

# 微共振腔輔助多重高品質因子共振超穎介面於光波前操控

## Microcavity-assisted Multi-resonant High-Q Metasurfaces for Wavefront Engineering

吳品韻

Pin-Chieh Wu

本文章提出一種新型微共振腔輔助之多重高品質因子 (high-Q) 共振超穎介面設計架構，結合光學法布里－波羅 (Fabry-Perot) 腔體機制與厚度漸變分佈式布拉格反射鏡 (DBR)，成功實現橫跨可見光至近紅外波段的多波長高-Q 共振響應。相較於傳統單一共振或多工式超穎介面設計，本超穎光學架構能在單一平面元件中同時產生多達 15 個高-Q 共振峰，且反射效率不隨共振數目增加而顯著下降。此外，藉由將具幾何相位控制能力的電漿子超穎原子整合至微共振腔中，每一共振波長皆可獨立實現連續  $2\pi$  的相位調控與可調振幅響應，從而達成多波長光波前操控。實驗與模擬結果顯示，此結構可應用於多色向量全像、結構性色彩、光學資訊加密與高密度光場調制等先進奈米光學技術，展現高度的設計自由度與實用潛力。

This article presents a novel microcavity-assisted multi-resonant high-Q metasurface platform that integrates Fabry-Perot cavity with a gradient-thickness distributed Bragg reflector (DBR). By introducing a wavelength-dependent cavity thickness, the proposed meta-optics architecture enables the simultaneous generation of multiple high-Q resonances spanning the visible to near-infrared spectral range within a single layered metasurface. Unlike conventional single-resonant or multiplexed metasurface designs, this approach supports 15 high-Q resonance modes without sacrificing optical efficiency. By incorporating plasmonic meta-atoms with geometric phase control into the metasurface, independent and continuous  $2\pi$  phase modulation can be achieved at each resonance wavelength, together with flexible amplitude control. This capability allows precise multi-wavelength wavefront engineering within a single device. Both numerical simulations and experimental demonstrations confirm the robustness and scalability of this platform. Potential applications include multi-color vectorial holography, structural color generation, optical information encryption, and high-density photonic encoding. This work provides a forward-looking metasurface design strategy that significantly expands the degrees of freedom for multi-wavelength, high-efficiency optical field manipulation.

## 一、超穎介面簡介

### 1.1 單一高品質因子共振超穎介面

近年來，超穎介面 (metasurface) 技術在奈米光學領域中展現出巨大的潛力<sup>(1-3)</sup>。這類結構藉由次波長尺寸的人工設計單元排列，能在結構厚度小於波長的情況下實現對光波前的操控，涵蓋振幅、相位與偏振等物理特徵。不同於傳統體積式光學元件，超穎介面具備平面化、可與現有光學系統整合、以及單一元件可達多種光學功能等優勢，使其在光學顯示、成像、感測與量子光源等應用領域迅速嶄露頭角。

單一高品質因子 (Q-factor) 共振型超穎介面通常仰賴特定共振模態在選定波長下實現對光場的強耦合，以提供高效率的相位或振幅調控。為提升共振品質因子並抑制非必要損耗，各式物理設計方法被廣泛研究與實踐 (如圖 1 左半部)。一種常見做法是使用高階米式共振 (high-order Mie resonances)<sup>(4)</sup>，特別是在全介電質奈米結構 (all-dielectric nanostructures) 中，能有效降低吸收損耗以及遠場散射損耗，進而提高光譜特徵中的品質因子。另一種做法是利用「無輻射模態」(non-radiating modes)<sup>(5)</sup>，例如 anapole mode。該模態源自於電偶極矩與環形極矩間的干涉抵銷，可將光能量侷限於結構內部而非輻射至遠場，有效提升近場範圍電磁場增益與 Q 值，常見於矽、氮化鎵等高折射率材料構成的奈米圓盤或方柱中。此外，透過共振模態之間的耦合 (mode coupling) 也可創造高 Q 共振。尤其是當超穎單元排列為具備特定周期性時，會引發表面晶格共振 (surface lattice resonance, SLR)<sup>(6)</sup>，其特性為由布拉格散射 (Bragg Scattering) 與單元內部共振交互作用形成的窄頻峰值，具備角度選擇性與長程耦合特性。近年亦有研究以拓撲保護的邊界態實現高 Q 共振，具代表性者如準束縛態 (quasi-bound state in the continuum, q-BIC)<sup>(7)</sup>。這類模態源於對稱性破壞引入可控的輻射通道，使原本不輻射的束縛模態能以極窄的共振峰與有限的損耗耦合至自由空間，進一步實現高選擇性與高效率的波前操控。儘管這些設計在功能表現上日益成熟，其在操作頻率與波段數量上的限制，仍成為推動多重高品質因子共振設計發展的主要動機之一。

### 1.2 多重高品質因子共振超穎介面

為了在單一超穎光學平台上實現多個頻率的高品質因子共振，最常見的方法是結合「單一高品質因子共振單元」與空間或垂直方向上的多工技術 (見圖 1 右半部)<sup>(8)</sup>。此一設計思路本質上是將前述單一共振超穎介面 (第 1.1 節) 之高 Q 特性，進一步延伸為多波長操作。所謂「空間多工化」(spatial multiplexing)<sup>(9)</sup>，即是將設計針對不同波長最佳化的多組超穎單元，交錯排列在同一個超穎介面中。每一組單元在其設計頻率上展現高 Q 共振特性，從而形成多個窄頻響應峰。然而，這種架構容易受到鄰近結構之間近場耦合影響，導致模態間干擾與效率下降。此外，元件整體效率會隨波長數上升而遞減，成為此類設計的物理瓶頸。

另一種作法則為「垂直多工化」(vertical stacking)<sup>(10)</sup>，將不同設計目標的模面堆疊於多層之中，每層對應一特定波長之高 Q 響應。此法雖可有效避免近場干擾，但製程難度高，對元件厚度與材料選擇也有嚴格要求，不利於實用化。除了空間與垂直多工之外，研究者亦嘗試在單一結構中實現內建的多重共振性，透過導入複雜幾何設計與模態混合 (mode hybridization) 以達到多頻高 Q 共振響應，但是這些方法可以達到的高品質因子共振個數都非常有限。

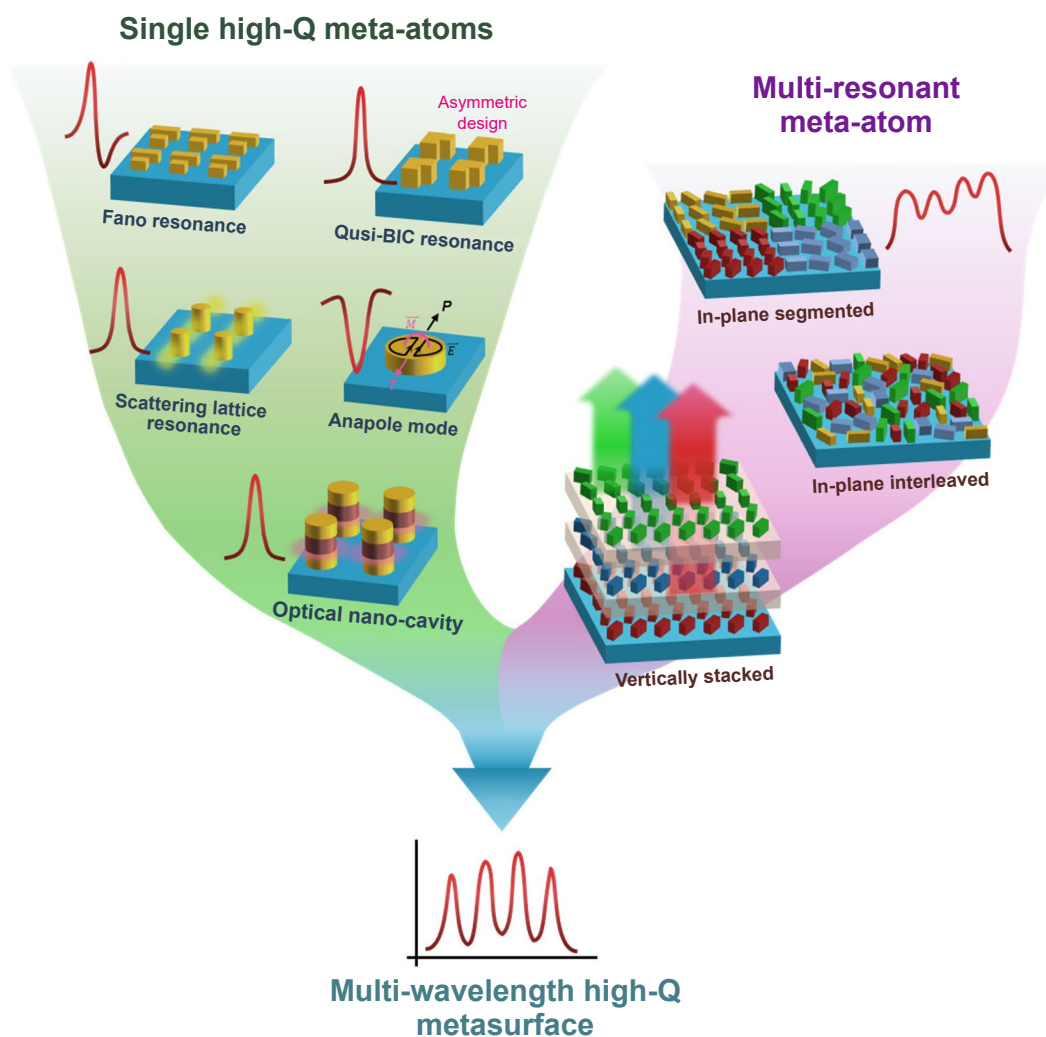


圖 1. 左側展示各類單一高品質因子超穎單元所利用的共振機制，包括 Fano 共振、準束縛態、散射型晶格共振、anapole 模態與光學微共振腔等；右側則呈現如何透過平面內多工 (in-plane segmented/interlaced) 與垂直堆疊 (vertically stacked) 方式，整合多組共振單元形成多波長操作之多重共振超穎介面。整體架構可實現同時具備高 Q 與多頻響應的超穎介面平台。

## 二、微共振腔與厚度漸變 DBR 之組合機制

本研究對於多波長高品質因子超穎介面設計的源頭可追溯至一個經典的光學法布里－波羅 (Fabry-Perot, FP) 共振腔，其結構由一層部分反射鏡、一個金屬全反射鏡以及夾在其中的介電層所組成。如圖 2(a) 所示，當光在腔體中往返的總光程滿足特定條件時，反射光譜中便會出現一系列明顯且尖銳的共振峰。這種現象來自於 FP 腔對電磁能量的有效儲存與侷限能力，使得特定波長的共振特性被放大，展現在極窄頻寬的光學響應中。為達成這類共振行為，腔體中的介電層厚度需滿足一基本條件，也就是其厚度需大於光在該材料中的有效波長。雖然可透過改變入射角度或材料折射率來調整整體反射強度，但要對單一高 Q 共振峰的相位進行細部控制，則往往需仰賴更高階的工程技術。另一種較具設計彈性的架構為金屬－介電質－金屬 (metal-insulator-metal, MIM) 型的超穎介面 (見圖 2(b))。其特點在於，頂

部的奈米結構具備豐富幾何設計自由度，能藉由尺寸、形狀與排列方向的調整，實現對共振頻率、頻寬以及相位的精確操控。由於中間的介電層極薄，金屬結構與背後反射鏡之間可產生強烈的近場耦合，進一步增強局部場與光學選擇性。

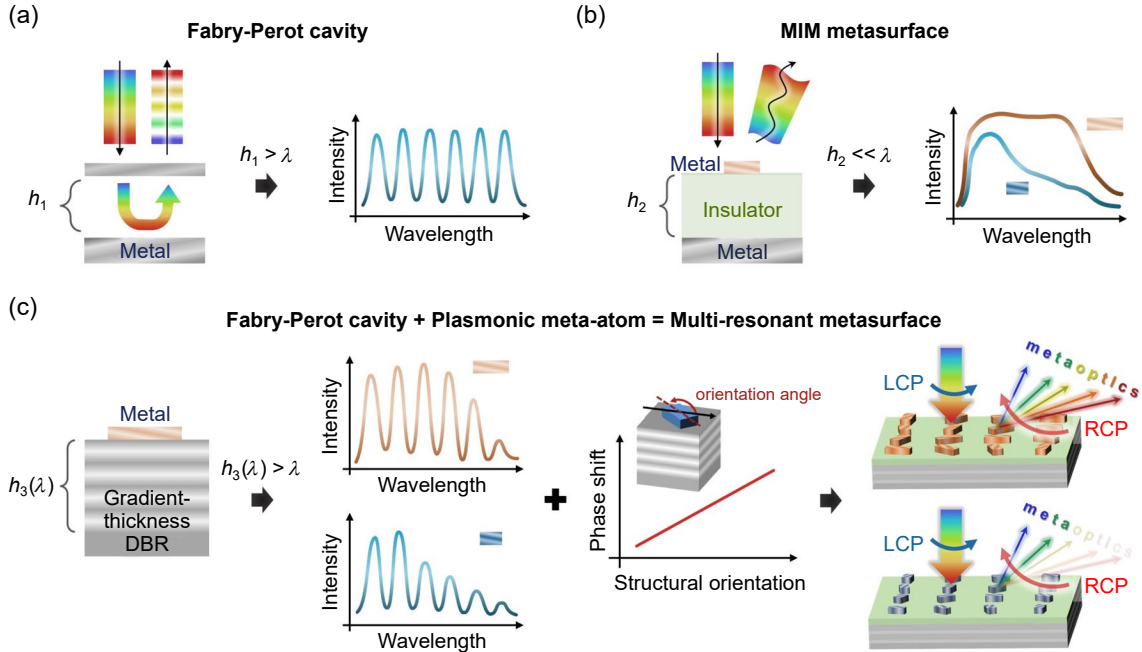


圖 2. (a) 傳統法布里-波羅共振腔由金屬鏡與部分反射鏡夾置一介電層構成，當介電厚度  $h_1$  大於操作波長時，可產生多個狹窄高 Q 值的共振峰。(b) 金屬-介電質-金屬型超穎介面透過幾何結構設計可調控反射光的振幅與頻譜，但由於介電層厚度極薄  $h_2 \ll \lambda$ ，共振模態的品質因子相對較低。(c) 本研究所提出的設計將具厚度漸變的 DBR 反射鏡引入 FP 腔體中，並於上方整合電漿子超穎原子，使介電腔體厚度  $h_2(\lambda)$  具備波長依賴性，達成多波長高 Q 共振。進一步結合幾何相位調控方法，能針對每一個共振峰獨立實現精確的相位控制，最終形成可操控波前的多重共振超穎介面。<sup>(11)</sup>

為了整合上述兩種設計的優勢並實現多重高 Q 共振響應，我們提出一種創新結構設計：將原本 FP 腔中的金屬反射鏡改為厚度漸變的分散式布拉格反射器 (distributed Bragg reflector, DBR)<sup>(11, 12)</sup>，並以具電漿子響應的超穎原子取代原本的部分反射鏡。這樣的組合設計不僅保留了腔體共振的能力，也賦予系統額外的振幅與相位調控自由度 (如圖 2(c) 所示)。

## 2.1 微共振腔輔助多重共振

為深入理解本研究所提出的多重共振超穎介面設計，我們首先以一組金屬-介電-金屬結構作為基礎模型 (見圖 3(a))，探討其在不同條件下的圓偏振轉換行為，特別是左旋圓偏振光 (left circular polarization, LCP) 轉為右旋圓偏振光 (right circular polarization, RCP) 的反射光譜特性。結果顯示，當中間介電層厚度逐漸增加時，原本寬頻的光譜會逐漸出現多個尖銳的高 Q 共振峰，且共振峰數量與厚度呈現正相關。這樣的變化趨勢與傳統 FP 腔的多階共振行為極為相似。

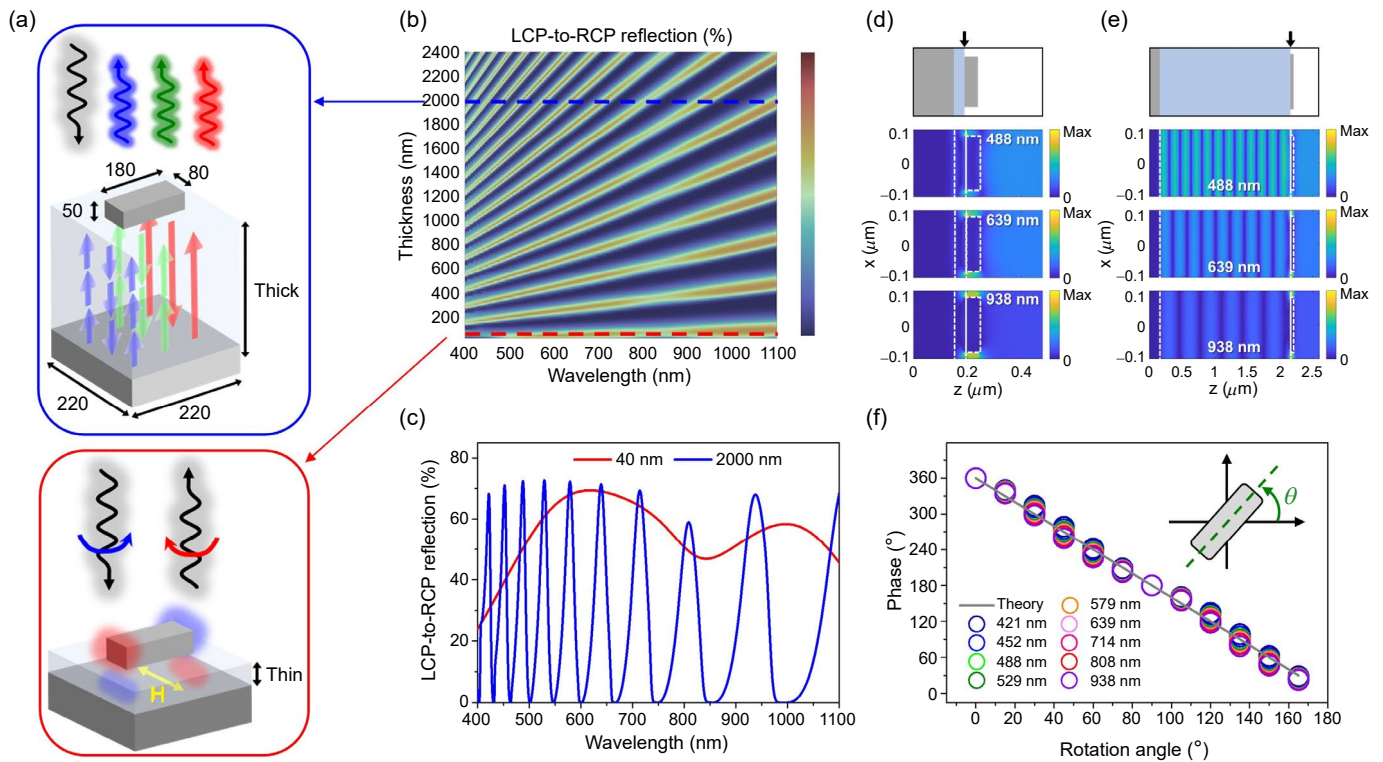


圖 3. (a) 不同介電層厚度下的場分佈行為示意圖。當厚度較大時，光場可在腔體中建立穩定駐波模態並產生多階共振(上圖)；當厚度極薄時，則由間隙電漿子主導共振效應(下圖)。(b) 模擬反射效率隨共振腔厚度與波長之光譜。(c) 兩種介電質厚度(40 nm 與 2000 nm) 下的轉換效率光譜。(d, e) 不同厚度下的模擬電場分佈，分別呈現 gap plasmon 主導模態與法布里—波羅模態的光場侷限位置與形貌。(f) 幾何相位於不同波長的共振峰之模擬結果。<sup>(11)</sup>

具體而言，在介電層厚度仍處於次波長尺度時，反射光譜顯示出寬頻但缺乏明顯峰值的特徵。這是因為在此區域，FP 腔的共振條件尚未建立，主導行為多由間隙電漿子 (gap plasmon) 所控制。模擬結果也證實此一情況下的電場分佈以侷限於奈米結構附近為主 (見圖 3(d))，並無明顯的駐波結構。當厚度增加至數百奈米至數微米等級，FP 模態開始建立，整體光譜轉變為由多個分離、狹窄且對比明確的共振峰組成，尤其是在短波長區段，其共振峰展現出更高的 Q 值，反映出高階 FP 模態的有效激發。值得注意的是，這些共振峰不僅具備高光譜解析度，其反射效率也能維持在高水準，僅在特定波段 (如 840 nm 附近) 因材料吸收導致輕微下降。此一結構的反射行為可視為 FP 共振與 MIM 超穎設計共同作用的結果，既有傳統金屬—介電質干涉的強烈頻率選擇性，也兼具超穎原子的幾何操控特性，如圖 3(b-e) 所示。

另一方面，為了在所有共振波長下均實現精確相位操控，我們引入幾何相位 (geometric phase) 設計原理。透過調整超穎原子的結構旋轉角度，即可針對每一共振峰實現連續  $2\pi$  的相位調控。模擬結果顯示，此方法對於不同波長之共振峰皆能有效作用，不受耦合距離或結構厚度的限制 (見圖 3(f))。與過往僅仰賴近場耦合或全介電質結構之策略不同，我們證明即使當超穎原子與反射鏡之間隔一段光學距離時，其本身仍能以共振單元形式運作，作為部分反射鏡維持幾何相位效應。因此，只要該距離仍支援 FP 模態耦合，整體波前控制便能在多個共振波長下穩定實現。

## 2.2 厚度漸變 DBR 輔助多重共振

除了使用金屬反射鏡構建共振腔外，這邊我們提出一種全新實現多重高 Q 值共振的策略，是利用具厚度漸變的分佈式布拉格反射鏡作為背反射層。透過在  $\text{SiO}_2$  與  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  等高低折射率材料間引入厚度梯度，可以在廣泛波長範圍內建立多個有效共振模式。圖 4(a) 左側顯示了此類 DBR 結構中所形成的腔模概念圖，圖 4(a) 右圖則示意整合電漿子結構後的多重共振超穎介面。由於 DBR 的高反射特性源自多層介面的連續反射與干涉效應，因此設計中需同時兼顧反射強度與駐波形成條件。模擬結果如圖 4(b) 所示，證明在 DBR 的高反射波段內，可清楚辨識出多個高 Q 共振峰。值得一提的是，由於電漿子超穎介面主要藉由電子集體振盪產生，通常伴隨著熱損耗的產生，使得 Q 值通常低於 10。相較於此工作中的超穎介面設計，從圖 4(b) 可以觀察到其 Q 值至少都高於 20，最高甚至超過 100，普遍優於傳統電漿子超穎介面。這主要歸因於 DBR 避免了表面電漿子常見的吸收損耗問題，使得共振峰不再受限於 Q 值低於 10 的瓶頸。此外，可以觀察到當我們引入厚度漸變的分佈式布拉格反射鏡與超穎介面結構整合時，反射光譜從原本的寬頻響應轉變成為具有 15 個高品質因子的共振特徵（橫跨可見至近紅外光譜，約 500 奈米至 1000 奈米），且最低的反射效率還可維持在 60% 左右，與先前利用交錯式超穎原子設計的超穎介面不同，此工作展示的超穎介面其波峰的反射率不會隨著高 Q 值品質因子個數的增加而下降。

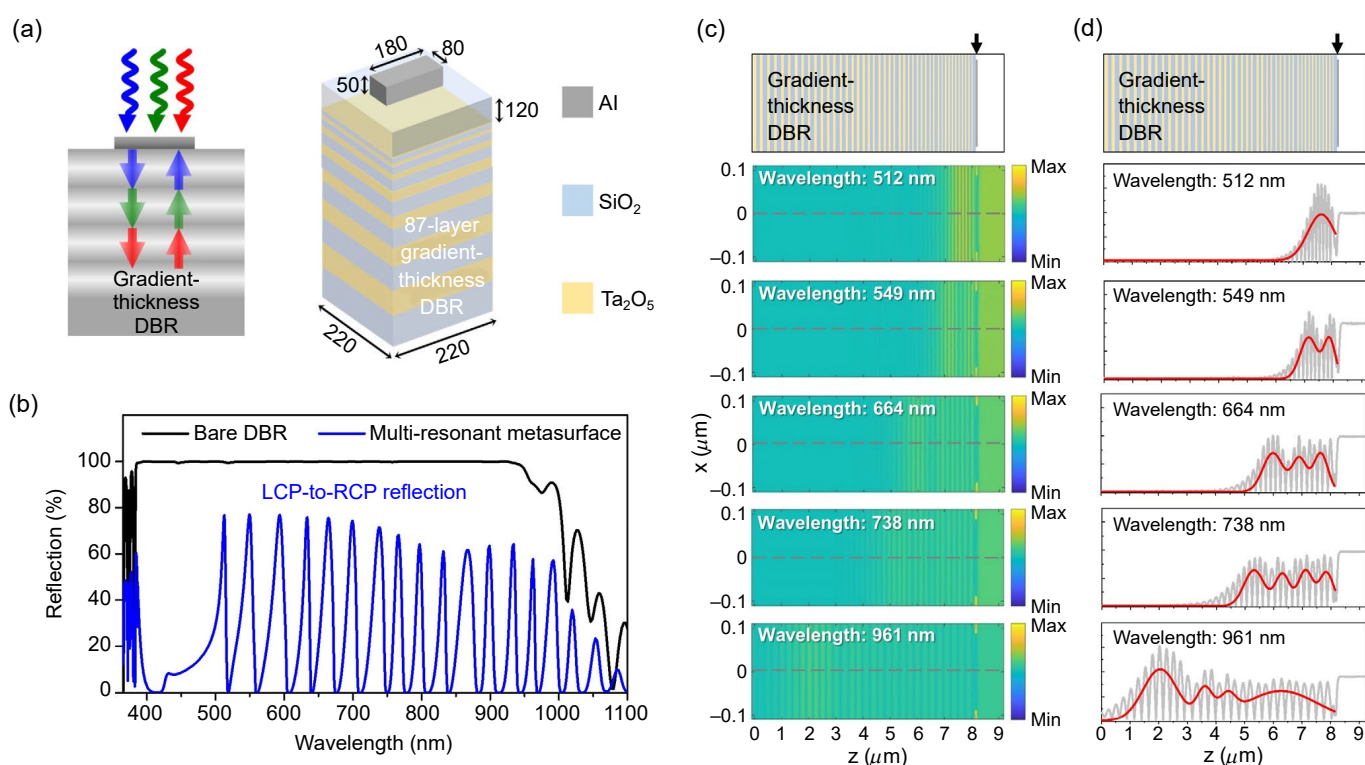


圖 4. (a) 左圖為採用  $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$  交替堆疊並具厚度梯度之分佈式布拉格反射鏡示意圖；右圖為將其結合電漿子超穎原子的多重共振介面結構。(b) 模擬反射光譜。(c) 共振波長下的橫向電場分佈模擬，顯示駐波形貌隨波長不同而改變。(d) 縱向方向場分佈與輪廓強度（灰色曲線）比對，顯示不同波長激發之模態數量與位置變化，呈現高度波長敏感性特徵。<sup>(11)</sup>

為更細緻解析此現象，我們挑選圖 4(b) 中的五個典型共振波長進行電場分佈模擬 (如圖 4(c) 與圖 4(d))。模擬顯示共振模態多呈現明確的駐波結構，且隨著波長增加，電場分佈逐漸向 DBR 深層延伸。這與 DBR 各層厚度由上至下遞增的結構設計密切相關，短波長光多在靠近介電質的上層被反射，因此駐波侷限於上部；長波長則能深入底部激發更完整的模態分佈。這樣的厚度漸變特性不僅影響駐波節點數與分布型態，也使得傳統均質薄膜模型無法準確預測其頻譜行為，需透過數值模擬來輔助理解。此外，由於駐波行為與結構層厚密切相關，因此在此 DBR 系統中，長波長的共振峰反而呈現更高的 Q 值，這與一般 FP 共振腔中常見的趨勢相反。

### 三、多重共振效應與光特性操控

深入了解共振機制後，本節將說明如何針對不同共振波長進行振幅與相位的自由調控，以實現多波長的光波前操控。由於超穎原子本身在此架構中等效為 FP 共振腔中的部分反射鏡，因此其結構幾何尺寸便直接影響了反射率及共振特性。透過微調這些結構的尺寸，可以有效改變各共振波長的反射強度，達到振幅的靈活控制。

為驗證此設計概念，我們設計了兩組具有相同 DBR 反射鏡與介電層厚度、但頂層電漿子結構尺寸不同的多重共振超穎介面，並進行奈米製程與實驗比較。從圖 5(a) 的 SEM 影像可見，兩組結構皆展現高結構均勻性，即使因為製程的不完美使得尺寸上有些微差異，製作品質仍相當穩定。如圖 5(b) 所示，兩組樣品在寬廣光譜範圍內均產生多組高 Q 共振峰，涵蓋可見光與近紅外波段，且實驗結果與模擬高度吻合，無論是轉換效率、共振峰位置或數量皆一致，充分驗證了本架構在各共振波長下均具備穩定的振幅可調能力。此外，由於兩組樣品之間僅有幾何尺寸的差異，因此共振峰在頻譜上的相對位移也能以模擬方式預測，但實驗中觀察到的偏移略大，可能來自樣品製程中材料折射率與厚度的微小變異。這樣的強度差異亦可應用於結構式光學設計，例如設計多組反射效率不同的超穎結構單元，進而產生具二元對比的圖像。圖 5(c) 所示為一例，利用兩組不同效率的高 Q 多重共振超穎結構拼組出雙色 QR code，證實其具備實體化資訊加密與光學標記的應用潛力。圖 5(d) 的模擬結果進一步說明本設計具備穩定的相位調控能力，顯示其在多波段波前調製方面的潛力。為實現這樣的應用，我們將此多重共振設計整合進超穎全像系統中，藉此展示其在光場重建上的實用性。

### 四、多重共振超穎介面於光波前操控

為進一步展現多重共振超穎介面在波前操控以及資訊保護上的實用潛力，接著我們結合其多波長與偏振選擇性的特性，實現具備雙重加密機制的光學全像元件。其設計核心在於，透過兩組具相位梯度的超穎原子陣列，分別作用於左旋與右旋圓偏振光，精確控制幾何相位並在特定偏振條件下轉換為對應的影像訊號，如圖 6(a) 所示。這樣的設計允許我們於同一元件中同時編碼四種偏振圖像，並透過旋轉角度與周期參數控制其偏轉角度，使不同偏振態的影像匯聚於相同觀測角度上。

如圖 6(b) 所示，實驗採用超連續光源搭配可調濾波模組 (acousto-optic tunable filter, AOTF) 選擇工作波長，並以偏振光學元件 (線偏振片 (linear polarizer, LP) 與四分之一波片 (quarter-wave plate, QWP)) 組合控制入射與檢測偏振。設計的全像圖樣在特定偏振與波長條

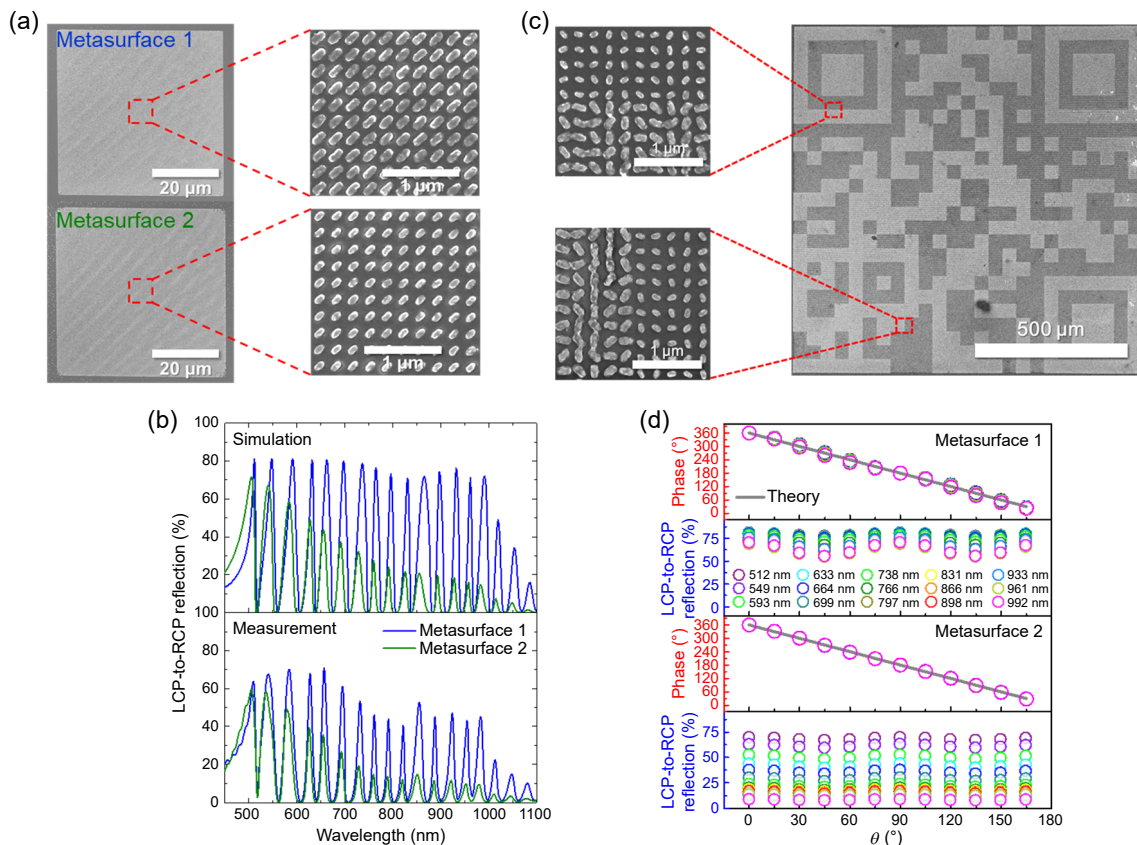


圖 5. (a) 左圖為兩組幾何尺寸不同的多共振超穎結構 SEM 影像。(b) 對應的 LCP-to-RCP 反射光譜。(c) 將這兩組結構依圖樣排列形成一組雙色 QR code 之 SEM 影像。(d) 模擬之相位偏移與反射光強度跟結構旋轉角關係。<sup>(11)</sup>

件下才能被辨識，並透過攝影機紀錄下來。圖 6(c) 示意我們所構建的多色加密架構。當樣品接受寬頻光照射時，所有圖樣疊合於螢幕上，肉眼無法辨識，只有在特定波長與偏振條件下，對應的數字圖樣才會清晰浮現，形成多層級的加密條件。每組影像皆包含五個對應數字，並能在五個波長下產生一致的偏轉角度與解析度，達成穩定的光學資訊映射。圖 6(d) 呈現四種偏振條件與五種波長下對應的影像讀取結果。從固定的觀察角度來看，各波段下的數字影像皆清晰居中，影像尺寸一致，說明此設計在不同條件下皆具備高度準確性與穩定性，展現出結合偏振與波長自由度的光學加密系統在未來資訊防護上的發展潛力。

## 五、結論與未來展望

本研究提出一種創新型多重高品質因子共振超穎介面平台，結合微共振腔機制與厚度漸變型分佈式布拉格反射鏡，成功實現橫跨寬頻波段的精準波前調控能力。相對於傳統  $\lambda/4$  DBR 受限於設計波長附近的狹窄反射帶，本架構透過引入厚度漸變 DBR，在可見至近紅外光譜中產生多達 15 個高 Q 值共振峰，且效率維持高度穩定。此平台的核心優勢，在於能夠有效結合金屬奈米結構的電漿子侷域共振與 DBR 結構內的 FP 模態，使共振不再侷限於材料本身的光學特性或單一幾何結構。這種耦合效應大幅拓展了共振控制的自由度，可在不犧

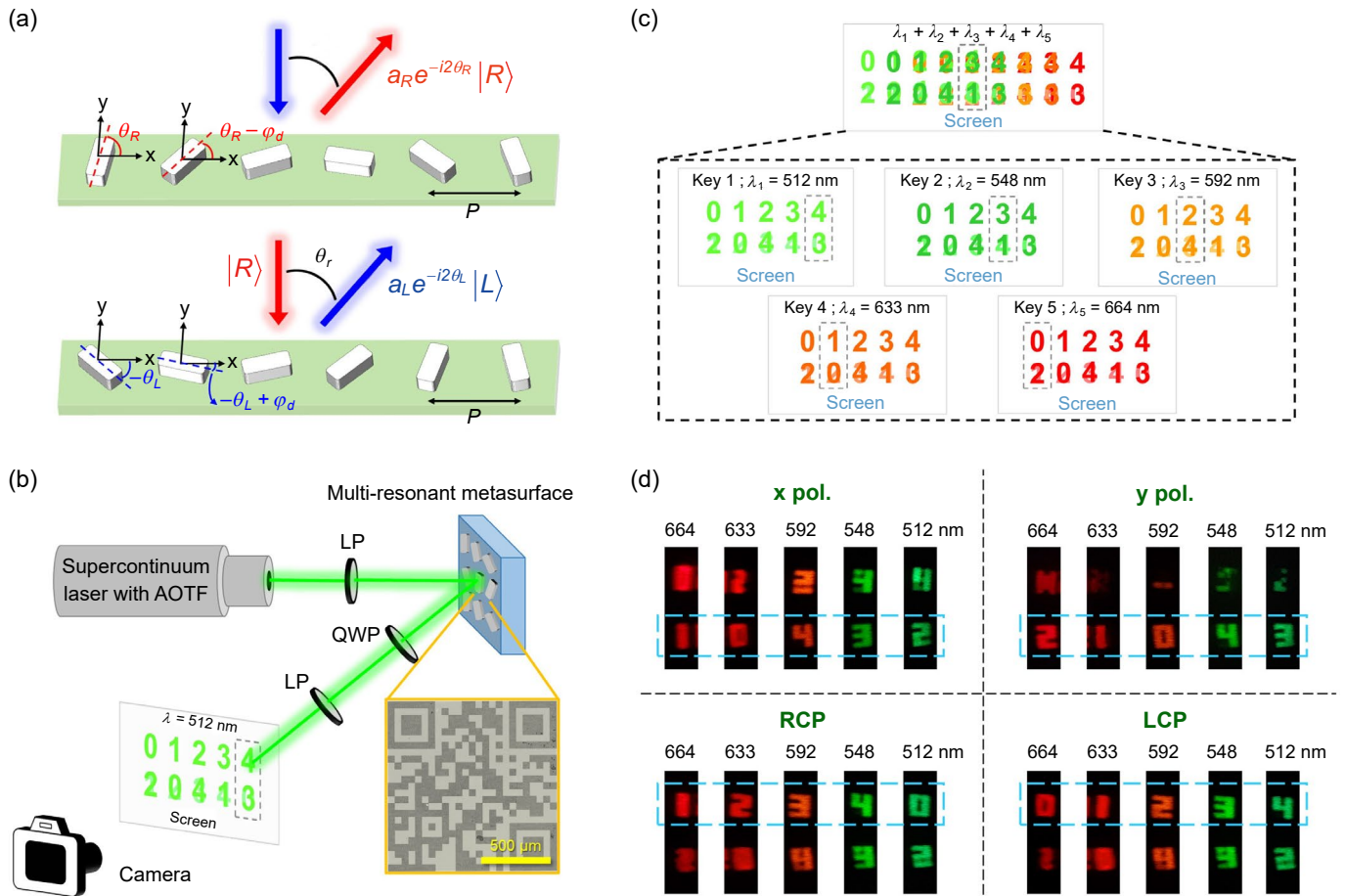


圖 6. (a) 描述左旋與右旋圓偏振光經由偏振態控制結構所產生的相位差異與波前調變原理示意圖。(b) 實驗光路圖。(c) 在五組不同「鑰匙」條件下(不同波長與偏振組合), 所對應的圖像資訊內容示意圖。(d) 在四種偏振條件下對應不同波長所解碼出的圖像資訊。<sup>(11)</sup>

牲工作效率下, 實現高密度、多波長的光強與相位操控。特別是在多色向量全像、結構性色彩與資訊加密等應用中, 皆成功展示此平台在同時處理多波長與偏振資訊上的能力, 突顯其於未來光電與資訊領域的應用潛力。

與傳統 MIM 超穎介面不同, DBR 架構不再受限於固定介電厚度所主導的共振條件, 改以漸變設計精準調控電磁波在不同深度的干涉條件, 讓共振位置具更高的靈活性與設計自由。反之, MIM 結構雖易建模, 但共振分佈難以自由調整, 且高 Q 值共振大多侷限於短波長區域, 限制應用彈性。儘管本研究著重於可見至近紅外範圍, 但整體架構具備高度可調性, 藉由調整 DBR 的反射層與介電層設計, 即可拓展至其他光譜區域。同時, 透過更換更高品質因子的金屬(如銀)或調整介電質間距, 也能進一步提升共振效率與數量。

## 參考文獻

1. YOUNGHWAN YANG, et al., *Light: Science & Applications*, **12**, 152 (2023).
2. SHUQI CHEN, WENWEI LIU, ZHANCHENG LI, HUA CHENG, JIANGUO TIAN, *Advanced Materials*, **32** (3), e1805912 (2020).
3. PHILIPPE LALANNE, PIERRE CHAVEL, *Laser & Photonics Reviews*, (2017).
4. XIA ZHANG, JING LI, JOHN F. DONEGAN, A. LOUISE BRADLEY, *Physical Review Materials*, **4**, 125205 (2020).

5. Amir Hassanfiroozi, Yen Cheng Lu, Pin Chieh Wu, *Advanced Materials*, **36** (46), e2410568 (2024).
6. Yu-Tsung Lin, Amir Hassanfiroozi, Wei-Rou Jiang, Mei-Yi Liao, Wen-Jen Lee and Pin Chieh Wu, *Nanophotonics*, (2022).
7. Thomas Weber *et al.*, *Nature Materials*, **22**, 970 (2023).
8. Elhanan Maguid *et al.*, *Science*, **352** (6290), 1202 (2016).
9. Andrew McClung *et al.*, *Science Advances*, **6** (38), eabc7646 (2020).
10. Ori Avayu, Euclides Almeida, Yehiam Prior, Tal Ellenbogen, *Nature Communications*, **8**, 14992 (2017).
11. Shih-Hsiu Huang *et al.*, *Nature Communications*, **15** (1), 9658 (2024).
12. Chia-Hsiang Lin, Shih-Hsiu Huang, Ting-Hsuan Lin, Pin Chieh Wu, *Nature Communications*, **14**, 6979 (2023).

## 作者簡介

吳品頤為國立臺灣大學應用物理學研究所博士，現為國立成功大學光電科學與工程學系教授。

Pin-Chieh Wu received his Ph.D. in the Graduate Institute of Applied Physics from National Taiwan University. He is currently a Professor in the Department of Photonics at National Cheng Kung University.