

折射透鏡技術限制與超穎透鏡發展

Limitations of Refractive Lens Technology and the Development of Metalenses

徐肇謙、陳彥鈞、陳哲勤、許維綸、王智明

Chao-Chien Hsu, Yen-Chun Chen, Che-Chin Chen, Wei-Lun Hsu, Chih-Ming Wang

傳統光學透鏡雖廣泛應用，但單片透鏡無法有效克服像差，導致現代光學系統需採用多片透鏡組合，造成體積龐大與重量增加的問題。超穎透鏡 (metalens) 基於次波長尺度的超穎表面 (metasurface) 結構，透過奈米結構陣列實現精密相位調控，具備輕薄、重量輕及易於整合的優勢。相較於傳統菲涅耳透鏡 (Fresnel lens)，超穎透鏡可提供像素化連續相位控制，完全消除菲涅耳透鏡常見的陰影區域，實現更高光學效率。然而，單片超穎透鏡若要同時實現高數值孔 (numerical aperture, NA)、消色差與像差校正，往往需要極陡峭的相位梯度。根據奈奎斯特取樣定理 (Nyquist sampling theorem)，高數值孔徑設計要求極小的單位晶胞尺寸，特別在透鏡外圍區域，而考量到元件的效率，每個菲涅耳區至少需 4 個相位採樣層級。這不僅大幅提高製造難度，也導致效率下降，限制了商業化應用。混合光學系統 (refractive and metalens hybrid optics) 結合傳統折射透鏡與超穎表面的優勢，提供實務解決方案。傳統透鏡負責主要聚焦，超穎校正器 (meta-corrector) 專注像差修正，可顯著降低相位梯度要求，簡化製造並提高效率。未來發展需克服製造成本挑戰，透過互補式金屬氧化半導體 (complementary metal-oxide semiconductor, CMOS) 相容製程技術推動商業化，混合光學系統在手機相機、醫療器材、車用光學等領域展現巨大應用潛力，有望成為下一代輕量化光學系統的主流方案。

Conventional optical lenses are widely used; however, a single lens element is generally insufficient to correct optical aberrations effectively. As a result, modern optical systems typically rely on multi-element lens assemblies, which inevitably lead to increased system volume and weight. Metalenses, based on subwavelength-scale metasurface structures, employ arrays of nanostructures to achieve precise phase modulation, offering advantages such as compactness, lightweight design, and ease of integration. Compared with traditional Fresnel lenses, metalenses provide pixelated yet quasi-continuous phase control, completely eliminating the shadow regions commonly found in Fresnel lenses and thereby enabling higher optical efficiency. Nevertheless, achieving high numerical aperture (NA), achromatic operation, and aberration correction simultaneously with a single metalens often requires extremely steep phase gradients. According to the Nyquist sampling theorem, high-NA designs demand tiny unit-cell sizes, particularly near the lens periphery. Moreover, to maintain high efficiency, each Fresnel zone must be sampled with at

least four discrete phase levels. These requirements significantly increase fabrication complexity and lead to efficiency degradation, thus limiting practical and commercial applications. Hybrid optical systems that combine refractive lenses and metalenses provide a practical solution by leveraging the complementary strengths of both approaches. In such systems, the conventional refractive lens performs the primary focusing function, while a metasurface-based corrector (meta-corrector) is dedicated to aberration correction. This division of functionality substantially reduces the required phase gradient, simplifies fabrication, and improves overall efficiency. Future development will need to address fabrication cost challenges, with commercialization driven by complementary metal–oxide–semiconductor (CMOS)-compatible processes. Hybrid optical systems show great potential in applications such as smartphone cameras, medical instruments, and automotive optics, and are expected to become a mainstream approach for next-generation lightweight optical systems.

一、傳統透鏡的應用與局限性

傳統透鏡在光學系統中被廣泛應用，其主要依靠材料的折射特性與連續相位偏移來實現光的聚焦與成像。然而，隨著光學技術的迅速進步，傳統透鏡的局限性逐漸顯現。由於單片透鏡無法有效克服像差問題，現代光學鏡頭通常採用多片折射透鏡的組合設計^(1, 2)，以實現像差補償。這種設計雖然能提升成像品質，但也導致了光學系統的體積增大與重量增加。例如，Canon EF 50mm f/1.8 STM 鏡頭採用 6 片 5 組架構⁽³⁾，其中前組負責主要聚焦與初級像差校正，中段控制光束與像散修正，後組執行色差與場曲補償，以確保大光圈條件下的成像品質。



圖 1. Canon EF50 mm f/1.8 STM (a) 內部構造示意圖 (b) 產品外觀⁽³⁾。

二、超穎透鏡的誕生與技術優勢

超穎表面為一種人工的特殊結構，藉由次波長尺度下的二維結構所組成，利用不同尺寸的次波長結構來對電磁波進行調控⁽⁴⁻⁹⁾，如圖 2，這些結構經由設計、排列，可以製作出超穎光學元件 (meta-devices)，像是全像片^(10, 11)、波片^(12, 13)、超穎透鏡⁽¹⁴⁾ 等。

超穎透鏡作為一種基於次波長結構的相位操控技術，展現了輕薄、重量輕以及易於組裝的優勢，並且能利用半導體製程進行大規模生產。這項技術的發展始於 1998 年，當時 Lalanne 等人提出了效率超過 80% 的閃耀式光柵概念^(15, 16)，並展示了透鏡的初步研究成果。隨後，Capasso 研究團隊在此基礎上取得重大突破，成功展示了第一個真正意義上的超穎透鏡。這種基於超穎表面的透鏡能在連續色彩頻寬範圍內穩定工作⁽¹⁷⁾，迅速吸引了全球學術界的廣泛關注。

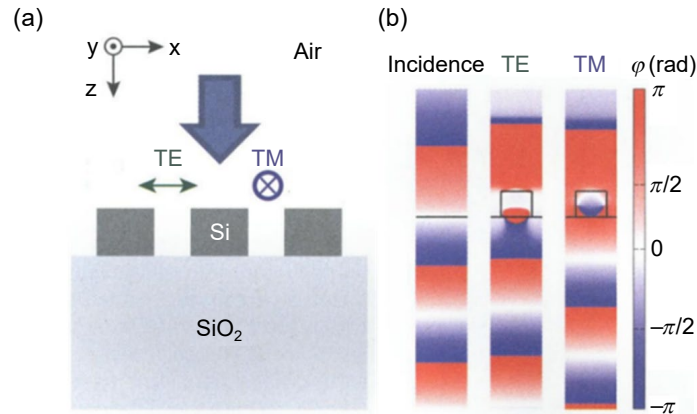


圖 2. (a) 週期性矽奈米柱陣列 (b) TE 偏振和 TM 偏振光通過具有 120 nm 寬的矽奈米柱界面後的相位波前⁽⁹⁾。

從技術原理來看，如圖 3 所示，透鏡的相位分布特性使其在功能上類似於菲涅耳透鏡，但性能表現卻遠超後者。其核心技術在於像素化的單位晶胞結構設計，能提供更加精細和精確的相位控制，並完全消菲涅爾透鏡固有的陰影區域問題⁽¹⁸⁾，從而實現顯著更高的效率。近年來，超穎透鏡的概念不斷被提出和完善，研究成果表明這項技術在消費電子設備中展現出巨大的應用潛力^(19,20)，尤其是在手機相機等對小型化和輕量化要求極高的光學系統中。

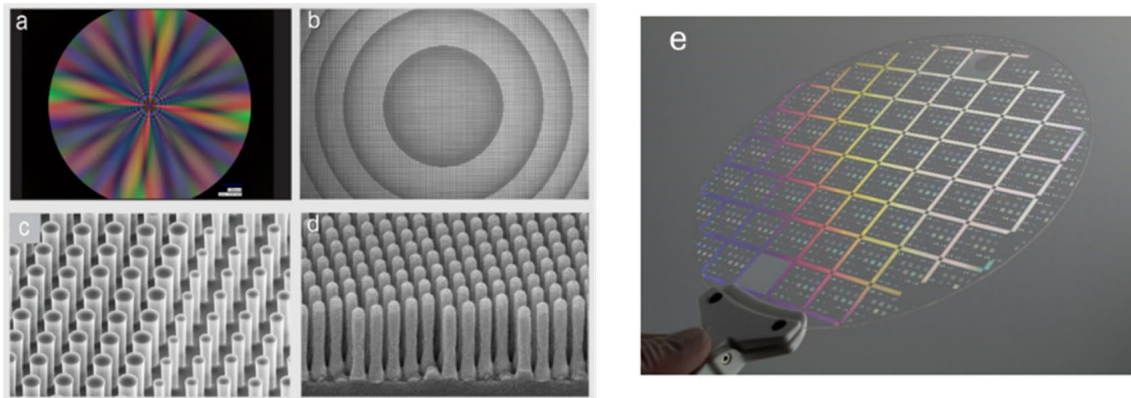


圖 3. (a) 顯微鏡下的超穎透鏡 (b) 超穎透鏡中心的 SEM 圖。(c-d) 單位晶胞的 SEM 圖。(e) 在 8 吋晶圓上的超穎透鏡⁽²¹⁾。

儘管超穎透鏡在理論和實驗室環境中展現出優異性能，但其商業化應用仍面臨重大的技術挑戰。目前的超穎透鏡製造主要依賴電子束微影技術，這種技術雖然能實現極高的製造精度，但在大量生產方面表現出明顯的侷限性，包括生產效率低及製造成本過高等問題。因此，為了滿足市場對成本效益的要求，需要開發與 CMOS 製造技術兼容的生產製程，例如 i-Line 步進曝光機與奈米壓印技術 (nanoimprint lithography, NIL)，進一步推動超穎透鏡的商業化。

三、單片超穎透鏡的性能挑戰

在設計鏡頭時，根據需求不再會是一片透鏡即可達到我們需求的光學性能，因為各種光學像差，需要多片鏡片來消除像差。雖然基於次波長結構組成的超穎透鏡，可以藉由自由排列結構來達成複雜的相位，然而還是會遇到一些挑戰，如在設計大數值孔徑的透鏡相位時，透鏡外圍的相位會是劇烈的 $0-2\pi$ 的相位變化，根據光柵繞射效率公式⁽²²⁾：

$$\eta = \sin c\left(\frac{1}{N}\right)^2$$

N 為閃爍式光柵的階數，若要繞射效率大於 80%， N 至少要大於 4，這代表 $0-2\pi$ 的劇烈相位變化，至少需要 4 個單元結構來描述，也就是排列超穎透鏡外圍時，會有較小週期的尺寸限制，製作時也會受限於半導體製程技術的能力。

在實際應用中，單一超穎透鏡除了製造技術的侷限性，還面臨多重挑戰。要同時實現聚焦、消色差以及像差校正的光學性能，超穎透鏡表面需具備極其陡峭的相位變化率^(22, 23)，這對設計和製程技術提出了極高的要求。根據取樣定理⁽²⁴⁾

$$U_{lx} \leq \frac{\lambda}{2NA}$$

U_{lx} 表示符合奈奎斯特頻率準則的單位晶胞尺寸。 λ 為操作波長。 NA 表示超穎透鏡的數值孔徑。為了準確重現急劇的相位梯度，必須開發超高分辨率的奈米結構單元以滿足空間頻率的取樣需求。然而，此舉不僅顯著提高了製造技術的門檻，還導致光學效率的明顯下降。此外，當超穎透鏡致力於像差修正或寬頻消色差時，往往需要在聚焦性能上妥協，這種設計上的取舍直接限制了系統的成像解析度。

四、高數值孔徑設計的核心挑戰

在高數值孔徑設計方面，超穎透鏡面臨著技術瓶頸。數值孔徑是提升成像解析度與光收集能力的關鍵指標，但高 NA 設計要求透鏡邊緣區域的相位梯度劇烈增長，需在極小的空間範圍內產生急劇的相位變化。這種極端的相位梯度需求直接導致高深寬比奈米結構的製造問題，包括側壁粗糙度與蝕刻製程均勻性等挑戰。此外，高 NA 超穎透鏡需在整個透鏡孔徑範圍內實現近乎連續的 2π 相位調制，並處理邊緣區域的急劇相位梯度變化，如圖 4 所示，相位梯度越大，相位調製所需要的空間解析度越大，代表超穎透鏡的單位晶胞週期會越小，這設計空間與製造誤差提出了嚴苛要求。

五、混合光學系統的技術突破

為突破單一超穎透鏡的限制，混合光學系統設計成為重要的技術策略。混合光學系統結合了傳統光學元件的折光能力與超穎透鏡的精密相位調控優勢，透過功能分工的方式有效解

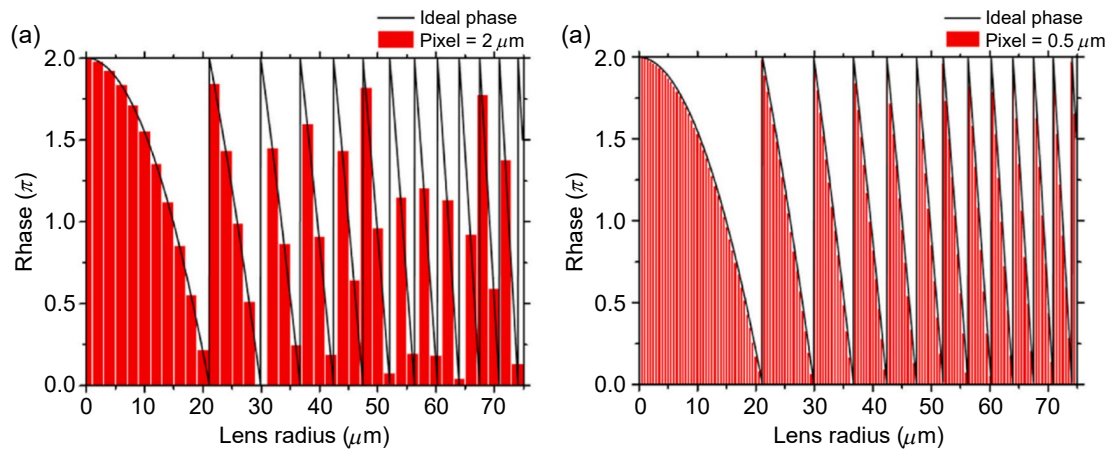


圖 4. (a) 單元晶胞尺寸為 $2\ \mu\text{m}$ 時，在超穎透鏡的外圍區域 (透鏡半徑 $> 30\ \mu\text{m}$)，每個菲涅耳區的採樣少於 4。(b) 當單元晶胞尺寸為 $0.5\ \mu\text{m}$ 時，所有菲涅耳區域的採樣均大於 4。⁽²⁴⁾

決高 NA 應用中的核心技術難題。在混合光學系統中，傳統透鏡主要擔任屈光功能，提供穩定的基礎光學性能，而超穎透鏡則專注於精密的像差修正與波前調制。這種分層設計策略顯著降低了對單一超穎透鏡在極端相位梯度控制方面的技術要求，同時保持了超穎光學系統的輕薄化優勢，並大幅提升整體光學效率與像差修正能力，使其在大視場、大光圈的嚴苛工作條件下仍能維持優異的成像品質。

六、混合設計的優勢與未來方向

相較於純超穎透鏡系統，混合設計在光學性能上實現了顯著提升，有效克服了高 NA 條件下相位梯度過於陡峭所導致的製造困難與性能劣化問題。同時，與傳統折射透鏡系統相比，混合架構可以減輕重量 30–50%，在維持甚至提升光學性能的前提下大幅改善了系統的便攜性與應用靈活性。除了混合系統外，多層超穎結構設計與新型相位調制策略等創新方法也為解決高 NA 技術瓶頸提供了重要途徑，推動下一代高性能、大尺寸、高解析度光學系統的發展。

七、應用案例與未來展望

近年來，研究人員已開始探討利用超穎透鏡替代部分傳統透鏡組的功能。2019 年，Nanfang Yu 研究團隊在可見光波段提出了結合超穎透鏡與傳統折射元件的混合方法⁽²⁵⁾。該方案利用折射元件與超穎表面色散特性相反的特性，使兩者的色散相互抵消，形成消色差光學系統。如圖 5 所示，這個混合雙片組由 1 mm 孔徑的折射透鏡和 1.5 mm 直徑的超穎透鏡組成，兩者由 0.5 mm 熔融石英基板分隔。通過優化折射元件的曲率半徑、圓錐常數以及超穎透鏡的相位輪廓，系統可使可見光的紅、藍、綠三色光線精確聚焦於 2 mm 外的設計焦平面上。

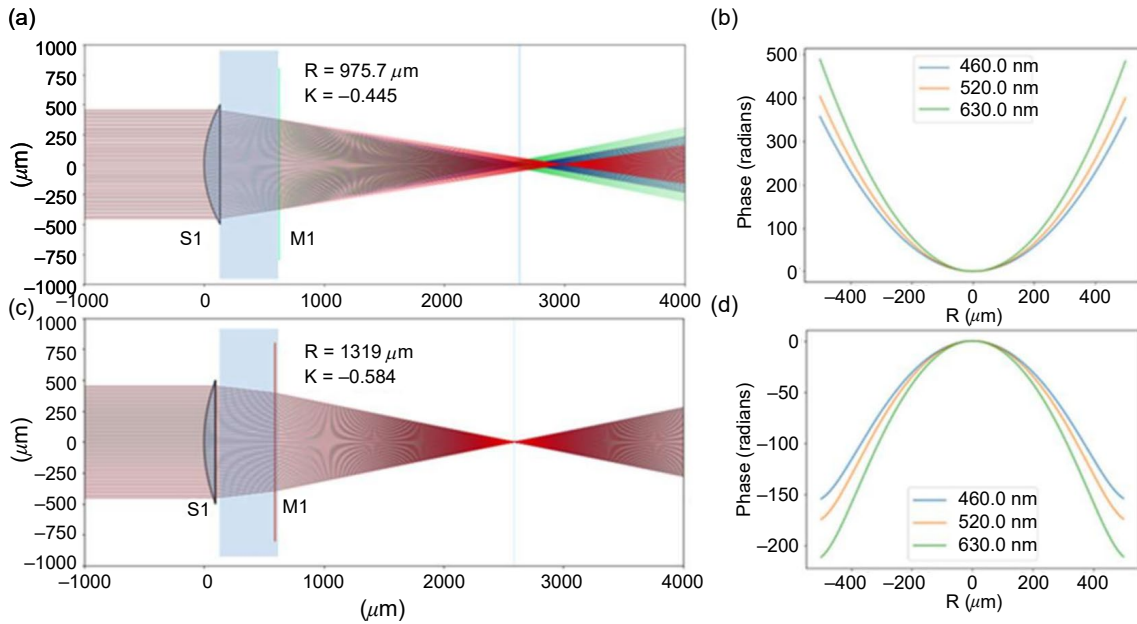


圖 5. (a) 優化前的光線追跡 (b) 優化前的超穎透鏡相位分布三種波長 (460、520、630 nm) 的相位輪廓 (c) 優化後的光線追跡 (d) 優化後的超穎透鏡相位分布。⁽¹⁸⁾

在可見光波段，2021 年 Wang 團隊在球透鏡前加入超穎校正器⁽²⁶⁾，通過預先調製光線進入球透鏡前的波前，改善球面透鏡的聚焦效率與品質，如圖 6 說明了混合系統的工作概念。由於球透鏡受到顯著的球面像差影響，入射光無法完美聚焦於幾何焦點。因此，如圖 6 的插圖所示，呈現出嚴重的球面像差。相反地，超穎校正器在光線入射到球透鏡之前提供了預修正波前。通過適當地設計和控制超穎校正器的相位分佈，可以消除球透鏡的球面像差，光線能夠良好聚焦並具有更小的光斑尺寸。

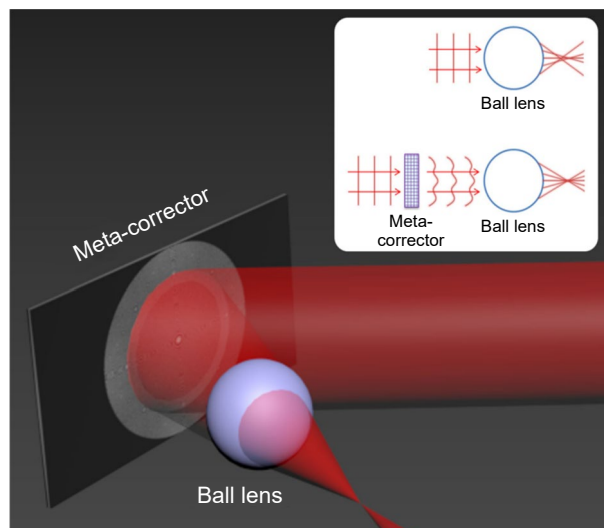


圖 6. 球透鏡搭配超穎校正器的工作概念示意圖。插圖顯示當加入由超當超穎校正器對入射光波前進行預調制時，可有效消除球透鏡的像差。⁽²⁶⁾

圖 7 呈現橫截面光強分布的對比分析。圖 7(a) 顯示僅使用球透鏡時，由於嚴重的球面像差，光強分布呈現明顯的發散，聚焦品質不佳。圖 7(b) 則展示球透鏡搭配超穎校正器後的結果，光強分布顯著改善，呈現清晰的聚焦特徵，證實超穎校正器有效補償了球面像差。

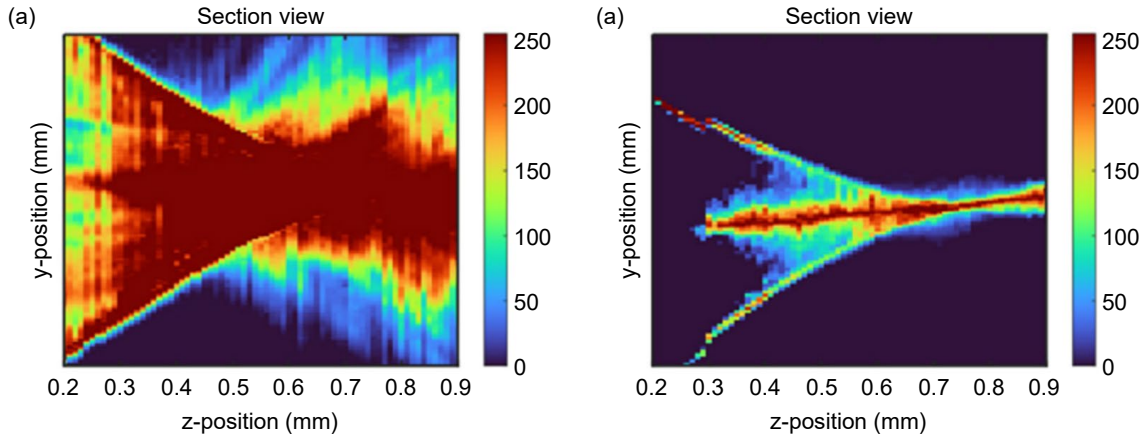


圖 7. (a) 僅使用球透鏡的光強分布。(b) 球透鏡搭配超穎校正器的光強分布。⁽²⁶⁾

在實際光學系統應用中，市售光學元件往往存在不可忽視的殘餘像差問題。這些像差的產生有多重原因：首先，製造過程中的加工精度限制和裝配公差會導致實際元件與理想設計之間存在偏差；其次，光學材料本身的色散特性、折射率均勻性等物理限制也會引入額外的像差；此外，為了平衡成本、重量、體積等實際考量，設計者往往需要在光學性能上做出一定程度的妥協。特別是在大量生產的商用產品中，為了控制製造成本和保持產品一致性，通常會採用較為保守的設計參數，這也使得殘餘像差成為普遍存在的現象。

這些商用光學元件通常是經過精密封裝的固定結構。其內部的透鏡間距、曲率半徑、透鏡厚度、材料選擇等關鍵光學參數均已在出廠時確定並固定，形成一個整體模組。對於使用者而言，這些封裝好的光學元件如同「黑盒子」，無法對其內部設計進行拆解、調整或重新優化。即使使用者發現系統存在明顯的像差問題，也難以通過調整內部參數來改善性能。這種結構上的限制使得傳統的像差校正方法難以直接應用。

傳統上，若要改善這類封裝系統的光學性能，通常有幾種途徑：一是更換整個光學模組，選用更高階、像差更小的產品，但這往往意味著顯著增加的成本支出；二是重新設計整個光路系統，加入額外的傳統校正透鏡組，但這會增加系統的體積、重量和複雜度。這些方法不僅成本高昂，也可能涉及複雜的系統整合問題，在許多實際應用場景中較難運行。在這種背景下，加入額外的校正器 (如超穎表面校正器或繞射光學元件) 成為一種實用的解決方案。這類新型校正器可以設計成超薄、輕量化的平面光學元件，僅需置於現有光學系統的適當位置，通過精心設計的微結構陣列引入特定的相位調制，來補償原系統的殘餘像差。此方法具有多重優勢：可在不改動原有光學系統架構的情況下，實現「即插即用」式的性能提升；其次，能夠有效補償球面像差、彗差、像散、場曲等多種像差類型；相較於傳統校正方案，這類校正器通常更輕薄、更易於整合，其設計靈活性高，可針對特定系統的像差特性進行客製化優化。這種創新的校正方式不僅保留了原有系統的設計優點和成本優勢，更提供了一種經濟且高效的光學性能提升途徑，特別適用於對現有商用光學系統進行性能升級、延長產品生命週期，或是在資源受限條件下實現高品質成像的應用場景。

2024 年，Wang 團隊特別針對近紅外波段設計了一超穎校正器，用以減輕庫克三片式透鏡的像差問題，其光束追跡圖如圖 8(a)⁽²⁷⁾。庫克三片式透鏡自 1893 年由 H. Dennis Taylor 取得專利以來⁽²⁸⁾，一直是許多商用鏡頭設計的基礎，其由兩片正透鏡和一片中央負透鏡組成的經典配置，能夠同時校正多種像差。然而，即使經過多年的優化發展，這種經典設計仍存在一些殘餘球面像差^(9, 29, 30)，影響其在高解析度成像任務中的表現。

該研究者指出，與提供聚焦和像差校正雙重功能的完整超穎透鏡不同，超穎校正器僅作為相位補償。在該混合光學系統中，傳統折射透鏡提供主要聚焦能力，而超穎校正器補償殘餘像差。這種功能分工降低了超穎表面的設計複雜度，允許使用更平滑的相位分布，從而提高繞射效率並簡化製造過程。圖 8(c) 顯示了使用和圖 8(b) 不使用超穎校正器的 Cooke 三重透鏡的焦點測量結果。傳統庫克三片式透鏡的中心半高全寬為 $5.68 \mu\text{m}$ ，並有明顯的側瓣。而使用超穎校正器後降至 $4.03 \mu\text{m}$ ，周邊側瓣強度減少，焦點能量集中度提高。

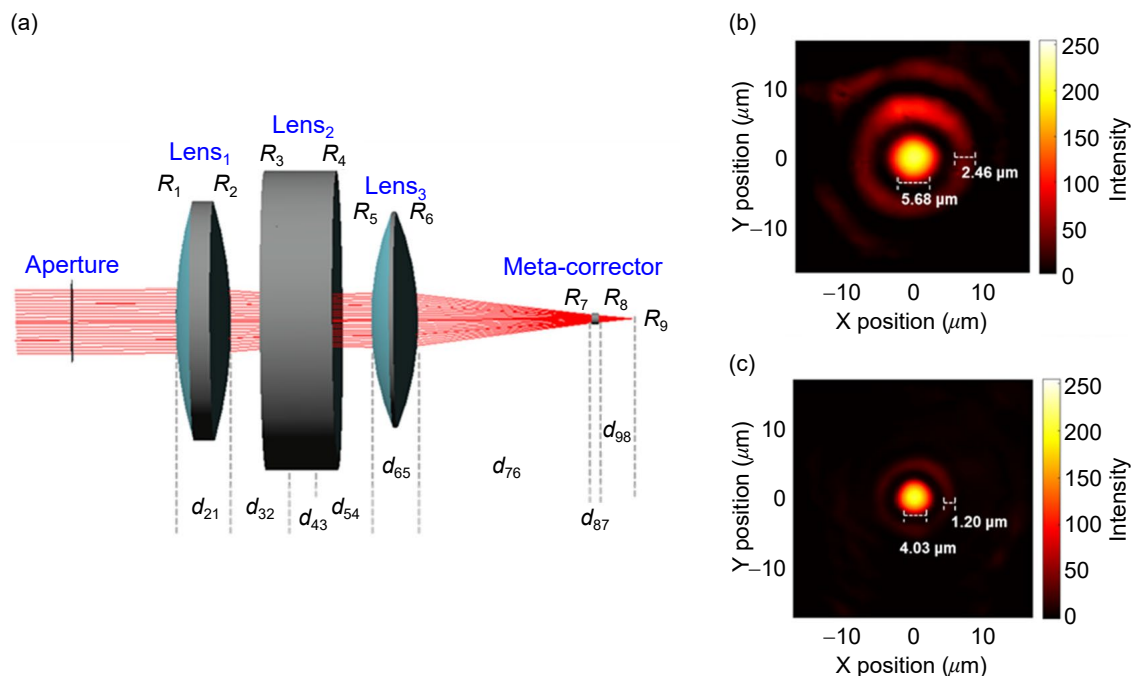


圖 8. (a) 庫克三透鏡加上超穎校正器光追跡圖。(b) 僅庫克三透鏡組 (c) 加入超校正器量測的聚焦點強度分布⁽²⁷⁾。

如果要讓單一片超穎透鏡同時負責聚焦和消除球面像差，會導致相位分布變得非常陡峭。這種劇烈的相位變化不僅讓相位調製變得困難，也會大幅降低光學效率。從圖 9(a) 和 (b) 可以看到，單一片超穎透鏡的結構和相位分布呈現出明顯的陡峭特徵。當使用庫克三片式透鏡搭配超穎校正器的混合系統後 (圖 9(c)) 情況有了顯著改善。從圖 9(b) 與圖 9(d) 的對比可見混合光學系統的優勢。傳統單一超穎透鏡設計需要高達 4000 餘徑度的邊緣相位調製，相位梯度十分陡峭。採用混合架構後，庫克三透鏡組承擔了大部分聚焦功能，使得超穎校正器僅需約 30 徑度的邊緣相位，在同樣透鏡尺寸下，使得相位梯度變得更平緩，平緩的相位分布帶來兩個實際好處：一是相位調製變得容易許多，二是整體光學效率得到提升。這種設計的關鍵在於功能分工。庫克三片式透鏡負責主要的聚焦工作，提供大部分光學功率；超穎校正器則專門用來補償殘餘的球面像差，只需要引入相對平緩的相位調製。這樣的分工

不但簡化了超穎表面的設計，也讓奈米結構的製造變得更可行。較平滑的相位分布意味著相鄰奈米結構之間的相位差較小，可以使用較大的結構週期，降低對製造精度的要求。同時也減少了製造誤差造成的影響，提高了系統的穩定性。

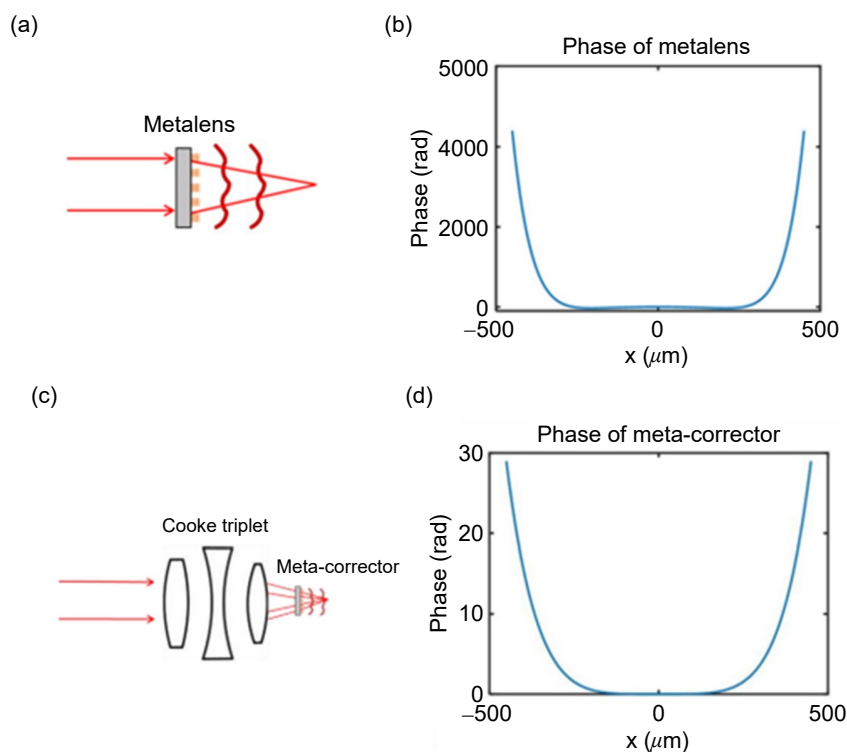


圖 9. (a) 單一超穎透鏡 (b) 單一超穎透鏡相位分布 (c) 庫克三透鏡加上超穎校正器 (d) 超穎校正器位分布⁽²⁷⁾。

除了作為現有系統的後期校正方案外，混合光學系統還提供了另一個設計思路。在系統開發的初始階段，設計者可以將折射透鏡與超穎透鏡作為一個整體進行優化。這種共同優化的策略能讓兩種元件的光學特性互補，找到最佳的參數組合，從根本上達成更優異的成像品質。

這種同時設計方法還能在保持優異光學性能的同時，有效簡化系統結構。例如，原本需要五片或六片透鏡才能達到的成像品質，在加入超穎校正器後，可能僅需三片或兩片透鏡即可實現。這不僅降低了系統的重量和體積，也減少了製造成本和組裝複雜度。對於需要輕量化、低重載設計的應用場景，如無人機載光學系統、可穿戴式裝置、或太空光學儀器等，這種優勢尤為顯著。

為了更具體地展示這種協同設計策略的實際成效，圖 10 中呈現了一個典型的混合光學系統實例。該系統採用矽透鏡 (Si-lens) 作為前端元件負責主要的光線收集，後端則配置超穎透鏡進行精密的像差校正。這種前後配合的緊湊配置充分體現了混合系統在空間利用效率上的優勢。從成像品質評估結果可以看出，該系統在不同視場位置都展現出優異的性能表現。點擴散函數 (spot size) 分析顯示，無論是軸上還是離軸位置的成像點都保持良好的聚焦特性。更重要的是，調制傳遞函數 (modulation transfer function, MTF) 曲線顯示，系統在各個

視場位置的表現都接近繞射極限，即使在高空間頻率下仍維持良好的解析度，證明了這種混合設計能夠在大視場範圍內實現高品質成像。這個實例驗證了協同設計理念的可行性：透過將傳統折射光學與超穎表面技術結合，不僅能夠簡化系統結構、縮小體積，更能在保持甚至提升光學性能的前提下，為未來的緊湊型光學系統開發提供了可實踐的路徑。

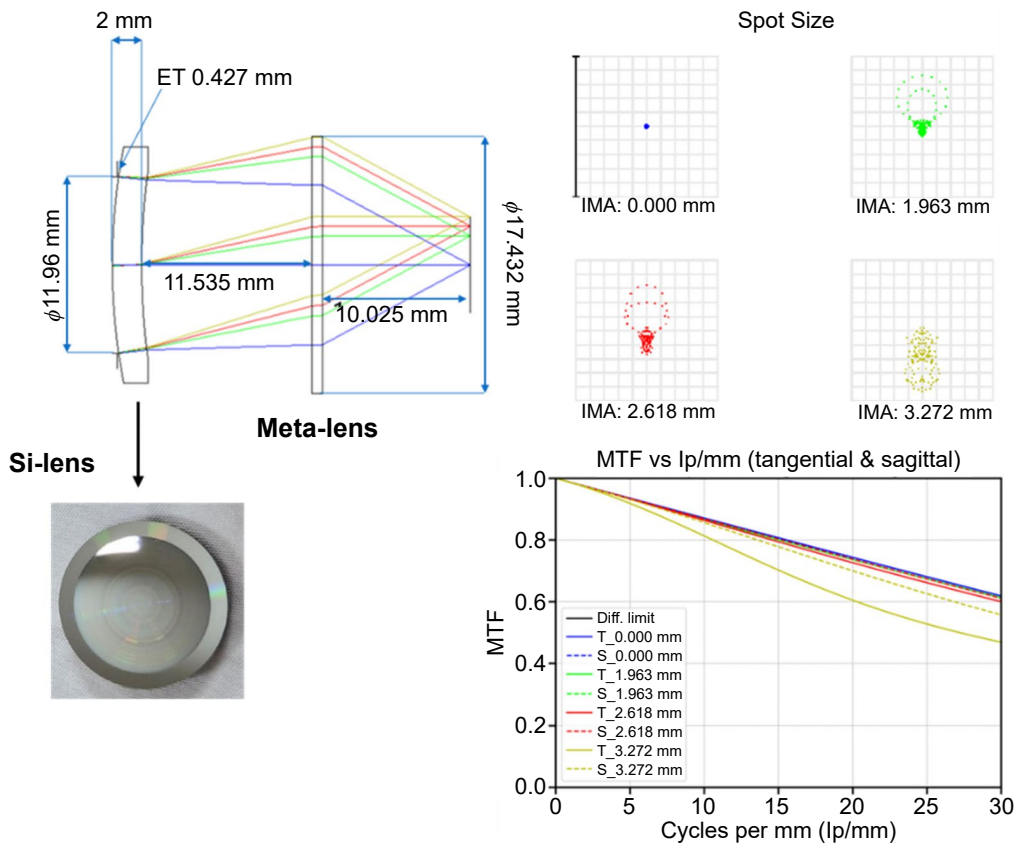


圖 10. 矽透鏡與超穎透鏡混合光學系統設計與性能評估。

八、結論

超穎透鏡技術的發展為光學系統設計帶來了新的可能性。雖然它具備輕薄、易於整合等優勢，但在實際應用中，單片超穎透鏡要同時達成高數值孔径、消色差與像差校正，往往會遭遇相位梯度過陡的問題，進而導致製造困難與效率降低。這些技術瓶頸使得純超穎透鏡系統難以直接取代傳統光學元件。混合光學系統的概念提供了務實的解決途徑。讓傳統透鏡負責主要的聚焦功能，超穎表面專注於像差修正，這樣的分工不僅降低了超穎結構的設計難度，也改善了整體的光學效率。從多個研究案例可以看到，無論是消色差，像差校正，許多團隊都證明了這種混合策略的可行性。

在實務應用上，混合系統有兩種主要的使用方式。一種是針對已封裝的商用光學模組，透過額外加入超穎校正器來改善殘餘像差，這對於需要升級現有系統的場合特別實用。另一種則是在設計初期就將折射與超穎元件一起考慮，透過協同優化來達成更好的性能，同時還能簡化系統結構、降低重量。讓混合光學系統真正普及，還需要克服製造成本與量產技術的

挑戰。目前電子束微影雖然精度高，但不適合大量生產。未來發展出與 CMOS 製程相容的技術將有助於降低成本、提高產量。隨著這些技術逐漸成熟，混合光學系統在手機相機、醫療器材、車用光學等領域的應用前景值得期待。

參考資料

1. S. Banerjee, and L. Hazra, *Thin lens design of Cooke triplet lenses: application of a global optimization technique* (SPIE, 1998).
2. V. Blahnik, and O. Schindelbeck, *Advanced Optical Technologies*, **10**, 145 (2021).
3. KenRockwell.com, "Canon 50mm f/1.8 Original Metal Mount EF (1987-1990)," please refer to the website: <https://kenrockwell.com/canon/lenses/50mm-f1.8-ef.htm>.
4. D. R. Smith, J. B. Pendry, and M. C. K. Wiltshire, *Science*, **305**, 788 (2004).
5. J. Valentine *et al.*, *Nature*, **455**, 376 (2008).
6. X. Zhang, and Z. Liu, *Nature Materials*, **7**, 435 (2008).
7. B. Cheng, Y.-C. Lan, and D. P. Tsai, *Optics Express*, **21**, 14898 (2013).
8. B. H. Cheng *et al.*, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **19**, 4601305 (2013).
9. D. Lin *et al.*, *Science*, **345**, 298 (2014).
10. X. Li *et al.*, *Science Advances*, **2**, e1601102 (2016).
11. K. Huang *et al.*, *Laser & Photonics Reviews*, **10**, 500 (2016).
12. Y. Deng, *et al.*, *ACS Nano*, **15**, 18532 (2021).
13. Z. Ma, *et al.*, *Optics Letters*, **43**, 911 (2018).
14. W.-L. Hsu *et al.*, *Nanomaterials*, **12**, 1973 (2022).
15. P. Lalanne *et al.*, *Optics Letters*, **23**, 1081 (1998).
16. P. Lalanne, *et al.*, *Journal of the Optical Society of America A*, **16**, 1143 (1999).
17. M. Khorasaninejad *et al.*, *Nano Letters*, **17**, 1819 (2017).
18. J. Cheng, S. Jafar-Zanjani, and H. Mosallaei, *Scientific Reports*, **6**, 38440 (2016).
19. R. J. Lin, *et al.*, *Nature Nanotechnology*, **14**, 227 (2019).
20. J. Engelberg *et al.*, *Nanophotonics*, **9**, 361 (2020).
21. Moxtek, "Metalens Foundry Service," please refer to the website: <https://moxtek.com/optics-product/metalens-foundry/>.
22. E. Hasman *et al.*, *Applied Physics Letters*, **82**, 328 (2003).
23. M. Khorasaninejad, and F. Capasso, *Science*, **358**, eaam8100 (2017).
24. C.-Y. Yu, *et al.*, *Materials Science in Semiconductor Processing*, **170**, 107982 (2024).
25. S. Shrestha, A. Overvig, and N. Yu, "Multi-Element Meta-lens Systems for Imaging," *Conference on Lasers and Electro-Optics*, p. FF2B.8. (2019).
26. G.-Y. Liu *et al.*, "Refractive and Meta-Optics Hybrid System," *Journal of Lightwave Technology*, **39**, 6880 (2021).
27. 李宗翰, 基於超穎校正器改善庫克三透鏡的光學性能之研究, 國立中央大學光電科學與工程學系碩士論文, (2024).
28. H. D. Taylor, "Photographic objective lens," U. S. Patent, ed. (1895).
29. J. B. Caldwell, and D. T. Moore, *Applied Optics*, **25**, 3351 (1986).
30. C. G. Blough *et al.*, *Applied Optics*, **29**, 4008 (1990).

作者簡介

徐肇謙先生現為國立中央大學光電科學與工程所博士生。

Chao-Chien Hsu is currently a Ph.D. student in the Department of Optics and Photonics, National Central University.

陳彥鈞先生現為國立中央大學光電科學與工程所博士生。

Yen-Chun Chen is currently a Ph.D. student in the Department of Optics and Photonics, National Central University.

陳哲勤先生為國立彰化師範大學物理博士，現為國家實驗研究院國家儀器科技研究中心研究員兼任精密光機製造技術發展組長。

Che-Chin Chen received his Ph.D. in Physics from National Changhua University of Education. He is currently a Research Fellow and Director of Precision Optics Manufacturing Technology Division, National Center for Instrumentation Research, NIAR.

王智明先生為國立中央大學光電科學與工程所博士，現為國立中央大學光電科學與工程教授。

Chih-Ming Wang received his Ph.D. in Optics and Photonics Engineering from National Central University. He is currently a Professor in the Department of Optics and Photonics at National Central University.

許維綸先生為國立台灣大學物理所博士，現為科穎達股份有限公司的執行長。

Wei-Lun Hsu received his Ph.D. in the Department of Physics from National Taiwan University. He is currently a CEO in the MetaRoseta Co., Ltd.