

東海大學應用物理學系
碩士論文

指導教授：黃家逸 博士

利用超穎材料製作兆赫波感測器

Terahertz sensors using metamaterials

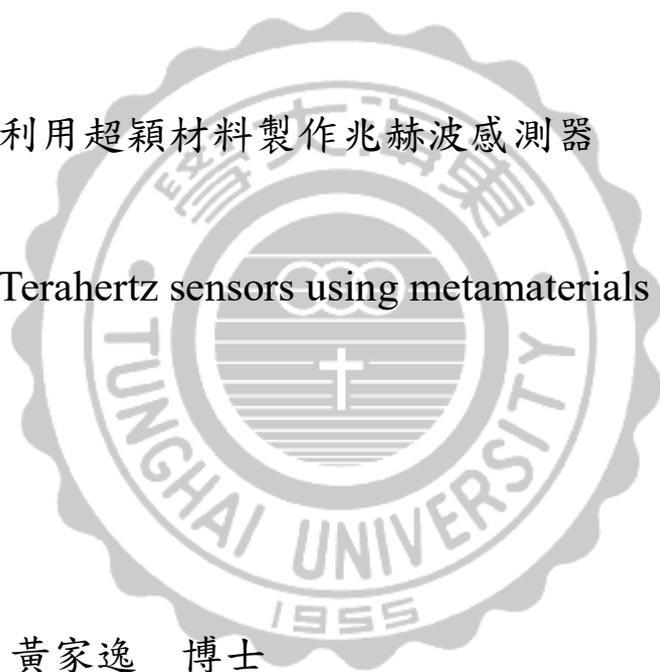
研究生：林琮偉

中華民國一〇七年六月

東海大學應用物理學系 碩士論文

利用超穎材料製作兆赫波感測器

Terahertz sensors using metamaterials



指導教授：黃家逸 博士

研究生：林琮偉

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 林琮偉 君所提之論文

論文題目：

(中文) 利用超穎材料製作兆赫波感測器

(英文) Terahertz sensors using 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 林琮偉 君所提之論文

(中文) 利用超穎材料製作兆赫波感測器

(英文) Terahertz sensors using metamaterials

論文口試委員會

召集人

林琮偉

(簽章)

委員

黃家逸

吳秋賢

陳嘉勻

蕭輔力

中華民國 107 年 6 月 28 日

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 14 日

Application Date: 2018 / 8 / 14 (YYYY/MM/DD)

107.04.10版

申請人姓名 Applicant	<u>林琮偉</u>	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 <u>107</u> 年 <u>8</u> 月 <u>2018</u> / <u>8</u>
學校名稱 University	<u>東海大學</u>	系所名稱 Schools or Departments	<u>應用物理系</u>		
論文名稱 Thesis/Dissertation Title	<u>利用超穎材料製作兆赫波感測器</u>				
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 <u>112</u> 年 <u>8</u> 月 <u>14</u> 日 <u>2023</u> / <u>8</u> / <u>14</u> (YYYY/MM/DD)	

申請人簽名：
Applicant Signature: 林琮偉

指導教授簽名：
Advisor Signature: 黃泉逸

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】

1. 以上所有欄位請據實填寫，缺項或簽章不全，恕不受理。
2. 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。
3. 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」。
4. 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。
5. 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】

1. Please fill in all blanks. The application form will not be accepted for processing until all information, signatures, and stamps are included.
2. If the thesis or dissertation is not yet submitted to the NCL, please attach the signed application form to the thesis or dissertation.
3. 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.)
4. 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.
5. 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

本研究是在我的導師 黃家逸教授細心指導下完成的，每當實驗進度遇到困難，老師總是先整理思緒、再接下去討論如何解決問題。這種耐心的思考方式深深感染個性急躁的我。撰寫論文過程中老師仔細批閱，並指點我如何改進以及寫文章的邏輯，也對我的想法都予以肯定，讓我得以自由發揮。在實驗室這兩年中，讓我獲得實驗精神以及思考邏輯，而且這些技能更能應用於生活中，謹此致上最深的敬意與感激。

四位口試委員魏培坤教授、吳秋賢教授、蕭輔力教授與陳嘉勻教授百忙之中前來提攜指導，在審查論文期間，提供我許多寶貴建議以及熱心指正，不僅助本論文能夠更完善、嚴謹，也使我接收到許多不同方面的知識以及不足的地方，在此由衷感謝委員們的不吝賜教。

兩年的光陰似箭，轉眼我的研究所生涯帶著滿滿的回憶進入了尾聲，隨著論文的完成，內心既澎湃也伴隨哀傷。謝謝物理系以及電機系實驗室的所有夥伴的互助以及學習。

中文摘要

本工作研究介電物質對 $3DMM$ (Three-dimensional, $3DMM$)以及平面超穎材料(planar metamaterial, PMM)的電磁共振影響。利用厚的光阻進行黃光顯影，製做出具有 3D 結構的超穎材料。因為 $3DMM$ 具有高深寬比的銀壁，所以其兆赫波頻譜擁有高的吸收峰值。因此， $3DMM$ 對於周遭環境折射率的變化具有靈敏的響應。

$3DMM$ 的共振穿透率低於平面超穎材料，且藉由電磁模擬軟體研究這個事實的起因。 $3DMM$ 可以用來做高性能的兆赫波濾波器，應用在兆赫波影像[1]以及兆赫波通訊[2]。

在模擬軟體中，使用不同折射率材料覆蓋於 $3DMM$ 與 PMM 上，量測它們的共振頻率變化量。模擬結果發現， $3DMM$ 的頻率靈敏度為 0.135 THz/RIU，而 PMM 的頻率靈敏度為 0.84 THz/RIU。因此， $3DMM$ 比起 PMM 對於介電物質折射率的變化擁有較高的靈敏度。

關鍵字：兆赫波超穎材料、頻率靈敏度、高深寬比、兆赫波濾波器

英文摘要

Abstract

This work studies the effect of dielectric materials on electromagnetic resonance of a bowl-shaped metamaterial (*3DMM*) and a planar metamaterial (*PMM*). *3DMM* is fabricated using a thick photoresist layer. *3DMM* has silver walls with a high aspect ratio. Therefore, *3DMM* exhibits a strong absorption peak in its terahertz spectrum. In other words, *3DMM* is sensitive to the change in the refractive index of a medium that covers the metamaterial.

3DMM has a lower resonance transmittance than *PMM*. This result is verified by electromagnetic simulation software. *3DMM* can be used to develop high-performance terahertz filters for the application of terahertz imaging and terahertz communication.

The change in the resonance frequencies of *3DMM* and *PMM* that are covered with materials with different refractive indices are simulated. The simulated results reveal that *3DMM* and *PMM* have frequency sensitivities of 0.135 and 0.84 THz/RIU, respectively. Therefore, *3DMM* is more sensitive to the change in the refractive index of a medium that covers the metamaterial than *PMM*.

Keyword: terahertz metamaterials, frequency sensitivity, high aspect ratio, terahertz filters

目錄

誌謝.....	i
中文摘要.....	ii
英文摘要.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	vii
第一章 緒論.....	1
1-1 超穎材料簡介.....	1
1-2 超穎材料的共振頻率.....	1
1-3 超穎材料的介電係數與磁導係數.....	2
1-4 參考文獻.....	3
第二章 研究方法.....	7
2-1 樣本製作.....	7
2-2 高真空磁控濺鍍機鍍銀.....	9
2-3 樣品測量.....	10
第三章 研究結果.....	11

3-1 平面超穎材料的外觀與頻譜.....	11
3-2 3DMM 的外觀與頻譜.....	12
3-3 3D 與平面超穎材料塗佈光阻後的頻譜圖	13
3-4 平面超穎材料與 3DMM 的模擬頻譜	15
3-5 3DMM 加上介電物質的模擬頻譜	17
3-6 改變 3DMM 銀壁高度的模擬頻譜.....	19
3-7 研究 3D 與平面超穎材料的頻率敏感度	20
第四章 結論與未來工作.....	22
結論	22
未來工作.....	22
參考文獻.....	24



表目錄

表 3-1. 三種超穎材料覆蓋光阻前後共振頻率的變化量。..... 14

表 3-2. 平面與 3DMM 覆蓋光阻前後共振頻率的變化量。..... 19



圖目錄

- 圖 1-1 電磁波對單一方形缺口之金屬分裂環的作用，可視為電感
(L)-電容(C)震盪電路。(B) 單一金屬分裂環尺寸的定義： G =缺口
(GAP); A =長度(LENGTH); B =寬(WIDTH); W =線寬(LINE WIDTH)。...2
- 圖 1-2. (A)銅分裂環共振器，尺寸： $C=0.8$ MM, $D=0.2$ MM, $R=1.5$ MM。
(B)共振發生在頻率為 4.845 GHz 處。.....3
- 圖 1-3. 內外雙共振環的電子顯微鏡影像，其中外共振環能夠藉由電
壓施加而平貼基板。(B) 內外雙共振環電控機制。(C) 內外雙共
振環在電壓施加下的兆赫波頻譜圖。.....4
- 圖 1-4. (A) 內外雙共振環的電子顯微鏡影像，其中內外共振環皆能
夠藉由電壓施加而平貼基板。(B) 內外雙共振環電控機制。(C)
內外雙共振環在電壓施加下的兆赫波頻譜圖。.....5
- 圖 1-5. 金分裂共振環的(A)光學與(B)電子顯微鏡影像。尺寸： $D=38$
 μM 、 $W=6$ μM 、 $G=2$ μM 、金的厚度= 9 μM 。.....6
- 圖 1-6. 分裂共振環覆蓋不同厚度光阻之(A)實驗與(B)模擬頻譜。....6
- 圖 2- 1. (a)3D 分裂共振環狀。(b)光罩設計圖。 7
- 圖 2- 2. 旋轉塗佈機.....8
- 圖 2- 3. 加熱平台。.....8

圖 2-4. 曝光機。	9
圖 2-5. 高真空磁控濺鍍機。	9
圖 2-6. 圖案化的光阻鍍銀。	9
圖 2-7. 兆赫波頻譜儀。	10
圖 3-1. (a) 平面分裂金屬環顯微鏡圖。(b)平面分裂共振環的兆赫波 頻譜。	11
圖 3-2. (A) 3DMM 之銀壁的高度。(B) 3DMM 之銀壁的線寬。	12
圖 3-3. (A) 覆蓋於 3DMM 上光阻之厚度。(B) 3DMM、(C) PMM1 與 (D) PMM2 塗佈光阻後的兆赫波頻譜。	14
圖 3-4. PMM1 在模擬軟體中的模型。	15
圖 3-5. PMM1 的(A)實驗頻譜與(B)模擬頻譜。	16
圖 3-6. 3DMM 在模擬軟體中的模型。	17
圖 3-7. 3DMM 的(A)實驗頻譜與(B)模擬頻譜。	17

第一章 緒論

1-1 超穎材料簡介

超穎材料(Metamaterials)為人工製造的次波長周期結構，意指結構本身的尺寸與與圖案週期比入射電磁波的波長小一個次方。當電磁波入射至超穎材料時，超穎材料會與電磁波產生交互作用，使得電磁波被吸收。這種特性是一般天然材料所不具備的。早期超穎材料的尺寸是以毫米為單位，其影響的波段發生在微波。隨著製程技術進步，超穎材料的尺寸可達微米等級甚至奈米，共振頻率也發生在更高頻區域，如兆赫波、紅外光以及可見光波段。

1-2 超穎材料的共振頻率

超穎材料最大的特色就是會發生表面電漿共振[3]。表面電漿共振為電子的振動發生於金屬平板與介電環境之間。當電磁波通過時金屬時，內部的自由電子會隨之震盪[4]。因此，控制自由電子的運動路徑，就能改變共振頻率。

以長方形缺口的金屬分裂環為例，當電磁波通過分裂環時，金屬環受到電磁波的作用可視為電感(inductance, L)-電容(capacitance, C)

震盪電路，如圖1-1(a)。每單位的分裂環之共振頻率可表示為[5]

$$\omega_{LC} = (LC)^{-1/2} \quad (1)$$

其中電容值 C 的大小取決於分裂環的缺口(gap, G)，會受到周圍物質的介電系數所影響，電感值 L 則會受到分裂環的面積(a , b and w)所決定，如圖1-1 (b)。

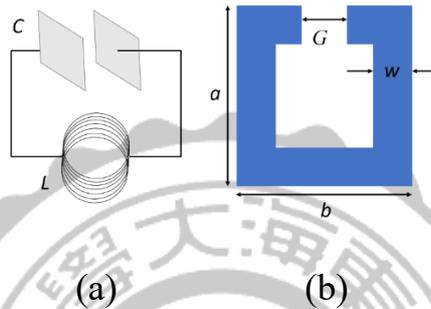


圖 1-1 電磁波對單一方形缺口之金屬分裂環的作用，可視為電感(L)-電容(C)震盪電路。(b) 單一金屬分裂環尺寸的定義： G =缺口(gap); a =長度(length); b =寬(width); w =線寬(line width)。

1-3 超穎材料的介電係數與磁導係數

超穎材料的相對介電係數(ϵ_r)與相對磁導係數(μ_r)可以用Drude-Lorentz model來描述[6]。

$$\epsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_{p,e}^2}{\omega^2 - \omega_{0,e}^2 + i\gamma_e\omega} \quad (2)$$

and

$$\mu_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_{p,m}^2}{\omega^2 - \omega_{0,m}^2 + i\gamma_m\omega} \quad (3)$$

其中 $\omega_{p,e}$ ($\omega_{p,m}$)、 $\omega_{0,e}$ ($\omega_{0,m}$)與 γ_e (γ_m) 分別為在電場(磁場)作用下的電漿頻率、共振頻率與阻尼因子。根據不同的金屬分裂環結構，必

須對Eqs. (2)與(3)做修正。只要知道共振頻率，阻尼因子與電漿頻率，即可獲得 ϵ_r 與 μ_r 對頻率的關係圖。

1-4 參考文獻

Physics Review Letter 84, 4184 (2000)

2000年加州大學聖地牙哥分校物理系教授Smith等人發表了一篇期刊，其論文是第一次利用實驗證實負折射率材料的存在。實驗中所製作的超穎材料是由兩個圓形缺口銅環的二維金屬陣列組成，如圖1-2(a)。觀察微波波段的頻譜，其微波入射電場的振盪方向平行開口，微波對分裂金屬環會產生強烈的電磁共振[7]，頻譜顯示共振頻率為4.845 GHz，如圖1-2 (b)。

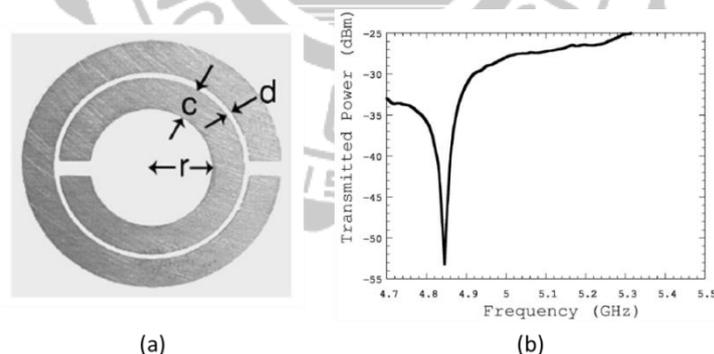


圖 1- 2. (a)銅分裂環共振器，尺寸: $c = 0.8 \text{ mm}$, $d = 0.2 \text{ mm}$, $r = 1.5 \text{ mm}$ 。(b)共振發生在頻率為 4.845 GHz 處。

Applied Physics Letters 102,111908 (2013)

2013 年 Lin 設計出串聯超穎材料，此超穎材料能被電壓控制[8]。樣本分別有兩種，在其中一種設計中，利用黃光微影製做內外雙共振環，並藉由外加電壓控制外共振環縮短雙臂揚起的高度，如圖 1-3(a)與圖 1-3(b)。當外共振環逐漸接近基板，共振頻率具有紅移的趨勢，如圖 1-3(c)。在另外一項實驗中，內外雙環皆能受電壓調控，如圖 1-4(a)與圖 1-4(b)。當內外共振環逐漸接近基板，共振頻率具有紅移的趨勢，如圖 1-4(c)。兩種方法相較之下，第二種設計能控制內外共振環，得到擁有更高 Q-factor 的濾波器。此外，低頻區有紅移的現象，而高頻區有藍移的現象。

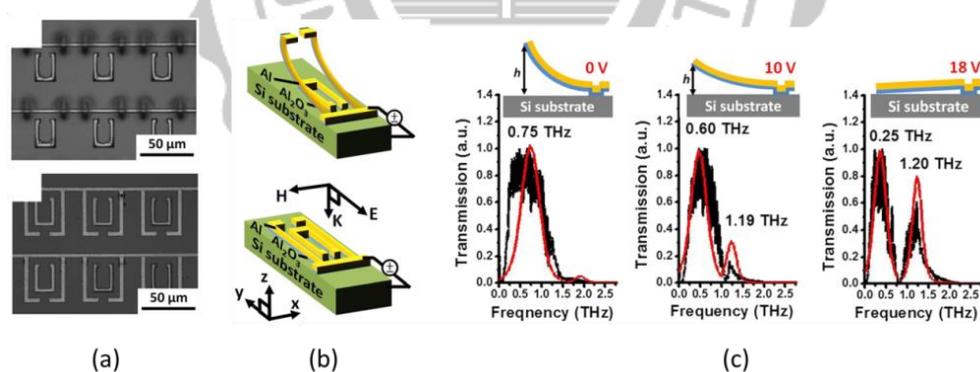


圖 1-3. 內外雙共振環的電子顯微鏡影像，其中外共振環能夠藉由電壓施加而平貼基板。(b) 內外雙共振環電控機制。(c) 內外雙共振環在電壓施加下的兆赫波頻譜圖。

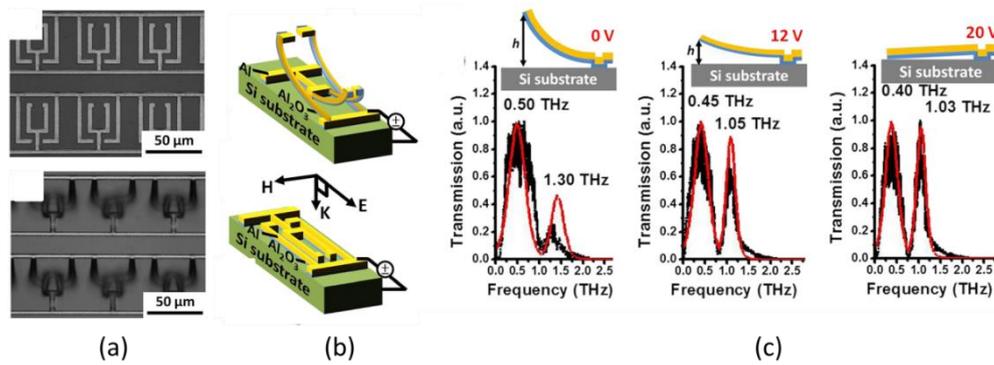
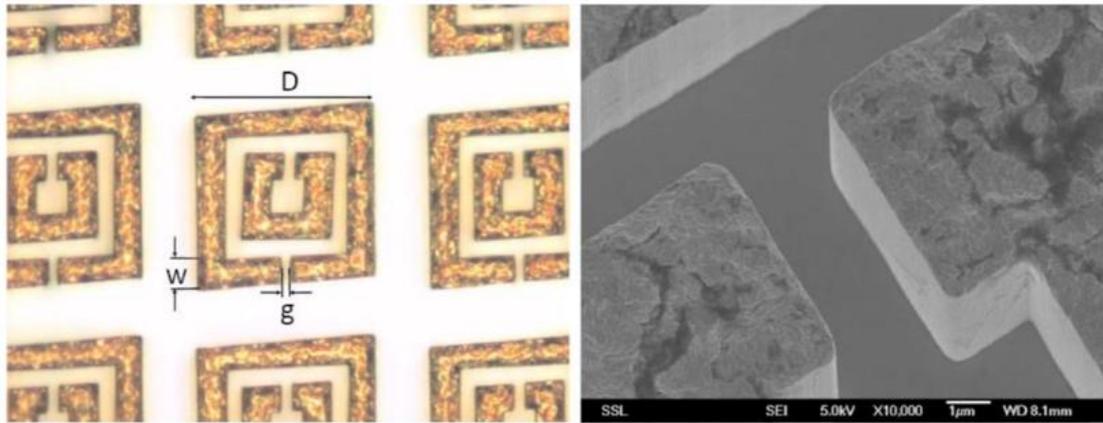


圖 1-4. (a) 內外雙共振環的電子顯微鏡影像，其中內外共振環皆能夠藉由電壓施加而平貼基板。(b) 內外雙共振環電控機制。(c) 內外雙共振環在電壓施加下的兆赫波頻譜圖。

APPLIED PHYSICS LETTERS 94, 064102 (2009)

2009年Sher-Yi Chiam等人利用質子束寫入以及電鍍的方式製做超穎材料[9]，在矽基板上做出高深寬比的金分裂共振環，分裂環的現寬為6 μm、缺口寬為2 μm、邊長為38 μm與銀的厚度9 μm，如圖1-5(a)。在他們的研究中，覆蓋不同厚度的光阻，黑線為金分裂共振環的頻譜，如圖1-6。共振頻率位在0.64 THz。紅線為分裂環覆蓋一層光阻(8 μm)、藍線為覆蓋兩層光阻(12 μm)，而綠線為覆蓋三層光阻(16 μm)。實驗結果發現共振頻率有紅移，並且逐漸趨進0.52 THz，共振頻率移動量為120 GHz。此外，O'Hara製做相同尺寸但厚度(200 nm)不一樣的金分裂共振環，覆蓋20 μm厚的同款光阻。結果發現共振頻率變化量至30 GHz就達飽和，這表明增加深寬比會導致更大的頻譜偏移量。



(a)

(b)

圖 1-5. 金分裂共振環的(a)光學與(b)電子顯微鏡影像。尺寸： $D = 38 \mu\text{m}$ 、 $w = 6 \mu\text{m}$ 、 $g = 2 \mu\text{m}$ 、金的厚度 = $9 \mu\text{m}$ 。

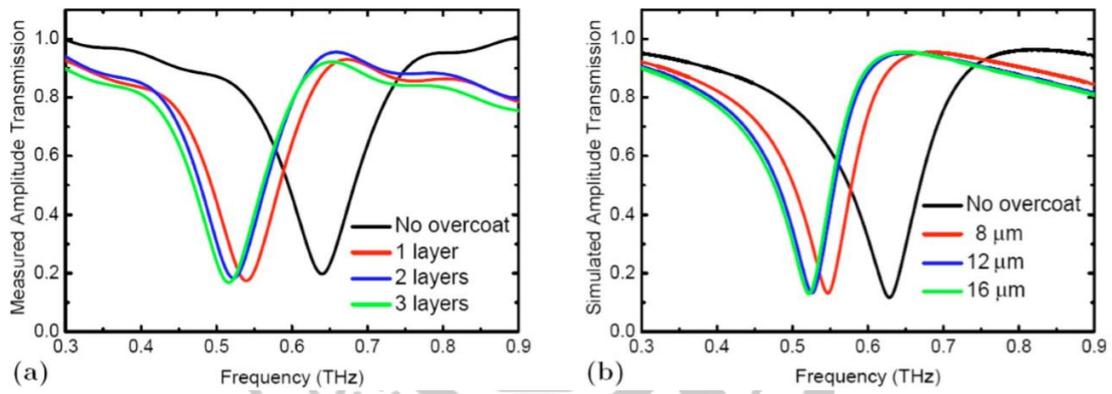


圖 1-6. 分裂共振環覆蓋不同厚度光阻之(a)實驗與(b)模擬頻譜。

第二章 研究方法

2-1 樣本製作

本實驗樣品的面積為 $2.2\text{ cm} \times 2.2\text{ cm}$ ，塑膠基板厚度為 $188\text{ }\mu\text{m}$ 。首先將基板黏貼在玻璃上，使塑膠基板不會捲曲，如圖 2-1。接著進行黃光微影，步驟分別為旋轉塗佈光阻、對光阻進行曝光、最後顯影做出 3D 分裂共振環。

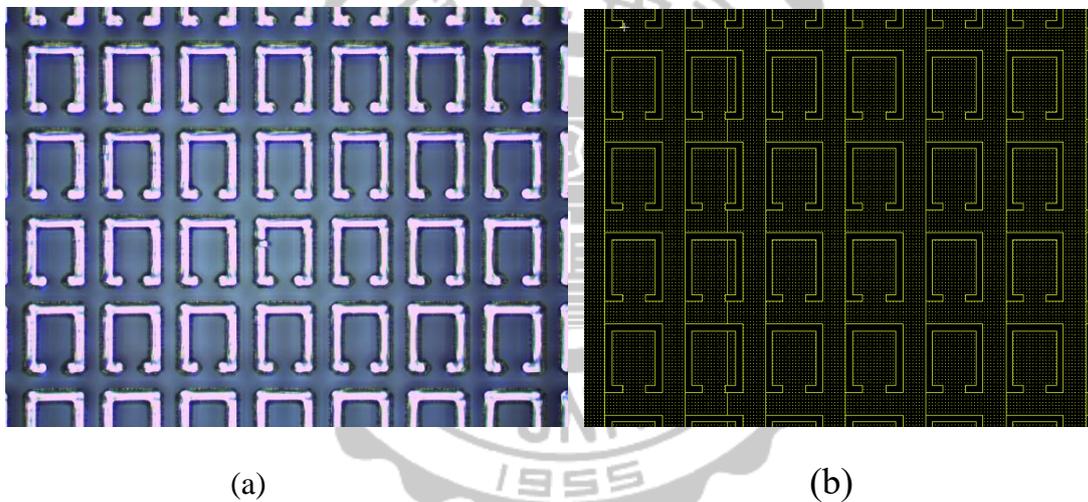


圖 2-1. (a)3D 分裂共振環狀。(b)光罩設計圖。

首先旋轉塗佈光阻於塑膠基板上，接著進行曝光，最後顯影做出分裂共振環。為了控制光阻膜厚以及使光阻均勻，旋轉塗佈的轉速設定為 500 rpm ，塗佈時間為 300 s ，如圖 2-2。因為此光阻非常的濃稠，故使用較長的旋轉時間。接著，光阻放上加熱平台加熱一分鐘，如圖 2-3。這是為了使光阻不因內聚力而產生聚合，這不僅使光阻定型，並

且在基板上得以有較高的附著力。光阻成型後，使用曝光機對樣品進行曝光，如圖 2-4。務必將光罩和樣品平行貼合，否則會造成曝光不均勻。接著，曝過光的光阻泡到稀釋過的顯影液(顯影劑:水=1:2)中進行顯影，目的是為了去除照過光的部分並且使光阻圖案化。將樣品放入去離子水中，清除樣品表面的顯影液並且用空氣槍吹乾。最後進行硬烤，使得光阻表面的水氣以及有機溶劑揮發，目的是為了減少對濺鍍機腔體的汙染。



圖 2-2. 旋轉塗佈機



圖 2-3. 加熱平台。

光阻圖形化後，利用高真空磁控濺鍍機在光阻上鍍上一層銀，如圖 2-5。因為銀比其他金屬擁有較明顯的電磁共振，所以選擇銀金屬，如圖 2-6。最後，利用丙酮去除圖形以外的光阻以及銀。這是因為丙酮容易移除光阻並且掀離銀薄膜。最後，即可做出 3 維超材料。

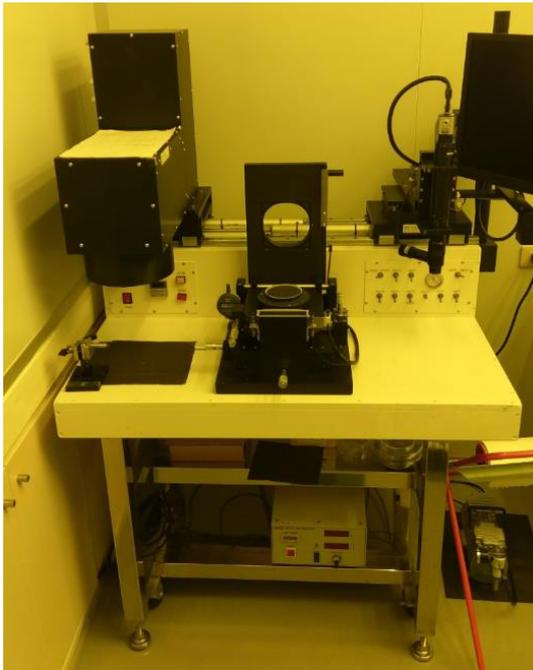


圖 2-4. 曝光機。



圖 2-5. 高真空磁控濺鍍機。



圖 2-6. 圖案化的光阻鍍銀。

2-2 高真空磁控濺鍍機鍍銀

射頻磁控濺鍍機(RF magnetron sputter)是一種薄膜沉積儀器，離子濺射是其基本原理。當靶材受到高能粒子轟擊後，粒子與靶材上的原子及分子動能互換並脫離靶材表面，如同石子丟入平靜水中濺起的

水花。先將氬氣預先通入腔體再開啟電流，藉由磁控濺鍍機內部加裝的磁鐵，電子受到勞倫茲力作用得以和氬氣發生碰撞，使其離子化產生氬離子，這些離子統稱為電漿。入射離子受到電場作用獲得動量且撞擊銀靶材表面，將銀原子碰撞出去，最後沉積在塑膠基板上。

2-3 樣品測量

啟動兆赫波頻譜儀(TPS 3000, TeraView)測量，如圖 2-7。量測樣品前，須先開啟溫控器，讓溫度達到 34.8 °C，才可打開雷射開關。接著，等待儀器的 CONTROL ON 與 LASER TEMP OK 亮綠燈後，就能夠開啟雷射。因兆赫波頻譜儀容易受到水氣的影響，故測量前會先通入氮氣已減少水氣。首先先測量空氣頻譜，然後再量測樣本的訊號。輸出的數據必須將樣本訊號扣除空氣訊號，如此才能得到正確的訊號。



圖 2-7. 兆赫波頻譜儀。

第三章 研究結果

3-1 平面超穎材料的外觀與頻譜

平面超穎材料的製作法如下：將鍍銀的基板塗佈光阻後，隨即進行軟烤。軟烤後，利用紫外光照射基板，將光罩上的圖形轉移至光阻層。曝光後，將基板放置在熱板上進行曝後烤。曝後烤後，基板浸泡在顯影液中進行顯影，接著利用酸液蝕刻銀薄膜。最後，即可得到平面分裂共振環，如圖 3-1(a)。圖 3-1(b)為平面分裂共振環的兆赫波頻譜圖。實驗結果顯示，平面超穎材料的共振峰值發生在 0.654 THz。

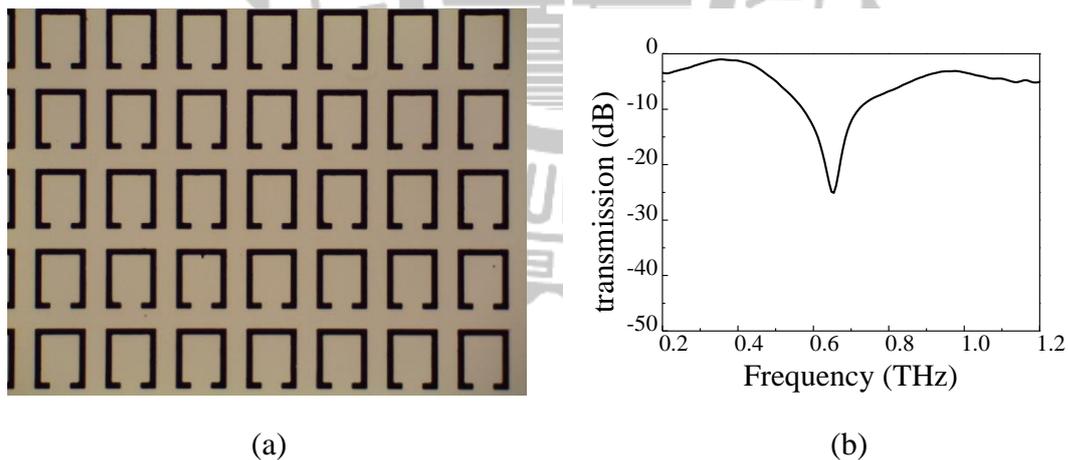
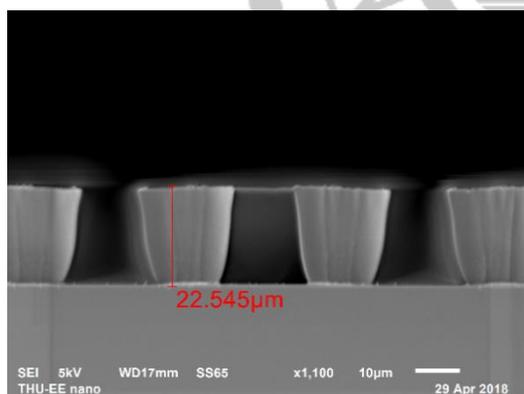


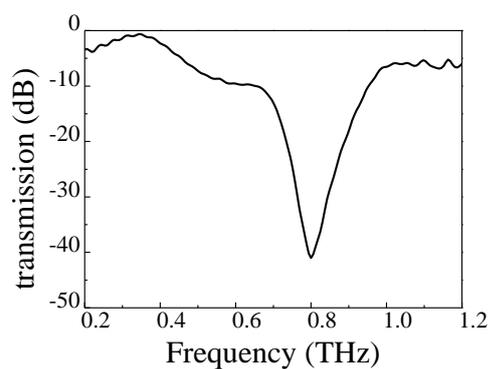
圖 3-1. (a) 平面分裂金屬環顯微鏡圖。(b)平面分裂共振環的兆赫波頻譜。

3-2 3DMM 的外觀與頻譜

3DMM 的製做方法如下：塗佈光阻在基板上，接著進行黃光微影將光罩圖形轉移置光阻，經過圖形化的光阻再鍍上一層銀，再利用丙酮將光阻去除，即可得到 3DMM，如圖 3-2(a)。3DMM 比平面超穎材料多了外圍的銀壁。圖 3-2(b)為 3DMM 的兆赫波頻譜圖。實驗結果發現，3DMM 的共振峰值發生在 0.800 THz。銀壁的高度為 22.545 μm ，銀壁的線寬為 1.455 μm ，分別如圖 3-2(c)、3-2(d)所示。3DMM 的共振峰值不同於平面超穎材料，這可能是因為前者比起後者多了直立的銀壁。為了證明這一點，將在 3-7 節中，詳加討論。



(a)



(b)

圖 3- 2. (a) 3DMM 之銀壁的高度。(b) 3DMM 之銀壁的線寬。

3-3 3D 與平面超穎材料塗佈光阻後的頻譜圖

由於電漿子材料對周圍介電質折射率的變化非常敏感，因此比較 3D 與平面超穎材料塗佈光阻後的頻譜圖。將兩種超穎材料都使用相同轉速塗佈光阻層，接著，利用電子顯微鏡量測的光阻層厚度厚度為 $26.75\ \mu\text{m}$ ，如圖 3-3(a)。圖 3-3(b)的紅線和黑線分別為塗佈光阻前後的 3DMM 的頻譜圖。圖 3-3(c)中的紅線和黑線分別是塗佈光阻前後平面超穎材料的頻譜圖。3DMM 塗佈上介電物質後，共振峰值位置由 $0.800\ \text{THz}$ 紅移至 $0.551\ \text{THz}$ ，頻譜移動量為 $0.249\ \text{THz}$ 。平面分裂共振環塗佈上介電物質後，共振峰值由 $0.654\ \text{THz}$ 紅移至 $0.527\ \text{THz}$ ，頻譜移動量為 $0.127\ \text{THz}$ 。因此，3DMM(3DMM)的頻譜移動量大於平面超穎材料(PMM1)的頻譜移動量。換句話說，3DMM 對於周圍物質折射率的改變具有明顯地變化。

不同的頻譜移動量可能是因為塗佈光阻前平面與 3D 分裂共振環具有不同的初始頻譜峰值。為了驗證這個推測，重新繪製光罩，讓新設計的平面超穎材料(PMM2)的共振頻率等於 3DMM 的共振頻率($0.8\ \text{THz}$)，如圖 3-3(d)。紅線為 PMM2 的原始頻譜，共振頻率位在 $0.805\ \text{THz}$ 。當 PMM2 塗佈上介電物質後，共振峰值由 $0.805\ \text{THz}$ 紅移至 $0.654\ \text{THz}$ ，頻譜移動量為 $0.151\ \text{THz}$ 。這個值接近 PMM1 的頻譜移動量(0.127)。因此，超穎材料對於周圍物質折射率的改變，不會因為原

始共振頻率的不同而造成顯著地頻譜移動量。由於 *3DMM* 的頻譜移動量大於平面超穎材料(*PMM2*)的頻譜移動量。因此，*3DMM* 比起平面超穎材料對周圍物質折射率的改變具有靈敏地響應。

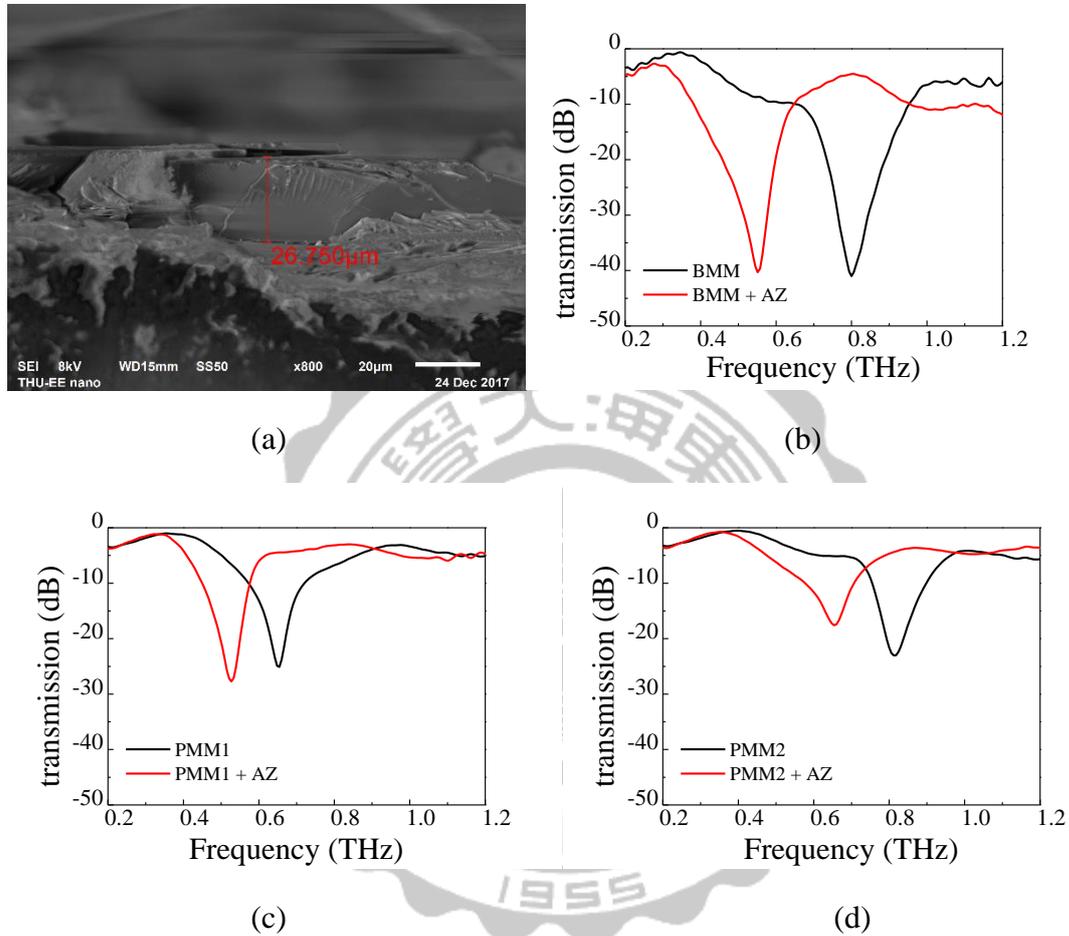


圖 3-3. (a) 覆蓋於 *3DMM* 上光阻之厚度。(b) *3DMM*、(c) *PMM1* 與(d) *PMM2* 塗佈光阻後的兆赫波頻譜。

表 3-1. 三種超穎材料覆蓋光阻前後共振頻率的變化量。

	<i>3DMM</i>	<i>PMM1</i>	<i>PMM2</i>
光阻覆蓋前的頻譜 f_0 (THz)	0.800	0.654	0.805
光阻覆蓋後的頻譜(f_1) (THz)	0.551	0.527	0.654
頻譜移動量($\Delta f = f_0 - f_1$) (THz)	0.249	0.127	0.151

3-4 平面超穎材料與 3DMM 的模擬頻譜

分別將實驗樣本 *PMM1* 以及 *3DMM* 的尺度參數輸入至電磁模擬軟體中，用以驗證 3-1 節至 3-5 節的實驗結果。首先以 *PMM1* 作為基準進行模擬，目的是為了驗證材料參數正確且符合實驗，如此才能進行下一步的模擬演算。圖 3-4 為 *PMM1* 在模擬軟體中的模型，藍色材料為塑膠基板，黃色是 *PMM1* 材料為銀， $a = 20 \mu\text{m}$ 、 $b = 60 \mu\text{m}$ 、 $c = 50 \mu\text{m}$ 、 $d = 6 \mu\text{m}$ 、周期為 $20 \mu\text{m}$ 、銀和塑膠基板的厚度分別定義為 $0.2 \mu\text{m}$ 以及 $188 \mu\text{m}$ 。實驗頻譜的共振頻率與穿透率分別位於 0.654 THz 以及 -25.1 dB ，如圖 3-5(a)。模擬頻譜共振頻率與穿透率分別位在 0.659 THz 以及 -25.4 dB ，如圖 3-5(b)。由圖 3-5(a)與 3-5(b)得知，實驗數值接近模擬數值，故可以使用此參數進行接下去的模擬。

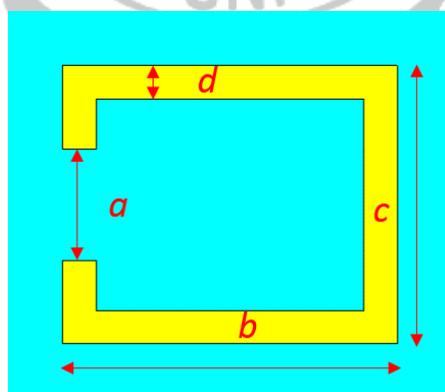


圖 3-4. *PMM1* 在模擬軟體中的模型。

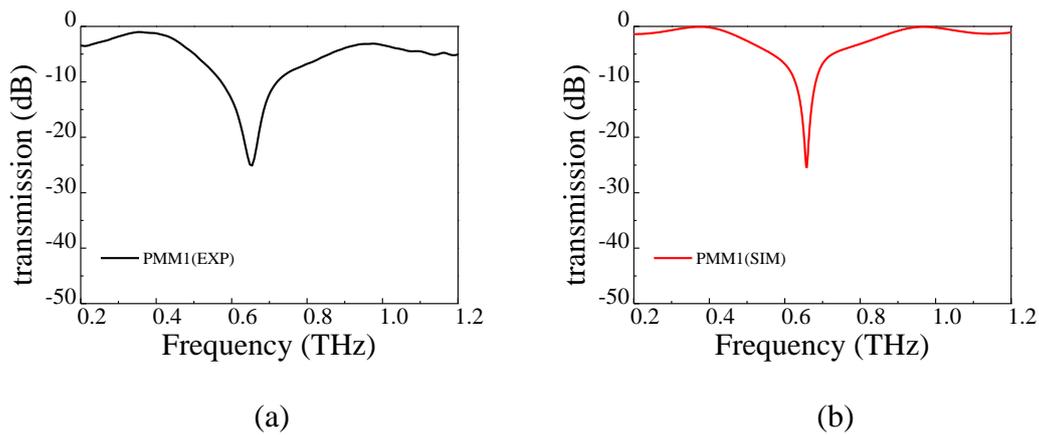


圖 3-5. *PMM1* 的(a)實驗頻譜與(b)模擬頻譜。

接著進行 *3DMM(3DMM)* 的模擬，將尺寸以及介電參數輸入至電磁模擬軟體。圖 3-6 為 *3DMM* 在模擬軟體中的模型， $e = 20 \mu\text{m}$ 、 $f = 60 \mu\text{m}$ 、 $g = 50 \mu\text{m}$ 、 $h = 6 \mu\text{m}$ 、以及 $i = 22.54 \mu\text{m}$ 。圖 3-7(a)為 *3DMM* 的實驗頻譜，而圖 3-7(b)為 *3DMM* 的模擬頻譜。*3DMM* 的實驗共振峰值落在 0.800 THz ，而實驗共振穿透率為 -41 dB 。*3DMM* 的模擬共振峰值落在 0.798 THz ，而模擬共振穿透率為 -38.6 dB 。實驗的共振峰值與模擬的共振峰值具有 0.02 THz 的差值，實驗的共振穿透率與模擬的共振穿透率具有 2.4 dB 的差值，而且模擬的共振頻譜比起實驗的共振頻譜具有更窄的頻寬。這些差值起因於 *3DMM* 的實際結構不同於模擬結構。圖 3-2(c)可以看出 *3DMM* 的內(外)銀壁對於分裂環中心向內(外)傾斜。實驗 *3DMM* 的內外銀壁並不是垂直於基板平面，但模擬 *3DMM* 的內外銀壁卻是垂直於基板平面。因此，實驗與模擬具有誤差。

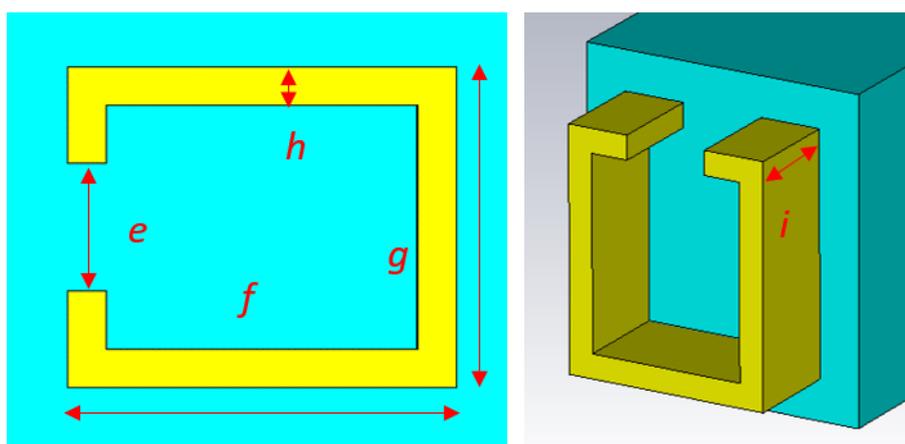


圖 3-6. 3DMM 在模擬軟體中的模型。

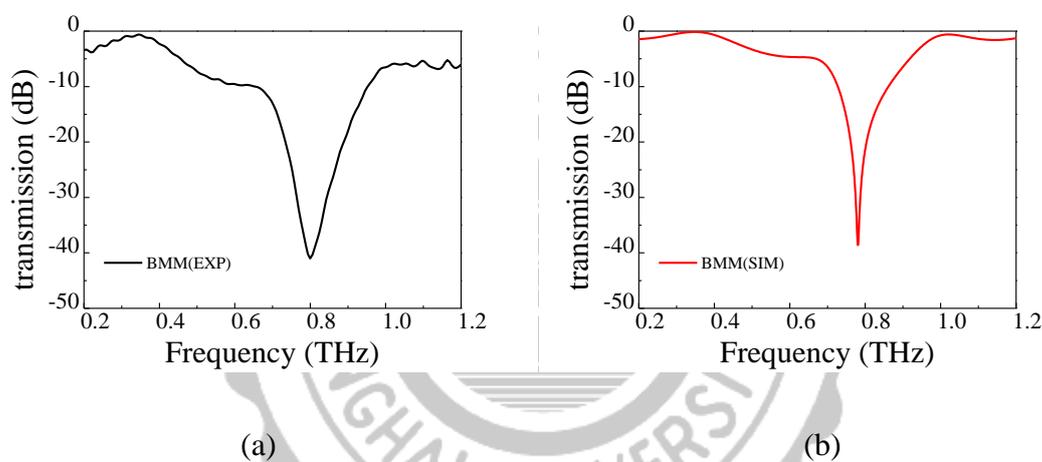
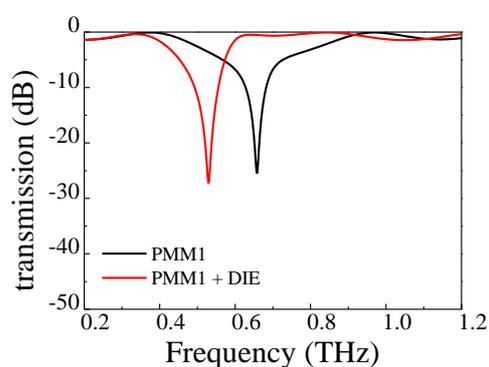


圖 3-7. 3DMM 的(a)實驗頻譜與(b)模擬頻譜。

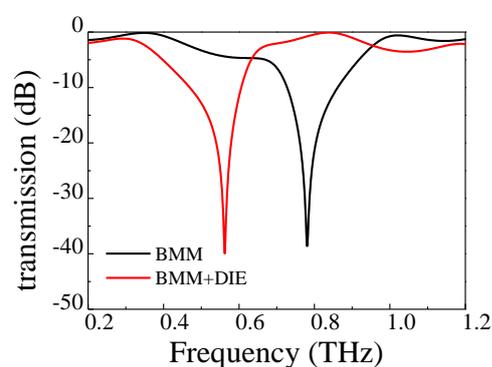
3-5 3DMM 加上介電物質的模擬頻譜

表 3-2 的實驗結果顯示 3DMM 深的吸收峰值以及對於介電材料敏感的兩項優點，前者已被 3-6 節中的模擬結果所驗證，接著也利用模擬驗證後者。圖 3-10(a)為 PMM1 覆蓋為 $26.75 \mu\text{m}$ 的介電物質之模擬頻譜，此介電材料的厚度設定為 $26.75 \mu\text{m}$ 。PMM1 電材料前後的共振峰值分別發生在 0.659 THz 與 0.529 THz ，頻譜移動量為 0.13 THz 。

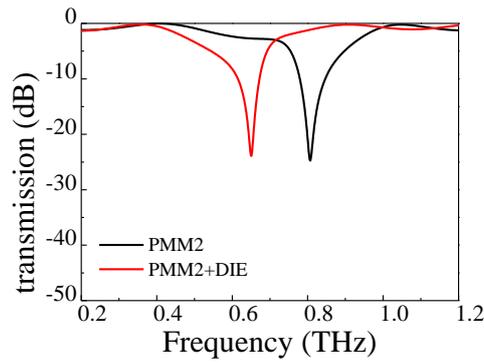
使用相同厚度($26.75\ \mu\text{m}$)的介電物質覆蓋在 3DMM 並進行模擬，如圖 3-10(b)。 3DMM 覆蓋介電材料前後的共振峰值分別發生在 $0.798\ \text{THz}$ 與 $0.563\ \text{THz}$ ，頻譜移動量為 $0.235\ \text{THz}$ 。接著，進行覆蓋於 PMM2 介電物質的模擬，如圖 3-10(c)。 PMM2 覆蓋介電材料前後的共振峰值分別發生在 $0.807\ \text{THz}$ 與 $0.651\ \text{THz}$ ，頻譜移動量為 $0.156\ \text{THz}$ 。表 3-1 與表 3-2 顯示，實驗的頻譜移動量接近模擬的頻譜移動量。在表 3-2 中， 3DMM 的頻譜移動量大於平面超穎材料的頻譜移動量。這種結果起源於 3D 的結構具有直立的銀壁。當覆蓋上一層介電材料後， 3D 結構所接觸到介電材料的表面積會比平面結構來得多，所以當周圍介電物質的折射率產生改變時， 3DMM 比起平面超穎材料具有較大的頻譜移動量。



(a)



(b)



(c)

圖 3-8. (a) *3DMM* 塗佈光阻後的兆赫波頻譜。(b) *PMM1* 與(c) *PMM2* 塗佈光阻後的兆赫波頻譜。

表 3-2. 平面與 *3DMM* 覆蓋光阻前後共振頻率的變化量。

	<i>3DMM</i>	<i>PMM1</i>	<i>PMM2</i>
介電材料覆蓋前的模擬頻譜(f_0) (THz)	0.798	0.659	0.807
介電材料覆蓋後的模擬頻譜(f_1) (THz)	0.563	0.529	0.651
頻譜移動量($\Delta f = f_0 - f_1$) (THz)	0.235	0.130	0.156

3-6 改變 *3DMM* 銀壁高度的模擬頻譜

表 3-1 與表 3-2 驗證了 *3DMM* 能受到更多介電物質的影響，使得 *3DMM* 比起 *PMM* 具有明顯的頻譜移動量。因此，利用模擬軟體將 *3DMM* 的銀壁高度從 $0 \mu\text{m}$ 漸漸升高至 $30 \mu\text{m}$ ，研究 *3DMM* 在空氣中高度對共振頻率的影響，如圖 3-11(a) 的黑線。此外，將 *3DMM* 覆蓋 $30 \mu\text{m}$ 的介電物質，並且把 *3DMM* 的銀壁高度從 $0 \mu\text{m}$ 漸漸升高至 $30 \mu\text{m}$ ，觀察 *3DMM* 在介電物質中高度對共振頻率的影響，如圖 3-11(a) 的紅線。圖 3-11(b) 為不同銀壁厚度 *3DMM* 的頻譜移動量。此移動量

為黑線減紅線所得到的值。圖 3-11(b)顯示，當銀壁越高時，覆蓋介電物質後，3DMM 接觸到介電物質的表面積增加，使得頻譜移動量隨之變大，因此越高的銀壁使得 3DMM 對環境折射率變化越敏感。

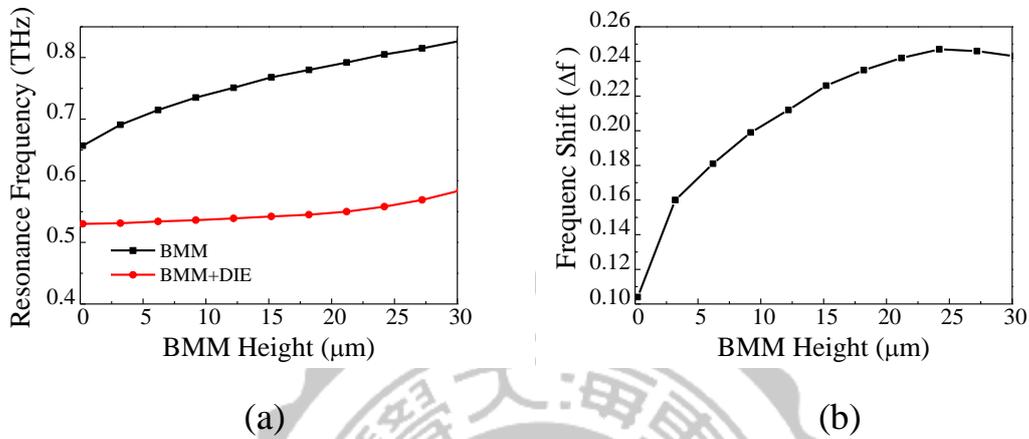


圖 3-9. (a)不同銀壁厚度 3DMM 在空氣(黑線)以及介電物質(紅線)中的共振頻率。(b)不同銀壁厚度 3DMM 的頻譜移動量。

3-7 研究 3D 與平面超穎材料的頻率敏感度

為了測試不同折射率對 3DMM 以及平面超穎材料的共振頻率影響。在電磁模擬軟體中，將 3DMM 與 PMM 覆蓋上介電物質，並且將折射率逐漸提高，觀察共振頻率的變化，分別如圖 3-12 黑線與紅線。定義圖 3-12 中黑線與紅線的斜率為頻率靈敏度(frequency sensitivity, S_f)[10]，

$$S_f = \frac{d}{dn}(\Delta f), \quad (4)$$

其中 Δf 為共振頻率的變化量， n 為介電物質的折射率。3DMM 的 S_f 為 0.135 THz/RIU，而 PMM 的 S_f 為 0.84 THz/RIU。因此，3DMM 比起

平面超穎材料對環境折射率的變化較靈敏。

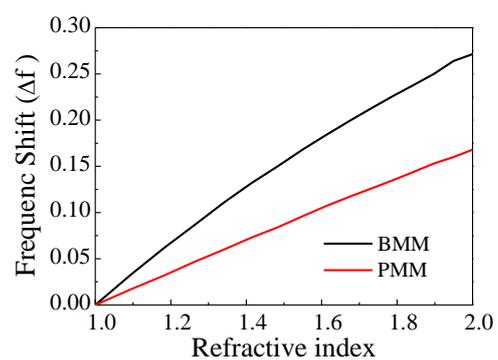


圖 3-10. 不同折射率材料於 3DMM 與 PMM 上的共振頻率變化量。



第四章 結論與未來工作

結論

本實驗藉由利用厚光阻製做 *3DMM*，它對兆赫波具有強烈的吸收以及對介電值變化擁有高敏感性。這是因為分裂環具有高深寬比的銀壁，造成小的共振穿透率。另外，銀壁接觸到介電物質的表面積大，因此 *3DMM* 對於周遭環境折射率的變化具有靈敏的響應。

將 *3DMM* 拆解成三部分，包含底部平面、外圍銀壁以及內圍銀壁。將這三部分放入電磁模擬軟體中，結果發現 *3DMM* 的共振頻率等於這三部分共振頻率之平均值。

利用模擬軟體發現 *3DMM* 與 *PMM* 周圍的折射率與共振頻率變化量成正比，其斜率可以視為超穎材料共振頻率對折射率的靈敏度(S_f)，*3DMM* 之 S_f 為 0.135 THz/RIU，*PMM* 之 S_f 為 0.84 THz/RIU，證明 *3DMM* 比平面超穎材料對介電物質有高的靈敏度。利用其頻率高靈敏度以及強烈吸收峰值，能夠用於生物感測器[11]與高效率的兆赫波濾波器。

未來工作

1. 本研究中 *3DMM* 製作過程中，易受溫度與濕度影響，使銀壁傾斜，

實驗時必須維持環境溫度與濕度。

2. 與參考文獻[8]做比較，以雙環的方式製做超穎材料，頻譜會有更高的 Q-factor，未來參考他的做法製做內外雙環的 3DMM，有機會增加共振吸收的效果。
3. 改變 3DMM 所乘載的物質並固定厚度，並記錄其改變共振頻率的變化量，以此變化量對照物質，介以檢驗物質。



參考文獻

1. N. Karpowicz et al. 2005. Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications. *Appl. Phys. Lett*, 86(5): 1–3.
2. J. B. Pendry, L. Martín-Moreno², F. J. Garcia-Vidal. 2004. Mimicking Surface Plasmons with Structured Surfaces, *Science*, 305(5685): 847–848.
3. W. L. Barnes, A. Dereux and T. W. Ebbesen, Surface plasmon subwavelength optics. *Nature Phys*, 424(6950):824-830.
4. K. Wang et al. 2011. Theoretical and experimental research on designer surface plasmons in a metamaterial with double sets of circular holes. *Opt. Express*, 19(12): 11375.
5. S. Linden et al. 2004. Magnetic Response of Metamaterials at 100 Terahertz. *Science*, 306(5700): 1351–1353.
6. Y. Liu and X . Zhang. 2011. Metamaterials: a new frontier of science and technology. *Chem. Soc. Rev*, 40(5): 2494–2057.
7. D. R. Smith et al. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity. *Phys. Rev. Lett*, 84(18): 4184–4187.
8. Y. S. Lin, Y. Qian, F. Ma, Z. Liu, P. Kropelnicki, and C. Lee, 2013. Development of stress-induced curved actuators for a tunable THz filter based on double split-ring resonators, *Appl. Phys. Lett*, 102(11), doi: 10.1063/1.4798244
9. S. Y. Chiam, R. Singh, J. Gu, J. Han, 2009. W. Zhang, and A. A. Bettiol, Increased frequency shifts in high aspect ratio terahertz split ring resonators. *Appl. Phys. Lett*, 94(6): 92–95.
10. W. S. Tsai, K. L. Lee, M. Y. Pan, and P. K. Wei. 2013. Increased detection sensitivity of surface plasmon sensors using oblique induced resonant coupling, *Opt. Lett.*, 38(23): 4962–4965.
11. J. Y. Lu et al. 2006. Terahertz microchip for illicit drug detection. *IEEE Photonics Technol. Lett*, 18(21): 2254–2256.