平行耦合濾波器的耦合線段間，加入一並聯電感，藉其與阻抗反轉器的等效關係，可增加濾波器階數，再利用間隙電容達成交互耦合，來產生兩個傳輸零點。若忽略交互耦合現象，其等效電路如圖十二(b)-(c)所示，可知此濾波器與 $\lambda/4$ 共振器帶通濾波器等效，故可利用傳統濾波器合成公式，直接推導出濾波器之設計參數，大大增進設計的方便性。

圖十三(a)為平行耦合二階共面波導帶通濾波器之電路佈局圖。係於傳統平行耦合濾波器的耦合線段間，利用金屬帶線實現一並聯電感，並利用間隙電容達成交互耦合，來產生兩個傳輸零點。此濾波器電路製作於一氧化鋁

Al_2O_3 基板上 ($\epsilon_r = 9.9$, $h = 0.381\text{mm}$, $\tan \delta = 0.002$)，圖十三(b)為其量測與模擬結果，兩者頻率響應大致符合，但因電路製作誤差造成頻率漂移。濾波器中心頻率約為 41GHz，通帶插入損耗約為 1.85dB。此濾波器於低頻和高頻止帶各有一傳輸零點，故可大幅改善其截止率。

為進一步增進濾波器效能，本研究亦設計一新式平行耦合四階共面波導帶通濾波器，圖十四為此四階濾波器之電路模型及等效電路，於前述二階濾波器的輸出入端，各加上一並聯電容來實現阻抗反轉器，可提高濾波器階數為四階，再利用間隙電容達成交互耦合，來產生兩個傳輸零點。此外，依其與傳統 $\lambda/4$ 共振器帶通濾波器之等效關係，即可推導出對應的濾波器設計公式。

圖十五(a)為此平行耦合四階共面波導帶通濾波器之電路佈局圖。係利用共面波導開路截線來實現並聯電容，再以間隙電容達成交互耦合，來產生兩個傳輸零點，以增進濾波器截止率。圖十五(b)為其量測與模擬結果，兩者頻率響應大致符合。此濾波器插入損失在 37~43GHz 皆小於 2dB，通帶反射係數皆大於 12.7dB，可符合設計規格。又因將傳輸零點設計於 32.5GHz，使其衰減量達到 50dB，優於設計規格。

四. 結論

本研究發展數種低通與帶通濾波器，供單面型微波通訊系統之用。在低通濾波器的設計上，以一維串接的方式，來改善止帶衰減量的不足。此種方式並不需要改變原來所設計的共

面波導低通濾波器的結構，只要簡單的串接起來，便可得到想要的止帶衰減量，當串接的個數越多，就可以得到越寬的止帶頻寬，進而改善低通濾波器的效能。

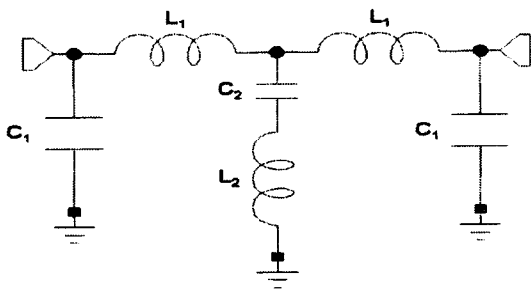
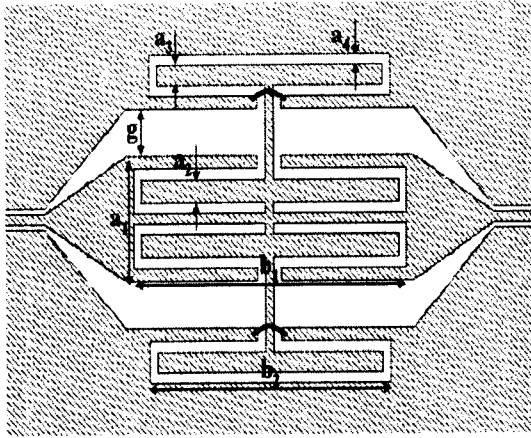
對於帶通濾波器的設計，本研究先以各式共面波導截線作為基礎，完成截線型共面波導帶通濾波器的設計。再進一步利用串接型帶通濾波器的概念，把一個帶通的頻率響應拆成低頻與高頻兩部分，個別作設計，可將設計帶通濾波器的困難度大大的降低。此外，為增進濾波器於止帶的截止率，另提出新式平行耦合共面波導帶通濾波器，於低頻及高頻止帶各具有一傳輸零點，可在不增加電路面積之下，大幅增進濾波器的選擇度。

對於本研究所提之濾波器，吾人皆提出簡便之等效電路，作為設計與分析的工具。本研究提之共面波導低通與帶通濾波器，兼具高效能及設計簡便的優點，故很適合於單面單晶微波積體電路的應用上。

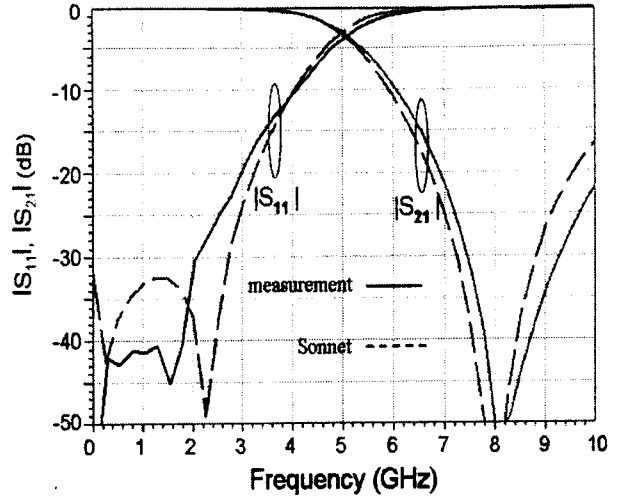
五. 參考文獻

- [1] K. Hettak, N. Dib, A.-F. Sheta, and S. Toutain, "A class of novel uniplanar series resonators and their implementation in original applications," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 46, pp.1270-1276, Sept. 1998.
- [2] K. Hettak, N. Dib, A. Omar, G.-Y. Delisle, M. Stubbs, and S. Toutain, "A useful new class of miniature CPW shunt stubs and its impact on millimeter-wave integrated circuits," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 47, pp.2340-2349, Dec. 1999.

- [3] G. E. Ponchak and L. P. B. Katehi, "Open- and short-circuit terminated series stubs in finite-width coplanar waveguide on silicon," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, pp. 970-976, June 1997.
- [4] F.-L. Lin, C.-W. Chiu, and R.-B. Wu, "Coplanar waveguide bandpass filter - a ribbon-of-brick-wall design," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol.43 pp.1589-1596, July 1995.
- [5] M.-L. Her, C.-M. Chang, C.-H. Lee, and Y.-C. Chiou, "Analysis of slot-loaded end-coupled resonator CPW bandpass filters," in *Asia-Pacific Microwave Conf. Proc.*, pp.326-329, 2001.
- [6] Y.-K. Kuo, C.-H. Wang, and C.H. Chen, "Novel reduced-size coplanar-waveguide bandpass filters," *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, vol. 11, pp.65-67, Feb. 2001.
- [7] Y.-S. Lin, W.-C. Kuo, C.-H. Wang, and C. H. Chen, "Wideband coplanar-waveguide bandpass filters with good stopband rejection," *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, Sept. 2004.
- [8] Y.-S. Lin, M.-S. Hsu, C.-H. Wang, and C. H. Chen, "Compact lumped-distributed parallel-coupled bandpass filters based on conductor-backed coplanar-waveguide," submitted to 2004 *Asia-Pacific Microwave Conf.*.
- [9] Y.-M. Yan, Y.-T. Chang, H. Wang, R.-B. Wu, and C. H. Chen, "Highly selective microstrip bandpass filter in Ka-band" in *32nd Eur. Microwave Conf. Proc.*, pp. 1137-1140, 2002.
- [10] J.-S. Chih, C.-H. Wang, Y.-S. Lin, and C. H. Chen, "Coplanar-waveguide coupled-line bandpass filter with attenuation poles in upper and lower rejection bands" in *Asia-Pacific Microwave Conf. Proc.*, pp. 467-470, 2003.
- [11] Y.-S. Lin and C. H. Chen, "Novel balanced microstrip coupled-line bandpass filters," in *2004 URSI Int. Symp. on Electromagnetic Theory*, pp. 567-569.
- [12] C.-H. Wang, Y.-S. Lin, and C. H. Chen, "Novel inductance-incorporated microstrip coupled-line bandpass filters with two attenuation poles," in *IEEE Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1979-1982, 2004.

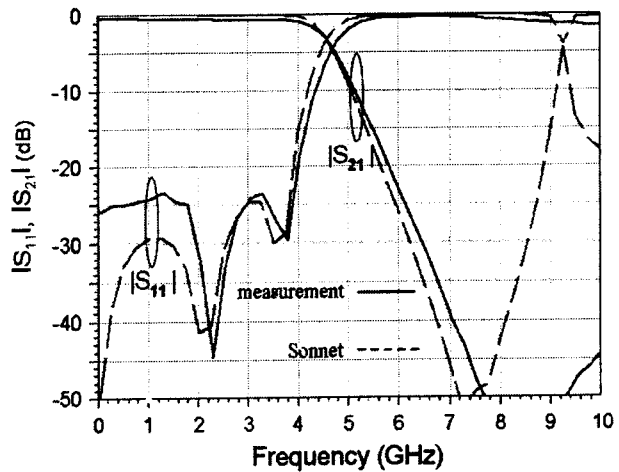
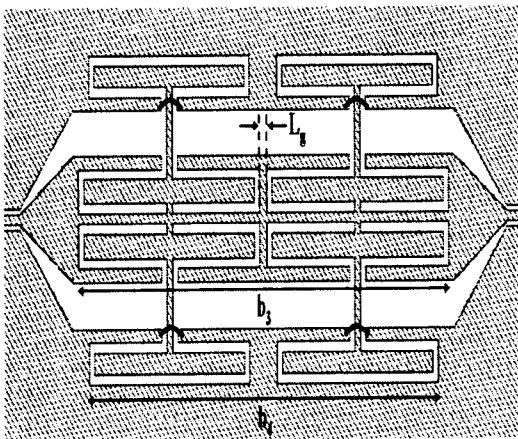


(a)

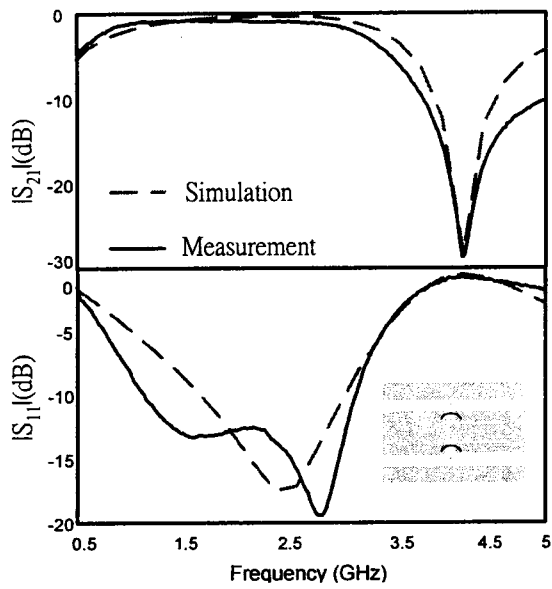


(b)

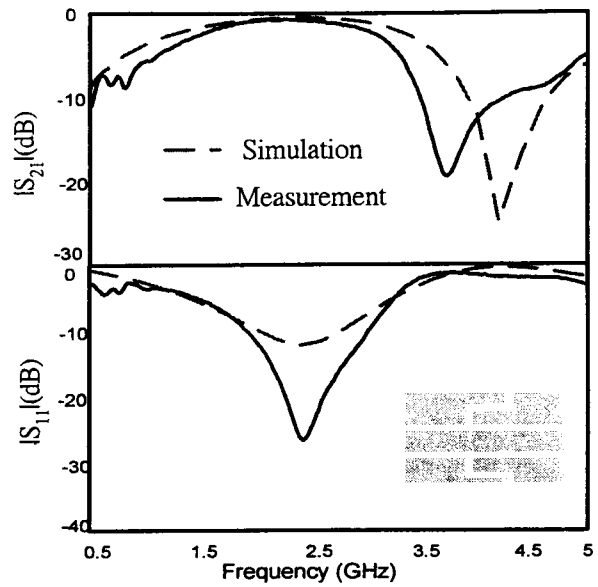
圖一. 共面波導低通濾波器，(a)結構與等效電路模型($a_1=1.22$, $a_2=0.23$, $a_3=0.20$, $a_4=0.10$, $g=0.46$, $b_1=3.45$, $b_2=3.05$, unit: mm)。(b) S 參數圖。此結構製作在氧化鋁基板($\epsilon_r=9.9$, $h=0.38\text{mm}$, $\tan \delta=0.005$)。



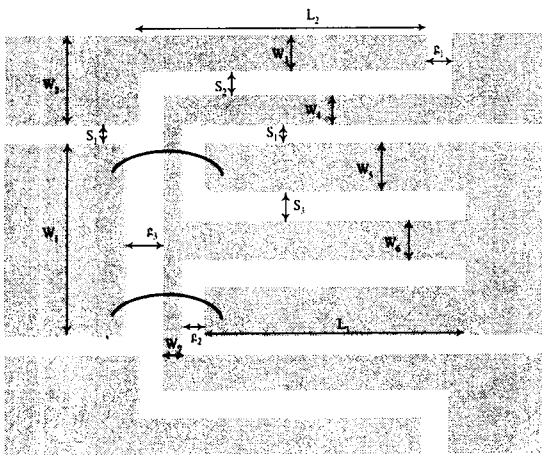
圖二. 串接型共面波導低通濾波器之結構($L_g=0.13$, $b_3=7.04$, $b_4=6.63$, unit: mm)與 S 參數圖。



圖三. 共面波導 $\lambda/4$ 並接短路截線之模擬與量測。

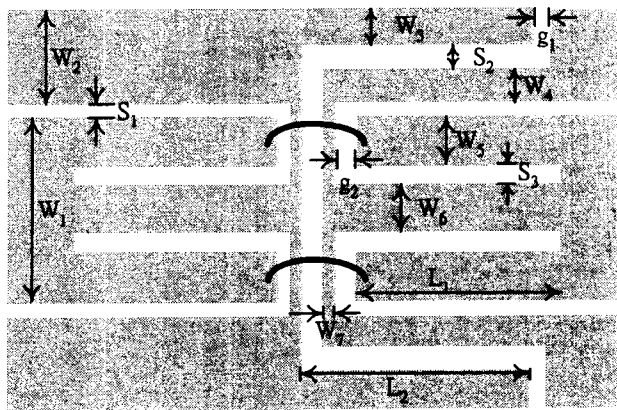


圖四. 共面波導 $\lambda/4$ 串接開路截線之模擬與量測。



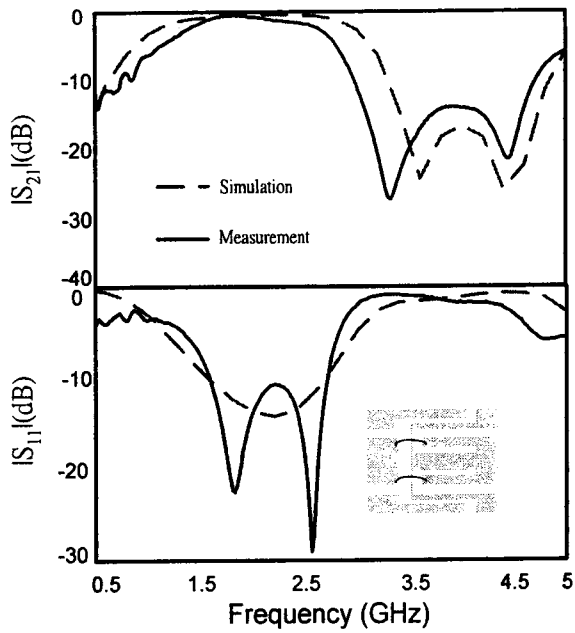
圖五. 截線型共面波導二階帶通濾波器之佈局。

$W_1=12.2$, $W_2=6.4$, $W_3=2.6$, $W_4=2.4$, $W_5=4.2$,
 $W_6=3$, $W_7=1$, $S_1=0.6$, $S_2=1.4$, $S_3=0.4$, $L_1=17.5$,
 $L_2=18$, $g_1=0.5$, $g_2=0.5$, $g_3=3$ (unit=mm).

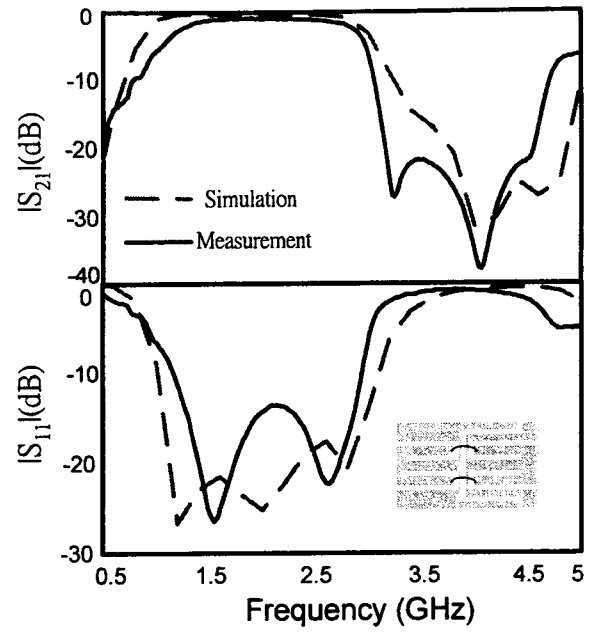


圖六. 截線型共面波導三階帶通濾波器之佈局。

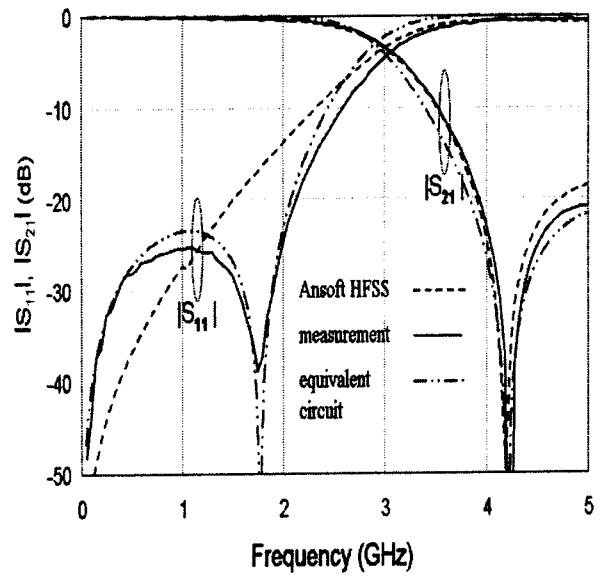
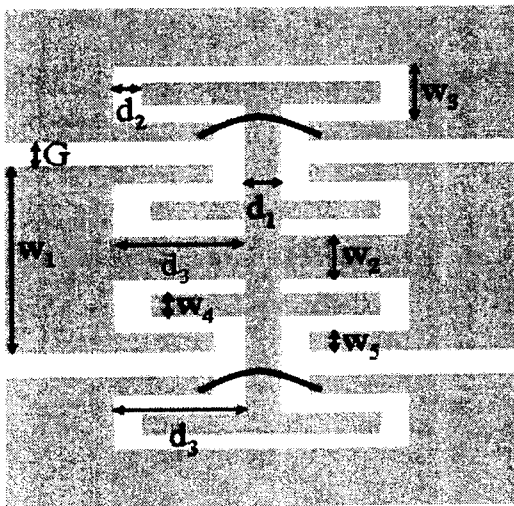
$W_1=10.2$, $W_2=6.4$, $W_3=2.2$, $W_4=2.2$,
 $W_5=3.4$, $W_6=3$, $W_7=1$, $S_1=0.6$, $S_2=2$, $S_3=0.4$,
 $L_1=17.5$, $L_2=18$, $g_1=0.5$, $g_2=0.5$ (unit=mm).



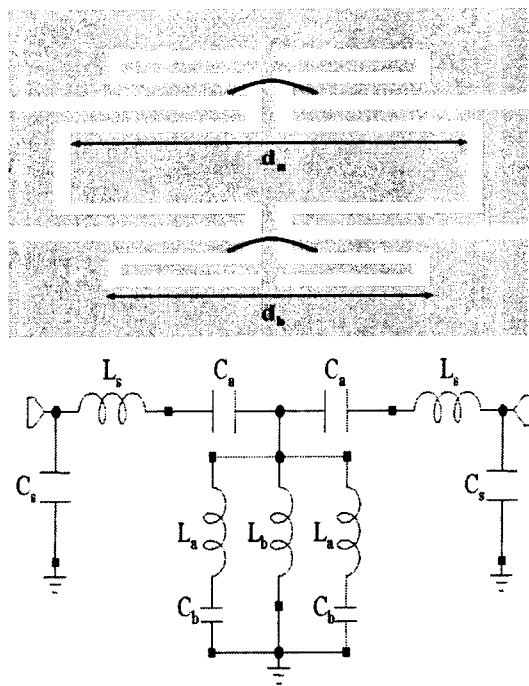
圖七. 截線型共面波導二階帶通濾波器之模擬與量測。



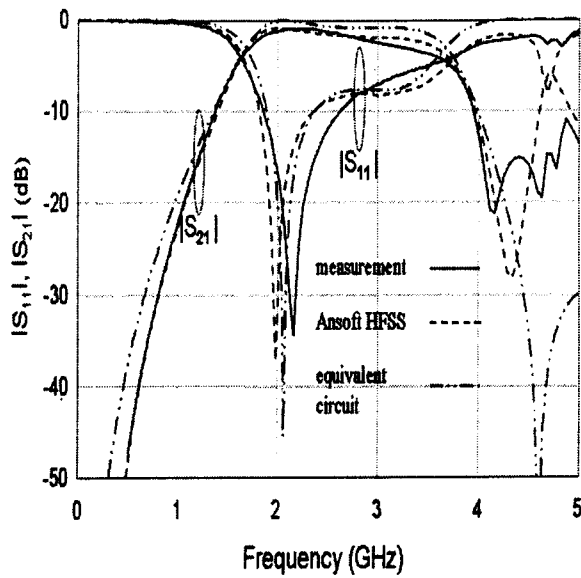
圖八. 截線型共面波導三階帶通濾波器之模擬與量測。



圖九. 共面波導低通濾波器之結構($G=1$, $W_1=9$, $W_2=2$, $W_3=2.5$, $W_4=1$, $W_5=1$, $d_1=1$, $d_2=0.75$, $d_3=3.5$, unit: mm) 與 S 參數圖。此結構製作在 FR4 基板 ($\epsilon_r=4.3$, $h=1.6\text{mm}$, $\tan \delta=0.022$)。

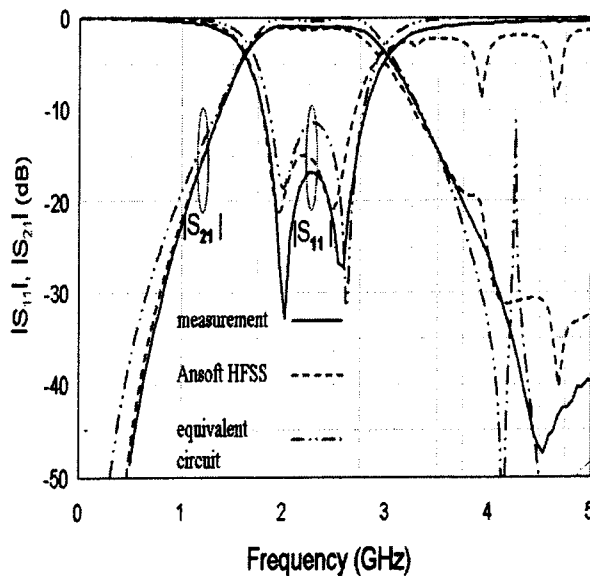
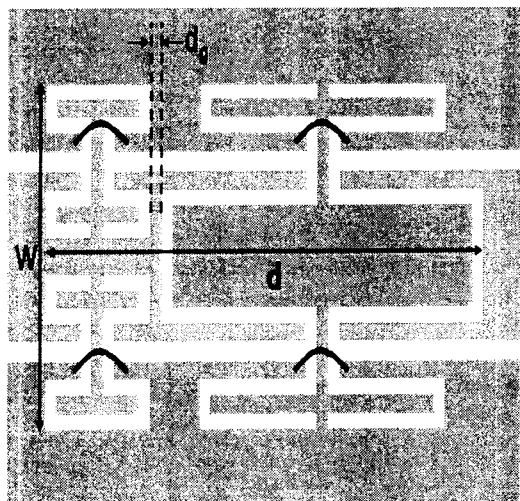


(a)

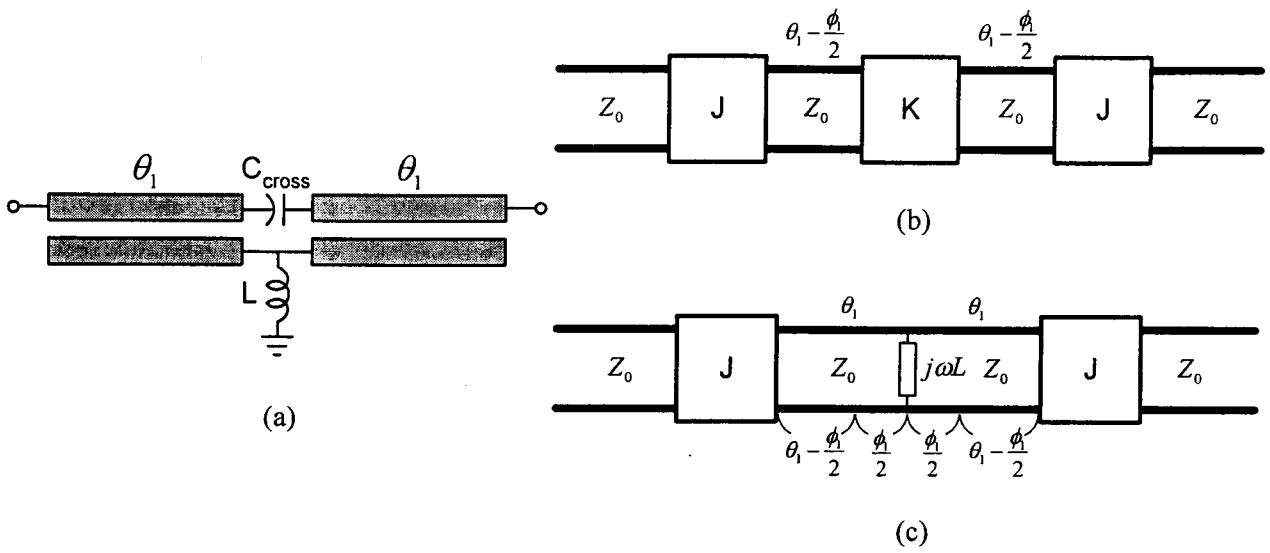


(b)

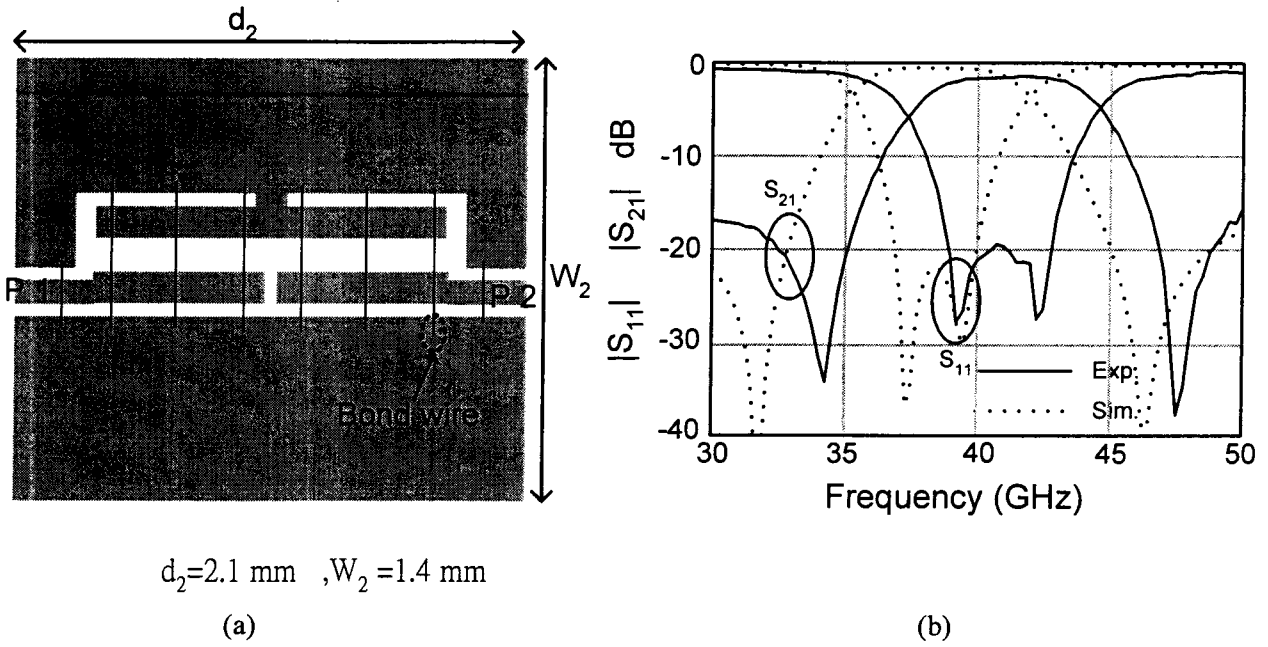
圖十. 共面波導高通濾波器，(a)結構 ($d_a = 23.5\text{mm}$, $d_b = 19\text{mm}$)與等效電路模型，(b) S 參數圖。結構中的其他參數皆與圖九相同。



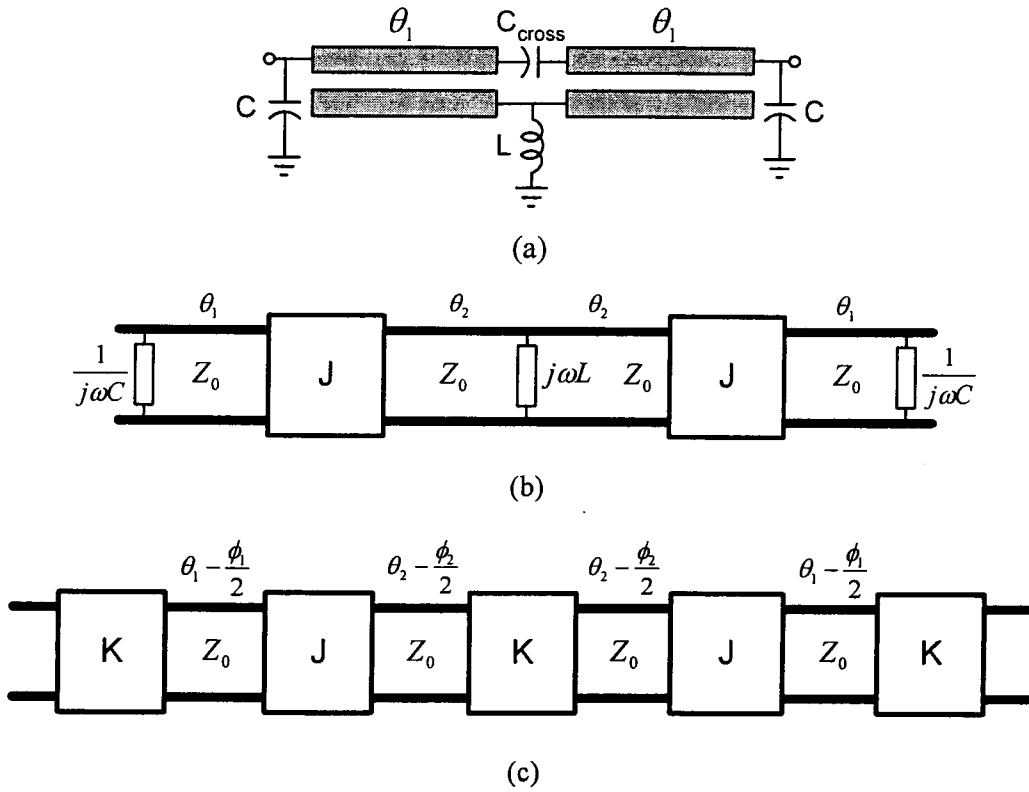
圖十一. 串接型共面波導帶通濾波器之結構($d=34\text{mm}$, $d_g=1\text{mm}$, $W=18\text{mm}$)與 S 參數圖。



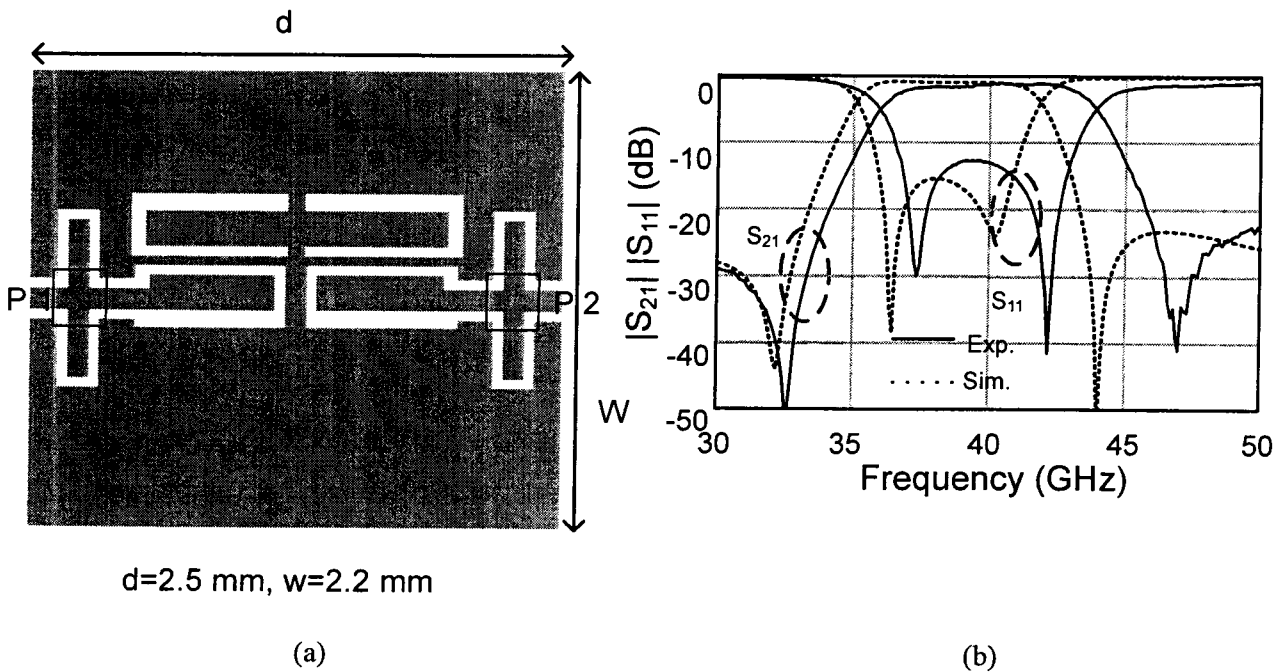
圖十二. 平行耦合二階帶通濾波器，(a)電路模型，(b)-(c)忽略交互耦合現象之等效電路模型。



圖十三. 平行耦合二階共面波導帶通濾波器，(a)結構，(b) S 參數圖。



圖十四. 平行耦合四階帶通濾波器，(a)電路模型，(b)-(c)忽略交互耦合現象之等效電路模型。



圖十五. 平行耦合四階共面波導帶通濾波器，(a)結構，(b) S 參數圖。