

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

(總計畫)(3/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC91-2219-E-009-026-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立交通大學電信工程學系

計畫主持人：張志揚

共同主持人：吳慕鄉，林鵬，陳家富

計畫參與人員：陳正中、湯敬文、林穎卿、謝旻芳、徐釗暉、范振國、廖家興、游志成、林琦軒、林建良、李延煒、管正平、鮑宣凱、彭若慈、王滋銘、陳建銘、吳偉誠、范瑋寒

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 10 月 14 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫總報告

薄膜型微波通訊被動元件之設計與功能測試

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 91 - 2219 - E - 009 - 026

執行期間： 89 年 8 月 1 日至 92 年 7 月

31 日

計畫主持人：張 志 揚

共同主持人：吳 慕 鄉

本期中報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位： 國 立 交 通 大 學

中 華 民 國 92 年 10 月 13 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫總報告

薄膜型微波通訊被動元件之設計與功能測試

Design and measurement of thin-film microwave communication passive devices

計畫編號：NSC 91-2219-E-009-026

執行期限：89年8月1日至92年7月31日

主持人：張志揚 交通大學電信系

共同主持人：吳慕鄉 大同工學院電機系

協同研究人員：施文欽 大同大學光電所

陳家富 交通大學材料科學與工程

學系

林鵬 交通大學材料科學與工程

學系

一、中文摘要

在子計劃一中，完成了小型化濾波器的設計、微型化支線型 3-dB 混成器、緊耦合混成器及寬頻多節式方向混成器的設計；在表面聲波濾波器方面，建立多層結構表面聲波特性的理論分析程式，並對氧化鋅薄膜表面聲波濾波器提出一套設計流程，並依此流程探討氧化鋅薄膜的常態化厚度及百分比頻寬不同時對濾波器的響應之影響。

在子計劃二中，以濺鍍法在氧化鋁基板上製作高介電薄膜型微波通訊被動元件，及研究電極與介質界面間的性質，並探討在高頻下的介電性質，最後開發以使用不同介電特性之介電層來製作薄膜型微波通訊被動元件之技術。

在子計劃三中，利用熱電子輔助化學氣相沉積法，在矽晶片成長大面積的多晶鑽石膜。而氧化鋅由於其極佳的壓電特性，及其易於利用濺鍍法沉積於各種基板上的特性，近年來廣泛地被選為成長壓電薄膜的材料。高均勻品質的鑽石膜結合上高優選方向的氧化鋅薄膜，及利用舉離法所研製出的交趾狀電極，製作出鑽石表面聲波濾波器。

關鍵詞：薄膜型元件、小型化元件、濾波器、混成器、表面聲波濾波器、熱燈絲

化學氣相沉積、交趾式電極

Abstract

The sub-project has finished the development of miniaturize filter, miniaturized branch line 3dB coupler, tight-coupling couplers and broadband multi-section directional couplers. In respect of SAW filter, we have constructed analytic programs of multilayer SAW filter and presented the principles and the flow chart for the design of ZnO thin-film Saw filter. Then we investigate the effects of the normalized thickness of ZnO thin-film and fractional bandwidth on SAW filter design. Finally, we have improved second effects that filter exists inherently.

The sub-project has manufactured high dielectric thin-film microwave communication passive devices on a Al_2O_3 substrate by sputtering. We surveyed properties between electrode and surface of medium and discussed properties of dielectric at high frequency. Finally, we used different properties of dielectric to develop techniques of thin-film microwave communication passive devices.

The sub-project has developed the large area of polycrystalline diamond film on silicon by Hot Filament CVD (HFCVD). Zinc Oxide, which has strong piezoelectric effect and sputtered on a variety of substrates, is a nature choice as the piezoelectric film layer in recent years. High uniformity of quality of diamond associated highly preferred orientation ZnO thin film and the interdigital transducers (IDTs) fabricated by lift-off process exhibit wonderful performance of diamond SAW filters.

Keywords: Thin-film component, miniaturize component, filter, branch line coupler, broadband multi-section directional coupler, saw filter, HFCVD, IDTs

二、緣由與目的

無線通訊將是二十一世紀初葉發展最快速的產業之一，我國國內也預期它將是繼微積體電路產業之後下一個明星產業，而射頻技術在整個無線通訊技術中佔有很重要的地位，無論主動與被動元件都有很大的進展。若以大哥大接收機為例，往往射頻被動元件的總價值不會低於主動元件的總價值。此外被動元件的小型化不僅受到各個無線通訊大廠的重視，世界各國重要研究單位也莫不把它當成重點來加以研究。

就通訊系統所使用的濾波器而言，一般在 1GHz 以下表面聲波元件[1]佔有很大的優勢，而高於 1GHz 則因為表面聲波元件交指狀電極變的非常細，以致生產成本過高及製程技術困難。倘若能將聲波傳遞的速度提高，則亦可使表面聲波濾波器的工作頻率提高(中心頻率=波速/波長)。在現有的材料中，鑽石由於具有最高的聲速(~10000m/sec)，因此若將其與壓電性薄膜相結合時，在製作高頻表面聲波元件時，可提供很大的優點

我們擬使用薄膜來製作其元件，並將以射頻濺鍍法製作之 $(Ta_2O_5)_{1-x}(TiO_2)_x$ 高介電薄膜及高分子 Polyimide 之低介電薄膜製作出微波薄膜式被動元件，包括

濾波器及耦合器，並分別量測其高頻下之特性。在表面聲波濾波器方面，我們將探討氧化鋅薄膜表面聲波濾波器及鑽石表面聲波濾波器。

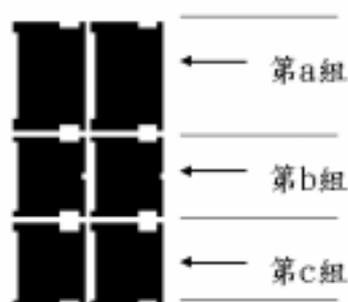
三、實驗方法

(1) 薄膜型濾波器及混成器

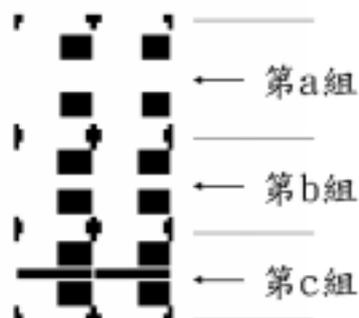
圖一、圖二及圖三所示為第一子計畫設計之五組薄膜型濾波器及一組混成器之 Layout，本計畫依此設計開發相關之製程，完成製作。



第一層底電極光罩圖形

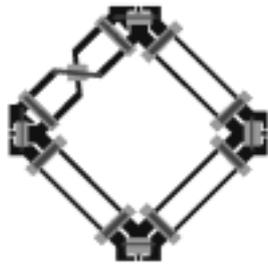


第二層介電薄膜光罩圖形



第三層上電極光罩圖形

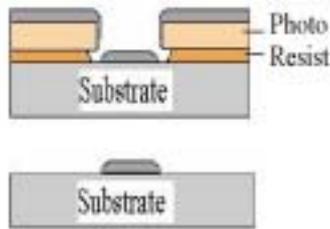
圖一 濾波器(a, b, c 三組)光罩圖型



圖二 混成器結構光罩圖形

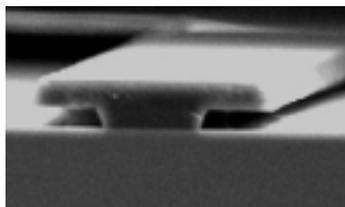
a、b、c 三組濾波器之製作，乃以氧化鋁(Al_2O_3)為基材，以微影製程技術，在國家奈米元件實驗室之黃光室裡進行製作 pattern，以改良式之 lift-off 技術製作出 undercutting 之光阻圖形，改善製作出的金屬圖形，避免底電極金屬尖端穿刺過介電層，與上電極接觸造成短路，其示意圖如圖四所示。

氧化鋁基材首先塗上一層 HMDS 讓厚膜光阻可以附著在基板上，再以 spin coating 的方式鍍上兩層光阻，分別為 LOR50B 及 AZP4620，經過軟烤後曝光、顯影等步驟，最後在 D. I. Water 中定影即完成光阻 pattern 的製作，圖四為製作出光阻的截面圖，由圖中可發現已有 undercutting 出現。底電極、介電薄膜和上電極皆用此方式來完成其 pattern 製作。

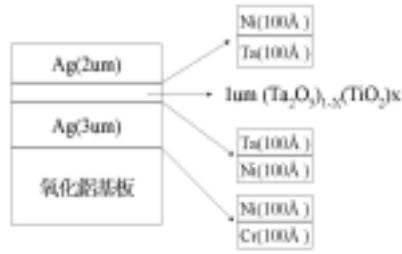


圖四 undercutting 示意圖

1. 底電極製備：以熱蒸鍍法鍍上底電極材料 Ag，因為考慮在氧化鋁基板上附著力的問題，所以先在氧化鋁基板上以熱蒸鍍法鍍上 Cr、Ni，形成一 Cr/Ni/Ag 的底電極。並且考慮電極材料 Ag 與介電層間的 adhesion，所以在 Ag 上方鍍上 Ni/Ta，即完成形成結構為 Cr/Ni/Ag/Ni/Ta 之複合式底電極。
 2. 介電薄膜製備：以濺鍍法鍍上一層約 1um 的 $(\text{Ta}_2\text{O}_5)_{1-x}(\text{TiO}_2)_x$ 的介電薄膜。
 3. 上電極製備：以熱蒸鍍法鍍上結構為 Ta/Ni/Ag 上電極。
- 即完成總結構為 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cr/Ni/Ag/Ni/Ta}/(\text{Ta}_2\text{O}_5)_{1-x}(\text{TiO}_2)_x/\text{Ta/Ni/Ag}$ 之濾波器之製作。



圖五 undercutting 光阻圖型



圖六 濾波器結構剖面圖

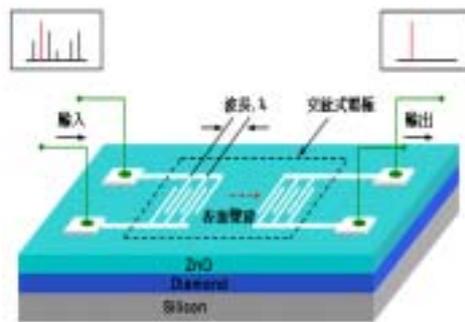
混成器的光罩圖型如圖二所示，氧化鋁基材首先塗上一層 HMDS，再以 spin coating 的方式鍍上兩層光阻，分別為 LOR 50B 及 AZ 5214E，經過軟烤後曝光、顯影等步驟，最後在 D. I. Water 中定影即完成光阻 pattern 的製作。底電極、介電薄膜和上電極皆用此方式來完成其 pattern 製作。

1. 底電極製備：與濾波器(a, b, c 三組)底電極相同但因為 Ag 與高分子型介電層附著性良好，所以不須鍍 Ni 及 Ta，底電極結構為 Cr/Ni/Ag。
2. 介電薄膜製備：使用 spin coating 鍍上兩層約 1um 厚的 Polyimide 薄膜，再放入氮氣氛下之爐管中 400°C 兩個小時，進行 Curing。
3. 上電極製備：以熱蒸鍍法鍍上 Cr/Ni/Ag 之上電極。

總結構為 $Al_2O_3/Cr/Ni/Ag/PI2556/Cr/Ni/Ag$ 。

(2)表面聲波濾波器

基本的表面聲波濾波器如圖七所示。為配合半導體製程，以矽晶片為主要的基材；矽晶片上的鑽石薄膜，主要作為傳遞表面聲波的媒介；氧化鋅則作為壓電薄膜，將上層鋁電極所引入的電訊號，轉變為機械訊號。

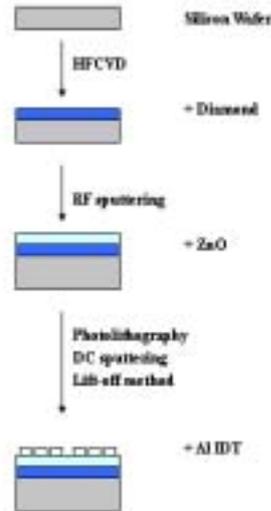


圖七 基本的表面聲波濾波器示意圖

鑽石表面聲波濾波器的製作流程如圖八所示。為配合半導體製程，製作鑽石表面聲波濾波器時，首先以矽晶片為最下方的底材；再鍍上鑽石薄膜作為傳遞表面聲波的媒介；氧化鋅則作為壓電薄膜，將上層鋁電極所引入的電訊號，轉變為機械訊號。成長大面積的鑽石薄膜，鍍膜方式選擇用熱電子輔助化學氣相沉積；成長氧化鋅薄膜，以高週波濺鍍進行；製作交趾鋁電極，則包括微影、鍍鋁

與舉離法等步驟。

一般鑽石薄膜鍍膜常使用微波電漿化學氣相沉積法[2]，或者是熱電子輔助化學氣相沉積法（另稱為熱燈絲法）[3]。在各種沉積鑽石膜的方法中，熱電子輔助 CVD 與其他 CVD 法比較，其加熱面積寬廣，且沒有火焰法的劇烈溫度梯度及電漿 CVD 法中電漿球形狀的限制，因此在膜厚與品質的均勻性方面，比較容易控制，最適合大面積成長，有利於降低生產成本。因此，本計畫鑽石鍍膜方式選擇用熱電子輔助化學氣相沉積法。



圖八 鑽石表面聲波濾波器的製作流程

四、設計流程

1. 薄膜濾波器：

用等效線路模型得到一個非常接近的解，再由此解做起始值，利用電磁模擬程式進行微調，如圖九所示。其中，發展出符合此濾波器的電路合成的設計公式及程式之等效電路，均是用理想傳輸線模型構成的。



圖九 濾波器之設計流程圖

2. 支線型混成器：

(1). 決定等效於 50 歐姆與 35.36 歐姆 90 度傳輸線的步階組抗傳輸線的 Z_L 、 L

與 Z_H 、 H_0 。

(2). 利用電磁模擬軟體 sonnet 模擬圖二中的電路結構，得到相對於 Z_L 、 L 與 Z_H 、 H 的物理尺寸。

(3). 利用電磁模擬軟體 sonnet 模擬整個支線型混成器電路。

3. 緊耦合混成器及寬頻多節式方向混成器：

(1). 決定電路中心頻率，及所要設計混成器的奇模阻抗 Z_{odd} 及偶模組抗 Z_{even} 值。

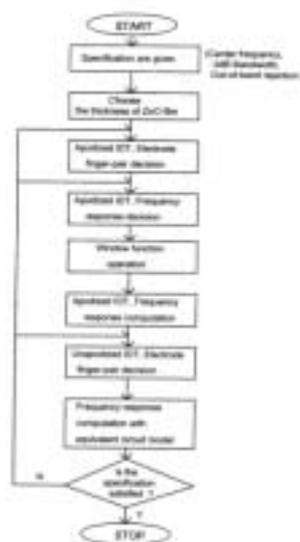
(2). 粗略計算金屬寬度、線距及耦合線長度。

(3). 利用電磁模擬軟體 sonnet 模擬多層電路結構在中心頻率。

(4). 調整奇模阻抗 Z_{odd} 及偶模組抗 Z_{even} 值，直到耦合係數為所需之值。

(5). 設計多節式方向混成器時，在利用電磁模擬軟體 sonnet 將各節混成器組合一起做整體模擬。

4. 氧化鋅薄表面聲波濾波器：

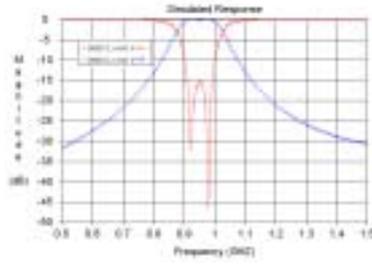


圖十 氧化鋅薄表面聲波濾波器設計

五、實驗結果

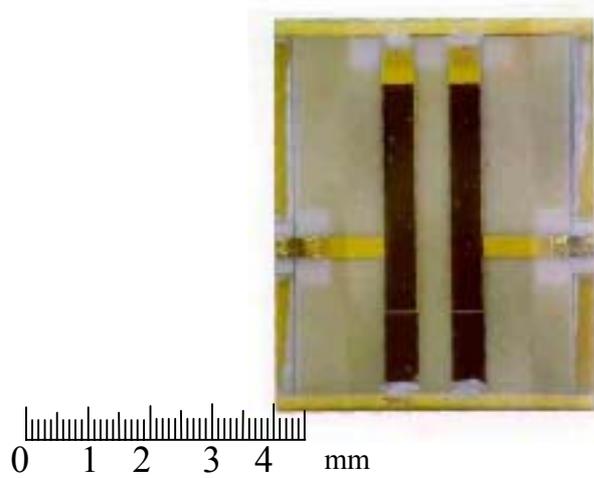
本實驗成功地利用兩層光阻形成改良式之光阻之 undercutting 之圖形，以 lift-off 剝離光阻之製程達到底電極、介電層及上電極之 pattern 之製作。並在底電極及上電極的部分，以多層金屬層結構形成之底電極，改善底電極與氧化鋁基材、底電極與介電層、介電層與上電極之 adhesion 之問題。

利用三度空間電磁模擬軟體 - Sonnet 所設計的薄膜濾波器散射參數特性如圖十一所示。厚度為 5um 的介電薄膜設計一組濾波器，中心頻率設計在 950MHz，頻寬為 100MHz。

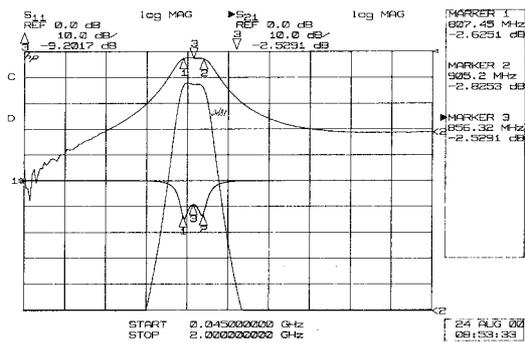


圖十一 薄膜濾波器的模擬結果

圖十二所呈現的是初步製作完成的薄膜濾波器外觀圖，其尺寸為 6.5 x 4.5 x 0.4 mm，而量測結果則呈現在圖十二。



圖十二 實際製作的濾波器外觀圖



圖十三 薄膜濾波器的量測結果

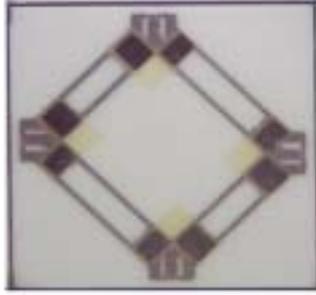
厚度為 1 μ m 的介電薄膜設計一組濾波器，濾波器中心頻率為 1GHz。



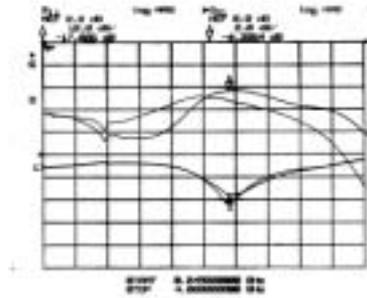
圖十四 實際製作的濾波器外觀圖

圖十五 薄膜濾波器的量測結果

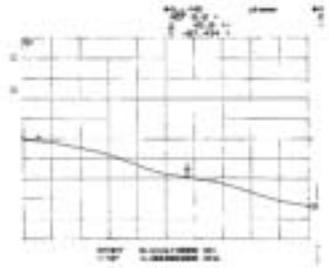
圖十六是薄膜支線型混成器的外觀圖，其尺寸約為 305milx305mil，圖十七、十八與十九是量測的結果，在圖十七顯示的是輸入端(port1)與兩個輸出端(port2,port3)之間的散射參數，其中反射系數最小的頻率約在 2.34GHz，其值介於-17dB 至 -20dB 之間， S_{21} 與 S_{31} 在相交點 2.05GHz 的值為-4.8dB。混成器的相位響應如圖十八所示，在 2.34GHz 達到 90 度的相位偏移。圖十九是輸入端與絕緣端之間的散射參數 S_{11} 與 S_{14} ，由圖可以看出在 2.34GHz， S_{11} 與 S_{14} 分別為-19.8dB 與-17.3dB



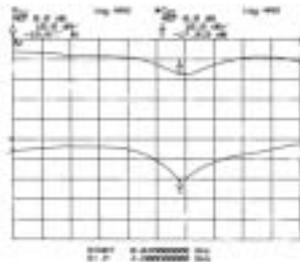
十六 實際製作的混成器的外觀圖



圖十七 混成器的量測結果: 兩個輸出端與輸入端的響應。

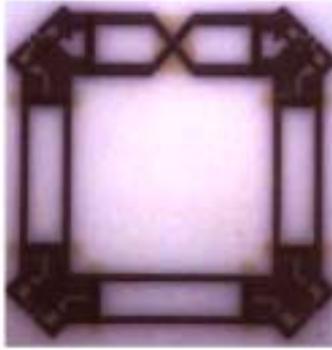


圖十八 混成器的量測結果: 相位響應

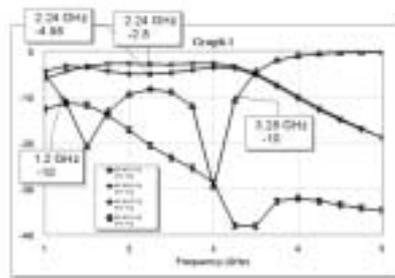


圖十九 混成器的量測結果: 絕緣響應

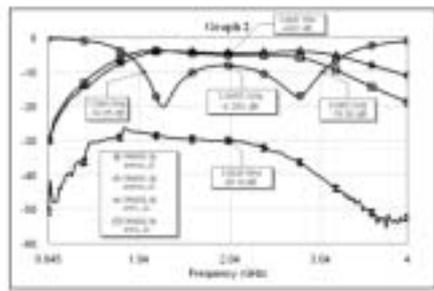
圖二十、圖二十一及圖二十二分別為薄膜式耦合器之實際製作之外觀圖、理論模擬圖及實際量測結果圖。



圖二十 混成器製作實際外觀圖

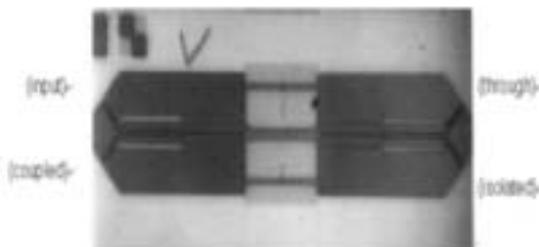


圖二十一 混成器理論模擬圖

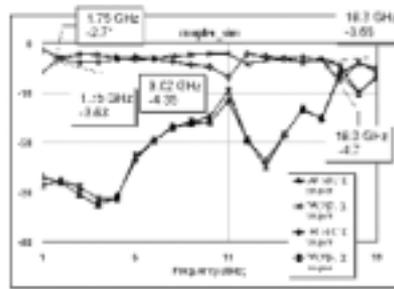


圖二十二 混成器量測圖

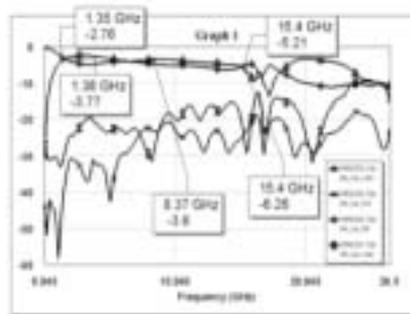
圖二十三為寬頻五節式方向混成器外觀圖，其尺寸為 170 mil x 730 mil。圖二十四電磁軟體 sonnet 模擬結果，圖二十五為量測結果。



圖二十三 寬頻五節式方向混成器外觀圖



圖二十四 電磁軟體 sonnet 模擬結果



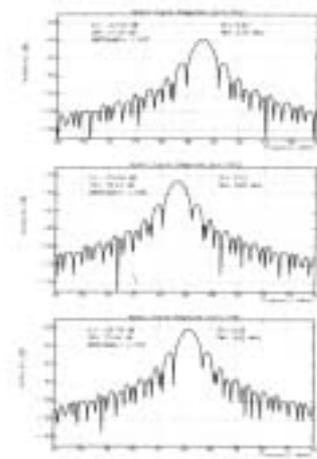
圖二十五 量測結果

表面聲波濾波器方面，由於薄膜的厚度與百分比頻寬(fractional bandwidth)為設計濾波器的兩個參數，因此在本研究中將探討不同厚度的氧化鋅薄膜與不同百分比頻寬下，對濾波器響應之影響，表一顯示兩種不同的光罩規格，兩者主要差異在於於頻寬百分比的不同。

	Mask 1	Mask 2	Unit
NP1 (apodized)	128	128	Pairs
NP2 (uniform)	40	40	Pairs
BW% (NP1)	2.5	5	
BW% (NP2)	2.5	2.5	
SB	40	40	dB
WL	56	56	μm

表一、兩種不同光罩規格

圖二十六 不同氧化鋅薄膜厚度下頻率響應之比較(Mask 1)



圖二十七 不同氧化鋅薄膜厚度下頻率響應之比較(Mask 2)

圖二十八 不同百分比頻寬之帶通濾波器頻率響應之比較(a)Mask 1 (b)Mask 2

鑽石表面聲波濾波器方面，表二為其中一組設計的參數值，由於鑽石擁有較

高的聲波傳遞速度，預計其頻率數可達 1.25 GHz。然而，本計畫執行時仍以 5 μ m 線寬交趾狀鋁電極進行試做。

Line width, d	2 μ m
Figure pairs, N	N1 = N2 = 50
Distance of input and output IDTs, D	D = 10 λ = 80 μ m
IDTs overlap, W	W = 60 λ = 480 μ m
Bonding pad	300 x 300 μ m
Die size	2.2 x 1.50 mm
Die spacing	200 μ m
Packing:	3.8 mmsq

表二、1.25 GHz SAW Filter 設計

實際製作元件時，先將具有壓電特性的氧化鋅薄膜，分別利用濺鍍方法在矽晶片，以及鑽石薄膜/矽晶片上成長。接著在氧化鋅薄膜上利用微影製程製作不同對數 (128, 64, 32 對) 的 5 μ m 線寬交趾狀鋁電極，最後利用網路分析儀量測帶通濾波器，圖二十九是分別在鑽石薄膜/矽晶片，以及矽晶片上的濾波器元件。由圖中，可以鑑別出 IDTs 的完整性。



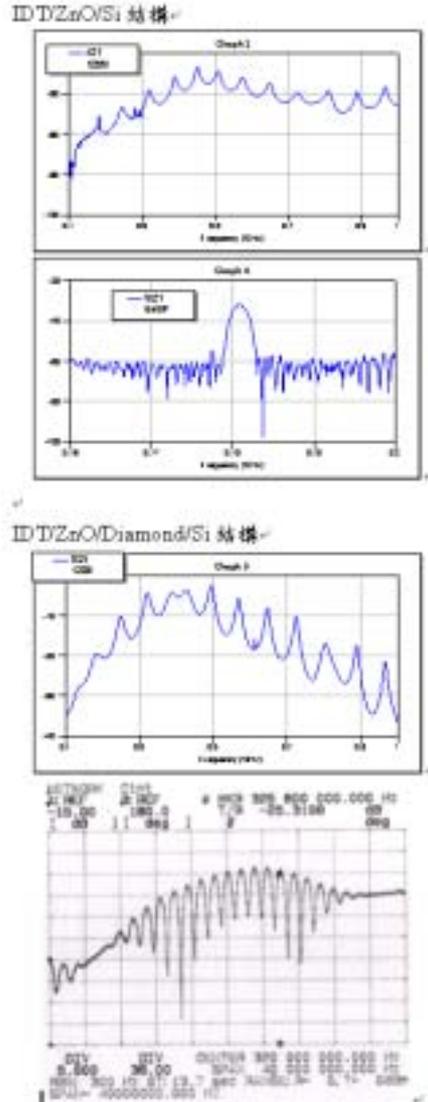
IDT/ZnO/Si 結構



IDT/ZnO/Diamond/Si 結構

圖二十九 光學顯微鏡下的表面聲波濾波器

圖三十是分別在鑽石薄膜/矽晶片，以及矽晶片上的濾波器元件(128 對電極)之頻率響應分析。



圖三十 不同結構濾波器的頻率響應

六、結論

實驗以薄膜為結構的濾波器及耦合器，由理論模擬與實際製作之結果發現，確實能達到小型化的優點，並成功製作出薄膜式的微波被動元件，若能使用更高介電常數材料的薄膜來設計，將能使元件的尺寸更為縮小。在實際應用上，可以選擇不同之介電常數之薄膜以迎合理論設計之所需，克服實際製作上之困難。

在表面聲波濾波器的方面，我們對氧化鋅薄膜表面聲波濾波器提出一套設計流程，並依此流程探討氧化鋅薄膜的常態化厚度及百分比頻寬不同時對濾波器的響應之影響。研究結果顯示：氧化鋅薄膜的常態化厚度越大且 apodized IDT 和 uniform IDT 具有同的百分比頻寬時，可得到嵌入損失較小旁帶抑制較大的濾波器響應特性。

而在實際製造鑽石表面聲波濾波器時，利用未經拋光的鑽石薄膜進行元件製作，製作出的元件無法出現帶通濾波器的特性，肇因於鑽石膜的表面過於粗糙，無法順利傳遞表面聲波；同時造成後續製程中，交趾式電極的圖案不完整。平滑

鑽石薄膜則由於與氧化鋅的附著力問題，帶通濾波器的特性並不明顯。然而，鑽石表面聲波濾波器的中心頻率為 326 Mb，比矽晶片上的元件 (181.4 Mb) 高出許多。

由於鑽石表面聲波濾波器在國內仍前瞻性嘗試，目前雖然在鑽石表面聲波濾波器的製作上，尚未出現良好的帶通濾波器的特性，但是相信在未来的通訊系統之中，隨著鑽石膜基材愈來愈容易取得，且價格日趨便宜的狀況下，以鑽石為基材的表面聲波元件將會廣大的應用在高頻元件上。

七、參考文獻

- [1] U.S. Patent, Tseng, "Thin-film integrated circuit with tank circuit characteristics and applications to thin-film filters and oscillators", Patent No. 4,166,258, Aug. 28, 1979.
- [2] C. F. Chen, C. L. Lin, T. M. Hong, *Growth of diamond from CO₂ - (C₂H₂, CH₄) gas system-without supplying additional hydrogen gas*; Surf. Coat. Technol. 52. (1992) 205.
- [3] 陳家富，洪昭明，陳勝雄，大面積鑽石膜合成裝置，中華民國新型發明 099268，84.3
- [4] H. Shinriki, T. Kisu et. al., *IEEE Transactions on Electron Devices.*, 37(1990)1939
- [5] C. Hashimoto, H. Okikawa et. al., *IEEE Transactions on Electron Devices.*, 36(1989)14
- [6] V. Mikhelashvili, G. Eisenstein *Microelectronic Reliability* 40 (2000) 657-658
- [7] A. Cappellani, J.L. Keddie, N.P. Barradas, S.M. Jackson *Solid-State Electronics* 43 (1999) 1095-1099
- [8] J. W. Adams, "A new optimal window," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 39, no. 8, pp. 1753-1769, Aug. 1969.
- [9] F. J. Harris, "On the use of windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform," *Proc. IEEE*, vol. 66, pp. 51-82, Jan. 1978.
- [10] A. R. Reddy, "Design of SAW bandpass filters using new window functions," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. and Frequency Control*, vol. 35, pp. 50-56, Jan. 1988.
- [11] R. H. Tancrell, "Analytic design of surface wave bandpass filters," *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, vol. SU-21, no.1, pp. 12-22, Jan. 1974.
- [12] C. K. Campbell, *Surface Acoustic Wave Devices and Their Signal Processing Applications*, Academic Press, Inc., Boston, 1989, pp.1-128.
- [13] H. Nakahata, K. Higaki, A. Hachigo, S. Shinkata, N. Fujimori, Y. Takahashi, T. Kajihara and Y. Yamamoto, *High Frequency Surface Acoustic Wave Filter Using ZnO/Diamond/Si structure*, *Jpn. J. Appl. Phys.* 33 (1994) 324-328.
- [14] P.R. Chalker, T.B. Joyce, C. Johnston, J.A.A. Crossley, J. Huddleston, M.D. Whitfield and R.B. Jackman, *Fabrication of aluminium nitride/ diamond and*

- gallium nitride/ diamond SAW devices*, *Diam. Relat. Mater.* 8 (1999) 309-313.
- [15] C. F. Chen, C. L. Lin, T. M. Hong, *Growth of diamond from CO₂ - (C₂H₂, CH₄) gas system-without supplying additional hydrogen gas*; *Surf. Coat. Technol.* 52. (1992) 205.
- [16] 王滋銘, 量產型大面積熱電子輔助化學氣相鑽石膜合成裝置之開發, 國立交大材料科學與工程研究所, 碩士論文, 92.6。
- [17] 李昇頤, 熱燈絲化學氣相沉積法於矽基材成長大面積鑽石膜之均勻性研究, 國立成大材料科學與工程研究所碩士論文, 89.6。
- [18] 管正平, 鑽石表面聲波濾波器之製作與特性分析, 國立交大材料科學與工程研究所, 碩士論文, 90.6。
- [19] H. Nakahata, S. Fujii, K. Higaki, A. Hachigo, H. Kitabayashi, S. Shikata and N. Fujimori, *Diamond-based surface acoustic wave devices*, *Semicond. Sci. Technol.* 18 (2003) S96-S104.