

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

繞射極限之突破：邊氏超透鏡紅外波段之實現與微波光學類 比實驗

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2112-M-009-040-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立交通大學光電工程研究所

計畫主持人：陳志隆

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 11 月 23 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

繞射極限之突破：邊氏超透鏡紅外波段之實現與微波光學類比實驗

Exploration on IR wavelength implementation of Pendry's superlens and its microwave optical analog

計畫編號：NSC 92-2112-M009-040

執行期限：92年8月1日至93年7月31日

主持人：陳志隆 (jlchern@faculty.nctu.edu.tw) 交大光電所

一、中文摘要

在本年度的計畫中，我們提出新型 DSRR 與 SPR 結構並在微波波段證明 DSRR 與 SPR 是一種擁有較佳特性的新型分裂共振環結構。DSRR 相較於 SRR 擁有較小的晶格長度，展現了在縮小體積上的應用性；而 SPR 則是擁有較大的頻寬，適合其他更進一步的應用。這些特性使得 DSRR 和 SPR 能夠順利的利用半導體製程製作。至於在紅外光波段部分，我們得到了一個初步但不夠完整的結果，這部分的實驗結果有賴更多更完整的樣品得到驗證。

關鍵詞：負折射率材質/

Abstract

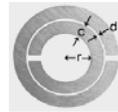
In this project, we proposed and experimentally identified several new types of meta-materials of negative index of refraction in microwave range. These form are proposed for practical implementation in optical range. However, current effort only revealed partial evidence in the 1.5 μ m optical range. More experimental efforts in corresponding optical range are involved.

Keywords: Meta-materials, Negative index of refraction

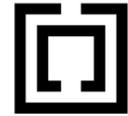
二、緣由與目的

負折射率的概念最早為1968年Veselago所提出，在當時，Veselago只是提出一種想法，並設想當磁導率跟介電常數發生時，會有和驚人的特性和應用。那個時候，並

無任何實驗輔助證明Veselago的想法是否正確。一直到1996年，英國皇家學院的Pendry等人證明了具有週期性的金屬條工作在截止頻率以下時，可以表現出相當於負介電常數的特質；藉由調整金屬條的寬度和週期，我們可以控制此週期結構的截止頻率。其後Pendry又證明了負磁導率的存在；一個利用分裂共振環所組成的陣列，將會在某個特定頻率表現出負磁導率的行為。這種分裂共振環稱為Split Ring Resonant - SRR (如圖一所示)



(圖一)



(圖二)

自從Pendry提出SRR和週期性金屬條的構想，便有許多前仆後繼的投入這塊領率，試圖找出能夠適當結合成負折射率的組合。2001年，美國聖地牙哥大學的Smith成功的利用改良後的SRR(如圖二所示)結合金屬的週期結構，以實驗方法在微波波段證明負折射率的存在。目前在微波波段的負折率材料已經發展成熟，眾人皆冀望此結果能夠成功的複製到光波波段，以期能發展出突破繞射極限的微光學元件。

光子在光子晶體能隙附近具有相當大的方向色散與光學異向性，適當的晶胞結構甚至可產生負型折射率材料，因此在微型光學成像系統之應用頗有潛力。我們應將光子晶體結構視為新型的光學人造材料，努力應用於微型光學成像系統，以縮小光學系統體積並提高其性能。本年度研究將持續前期的工作成果，著重在1.5 μ m波長工作。主要工作在發展波長1.5 μ m的光子

晶體結構 (與工研院光電所合作), 預期目標將朝向研發可突破繞射極限產生更小的聚焦光點的平面聚焦透鏡, 以供光學讀學頭之用。

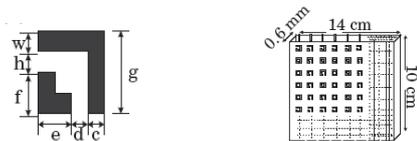
我們以 Pendry 發展左手材質在微波波段的實踐之技術為基礎, 發展出新穎的分裂共振環結構, 並將其原理和技術延伸到 1.5um 左手材質樣品的設計。透過工研院已有的半導體製程設備和將開發的新的製程技術發展製作樣品。待樣品完成, 再由交大已現有的儀器設備進行樣品的量測和設計的改善。

三、結果與討論

在這個計畫支持下, 我們提出幾個新型的結構並在微波波段得到驗證。

(1) Deformed Split Ring Resonator (DSRR)

(1. a) 原理



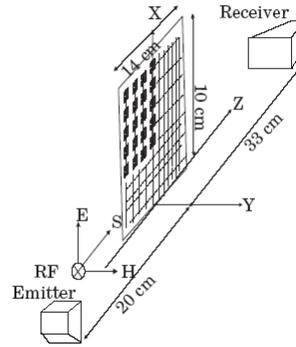
(圖三)

(圖四)

DSRR (如圖三所示) 是根據 SRR 的基本概念所衍生出的新型分裂共振環結構。DSRR 的上下半邊與 SRR 的兩個共振環作用相似。當磁場垂直通過此共振環時, 將會在共振環上產生強烈的表面電流, 藉此侷限住通過的磁場, 而產生負的磁導率。

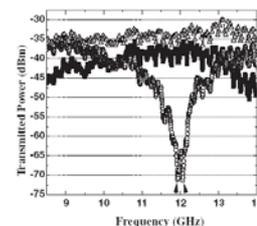
(b) 實驗

在本實驗中, DSRR 的規格和大小如圖三中所標記: $c=d=h=w=0.655$ mm, $e=f=1.31$ mm, $g=2.62$ mm。所有的 DSRR 如圖四所示, 都是製作在印刷電路板上, 一塊印刷電路板上有 20x28 個 DSRR, 其晶格長度為 5 mm (意即上下左右兩個 DSRR 之間的間隔為 5 mm)。而提供負介電常數的金屬條結構, 則製作在印刷電路板的另一面, 其規格為 0.254 mm x 100 mm, 晶格長度也是 5 mm。



(圖五)

本實驗的實驗架構如圖五所示。一個微波發射器放置在印刷電路板前 20 cm 處, 另一個微波接收器放在印刷電路板後 33 cm 處, 電磁波行進的方向為 Z。發射器的電場平行 X 軸, 磁場平行於 Y 軸; 也就是說, 當電磁場通過此週期結構時, 磁場會與 DSRR 的法線平行。



(圖六)

最後結果如圖六所示, 三角形曲線代表參考頻譜 (發射器和接收器中間無任何物體)、圓圈曲線為 DSRR、而黑色實線則表示 DSRR 和週期性金屬線的結合。圖中可以很清楚的觀察到, DSRR 所代表的圓圈曲線在 12GHz 附近形成了一個吸收頻帶。根據基本的電磁學原理, 此吸收頻帶所代表的意義即為負的磁導率; 也就是說, 當磁導率小於零時, 電磁波在此介質中呈現指數衰減, 因此我們在接收端觀察不到電磁波的存在。而當我們將代表負介電常數的週期性金屬結構和 DSRR 結合在一起時, 發現了令人興奮的結果。在圖六中我們觀察到加上了週期性金屬結構的 DSRR, 原本在 12GHz 附近的吸收頻譜消失了, 取而代之的是與參考頻譜相似的曲線。這代表原來在 11-13GHz 附近負磁導率所造成的吸收頻譜和負介電常數結合之後, 形成負的折射率, 使得本來呈指數衰減的電磁波變成可以在這複合介質中傳遞的電磁波。值得觀察的是, 在原本的吸收頻譜之外, 也就是

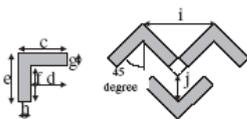
大於13GHz和小於11GHz的範圍，我們可以看到DSRR加上週期性金屬結構的穿透功率比單純的DSRR來的高，會發生這種現象的原因，乃是因為原本在吸收頻譜之外之處，磁導率是正的，加進了金屬結構之後，受到負介電常數的影響，電磁波會略有些衰減。這個現象也另外提供了一個複合的DSRR和金屬結構的確是負折射的證據。

(1.c)結論

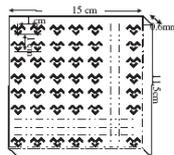
由實驗的結果得知，此DSRR結構雖然與SRR有著不同的排列，但是其卻與SRR一樣擁有負磁導率的特性。在此列出三個DSRR和SRR的異同處：①圖案上的不同：相較於SRR有著兩個共振環的結構，DSRR是由左右兩個共振環所形成的。②物理上的不同：對於原來的SRR而言，兩個分裂共振環的用意，乃是要在其極小的空隙之間形成強大的電容，藉以影響通過的電磁場。然而，相對於SRR，DSRR的運作原理有些不同之處。當磁場通過DSRR的結構時，會驅動兩邊各半個金屬條的電流，然後在這兩個金屬條之間的小間隙形成靜電場，藉此影響通過的電磁場。這和SRR利用兩個共振環之間的電容是有所不同的。③特性長度的不同：本次實驗所規劃DSRR的大小和Pendry所提出的SRR大小都一樣是2.62 mm x 2.62mm，但是其共振頻率卻有所不同。在同樣的晶胞大小下，SRR的共振頻率約為10GHz，DSRR的共振頻率卻約為12GHz，這表示在同樣的共振頻率下，DSRR擁有較小的晶格長度，可以有效的減少整個負折射率材質的面積大小。對於我們想要將負折射率應用到光波波段來說，DSRR無疑是個較好的選擇。

(2)Smiling Pattern Resonator (SPR)

(2.a)原理



(圖七)



(圖八)

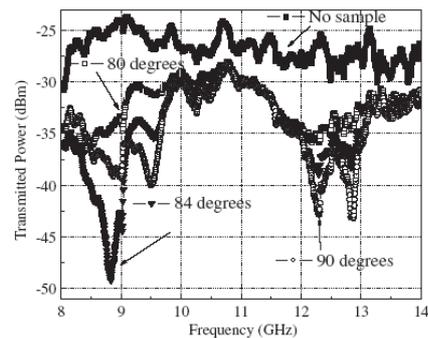
SPR (如圖七所示) 是根據DSRR的基本概念所衍生出的新型分裂共振環結構。每一個SPR的結構都包含三個Λ形狀的直角金

屬條，每一個Λ都和DSRR較大半邊的金屬結構相同。其形狀像是一個微笑的圖案。SPR的物理特性和DSRR幾乎一樣，當磁場垂直通過此共振環時，也會在共振環上產生強烈的表面電流，藉此侷限住通過的磁場，而產生負的磁導率。只是排列的方式有所不同。其目的在於SPR會產生兩個不同的共振頻率而得到較大的頻寬。

(2.b)實驗

在本實驗中，SPR的規格和大小如圖七中所標記： $c=e=2.62$ mm， $d=f=1.965$ mm， $g=h=0.655$ mm， $i=3.846$ mm， $j=0.935$ mm。和DSRR相同，SPR也是製作在印刷電路板上(圖八)，一塊印刷電路板上有15x12個DSRR，其晶格長度為10 mm。而提供負介電常數的金屬條結構，則在印刷電路板的另一面，其規格為0.254 mm x 100 mm，晶格長度也是10 mm。

SPR的實驗架構和DSRR的實驗架構相同。一個微波發射器放置在印刷電路板前20 cm處，另一個微波接收器放在印刷電路板後33 cm處，電磁波行進的方向為Z。發射器的電場平行X軸，磁場平行於Y軸；也就是說，當電磁場通過此週期結構時，磁場會與DSRR的法線平行(我們暫定此狀態為90度入射)。



(圖九)

最後結果如圖九所示，方形曲線代表參考頻譜(發射器和接收器中間無任何物體)；空白方形、倒三角形和圓形曲線分別代表SPR在80度、84度和90度入射時的吸收頻譜。圖中可以很清楚的觀察到，SPR所形成的吸收頻譜不但在12-13GHz之間有吸收的現象，在較為低頻的8-9GHz左右也有一個吸收頻帶，這表示SPR為一雙共振結構。此

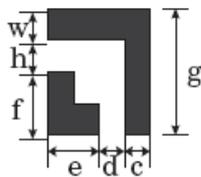
外、SPR在低頻時的吸收以84度最為明顯，在高頻部分乃是90度最為顯著。這樣的實驗結果表示不同的角度對不同的吸收頻帶是有影響的，且其對角度的敏感度甚高。且這些吸收頻帶和DSRR的吸收頻帶有相同的意義，一樣都具有磁導率小於零的特性。

(2.c)結論

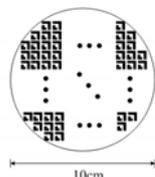
由實驗的結果得知，此SPR結構雖然是DSRR的變形，但是其雙共振的特性卻產生較大的頻寬。對SRR而言，其頻寬約為10% ($\Delta\omega/\omega_0 = 10\%$)，但是在SPR的吸收頻譜中，我們可以發現，在8-10GHz時，頻寬約為14%，而11-14GHz也有8%，其總頻寬超過20%，這個數字幾乎是SRR的兩倍。況且，SPR和DSRR一樣，結構不似SRR複雜，當我們想要利用半導體製程製做光波波段所用的樣品時，DSRR和SPR的結構顯然是較為方便且可行的結構

(3) Deformed Split Ring Resonator (DSRR) by IZO

(3.a)原理

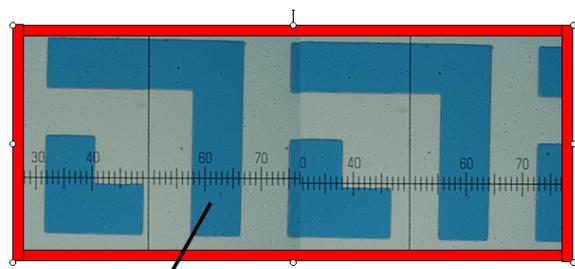


(圖十)



(圖十一)

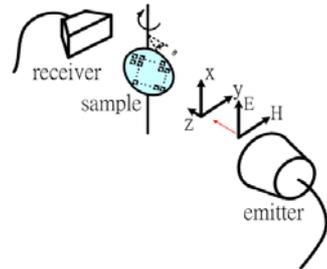
在此實驗中，基本原理都與(1)相同，但是在此我們以透明導電材料IZO取代原本的金屬線，並將DSRR製作在玻璃和矽的基板。實際製作出的情況如圖十二所示：



(圖十二)

(3.b)實驗

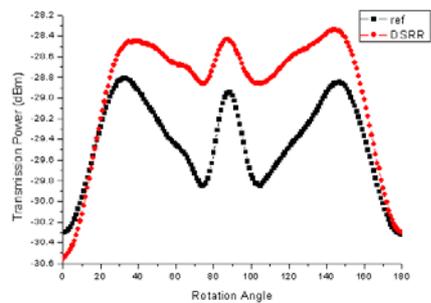
在本實驗中，DSRR的規格和大小如圖二中所標記： $c=d=h=w=0.2\text{ mm}$ ， $e=f=0.4\text{ mm}$ ， $g=1\text{ mm}$ 。所有的DSRR如圖四所示，都是製作在玻璃板或矽基板上，使用的金屬材料為IZO，一塊基板的直徑為10 cm，其晶格長度為1.2 mm(意即上下左右兩個DSRR之間的間隔為1.2 mm)。



(圖十三)

本實驗的實驗架構如圖十三所示，操作波長為10.718GHz。一個微波發射器放置在印刷電路板前20 cm處，另一個微波接收器放在印刷電路板後33 cm處，電磁波行進的方向為Z。發射器的電場平行X軸，磁場平行於Y軸；也就是說，當電磁場通過此週期結構時，磁場會與DSRR的法線平行(在此實驗中定義為0度)。

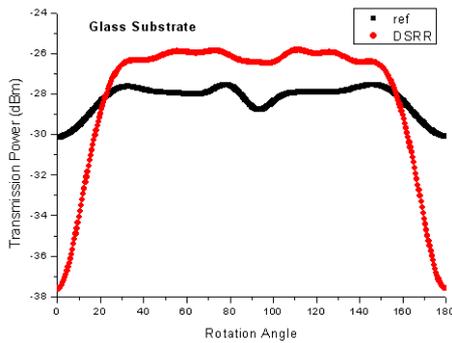
1. 矽基板



(圖十四)

最後結果如圖十四所示，黑色曲線代表參考頻譜(樣品為矽基板上佈滿一層IZO)、紅色實線則表示DSRR。圖中可以觀察到，DSRR所代表的紅色曲線在0度時的吸收與參考片相比並不明顯，約莫只有0.2dBm的吸收。根據前一部份的實驗，我們期待DSRR在此一情況下會有明顯的吸收，但是結果卻與預期的有所差異，這表示用IZO製作在矽基板上的DSRR，也就是材料會對實驗結果造成一定程度的影響。

2. 玻璃基板



(圖十五)

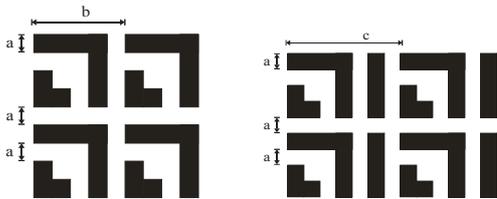
最後結果如圖十五所示，黑色曲線代表參考頻譜（樣品為玻璃基版上佈滿一層 IZO）、紅色實線則表示 DSRR。圖中可以清楚的觀察到，DSRR 所代表的紅色曲線在 0 度時的吸收與參考片相比，約莫短少了 8dBm。根據前一部份的實驗，我們期待 DSRR 在此一情況下會有明顯的吸收，而實驗結果也和我們所預期的吻合

(3.c) 結論

由實驗的結果，我們可以歸納出幾點結論：①對於同樣的圖案，在不同基版上的實驗結果會有所不同，這也表示材料對實驗結果會有一定的影響性。②透明導電材料 IZO 乃是另一個可行的選擇。由於接下來我們的目標乃是在紅外波段實現負折射率材料，因此選擇一個紅外波段適合的材質便是一個重要的課題。IZO 對於紅外乃至於可見光而言，是一種透明電極材料，相對於金屬材質在光波段的大反射率，IZO 或許可以提供我們另外一個選擇性。而本實驗成功的印證 IZO 在微波波段的可行性，也替接下來的實驗打下一個較為穩固的基礎。

光學波段之驗證:

(1) 原理

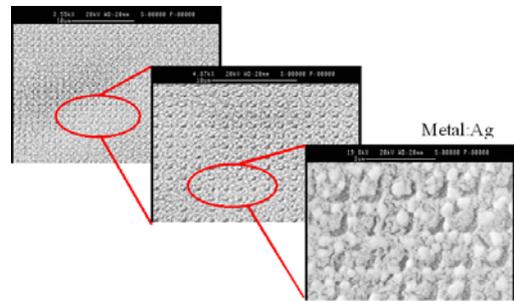


(圖十六)

(圖十七)

基於 DSRR 在微波波段的成功驗證，接下來我們想要將其光波波段實現。一般的半導體製成所用的基版大都為矽，對於紅外

光而言，矽是一種反射極為嚴重的材料，在 $1.5 \mu\text{m}$ 時，矽的反射率高達 50%，在實驗上，如此大的反射率可能造成一些不必要的效應像是散射。更嚴重的是，假使最後在光波波段成功的證明負折射率的存在，矽的高反射率也會使得整個微光學元件的效率大打折扣。因此，在此工研院光電所利用半導體製程的技術，將圖案的金屬條製作在壓克力的基版上，以期達到最大的效益。對 $1.5 \mu\text{m}$ 的紅外光波段來說，壓克力基版是一種透明的材料，因此不會對我們即將要進行的實驗有太大的影響。製作出來的樣本在 AFM 之下情形如圖十八所示：

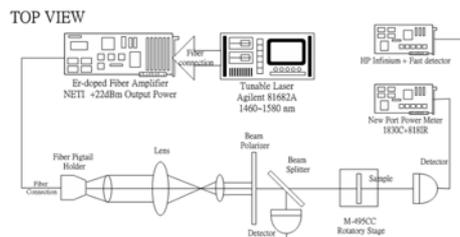


(圖十八)

礙於半導體製程上製作長直金屬線的技术十分困難，以及所有的圖案都只能製作在同一面的限制，因此我們將原本 DSRR 加上週期性金屬結構的圖樣作了些許的變化（如圖十七所示），在此結構中，DSRR 和週期性的金屬結構仍可各自發揮負磁導率和負介電常數的作用，而結合成為複合的負折射率材料。

(2) 實驗

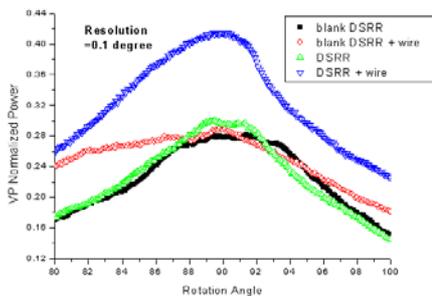
在本實驗中，DSRR 的規格和大小如圖十六中所標記： $a=0.2 \mu\text{m}$ ， $b=1 \mu\text{m}$ ， $c=1.4 \text{mm}$ 。所有的 DSRR 如圖十六和圖十七所示，都是製作在壓克力基版上。整塊重複圖案的區域為 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 。





(圖十九)

本實驗的實驗架構如圖十九所示 (Layout 與實際情況)。光源為一可調式雷射 (1546-1580nm)，後端接上一光源放大器以增加光的強度，光源經過光纖之後以一透鏡組加以擴束。出光之後以一偏振片控制光的偏振，使得光源的偏振方向垂直光學桌；也就是說，當雷射光通過樣品時，磁場的方向會和DSRR的法線方向平行。樣品下方為一旋轉平台，可以控制樣品和入射光的相對角度(我們定DSRR的法線與入射光垂直時為90度入射)。整個實驗過程除了最後接收雷射光的光偵測器之外，另外在出光處以一分光片監測雷射光的穩定度，以消除任何雷射光不穩所造成的效應。



(圖二十)

實驗結果如圖二十所示，在1550 nm 的波長下，黑色線blank DSRR代表在壓克力的基版上有像圖十DSRR的溝槽，但無DSRR的金屬線；紅色線blank+DSRR代表在壓克力的基版上有如圖十七的溝槽，但無金屬線於其上。這兩條曲線是用以消除所有非DSRR和結構性金屬所造成的效應，像是基版對光的影響等等，藉以確保我們所觀察到的效應皆為DSRR所造成。在圖中我們可以觀察到，代表圖十七的綠色線和代表圖十八的藍色線在90度入射時有大約15%的功率差異，且DSRR的功率比DSRR+wire來得小。

(3)結論

在光波波段的實驗，我們需十分小心，在微波波段時，微波的波束遠大於基版的厚

度，因此無須考慮任何波束被基版阻擋的問題；但是在光波波長時，基版的厚度為2mm，相對於直徑5mm的雷射光而言，基版的厚度不可忽略，這也是為什麼壓克力基版優於矽基版的原因。因此，實驗過程中的擺設跟對準就成了十分重要的課題。對此實驗結果，可能的原因有兩種：一是DSRR 和週期性金屬結構的確發揮其作用，成功的在光波波長造成負折射率和負介電常數，所以在90度入射時，我們可以看到只有負導磁率的DSRR之穿透功率比結合了負導磁率和負介電常數的DSRR+wire的功率來的高。另外一個可能的原因則是基版的厚度所造成的影響，由於製成技術的限制，使得每個基版的厚度不盡相同，因此造成一個巧合的結果，且因為光電所目前無法再提供同樣品作為輔助驗證之用，因此我們無法完全忽略此一可能性。且實驗中最奇怪的一點乃是，在圖二十中90度入射時，DSRR不似微波波段有一明顯的吸收頻帶，這也是我們必須釐清的重點。

在國科會經費支援下與國家奈米實驗室與工研院光電所的技术支援下，我們從2003年到2004年相關論文發表如下：

70. Detection of Subwavelength Slit-width Variation with Measurements in the Far Field using an Embedded-aperture Interferometer configuration, **J. of Optical Society of America (JOSA) A**, (2004) (accepted) S.-C. Chu and J.-L. Chern
69. Electromagnetic resonance in deformed split ring resonators of left-handed meta-materials, **J. Appl. Phys.** 96, 1979-1982 (2004) Y.-J. Hsu, Y.-C. Huang, J.-S. Lih, and J.-L. Chern
68. Transmission characteristics of smiling pattern resonators, **Japan J. Appl. Phys. (Letter)** 43, L669-672 (2004)

- Y.-J. Hsu and J.-L. Chern
67. Characterization of the Subwavelength Variation Signature from Far-field Irradiance, **Optics Lett.** 29, 1045-1047 (2004) S.C. Chu and J.-L. Chern
66. Transmission Characteristics of Deformed Split-Ring Resonators, **Japan J. Appl. Phys. (Letter)** 43, L190-193, (2004), Y-C Huang, Y-J Hsu, J-S Lih, and J-L Chern,
65. Far-Infrared Resonance in Split Ring Resonators, **Japan J. Appl. Phys. (Letter)** 43, L176-179, (2004), A-Chuan Hsu, Y-K Cheng, K-H Chen, J-L Chern, S-C Wu, C-F Chen, H. Chang, Y-H Lien and J-T Shy
- [4] D. R. Smith, S. Schultz, P. Markos, and C. M. Soukoulis, “Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients”, *Phys. Rev. B* **65**, 195104 (2002).
- [5] J. B. Pendry, “Negative Refraction Makes a Perfect Lens”, *Phys. Rev. Lett.* **85**, pp. 3966-3969 (2000).
- [6] E. Ozbay, K. Aydin, E. Cubukcu, and M. Bayindir, “Transmission and Reflection Properties of Composite Double Negative Metamaterials in Free Space”, *IEEE Trans. Antennas Propagation* **51**, pp. 2592-2595 (2003).
- [7] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and I. Youngs, “Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures”, *Phys. Rev. Lett.* **76**, pp. 4773-4776 (1996).

論文發表與專利撰寫仍努力中。

四、計畫成果自評

整個計畫作起來很吃力，主要是在沒有好的樣本。雖然有微波波段的進展與驗證，但光波仍有待確認。

雖然藉由工研院光電所開發新的製程作出樣本，有部份數據支持 1.5 μ m 波段的可行性，但仍需更多的實驗數據。

五、參考文獻

- [1] V. G. Veselago, “The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ ”, *Sov. Phys.-Usp.* **10**, pp. 509-514 (1968).
- [2] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, “Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47**, pp. 2075-2084 (1999).
- [3] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, “Experimental Verification of a Negative Index of Refraction”, *Science* **292**, pp. 77-79 (2001).