

# 紫外超穎介面於前瞻光譜與奈米製造之應用

## Ultraviolet Metasurfaces for Advanced Molecular Spectroscopy and Nanofabrication

沈上傑、曾銘綸

Shang-Jie Shen, Ming-Lun Tseng

超穎介面為次波長奈米結構組成之二維光學裝置，近年應用拓展至深紫外波段。深紫外光具高能量與短波長，廣泛應用於生醫光譜、材料分析、微影製程與超快雷射。本文探討深紫外超穎介面於光譜與奈米製造之應用，說明其在分子吸收與拉曼散射中的優勢，並介紹近年以鋁與矽材料實現深紫外共振拉曼增強之成果，及基於氮化鋁之超穎透鏡於成像與微加工中的應用。深紫外超穎介面具微型化、高靈敏與可整合等優勢，展現新世代光電元件潛力。

Metasurfaces, composed of subwavelength nanostructures, have expanded into the deep-ultraviolet (DUV, 200–300 nm) regime, offering new opportunities in biomedical spectroscopy, materials analysis, lithography, and ultrafast lasers. However, conventional optics face challenges in DUV due to strong material absorption and high fabrication costs. This article reviews the potential of DUV metasurfaces in spectroscopy and nanomanufacturing, highlighting their advantages in molecular absorption and resonant Raman scattering. We present recent demonstrations of aluminum plasmonic and silicon polaritonic metasurfaces that enhance DUV Raman signals, as well as aluminum nitride metalenses for DUV imaging and picosecond laser microfabrication. These advances highlight the potential of metasurfaces to enable compact, sensitive, and integrable DUV photonic devices.

### 一、前言

超穎介面 (metasurfaces)<sup>(1,2)</sup> 是一種由奈米尺度共振單位元 (resonant units, 亦稱「超穎原子」) 所構成的二維人工奈米結構，近年來已大幅推動光電科技的進展，並為多項應用帶來嶄新契機。透過精巧設計其結構與選擇合適材料，超穎介面可實現對光波前、相位、偏振與強度的高度控制，具有輕薄短小、易於整合等優勢，已廣泛應用於光波操控<sup>(2)</sup>、光源產生<sup>(3)</sup>、成像與生醫檢測<sup>(4)</sup> 等領域。在眾多研究方向中，深紫外 (deep ultraviolet, DUV) 區間的光

電元件開發，是超穎介面展現關鍵創新潛力的重要場域。深紫外光 (波長約 200–300 nm) 在先進光電元件製程、生醫光譜分析、無標記分子影像與臨床診斷等應用中扮演不可或缺的角色。然而，傳統深紫外光學元件常面臨材料選擇受限的問題：例如一般玻璃在 300 nm 以下波段會產生顯著吸收，傳統元件多仰賴高成本之特殊材料 (如深紫外級石英或氟化鎂)，或採用體積龐大之反射式設計，限制其可攜性與系統整合潛力。近年研究已顯示，超穎介面在深紫外奈米光子學領域展現卓越潛力，具備提升 DUV 光捕獲與產生效率的功能性結構。藉由其設計自由度，超穎介面有望實現新型、微型化且可整合之深紫外光學元件，為次世代光電系統提供關鍵解決手段。本文旨在簡要介紹超穎介面於深紫外光電應用之最新進展。首先將說明深紫外光之應用潛力與挑戰，並探討超穎介面之工作原理與材料設計考量。接著，介紹國內近年於生醫與材料光譜分析應用方面的兩項代表性研究成果。最後，本文將聚焦於超穎介面於深紫外超薄透鏡、深紫外影像系統與超快雷射微結構製造等前沿課題之發展現況與未來展望。

## 二、深紫外光子學之重要性與應用價值

近年來，深紫外光已逐漸成為光電研究中備受矚目的工作波長範圍。深紫外光之波長介於 200 nm 至 300 nm 之間，對應之光子能量約為 6.2 至 4.1 電子伏特 (eV)。由於其具備相較於可見光更短之波長與更高之光子能量，深紫外光除了廣泛應用於殺菌與除汙之外，在生醫影像、材料光譜與先進製程等領域亦展現出重要價值。

在生醫領域中，近年研究指出深紫外光對生醫影像與分子光譜分析具備極大潛力。如圖 1(b) 所示<sup>(5)</sup>，構成去氧核糖核酸 (DNA) 之腺嘌呤 (Adenine, A)、胞嘧啶 (Cytosine, C)、鳥嘌呤 (Guanine, G) 與胸腺嘧啶 (Thymine, T)，以及核糖核酸 (RNA) 中常見之替代鹼基如 N<sup>6</sup>- 甲基腺嘌呤 (N<sup>6</sup>-methyladenine, mA)、5-甲基胞嘧啶 (5-methylcytosine, mC)、尿嘧啶 (Uracil, U) 等分子，在可見光中幾乎無明顯吸收訊號。因此，在傳統光譜或影像分析中，往往需要借助特定之分子標籤或螢光染料進行輔助。

然而，若觀察上述分子在深紫外區間之吸收光譜，可發現其皆具有明確而可區分之吸收特徵峰。此現象源於分子結構間之差異，導致其於深紫外波段發生不同鍵結能階之間的能帶躍遷 (interband transition)，進而產生具分子特異性的吸收行為。這種光子與分子間的活躍交互作用，促使多項創新應用成為可能。

例如，因動物活體細胞中的核酸 (nucleic acids)、芳香族胺基酸 (aromatic amino acids) 與蛋白質對紫外光具有顯著吸收，美國 Paul Matsudaira 研究團隊便利用深紫外光源進行細胞內分子質量分布之分析<sup>(5,6)</sup>。研究中，團隊量測了小鼠巨噬細胞 IC-21 (mouse macrophage IC-21 cell，常用於免疫與發炎反應研究) 在波長 260 nm 與 280 nm 下之穿透光學密度 (optical density, OD)，分別記為 OD<sub>260</sub> 與 OD<sub>280</sub>。於數據分析中，團隊採用文獻中針對核酸、蛋白質與芳香族胺基酸於此兩波長的消光係數 (extinction coefficients)，並搭配比爾-朗伯定律 (Beer-Lambert law)，寫下以下式子：

$$m_{protein} = \frac{OD_{260} \times \epsilon_{n280} - OD_{280} \times \epsilon_{n260}}{\epsilon_{p260} \times \epsilon_{n280} - \epsilon_{n280} \times \epsilon_{p260}}$$

$$m_{nucleicacid} = \frac{OD_{260} \times \epsilon_{p280} - OD_{280} \times \epsilon_{p260}}{\epsilon_{p280} \times \epsilon_{n260} - \epsilon_{p260} \times \epsilon_{n280}}$$

其中， $\epsilon_{n260}$  及  $\epsilon_{n280}$  分別為核酸在 260 nm 與 280 nm 下之消光係數；而  $\epsilon_{p260}$  與  $\epsilon_{p280}$  則為蛋白質在這兩個波長下之消光係數。圖 1(c-i) 與圖 1(c-ii) 分別為巨噬細胞於 260 nm 與 280 nm 深紫外光照射下所獲得之光學影像。藉由這些影像中之二維光學密度資訊，結合前述之吸收模型與比爾-朗伯定律，研究團隊成功解析出核酸(圖 1(c-iii)) 與蛋白質(圖 1(c-iv)) 於細胞內之空間分布。從圖像可觀察到，核酸主要分布集中於細胞核附近；另一方面，蛋白質在整體細胞中之分布則相對均勻，但於細胞突起之位置可見較高密度。此研究展示了利用生醫分子本身之紫外吸收特徵進行非標記光學影像分析的可行性。其解析度極高，對分子空間分布之偵測靈敏度可達飛克 (femtogram, fg) 等級。此研究發表後，亦有其他團隊延伸此概念應用於血液檢驗，並證實其精密度優於傳統染色法<sup>(7)</sup>。從此段之探討可知，深紫外光與物質間之強烈交互作用具有極大之應用價值。

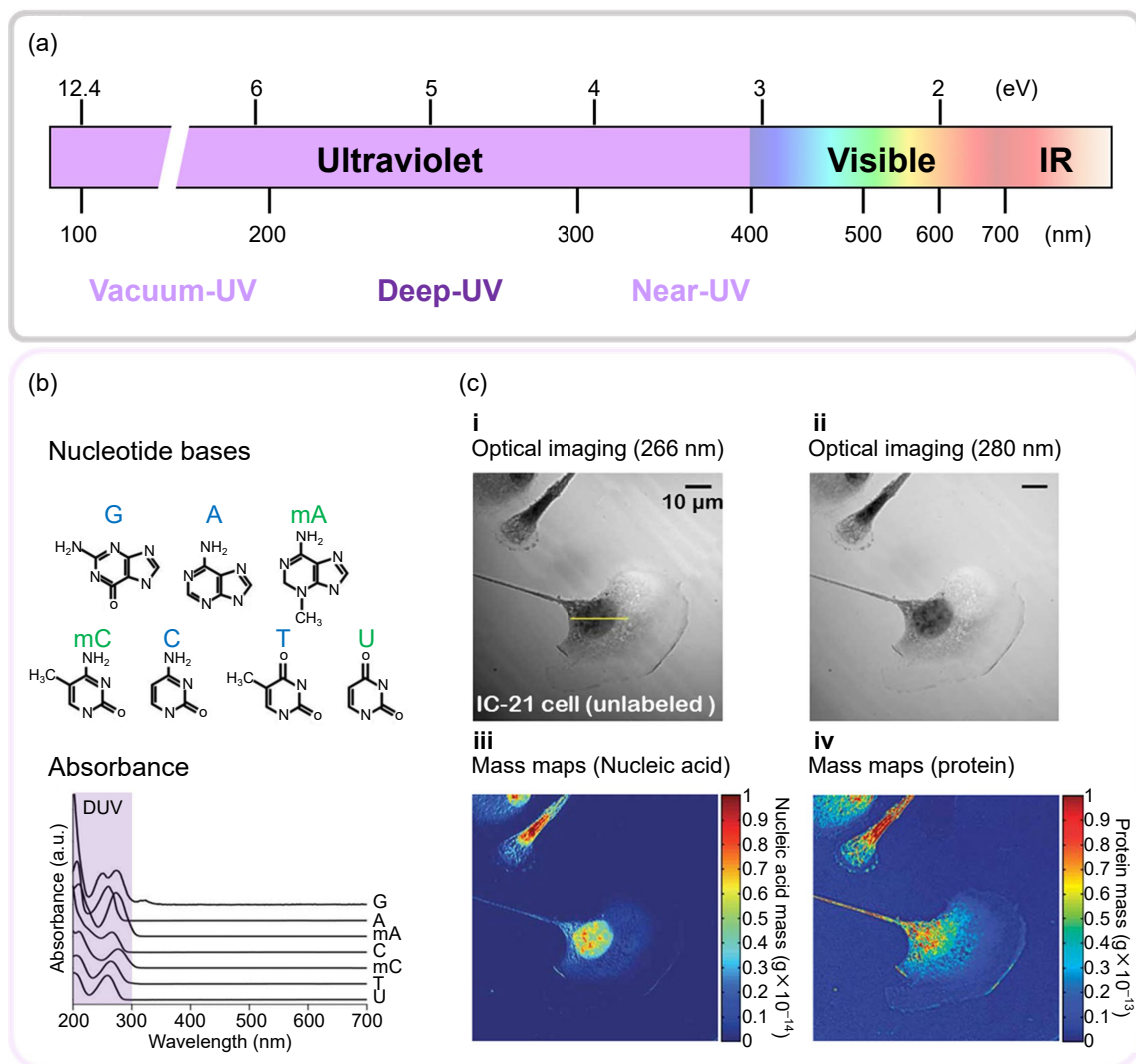


圖 1. 深紫外光之應用潛力。(a) 深紫外光之光譜定義。(b) 生物分子之深紫外光譜性質<sup>(5)</sup>。(c) 利用深紫外光進行活體細胞中分子之分布影像<sup>(6)</sup>。

利用奈米光學技術改善深紫外波段相關的分子光譜與影像應用，近年來已成為一項重要且新興的研究趨勢。其中，超穎介面 (metasurface) 展現出高度潛力。超穎介面是一種人造光

學元件，其功能與性質主要由內部週期性分佈的次波長奈米結構 (亦稱超穎原子) 之幾何設計與排佈所決定。依據所採用材料與其對應的物理機制，超穎介面大致可分為金屬型的電漿子超穎介面與高折射率介電質型的介電質超穎介面。前者之共振機制主要與金屬奈米結構中的自由電子在光照下於金屬與介電質界面產生之侷域性表面電漿子 (localized surface plasmon polaritons, LSPP, 見圖 2(a)) 有關；後者則源自介電質結構中位移電流所激發的米式散射 (Mie scattering, 見圖 2(b))。兩類超穎介面在材料選擇上各有需求：電漿子型元件要求材料具備負值介電常數 (dielectric constant)，而介電質型元件則偏好高折射率 (通常大於 2) 且低吸收 (即低虛部介電常數) 之材料，以增強其位移電流所驅動的光學共振效應。

在深紫外超穎介面開發上，材料選擇是主要挑戰之一。由於多數材料在此波段具有強烈吸收，常用於超穎介面之金屬 (如金、銀) 與半導體 (如氮化鎵、二氧化鈦) 皆難以符合上述需求。對電漿子型超穎介面而言，鋁是最常見的選擇，因其具備較高的電漿截止頻率 (plasma frequency, 約 15 eV, 相較之下金與銀分別為約 9 eV 與 9.2 eV)，且其帶間躍遷發生於波長小於 100 nm 的區域，使得其奈米結構能在深紫外激發 LSPP。圖 2(c) 為鋁之介電常數曲線<sup>(8)</sup>，可見其實部在深紫外波段皆為負值，證實其可用性。

相對地，在介電質型超穎介面開發中，合適材料包括氮化鋁、氧化鋁與鑽石等。以氮化鋁為例，其介電常數如圖 2(d) 所示<sup>(9)</sup>，在波長大於約 230 nm 的深紫外範圍內，其虛部接近於零，且折射率維持於約 2.2–2.3 之間，證實其為深紫外應用的潛力材料。圖 2(e) 為一鋁奈米孔洞 (直徑 50 nm) 於 266 nm 時的共振模擬，可見其在 LSPP 激發下能有效收集並增強表面電磁場能量<sup>(10)</sup>。圖 2(f) 則顯示一氮化鋁奈米顆粒球 (直徑約 140 nm) 於 248.7 nm 波長下內部的磁場模擬結果，可觀察其內外皆出現共振電磁場，此為典型介電質奈米粒子共振時的行為。

在超穎介面設計中，常見兩大目標：(1) 於特定波段實現奈米尺度電磁場增強，以及 (2) 控制出射光之波前、偏振與角動量等特性。對於前者，經常透過設計共振單元的幾何參數達成。如圖 2(g) 所示，瑞士洛桑理工大學 Hatice Altug 團隊調整雙橢圓結構中兩者的夾角，成功操控紅外波段的共振品質因子與對應近場增強效果。值得一提的是，超穎介面亦能增強磁場並在奈米尺度產生所謂的「超手性光場」(superchiral field)<sup>(11, 12)</sup>。其他常見設計策略包含：破壞共振單元的平面對稱性以引入法諾共振 (Fano resonance) 或連續體束縛態 (bound state in the continuum)；或透過調整結構週期以實現共振模式之同調干涉增強。這類能增強近場電磁場的超穎介面，常用於生醫檢測或非線性光學中以提升訊號強度。

在波動傳播控制方面，共振單元需能有效調控出射光的相位，常見方法是設計具大高寬比 (aspect ratio) 的奈米柱，並透過調整其寬度來控制導膜態 (waveguide mode) 之相位延遲。以氮化鎵奈米柱為例，如圖 2(h-i) 所示，不同直徑於 532 nm 的共振模態逐步變化，進而實現連續性的  $2\pi$  相位控制 (圖 2(h-ii))<sup>(13, 14)</sup>。此設計確保高穿透率，並可藉由在元件表面上排列不同尺寸的奈米柱，實現次波長尺度的相位控制，進一步操控波前形狀與出射光場特性。

### 三、超穎介面於深紫外光譜技術之應用

在深紫外區間執行拉曼光譜測量，能充分展現此波段於光譜分析上的價值與潛力。深紫外光與分子內部電子具有強烈的交互作用，可有效誘發帶間躍遷 (interband transition) 並產生顯著的極化效應 (polarization)，進一步促成強烈的拉曼散射，亦即「共振拉曼散射」(resonant Raman scattering)。以波長 257.2 nm 的深紫外光激發去氧腺苷 (deoxyadenosine) 為

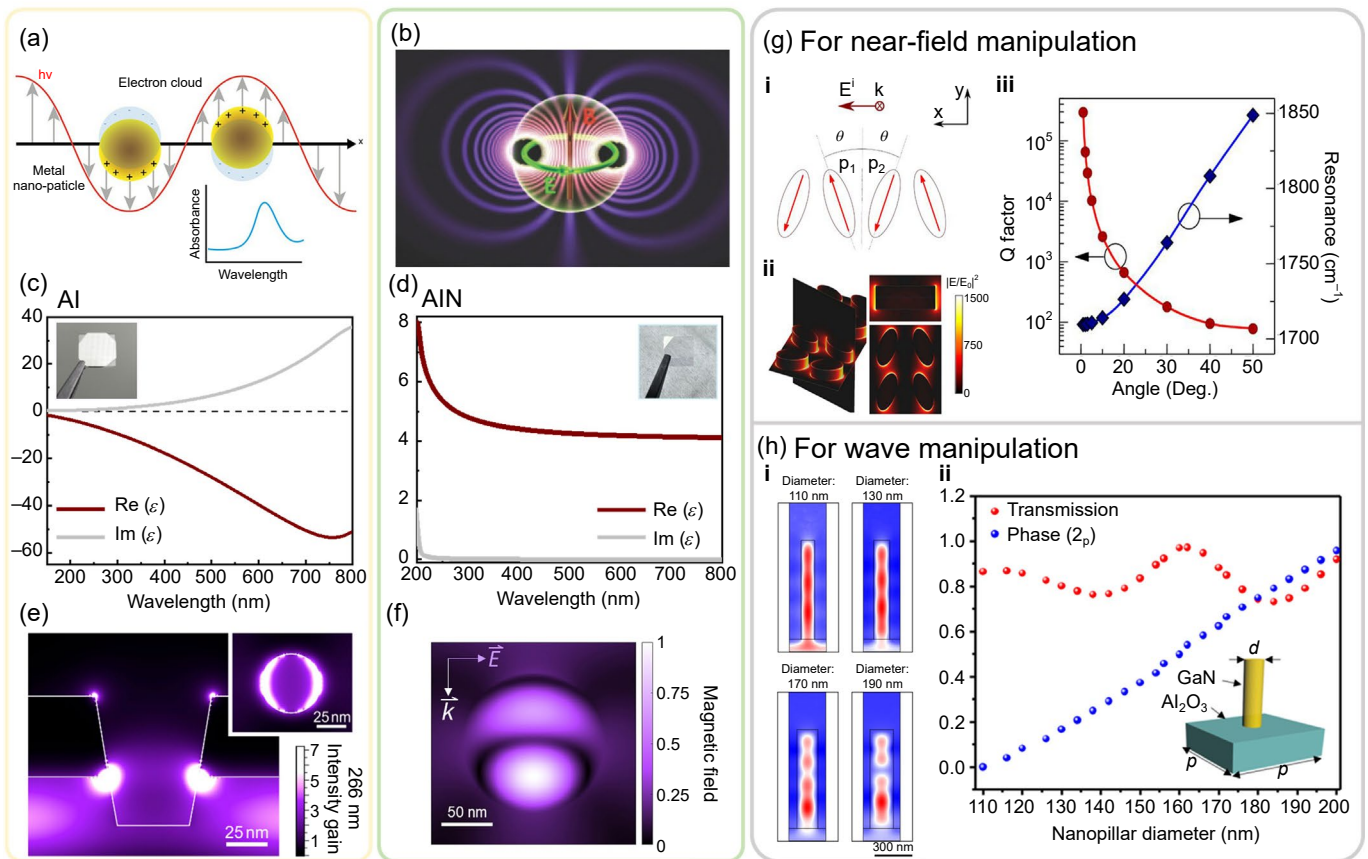


圖 2. 超穎介面之材料分類。(a) LSPR 之共振機制示意圖<sup>(18)</sup>。(b) 半導體顆粒之米式散射共振<sup>(19)</sup>。(c) 鋁之介電係數<sup>(8)</sup>。插圖為鋁薄膜之照片。(d) 氮化鋁之介電常數<sup>(9)</sup>。插圖為氮化鋁薄膜之照片<sup>(20)</sup>。(e) 鋁奈米洞在 266 nm 之 LSPR 共振模擬結果<sup>(10)</sup>。(f) 直徑 140 nm 氮化鋁奈米顆粒在 248.7 nm 時之共振模擬結果。(g) 用於近場增強效應之超穎介面共振單位元之設計手段<sup>(21)</sup>。(h) 用於光波調控之超穎介面其中共振單位元之設計手段<sup>(13)</sup>。

例<sup>(15)</sup>，其共振拉曼散射截面可高達每單位立體角  $10^{25} \text{ cm}^2$ ，比起可見光激發下的非共振拉曼散射強度提升約五個數量級<sup>(16)</sup>。這樣的能量耦合與散射增強機制與一般的拉曼散射不同。圖 3 乃是比較雷利散射 (Rayleigh scattering)、一般拉曼之史托克 (Stokes) 散射，及共振拉曼中之史托克散射。在一般 (非共振) 拉曼中，電子僅被短暫激發至由入射光引發之虛態 (virtual state)，再散射回不同的基態振動能階。而其中之能量差 (標記為  $h\nu - h\nu_{\text{vib}}$ ) 則對應到光譜中之拉曼位移 (Raman shift)。一般拉曼散射中其散射截面與強度相對有限。而在共振拉曼中，除了散射強度的顯著提升外，其光譜經常能觀察到額外之拉曼峰值。其機制包括以下幾個關鍵因素：首先，電子激發與振動模態間的耦合增強，使某些原本微弱或不顯著的振動訊號被強烈放大；其次，共振條件會選擇性地放大與電子對稱性相符的振動模態，讓非對稱模態或高階泛音 (overtone) 得以清楚呈現；第三，訊雜比的提高讓許多原本淹沒在背景中的譜峰被辨識出來；最後，若激發態的振動能階也參與散射過程，還可能導致組合模、熱激發譜線等額外特徵的出現。綜合而言，共振拉曼在深紫外條件下的應用，不僅提升光譜靈敏度，也能揭示更完整且豐富的分子振動資訊，對於複雜生物分子及奈米材料的定性與定量分析具有極高潛力<sup>(17)</sup>。

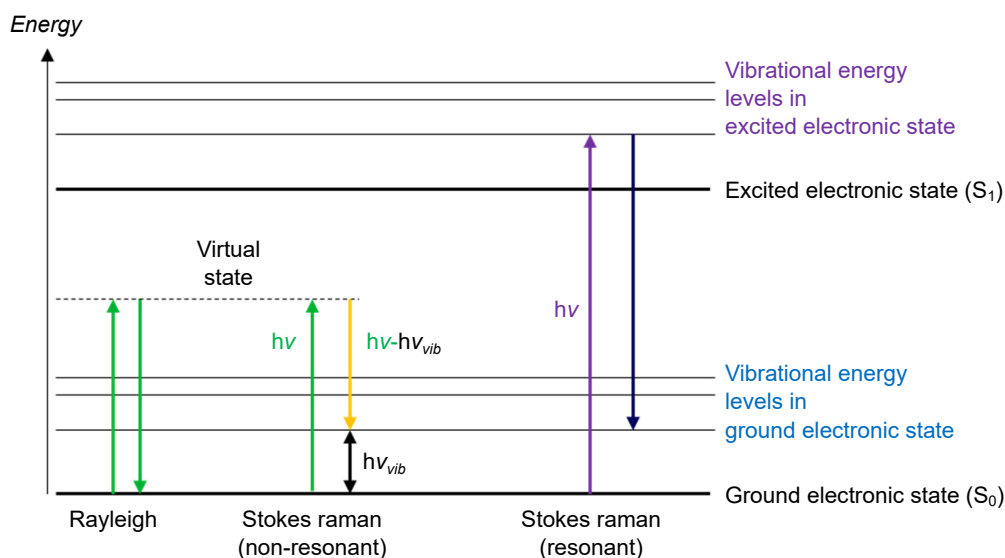


圖 3. 雷利散射、非共振拉曼與共振拉曼之性質比較。

而超穎介面具有進一步增進深紫外拉曼光譜技術之巨大潛力。例如，2021 年國立清華大學嚴大任教授與果尚志教授之團隊合作實現了一種能夠有效增強生醫分子之深紫外共振拉曼散射之電漿子超穎介面 (圖 4(a))<sup>(22)</sup>。研究中，團隊以磊晶技術製作表面平整且具單晶性質之鋁並採用電子束微影及乾蝕刻於其上製作由鋁奈米洞組成之超穎介面 (圖 4(b))。圖 4(c) 展示了研究中利用鋁超穎介面進行深紫外表面增強共振拉曼散射 (DUV-SERRS) 量測的成果，針對五種核酸鹼基單體 (A、T、C、G、U) 進行分析。將單層 (~1 nm) 鹼基分子分別沉積於石英玻璃、平整鋁膜與奈米孔洞基板上比較後發現，只有鋁超穎介面能在 266 nm 激發光下產生顯著增強的拉曼訊號，並展現最高達  $10^6$  的訊號增強因子。值得注意的是，該基板可在高波數與低波數區域皆觀察到清晰的拉曼指紋訊號，對每一種鹼基皆能解析出七至九個以上的特徵峰，涵蓋範圍從  $\sim 600 \text{ cm}^{-1}$  延伸至  $\sim 1700 \text{ cm}^{-1}$ ，特別是在低波數區域 ( $< 800 \text{ cm}^{-1}$ ) 亦呈現顯著增強，這對於某些以往難以偵測的彎曲 (bending) 或骨架振動模態具有關鍵價值。這項成果證實研究開發之超穎介面具備高靈敏度與高解析度，能同時揭露鹼基的高低波數拉曼特徵，提供更完整且具鑑別性的分子訊息，有效提升核酸光譜分析的廣度與深度。此外，研究中也證實該超穎介面可穩定地檢測 12-mer 單鏈去氧核糖核酸 (ssDNA) 的訊號，並藉由分析  $1339 \text{ cm}^{-1}$  等特徵峰值，成功分辨單一鹼基的突變位置與數量。實驗結果顯示，突變量與訊號強度之間呈現高度線性關係，具潛力應用於定量核酸突變分析。此研究對於應用深紫外超穎介面以應用於共振拉曼光譜之研究具有相當大的貢獻。

除了生醫材料之外，具有場增強效應的深紫外超穎介面也可應用於奈米材料之分析。圖 4(d-f) 為筆者團隊於 2025 年發表之研究成果<sup>(23)</sup>。此研究中不同以往深紫外超穎介面多採用鋁為材料，此研究中採用矽為超穎介面之原料。圖 4(d) 顯示了取自文獻<sup>(24)</sup> 中矽在波長 200 至 500 nm 波長範圍內的介電常數之實部 ( $\text{Re}(\epsilon)$ ，紫色曲線) 與虛部 ( $\text{Im}(\epsilon)$ ，灰色曲線)。從圖中可見，在近紫外 (300–400 nm) 與可見光範圍內，矽的介電常數與其他常用之介電質一般，其實部大於零。然而，其虛部由於其帶間躍遷，在波長低於 400 nm 時迅速上升。由於材料之介電常數之實部與虛部必須遵循克拉莫-克羅尼關係式 (Kramers-Kronig relations)，

虛部中由吸收引起的改變必將導致實部出現下降。而這種因為光與物質之間交互作用導致之振盪現象夠強時，其實部甚至會轉變成負的數值。對於矽來說，此現象發生在波長低於約 295 nm。而此現象也導致矽在深紫外區間之光學性質不同於可見光與近紅外光，此時矽之性質更像是金屬一般，具有能與周遭介質介面產生侷域性表面極化子 (localized surface polaritons)<sup>(25)</sup>。值得一提的是，僅有數種材料具備這種因帶間躍遷導致介電常數之實部有如此大的性質上之變化。例如，儘管二氧化鈦在紫外區間之帶間躍遷亦相當顯著，但其介電係數卻不會因此轉變成負的。而在這些材料中，矽是最穩定且最具備大規模奈米製造潛力之材料。另外，儘管矽在深紫外區間具有負的介電係數，其對應之光學共振是否可直接稱呼為表面電漿共振尚待進一步驗證。研究中為了增強矽超穎介面之表面增強效應，團隊設計了一蝌蚪形狀孔洞排列之超穎介面 (圖 4(e))。此超穎介面在 266 nm 處將會產生極強之表面電場增強為了進一步驗證其應用於深紫外共振拉曼光譜之潛力，團隊與陽明交大材料系林御專教授合作將二維材料二硫化錳 (2D-WS<sub>2</sub>) 及二硫化鉬 (2D-MoS<sub>2</sub>) 轉移到此超穎介面。研究中為了進行比較，採用了 488 nm 及 266 nm 之雷射分別進行拉曼測量以比較其可見光及深紫外區間中拉曼訊號之差異。其拉曼測量結果如圖 4(f) 所示。先就二硫化錳測量結果進行討論。在深紫外光之激發下，二維材料之拉曼訊號於超穎介面區域 (紫線，標記為 M.S.) 相較與鄰近之矽表面明顯有增強之效果。此結果證實了超穎介面可有效增強分子之深紫外拉曼訊號。另外，如果比較此樣品在深紫外及可見光激發下之拉曼光譜會發現，二維材料明顯地在深紫外光之照射下展現出更多之拉曼特徵峰 ( $\approx 707, 763, 825 \text{ cm}^{-1}$ )。參考先前大阪大學 Satoshi Kawata 教授的研究會發現<sup>(26)</sup>，這些共振峰對應到的是二維材料在深紫外照射下由於帶間躍遷及後續之谷間躍遷 (inter-valley transition) 導致的所謂雙共振拉曼散射。這些拉曼訊號對於理解奈米材料之能帶結構及其聲子色散之效應及極有用。而類似的結果亦可在二硫化鉬之測量結果中看出。自圖 4(f-iii) 可以看出，超穎介面可大幅增強二硫化鉬之深紫外拉曼訊號。光譜中對應到  $E_{2g}^1(\Gamma)$  以及  $A_{1g}(\Gamma)$  之拉曼訊號明顯的增強。另外相較於可見光拉曼光譜，在超穎介面增強下的深紫外拉曼光譜中也可看到許多對應到雙共振拉曼導致的額外之拉曼散射特徵峰。這些研究結果都表明研究中開發出之矽超穎介面對於深紫外拉曼光譜之應用具有極大之潛力。此外，深紫外超穎介面亦可應用於其他光譜技術如表面增強吸收光譜<sup>(9)</sup> 及自發螢光光譜<sup>(10, 23)</sup> 之增強，有興趣之讀者可參考文獻之結果。

#### 四、深紫外超穎透鏡之開發與製作

除了改善光譜之靈敏度之外，超穎介面在深紫外之新穎光學元件開發亦具有重要之應用潛力。筆者團隊近來亦致力於深紫外超穎透鏡 (metalens, 圖 5(a)) 之開發及相關應用之探討<sup>(20)</sup>。此研究中採用氮化鋁這種寬能隙半導體材料來製作超穎透鏡。氮化鋁在深紫外區間具有良好之光電性質 (圖 5(b))，且具有堅固耐用、可承受高溫等穩定性質。在研究中採用奈米圓柱作為超穎透鏡之共振單位元 (圖 5(c))。將高度 380 nm 之圓柱之直徑逐漸改變，可以發現其中之共振模態逐漸改變。從圖 5(d) 可以看出，這些奈米圓柱之穿透率超過 60% 且能夠完整地涵蓋  $2\pi$  相位以達到波前控制之效果。圖 5(e) 乃是此超穎透鏡之照片，樣品之製造乃是藉由電子束微影搭配蝕刻製程完成。圖 5(f) 乃是此超穎透鏡聚焦之實驗與理論結果比較。可以看出此超穎透鏡在 266 nm 之聚焦能力與理論預測相當接近。

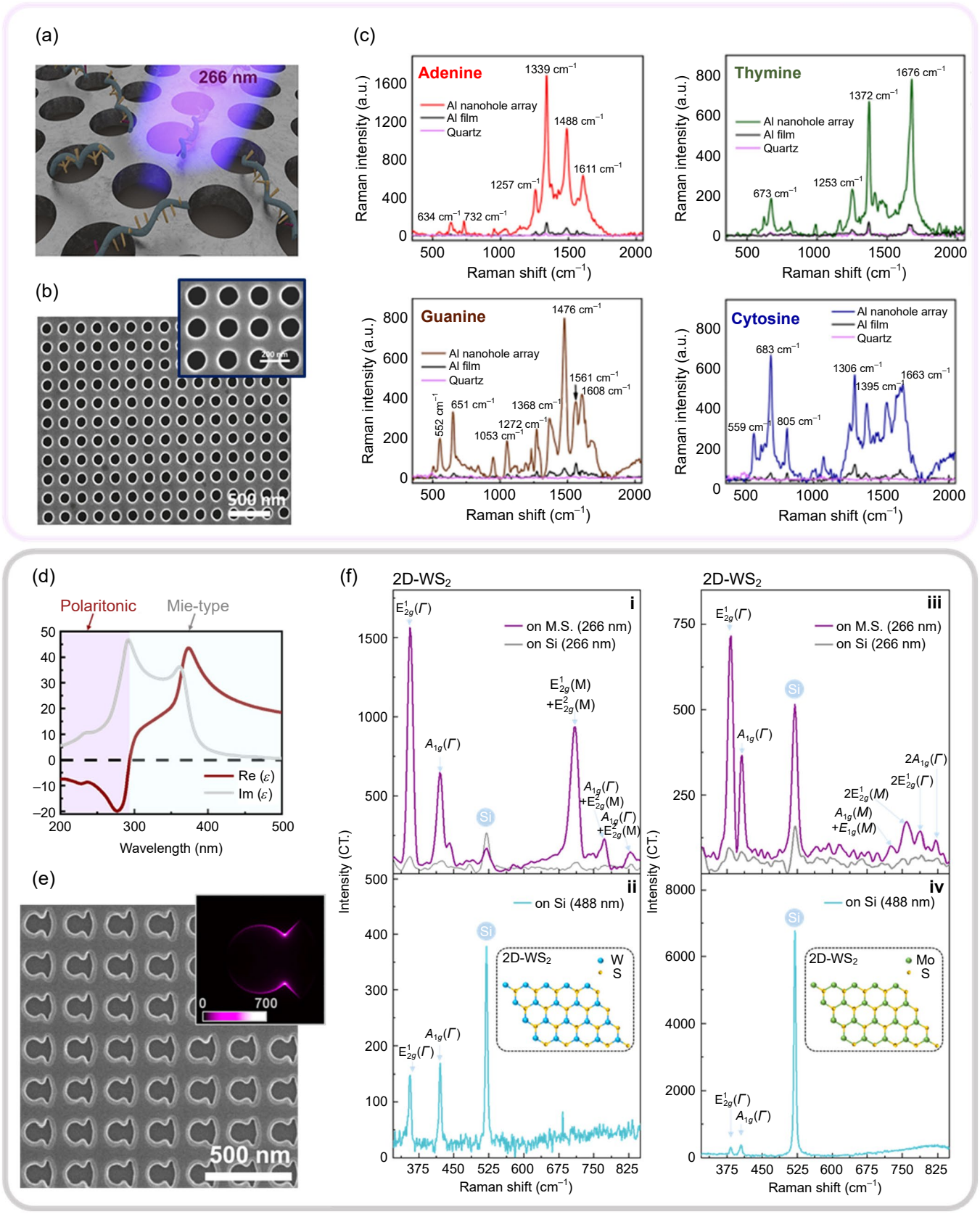


圖 4. 超穎介面於深紫外區間之表面增強共振拉曼之應用。(a)-(c) 利用單晶鋁製作而成之電漿子超穎介面及其應用於生物分子之表面增強深紫外拉曼光譜之應用<sup>(22)</sup>。(d)-(f) 利用矽因為帶間躍遷造成之表面極化子效應於二維材料之深紫外共振拉曼之測量<sup>(23)</sup>。

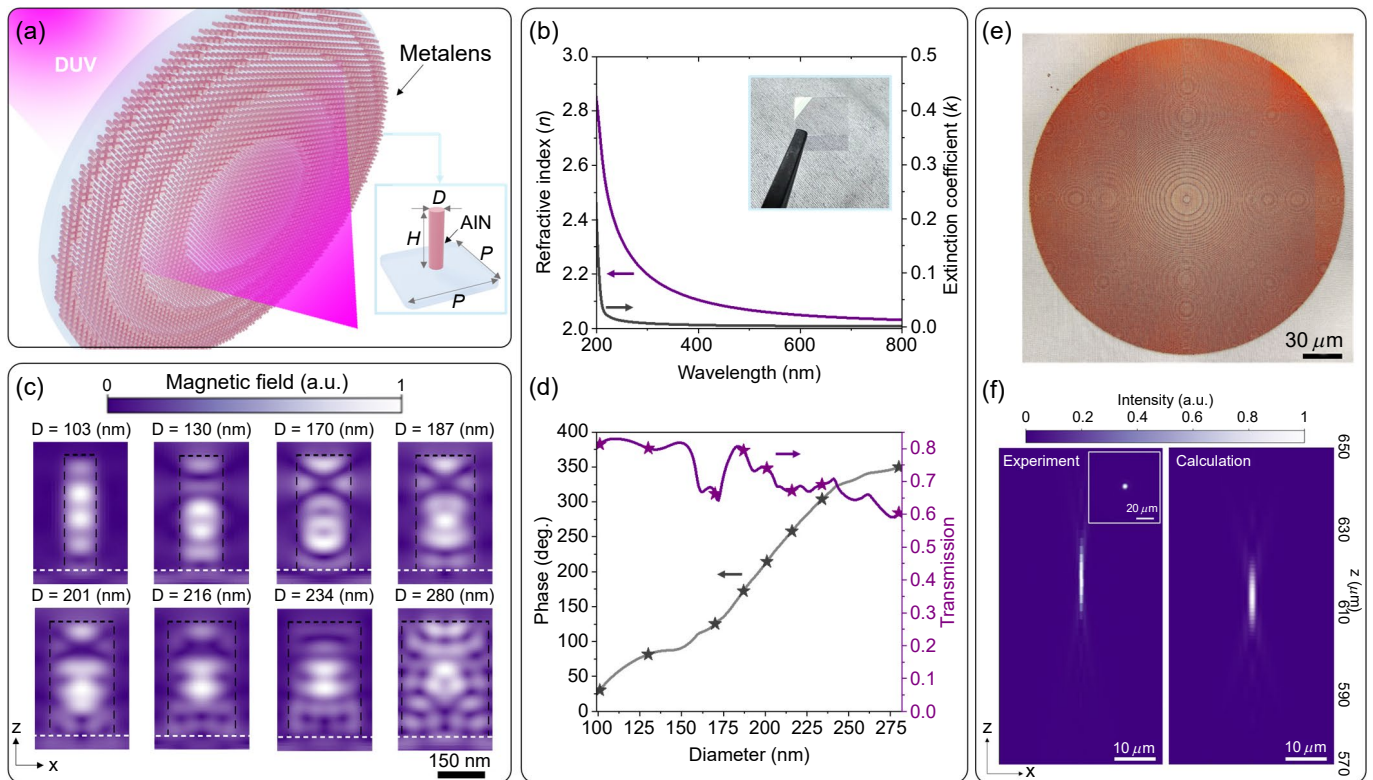


圖 5. 氮化鋁深紫外超穎透鏡<sup>(20)</sup>。(a) 超穎透鏡之示意圖。 $P$ : 300 nm ;  $H$ : 380 nm ;  $D$ : 100 – 280 nm。(b) 氮化鋁之光學參數。插圖：氮化鋁薄膜。(c) 構成超穎透鏡之氮化鋁奈米柱之共振模擬。(d) 奈米柱之穿透率與相位。(e) 超穎透鏡之照片。(f) 超穎透鏡在波長 266 nm 之聚焦測試。

在研究中亦測試了此超穎透鏡之影像能力。團隊利用聚焦離子束加工鋁薄膜以製作不同之微結構，如圖 6(a-c) 所示。測試中將超穎透鏡作為成像透鏡將鋁微結構之影像投影於相機中，其結果如圖 6(d-f)。可以看出，超穎透鏡可以將影像確實投影於相機上，且解析度接近理論之繞射極限。另外研究中也證實了超穎透鏡應用於深紫外超快雷射加工之可能性。研究中利用超穎透鏡將中央波長 266 nm 之皮秒脈衝雷射聚焦於蓋有光阻之矽基板並置於平移台上 (圖 7(a))。藉由控制平移台跟快門得以在矽之表面製作一系列由微米尺度大小之孔洞 (圖 7(b)) 排列而成之陽明交通大學校徽 (圖 7(c))。這些應用之成功也充分顯示了氮化鋁超穎透鏡未來在新穎之深紫外光電系統開發上之潛力。

## 五、總結與未來發展

本文探討超穎介面於深紫外光譜與奈米製造應用中的潛力，顯示其不僅能有效提升分子訊號之檢出靈敏度，亦能實現微型化與整合式光學元件之開發。未來研究可進一步朝向以下方向推進：首先，發展具高光學性能且製程友善之新型深紫外材料；其次，結合人工智慧進行超穎結構之反向設計及功能優化；最後，整合深紫外超穎介面於實際光電系統如生醫檢測、極紫外 (EUV) 製程中，將成為推動次世代奈米光子學應用的重要關鍵。

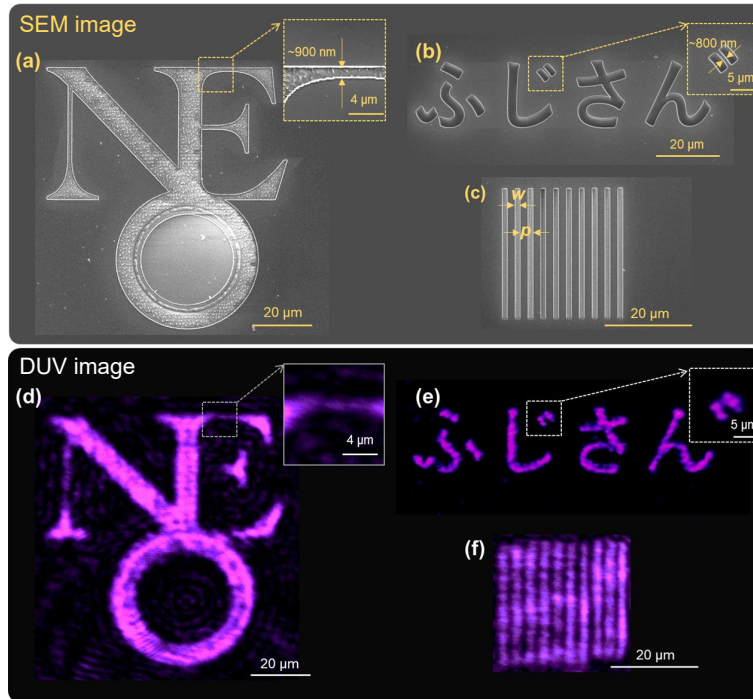


圖 6. 氮化鋁超穎透鏡用於深紫外成像<sup>(20)</sup>。(a)-(c) 用來測試之微結構之電子顯微鏡影像。P: 3  $\mu\text{m}$  ; w: 1  $\mu\text{m}$ 。包含英文字母“NEO”、平假名、及奈米光柵。(d)-(f) 超穎透鏡對應之成像結果。

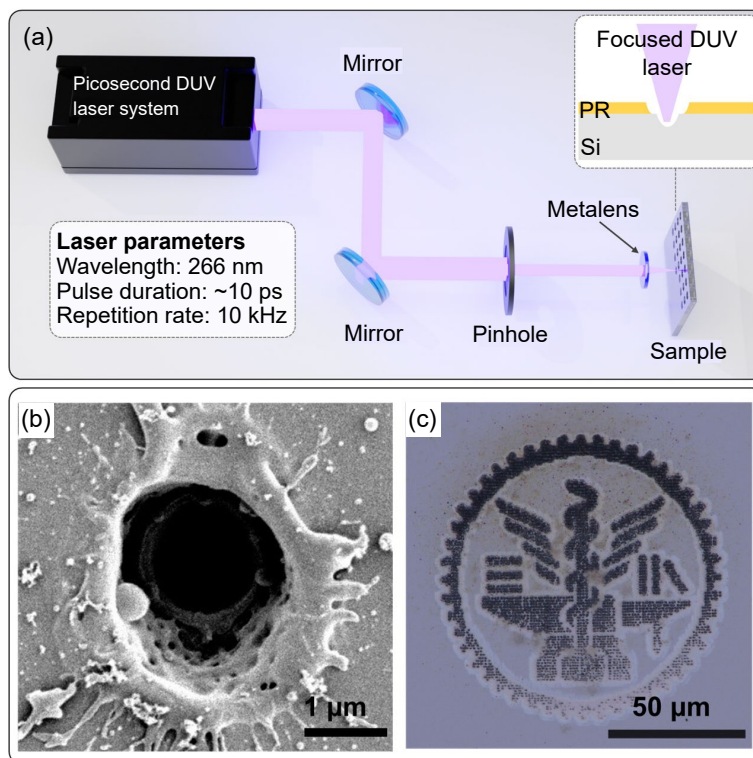


圖 7. 氮化鋁超穎透鏡用於深紫外超快雷射加工<sup>(20)</sup>。(a) 實驗架構示意圖。(b) 製造出之微結構的電子顯微鏡影像。(c) 在矽表面上製造之陽明交大校徽。

## 誌謝

筆者感謝臺灣國科會 (NSTC 113-2636-M-A49-001, 114-2636-M-A49-001, 113-2112-M-A49-025, 113-2221-E-260-007-MY3) 及教育部 (玉山青年計畫) 對於研究團隊之支持與經費補助。

## 參考文獻

1. H.-H. Hsiao, C. H. Chu, D. P. Tsai, *Small Methods* **1**, 1600064 (2017).
2. M. L. Tseng *et al.*, *Adv. Opt. Mater.* **6**, 1800554 (2018).
3. T. Pertsch, Y. Kivshar, *MRS Bulletin* **45**, 210-220 (2020).
4. M. L. Tseng, Y. Jahani, A. Leitis, H. Altug, *ACS Photonics* **8**, 47-60 (2020).
5. Y. Kumamoto, A. Taguchi, S. Kawata, *Adv. Opt. Mater.* **7**, 1801099 (2018). This review article also provides a detailed explanation for the data analysis approach used in Ref. [6].
6. B. J. Zeskind *et al.*, *Nat. Methods* **4**, 567-569 (2007).
7. A. Ojaghi *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **117**, 14779-14789 (2020).
8. K. M. McPeak *et al.*, *ACS Photonics* **2**, 326-333 (2015).
9. S. J. Shen *et al.*, *ACS Photonics*, **12**, 2955 (2025).
10. A. Barulin, J. B. Claude, S. Patra, N. Bonod, J. Wenger, *Nano Lett.* **19**, 7434-7442 (2019).
11. L. Ye *et al.*, *ACS Photonics* **10**, 4377-4384 (2023).
12. M. L. Tseng *et al.*, *Adv. Opt. Mater.* **7**, 1900617 (2019).
13. Y. Luo *et al.*, *Nanophotonics* **11**, 1949-1959 (2022).
14. Y. Luo *et al.*, *Small Methods* **6**, e2101228 (2022).
15. Z. Q. Wen, G. J. Thomas, *Biopolymers* **45**, 247-256 (1998).
16. E. J. Blackie, E. C. Le Ru, P. G. Etchegoin, *J. Am. Chem. Soc.* **131**, 14466-14472 (2009).
17. in *Modern Raman Spectroscopy*. (2019), pp. 101-117.
18. E. Cortes *et al.*, *Chem. Rev.* **122**, 15082-15176 (2022).
19. A. I. Kuznetsov, A. E. Miroshnichenko, M. L. Brongersma, Y. S. Kivshar, B. Luk'yanchuk, *Science* **354**, 846 (2016).
20. Y. C. Peng *et al.*, *Nano Lett.* **25**, 3141-3149 (2025).
21. A. Tittl *et al.*, *Science* **360**, 1105-1109 (2018).
22. A. Dubey *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **143**, 19282-19286 (2021).
23. B. R. Lee *et al.*, *Adv. Funct. Mater.* **35**, 2420439 (2025).
24. E. D. Palik, *Handbook of optical constants of solids*. (Academic press, 1998), vol. 3.
25. V. M. Agranovich, *Surface polaritons*. (Elsevier, 2012).
26. H. L. Liu *et al.*, *Sci. Rep.* **8**, 11398 (2018).

## 作者簡介

曾銘綸先生為國立臺灣大學應用物理所博士，現為國立陽明交通大學電子研究所助理教授。

Ming Lun Tseng received his Ph.D. from the Graduate Institute of Applied Physics of National Taiwan University. He is currently an Assistant Professor in the Institute of Electronics at National Yang Ming Chiao Tung University.

沈上傑為國立陽明交通大學電子研究所碩士生。

Shang-Jie Shen is currently a M.S. student in the Institute of Electronics at National Yang Ming Chiao Tung University.