

東海大學電機工程學系
碩士論文

高介電係數鈣鈦礦微波介電材料之研製及
元件應用之研究

**Study and fabrication of high dielectric
constant perovskite microwave dielectric
materials and its applications on devices**

研究生：李彥霖

指導教授：林士弘 博士

中華民國 107 年 5 月

東海大學電機工程學系碩士學位
考試委員審定書

電機工程學系研究所 李彥霖 君所提之論文，

高介電係數鈣鈦礦微波介電材料之研製及元件

應用之研究，經本考試委員會審查，符合碩士

資格標準。

學位考試委員會 召集人：潘彥龍 (簽章)

委員：陳元斌

苗新元

劉日新

林士宏

中華民國 107 年 05 月 09 日

誌謝

感謝恩師林士弘教授這幾年除了在課業學習和實驗上的幫助，也訓練我在未來就業時應有的精神和處事態度，使我在學習的路程上獲益良多，除此之外，老師也在假日時犧牲寶貴的休息時間協助我在課業以及實驗上的問題。我想身為老師的學生事一件很光榮的事。

實驗室的學長們協助我在儀器的使用、課業以及生活上都給予我很好的指導和照顧，讓我在這幾年能夠順利的進行我的研究。

感謝跟我同一屆的同學們，在平日時我們都會互相幫助，在就學碩士的過程中很榮幸有這些同學一起努力完成學業。也感謝跟我同實驗室的學弟在實驗上給予我協助，相信他們在未來能讓實驗室的發展越來越好。

最後我要感謝我的母親與姊姊在我求學的路程中給予我極大的幫助，給予我精神和物質上最大的支持。因為有你們給予我的支持才能讓我在毫無顧慮的情況下完成碩士學位。

摘要

在本論文將討論介電陶瓷材料 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 、 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 和 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ，藉由摻雜 SnO 和 La_2O_3 ，探討對其微波特性的影響。

從實驗結果顯示， $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 在 $x=0.02$ ，燒結溫度為 1500°C 時有最好的介電特性 ($\epsilon_r \sim 45.5$ 、 $Q \times f \sim 15,000 \text{ GHz}$ 、 $\tau_f \sim -7.1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$)。 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 在 $x=0.06$ ，燒結溫度為 1475°C 時有最好的介電特性 ($\epsilon_r \sim 37.5$ 、 $Q \times f \sim 16,000 \text{ GHz}$ 、 $\tau_f \sim -9.6 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$)。 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 在 $x=0.9$ 燒結溫度 1450°C 時有最好的介電特性 ($\epsilon_r \sim 42.5$ 、 $Q \times f \sim 23,000 \text{ GHz}$ 、 $\tau_f \sim 58 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$)。

此外，本論文以 FR4 、 Al_2O_3 及 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}$ 三種不同基板，用髮夾式低通濾波器以 IE3D 模擬，可發現 C_{97}ZLTS 頻率響應表現雖然沒有 FR4 、 Al_2O_3 好，但是能夠縮小濾波器面積。

關鍵字：微波介電材料、濾波器、摻雜

Abstract

The microwave dielectric properties of the $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$, $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ and $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ are discussed in this paper. By doping with SnO and La_2O_3 to study the effect of its microwave characteristics.

The experimental results show that $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ has the best dielectric properties at $x=0.02$ and sintering temperature of 1500°C ($\epsilon_r \sim 45.5$, $Q \times f \sim 15,000$ GHz, $\tau_f \sim -7.1$ ppm/ $^\circ\text{C}$). $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ has the best dielectric properties at $x=0.06$ and sintering temperature of 1475°C ($\epsilon_r \sim 37.5$, $Q \times f \sim 16,000$ GHz, $\tau_f \sim -9.6$ ppm/ $^\circ\text{C}$). $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ has the best dielectric properties ($\epsilon_r \sim 42.5$, $Q \times f \sim 23,000$ GHz, $\tau_f \sim 58$ ppm/ $^\circ\text{C}$) at $x=0.9$ sintering temperature of 1450°C .

In addition, this paper uses FR4, Al_2O_3 and $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}$ three different substrates, using hairpin low-pass filter to simulate with IE3D, we can find that C_{97}ZLTS frequency response performance is not as good as FR4 and Al_2O_3 , but it can reduce filter size.

Keyword: Microwave dielectric material, Filter, Doping

目錄

第一章 緒論.....	1
前言.....	1
研究目的.....	2
第二章 介電材料原理.....	3
2-1 陶瓷材料之微波介電特性.....	3
2-1-1 介電常數(Dielectric constant : K 、 ϵ_r).....	3
2-1-2 品質因數(Quality factor : Q).....	7
2-1-3 共振頻率溫度飄移係數(Temperature coefficient of resonant frequency : τ_f)...9	
2-2 介電共振器(Dielectric resonator : DR)原理.....	10
2-3 結構分析.....	17
2-3-1 鈣鈦礦結構.....	17
2-4 材料燒結.....	18
2-4-1 燒結種類.....	19
2-4-2 材料燒結之擴散方式.....	21
2-4-3 材料燒結之過程.....	22
第三章 微帶線及濾波器原理.....	26
3-1 濾波器原理.....	26
3-1-1 濾波器的簡介.....	26
3-1-2 濾波器之種類及其頻率響應.....	27
3-2 微帶線原理.....	32
3-2-1 微帶傳輸線的簡介.....	32
3-2-2 微帶線的傳輸模態.....	33
3-2-3 微帶線各項參數公式計算及考量.....	34
3-2-4 微帶線的不連續效應.....	37
3-2-5 微帶線的損失.....	45
3-3 微帶線諧振器種類.....	46
3-3-1 $\lambda/4$ 短路微帶線共振器.....	47
3-3-2 $\lambda/2$ 開路微帶線共振器.....	48
3-4 共振器間的耦合形式.....	50
3-4-1 電場耦合 :	50
3-4-3 混和耦合 :	59

3-5 四分之一波長的阻抗轉換器與開路殘段(open stub)	62
第四章 實驗步驟和量測方法	64
4-1 微波介電材料的製程	64
4-1-1 粉末的配製與球磨	65
4-1-2 粉末的煨燒	66
4-1-4 壓模成型、去黏劑及燒結	66
4-2 微波介電材料的量測與分析	68
4-2-1 密度測量	68
4-2-2 X-Ray 分析	68
4-2-3 SEM 分析	68
4-2-4 介電特性量測與分析	69
4-2-5 共振頻率溫度飄移係數之量測	77
4-3 濾波器的製作與量測	77
第五章 實驗結果和討論	81
5-1 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之微波介電特性	81
5-1-1 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之 XRD 分析結果	81
5-1-2 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之 SEM 分析結果	83
5-1-3 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.08}\text{Sn}_{0.02})_5\text{O}_{17}$ 之 EDS 分析結果	86
5-1-4 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之密度分析結果	87
5-1-5 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之介電常數(ϵ_r)、品質因素($Q \times f$)分析結果	89
5-1-6 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之溫度頻率飄移係數(τ_f)分析結果	91
5-2 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之微波介電特性	93
5-2-1 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之 XRD 分析結果	93
5-2-2 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之 SEM 分析結果	95
5-2-3 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之 EDS 分析結果	98
5-2-4 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之密度分析結果	99
5-2-5 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之介電常數(ϵ_r)、品質因素($Q \times f$)分析結果	101
5-2-6 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之溫度頻率飄移係數(τ_f)分析結果	103
5-3 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 之微波介電特性	105
5-3-1 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 之 XRD 分析結果	105
5-3-2 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 之 SEM 分析結果	107
5-3-3 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 之 EDS 分析結果	111
5-3-4 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 之密度分析結果	113
5-3-5 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 之介電常數(ϵ_r)、品質因素($Q \times f$)分析結果	114
5-3-6 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 之溫度頻率飄移係數(τ_f)分析結果	116

5-3-7 材料特性總表	118
5-4 低通濾波器之設計和模擬	120
5-4-1 濾波器設計與規格	120
5-4-2 濾波器模擬探討	122
第六章 結論	127
參考文獻	128



圖目錄

圖 2-1 極化頻率響應圖.....	5
圖 2-2 空間電荷極化示意圖.....	5
圖 2-3 電偶極極化示意圖.....	6
圖 2-4 離子極化示意圖.....	6
圖 2-5 電子極化示意圖.....	6
圖 2-6 電磁波之入射、反射、透射關係圖.....	12
圖 2-7 電磁波之在介質二中發生全反射之圖.....	13
圖 2-8 圓柱型 DR 電場分佈圖.....	16
圖 2-9 圓柱型 DR 中各種 mode 之外部與內部功率傳輸比.....	17
圖 2-10 鈣鈦礦結構.....	18
圖 2-11 顆粒間的接觸介面.....	22
圖 2-12 第一階段為相鄰粉體顆粒的頸部成長及少量收縮現象產生.....	24
圖 2-13 第二階段為物質傳遞過程或緻密化.....	24
圖 2-14 第三階段為晶粒成長，消除孤立的孔洞.....	25
圖 3-1 射頻通訊系統前端架構.....	27
圖 3-2A 各頻帶濾波器示意圖.....	29
圖 3-2B 頻帶濾波器響應形式.....	29
圖 3-3 三種濾波器的低通原型圖.....	31

圖 3-4 微帶線之外觀圖.....	32
圖 3-5 微帶線之電場分佈圖.....	33
圖 3-6 微帶線開路端效應電路及等效圖.....	38
圖 3-7 串聯微帶線間距效應電路及等效圖.....	40
圖 3-8 步階阻抗效應電路及等效模型.....	41
圖 3-9 直角彎折效應電路及等效模型.....	42
圖 3-10 微帶線 T 型分岔不連續效應.....	44
圖 3-11 四分之一波長微帶線短路傳輸線.....	47
圖 3-12 指叉型(interdigital)濾波器.....	47
圖 3-13 二分之一波長微帶線諧振器的傳輸線示意圖.....	48
圖 3-14 平行耦合線濾波器.....	49
圖 3-15 U 型諧振器與 U 型濾波器.....	49
圖 3-16 正方形開迴路諧振器與開迴路諧振器濾波器.....	49
圖 3-17 微帶線共振器之電場強度分佈圖(a) $\lambda/4$ 短路(b) $\lambda/2$ 開路.....	51
圖 3-18 幾種電場耦合的共振器佈局.....	51
圖 3-19 兩電場耦合的共振器之等效電路圖.....	51
圖 3-20 當 $Y_{11}=Y_{22}$ 以及 $Y_{12}=Y_{21}$ 的等效 π 型網路.....	53
圖 3-21 表示電場耦合使用導納反轉子的另一種等效電路圖.....	53
圖 3-22 微帶線共振器之磁場強度分佈圖(a) $\lambda/4$ 短路(b) $\lambda/2$ 開路.....	55

圖 3-23 幾種磁場耦合的共振器佈局.....	55
圖 3-24 兩磁場耦合的共振器之等效電路圖.....	56
圖 3-25 當 $Z_{11}=Z_{22}$ 以及 $Z_{12}=Z_{21}$ 的等效 T 型網路.....	57
圖 3-26 表示磁場耦合使用阻抗反轉子的另一種等效電路圖.....	57
圖 3-27 幾種混和耦合的共振器佈局.....	59
圖 3-28 兩混和耦合的共振器之等效電路圖.....	60
圖 3-29 J-inverter & K-inverter 分別代表電場、磁場耦合的另一種等效電路圖..	60
圖 3-30 四分之一波長阻抗轉換器電路.....	62
圖 4-1 實驗流程圖.....	63
圖 4-2 燒結升降溫程序.....	67
圖 4-3 Courtney hold 基本架構.....	68
圖 4-4 探針迴圈耦合方式.....	70
圖 4-5 TE _{onp} 模態場型圖.....	71
圖 4-6 共振腔實體結構.....	75
圖 4-7 DR 量測示意圖.....	76
圖 4-8 濾波器量測示意圖.....	80
圖 5-1 Ca _{0.99} Zn _{0.01} La ₅ (Ti _{1-x} Sn _x) ₅ O ₁₇ (x=0.02-0.1)在燒結溫度 1500°C 持溫 4 小時之 XRD 圖.....	82

圖 5-2 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.08}\text{Sn}_{0.02})_5\text{O}_{17}$ 在不同燒結溫度持溫 4 小時之 XRD 圖.....	83
圖 5-3 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.08}\text{Sn}_{0.02})_5\text{O}_{17}$ 在不同燒結溫度之 SEM 圖.....	84
圖 5-4 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}(x=0.02-0.1)$ 燒結溫度 1125°C 之 SEM 圖.....	85
圖 5-5 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.08}\text{Sn}_{0.02})_5\text{O}_{17}$ 燒結溫度 1500°C 之 EDS 三點圖.....	87
圖 5-6 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}(x=0.02-0.1)$ 各燒結溫度密度圖.....	88
圖 5-7 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}(x=0.02-0.1)$ 之介電係數與燒結溫度關係圖....	90
圖 5-8 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}(x=0.02-0.1)$ 之品質因素與燒結溫度關係圖....	91
圖 5-9 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}(x=0.02-0.1)$ 之溫飄係數與燒結溫度關係圖....	92
圖 5-10 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 在燒結溫度 1475°C 持溫 4 小時之 XRD 圖....	94
圖 5-11 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}$ 在不同燒結溫度持溫 4 小時之 XRD 圖....	95
圖 5-12 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.06}\text{Sn}_{0.04})_5\text{O}_{17}$ 在不同燒結溫度 SEM 圖.....	96
圖 5-13 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 在不同比例 1475°C 燒結溫度 SEM 圖.....	97
圖 5-14 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}$ 燒結溫度 1475°C 之 EDS 三點圖.....	99
圖 5-15 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}(x=0.02-0.1)$ 不同溫度之密度圖.....	100
圖 5-16 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}(x=0.02-0.1)$ 不同溫度之介電常數圖.....	102
圖 5-17 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}(x=0.02-0.1)$ 不同溫度之品質因素圖.....	103
圖 5-18 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}(x=0.02-0.1)$ 溫度係數與燒結溫度關係圖....	104
圖 5-19 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}(x = 0.1-0.9)$ 在燒結溫度 1450°C 持溫 4 小時之 XRD	
圖.....	106

圖 5-20 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{0.1}\text{La}_{0.9}\text{O}_{17}$ 介電陶瓷在不同溫度下的 XRD 圖.....	107
圖 5-21 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{0.1}\text{La}_{0.9}\text{O}_{17}$ 在不同燒結溫度 SEM 圖.....	109
圖 5-22 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1-0.9$) 在 1400 °C 燒結溫度 SEM 圖.....	110
圖 5-23 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{0.1}\text{La}_{0.9}\text{O}_{17}$ 燒結溫度 1450°C 之 EDS 三點圖.....	112
圖 5-24 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1-0.9$) 不同溫度之密度圖.....	113
圖 5-25 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1-0.9$) 不同溫度之介電常數圖.....	115
圖 5-26 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1-0.9$) 不同溫度之品質因素圖.....	116
圖 5-27 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1-0.9$) 溫度系數與燒結溫度關係圖.....	117
圖 5-28 濾波器的 layout 圖.....	121
圖 5-29 (a)FR4 模擬量測圖(b)3dB 頻寬內響應圖.....	123
圖 5-30 (a) Al_2O_3 模擬量測圖(b)3dB 頻寬內響應圖.....	124
圖 5-31 (a) $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}$ 模擬量測圖(b)3dB 頻寬內響應圖.....	125

表目錄

表 5-1 相似材料的微波介電特性.....	80
表 5-2 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.08}\text{Sn}_{0.02})_5\text{O}_{17}$ 在 1500°C 燒結溫度的點各別元素含量.....	85
表 5-3 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.08}\text{Sn}_{0.02})_5\text{O}_{17}$ 在 1475°C 燒結溫度的點各別元素含量.....	97
表 5-4 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{0.1}\text{La}_{0.9}\text{O}_{17}$ 1450°C 燒結溫度燒結溫度的點各別元素含量.....	110
表 5-5 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$) 在燒結溫度 1500°C 持溫四小時的微波介電特性表.....	117
表 5-6 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$) 在燒結溫度 1475°C 持溫四小時的微波介電特性表.....	118
表 5-7 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1-0.9$) 在燒結溫度 1450°C 持溫四小時的微波介電特性表.....	118

第一章 緒論

前言

隨著無線通訊時代的來臨，對個人行動通訊系統及衛星通訊的需求急速成長。現代科技的進步，使人們越來越依賴無線通訊產品。為了滿足攜帶方便，通訊產品也朝著輕、薄、短、小方面來發展，隨著電子產品尺寸漸趨縮小而微縮的被動元件顯得日趨重要，而具有高介電係數(ϵ_r , dielectric constant)、高品質因素($Q \times f$, quality factor)及低共振頻率溫度係數(τ_f , temperature coefficient of resonant frequency)等特性的微波介電材料正是目前最好的選擇。

而目前平面印刷電路板(Printed circuit board, PCB)仍是製作各種電路最常使用的基板，但在應用上仍有其缺點存在，主要是隨著使用頻率的增加，其介電損耗也會隨著大幅增加，因此在現今微波通訊元件操作的頻段時，PCB已無法滿足低損耗的需求，所以為了改善損耗的問題，我們使用介電陶瓷材料來取代PCB，其具有高品質因數($Q \times f$, quality factor)的特性，能用來改善過大的介質損耗，而高介電係數(ϵ_r , dielectric constant)也能使整體電路尺寸縮小，若同時能使燒結溫度降低，則此材料就可以應用於微波頻段的電路，所以如何製作一個具有良好微波介電特性的基板變成我們所要研究的首要課題。

研究目的

本論文主要研究目的分為兩部分，第一部分是微波介電材料的開發與製作，而第二部分為電路元件的設計與實作。在第一部分，我們將 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_4\text{Ti}_5\text{O}_{17}$ 和 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_4\text{Ti}_5\text{O}_{17}$ 作為主體材料，將 Ti^{4+} 微量取代的方式添加 Sn^{2+} ，調整不同的x變化量來探討 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_4\text{Ti}_5\text{O}_{17}$ 和 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_4\text{Ti}_5\text{O}_{17}$ 微波介電特性的變化。以 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{TiO}_{17}$ 為主體材料，將 Ti^{4+} 以取代的方式添加 La^{3+} ，調整不同的x變化量來探討 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 微波介電特性的變化，期望能夠得到更好的介電特性。

在第二部分，利用模擬軟體HFSS對一濾波器電路進行設計，並將其實作在FR4、 Al_2O_3 及自製基板上。此三種基板之介電係數及品質因數大小依序為 $\text{FR4} < \text{Al}_2\text{O}_3 < \text{自製基板}$ ，能夠從此三種基板中探討介電係數及品質因數對元件特性的影響以及對元件尺寸的改善效果。

第二章 介電材料原理

2-1 陶瓷材料之微波介電特性

2-1-1 介電常數(Dielectric constant : K 、 ϵ_r)

介電常數影響著元件的尺寸與共振頻率，電磁波在介質中傳遞，其波長與介質的介電常數有關。

$$\text{關係如下：}\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{式 2-1})$$

λ ：電磁波在介質中的波長

λ_0 ：電磁波在真空中的波長

我們可以由(式 2.1)得出 ϵ_r 越大，電磁波在該介質中的波長越短。將這個特點利用在微帶線結構上，就可以縮小元件之尺寸。但必須考慮時間延遲上製程的限制，因此適當的 ϵ_r 才是我們所追求的目標。

影響介電材料之介電特性的因素包含極化現象、孔洞(Porosity)、晶界(Grain boundary)、微細構造(Microstructure)以及陶瓷燒結後各晶系之含量等都對介電材料之介電特性有相當程度之影響，其中以極化現象為影響介電特性之最主要的因素，極化率越大則介電係數越大。

極化與頻率有著密切的關係，隨著頻率的改變，極化的機構也會有所不同(如圖 2-1)，以下分別對四種不同的機構作說明[1]:

(1) 空間電荷極化(space charges polarization : α_s)(圖2-2) :

此機構形成之主要原因是由於可移動的電荷或材料之中，存有的淨電荷受界面(晶界、相界)之阻擾，或被材料拘留所造成的，其產生之頻率通常低於 10^4 Hz。

(2) 電偶極極化(dipolar polarization : α_o)(圖2-3) :

此機構是由於原子或錯離子中常存在於不平衡電荷分佈，當受到外加電場作用時，這些電荷(電偶極)會隨電場方向而平行排列，造成所謂的方向極化(亦稱電偶極極化)，其發生的頻率約 $10^4 \sim 10^8$ Hz。

(3) 離子極化(ionic polarization : α_i) : (圖2-4)

也可以稱為原子極化 (atom polarization)，正是因陽離子和陰離子相互吸引所產生的相對位移引起，其發生之頻率範圍約在紅外線區，頻率約為 $10^9 \sim 10^{14}$ Hz。故在微波和遠紅外線頻帶內，離子極化是決定材料介電特性之主要機構。

(4) 電子極化(electron polarization : α_e)(圖2-5) :

即原子內的電子雲因外加電場作用而偏向一邊，為所有材料均會發生之極化現象，而其發生之頻率約在紫外線的範圍內 ($> 10^{14}$ Hz)。

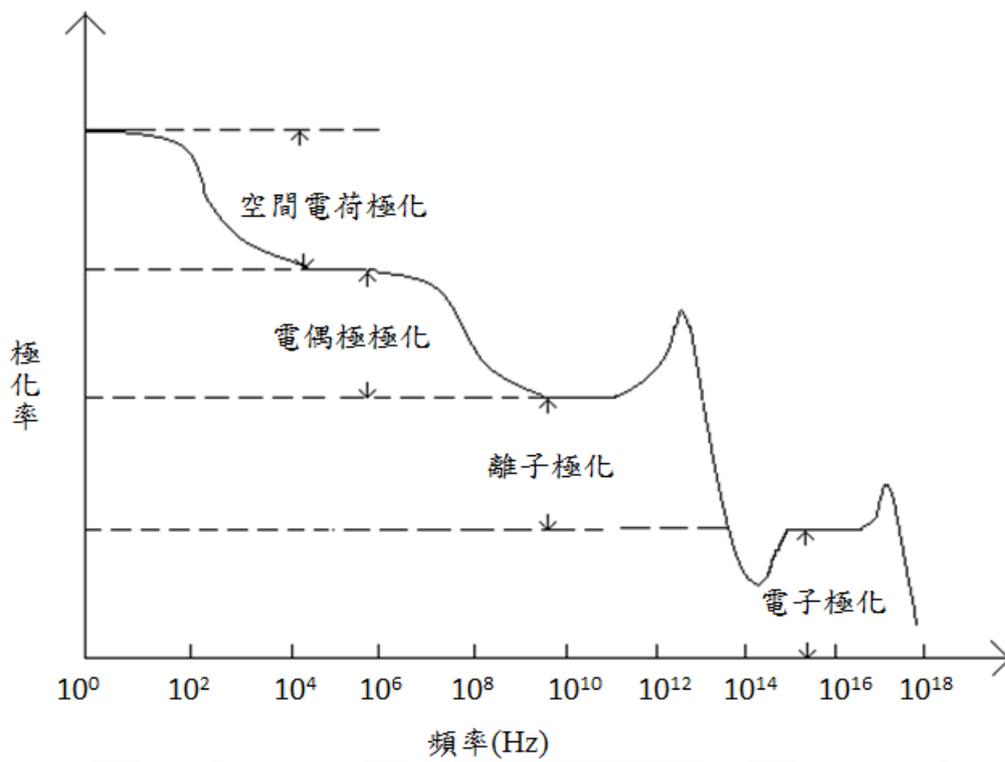


圖2-1.極化頻率響應圖

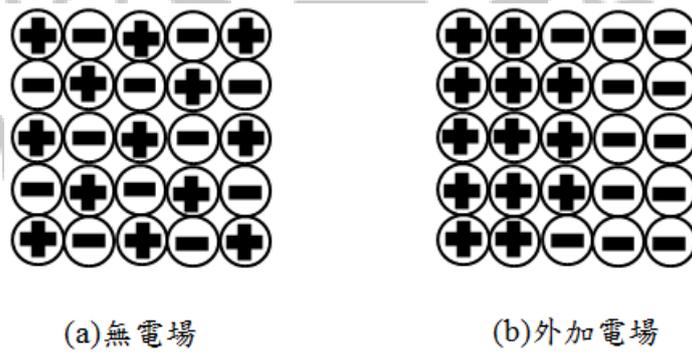


圖2-2.空間電荷極化示意圖

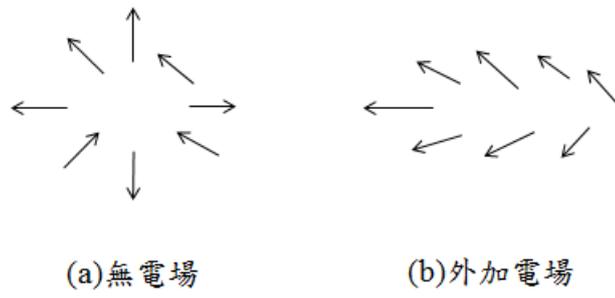


圖2-3.電偶極極化示意圖

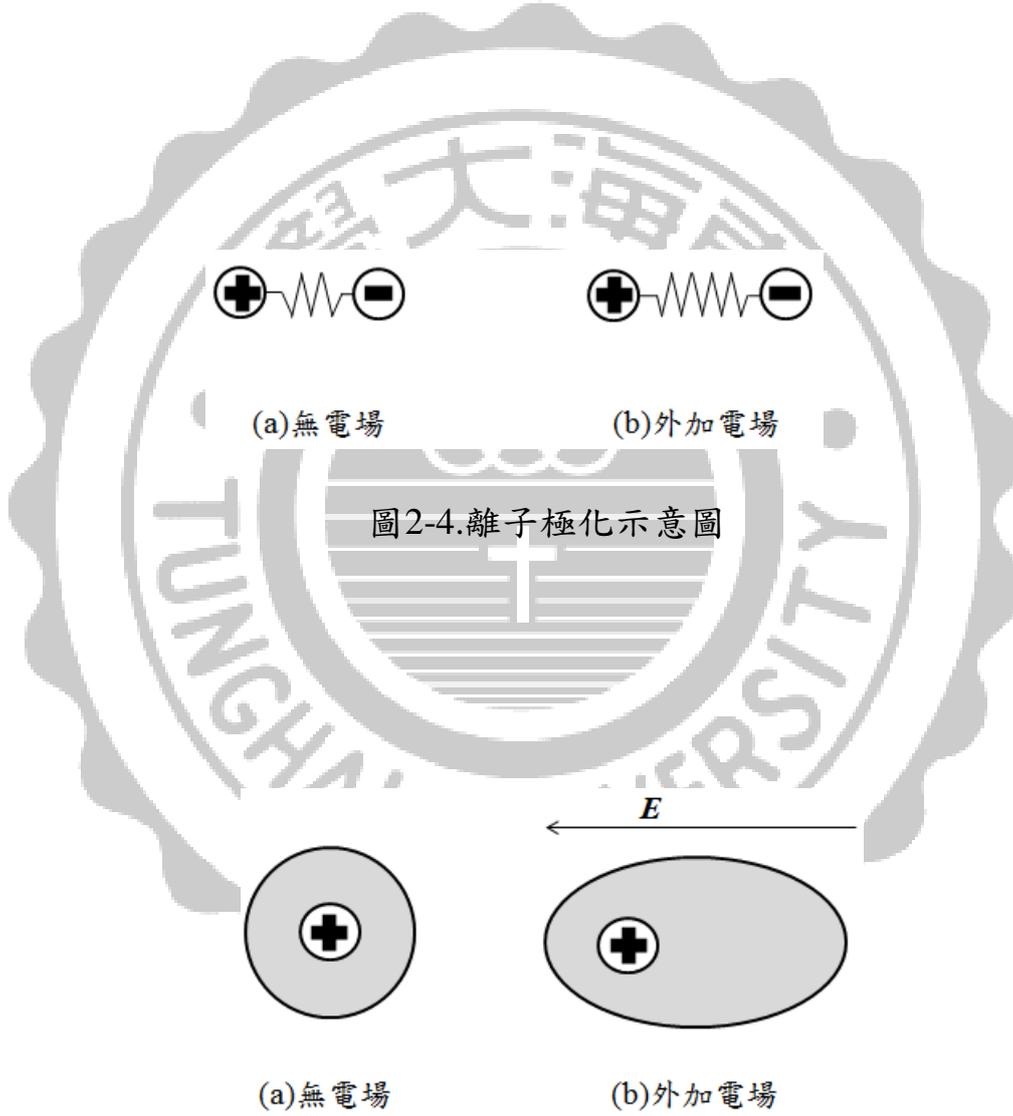


圖2-5.電子極化示意圖

介電材料的總極化率為上述之和

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_i + \alpha_e \quad (\text{式2-2})$$

當外加頻率大過於某一極化機構之截止頻率時，該極化機構會因慣性作用跟不上外加頻率的變化因而造成喪失其極化作用，進而可能造成材料的介電常數下降。由圖2-1可看出在微波的領域($10^8 \sim 10^{11}$ Hz)內之介電材料僅存有電子及離子極化兩種機構。又由於電子極化較離子極化小很多，所以通常在微波的領域內材料的介電常數取決於離子極化量的大小。所以通常在選擇微波介電材料時，會選擇離子極化較大的材料方可取得較高之介電常數。

2-1-2 品質因數(Quality factor : Q)

Q 值代表每週期內，最大儲存能量與平均所消耗能量之比值，換言之 Q 值越大，所消耗的能量就越小。

$$\text{關係式：} Q = 2\pi \frac{\text{每週期的最大能量儲存}}{\text{每週期的平均能量消耗}} = \frac{2\pi W}{PT} = \frac{\omega_0 W}{P} \quad (\text{式 2-3})$$

W ：儲存的能量 ω_0 ：共振頻率 P ：功率消耗 T ：週期

在進行 Q 值量測時，其 Q 值會受到共振器尺寸的不同而影響，但在微波頻段約 1~20 GHz 的範圍中，所得出的 Q 值與共振頻率之乘積為定值，即 $Q \times f$ 為一個常數。因此在表達材料的品質因素時，通常以 $Q \times f$ (GHz) 做為表示以方便比較。我們由關係式得出 Q 值的大小影響元件共振時能量的耗損，和微波介電共

振器(DR)對頻率的選擇度， Q 值越大，選擇度越佳。一般要求 $Q \times f$ 須大於 5000。

而共振器之頻寬(Bandwidth)與 Q 值成反比，因此當 Q 值較高時，相對的頻寬就較窄，電路之選擇性相對的也較高。

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (\text{式 2-4})$$

f_0 ：共振頻率

f_1 ：共振頻率往低頻之-3dB點

f_2 ：共振頻率往高頻之-3dB點

在量測材料的品質因數時，需要將材料置於空腔共振器內來進行測量，對於共振器我們要考慮到下列兩種情況：

1. 無載品質因數($Q_{unloaded}$)：此為共振器本身的品質因數，其損耗只與共振器本身有關。
2. 有載品質因數(Q_{Load})：共振器與外部電路結合所得到的品質因數，其損耗不僅為材料本身還包括了外部電路的總損耗。

當分析空腔共振器的品質因數時，因共振器的損耗包含了導體損、介質損和輻射損，因此在計算其品質因數時要分別考慮導體品質因數、介質品質因數和輻射品質因數，其公式如下：

導體品質因數(Q_c)：

$$Q_c = \frac{w_0 W}{P_c} \quad (\text{式 2-5})$$

介質品質因數(Q_d):

$$Q_d = \frac{w_0 W}{P_d} = \frac{1}{\tan \delta} \quad (\text{式 2-6})$$

輻射品質因數(Q_r):

$$Q_r = \frac{w_0 W}{P_r} \quad (\text{式 2-7})$$

其中

P_c : 導體損耗功率

P_d : 介質損耗功率

P_r : 輻射損耗功率

共振器的總損耗功率為

$$P = P_c + P_d + P_r \quad (\text{式 2-8})$$

即可得到共振器總品質因數值為

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_r} \quad (\text{式 2-9})$$

Q_d 即為材料的介質品質因數

2-1-3 共振頻率溫度飄移係數 (Temperature coefficient of resonant frequency : τ_f)

微波材料實際應用於元件上時，我們不希望共振頻率會隨著溫度變化而改

變，這樣才能廣泛穩定的應用在不同的溫度環境下。所以我們在探討微波材料的特性時，不僅只有介電係數與品質因數，共振頻率溫度飄移係數也是一項重要的特性。

而共振頻率溫度飄移係數的定義為：

$$\tau_f = \frac{1}{f} \frac{df}{dT} \quad (\text{ppm}/^\circ\text{C}) \quad (\text{式2-10})$$

其中

f : 共振頻率

T : 溫度

且共振頻率會隨著介電係數(K)和密度(D)的變化而改變，其關係式為：

$$f = \frac{c}{\sqrt{KD}} \quad (\text{式2-11})$$

將(式2-10)代入(式2-9)之後可得到 τ_f 與介電係數(K)和密度(D)的關係式為：

$$\tau_f = -\frac{1}{2K} \frac{\delta K}{\delta T} - \frac{1}{D} \frac{\delta D}{\delta T} \quad (\text{式2-12})$$

其中 $\frac{1}{2K} \frac{\delta K}{\delta T}$ 為介電係數之溫度飄移係數 $\frac{1}{D} \frac{\delta D}{\delta T}$ 為熱膨脹係數

2-2 介電共振器(Dielectric resonator : DR)原理

介電共振器(DR)是由相當高的介電常數所組成[2]，而所能存在電磁場的模式(mode)跟金屬空腔共振器類似，其邊界是由空氣所圍繞而造成的磁牆將電磁場

保持在共振器內共振，而少部分的磁場輻射離開。若以低損的材料所組成，則可得到高Q值，成本、尺寸或重量與一般金屬空腔共振器來的小，又容易與微波積體電路整合在一起並與平面傳輸線耦合，替代一般使用在微帶線電路例如濾波器的金屬空腔共振器。

根據古典物理學的Snell's law，波由一介質射入另一介質時，因為介電係數的不同會造成反射與透射[3]，其入射、反射、折射角度(如圖2-6)所示，與介電係數的關係為：

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1}} \quad (\text{式2-13})$$

其中

θ_1 : 介質一的入(折)射角

θ_2 : 介質二的入(折)射角

ϵ_1 : 介質一的介電係數

ϵ_2 : 介質二的介電係數

當波由高介電係數的介質入射進低介電係數的介質時，入射角大於某一角度時可能會發生全反射現象，此時的入射角度與介電係數之關係為：

$$\sin\theta_c = \frac{\sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1}} \quad (\text{式2-14})$$

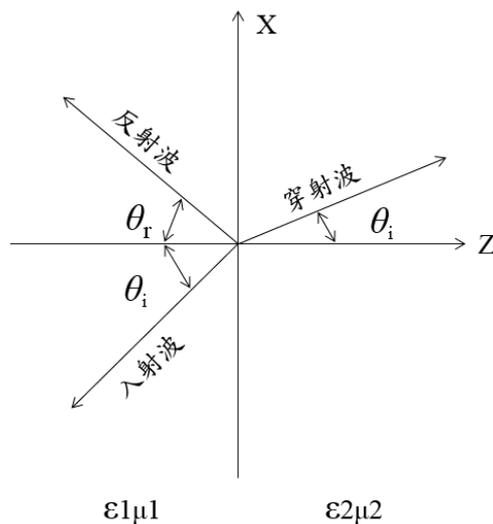
其中

θ_c :介質一的入(折)射角

ϵ_1 :入射介質的介電係數

ϵ_2 :全反射介質的介電係數

由上述可知，若入射角 θ_i 大於臨界角 θ_c 時，會使入射波發生全反射，此時便無透射波之產生。當 θ_i 逐漸增加，欲產生全反射所需之 ϵ_r 值亦隨之增加，當 θ_i 等於 $\pi/2$ 時， $\epsilon_r \geq 1 + \sin^2 \theta_i$ 的最大值為2，即當一介質之介電值大於2時，在空氣中之電磁波無論以什麼角度射入介質，都可以在其內部產生全反射，而被限制在介質體內(如圖2-7)。



電磁波由介質1($\epsilon_1\mu_1$)入射到介質2($\epsilon_2\mu_2$)

圖2-6.電磁波之入射、反射、透射關係圖

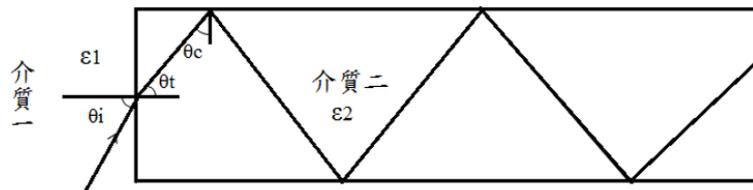


圖2-7.電磁波之在介質二中發生全反射之圖

DR是能將能量儲存於體內的元件，其介電係數通常高於周圍的環境，因此當一外加電磁波打入DR內部時，會在內部發生全反射而被限制在材料裡，當DR內某些頻率的入射與反射波加總起來而形成駐波，讓介質體如共振器一樣，便能將大部分電磁波能量滯留於內部。

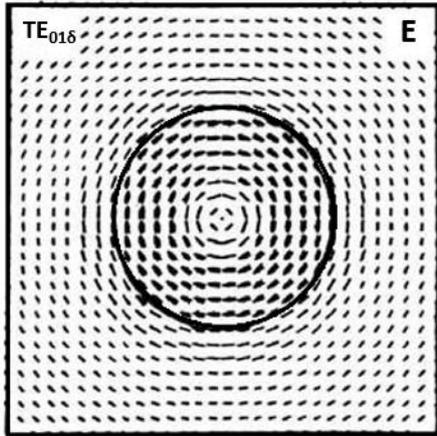
若將DR製成各種不同的形狀，配合周圍環境所形成邊界條件，並利用馬克思威爾方程式(Maxwell's equations)，就能知道DR裡共振的電磁波頻率和DR內外電磁場分佈的狀況。以圓形的DR來說，每一種電磁場分佈即為一種模態並擁有其相對應的共振頻率，其模態可區分為以下三種型式：

1. 橫向電場模式 (TE mode)
2. 橫向磁場模式 (TM mode)
3. 混合式電磁場模式 (HEM mode)

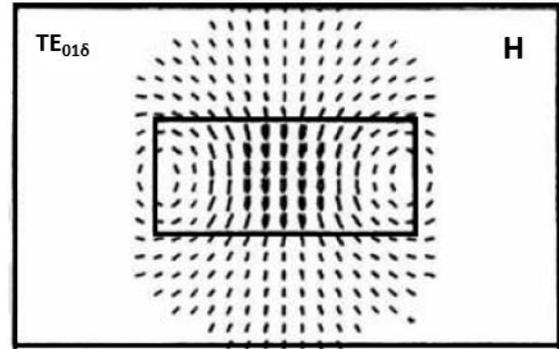
圖2-8為圓柱型DR電場分部圖[4]，最常用的模式為 TE_{010} mode，其儲存能量

的特性最好[5]，當介電係數為40時， $TE_{01\delta}$ mode可以讓DR儲存95%之電能和超過60%的磁能。其餘的能量則分佈在陶瓷體四周之環境中，能量分佈隨距離之增加而快速衰減(如圖2-9)[6]。

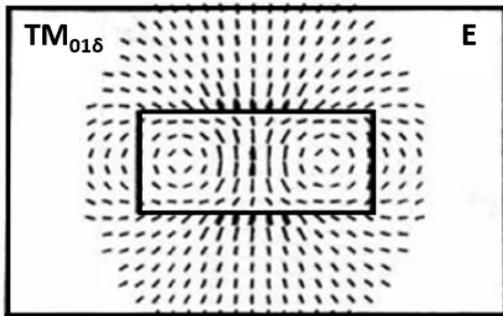




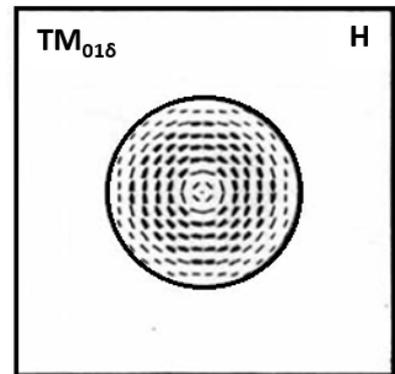
(a) TE_{016} mode 電場分佈
(DR厚度中心水平面)



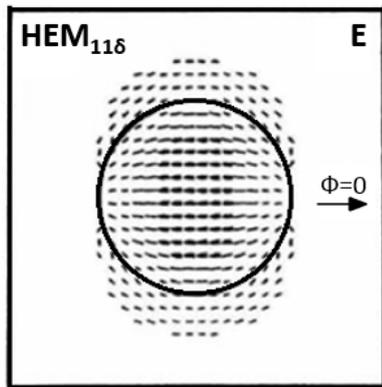
(b) TE_{016} mode 磁場分佈
(DR直徑垂直面)



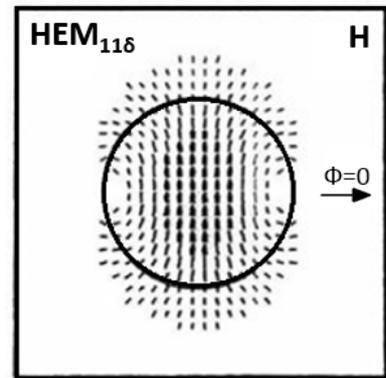
(c) TM_{016} mode 電場分佈
(DR直徑垂直面)



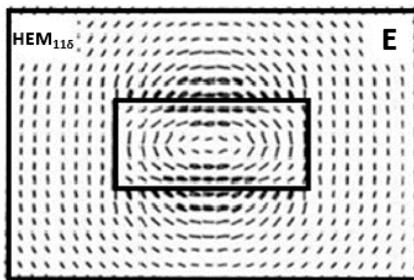
(d) TM_{016} mode 磁場分佈
(DR厚度中心水平面)



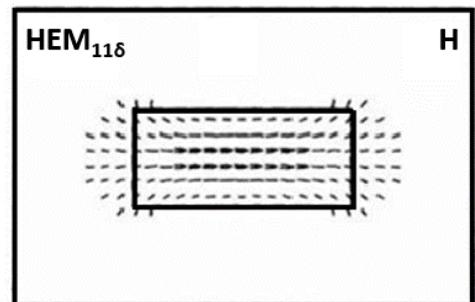
(e) HEM_{118} mode 磁場分佈
(DR 厚度中心水平面)



(f) HEM_{118} mode 電場分佈
(DR 上表面水平面)



(g) HEM_{118} mode 電場分佈
(DR 直徑垂直面、 $\psi=0$)



(h) HEM_{118} mode 磁場分佈
(DR 直徑垂直面、 $\psi=\pi/2$)

圖2-8. 圓柱型DR電場分佈圖

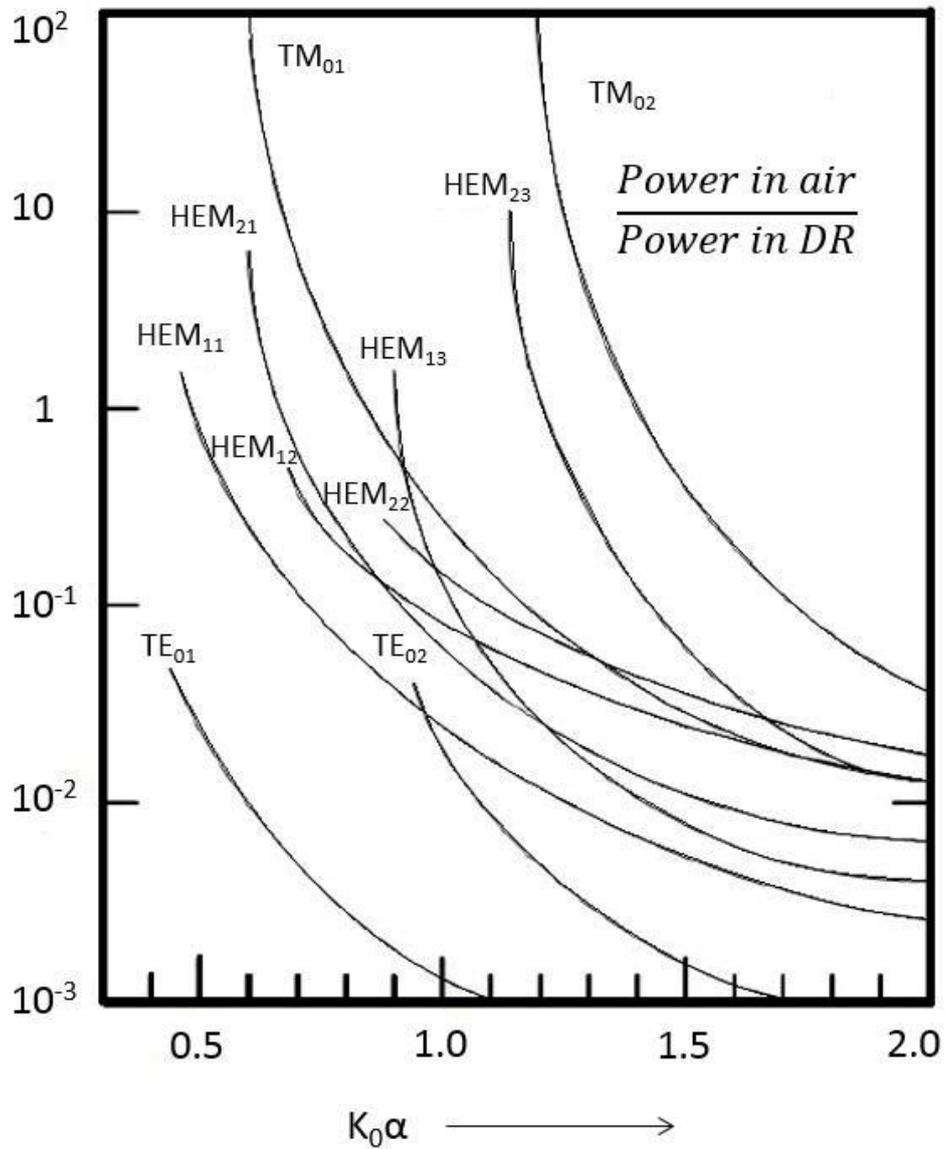


圖2-9.圓柱型DR中各種mode之外部與內部功率傳輸比

2-3 結構分析

這邊介紹鈣鈦礦結構以及主要應用的領域。

2-3-1 鈣鈦礦結構

$A_nB_nO_{3n+2}$ 鈣鈦礦材料在陶瓷科學與技術中應用於許多電子陶瓷材料而扮演

很重要的角色，其中也包括微波介電材料，由於此材料呈立方體晶形，A通常為低價而半徑較大的正離子，與負離子O一起按面心立方緊密堆積，而B為高價而半徑較小的正離子，位於O八面體的體心位置，A位和B位皆可被半徑相近的其他金屬離子部分取代而保持其晶體基本上結構不變，由於具有獨特的晶體結構，尤其經摻雜後形成的晶體缺陷結構和性能，或可被應用在固體燃料電池、固體電解質、感測器、高溫加熱材料、固體電阻器及替代貴金屬的氧化還原催化劑等許多領域(如圖2-10)。

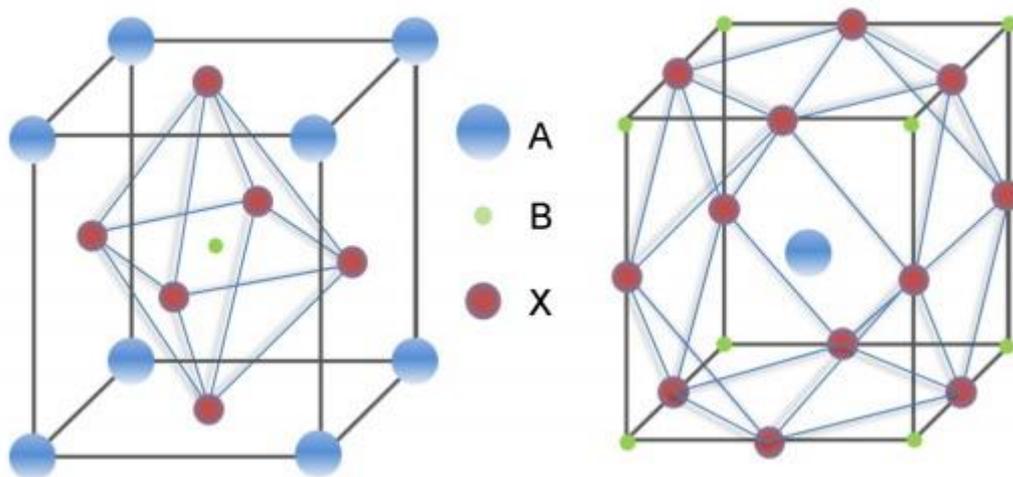


圖. 2-10 鈣鈦礦結構

2-4 材料燒結

燒結為材料在低於熔點溫度之下加熱，使粉末顆粒相互鍵結和成長，並藉由

物質在其內的移動和重新排列而達到堅固化、緻密化、再結晶化和結合等過程，最後形成具有某種微結構的燒結體。

2-4-1 燒結種類

在材料的燒結中，根據材料性質及添加物的有無，可分為固相燒結和液相燒結兩種，此兩種燒結的介紹如下：

(一) 固相燒結(Solid-state sintering)：

此燒結在過程中不會有液相的反應物形成，其緻密化的程度主要取決於孔隙率的多寡，若供給的能量緩慢，材料的孔隙會由內部緩緩被填充，但若是供給的能量過高，則會造成晶粒的成長過快，有些孔隙來不及去除而被包覆在晶粒內，此時便形成了包覆性(封閉性)的孔隙，進而導致整體緻密性的下降。

(二) 液相燒結(Liquid-state sintering)：

此燒結在過程中會有液相物質的產生，與材料顆粒的交互影響會使顆粒發生重新排列、溶解和再析出，這些作用會促使材料在較低溫度的狀況下達到緻密化，以下針對液相燒結的階段作說明：

1. 顆粒的重新排列(Rearrangement process)

此階段會發生溶解、濕潤、散佈和液體的重新分布，透過液體的分布，顆粒間的毛細孔會被填充，產生毛細壓力和表面張力，使粒子重新排列，粒子的重新排列是朝向減低孔隙率的方向排列，而密度如果上升則重新排列的阻力也會上升。影響重新排列的力量也會與顆粒的大小、孔隙的大小、濕潤程度和液相的含量有關，理論上若顆粒為球形，則液相含量越少重排力量就越大[7]，若顆粒為不規則型，則重新排列的力量會隨液相的量增加而加強[28]。

2. 溶解與再析出(Solution-precipitation process)

此階段由於毛細壓力和表面能的關係，顆粒與顆粒間或顆粒曲面較小的地方會較容易發生溶解，而在溶解度低的地方重新析出，可進一步提高材料的緻密性。此過程的反應有以下兩點[29-30]：

- (a) 晶粒形狀的調整與緻密化：主要透過接觸平坦化、小顆粒的溶解及固態擴散來達到更緊密的堆積，並可釋放出多餘的液體對孔隙進行填充。
- (b) 粗化：不同大小的晶粒藉由一連續方向性晶粒成長接合和晶粒變形的過程融合成較大晶粒，使晶粒成長及晶粒數降低。

3. 接合過程(Coalescence process)

此階段主為晶粒的成長與接合，而孔隙內的氣體則藉由擴散排出燒結體，使材料完成整個緻密化過程。

若要達成好的液相燒結，以上幾點是非常重要的，若要達到較好的液相燒結，

需要適當的液相、液體能充分潤濕固體及固體對液體適當的溶解度才能達成。

2-4-2 材料燒結之擴散方式

物質在燒結過程中主要以擴散為移動方式[24]，其擴散路徑的不同主要分成五種：

1. 表面擴散(Surface diffusion)

是指原子、離子、分子以及原子團在固體表面沿表面方向的運動，物質由表面能較高的位置(固體-氣體界面)擴散至表面能較低的位置(頸部、固體-固體界面)就會發生表面擴散。(圖2-13)。

2. 蒸發與凝結(Evaporation and condensation)

物質在蒸氣壓較高處蒸發而在蒸氣壓較低處凝結。

3. 體擴散(Volume diffusion)

體擴散又稱點陣擴散。是指通過原子在點陣內（不是沿晶界、表面或其他缺陷區）的熱運動引起的擴散。亦稱為“晶格擴散”或“晶內擴散”，指原子在晶體內部的擴散過程。

4. 晶界擴散(Grain boundary diffusion)

物質經由晶界往頸部附近擴散。

5. 黏性流動(Viscous flow)

具有黏性的實際流體的運動。由於黏性作用，流體質點粘附在物體表面上，形成流體不滑移現象（即相對速度為零），因而產生摩擦阻力和能量耗散。同時，當

流體流過鈍體時，物體後部表面附近的流體受到阻滯、減速，並從表面分離，從而形成低壓旋渦區和壓差阻力。

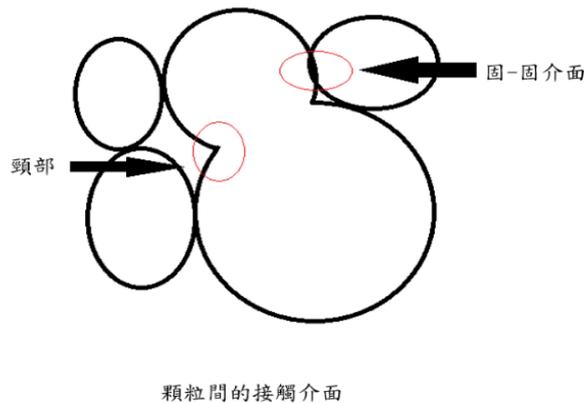


圖2-11.顆粒間的接觸介面

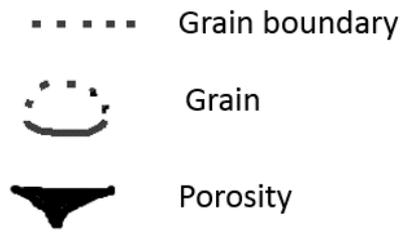
2-4-3 材料燒結之過程

一般生胚材料在進行燒結反應時，過程分為前中後三個時期：在燒結初期時，如圖 2-14 所示，顆粒開始發生連結並由點接觸的方式逐漸變成面接觸，此時期之擴散機制以表面擴散、蒸發與凝結為主，體積變化率改變不大。而到了中期，如圖 2-15 所示，晶粒受熱開始成長，晶粒間的孔隙也因晶粒的成長而逐漸變小，此時期的擴散機制主要為體擴散和晶界擴散，體積變化率的改變最大，密度也開始緻密化。最後到了後期，如圖 2-16 所示，晶粒成長基本上已趨向穩定，若供給的溫度過高可能會使晶粒發生異常成長，異常成長的晶粒因吞併許多周圍的晶粒而比一般晶粒大上許多，此種晶粒因所具有的邊緣數比鄰近的晶粒多，曲率也較大，因此會以較快的速率成長，在發生異常成長的晶粒附近因晶粒尺寸相差

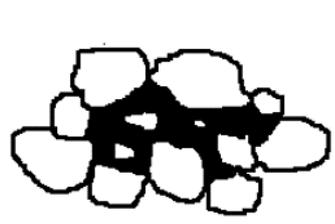
過大可能會導致孔隙的增加，緻密度也因此而下降。

陶瓷的固相燒結、液相燒結和氣相燒結的理論中，燒結速度、燒結的充分程度與燒結時間、粉體顆粒半徑等密切相關。原料粉體顆粒度越細小、燒結時間越長，燒結就越充分；其他因素，如氣泡、晶界、雜質及添加劑、燒結氣氛等，也會對燒結產生影響。



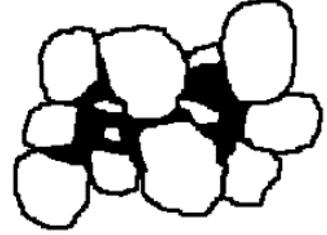


Initial situation



(a)

Orientation of particles



(b)

Development of contact



(c)

Early stage

圖2-12.第一階段為相鄰粉體顆粒的頸部成長及少量收縮現象產生

Contact growth



(d)

Grain boundary development



(e)

Contact growth



(f)

Middle stage

圖 2-13.第二階段為物質傳遞過程或緻密化

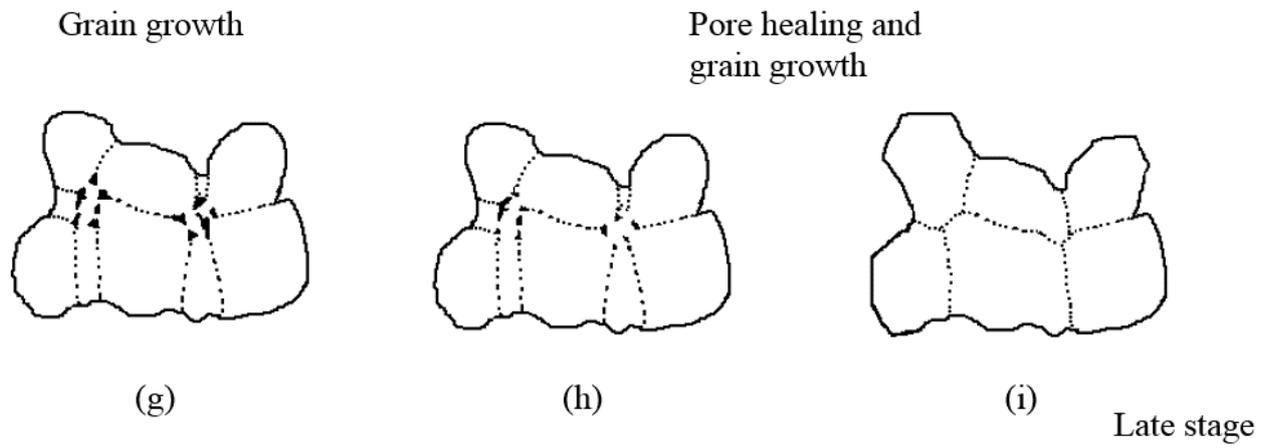


圖 2-14. 第三階段為晶粒成長，消除孤立的孔洞



第三章 微帶線及濾波器原理

3-1 濾波器原理

3-1-1 濾波器的簡介

在通訊系統中，濾波器是一個重要的被動元件，其功能為篩選特定頻率的訊號並將不必要的雜訊濾除，也因為這個特性，濾波器常被用於信號接收或發射的系統中。舉例來說，圖3-1為一前端射頻通訊系統之架構，在此系統中，接收的信號須先通過一濾波器來將雜訊去除後，才能進行訊號的調變與還原，因此濾波器在訊號的處理中扮演著很重要的角色。

傳統的低頻濾波器是由一系列的集總元件(電感和電容)所構成，將電容或電感經過適當的串並聯後即能製作出操作在不同頻帶的濾波器。當我們要將濾波器應用在高頻的微波頻段時，由於波長不再遠大於元件尺寸，造成電容與電感在高頻時會有寄生效應(parasitic effect)產生且準確度不夠高或元件之間的距離、尺寸無法隨意忽略等一些問題，而導致傳統的集總元件不適用於高頻。因此，要將濾波器設計在此頻段，我們需將元件用分散式元件的概念來完成，而微帶線因具有平面式結構和製作容易等優點，所以利用微帶線作為構成濾波器的主體，藉由改變微帶線的佈局結構來完成濾波器的設計。

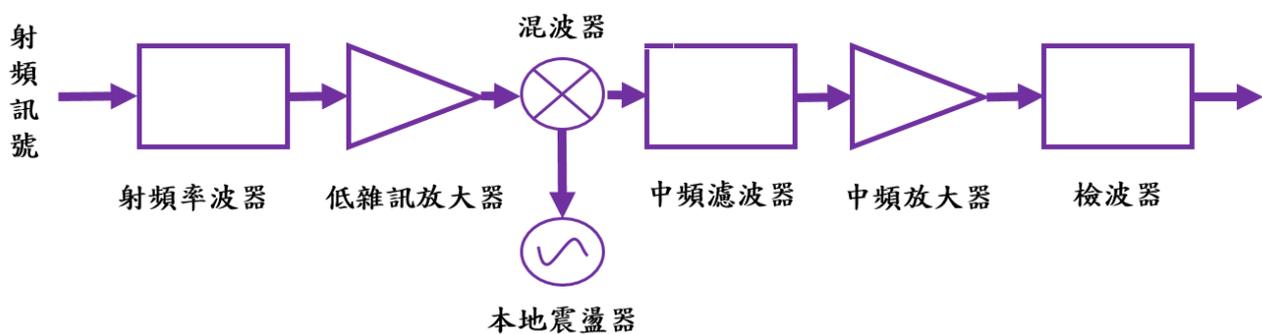


圖3-1 射頻通訊系統前端架構

3-1-2 濾波器之種類及其頻率響應

濾波器依照其通過頻帶的不同，一般可分為低通、帶通、高通和帶拒四種不同的形式(圖3-2A)，以及各別有不同的響應形式(圖3-2B)，以下分別做介紹：

1. 低通濾波器(Low pass filter：LPF)

此種濾波器只允許低頻的訊號通過，中頻及高頻的訊號則會被濾除，如圖3-2(a)所示。此種濾波器也常被使用作為設計濾波器的原型。

2. 高通濾波器(High pass filter：HPF)

此種濾波器只允許高頻的訊號通過，中頻及低頻的訊號則會被濾除，如圖3-2(b)所示。

3. 帶通濾波器(Band pass filter：BPF)

此種濾波器只允許頻率中間某一特定範圍的訊號通過，超過此範圍的頻率(過低或過高)皆會被濾除，如圖3-2(c)所示。此種濾波器常被用於通訊系統的訊號過濾。

4. 帶拒濾波器(Band reject filter：BRF)

與帶通濾波器相反，此種濾波器濾除在頻率中間某一特定範圍內的訊號而讓低頻及高頻的訊號通過，如圖3-2(d)所示。

一般的濾波器其通帶和止帶間的界線並不如理想濾波器般完美，而是存在一個衰減曲線，在這衰減曲線中，我們取其在 -3 dB的頻率為截止頻率。在設計濾波器時，一般會以低通濾波器做為設計的原型，再運用各種轉換的技術將濾波器視需求轉為帶通、高通或帶拒。而針對低通濾波器其通帶和衰減曲線的響應特性，我們可設計三種不同的濾波器[8]，分別為：

1. 巴特沃斯濾波器(Butterworth filter)

此種濾波器在通帶和止帶的衰減特性皆為平滑曲線，即不存在漣波，可以提供最平滑的通帶響應。通帶的平坦程度會隨著階數的增高而增加，如圖3-3(a)。

2. 柴比雪夫濾波器(Chebyshev filter)

在通帶可容許有限度的漣波產生，同時也將獲的較為陡峭之轉態響應，以相同數目元件所組成的濾波電路，但是通帶區內漣波值不同時，當漣波越大者，進入截止區的衰減斜率越大，反之越小，如圖3-3(b)。

3. 橢圓濾波器(Elliptic filter)

此種濾波器擁有最快速的衰減響應，其在通帶及截止帶均有漣波的產生，而在截止帶多了傳輸零點造成其衰減速率增加，此種濾波器能以最少的元件達到良好的衰減特性，如圖3-3(c)。

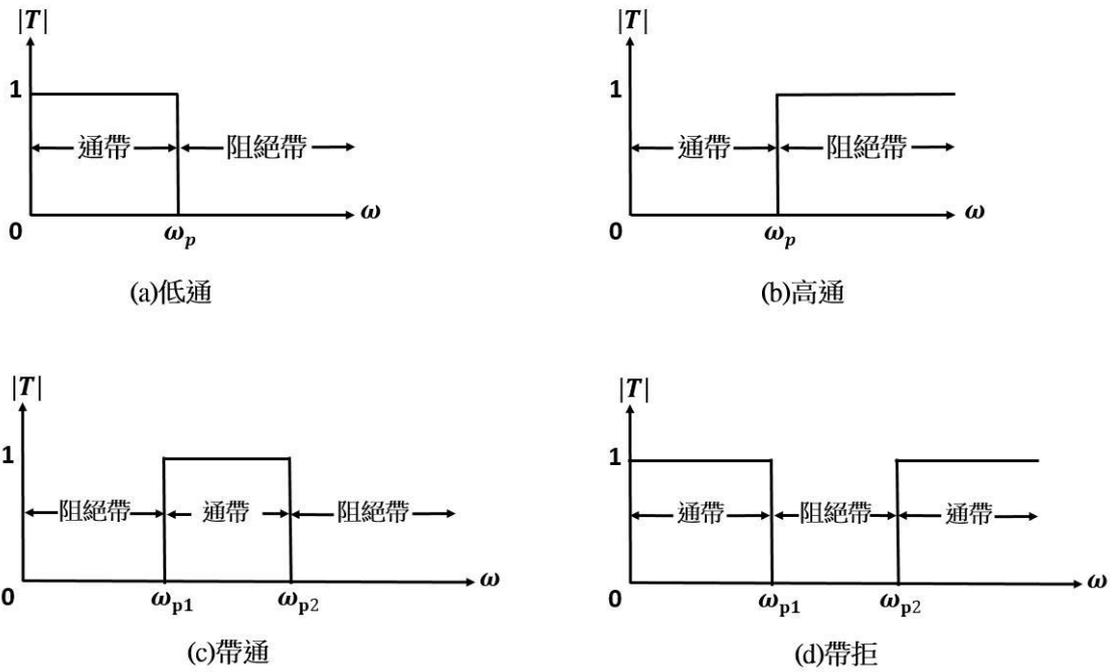


圖3-2A 各頻帶濾波器示意圖

(a)低通濾波器(b)高通濾波器(c)帶通濾波器(d)帶拒濾波器

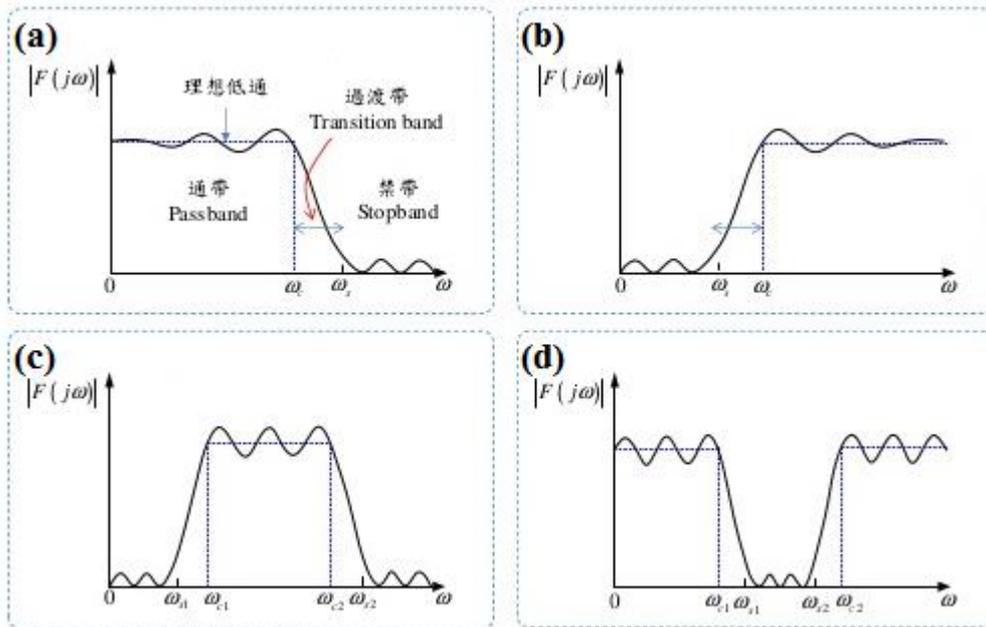
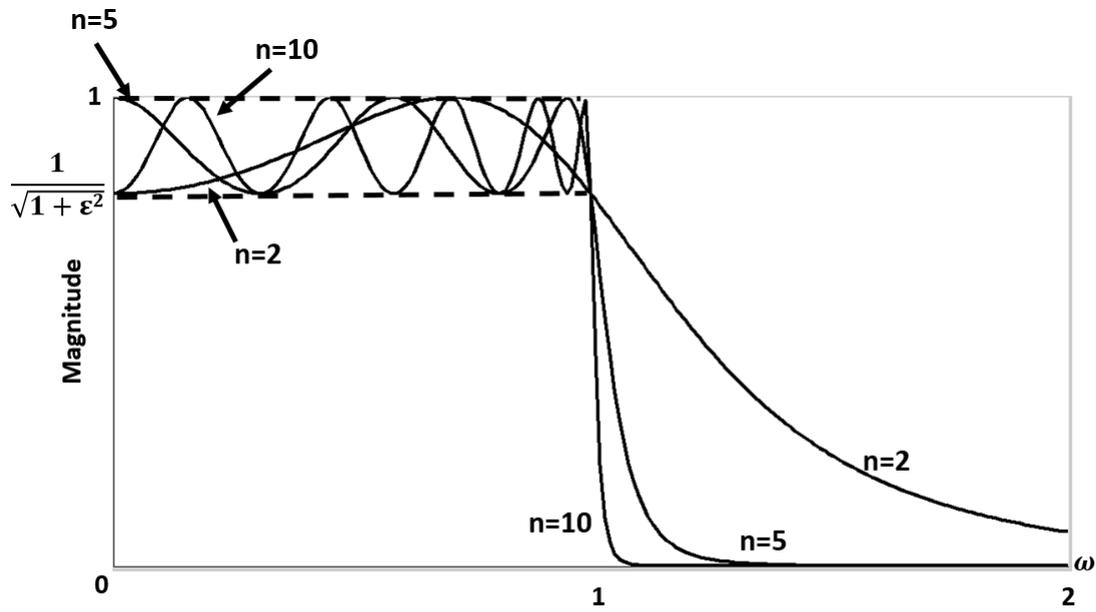
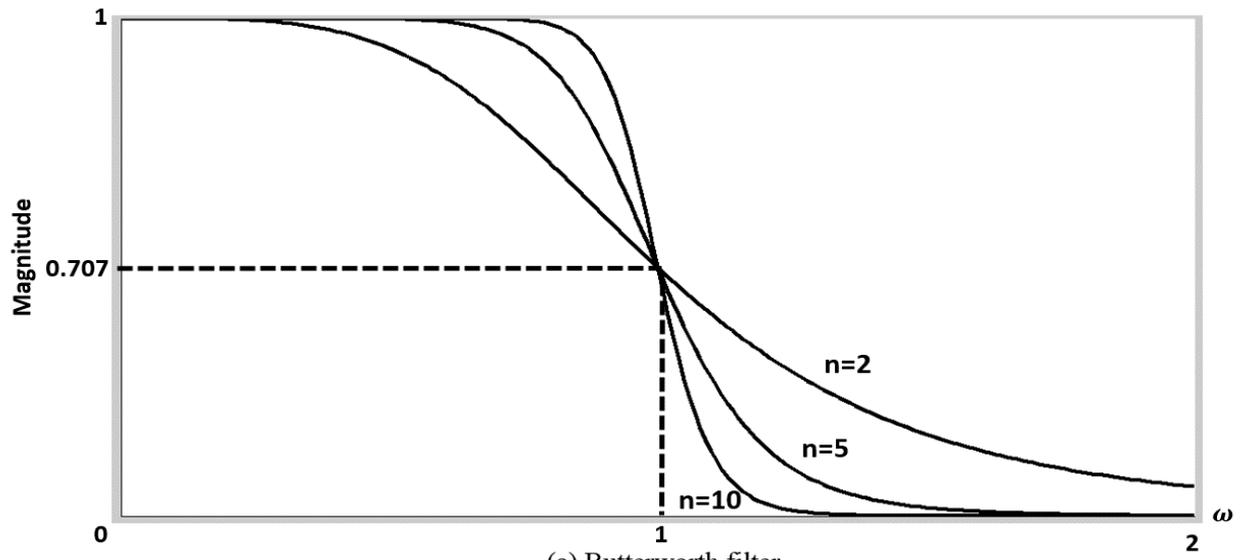
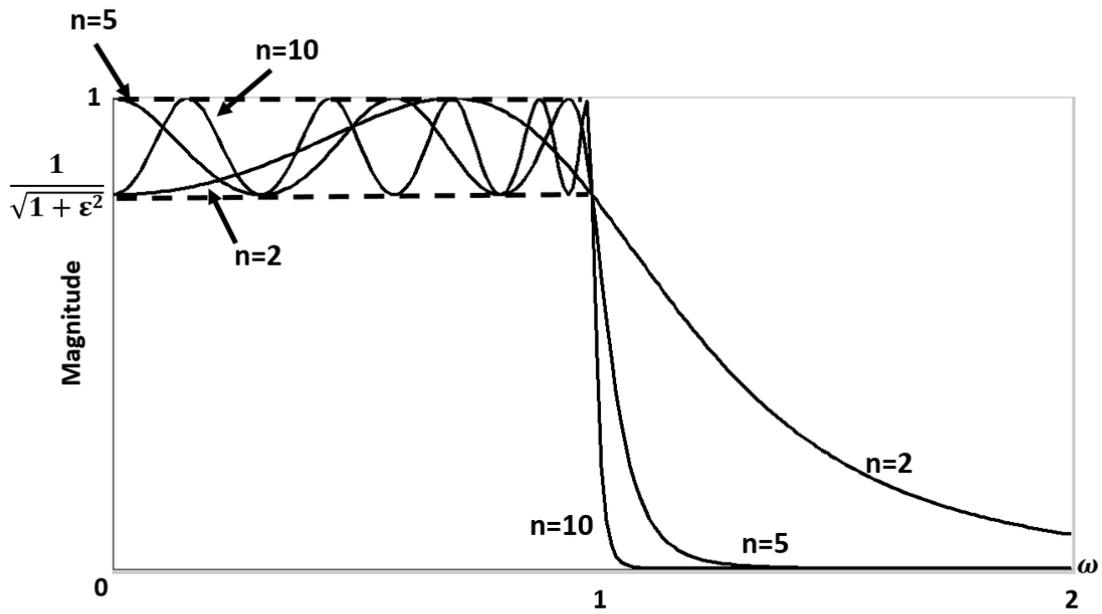


圖3-2B 各頻帶濾波器響應形式

(a)低通濾波器(b)高通濾波器(c)帶通濾波器(d)帶拒濾波器





(b) Chebyshev filter

圖3-3 三種濾波器的低通原型圖

(a) 巴特沃斯濾波器 (b) 柴比雪夫濾波器 (c) 橢圓濾波器



3-2 微帶線原理

3-2-1 微帶傳輸線的簡介

微帶線有兩層導體層，其中下層完全作為接地層(ground layer)用，上層則佈線(layout)設計成所需的電路線，如圖 3-4[19]，中間即以平板狀介電基板隔開這兩層導體層，並提供電磁波所需的傳導空間，這種傳輸線可使用印刷電路技術或用於半導體制程中的各種蝕刻技術製成微波積體電路(Microwave Integrated Circuit : MIC)，所以可得體積小且質輕之元件或電路，具有可小型化的優點。

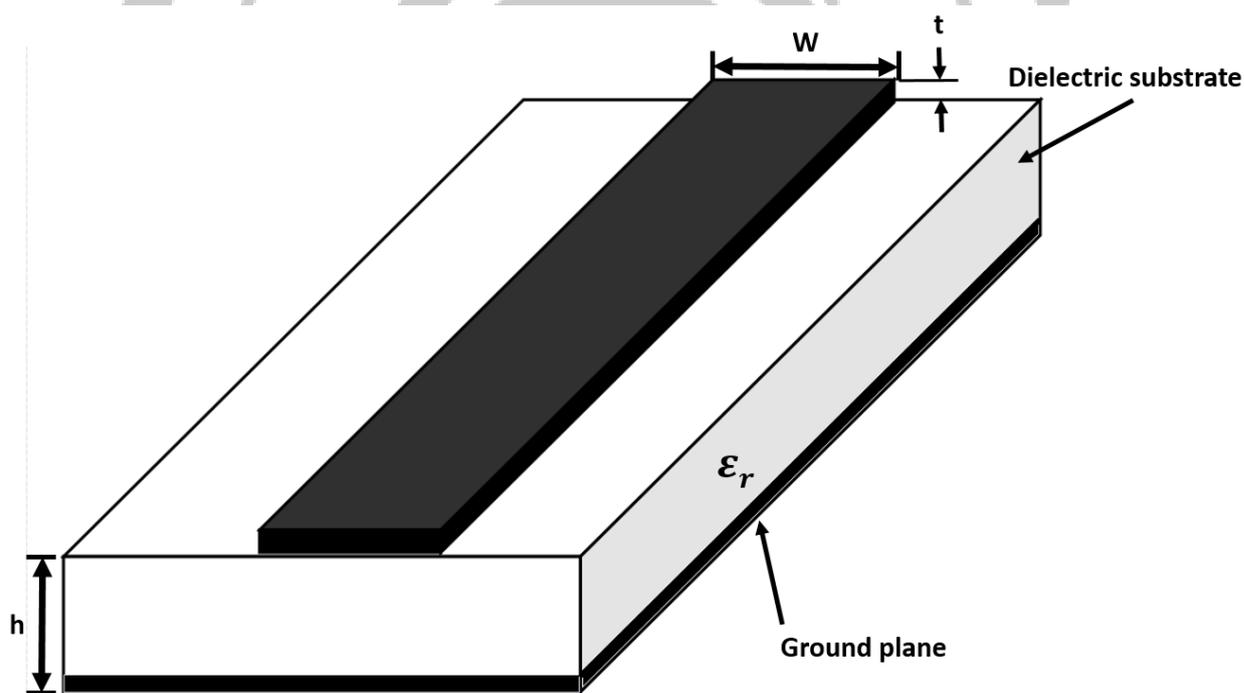


圖 3-4 微帶線之外觀圖

3-2-2 微帶線的傳輸模態

一平行傳輸線若置於空氣或單一均勻的介質體中，則依據其電磁場的邊界條件，其可傳送較低模態的TEM波。然而，當微帶線使用介質體做為基板，而上方是空氣層時，電磁場在兩介質交界處即產生新的邊界條件，而其電場在兩種不同的介電質中分布情況也會有所不同，如圖3-5所示。因為介質的不均勻，電磁波在微帶線上傳播時會產生高階模態，因而其傳播模態不再是單一的TEM波，而是一種TE-TM的混和波。

但在大部分的微帶線中其基板的厚度都遠小於在其上傳播的電磁波波長，因而在介質內傳播的電磁波模態會近似TEM波，這種模態為準TEM波(quasi-TEM)。若使用準靜態近似，則能獲得其相位速度、傳播常數及特性阻抗等的近似值，運用這些近似值即可對此微帶線的各项參數進行分析。

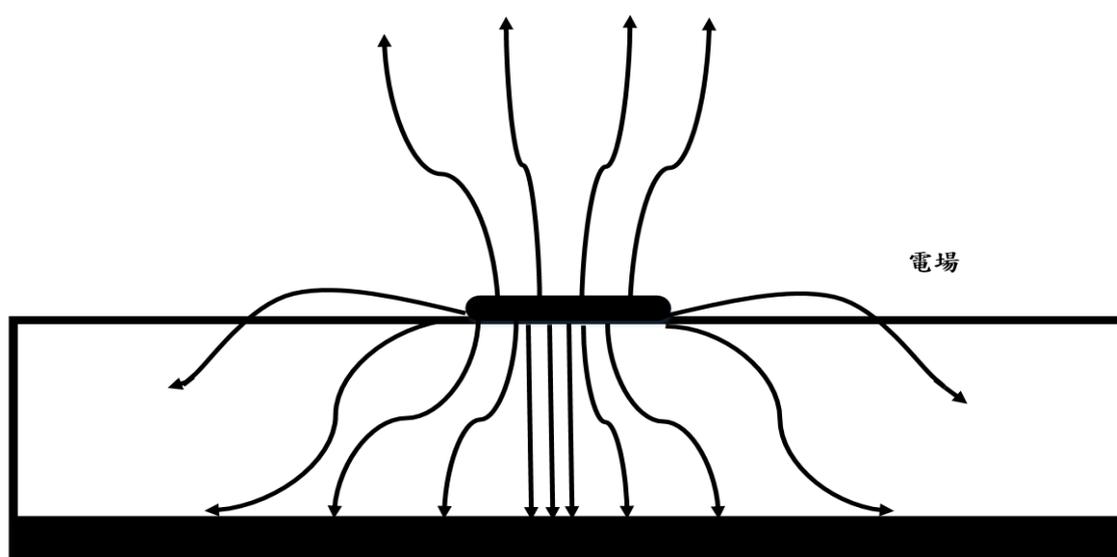


圖 3-5 微帶線之電場分佈圖

3-2-3 微帶線各項參數公式計算及考量

當我們將微帶傳輸線印製在一個介電材料上時，對於微帶線上的各項參數，希望能將兩介電層對於傳輸線的影響視為一等效的介電層，如此便可用單一的等效介電係數、等效特性阻抗來分析電磁波在傳輸線上的波速、相速、電氣長度等參數之近似值。以下針對較常用的公式將其列出[9]。

1. 等效介電係數公式：

當 $\frac{W}{h} \leq 1$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-0.5} + 0.04 \left(\frac{W}{h} \right)^2 \right] \quad (\text{式3-1})$$

當 $\frac{W}{h} \geq 1$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} \quad (\text{式3-2})$$

其中

ϵ_e ：等效介電係數

ϵ_r ：介質基板介電係數

h ：介質基板厚度

W ：微帶線寬度

2. 等效特性阻抗公式：

當 $\frac{W}{h} \leq 1$

$$Z_0 = \frac{\eta}{2\pi\sqrt{\epsilon_e}} \ln\left(\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h}\right) \quad (\text{式3-3})$$

當 $\frac{W}{h} \geq 1$

$$Z_0 = \frac{\eta}{\sqrt{\epsilon_e}} \left[\frac{W}{h} + 1.393 + 0.677 \ln\left(\frac{W}{h} + 1.444\right) \right]^{-1} \quad (\text{式3-4})$$

其中

Z_0 : 等效特性阻抗

ϵ_e : 等效介電係數

h : 介質基板厚度

W : 微帶線寬度

η : 空氣中之波阻抗, $\eta = 120\pi$

利用以上兩個等效參數，我們可得知微帶線上的其他參數，如：

1. 電磁波在微帶線中的相速(Phase velocity : v_p)

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (\text{式3-5})$$

其中

C : 光速

2. 電磁波在微帶線中的波數(Wave number : β)

$$\beta = \frac{w}{v_p} \quad (\text{式3-6})$$

其中

w : 電磁波的角頻率

3. 電磁波在微帶線中的波長(Guided wavelength : λ_g)

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} \quad (\text{式3-7})$$

4. 電磁波在微帶線中的電氣長度(Electric length : θ)

$$\theta = \frac{2\pi l}{\lambda_g} \quad (\text{式3-8})$$

其中

l : 傳輸線之長度

由這些參數我們便可藉由調整微帶線的線長、線寬和基板的介電係數來設計所需要的傳輸線及元件。

3-2-4 微帶線的不連續效應

當微帶線為一條直線時，其上之電磁場呈現規則且連續性的分布，且其模態也固定不變。但是當微帶線的佈局出現不連續的情況，如彎折、開路、線寬突然改變、出現分岔路徑等，在這些不連續的地方其電磁場的邊界條件即產生變化，原本的單一模態不能滿足其邊界條件，所以在這些地方會有高階模態的產生，其電磁場也呈現不同的分布狀態。針對這些不連續效應及其所感應出的各種寄生效應，有些等效模組被提出，這些等效模組在適用範圍內能將複雜的電磁場問題用等效電感或電容的串並聯來將其簡化，方便設計者在電路的設計和佈局上能評估其影響。以下對幾種不連續效應來做介紹。

1. 開路端效應

如圖3-6，當一微帶線在終端呈現開路狀態時，其電磁場在開路端附近會因邊界效應的不同而導致一些散射場延伸至線外，我們可將此效應等效為一段虛設的傳輸線長度(Δl)或是一個並聯的電容(C_0)，其等效參數值如下[10]:

$$\frac{\Delta l}{h} = 0.412 \frac{\epsilon_e + 0.3}{\epsilon_e - 0.258} \left[\frac{\frac{W}{h} + 0.262}{\frac{W}{h} + 0.813} \right] \quad (\text{式3-9})$$

$$C_0 = \frac{\Delta l \sqrt{\epsilon_e}}{cZ_0} \quad (\text{式3-10})$$

其中

W : 微帶線寬度

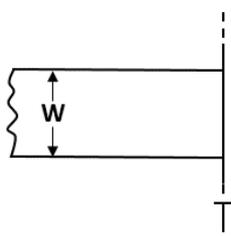
h : 基板厚度

ϵ_e : 微帶線的等效介電係數

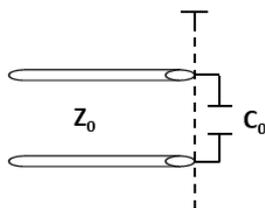
c : 光速

Z_0 : 微帶線之等效特性阻抗

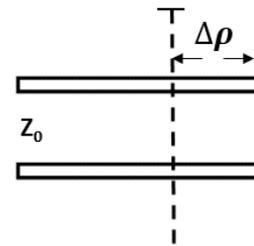
Open End



(a) 開路微帶線



(b) 等效電容模型



(c) 等效長度模型

圖3-6 微帶線開路端效應電路及等效圖

2. 串聯微帶線間的間距效應

如圖3-7，當兩串聯的微帶線間有一小段間距時，能量會以耦合的方式從第一條傳輸線的開路端耦合至另一條傳輸線。從電壓的觀點來看，在兩介質的開路端間會感應出等量但極性相反的電荷體，形成一對類似乎型電容版的情形，因此我們可以依電容效應 C_g 來等效兩個開路端的耦合效應。另外，考慮到兩個開路端對地之邊緣電磁場效應，在兩端需要再額外加上電容 C_f 來等效。其等效參數如下[25]：

$$C_f = \frac{C_{even}}{2} \quad (式3-11)$$

$$C_g = \frac{C_{odd} - C_f}{2} \quad (式3-12)$$

$$C_{even} = \left(\frac{\epsilon_r}{9.6}\right)^{0.9} C_e \quad (式3-13)$$

$$C_{odd} = \left(\frac{\epsilon_r}{9.6}\right)^{0.8} C_0 \quad (式3-14)$$

$$\frac{C_e}{W} (pf/m) = \left(\frac{g}{W}\right)^{m_e} \exp(k_e) \quad (式3-15)$$

$$\frac{C_0}{W} (pf/m) = \left(\frac{g}{W}\right)^{m_o} \exp(k_o) \quad (式3-16)$$

當 $0.1 < \frac{g}{W} < 0.3$ 時:

$$m_e = 0.8675 \quad k_e = 2.043 \left(\frac{W}{h}\right)^{0.12} \quad (式3-17)$$

當 $0.3 < \frac{g}{W} < 1.0$ 時:

$$m_e = \frac{1.565}{\left(\frac{W}{h}\right)^{0.16}} - 1 \quad k_e = 1.97 - \frac{0.03}{\frac{W}{h}} \quad (式3-18)$$

當 $0.1 < \frac{g}{W} < 1.0$ 時:

$$m_o = \frac{W}{h} (0.619 \log \frac{W}{h} - 0.3853) \quad k_o = 4.26 - 1.453 \log \frac{W}{h} \quad (式3-19)$$

其中

C_e : 當基板為介電係數 $\epsilon_r=9.6$ 的氧化鋁材質時的偶模態等效間隙電容

C_0 : 當基板為介電係數 $\epsilon_r=9.6$ 的氧化鋁材質時的奇模態等效間隙電容

C_{even} : 當基板為介電係數 ϵ_r 時的偶模態等效間隙電容

C_{odd} : 當基板為介電係數 ϵ_r 時的奇模態等效間隙電容

W :微帶線寬度

g :兩微帶線開路端之間隙

h :基板厚度

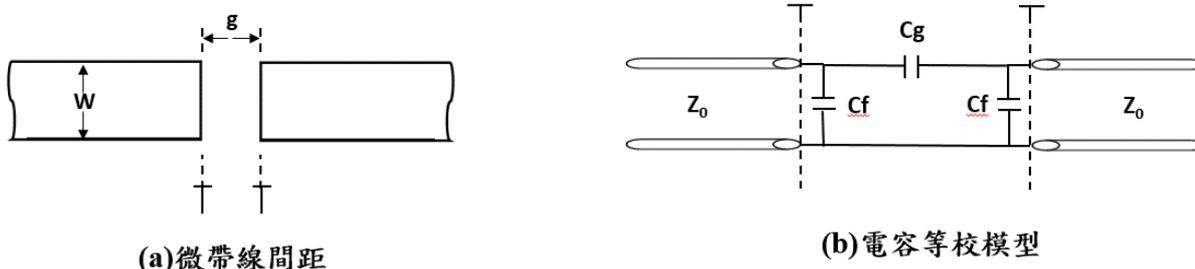


圖 3-7 串聯微帶線間距效應電路及等效圖

3. 步接阻抗效應

如圖 3-8，當微帶線的線寬突然改變時，會造成電磁場的不連續性，此不連續效應可等效為一個串聯電感 L 和一個並聯電容 C ；或者再轉換成兩個電感 L_1 、 L_2 和一個電容 C 的 T 型網路。其中電容代表在邊界處多餘電荷的累積和接合處寬微帶線開路部分產生的邊緣電場效應，電感則代在接合處因寬度改變造成的電流密度擁擠現象。各等效模型之參數推導如下[26]：

$$\frac{C}{h} (\text{pF}/m) = 1370 \frac{\sqrt{\epsilon_{e1}}}{Z_{01}} \left(1 - \frac{W_2}{W_1}\right) \left(\frac{\epsilon_{e1} + 0.3}{\epsilon_{e1} - 0.258}\right) \left(\frac{W_1 + 0.264}{\frac{W_1}{h} + 0.8}\right) \quad (\text{式 3-20})$$

$$L_1 = \frac{L W_1}{L_{W1} + L_{W2}} L \quad (\text{式 3-21})$$

$$L_2 = \frac{L W_2}{L_{W1} + L_{W2}} L \quad (\text{式 3-22})$$

$$\frac{L}{h} (\mu H/m) = 0.987 \left(1 - \frac{Z_{01}}{Z_{02}} \sqrt{\frac{\epsilon_{e1}}{\epsilon_{e2}}} \right)^2 \quad (\text{式 3-23})$$

其中

L_{w1} : 線寬為 W_1 之微帶線單位等效電感值

L_{w2} : 線寬為 W_2 之微帶線單位等效電感值

h : 基板厚度

ϵ_{e1} : 線寬為 W_1 之微帶線等效介電係數

ϵ_{e2} : 線寬為 W_2 之微帶線等效介電係數

Z_{01} : 線寬為 W_1 之微帶線等效特性阻抗

Z_{02} : 線寬為 W_2 之微帶線等效特性阻抗

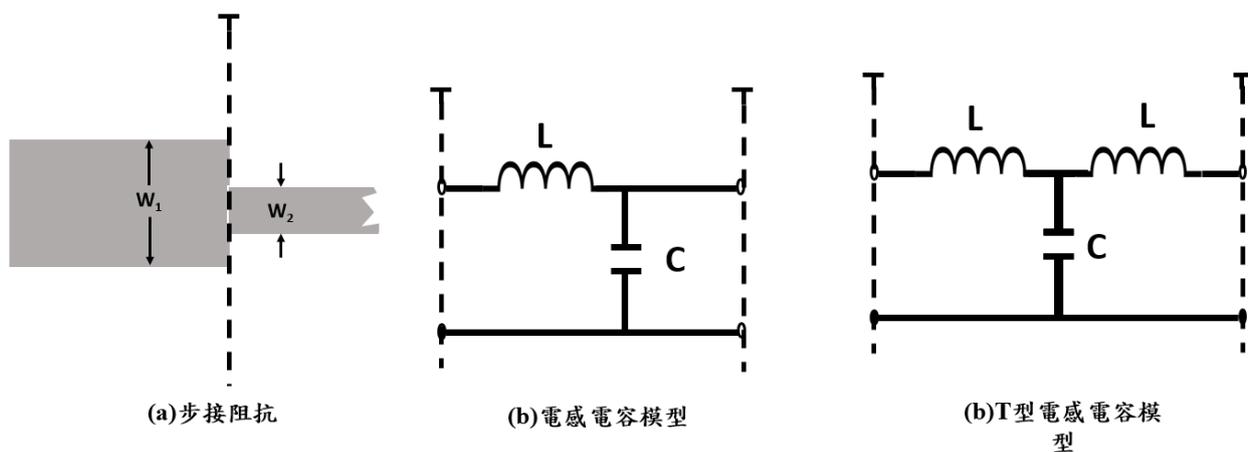


圖 3-8 步階阻抗效應電路及等效模型

4. 直角彎折效應

如圖 3-9，微帶線在佈局時有一個 90 度直角彎折，當一行進波在前進時遇到彎折處，部分的波將會反彈導致電磁場的分布不均勻，並在彎折處累積額外的電荷量，造成一電容效應 C 的產生，此效應在彎折處的外緣尤其明顯。另外，由於電流的不連續效應，導致在此彎折處也有電感效應 L 的產生。其等效參數為：

$$\text{當 } \frac{W}{h} < 1$$

$$\frac{C}{W} (\text{pF}/\text{m}) = \frac{(14\varepsilon_r + 12.5)\frac{W}{h} - (1.83\varepsilon_r - 2.25)}{\sqrt{\frac{W}{h}}} + \frac{0.02\varepsilon_r}{\frac{W}{h}} \quad (\text{式 3-24})$$

$$\text{當 } \frac{W}{h} \geq 1$$

$$\frac{C}{W} (\text{pF}/\text{m}) = (9.5\varepsilon_r + 1.25)\frac{W}{h} + 5.2\varepsilon_r + 7 \quad (\text{式 3-25})$$

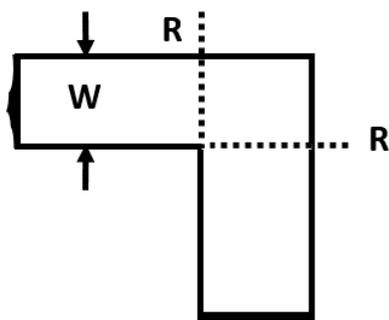
$$\frac{L}{h} (\text{nH}/\text{m}) = 100(4\sqrt{\frac{W}{h}} - 4.21) \quad (\text{式 3-26})$$

其中

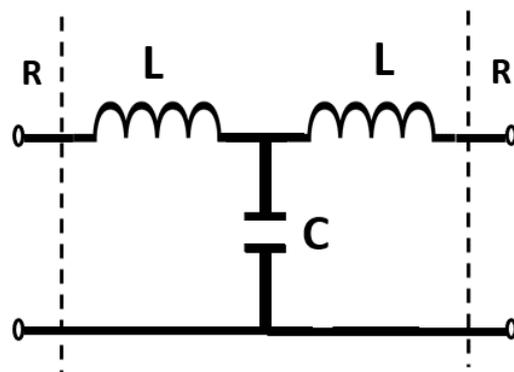
W ：微帶線寬度

h ：基板厚度

ε_r ：基板的介電係數



(a) 直角彎折效應



(b) 電感電容等校模型

圖 3-9 直角彎折效應電路及等效模型

5. T型接合微帶線

如圖 3-10，微帶線多了一個分流路徑，此種微帶線因在中間分岔路徑的不連續效應產生了等效電感 L_1 、 L_2 和電容 C_T ，其等效參數為[26]:

當 $25 \leq Z_{02} \leq 100$

$$\frac{C_T}{W_1} (\text{pF/m}) = \frac{100}{\tanh(0.0072Z_{02})} + 0.64Z_{02} - 261 \quad (\text{式 3-27})$$

當 $0.5 \leq \left(\frac{W_1}{h}, \frac{W_2}{h}\right) \leq 2$

$$\frac{L_1}{h} (\text{nH/m}) = -\frac{W_2}{h} \left\{ \frac{W_2}{h} \left(-0.016 \frac{W_1}{h} + 0.064 \right) + \frac{0.016}{W_1/h} \right\} L_{w1} \quad (\text{式 3-28})$$

當 $1 \leq \frac{W_1}{h} \leq 2$, $0.5 \leq \frac{W_1}{h} \leq 2$

$$\frac{L_1}{h}(\text{nH/m}) = \left[\frac{W_2}{h} \left(-0.016 \frac{W_1}{h} - 0.47 \right) - 0.357 + 0.0283 \sin \left(\pi \frac{W_1}{h} - 0.75\pi \right) + 0.195 \frac{W_1}{h} \right] L_{w2} \quad (\text{式 3-29})$$

其中

W_1 : 主微帶線寬度

W_2 : 分岔微帶線寬度

Z_{02} : 分岔微帶線之等效特性阻抗³⁶

h : 基板厚度

L_{w1} : 微帶線之單位等效電感

L_{w2} : 分岔微帶線之單位等效電感

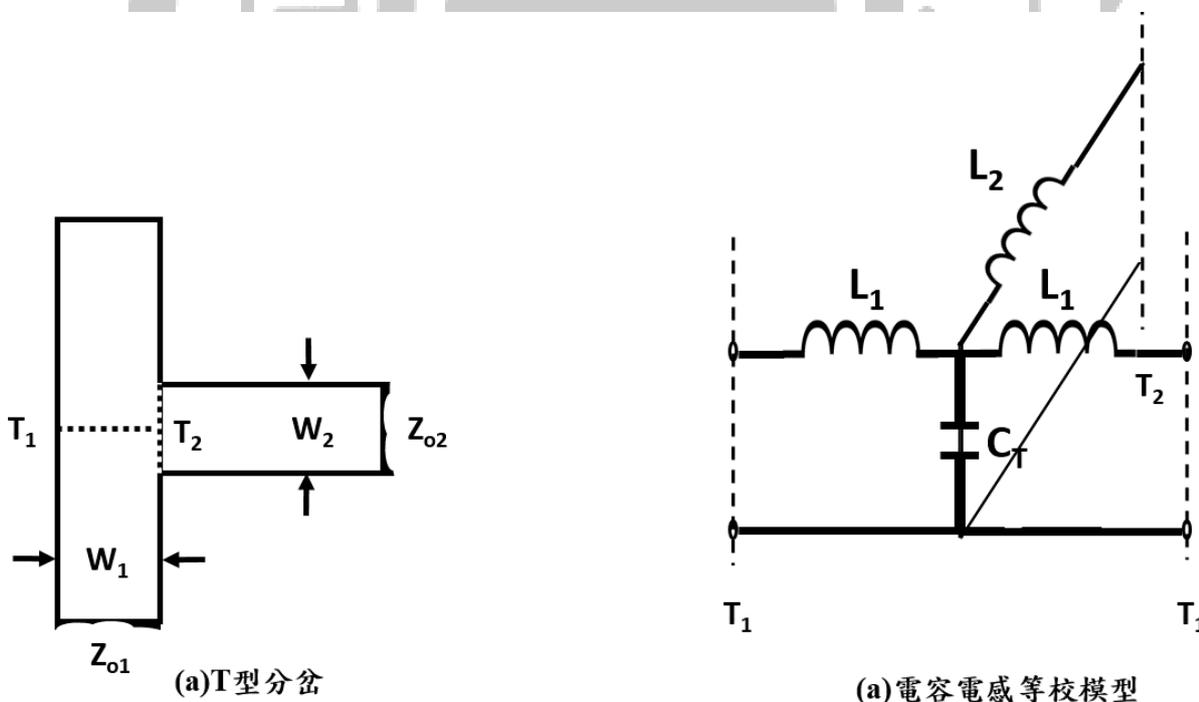


圖 3-10 微帶線 T 型分岔不連續效應

3-2-5 微帶線的損失

微帶線的損失主要分為導體損、介電損和幅射損[20-22]。在導體損方面，一般我們以下列的導體衰減常數表示：

$$\alpha_c = \frac{8.686R_s}{Z_c W} \text{ dB/unit length} \quad (\text{式3-30})$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}} \text{ } \Omega/\text{per square} \quad (\text{式3-31})$$

其中

Z_c ：微帶線寬度為W時之特性阻抗

R_s ：每平方單位導體的表面電阻

ω ：角頻率

μ_0 ：真空中的導磁係數

σ ：傳導係數

而介電衰減常數以下列公式表示：

$$\alpha_d = 8.686\pi \left(\frac{\epsilon_{re}-1}{\epsilon_r+1} \right) \frac{\epsilon_r \tan\delta}{\epsilon_{re} \lambda_g} \text{ dB/unit length} \quad (\text{式3-32})$$

其中

$\tan\delta$ ：介電基板的損失正切。

在一般的低損介電材料中，導體的損耗較介質的損耗來的大，而微帶線的幅射損耗能藉由將其置於金屬封裝盒中來防止電磁波能量的外洩，同時此封裝盒也可以避免元件受到外來電磁波的影響，所以具有屏蔽的作用。

3-3 微帶線諧振器種類

在低頻濾波器中，主要是由集總元件電容，電感所構成。而製作低頻濾波器的方法是用查表的方式獲得構成濾波器的各個電容和電感值，便可完成該濾波器的基本架構。但在高頻的領域中，由於沒有可以適用於高頻的理想電容與電感元件，故必須引用其他可適於高頻使用的諧振器機制以及適合的諧振器間能量傳遞方式。而應用於高頻的諧振器中，最方便使用為平面式的微帶線諧振器。

在微帶線諧振器中，四分之一波長單端短路的傳輸線與二分之一波長開路的傳輸線均可等效為電容、電感組成的諧振電路模型，且具有結構簡單和體積小的優點，因此微帶線諧振器的選擇以此兩類微帶線諧振器以及其所變形的微帶線諧振器為主要。而此兩類微帶線作變形而產生的新微帶線諧振器結構中，主要用於於盡量減少諧振器所占的電路板體積，這對於邁向輕薄短小且大量使用濾波器的高頻通訊電路產品而言，是降低產品體積的重要考量。下面將逐一介紹上述兩種微帶線諧振器結構[27]。

3-3-1 $\lambda/4$ 短路微帶線共振器

圖 3-11 為四分之一波長微帶線短路傳輸線的示意圖，而在所有的微帶線諧振器中，佔用電路板面積最小的諧振器結構就是四分之一波長短路微帶線諧振器，而此種諧振器型式所製作成的指叉型(Interdigital)濾波器如圖 3-12。此結構雖然有佔電路面積較小的優點，但在製作時必須在電路板上穿孔接地，來達成單端短路，而穿孔接地會增加電路製作的複雜度和困難度。

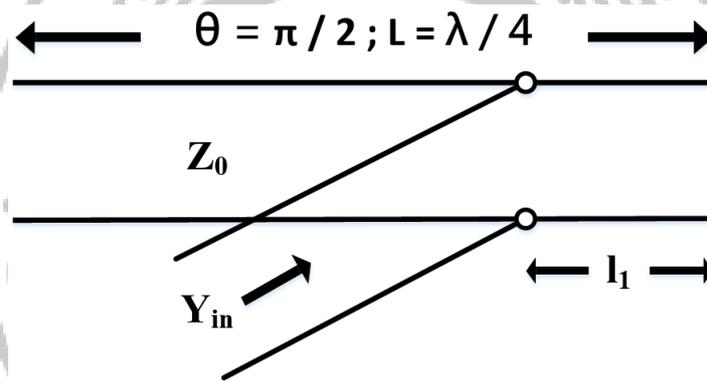


圖 3-11 四分之一波長微帶線短路傳輸線

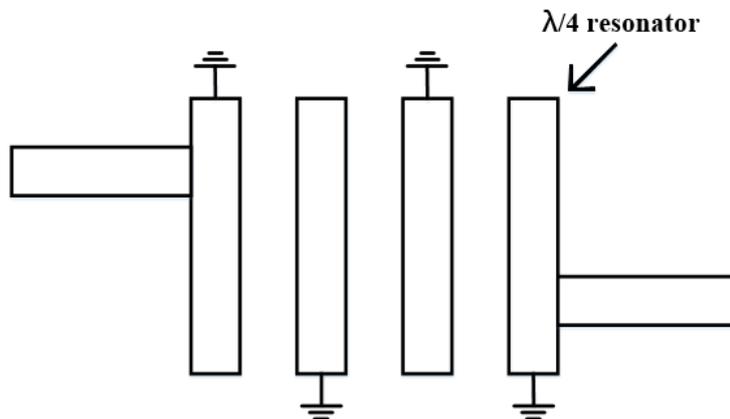


圖 3-12 指叉型(interdigital)濾波器

3-3-2 $\lambda/2$ 開路微帶線共振器

圖3-13為二分之一波長微帶線諧振器的傳輸線示意圖，與上述的四分之一波長短路微帶線諧振器比較，二分之一波長開路微帶線諧振器所佔用的電路面積雖然比較大，但是二分之一波長開路微帶線諧振器不需要穿孔接地，有在製作上較為容易的優點。圖3-14就是使用此種諧振器所完成的平行耦合線(Parallel coupled-line)濾波器。

二分之一波長開路微帶線諧振器的另一個為 U 型的諧振器(Hairpin-line Resonator)，將二分之一波長開路的微帶線凹成 U 形，便可形成此種諧振器，如圖 3-15 所示。與二分之一波長開路微帶線諧振器比較，此諧振器結構可以更加有效利用電路板面積，更可以依照 Interdigital 設計的方式來製作濾波器。另一個與 U 型諧振器相似的諧振器變形，是將二分之一波長開路微帶線諧振器，曲折成正方形的樣式而成為一正方形開迴路諧振器，如圖 3-16 所示。

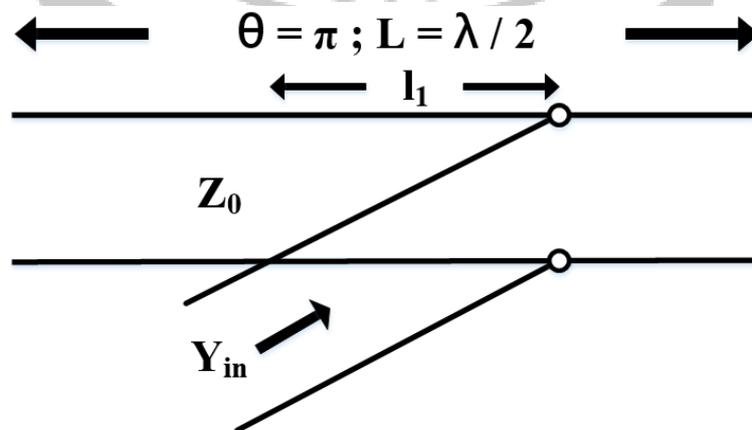


圖 3-13 二分之一波長微帶線諧振器的傳輸線示意圖

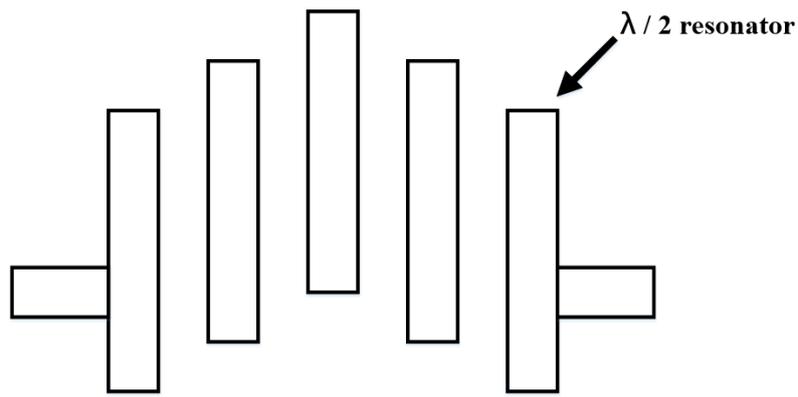


圖 3-14 平行耦合線濾波器

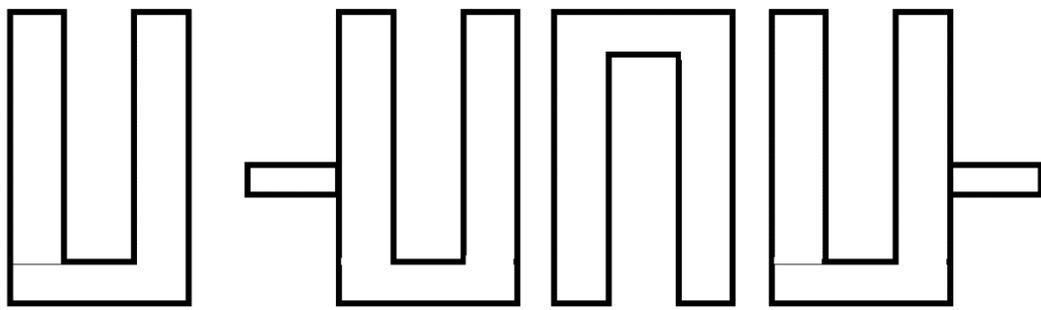


圖 3-15 U 型諧振器與 U 型濾波器

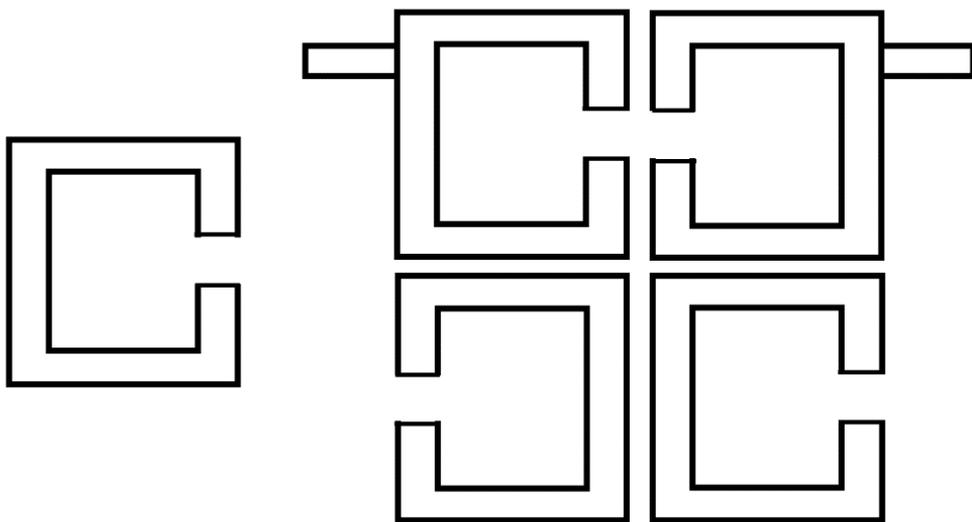


圖 3-16 正方形開迴路諧振器與開迴路諧振器濾波器

3-4 共振器間的耦合形式

微帶線方形開迴路共振器的基本耦合結構可分為三種：電場耦合(Electric coupling)、磁場耦合(Magnetic coupling)、混合耦合(Mix coupling)。這些耦合結構是利用一對完全相同微帶方形開迴路共振器依其不同的排列方式所完成。在這些耦合架構中，任何的耦合量是由相鄰共振器洩漏的電(磁)場(Fringing fields)所提供。因此，洩漏的電(磁)場的性質與大小將會決定耦合的性質與耦合量的大小，以下對各種耦合類型的特性作介紹。

3-4-1 電場耦合：

如圖 3-17 所示為微帶線共振器在共振時其電場最大峰值分佈情形，由圖中可得知，微帶線共振器在共振時，其電場最強處是位於微帶線的開路端，因此將兩相鄰的微帶線共振器以開路端相對，便可獲得電場耦合，此時耦合量可以兩共振器間的互容(Mutual capacitance)量來表示，所以此種耦合結構又稱為電容性耦合。如圖 3-18 所示為幾個電場性耦合的共振器佈局。

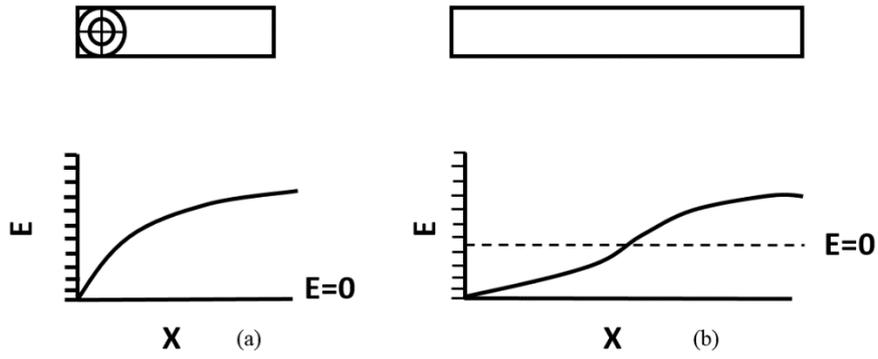


圖 3-17 微帶線共振器之電場強度分佈圖(a) $\lambda/4$ 短路(b) $\lambda/2$ 開路

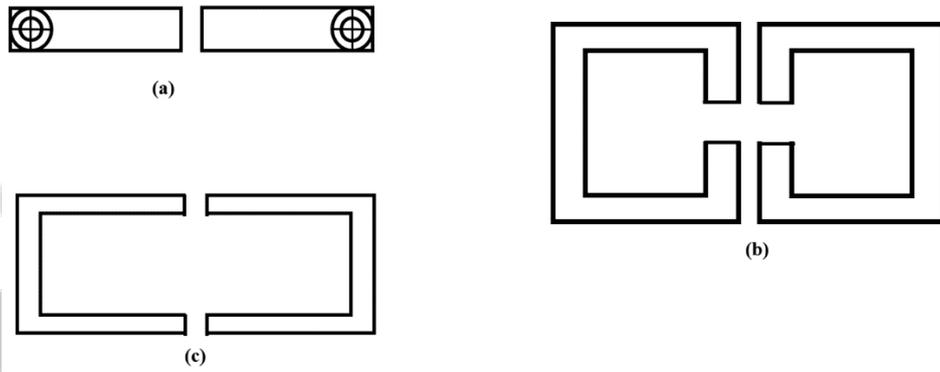


圖 3-18 幾種電場耦合的共振器佈局

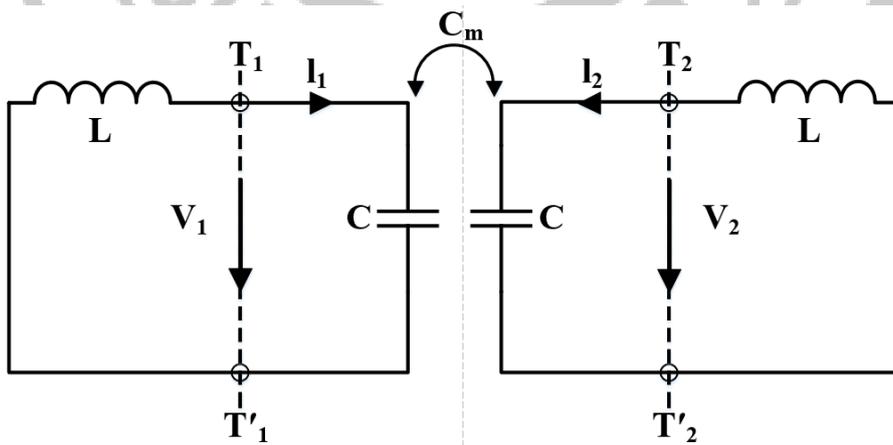


圖 3-19 兩電場耦合的共振器之等效電路圖

當兩共振器為電場耦合時，且操作在共振頻率附近時，此時圖 3-18 的集總元件(Lump Element)等效電路模型可以用圖 3-19 來表示，圖 3-19 中的 L 與 C 分別表示為個別共振器的自感值與自容值，所以當單共振器未耦合時，其共振角頻率為 $1/\sqrt{LC}$ ，而圖 3-19 中的表示為兩共振器耦合時的互容值。需要注意的是如果耦合結構是散布式元件(Distributed element)，其集總式元件等效電路僅在共振頻率附近才有效。

若由參考平面 T_1-T_1' 與 T_2-T_2' 看進去時，將可以得到一個雙埠(Two-port)網路。假設此一網路處於弦波穩態的條件下，則可以得到下列的方程式：

$$I_1 = j\omega CV_1 - j\omega C_m V_2 \quad (\text{式 3-33})$$

$$I_2 = j\omega CV_2 - j\omega C_m V_1 \quad (\text{式 3-34})$$

將上兩式稍作整理，便可得到此電路的導納矩陣(Admittance matrix)，則四個 Y 參數(Y parameters)：

$$Y_{11} = Y_{22} = j\omega C \quad (\text{式 3-35})$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -j\omega C_m \quad (\text{式 3-36})$$

根據網路定理可知，當一已知的導納矩陣，且在 $Y_{11} = Y_{22}$ 以及 $Y_{12} = Y_{21}$ 的情況下，可將此導納矩陣電路部分等效成等效型網路，如圖 3-20 所示

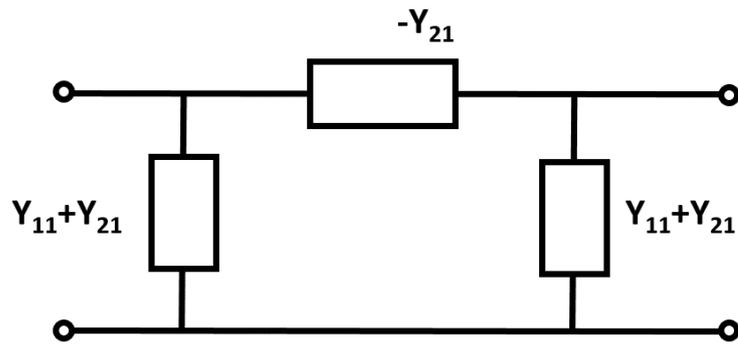


圖 3-20 當 $Y_{11}=Y_{22}$ 以及 $Y_{12}=Y_{21}$ 的等效 π 型網路

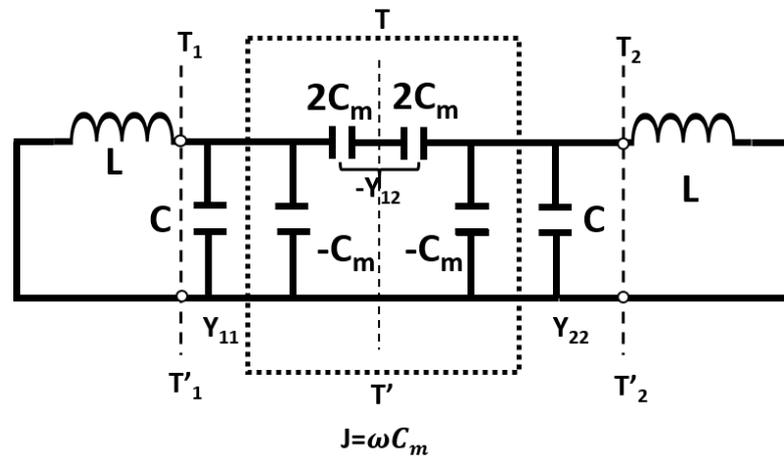


圖 3-21 表示電場耦合使用導納反轉子的另一種等效電路圖

所以圖 3-19 中 T_1-T_1' 到 T_2-T_2' 之間的電路可以模擬成圖 3-21 中 T_1-T_1' 與 T_2-T_2' 的部分，圖 3-21 中的虛線部分 J 代表導納反轉子(Admittance inverter)，所以由圖 3-21 中可看出，兩共振器的電場耦合已經表示成 $J=\omega C_m$ 。假設在圖 3-21 的對稱平面 T_1-T_1' 上，置入一電場牆(Electric wall)(電場牆就是短路的意思，也可想成是奇模態(Odd mode))，此刻單共振器電路之共振頻率為：

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C+C_m)}} \quad (\text{式 3-37})$$

觀察上式可以知道，電場耦合在奇模態的情形下，共振頻率比單共振器未共振時還低；這在物理上面的解釋是在電場耦合結構的對稱平面上，引入一電場牆，結果增強了共振器儲存電荷的能力。相同地，假如在圖 3-21 的對稱平面 $T-T'$ 上，置入一磁場牆(Magnetic wall)(所謂磁場牆就是開路的意思，也可想成是偶模態(Even mode))，此刻單共振器之共振頻率為：

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C-C_m)}} \quad (\text{式 3-38})$$

在這例子裡，因為耦合效應減少了共振器儲存電荷的能力，以致於共振頻率增加。經由(式 3-37)以及(式 3-38)可以找出電場耦合係數(Electric coupling coefficient) k_E ：

$$k_E = \frac{f_m^2 - f_e^2}{f_m^2 + f_e^2} = \frac{C_m}{C} \quad (\text{式 3-39})$$

3-4-2 磁場耦合：

從上節可知當微帶線共振器在共振時，其電場分佈最強處是位於微帶線的開路端；相對地，其磁場分佈最強則是位於微帶線的短路端或是兩開路端之中點，亦即在電場強度為零處，如圖 3-22 所示。

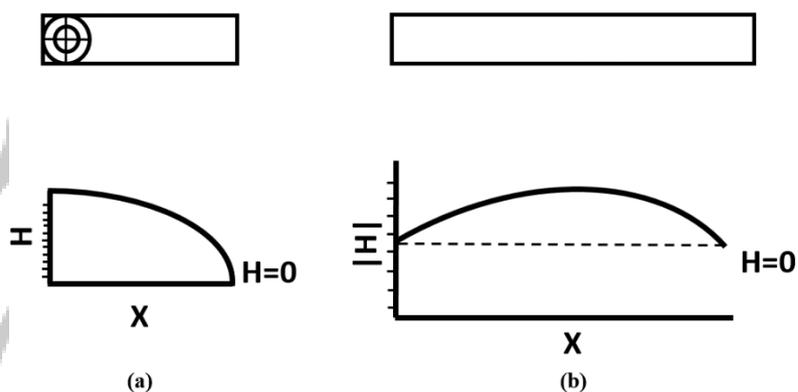


圖 3-22 微帶線共振器之磁場強度分佈圖(a) $\lambda/4$ 短路(b) $\lambda/2$ 開路

因此將兩相鄰的微帶線共振器以短路端或是以兩開路端中點相對，便可獲得磁場耦合，此時耦合量可以兩共振器間的互感(Mutual inductance)量來表示，所以此種耦合結構又稱為電感性耦合；如圖 3-23 所示為幾個磁場性耦合的共振器佈局。

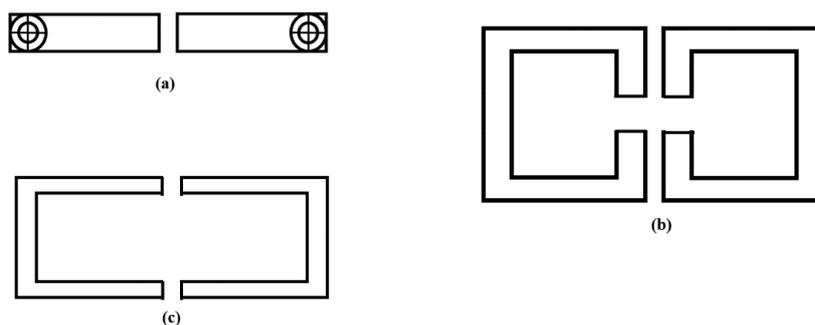


圖 3-23 幾種磁場耦合的共振器佈局

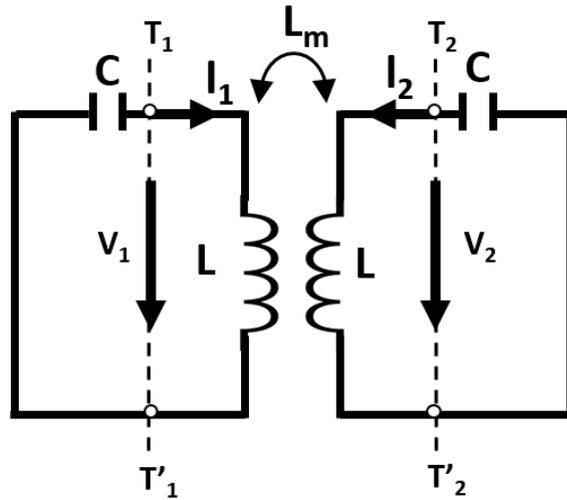


圖 3-24 兩磁場耦合的共振器之等效電路圖

當兩共振器為磁場耦合時，其集總元件的等效電路如圖 3-24 所示；圖 3-24 中的 L 與 C 分別表示為個別共振器的自感值與自容值。同樣地，當單共振器未耦合時，其共振角頻率為 $1/\sqrt{LC}$ ，而圖 3-24 中的 L_m 表示為兩共振器耦合時的互感值。圖中參考平面 T_1-T_1' 到 T_2-T_2' 這部分的雙埠網路可以利用底下方程式來描述：

$$V_1 = j\omega L I_1 + j\omega L_m I_2 \quad (\text{式 3-40})$$

$$V_2 = j\omega L I_2 + j\omega L_m I_1 \quad (\text{式 3-41})$$

而從(式 3-40)以及(式 3-41)，可以找到阻抗矩陣(Impedance matrix)中的四個

Z 參數(Z-parameters)：

$$Z_{11} = Z_{22} = j\omega L \quad (\text{式 3-42})$$

$$Z_{12} = Z_{21} = j\omega L_m \quad (\text{式 3-43})$$

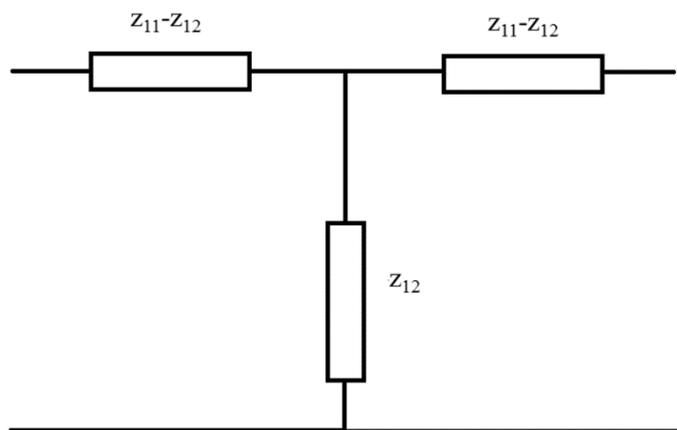


圖 3-25 當 $Z_{11}=Z_{22}$ 以及 $Z_{12}=Z_{21}$ 的等效 T 型網路

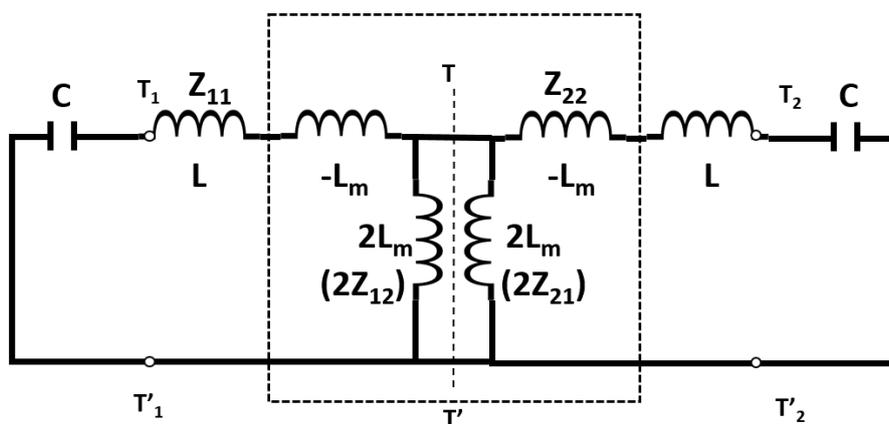


圖 3-26 表示磁場耦合使用阻抗反轉子的另一種等效電路圖

同樣地，由網路定理可知，當一已知的阻抗矩陣，且在 $Z_{11}=Z_{22}$ 以及 $Z_{12}=Z_{21}$ 的情況下，可將此阻抗矩陣電路部分等效成等效 T 型網路，如圖 3-25 所示；所以圖 3-24 中 T_1-T_1' 到 T_2-T_2' 之間的電路可以模擬成圖 3-26 中 T_1-T_1' 和 T_2-T_2' 的部分。圖 3-26 中的虛線部分代表阻抗反轉子 (Impedance inverter)，很明顯地，由圖

3-26 中可看出，兩共振器的磁場耦合已經表示成 $K=\omega L_m$ 。假如我們在圖 3-26 的對稱平面 $T-T'$ 上，置入一電場牆，此時單共振器電路之共振頻率為：

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L-L_m)C}} \quad (\text{式 3-44})$$

很明顯地，當對稱平面 $T-T'$ 引入一電場牆時，由於耦合的效應，減少了單共振電路所儲存的磁通量，共振頻率因而增加了；假如在圖 3-26 的對稱平面上置入一磁場牆，則此時單共振電路之共振頻率為：

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L+L_m)C}} \quad (\text{式 3-45})$$

在這例子裡，因為耦合效應增加了共振器儲存磁通量的能力，以致於共振頻率變小。相同地，由(式 3-44)及(式 3-45)兩式可以找出磁場耦合係數(Magnetic coupling coefficient) k_M ：

$$k_M = \frac{f_e^2 - f_m^2}{f_e^2 + f_m^2} = \frac{L_m}{L} \quad (\text{式 3-46})$$

3-4-3 混和耦合：

如圖 3-27 所示為另一種與電容性及電感性耦合結構相異的微帶線共振器佈局。此種結構的耦合特性並非單純地僅由電容性耦合或是電感性耦合所主宰，而是由電容性耦合與電感性耦合同時構成，則此類耦合形式我們稱之為混和耦合。

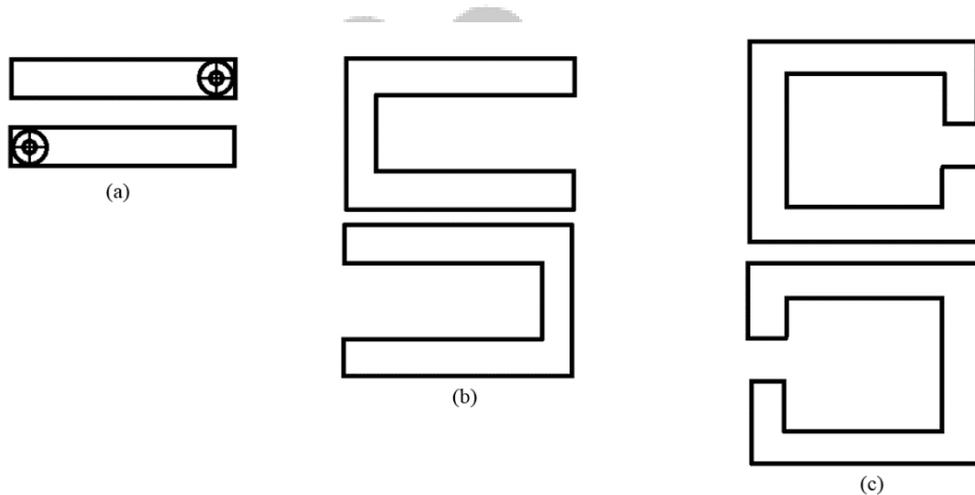


圖 3-27 幾種混和耦合的共振器佈局

若是以集總式等效電路來表示這種所謂的混和耦合，可見圖 3-28 和圖 3-29；可觀察出，從參考平面 T_1-T_1' 的左邊到參考平面 T_2-T_2' 的右邊為雙埠網路的 Y-參數部分；而從參考平面 T_1-T_1' 的右邊到參考平面 T_2-T_2' 的左邊是為雙埠網路的 Z-參數部分，則 Y 以及 Z 參數可以以下式子來表示：

$$Y_{11}=Y_{22}=j\omega C \quad (\text{式 3-47})$$

$$Y_{12}=Y_{21}=j\omega C'_m \quad (\text{式 3-48})$$

$$Z_{11}=Z_{22}=j\omega L \quad (\text{式 3-49})$$

$$Z_{12}=Z_{21}=j\omega L'_m \quad (\text{式 3-50})$$

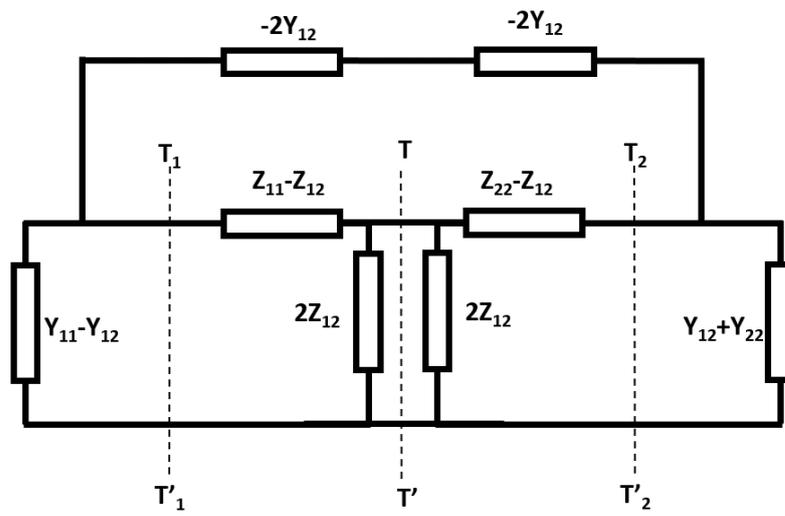


圖 3-28 兩混和耦合的共振器之等效電路圖

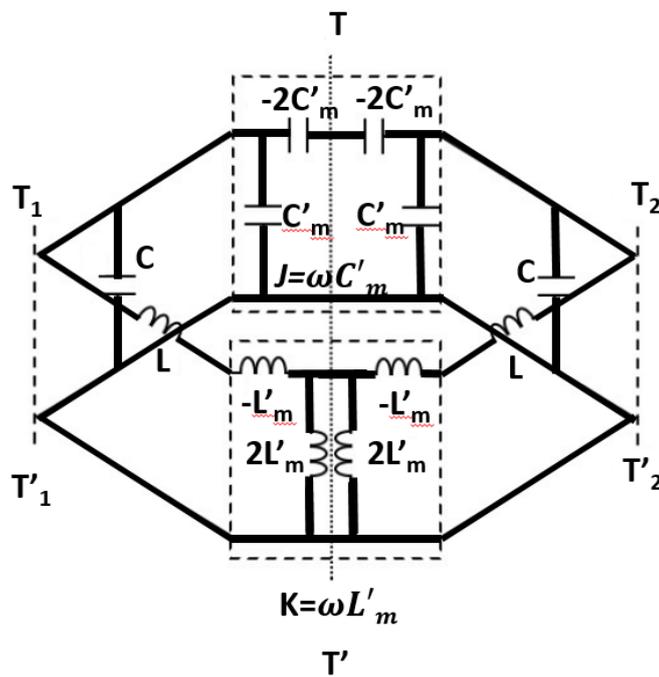


圖3-29 使用J-inverter & K-inverter分別代表電場、磁場耦合的另一種等效電路圖

其中 L 、 C 、 C'_m 和 L'_m 分別是圖 3-29 中集總式電路的自容值、自感值、互容值以及互感值；另外，圖 3-29 中的阻抗反轉子 $J=\omega C'_m$ 以及導納反轉子 $K=\omega L'_m$ 個別代表磁場耦合以及電場耦合。

在圖 3-29 中的對稱平面中分別置入電場牆以及磁場牆，可分別求得此時個別的共振頻率：

$$f_e = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L-L'_m)(C+C'_m)}} \quad (\text{式 3-51})$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L+L'_m)(C+C'_m)}} \quad (\text{式 3-52})$$

相同地，從(式 3-51)以及(式 3-52)可以找出混和耦合係數(Mixed coupling coefficient) k_x ：

$$k_x = \frac{f_e^2 - f_m^2}{f_e^2 + f_m^2} = \frac{CL'_m + LC'_m}{LC + L'_m C'_m} \quad (\text{式 3-53})$$

若假設： $LC \gg L'_m C'_m$ ，則(式 3-53)可變為：

$$k_x \approx \frac{L'_m}{L} + \frac{C'_m}{C} = k'_M + k'_E \quad (\text{式 3-54})$$

由上式可以很清楚知道，混和耦合即是磁場耦合與電場耦合的重疊效應。

3-5 四分之一波長的阻抗轉換器與開路殘段(open stub)

四分之一波長阻抗轉換器是一個簡單又實用的阻抗匹配電路[23]，以下我們將從阻抗的觀點來對四分之一波長阻抗轉換器進行分析。圖3-30 為一個典型的四分之一波長阻抗轉換器的電路，其中負載阻抗為 R_L ，饋入線的特性阻抗值為 Z_0 ，在此令兩者均為實數。在兩元件之間就是一段特性阻抗為 Z_1 的四分之一波長的無損傳輸線。

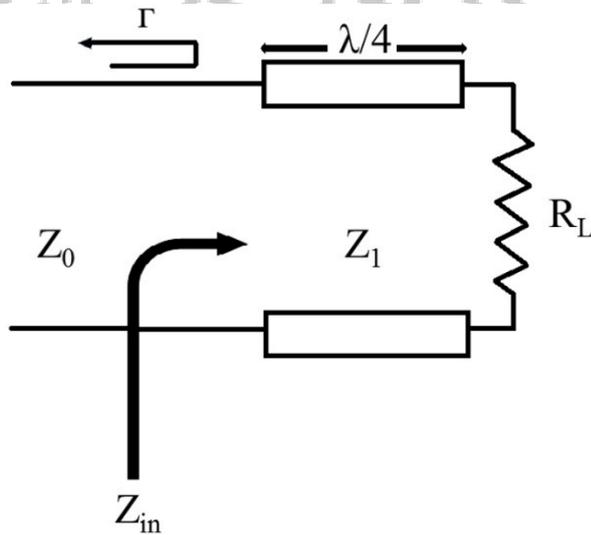


圖 3-30 四分之一波長阻抗轉換器電路

從傳輸線的左端看進去的輸入阻抗可以表示為下式：

$$Z_{in} = Z_1 \frac{R_L + jZ_1 \tan \beta l}{Z_1 + jR_L \tan \beta l} \quad (\text{式 3-55})$$

將分子與分母同除 $\tan \beta l$ 後，再代入 $\beta l = \frac{2\pi \lambda}{\lambda} \frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2}$ ，並取 $\beta \rightarrow \pi/2$ 的極限後，

可得：

$$Z_{in} = \frac{Z_1^2}{R_L} \quad (\text{式 3-56})$$

當 Z_{in} 等於 Z_0 時，反射係數 Γ 為零時，此時的 Z_1 為：

$$Z_1 = \sqrt{Z_0 R_L} \quad (\text{式 3-57})$$

由上式可知當 Z_1 為饋入線特性阻抗值與負載阻抗的幾何平均數時反射係數 Γ 為零。上述結果僅限於阻抗匹配的傳輸線段長度為四分之一波長或其奇數 $(2n+1)$ 倍時才成立。只要頻率稍微飄移，就無法完全匹配了，所以完美的匹配僅限於特定的頻率點下才成立。

當四分之一波長阻抗轉換器中的 $RL \rightarrow \infty$ （即開路）時，就形成四分之一波長開路殘段(open stub)。特定頻率點下，根據(式 3-56)，在距離負載四分之一波長的傳輸線看進去，輸入阻抗將會趨近於零。於是可以利用四分之一波長開路殘段的特性，就可以在特定的位置、特定的頻率下，製造出一個想要的零點。

第四章 實驗步驟和量測方法

此章節介紹微波介電材料的製做過程以及物性和電性的量測方法。

4-1 微波介電材料的製程

本實驗材料的製程如下圖4-1所示，以下分別以步驟進行說明。



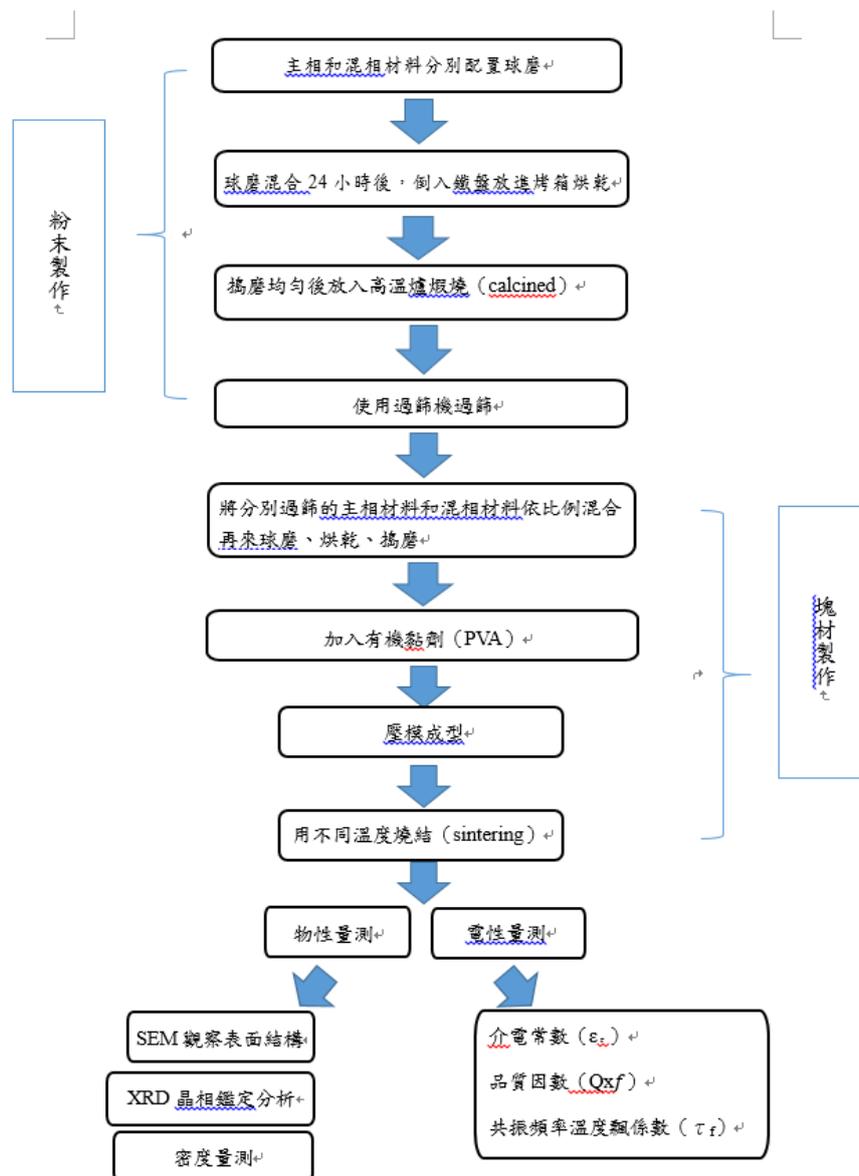


圖4-1 實驗流程圖

4-1-1 粉末的配製與球磨

本實驗是以固態合成法，使用高純度的CaCO₃、Nb₂O₅、La₂O₃、TiO₂、ZnO、SnO₂ 粉末，將所需的各種粉末按照莫耳克數比分別加入尼龍瓶中，並放入氧化鋯珠作為研磨用介質，並於粉末配製完後加入酒精作為助磨劑。最後將完成的尼龍瓶置於桌上型球磨機上球磨24小時使粉末均勻混合。

4-1-2 粉末的煨燒

將球磨後的粉倒入鐵盤內，放進85°C的烘乾箱內進行烘乾，接著使用研磨鉢將烘乾後的粉體進行搗磨，之後置入氧化鋁坩鍋內後放入高溫爐內以每分鐘10°C的升溫速率升到所需要的煨燒溫度。

粉末煨燒完成後使用研磨鉢將粉搗碎磨細，並取一部分進行XRD相鑑定，以確定其材料相之合成。

4-1-3 加入有機黏劑和過篩

將球磨過的粉烘乾後，為了使粉末能順利壓模成型，我們在粉末內加入10 wt%、濃度為15%的有機黏劑(PVA)，並將黏劑與粉末均勻混合，然後用搗磨鉢將粉磨細，最後使用100 mesh的過篩網過篩，得到大小分佈均勻的顆粒。

4-1-4 壓模成型、去黏劑及燒結

將過篩後的粉利用模具及壓模機壓模成型出具有直徑10 mm，厚度5 mm的圓柱型生胚，壓模機使用的壓力約為280MPa。

在高溫爐的設定方面，先以每分鐘10°C的升溫速率升至650°C持溫2小時，這段時間主要為去除有機黏劑，接著再以每分鐘10°C的升溫速率升至材料的燒結溫度，然後持溫4小時讓生胚進行成長、結晶和緻密化，最後再用每分鐘10°C的降溫速率降至室溫後取出後進行材料的量測與分析，燒結的升降溫程序可參考圖4-2所示。

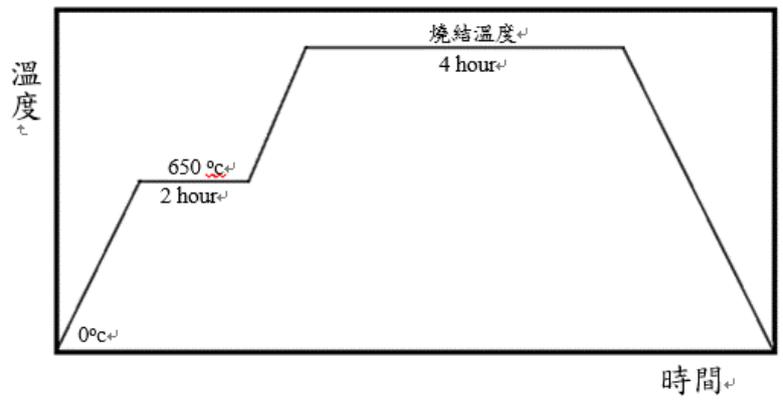


圖 4-2 燒結升降溫程序



4-2 微波介電材料的量測與分析

4-2-1 密度測量

密度測量採用阿基米得原理，先將燒結後的塊材置於電子天平上量測重量 (W_{air})，之後將塊材置入熱水中煮沸5小時使孔隙內的空氣去除，最後放入烤箱烤乾，將烤乾後的燒結體懸浮在水中(燒結體須完全沒入水中)並量測其排開水重，以此得知燒結體的體積(V)。接著利用以下的公式即可得知燒結體的密度 D (g/cm^3)：

$$D = \frac{W_{air}}{V} \quad (式4-1)$$

4-2-2 X-Ray分析

本實驗之相鑑定使用日本Siemens D5000型X光繞射分析儀(X-Ray Diffraction Meter)。其機器採用加速電子撞擊銅靶所產生之 $K\alpha$ 射線($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$)，並於40 mA/40 kV的電流/電壓大小條件下，使用 10° – 80° 的掃描角度(2θ)，並用 $0.1^\circ C/step$ 的掃描速度來進行燒結體的相鑑定。

在燒結體的後續處理和分析上，先利用水沙紙(600 mesh)將燒結體的表面磨平，之後再將燒結體置於儀器中進行分析，最後將儀器分析出來的相鑑定結果與材料之JCPDS卡做比較來分析出燒結體的結晶相。

4-2-3 SEM分析

本實驗使用掃描電子顯微鏡(SEM)來對燒結體的表面進行微結構的觀察及晶粒元素的分析。首先使用超音波震盪器清洗燒結體的表面污垢後烘乾，之後將燒結體的表面利用蒸鍍度上一層銀。將處理後的燒結體用導電碳膠帶固定於鐵環上，完成後將燒結體置入SEM中以2000~4000倍的放大倍率觀察其表面微結構。

4-2-4 介電特性量測與分析

微波介電材料特性(介電係數、品質因數 Q_d)的鑑別和分析方法最早是由B. W. Hakki和P. D. Coleman所提出，之後W. E. Courtney將之作進一步的分析，完成了普遍使用的Courtney Method[11]。後來在模態的鑑別上P. Wheless和D. Kajfez提出了更為簡便的模態鑑別法[12]，而Y. Kobayashi和M. Katoh則提出了改良式的Courtney Method[13]來測量計算材料的介電係數和品質因數。

1. TE_{0np}模態的耦合與鑑別

這邊先介紹耦合線圈的放置方式對DR耦合模態的影響，利用圖4-3模具簡化版來介紹量測原理，當耦合線圈水平放置時(如圖4-4(a))，其磁場交練面積會最大，DR所耦合的模態以TE模態為主，接著旋轉迴圈，在旋轉的過程中TE模態的耦合強度變弱而TM模態的耦合強度變強，當旋轉到耦合線圈垂直放置時(如圖4-4(b))，磁場交練面積會最小，這時DR所耦合的模態則以TM模態為主。因為DR的TE模態其儲存能量特性最好，因此在量測時我們把耦合線圈以水平放置來進行TE模態的耦合。另外，欲鑑別TE模態的共振頻率，可將共振腔上方

之平行金屬板往上移，當金屬板上移時TE模態的頻率會往低頻飄。

接著來判別 TE_{0np} 模態的p值，P. Wheless和D. Kajfez在 TE_{0np} 提供了一個簡易的判別方法，方法為將耦合線圈的饋入位置在平行DR高度的軸上作上下平移，若 $p = 1$ 則在整個平移過程中能探測到一最大值；若 $p = 2$ 則在平移過程中能探測到兩個最大值且在此兩最大值的中心會出現一最小值。圖4-5(a)(b)為DR在 TE_{011} 和 TE_{012} 模態的示意圖，各p值的電場大小分布能由圖中看出。

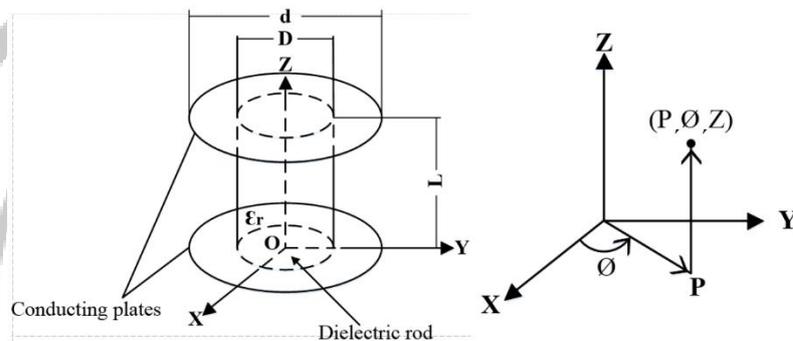


圖4-3 Courtney hold基本架構

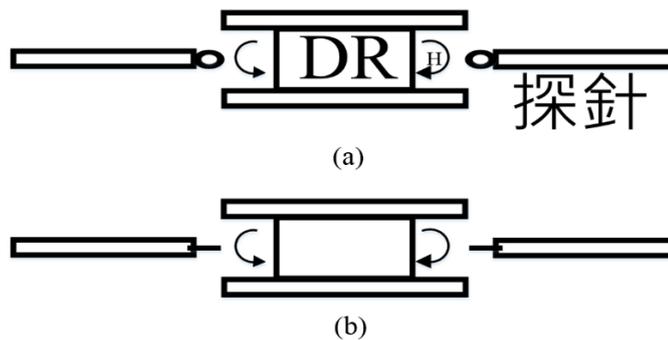


圖4-4 探針迴圈耦合方式

(a)垂直方式耦合

(b)平行方式耦合

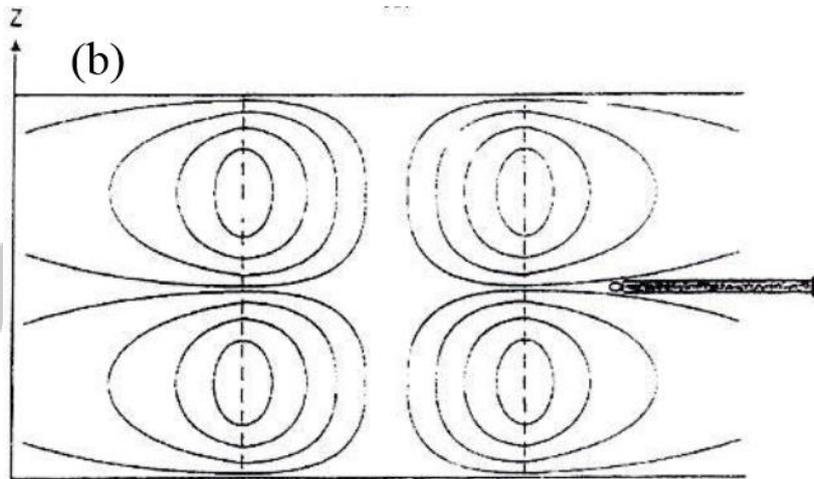
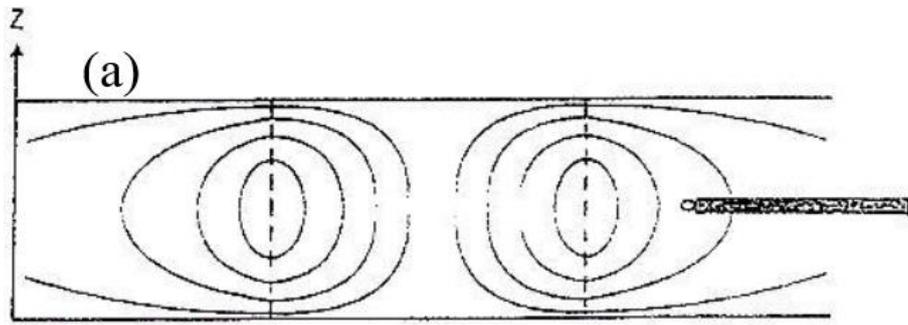


圖4-5 TE_{onp}模態場型圖

(a) TE₀₁₁模態

(b) TE₀₁₂模態

2. 介電係數之計算

Y. Kobayashi在推導DR的介電係數時首先設其導磁係數與真空中相同，接著再利用由TE_{onp}模態下測量得出的共振頻率 f_0 求出其介電係數，公式如下：

$$C_r = \left(\frac{\lambda_0}{\pi D}\right)^2 (x^2 + y^2) + 1 \quad (\text{式 4-2})$$

$$y^2 = \left(\frac{\pi D}{\lambda_0}\right)^2 \left[\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g}\right) - 1\right] \quad (\text{式 4-3})$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \quad (\text{式 4-4})$$

$$\lambda_g = \frac{2L}{p}, \quad p = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{式 4-5})$$

$$\chi \frac{J_0(x)}{J_1(x)} = -y \frac{K_0(y)}{K_1(y)} \quad (\text{式 4-6})$$

其中

λ_0 : 真空中TE_{onp} 模態的電磁波波長

λ_g : 當DR的柱高為無限長時的電磁波波長

C : 光速

f_0 : 真空中的TE_{onp} 模態共振頻率

D : DR之直徑

L : DR之柱高

p : TE_{onp} 模態之第三個下標值

$J_n(x)$: 第一類Bessel函數

$K_n(y)$: 修正後的第二類Bessel函數

當我們由量測得知DR在TE_{onp} 的共振頻率和決定p的值，配合DR的直徑和高度，即可由上述公式得知其介電係數 ϵ_r 。

2. 品質因數 Q_d 的計算

材料的耗損正切 $\tan\delta$ 可以從下列公式求出：

$$\tan\delta = \frac{A}{Q_u} - BR_s \quad (\text{式 4-7})$$

$$A=1+\frac{W}{\varepsilon_r} \quad (\text{式 4-8})$$

$$B=\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g}\right)^3 \frac{1+W}{30\pi^2 \varepsilon_r p} \quad (\text{式 4-9})$$

$$W=\frac{J_1^2(x) K_0(y) K_2(y) - K_1^2(y)}{K_1^2(y) j_1^2(x) - J_0(x) J_2(x)} \quad (\text{式 4-10})$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi f_0 u}{\sigma}} = 0.825 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{f_0 [\text{GHz}]}{\bar{\sigma}}} [\Omega], \quad \bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (\text{式 4-11})$$

其中

Q_u : 無載品質因數

W : 儲存在DR外部的電場能量/儲存在DR內部的電場能量

ε_r : DR之介電係數

λ_0 : 真空中TE_{onp} 模態的電磁波波長

λ_g : 當DR的柱高為無限長時的電磁波波長

p : TE_{onp} 模態之第三個下標值

$J_n(x)$: 第一類Bessel函數

$K_n(y)$: 修正後的第二類Bessel函數

R_s : 金屬板的表面電阻

σ : 金屬板的導電率

$\bar{\sigma}$: 金屬板的相對導電率

σ_0 : 銅的導電率(5.8×10^7 S/m)

μ ：導磁率(非磁性材料視為真空導磁率 $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$ H/m)

無載品質因素 Q_u 可以下列公式求出：

$$Q_u = \frac{Q_L}{1-a_t} \quad (\text{式 4-12})$$

$$Q_L = \frac{f_0}{f_2-f_1} = \frac{f_0}{BW} \quad (\text{式 4-13})$$

$$a_t = 10^{-IL[dB]/20} = |S_{21}| \quad (\text{式 4-14})$$

其中

Q_L ：有載品質因數

f_2 ：較高的半功率頻率

f_1 ：較低的半功率頻率

BW ：半功率頻寬

IL ：插入損耗

4. 介電係數和品質因數的量測：

在量測方面，我們使用HP 8360 series synthesized sweeper設定訊號頻率及Agilent 8757D Scalar network analyzer量測DR的頻率響應，並用如圖4-6的共振腔來置放DR。先將一顆直徑與高度比約為2的DR夾在由兩平行金屬板所構成的共振腔中，利用水平放置的耦合線圈量測其 TE_{011} 模態下的共振頻率及插入損(如圖4-7(a))，再把各項參數輸入計算軟體中即可獲得介電係數 ϵ_r 。之後將相同尺寸

的DR相疊置入共振腔中，量測 TE_{012} 模態的共振頻率及插入損(如圖4-7(b))，將相關參數輸入軟體中即可獲得DR的品質因數 Q_d 。

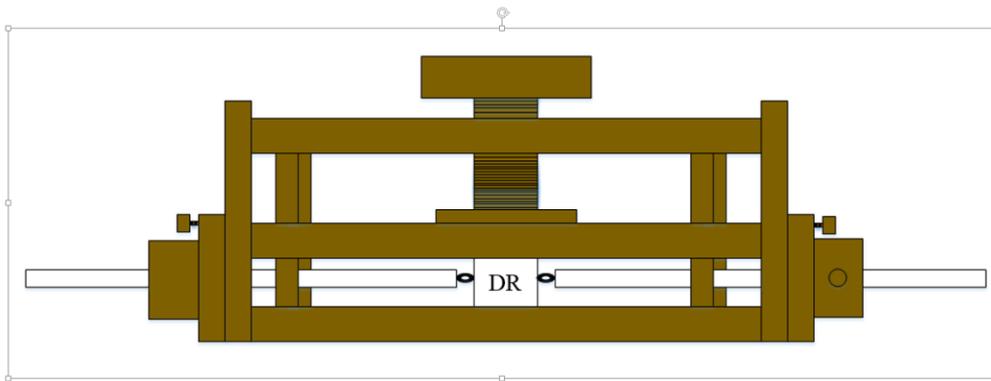
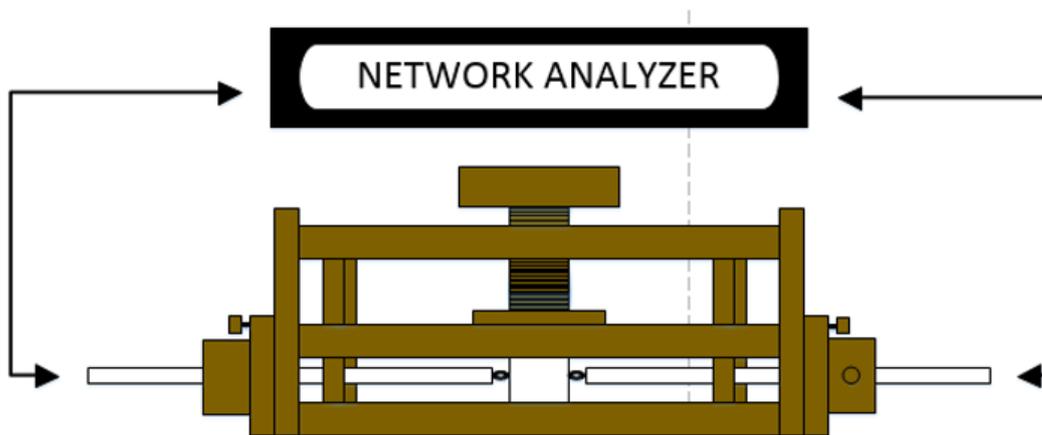
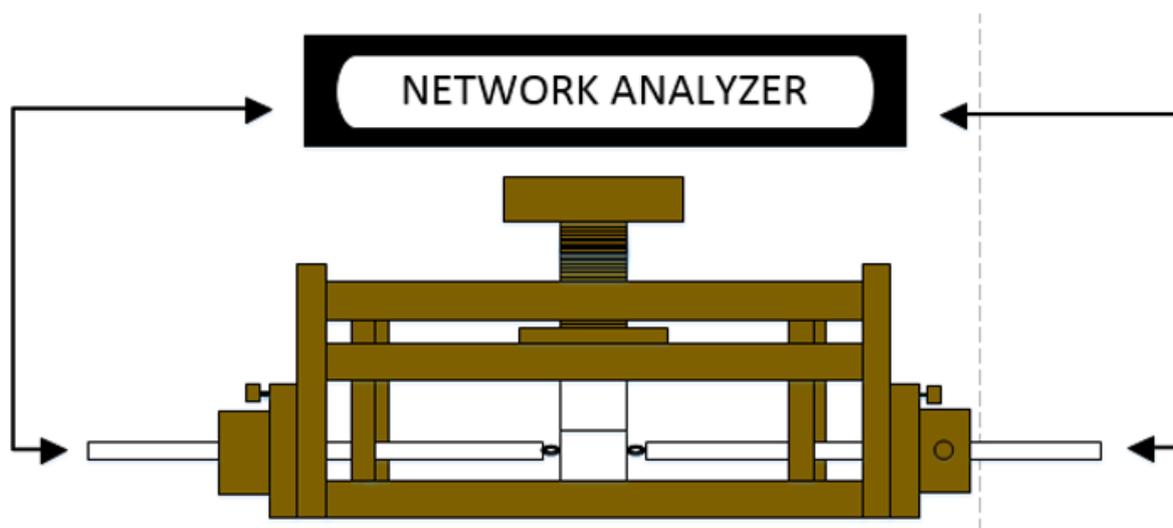


圖 4-6 共振腔實體結構



(a) 單顆 DR 量測示意圖



(b)雙頻 DR 量測示意圖

圖 4-7 DR 量測示意圖



4-2-5 共振頻率溫度飄移係數之量測

本實驗測量溫度飄移係數的方法為將DR置入恆溫箱中，並使用溫度範圍30–80°C來進行測試，先讓DR在30°C持溫20分鐘後紀錄共振頻率，之後提升至40°C持溫20分鐘後再紀錄其共振頻率，之後每10°C重覆以上步驟至80°C，最後以30°C (設此溫度為 T_1)的共振頻率為 f_1 ，其他溫度點 T_i 的共振頻率為 f_i 並套入以下公式：

$$\tau_f = \frac{1}{f} \frac{f_t - f_1}{T_t - T_1} \quad (\text{式 4-15})$$

再取各 τ_f 的平均值即為此DR的共振頻率溫度飄移係數值。

4-3 濾波器的製作與量測

本實驗使用三種不同材質的基板，其分別為玻璃纖維基板(FR4)、氧化鋁基板(Al_2O_3)和自製基板，使用的基板厚度皆固定為1.6 mm。在濾波器的電路繪製上，先使用模擬軟體HFSS來模擬設計電路的響應圖，接著再將圖形實作在三種基板上，製作的方式如下：

1. FR4基板濾波器的實作方法：

- (1) 將電路圖形印製在描圖紙上

- (2) 將描圖紙上的圖形覆蓋在FR4光阻上並置於曝光機內曝光90秒
- (3) 使用顯影劑將曝光部分之光阻溶解掉，並使未曝光(電路實體部分)的部分形成耐腐蝕之保護膜
- (4) 將FR4置於蝕刻液內，其會將曝光部分之覆銅層蝕刻掉並保留未曝光之電路圖形
- (5) 使用酒精將電路圖形上及背面之光阻去除
- (6) 使用焊槍及焊錫將SMA插座焊於濾波器之輸入及輸出端
- (7) 電路特性之量測。

2. 氧化鋁基板濾波器的實作方法：

- (1) 將電路圖形製作成網版
- (2) 使用銀膠將網版上之圖形印刷於氧化鋁基板上
- (3) 將基板置於高溫爐內以 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升溫速率升至 550°C 後持溫30分鐘，之後降溫取出
- (4) 將氧化鋁基板之背面用銅膠帶覆蓋
- (5) 焊接上SMA接頭
- (6) 電路特性之量測。

3. 自製基板濾波器之實作方法：

- (1) 將自製材料調配、煨燒、使用模具壓成方型板、燒結後用拋光機將厚度磨至1.6 mm

- (2) 將製作於網板上之電路圖形用銀膠印刷於基板上
- (3) 將基板置於高溫爐內以 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升溫速率升至 550°C 後持溫30分鐘，之後降溫取出
- (4) 將基板背面貼上銅膠帶，饋入線接上SMA接頭
- (5) 電路特性之量測。

本實驗量測濾波器特性之儀器為Agilent E8364A network analyzer，量測示意圖如圖4-8所示，量測的特性主要為：

1. 濾波器在量測頻帶內的整體表現
2. 濾波器之共振頻率
3. 濾波器在通帶的穿透損耗(S_{11})、插入損耗(S_{21})
4. 濾波器其通帶之頻寬(bandwidth)

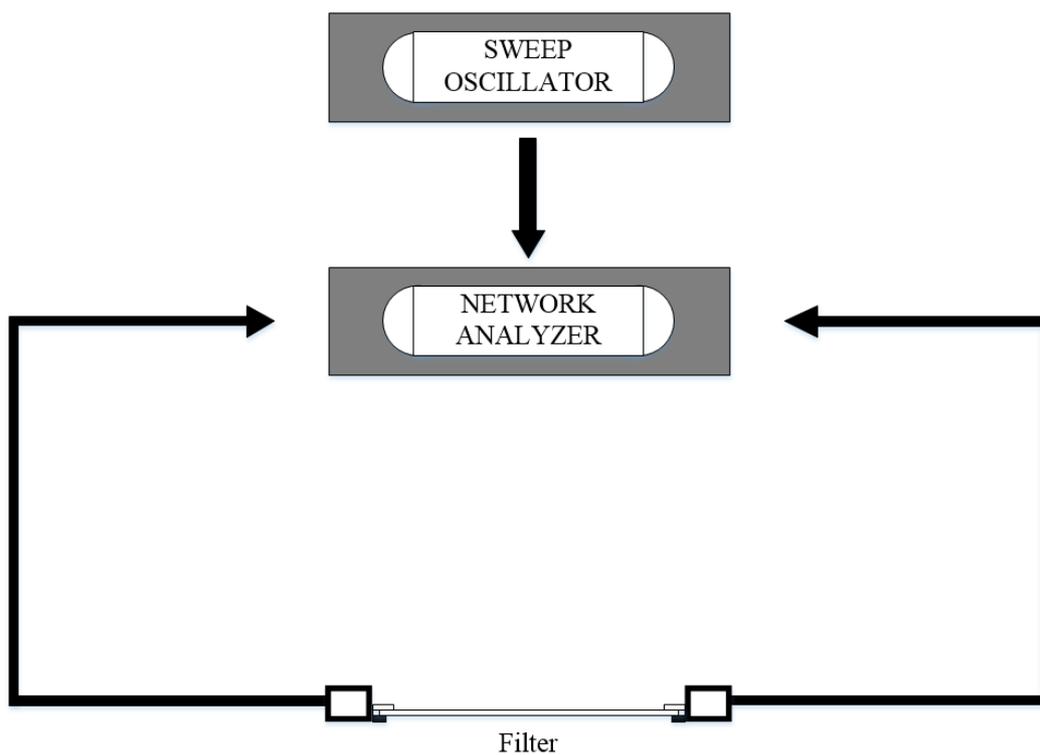


圖4-8 濾波器量測示意圖



第五章 實驗結果和討論

本實驗嘗試將表 5-1 的相似材料做為主體材料 [14][15]，將 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_4\text{Ti}_5\text{O}_{17}$ 和 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_4\text{Ti}_5\text{O}_{17}$ 以 Ti^{4+} (0.60 Å) 微量取代的方式添加 Sn^{2+} (0.69 Å)，調整不同的 x 變化量來探討 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_4\text{Ti}_5\text{O}_{17}$ 和 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_4\text{Ti}_5\text{O}_{17}$ 微波介電特性的變化。以及用 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{TiO}_{17}$ 將 Ti^{4+} (0.60 Å) 以取代的方式添加 La^{3+} (1.06 Å)，調整不同的 x 變化量來探討 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 微波介電特性的變化，期望能夠得到更好的介電特性 [16][17]。

表 5-1 相似材料的微波介電特性

材料	燒結溫度(°C)	ϵ_r	$Q \times f$ (GHz)	τ_f (ppm/°C)
$\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_4\text{Ti}_5\text{O}_{17}$	1450	57	15,000	-8.1
$\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_4\text{Ti}_5\text{O}_{17}$	1450	56	13,000	-13.5
$\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{TiO}_{17}$	1275	45	18,000	-114

5-1 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之微波介電特性

我們將透過調整不同的 x 比例 ($x=0.02-0.1$)，來探討 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 的微波介電特性。

5-1-1 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之 XRD 分析結果

圖 5-1 為 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$) 在最佳燒結溫度 1500°C 時之

XRD圖。由圖中可以觀察出取代量 x 值不同時雖然相對強度有些許變化但並不會對主相產生明顯的變化，主相為 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 。

圖5-2為 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.08}\text{Sn}_{0.02})_5\text{O}_{17}$ 介電陶瓷在不同溫度下的XRD圖。可以觀察出不同燒結溫度對於整體的XRD圖沒有甚麼變化，主相為 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.08}\text{Sn}_{0.02})_5\text{O}_{17}$ 。

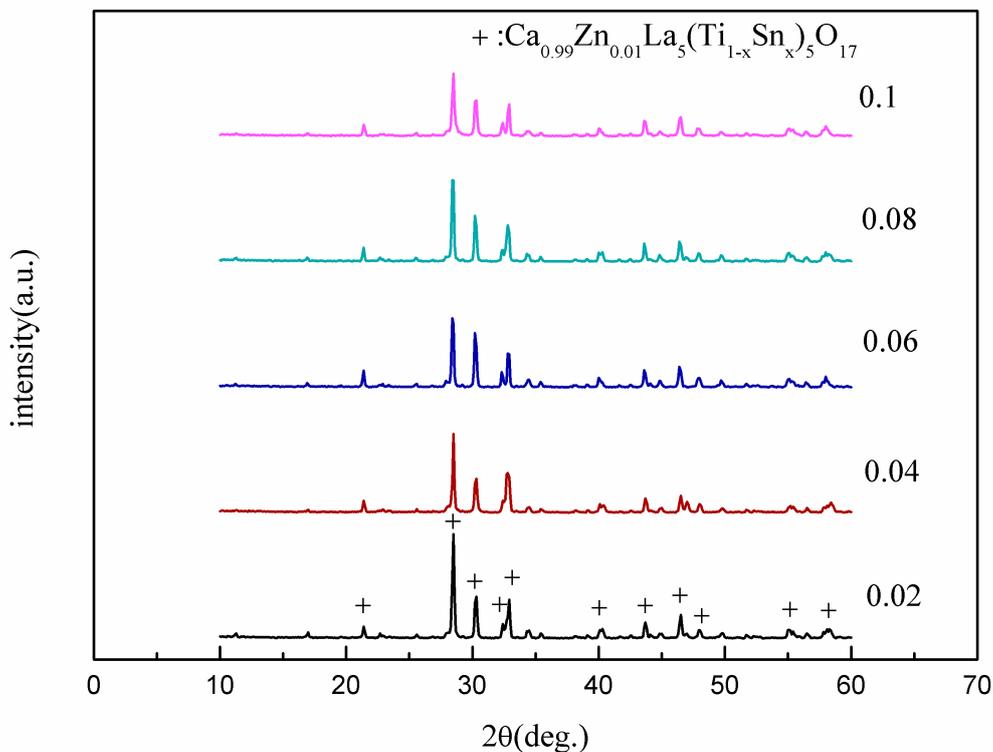


圖5-1 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$) 在燒結溫度 1500°C 持溫4小時之

XRD圖

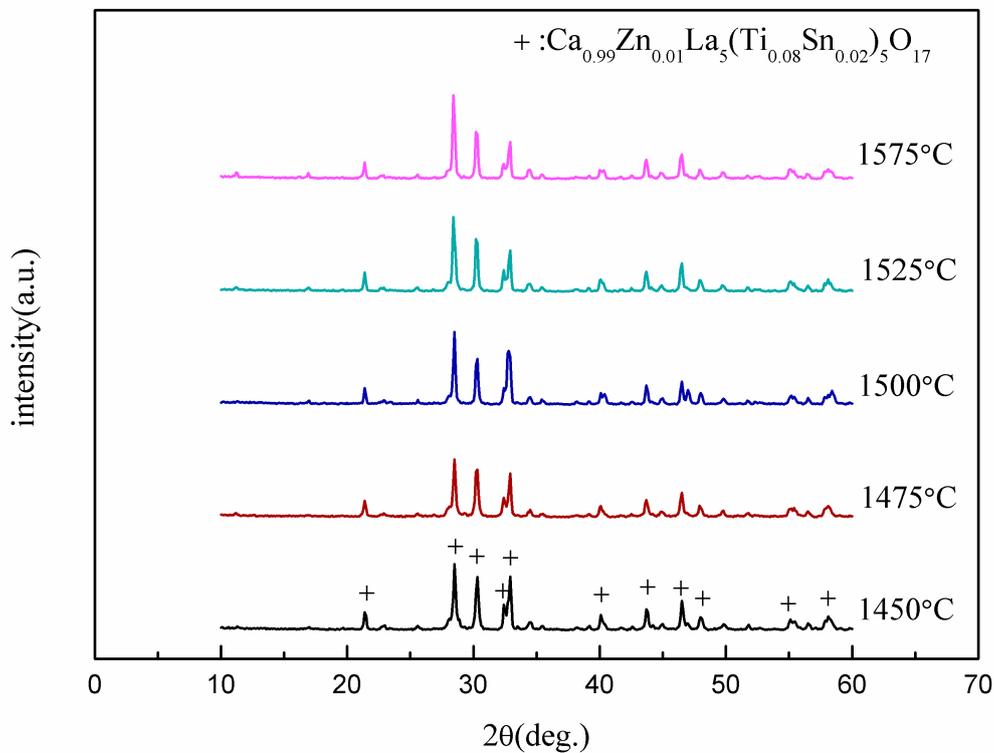
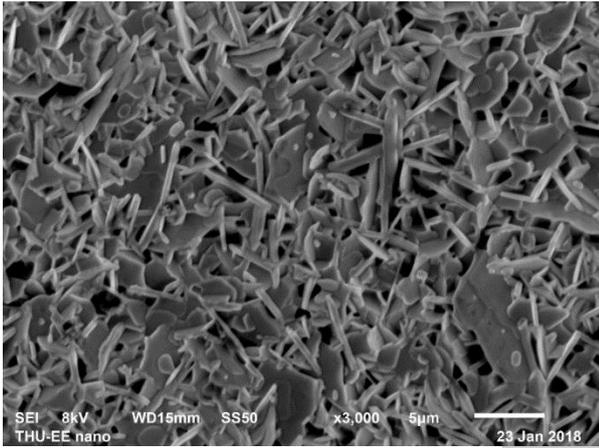


圖 5-2 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.08}\text{Sn}_{0.02})_5\text{O}_{17}$ 在不同燒結溫度持溫4小時之XRD圖

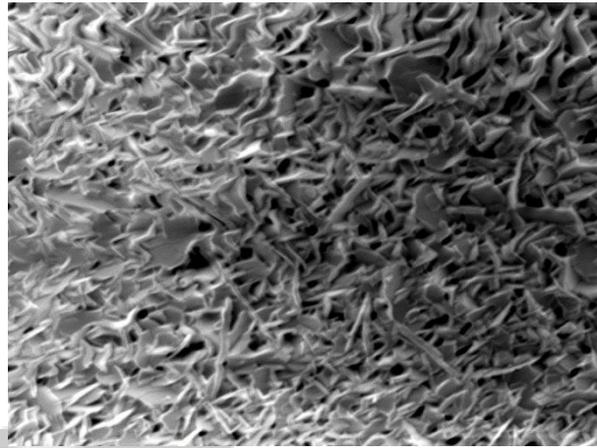
5-1-2 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之SEM分析結果

圖 5-3 為 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.08}\text{Sn}_{0.02})_5\text{O}_{17}$ 在不同燒結溫度(1425-1550°C)，持溫4小時之SEM圖。由圖中可以看出隨著燒結溫度增加，晶粒有逐漸成長的趨勢。從燒結溫度(1425-1550°C)中陶瓷材料的孔隙有減少的趨勢，在1550°C時孔隙最少最為緻密，但仍可以發現孔隙的存在，由此推測此材料的晶粒還在持續成長。

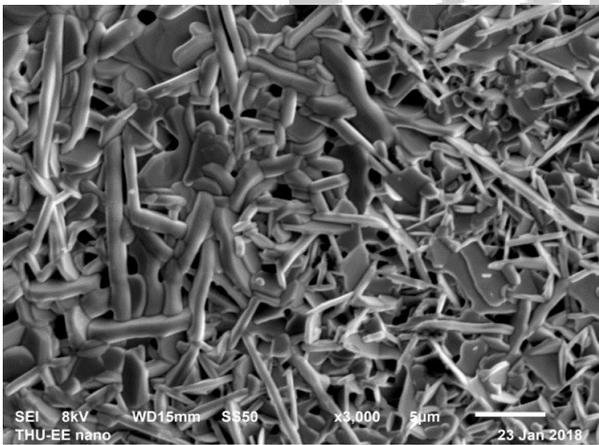
圖 5-4 為 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 不同比例在1500°C燒結溫度下的SEM圖。由圖中可以發現隨著 x 的比例上升，晶粒有逐漸變大的趨勢。



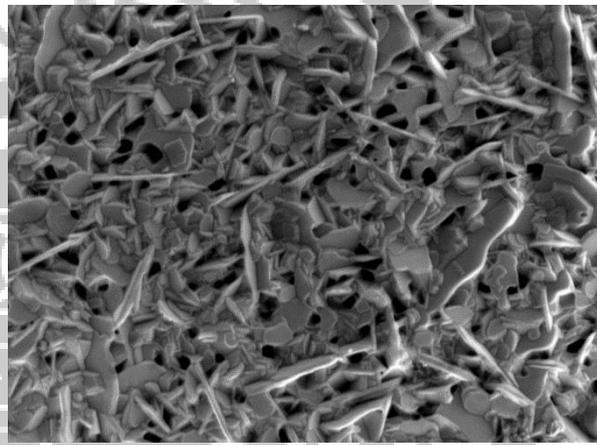
(a) 1425°C



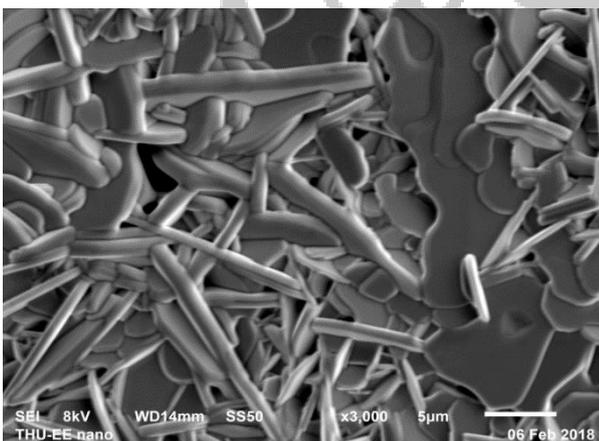
(b) 1450°C



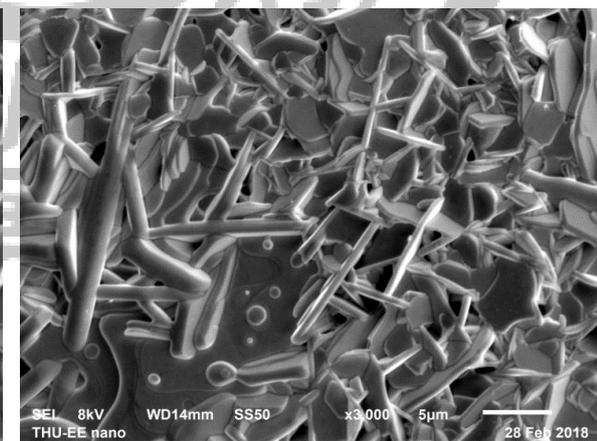
(c) 1475°C



(d) 1500°C

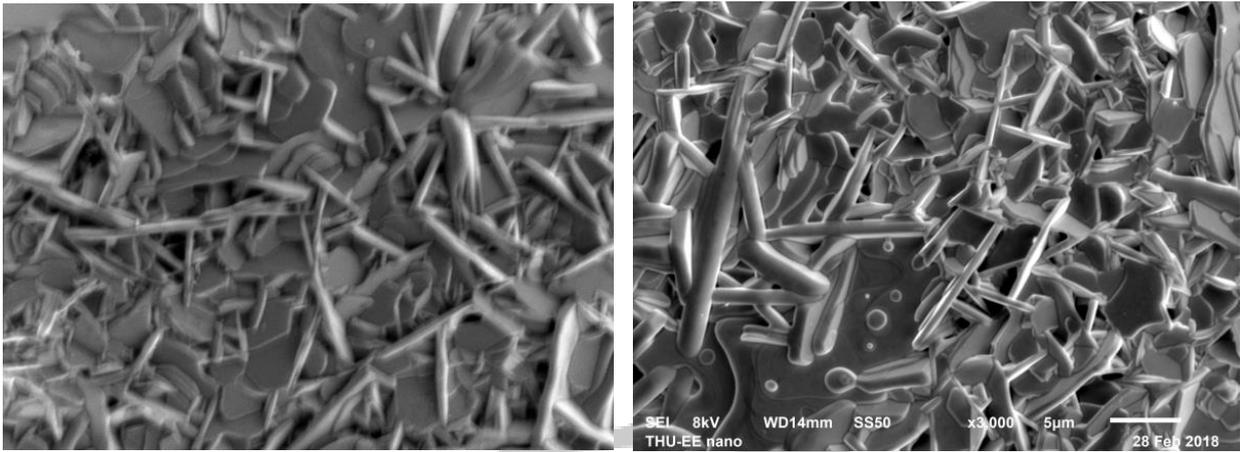


(e) 1525°C



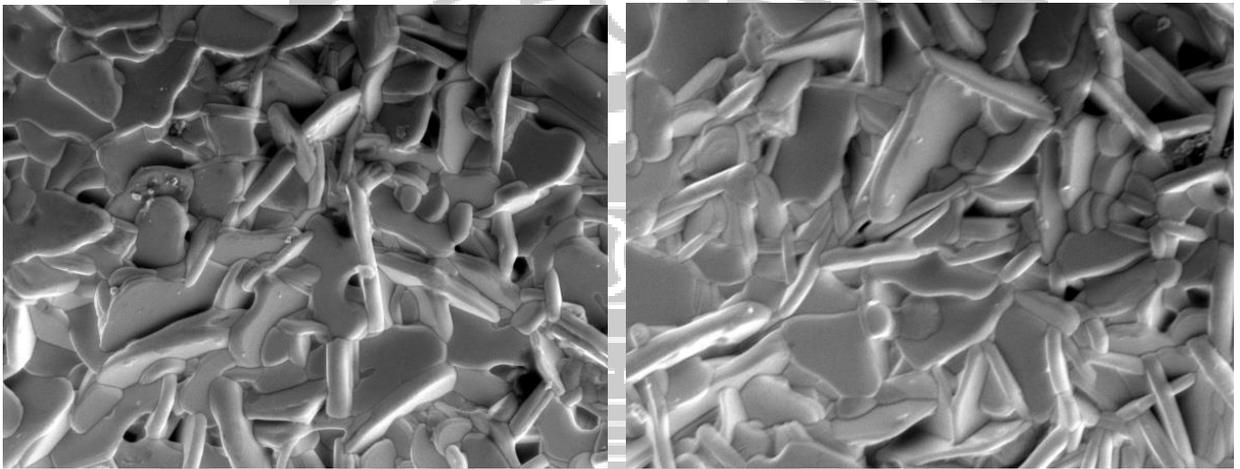
(f) 1550°C

圖5-3 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.08}\text{Sn}_{0.02})_5\text{O}_{17}$ 在不同燒結溫度之SEM圖



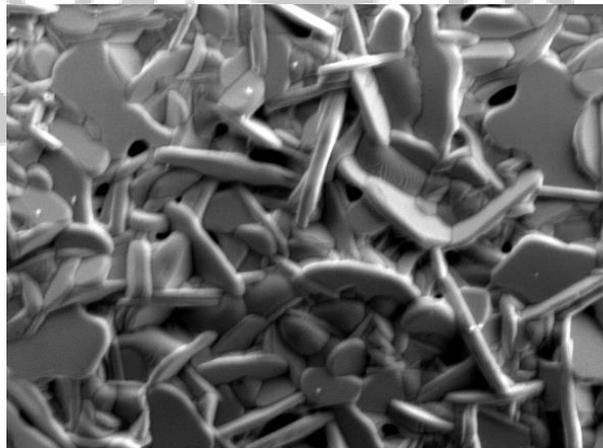
(a) $x=0.02$

(b) $x=0.04$



(c) $x=0.06$

(d) $x=0.08$



(e) $x=0.1$

圖5-4 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}(x=0.02-0.1)$ 燒結溫度 1125°C 之 SEM 圖

5-1-3 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.08}\text{Sn}_{0.02})_5\text{O}_{17}$ 之EDS分析結果

圖5-5為 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.08}\text{Sn}_{0.02})_5\text{O}_{17}$ 在1500°C燒結溫度的三點EDS圖，從表5-2可以長條狀、塊狀和圓形的晶粒元素百分比有與配粉時的莫耳濃度一致。

表5-2 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.08}\text{Sn}_{0.02})_5\text{O}_{17}$ 在1500°C燒結溫度的點各別元素含量

Element	Weight/Atomic A	Weight/Atomic B	Weight/Atomic C
C	2.96/8.80	3.85/11.37	3.95/13.29
O	24.21/52.35	21.67/48.05	15.82/39.90
Ca	1.79/1.54	1.86/1.64	2.37/2.38
Ti	41.32/29.84	41.90/31.03	39.22/33.04
Zn	0.12/0.08	0.08/0.04	0.22/0.14
Sn	0.29/0.09	0.77/0.23	1.70/0.58
La	29.31/7.30	29.88/7.63	36.2/10.67

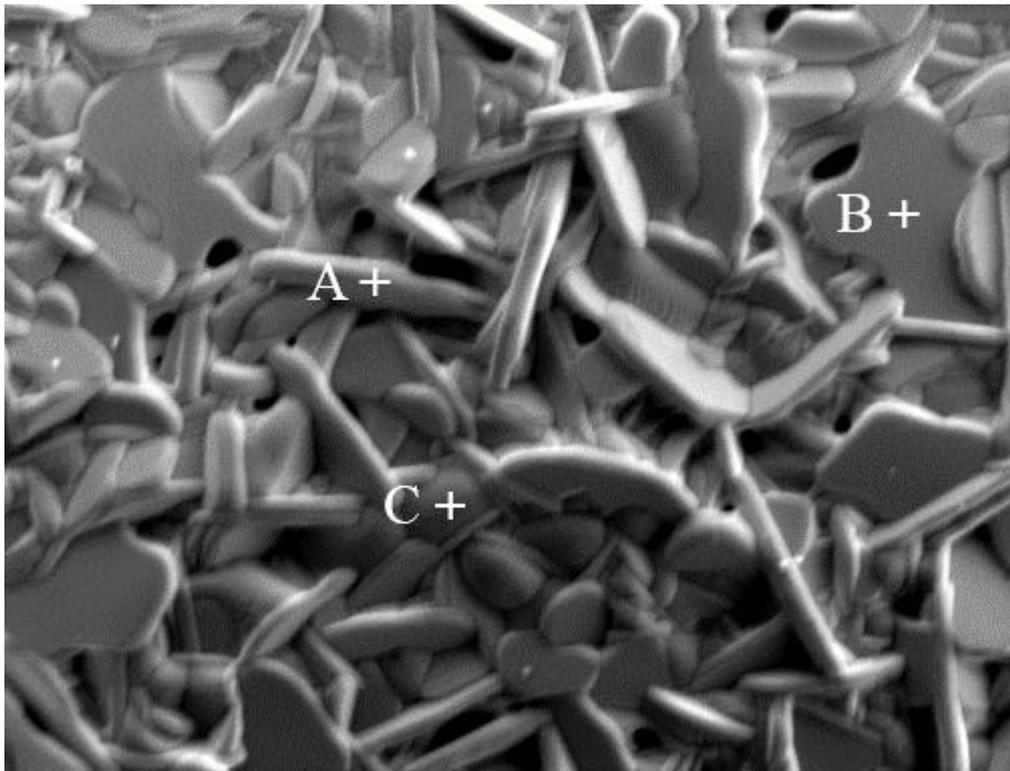


圖5-5 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.08}\text{Sn}_{0.02})_5\text{O}_{17}$ 燒結溫度 1500°C 之EDS三點圖

5-1-4 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之密度分析結果

圖5-6為 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$) 在不同燒結溫度 ($1425-1550^\circ\text{C}$)，持溫4小時之密度圖。從圖中可以知道 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$) 的密度隨著燒結溫度升高而變大，且沒有下降的趨勢。在不同燒結溫度， $x=0.04$ 時有所有摻雜比例中最大的密度，在 $x=0.04$ ，燒結溫度為 1550°C 時有最大的密度約 $4.7(\text{g}/\text{cm}^3)$ 。從圖5-3的SEM圖可以知道在最高溫 1550°C 仍然有些微的孔隙存在，

推測是因為此材料的晶粒還在持續成長，所以整體比例的密度才沒有下降的趨勢。此趨勢與SEM圖所觀察到的趨勢相近。但是影響視密度的有許多因素，如：孔隙率、燒結情況、晶粒大小、有序或者無序的排列和晶格缺陷等。由上述分析結果得知，孔洞較少和均勻的晶粒大小分布皆會提升介電材料的緻密度。

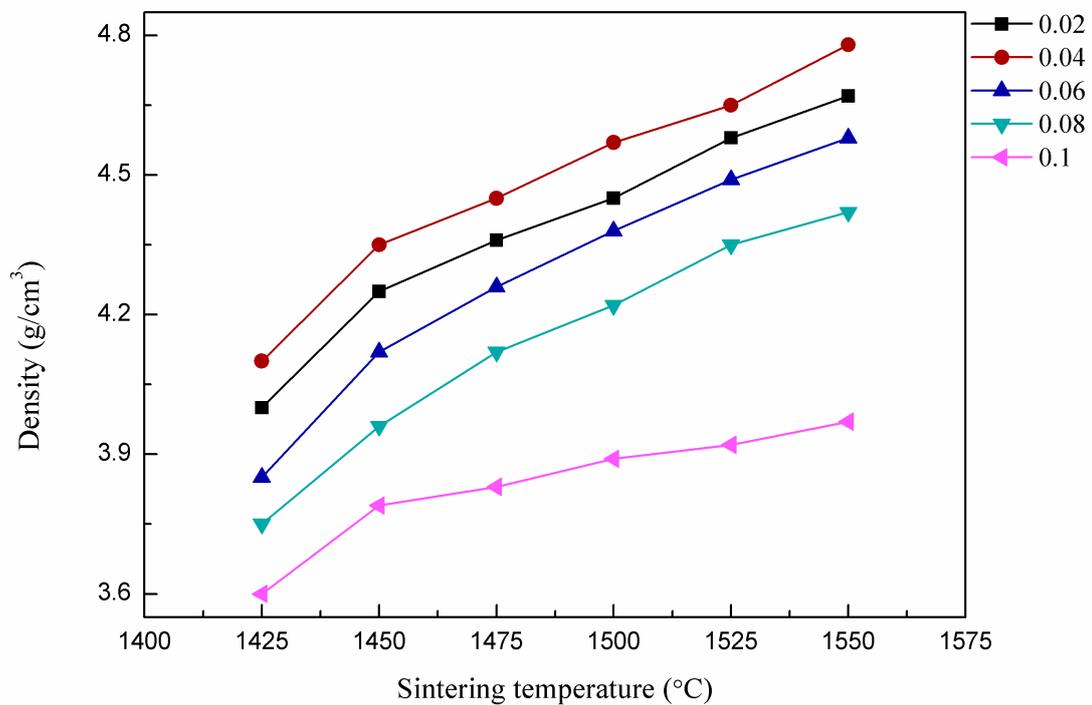


圖5-6 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$)各燒結溫度密度圖

5-1-5 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之介電常數(ϵ_r)、品質因素

$(Q \times f)$ 分析結果

圖 5-7 和 5-8 為 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$) 在不同燒結溫度 (1425-1550°C)，持溫 4 小時之介電常數和品質因素關係圖 ($f_0=6.9\sim 7.5\text{GHz}$)。由圖中可以看出 ϵ_r 會隨著燒結溫度升高而持續上升但是沒有下降的趨勢，從圖 5-6 的密度圖中可以得知 ϵ_r 與密度的趨勢一致。在不同燒結溫度， $x=0.04$ 時有所有摻雜比例中最大的 ϵ_r ，在 $x=0.04$ ，燒結溫度為 1550°C 時有最大的 ϵ_r 約 47.5。 $Q \times f$ 值從 1425-1500°C 為持續上升然後下降，因為晶粒快速成長造成晶粒大小不均勻，會使晶格震盪不諧調，晶粒變大，並且其電域壁(domain wall) 越不容易移動，極化損提高，品質因素下降；所以晶粒大小影響品質因數極大，而晶粒大小最均勻時會得到較佳的品質因素。在所有燒結溫度中， $x=0.02$ 時擁有全部比例中最高的 $Q \times f$ 值，在 $x=0.02$ 燒結溫度為 1500°C 最高的 $Q \times f$ 值約為 15,000。從上面的分析結果得到在 $x=0.02$ ，燒結溫度為 1500°C 時有最好的介電特性 ($\epsilon_r \sim 45.5$ 、 $Q \times f \sim 15,000\text{ GHz}$)。

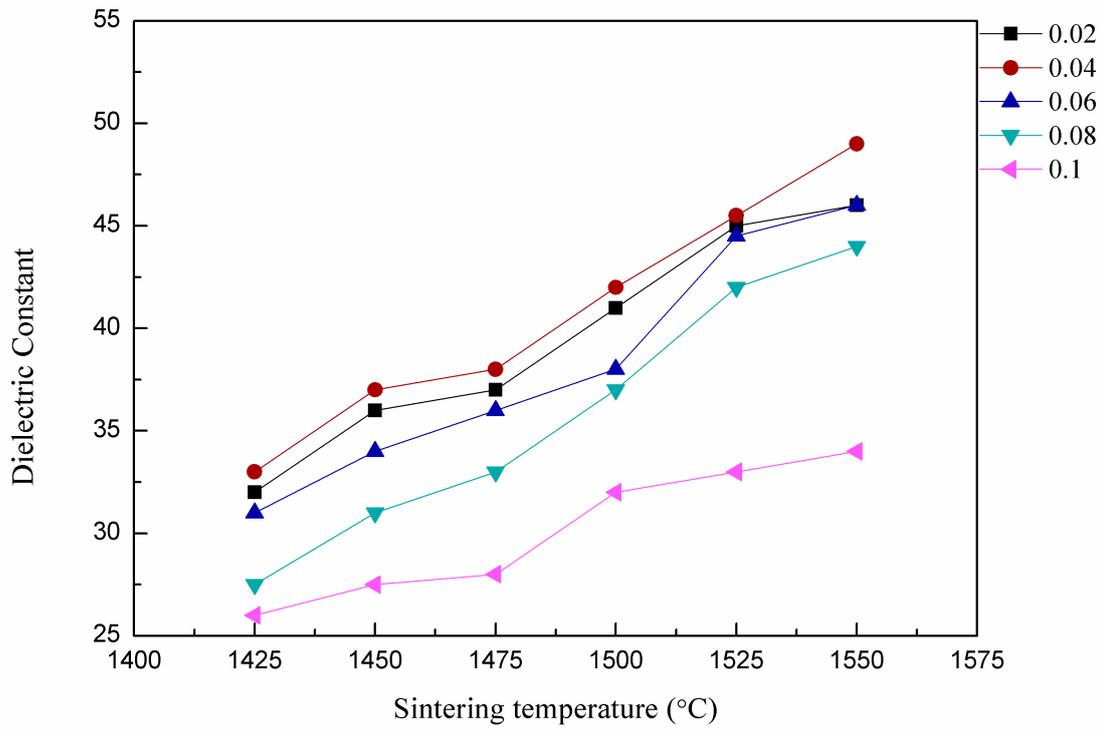


圖5-7 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$)之介電係數與燒結溫度關係圖



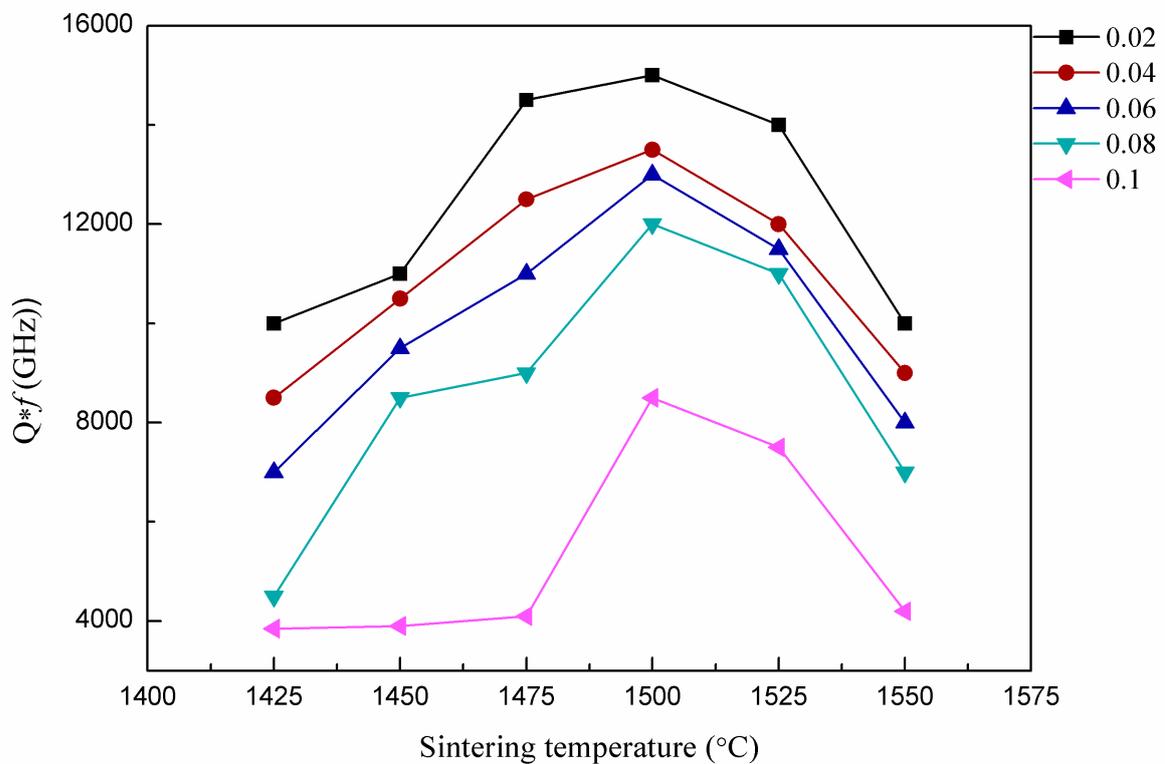


圖5-8 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$)之品質因素與燒結溫度關係圖

5-1-6 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之溫度頻率飄移系數(τ_f)分析

結果

圖5-9為 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$)在不同燒結溫度(1425-1550 °C)，持溫4小時之溫度頻率飄移系數分析圖，溫飄係數主要受到組合物和摻雜物的影響。由圖中可以看出隨著 x 取代量越來越多，溫飄係數會越往負值趨近，且隨著燒結溫度升高，溫飄係數值會往負值趨近。最趨近於零的溫飄係數為 $x=0.02$ 在1425°C燒結溫度下約-5.1 ppm/°C。

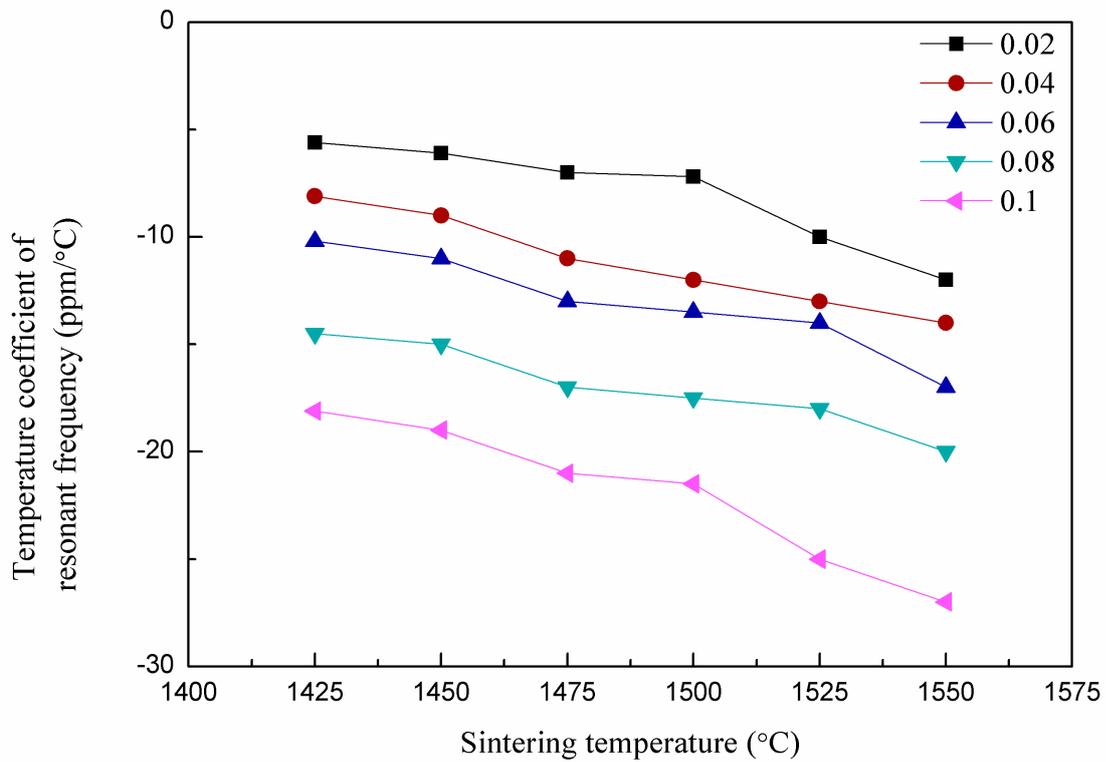


圖5-9 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$)之溫飄係數與燒結溫度關係圖

綜合上述結果可以整理出在 $x=0.02$ 燒結溫度為 1500°C 持溫四小時下的微波介電特性 ϵ_r 約為 45.5、 $Q \times f$ 約為 15,000 GHz、 τ_f 約為 $-7.1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 。

5-2 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之微波介電特性

我們將透過調整不同的 x 比例($x=0.0-1.0$)，來探討 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 的微波介電特性。

5-2-1 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之XRD分析結果

圖5-10為 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x = 0.02\sim 0.1$)在最佳燒結溫度 1475°C 時之XRD圖。由圖中可以觀察出取代量 x 值不同時雖然相對強度有些許變化但並不會對主相產生明顯的變化，主相為 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 。

圖5-11為 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}$ 介電陶瓷在不同溫度下的XRD圖。可以觀察出不同燒結溫度對於整體的XRD圖沒有甚麼變化，主相為 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}$ 。

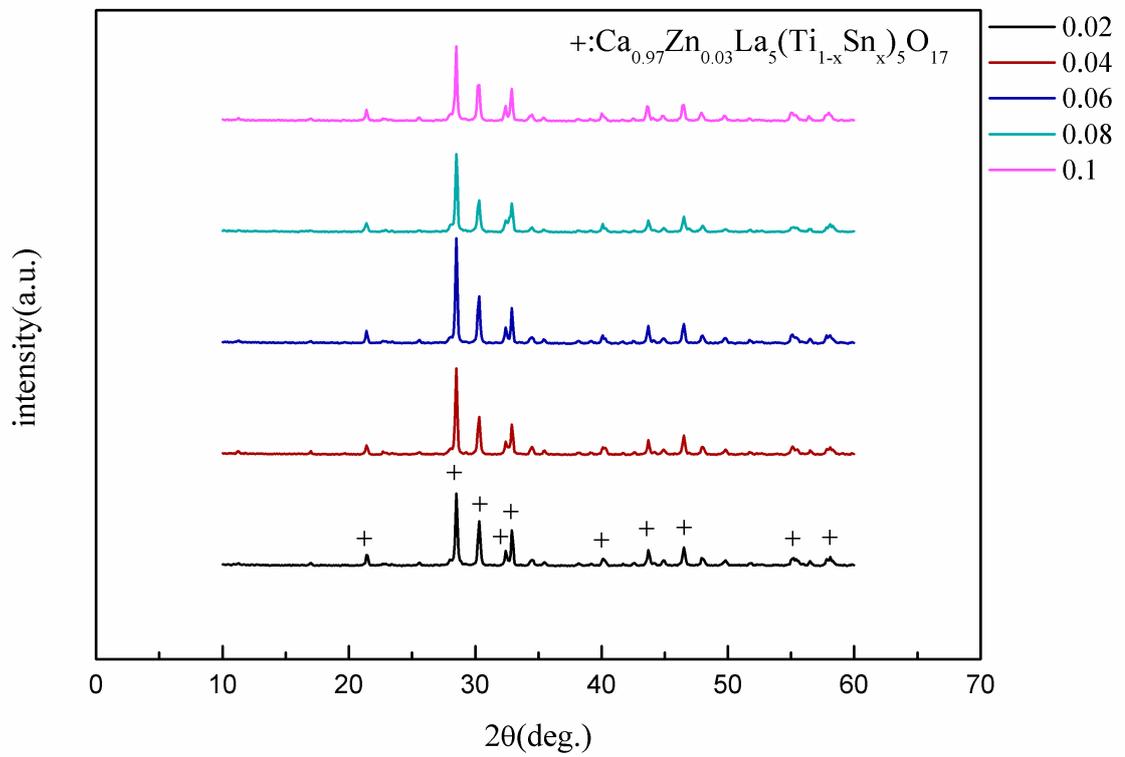


圖5-10 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 在燒結溫度 1475°C 持溫4小時之XRD圖



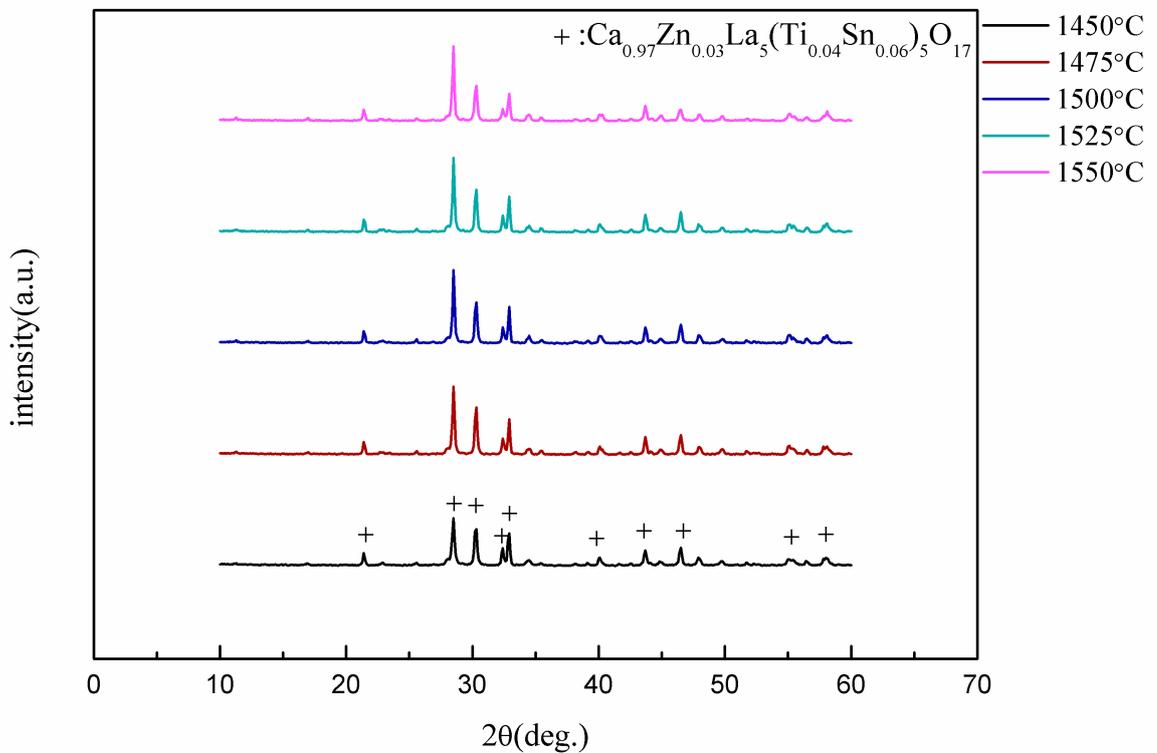
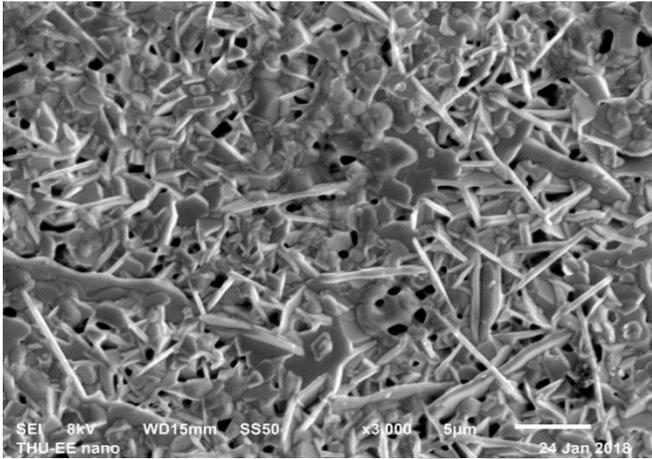


圖5-11 Ca_{0.97}Zn_{0.03}La₅(Ti_{0.04}Sn_{0.06})₅O₁₇在不同燒結溫度持溫4小時之XRD圖

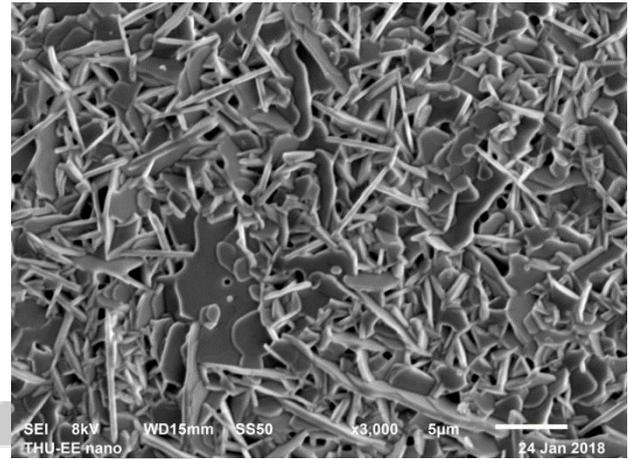
5-2-2 Ca_{0.97}Zn_{0.03}La₅(Ti_{1-x}Sn_x)₅O₁₇之SEM分析結果

圖5-12為Ca_{0.97}Zn_{0.03}La₅(Ti_{0.06}Sn_{0.04})₅O₁₇在不同燒結溫度(1425-1550°C)，持溫4小時之SEM圖。由圖中可以看出隨著燒結溫度增加，晶粒有逐漸成長的趨勢。從燒結溫度(1425-1550 °C)中陶瓷材料的孔隙有減少的趨勢，在1550°C時孔隙最少最為緻密，由此推測此材料的晶粒還在持續成長。

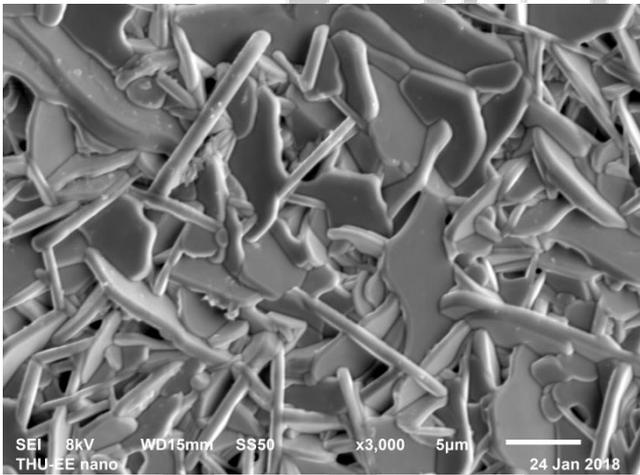
圖5-13為Ca_{0.97}Zn_{0.03}La₅(Ti_{1-x}Sn_x)₅O₁₇不同比例在1475°C燒結溫度下的SEM圖。由圖中可以發現隨著x的比例上升，晶粒有逐漸變大的趨勢。



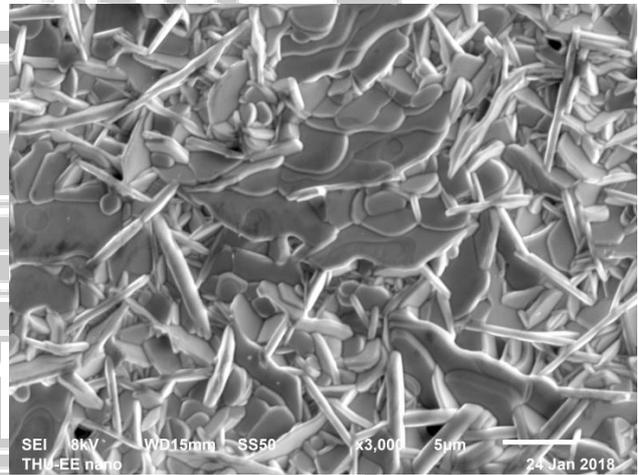
(a)1425°C



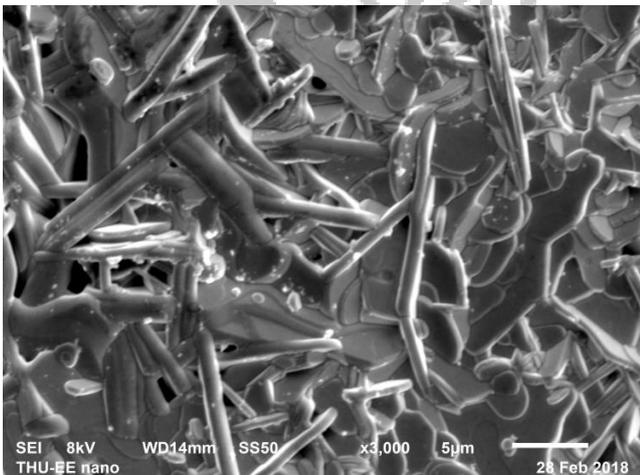
(b)1450°C



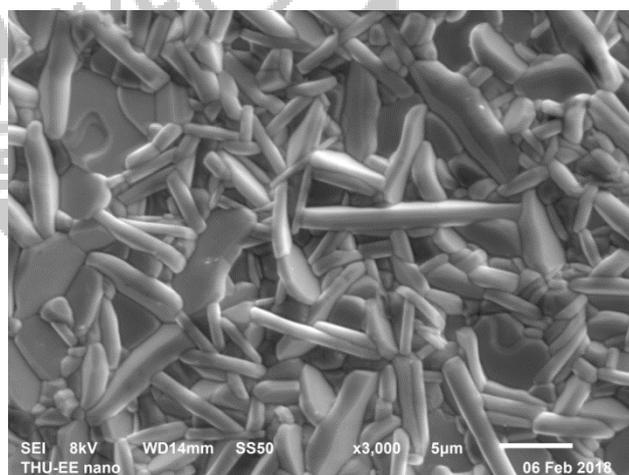
(c)1475°C



(d)1500°C

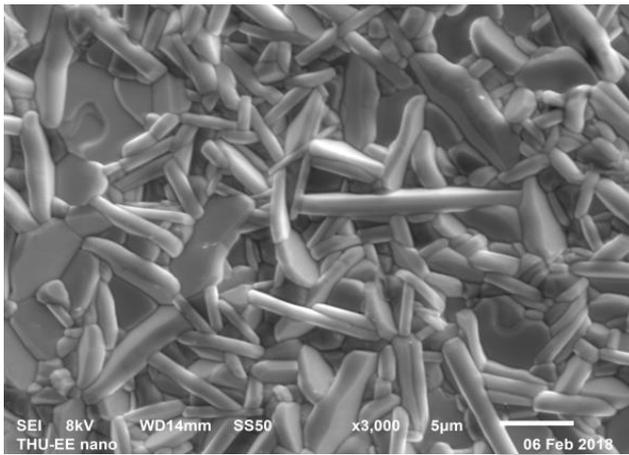


(e)1525°C

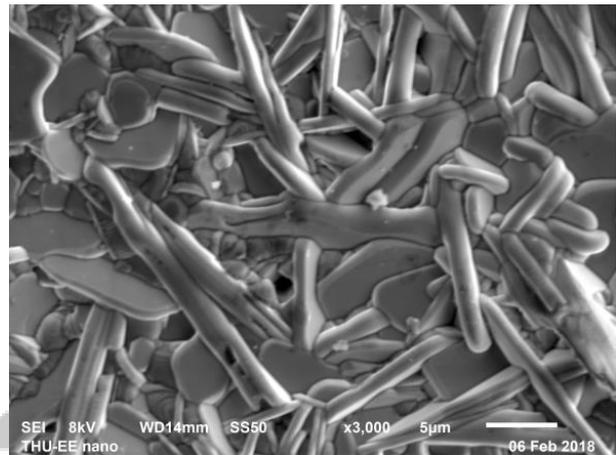


(f)1550°C

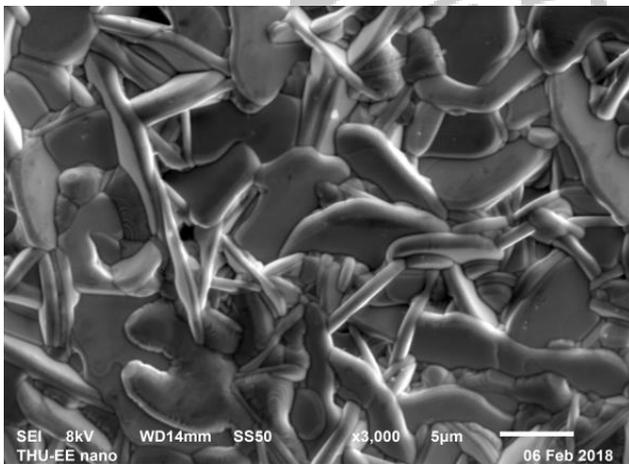
圖5-12 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.06}\text{Sn}_{0.04})_5\text{O}_{17}$ 在不同燒結溫度SEM圖



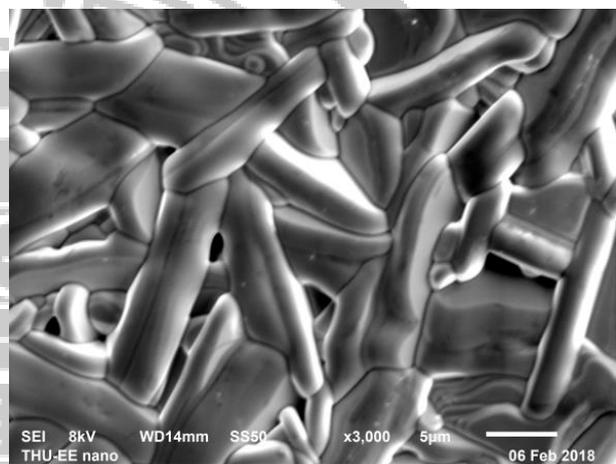
(a) $x=0.02$



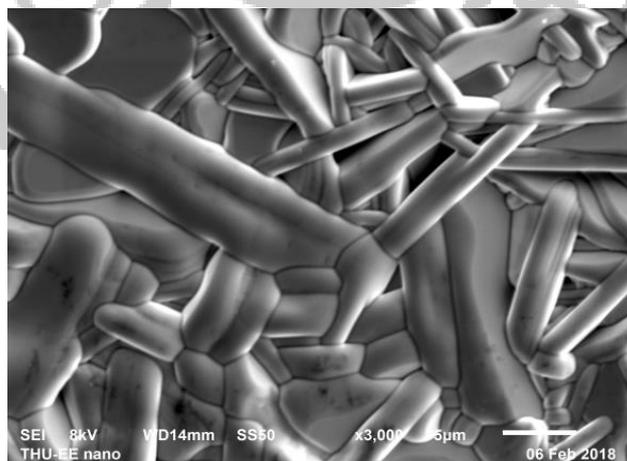
(b) $x=0.04$



(c) $x=0.06$



(d) $x=0.08$



(e) $x=0.1$

圖5-13 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 在不同比例1475°C燒結溫度SEM圖

5-2-3 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之EDS分析結果

圖 5-14 為 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.06}\text{Sn}_{0.04})_5\text{O}_{17}$ 在 1475°C 燒結溫度的三點 EDS 圖，從表 5-3 可以長條狀、塊狀和圓形的晶粒元素百分比有與配粉時的莫耳濃度一致。

表 5-3 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.06}\text{Sn}_{0.04})_5\text{O}_{17}$ 在 1475°C 燒結溫度的點各別元素含量

Element	Weight/Atomic A	Weight/Atomic B	Weight/Atomic C
C	2.76/8.70	3.85/11.37	3.75/13.09
O	24.41/52.45	21.67/48.05	16.02/41.90
Ca	1.59/1.50	1.66/1.54	2.17/2.28
Ti	40.32/28.84	40.70/30.03	36.22/31.04
Zn	0.32/0.12	0.28/0.14	0.42/0.24
Sn	1.29/1.09	1.97/1.23	3.70/2.58
La	29.31/7.30	29.88/7.63	36.2/10.67

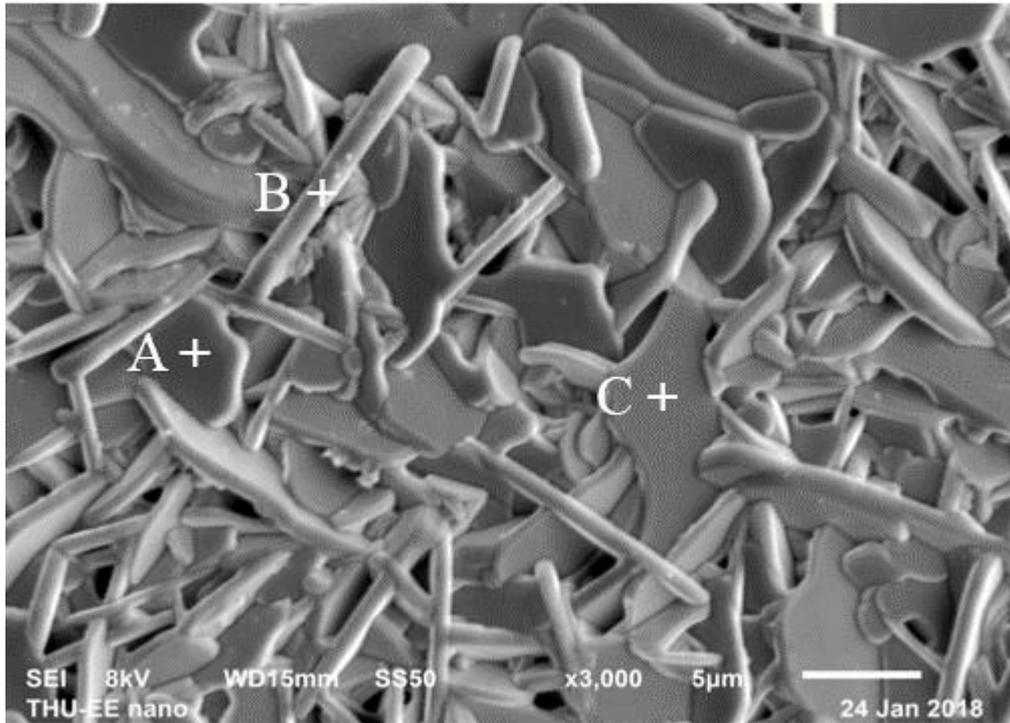


圖5-14 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}$ 燒結溫度 1475°C 之EDS三點圖

5-2-4 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之密度分析結果

圖 5-15 為 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$) 在不同燒結溫度 ($1425-1550^\circ\text{C}$)，持溫 4 小時之密度圖。從圖中可以知道 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$) 的密度隨著燒結溫度升高而變大，且沒有下降的趨勢，從圖 5-12 的 SEM 圖可以知道在最高溫 1550°C 仍然有些微的孔隙存在，推測是因為此材料的晶粒還在持續成長，所以密度才沒有下降的趨勢。此趨勢與 SEM 圖所觀察到的趨勢相近。在不同燒結溫度， $x=0.02$ 時有所有摻雜比例中最大的密度，在 $x=0.02$ ，燒結溫度為 1550°C 時有最大的密度約 $5.4(\text{g}/\text{cm}^3)$ 。但是影響視密度的有許多因素，如：孔隙率、燒結情況、晶粒大小、有序或者無序的排列和晶格缺陷等。由上述

分析結果得知，孔洞較少和均勻的晶粒大小分布皆會提升介電材料的緻密度。

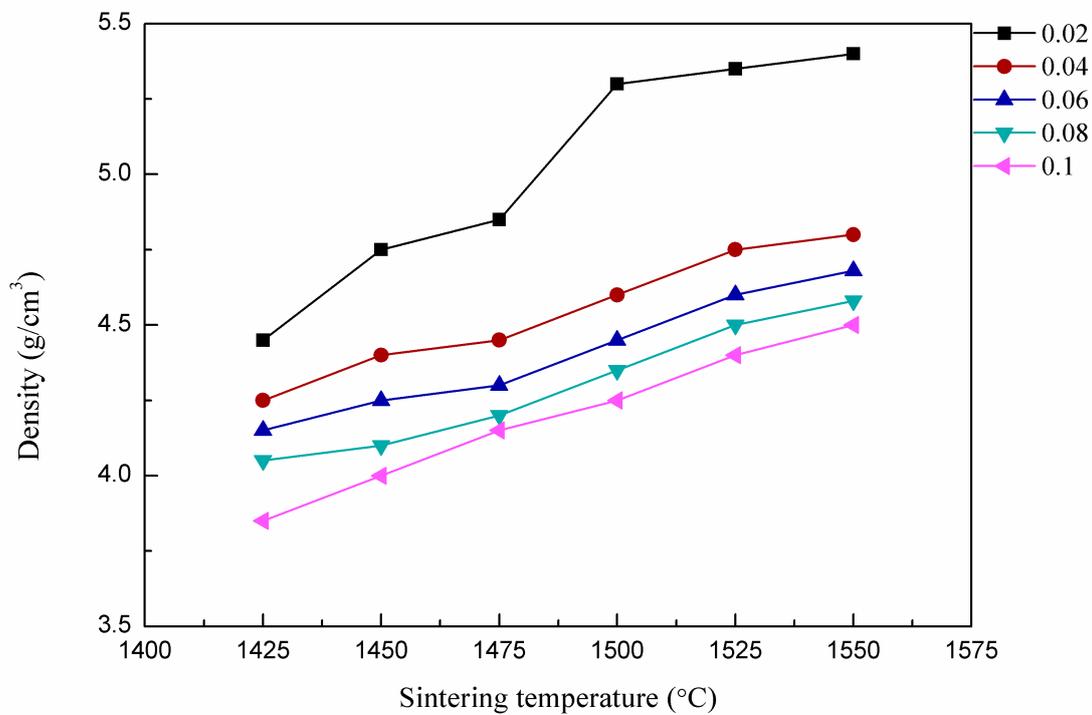


圖5-15 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$)不同溫度之密度圖

5-2-5 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之介電常數(ϵ_r)、品質因素($Q \times f$)分析結果

圖 5-16 和 5-17 為 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$) 在不同燒結溫度 (1425-1550 °C)，持溫4小時之介電常數和品質因素關係圖($f_0=6.9\sim 7.5\text{GHz}$)。由圖中可以看出 ϵ_r 會隨著燒結溫度升高而持續上升但是沒有下降的趨勢，從圖5-15的密度圖中可以得知 ϵ_r 與密度圖趨勢一致。在不同燒結溫度， $x=0.02$ 時有所有摻雜比例中最大的 ϵ_r ，且在 $x=0.02$ ，燒結溫度為1550°C時有最大的 ϵ_r 約55.1。 $Q \times f$ 值從1425-1475 °C為持續上升然後下降，因為晶粒快速成長造成晶粒大小不均勻，會使晶格震盪不諧調，晶粒變大，並且其電域壁(domain wall) 越不容易移動，極化損提高，品質因素下降；所以晶粒大小影響品質因數極大，而晶粒大小最均勻時會得到較佳的品質因素。在所有燒結溫度中， $x=0.06$ 時擁有全部比例中最高的 $Q \times f$ 值，且在 $x=0.06$ 燒結溫度為1475°C最高的 $Q \times f$ 值約為16,000。從上面的分析結果得到在 $x=0.06$ ，燒結溫度為1475°C時有最好的介電特性($\epsilon_r \sim 37.5$ 、 $Q \times f \sim 16,000 \text{ GHz}$)。

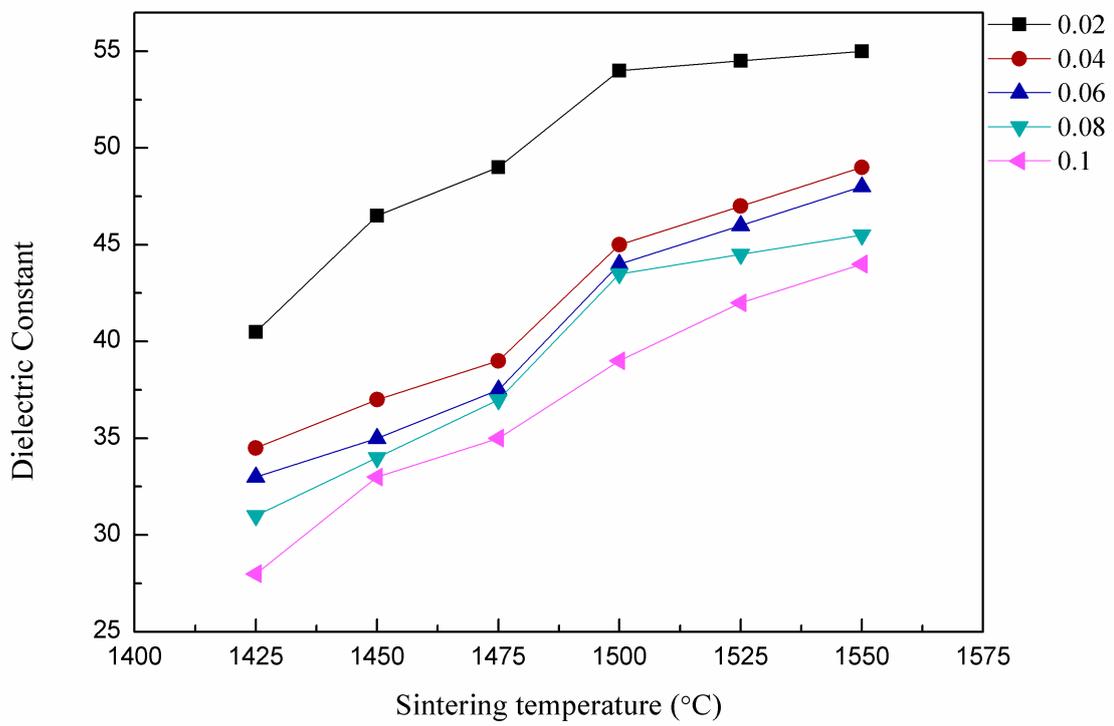


圖5-16 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$)不同溫度之介電常數圖



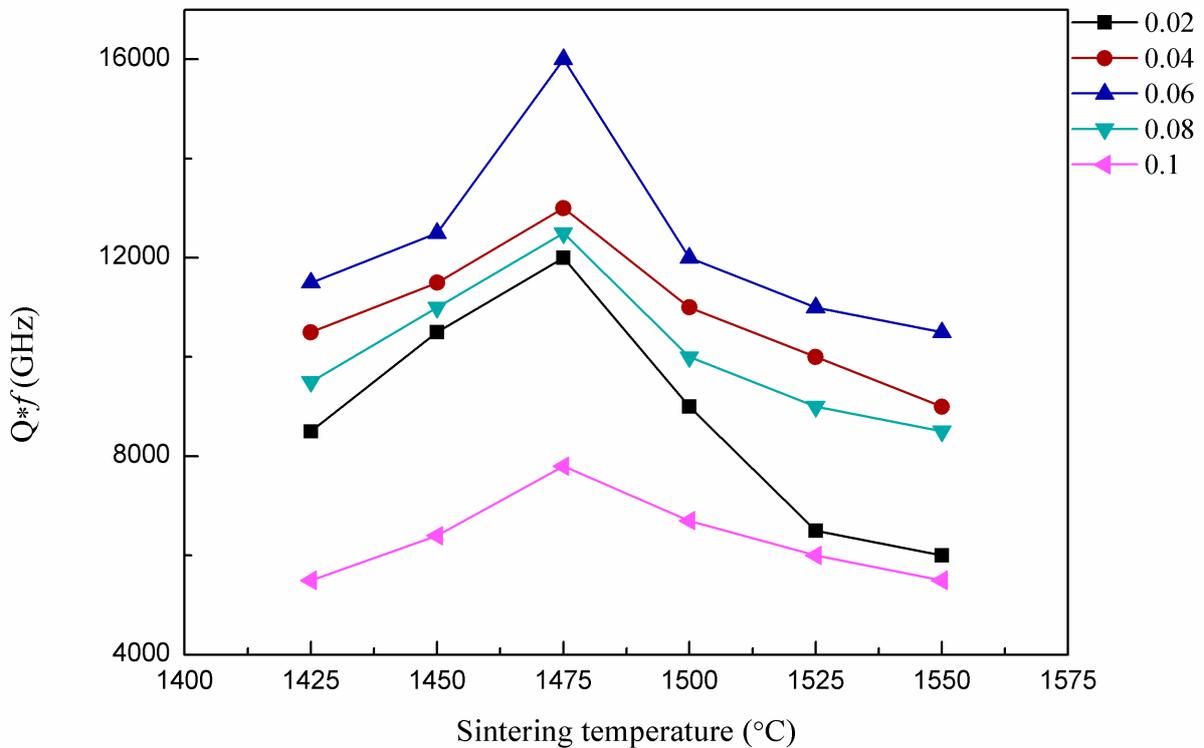


圖5-17 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$)不同溫度之品質因素圖

5-2-6 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 之溫度頻率飄移系數(τ_f)分析結果

圖 5-18 為 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$) 在不同燒結溫度 (1425-1550 °C)，持溫4小時之溫度頻率飄移系數分析圖，由圖中可以看出隨著 x 取代量越來越多，溫飄係數會越往負值趨近，且隨著燒結溫度升高，溫飄係數值會往負值趨近。最趨近於零的溫飄係數為 $x=0.02$ 在 1425°C 燒結溫度下約 -5.1 ppm/°C。

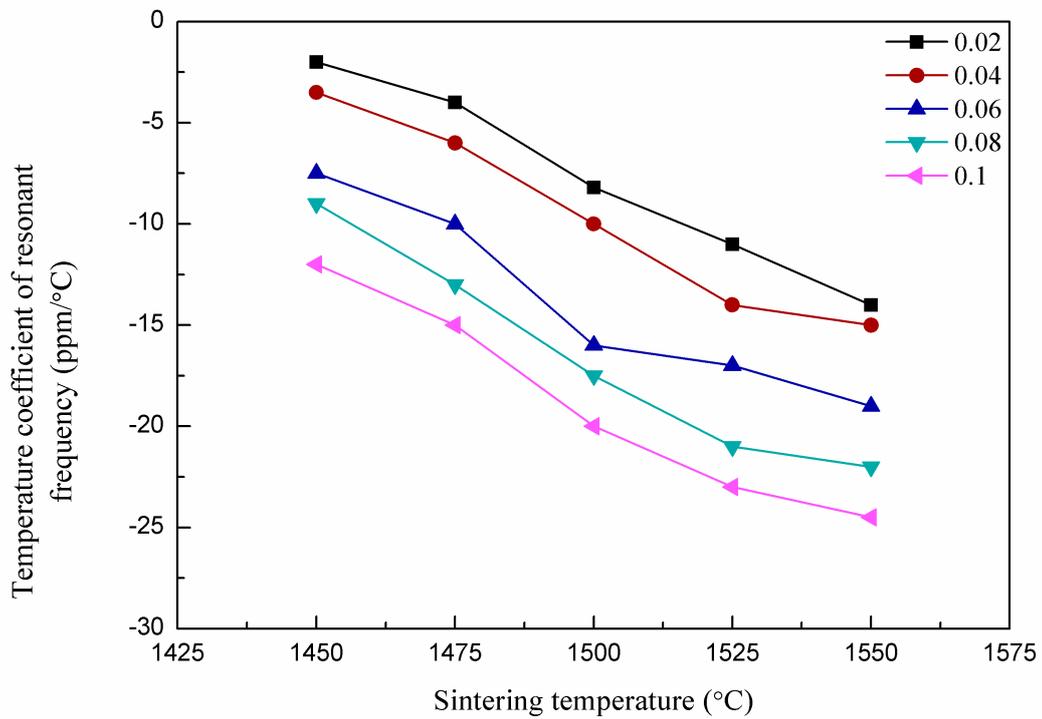


圖5-18 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$) 溫度係數與燒結溫度關係圖

綜合上述結果可以整理出在 $x=0.06$ 燒結溫度為 1475°C 持溫四小時下的微波介電特性 ϵ_r 約為 37.5、 $Q \times f$ 約為 16,000 GHz、 τ_f 約為 $-9.6 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 。

5-3 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 之微波介電特性

我們將透過調整不同的 x 比例($x=0.1-0.9$)，來探討 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 的微波介電特性。

5-3-1 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 之XRD分析結果

圖5-19為 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1\sim 0.9$)在最佳燒結溫度 1450°C 時之XRD圖。由圖中可以觀察出 x 摻雜量越大主相強度會有明顯得變化，從圖中可以知道主相為 $\text{Ca}_5\text{Nb}_5\text{O}_{17}$ 和次相為 CaLa_2O_x 。由於La的離子半徑為 1.06\AA ，Ti的離子半徑為 0.60\AA ，所以XRD掃描在相同角度下入射後反射的最高的峰值會因為離子半徑差距太大而造成峰值往前偏。

圖5-20為 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{0.1}\text{La}_{0.9}\text{O}_{17}$ 介電陶瓷在不同溫度下的XRD圖。可以觀察出不同燒結溫度對於主相強度並沒有明顯得變化，從圖中可以知道主相為 $\text{Ca}_5\text{Nb}_5\text{O}_{17}$ 和次相為 CaLa_2O_x 。

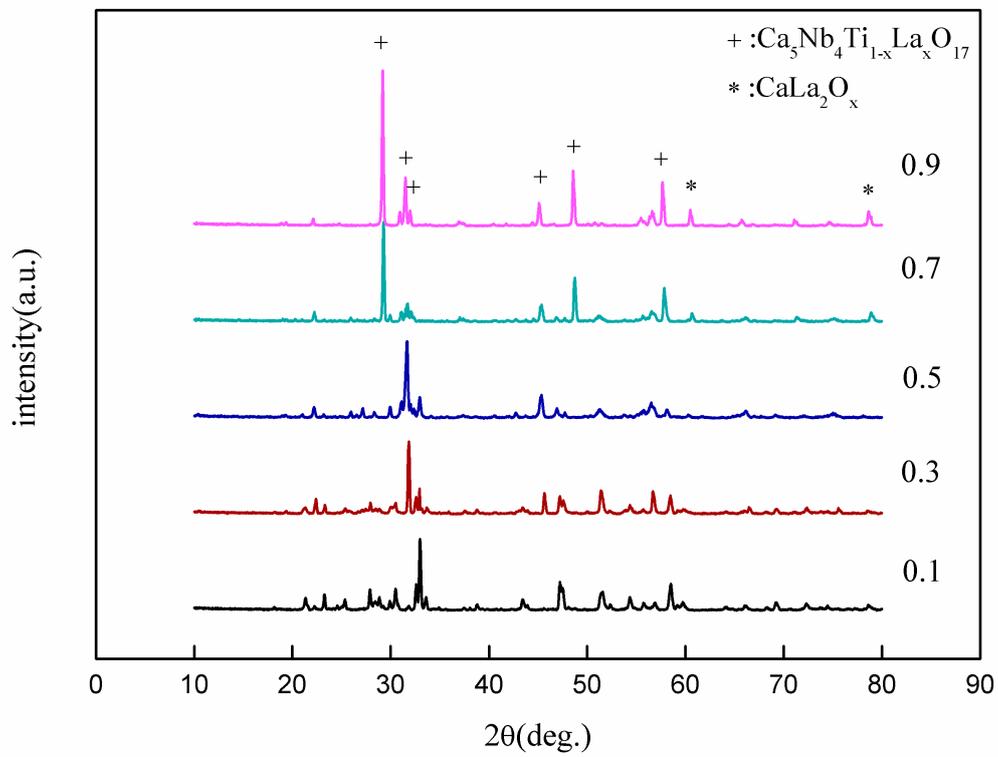


圖5-19 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x = 0.1 \sim 0.9$)在燒結溫度 1450°C 持溫4小時之XRD圖



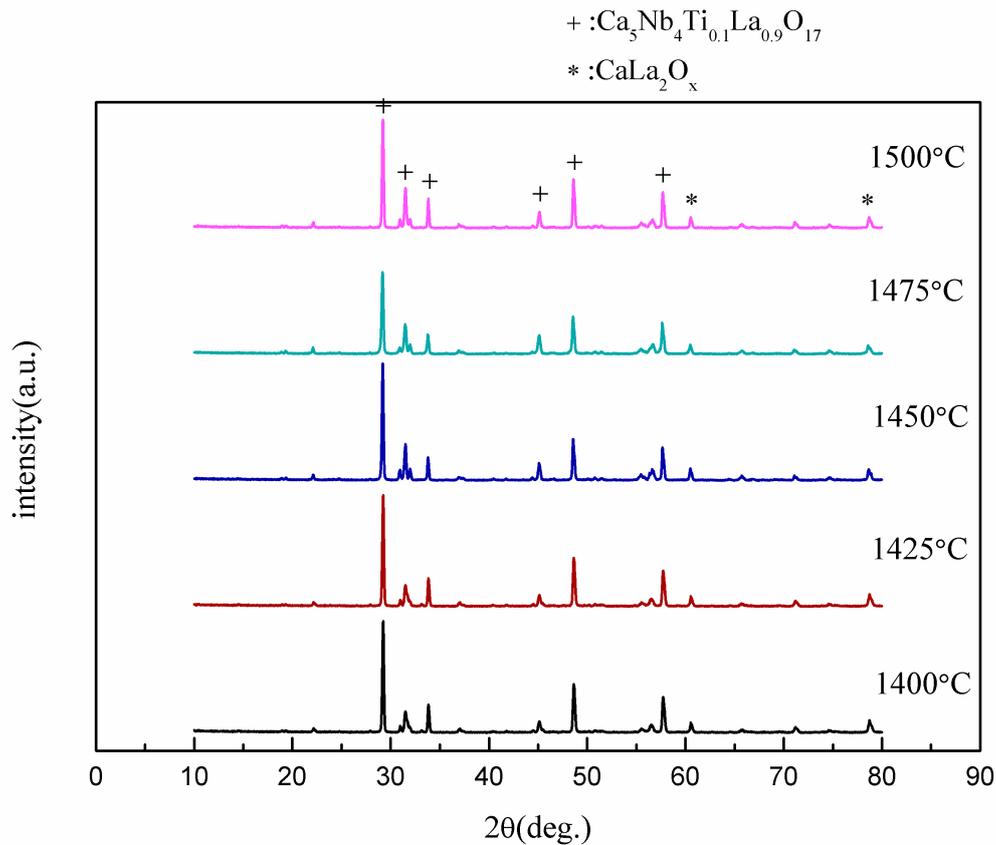


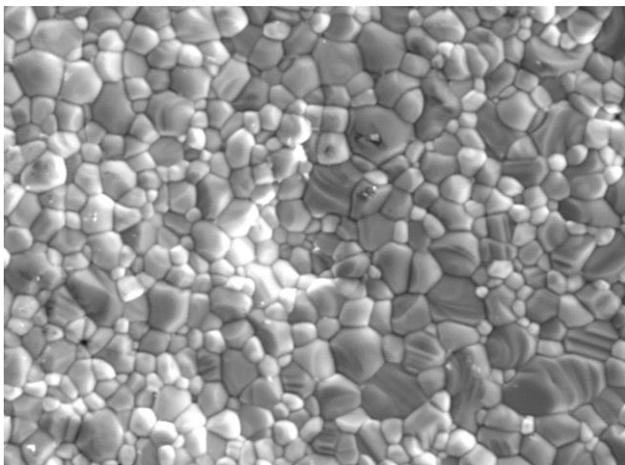
圖 5-20 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{0.1}\text{La}_{0.9}\text{O}_{17}$ 介電陶瓷在不同溫度下的 XRD 圖

5-3-2 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 之 SEM 分析結果

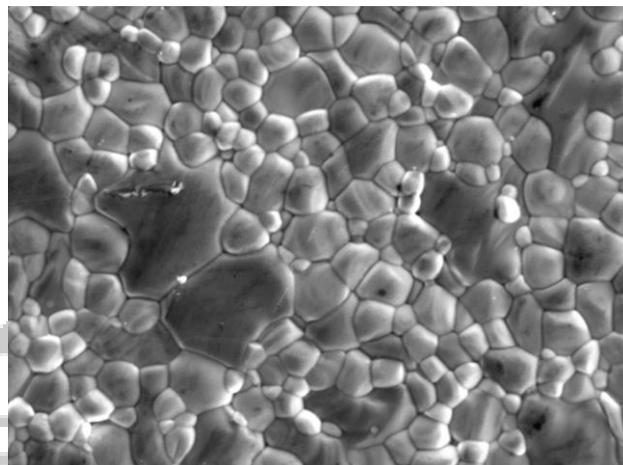
圖 5-21 為 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{0.1}\text{La}_{0.9}\text{O}_{17}$ 在不同燒結溫度 (1400-1550 °C)，持溫 4 小時之 SEM 圖。由圖中可以看出隨著燒結溫度增加，晶粒有逐漸成長的趨勢。從燒結溫度 (1400-1500 °C) 中陶瓷材料的孔隙有減少的趨勢，但在 1525 °C 之後因為晶粒過度成長而造成孔隙增加。

圖 5-22 為 $\text{Zn}_{0.5}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{NbO}_4$ ($x=0.1-0.9$) 不同比例在 1400 °C 燒結溫度下的

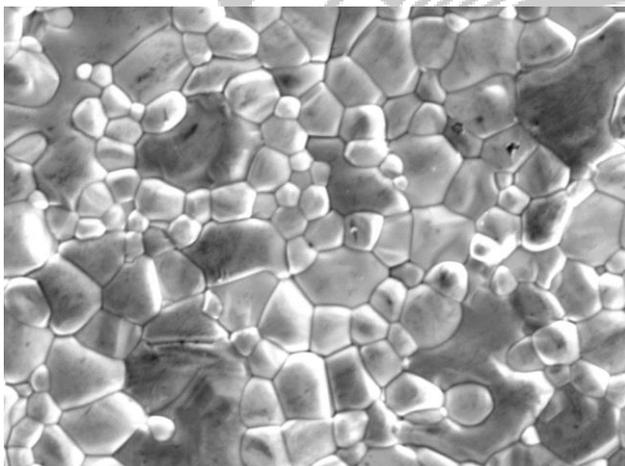
SEM圖。由圖中可以發現隨著 x 的比例上升，晶粒有逐漸成長的趨勢。



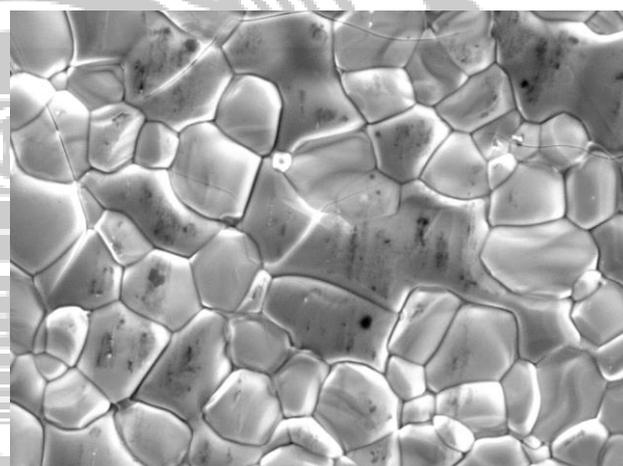
(a) 1400°C



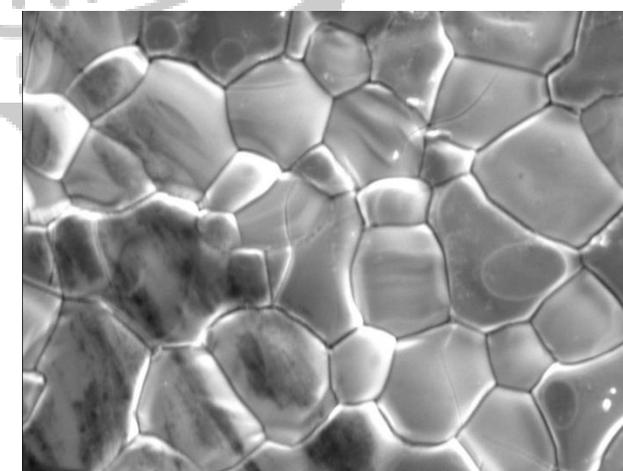
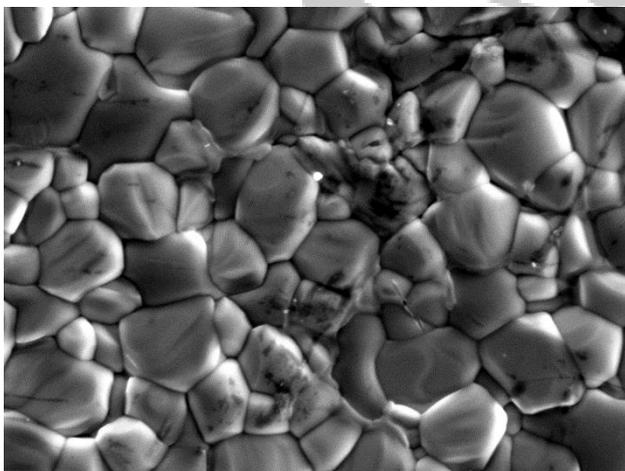
(b) 1425°C



(c) 1450°C

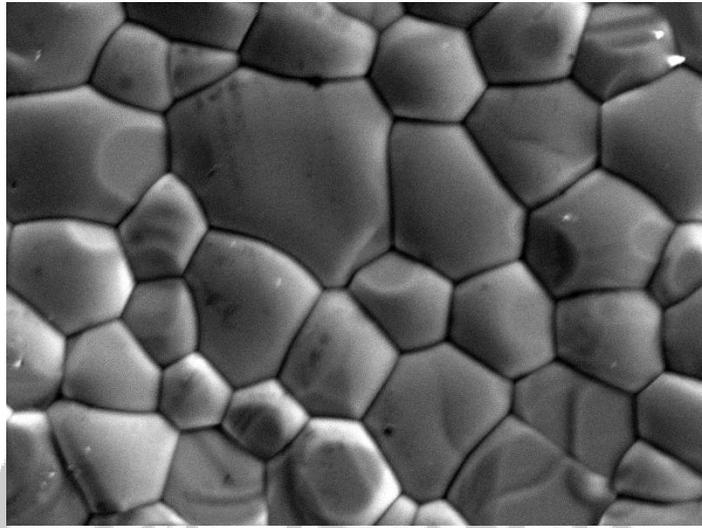


(d) 1475°C



(e) 1500°C

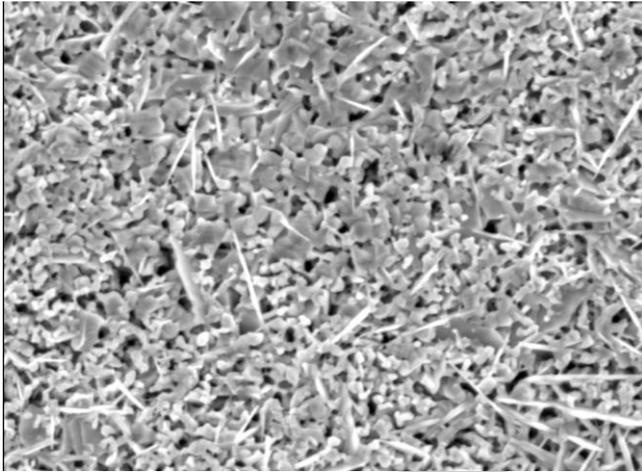
(f) 1525°C



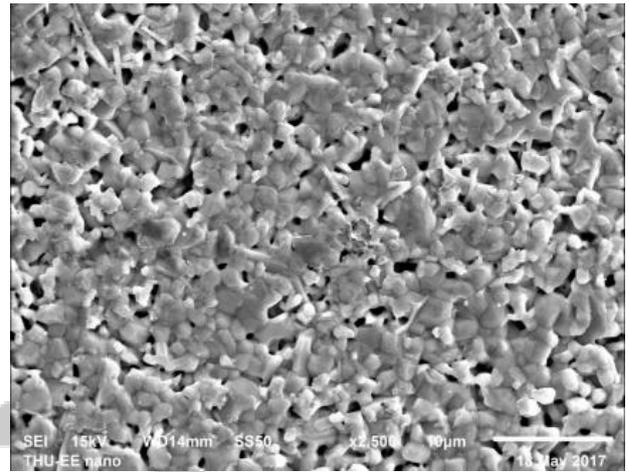
(g) 1550°C

圖5-21 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{0.1}\text{La}_{0.9}\text{O}_{17}$ 在不同燒結溫度SEM圖

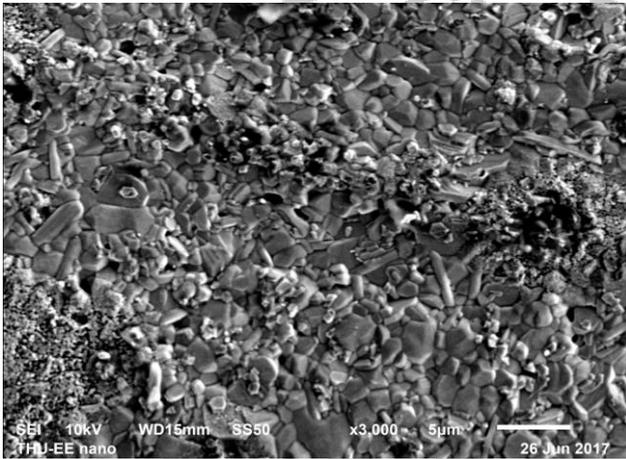




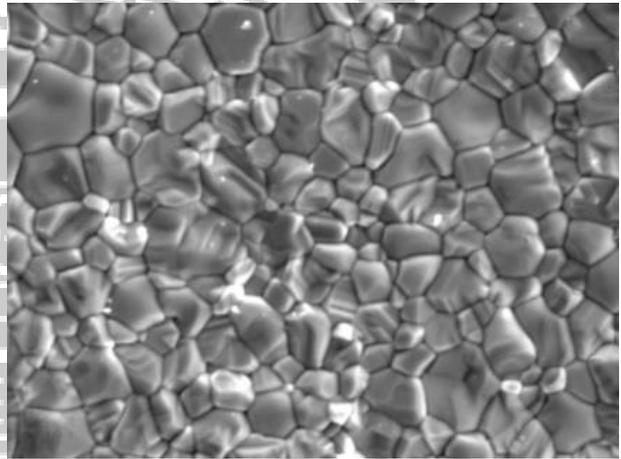
(a) $x=0.1$



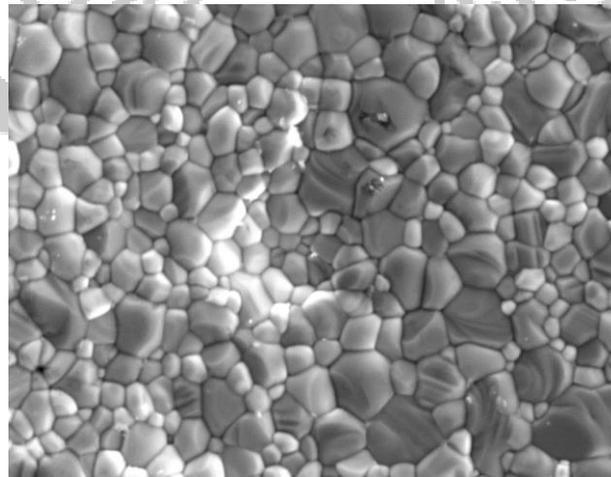
(b) $x=0.3$



(c) $x=0.5$



(d) $x=0.7$



(e) $x=0.9$

圖5-22 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1-0.9$)在1400 °C燒結溫度SEM圖

5-3-3 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 之EDS分析結果

圖5-23和表5-6為 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{0.1}\text{La}_{0.9}\text{O}_{17}$ 在1450 °C燒結溫度的整面分析EDS圖和元素含量表。從表5-6的Atomic%中可以發現原子數目百分比有依照莫耳比例摻雜的數量。

表 5-4 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{0.1}\text{La}_{0.9}\text{O}_{17}$ 1450 °C 燒結溫度燒結溫度的點各別元素含量

Element	Weight/Atomic A	Weight/Atomic B	Weight/Atomic C
C	5.58/6.79	4.77/4.36	8.65/6.43
O	26.39/61.04	27.83/62.41	18.13/50.55
Ca	17.94/16.56	17.45/15.94	16.46/18.33
Ti	1.51/1.16	1.16/0.89	1.98/1.91
Nb	35.86/14.28	36.57/14.41	32.34/15.53
La	12.00/3.20	11.25/2.97	10.06/3.59



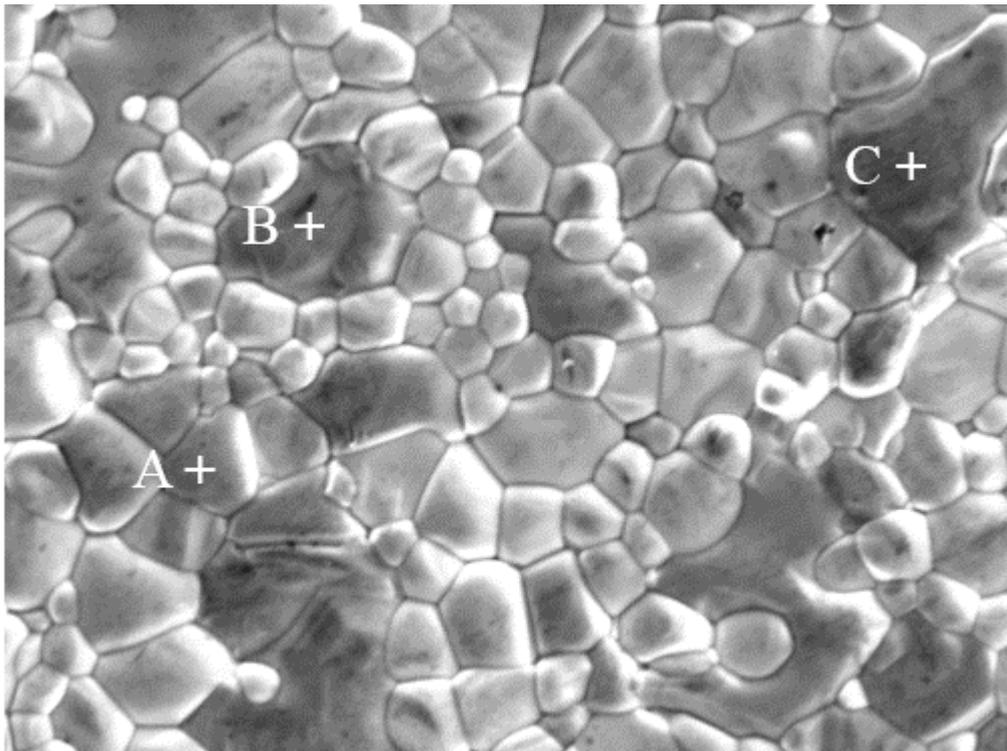


圖5-23 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{0.1}\text{La}_{0.9}\text{O}_{17}$ 燒結溫度 1450°C 之EDS三點圖



5-3-4 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 之密度分析結果

圖5-24為 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 在不同燒結溫度(1400-1550 °C)的密度圖，從圖中可以發現在 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1$ 和 0.3)時，密度隨著燒結溫度升高而上升，之後在1525 °C時開始下降。 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.5-0.9$)時則沒有明顯的上升趨勢。

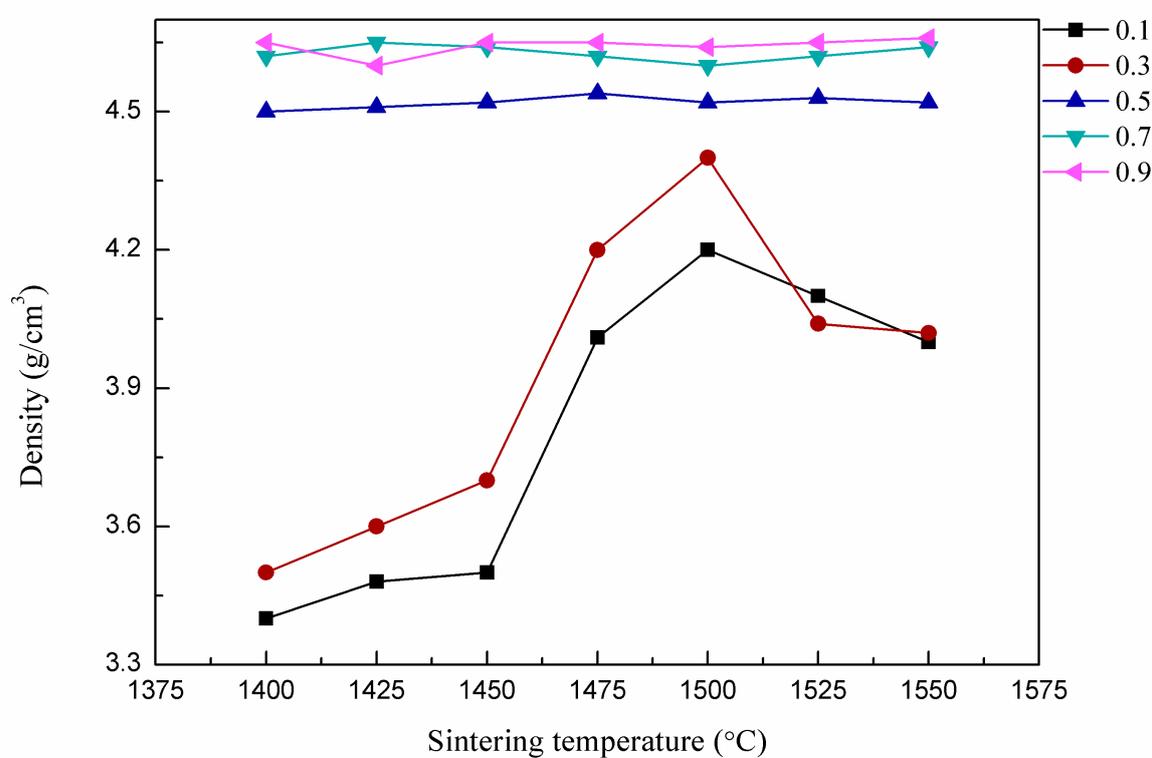


圖5-24 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1-0.9$)不同溫度之密度圖

5-3-5 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 之介電常數(ϵ_r)、品質因素($Q \times f$)分析

結果

圖 5-25 和 5-26 為 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1-0.9$)在不同燒結溫度(1400-1550 °C)，持溫 4 小時之介電常數和品質因素關係圖($f_0 = 7.0 \sim 7.5\text{GHz}$)。由圖中可以看出 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1$ 和 0.3)的 ϵ_r 會隨著燒結溫度升高而持續上升，在 1525 °C 時開始下降，以及在 $x=0.5-0.9$ 時， ϵ_r 沒有明顯的下降趨勢，與圖 5-24 的密度圖趨勢一致。品質因素值會隨著 La 的含量提高而逐漸上升。因為晶粒快速成長造成晶粒大小不均勻，會使晶格震盪不諧調，晶粒變大，並且其電域壁(domain wall) 越不容易移動，極化損提高，品質因素下降；所以晶粒大小影響品質因數極大，而晶粒大小最均勻時會得到較佳的品質因素，從圖 5-22 的 SEM 圖可以發現在 $x=0.9$ 時的晶粒較均勻而影響到品質因素。在 $x=0.9$ 燒結溫度為 1450 °C 時有最高的 $Q \times f$ 值約 23,000。從上面量測結果得知在 $x=0.9$ 燒結溫度 1450 °C 時有較好的介電特性($\epsilon_r \sim 42.5$ 、 $Q \times f \sim 23,000\text{GHz}$)。

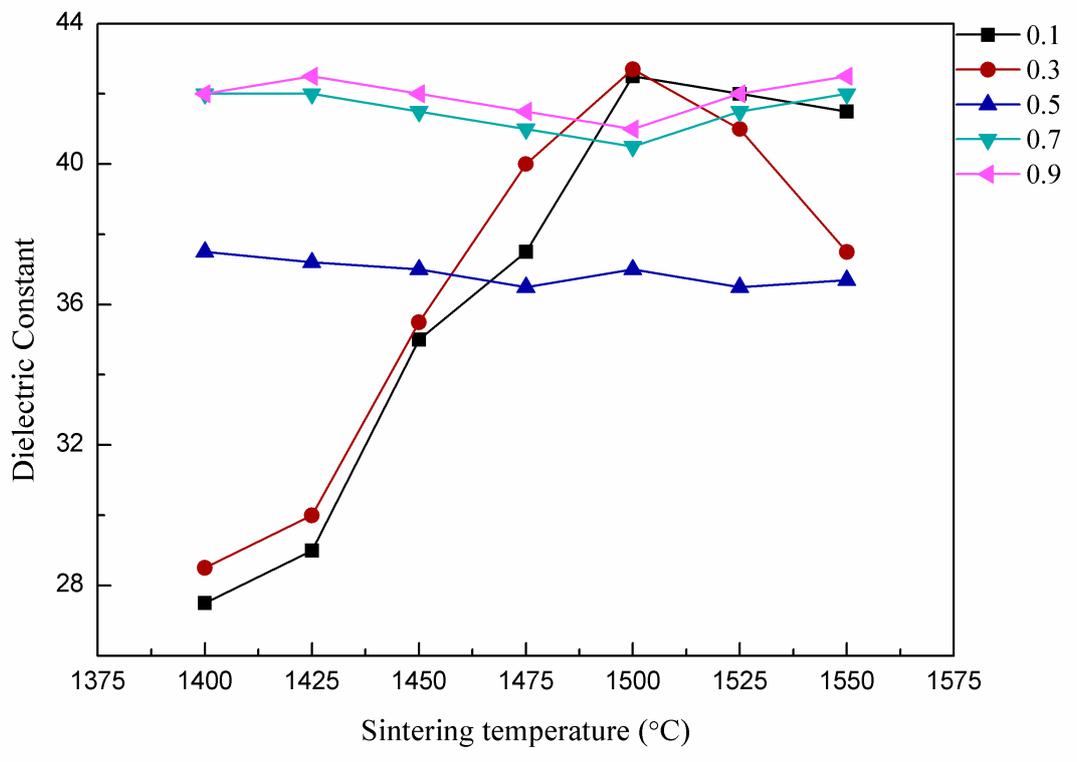


圖5-25 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1-0.9$)不同溫度之介電常數圖



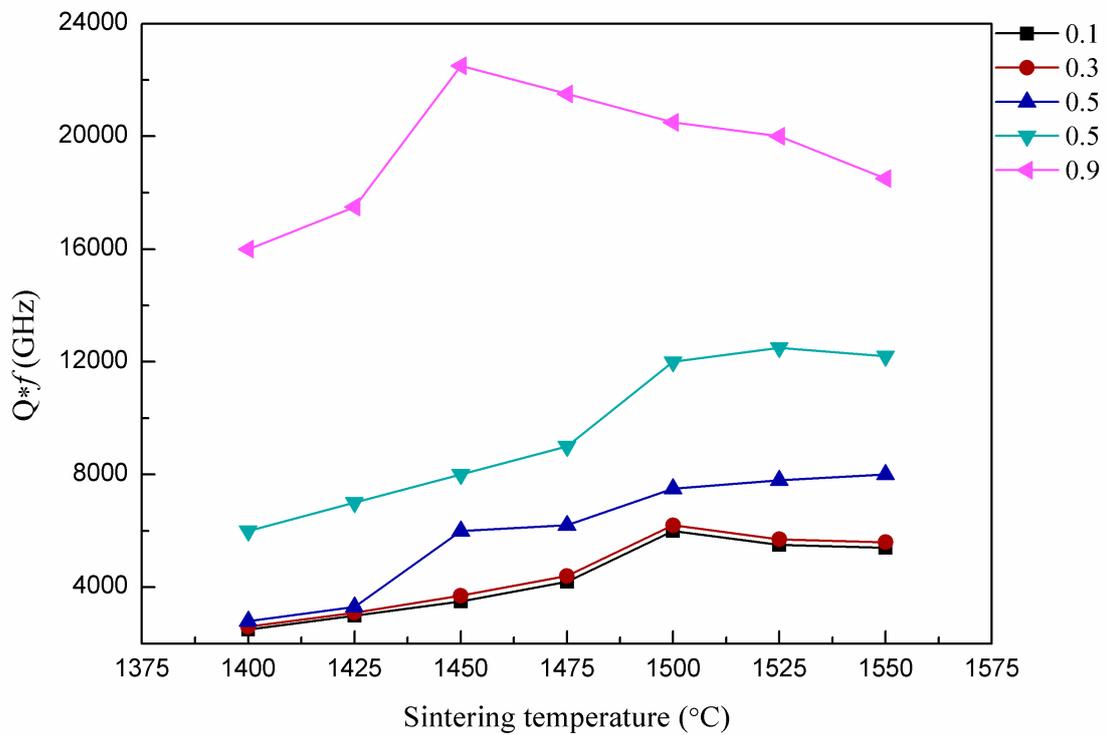


圖5-26 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1-0.9$)不同溫度之品質因素圖

5-3-6 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 之溫度頻率飄移系數(τ_f)分析結果

圖5-27為 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1-0.9$)在不同燒結溫度(1400-1550 °C)，持溫4小時之溫度頻率飄移系數分析圖，由圖中可以看出隨著 x 取代量越來越多，溫飄係數會越往正值趨近。最趨近於零的溫飄係數為 $x=0.05$ 在1450°C燒結溫度下約-9.1 ppm/°C。

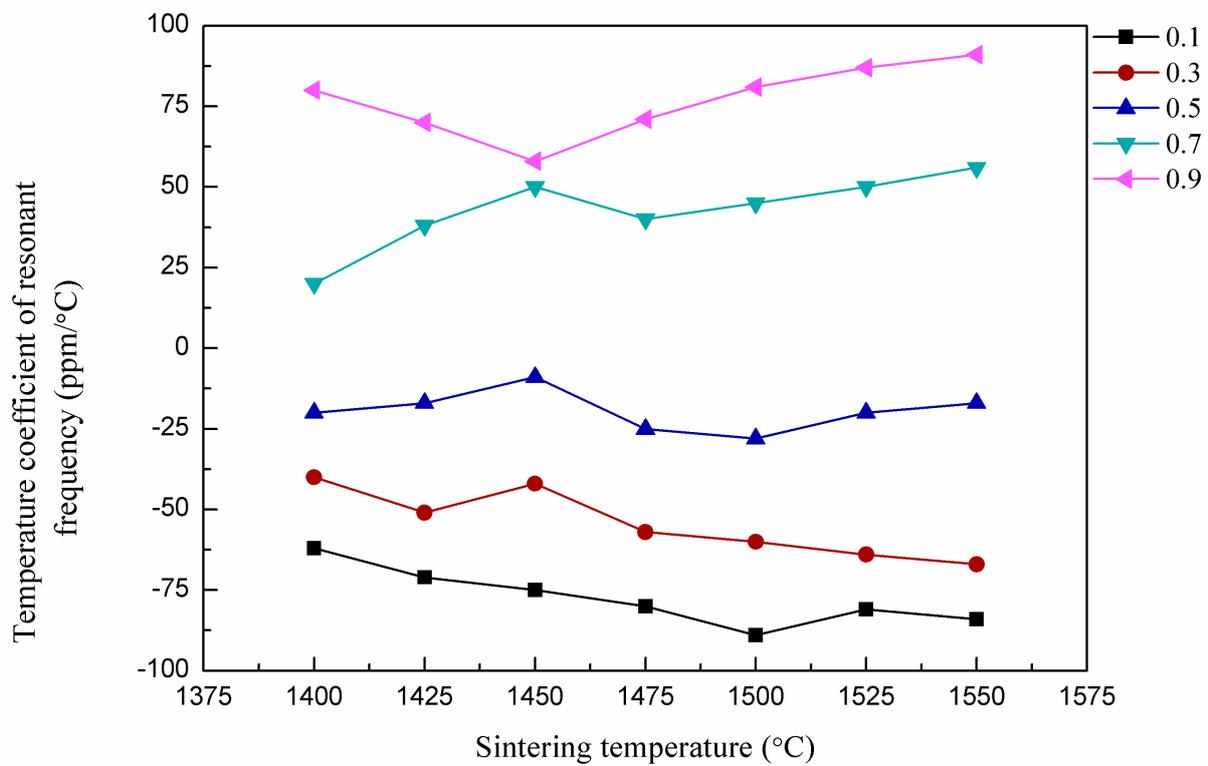


圖 5-27 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1-0.9$) 溫度系數與燒結溫度關係圖

綜合上述結果可以整理出在 $x=0.09$ 燒結溫度為 1450°C 持溫四小時下的微波介電特性此時 ϵ_r 約為 42.5、 $Q \times f$ 約為 23,000 GHz、 τ_f 約為 58 ppm/°C。

5-3-7 材料特性總表

表 5-5、5-6 和 5-7 為三種不同材料在最好的燒結溫度下不同摻雜比例的微波介電特性。

從表 5-5 和 5-6 中可以發現兩種材料會因為 Ca 與 Zn 摻雜的比例不同而使介電特性有很大的改變，而表 5-7 的 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1-0.9$) 的介電特性會隨著 La 的比例越多而越往上提升，溫飄系數則從負值隨著 La 比例越多而變為正值。

表 5-5 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$) 在燒結溫度 1500°C 持溫四小時的微波介電特性表

x value	Density (g/cm^3)	ϵ_r	$Q \times f$ (GHz)	τ_f (ppm/ $^\circ\text{C}$)
0.02	4.45	41	15000	-7.2
0.04	4.57	42	13500	-12
0.06	4.38	38	13000	-13.5
0.08	4.22	37	12000	-17.5
0.1	3.89	32	8500	-21.5

表 5-6 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ ($x=0.02-0.1$) 在燒結溫度 1475°C 持溫四小時的微波介電特性表

x value	Density (g/cm^3)	ϵ_r	$Q \times f$ (GHz)	τ_f (ppm/ $^\circ\text{C}$)
0.02	4.85	49	12000	-4.2
0.04	4.45	39	13000	-6.5
0.06	4.3	37.5	16000	-9.6
0.08	4.2	37	12500	-13.8
0.1	4.15	35	7800	-15.4

表 5-7 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1-0.9$) 在燒結溫度 1450°C 持溫四小時的微波介電特性表

x value	Density (g/cm^3)	ϵ_r	$Q \times f$ (GHz)	τ_f (ppm/ $^\circ\text{C}$)
0.1	3.5	35	3500	-75
0.3	3.7	35.5	3700	-42
0.5	4.52	37	6000	-9
0.7	4.64	41.5	8000	50
0.9	4.65	42	23000	58

5-4 低通濾波器之設計和模擬

5-4-1 濾波器設計與規格

利用參考文獻[18]中的設計理論，來設計出一個髮夾式低通濾波器，此濾波器利用耦合線來調整耦合強度，可以在所需的低通帶之上製造三個衰減極點，且為了進一步提高阻帶性能，在構造上設計一種具有兩個不對稱耦合線髮夾式的低通濾波器。

濾波器電路佈線如圖 5-27，微帶線特性阻抗為 50 歐姆，中心頻率 f_0 訂於 2.5GHz，以 IE3D 分別模擬 3 種基板特性參數，FR4 基板($\epsilon_r=4.4$; $\tan\delta=0.02$; 厚度 $H=0.635$)、 Al_2O_3 基板($\epsilon_r=9.8$; $\tan\delta=0.00005$; 厚度 $H=0.635$)和本論文的材料 $Ca_{0.97}Zn_{0.03}La_5(Ti_{0.04}Sn_{0.06})_5O_{17}$ ($\epsilon_r=37.5$; $\tan\delta=0.000062$; 厚度 $H=1.6$)。

(1)FR4 最佳化物理長度(單位:mm)

W1	W2	W3	W4	L1	L2	L3	L4
1.2	0.1	0.8	2	8.2	8.2	6	1.2

(2) Al_2O_3 最佳化物理長度(單位:mm)

W1	W2	W3	W4	L1	L2	L3	L4
0.6	0.1	0.5	2	6.4	5.8	3.5	0.6

(3) $Ca_{0.97}Zn_{0.03}La_5(Ti_{0.04}Sn_{0.06})_5O_{17}$ 最佳化物理長度(單位:mm)

W1	W2	W3	W4	L1	L2	L3	L4
0.22	0.1	0.3	1	6.4	3.2	1.5	0.22

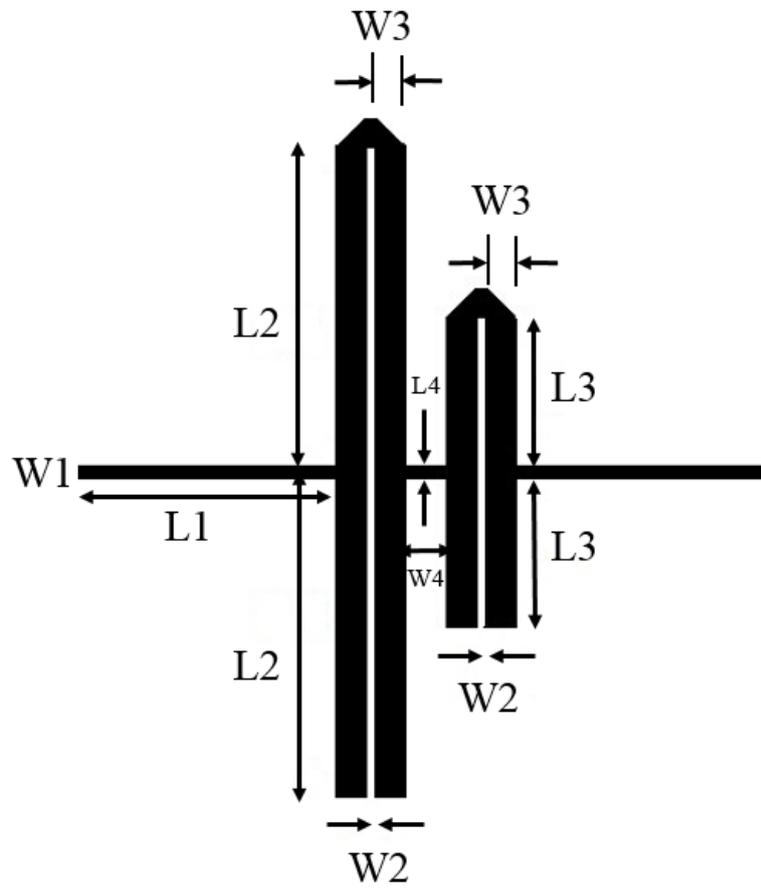


圖 5-28 濾波器的 layout 圖

5-4-2 濾波器模擬探討

FR4 模擬(圖形佈局長 21.8mm ;寬 18.4mm)

	3dB 頻率點	漣波最低點	漣波最高點	漣波大小	S21< -1dB
	2.48GHz	0.87GHz	1.39GHz		
模擬值	S ₂₁ :-3.2dB S ₁₁ :-3.8dB	S ₂₁ :-0.2dB S ₁₁ :-23.9dB	S ₂₁ :-0.29dB S ₁₁ :-26.5dB	0.09dB	2.15GHz

模擬值 S₂₁ 從 3.17GHz 開始皆低於-20dB

模擬值的頻率響應圖如圖 5-29 所示

Al₂O₃ 模擬(圖形佈局長 16mm ;寬 12.7mm)

	3dB 頻率點	漣波最低點	漣波最高點	漣波大小	S21< -1dB
	2.49GHz	1.13GHz	1.71GHz		
模擬值	S ₂₁ :-3dB S ₁₁ :-3.07dB	S ₂₁ :-0.26dB S ₁₁ :-13.9dB	S ₂₁ :-0.2dB S ₁₁ :-17dB	0.06dB	2.22GHz

模擬值的頻率響應圖如圖 5-30 所示

Ca_{0.97}Zn_{0.03}La₅(Ti_{0.04}Sn_{0.06})₅O₁₇ 模擬(圖形佈局長 14.6mm ;寬 6.92mm)

	3dB 頻率點	漣波最低點	漣波最高點	漣波大小	S21< -1dB
	2.5GHz	1.13GHz	1.71GHz		
模擬值	S ₂₁ :-3dB S ₁₁ :-3.2dB	S ₂₁ :-1.56dB S ₁₁ :-5.7dB	S ₂₁ :-0.4dB S ₁₁ :-14.6dB	1.16dB	0.76GHz

模擬值的頻率響應圖如圖 5-31 所示

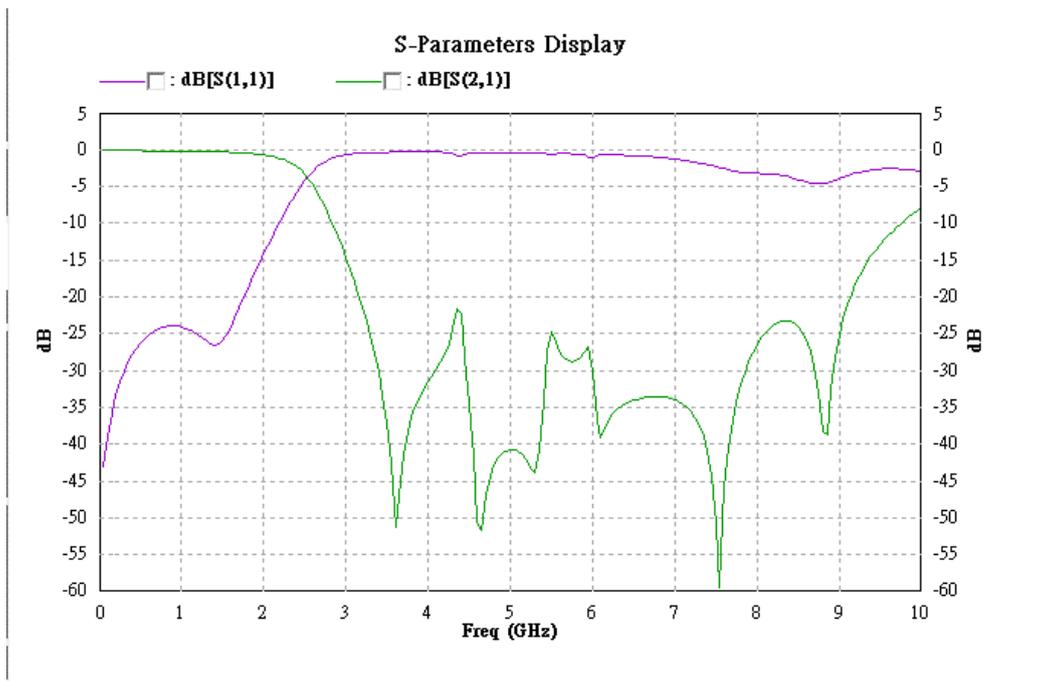


圖 5-29(a)FR4 模擬量測圖

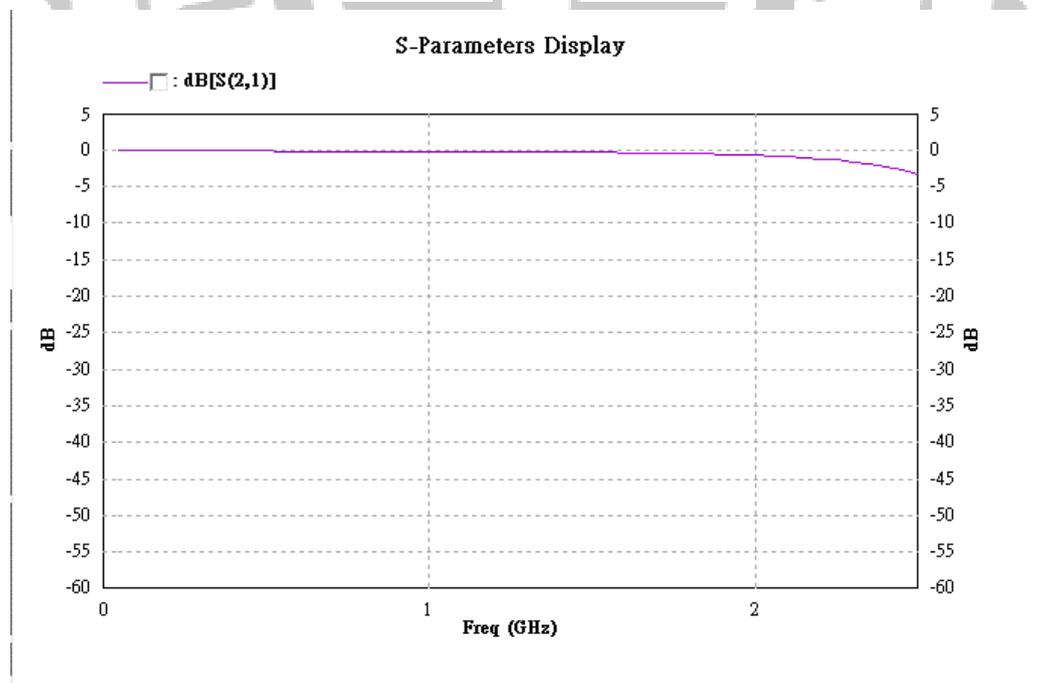


圖 5-29(b)3dB 頻寬內響應圖

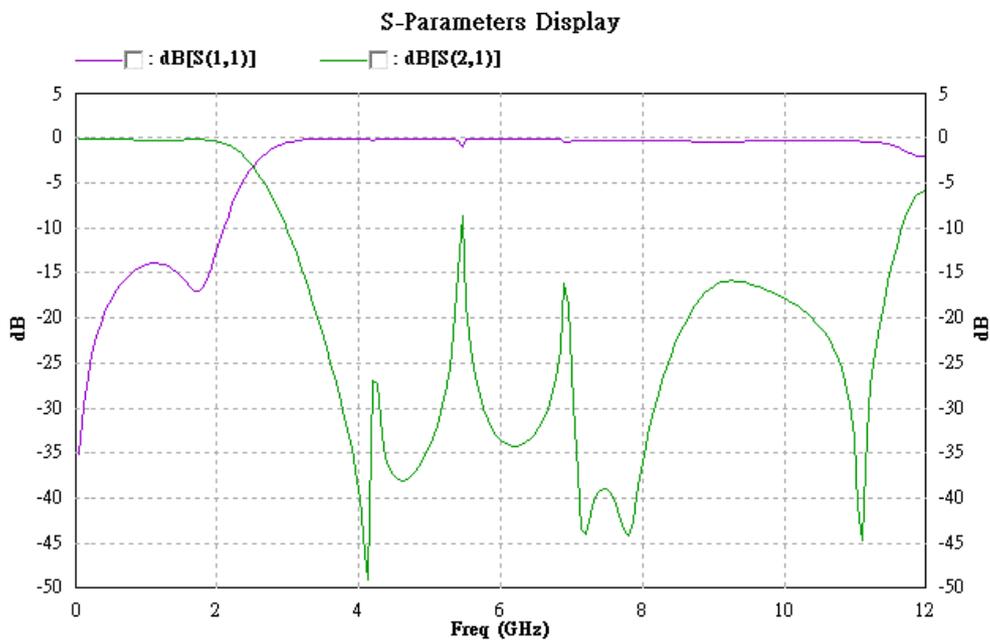


圖 5-30(a) Al_2O_3 模擬量測圖

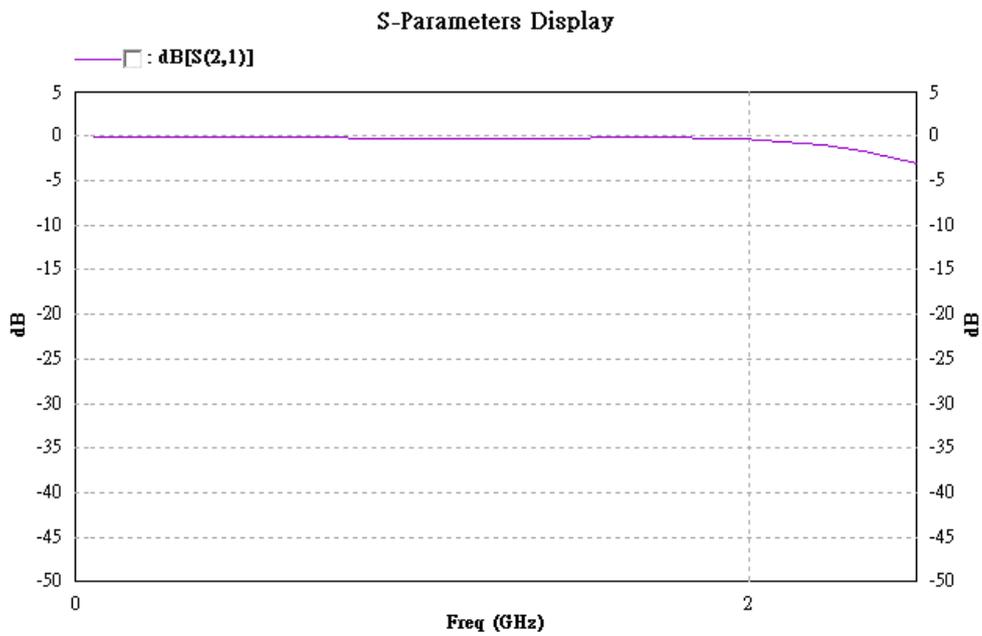


圖 5-30(b) 3dB 頻寬內響應圖

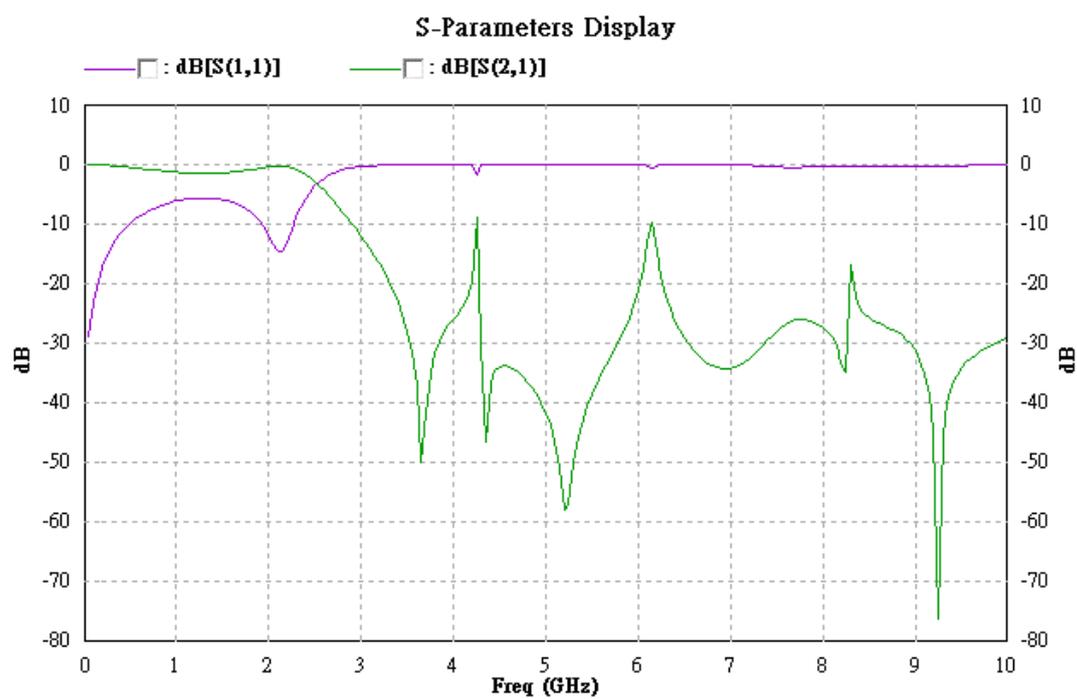


圖 5-31(a) $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}$ 模擬量測圖

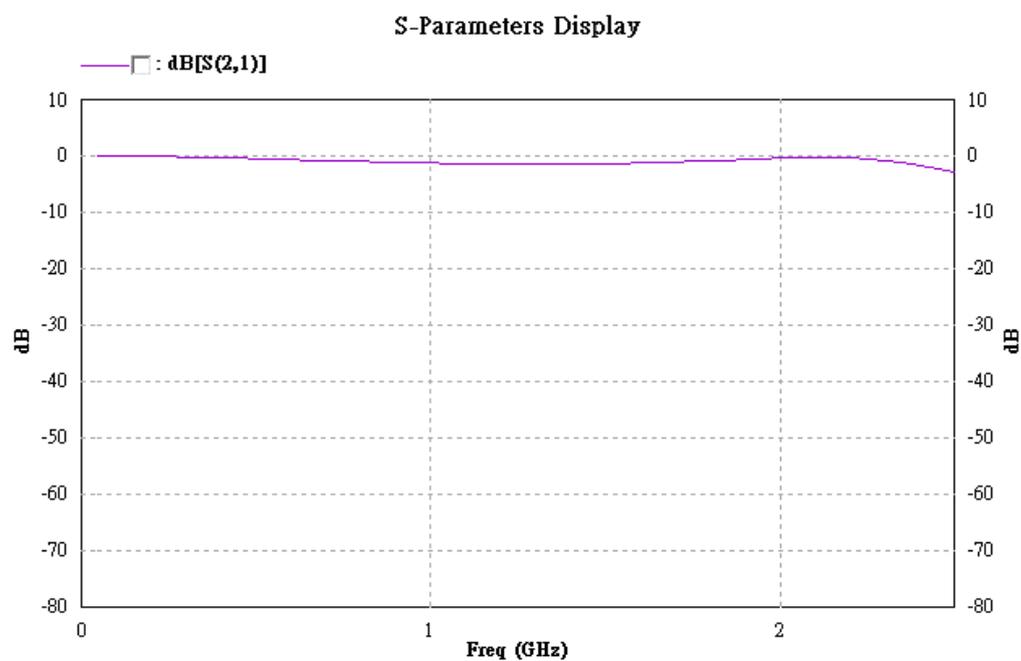


圖 5-31(b) 3dB 頻寬內響應圖

從模擬結果發現，此種低通濾波器有較長的截止頻帶，且觀察到當基板的介電係數漸增，電路的佈局面積能夠逐漸縮減。且在低通帶有產生衰減極點。

與 FR4 和 Al_2O_3 模擬出來的頻率響應圖互相做比較，論文材料 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}$ 在模擬方面沒有較好的特性，雖然在低通帶上也有產生衰減極點，但是 S_{21} 的漣波大小太大，對於元件影響也較高，例如漣波頻率及其高次諧波是在音頻範圍內，會被無線電接收器、錄音設備等電子設備接收到。

在電路佈局的面積方面， $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}$ 模擬的佈局能夠縮減電路佈局面積，與 FR4(2.18cm×1.84cm)和 Al_2O_3 (1.6 cm×1.27cm) 做比較 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}$ (1.46 cm×0.69cm)有大幅縮減電路面積，與 FR4 比約縮減 75%，與 Al_2O_3 比約縮減 50%。

第六章 結論

本論文主要利用三種不同的微波介電材料，以摻雜的方式來調整不同的X變化量來探討其微波介電特性的變化，並找出最好的比例。

從實驗得知 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 在 $x=0.02$ ，燒結溫度為 1500°C 時有最好的介電特性($\epsilon_r \sim 45.5$ 、 $Q \times f \sim 15,000 \text{ GHz}$ 、 $\tau_f \sim -7.1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$)。 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_5\text{O}_{17}$ 在 $x=0.06$ ，燒結溫度為 1475°C 時有最好的介電特性($\epsilon_r \sim 37.5$ 、 $Q \times f \sim 16,000 \text{ GHz}$ 、 $\tau_f \sim -9.6 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$)。 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ 在 $x=0.9$ 燒結溫度 1450°C 時有最好的介電特性($\epsilon_r \sim 42.5$ 、 $Q \times f \sim 23,000 \text{ GHz}$ 、 $\tau_f \sim 58 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$)。

其中 $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}$ 與 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.08}\text{Sn}_{0.02})_5\text{O}_{17}$ 相比，在最好的特性下燒結溫度有稍微降低，且 $Q \times f$ 值較高，並擁有與 $\text{Ca}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.08}\text{Sn}_{0.02})_5\text{O}_{17}$ 相近的介電常數值跟趨近於零的溫飄係數。而 $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{Ti}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_{17}$ ($x=0.1-0.9$)的介電特性則會隨著 La 的比例越多而越往上提升，溫飄係數則從負值隨著 La 比例越多而變為正值。

在髮夾式低通濾波器模擬方面， $\text{Ca}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{La}_5(\text{Ti}_{0.04}\text{Sn}_{0.06})_5\text{O}_{17}$ 在模擬的表現上雖然沒有較好的數值，但與 FR4 和 Al_2O_3 相比能夠有效的縮減電路面積。此材料未來應用在微波元件上可能會有不錯的表現。

參考文獻

- [1] W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, 陳皇鈞(譯), 陶瓷材料概論, 曉園出版社(1988).
- [2] R. D. Richtmyer, “Dielectric resonators,” *J. Appl. Phys.*, 10 391–398 (1939).
- [3] D. M. Pozar, “Microwave engineering,” Third Edition, John Wiley & Sons (2005).
- [4] D. Kajfez, A. W. Glisson, and J. James, “Computed modal field distributions for isolated dielectric resonators,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 32 [12] 1609–1616 (1984).
- [5] D. Kajfez, “Basic principle give understanding of dielectric waveguides and resonators,” *Microwave System News.*, 13 152–161 (1983).
- [6] D. Kajfez and P. Guillon, Dielectric resonators, Artech House (1989).
- [7] J. W. Cahn and R. B. Heady, “Analysis of capillary forces in liquid-phase sintering of jagged particles,” *J. Am. Ceram. Soc.*, 53 [7] 406–409 (1970).
- [8] R. L. Geiger, P. E. Allen, and N. R. Strader, VLSI design techniques for analog and digital circuits, McGraw-Hill (1990).
- [9] J. S. Hong and M. J. Lancaster, Microstrip filters for RF/microwave applications, John Wiley & Sons (2001).
- [10] G. Kompa, Practical microstrip design and applications, Artech House (2005).
- [11] W. E. Courtney, “Analysis and evaluation of a method of measuring the complex permittivity and permeability of microwave Insulators,” *IEEE Trans. Microwave*

Theory Tech., 18 [8] 476–485 (1970).

[12] P. Wheless and D. Kajfez, “The use of higher resonant modes in measuring the dielectric constant of dielectric resonators,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 33 [1] 473–476 (1985).

[13] Y. Kobayashi and M. Katoh, “Microwave measurement of dielectric properties of Low-Loss materials by the dielectric rod resonator method,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 33 [7] 586–592 (1985).

[14] Tony Josepha, P.S. Anjanaa, S. Letourneaub, R. Ubicb, Sander van Smaalenc, M.T. Sebastianaa “Structure and microwave dielectric properties of $\text{Ca}_5\text{A}_4\text{TiO}_{17}$ (A = Nb, Ta) ceramics” *Materials Chemistry and Physics*, (2010) 77–82

[15] Yih-Chien Chen* and Jian-Min Tsai “DIELECTRIC PROPERTIES OF $\text{Ca}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{La}_4\text{Ti}_5\text{O}_{17}$ CERAMICS AT MICROWAVE FREQUENCIES” *International Journal of Modern Physics B* Vol. 23, Nos. 6 & 7 (2009) 1179–1184

[16] Sea-Fue Wang Yung-Fu Hsu Chun-Ya Chen “Microwave dielectric properties of ZrO_2 and SnO_2 doped $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{TiO}_{17}$ ceramics” *Journal of Alloys and Compounds*, Sep 2016.

[17] SEA-FUE WANG, YUNG-FU HSU, and CHUN-YA CHEN “Effects of WO_3 and Ta_2O_5 Dopants on the Structure, Microstructure, and Microwave Dielectric Properties of $\text{Ca}_5\text{Nb}_4\text{TiO}_{17}$ Ceramics” *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, 2016

- [18] Sha Luo, Lei Zhu, Senior Member, IEEE, and Sheng Sun, “Stopband-Expanded Low-Pass Filters Using Microstrip Coupled-Line Hairpin Units” *IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS*, Aug 2008.
- [19] K. C. Gupta, R. Garg, I. Bahl, and E. Bhartia, “Microstrip Lines and Slotlines”, Second Edition, Artech House, Boston, 1996.
- [20] R. A. Pucel, D. J. Masse, and C. P. Hartwig, “Losses in microstrip,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-16 342–350 (1968).
- [21] G. L. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, “Microwave filters, impedance matching networks and coupling structures,” *Artech House* (1980).
- [22] E. J. Denlinger, “Losses of microstrip lines,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 28 [6] 513–522 (1980).
- [23] S. H. Cha, “Measurements of microwave conductivity and dielectric constant by the cavity perturbation method and their errors,” *IEEE. Trans. MTT*, MTT-33 519(1985).
- [24] W. F. Smith, 劉品均(譯), 施佑蓉(譯), 材料科學與工程, 第三版, 高立圖書(2005).
- [25] 張盛富, 戴明鳳, 無線通信之射頻被動電路設計, 全華出版社 (1998).
- [26] K. C. Gupta, R. Garg, I. Bahl, and P. Bhartia, *Microstrip lines and slotlines*, Second Edition, Artech House (1996).
- [27] J. S. Hong and M. J. Lancaster, *Microstrip filters for RF/Microwave applications*, John Wiley & Sons (2001).

[28] W. J. Huppmann and G. Petzow, *Sintering processes*, Plenum Press (1979).

[29] R. M. German, *Liquid phase sintering*, Plenum Press (1985).

[30] J. H. Jean and C. H. Lin, “Coarsening of tungsten particles in W-Ni-Fe alloys,” *J. Mater. Sci.*, 24 [2] 500–504 (1989).

