

17. 超穎透鏡於虛擬實境 與擴增實境的應用

虛擬實境與擴增實境為何需要考慮 超穎透鏡？

隨著元宇宙議題蓬勃發展，虛擬實境 (VR) 與擴增實境 (AR) 頭盔成為新一代寵兒。然而目前市面上的VR/AR頭盔有許多問題，諸如頭盔過重、顯示器畫素不夠多、視野不夠大、光學元件效率不夠高等問題，以至於這些系統目前還沒有如智慧型手機一樣被廣大消費者所接受。VR 與AR裡面的光學系統有很大的不同，例如VR需要美式鬆餅鏡 (pancake lens)、菲涅耳透鏡 (Fresnel lens) 搭配或取代原有的厚重鏡頭組，以縮小頭盔體積與重量；而AR中則用到自由曲面或是波導光學混合器，使虛擬影像與實體影像做整合。當然在AR中也需要在可見光波段消色差的鏡頭組，用以將顯示器畫面導入混合器之中。然而即便有美式鬆餅鏡或菲涅耳透鏡的加入，好的影像品質需要多片鏡片整合消色差，因此輕薄與更好的畫質如魚與熊掌無法兼得。除了可見光波段的影像需要鏡頭組以外，測距偵測也需要紅外線鏡頭。無論展業或是學術端，也開始尋求下一個「黑科技」，使更小的裝置形構 (form factor)、更大的視野 (field of view, FOV)、更好的成像品質、更高效率的VR/AR成為可能。

諸多黑科技中，以「超穎介面 (metasurfaces)」最受矚目，隨著奈米科技與奈米光學的發展，超穎介面可利用次波長的奈米結構形成的「介面」的尺度下，任意操控光的相位、振幅、偏振、色散等[1]。超穎介面利用奈米結構近場的相位、振幅與偏振來調控遠場的光，有著繞射光學、物理光學的性質，又不侷限於傳統繞射光學元件的限制。

實現消色差超穎透鏡有許多方式，本文將介紹利用色散工程 (dispersion-engineering) 的超穎介面實現輕薄消色差超穎透鏡遇到的問題[2-7]，以及我們近年發展的結合色散工程法與區域板干涉法 (zone interference)[8]，還有利用機器學習法 (machine learning) [9]，實現大面積、三原色消色差超穎透鏡，以下簡稱超穎透鏡，並做到接近繞射極限的成像品質。另外，我們也將設計與製作而成的超穎透鏡，結合近眼光纖掃描顯示器，或是雷射背光源的微型液晶顯示器，展示超穎透鏡於AR與VR 應用時在人眼成像的效果。

利用區域板干涉法與色散工程設計的超穎透鏡

超穎介面有許多超越傳統繞射光學元件限制的地方，色散工程即為其中之一。大約

在5年前，陸續有許多利用色散工程的方式設計「超穎原子」，並將這些具有不同色散特性的原子排列而成，在單一介面上解決鏡頭組需要好幾片鏡片才能消得掉的色差[2-4]。然而色散工程並非沒有侷限，超穎原子在設計過程中，也會受到物理特性的限制，無法同時滿足需要的相位、群延遲、群延遲色散，又同時保持高效率。因此，如果可見光連續波段都要消色差的話，這會限制超穎透鏡直徑至幾十或幾百微米大小[5-6]。雖然單一片超穎透鏡無法有效率的實現大面積消色差透鏡，但也可以將超穎透鏡與其他透鏡做整合，除了增加原透鏡組的消色差波段範圍，也可以將超穎透鏡直徑增加到1.5 mm 尺度[7]。雖然超穎透鏡仍有許多限制，但世上也沒有任何透鏡組能夠同時滿足所有要求。所以科學家開始針對不同需求的光學系統，設計新穎的超穎透鏡。

我們研究的超穎透鏡，目標除了做得更輕薄，也要改善美式鬆餅鏡與菲涅耳透鏡

成像品質問題。我們針對AR/VR的應用，工作波長視顯示器的波長而定，我們鎖定三原色共三個波長，即488, 532, 658 nm。在不需要連續波段消色差的情況下，可開發出更大面積的超穎透鏡。我們設計的超穎透鏡如圖1(a) 所示，整個超穎透鏡可以區分為很多區域 (zone)，類似但不被菲涅耳透鏡的繞射條件所限制。每個區域有一個自由微調的相位，不同區域的相位會在聚焦焦點形成建設性或破壞性干涉。舉菲涅耳透鏡為例，見圖1(b)，當設計波長為綠光時，每個區域的複數電場 (多個細綠色箭頭) 在聚焦焦點疊加成建設性干涉 (一個長的粗綠色箭頭)，然而在紅光或藍光照射時，在該聚焦焦點則無法疊加成建設性干涉 (短的粗紅色箭頭與短的粗藍色箭頭)。而在我們的超穎透鏡，我們透過優化每個區域自由微調的相位，以達到同時三個波長的光都能形成建設性干涉，見圖1(c)。另一方面，在每個區域裡面，我們運用色散工程，滿足超穎透鏡所需要的中心波長相位、群延遲 (group delay, GD)，與群延遲色散 (group delay dispersion, GDD)。

這三者超穎透鏡所不同的關係見圖1(d)上中下圖。

為了滿足所需要的色散條件 (中心波長相位、群延遲與群延遲色散)，我們設計各種超穎原子。這些不同形狀的長方柱可藉由耦合的模態，來

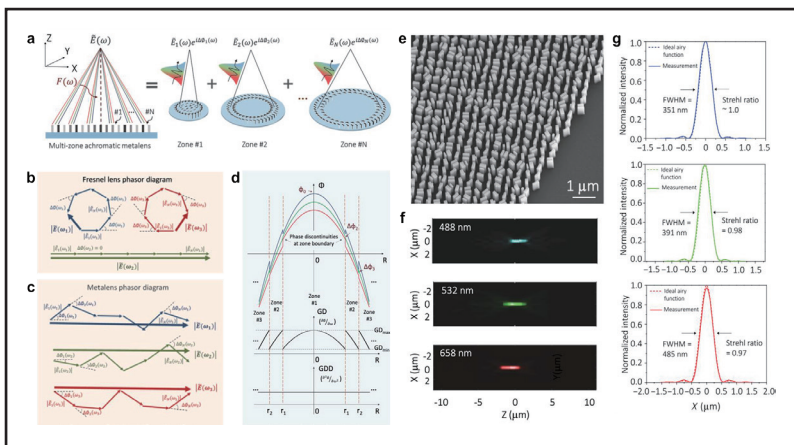


圖1 (a) 利用區域板干涉法的超穎透鏡設計原理。(b) 菲涅耳透鏡的干涉情形。(c) 超穎透鏡的區域板干涉情形。(d) 超穎透鏡的色散情形。(e) 超穎透鏡電子顯微鏡照片。(f) 縱向聚焦特性。(g) 橫向聚焦特性。

資料來源：國立陽明交通大學光電工程學系

增加超穎原子可達到的色散範圍。我們設計的超穎透鏡直徑 2 mm，數值孔徑 (NA) 為 0.7，製程的結構電子顯微鏡見圖1(e)。超穎透鏡在三個工作波長的縱向聚焦效果分別展示於圖1(f) 上中下，可以看出焦點位置略有所偏移，但相比於2.1 mm 焦長而言，偏移微乎其微。一般在繞射光學中的菲涅耳區域板 (Fresnel zone plate) 會見到的縱向多焦點的缺點，在我們設計的超穎透鏡並沒有出現。圖1(g)展示的是實驗的三個波長在橫向聚焦，與該波長在繞射極限下的比較，史特瑞比例 (Strehl ratio) 高達0.97 以上，聚焦效果接近繞射極限。

利用機器學習法設計的超穎透鏡

上個單元設計的超穎透鏡可做到直徑 2 mm，然而要應用於VR中還稍嫌略小。因此，我們在另外一個工作中使用機器學習法來設計超穎透鏡。機器學習法有許多範疇，我們在此運用的是一種屬於反向設計法 (inverse design) 中的拓撲優化 (topology optimization) [10]。這個方法包含正向運算 (forward simulation)，如圖2(a)，以及伴隨模擬 (adjoint simulation)，如圖2(b)，由此可以快速的計算優值 (figure of merit, FOM) 與優值梯度 (gradient of FOM)。優值在不同光學元件可以代表不同的物理量，例如在我們的超穎透鏡中是聚焦焦點的效率。超穎透鏡在優化過

程中面臨到的問題在於越大面積，電磁波模擬的聚焦效率計算會越慢，因此，我們在這裡開發了一個基於超穎透鏡近場與格林函數 (Green's function) 卷積的快速近似求解器來加快聚焦焦點效率計算。計算過程中的優值與優值梯度，經由疊代演算法，見圖2(c)，即可快速優化大面積超穎介面了。

在實驗驗證中，我們設計了幾個超穎透鏡，第一種直徑為2 mm，NA有0.3與0.7，同時優化六種不同波長。奈米結構與不同波長的聚焦半高全寬見圖2(d, e)，實驗結果均接近繞射極限。第二種直徑高達1 cm，NA 為 0.3，同時優化三個工作波長，這個超穎透鏡使用到約109 個超穎原子仍可實現，照片、電子顯微鏡見圖2(f)。在設計波長的聚焦效果見圖2(g)，實驗結果顯示史特瑞比例 (Strehl ratio) 較低一點，但仍有0.8 以上，聚焦效果具有些許像差，但仍符合商用要求。

於虛擬實境與擴增實境的應用

接下來，我們利用我們的超穎透鏡演示應用於VR/AR 的可能性。圖3(a)所示為VR演

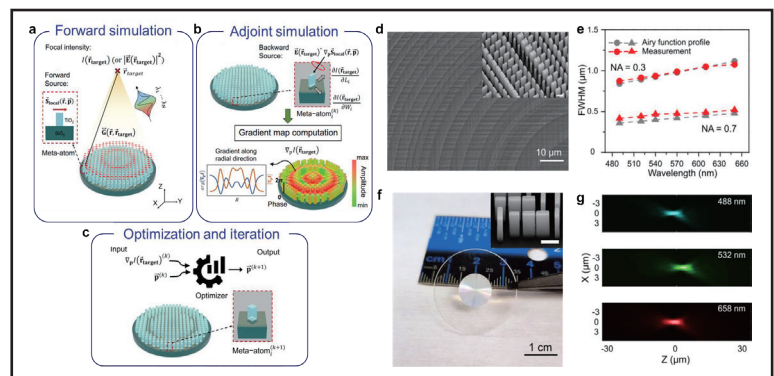


圖2 (a-c) 利用機器學習法的超穎透鏡設計原理，包含 (a) 正向運算、(b) 伴隨運算與 (c) 疊代演算法。(d) 超穎透鏡電子顯微鏡照片。(e) 不同數值孔徑與波長的聚焦焦點大小。(f) 直徑1 cm超穎透鏡照片，內嵌為電子顯微鏡照片。(g) 縱向聚焦特性。
資料來源：國立陽明交通大學光電工程學系

示，單獨一片超穎透鏡放置於眼前，實驗中我們以照相機來代表眼球，並記錄模擬眼球看到的畫面，超穎透鏡的部分選用利用區域干涉與色散工程的超穎透鏡。顯示器則放置於超穎透鏡的焦平面之內，使眼球所見放大虛像。我們首先使用近眼光纖掃描的李沙育圖形 (Lissajous pattern) 作為顯示器的部份，示意圖見圖3(b)。圖3(c)為模擬視覺的影像，分別包含三種顏色同時出現的3D字母與彩色盾牌圖形。除此之外，我們也演示簡易版本的AR系統，即在眼睛與超穎透鏡之間多放置一光學混合器，如此眼睛可以同時看到環境影像與虛擬影像，示意圖如圖3(d)所示。圖3(e)為模擬視覺的影像，綠色的天氣、行事曆與時間資訊，三種顏色同時出現的字母，以及疊合在一起的實體布偶影像。

另一方面，我們也利用機器學習設計的超穎透鏡演示可能的VR系統。在此，我們改以商用的雷射背光源的微型液晶顯示器(μ -LCD)建立虛擬影像，示意圖如圖3(f)，像素大小為 $8\ \mu\text{m}$ 。圖3(g)展示的是三原色二階

光(像素全亮抑或全暗)混合而成的畫面，仔細看可以看得出像素一點一點的樣子，這是由於超穎介面解析度夠高所致，但這不影響顏色的混和，如混和圖可以清楚看出黃色、洋紅色、青色，與白色區塊。像素點太明顯的問題可以以成像效果較差的超穎透鏡解決、替換更高密度像素的顯示器，或是改用掃描式的雷射顯示器。圖3(h)展示的是三原色灰階光(像素在暗與亮中有256種灰階)混合而成的畫面，清楚展示米白色鐘塔外牆、暗紅色鐘塔屋頂，以及藍天的畫面。

總結

超穎介面的發展極為迅速，我們以色散工程搭配區域干涉法實現直徑最大至2 mm的三原色消色差超穎透鏡，聚焦效果接近繞射極限。我們也用機器學習的反向設計法設計三原色消色差超穎透鏡，直徑最大至1 cm，使用了約109個數的超穎原子。我們在此研究建立了VR與AR系統的可行性，利用相機模擬人眼看到的效果，使用單獨一片超穎介面作為成像工具，以及利用近眼光纖掃描或

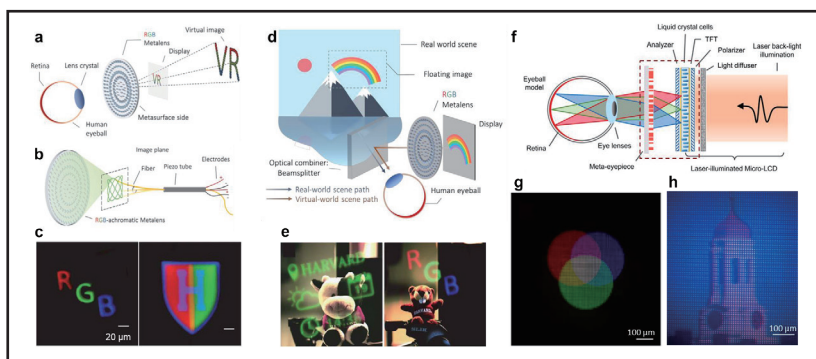


圖3 (a, b) 虛擬實境架構，包含三維示意圖 (a) 與超穎透鏡搭配近眼光纖顯示器 (b)。 (c) 呈現的虛擬實境畫面，包含同時顯示三種不同顏色的三維立體字母與盾牌畫面。 (d) 擴增實境架構。 (e) 呈現的實物影像與虛擬畫面疊合。 (f) 虛擬實境架構，搭配雷射背光源的微型液晶顯示器。 (g, h) 呈現的虛擬實境畫面，包含三原色二階光混合畫面 (g) 與三原色灰階光混合畫面 (h)。

資料來源：國立陽明交通大學光電工程學系

是雷射背光源的微型液晶顯示器作為虛擬影像來源。超穎透鏡成功取代厚重鏡頭組，比美式鬆餅鏡、菲涅耳透鏡還要輕薄，而且成像品質更為優異。用以AR/VR的輕薄與優異成像透鏡成為可能，使之普及於廣大消費端。

airiti

參考文獻:

1. W.-L. Hsu, Y.-C. Chen, S. P. Yeh, Q.-C. Zeng, Y.-W. Huang, and C.-M. Wang, "Review of metasurfaces and metadevices: Advantages of different materials and fabrications," *Nanomaterials* 12(12), 1973 (2022).
2. M. Khorasaninejad, Z. Shi, A. Y. Zhu, W. T. Chen, V. Sanjeev, A. Zaidi, and F. Capasso, "Achromatic Metalens over 60 nm Bandwidth in the Visible and Metalens with Reverse Chromatic Dispersion," *Nano Letters* 17, 1819-1824 (2017).
3. E. Arbabi, A. Arbabi, S. M. Kamali, Y. Horie, and A. Faraon, "Controlling the sign of chromatic dispersion in diffractive optics with dielectric metasurfaces," *Optica* 4, 625-632 (2017).
4. S. M. Wang, P. C. Wu, V.-C. Su, Y.-C. Lai, C. H. Chu, J.-W. Chen, S.-H. Lu, J. Chen, B. B. Xu, C.-H. Kuan, T. Li, S. N. Zhu and D. P. Tsai "Broadband achromatic optical metasurface devices," *Nature Communications* 8, 187 (2017).
5. S. Wang, P. C. Wu, V.-C. Su, Y.-C. Lai, M.-K. Chen, H. Y. Kuo, B. H. Chen, Y. H. Chen, T.-T. Huang, J.-H. Wang, R.-M. Lin, C.-H. Kuan, T. Li, Z. Wang, S. Zhu and D. P. Tsai, "A broadband achromatic metalens in the visible," *Nature Nanotechnology* 13, 227-232 (2018).
6. W. T. Chen, A. Y. Zhu, V. Sanjeev, M. Khorasaninejad, Z. Shi, E. Lee and F. Capasso, "A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible," *Nature Nanotechnology* 13, 220–226(2018).
7. W. T. Chen, A. Y. Zhu, J. Sisler, Y.-W. Huang, K. M. A. Yousef, E. Lee, C.-W. Qiu, and F. Capasso, "Broadband achromatic metasurface-refractive optics," *Nano Letters* 18(12), 7801–7808 (2018).
8. Z. Li, P. Lin, Y.-W. Huang, J.-S. Park, W. T. Chen, Z. Shi, C.-W. Qiu, J.-X. Cheng, and F. Capasso, "Meta-optics achieves RGB-achromatic focusing for virtual reality," *Science Advances* 7(5), eabe4458 (2021).
9. Z. Li, R. Pestourie, J.-S. Park, Y.-W. Huang, S. G. Johnson, and F. Capasso, "Inverse design enables large-scale highperformance meta-optics reshaping virtual reality," *Nature Communications* 13, 2409 (2022).
10. D. Sell, J. Yang, S. Doshay, R. Yang, and J. A. Fan, "Large-angle, multifunctional metagratings based on freeform multimode geometries," *Nano Letters* 17(6), 3752–3757 (2017).