



國立臺灣大學重點科技學院
元件材料與異質整合學位學程
碩士論文

Program in Semiconductor Device, Material, and Hetero-integration

Graduate School of Advanced Technology

National Taiwan University

Master's Thesis

超穎介面透鏡之研製與應用

Development and Applications of Metasurface Lenses

凌聖沅

Sheng-Yuan Ling

指導教授：吳忠幟 博士

Advisor: Chung-Chih Wu, Ph.D.

中華民國 114 年 7 月

July, 2025



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書
MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

超穎介面透鏡之研製與應用

Development and Applications of Metasurface Lenses

本論文係凌聖沅 R12K43005 在國立臺灣大學元件材料與異質整合碩士學位學程完成之碩士學位論文,於民國 114 年 7 月 29 日承下列考試委員審查通過及口試及格,特此證明。

The undersigned, appointed by the Program for Semiconductor Device, Material, and Hetero Integration on 29 July 2025 have examined a Master's thesis entitled above presented by SHENG-YUAN LING R12K43005 candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

吳忠偉 張志豪 蘇志宏
(指導教授 Advisor)

主任 Director: 吳肇欣

誌謝



碩士班的兩年時光轉瞬即逝，仍依稀記得初入台大時心中的悸動與期待。首先，誠摯感謝指導教授吳忠幟老師在這段期間的悉心指導。即使我在實驗中屢屢遇到挫折與失敗，老師始終給予我寬容與鼓勵，並提供具體的建議協助我改進。在我延後繳交論文的情況下，老師仍不吝撥空與我討論論文內容，細心指出論文架構與編排中需修正之處，讓我能順利完成碩士論文。能成為老師的學生，是我莫大的榮幸。

同時，也誠摯感謝口試委員張志豪教授與蔡志宏教授，撥冗參與本論文的口試，並於審閱過程中協助指出內容中的錯誤與疏漏，讓我有機會進一步修正與精進。兩位老師在口試中所提出的問題與討論，不僅拓展了我對研究議題的思考，也讓我受益良多，深感感激。

感謝柏瑞在我進行 Metasurface 模擬與製程的過程中給予耐心的指導。即使我經歷多次樣品失敗，你仍不厭其煩地協助我設計版圖，甚至特地前往新竹幫忙撰寫 pattern。在奈米柱結構倒塌的情況下，也與我深入討論可能的原因，讓我能重新思考與優化設計，真的非常感謝你的協助與鼓勵。謝謝慶荃，實驗室中許多瑣碎卻重要的事務，都是由你一手打理。無論是 sputter 故障、氮氣用盡、或是槍體無法 vent 的突發狀況，你總是主動聯繫廠商、尋求解決方案，讓實驗室的運作得以順利進行，真的辛苦你了。同時也感謝俊偉與鎔嶽，謝謝你們在我學習模擬的過程中提供協助，耐心解答我各種技術性與觀念上的疑問，讓我在研究上能不斷前進。

接著是我的實驗室好夥伴們。兄弟汶晉，幾乎是每天來實驗室都會見到的熟悉身影，見到你的時間快比女朋友多了。感謝你陪我做實驗，然後也陪我去看很多次 SEM，不愧是 SEM 大師，拍出來的形狀又大又圓。期待之後一起當兵變成光頭的樣子，頭頂一定可以照亮所有實驗室的夥伴。

接著是號稱腳踝從來沒好過的珮玲，禁區猛獸這個稱號到現在還沒見識過，到底有沒有辦法過我都還不知道呢，所謂沒有比賽就沒有輸贏。和你一起組雙打的日子很快樂，要是對手再強一點就好了。然後是甚麼都懂很多的奕廷，感覺你對很多

議題都很有想法，並且都可以講出一套道理，從你身上學到很多。也感謝慧銘跟我分享很多台語的講法，讓我這個假高雄人可以跟別人炫耀台語知識。

謝謝世勇陪我夜唱、去信義區、吃阜杭豆漿，高中沒有講的話都在碩班講完了，希望你可以勤練喝酒的能力，之後和我一較高下。接著是 reels 之鬼家蔚，到底要在幾個 reels 裡面看到你，請停止傳廢片給我，但可以邀我一起跳。最後也祝雅薰、以庭在實驗中都能一次就成功，順利畢業。

另外，我想要感謝我的家人的支持，總是在我求學之路上支持我，在我實驗失敗的時候鼓勵我，並且支持我做的每個決定。希望我未來能持續努力進步，成為更好的人。

摘要



本研究旨在設計並實現一款具聚焦功能之可見光波段超穎介面透鏡 (metalens)，並系統性探討其製程參數、封裝條件對光學效能之影響。設計上採用高折射率二氧化鈦(TiO_2)作為奈米柱材料，透過調變其橫向尺寸以實現 0° 至 360° 的相位延遲控制，並配合廣義斯乃爾定律完成聚焦之空間相位配置。模擬結果顯示，超穎透鏡在有無封裝條件下皆能有效聚焦光場，而加入光學封裝膠後不僅未造成效率明顯下降，亦未干擾相位控制，反而可進一步抑制旁瓣、提升聚焦集中度。

製程方面，採用電子束微影與乾式蝕刻技術成功製作高深寬比之奈米柱陣列，並於各製程階段進行 SEM 結構確認。封裝方面，採用真空輔助滲透方式提升膠體進入奈米柱間隙的能力，並透過 SEM 壓痕觀察佐證膠體與結構間之密合。實驗量測部分，搭建光學平台進行聚焦掃描與效率量測，實測效率達 88.4%，與模擬結果高度一致，並具良好成像解析能力。此外，即使在早期製程中曾出現部分奈米柱倒塌，其光學功能亦未完全喪失，並且具有效率 46.8%，顯示本設計具良好容錯性與製程穩定性。

本研究所提出之超穎透鏡結構不僅具備高效率特性，亦驗證封裝策略對實用應用之可行性與穩定助益，為未來微型光學系統與生醫影像應用奠定關鍵基礎。

關鍵字：超穎介面、超穎透鏡、光學封裝、二氧化鈦、奈米結構、FDTD 模擬、聚焦效率

Abstract

This study presents the design, fabrication, and characterization of a visible-wavelength metalens with focusing functionality, and investigates the influence of fabrication and encapsulation conditions on its optical performance. The metalens consists of high-refractive-index titanium dioxide (TiO₂) nanopillars with varying lateral dimensions to achieve 0° to 360° phase modulation, based on generalized Snell's law.

Simulation results demonstrate effective focusing under both encapsulated and non-encapsulated conditions. With NOA81 optical adhesive as an encapsulation layer, the device maintains high efficiency and phase accuracy, while exhibiting improved side lobe suppression and enhanced focus intensity.

The fabrication process involves electron beam lithography and dry etching to produce high-aspect-ratio nanopillars. SEM imaging confirms structural integrity after each step. A vacuum-assisted encapsulation method enhances NOA81 infiltration, with imprint patterns on the cured surface serving as indirect evidence. Optical measurements show a post-lens efficiency of 88.4%, matching simulations. Even in early batches with partial pillar collapse, the lens retained focusing functionality with 46.8% efficiency, indicating strong fabrication tolerance.

Overall, this work demonstrates a practical and robust metalens with high efficiency and packaging stability, suitable for compact optical systems and biomedical imaging applications.

Keywords: Metasurface, metalens, optical encapsulation, titanium dioxide, nanopillar, FDTD simulation, focusing efficiency.

目次



口試委員審定書	I
誌謝	II
摘要	IV
Abstract.....	V
目次	VI
圖次	VIII
表次	XI
第一章 緒論	1
1.1 傳統透鏡與平面超穎透鏡簡介	1
1.2 超穎介面在生醫影像中的應用潛力	3
1.3 超穎介面波前調控基本原理	4
1.3.1 惠更斯原理	4
1.3.2 廣義斯乃爾與相位梯度設計	6
1.4 時域有限差分法模擬	8
1.5 研究動機與論文結構	10
第一章圖表	12
第二章 用於內視鏡光學之超穎介面透鏡之研製	17
2.1 前言	17
2.2 超穎介面設計與模擬	18
2.2.1 單元結構參數掃描	18
2.2.2 相位設計流程與自動化佈圖	19
2.2.3 基板折射率對光學行為之影響	20
2.3 超穎介面製作	22
2.3.1 超穎介面製作流程	23

2.4 封裝條件對超穎介面結構與光學性能之影響	28
2.4.1 模擬分析封裝材料對超穎介面光學效應之影響	28
2.4.2 封裝方式比較與結構滲透性觀察	30
2.5 超穎介面透鏡之結果與討論	32
2.5.1 實驗結果影像	32
2.5.2 量測系統架設與結果分析	34
第二章圖表	36
第三章 總結	61
3.1 總結	61
參考文獻	63



圖次



圖 1-1 (a)傳統光學元件示意圖 (b)傳統光學透鏡聚焦示意圖.....	12
圖 1-2 (a)超穎透鏡元件示意圖 (b)超穎透鏡聚焦示意圖.....	12
圖 1-3 二氧化鈦(TiO ₂)折射率與消光係數量測圖.....	13
圖 1-4 結合超穎介面之窄化點擴散函數 (PSF) 螢光成像系統.....	14
圖 1-5 以惠更斯原理模擬超穎介面聚焦機制.....	14
圖 1-6 (a)斯乃爾定律示意圖 (b)廣義斯乃爾定律示意圖.....	15
圖 1-7 時域有限差分法演算法示意圖.....	16
圖 2-1 超穎介面模擬設置圖.....	37
圖 2-2 相位輪廓圖(Phase profile).....	38
圖 2-3 在封裝材料 NOA81 ($n=1.56$) 介質環境下，操作波長 $\lambda=600\text{ nm}$ 、結構週期 $P=250\text{ nm}$ 之條件下模擬結果：(a)不同柱高下之穿透率對 F.F.之變化，(b)不同柱高下之相位對 F.F.之變化.....	39
圖 2-4 在封裝材料 NOA81 ($n=1.56$) 介質環境下，操作波長 $\lambda=600\text{ nm}$ 、結構週期 $P=250\text{ nm}$ 之條件下模擬結果：(a)柱高 1300 nm 下之穿透率對 F.F.之變化，(b)柱高 1300 nm 下之相位對 F.F.之變化.....	40
圖 2-5 模擬在空氣 ($n=1$) 介質環境下，操作波長 $\lambda=532\text{ nm}$ 、結構週期 $P=270\text{ nm}$ 之條件下，不同基板折射率對結構穿透率與相位延遲之影響：(a)穿透率變化，(b)相位延遲變化.....	41
圖 2-6 使用 TiO ₂ 奈米柱結構，結構週期 $P=270\text{ nm}$ 、高度 $H=600\text{ nm}$ ，玻璃基板上方為空氣介質環境中，操作波長 $\lambda=532\text{ nm}$ 的條件下，偏折型超穎介面之 FDTD 遠場模擬輻射圖.....	42
圖 2-7 超穎介面製程流程圖.....	43
圖 2-8 使用 TiO ₂ 奈米柱結構 (高度 $H=1300\text{ nm}$ 、週期 $P=250\text{ nm}$) 於玻璃基板上，在空氣介質環境中，操作波長 $\lambda=600\text{ nm}$ 的模擬條件下，探討不同封裝材料(PDMS、	

PMMA、NOA81) 滲入奈米柱空隙所造成之穿透率與相位影響：(a)穿透率對 F.F 之變化，(b)相位延遲對 F.F 之變化	44
圖 2-9 (a)封裝材料未滲透奈米柱 (b)封裝材料滲透奈米柱間隙.....	45
圖 2-10 使用 TiO_2 奈米柱結構（高度 $H = 1300 \text{ nm}$ 、週期 $P = 250 \text{ nm}$ ）於玻璃基板上，在空氣介質環境中，操作波長 $\lambda = 600 \text{ nm}$ 的模擬條件下，探討封裝材料滲透與否對元件性能之影響：(a)滲透型與未滲透型封裝對穿透率之影響，(b)滲透型與未滲透型封裝對相位延遲之影響	46
圖 2-11 撕除封裝材料後之(a)樣品表面(b)封裝材料.....	47
圖 2-12 未加壓封裝樣品之 SEM 影像(a)撕除封裝層後奈米柱超穎介面結構，(b)封裝膠表面殘留之奈米柱痕跡	48
圖 2-13 經真空加壓封裝樣品之 SEM 影像(a)撕除封裝層後奈米柱超穎介面結構，(b)封裝膠表面殘留之奈米柱痕跡，且壓痕更為明顯深入	48
圖 2-14 超穎介面經軟體排列輸出之建模圖	49
圖 2-15 電子束微影後(a)光學顯微鏡影像，(b)電子顯微鏡影像，(c)高倍率電子顯微鏡影像	50
圖 2-16 金屬剝離後 SEM 影像:(a) 放大倍率 1,000 倍，(b)放大倍率 10,000 倍，(c)放大倍率 30,000 倍.....	51
圖 2-17 反應式離子蝕刻後 SEM 影像:(a)放大倍率 10,000 倍，(b)傾斜 30 度低倍率，(c)傾斜 30 度高倍率.....	52
圖 2-18 金屬遮罩濕蝕刻後 SEM 影像:(a)確認整體奈米柱排列完整，(b)測量最大與最小線寬及週期，(c)側視圖顯示奈米柱高度約為 1300 nm	53
圖 2-19 真空乾燥器	54
圖 2-20 超穎透鏡量測系統架設圖	55
圖 2-21 超穎介面元件光場傳播模擬比較:(a)無封裝層，(b)NOA81 封裝層	56
圖 2-22 結構完整超穎透鏡樣品之(a)無封裝層下之聚焦強度分佈圖，(b)使用封裝層	

下之聚焦強度分佈圖	57
圖 2-23 超穎透鏡成像解析度測試結果	58
圖 2-24 部分倒塌超穎透鏡樣品之 SEM 影像:(a)放大倍率 1,000 倍，局部排列不完整，(b)放大倍率 10,000 倍，可見部分 TiO ₂ 奈米柱出現倒塌現象	59
圖 2-25 部分倒塌超穎透鏡樣品之(a)無封裝層下之聚焦強度分佈圖，(b)使用封裝層下之聚焦強度分佈圖	60

表次

表 2-1 結構完整超穎透鏡之量測結果與效率.....	36
表 2-2 部分倒塌超穎透鏡之量測結果與效率.....	36



第一章 緒論



1.1 傳統透鏡與平面超穎透鏡簡介

傳統透鏡是一種根據光在不同介質中折射行為所設計的基礎光學元件，如圖 1-1(a)，其原理主要源自於折射定律。當光通過具有不同折射率的材料界面時會發生偏折，透鏡即是利用這一性質，透過設計其曲率與厚度，使光線得以聚焦或發散，聚焦示意圖如圖 1-1(b)。其常見形狀包括球面與非球面結構，並廣泛應用於照相機、顯微鏡、投影設備與其他精密光學系統。

然而，隨著對高解析度與輕量化的需求不斷增加，傳統透鏡面臨了諸多挑戰。為了補償成像時的像差，例如球差、慧差、色差等，常需使用多片透鏡組合成為複雜的光學系統。這不僅增加了設計與製造的成本，也對體積、重量與光軸對準提出了更高的要求，使其難以應用於微型化或高度整合的光電系統中。

為解決這些限制，平面超穎透鏡 (metalens)，如圖 1-2(a)，作為一種新興的光學設計技術，逐漸受到重視。該類透鏡以超穎材料 (metamaterials) 為基礎，其結構由具亞波長尺度的奈米結構單元 (unit cell) 組成，透過幾何與排列方式的設計，實現對光波前的高精度操控，如圖 1-2(b)。這些單元能在單層結構中引入空間變化的相位延遲，藉此模擬傳統透鏡的聚焦能力，甚至實現更多元的光場調控功能。

在設計層面，超穎透鏡的運作可利用不同相位調控機制，包括幾何相位 (Pancharatnam – Berry phase)、材料共振相位與傳統光程差等。設計者可藉由選擇單元幾何形狀、高度與材料折射率，進行最佳化調整，以符合特定波長、偏振狀態或入射角條件下的應用需求。為精準描述超穎材料在宏觀尺度上的光學行為，常採用等效介質理論 (Effective Medium Theory, EMT) 進行建模，將微觀結構平均化為等效折射率與磁導率[1]。

設計平面超穎透鏡時，等效介質理論提供了一種分析微結構電磁行為的有效方法。當奈米結構的週期遠小於入射光波長時，光無法解析單一結構細節，而是感

受到整體平均的光學響應，此時結構可視為具等效折射率 n_{eff} 的均勻介質。透過改變單位結構的幾何尺寸（如直徑或寬度），即可調控其等效折射率，進而控制光在介面上的相位延遲。這種設計方式可對應至空間相位分布需求，常用於模擬透鏡所需的聚焦波前，並能以簡單公式大致估算結構對應之相位變化：

$$\phi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_{\text{eff}} \cdot d \quad (1.1)$$

其中 ϕ 為局部相位延遲， d 為結構高度， λ 為操作波長，EMT 雖屬近似模型，可於設計初期有效預測趨勢，亦常搭配數值模擬（如 FDTD）進行精確計算與優化，有助於加速超穎透鏡單位元結構的選擇與排列設計。

在材料選用方面，平面超穎透鏡若以高折射率的透明介電質為主體，如二氧化鈦 (Titanium Dioxide, TiO_2)，則在可見光波段可維持低吸收損耗與高穿透效率，進一步提升其可見光應用效能， TiO_2 之折射率與消光係數經橢圓偏振儀量測得出，如圖 1-3 所示。



1.2 超穎介面在生醫影像中的應用潛力

隨著光學奈米結構設計技術的進展，超穎介面 (metasurface) 因其超薄、程式化的光波操控能力，在生醫影像系統中展現出高度的應用潛力。尤其針對微創式內視鏡，其尺寸與性能需求遠超傳統透鏡設計所能達成之範疇，超穎介面所提供的高度集成能力與功能性，正好回應此一挑戰。

內視鏡系統在實際應用中常面臨多項技術難題，包括空間受限下的模組微型化需求、球面像差與色散誤差對成像品質的干擾、多波長螢光激發與接收的整合，以及對病灶組織的偏振成像與對比能力等。在這些方面，傳統多片式透鏡不僅製程複雜、對位困難，亦難以實現多功能於單一元件之整合。相對而言，超穎介面透過亞波長結構排列設計，能於單層結構上實現波前調控、色差補償與偏振控制，並具備高度 CMOS 相容性，成為提升影像系統整合度與靈活度的關鍵。

Zhang, Shuyan 等人於 2021 中發表的研究中展示一套整合超穎介面的共軛焦螢光成像系統，其核心為一具備高聚焦能力的反射式超穎透鏡，能有效縮小點擴散函數 (PSF)，進而提升系統解析度與穿透深度[2]。該超穎介面製作於 SiO_2 基板上，採用非晶矽奈米柱陣列，可對入射光進行相位調控並反射聚焦。實驗中，該元件成功整合入傳統共軛焦顯微光路，並對比傳統系統與超穎介面系統之 PSF 分布。結果顯示，使用超穎介面後能產生更集中且尖銳的焦點，如圖 1-4 所示，明顯提升了成像解析度與螢光訊號品質，證實其應用於微型化生醫影像模組之潛力。

此外，由於超穎介面可製作於玻璃、矽、聚合物等材料基板上，亦具備與現有微光學、CMOS 感測器整合之潛力，進一步拓展其於穿戴式醫療感測裝置或微創導引設備等應用可能[3]。綜合而言，透過合理設計，超穎介面可在次波長尺度結構中實現複雜光學功能，具備突破生醫影像系統空間限制、提升成像品質的優勢，預期將於未來低侵入性臨床影像技術中扮演關鍵角色[4]。



1.3 超穎介面波前調控基本原理

1.3.1 惠更斯原理 (Huygens' Principle)

惠更斯原理 (Huygens' Principle) 自 17 世紀由 Christiaan Huygens 提出以來，長期以來為理解波動傳播的基礎理論之一。該原理指出，每一波前上的點皆可視為次波源 (secondary source)，而這些次波源將向外以球面波方式發射波動，其總和疊加構成下一時刻的新波前。這一簡單且直觀的假設，成功地解釋了光的反射、折射、繞射與干涉等物理行為，並廣泛應用於現代光學設計與波動模擬之中。

在超穎介面中，惠更斯原理被具體地應用於控制光的波前形貌。由大量具次波長尺寸的奈米結構所組成的超穎介面，可視為密集排布的次波源陣列，如圖 1-5。這些單元結構，透過其幾何設計與材料選擇，對入射光產生特定的相位延遲與振幅變化，進而改變整體出射波的波前形狀。從物理觀點而言，這些結構單元如同具可調參數的「人造次波源」，賦予設計者能以極高的自由度進行光波操控。

理論上，若考慮超穎介面位於平面 $z = 0$ ，對入射光產生調變，則觀察點 $P(x_p, y_p, z_p)$ 的遠場電場響應可由惠更斯-基爾霍夫積分 (Kirchhoff-Huygens Integral) 描述如下：

$$E(P) = \iint_S A(x, y) e^{i\phi(x, y)} \cdot \frac{e^{ikR}}{R} dx dy \quad (1.2)$$

其中 $A(x, y)$ 表示位於 (x, y) 處的結構單元所產生的振幅響應， $\phi(x, y)$ 為該單元引入的相位延遲， $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 為波數， $R = \sqrt{(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2 + z_p^2}$ 為觀察點與次波源之間的距離。此式表明，透過適當設計單元的局部相位與振幅響應，即可精準重構目標波前。對於實作而言，只要能讓超穎介面上的結構單元在空間上呈現期望的相位分佈，即可使出射波產生聚焦或偏折等光場變化。實際設計中，研究者通常藉由改變單元的幾何參數（如奈米柱直徑與高度），獲得一組對應於 $0 \sim 2\pi$ 相位範圍的設計曲線，再依據預期的波前特性（如線性相位梯度、球面相位分佈）選擇適當單元相位分佈，以形成完整的超穎介面設計。

根據 Decker 等人之分析，即使在結構單元未同時激發電與磁偶極共振的條件下，光場仍可藉由局部次波源的設計實現有效的波前操控。其研究指出，即便在非共振重疊條件（non-overlapping resonances）下，只要單元具備明顯的偶極響應，仍可透過排列造成方向性的干涉，使出射波具有明確的相位調變與方向控制能力 [5]。這意味著，即便系統不符合理想的全向對稱條件，惠更斯原理本身仍能提供合理的物理解釋與設計依據。換言之，超穎介面的設計並不必然依賴複雜的偶極共振匹配機制，只要結構設計合理，即可藉由空間相位控制實現波前重構。

為更具體理解光場的局部相位控制機制，Decker 亦提出簡化的解析模型描述單元的場傳輸行為。其在理想無損情況下，單一結構的傳輸係數 $t(\omega)$ 可表示為：

$$t(\omega) = 1 + \frac{2i\gamma}{\omega_0^2 - \omega^2 - 2i\gamma\omega} \quad (1.3)$$

其中 ω 為操作頻率， ω_0 為共振頻率， γ 為共振寬度。該模型指出，當操作頻率 ω 接近共振頻率 ω_0 時，結構單元會引入明顯的相位跳變與振幅調變，此一響應可用來設計超穎介面單元，以達成預期的相位操控。

總結而言，惠更斯原理提供了對超穎介面操控機制的基本理解架構。透過將每一奈米結構視為次波源，並控制其相位與振幅，超穎介面可實現高度自由的波前設計。即使不依賴雙模態共振的設計，單以次波源的干涉與分佈控制，便可實現多樣化的光學功能，展現其在現代平面光學中的廣泛潛力與設計彈性。



1.3.2 廣義斯乃爾與相位梯度設計(Generalized Snell's law)

傳統的斯乃爾定律(Snell's law)用以描述當光從一種介質進入另一種介質時，其入射角與折射角的關係為：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.4)$$

如圖 1-6(a)， n_i 、 n_t 分別為入射與出射介質的折射率， θ_i 、 θ_t 分別為入射角與折射角。此定律建立於介面無相位不連續之條件下，亦即入射波在介面上經歷均勻傳播。然而，若於介面上引入橫向相位不連續 (phase discontinuity)，光波在穿越介面時將遵循廣義斯乃爾定律 (Generalized Snell's Law, GSL) [6]。

廣義斯乃爾定律考慮了介面上相位的突變，並由費馬原理(Fermat's principle)出發，認為光將沿著相位累積最快的方向傳播。當光通過帶有相位梯度 $\frac{d\phi}{dx}$ 的超穎介面時，根據路徑差產生的相位延遲可導出以下公式：

$$n_i \sin \theta_i - n_t \sin \theta_t = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\phi}{dx} \quad (1.5)$$

廣義斯乃爾定律的示意圖如圖 1-6(b)，其中 θ_i 、 θ_t 分別為入射與出射角， λ 為波長， $\frac{d\phi}{dx}$ 表示超穎介面在橫向 x 方向上的相位變化率。當 $\frac{d\phi}{dx} \neq 0$ 時，光的折射角將偏離傳統斯乃爾定律所預測之值，達到光束偏折、導引等操控效果[7][8]。

若將超穎介面視為一組布於介面上的相位單元，則每一單元可視為「控制光波相位的像素」。例如在本研究中，使用高折射率介電材料 TiO_2 製作奈米柱結構，藉由改變其直徑與高度以調控穿透光的相位延遲，即可對應所需的相位分布 $\phi(x)$ 。此設計方法可進一步實現如波束偏折器、平面透鏡等應用元件[9]。

針對具設計目標的相位分布，例如實現聚焦功能，可導出理想相位分佈如下：

$$\phi(x) = -k(\sqrt{x^2 + f^2} - f) \quad (1.6)$$

其中 f 為焦距， $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 為波數，上述設計公式對應的相位梯度可改寫

$$\frac{d\phi}{dx} = -k \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2 + f^2}} \quad (1.7)$$

代入 Generalized Snell's Law 可得聚焦波前於不同 x 位置所需的出射角 $\theta_t(x)$ ，進而進行結構對應設計。此理論架構可應用於離散型或連續型超穎介面相位元設計，並透過 FDTD 模擬驗證光場行為，對實際光學元件製作提供有效指引。



1.4 時域有限差分法模擬

有限差分時間域法 (Finite Difference Time Domain, FDTD) 是一種以時間為主軸的電磁模擬技術，最初由 Kenneth Yee 在 1966 年提出[10]，其演算法基礎是對 Maxwell 方程在時間與空間方向進行差分離散。透過此方法，可以逐步模擬電場與磁場在空間與時間中的相互變化與傳遞，並可有效處理結構複雜或邊界條件變動的問題[10]。馬克士威方程式中，微分形式的法拉第定律及安培定律表示為：

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1.8)$$

$$\nabla \times H = -\varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1.9)$$

E 與 H 分別代表電場與磁場強度， μ 為磁導率 (Permeability)， ε 為介電係數 (Permittivity)。在 FDTD 模擬中，空間會被劃分為許多微小的格點，如圖 1-7(a) 所示。在每個格點上，電場與磁場會定義在不同的空間位置與時間節點，使得這些場值能夠交錯地進行時間更新，提升數值穩定性與準確性。

對於一維情況，每個格點上的電場與磁場可以透過下列差分方程計算

$$E_z^{q+1}[m] = E_z^q[m] + \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta x} [H_y^{q+\frac{1}{2}}(m+\frac{1}{2}) - H_y^{q+\frac{1}{2}}(m-\frac{1}{2})] \quad (1.10)$$

$$H_y^{q+\frac{1}{2}}[m+\frac{1}{2}] = H_y^{q-\frac{1}{2}}[m+\frac{1}{2}] + \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta x} [E_z^q(m+1) - E_z^q(m)] \quad (1.11)$$

上述公式中的 $E_z^{q+1}[m]$ 表示在第 $n+1$ 個時間步與第 i 個空間節點的電場值，而

$H_y^{q+\frac{1}{2}}[m+\frac{1}{2}]$ 則為半時間步長與半空間節點上的磁場分量。這種電磁場交錯配置 (staggered grid) 是 Yee 演算法的核心概念[11]。

為確保差分計算過程的穩定性，FDTD 模擬必須滿足 Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) 條件，避免計算過程產生發散。穩定條件如下式：

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c} \quad (1.12)$$

其中 c 表示光速， Δx 為空間格點之間的距離。若所選取的時間步長不符合此條件，可能導致模擬結果不穩定甚至失真。

在實際模擬過程中，FDTD 採用交錯式場分布的方式，透過時間步進的策略逐步解出電磁場於空間中之變化，如圖 1-7(b)所示。此方法即使在處理具有複雜邊界與異質材料之結構時，亦能有效模擬其電磁反應特性[12]。

本研究使用 RSoft FullWAVE 模擬軟體進行三維全波 FDTD 分析，建立包含奈米柱、基板與封裝層的完整結構模型，探討封裝材料折射率改變，以及封裝膠是否滲透至柱間對穿透率與相位響應之影響。



1.5 研究動機與論文結構

隨著近代光學技術的發展，光學元件的輕量化、功能整合化與製程微型化已成為重要趨勢。傳統透鏡基於曲率設計，需依賴厚重材料堆疊實現光束控制，限制了其在穿戴式裝置、生醫影像與微型光學系統中的應用潛力。相較之下，超穎介面（Metasurface）技術透過次波長尺度結構控制相位、振幅與偏振，具備薄型化、客製化與高度整合的優勢，逐漸成為新世代光學設計的主要方向。

本研究以實際應用為導向，聚焦於設計與實作一款可應用於可見光波段之超穎介面透鏡（metalens），並針對製程穩定性與封裝可靠性進行深入探討。考量實際應用環境中元件需經歷多重加工與封裝流程，因此需確認元件在封裝條件下的光學表現是否維持穩定，並驗證製程參數對結構形貌與光學效能之影響。此外，透過與實際醫療影像系統整合需求配合，本研究所設計之超穎透鏡為具聚焦功能之圓形結構，並進行模擬與量測結果比對，期望提出具實用性與製程兼容性的元件設計方案。

本論文共分為三章。

第一章說明本研究的背景、目的與研究價值，介紹超穎介面技術在現代光學系統中所扮演的重要角色，並說明超穎介面透鏡設計的基本原理與相位控制方法，作為後續模擬與實作的理論基礎。最後簡介論文整體架構與各章節之安排邏輯。

第二章說明整合設計模擬、製程實作與量測分析，首先建立單一奈米柱之相位資料庫，並透過廣義斯乃爾定律配置金屬透鏡結構，利用 FDTD 方法進行聚焦光場模擬分析。接著詳細介紹電子束微影、乾式蝕刻、封裝膠滲透處理等製程步驟，並於各階段進行 SEM 結構觀察以確認形貌穩定性。最後透過實驗平台量測穿透效率與聚焦特性，並與模擬結果進行比對，分析封裝條件對光場表現之影響，並討論結構倒塌元件的可用性與容錯性。

第三章作結論與未來展望，綜整本研究設計與實驗成果，評估所設計之超穎透鏡在封裝與製程條件下之效能表現，說明其具備良好穩定性與應用潛力，並提出後續可持續優化之方向，包含材料選擇、製程簡化與多功能元件整合等面向。



第一章圖表

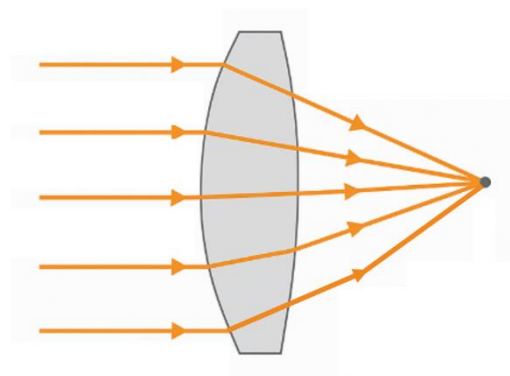


圖 1-1 (a)傳統光學元件， (b)傳統光學透鏡聚焦示意圖。

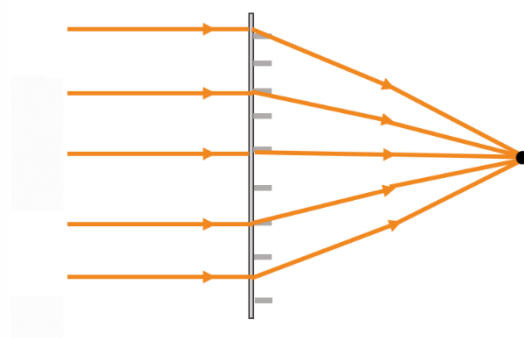
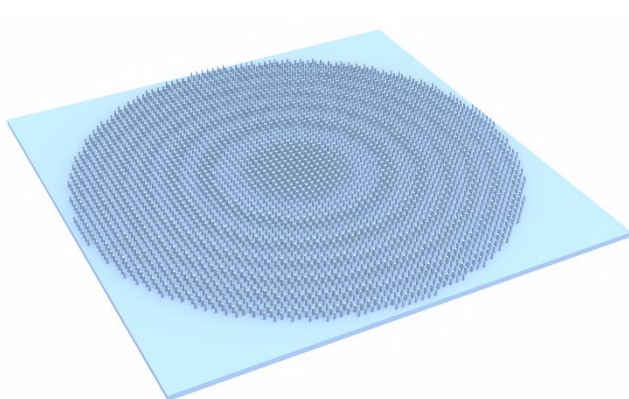


圖 1-2 (a)超穎透鏡元件， (b)超穎透鏡聚焦示意圖。

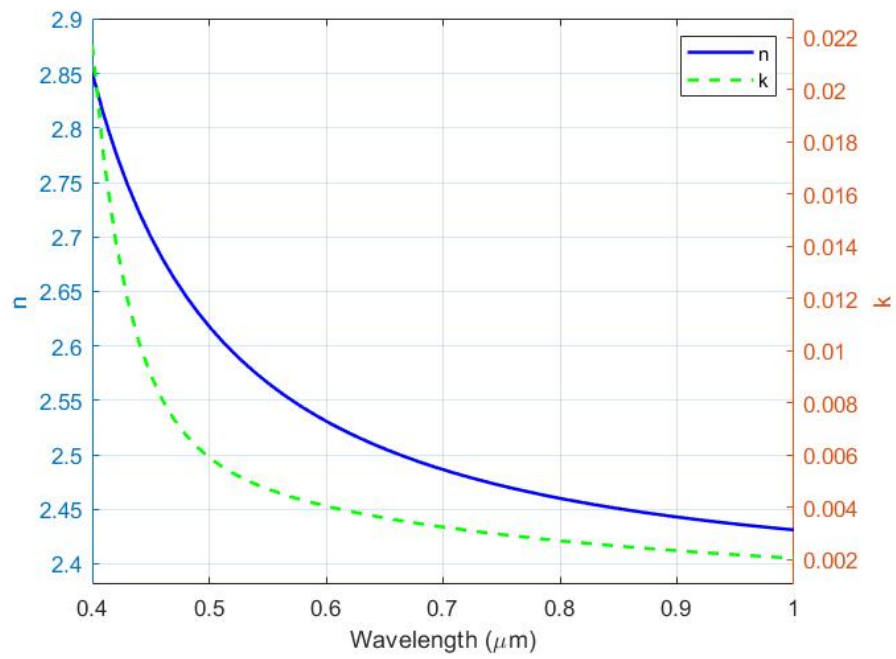


圖 1-3 二氧化鈦(TiO_2)折射率與消光係數量測圖

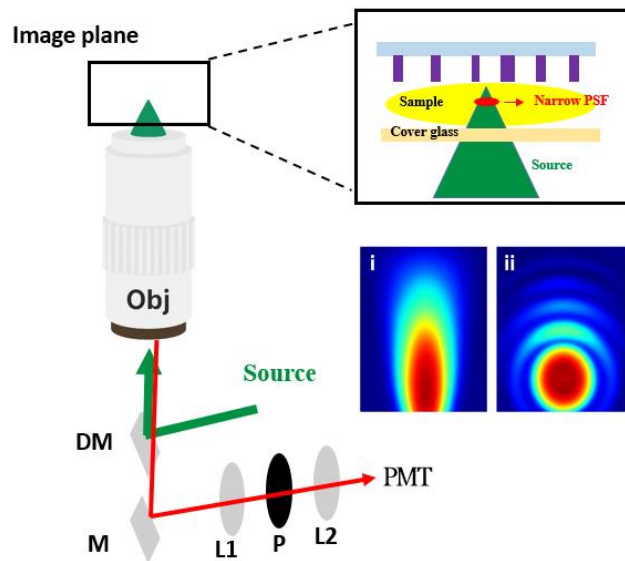


圖 1-4 結合超穎介面之窄化點擴散函數 (PSF) 螢光成像系統與聚焦效果比較示意圖。小圖(i)(ii)為使用前後之 PSF 橫截面分布比較，可見聚焦點收斂效果提升。

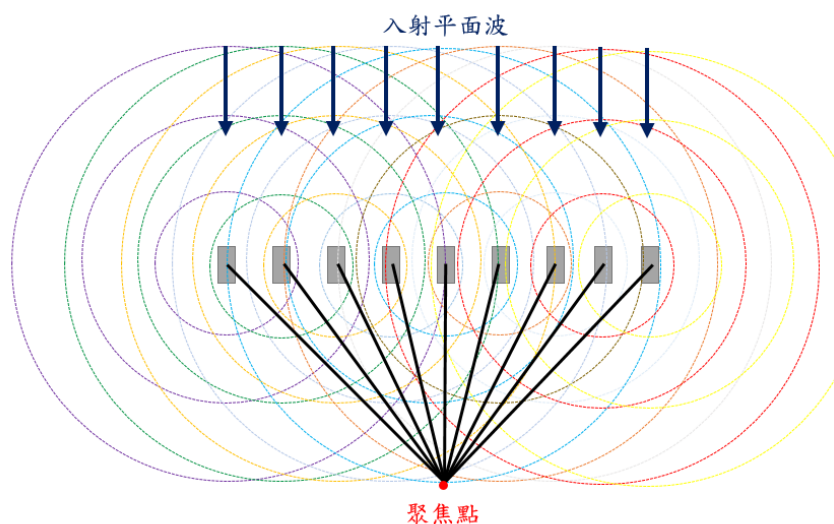


圖 1-5 以惠更斯原理模擬超穎介面聚焦機制。

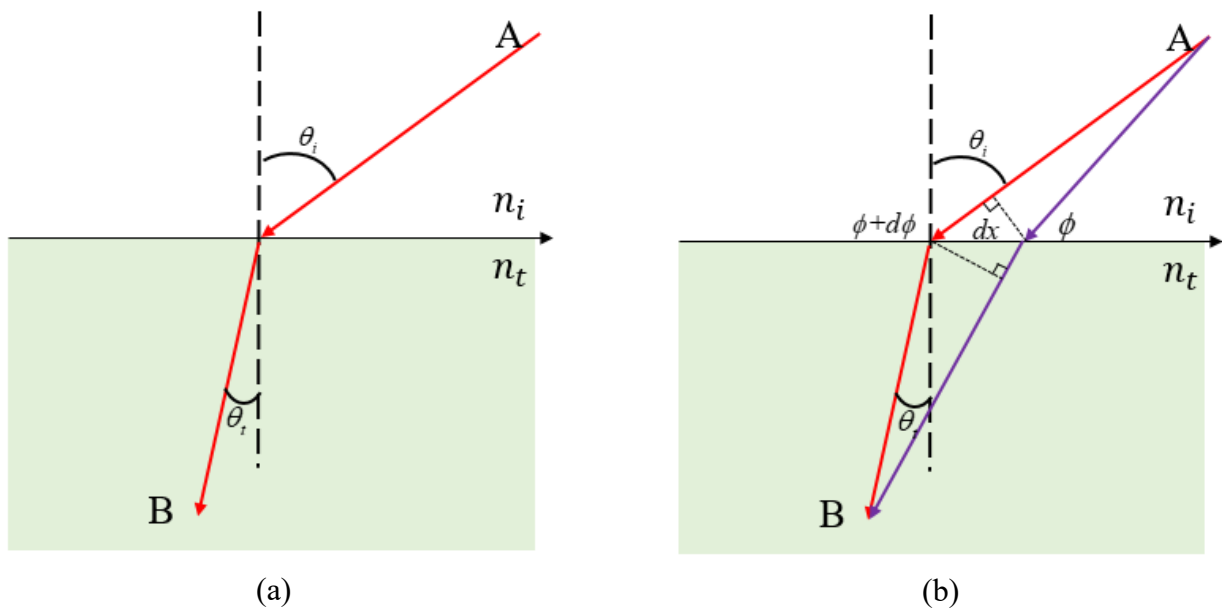


圖 1-6 (a)斯乃爾定律示意圖， (b)廣義斯乃爾定律示意圖。

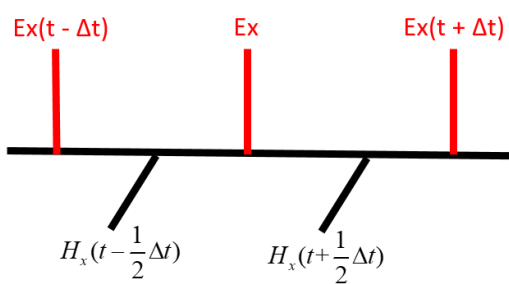
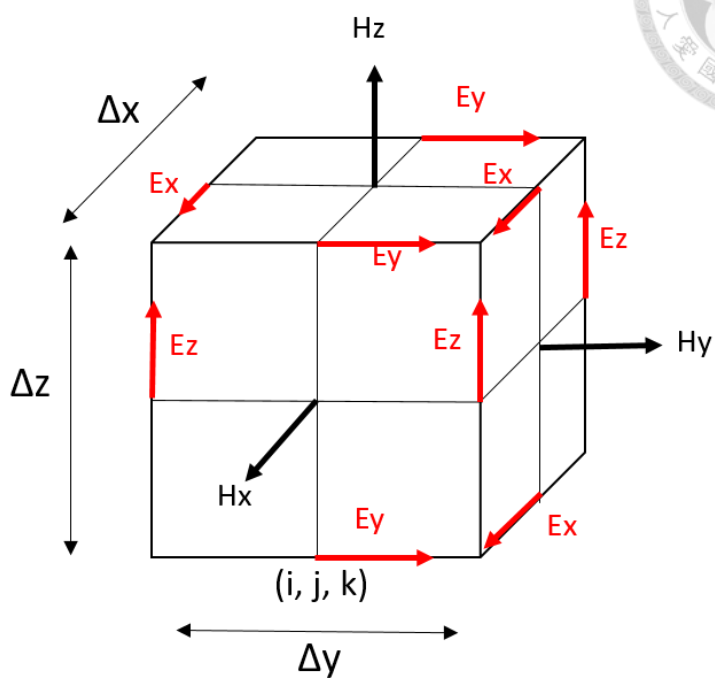


圖 1-7 時域有限差分法演算法示意圖

第二章 用於內視鏡光學之超穎介面透鏡之研製



2.1 前言

本研究與國立臺灣大學醫學院醫療器材與醫學影像研究所駱遠老師團隊合作，共同開發應用於生醫內視鏡系統之自聚焦超穎透鏡[13]。

為建立後續超穎介面元件設計所需之相位資料庫 (phase library)，本研究首先針對單一圓柱狀奈米柱結構進行參數模擬掃描，藉此界定可行的設計參數範圍，結構示意圖如圖 2-1。模擬中固定結構週期為 250 nm，並改變奈米柱的橫向尺寸以調控填充因子 (F.F)，其範圍設定為 0.1 至 0.9。計算各參數下對應的相位延遲與穿透率，作為設計依據。模擬結果顯示，為實現完整 0° 至 360° 的相位覆蓋，奈米柱結構需具備足夠的相位調控能力。經多組參數比對後，本研究選定柱高 1300 nm 為最終模擬結構，能有效涵蓋全相位範圍，並具備良好的穿透特性。

此外，考量實際製程解析度限制，奈米柱直徑應控制於約 80 nm 至 200 nm，對應填充因子約落在 0.32 至 0.8 之間。為兼顧相位可調性、穿透效率與製作可行性，亦須避開穿透率明顯下降的區段。因此，最終選定填充因子為 0.32 至 0.8 作為後續相位配置設計的有效參數範圍[14]。

接著由合作單位提供所需的相位輪廓 (phase profile)，如圖 2-2，對應於透鏡在焦距、孔徑與成像距離下的光場設計。接著我們使用 MATLAB 撰寫程式，根據所需相位對應參數掃描得出的所需單位柱寬分佈，進行直徑為 750 μm 的超穎介面排列。

獲得可用的結構資料後，本研究進一步使用 Python 程式自動化產出 GDS layout 檔案，搭配設計將奈米柱位置與尺寸參數轉換為製程可用的圖形資料。設計完成後，利用 KLayout 軟體進行檢查，並輸出供後續電子束微影製程使用。



2.2 超穎介面設計與模擬

2.2.1 單元結構參數掃描

本研究旨在設計具備聚焦功能之超穎介面元件，首先針對其基本單元：二氧化鈦(TiO_2) 奈米柱結構進行系統性的參數掃描分析，建立完整的相位資料庫後，能作為後續相位配置設計的依據。模擬將條件設定為 TE 偏振光垂直入射，基板為折射率約 1.45 的二氧化矽(SiO_2) 玻璃，並考量實際封裝情況，將光學黏著劑 NOA81 納入模擬模型中，以提高設計的實用性與準確性。

在結構設定方面，奈米柱陣列的排列週期 (P) 固定為 250 nm，操作波長則設定為 600 nm。橫向尺寸變化對應的填充因子(Filling Factor, F.F)由定義式 $F.F = W/P$ 決定，其中 W 為奈米柱寬度。模擬中將 F.F 從 0.1 掃描至 0.9，步進為 0.02，以探討不同奈米柱寬度對光學特性的影響。為進一步分析柱高對相位控制能力的影響，模擬亦針對不同柱高 (1000 nm 至 1400 nm) 進行比較，並記錄對應的穿透率 (Transmission) 與相位延遲 (Phase Shift) 變化。

模擬採用週期性邊界條件並透過有限差分時域法 (FDTD) 計算其光學響應。圖 2-3 展示不同奈米柱高度下的模擬結果。圖 2-3(a)為穿透率隨填充因子變化的趨勢，圖 2-3(b)則為相位延遲隨填充因子變化的趨勢。結果顯示，大多數高度設定下的結構均能維持穿透率在 75 %以上，顯示良好的透光性。然而在柱高為 1000 nm 至 1200 nm 時，相位變化範圍不足，未能涵蓋完整的 0° 至 360° ，限制了其在全相位設計中的應用彈性。相較之下，當柱高為 1300 nm 或更高時，便能實現完整的相位控制範圍，同時維持高穿透率，顯示其具備設計所需的光學特性。

綜合考量穿透率與相位覆蓋範圍，本研究最終選定柱高為 1300 nm 作為後續設計之最佳參數設定，穿透度及相位曲線如圖 2-4(a)(b)，並據此建立相位對應資料庫，供聚焦型超穎介面元件設計使用。



2.2.2 基板折射率對光學行為之影響

本研究雖然在實際製程中選用折射率約為 1.45 的玻璃基板，然為更全面理解基板光學性質對元件性能的潛在影響，我們進一步進行不同基板折射率條件下的模擬分析。

在實際應用中，基板材質的選擇往往受限於機械穩定性、製程兼容性與成品封裝條件，可能導致折射率出現變動。此外，未來若需將本設計應用於彎曲型、透明聚合物基板（如 COP、PET 等）或多層封裝元件中，基板的光學折射率可能與目前所採用材料有顯著差異。因此，預先探討基板折射率對光學響應之影響，可作為設計容差與元件可擴展性的參考依據。

在本次模擬中，尚未納入封裝層對結構的影響，入射光源波長設定為 540 nm，奈米柱材料選用二氧化鈦(TiO_2)，高度為 600 nm。使用 RSoft FDTD 模擬軟體，系統性地掃描基板折射率範圍，從 $n=1.1$ 至 $n=1.8$ ，以評估不同基板材料對光學響應之影響。分析其對穿透率與出射相位的影響。

模擬結果如圖 2-5(a)(b)所示：

(a) 穿透率方面：隨著基板折射率升高，穿透率呈現明顯下降趨勢。當基板折射率為 1.1 時，穿透率可達到約 90%，但當折射率升高至 1.8 時，穿透率降至約 70% 以下。推測此為介面折射率對比提高，造成反射與散射損耗增加所致。

(b) 相位延遲方面：基板折射率的提升亦改變了相位延遲與結構參數之對應關係，導致相位覆蓋曲線產生壓縮或偏移。特別是在填充因子較小的區段，當基板折射率升高時，相位變化曲線的斜率顯著提升，表示高折射率基板會使設計更敏感於結構變動。

此結果強調了基板材料選擇對光學元件性能的影響。儘管本研究最終選擇以玻璃為基板，但本模擬提供了未來若需調整基板材質或應用於不同封裝條件下的參考依據。



2.2.3 相位設計流程與自動化佈圖

1. 建立相位輪廓 (Phase Profile)

根據預期透鏡的聚焦距離與入射波條件，利用 MATLAB 撰寫之程式，根據廣義斯乃爾定律計算整個設計區域中每一個單元所需的相位延遲，並形成二維相位分佈矩陣。程式同時支援 TE 與 TM 偏振條件的設計，並可額外加入偏移角度參數。

2. 單元相位掃描與幾何對應

本研究先透過 RSoft 的 FDTD 模擬，針對不同橫向尺寸(F.F)與高度組合的 TiO_2 奈米柱進行電磁模擬，建立其穿透率與相位延遲響應資料庫 (phase library)。並對實驗掃描結果進行二維內插，建立相位延遲與 F.F 之連續對應關係。

對於每一位置的設計相位值，程式會搜尋對應最接近的 F.F 組合，並計算其匹配誤差 (FF_error)，最終生成符合設計需求之 F.F 分佈矩陣。

3. 遠場模擬分析

為驗證本研究設計流程與相位控制能力的準確性，特別先針對線性相位梯度進行偏折型超穎介面結構模擬，將設計所得之相位配置套用於陣列，並觀察其遠場輻射方向。模擬結果如圖 2-6 所示，主要能量集中於偏折角約 20° 的方向，符合理論預期，說明建立之相位延遲資料庫可正確對應光束偏折角度，驗證本設計流程之可行性與物理正確性[15]。

4. 幾何資料儲存與轉換

選定後的結構資料包含各點之空間位置 (P_X, P_Y) 與對應之奈米柱尺寸 (FF_TE, FF_TM)，最終將其儲存為 .mat 格式供後續 Python 排版程式調用。此階段已完整建立 2D 結構參數圖，涵蓋整個設計透鏡範圍。

5. 版圖自動生成 (GDS Layout Generation)

使用 Python 程式 GDSdrawer_exp.py 搭配 gdstk 函式庫，讀取上述 .mat 結構資料，自動繪製每一奈米柱的方形圖案，並以 gdstk.rectangl 建構單元圖形後重複排

列，產生對應之版圖資料。最終輸出為.gds 格式，可直接輸入至電子束微影系統進行寫入製程。





2.3 超穎介面製作

本研究所設計之超穎透鏡元件，需具備亞波長尺度之奈米柱結構，製作過程涵蓋薄膜沉積、圖案定義、金屬遮罩建立與奈米蝕刻等步驟，最終透過掃描式電子顯微鏡驗證結構完整性與尺寸精度。整體製程流程如圖 2-7 所示，以下為各步驟之詳細說明。

首先，以玻璃為基板進行製程，並使用射頻濺鍍機(Radio Frequency Sputtering)於基板表面沉積一層二氧化鈦(TiO_2)薄膜。濺鍍所使用之靶材為直徑三英吋、純度達 99.99 %之高純 TiO_2 ，以確保薄膜光學性質穩定且適用於後續高折射率相位控制設計。沉積完成後，將樣品置於高溫爐中進行退火處理，以改善膜層的結晶品質並提升其光學均勻性[16]。

為精確掌握薄膜厚度與成長速率，使用可變角度橢圓偏振儀 (Variable Angle Spectroscopic Ellipsometer, VASE VB-400, J.A.Woollam Co.) 進行光學參數量測，並回饋至濺鍍時間參數，控制最終膜厚落於設計需求範圍內 (1300 nm)。

薄膜成長完成後，進行電子束微影製程。首先將電子束光阻以旋轉塗佈 (Spin Coating) 方式塗覆於 TiO_2 表面，經烘烤去除溶劑後，使用電子束微影機 (E-beam Lithography) 進行高解析圖案曝光。所使用之圖樣為依據相位分佈設計所得之 GDS 版圖，GDS 檔案由 Python 撰寫之自動排版程式產生，包含各奈米柱位置、尺寸與形狀資訊。

完成曝光與顯影後，利用電子槍蒸鍍機 (E-gun Evaporation) 在圖案區域沉積一層金屬硬遮罩。本研究選用高純度鎳 (Ni, 純度 99.99%，尺寸 3 mm × 6 mm) 作為遮罩材料，因其具備良好之蝕刻抗性與機械強度。蒸鍍完成後，進行 lift-off 製程，移除非圖案區域之光阻與金屬，使遮罩僅保留於設計圖案之上。

接著，使用感應耦合電漿反應式離子蝕刻系統 (Inductively Coupled Plasma-Reactive Ion Etching, ICP-RIE, Oxford Instruments/ Plasmalab System) 對 TiO_2 薄膜進行乾式蝕刻，依據目標結構深度調整參數與氣體組合 (如 SF_6/O_2)，以達成高深寬比奈米



柱結構[17]。

製程完成後，透過掃描式電子顯微鏡（Scanning Electron Microscope, SEM）觀察樣品橫截面與上視圖，確認奈米柱尺寸、排列規則性與結構均勻性，並作為結構是否符合設計規格之依據。

2.3.1 超穎介面製作流程

A、TiO₂薄膜沉積與膜厚控制

1. 基板清潔

- 使用尺寸為 1 cm × 1 cm 的玻璃基板
- 以棉棒沾丙酮與甲醇反覆交替擦拭、沖洗髒污，直至無污染
- 氮氣吹乾後，置入濺鍍機腔體中備用

2. 濺鍍沉積 TiO₂ 薄膜

- 濺鍍機腔體抽真空至 $< 2.5 \times 10^{-6}$ Torr。
- 通入氬氣(Ar)40 sccm (standard cube centimeter per minite) 以及氧氣(O₂) 0.2 sccm，製程壓力控制於 1×10^{-2} Torr。
- RF 功率設定為 200 W，靶材為純度 99.99 % TiO₂。
- 初期封閉檔板進行 20 分鐘預打，再開啟檔板沉積 1 小時 TiO₂。
- 完成後取出樣片。

3. 橢圓偏振儀量測

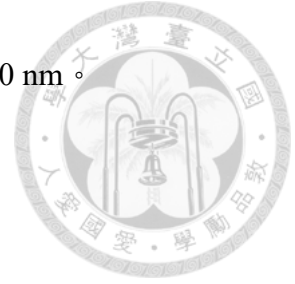
- 使用標準片校正儀器後，貼無痕膠帶並固定樣片。
- 以 TiO₂材料模型擬合量測數據，取得實際膜厚與成長速率 (nm/hr)。

4. 高溫退火(Annealing)

- 樣品置入高溫爐中，以 20 分鐘升溫至 700 °C。
- 保持 700 °C 退火 2 小時，提升膜層結晶性與光學均勻性。

5. 重複濺鍍至指定厚度

- 據量測結果重複步驟 A.2~A.3，直至成膜厚度達 1300 nm。



B、光阻塗佈與電子束微影

1. 樣品表面前處理

- 使用無塵布與氣體清洗方式清潔樣片表面，去除殘留雜質與顆粒。

2. 旋塗接著劑 HMDS

- 旋轉塗佈 HMDS(Hexamethyldisilazane)，轉速設定為 4000 rpm。

3. 正光阻塗佈

- 旋塗正型光阻 AR-P6200.09，轉速設定為 7500 rpm。
- 烘烤溫度為 140 °C，形成約 150 nm 厚的光阻層。

4. 導電層 E-spacer 塗佈

- 旋塗導電層 E-spacer，轉速設定為 2000 rpm，溫度 140 °C，時間 1 分鐘。
- 此步驟用於避免曝光過程中電子累積造成電荷干擾，提升圖形準確性。

5. 電子束曝光

- 使用電子束微影機 (ELS-7800) 圖案寫入，操作電壓設定 80 kV，電流為 100 pA。
- 曝光圖案依據預先設計之 GDS 版圖，包含奈米柱位置與尺寸資料。

6. 去離子水沖洗

- 曝光完成後，先以去離子水 (DI Water) 短暫沖洗樣品表面，去除導電層或殘留物。

7. 顯影

- 使用 AR 600-546 顯影液，顯影時間為 1 分鐘。
- 此步驟將未曝光區域光阻溶解，留下完整圖案輪廓。



8. 乾燥處理

- 顯影後樣品取出，以氮氣槍(N₂ Gun)將表面水氣與殘液吹乾，完成圖案轉移準備。

C、金屬遮罩蒸鍍 (Ni)

1. 鎳靶材準備與確認

- 使用純度 99.99%、尺寸約 3 mm × 6 mm 的鎳 (Nickel) 錠作為蒸鍍材料。
- 鎳錠表面無明顯氧化層，並檢查剩餘材料量是否足夠

2. 樣品固定與抽真空

- 將顯影完成之樣品置於蒸鍍機載台中，確認光阻圖形完整無損。
- 啟動真空系統，將腔體壓力抽至低於 5×10^{-4} Torr，以避免蒸鍍過程中氧氣與其他雜質干擾鍍膜質量。

3. 功率設定與鍍率穩定

- 啟動電子槍蒸鍍系統 (E-gun evaporation)，對鎳錠進行加熱熔融。
- 逐步調整功率至適當範圍，使鍍率穩定於 1 Å/s。
- 蒸鍍速率透過晶體膜厚計 (Quartz Crystal Microbalance) 即時監控。

4. 開啟檔板並開始鍍膜

- 當鍍率穩定後，開啟檔板開始正式沉積。
- 持續蒸鍍至膜厚達 70 nm，形成完整金屬遮罩結構。

5. 完成金屬遮罩製作

- 蒸鍍完成後關閉設備，待樣品冷卻後取出，準備進行後續 lift-off。

D、光阻與金屬剝離 (Lift-off)

1. 剝離處理

- 將鍍有金屬遮罩的樣品浸入剝離液 AR 600-71 中，靜置至光阻與覆蓋其上的金屬層自然脫落。



- 剝離時間依圖案密度與金屬厚度調整，確保遮罩區域完整移除。

2. 表面清潔

- 取出樣品後，使用丙酮（Acetone）與異丙醇（IPA）交替沖洗殘膠與有機物。
- 氮氣槍吹乾樣品表面，確保無殘留污染，備妥進行乾式蝕刻製程。

E、反應式離子蝕刻（ICP-RIE）

1. 樣品準備

- 為提升製程均勻性與樣品固定性，將試片以貼附方式固定於 8 吋矽晶圓表面。

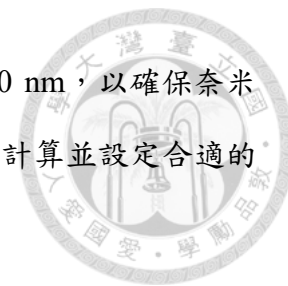
2. 氧電漿前處理（去除有機雜質）

- 將樣品送入 ICP-RIE 腔體，抽真空至腔壓低於 7×10^{-2} Torr。
- 設定預處理參數如下：
① HF 功率:120 W ② ICP 功率：250 W
③腔體壓力控制（APC）：30 mTorr ④ O₂流量：50 sccm
- 此步驟可有效移除表面殘留光阻與有機污染，提升主蝕刻效果

3. 主蝕刻製程（TiO₂結構成形）

- 主蝕刻氣體使用六氟化硫(SF₆)，氣體流量設定為 10 sccm。
- 蝕刻參數如下(10 min 30 s)：
① HF 功率:150 W ② ICP 功率：200 W
③腔體壓力控制（APC）：5 mTorr ④ SF₆ 流量：10 sccm
- 蝕刻參數如下(2 min)：
① HF 功率:180 W ② ICP 功率：200 W
③腔體壓力控制（APC）：5 mTorr ④ SF₆ 流量：10 sccm
- 由於設計之奈米柱結構高度為 1300 nm，超過單次蝕刻深度控制範圍（1000 nm），因此將蝕刻程序分為兩段進行：第一段進行約 1000 nm 深

度的蝕刻，第二段以不同功率條件再蝕刻剩餘約 300 nm，以確保奈米柱完整成形。根據預先量測之蝕刻速率與設計深度，計算並設定合適的蝕刻時間，確保奈米柱完整蝕刻成形。



F、金屬遮罩移除與樣品清潔

1. 金屬遮罩蝕刻液製備

- 使用硫酸(H_2SO_4)與雙氧水(H_2O_2)以體積比 3:1 混合，配製選擇性金屬蝕刻液。
- 採「酸中加氧」方式操作(將 H_2O_2 加入 H_2SO_4 中)，以避免過度放熱或濺灑。

2. 金屬移除

- 以鑷子夾取試片，浸入蝕刻液中 3~5 秒，觀察金屬遮罩是否完全去除，避免過度蝕刻影響結構邊界。
- 若遮罩尚未完全移除，可重複短時段浸泡與觀察操作。

3. 清洗與保存

- 金屬移除後立即以大量去離子水沖洗試片，去除酸性殘留。
- 再以丙酮與異丙醇清潔表面，去除水痕與微粒，並以氮氣吹乾。
- 最後將樣品收納於試片盒中，避免受潮與污染，備妥後續觀測與量測。

4. 熱烘處理 (Baking)

- 將清洗完成之樣品放置於熱台上，設定溫度約為 120~150 °C，烘烤 5~10 分鐘。
- 此步驟可有效去除樣品表面與微孔中的水分殘留，降低後續儲存或量測時的污染與損傷風險。

5. 樣品保存

- 待樣片冷卻後置入乾淨樣品盒中保存，避免灰塵、濕氣與有機污染，準備後續 SEM 觀測與光學特性量測。



2.4 封裝條件對超穎介面結構與光學性能之影響

2.4.1 模擬分析封裝材料對超穎介面光學效應之影響

在生醫內視鏡等應用情境中，超穎透鏡需直接暴露於體液或潮濕環境中進行觀測與成像，為確保其操作穩定性與生物相容性，封裝層的設計成為不可或缺的關鍵。除了避免環境對光學性能的干擾外，更重要的是保護超穎結構中高 aspect ratio 的奈米柱元件，防止其在使用過程中因受潮、表面張力或機械碰撞而產生倒塌的問題。

然而，封裝層的折射率與材料性質亦會改變奈米結構周圍的有效介電環境，進一步影響其相位調控能力與光學效率。因此，本節將透過模擬方式，系統性探討不同封裝材料對相位響應與穿透率的影響，並分析其在實作穩定性、光場控制與生醫封裝可行性上的整體表現，以篩選出最適合應用於本研究之超穎透鏡結構的封裝材料。

為確保封裝層對超穎結構光學行為之影響能夠一致比較，本研究在模擬中統一設定封裝層厚度為 $2\ \mu\text{m}$ ，並將奈米柱結構的高度固定為 $1300\ \text{nm}$ 。此一高度設定為實驗設計中實際可行的結構參數，亦可避免封裝層未完全覆蓋或過度滲透的極端情況。透過不同折射率封裝材料對相同結構的光場模擬，可系統性探討其對穿透率與相位響應的影響，並評估各材料於生醫應用中之實用性與穩定性[18]。

本研究針對三種代表性封裝材料：PDMS($n=1.41$)、PMMA($n=1.48$) 與 NOA81($n=1.56$) 進行模擬分析，分別觀察其在不同填充因子(F.F)下的穿透率 (Transmission) 與相位響應 (Phase)，如圖 2-8。

模擬結果顯示，三者皆可實現完整的 360° 相位覆蓋範圍，且穿透率多數可維持在 $0.75\sim 0.95$ 之間，具備實際應用潛力。然而進一步比較可發現，NOA81 在相位響應的連續性與單調性上表現最為優異，其 phase 與 F.F. 曲線呈現穩定變化，避免多重跳變情形，提供更高的設計自由度並降低結構參數敏感度。此外，其穿透率雖略有震盪，整體趨勢穩定，並於部分區段達到高於 PDMS 與 PMMA 的峰值。



除光學表現外，NOA81 亦具備顯著的製程與實作優勢。其為 UV 固化型封裝膠，操作簡便，無需真空脫泡與烘烤，固化後可快速形成高機械強度之保護層。相較之下，PDMS 為彈性體，於潮濕環境中易吸水變形，並可能滲入奈米結構間隙，造成有效折射率改變與結構不穩定。對於本研究中應用於生醫內視鏡的超穎透鏡設計而言，NOA81 更能有效防止高深寬比(aspect ratio)奈米柱在潮濕環境中倒塌或脫落，提高裝置的穩定性與可靠性。

綜合模擬與實作考量，NOA81 在相位控制、穿透效率與結構保護性上皆展現出最理想的整體表現，因此本研究選擇以 NOA81 作為後續超穎結構元件封裝的實驗材料。



2.4.2 封裝方式比較與結構滲透性觀察

為探討封裝膠是否滲透至奈米柱結構內部對元件光學特性的影響，本研究分別建立「未滲透 (non-infiltrated)」與「滲透 (infiltrated)」兩種結構模型，如圖 2-9(a)(b)所示。兩者皆使用折射率為 $n=1.56$ 的紫外光固化膠 NOA81 作為封裝材料，基板則為折射率約為 1.45 的二氧化矽 (SiO_2)，並以二氧化鈦 (TiO_2) 奈米柱作為超穎介面基本單元，結構示意圖如圖 2-9。圖 2-9(b)的不同處在於結構中 NOA81 進一步滲入奈米柱與柱間的空隙，填補原本為空氣的低折射率區域。

穿透率 (Transmission) 與相位延遲 (Phase Shift) 的影響模擬結果如圖 2-10(a)(b) 所示。滲透結構相較於未滲透結構具有整體略高的穿透率，尤其在中低填充因子區段 ($F.F \approx 0.3 \sim 0.5$) 表現更為穩定。這可歸因於 NOA81 滲入後減少了界面折射率差異，降低散射與反射損耗，使更多光能量得以通過。此外，相位延遲部分也顯示，滲透結構有較佳的連續性與可控性。相比之下，未滲透結構的相位變化在高填充因子區段 ($F.F = 0.6 \sim 0.8$) 則出現劇烈的相位跳變 (phase discontinuity)，即相位值隨微小的幾何變化發生急遽波動，這種跳變使得從預設相位需求反推結構參數變得困難，容易造成相位無法覆蓋完整設計範圍或區域內相位值重複，降低元件的均勻性與聚焦品質。因此在實際製成應優先考量滲透奈米柱結構之封裝方式，以提升元件光學效能與製作良率。

為了驗證封裝膠是否實際滲透進入奈米柱結構間隙，本研究原先規劃使用聚焦離子束 (FIB) 對樣品進行斷面切割，再搭配穿透式電子顯微鏡 (TEM) 進行觀察，以獲得封裝膠與奈米結構間的界面形貌[18]。然而，在諮詢儀器專業人員後得知，FIB 切削深度通常從樣品表面下切約 $10 \mu\text{m}$ 為最佳焦距，遠超出本研究奈米柱高度 (約 $1.3 \mu\text{m}$) 的結構區域，若直接切削，觀察層將錯過奈米柱與封裝層的接觸界面。此外，FIB 製備前需先進行樣品拋平，對於具微結構凸起的封裝樣品而言較為困難，且具破壞性。因此本研究改採低侵入性的觀察策略：將已固化之封裝膠以物理方式撕除，形成樣品與封裝膠體兩端，如圖 2-11。接著以掃描式電子顯微鏡

(Scanning Electron Microscope, SEM)觀察其膠體表面痕跡與樣品表面的奈米柱形貌，藉此推估封裝膠是否滲入奈米柱間。

實驗設計上，分別進行兩種封裝條件：一為未施加外力、自然旋塗固化的對照組，另一為經抽真空並輕壓玻璃蓋片以促進滲透的加壓組。封裝完成後以手動方式將封裝膠撕除，並採用 SEM 觀察撕除後膠體底部與樣品表面之結構狀況。

圖 2-12 顯示在未加壓條件下樣品表面及封裝層表面的影像，圖 2-12(a)顯示撕除後之封裝膠表面輪廓平整，而樣品表面影像仍可見奈米柱排列清晰，柱間並無明顯壓痕或填補痕跡，如圖 2-12(b)，推測封裝膠主要僅附著於柱頂表面，未發生滲透；另一方面在真空汞加壓條件下，如圖 2-13(b)，膠上明顯出現與柱陣相對應之壓痕與變形，顯示膠體與奈米柱結構接觸更為緊密，推測可能已發生滲透，說明抽真空與施壓對封裝滲透具有促進作用。

然而，由於撕除方式無法提供橫向截面資訊，因此仍難以判斷膠體是否完全滲透至柱底，或僅在結構上緣產生變形。此外，撕除過程本身可能導致局部膠體破裂或形貌改變，進而影響觀察結果。若需進一步確認滲透深度與形貌分布，未來仍可考慮改採物理切割方式（如玻璃切割機）進行斷面樣品製作，搭配高解析 SEM 或光學斷層掃描等技術進行觀察。

綜上所述，雖然本研究所採用之撕除觀察方式僅為間接證據，但已成功區分不同封裝條件下膠體與結構的接觸差異，並提供有效佐證封裝參數對於滲透行為的影響，為後續封裝策略優化提供重要依據。



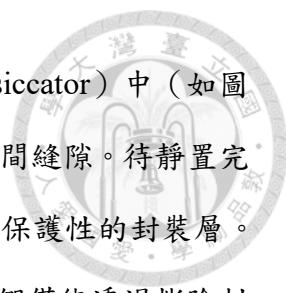
2.5 超穎介面透鏡之結果與討論

2.5.1 實驗結果影像

本研究針對臺大醫學院醫療器材與醫學影像研究所駱遠老師實驗室所提供之相位設計需求，進行直徑 $750\text{ }\mu\text{m}$ 之聚焦型超穎透鏡設計，並針對封裝條件與製程穩定性進行實驗驗證與分析。所採用之基本單元為圓柱狀二氧化鈦 (TiO_2) 奈米柱，結構高度為 1300 nm ，排列週期為 250 nm 。依據廣義斯乃爾定律 (Generalized Snell's Law) 計算透鏡各位置所需的相位延遲後，本研究利用 MATLAB 程式產生對應相位分布，並選取具對應相位值之奈米柱幾何參數。再透過 Python 排版程式自動化繪製每一奈米柱圖樣，並匯出為 .gds 版圖檔，如圖 2-14 所示，最終輸入電子束微影系統進行圖案寫入。

製程方面，本研究於各關鍵製作階段均進行掃描式電子顯微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) 觀察，以系統性紀錄奈米柱結構的形成過程與形貌演變。圖 2-15 至圖 2-18 分別展示電子束微影 (E-beam Lithography)、金屬遮罩剝離 (Lift-off)、乾式蝕刻 (ICP-RIE) 以及濕蝕刻 (金屬遮罩去除) 等步驟後之結構影像。在電子束微影階段，圖 2-15，可清晰觀察到奈米柱圖樣已成功轉寫至光阻層，排列準確，圖樣邊界銳利，未見曝光偏差與邊緣模糊現象。Lift-off 完成後，如圖 2-16，金屬遮罩準確地保留於預定圖樣區域，且底部結構未遭破壞，顯示金屬沉積與剝離步驟順利執行。經 ICP-RIE 蝕刻後，圖 2-17，柱體結構高度約為 1300 nm ，輪廓垂直且形貌筆直，證實蝕刻參數可穩定產生高 aspect ratio 結構。最後，在濕蝕刻移除金屬遮罩後，如圖 2-18，整體結構排列仍維持一致，柱體表面無破損與殘留物，顯示後處理未造成結構劣化。

在封裝條件方面，本研究選擇折射率為 1.56 的紫外光固化型光學膠 NOA81 作為封裝材料。根據前述模擬結果顯示，當封裝膠體滲透至奈米柱結構間隙時，能有效降低界面折射率差異，提升穿透率與相位連續性，進而改善整體光學效能。為提升封裝膠體滲入奈米柱結構的機會，本研究採用真空輔助封裝方式作為前處理步



驟。將旋塗 NOA81 光學膠之樣品置入真空乾燥器 (vacuum desiccator) 中 (如圖 2-19)，並在低壓條件下靜置約 12 小時，以促使膠體緩慢滲入柱間縫隙。待靜置完成後，再進行紫外光 (UV) 照射使其固化，形成完整且具機械保護性的封裝層。然而，由於奈米結構尺寸極小，且觀察技術仍存在限制，因此我們僅能透過撕除封裝層後之 SEM 影像進行間接判斷。從先前實驗結果可見，經真空處理後撕下的膠體表面出現明顯對應柱陣之壓痕，與未經真空封裝所呈現之平整表面相比有顯著差異。此現象推測為膠體與奈米柱產生更密合之接觸，並已滲透入結構間隙。

2.5.2 量測系統架設與結果分析

本研究設計並成功製作之聚焦型超穎透鏡樣品，最終送至駱遠老師實驗室進行實體光學量測，以驗證其實際聚焦效果與光學穿透性能。量測系統架構如圖 2-20 所示，雷射光先經過所製作之金屬透鏡（metalens）聚焦，再透過 NA 為 0.4 的物鏡與透鏡模組導入 CCD 感測器進行成像。為更加精確地定位焦點位置，實驗亦配合線性平台沿 Z 軸進行焦距掃描，取得不同位置之光斑分佈影像，以確認實際焦距與聚焦品質[19]。

圖 2-21 為模擬所得到的聚焦強度沿縱向掃描分佈結果，顯示主焦點位置集中清晰，旁瓣抑制效果良好，整體光場分佈符合預期，顯示相位設計準確且光學聚焦性能佳。圖 2-22 為實際量測之 CCD 聚焦影像結果，同樣呈現明確的主焦點聚集現象，與模擬結果高度一致，顯示本設計在實體製程後未產生顯著偏移或光場失真。進一步比較模擬與實驗結果，可驗證本研究所設計之超穎透鏡具備穩定且一致的光學傳輸特性。

實驗中先以功率計量測通過超穎透鏡前後的光功率變化。結果如表 2-1 所示，入射端雷射光功率為 4.3 mW，透過超穎透鏡後量測為 3.8 mW，對應穿透效率約為 88.4 %。此數值明顯高於前人使用相似尺寸設計之超穎透鏡報告中平均 70%~75 %的效率[19]，顯示本研究在設計與封裝製程方面具有明顯優勢，特別是在保持結構穩定性與提升光傳輸效率兩者之間取得良好平衡。另一方面，為進一步觀察本超穎透鏡之成像能力，亦引入標準解析測試圖（USAF resolution target）作為成像目標，並於拍攝聚焦影像（圖 2-23）。結果顯示，成像輪廓清楚、對比度良好，成功解析至 Group 8 Element 4 級別，顯示超穎透鏡在實際應用中具備成像功能，並非僅能產生聚焦點。此結果不僅證實本設計之相位控制有效，亦代表整體光學路徑損失有限，可應用於生醫影像系統等高解析需求場域。

在本研究早期製作過程中，曾有此款超穎透鏡樣品因奈米柱結構於製程中部分倒塌，產生局部排列錯亂與結構變形，如圖 2-24。然而，實際進行聚焦量測後，

仍可觀察到明顯的焦點形成，雖然總體透過效率僅約 46.8%，如表 2-2，但已能實現預期的光學聚焦功能，其聚焦強度分佈圖如圖 2-25。針對部分奈米柱倒塌之樣品進行聚焦量測分析，可觀察到在無封裝層情況下，如圖 2-25(a)，雖仍可辨識主焦點，但強度分佈不均，於 $Z \approx 70 \mu\text{m}$ 與 $110 \mu\text{m}$ 兩處出現能量集中，呈現明顯雙焦點現象。而在有封裝層情況下，如圖 2-25(b)，焦點表現顯著改善，光束集中度提升、旁瓣大幅抑制，整體分佈對稱性趨近於完整 metalens。然而，相較於圖 2-22(b)所示完整結構，仍可觀察到焦點稍具模糊與聚焦強度略低，反映結構缺陷仍對性能造成一定影響，但整體而言系統仍能實現基本聚焦功能，顯示本設計具備一定程度之容錯性。

進一步分析可推測，結構倒塌主要來自於奈米柱的高 aspect ratio (柱高與寬度比) 使其在乾燥過程中受毛細力影響而產生彎曲與黏結現象。根據文獻指出，當結構 aspect ratio 超過臨界值(約 1.5~2.2)時，在次微米間距下極易產生倒塌風險[20]。本研究中奈米柱高度約 1300 nm、週期為 250 nm，aspect ratio 超過 5，顯著高於文獻中穩定上限，為倒塌之可能主因。值得注意的是，雖然後續製作樣品柱高與週期皆相同，但更換為不同基板材質後，即未再觀察到倒塌情形。此結果可能與基板表面能、親水性或熱膨脹係數不同，進而影響乾燥步驟中液體分布與毛細壓力有關，亦可能降低毛細力或改善結構附著性，有助於提升機械穩定性。

綜合來看，本設計結構對於局部製程缺陷具有良好容錯性，整體光學行為並未完全喪失，亦可反映出此超穎透鏡設計於製程穩定性與實用性上的潛力，有助於未來進行更大面積或批次量產的應用發展。[21]

第二章圖表



	Power(mW)
Laser power	4.3
After metalens	3.8
Efficiency (%) = $3.8 / 4.3 = 88.4 \%$	

表 2-1 結構完整超穎透鏡之量測結果與效率

	Power(mW)
Laser power	3.2
After metalens	1.5
Efficiency (%) = $1.5 / 3.2 = 46.8 \%$	

表 2-2 部分倒塌超穎透鏡之量測結果與效率

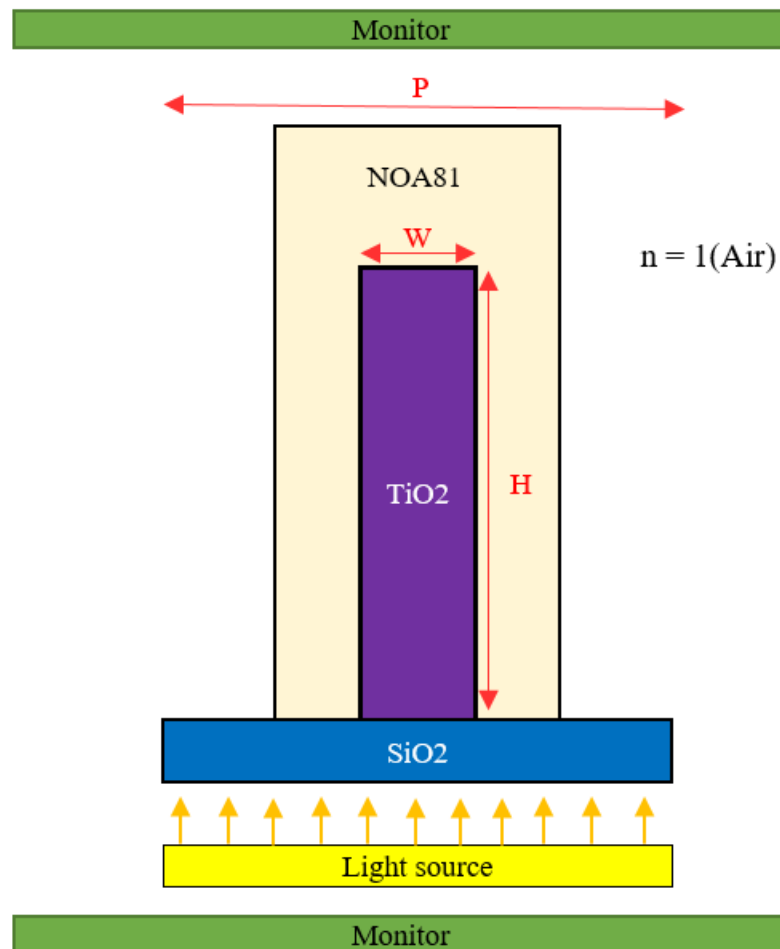


圖 2-1 超穎介面模擬設置圖

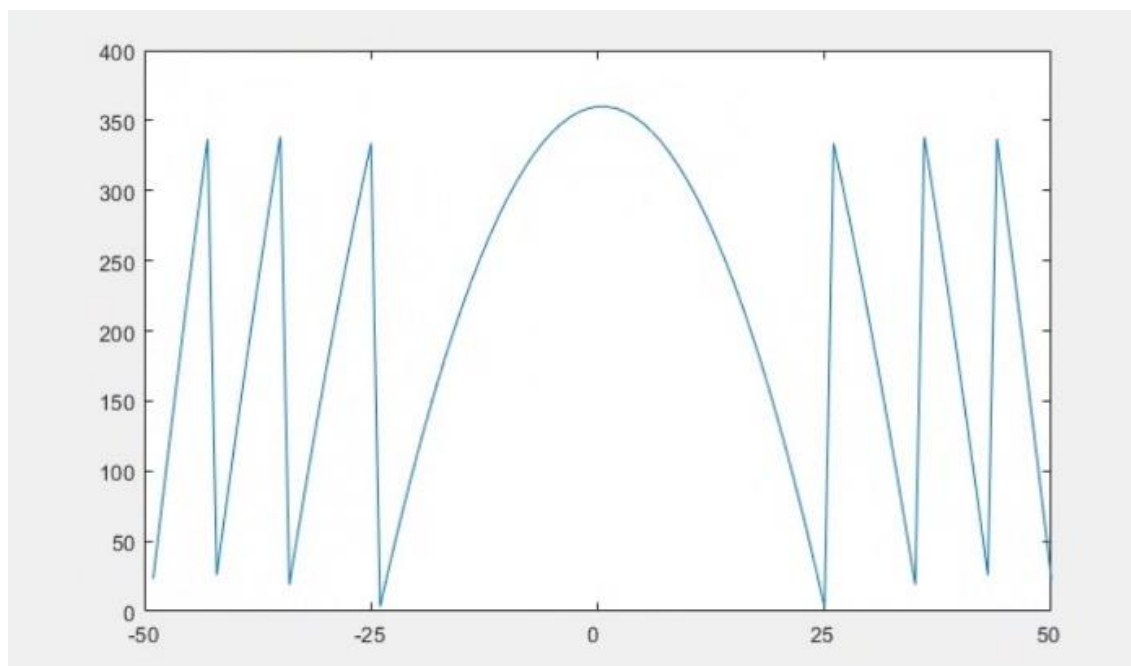


圖 2-2 相位輪廓圖(Phase profile)

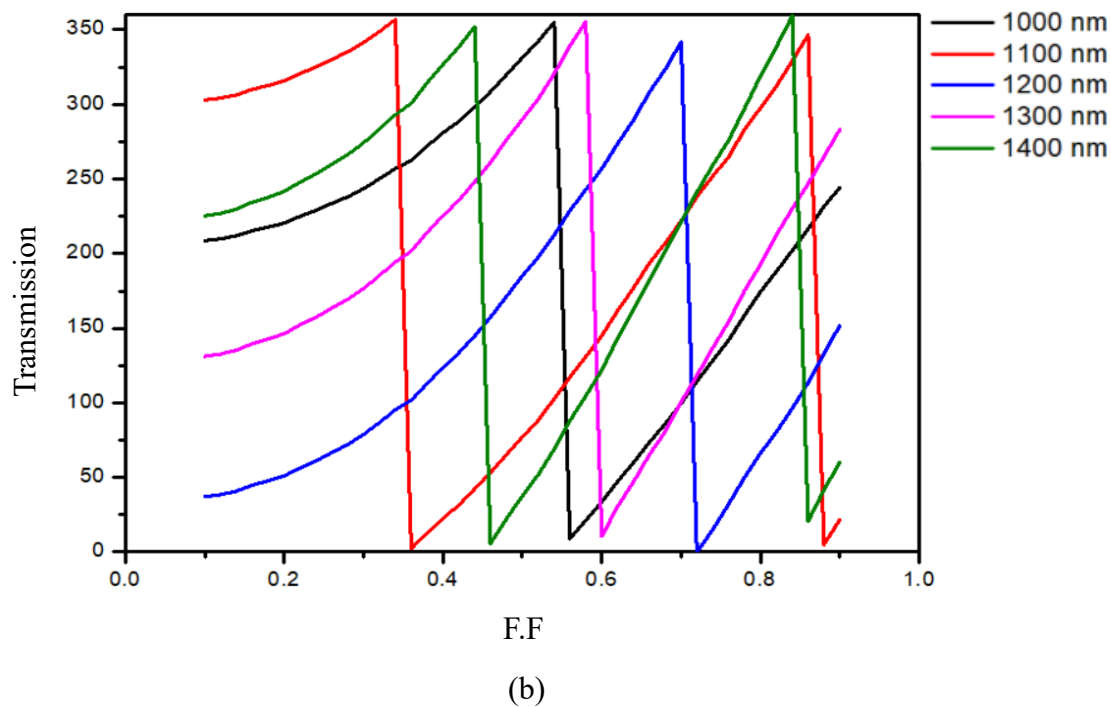
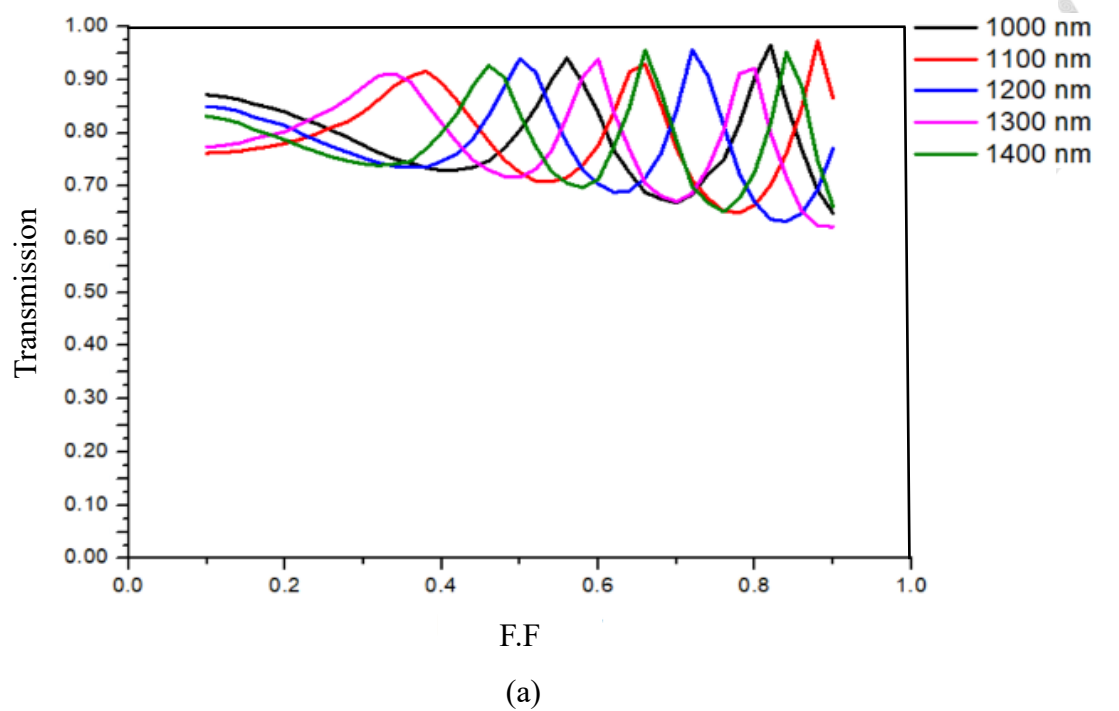


圖 2-3 在封裝材料 NOA81 ($n = 1.56$) 介質環境下，操作波長 $\lambda = 600$ nm、結構週期 $P = 250$ nm 之條件下模擬結果：(a)不同柱高下之穿透率對 F.F.之變化， (b)不同柱高下之相位對 F.F.之變化。

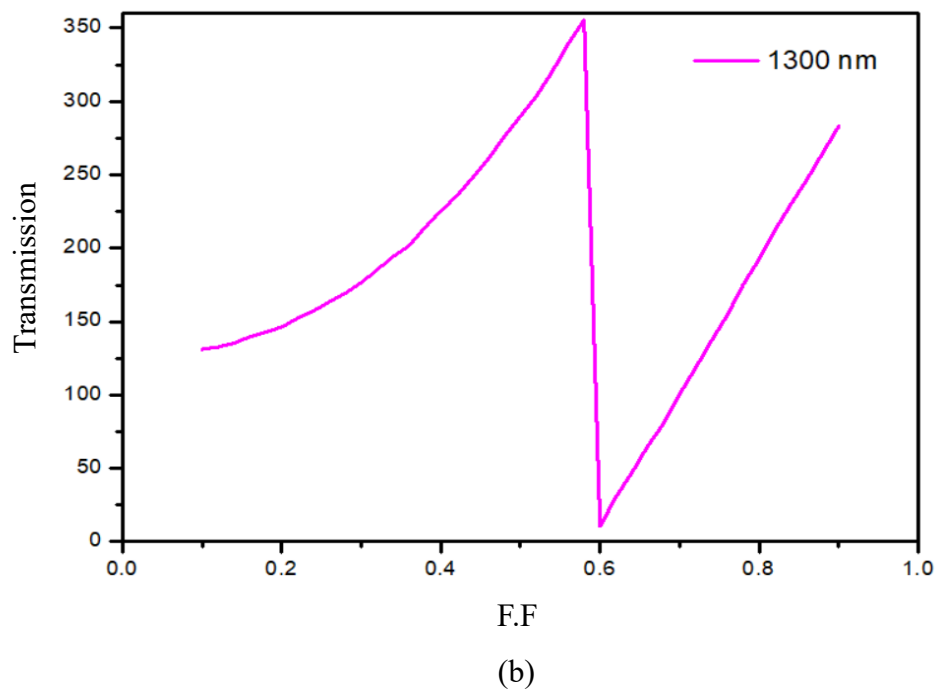
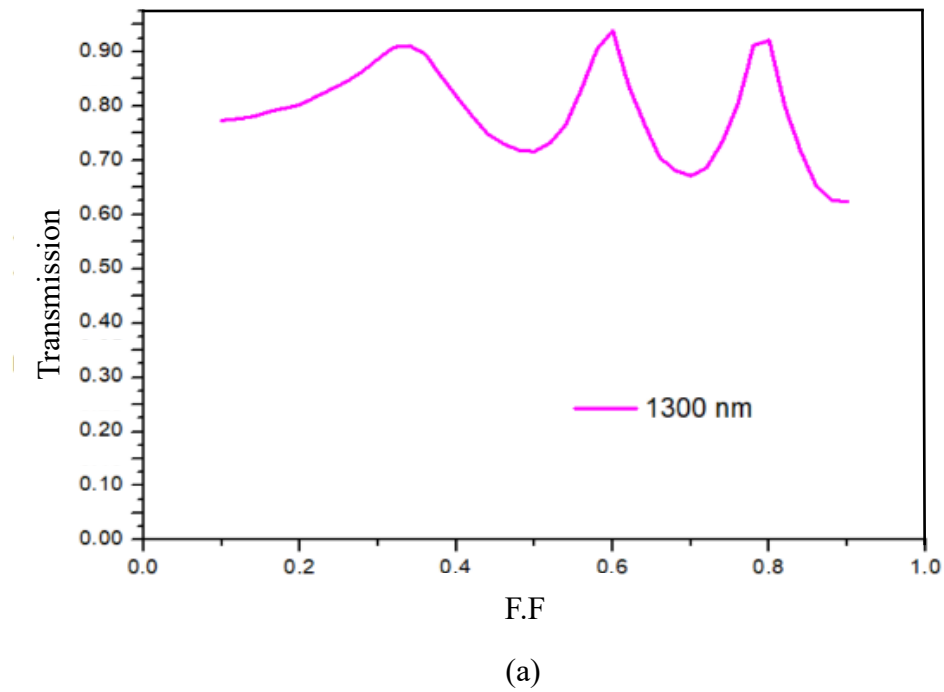
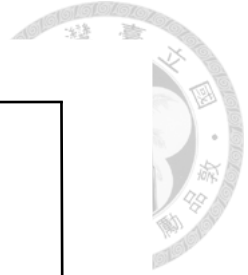


圖 2-4 在封裝材料 NOA81 ($n = 1.56$) 介質環境下，操作波長 $\lambda = 600$ nm、結構週期 $P = 250$ nm 之條件下模擬結果：(a)柱高 1300 nm 下之穿透率對 F.F.之變化，(b)柱高 1300 nm 下之相位對 F.F.之變化。

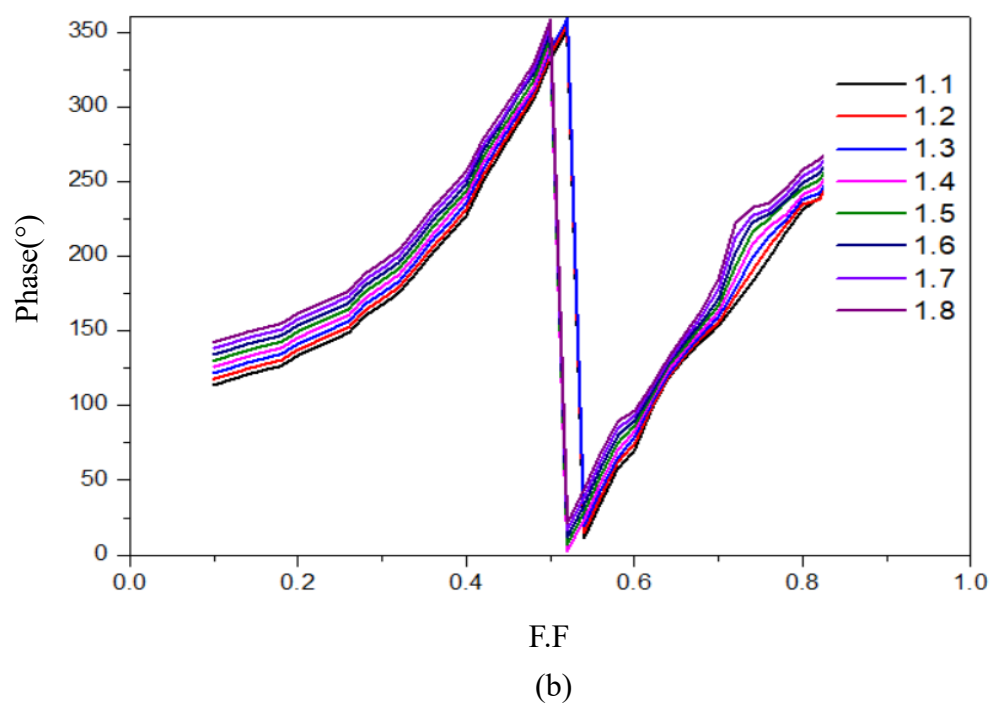
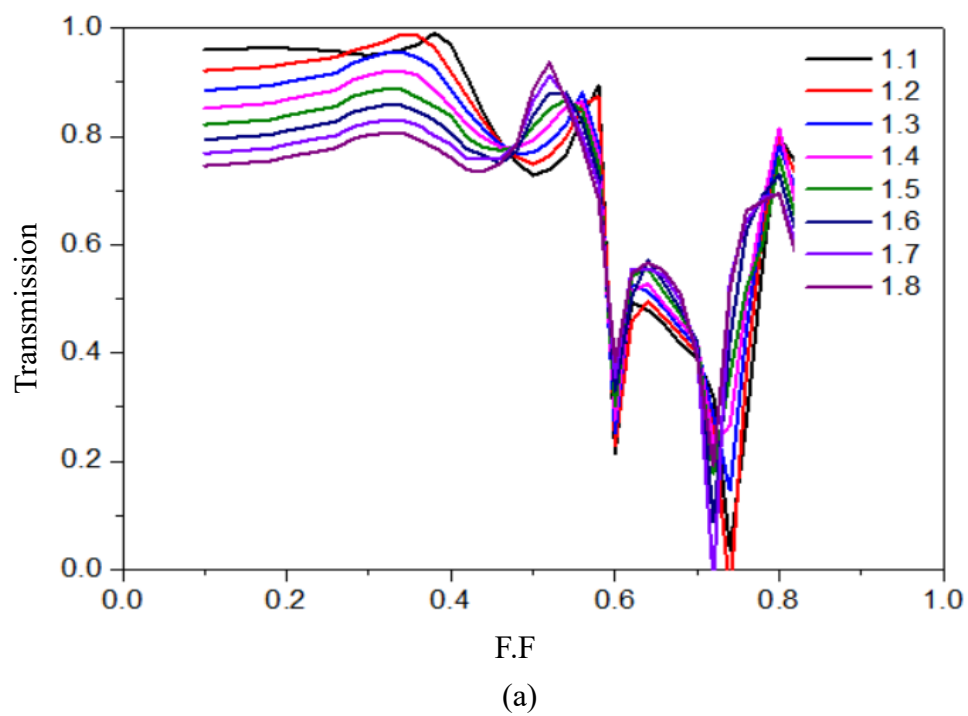


圖 2-5 模擬在空氣 ($n=1$) 介質環境下，操作波長 $\lambda=532\text{ nm}$ 、結構週期 $P=270\text{ nm}$ 之條件下，不同基板折射率對結構穿透率與相位延遲之影響：(a) 穿透率變化，(b) 相位延遲變化。

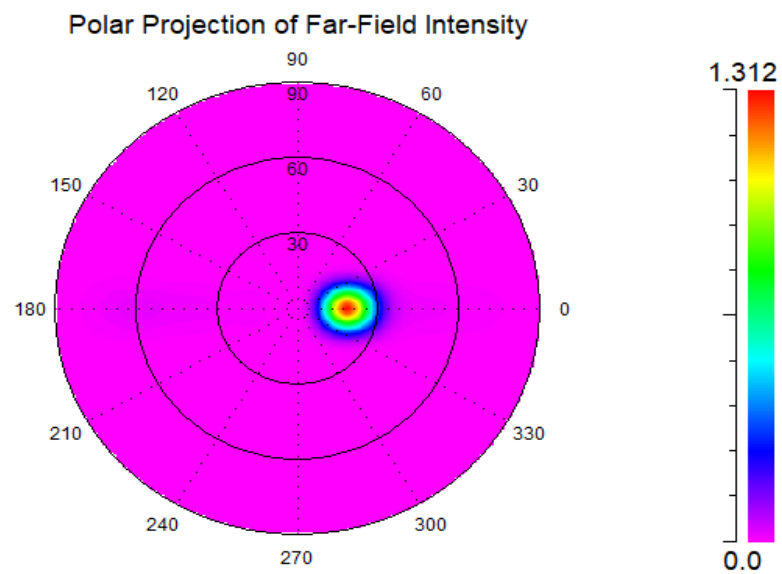


圖 2-6 使用 TiO_2 奈米柱結構，結構週期 $P = 270 \text{ nm}$ 、高度 $H = 600 \text{ nm}$ ，玻璃基板上方為空氣介質環境中，操作波長 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 的條件下，偏折型超穎介面之 FDTD 遠場模擬輻射圖。

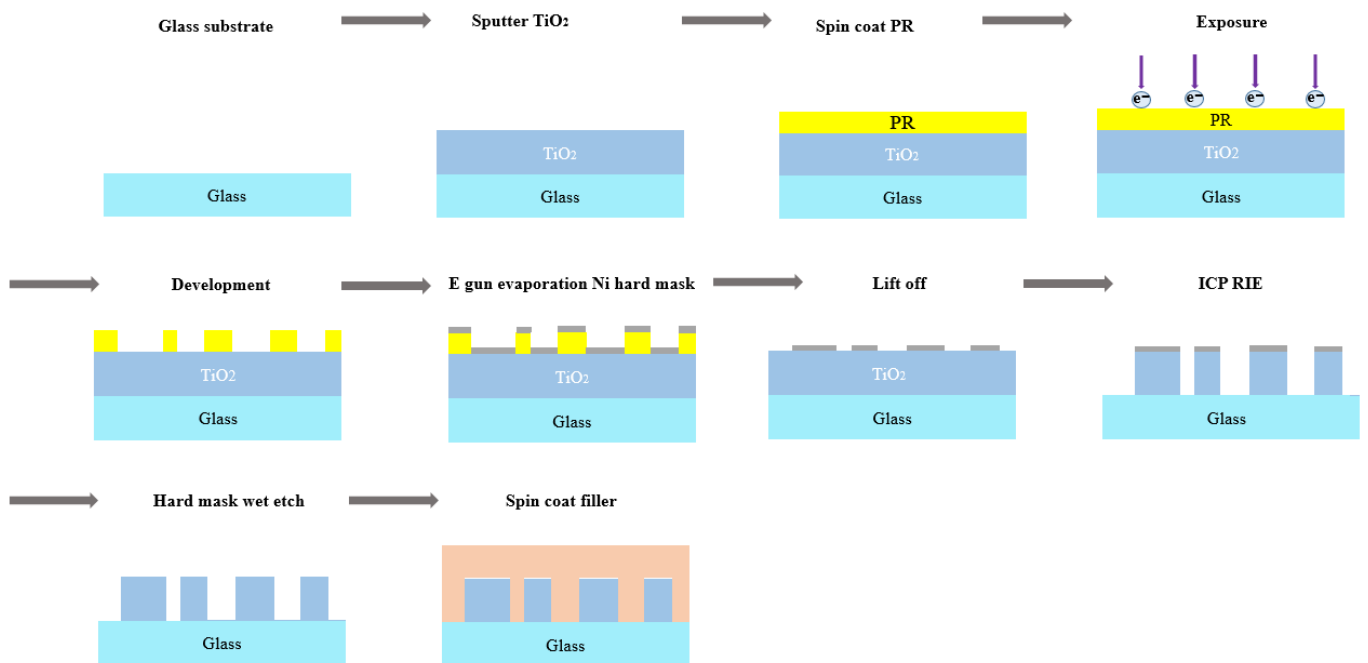


圖 2-7 超穎介面製程流程圖

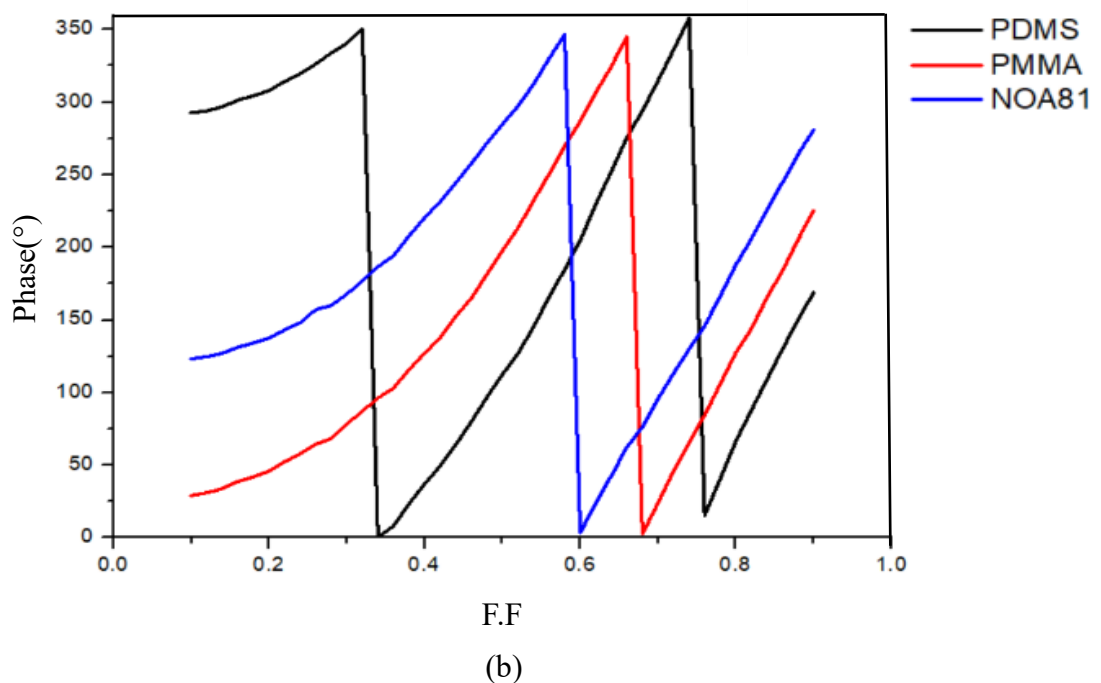
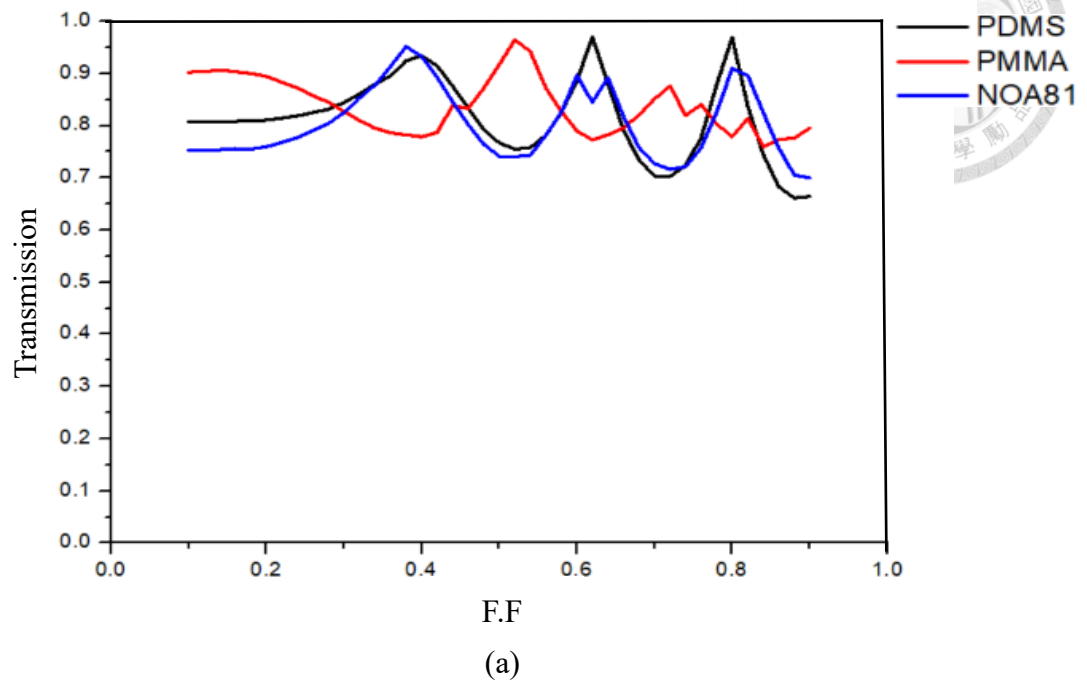


圖 2-8 使用 TiO_2 奈米柱結構（高度 $H=1300\text{ nm}$ 、週期 $P=250\text{ nm}$ ）於玻璃基板上，在空氣介質環境中，操作波長 $\lambda=600\text{ nm}$ 的模擬條件下，探討不同封裝材料（PDMS、PMMA、NOA81）滲入奈米柱空隙所造成之穿透率與相位影響：(a) 穿透率對 F.F. 之變化，(b) 相位延遲對 F.F. 之變化。

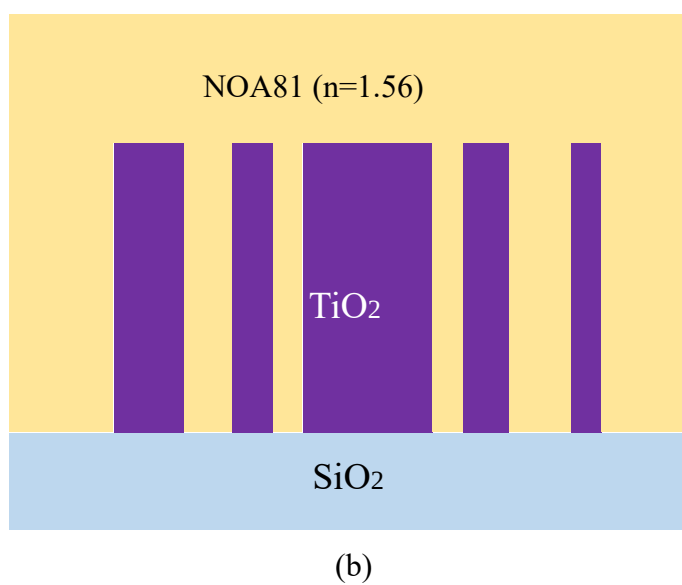
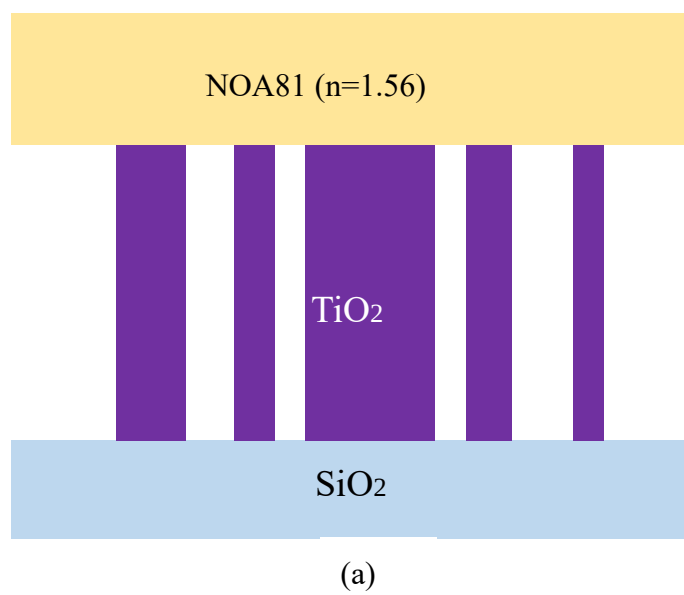
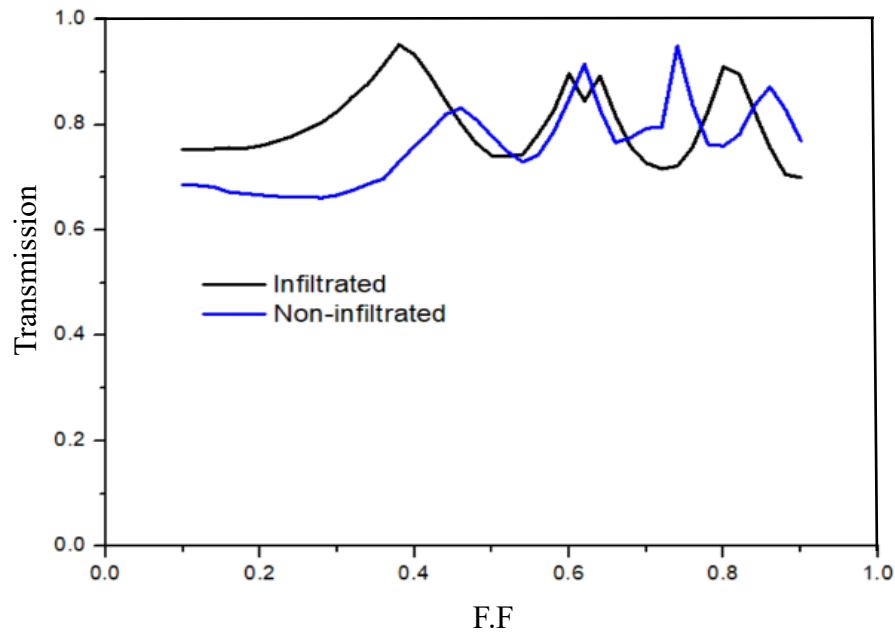
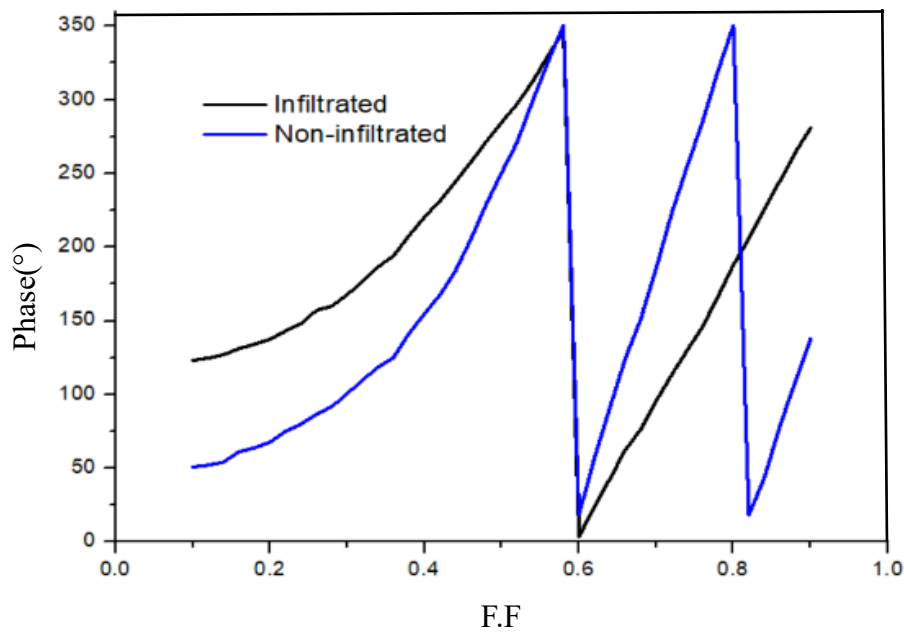


圖 2-9 (a)封裝材料未滲透奈米柱，(b)封裝材料滲透奈米柱間隙。



(a)



(b)

圖 2-10 使用 TiO_2 奈米柱結構（高度 $H = 1300 \text{ nm}$ 、週期 $P = 250 \text{ nm}$ ）於玻璃基板上，在空氣介質環境中，操作波長 $\lambda = 600 \text{ nm}$ 的模擬條件下，探討封裝材料滲透與否對元件性能之影響：(a)滲透型與未滲透型封裝對穿透率之影響，
(b)滲透型與未滲透型封裝對相位延遲之影響。

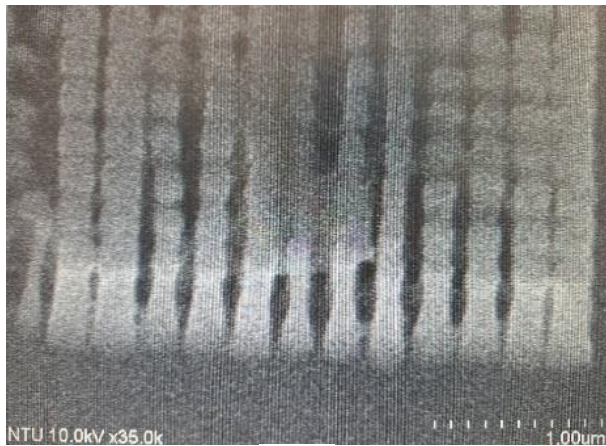


(a)

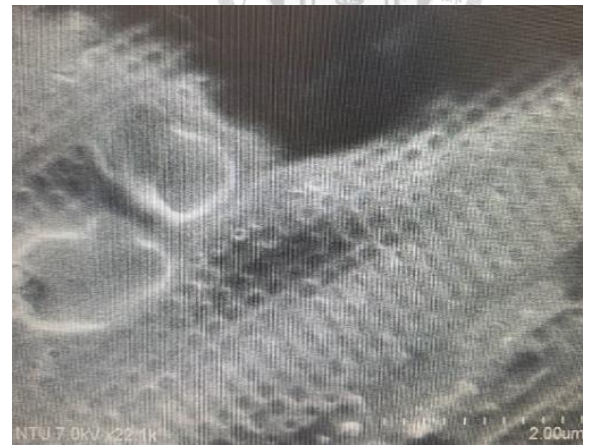


(b)

圖 2-11 撕除封裝材料後之(a)樣品表面，(b)封裝材料。

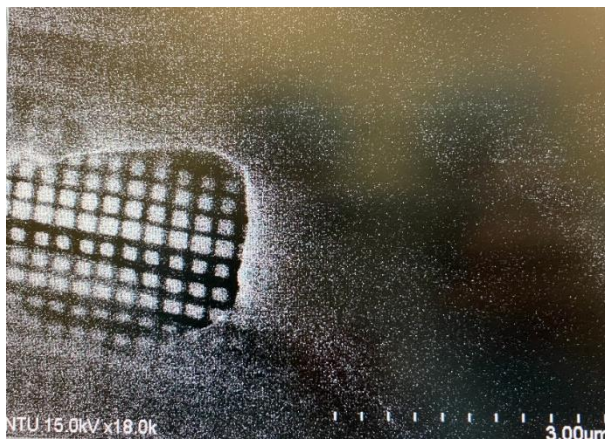


(a)



(b)

圖 2-12 未加壓封裝樣品之 SEM 影像:(a)撕除封裝層後奈米柱超穎介面結構，
(b)封裝膠表面殘留之奈米柱痕跡。



(a)



(b)

圖 2-13 經真空加壓封裝樣品之 SEM 影像:(a)撕除封裝層後奈米柱超穎介面結構，
(b)封裝膠表面殘留之奈米柱痕跡，且壓痕更為明顯深入。

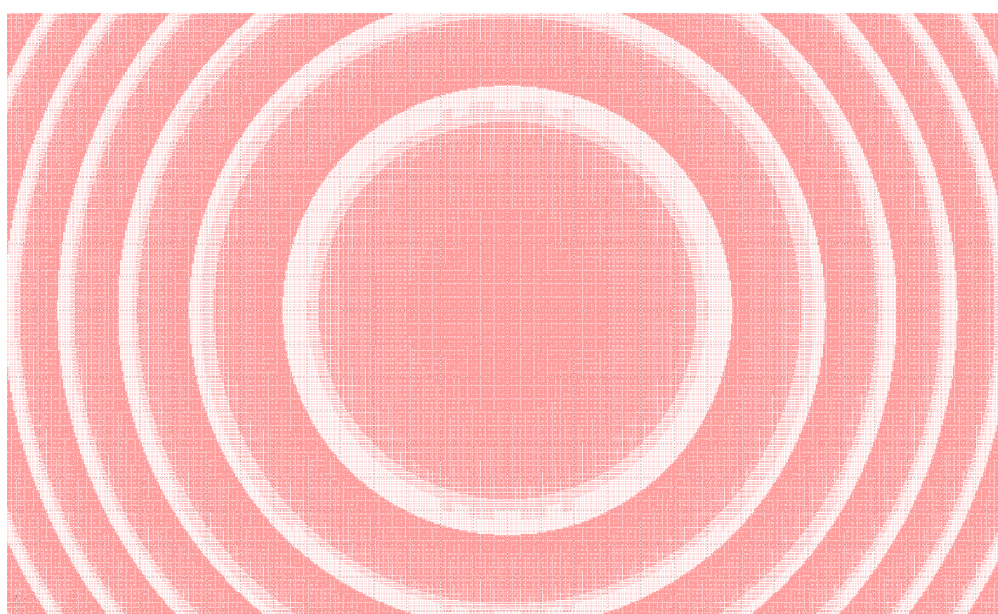
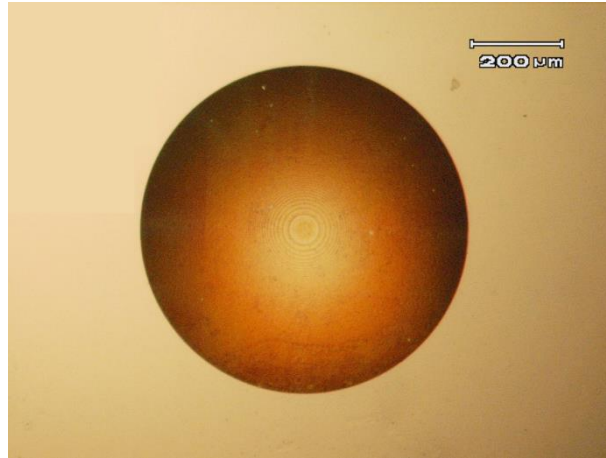
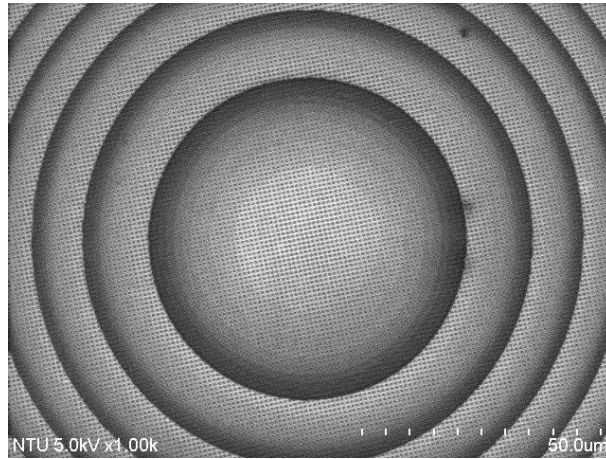


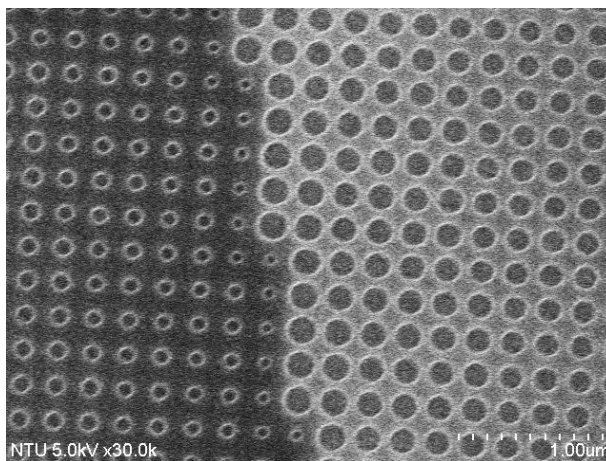
圖 2-14 超穎介面經軟體排列輸出之建模圖



(a)

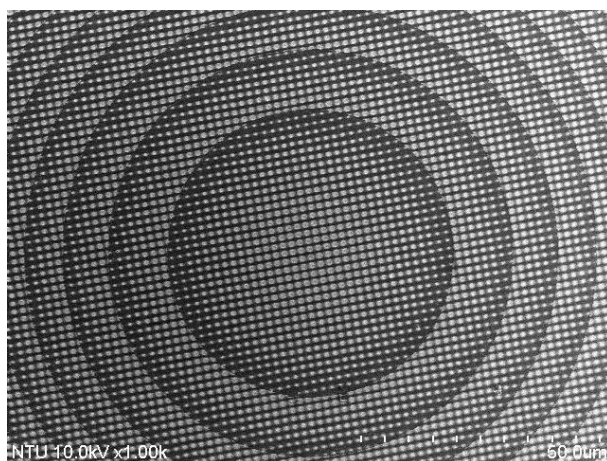


(b)

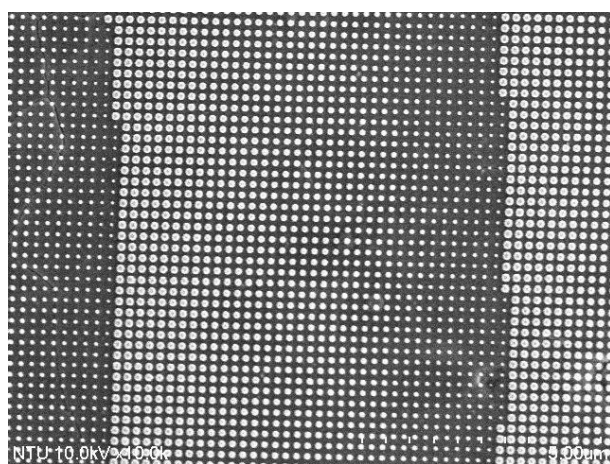


(c)

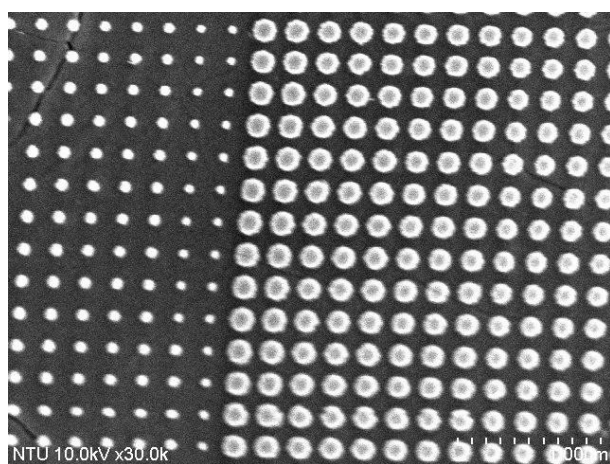
圖 2-15 電子束微影後之(a)光學顯微鏡影像，(b)電子顯微鏡影像，
(c)高倍率電子顯微鏡影像。



(a)

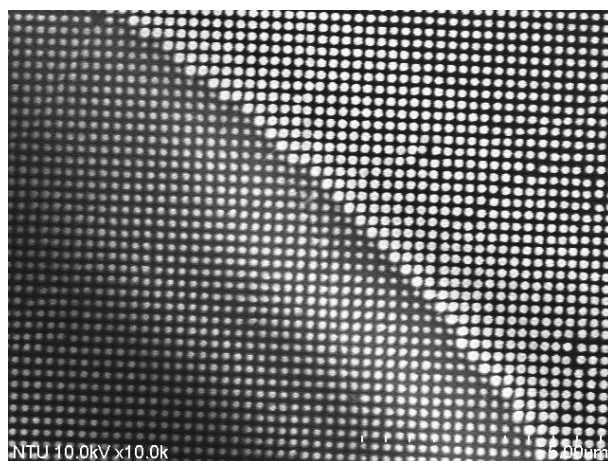


(b)

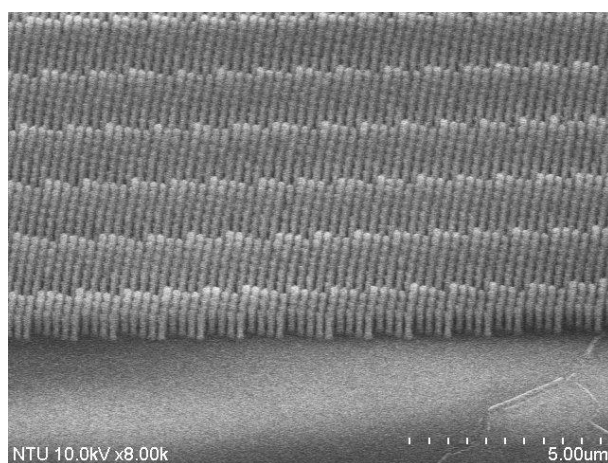


(c)

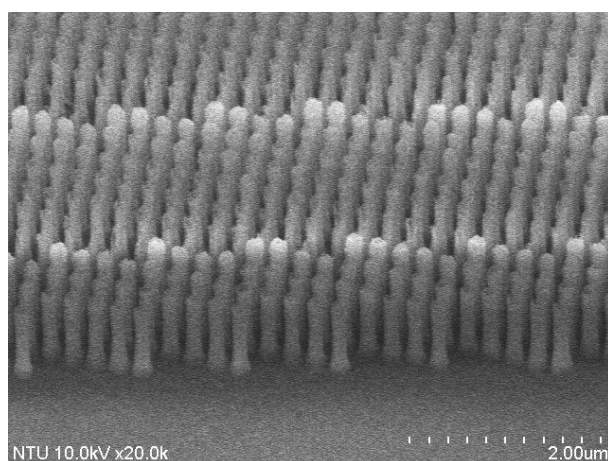
圖 2-16 金屬剝離後 SEM 影像:(a)放大倍率 1,000 倍，(b)放大倍率 10,000 倍，
(c)放大倍率 30,000 倍。



(a)

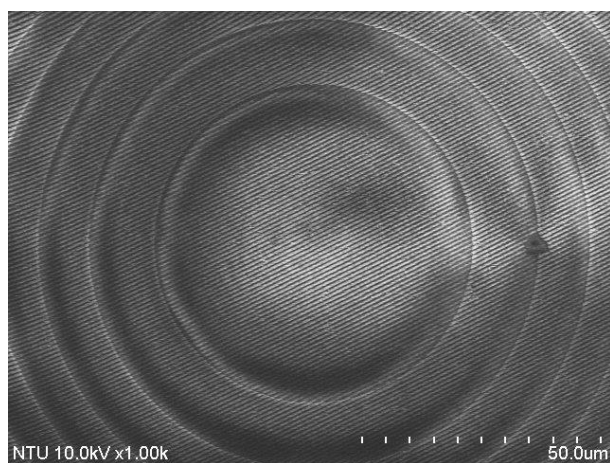


(b)

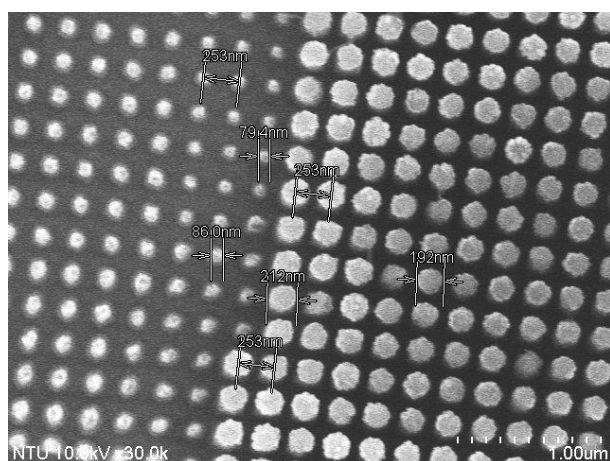


(c)

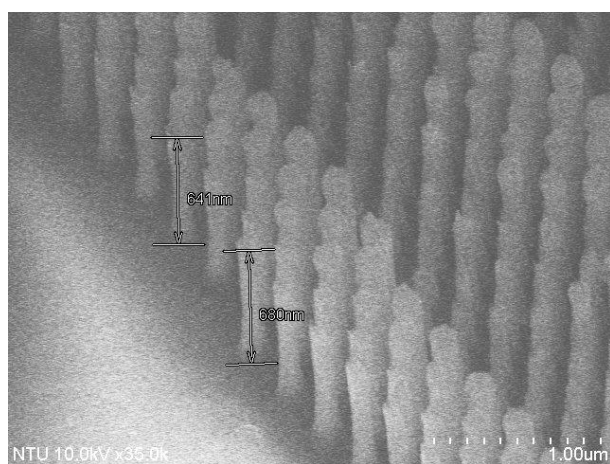
圖 2-17 反應式離子蝕刻後 SEM 影像:(a)放大倍率 10,000 倍，(b)傾斜 30 度低倍率，
(c)傾斜 30 度高倍率。



(a)



(b)



(c)

圖 2-18 金屬遮罩濕蝕刻後 SEM 影像:(a)確認整體奈米柱排列完整，(b)測量最大與最小線寬及週期，結果皆符合設計目標，(c)側視圖顯示奈米柱高度約為 1300 nm。



圖 2-19 真空乾燥器

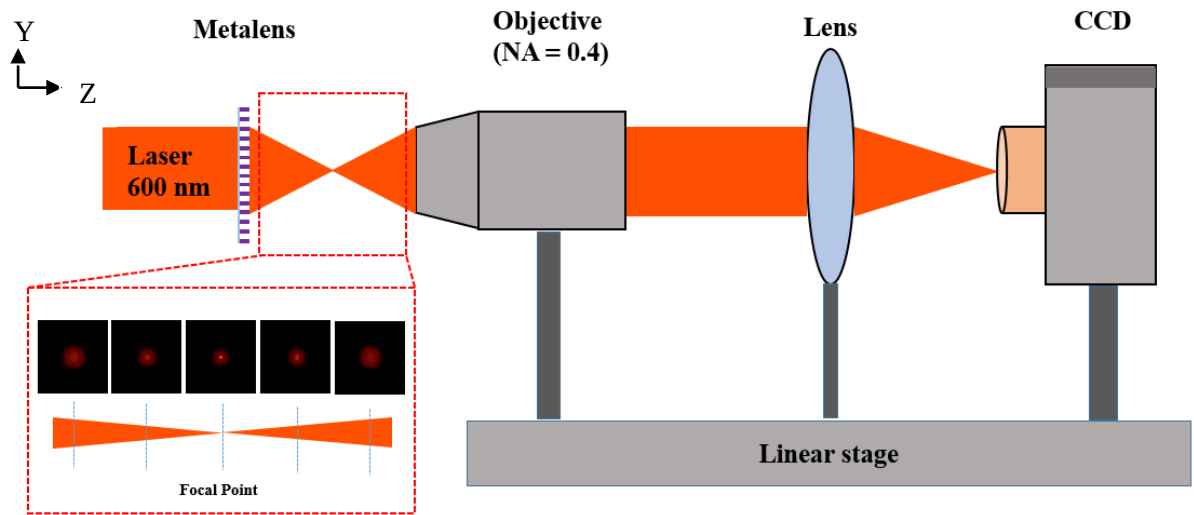


圖 2-20 超穎透鏡量測系統架設圖

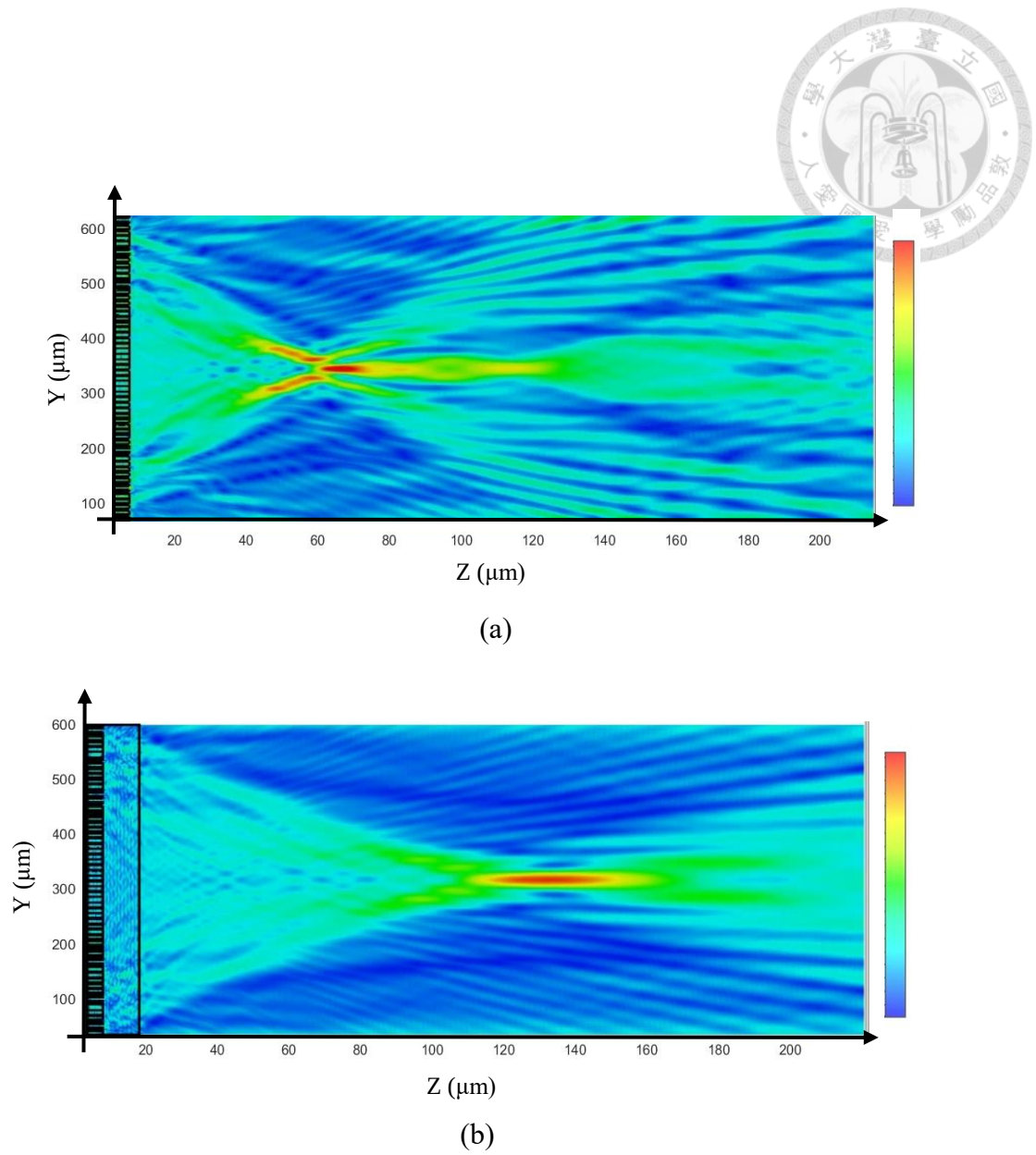


圖 2-21 超穎介面元件光場傳播模擬比較:(a)無封裝層，(b)NOA81 封裝層。

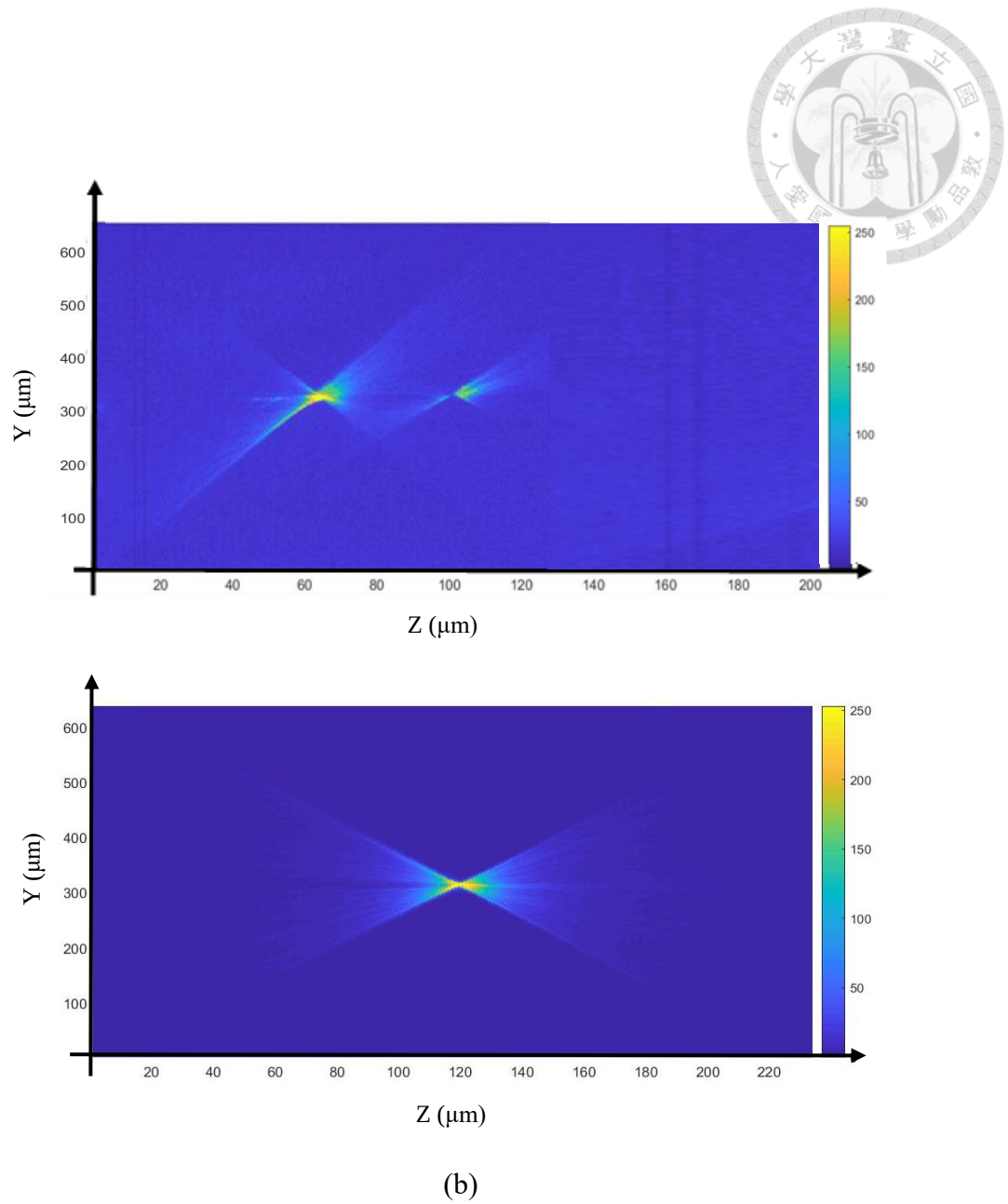


圖 2-22 結構完整超穎透鏡樣品之(a)無封裝層下之聚焦強度分佈圖，
(b)使用封裝層下之聚焦強度分佈圖。

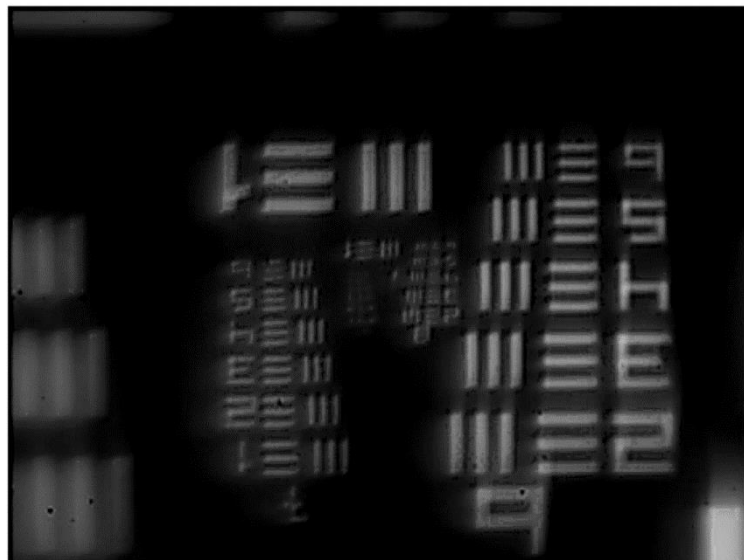
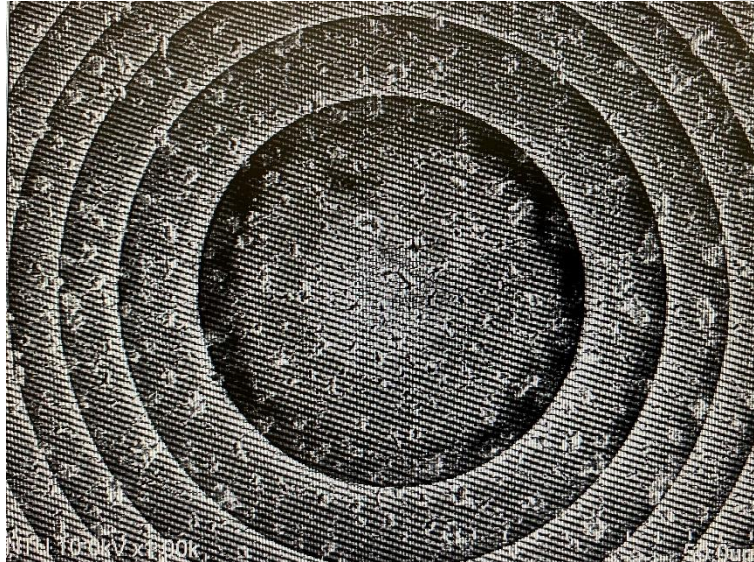
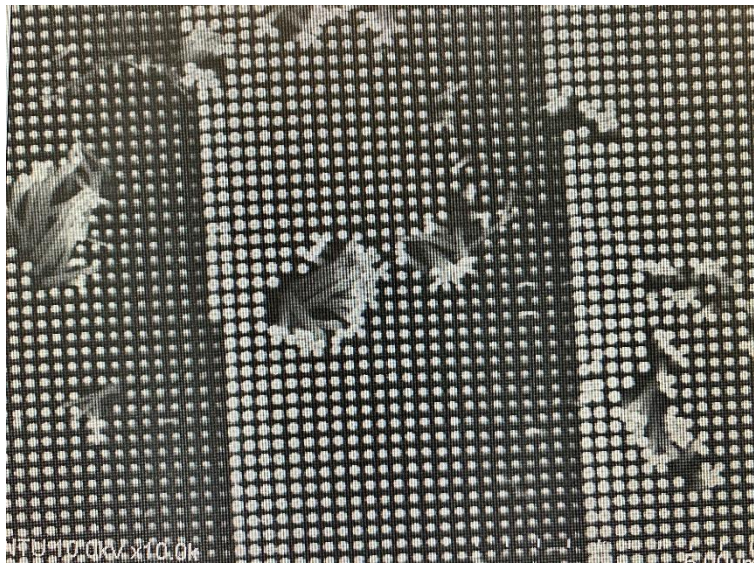


圖 2-23 超穎透鏡成像解析度測試結果。測試圖樣為美國空軍 1951 年解析度測試圖 (USAF 1951 Resolution Test Chart)，由多組不同空間頻率的黑白線對構成，用以量測光學系統可分辨的最小細節。當圖樣中三條線可被辨識時，表示該頻率仍可解析。本成像結果可辨識至 Group 8 Element 4，對應解析度為 362 lp/mm，顯示本系統具備高空間解析能力。

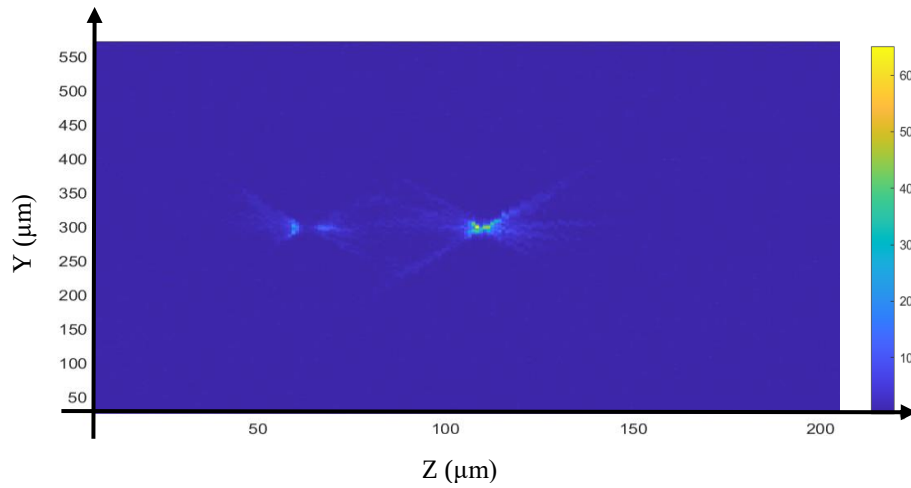


(a)

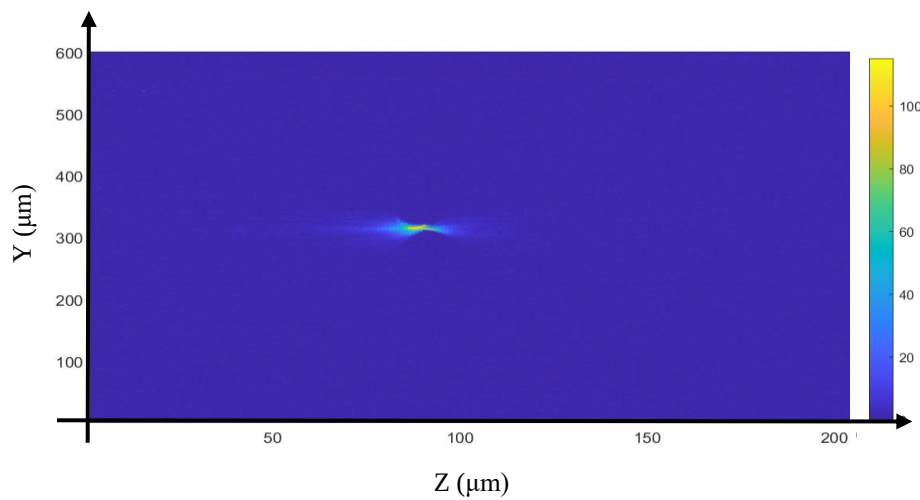


(b)

圖 2-24 倒塌超穎透鏡樣品之 SEM 影像:(a)放大倍率 1,000 倍，局部排列不完整，
(b)放大倍率 10,000 倍，可見部分 TiO_2 奈米柱出現倒塌現象。



(a)



(b)

圖 2-25 部分倒塌超穎透鏡樣品之(a)無封裝層下之聚焦強度分佈圖，
(b)使用封裝層下之聚焦強度分佈圖。

第三章 總結



3.1 總結

本研究成功設計並製作具聚焦功能之超穎介面元件，並系統性探討其奈米柱結構之參數對光學性能的影響，並進一步透過封裝技術驗證其實用可行性。首先，在理論設計與模擬部分，透過改變單元結構的橫向尺寸與填充因子 (Filling Factor, F.F)，建立涵蓋 0° 至 360° 相位延遲的資料庫，並以此為依據完成全域相位配置。模擬結果顯示，在無封裝與有封裝條件下，超穎透鏡均能有效聚焦光場，而加入 NOA81 封裝膠後不僅未造成顯著效率損失，亦未對相位延遲控制產生干擾。相反地，封裝結構在旁瓣抑制方面表現更為優異，聚焦強度亦更集中，顯示該封裝方式對光學性能具正向助益。

實作方面，利用電子束微影、金屬剝離(Lift-off)與乾式蝕刻技術(ICP)製作出直徑 $750\text{ }\mu\text{m}$ 、高度 1300 nm 之二氧化鈦奈米柱陣列結構，並以 SEM 影像確認其結構完整性與尺寸符合設計需求。為提高封裝膠之滲透能力，採用真空輔助封裝方式，使 NOA81 在低壓條件下更易流入奈米柱間隙，並以紫外光固化形成穩定保護層。撕除封裝層後於 SEM 圖中可觀察到明顯的壓痕對應奈米柱排列，間接佐證封裝膠已成功滲透並密合。

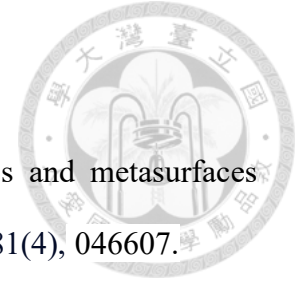
在光學量測方面，搭建聚焦光斑掃描平台並量測金屬透鏡的聚焦能力與效率。實驗結果顯示，未封裝樣品雖可成功聚焦，但主焦點較為分散，且存在明顯旁瓣，與模擬結果一致；而封裝後之樣品聚焦效果顯著改善，焦點集中且旁瓣大幅抑制，聚焦效率提升至 88.4%。此外，USAF 成像測試結果亦顯示其解析能力可達 Group 8 Element 4，代表其具備良好成像能力。特別值得一提的是，某一批製程中曾出現局部奈米柱倒塌情況，然而實驗中仍可量測到清晰聚焦光斑，效率雖僅約 46.8%，但仍證明該結構具良好穩定性與容錯性。後續將基板更換為不同材質後，在相同結構參數（柱高與週期）條件下成功製作出無倒塌之超穎透鏡，顯示基板材質對結構

機械穩定性具有關鍵影響，亦為未來製程優化提供重要依據。

綜合模擬、製程與量測三方面結果可得，本研究所提出之超穎透鏡結構在製程公差內仍能保持穩定的光學表現，且搭配簡易封裝步驟可顯著提升整體性能與耐用性。此成果為未來金屬透鏡於生醫成像、穿戴式裝置或光學整合系統等應用奠定了實用化基礎，亦展現出超穎結構設計與製作上的高度可行性與潛力。



參考文獻



- [1] Alexopoulos, A. (2010) "Effective-medium theory of surfaces and metasurfaces containing two-dimensional binary inclusions" *Physical Review E*, 81(4), 046607.
- [2] Zhang, SY; Wong, CL; Zeng, SW; Bi, RZ; Tai, K; Dholakia, K; Olivo, M. (2021) "Metasurfaces for biomedical applications: imaging and sensing from a nanophotonics perspective" *Nanophotonics*, 10(1), 259-293.
- [3] Luo, Y; Tseng, ML; Vyas, S; Kuo, HY; Chu, CH; Chen, MK; Lee, HC; Chen, WP; Su, VC; Shi, X. (2022) "Metasurface-Based Abrupt Autofocusing Beam for Biomedical Applications" *Small Methods*, 6(4), 2101228.
- [4] Barulin, A; Nguyen, DD; Kim, Y; Ko, CH; Kim, I. (2024) "Metasurfaces for Quantitative Biosciences of Molecules, Cells, and Tissues: Sensing and Diagnostics" *ACS Photonics*, 11(3), 904-916.
- [5] Decker, M; Staude, I; Falkner, M; Dominguez, J; Neshev, DN; Brener, I; Pertsch, T; Kivshar, YS. (2016) "High-efficiency light-wave control with all-dielectric optical Huygens' metasurfaces" *Advanced Optical Material*, 3(6), 813-820.
- [6] Li, XS; Zhou, HT; Wang, YF; Wang, YS. (2021) "Modulation of acoustic self-accelerating beams with tunable curved metasurfaces" *Applied Physics Letters*, 118(2), 023503.
- [7] Shen, SY; Ruan, ZH; Yuan, Y; Tan, HP. (2022) "Conditions for establishing the "Generalized Snell's law of refraction" in all-dielectric metasurfaces: theoretical bases for design of high-efficiency beam deflection metasurfaces" *Nanophotonics*, 11(1), 21-32.
- [8] Liu, Y; Zhang, D; Li, W; & Zhang, S. (2021) "Generalized Snell's law for metasurfaces with phase discontinuities" *Journal of Optics*, 23(4), 045102.
- [9] Wu, T; Zhang, XQ; Xu, Q; Plum, E; Chen, KJ; Xu, YH; Lu, YC; Zhang, HF; Zhang, ZY. (2021) "Dielectric Metasurfaces for Complete Control of Phase, Amplitude, and

Polarization” *Advanced Optical Materials*, 10(1), 2101223.

[10] Smy, TJ; Stewart, SA; Rahmeier, JGN; Gupta, S. (2020) “FDTD Simulation of Dispersive Metasurfaces With Lorentzian Surface Susceptibilities” *IEEE Access*, 8, 83027-83040.

[11] Cole, JB. (1997) “A high-accuracy realization of the Yee algorithm using non-standard finite differences” *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, 45(6), 991-996.

[12] Chen, XB; Yang, F; Li, MK; Xu, SH. (2020) “Analysis of Nonlinear Metallic Metasurface Elements Using Maxwell-Hydrodynamic Model With Time-Domain Perturbation Method” *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 68(3), 2213-2223.

[13] Chen, HT; Taylor, AJ; Yu, NF. (2016) “A review of metasurfaces: physics and applications” *Reports On Progress In Physics*, 79(7), 076401.

[14] Phan, T; Sell, D; Wang, EW; Doshay, S; Edee, K; Yang, JJ ; Fan, JA. (2019) “High-efficiency, large-area, topology-optimized metasurfaces” *Light-Science & Applications*, 8, 48.

[15] Yuzhong W; Cheng P; Qiming W; Yongheng M; Yayun C; Jiaran Q. (2023) “Phase-Only Compact Radiation-Type Metasurfaces for Customized Far-Field Manipulation” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 71(9), 4119-4128.

[16] Pustovalova, A; Boytsova, E; Aubakirova, D; Bruns, M; Tverdokhlebov, S; Pichugin, V. (2020) “Formation and structural features of nitrogen-doped titanium dioxide thin films grown by reactive magnetron sputtering” *Applied Surface Science*, 534, 147572.

[17] Wang, YH; Rahman, KH; Wu, CC; Chen, KC. (2020) “A Review on the Pathways of the Improved Structural Characteristics and Photocatalytic Performance of Titanium Dioxide (TiO₂) Thin Films Fabricated by the Magnetron-Sputtering Technique” *Catalysts*,

10(6), 598.

[18] He, SK; Tian, Y; Zhou, HM; Zhu, MM; Li, CX; Fang, B; Hong, Z; Jing, XF. (2025)

“Review for Micro-Nano Processing Technology of Microstructures and Metadevices”

Advanced Functional Materials, 35(24).

[19] Luo, Y., Tseng, M. L., Vyas, S., Kuo, H. Y., Chu, C. H., Chen, M. K., Lee, H. C.,

Chen, W. P., Su, V. C., Shi, X., Misawa, H., Tsai, D. P., & Yang, P. C. (2022)

“Metasurface-based abrupt autofocusing beam for biomedical applications” Small

Methods, 6(4), 2101228.

[20] Yoshimoto, K, Higgins, C, Raghunathan, A, Hartley, J. G, Goldfarb, D. L, Kato, H,

Petrillo, K, Colburn, M. E, Schefske, J, Wood, O, Wallow, T. I. (2011) “Revisit pattern

collapse for 14nm node and beyond” Proceedings of SPIE - The International Society for

Optical Engineering, 7972, 79720K.

[21] Liu, BW; Cheng, JL; Zhao, MX; Yao, J; Liu, XY; Chen, SH; Shi, L; Tsai, DP; Geng,

ZH; Chen, MK. (2024) “Metalenses phase characterization by multi-distance phase

retrieval” Light-Science & Applications, 13(1), 182.

