

雅努斯超穎介面實現任意偏振態的方向性不對稱全像成像

Directionally Asymmetric Holographic Imaging for Arbitrary Polarization States Using Janus Metasurfaces

張育銓¹、林承億¹、蘇煥騰¹、吳昀倩¹、許智堯¹、張書銘¹、黃耀緯^{1*}Yu-Chuan Chang¹, Chang-Yi Lin¹, Huan-Teng Su¹, Yun-Chien Wu¹, Chih-Yao Hsu¹, Shu-Ming Chang¹, and Yao-Wei Huang^{1*}¹ 國立陽明交通大學光電工程學系¹Department of Photonics, National Yang Ming Chiao Tung University

*E-mail: ywh@nycu.edu.tw

摘要

雅努斯超穎介面已成為實現具方向性不對稱全像成像的重要技術平台。然而，現有設計常面臨多項限制，包括製程複雜、依賴空間多工或垂直堆疊結構、偏振態控制受限，或因顯著的歐姆損耗而難以在可見光波段運作。在本研究中，我們提出一種單層介電質雅努斯超穎介面全像片，採用二氧化鈦超穎原子，使其能在正向與反向照明下同時運作，以克服上述限制。透過結合德曼光柵原理與精確的相位操控，我們的設計可在 532 nm 波長下，針對任意偏振光產生高保真度的全像影像。此方法不僅簡化了製程並降低了損耗，也拓展了全像技術的應用範疇，為微型且多功能的光學技術帶來多元創新的可能性。

關鍵字：任意偏振態；方向性不對稱；雅努斯超穎介面；全像術；超穎光學

Abstract

Janus metasurfaces have emerged as a powerful platform for directionally asymmetric holographic imaging. However, existing designs often suffer from limitations such as complex fabrication processes, reliance on spatial multiplexing or vertical stacking, restricted polarization control, or significant Ohmic losses—particularly preventing operation in the visible spectrum. In this study, we present single-layer dielectric Janus metasurface holograms utilizing TiO₂ meta-atoms, each capable of operating simultaneously for forward and backward illumination, to overcome these obstacles. By incorporating the Damman grating principle and precise phase manipulation, our design generates high-fidelity holographic images for arbitrary polarized light at wavelength of 532 nm. This approach not only achieves simplified fabrication and minimizes losses but also broadens the applicability of holography, paving the way for diverse innovations in compact and versatile optical technologies.

Keywords: Arbitrary Polarization; Directional Asymmetry; Janus Metasurfaces; Holography; Meta-optics

一、前言

「雅努斯 (Janus)」一詞源自古羅馬的雙面神，其同時凝視過去與未來，象徵從相反方向觀察時可呈現不同特性的能力。此種方向性不對稱性已被應用於奈米光子學中，實現多種功能^[1]，包括雅努斯超材料 (Janus metamaterials)^[2]、雅努斯光子晶體 (Janus photonic crystals)^[3]、以及非互易元件^[4]。隨著人們對於在單一介面上、於次波長尺度精確操控光的需求提升，雅努斯超穎介面因而自然發展而生。現有研究顯示，雅努斯超穎介面可實現多種功能，例如透鏡^[5]、全像片^[6]、以及雙頻控制^[7]。然而，多數相關研究仍依賴於工作於微波波段的金屬天線^[5-7]。雖然已透過金與鎂等材料實現可在可見光範圍內對氬氣與氧氣具有響應的電漿子雅努斯超穎介面，但此類系統仍存在顯著的損耗問題^[8]。此外，金屬天線通常僅能作用於單一偏振態，因此需要透過空間多工策略，將不同方向的響應編碼至不同偏振態或子像素中，然而此方法會降低有效截面積並進一步降低效率。

為了解決上述問題，已有研究提出基於矽材料的雅努斯超穎介面，並展現更豐富的功能性^[9]。然而，這類方法通常需要雙層（或垂直堆疊）結構，且仍侷限於中紅外與近紅外波段。其他研究則透過引入石墨烯或二氧化鈮等材料以實現可調性^[10, 11]，或利用非線性材料達成非互易傳輸^[12]，但這些方法多半需要多層垂直堆疊結構。此外，上述空間多工與垂直堆疊策略僅能支援線偏振或圓偏振。相較之下，我們先前的研究提出單層二氧化鈮 (TiO_2) 雅努斯超穎介面，使其能在可見光範圍內支援任意偏振態^[13]。然而，在純單層設計且不依賴空間多工的情況下，實現具方向性不對稱的全像影像生成——亦即從近場到遠場光場操控的重要里程碑——仍尚未被實驗展示。

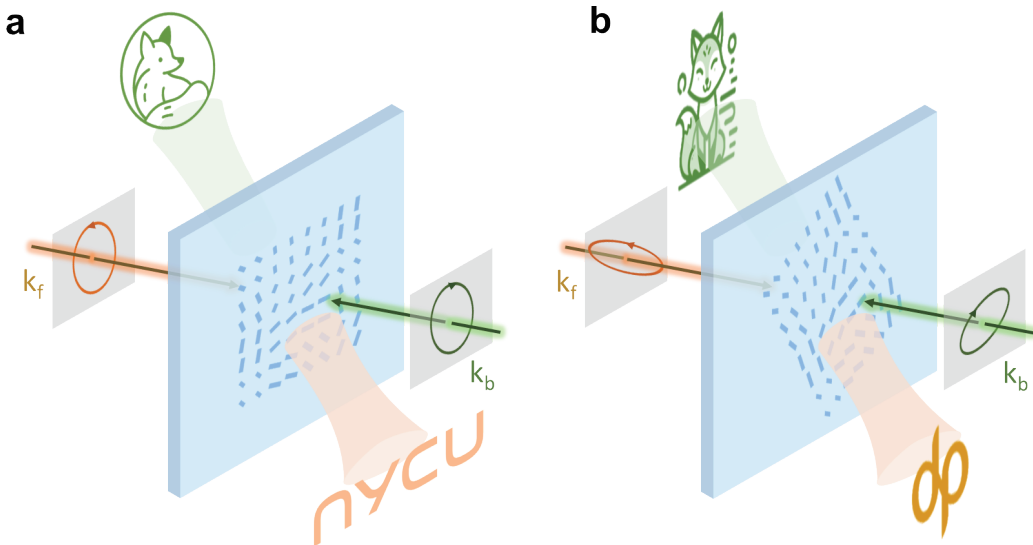


圖 1. 雅努斯超穎介面全像片之示意圖。(a) 針對圓偏振光最佳化之設計。(b) 針對橢圓偏振光最佳化之設計。 k_f 與 k_b 分別表示偏振光向前與向後傳播的方向。

在本研究中，我們提出單層雅努斯超穎介面全像片，可在正向與反向照明下重建不同影像，如圖 1 所示^[14]。我們採用瓊斯矩陣方法，並結合矩形奈米柱中的傳播相位與幾何相位控制，使系統可在任意偏振態下運作，包含線偏振、圓偏振與橢圓偏振。在實驗上，我們展示了兩種雅努斯超穎介面全像片。於圖 1(a) 中，樣品 1 針對左旋圓偏振光設計，在正向入射時重建「nycu」（國立陽明交通大學縮寫），在反向入射時則重建一隻狐狸（陽明交大吉祥物）。於圖 1(b) 中，樣品 2 則針對橢圓偏振光進行優化，在正向入射時產生「dp」（陽明交大光電工程學系縮寫），在反向入射時產生另一個狐狸圖像。兩種超穎介面皆由單層 TiO₂ 奈米柱構成，製作於玻璃基板上，並透過精確調控結構寬度與旋轉角度，使其於可見光波段運作。此研究建立了一套具方向性不對稱多功能性的設計原則，為未來在微型化光學元件中的廣泛應用奠定基礎，包括先進成像、波束整形及各類全像技術，並可延伸至可見光以外的更廣波段範圍。

二、雅努斯超穎介面全像片的局部與全域矩陣

雅努斯超穎介面的功能源自其全域瓊斯矩陣 (global Jones matrix)，而該全域矩陣則由各個超穎原子的局部瓊斯矩陣 (local Jones matrices) 所決定。在設計雅努斯超穎介面全像片時，我們的主要目標是優化這些作為基本單元的超穎原子。此優化過程包含調整其排列、形狀、尺寸與旋轉角度，使來自正向與反向入射的任意偏振光皆能產生預期的全像影像。在本研究中，我們採用矩形奈米柱作為超穎原子，其行為類似雙折射線性波片，其性質可表示為：

$$J = R(-\alpha) \begin{bmatrix} e^{i\varphi_x} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_y} \end{bmatrix} R(\alpha) \quad (1)$$

$$J' = R(-\alpha') \begin{bmatrix} e^{i\varphi_x} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_y} \end{bmatrix} R(\alpha') \quad (2)$$

其中，角分符號 (') 表示反向座標系統^[13, 14]。參數 φ_x 與 φ_y 分別代表入射電場在局部 x 與 y 分量 (E_x 與 E_y) 的相位延遲，而 $R(\alpha)$ 為描述超穎原子旋轉角度 α 的旋轉矩陣。

為建立統一的座標系統，我們考慮正向與反向座標之間的關係，進而推導出雅努斯超穎介面全像片的全域瓊斯矩陣^[13, 14]：

$$J(x, y) = \begin{bmatrix} (e^{i\varphi_f(x, y)} + e^{i\varphi_b(x, y)}) \cos \chi \sin \chi & e^{-i\delta} (e^{i\varphi_f(x, y)} - e^{i\varphi_b(x, y)}) \cos^2 \chi \\ e^{-i\delta} (e^{i\varphi_f(x, y)} - e^{i\varphi_b(x, y)}) \sin^2 \chi & e^{-i2\delta} (e^{i\varphi_f(x, y)} + e^{i\varphi_b(x, y)}) \cos \chi \sin \chi \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中， δ 表示全域電場分量 E_x 與 E_y 之間的相位差，而 $\chi = \tan^{-1}(E_y/E_x)$ ，對應的入射偏振態可表示為 $|\lambda(\chi, \delta)\rangle = [\cos \chi; e^{i\delta} \sin \chi]$ 。 φ_f 與 φ_b 分別對應於正向與反向入射時所期望的全像影像之相位分佈。這些相位分佈是透過電腦生成全像術 (computer-generated holography, CGH) 中的 Gerchberg-Saxton 演算法取得^[15]。

比較全域與局部矩陣可發現一項物理限制，即方程式 (3) 中的非對角元素需相同。此條件使入射光的 χ 被限制為 $\pi/4$ ，對應於 $\pm 45^\circ$ 線偏振、圓偏振以及特定橢圓偏振

態，從而大幅限制可實現的偏振態範圍。

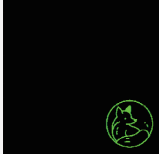
為突破此限制，我們在全域矩陣中引入一個旋轉角 β ，將其轉換為 J_β ，其轉換關係可表示為：

$$J|\lambda(\pi/4, \delta)\rangle = JR(-\beta)R(\beta)|\lambda\rangle = J_\beta|\lambda(\chi_d, \delta_d)\rangle \quad (4)$$

其中 $|\lambda(\chi_d, \delta_d)\rangle$ 表示具有任意 χ_d 與 δ_d 的入射偏振態。旋轉角 β 與偏振角 $\gamma(\chi, \delta) = 0.5 \tan^{-1}(\tan 2\chi \cos \delta)$ 有關，因此可表示為 $\beta = \gamma(\chi, \delta) - \gamma(\pi/4, \delta)$ ，其中 $\gamma(\pi/4, \delta)$ 對應於原先由雅努斯超穎介面所施加的 $\chi = \pi/4$ 限制。

在實驗上，為驗證任意偏振操作能力，我們展示了兩種雅努斯超穎介面全像片，分別在左旋圓偏振與橢圓偏振光下運作。其數學表示分別為 $|\pi/4, \pi/2\rangle$ 與 $|\pi/6, \pi/3\rangle$ 。前者不受 χ 限制，而後者則受到限制，因此需要對後者樣品施加全域旋轉。所需旋轉角為 $\beta = \gamma(\pi/6, \pi/3) - \pi/4 \approx -24.55^\circ$ 。兩個樣品的詳細資訊，包括其操作偏振態與理想重建影像，列於表 1 中。

表 1. 兩種雅努斯超穎介面全像片及其對應的目標偏振態與重建影像。

	$ \lambda(\chi, \delta)\rangle$	正向影像	反向影像
樣品 1	$ \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}\rangle$		
樣品 2	$ \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{3}\rangle$		

三、設計與製作

我們選用以 TiO_2 為材料的矩形超穎原子，其高度 (h) 為 600 nm，基礎週期 (p) 為 480 nm，並排列於熔融石英基板上的方形晶格中，如圖 2(a, b) 所示。透過結合傳播相位與幾何相位的理論，我們調整每個超穎原子的寬度 (W_x 與 W_y) 與旋轉角度 (α)，以實現所需的相位延遲與波片延遲，同時根據相位對應寬度的查找表 (圖 3)，在 532 nm 波長下維持高透射率。最終設計的超穎介面全像片由 550×550 個像素組成，每個像素皆由這些超穎原子的陣列所構成。

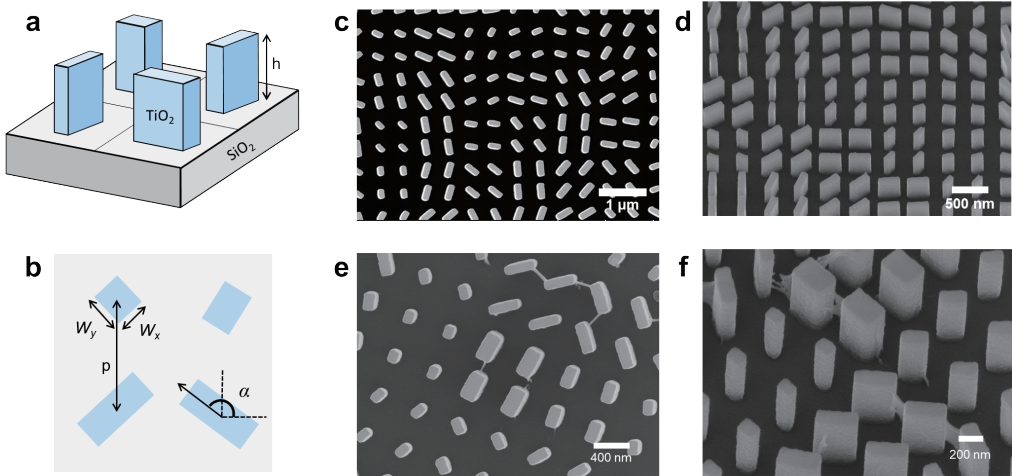


圖 2. 雅努斯超穎介面全像片之設計與製作。(a, b) TiO_2 矩形超穎原子之示意圖，排列於玻璃基板上的方形晶格中，其高度固定為 $h = 600 \text{ nm}$ ，週期為 $p = 480 \text{ nm}$ 。超穎原子的寬度與旋轉角分別以 W_x 、 W_y 與 α 表示。(c, d) 樣品 1，針對偏振態 $(\chi, \delta) = (\pi/4, \pi/2)$ 的雅努斯超穎介面全像片局部之 SEM 影像。(e, f) 樣品 2，針對偏振態 $(\chi, \delta) = (\pi/6, \pi/3)$ 的雅努斯超穎介面全像片局部之 SEM 影像。左側影像為俯視圖，右側影像為側視圖；側視 SEM 影像係以約 30° 傾角量測取得。

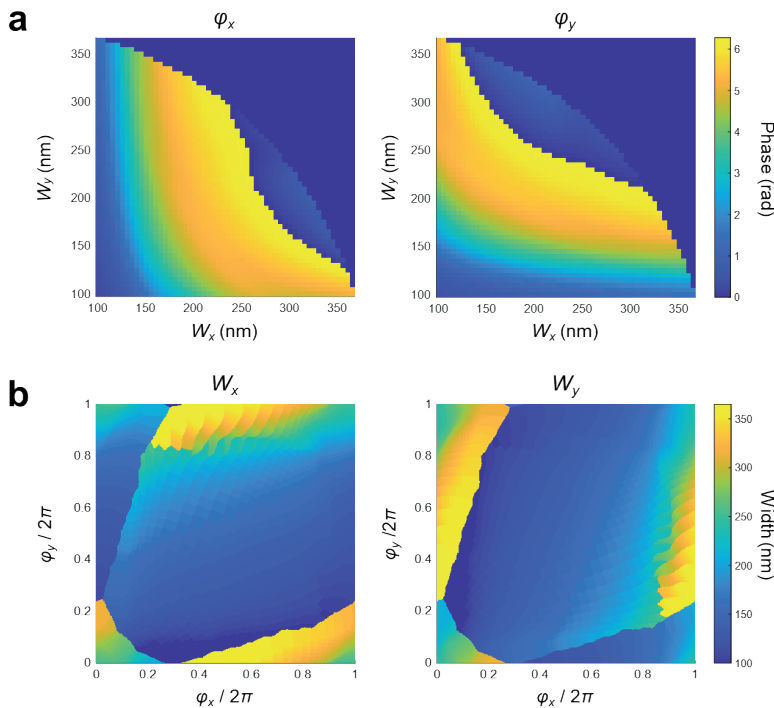


圖 3. (a) 超穎原子的複數透射特性資料庫。其中， ϕ_x 與 ϕ_y 分別表示光沿超穎原子 x 軸與 y 軸傳播時所產生的相位變化。(b) 由資料庫建立之相位對應寬度查找表。

為確保量測結果的可靠性，每個雅努斯超穎介面全像片的像素皆包含 4 個相同的超穎原子，使有效像素尺寸提升為 $2p = 0.96 \mu\text{m}$ ，並形成尺寸為 $528 \mu\text{m} \times 528 \mu\text{m}$ 的單一版面全像片，如圖 4(a) 所示。零階繞射影像範圍，即遠場在 x 或 y 方向上的整體視野 (field of view, FOV)，由像素尺寸所決定，可由公式 $\pm \sin^{-1}[\lambda/(4p)]$ 計算得到 $\pm 16.1^\circ$ ，對應的總角度範圍約為 32.2° (圖 4(b))。然而，實際可使用的 FOV 亦取決於理想設計影像的空間分佈範圍。例如，樣品 1 的正向「nycu」影像在視場中約佔 19.84° 。因此，雖然像素尺寸決定了整體 FOV，雅努斯超穎介面全像片在近場的總尺寸則主導遠場的角解析度 (即每個遠場像素所對應的角度大小)。

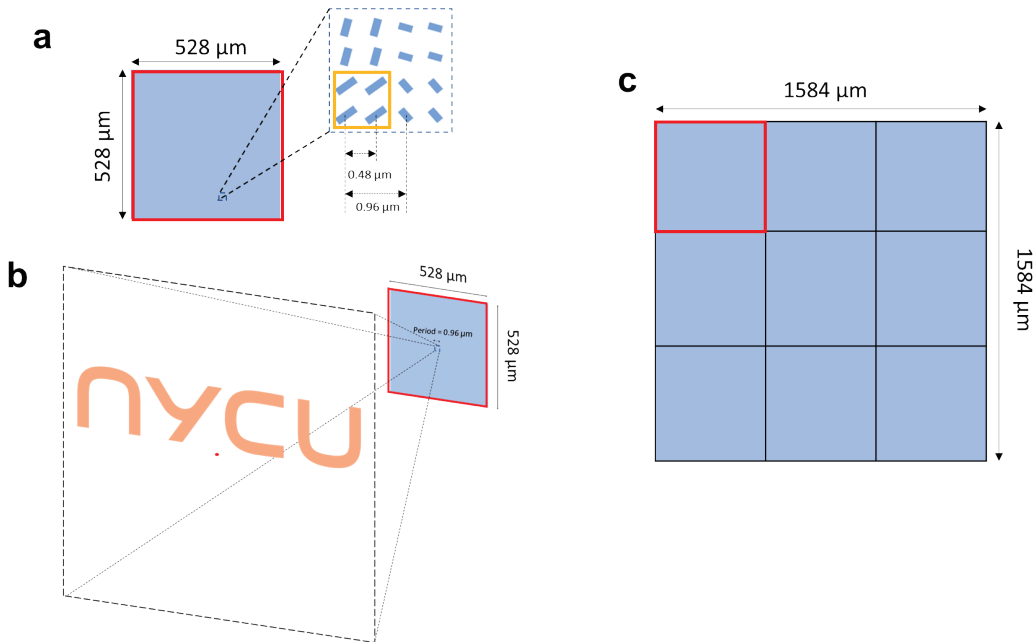


圖 4. 基於德曼光柵概念之雅努斯超穎介面全像片示意圖。(a) 單一版面之雅努斯超穎介面全像片，尺寸為 $528 \mu\text{m} \times 528 \mu\text{m}$ ，每個像素 (黃色框) 由四個相同的超穎原子構成。(b) 雅努斯超穎介面全像片之正向全像成像示意圖。影像的繞射角由單一像素 (黃色框) 決定，而解析度則由整體雅努斯超穎介面全像片的尺寸所控制。紅色光點用以模擬零階繞射。(c) 由 3×3 個如 (a) 所示之相同單一版面所組成的雅努斯超穎介面全像片示意圖，以產生高保真度的全像影像。

在全像成像中，「保真度」(fidelity) 是指重建影像再現其目標影像的準確程度。達成高保真度對於保留細節並減少影像失真至關重要。然而，在全像技術中影響保真度的一個主要因素為散斑雜訊 (speckle noise)，其源自雷射光源的高度相干性。散斑表現為顆粒狀的干涉圖樣，會降低重建影像的清晰度與均勻性。一種同時提升保真度並抑制散斑的有效策略是導入德曼光柵 (Dammann grating)^[15]。在本研究中，所設計的超穎介面全像片可產生多個均勻的繞射光束，進而提升整體全像重建的均勻性。

其理論推導如下。設計之全像片在近場的分佈為 $u(x, y) = e^{i\phi(x, y)}$ ，其對應的遠場

分佈 $U(k_x, k_y)$ 透過 CGH 取得。為將德曼光柵引入全像設計中，我們在二維空間中對此近場分佈進行週期性鋪排。在實作上，修正後的近場分佈 $u'(x, y)$ 可表示為：

$$u'(x, y) = u(x, y) \otimes \left[\text{comb}\left(\frac{x}{W}, \frac{y}{W}\right) \text{rect}\left(\frac{x}{NW}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{NW}\right) \right] \quad (5)$$

其中 W 表示 $u(x, y)$ 的空間範圍 ($528 \mu\text{m}$)，而 N 表示在 $N \times N$ 排列中的週期鋪排數量。因此，修正後的遠場分佈 $U'(k_x, k_y)$ 可寫為：

$$U'(k_x, k_y) \propto U(k_x, k_y) \{ \text{comb}(Wk_x, Wk_y) \otimes [\text{sinc}(NWk_x) \text{sinc}(NWk_y)] \} \quad (6)$$

在本研究中，我們選擇 $N = 3$ ，對應的樣品尺寸為 $1584 \mu\text{m} \times 1584 \mu\text{m}$ ，如圖 4(c) 所示。新的全像影像 $|U'(k_x, k_y)|^2$ 可視為原始全像影像 $|U(k_x, k_y)|^2$ 乘上一個點陣結構，其中每個相鄰點在 k 空間中相隔 3 個像素。透過此設計，我們在提升全像影像保真度的同時，有效抑制了散斑雜訊。

我們的製程流程依循精確的步驟進行。首先，在熔融石英基板上旋塗一層電子束光阻 (ZEP 520A, Zeon)，以形成厚度約 600 nm 的均勻光阻層。接著，在光阻上方再旋塗一層薄的導電高分子膜 (ESPACER 300Z, Resonac)，以利後續電子束微影製程進行圖案曝光。隨後，我們利用原子層沉積沉積 TiO_2 薄膜，其厚度設計至少為超穎原子最大寬度的一半，以避免產生空洞結構。 TiO_2 薄膜的厚度與折射率則透過橢圓偏光儀量測確認，以確保其符合設計需求。最後，我們使用高密度電漿反應式離子蝕刻系統去除光阻上方多餘的 TiO_2 ，並將樣品浸泡於去除劑 (Remover PG, MicroChem) 中以去除殘留光阻。

透過此製程，我們成功製作出兩種針對不同偏振態設計的全像片，如圖 2(c-f) 所示。在圖 2(c) 與 圖 2(e) 中，每個雅努斯超穎介面全像片的像素由 2×2 個矩形超穎原子所組成，並排列於方形晶格中。圖 2(d) 與 圖 2(f) 顯示其側壁近乎垂直，結構高度約為 613 nm ，與設計值相當一致。

值得注意的是，針對橢圓偏振設計的雅努斯超穎介面全像片 (樣品 2，圖 2(e)) 在俯視掃描電子顯微鏡 (scanning electron microscope, SEM) 影像中可觀察到明顯的整體旋轉角度。此全域旋轉是源自於在全域矩陣中引入額外旋轉角 β 的設計結果，其數值約為 -24.55° 。

四、光學特性

為了預測並驗證我們所設計之雅努斯超穎介面全像片的重建影像，我們利用 CGH 針對不同偏振態與入射方向數值生成其相位分佈，並將其導入遠場繞射分析，即快速傅立葉轉換 (fast Fourier transform, FFT)。其模擬結果如圖 5(a, c) 所示。

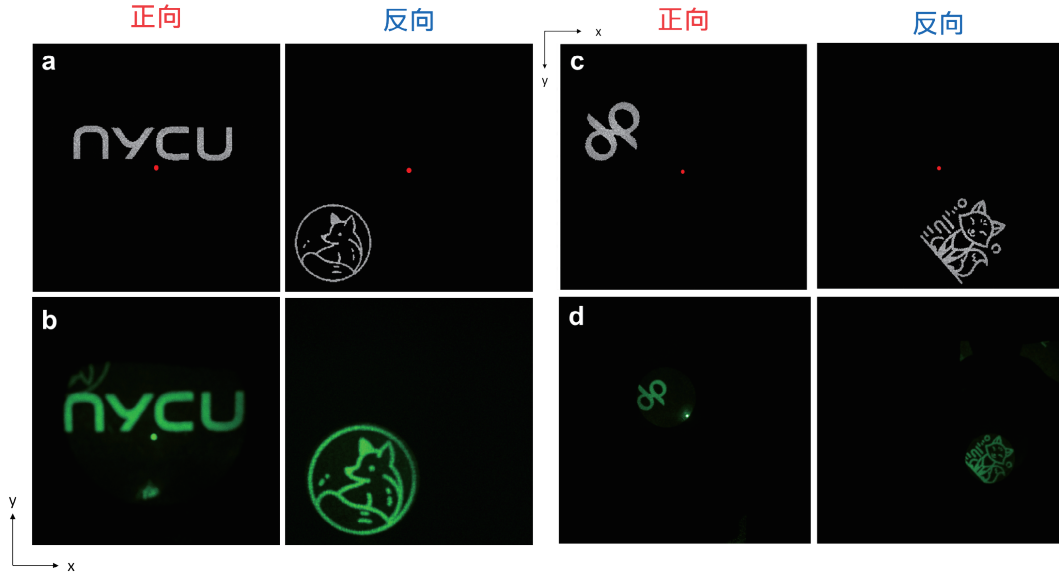


圖 5. 雅努斯超穎介面全像片之全像成像結果。(a, b) 樣品 1 的模擬 (a) 與實驗量測 (b) 之重建影像。(c, d) 樣品 2 的模擬 (c) 與實驗量測 (d) 之重建影像。

在光學量測方面，我們建構了一套實驗系統以驗證所設計之雅努斯超穎介面全像片的全像成像性能。入射光源為波長 532 nm 的單模雷射。偏振器與分析器皆由線性偏振片與四分之一波片組成，其中偏振器用於控制入射偏振態，而分析器則用於分析輸出偏振態。量測結果如圖 5(b, d) 所示。我們進一步評估圖 5(b) 中重建之「nycu」影像的水平方向 FOV，其值約為 20.84° ，與理論預測的 19.85° 相當一致。

比較模擬與實驗之全像影像可知，在模擬結果中標示於中心的紅色光點代表零階繞射，其對應於實驗影像中心觀察到的明亮綠色光點。整體而言，實驗結果與模擬結果高度一致，呈現出良好的成像品質，且未觀察到明顯的散斑雜訊。此保真度的提升可歸因於德曼光柵的引入，其有效提升了影像的對比度與均勻性。儘管樣品 1 與樣品 2 之間存在座標差異，這是源自於設計中在 $-y$ 方向採用鏡像排列之超穎原子配置所致，實驗結果仍展現出高度穩健性，並與模擬預測結果良好吻合。

為量化重建全像影像的整體品質，我們採用兩種互補指標：散斑對比 (speckle contrast) 與成像對比 (imaging contrast) ^[16]，分別反映影像品質的不同面向。散斑對比定義為 $C = \sigma/I_b$ ，其中 I_b 與 σ 分別為選定亮區內影像強度的平均值與其標準差。此指標用於量化散斑雜訊程度；較低的 C 值代表較低的散斑效應，通常當 $C < 0.30$ 時可視為有效抑制散斑。在本研究中，「nycu」圖樣亮區的散斑對比平均約為 0.39，顯示散斑雜訊已受到良好控制。

另一方面，成像對比則用於評估全像特徵相對於背景的可辨識度，其定義為 $(I_b - I_d)/(I_b + I_d)$ ，其中 I_d 為選定暗區內的平均影像強度。較高的數值代表較佳的圖樣辨識能力。在本研究中，成像對比平均約為 0.87，顯示全像圖樣與背景之間具有高度可區分性，整體影像品質優異。

五、結果與討論

我們已成功於可見光範圍內，利用單層 TiO_2 雅努斯超穎介面全像片實現具方向性不對稱的全像成像。透過對局部與全域瓊斯矩陣的理論分析，並在樣品中引入全域旋轉，我們的設計原則克服了空間多工與垂直堆疊的限制，為任意入射偏振態提供更高的設計彈性。

此外，我們將德曼光柵理論導入全像設計中，並採用每個像素由四個相同超穎原子組成的配置策略，使得全像影像在可觀測視場內具有高保真度，且散斑雜訊顯著降低。模擬設計與實驗量測之間的高度一致性進一步驗證了本方法的可靠性與準確性。儘管量測影像在座標空間中呈現翻轉現象，其整體成像品質與保真度仍表現優異。

這些成果所展現的能力已超越傳統全像應用的範疇。本研究提出之雅努斯超穎介面設計原則不僅可應用於全像成像，亦已於先前研究中驗證可用於光的軌道角動量 (orbital angular momentum, OAM) 生成，顯示其廣泛潛力。此外，若進一步結合可調式材料、非局域共振^[17]，或矩陣傅立葉光學 (matrix Fourier optics)^[18]，將可進一步拓展其功能性，實現更具動態性、非互易特性或多極偏振控制的光學行為。我們預期此具高度彈性的技術平台，將推動多種光學技術的創新發展，特別是在需要方向性不對稱光控制的應用場景中，例如擴增實境的光學合成器^[19]、深度感測之收發模組^[20, 21]，以及雷射系統中的腔模調控^[22]。

本研究原文發表於《Advanced Optical Materials》^[14]，亦獲選為該期刊背封面與封面故事^[23]。

誌謝

本研究獲得國家科學及技術委員會計畫補助（計畫編號：113-2112-M-A49-025 與 114-2112-M-A49-007）。作者亦感謝教育部玉山青年學者計畫之支持。本研究部分於國立陽明交通大學奈米設施中心、奈米科學與技術中心，以及台灣半導體研究中心完成。

參考文獻

- [1] J.-Y. Sui, S.-Y. Liao, J.-H. Zou, Q. Chen, Z. Tang, X. Li, C. Yang, C.-M. Guo, Y.-R. Wu, R.-Y. Dong, J. Xu, and H.-F. Zhang, *Results in Physics*, vol. 61, pp. 107795, 2024.
- [2] Z. Zhang, J. E. Raymond, J. Lahann, and A. Pena-Francesch, *Advanced Materials*, vol. 36, pp. 2406149, 2024.
- [3] Y. Chen, Z. Chen, and J. Wei, *ACS Applied Nano Materials*, vol. 6, pp. 14702–14709, 2023.
- [4] E. A. Kittlaus, W. M. Jones, P. T. Rakich, N. T. Otterstrom, R. E. Muller, and M. Rais-Zadeh, *Nature Photonics*, vol. 15, pp. 43–52, 2021.
- [5] K. Chen, G. Ding, G. Hu, Z. Jin, J. Zhao, Y. Feng, T. Jiang, A. Alù, and C.-W. Qiu, *Advanced Materials*, vol. 32, pp. 1906352, 2020.

- [6] W. Yang, K. Chen, S. Dong, S. Wang, K. Qu, T. Jiang, J. Zhao, and Y. Feng, *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 15, pp. 27380–27390, 2023.
- [7] J. Ding, N. Xu, H. Ren, Y. Lin, W. Zhang, and H. Zhang, *Scientific Reports*, vol. 6, pp. 34020, 2016.
- [8] P. Yu, J. Li, S. Zhang, Z. Jin, G. Schütz, C.-W. Qiu, M. Hirscher, and N. Liu, *Nano Letters*, vol. 18, pp. 4584–4589, 2018.
- [9] J. Bang, Y. Kim, T. Choi, C. Kim, H. Son, S.-J. Kim, Y. Jeong, and B. Lee, *ACS Photonics*, vol. 12, pp. 1666–1675, 2025.
- [10] Y. Wu, S.-Y. Liao, and H.-F. Zhang, *Diamond and Related Materials*, vol. 152, pp. 111878, 2025.
- [11] B. Chen, S. Yang, J. Chen, J. Wu, K. Chen, W. Li, Y. Tan, Z. Wang, H. Qiu, K. Fan, C. Zhang, H. Wang, Y. Feng, Y. He, B. Jin, X. Wu, J. Chen, and P. Wu, *Light: Science & Applications*, vol. 12, pp. 136, 2023.
- [12] J. Xu, Z. Tang, J.-Y. Sui, and H.-F. Zhang, *Optics & Laser Technology*, vol. 170, pp. 110242, 2024.
- [13] C.-Y. Lin, J.-H. Huang, H.-T. Su, S.-M. Chang, Y.-C. Wu, and Y.-W. Huang, *Advanced Optical Materials*, vol. 12, pp. 2401335, 2024.
- [14] Y.-C. Chang, C.-Y. Lin, H.-T. Su, Y.-C. Wu, C.-Y. Hsu, S.-M. Chang, and Y.-W. Huang, *Advanced Optical Materials*, vol. 13, pp. e01546, 2025.
- [15] G. Zheng, H. Mühlenbernd, M. Kenney, G. Li, T. Zentgraf, and S. Zhang, *Nature Nanotechnology*, vol. 10, pp. 308–312, 2015.
- [16] J. W. Goodman, *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* (Roberts and Company Publishers, 2007).
- [17] H.-T. Su, L.-Y. Wang, C.-Y. Hsu, Y.-C. Wu, C.-Y. Lin, S.-M. Chang, and Y.-W. Huang, *Nano Letters*, vol. 24, pp. 10055–10061, 2024.
- [18] Y.-T. Liu, Y.-C. Wu, C.-Y. Lin, H.-T. Su, Y.-Q. Zhou, and Y.-W. Huang, *Advanced Optical Materials*, vol. 13, pp. 2500872, 2025.
- [19] C.-Y. Hsu, H.-T. Su, W.-T. Kuo, W.-Z. Li, Y.-T. Liu, Y.-C. Chang, and Y.-W. Huang, *Nano Letters*, vol. 26, pp. 4080–4088, 2026.
- [20] W.-C. Hsu, C.-H. Chang, Y.-H. Hong, H.-C. Kuo, and Y.-W. Huang, *Nano Letters*, vol. 24, pp. 1808–1815, 2024.
- [21] W.-C. Hsu, W.-C. Miao, Y.-H. Hong, H.-C. Kuo, and Y.-W. Huang, *Nano Letters*, vol. 25, pp. 11382–11390, 2025.
- [22] H. Sroor, Y.-W. Huang, B. Sephton, D. Naidoo, A. Vallés, V. Ginis, C.-W. Qiu, A. Ambrosio, F. Capasso, and A. Forbes, *Nature Photonics*, vol. 14, pp. 498–503, 2020.
- [23] Y.-C. Chang, C.-Y. Lin, H.-T. Su, Y.-C. Wu, C.-Y. Hsu, S.-M. Chang, and Y.-W. Huang, *Advanced Optical Materials*, vol. 13, pp. e70564, 2025.