

東海大學應用物理學系  
碩士論文

指導教授：黃家逸 博士

共同指導教授：魏培坤 博士

金屬高度對具有超穎材料之介電濕潤盒的電磁共振影響

Effect of height of metal films on electromagnetic resonance  
of electrowetting-on-dielectric cells with metamaterials

研究生：陳昱劭

中華民國一〇七年六月

# 東海大學應用物理學系

## 碩士論文

論文題目

(中文)

金屬高度對具有超穎材料之介電濕潤盒的電磁  
共振影響

(英文)

Effect of height of metal films on electromagnetic  
resonance of electrowetting-on-dielectric cells with  
metamaterials

指導教授：黃家逸 博士

共同指導教授：魏培坤 博士

研究生：陳昱劭

中華民國一〇七年六月二十八日

東海大學碩士班研究生  
論文指導教授推薦書

應用物理學系 碩士班 陳昱劭 君所提之論文

論文題目：

(中文) 金屬高度對具有超穎材料之介電濕潤盒的電磁  
共振影響

(英文) Effect of height of metal films on the  
electromagnetic resonance of electrowetting-on-  
dielectric cells with metamaterials

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 黃家逸 (簽章)

107 年 6 月 28 日

東海大學碩士班研究生  
論文口試委員審定書

應用物理學系 碩士班 陳昱劭 君所提之論文

(中文) 金屬高度對具有超穎材料之介電濕潤盒的電磁  
共振影響

(英文) Effect of height of metal films on the  
electromagnetic resonance of electrowetting-on-  
dielectric cells with metamaterials

論文口試委員會

召集人

吳政賢 (簽章)

委員

黃家逸

蕭輔力

魏堉坤

陳嘉亨

中華民國 107 年 6 月 28 日

編號：

## 國家圖書館博碩士學位紙本論文【延後公開】申請書

### Application for delayed public release of thesis/dissertation

申請日期：民國 107 年 8 月 15 日

Application Date: 2018 / 8 / 15 (YYYY/MM/DD)

107.04.10版

申請人姓名 Applicant	陳昱斌	學位類別 Graduate Degree	<input checked="" type="checkbox"/> 碩士 Master <input type="checkbox"/> 博士 Doctor	畢業年月 Graduation Date (YYYY/MM)	民國 107 年 7 月 2018 / 7
學校名稱 University	東海大學	系所名稱 Schools or Departments		應用物理學系	
論文名稱 Thesis/Dissertation Title	金屬高度對具有超穎材料之介電濕潤益的電磁共振影響				
延後原因 Reason for delay	<input type="checkbox"/> 已申請專利並檢附證明，專利申請案號： Filing for patent registration. Registration number: _____ <input checked="" type="checkbox"/> 準備以上列論文投稿期刊 Submission for publication			公開日期 Delayed Until	民國 112 年 7 月 01 日 2023 / 7 / 01 (YYYY/MM/DD)

申請人簽名：

Applicant Signature: 陳昱斌

指導教授簽名：

Advisor Signature: 黃家逸

研究所所長簽名：

Dean of Graduate School Signature: 

研究所章戳：

Schools or Department Seal: 

學校圖書館章戳：

University Library Seal: 

## 【說明】

- 以上所有欄位請據實填寫，缺項或簽章不全，恕不受理。
- 論文尚未送交國家圖書館，請於提送論文時，夾附親筆簽名申請書 1 份。
- 論文已送達國家圖書館，請將親筆簽名申請書一式 2 份掛號郵寄 10001 臺北市中山南路 20 號國家圖書館館藏發展及書目管理組，並於信封註明「紙本論文延後公開申請書」。
- 依「教育部 100 年 7 月 1 日臺高(二)字第 1000108377 號函文」，延後公開須訂定合理期限，請依實際需求設定延後公開日期，自申請日期起算至多 5 年，若超過 5 年或未填寫延後公開日期，將逕以函定 5 年辦理。
- 有關電子學位論文之內容更動或延後開放事宜，請向學校權責單位申辦。

## 【Notes】

- Please fill in all blanks. The application form will not be accepted for processing until all information, signatures, and stamps are included.
- If the thesis or dissertation is not yet submitted to the NCL, please attach the signed application form to the thesis or dissertation.
- If the thesis or dissertation has been submitted to the NCL, please send a REGISTERED letter with 2 copies of the signed application form attached. The letter should be addressed to "Collection Development Division", National Central Library with a note in the envelope indicating "Application for delay of public release" to the following address. [No.20, Zhongshan S. Rd., Zhongzheng District, Taipei City 10001, Taiwan \(R.O.C.\)](#)
- Following the instructions from the MOE, the delay should be a reasonable period of no more than 5 years. If the applicant fills in a date that creates a period longer than 5 years, the delayed period for public viewing period will be fixed at 5 years.
- For queries concerning the delayed for public release of an electronic version of thesis, please refer to your guidelines for details.

(以下由國圖填寫 For Internal Use)

承辦單位\_館藏組：\_\_\_\_\_日期/處理狀況：

典藏地：\_\_\_\_\_登錄號：\_\_\_\_\_索書號：\_\_\_\_\_

會辦單位\_知服組：\_\_\_\_\_日期：\_\_\_\_\_  移送並註記，原上架日期：\_\_\_\_\_

## 誌謝

這篇論文能夠順利完成，首先要由衷的感謝我的家人。在我失意時給我鼓勵；在我最忙的期間體諒我缺席許多重要家庭活動，也在經濟方面給予我支持。我能夠完成碩士學業，有你們的支持是最重要的。

接著要感謝東海大學黃家逸黃老師與台灣大學魏培坤魏老師。黃老師在我的大學及碩士學涯中參予了大部分的時間，期間對我的細心指導與栽培不勝枚舉。在實驗上也給予我莫大的資源與自主，能夠在大學及碩士的時光中跟隨黃老師，對我來說，是十分慶幸的事。在此同時要感謝魏老師。在我碩士期間，能夠毫無保留的分享他的實驗室資源與建議。感謝兩位老師對於我撰寫本篇論文的各種悉心指導。也感謝各位前來擔任口試委員的教授們，蕭輔力教授、陳嘉勻教授與吳秋賢教授給與本篇論文的寶貴建議。

最後，謝謝這幾年來實驗室的夥伴。感謝當我還是專題生時便時常教導與支援我實驗的各位學長；還有實驗室內和我一同學士畢業的同學，你們的陪伴讓我能夠在苦悶的實驗生活中充滿著笑聲。也謝謝實驗室中的各位學弟妹，在我專心撰寫論文時能夠抽出時間協助我。感謝曾經與現在加入實驗室的大家，謝謝你們的為我的滴滴點點，讓我能夠完成本篇論文。

## 中文摘要

本工作研究金屬高度對具有超穎材料之介電濕潤盒的電磁共振影響。在玻璃基板上製做出不同高度的光阻圖案，接著將銀薄膜沉積在光阻圖案上，用以製做出具有高深寬比的分裂共振環(high-aspect-ratio split ring resonators, HAR-SRRs)。另外，將具有圖案化的氧化銦錫(indium tin oxide, ITO)塑膠基板(PET)覆蓋上介電材料，用以製做電極板。將甘油油滴放入兩基板中央並封盒成介電濕潤(electrowetting-on-dielectric, EWOD)元件。利用介電濕潤驅動盒中液滴移動，改變 HAR-SRRs 之周圍介質，使得 HAR-SRRs 的共振頻率可被電壓調控。

在 EWOD 元件中，液滴在高深寬比結構的表面具有三種狀態。第一種狀態是液滴完全埋浸於高深寬比結構中(定義為  $K=1$ )，第二種狀態是液滴完全懸浮於高深寬比結構的表面上(定義為  $K=0$ )，第三種狀態是液滴介於第一種狀態與第二種狀態之間( $0 < K < 1$ )。在電磁模擬中加入  $K$  值，可以推測甘油液滴在 HAR-SRRs 表面上的狀態。當甘油埋浸於結構中( $K=1$ )，HAR-SRRs 所感受的折射率差異達到最大；當甘油完全懸浮於結構上( $K=0$ )，HAR-SRRs 所感受的折射率差異達到最小。因此，甘油在 HAR-SRRs 表面上的狀態對共振頻率變化具有明顯的影響。

本研究開發共振頻率可調控的兆赫波濾波器，最大可調控的範圍為 0.33 THz。這樣濾波器優於利用液晶所製做的兆赫波濾波器。因此，本研究所開發的兆赫波濾波器可以應用在兆赫波成像及兆赫波生物檢測上。

關鍵字：超穎材料、電濕潤效應、高深寬比結構、兆赫波、共振頻率可調式濾波器。





# 英文摘要

## Abstract

This work studies the effect of the height of metal films on the electromagnetic resonance of electrowetting-on-dielectric (EWOD) devices with metamaterials. Photoresist is patterned on a glass substrate, and then the patterned photoresist is deposited with a silver film. The high-aspect-ratio split ring resonators (HAR-SRRs) are fabricated from the glass substrate with the patterned silver film. An ITO-coated plastic substrate is patterned as an electrode plate. A patterned dielectric layer is deposited on the electrodes. A glycerin droplet is sandwiched between the glass substrate with the patterned silver film and the plastic substrate with the patterned electrodes. The EWOD device is fabricated after polymer gel seals the glass and plastic substrates.

Three states will exist as a droplet is placed on a HAR structure. The first case is the state in which the droplet is fully embedded into the HAR structure (defined as  $K = 1$ ). The second case is the state in which the droplet is fully suspended on the HAR structure (defined as  $K = 0$ ). The third state is between the two states ( $0 < K < 1$ ).

The  $K$  parameter is introduced into the electromagnetic simulation to inspect the state in which the droplet exists. As the glycerin droplet is fully embedded into (suspended on) the HAR structure [i.e.  $K = 1$  ( $0$ )], the HAR-SRRSSs experience the maximum (minimum) change in the refractive index of the medium that surrounds the HAR-SRRs. Therefore, the state of glycerin droplet is the key parameter for the simulation in which the shift of the resonance frequencies of the HAR-SRRs is performed.

This work fabricates a frequency tunable terahertz filter with the maximum frequency tuning range of 0.33 THz. Such a filter has a larger frequency tuning range than liquid-crystal-based terahertz filters. The frequency tunable terahertz filter can be used in terahertz imaging and terahertz biosensing.

Key word: Metamaterial, electrowetting-on-dielectric, high-aspect-ratio structure, terahertz, tunable terahertz filter.

# 目錄

誌謝.....	i
中文摘要.....	ii
英文摘要 Abstract.....	iv
目錄.....	v
表目錄.....	viii
圖目錄.....	vii
第一章 緒論.....	1
1-1 表面電漿共振原理.....	1
1-2 超穎材料共振模態.....	2
1-3 電濕潤與介電濕潤原理.....	3
1-4 表面張力.....	5
1-5 接觸角與介電泳力.....	6
第二章 文獻探討.....	9
2-1 研究動機.....	9
2-2 金屬薄膜厚度對超穎材料共振頻譜的關係.....	9
第三章 研究方法.....	14
3-1 兆赫波超穎材料的製作.....	14
3-2 HAR-SRRs 電子顯微鏡影像.....	17

3-3 圖案化電極的製作.....	18
3-4EWOD 元件組裝 .....	20
3-5 樣本量測.....	22
第四章 研究結果 .....	23
4-1P-SRR 製成的 EWOD 元件頻譜 .....	23
4-2HAR-SRRs 共振頻譜.....	24
4-3HAR-SRRs 製成的 EWOD 元件頻譜 .....	25
4-4 數據分析與預期 .....	27
第五章 結論與未來工作 .....	31
結論.....	31
未來工作 .....	32
參考文獻.....	33



## 表目錄

表格 4-1. 為圖 4-4 的數據整理並計算出共振頻率變化量( $\Delta f$ ) .....26

表格 4-2. 模擬 EWOD 元件的頻率變化值及所帶入的  $K$  值。 .....30



## 圖目錄

- 圖 1-1. 金屬表面的自由電子受到電磁波作用後，電子會集體震盪並產生表面電漿波，紅色曲線為表面電漿波的電力線[1]。.....2
- 圖 1-2. (a)圖中，正電荷與負電荷主要累積在 SRR 開口兩側，並以  $\delta LC$  為振盪路徑共振，是為  $LC$  共振。圖中  $W = 6 \mu\text{m}$ 、 $L = 60 \mu\text{m}$ 、 $R = 50 \mu\text{m}$ 、 $G = 20 \mu\text{m}$ 。(b)圖中，正電荷與負電荷主要累積在底部兩側，並以  $\delta\text{Dipole}$  路徑共振，是為 Dipole 共振。.....3
- 圖 1-3. (a)為未施加電壓液滴原本的狀態。(b)為施加電壓後，液滴會呈現收縮的狀態以使其自由能趨向最低；圖中紅點代表正電荷，藍點代表負電荷[6], [7]。.....4
- 圖 1-4. (a)加入介電層後，未施加電壓液滴原本的狀態。(b)為加入介電層後施加電壓，液滴呈現收縮的狀態，以使其自由能趨向最低；圖中紅點代表正電荷，藍點代表負電荷[10]。.....4
- 圖 1-5. 定溫下，在一個三邊固定一邊滑動的金屬框架內張開一薄膜；薄膜表面張力以  $\gamma$  表示，並施予  $F$  的力使金屬條緩慢移動  $dx$  的距離。.....6
- 圖 1-6. 為介電濕潤測面示意圖，虛線部份為未輸入電壓時液珠初始形狀；接觸角(contact angle)定義為：液滴和固體表面接觸點切線的角度  $\theta_0$  為初始的接觸角、 $\theta_v$  輸入電壓後的接觸角[10]。....7

圖 2-1. 為具有不同的金厚度的超穎材料樣本在掃描式電子顯微鏡下的影像以及兆赫波下的穿透吸收頻譜。(b)、(d)、(f)頻譜圖中黑線是穿透值，紅線為反射值，實線為測量值，虛線為模擬值 $t$ 表示金屬層厚度。.....	9
圖 2-2. (a) SRR 的示意圖，(b)為 LC 震盪迴路。.....	10
圖 2-3. SRR 切線模型示意圖。.....	11
圖 2-4. 不同路徑修正下 SRR 的共振頻率對金屬厚度的模擬圖。..	11
圖 2-5. (a)圖為雙環開口斜振環在光學顯微鏡下的影像，幾何參數為 $D = 38 \mu\text{m}$ 、 $w = 6 \mu\text{m}$ 、 $g = 2 \mu\text{m}$ 、厚度為 $9 \mu\text{m}$ 。(b)圖為樣本在 SEM 下的影像。.....	12
圖 2-6. 為雙環開口斜振環蓋上光阻後( $\epsilon = 2.7 \pm 0.2$ 在 1 THz 下)在兆赫波下的規一化共振吸收頻譜(a)測量值(b)模擬值，分別為原始(黑線)、一層(紅線)、兩層(藍線)、三層(綠線)。.....	13
圖 2-7. 共振頻率對 SRR 高度的模擬變化圖。.....	13
圖 3-1. HAR-SRRs 示意圖。.....	16
圖 3-2. HAR-SRRs 在電子顯微鏡下的影像。.....	16
圖 3-3. 電子顯微鏡下的 HAR-SRRs 樣本。圖(a)樣本高度為 $8 \mu\text{m}$ 、圖(b)樣本高度為 $13 \mu\text{m}$ 、圖(c)樣本高度為 $18 \mu\text{m}$ 、圖(d)樣本高度為 $19 \mu\text{m}$ 、圖(e)樣本高度為 $21 \mu\text{m}$ 及圖(f)樣本高度為 $24 \mu\text{m}$ 。	

.....	17
圖 3-4. EWOD 元件圖案化電極示意圖 .....	19
圖 3-5. EWOD 元件剖面示意圖。灰色為 PET 基板；綠色為玻璃基板。 .....	21
圖 3-6. 超穎材料的量測架構圖。 .....	22
圖 4-1. 由平面的 SRR (plane split ring resonator, P-SRR) 製作的 EWOD 元件的兆赫波頻譜。 .....	23
圖 4-2. 光阻厚度為 18 $\mu\text{m}$ 的 HAR-SRRs 的兆赫波頻譜 .....	24
圖 4-3. 由不同高度的 HAR-SRRs 所製成的 EWOD 元件在兆赫波頻譜儀下的共振頻率。 .....	25
圖 4-4. 液珠在高深寬比結構下的微觀狀態示意圖。(a) Wenzel state (b) Cassie state。 .....	27
圖 4-5. $K$ 表示液珠在樣本內部的不同狀態。 $K=0$ 時為 Wenzel state； $K=1$ 時為 Cassie state。黑線與紅線為 LC 共振時的電力線。 .....	28
圖 4-6. 共振頻率變化與金屬高度在 $K=0$ 與 $K=1$ 時的模擬對應關係，以及 EWOD 元件之共振頻率變化與金屬高度的實驗對應關係。 .....	28
圖 4-7. (a) 模擬與實驗的頻率變化值對 HAR-SRRs 高度圖。(b) 不同 HAR-SRRs 頻率變化模擬中 $K$ 所帶入的值。 .....	29

# 第一章 緒論

## 1-1 表面電漿共振原理

由人工製作的次波長週期結構，稱為超穎材料(metamaterials)，次波長結構代表圖案尺寸和週期小於入射電磁波波長一個次方(order)。當電磁波通過超穎材料時，超穎材料會吸收電磁波。這個現象可由表面電漿共振(surface plasma resonance, SPR)理論描述[1]。電磁波入射至超穎材料表面時，可以分成橫向電波(transverse electric wave, TE wave)以及橫向磁波(transverse magnetic wave, TM wave)。對於超穎材料來說，TE wave無法滿足SPR的發生條件。但是當入射波為TM wave時，電場在入射面上可以分為垂直分量與水平分量的合向量，而超穎材料金屬內部的自由電子會受到垂直分量電場的影響而聚集在金屬表面，水平分量則使得這些自由電子在金屬表面做集體振盪，這樣的現象稱為表面電漿共振，如圖1-1。根據電磁學理論，在微波(microwave)與兆赫波(terahertz)段內，金屬可視為完美的導體(金屬內部無電磁場)，因此在金屬表面的自由電子無法震盪[2]。因此，利用表面電漿波的理論無法完全解釋超穎材料在微波與兆赫波波段下的行為。2004年Pendry[3]利用類表面電漿偏極子共振[surface-plasmon-polariton (SPP)-like resonance]解釋超穎材料在微波與兆赫波波段下發生的物理現象。他認為薄板金屬孔洞陣列在微波與兆赫波段下，電磁波會使



金屬孔洞附近的自由電子產生震盪。這種行為類似於平板金屬表面自由電子的震盪，因此被稱為SPP-like resonance。

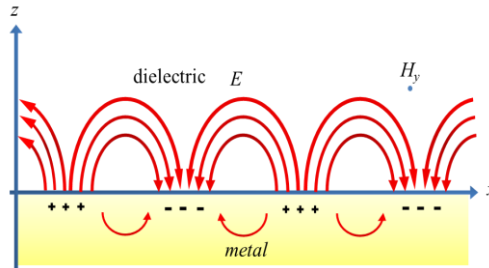


圖 1-1. 金屬表面的自由電子受到電磁波作用後，電子會集體震盪並產生表面電漿波，紅色曲線為表面電漿波的電力線[1]。

## 1-2 超穎材料共振模態

常見的超穎材料主要有魚網狀、分裂共振環狀以及長條狀。本實驗所採用的為分裂共振環(split ring resonator, SRR)。此類型的超穎材料具有兩種主要的共振模態，分別為電感(inductance, L)-電容(capacitance, C)模態以及偶極矩(Dipole)模態，如圖 1-2。當入射電磁波的電場方向平行於 SRR 的缺口方向時，金屬中自由電子會沿著金屬產生集體振盪，進而視為一等效 LC 振盪電路，SRR 的共振頻率即可用 LC 電路的振盪頻率表示，

$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

當 SRR 產生 LC 共振時，Dipole 共振也會發生，如圖 1-2 所示。Dipole 共振的頻率可表示為

$$f_{Dipole} \cong 2 \times f_{LC} = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

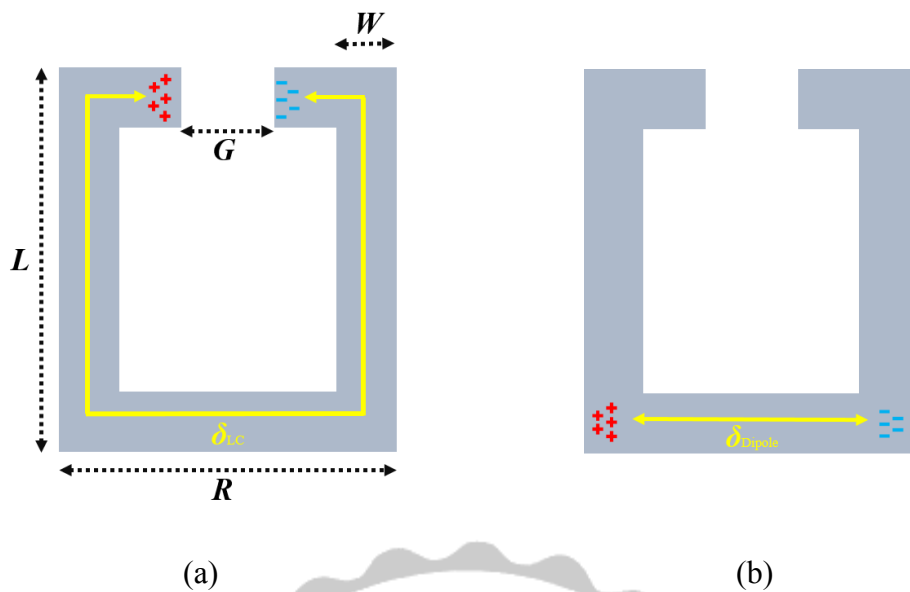


圖 1-2. (a)圖中，正電荷與負電荷主要累積在 SRR 開口兩側，並以  $\delta_{LC}$  為振盪路徑共振，是為 LC 共振。圖中  $W=6\ \mu\text{m}$ 、 $L=60\ \mu\text{m}$ 、 $R=50\ \mu\text{m}$ 、 $G=20\ \mu\text{m}$ 。(b)圖中，正電荷與負電荷主要累積在底部兩側，並以  $\delta_{Dipole}$  路徑共振，是為 Dipole 共振。

### 1-3 電濕潤與介電濕潤原理

電濕潤效應最早是由Lippmann在1875年發現，在玻璃管中的電解質溶液與水銀的界面，外加電場之後，其界面高度會被外加電場所影響，也就是電場會改變界面能的平衡狀態，使得液面高度改變，當時被稱作電毛細管現象(electrocapillary)[4]。而在1981年，Geni和Hackwood利用這原理設計顯示器，並命名為電濕潤效應[5]，如圖1-3。

電濕潤效應乃是藉由電性改變固相及液相之間的介面電荷分佈，使得內部自由電荷重新分配，表面能量發生變化後，物質自主使其自由能趨向最低，改變其平衡狀態的一種物理現象。

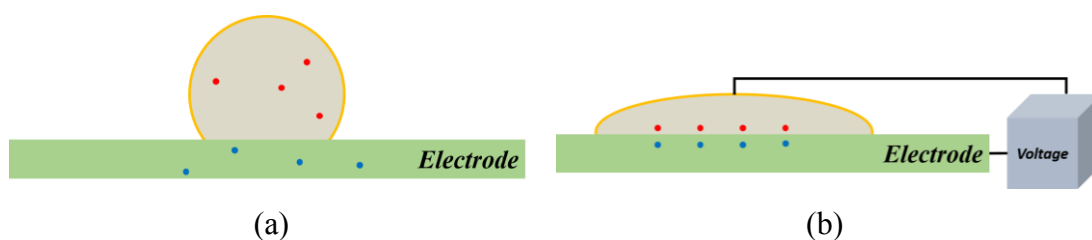


圖 1-3. (a)為未施加電壓液滴原本的狀態。(b)為施加電壓後，液滴會呈現收縮的狀態以使其自由能趨向最低；圖中紅點代表正電荷，藍點代表負電荷[6],[7]。

早期的電濕潤元件，因為液體與電極直接接觸，導致加入電壓後；等效電阻值較低，容易造成迴路導通產生電流，而使得液滴被解離、變質。1993年Bruno Berge 的團隊提出了一個新概念[8]，在電極上加一層介電材料，此作法可以有效的降低液滴被解離的現象，也就是所謂的介電濕潤效應(electrowetting on dielectric, EWOD)。

其原理如下圖1-4所示，外加電壓之後，在理想的介電材料中，電子無法傳輸，故電荷會累積在電極/介電材料、介電材料/液滴的交界面，形成一電場驅動的結構，巨觀來說可以等效為一電容。除了阻止電荷傳輸外，介電濕潤效應也同時降低液滴的材料限制，在過去只能選用極性強的液體，加入介電層之後，便不必考慮介面極化的情形[9]。

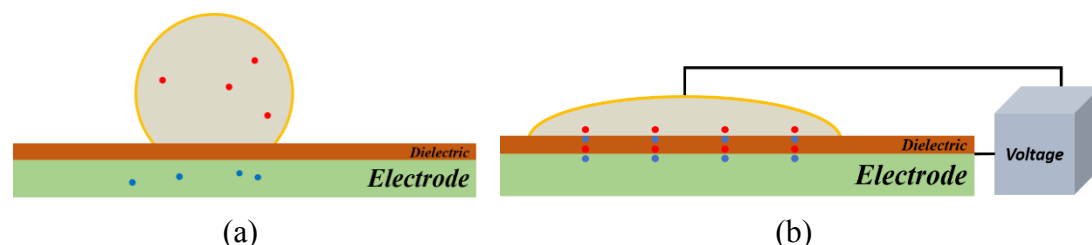


圖 1-4. (a)加入介電層後，未施加電壓液滴原本的狀態。(b)為加入介電層後施加電壓，液滴呈現收縮的狀態，以使其自由能趨向最低；圖中紅點代表正電荷，藍點代表負電荷[10]。

## 1-4 表面張力

探討電濕潤的特性，必須要先對表面張力，表面能有所認識。液體(或固體)的表面層分子，因為其所處環境和分子內部環境有許多的差別，故表層分子的諸多特性會與內部不太相同。通常表面影響的層數約在三到四層左右。研究這三、四層分子特性的科學，就叫做表面科學(surface sciences)。

表面層分子和體積內部分子都屬同一種分子，但是有不同的性質，表層分子有一個很重要的量，就是表面張力(surface tension)。一個在表面的分子，其相鄰的分子數目，要比內部的少，表層分子的能量因此要比內部分子的能量高。所以當系統表面積增加，有一部分的內層分子會變成表層分子；如此便需要能量。因此假設表面積增加，且要保持系統的溫度不變，則週遭必須提供熱能給系統。所以表面張力和增加表面積所吸收的熱量有很密切的關係。

表面張力另一個重要的性質是，他會盡可能的使一個液體系統保持有最小的表面積，所以可以看作抗張力。

要計算表面張力，傳統的方法如圖 1-5，在一長方形邊框中央張開一層薄膜，其表面張力假設為  $\gamma$ 。將三邊固定，一邊接上可滑動的金屬線，其長度為  $L$ 。對金屬線施予向右之外力  $F$ ，且  $F$  略大於薄膜表面張力並使其緩慢移動  $dx$  的距離。在此過程中，薄膜對外做的功為

$$dW = -Fdx = -\gamma 2Ldx = -\gamma dA \quad , \quad (3)$$

其中的兩倍是因為考慮薄膜的兩個面，因此多加上的因數。此之中運用了熱力學的準靜態過程(quasi-static)條件  $F=2L\gamma$ ，故表面張力  $\gamma$  的單位可寫成 [力 / 長度] (newton / meter)。

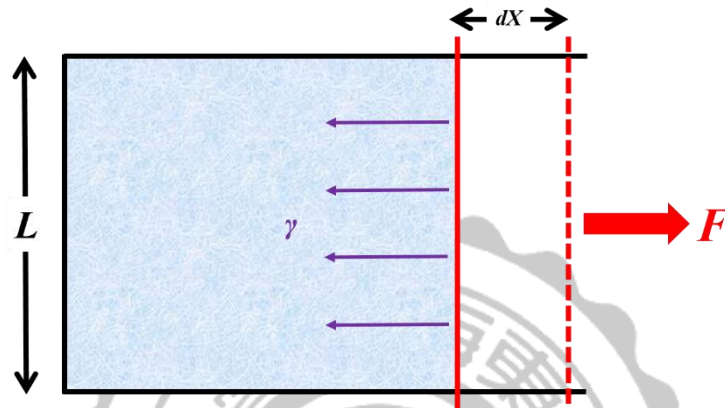


圖 1-5. 定溫下，在一個三邊固定一邊滑動的金屬框架內張開一薄膜；薄膜表面張力以  $\gamma$  表示，並施予  $F$  的力使金屬條緩慢移動  $dx$  的距離。

## 1-5 接觸角與介電泳力

對液滴來說，其接觸角(contact angle)可定義為：液滴和固體表面接觸點切線的角度，如圖 1-6。要了解接觸角與外加電壓之間的關係，我們以 Young's equation 來計算液滴在基板上的三相接觸角  $\cos\theta_0$ ，並以表面張力形式表示之

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SG} - \gamma_{LG} \cos\theta_0 \quad , \quad (4)$$

而外加電壓後， $\gamma_{SL}$  也會因表面電荷分佈不均勻而隨之改變  $\gamma_{SL}^{eff}$  為，並由下列方程式描述

$$\gamma_{SL} \rightarrow \gamma_{SL}^{eff} = \gamma_{SL} - \frac{E_s}{A} \quad , \quad (5)$$

其中  $E_s$  為加電壓後的表面能，可將其近似為等效電容所儲存的能量

$$E_s = -\frac{1}{2}CV^2 = -\frac{1}{2}\frac{\epsilon\epsilon_0 A}{d}V^2, \quad (6)$$

同時定義  $\theta_v$  為加上外加電壓後的接觸角，便可以計算出

$$\cos \theta_v - \cos \theta_0 = \frac{\epsilon\epsilon_0}{2\gamma_{LG}d}V^2. \quad (7)$$

上述方程式各項參數代表：

$\gamma_{SL}$ ：固體與液體的介面張力。

$\gamma_{LG}$ ：液體與氣體的介面張力。

$\gamma_{SG}$ ：固體與氣體的介面張力。

$\gamma_{SL}^{eff}$ ：施加電壓後固/液介面之表面張力。

$V$ ：施加電壓大小。

$C$ ：介電層單位面積之電容值( $F/m^2$ )。

$\epsilon_0$ ：真空中的介電常數(vacuum permittivity)。(  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ } c^2/N \cdot m^2$  )

$\epsilon$ ：介電層之介電係數(dielectric constant)。

$d$ ：介電層之厚度。

$A$ ：液滴與固體表面接觸之面積。

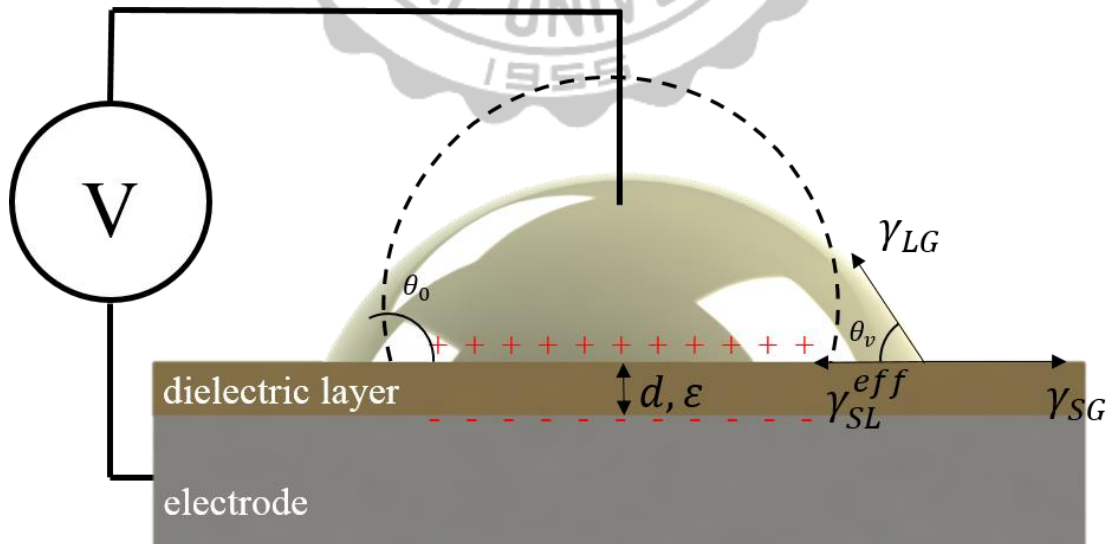


圖 1-6. 為介電濕潤測面示意圖，虛線部份為未輸入電壓時液珠初始形狀；接觸角 (contact angle) 定義為：液滴和固體表面接觸點切線的角度  $\theta_0$  為初始的接觸角、 $\theta_v$  輸入電壓後的接觸角[10]。

由 Eq.(7) 可得知，固液交界面的接觸角變化量和介電層之介電常數、介電層的厚度以及所施加的電壓和周圍的環境有關，故從介電濕潤效應發現以來，許多文獻也針對介電層效應作了許多研究 [11]。因此，由文獻綜合分析得知，欲提高元件表面之接觸角變化量，可選用高介電常數之介電材料，或將介電層厚度降低或是提升外加電壓。





## 第二章 文獻探討

### 2-1 研究動機

本研究中，主要探討在可調控的介電濕潤兆赫波濾波器中，金屬薄膜的高度對頻率調控範圍的影響。在 2-2 節中，過去文獻指出金屬薄膜厚度與超穎材料共振頻譜之間的關係。因此，這個論文探討金屬薄膜高度對於兆赫波濾波器的共振偏移量影響。

### 2-2 金屬薄膜厚度對超穎材料共振頻譜的關係

*Phys. Stat. Sol. (b) 244, No. 4, 1256–1261 (2007)*[12]

在 2007 年，H. Guo 等人做了一系列的模擬與實驗去驗證金屬層厚度和超穎材料共振頻譜的關係。此實驗採用金的 SRR 圖形，如圖 2-1。當金屬層越厚，共振頻率會藍移並且電磁共振吸收會增強。

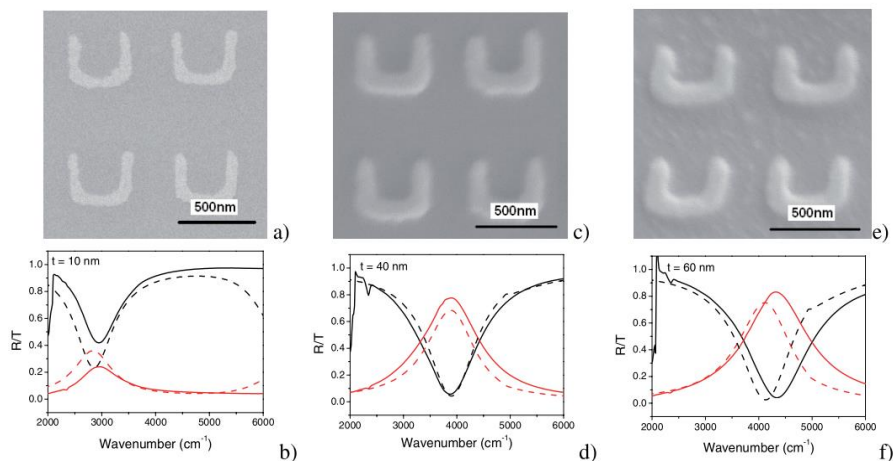


圖 2-1. 為具有不同的金厚度的超穎材料樣本在掃描式電子顯微鏡下的影像以及兆赫波下的穿透吸收頻譜。(b)、(d)、(f)頻譜圖中黑線是穿透值，紅線為反射值，實線為測量值，虛線為模擬值  $t$  表示金屬層厚度。



H. Guo 提到，當 SRR 的共振模態為  $LC$  共振時，如圖 2-2。假設  $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_{eff}$  以及  $\mu_0$  分別為真空的介電常數、等效的介電常數與真空磁導係數， $LC$  共振的頻率可以寫為

$$\omega_{LC} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{l_x l_y}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \sqrt{\frac{d}{w}}, \quad (8)$$

其中  $C = \epsilon_0 \epsilon_{eff} (wt/d)$  以及  $L = \mu_0 (l_x l_y / t)$ 。可以注意到在這個模型下，厚度的影響是被忽略的。

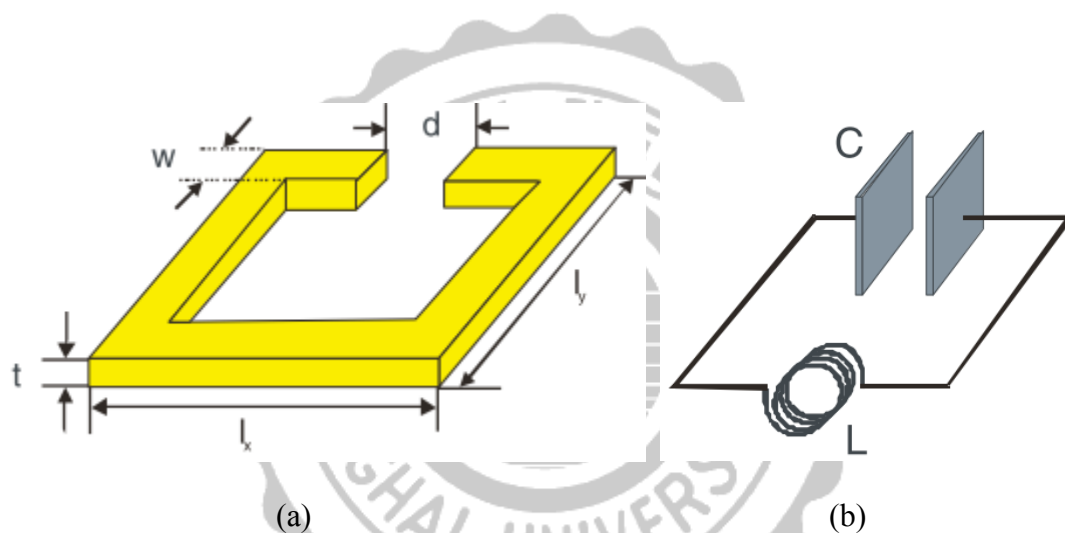


圖 2-2. (a) SRR 的示意圖，(b)為  $LC$  震盪迴路。

為了將厚度的因素考慮在 Eq. (8) 中，所以 H. Guo 提出了所謂的切線(cut-wire)模型。由於超穎材料為分裂共振環陣列，並且每個環中的電子會互相影響，所以電子在環中的移動路徑並不一定在總長度上。因此，必須在總長度上加入修正量(correction length,  $\delta$ )，使得厚度的因素被涵蓋在 Eq. (8) 中，如圖 2-3。

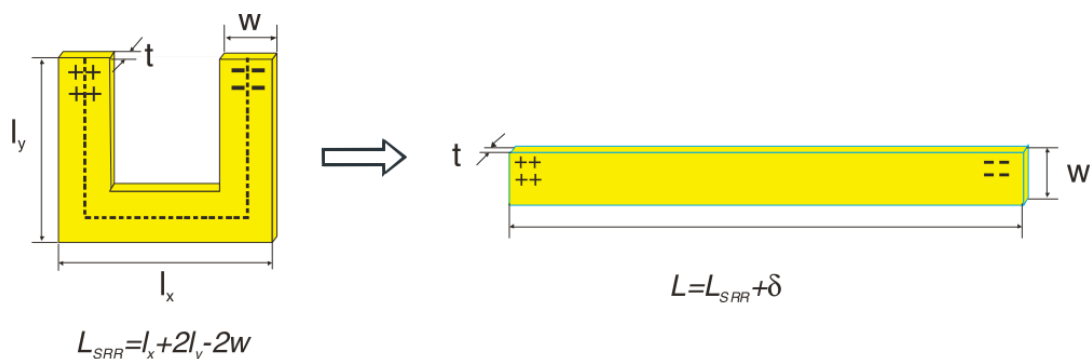


圖 2-3. SRR 切線模型示意圖。

H. Guo 做了一系列包含  $\delta$  的模擬，如圖 2-4。當  $\delta$  為零時，模擬出來的共振峰值(紅線)與實驗數據(黑線)不吻合。藍線為  $\delta = 210$  nm 時的模擬結果，而模擬值在不同厚度的金都沒有與實驗值對上。因此可以確定  $\delta$  應該是介於 0~210 nm 的數值。當  $\delta = 90$  nm 時，實驗值在金薄膜厚度為 10、20 以及 30 nm 時等於模擬值。然而，當厚度達到 40 nm 以上時，模擬值略大於實驗值。因此，可以確定修正量  $\delta$  是合理的。

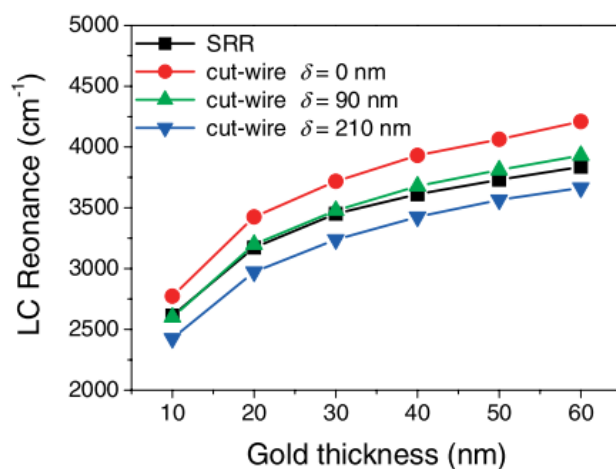


圖 2-4. 不同路徑修正下 SRR 的共振頻率對金屬厚度的模擬圖。

*Applied Physics Letters* 94, 064102 (2009)[13]

2009 年 Sher-Yi Chiam 等人在 *Applied Physics Letter* 上發表了一篇有關於金屬層厚度對兆赫波超穎材料的影響。利用質子束直寫機在矽基板上蝕刻 PMMA 光阻。接著，將具有圖案化光阻的樣本電鍍金。最後用丙酮將 PMMA 去除，即可做出金屬層厚度為  $9\ \mu\text{m}$  的 SRR，如圖 2-5。

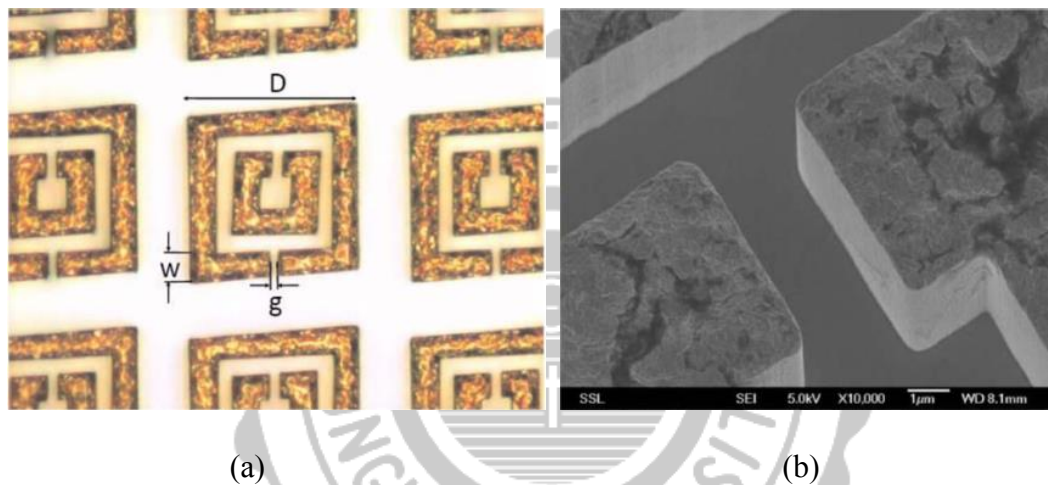


圖 2-5. (a)圖為雙環開口斜振環在光學顯微鏡下的影像，幾何參數為  $D = 38\ \mu\text{m}$ 、 $w = 6\ \mu\text{m}$ 、 $g = 2\ \mu\text{m}$ 、厚度為  $9\ \mu\text{m}$ 。(b)圖為樣本在 SEM 下的影像。

圖 2-6 為具有高厚度之金屬的 SRR 蓋上介質後，在兆赫波頻譜下的表現。當樣本未覆蓋介電層時，SRR 的共振峰值約在  $0.64\ \text{THz}$ 。覆蓋了一層介電質後，共振頻率紅移到約為  $0.54\ \text{THz}$  的位置。接著覆蓋上第二層以及第三層後頻率雖有變化，但變化量卻不如黑線和紅線明顯，約為  $0.53\ \text{THz}$  及  $0.51\ \text{THz}$ 。

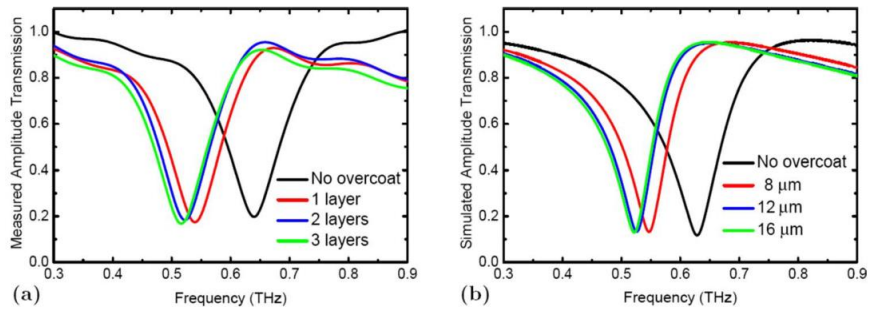


圖 2-6. 為雙環開口斜振環蓋上光阻後( $\epsilon = 2.7 \pm 0.2$  在 1 THz 下)在兆赫波下的規一化共振吸收頻譜(a)測量值(b)模擬值，分別為原始(黑線)、一層(紅線)、兩層(藍線)、三層(綠線)。

Sher-Yi Chiam 利用電磁模擬軟體 (Computer Simulation Technologies)去驗證。當金屬厚度增加時，SRR 共振頻率也會跟著藍移，且頻率變化會越來越小，如圖 2-7 的藍線。這個結果也可以從具有 20  $\mu\text{m}$  厚之介電質的 SRR 所觀察到，如圖 2-7 的黑線。然而，黑線的斜率小於藍線的斜率。這樣的事實起因於 SRR 基板與環境介質之間的介電係數差異所導致。當環境介質與基板的介電係數差異增加時，曲線的斜率也會隨之增加。研究結果顯示，當超穎材料的金屬層越厚，共振頻率也會增加，然而頻率變化會逐漸趨緩(如藍線斜率變小)。

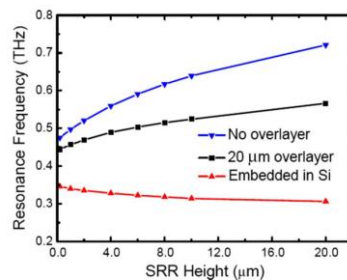


圖 2-7. 共振頻率對 SRR 高度的模擬變化圖。

## 第三章 研究方法

EWOD 元件由上下兩塊基板所組成。上基板成長了具有特定吸收的兆赫波超穎材料，下基板放置了能夠控制甘油液滴移動的圖案化電極。3-1 節將會介紹兆赫波超穎材料的製作方法，3-2 節介紹圖案化電極的製作過程，3-3 節描述了將上下兩個基板組成 EWOD 元件的製作步驟。

### 3-1 兆赫波超穎材料的製作

#### 玻璃基板裁切與清潔

利用玻璃切割器將玻璃基板切割為  $2\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$ ，再放置於 Sample Holder 的圓盤上。為了要去除玻璃表面油污及灰塵，將 Sample Holder 圓盤浸泡於清潔液中，液面需高玻璃，並用超音波震盪機震盪約 20 分鐘，取出圓盤後利用 R.O. 逆滲透純水清洗，再利用氮氣槍將其水漬去除，重複此步驟分別把清潔液依序換成丙酮、酒精、及 R.O. 逆滲透純水。

#### 光阻塗佈與曝光

利用滴管將 SU8 3010 負型光阻滴在乾淨玻璃基板上，接著進行旋轉塗佈。第一轉 (600 rpm, 30 sec) 控制光阻均勻分布、第二轉 (1000 rpm, 60 sec) 控制光阻層厚度。旋轉塗佈之後，為了讓光阻受熱均勻

以及避免氣泡的產生，將玻璃基板放在加熱平台上進行二階段軟烤。第一階段使用 65 °C 溫度對基板加熱 1 min，第二階段使用 95 °C 溫度對基板加熱 15 min。二階段軟烤之後，利用紫外光(光強度 32 mW/cm<sup>2</sup>)對樣本進行曝光 15 sec。

### 光阻曝後烤與顯影

樣本曝光後，接著進行階段式的曝後烤。為了消除光阻內的駐波效應，第一階段使用 65 °C 溫度對基板加熱 1 min，第二階段使用 95 °C 溫度對基板加熱 3 min。接著對樣本進行顯影。利用 IPA 將樣本進行定影後，就可以得到圖案化的光阻。

### 蒸鍍金屬薄膜

利用蒸鍍機將圖案化的光阻鍍上厚度約 100 nm 的銀薄膜，及可在上基板表面上製造出具有特定吸收的兆赫波超穎材料。諧振環的總長為 176 μm、線寬 6 μm、開口間距 20 μm。並且將此種墊高的金屬分裂共振環稱為高深寬比分裂共振環 (high-aspect-ratio split ring resonators, HAR-SRRs)，如圖 3.1 及圖 3.2。

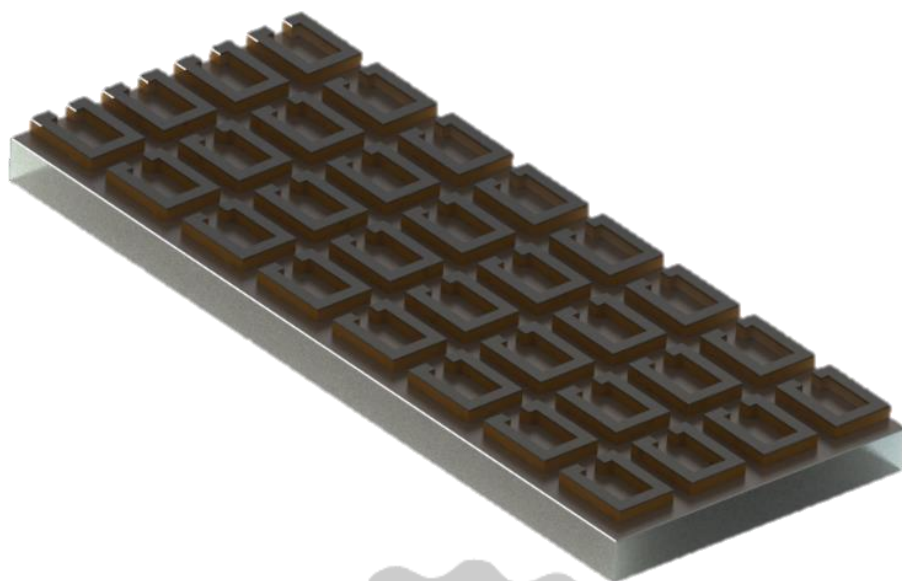


圖 3-1. HAR-SRRs 示意圖。

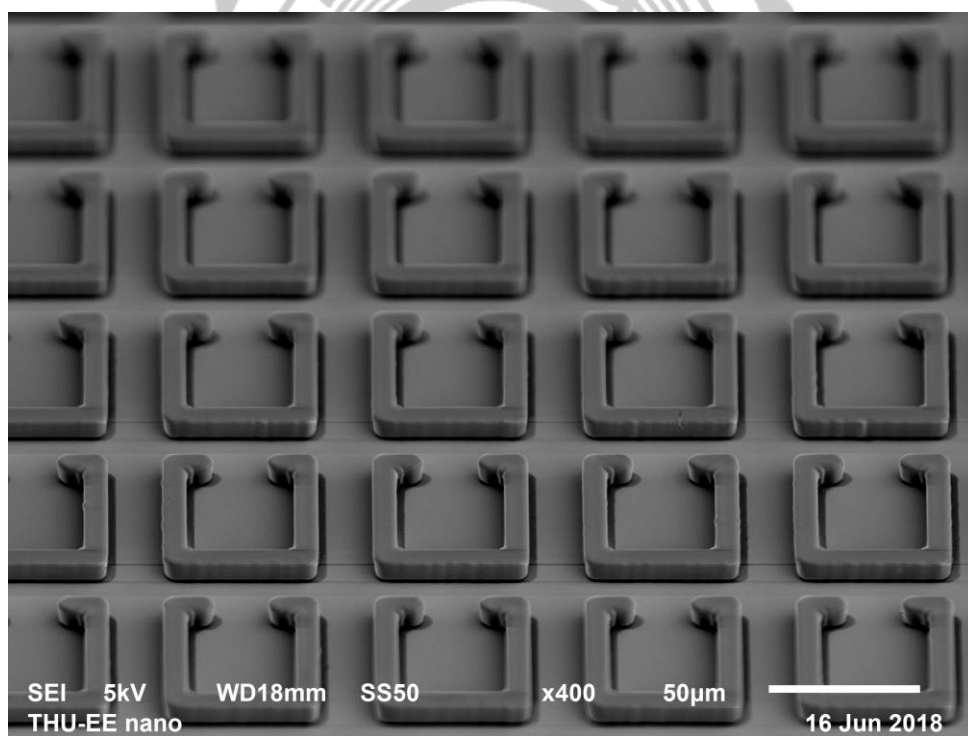


圖 3-2. HAR-SRRs 在電子顯微鏡下的影像。



### 3-2 HAR-SRRs 電子顯微鏡影像

如圖 3-3，利用電子顯微鏡得知 HAR-SRRs 的厚度並記錄與模擬。

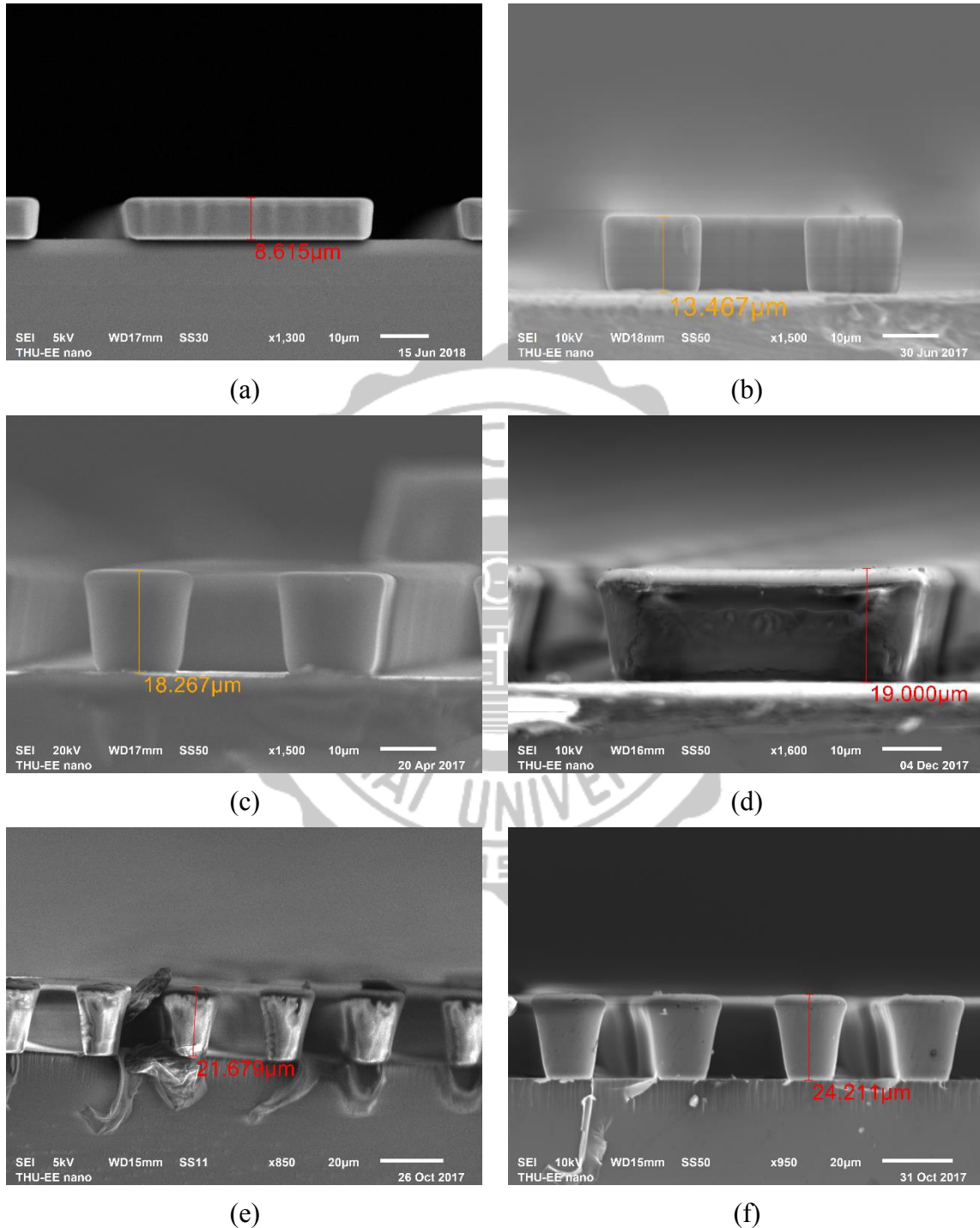


圖 3-3. 電子顯微鏡下的 HAR-SRRs 樣本。圖(a)樣本高度為 8 μm、圖(b)樣本高度為 13 μm、圖(c)樣本高度為 18 μm、圖(d)樣本高度為 19 μm、圖(e)樣本高度為 21 μm 及圖(f)樣本高度為 24 μm。



### 3-3 圖案化電極的製作

#### 塑膠基板裁切與清潔

利用裁切刀將具有 ITO 的 PET 基板切割為  $2.6\text{ cm} \times 2.6\text{ cm}$ 。因為 PET 基板兩面皆有保護用的塑膠膜，因此不需要清洗 PET 基板，可以直接使用。

#### 光阻塗佈及曝光

為避免 PET 基板的彎曲造成旋塗時光阻厚度不均，將 PET 基板固定在玻璃底板上，正面朝上為 ITO 面。接著，將樣品利用真空固定在旋轉塗佈機上，使用滴管取適量的 ENPI 202 負型光阻覆蓋在基板上，然後分別以第一轉(600 rpm，10 sec)、第二轉(2000 rpm，20 sec)，達到旋轉塗佈均勻的效果，放上  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  加熱平台上軟烤 1 min。軟烤之後，利用紫外光(光強度  $32\text{ mW/cm}^2$ )對樣本進行曝光 30 sec。

#### 光阻曝後烤與顯影

將曝光完成的 PET 基板由玻璃底板上卸除，放上  $100^{\circ}\text{C}$  的加熱平台上進行 1 min 的曝後烤。之後再用 EPD-48 的稀釋液顯影，秒數約 30 sec。最後用 DI water 定影，圖案化出 ENPI 202 的圖形。

## ITO 導電層去除

利用鹽酸+氯化鐵的酸性溶液蝕刻未被光阻保護的 ITO，接著在用丙酮去除 ENPI 202 負型光阻，將 ITO 定義成需要的圖形。

## 介電層對位與二次黃光

使用 SU8 2000.2 負型光阻作為 EWOD 元件的介電層材料，利用黃光製程將厚度約為  $3\ \mu\text{m}$  的光阻圖案化，並且與 ITO 電極重合。如此可增加側向電場強度，且不影響等效電容值。作法同上述黃光流程，在此不贅述。塗佈光阻的參數為第一轉 600 rpm，時間長達 10 sec，而第一轉 3000 rpm，則持續 20 sec。光阻的軟烤溫度為  $100\ ^\circ\text{C}$ ，而軟烤時間為 1 min。照射光阻的光強度為  $32\ \text{mW}/\text{cm}^2$ ，曝光秒數為 10 sec。曝後烤溫度為  $100\ ^\circ\text{C}$ ，曝後烤時間為 1 min，如示意圖 3-4。



圖 3-4. EWOD 元件圖案化電極示意圖

### 3-4 EWOD 元件組裝

#### 塗佈鐵氟龍

為使基板表面有疏油性質，利用真空幫浦將基板固定在旋轉塗佈機上，取適量的鐵氟龍(AF400S2-100-1)溶液覆蓋於樣本上。以第一轉(500 rpm，10 sec)以及第二轉(1000 rpm，30 sec)的參數均勻塗佈鐵氟龍。接著，利用溫度為 100 °C 加熱平台烘烤鐵氟龍 10 min，使得溶劑揮發。

#### 封盒

利用裁切刀切割厚度為 130  $\mu\text{m}$  的條狀塑膠片，使得每一塊塑膠片具有相同的面積 0.5 cm  $\times$  4 cm。接著將條狀塑膠片放在下基板的左右兩側。以針筒吸取甘油並滴上基板中央，體積約為 0.5  $\mu\text{ml}$ 。以鑷子小心夾起具有超穎材料的上基板，接著覆蓋在甘油上，並以砝碼輕壓確保厚度均勻且固定。接著，以牙籤混合 AB 膠沾上四邊，密合上下兩板。如此可以完成 EWOD 元件，如示意圖 3-5。

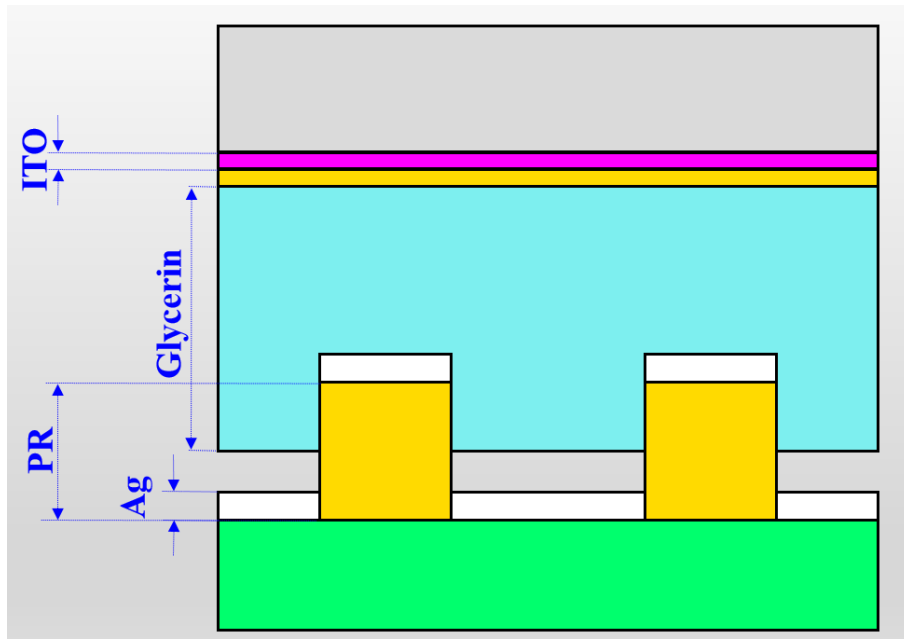


圖 3-5. EWOD 元件剖面示意圖。灰色為 PET 基板；綠色為玻璃基板。



### 3-5 樣本量測

#### 驅動方法

利用信號產生器輸出直流(Direct Current, DC)1 kHz 12V 的正弦波並通過穩壓放大器放大 10 倍電壓，最終輸出 1 kHz 120V 的 DC 電壓。將正負電壓施加在電濕潤兆赫波濾波原件的相鄰電極，在液滴下方形成電場並驅動液滴移動，原理見章節 1-5。移動後的液滴會阻擋光路進而使 SRR 的共振吸收峰值往低頻移動。

#### 量測裝置

圖 3-6 為超穎材料的量測架構圖。使用高功率綠光雷射(high power green laser)激發飛秒鈦藍寶石雷射(femtosecond ti:sapphire laser)，產生短脈衝。利用短脈衝光激發兆赫波天線(terahertz antenna)產生兆赫波光源。將兆赫波光源入射於樣本，利用兆赫波頻譜儀(terahertz spectrometer)分析超穎材料的共振頻率。

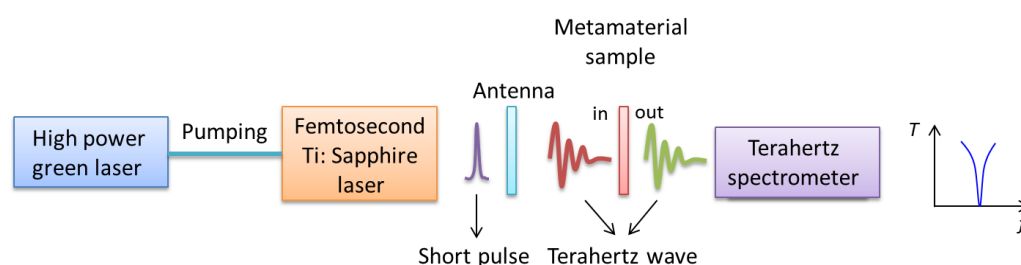


圖 3-6. 超穎材料的量測架構圖。

## 第四章 研究結果

### 4-1 P-SRR 製成的 EWOD 元件頻譜

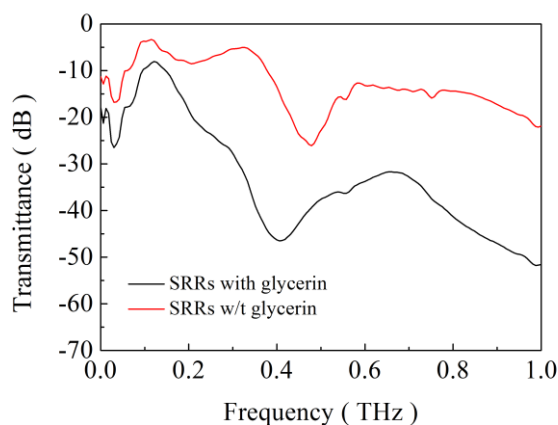


圖 4-1. 由平面的 SRR (plane split ring resonator, P-SRR)製作的 EWOD 元件的兆赫波頻譜。

將平面的 SRR (plane split ring resonator, P-SRR)製做成 EWOD 元件，並且量測此元件的兆赫波頻譜，如圖 4-1。利用訊號產生器與放大器對 EWOD 元件的相鄰電極施加頻率為 1 kHz 的 120 V 正弦波，使得油滴的兩側因不同的介面能而產生移動。黑線為封盒後 SRR 在空氣下的頻譜，共振峰值為 0.47 THz。紅線為封盒後 SRR 在甘油下的頻譜，共振峰值為 0.40 THz。共振峰值變化量( $\Delta f$ )約為 0.07 THz。

## 4-2 HAR-SRRs 共振頻譜

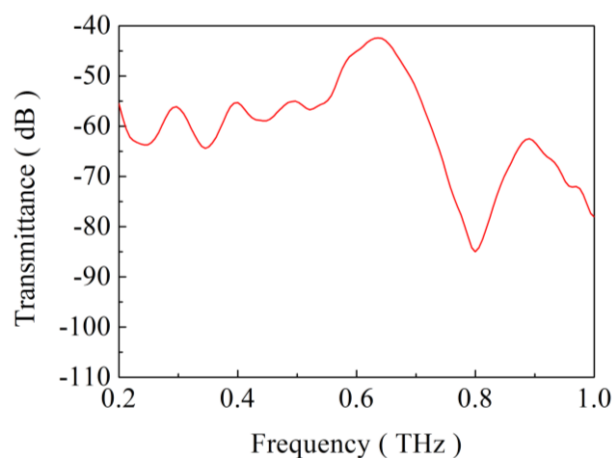


圖 4-2. 光阻厚度為  $18\ \mu\text{m}$  的 HAR-SRRs 的兆赫波頻譜

圖 4-2 是光阻厚度為  $18\ \mu\text{m}$  的 HAR-SRRs 在兆赫波下的穿透頻譜。共振峰值約為  $0.79\ \text{THz}$ ，且頻譜左側肩膀的平均穿透率為  $-60\ \text{dB}$ 。 $0.2\ \text{THz}$  到  $0.6\ \text{THz}$  的穿透率起伏是因為 HAR-SRRs 為多層結構，導致兆赫波產生 Fabry-Pérot 干涉，如圖 3-5。因為高深寬比圖案的二次黃光製程困難，所以無法去除底層的金屬，造成 HAR-SRRs 的穿透強度不高。

### 4-3 HAR-SRRs 製成的 EWOD 元件頻譜

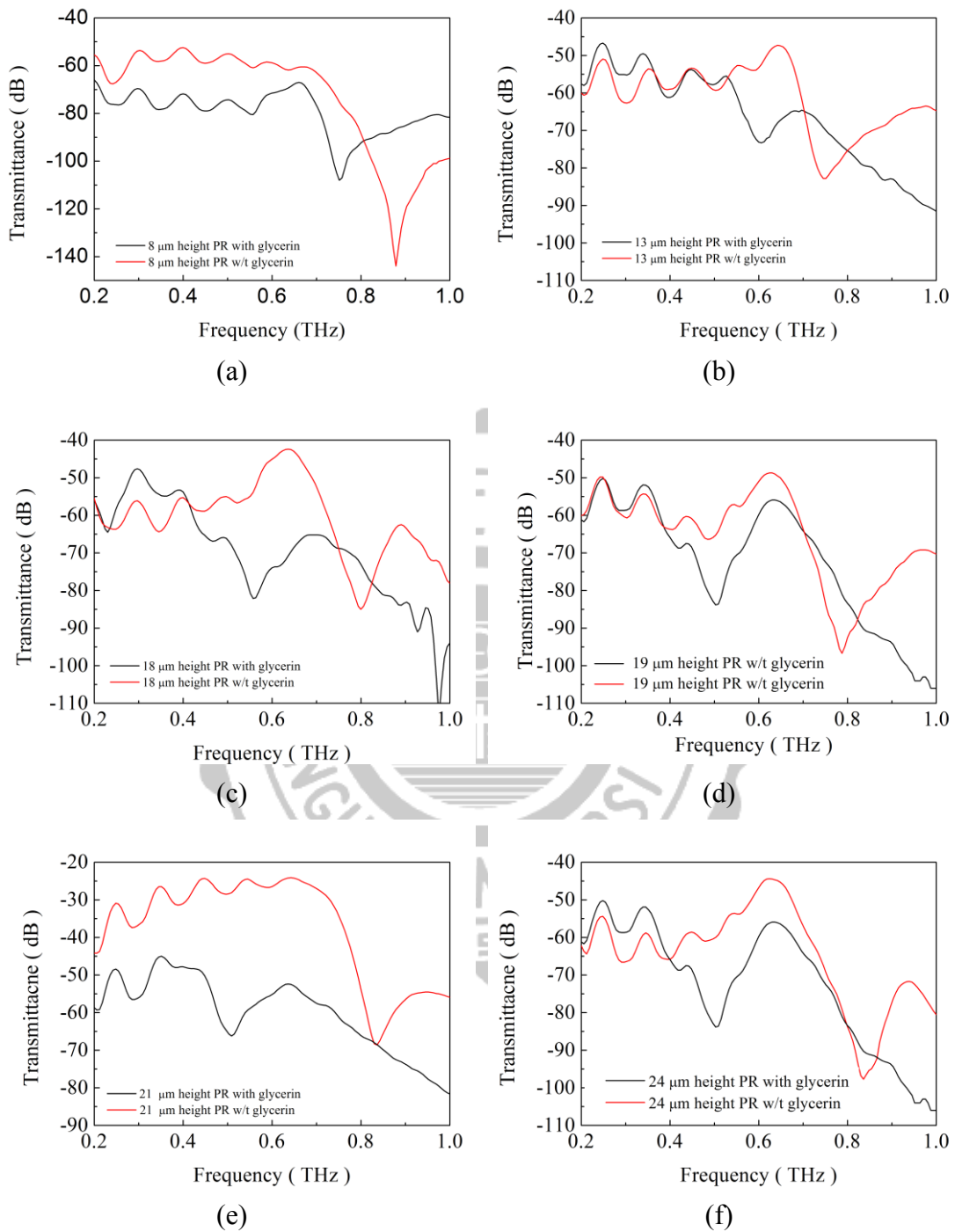


圖 4-3. 由不同高度的 HAR-SRRs 所製成的 EWOD 元件在兆赫波頻譜儀下的共振頻率。



表格 4-1. 為圖 4-4 的數據整理並計算出共振頻率變化量( $\Delta f$ )

光阻高度 ( $\mu\text{m}$ )	無甘油時共振頻率 (THz)	有甘油時共振頻率 (THz)	頻率變化 ( $\Delta f$ )
8	0.878	0.751	0.127
13	0.745	0.605	0.14
18	0.799	0.557	0.242
19	0.787	0.502	0.285
21	0.830	0.508	0.322
24	0.836	0.502	0.334

圖 4-3 為不同高度的 HAR-SRRs 所製成之 EWOD 元件在兆赫波頻譜儀下的共振頻譜。各圖中，紅線都是 HAR-SRRs 在空氣中的共振頻譜，黑線則是 HAR-SRRs 在甘油中的共振頻譜。在大部分的樣本中，空氣中的 HAR-SRRs 都具有較強的共振峰值吸收，這代表甘油的加入會使得兆赫波被反射或是吸收。然而，甘油造成的反射與吸收並不會影響共振峰值所在的頻率。將圖 4-3 的數據整理過後，呈現在表 4-1。表 4-1 可以得知，不同高度的 HAR-SRRs 在空氣中有著不同的起始共振頻率。當光阻高度為  $8 \mu\text{m}$  及  $13 \mu\text{m}$  時，兩個 EWOD 元件具有近似的頻率變化量，分別為  $0.127 \text{ THz}$  及  $0.140 \text{ THz}$ ，如圖 4-3(a) 與 4-3(b)。當光阻高度為  $18 \mu\text{m}$  時，EWOD 元件具有  $0.242 \text{ THz}$  的頻率變化量，如圖 4-3(c)。當光阻高度為  $19 \mu\text{m}$  時則具有  $0.285 \text{ THz}$  的頻率變化量，如圖 4-3(d)。當光阻高度為  $21 \mu\text{m}$  及  $24 \mu\text{m}$  時，兩個 EWOD 元件也具有近似的頻率變化量，分別為  $0.322 \text{ THz}$  及  $0.334$

THz，如圖 4-3(e)與 4-3(f)。

#### 4-4 數據分析與預期

當油滴靜置於具有高深寬比結構的表面時，雖然巨觀上皆為疏油狀態，仍可區分為兩種狀態，Wenzel state 及 Cassie state，如圖 4-4[14]。

Wenzel state 描述液珠埋入結構中；Cassie state 描述液珠懸浮在結構之上。

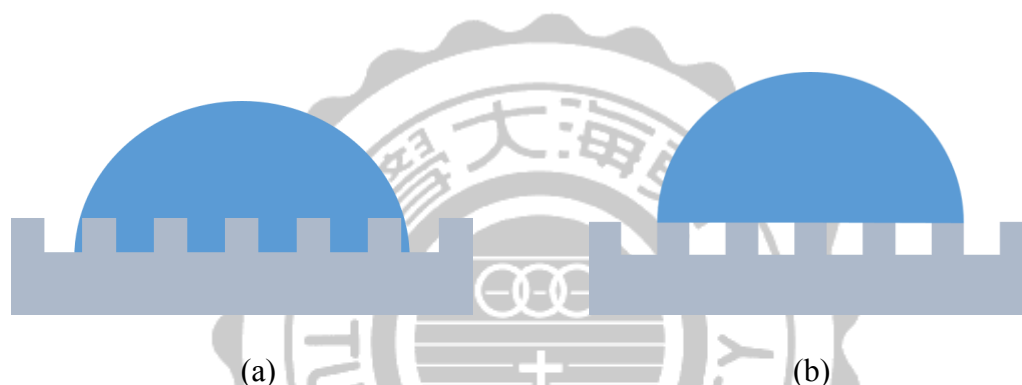


圖 4-4. 液珠在高深寬比結構下的微觀狀態示意圖。(a)Wenzel state (b) Cassie state。

由於油滴在 EWOD 元件中被封入盒中，導致現今側向顯微鏡無法拍出影像。因此，液滴在元件內部的 Wenzel 狀態與 Cassie 狀態難以判別。為了解決這個問題，在電磁模擬中引入了一個參數  $K$ ，做為推論液珠在元件中的狀態，如圖 4-5。當  $K=0$  時，液珠全部埋入結構中，即為 Wenzel state。當  $K=1$  時液珠全部懸浮在結構上，即為 Cassie state。

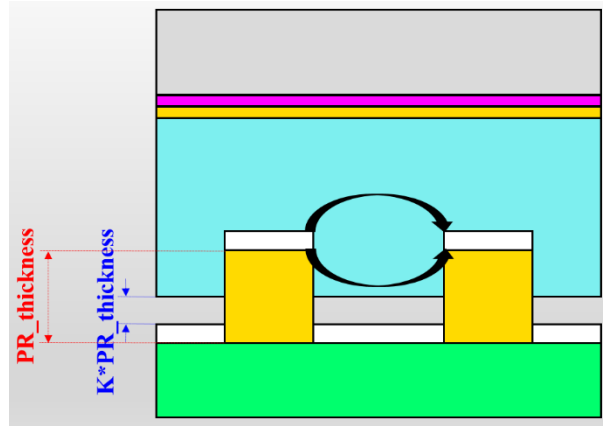


圖 4-5.  $K$  表示液珠在樣本內部的不同狀態。 $K=0$  時為 Wenzel state； $K=1$  時為 Cassie state。黑色曲線為  $LC$  共振時的電力線。

當  $K=1$  時，模擬的頻率變化值在  $8\ \mu\text{m}$  及  $13\ \mu\text{m}$  與實驗的變化值相似。隨著結構高度增加，實驗的頻率變化值與模擬的頻率變化出現落差，如圖 4-6 中紅線。當  $K=0$  時，雖然模擬的頻率變化在  $21\ \mu\text{m}$  及  $24\ \mu\text{m}$  與實驗的頻率變化值吻合，隨著結構高度降低，實驗的頻率變化值與模擬的頻率變化出現落差，如圖 4-6 中黑線。 $K$  值的加入仍然無法讓實驗與模擬吻合，因此嘗試著改變各厚度的  $K$  值進行模擬。

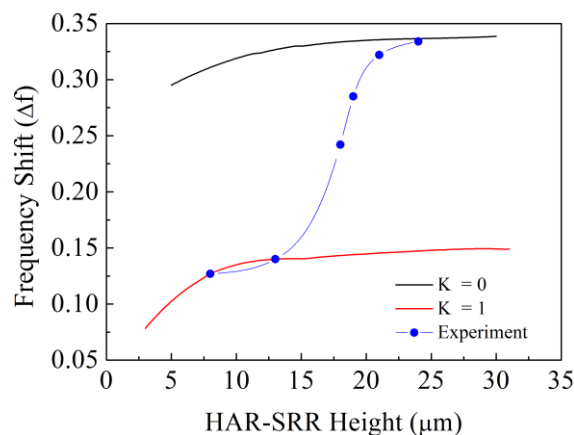


圖 4-6. 共振頻率變化與金屬高度在  $K=0$  與  $K=1$  時的模擬對應關係，以及 EWOD 元件之共振頻率變化與金屬高度的實驗對應關係。

由圖 4-6 可以推測，在不同的高度下，具有不同的  $K$  值。此現象源於 HAR-SRRs 主要模態為  $LC$  共振，且電子震盪發生在金屬表面，如示意圖 4-5。圖 4-5 中黑線及紅線為電荷發出的電力線。當  $K$  值不同時，電力線所感受到的介質體積便不同。當體積不同時環境的介電常數便不同，因此共振頻率也會受到影響，進而造成頻率變化量改變。由上述討論推測，推測  $K$  值在結構高度為  $13\ \mu\text{m}$  到  $21\ \mu\text{m}$  具有不同值，因此調整  $K$  值是必要的。圖 4-7(a) 為不同高度 HAR-SRRs 的共振頻率變化量。圖中紅色三角形為模擬值，藍色圓形為實驗值。圖 4.7(b) 為圖 4-7(a) 模擬時所使用的  $K$  值。表 4-2 為整理圖 4-7 中模擬所使用的  $K$  值與對應高度的關係。

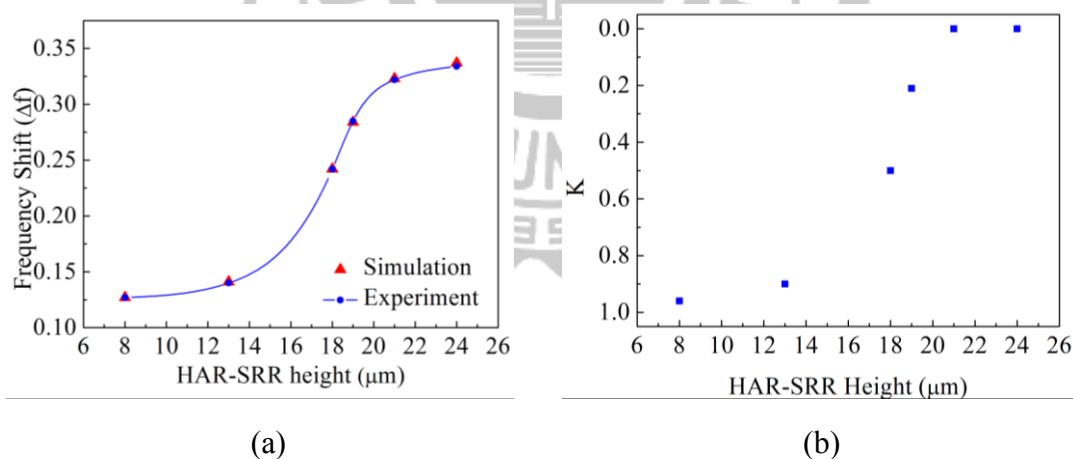


圖 4-7. (a) 模擬與實驗的頻率變化值對 HAR-SRRs 高度圖。(b) 不同 HAR-SRRs 頻率變化模擬中  $K$  所帶入的值。

表格 4-2. 模擬 EWOD 元件的頻率變化值及所帶入的  $K$  值。

光阻高度 ( $\mu\text{m}$ )	頻率變化( $\Delta f$ )	$K$ 值
8	0.127	0.96
13	0.141	0.90
18	0.242	0.50
19	0.284	0.21
21	0.323	0
24	0.337	0



## 第五章 結論與未來工作

### 結論

本實驗透過光阻墊高做出高深寬比的分裂共振環，並將此共振環及電極封盒成具有超穎材料之介電濕潤元件，研究金屬高度對具有超穎材料之介電濕潤元件的電磁共振影響。

當液滴放置在週期結構表面上時，具有三種狀態。第一種狀態為液滴埋浸於週期結構中，第二種狀態為液滴懸浮於週期結構的表面上，第三種狀態為液滴介於第一種狀態與第二種狀態之間。引入  $K$  值描述液滴在週期結構表面上的狀態。 $K = 1$  定義為液滴完全埋浸於週期結構中，即第一種狀態(Wenzel state)。 $K = 0$  定義為液滴完全懸浮於週期結構上，即第二種狀態(Cassie state)。 $0 < K < 1$  定義為液滴部份埋浸於週期結構中且部份懸浮於週期結構上，即第三種狀態。由於難以觀察液滴在元件中的影像，因此在電磁模擬軟體中引入  $K$  值，可以找出液滴在分裂共振環上的狀態。

實驗結果發現， $K$  值的引入使得 HAR-SRRs 的模擬共振頻率變化值吻合實驗共振頻率變化值，因此才能預測液滴在分裂共振環上的狀態

參考文獻 13 與參考文獻 14，皆在探討金屬高度對共振頻率變化的影響。然而，這兩篇文獻並未引入  $K$  值分析液滴在分裂共振環

上的狀態。因此，本研究有別於之前的研究。此外，本研究的樣本能夠藉由電壓調控共振頻率，因此提供了開發更好的兆赫波濾波器之可能性。

## 未來工作

1. 利用金屬遮罩製作 HAR-SRRs 樣本及對位技術，將結構與遮罩對準，如此可以讓金屬在蒸鍍過程中只沉積在 HAR-SRRs 結構上，避免金屬薄膜成長基板表面。當底層金屬被移除，便可以提升元件總體穿透強度且避免嚴重的 Fabry-Pérot 干涉。
2. 將 EWOD 元件中空氣及甘油利用兩種介電常數差異大的流體材料替換。當兩種材料介電常數差異越大，可以預期元件能具有的更寬頻的調控範圍。然而，此兩種材料須滿足密度匹配。

## 參考文獻

- [1] J. Zhang, L. Zhang, and W. Xu, "Surface plasmon polaritons: Physics and applications," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 45, pp. 113001 (2012).
- [2] K. Wang, L. Ding, J. Liu, J. Zhang, X. Yang, J. Y. Chin, and T. J. Cui, "Theoretical and experimental research on designer surface plasmons in a metamaterial with double sets of circular holes," *Opt. Express*, 19, pp. 11375(2011).
- [3] J. B. Pendry, L. Martín-Moreno, J. Garcia-Vidal, "Mimicking Surface Plasmons with Structured Surfaces," *Science*, 305, 5685, pp. 847–848(2004).
- [4] G. Lippmann, "Relation entre les phénomènes électriques et capillaires," (1875).
- [5] G. Beni and S. Hackwood, "Electrowetting displays," *Appl. Phys. Lett.*, 38, pp. 207-209(1981).
- [6] F. Mugele and J. C. Baret, "Electrowetting: From basics to applications," *J. Phys. Condens. Matter*, 17, p. 705-774(2005).
- [7] M. G. Pollack, R. B. Fair, and A. D. Shenderov, "Electrowetting-based actuation of liquid droplets for microfluidic applications," *Appl. Phys. Lett.*, 77, pp. 1725–1726(2000).
- [8] B. Berge, "Electrocapillarity and wetting of insulator films by water," *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Serie II*, 317, pp. 157-163(1993).
- [9] H. Liu, S. Dharmatilleke, D. K. Maurya, and A. A. O. Tay, "Dielectric materials for electrowetting-on-dielectric actuation," *Microsyst. Technol.*, 16, pp. 449–460(2010).
- [10] H. Moon, S. K. Cho, R. L. Garrell, and C. Jin, "CJ" Kim, "Low voltage electrowetting-on-dielectric," *J. Appl. Phys.*, 92, pp. 4080–4087(2002).
- [11] W. J. J. Welters and L. G. J. Fokkink, "Fast Electrically Switchable Capillary Effects," *Langmuir*, 14, pp. 1535–1538(1998).
- [12] H. Guo, N. Liu, L. Fu, H. Schweizer, S. Kaiser, and H. Giessen, "Thickness dependence of the optical properties of split-ring resonator metamaterials," *Phys. status solidi*, 244, pp. 1256–1261(2007).
- [13] S. Y. Chiam, R. Singh, J. Gu, J. Han, W. Zhang, and A. A. Bettiol, "Increased frequency shifts in high aspect ratio terahertz split ring



- resonators,” *Appl. Phys. Lett.*, 94, pp. 064102(2009).
- [14] V. Bahadur and S.V. Garimella, “Electrowetting-based control of static droplet states on rough surfaces,” *Langmuir*, 23, pp. 4918–4924(2007).

