

奈米共振腔超穎表面結構製作及其光學特性量測

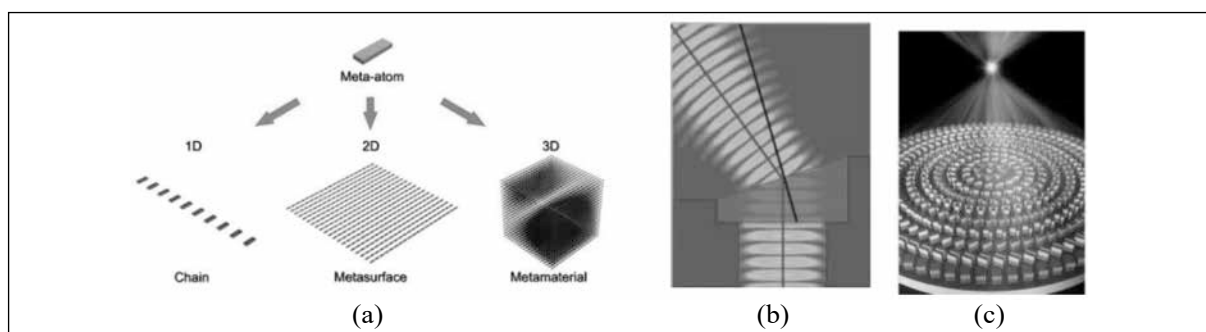
本研究自主開發出一套高解析度且大面積的奈米壓印設備，應用於製作奈米級的金屬結構，以實現具有聚焦功能之穿透式電漿子超穎介面 (Plasmonic Meta surfaces) 的超穎透鏡 (Meta lens)。超穎透鏡可以克服傳統透鏡成像能力受到幾何尺度之限制和繞射等影響，達到在數百奈米的尺度下具有聚焦與高解析度的光學特性。本研究之目標為製作總高度 600 nm 的超穎透鏡，經量測在入射近紅外光時，聚焦效率約為 33 %。實驗流程是在 2 吋玻璃基板上製作出三層金屬高度為 40 nm 結構，並且包覆三層高度為 200 nm 玻璃材質介電層。為達成共振腔的目的，第一層和第三層為相互正交且線寬 100 nm、週期 200 nm 的金屬線光柵；第二層則為各種不同設計的奈米圖案化金屬結構，最後組成一超穎透鏡，以實現光學或光電元件的薄型化。

■ 丁昱淳、李永春

關鍵詞：奈米壓印、電漿子超穎介面、超穎透鏡

自從 2000 年可以透過超穎材料 (Meta-Material) 控制光學現象的概念被提及，其成為近 20 年內發展最快速的研究領域之一 (D. R. Smith, et al., 2000)。超穎材料是由次波長尺度的超穎原子 (Meta-Atoms) 組成如圖一 (a) (J. Wang, and J. Du, 2016)，透過控制其的尺寸、距離、排列順序、旋轉角度和材料性質等控制電磁波波前相位，達到非自然界存在的光學現象 (D. R. Smith, et al., 2000), (W. Cai and V. Shalaev, 2010)，例

如讓光朝反方向偏折的負折射率 (Negative Refractive Index) 圖一 (b) (T. Upadhyaya et al., 2022)、超穎透鏡 (Super-Resolution Lens) 圖一 (c) (S. Wang et al., 2017) 等。但是由於高損耗、繞射以及 3 維材料製作上的困難，科學家轉而研究超穎表面；超穎表面也稱為 2 維超穎材料，由相同高度的超穎原子排列而成，並且發現超穎表面仍可以達到與 3 維結構相同的效果，如操控相位、振幅、偏振等 (Nanfang Yu et al., 2013), (N. Yu

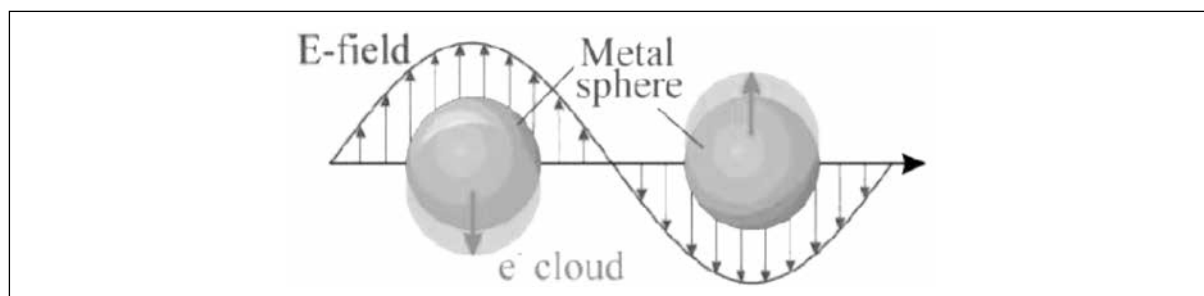


圖一 (a) 超穎原子、超穎材料、超穎表面、超穎鍊，(b) 負折射，(c) 超穎透鏡示意圖

et al., 2017), (A. V. Kildishev et al., 2013), (M. A. Kats et al., 2013), (C. L. Holloway et al., 2012)。因此超穎表面在近幾年多被設計於製作有別於毫米等級傳統光學元件的奈米等級超薄型光學元件。

本研究製作的為穿透式電漿子超穎介面。有別於以往反射式電漿子超穎表面，穿透式電漿子超穎介面超穎表面的設計概念是利用金屬和介電層的組合，透過類似

雷射共振腔的概念，調整層厚度和材料特性，以實現局域化表面電漿共振效應。對金屬顆粒施加電場產生侷域性表面電漿共振 (Localized Surface Plasmon Resonance)，自由電子會根據電場的方向進行類似於電偶極子的振盪運動，會在金屬顆粒的表面周圍形成強烈的電場增強效應，如圖二 (J.Wang, and J. Du, 2016)，以達到高效率的穿透式電漿子超穎表面。



圖二 侷域性表面電漿共振

隨著科技的進步，人們對於材料尺寸的微小化需求不斷增加，其中材料和元件的尺寸已經降至微小的奈米級別。而奈米壓印微影技術 (Nanoimprinting Lithography; NIL)，為實現奈米結構的一種重要方法。奈米壓印技術的優點包括高度的解析度、低成本、高效率、應用於多種材料。無論是在光學、電子、生物醫學還是其他領域，奈米壓印都展示出巨大的應用潛力。通過選擇不同的材料、結構和製程參數，我們可以製造出各種奈米級元件，光通元件、超穎表面、太陽能電池、抗反射蛾眼結構……等等，且證明其解析度能到達 10 nm 的等級 (P. R. Fabian and S. Y. Chou, 2008), (S. Y. Chou et al., 1995)。奈米壓印有熱壓印技術、步進感光成形奈米壓印 (M. Colburn et al., 1999)、軟微影成像技術、接觸式金屬轉印與遮罩植入式為影技

術 (Y. C. Lee and C. Y. Chiu, 2008) 等。本研究利用自行開發的壓印機台結合由普林斯頓大學的 S. Y. Chou 熱壓印技術 (S. Y. Chou, 1995) 不會受到光學設備的限制的優點和哈佛大學的 George M. Whitesides 提出軟微影成像技術 (Micro-Contact Printing, u-CP) (Y. Xia et al., 1996) 中，可撓性的 PDMS 適合用在各種不平整或是有曲率的基板上等優勢製作超穎表面。

本研究將展示具有聚焦功能的高效能穿透式的電漿子超穎光學元件，選擇金作為超穎原子，其具有製程容易且有良好保存性的特點。通過奈米結構和特定偏振入射光的共振效應，在近紅外波段實現了聚焦等光學效應，並通過引入奈米共振腔的概念，使散射光能在進入遠場之前與多層電漿子超穎表面進行多次交互作用，實現具有聚焦功能的高

效能穿透式的電漿子超穎光學元件，並且能夠對未來的穿透式平面光學元件能做出更多貢獻。

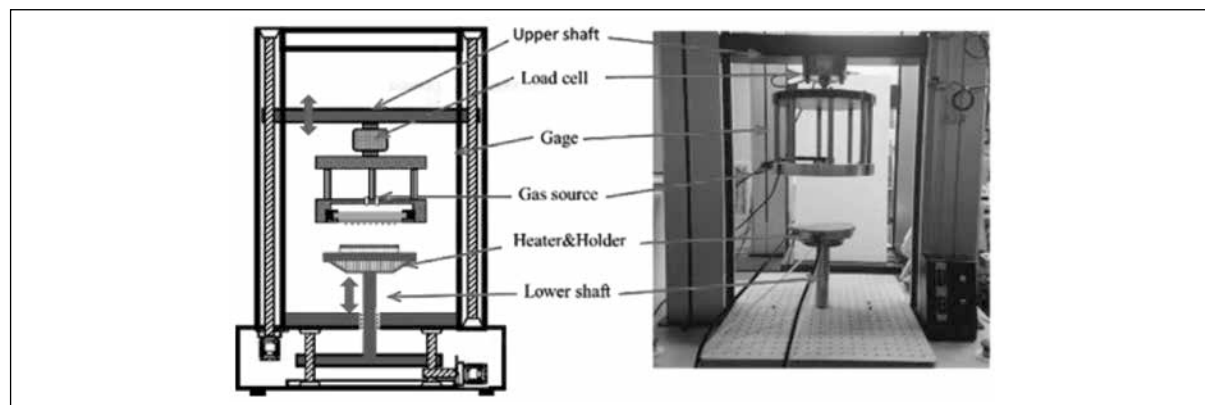
壓印系統與模仁製備

一、硬體架構

本實驗開發的壓印機台是由傳統的拉伸機改造而成，如圖三所示，機台的上下軸可獨立運動，設置上下軸獨立運動的目的是為了讓壓印製程有最大靈活性，以利執行壓印以及脫模。

在壓印系統中，上軸加裝一量測荷重元，並在下方連接氣壓治具，此治具的組成為一鋁合金圓盤、鋼柱支架，並在氣壓治具下放置撓性 PDMS，且 PDMS 上方有通以氣流道，可使腔體加壓至 1~3 atm 的壓力使

PDMS 呈現一凸度，目的是讓壓印時的壓力分佈能較為平均，且確保大面積的成功率以及每區的結構高度相同。PDMS 下方可以放置壓印的模仁，並與下軸待壓印的基板接觸進行壓印。下軸部分裝置真空加熱吸盤，內部加熱是由四塊陶瓷加熱片組成。目的是若我們使用熱壓印阻劑時，需要先將基板上的阻劑加熱到玻璃轉換溫度再進行壓印，並透過下軸的獨立運動可以讓基板與模仁順利進行脫模，此外在壓印時也需要將基板固定在下軸，所以需要真空吸盤來固定基板。而做成獨立運動的優點是，如果要使用光固化的壓印阻劑進行壓印時，只需更換治具就能進行曝光固化；但缺點是每次要進行不同製程時需反覆架設機構，會略為繁複（杜珮綺，2019），（朱致緯，2019）。



圖三 壓印機台示意圖

二、模仁製備及翻模材料

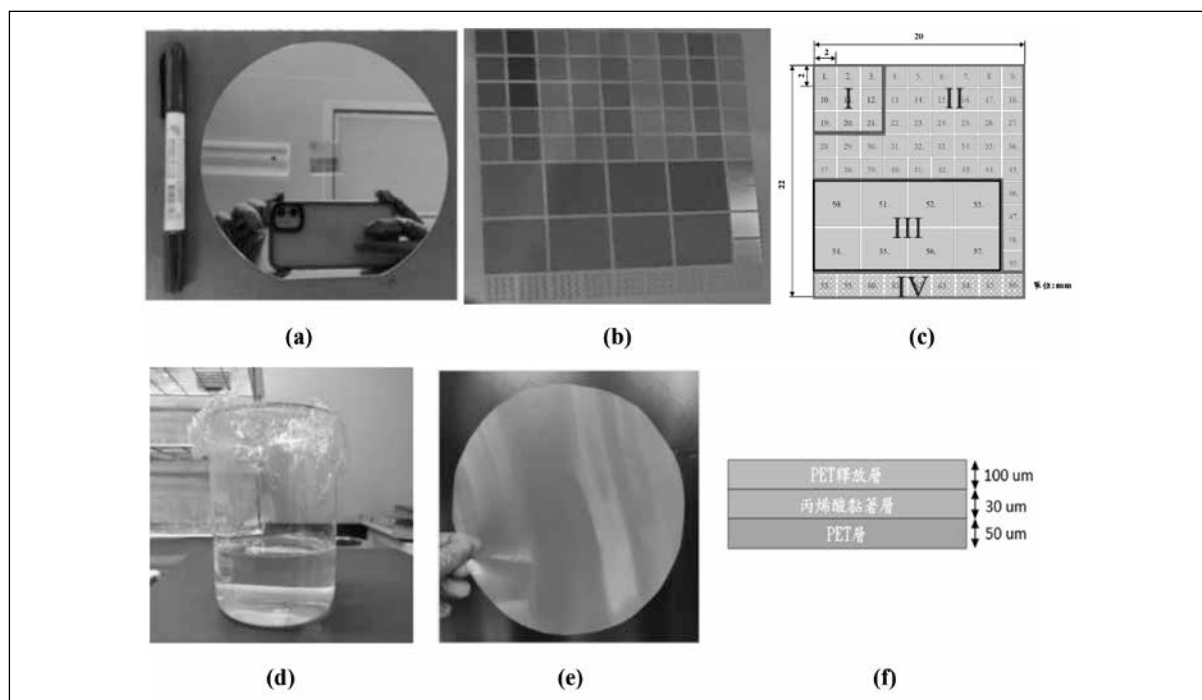
本研究 6 吋矽母模仁上的圖形是由本研究團隊設計，再交由 Benchmark Technologies Inc. (Lynnfield, Massachusetts, U.S.A.) 代工製造，模具的實體圖如圖四 (a)、(b) 所示。

矽母模仁的佈圖設計為在 20 mm × 20 mm 的範圍內設計四種不同的結構形貌，並將這四種結構在 20 mm × 20 mm 的面積

中劃分成四個區域 (I、II、III、IV)，如圖四 (c)，依序分別為 I 單元結構；II. 梯度板；III. 光柵；IV 超穎透鏡，並且在每一個區域中，又會區分成 2 mm × 2 mm (在 I、II、IV 區) 與 4 mm × 4 mm (在第 III 區) 的小區域，這些區域分別對應不同的光學效應。本實驗利用區域 64、65 區製作具有聚焦光學效果的超穎透鏡。超穎透鏡 SEM 模具形貌確認圖，如圖四 (d)，以及週期為

200 nm，線寬為 120 nm 線光柵的 50 區為製作一、三層光柵結構，SEM 模具形貌上視圖確認圖如圖四 (e)，因超穎表面高度結

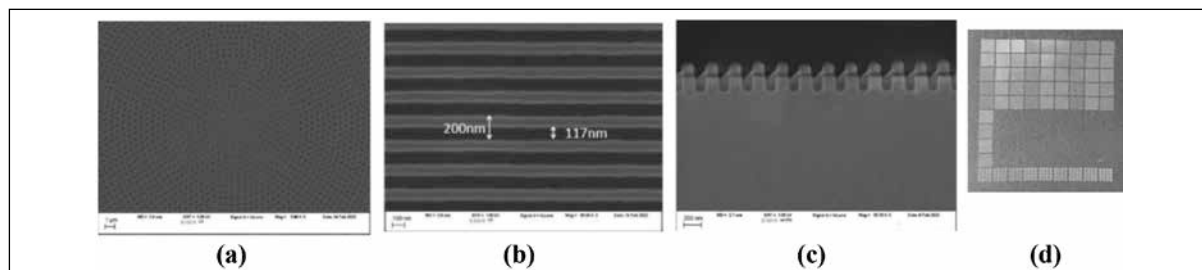
構一致，因此以 50 區的結構高度 150 nm 作為參考依據，如圖四 (f)。



圖四 (a) 矽母模仁實體圖，(b) 矽母模仁結構放大圖，(c) 超穎表面示意圖，(d) 超穎透鏡模具形貌，(e) 週期為 200 nm，線寬為 120 nm 線光柵的 50 區模具上視圖，(f) 50 區結構高度 150 nm

最早奈米壓印製程主要都是利用硬質母模仁直接對基板進行壓印，由於硬質模仁成本高、使用壽命低且壓印缺陷多，因此有文獻研發出高分子材料作為軟性模仁取代傳統硬質模仁 (L. Liu et al., 2016)，本實驗利用聚二甲基矽氧烷 (Polydimethylsiloxane, PDMS) 作為撓性壓印背板，以便在進行壓印時可以提高大面積的成功率。再經由利用聚乙烯醇 (Polyvinyl Alcohol, PVA)，如圖五 (a) 所示，只要碰到水就會分解的特性，翻製軟模壓

印可以大大提升模具的壽命，且 不影響結構的製作結果，上述提到的 PVA 是翻模材料，真正把 PVA 從模具上取下的是利用向強科技生產的熱解離膠帶，如圖 5 (b) 所示，型號為 RHT526-S，熱解離膠帶的結構如圖五 (c) 所示，其原理是利用其底下 PET 黏著層將 PVA 從模具上帶起來，在利用熱解膠帶熱解離的特性在溫度達到時發泡並分離 PVA 薄膜於晶圓上，翻製結果如圖五 (d) 所示。



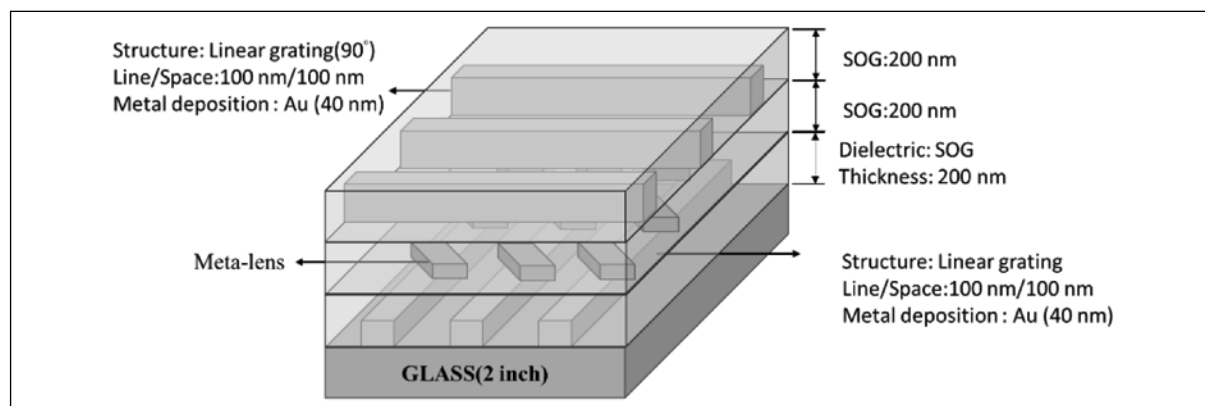
圖五 (a) PVA 溶液，(b) 熱解膠帶實體圖，(c) 熱解膠帶結構示意圖，(d) PVA 翻製結果

超穎表面結構製作與量測

一、穿透式電漿子超穎表面架構

本研究團隊設計的是具有「共振腔效應」的超穎表面，設計特點包含週期性以及多層結構。我們在玻璃基板製作三層奈米金屬結構，利用異常透射 (Anomalous Transmission) 的特性達到操控電磁波波前的能力，產生偏振轉換、光束偏折以及聚焦之

光學效果。結構中一、三層是相差 90° 之金屬光柵結構，當作偏振選擇的功能；中間層則依照光學性能分為 3 種結構：1. 單元結構、2. 梯度版、3. 超穎透鏡；一、二、三層光柵之金屬高度設計為 40 nm 的製作以及量測結果，此外三層結構都分別包覆 200 nm 的 SOG (Spin On Glass) 當作介電層。圖六為三層結構之示意圖。



圖六 三層結構之示意圖

二、超穎透鏡結構製作

本實驗是利用奈米壓印製作三層超穎表面的結構，金屬高度為第一、二、三層為 40 nm，高度的結構進行量測。結構製作部分利用壓印製程配合舉離製程製作，並且旋塗 SOG，由於 SOG 旋塗上之後膜厚無法到達理想的 200 nm，所以本研究嘗試以乾蝕刻的方式將 SOG 削平至理想尺寸，完成第一層的製作。第二層和第三層為相同的製作方式。

本實驗使用的阻劑為熱壓印膠 (mr-I 7010) 為 mr-I 7000R 系列 (Micro Resist Technology, Berlin, Germany)。在介電層的選擇上是使用美國公司 Desert Silicon 所提供的 NDG-2000 系列，其主要參雜的物質是矽 (Si)，主要功能是在試片上形成絕緣層、介電層、遮罩層 (Mask layer)、防潮保

護層 (Silicate) 等等，外觀上呈現透明，只需經過旋塗、加熱就能形成固態薄膜。以下會說明第一層的製作方法和每一層的對位方法。第一層的製作方法為，其流程圖如圖七 (a) ~ (l) 所示：

- (a) 將 2 吋玻璃基板以氧電漿功率 150 W、氧氣通量 20 SCCM 進行 80 秒氧電漿轟擊，進行表面改質，增加親水性。
- (b) 將玻璃基板以 5000 rpm 維持 30 秒旋塗 mr-I 7010R 壓印膠。
- (c) 以 100°C 、2 分鐘進行軟烤，軟烤完畢後放置 1 分鐘等待試片冷卻。
- (d) 將翻製好的熱解膠帶 PVA 結構面與軟烤後的熱壓印膠貼合，並將 PDMS 背板固定於上軸，並給予上軸一正壓 0.01 MPa，使背板產生一凸度。
- (e) 下軸以 0.02 mm/s 的速度上升，使其慢

慢貼合上軸，當負荷顯示為 60 N 時則停止下軸上升，接著以每秒 0.005 MPa 階段式升壓至 0.180 MPa；等壓力值到達 3000 N 後，以 4 分鐘升溫至 120 °C，並持溫 6 分鐘進行熱壓印。

- (f) 待溫度降至 100 °C 時，熱解膠帶達到發泡溫度，以每秒 0.005 MPa 將背板洩壓至 0.01 MPa，並以 0.02 mm/s 的速率進行脫模，脫模過程因為熱解膠帶達到發泡溫度，所以會和 PVA 分離，所以脫模完畢會只剩下 PVA 在基板上，發泡層會與上軸一同離開基板。
- (g) 將試片泡入 55 °C 之 DI water 中使 PVA 解離乾淨，即完成壓印製作。

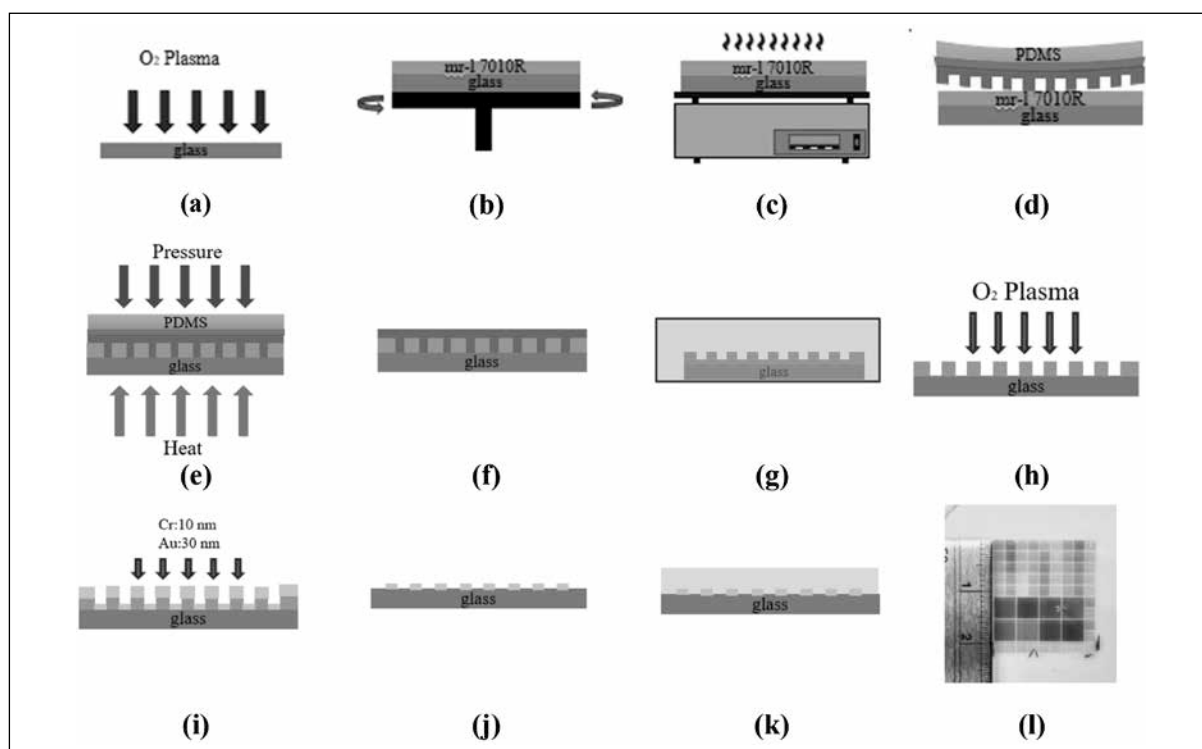
(h) 以 ICP 乾蝕刻去除殘留層，參數為 O₂: 20 SCCM、Pressure: 1 Pa、ICP Power: 75 W、RF Bias: 100 W、Etching Time: 18 s。

(i) 去除完畢後利用 E-beam Evaporator 蒸鍍 Cr: 5 nm、Au: 35 nm。

(j) 將試片泡入丙酮溶液以超音波震盪機震 40 分鐘，執行舉離製程，完成金屬線光柵之製作。

(k) 將旋塗完之 SOG 以 CHF₃: 40 SCCM、Pressure: 1 Pa、ICP Power: 75 W、RF Bias: 100 W、Etching Time: 90 s 之參數將 SOG 削薄至 200 nm。

(l) 第一層結構實體圖。



圖七 (a) 2 吋玻璃基板表面改質，(b) 旋塗 mr-l 7010R，(c) 軟烤，(d) 給定 PDMS 預凸度，(e) 給定試片壓力和溫度，(f) 壓印完成後脫模，(g) 解離 PVA，(h) ICP 乾蝕刻去除殘留層，(i) 蒸鍍 Cr: 5 nm、Au: 35 nm，(j) 金屬舉離，(k) 旋塗 SOG 並削薄至 200 nm，(l) 單層實體圖

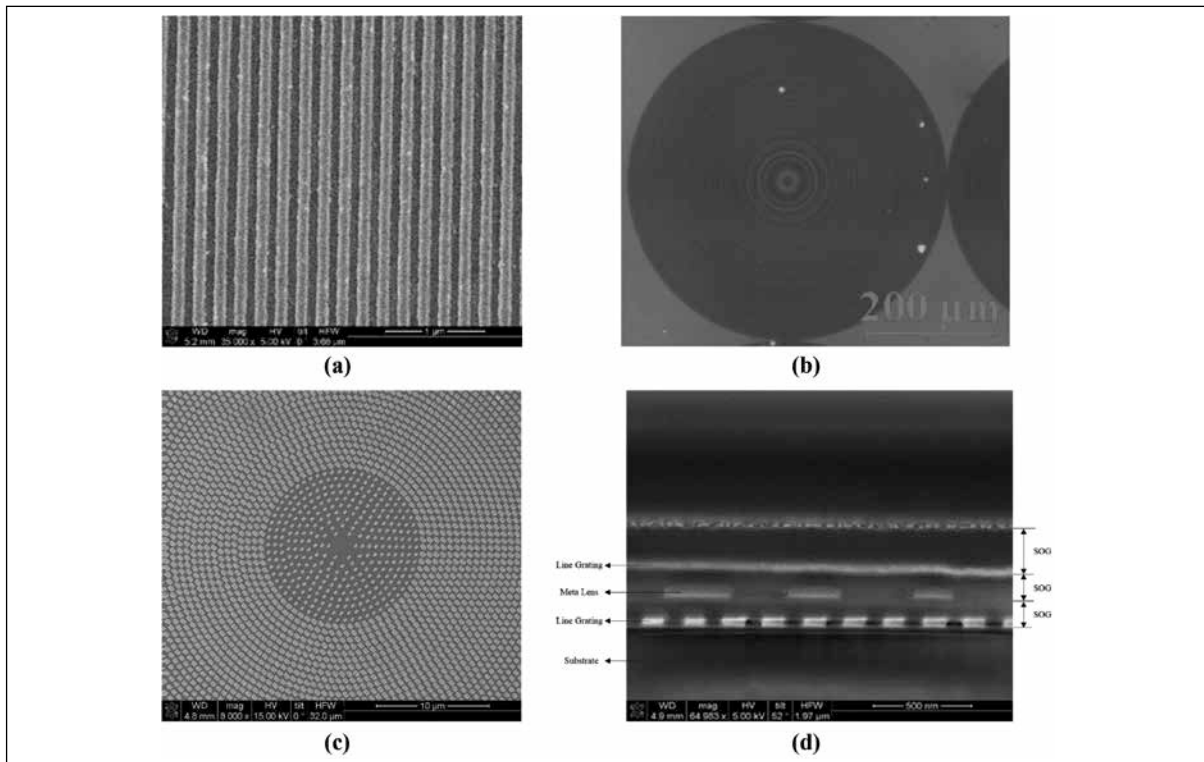
三、超穎透鏡結構型貌確認與光學量測

本實驗利用雙束型聚焦離子束顯微鏡 (FIB)，以及光學顯微鏡確認製作出來的金

屬結構型貌，進行量測的部分包括 50 區的直線光柵、64 區和 65 區的超穎透鏡、SOG 厚度確認。圖 8 (a) 為製作完成之確認結

果，可以看到直線光柵尺寸約為 110 nm /90 nm 與模擬誤差 10 nm。64 區和 65 區的超穎透鏡，因為結構相仿，因此檢查 65 區作為代表，其中圖八 (b)，為光學顯微鏡在放大 5 倍的情況下，確認一個超穎透鏡的形貌狀態，再以 FIB 確認細部結構的完整性，如圖

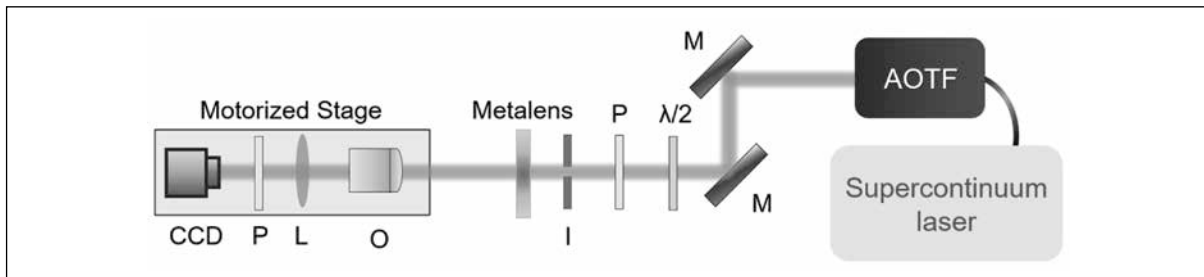
八 (c)，發現大面積下結構非常完善且無嚴重缺陷。圖八 (d) 為三層剖面圖 SOG 高度，可以發現第一層和第二層 SOG 厚度約為 200 nm，第三層 SOG 厚度超過設定的 200 nm，是因為發現無論第三層厚度厚薄，聚焦效率相仿，因此並無利用 ICP 削薄。



圖八 (a) 50 區金屬直線光柵形貌，(b) 光學顯微鏡放大五倍 65 區超穎透鏡金屬結構形貌，(c) 65 區金屬結構形貌，(d) 65 區超穎透鏡三層剖面圖 SOG 高度

光路架設依照不同的量測結構而有不同的架構。圖九超穎透鏡之量測架構示意圖。雷射光源導入光路後透過反射鏡進行光路校正。接著，由於本工作著重於偏振轉換的

穿透效果，我們將利用半波片 ($\lambda/2$) 和偏振片 (P) 將入射光轉成 y 偏振光，然後透過一個光圈 I 去調整進入超穎透鏡的光線量，經過超穎透鏡後會聚焦，並利用物鏡 (O) 去

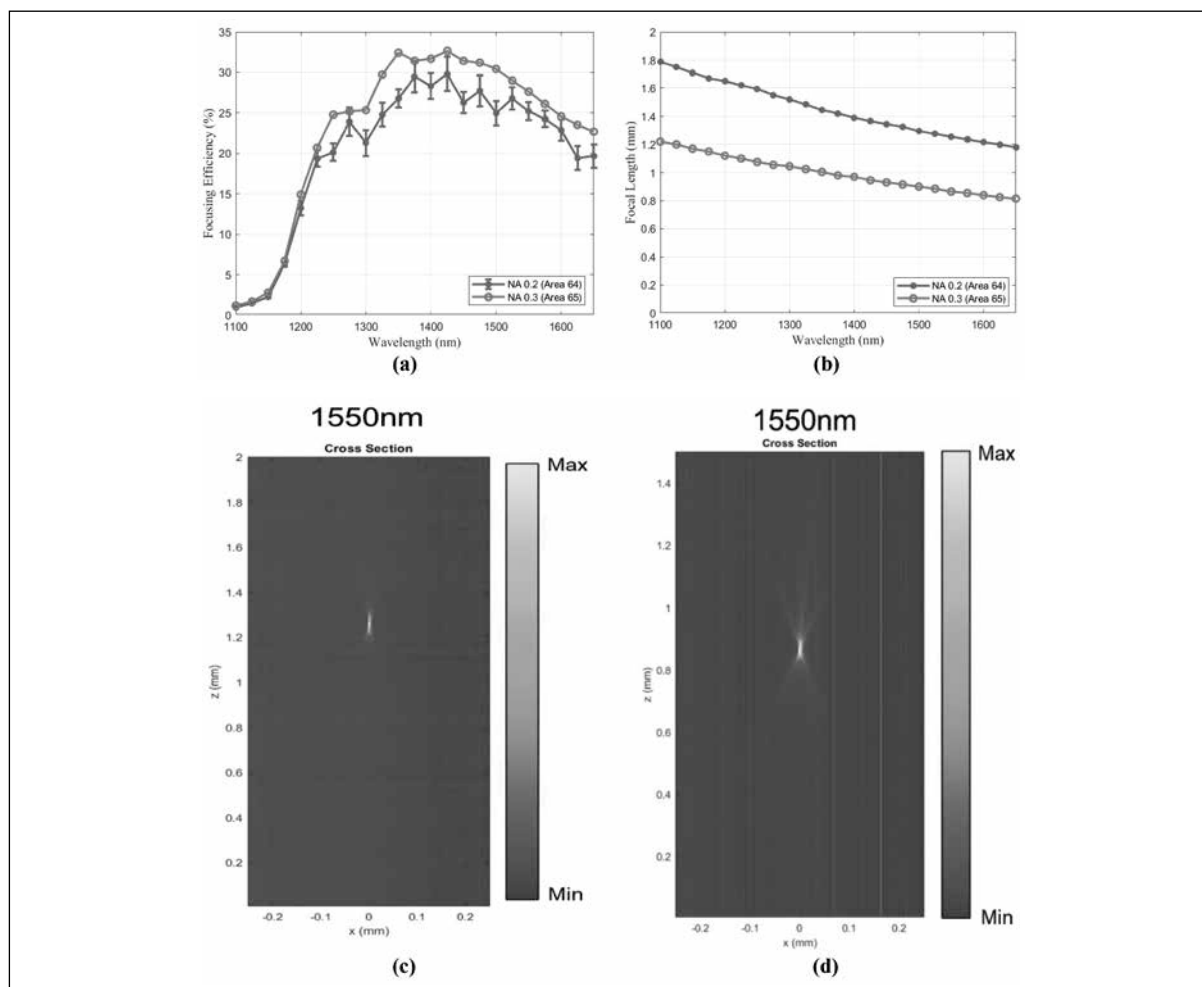


圖九 光學量測示意圖

搜集光線經由元件中第二層奈米天線的偏振轉換後，透過透鏡 (L) 和第二個偏振片接收 x 偏振的出射光，故前後的線偏振片須呈現正交形式，以上光學元件都需在準直的光路上進行架設。最後由近紅外相機接收 x 偏振的出射光，所使用的近紅外相機是 HAMAMATSU Photonic 的 InGaAs cameras C14041-10U，其接收範圍在 950 至 1700 奈米之間的近紅外光。可以於此範圍的圖像進行分析並且計算出精確的光強度值。

超穎透鏡部分由於尺寸繁雜且不易計算，所以此部份沒有做模擬比較。本實驗之超穎透鏡主要功能為光束聚焦，可以製作出來且進行量測的區域有 64、65 區；64、65

區分別設計為 NA 值 0.2 在波長 1550 nm 焦距為 1225 μm ，以及 NA 值 0.3 在波長 1550 nm 焦距為 795 μm 。圖十 (a) 為超穎透鏡 64、65 區在近紅外波長的聚焦效率；圖十 (b) 為 64、65 區在各波長的聚焦距離。由圖十 (a) 中得知超穎透鏡聚焦效率大約在波長 1350 nm ~ 1450 nm 聚焦效率約為 33%，在 1550 nm 時也有約 28% 的效率。未能有更高的效率可能有以下幾種原因：(1) SOG 厚度並未準確達到模擬要求之 200 nm；(2) 由於 ICP 乾蝕刻的關係導致光柵與梯度板結構尺寸都略有擴大；(3) 試片整潔度等。由圖十 (b) 可以發現設計的焦距和實驗結果沒有太大的區別。在圖十 (c)、(d) 可以發現超穎透鏡於波長 1550 nm 下聚焦的效果。



圖十 (a) 64、65 區聚焦效率，(b) 64、65 區在各波長的聚焦距離，(c) 64 區在 1550 nm 下聚焦的效果，(d) 65 區在 1550 nm 下聚焦的效果

結論

本研究提出一種創新且有效的壓印機制，使用水解型高分子材料 (PVA) 為壓印模具，建構出對應之奈米壓印設備與製程技術，可以在實驗室完成多層、大面積、且尺度精確的奈米金屬結構，應用於三層金屬結構之穿透式電漿子超穎介面，且設計並製作出多種不同聚焦距離的超穎透鏡結構。在一、三層光柵中，本研究透過旋塗膜厚以及乾蝕刻參數製作出線寬/線距為 100 nm/100 nm 且金屬高度為 40 nm 的金屬光柵結構；在介電層部分則可以透過乾蝕刻參數將 SOG 削薄至接近模擬尺寸 200 nm，中間層製作具有光束聚焦效果的超穎透鏡結構，且透過光學量測超穎透鏡的聚焦效率可以達到約 33%，設計的焦距和實驗結果也非常接近，有誤差的原因可能為材料性質、界面性質、製程限制、光源特性等等，但整體而言，三層結構缺時有發揮出該有的光學效果，未來如果能將 SOG 厚度修正至 200 nm，或使用其他製程，或許可以再次提升量測效率。總而言之，超穎透鏡克服傳統透鏡成像能力受到維度限制和繞射等影響，達到在數百奈米的尺度下具有聚焦和高解析度的特性。

參考文獻

1. D. R. Smith et al. (2000). Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Phys. Rev. Lett.*, 84, 4184–4187.
2. J. Wang, J. Du (2016). Plasmonic and dielectric metasurfaces: design, fabrication and applications. *Applied Sciences* 6.
3. W. Cai, V. Shalaev (2010). *Optical Metamaterials*. New York, NY: Springer New York.
4. T. Upadhyaya et al. (2022). Left-Handed Material Inspired Multi-Layer Planar Antenna Design for Satellite Communication Applications. *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 108.
5. S. Wang et al. (2017). Broadband achromatic optical metasurface devices. *Nat Commun*, vol. 8, no. 1, p. 187, Aug.
6. Nanfang Yu et al. (2013). Flat Optics: Controlling Wavefronts With Optical Antenna Metasurfaces. *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 19, no. 3, pp. 4700423–4700423, May 2013.
7. N. Yu et al. (2011). Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction. *Science*, vol. 334, no. 6054, pp. 333–337.
8. A. V. Kildishev, A. Boltasseva, & V. M. Shalaev (2013), “Planar Photonics with Metasurfaces,” *Science*, vol. 339, no. 6125, p. 1232009.
9. M. A. Kats, R. Blanchard, P. Genevet, & F. Capasso (2013). Nanometre optical coatings based on strong interference effects in highly absorbing media. *Nature Mater*, vol. 12, no. 1, pp. 20–24.
10. C. L. Holloway et al. (2012). An Overview of the Theory and Applications of Metasurfaces: The Two-Dimensional Equivalents of Metamaterials. *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 54, no. 2, pp. 10–35.
11. P. R. Fabian, S. Y. Chou (2008). Lithography and other patterning techniques for future electronics. *Proceedings of the IEEE.*, vol. 96, no. 2, pp. 248–270.
12. S. Y. Chou, P. R. Krausse, & P. J. Renstrom (1995). Imprint of sub 25 nm vias and trenches in polymers. *Appl. Phys. Lett.*, vol. 6, no. 21, pp. 3114–3116.
13. M. Colburn et al. (1999). Step and flash imprint lithography: a new approach to high-resolution patterning. *International Society for Optics and Photonics.*, vol. 3676, pp. 379–389.
14. Y. C. Lee, C. Y. Chiu (2008). Micro-/nano-lithography based on the contact transfer of thin film and mask embedded etching. *J. Micromech. Microeng.*, vol. 18, no. 7, p. 075013.
15. S. Y. Chou (1996). Nanoimprint lithography. *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 14, no. 6, pp. 4129–4133.
16. Y. Xia, J. Tien, D. Qin, & G. M. Whitesides (1996). Non-Photolithographic Methods for Fabrication of Elastomeric Stamps for Use in Microcontact Printing,” *Langmuir*, vol. 12, no. 16, pp. 4033–4038.

17. 杜珮綺 (2019)。奈米壓印暨黑光阻嵌入式軟性光罩之微奈米製程與應用 [碩士論文]。國立成功大學機械工程學系。
18. 朱致緯 (2019)。奈米壓印微影製程應用於高頻表面聲波元件之製作與實驗量測 [碩士論文]。國立成功大學機械工程學系。
19. L. Liu et al.(2016). A programmable nanoreplica molding for the fabrication of nanophotonic devices. Sci Rep, vol. 6, no. 1, p. 22445.

作者簡介

丁昱淳 / 國立成功大學 機械系

李永春 / 國立成功大學 機械系 / 指導老師

