

以介電質雅努斯超穎介面產生方向性不對稱軌道角動量

Asymmetric OAM Generation via Dielectric Janus Metasurfaces

黃耀緯

Yao-Wei Huang

雅努斯 (Janus) 超穎介面可根據入射方向靈活操控光場，已廣泛應用於從微波到中紅外波段的研究。然而，過往設計多依賴空間多工或垂直堆疊，導致製程複雜；此外，金屬型雅努斯超穎介面因材料特性，在可見光波段中存在顯著的歐姆損耗。本研究，我們實驗展示了以二氧化鈦製作而成的單層雅努斯超穎介面，具備任意偏振控制能力，並在自旋與軌道角動量上展現方向性不對稱的功能。我們提出一種專為雅努斯超穎介面設計的新型瓊斯矩陣公式，成功在 532 奈米波長下，依照入射方向，高效率地產生兩種不對稱且具高純度的漩渦光束軌道角動量狀態。此創新實現了微型化且多功能的相位操控，可應用於雷射與光學合光器等領域，拓展其在各式應用場景中的潛力。

Janus metasurfaces, capable of versatile light manipulation depending on the direction of incidence, have been investigated from the microwave to the mid-infrared spectrum. However, previous designs often relied on spatial multiplexing or vertical stacking, leading to complex fabrication processes. Metallic Janus metasurfaces, due to their inherent material properties, also suffer from significant Ohmic losses in the visible range. In this work, we experimentally demonstrate single-layer TiO_2 -based Janus metasurfaces with arbitrary polarization control, exhibiting directionally asymmetric functionalities in both spin and orbital angular momentum (OAM). We introduce a novel Jones matrix formulation specifically adapted for Janus metasurfaces, enabling the efficient generation of two distinct, high-purity OAM states of vortex beams at a wavelength of 532 nm, depending on the direction of incidence. This advancement enables compact and flexible phase manipulation, supporting applications such as lasers and optical combiners, and broadening the potential of metasurface technologies across diverse optical platforms.

一、簡介

帶有軌道角動量 (orbital angular momentum, OAM) 的漩渦光束，其特徵為螺旋狀波前，其方位相位為 $\exp(im\phi)$ ，其中 m 為量子數 (可為任意整數)， ϕ 為光束橫截面中的方位角

(¹)。這種獨特的波前特性在量子資訊(²)、光通訊(³)、顯微技術(⁴)、漩渦雷射技術(⁵)等領域發揮了重要貢獻並被廣泛應用。目前已有多種方法用於產生漩渦光束，例如螺旋相位片(⁶)、q-plate(^{7, 8})與 J-plate(^{9, 10})等。自旋角動量 (spin angular momentum, SAM) 與軌道角動量之間的轉換通常展現出方向性對稱 (即正反方向具有相同量子數) 或方向性反對稱 (即正反方向具有相反符號的量子數) 特性，分別對應於 Pancharatnam-Berry 幾何相位與傳播相位的調控機制。例如在 q-plate 中，雙折射單元結構沿著方位角逆時針排列，即便從相反方向觀察，其排列方向仍保持逆時針，因此會產生相同的 (對稱) OAM 狀態。在傳播相位型的元件 (如螺旋相位片) 中，結構會呈現從另一側看起來厚度 (或奈米柱寬度) 變化相反的行為，導致產生相反的 (反對稱) OAM 狀態。J-plate 則結合了幾何相位與傳播相位的混合機制，可針對任意兩個正交自旋態產生不具對稱或反對稱關係的非對稱 OAM 狀態(^{9, 10})，但其功能目前僅限於單向傳輸。

過去在微波波段已有以空間多工方式實現金屬型雅努斯超穎介面的成功案例(^{11, 12})，但金屬材料在可見光至近紅外甚至紫外波段中普遍存在高吸收與強反射等問題，這些均源自其本徵的光學與電性特性。此外，中紅外波段亦有報導利用雙層矽基結構製作雅努斯超穎介面，但其製程相當複雜(¹³)。上述報導的雅努斯超穎介面主要僅針對線偏振(¹¹)或圓偏振光(^{12, 13})運作，尚未見能從任意自旋態產生方向性不對稱 OAM 的研究。

在本研究中(¹⁴)，我們展示了單層介電質雅努斯超穎介面，在可見光波段下具備產生方向性不對稱角動量的能力。我們以數值模擬清楚說明了光從正向 (+z 方向) 與反向 (-z 方向) 入射時，在各自座標系下所呈現的功能。與以往僅針對同一方向導出的超穎介面函數不同(¹⁵)，我們所推導的理論框架可實現雙向光傳播下的不同 OAM 狀態，賦予相位控制上的更多自由度。透過我們提出的座標轉換方式，能有效整合幾何相位與傳播相位調控，實現在雙面皆可產生高品質 OAM 光束。本研究所設計的第一個雅努斯超穎介面 (Janus-1) 示意圖如圖 1 所示。從雅努斯超穎介面兩側分別產生軌道角動量為 1 與 5 的漩渦光束，代表在各自座標系下，以左旋圓偏振 (left-handed circular polarization, LCP) 光正向與反向入射的結果。值得注意的是，入射光的自旋態不需限於圓偏振光，也可為任意橢圓偏振態，這一點我們也在其他設計 (Janus-2 與 Janus-3) 中進一步展示。

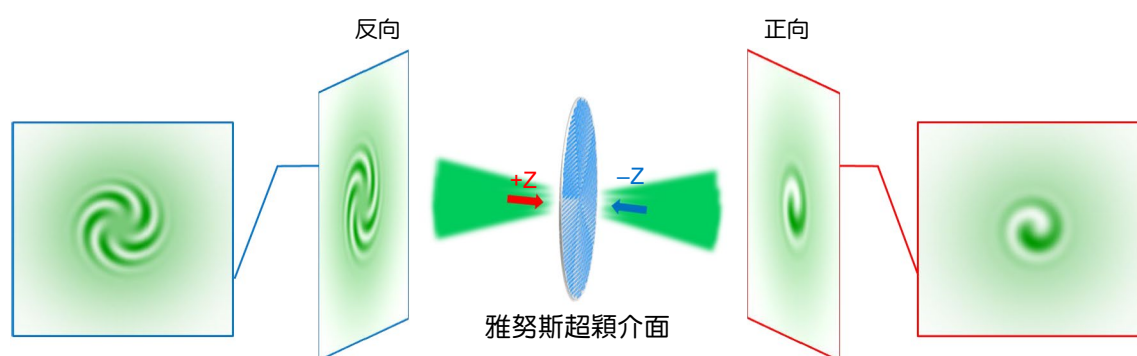


圖 1. 設計於 532 奈米波長下運作的雅努斯超穎介面示意圖。當偏振光從不同方向入射至該超穎介面時，會產生不同的軌道角動量 (OAM) 狀態。圖中兩側的干涉圖樣呈現了軌道角動量狀態為 1 與 5 時的相位分佈。

二、雅努斯超穎介面的瓊斯矩陣計算

如眾所皆知，矩形型單元的複數透射行為可透過瓊斯矩陣 (Jones matrix) 描述，類似於傳統線性雙折射波片的形式⁽¹⁵⁾。然而，當光從正向與反向入射時，對應的超穎介面在局部矩陣上存在差異，導致單元結構所施加的相位亦不同，其表達式如下：

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

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

其中， φ_x 與 φ_y 分別為偏振光沿著超穎單元的 x 軸與 y 軸傳播時所累積的相位延遲， α 與 α' 為在各自座標系下所定義的旋轉角度，而撇號 (') 則用來表示正向與反向座標系之間的差異。

現在，我們期望實現一種單層超穎介面，當相同的任意偏振光從正向與反向入射時，能產生不對稱的功能。為此，我們設計了能夠在兩側入射下分別賦予軌道角動量態為 m 與 n' 的超穎介面。在任意位置 (x, y) 處，該超穎介面的全域矩陣作用可表示為：

$$J(x, y) |\lambda\rangle = e^{im\phi(x, y)} |\lambda\rangle^* \quad (2a)$$

$$J(x, y) |\lambda\rangle' = e^{in'\phi(x, y)} |\lambda\rangle'^* \quad (2b)$$

此處的星號 (*) 表示電場的複數共軛， $\phi(x, y)$ 則為超穎介面上單元結構所對應的位置方位角。本徵偏振態 $|\lambda\rangle$ 表示為 $[\cos\chi; \exp(i\delta) \sin\chi]$ ，亦可記作 $|\lambda(\chi, \delta)\rangle$ 或簡記為 $|\chi, \delta\rangle$ ，其中 χ 為偏振光的橢圓率 (ellipticity)， δ 為相位延遲。根據座標轉換，我們可依據上述兩式推導出雅努斯超穎介面的函數 $J(x, y)$ ，其表達式如下：

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

此矩陣已轉換至正向座標系，以利計算。在單層雅努斯超穎介面中，要求超穎介面上每一位置的全域矩陣需符合式 (1) 中推導的局部矩陣條件。該條件要求全域矩陣的兩個非對角元素必須相等⁽¹⁶⁾。在此條件下，我們發現入射光的偏振態受到物理限制，需滿足 $\cos^2\chi = \sin^2\chi$ 。這樣的結果進一步說明，我們所設計的雅努斯超穎介面，其本徵偏振態必須滿足 $\chi = \pm\pi/4$ ，而相位延遲 δ 則可為任意實數，作為設計上的自由度。然而，這項限制使得該雅努斯超穎介面僅能對應特定幾種偏振態運作，嚴重限制了其實際應用範圍。為了打破這項侷限，我們進一步引入額外的設計自由度，透過考慮整體全域矩陣的旋轉角度進行優化。當全域矩陣以角度 β 進行旋轉時，其對應的本徵偏振態也會隨之轉換，從而導出新的偏振狀態。此過程可推導如下：

$$J|\lambda\rangle = J\left|\frac{\pi}{4}, \delta\right\rangle = JR(-\beta)R(\beta)\left|\frac{\pi}{4}, \delta\right\rangle = J_{\beta}|\chi_d, \delta_d\rangle \quad (4)$$

其中， $|\pi/4, \delta\rangle$ 表示原始偏振態，受限於 $\chi = \pi/4$ ； $R(\beta)$ 為旋轉矩陣， $J_{\beta} = J_R(-\beta)$ 為旋轉後的全域矩陣；而 $|\chi_d, \delta_d\rangle = R(\beta)|\pi/4, \delta\rangle$ 則為目標設計的偏振態，其中 χ_d 與 δ_d 對應任意的偏振態參數。因此，透過此方法，任意偏振態皆可實現正向與反向入射所對應的不同 OAM 狀態，成功展現我們所設計的雅努斯超穎介面在方向性相位控制上的高靈活性。

三、超穎原子與奈米製程

在本研究的設計中，超穎原子排列成六方晶格結構，每個晶格的週期為 500 奈米，如圖 2(a) 所示。原則上，晶格型式與週期的選擇並無唯一標準；我們採用此配置，是基於該類超穎原子在工作波長 532 奈米下展現較高的偏振轉換效率。我們選用高度固定為 600 奈米的矩形 TiO_2 超穎原子，排列於石英基板上。每個單元的相位延遲參數 φ_x 、 φ_y ，以及局部旋轉角 α ，必須滿足式 (3) 中所描述的全域矩陣，並依據文獻^(9, 10) 中的方法進行設計。此外，在 Janus-3 中的每個單元額外引入全域旋轉角 β ，以提供額外的偏振控制自由度。至於每個超穎原子的寬度參數 (W_x , W_y)，則依據我們建立的相位對應寬度查詢表進行設計，以實現在 532 奈米波長下所需的相位延遲。

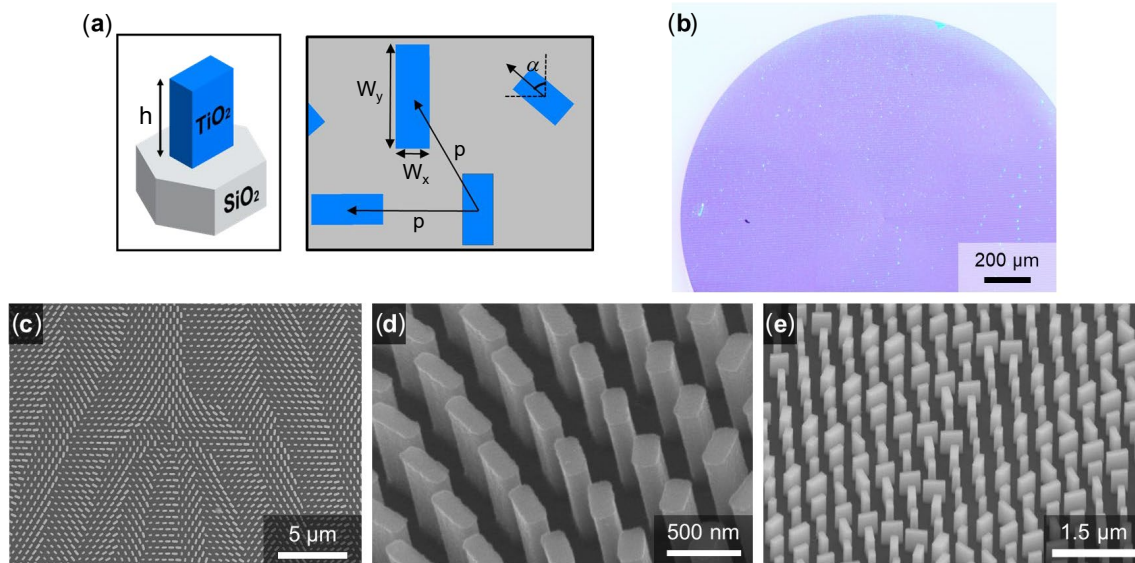


圖 2. 雅努斯超穎介面的設計與製作結果。(a) 左圖為示意圖：600 奈米高的矩形 TiO_2 超穎單元排列於石英基板上，構成週期為 500 奈米的六方晶格；右圖為超穎單元排列方式及幾何參數示意，包括寬度(W_x , W_y)、週期 (p) 與旋轉角 (α)。(b) Janus-2 的光學顯微鏡影像。(c-e) Janus-1 (c)、Janus-2 (d) 與 Janus-3 (e) 中心區域的掃描式電子顯微鏡影像。

為了驗證我們所推導的理論，並利用單層介電質雅努斯超穎介面產生方向性不對稱的渦旋光束，我們設計並製作了三款用於圓偏振與橢圓偏振入射光的雅努斯超穎介面。Janus-1

的本徵偏振態為圓偏振 $|\pi/4, \pi/2\rangle$ ，其正向與反向所產生的 OAM 態為 $[m, n] = [+1, +5]$ 。Janus-2 與 Janus-3 則分別對應不同的橢圓偏振態，並產生不同的 OAM 狀態，詳見表 1。需要注意的是，Janus-2 的偏振態為 $\chi = \pi/4$ ，使得其全域矩陣中的兩個非對角元素相等，符合式 (3) 的設計條件；而 Janus-3 的偏振態為 $\chi = \pi/6$ ，因此可透過引入樣品全域旋轉角 (參見式 (4)) 作為額外的自由度，打破式 (3) 所造成的設計限制。

表 1. 三款雅努斯超穎介面設計。

	$ \lambda(\chi, \delta)\rangle$	正向 OAM 態	反向 OAM 態
Janus-1	$\left \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}\right\rangle$	1	5
Janus-2	$\left \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right\rangle$	2	-3
Janus-3	$\left \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{3}\right\rangle$	2	-4

製作過程中，我們採用電子束微影、原子層沉積與蝕刻等技術。首先，我們在石英玻璃基板上旋轉塗佈一層光阻 (ZEP 520A, Zeon)，使其厚度均勻達到 600 奈米。接著，在光阻表面再旋塗一層薄的導電聚合物膜 (ESPACER 300Z, Showa Denko)，以利後續電子束微影步驟生成所需圖樣。圖樣完成後，我們使用原子層沉積技術沉積 TiO_2 薄膜，其厚度至少為超穎單元最大寬度的一半，以避免在製作過程中產生空隙。 TiO_2 薄膜的厚度與折射率經由橢圓偏光儀 (ellipsometry) 量測確認，確保其與設計參數一致。最後，我們使用高密度電漿反應式離子蝕刻系統去除光阻表面多餘的 TiO_2 ，並將樣品浸泡於 Remover PG 中，去除殘留光阻，完成整體製程。所有的雅努斯超穎介面樣品皆依照上述的流程製作完成，圖 2(c-e) 分別顯示三款實驗製作樣品的掃描式電子顯微鏡圖像。

此外，我們補充說明 Janus-1 與 Janus-2 結構中加入了額外的光柵相位，對應球座標中的偏折極角 (θ_d) 為 5° 、偏折方位角 (ϕ_d) 為 0° ；而 Janus-3 則設計為更複雜的光柵相位，其偏折角為 $(\theta_d, \phi_d) = (25.1^\circ, 101.8^\circ)$ ，但這些值是可以任意設定的。這些額外的光柵相位有助於在一次繞射階中產生更純淨的 OAM 漩渦光束，並消除零階中未轉換偏振項的干擾，這點已於文獻^(9, 10) 中證實。

四、軌道角動量分析

為了驗證我們的雅努斯超穎介面，我們搭建了一組實驗測量系統，如圖 3 所示。在實驗中，我們使用波長為 532 奈米的雷射作為入射光源，入射偏振態則依據表 1 中所列，對應於 Janus-1 至 Janus-3 的設計，並涵蓋了正向與反向入射的情境。三款雅努斯超穎介面的實驗結果與模擬結果彙整於圖 4 中。圖 4(a) 顯示量測到的光強分布，呈現典型的甜甜圈形狀，其中央空洞的大小取決於漩渦光束的 OAM 數值。為了觀察這些漩渦光束的相位，我們在馬赫-岑得 (Mach-Zehnder) 干涉儀架構下，將其與高斯光束干涉，結果如圖 4(b) 所示。可以清楚看到 Janus-1 至 Janus-3 的干涉條紋數量與旋轉方向，皆對應其設計的 OAM 量子數。

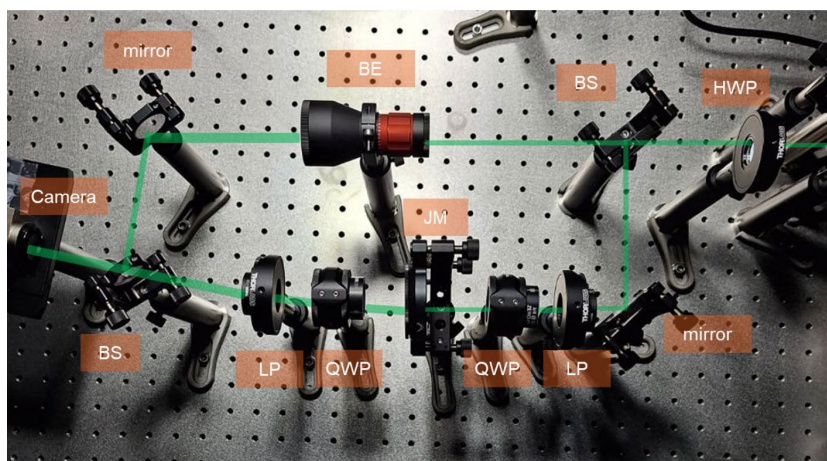


圖 3. 實驗架構照片。為了產生所需的線偏振光，系統中使用了一片半波片 (HWP)。透過四分之一波片 (QWP) 與線偏振片 (LP) 的組合，可產生對應於雅努斯超穎介面所需的入射偏振態；另一組 QWP 與 LP 則用於分析輸出光束的偏振狀態。來自下方光路的漩渦光束與上方光路中經過光束擴展器 (BE) 的展開光束進行干涉，最後由相機擷取干涉圖樣。

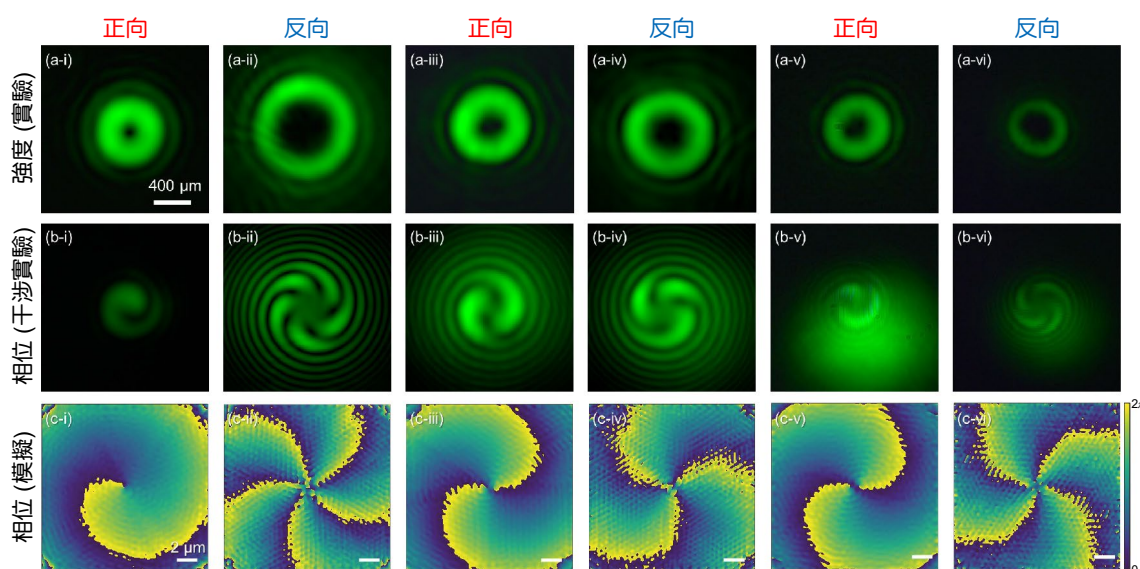


圖 4. 三款雅努斯超穎介面在正向與反向入射下的實驗與模擬結果。(a) 實驗量測的輸出光強分布。(b) 輸出光束與高斯光干涉後的實驗干涉條紋。(c) 模擬得到的輸出相位分布。從 (i) 至 (vi) 分別對應於 Janus-1 的正向與反向入射、Janus-2 的正向與反向入射，以及 Janus-3 的正向與反向入射結果。

此外，我們也使用有限差分時域法 (finite difference time domain method, FDTD) 模擬，在距離超穎單元約一個波長的位置取得模擬相位分布，如圖 4(c) 所示。這些相位圖呈現 m 次或 n 次的 2π 方位角變化，旋轉方向為順時針或逆時針，分別對應於不同入射方向與設計的 OAM 數值。這些結果與圖 4(b) 中的實驗觀察結果一致，顯示我們成功地在實驗中實現了設計的功能。我們透過本實驗，證實了雅努斯超穎介面可依照設計，針對任意偏振態，在正向與反向照射下產生不對稱的 OAM 光束。

五、自旋角動量分析

在接下來的分析中，我們探討雅努斯超穎介面的偏振轉換特性。我們量測了 Janus-1 至 Janus-3 在正向與反向入射下，輸出偏振態 $\lambda(\chi, \delta)$ 的斯托克斯參數 (Stokes parameters)。圖 5 顯示了正向與反向入射下，輸出偏振態的理論值 (藍色)、模擬值 (紅色) 與實驗值 (黃色) 之斯托克斯參數。在模擬部分，我們透過全波有限差分時域模擬，取得漩渦光束甜甜圈形光強分布中的 x 與 y 方向的電場分量 (E_x, E_y)，接著利用瓊斯向量表示的偏振態 $|\chi, \delta\rangle = [\cos\chi; \exp(i\delta)\sin\chi]$ ，代入理論公式計算出對應的斯托克斯參數。 S_1 、 S_2 與 S_3 的理論公式如下：

$$S_1 = \cos^2 \chi - \sin^2 \chi \quad (5a)$$

$$S_2 = 2 \cos \delta \cos \chi \sin \chi \quad (5b)$$

$$S_3 = 2 \sin \delta \cos \chi \sin \chi \quad (5c)$$

對於 Janus-1，其理論輸出自旋態在正向與反向皆為右旋圓偏振 (right-handed circular polarization, RCP)，在任意兩個正交線偏振間不會產生光強差異，故 S_1 與 S_2 約為 0，而 S_3 約為 -1。對於 Janus-2，其理論輸出自旋態為 $|\pi/4, -\pi/4\rangle$ 及 $|\pi/4, -\pi/4\rangle'$ ，在水平與垂直方向的光強差亦為零，但具有 $-\pi/4$ 的相位延遲，因此 S_1 約為 0， S_2 與 S_3 的理論值分別為 0.707 與 -0.707。至於 Janus-3，其對應偏振態為任意橢圓偏振狀態 $|\chi, \delta\rangle = |\pi/6, \pi/3\rangle$ ，其理論斯托克斯參數值分別為： S_1 為 0.500， S_2 為 0.433， S_3 為 -0.750。

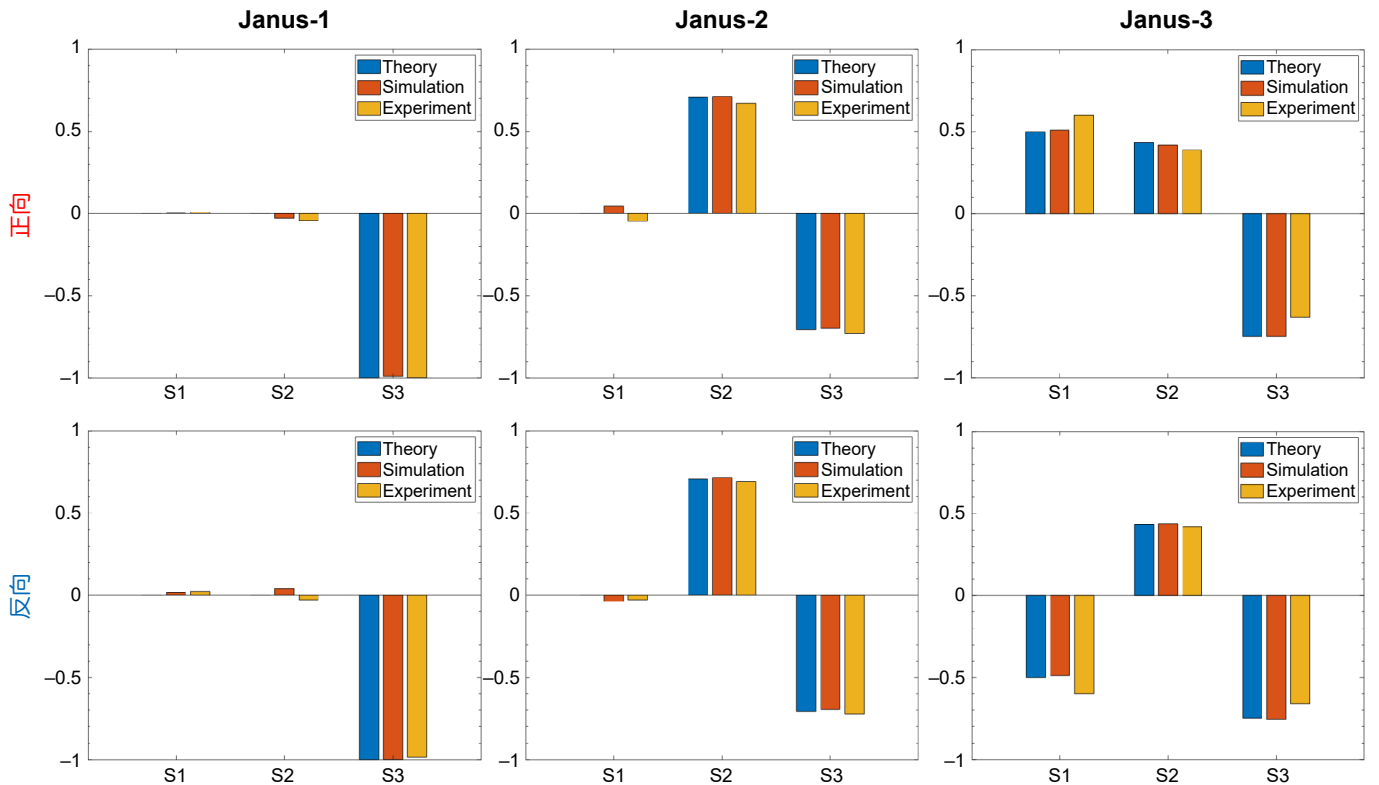


圖 5. Janus-1、Janus-2 與 Janus-3 在正向與反向入射下，輸出偏振態的理論值 (藍色)、模擬值 (紅色) 與實驗量測值 (黃色) 之斯托克斯參數。 S_1 、 S_2 與 S_3 的數值以長條圖表示。

對於實驗量測的斯托克斯參數，我們使用一組線偏振片與四分之一波片來分析輸出光的偏振態。這些偏振態被投影至六種標準偏振基底上： $|x\rangle$ 、 $|y\rangle$ 、 $|45^\circ\rangle$ 、 $|-45^\circ\rangle$ 、 $|L\rangle$ (左旋圓偏振)、 $|R\rangle$ (右旋圓偏振)。接著，我們利用光功率計量測這六種偏振狀態下的功率 (PPP)，再根據下列轉換公式計算出對應的斯托克斯參數⁽¹⁰⁾：

$$P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_{45^\circ} \\ P_{-45^\circ} \\ P_L \\ P_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = AS \quad (6a)$$

$$S = (A^T A)^{-1} A^T P \quad (6b)$$

此外，由於樣品上施加了旋轉角 $\beta = -24.6^\circ$ ，Janus-3 的理論輸出自旋態為 $|\pi/6, -\pi/3\rangle$ 與 $|\pi/3, -\pi/3\rangle$ ，因此其理論、模擬與實驗所得的斯托克斯參數組合也隨之不同。

實驗結果如圖 5 所示，整體而言，斯托克斯參數的實測值與理論與模擬結果高度一致，Janus-1 至 Janus-3 均展現出優異的偏振轉換能力，證實我們設計的雅努斯超穎介面可在任意偏振條件下穩定運作。值得注意的是，相較於 Janus-1 與 Janus-2，Janus-3 的實驗結果與理論預測之間的偏差較大。考量三組樣品皆源自相同的超原子資料庫，並採用相同製程條件製作，其偏振轉換效率與製程誤差應具有相近表現，因此我們推測差異主因在於 Janus-3 對應的偏振態與繞射角度較為複雜，進一步加大了偏振特性量測與解析的難度，導致其斯托克斯參數的誤差相對較大。

六、結論

先前在微波波段對於雅努斯超穎介面的展示，特別是應用於透鏡與全像圖時，主要採用空間多工的方式^(11, 12)。此方法需將兩種不同功能的超穎單元交錯排列，分別對應正向與反向入射方向。為實現每個超穎單元的偏振轉換功能，往往需要包含三層金屬結構。另一種實現方向性不對稱功能的方法，是使用多層超穎介面，例如中紅外波段中，以矽基雙透鏡 (doublet metalens) 展示邏輯閘聚焦功能的案例⁽¹³⁾。相較之下，我們所提出的單層介電質雅努斯超穎介面提供了一個更簡潔有效的替代方案，能在可見光波段針對任意自旋組態產生方向性不對稱的 OAM 狀態。

儘管如此，我們的設計在產生高階 OAM 狀態方面仍存在一定限制。由於設計中未考慮振幅調變，因此僅能在低 OAM 量子數條件下產生具有高純度的 OAM 光束。從圖 4(b) 的干涉條紋與圖 4(c) 的模擬相位分布中，我們可以明確進行 OAM 狀態的定性檢驗。但若要进一步產生更高階的 OAM 模態或進行更精細的空間奈米尺度設計，則需同時考慮相位與振幅調變，並進行 OAM 狀態的量化驗證⁽¹⁷⁾。

總結而言，透過座標轉換的理論架構，我們釐清了正向與反向條件下，雅努斯超穎介面的局部與全域矩陣之間的對應關係。我們善用設計自由度，包括全域旋轉、局部旋轉與單元寬度，實現對任意偏振態的控制。具體而言，單元寬度負責產生傳播相位、局部旋轉對應

幾何相位、全域旋轉則實現偏振態中 χ 不受限於 $\pm\pi/4$ 的橢圓偏振設計。根據此設計原理，我們成功製作出以 TiO_2 為基礎的單層雅努斯超穎介面，能依據入射方向產生不對稱的 OAM 光束。其在正向與反向入射下皆展現出高效能與良好的偏振轉換能力，在理論與實驗中均獲得驗證。其強度分布展現典型的甜甜圈形狀，干涉圖樣的奇點與光瓣分布亦與設計之 OAM 狀態與模擬結果一致。此外，實驗所得之斯托克斯參數與理論及模擬值高度吻合。這些令人振奮的成果讓我們深信，所提出的雅努斯超穎介面設計將在超穎光學領域中持續發揮關鍵作用，並進一步拓展其功能性與應用潛力，包括雷射腔內模態調控⁽⁵⁾、光學合光器⁽¹⁸⁾、接收與發射端多功能整合⁽¹⁹⁾、時空耦合控制⁽²⁰⁾ 等先進光學應用。

本研究原文發表於《Advanced Optical Materials》⁽¹⁴⁾，亦獲選為該期刊內前封面與封面故事⁽²¹⁾。

參考文獻

1. L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman, *Physical Review A*, **45**, 8185 (1992).
2. T. Stav, A. Faerman, E. Maguid, D. Oren, V. Kleiner, E. Hasman, and M. Segev, *Science*, **361**, 1101 (2018).
3. Y. Yan, G. Xie, M. P. J. Lavery, H. Huang, N. Ahmed, C. Bao, Y. Ren, Y. Cao, L. Li, Z. Zhao, A. F. Molisch, M. Tur, M. J. Padgett, and A. E. Willner, *Nature Communications*, **5**, 4876 (2014).
4. T. A. Klar and S. W. Hell, *Optics Letters*, **24**, 954 (1999).
5. H. Sroor, Y.-W. Huang, B. Sephton, D. Naidoo, A. Valles, V. Ginis, C.-W. Qiu, A. Ambrosio, F. Capasso, and A. Forbes, *Nature Photonics*, **14**, 498 (2020).
6. M. W. Beijersbergen, R. P. C. Coerwinkel, M. Kristensen, and J. P. Woerdman, *Optics Communications*, **112**, 321 (1994).
7. L. Marrucci, C. Manzo, and D. Paparo, *Physical Review Letters*, **96**, 163905 (2006).
8. R. C. Devlin, A. Ambrosio, D. Wintz, S. L. Oscurato, A. Y. Zhu, M. Khorasaninejad, J. Oh, P. Maddalena, and F. Capasso, *Optics Express*, **25**, 377 (2017).
9. R. C. Devlin, A. Ambrosio, N. A. Rubin, J. P. B. Mueller, and F. Capasso, *Science*, **358**, 896 (2017).
10. Y.-W. Huang, N. A. Rubin, A. Ambrosio, Z. Shi, R. C. Devlin, C.-W. Qiu, and F. Capasso, *Optics Express*, **27**, 7469 (2019).
11. K. Chen, G. Ding, G. Hu, Z. Jin, J. Zhao, Y. Feng, T. Jiang, A. Alu, and C.-W. Qiu, *Advanced Materials*, **32**, 1906352 (2020).
12. W. Yang, K. Chen, S. Dong, S. Wang, K. Qu, T. Jiang, J. Zhao, and Y. Feng, *ACS Applied Materials & Interfaces*, **15**, 27380 (2023).
13. Y. Huang, T. Xiao, S. Chen, Z. Xie, J. Zheng, J. Zhu, Y. Su, W. Chen, K. Liu, M. Tang, P. Muller-Buschbaum, and L. Li, *Opto-Electronic Advances*, **6**, 220073 (2023).
14. C.-Y. Lin, J.-H. Huang, H.-T. Su, S.-M. Chang, Y.-C. Wu, and Y.-W. Huang, *Advanced Optical Materials*, **12**, 2401335 (2024).
15. J. P. Balthasar Mueller, N. A. Rubin, R. C. Devlin, B. Groever, and F. Capasso, *Physical Review Letters*, **118**, 113901 (2017).
16. C. Menzel, C. Rockstuhl, and F. Lederer, *Physical Review A*, **82**, 053811 (2010).
17. M. de Oliveira, M. Piccardo, S. Eslami, V. Aglieri, A. Toma, and A. Ambrosio, *ACS Photonics*, **10**, 290 (2023).
18. B. Born, S.-H. Lee, J.-H. Song, J. Y. Lee, W. Ko, and M. L. Brongersma, *Nature Communications*, **14**, 5602 (2023).
19. X. G. Zhang, Y. L. Sun, B. Zhu, W. X. Jiang, Q. Yu, H. W. Tian, C.-W. Qiu, Z. Zhang, and T. J. Cui, *Light: Science & Applications*, **11**, 126 (2022).
20. M. Piccardo, M. de Oliveira, V. R. Policht, M. Russo, B. Ardini, M. Corti, G. Valentini, J. Vieira, C. Manzoni, G. Cerullo, and A. Ambrosio, *Nature Photonics*, **17**, 822 (2023).
21. C.-Y. Lin, J.-H. Huang, H.-T. Su, S.-M. Chang, Y.-C. Wu, and Y.-W. Huang, *Advanced Optical Materials*, **12**, 2470102 (2024).

作者簡介

黃耀緯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光電工程學系副教授。

Yao-Wei Huang received his Ph.D. in Applied Physics from National Taiwan University. He is currently an Associate Professor in the Department of Photonics at National Yang Ming Chiao Tung University.