

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

陶瓷薄膜之微波介電性質研究及應用

Microwave dielectric characteristic and applications of ceramic thin film

計畫編號：NSC 90-2216-E-009-039

執行期限：90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

主持人：林鵬 國立交通大學材料科學及工程系

一、中文摘要

利用薄膜製程製作微小化元件之技術，為主要之趨勢之一，因此相關無線通訊被動元件利用薄膜技術設計製作，可以提高製程之準確性，並使得元件大小尺寸充分微小化。於微波應用上所使用之頻率大多是以往電子元件的數倍至數十倍；因此在微波的條件下本身材料的微波特性變化對元件設計與製作有很大的影響。本研究分別製作一簡易諧振器，藉以反推基板之等效介電常數，得於 6GHz 下 Al_2O_3 基板之介電常數介於 9.65-9.60 之間；另製作兩組高頻濾波器原設計共振頻率為 0.95GHz，其以 $(\text{Ta}_2\text{O}_5)_{1-x}-(\text{TiO}_2)_x$ 作為此濾波器之介電層，並以共平面波法量測元件之 S 參數。實測共振頻率各為 1.19 及 1.24GHz，此差異來自於下列原因：介電層厚度增加，濾波器共振頻率會往高頻移動。另固定介電層厚度改變其介電常數，其介電常數增加濾波器共振頻率會往低頻移動。而研究得知，介質之厚度、導線之平坦度、薄膜之均勻性等將直接影響材料之高頻等效介電常數，值得更進一步研究。

關鍵字：微波量測、陶瓷薄膜

Abstract

Thin film processing of passive components used in microwave communication system provides a more precise control of size, fewer steps of fabrication compared with conventional LTCC technique. Most of all, thin film

process is compatible with that of microwave integrated circuit (MICs). The key point to realize the thin-film passive devices is the availability of thin dielectric films, of which the dielectric properties are well characterized. In this study a basic microstrip resonator and two set of thin-film filters were designed and fabricated. Through the comparison between the simulated resonance frequency and the measured ones, the dielectric constants ϵ_r of the microstrip substrates and the dielectric films of the filters were estimated. The ϵ_r value of substrate is found to be about 9.6~9.65, which is close to that obtained from cavity method. The simulated resonance frequency of the filters was set at 0.95 GHz while the measured ones were 1.19 and 1.24 GHz. The deviation came from the variation of both ϵ_r and thickness of the dielectric films, and that caused the evaluation of ϵ_r value some uncertainty. More precise control of film thickness will be necessary for an accurate estimated dielectric constant of the films.

Keywords : thin films, microwave, dielectric

二、緣由與目的

目前無線行動通訊商品設計之趨勢逐漸朝向輕、薄、短、小之應用，然而產品所需求之功能不斷擴充，行動通訊之應用不在侷限於通話上，大量的資訊傳遞已成為市場主流；有鑑於此，對於元件製程之精準度與材料特性之要求更趨於嚴格。

而厚膜技術為目前產業的主流，但厚

膜技術對產品之精準度有其極限，其於製程中所牽涉之參數過多，導致產品精確性不易控制，故使用薄膜製程可使得元件之精確性極尺寸微小化明顯提升。以往薄膜製程主要應用於電子元件上，其元件使用之頻率一般小於 1 GHz；然而於微波應用上所使用之頻率大多是以以往電子元件的數倍至數十倍；因此，常用的薄膜材料，在微波的條件下本身材料的微波特性變化對元件設計與製作有很大的影響。

在操作頻率增加的情況下，相對地對應的波長會隨之縮短，當此波長接近於傳輸距離時，波的干涉行為會逐漸明顯，即在傳輸點上的振幅以及相位是隨時間而改。波在同一種介質環境下傳播皆是以 TEM 模式來進行，即在波傳遞方向與電場，磁場三者互相垂直。在微帶線的結構下，電磁波在兩個不同介質（空氣與基板）上進行，因此結構上其時變電場及時變磁場可以用 TEM 模式來加以討論；由於實際上波傳遞行為存在不均勻之介質環境（同時受到空氣與基板之影響），兩介質之電磁場的相位無法匹配，所以純 TEM 模式不能存在於微帶線中，又由於介質基板的厚度很小（ $< \lambda$ ），所以電磁場分佈很接近 TEM 波，故可以準 TEM 模式來解釋電磁波的傳遞行為，而在準 TEM 模式中，微帶線的介質與空氣可以用一常數 ϵ_{eff} 高頻等效介電常數的均勻介質取代，所以高頻等效介電常數可作為實際於高頻環境下介質之介電常數，藉此以決定連接線之線寬及線距。

介電薄膜之介電常數 ϵ_{eff} 與厚度是微波薄膜被動元件尺寸的重要決定因素，因此準確的介電常數值是必須建立的基礎參數。而介電常數本身會隨著外加電場頻率而改變。一般而言，頻率越高，材料內極化應變程度越弱，介電常數也越低。其定量變化甚難預測準確，故微波頻帶的介電常數值必須以實驗求之。此外，薄膜的介電常數值也隨製程條件變化而大幅變動。以目前於電子元件中所應用之介電薄膜大多於 MHz 頻率範圍下以平行電板法所測得，但在 GHz 頻率範圍則甚少報導。

而對於高頻等效介電常數 ϵ_{eff} 之量測方法大致可分為諧振頻率法及波穿透/反射等方法；諧振頻率技術是利用測量待測材料或元件之諧振頻率再進行分析，因此常利用（1）傳輸線耦合（2）以傳輸線結構組合成一諧振腔（3）直接將測試材料或元件放置於一圓柱狀諧振腔等結構進行測量。但對於傳輸線諧振技術，其電磁波邊緣效應極易造成量測誤差，而以諧振腔技術，其訊號耦合通常都很小，無法降低量測誤差。而對於波穿透/反射法，乃是對某一特定高頻元件進行高頻 S 參數（ S_{11} 、 S_{21} ）之量測，可準確反推相對應的高頻等效介電常數 ϵ_{eff} ，但量測設備昂貴，且注重於元件之量測及整體電路之量測，無法有效顯示材料之介電性質。

本計畫分為兩步驟：（A）以 Sonnet 設計一簡單之微帶線諧振器，其結構如圖一所示做出實踐元件候，並 Anritsu 3680V 搭配 HP8722 網路分析儀量測諧振器之中心頻率。（B）另外由交通大學電信研究所所張志揚教授協助以 Sonnet 軟體設計薄膜型微波濾波器元件，其中介電層以本實驗室之 $(\text{Ta}_2\text{O}_5)_{1-x}-(\text{TiO}_2)_x$ 薄膜技術，研製此一元件如圖二所示，並且以共平面波法（CPW），經由 CPW 轉接器轉接至 CPW 量測端，再經由網路分析儀量測此元件之 S 參數。

三、實驗方法

簡易諧振器之結構以表面平滑之 Al_2O_3 板厚約 375 μm ，底部以濺鍍法度以白金電級，上以鍍銀為導線，導線厚必須大於 3 μm ，以符合集膚效應。微帶線設計以 50 歐姆阻抗線 2 波長作為設計條件。

另一設計如圖二所示，以所設計出三組薄膜型濾波器之光罩進行元件製作，以氧化鋁為基材的濾波器元件電極 pattern 之製備是在黃光室內進行，使用改進的 lift-off 光阻，製作出 undercutting 的光阻圖型，以改善製作出的金屬圖形，可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。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 的方式鍍上兩層厚膜光阻，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；此外底電極備製：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約 1000Å 的 Cr、Ni，形成一 Cr/Ni/Ag 的底電極與介電層間的 Adhesion，所以在銀上方鍍上 Ni/Ti，即完成形成結構為 Cr/Ni/Ag/Ni/Ti 的底電極。於介電層方面，以濺鍍法鍍上一層約 1 μm 的 $(\text{Ta}_2\text{O}_5)_{1-x}(\text{TiO}_2)_x$ 的介電薄膜，而在上電極方面，以熱蒸鍍法鍍上結構為 Ti/Ni/Ag 上電極。即完成總結構為 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}/\text{Ni}/\text{Ag}/\text{Ni}/\text{Ti}/(\text{Ta}_2\text{O}_5)_{1-x}(\text{TiO}_2)_x/\text{Ti}/\text{Ni}/\text{Ag}$ 之濾波器。

高頻量測使用於微帶線諧振器之量測以 Anritsu 3680V 搭配 HP8722 網路分析儀量測諧振器之中心頻率。另濾波器方面以 CPW 法，經由 CPW 轉接器轉接至 CPW 量測端，再經由網路分析儀量測此元件之 S 參數。

四、結果與討論

(A) 簡易諧振器

實驗設計以中心頻率 6GHz 作為設計，經 Microwave office 軟體設計微帶線線寬與線長，將此微帶線之條件依 Sonnet 軟體模擬得圖三；由此得知模擬條件中，中心頻率隨著介電常數之增加而向低頻偏移。而實際製作之諧振器經過量測後其中心頻率為 5.96GHz，根據實驗結果與模擬對比推測其 Al_2O_3 基板之介電常數介於 9.65~9.60 之間。而以 Damaskos Open Resonator Cavity Material Measurement System 900T 量測此一基板之介電常數為 9.7。此兩種量測產生不同之介電常數結果，根據圖四不同共振頻率下介電常數與阻抗值之圖顯示，在同樣的條件下，阻抗值隨介電常數之增加而減少，隨頻率增加而增加，呈線性關係。由此若量測之中心頻率為 5.96GHz，其介電常數對應之阻抗

之應為 48.5 歐姆。而根據 Cavity 所測得之介電常數值為 9.7，其對應之阻抗值為 48.4 歐姆。可推知於微帶線諧振器之量測上有損失出現。推測損失原因包含導線表面粗糙度之影響，因為於高頻下，電磁波之運動是於金屬表面上，故表面之粗糙度，將增加電磁波之損失。另外開放空間下電磁波之輻射損失也是影響量測結果的因素之一。另線寬與線長之準確性也明顯影響量測結果。

(B) 高頻濾波器

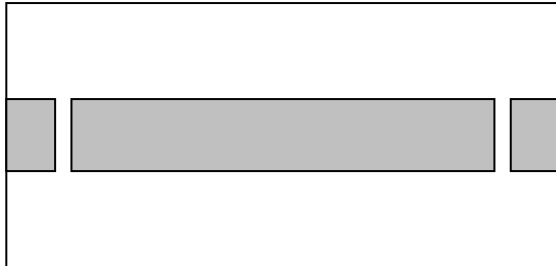
另本實驗分別設計甲、乙組濾波器元件，初步量測結果甲組濾波器的 return loss 為 8.2dB，transmission loss 為 6.7dB，共振頻率為 1.19GHz(原設計的共振頻率為 0.95GHz)理論模擬與實際量測結果如圖五所示；而乙組濾波器的 return loss 為 7.1dB，transmission loss 為 10.8dB，共振頻率為 1.24GHz(原設計的共振頻率為 0.95GHz)理論模擬與實際量測結果如圖六所示；可發現 A、B 兩組濾波器的共振頻率接發生偏移。以三度空間電磁模擬軟體 Sonnet 進行介電層之介電常數模擬。分別改變厚度對共振頻率的影響，如圖七所示，當介電層厚度增加，共振頻率會往高頻移動。另固定介電層厚度改變其介電常數，如圖八所示，介電常數增加共振頻率會往低頻移動。由以上結果可知，甲、乙兩組實做濾波器共振頻率偏高，推測原因為介電層厚度大於 1μm，或是介電常數大於 22，未來實驗將精準控制介電層的厚度，則可以反推介電層的介電常數。

五、結論

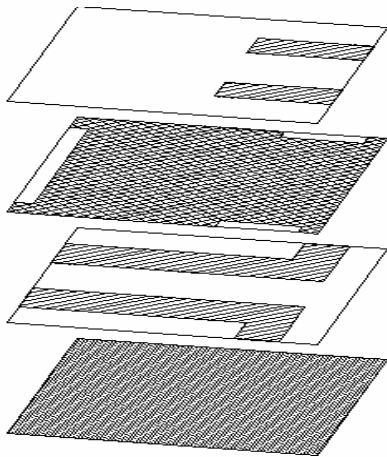
1. 若能準確控制微帶線之寬度與長度將可準確的量測到諧振器之中心頻率，以此推測出薄膜或基板於高頻下實際之介電常數，以此介電常數來設計所需之電路，將使產品之性能更加提升。
2. 若能精準控制薄膜的組成與厚度，則以薄膜為結構的濾波器確實能達到小型化的優點。
3. 介電層之厚度與介電常數是影響微波

濾波器共振頻率偏移的主要因素之一。

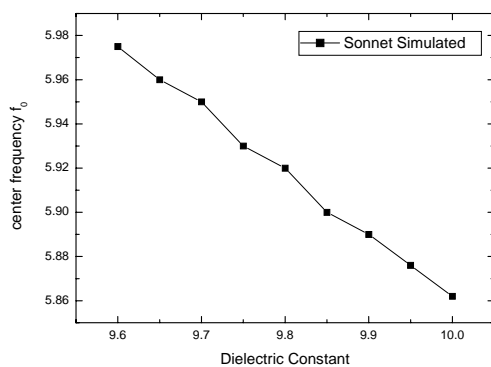
4. 可藉由實際量測之共振頻率，藉以 3D 電磁模擬軟體，藉由改變模擬參數，導以實際量測值，可間接推斷出薄膜材料之介電常數。



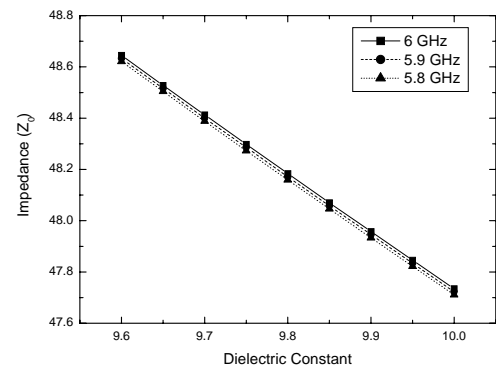
圖一：諧振器結構圖



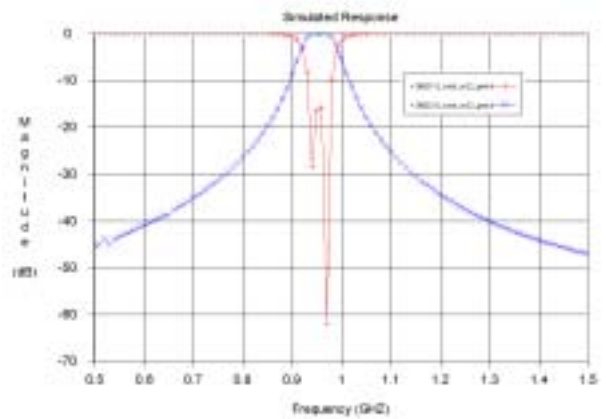
圖二：濾波器結構圖型



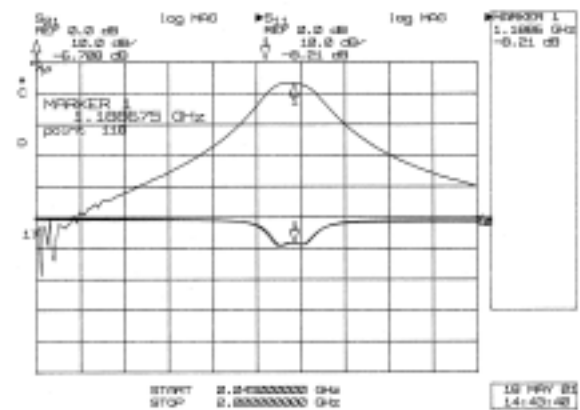
圖三：Sonnet Simulated f_0 v.s Dielectric constant



圖四：不同頻率下，介電常數與阻抗之關係圖

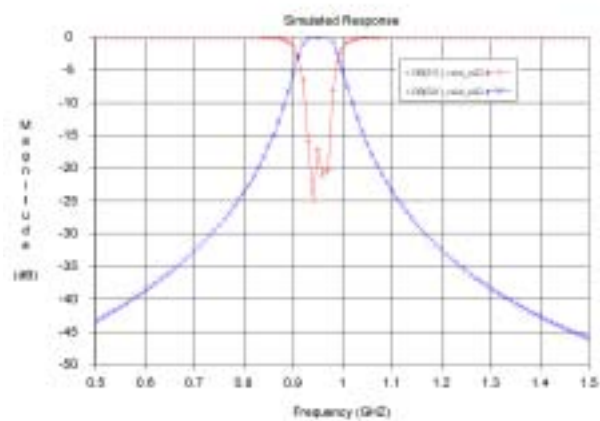


(a)理論模擬

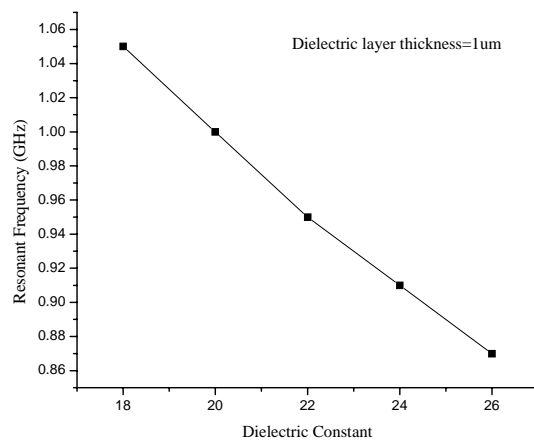


(b)實際量測

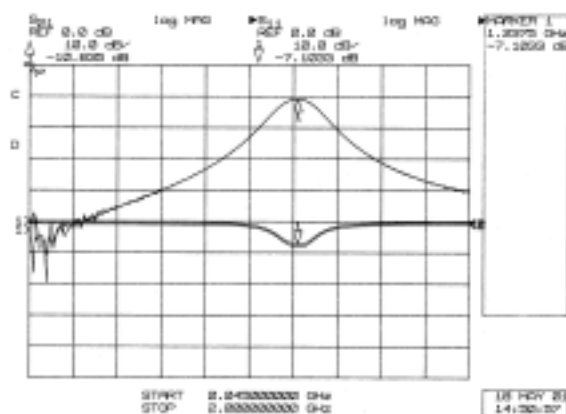
圖五：甲組濾波元件之(a)理論模擬 (b)實際量測



(a)理論模擬

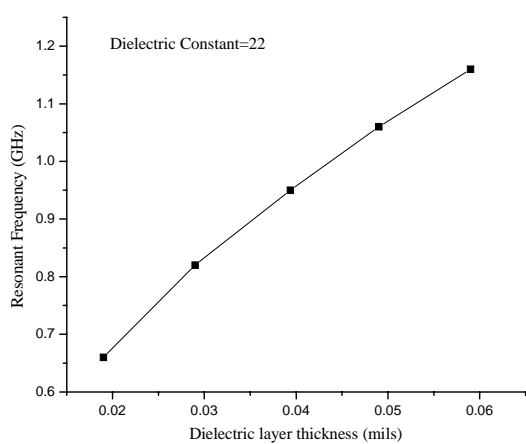


圖八：Sonnet 模擬介電層之介電常數改變對濾波器共振頻率之影響



(b)實際量測

圖六：乙組濾波元件之(a)理論模擬 (b)實際量測



圖七：Sonnet 模擬介電層厚度改變對濾波器共振頻率之影響