

## Millimeter-Wave Ultra-Wideband Ring Bandpass Filter on LCP substrate

Ping-Chung Wang<sup>1</sup>, Chu-Yu Chen<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Department of Electrical Engineering  
National University of Tainan, Tainan, 70005, Taiwan

\*Email : cychen57@mail.nutn.edu.tw

### Abstract

**This paper presents the design and implementation of a 28-GHz millimeter-wave RF-integrated-circuit-on-chip bandpass filter using a standard liquid Crystal Polymer (LCP) micromachining process. A planar ring resonator structure with dual-transmission zeros was adopted in the design of this LCP-based filter. The LCP substrate with good Dk and Df electrical properties is found to be a prominent material especially in the millimeter-wave applications. The component size is  $8 \times 8.1 \times 0.1 \text{ mm}^3$ . The investigations of sensitivity to the return loss and passband bandwidth for different mitring corner shape are also studied. The filter has a 3-dB bandwidth of about 13 GHz (18.77~31.94 GHz) at the center frequency of 25 GHz. The measured insertion loss of the passband is about 0.36 dB, and the return loss is better than 10 dB within the passband.**

***Keywords* — Millimeter-Wave Bandpass Filter, liquid crystal polymers (LCPs), Dual-band ring resonator, wideband.**

---

\* Corresponding author: cychen57@mail.nutn.edu.tw  
DOI : 10.53106/222344892022101202003

## 毫米波超寬頻軟性基板上環形帶通濾波器

王秉中 陳居毓

國立臺南大學電機工程系

### 摘要

本論文採用液晶高分子(LCP)軟性基板微加工過程的 28 GHz 毫米波射頻晶片上集成電路帶通濾波器的設計和實現，LCP 軟性基板的濾波器中採用具有低損耗和兩個傳輸零點的平面環形諧振器結構，已發現具有良好 Dk 和 Df 電性能的 LCP 軟板是在毫米波應用上傑出的材料。研究諧振器上不同斜角長度對濾波器反射損耗(Return loss)和通帶帶寬的敏感性。帶通濾波器中心頻率為 25 GHz，反射損耗(Return loss)於-10 dB 以下操作的頻率範圍在 18.77~31.94 GHz，且插入損耗(Insertion loss)能達到-0.36 dB，實驗結果顯示模擬和量測具有高度的一致性。

關鍵詞：毫米波帶通濾波器、雙頻帶環形諧振器、液晶高分子(LCP)軟性板材、超寬頻段。

## 1. 緒論

近年來第五代行動通訊(5G)的寬頻無線網絡受到關注度[1]，無線行動通訊品質要求越趨多元化，例如傳輸速率快、降低通訊延遲等，現今廣為使用無線通訊的頻率範圍包含有 6 GHz 以下頻段的 sub-6GHz 與高於 24 GHz 以上的毫米波頻帶[2]。根據 2019 年世界無線通訊會議(WRC-19)最終定義毫米波頻寬範圍包含有 24.25~27.5 GHz、37~43.5 GHz、45.5~47 GHz、47.2~48.2 GHz、66~71 GHz，毫米波應用上因在大氣中傳輸損耗較低的通訊傳播為優先發展頻段[3]，如圖 1 表示在白色實現圓圈是行動通訊發展的頻段傳輸損耗不受到影響的頻段，而 20~40 GHz 區間是行動通訊在毫米波的高速傳輸上受到關注的頻段。行動通訊裡不只有毫米波頻帶的接收，還有無線網路(Wi-fi)、藍牙訊號和全球衛星系統(GPS)的接收，因此需要不同頻段的濾波器以提高各個訊號間的隔離度[4]，所以在第五代行動通訊(5G)使用濾波器的需求有增無減，而使用的帶通濾波器是在毫米波接收訊號更能鎖定所需的頻段，使得帶通濾波器在射頻元件的影響。

毫米波帶通濾波器使用不同材質產生不同的響應結果。液晶(LC)材料在毫米波頻帶製作帶通濾波器可以有效高頻的插入損耗，而且頻帶可調性很高的板材[5]，還有玻璃基板為 IPD 製程是核心的材料，因為在高頻電動性能方面的優勢在毫米波頻帶是現今製程高頻元件常見的技術其中之一[6,7]。在文獻[8]中，提到有新穎的雙極性 CMOS 製程在毫米波頻帶的濾波器在平坦的通帶響應與相對大的諧波抑制是非常出色。但是在堆疊多層元件架構的 LTCC 是相對穩定的製程材料，用多層板材架構的 LTCC 做帶通濾波器設計可以同時獲得增強阻帶抑制和低插入損耗的技術[9,10]，但 LTCC 材料在製程方面可能受到超高溫的影響到不只濾波器元件，還影響其他元件的特性。

本文毫米波帶通濾波器是使用 LCP(Liquid Crystal Polymer)軟性板材製作，(LCP)軟性板材由於在毫米波應用頻帶上具有穩定的相對介電常數( $\epsilon_r$ )和低損耗( $\tan\delta=0.002\sim 0.004$ )的特性[11]，而且在低吸濕性等非常吸引人的特性，該板材也兼具高耐熱、高柔韌性[12]，還有和較高的熔融強度等優點。

使用 LCP 軟板製程來研製 28 GHz 帶通濾波器在現今文獻中較少類似的研製，相較於過去將毫米波帶通濾波器實現在硬式板材、CMOS 與 LTCC 等製程上，為了讓 LCP 軟板在濾波器這個領域更突出，使用的架構是具有高 Q 值和低插入損耗的雙模態環形諧振器[13]，該架構已經證實在不同板材的操作頻率插入損耗低[14,15]，該濾波器在調整環形諧振器的寬度和開路調節線增加設計濾波器的選擇性。

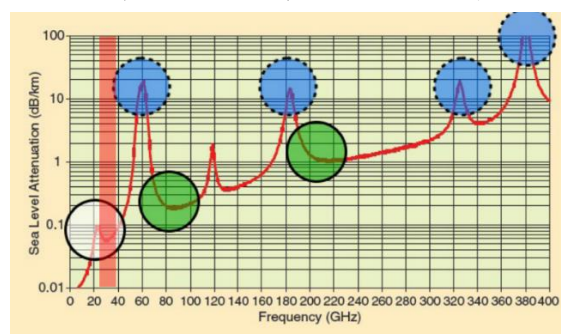


圖 1. 大氣中的氧氣而導致的傳輸損耗相對圖[3]

## 2. LCP 毫米波濾波器設計與分析

### 2.1 LCP 軟板特性

隨著工作頻率的增加，為了製程上面在提高集成密度水平並保持低功率損耗和減少成本，使用 LCP 軟板的新穎材料製作帶通濾波器，因為該板材對銅的附著力極高，而且在製程上用較低的層壓加工溫度是減少其他元件的影響，板材的結構具有柔韌性。軟板的相對介電常數( $\epsilon_r$ )為 3 和厚度  $100\mu\text{m}$  進行模擬，雙模環形諧振器設計在(LCP)軟性基板上。在設計環形諧振器和接地面金屬的厚度都是  $11\mu\text{m}$ ，軟板上層為帶通濾波器的設計和底部放置一層接地面的結構圖，如圖 2 表示。

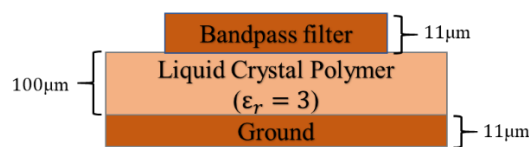


圖 2. 銅箔導線在 LCP 薄膜的結構圖

### 2.2 具有雙模態正方形環諧振器設計

環形諧振器的帶阻特性可以通過使用兩條正交的饋入線實現，饋入線直接連接環形諧振器；分別位於  $180^\circ$  和  $270^\circ$  處，而在  $0^\circ$  和  $90^\circ$  處是兩條的調節支線。在諧振器和饋入線之間沒有使用耦合間隙，調節支線作用是在中心頻率兩端產生兩個傳輸零點並形成一個寬通帶，環形諧振器的周長  $l_r$  表示為(1)

$$l_r = n\lambda_g \quad (1)$$

其中  $n$  是模式編號，而  $\lambda_g$  是波長。在操作頻率為 25 GHz 下其波長 ( $\lambda_g$ ) 約為 7.589 mm，為了考慮所提出環形諧振器的影響，採用線環耦合的等效電路 ABCD 矩陣，環形諧振器的通帶和帶阻可以通過將 ABCD 矩陣轉換為散射矩陣來進一步確認，而兩個調節線  $l_t$  長度為  $\lambda_g/4$  可以提供更高地截止頻率響應，增加回波損耗 (return loss) 衰減並獲得寬通帶；帶通濾波器的環形諧振器長度  $l_f$  為  $0.25\lambda_g$  mm、微帶線  $l_1$  長度約為  $0.29\lambda_g$  mm、調節支線  $l_t$  長度為  $0.25\lambda_g$  mm、 $w$  為  $0.066\lambda_g$  mm、 $w_1$  為  $0.053\lambda_g$  mm 和  $w_2$  為  $0.047\lambda_g$  mm，如圖 3 所示。

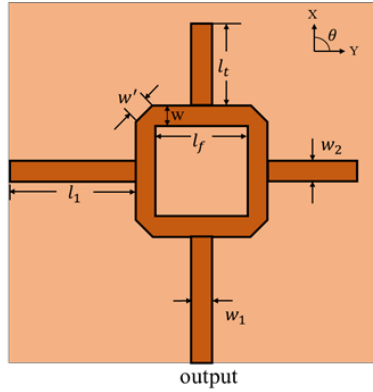


圖 3. 連接正交微帶線和調節分支環形諧振器

切角長度的變化會影響到反射損耗衰減和通帶的頻寬變化數據如表 1，其響應如圖 4 和 5 所示，模擬結果顯示沒有切角的環形諧振器在高頻(31 GHz)其反射損耗較大，導致通帶的寬度會受到影響，沒有切角的架構其反射損耗( $S_{11}$ )為-1.2 dB，而插入損耗( $S_{21}$ )為-21.7 dB;同樣可以看見有切角的架構在不同寬度中反射損耗變化最大，插入損耗數值沒有差太多，模擬結果是環形諧振器的寬度( $w$ )的比值來判斷的，所以在 $w'$ 為 0.71mm 的模擬結果顯示反射損耗模態最明顯且高頻的地方插入損耗較低。

表 1. 斜角長度影響回波損耗和通帶帶寬的模擬參數比較

有無斜角 長度( $w'$ )	沒有斜切		$w'=0.5$ (mm)		$w'=0.71$ (mm)		$w'=0.93$ (mm)		$w'=1$ (mm)	
	$S_{11}$ (dB)	$S_{21}$ (dB)	$S_{11}$ (dB)	$S_{21}$ (dB)	$S_{11}$ (dB)	$S_{21}$ (dB)	$S_{11}$ (dB)	$S_{21}$ (dB)	$S_{11}$ (dB)	$S_{21}$ (dB)
20 GHz	-18.9	-0.4	-25	-0.4	-38.7	-0.4	-22.5	-0.4	-18.9	-0.4
25 GHz	-60.3	-0.3	-26.1	-0.3	-18.9	-0.3	-14.6	-0.4	-12.2	-0.5
31 GHz	-1.2	-21.7	-6.1	-2.2	-22.9	-0.9	-18.4	-0.7	-29.4	-0.7

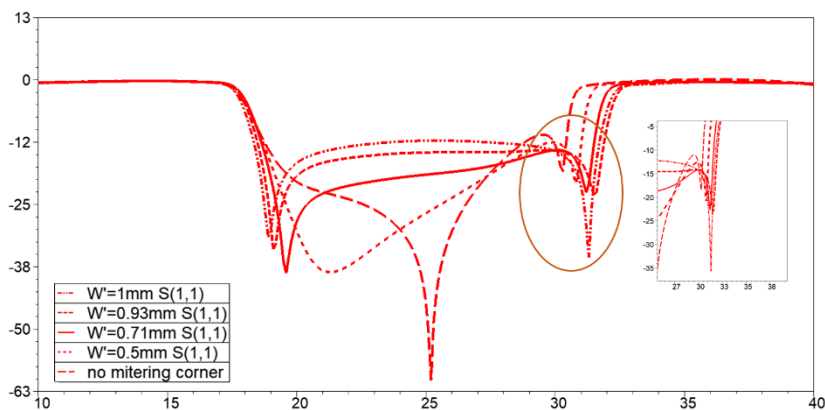


圖 4. 濾波器斜切長度不同導致反射損耗的 S 參數變化

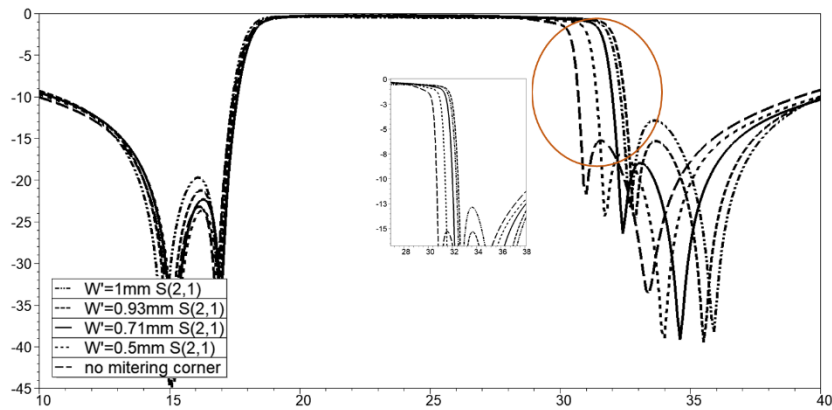


圖 5. 濾波器斜切長度不同導致插入損耗的通帶帶寬變化

### 3. 模擬和實驗結果

EM 模擬和實際測量結果如圖 6 所示。可以看出在 25 GHz 的中心頻率實際測量的通帶插入損耗(Insertion loss)為 -0.81 dB，在截止頻率通帶寬度約為 13.96 GHz，並且通帶內的回波損耗小於 -10 dB；且通帶外側具有兩個傳輸零點  $TZ_1$  和  $TZ_2$  分別為 16 GHz 和 33.6 GHz。

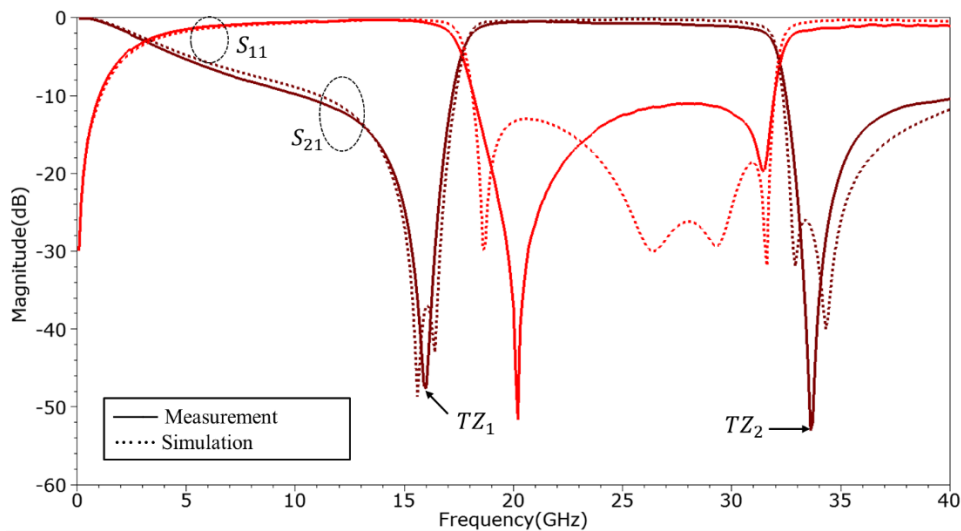


圖 6. 中心頻率為 24.5GHz 的 EM 模擬和實際測量結果

圖 7 表示，模擬結果和實際測量帶通濾波器的群延遲通帶，帶通濾波器之群延遲 ( $\tau$ ) 計算公式如下(2):

$$\tau = -\frac{d\angle S_{21}}{d\omega} \quad (2)$$

公式的 $\angle S_{21}$ 是插入損耗的相位角度與 $\omega$ 是角速度，結果顯示傳輸零點提供更好的截止速率並有良好的傳輸特性，讓通帶內群延遲(Group delay)都低於 100 皮秒(ps)。

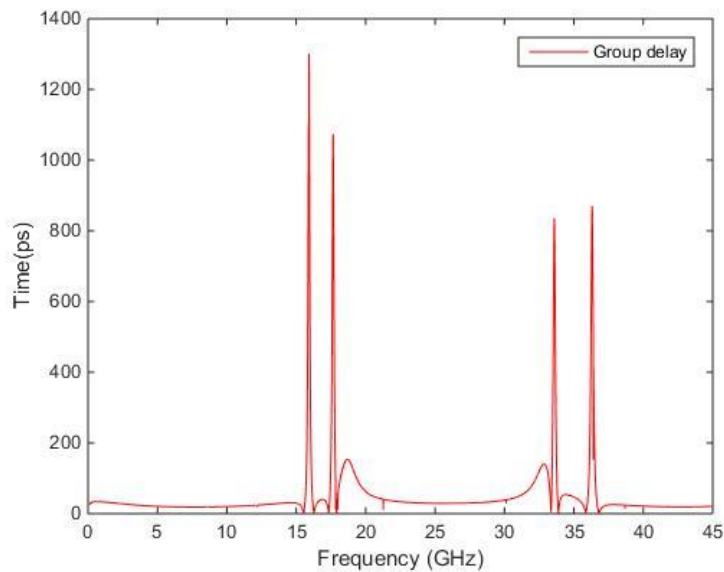


圖 7. 帶通濾波器之群延遲的模擬結果

#### 4. 結論與未來展望

通過設計測量並驗證濾波器用 LCP 軟板製作在毫米波頻帶的可實行性，實際量測帶通濾波器的插入損耗為-0.81dB 是幾乎不會影響到訊號傳輸方面的完整性，讓毫米波頻帶的傳輸訊號變得更快速和降低訊號延遲，而厚度很薄的關係在未來製作行動通訊可以有效利用堆疊方式在製程方面突破空間的限制，之後行動通訊在製程會往可以彎折的方式來縮小空間利用。

#### 5. 參考文獻

- [1] P. Zhouyue, and F. Khan, "An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems," *IEEE Commun. Mag.*, June 2011, vol. 49, no. 6, pp. 101-107.
- [2] F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta and P. Popovski, "Five Disruptive Technology Directions for 5G," *IEEE Com. Mag.*, Feb. 2014, vol. 52, no. 2, pp. 74 - 80.
- [3] M. Samimi, K. Wang, Y. Azar, G.N. Wong, R. Mayzus and H. Zhao, "28 GHz angle of arrival and angle of departure analysis for outdoor cellular communications using steerable beam antennas in New York city," *IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC)*, Dresden, Germany., June 2013, pp. 1-6.
- [4] S. Mahon, "The 5G Effect on RF Filter Technologies" *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing.*, vol. 30, no. 4, pp. 494-499, Nov. 2017.
- [5] M. Yazdanpanahi and D. Mirshekar-Syahkal, "Millimeter-wave Liquid-Crystal-Based Tunable Bandpass Filter," *IEEE Radio and Wireless Symposium.*, 2012.
- [6] S. Wang and K. F. Cho, "CMOS/IPD switchable bandpass circuit for 28/39 GHz fifth-generation applications," *IET Microwave, Antenna & Propagation.*, pp.1461-1466, vol. 10, no. 14, 2016.

- [7] M. Ali, "Miniaturized High-Performance Filters for 5G Small-Cell Applications," *2018 IEEE 68<sup>th</sup> Electronic Components and Technology Conf.(ECTC)*, San Diego, CA, USA, 2018.
- [8] X. Lu, K. Mouthaan and Y. T. Soon, "A Ka-Band Lumped Element Dual-Behavior Resonator (DBR) Filter in Standard 0.13- $\mu\text{m}$  CMOS Technology," *Asia-Pacific Micro. Conf.*, Nov. 2013.(會議)
- [9] G. Shen, W. Che, and Q. Xue, "Compact Microwave and Millimeter-Wave Bandpass Filters Using LTCC-Based Hybrid Lumped and Distributed Resonators," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 104797-104809, July, 2019.
- [10] G. Shen, W. Che, Wenjie Feng, Y. Shi, F. Xu, Q. Xue, "Ultra-Low-Loss Millimeter-wave LTCC bandpass Filter Based on Flexible Design of Lumped and Distributed Circuits," *IEEE Tran. Circuits & Systems II: Express Briefs.*, vol. 68, no. 4, pp. 1123-1127, Oct. 2020.
- [11] D. C. Thompson, O. Tantôt, H. Jalladeas, G. E. Ponchak, M. M. Tentzeris and J. Papapolymerou, "Characterization of Liquid Crystal Polymer (LCP) Material and Transmission Lines on LCP Substrates From 30 to 110 GHz," *IEEE Trans. Microwave Theory &Tech.*, vol. 52, no. 4, April, 2004.
- [12] Dipal S Sindha, Brijesh Shah and Falguni Raval, "Study of Liquid Crystal Polymer Based Flexible Antenna," *International Journal of Advanced Research in Computer Eng. & Tech. (IJARCET)*, vol. 5, no. 3, March, 2016.
- [13] L. Wolff, "Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a microstrip ring resonator," *Electron. Lett.*, vol. 8, no. 12, pp. 302–303, June, 1972.
- [14] Cheng-Ying Hsu, Chu-Yu Chen and Huey-Ru Chuang, "A 60-GHz Millimeter-Wave Bandpass Filter Using 0.18- $\mu\text{m}$  CMOS Technology," *2015 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC)*, Singapore, 2015, pp. 246-248.
- [15] L. H. Hsieh, and K. Chang, "Compact, Low Insertion-Loss, Sharp-Rejection, and Wide-Band Microstrip Bandpass Filters," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.*, vol. 51, no. 4, pp. 1241-1246, April, 2003.