

超穎介面與奈米光子元件

Metasurfaces and Nanophotonic Devices

張元蔚、劉艾音、沈品甄、曾思瑾、蕭惠心

Yuan-Wei Chang, Ai-Yin Liu, Ping-Chen Shen, Ssu-Chin Tseng, Hui-Hsin Hsiao

超穎材料為利用週期性次波長的微奈米結構來調控電磁波響應的人造材料，過去三維超穎材料受限於結構設計複雜在製程上具有挑戰性，以及金屬結構在光學頻率下本身存在的損耗，使得許多已提出的潛在應用仍難以實現。相較之下，具有較低維度的超穎介面在實現上更具可行性，超穎介面通常由具有空間變化幾何結構、且間距小於波長的微奈米結構陣列所組成，能夠調控電磁波的振幅、相位與極化響應，進而精確控制其傳播方向與波前形貌。藉由這些特性，超穎介面可應用於發展各式各樣的超薄光學元件，如超穎透鏡、波片、檢偏器、非線性光學元件、全像元件以及光學感測器等。

Metamaterials (MMs) are artificial composite materials composed of periodic subwavelength micro- and nanostructures designed to manipulate electromagnetic responses. In the past, three-dimensional metamaterials suffered from significant fabrication challenges due to their complex structural designs and the intrinsic metallic losses of plasmonic components at optical frequencies. Metasurfaces, characterized by a reduced dimensionality of MMs, possess much feasibility in realization. They usually consist of flat optical resonator arrays with spatially varying geometry and subwavelength separation. Upon the interaction with light, the engineering spatially varying amplitude, phase, and polarization response provides new degrees of freedom to accomplish polarization control and wavefront shaping. Their outstanding optical properties have led to the development of versatile ultrathin optical devices such as meta-lenses, wave plates, polarimetry, nonlinear optical devices, meta-holograms, optical sensors, etc.

一、前言

光通過材料的行為可以透過材料的兩個物理量來決定：介電常數 (ϵ) 和磁導率 (μ)，大部分自然材料都是屬於介電常數和磁導率大於零的材料，如：空氣、水、玻璃…等等，而介電常數和磁導率皆小於零的材料在自然界中並不存在，擁有這樣特性的材料會使光在其中的傳播行為不同於傳統認知：出現負折射率的現象，違反了傳統折射定律，如果能夠開發出這樣的人造超穎材料 (metamaterials)，便可能達成過去人類直覺無法達成的特殊應用，例如：超級透鏡 (super-lensing)、隱形斗篷 (invisible-cloaks) 等。

然而過去受限於製程技術，許多三維超穎材料的應用仍處於理論或研究階段，主要是因為其結構複雜且尺度微小，使得其製程難度高、難以大量生產，同時金屬結構在光學頻率下本身存在的損耗難以克服，因此更多人轉而研究更具實現性與可行性的二維超穎介面

(metasurfaces)。超穎介面由具有空間變化幾何結構、且間距小於波長的微奈米結構陣列所組成，當一束入射電磁波照射到這些隨空間變化微奈米結構，由於每個奈米天線的幾何形狀的不同，與之交互作用後之散射光的振幅、相位與偏振態也各自相異，因此可藉由精心設計這些微奈米結構來調製散射光在空間中的振幅、相位與偏振態分布，使得其電磁波傳遞波前 (wavefront) 被重新塑形，產生偏折、聚焦、偏振態改變或轉換成渦旋光束等光學現象，進而開發出各式多功能超薄光學元件，如光束控制、波片、檢偏器、超穎透鏡、非線性光學、感測應用等。隨著製程技術的進步，超穎介面有機會在光通訊、光達、生醫感測、醫療影像、擴增實境與虛擬實境等領域發揮更廣泛的影響力，成為新世代光子技術的核心之一。

二、超穎透鏡 (Meta-Lenses)

傳統透鏡利用設計透鏡的曲率，使原始入射光束經由光行進時累積相位，而在匯聚焦點處彼此具有相同的等效光程差；超穎透鏡則是突破傳統的方法，利用在平面空間中設計排列不同幾何形狀的次波長奈米結構，由於不同幾何形狀的奈米結構跟入射光波交互作用後具有不同的振幅和相位響應，因此可藉由精心設計這些奈米結構排列組合，使得其相位響應在空間分布上符合透鏡公式，而達成相同的聚焦效果。以圖 1 為例，超穎介面藉由排列不同幾何形狀的奈米結構，使得其相位響應依特定梯度變化排列，則入射電磁波的波前就會根據空間相位梯度分布而偏折⁽¹⁻³⁾；而當設計的超穎介面空間相位分布符合透鏡公式時，則能使光匯聚於設計之焦點處，就形成了超穎透鏡。圖 2(a) 與 (b) 顯示了傳統透鏡與超穎透鏡的比較，傳統光學透鏡利用設計透鏡曲面來實現光的偏折，藉由光行進時累積相位，使得聚焦光束在焦點處具相同的等效光程差，但同時也由於需要空間傳遞相位的累積使得其體積難以縮小，即便是改良後的菲涅耳透鏡 (Fresnel lens) 也難以完全消除此一缺點，但超穎透鏡的原理使其體積可大幅縮減，且其製造技術與現今的半導體製程高度匹配，整合相對容易。

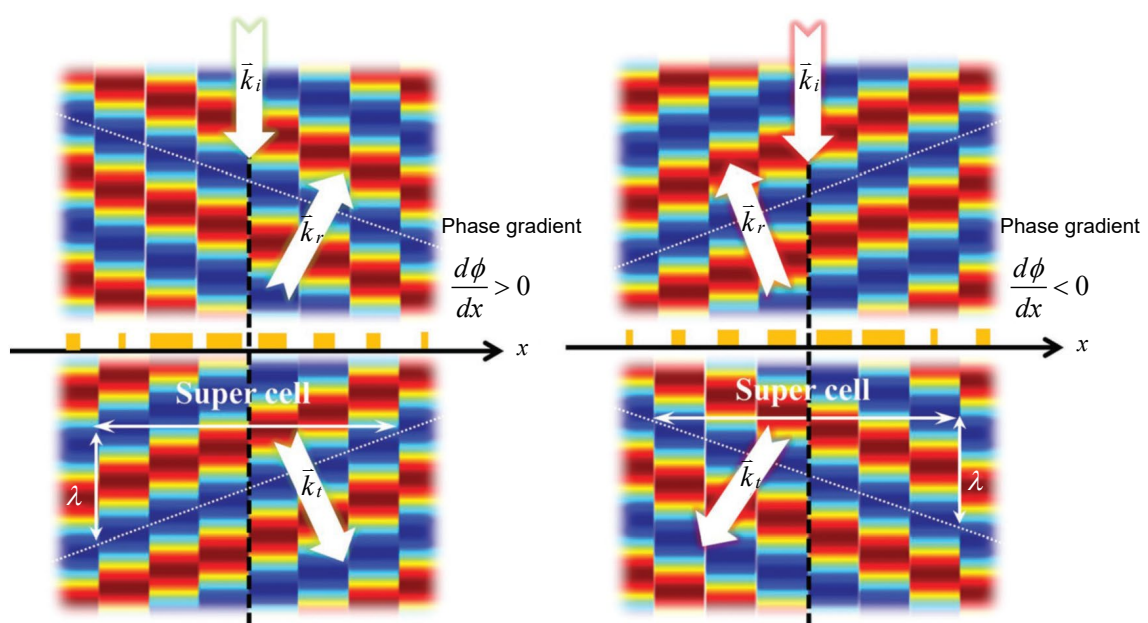


圖 1. 藉由設計超穎介面之空間相位梯度分布，可控制電磁波的波前行進方向⁽¹⁾。

此外，有別於傳統透鏡，近年來各式超穎透鏡的進階設計已達成多功能的光操控特性，如圖 2(c)、(d) 所示，超穎透鏡可使不同波長的光焦距於空間中不同的位置，也可以根據入射光的極化特性使得光聚焦在不同的焦點上，或是達成在寬頻的可見光波段範圍皆具有相同焦距之消色差超穎透鏡。此外，現今超穎透鏡的發展已可達成過去傳統光學技術需要組合好幾種光學元件才能達成的目標，如圖 3 所示，過去要產生聚焦之向量漩渦光束 (vector beams) 須由偏振轉換器 (polarization converter)、二元相位濾波器 (binary phase filter) 與高數值光圈透鏡 (high-NA lens) 三個光學元件組合來達成，而現今可使用單一超穎透鏡設計也可達成相同的功能並且具高聚焦效率。

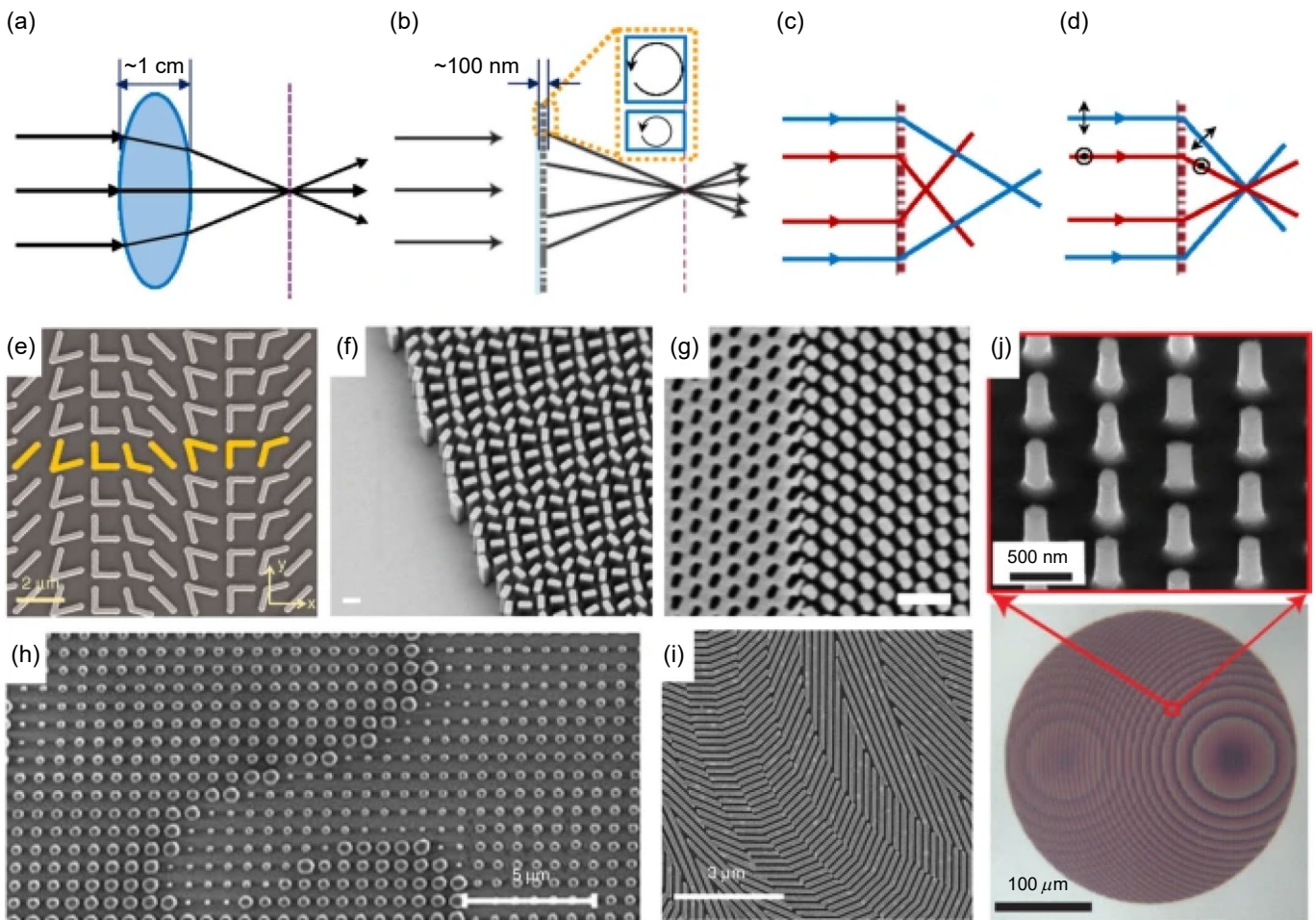


圖 2. (a) 傳統透鏡的聚焦原理；(b) 超穎透鏡的聚焦原理；多功能之超穎透鏡可控制 (c) 不同波長或 (d) 不同極化光具不同聚焦特性；(e-j) 各式超穎透鏡微結構影像⁽⁴⁾。

三、環形磁偶矩 (toroidal dipole) 超穎材料與感測器應用

在超穎材料中，利用人工設計的結構與電磁波的交互作用，展現出大自然中前所未見的光學現象，其中一種特別的電磁多極矩形式－環形磁偶極矩 (toroidal dipole)，在近年來受到廣泛關注。它與我們熟知的電偶極矩 (由正負電荷分離形成) 及磁偶極矩 (由環狀電流構成) 不同，環形磁偶極矩是由甜甜圈狀的閉合表面電流所感應出的特殊磁場分布 (圖 4(a))。由於其電磁場呈現反對稱分布，這種型態在傳統的多極矩展開中常被忽略。

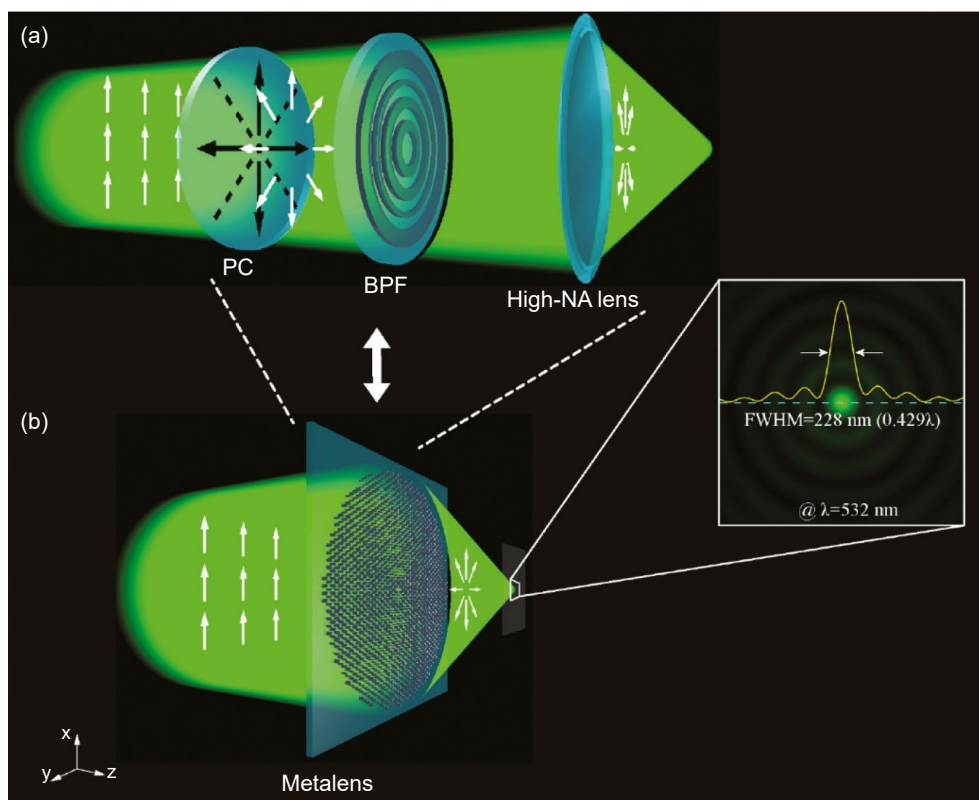


圖 3. 利用單一超穎透鏡達成過去需要組合三種光學元件的功能⁽⁵⁾。

儘管自然界中存在許多具有環狀結構的系統，例如 λ -核酸外切酶、噬菌體與環狀核糖核酸等，但這些結構所產生的環形磁偶矩通常非常微弱。其原因在於，三種多極矩的輻射強度與波長 λ 和分子尺寸 R 的關係分別為：電偶極矩 $\propto \frac{\lambda}{R}$ ，磁偶極矩 $\propto \left(\frac{\lambda}{R}\right)^2$ ，環形磁偶矩則更弱，為 $\propto \left(\frac{\lambda}{R}\right)^3$ 。因此，只有在極小尺寸的分子或結構中，環形磁偶矩的貢獻才有可能被顯著觀察。為了有效放大並觀察環形磁偶矩的光學效應，有研究團隊發展出多種奈米結構設計，其中雙裂環共振器 (split-ring resonator, SRR) 因具備良好的電流環路控制能力，已被證實能有效激發顯著的環形磁偶矩響應。例如，有研究成功將此設計應用於肺癌細胞的檢測，利用環形磁偶矩對微弱生物訊號的高靈敏度，提高了檢測準確性 (圖 4(b))⁽⁷⁾。

近年來則發現利用簡易的週期性介電質 (dielectric) 圓柱設計，在垂直入射的外加光源激發下，可在近紅外波段產生平行於基板的環形磁偶矩。如圖 4(c) 所示，週期性的矽奈米圓柱設計製作於玻璃基板上，上面覆蓋旋塗式玻璃 (spin-on-glass, SOG)，在適當的圓柱深寬比優化下，可在矽奈米圓柱中產生環形分布的磁偶極矩，進而產生平行於基板的環型磁偶矩。由於環型磁偶矩共振模態特殊的電磁場分布，相較於電偶極矩或磁偶極矩，環型磁偶矩展現了更高的環境折射率靈敏度，可在單位折射率變化下，量測得到高達 459 奈米的波長變化量。

此外，介電質材料由於本身材料低損耗的特性，基於介電質材料設計之微結構可實現高品質因子 (quality factor, Q-factor) 的光譜特徵，過去在介電質奈米共振腔的設計上常利用電偶極或磁偶極之 Mie 共振，近年來在全介電質超穎介面 (all-dielectric metasurface) 的設計上則著重於高階模態的運用或利用「連續譜中的準束縛態」(quasi-bound states in the continuum,

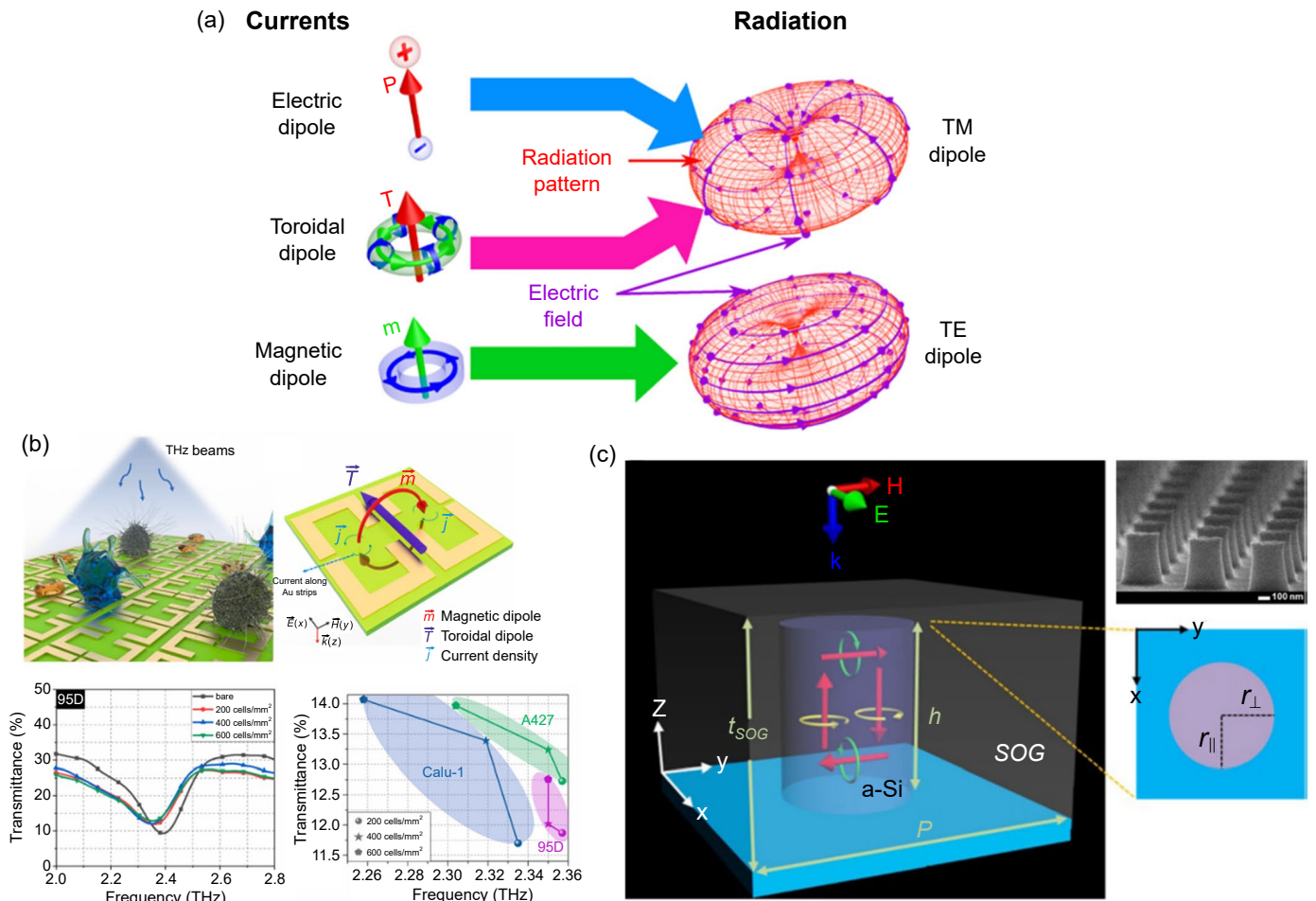


圖 4. (a) 環形矩示意圖⁽⁶⁾。(b) 雙裂環共振器激發環形矩之生醫感測器應用⁽⁷⁾。(c) 矽奈米柱陣列之環形磁偶矩超穎材料⁽⁸⁾。

以下簡稱 Q-BIC) 的設計概念，來實現高品質因子的共振模態。連續譜中的束縛態 (BIC) 理論上為位於可輻射的連續態能譜中，卻因結構的對稱性或干涉條件，能完全避免輻射洩漏至外界，因此具備理論上無限大的品質因子。然而，這樣完美的束縛也意味著無法與外界交互作用，不僅在光譜中難以觀測，也限制其實際應用，且由於 BIC 與外加電磁波完全解耦合，因此無法由遠場波源激發 BIC。儘管如此，研究人員發現可藉由特殊方式產生連續譜中的準束縛態，其概念是透過在結構中引入微小的不對稱，打破原本的對稱保護，使共振模式可與外加電磁波交互作用，進而在光譜上可被觀測到與調控 (圖 5a)⁽⁹⁾。

圖 5(b) 顯示各種不同破壞結構對稱性的設計，例如：製造結構缺陷或突起、控制結構旋轉角度等⁽¹⁰⁾，便可激發出高品質因子的窄頻 Q-BIC 共振。這類設計已在理論與實驗中被證實能提升光學系統對於共振模態頻寬的可調控性，並廣泛應用於濾波器、感測器及非線性光學元件等領域。圖 5(c) 所示為週期性成對矽奈米柱陣列構成的超穎介面⁽¹¹⁾，將兩個成對奈米長方柱通過改變其旋轉角來破壞結構的平面對稱性，以激發具有超高品質因子的 Q-BIC 共振，並應用於光學折射率感測，實驗結果 (圖 5(d)) 顯示，在單位折射率變化下，此元件可達 608 奈米的折射率靈敏度，同時品質因素 (figure of merit) 高達 46，展示了全介電質超穎介面作為高靈敏光學元件的潛力。

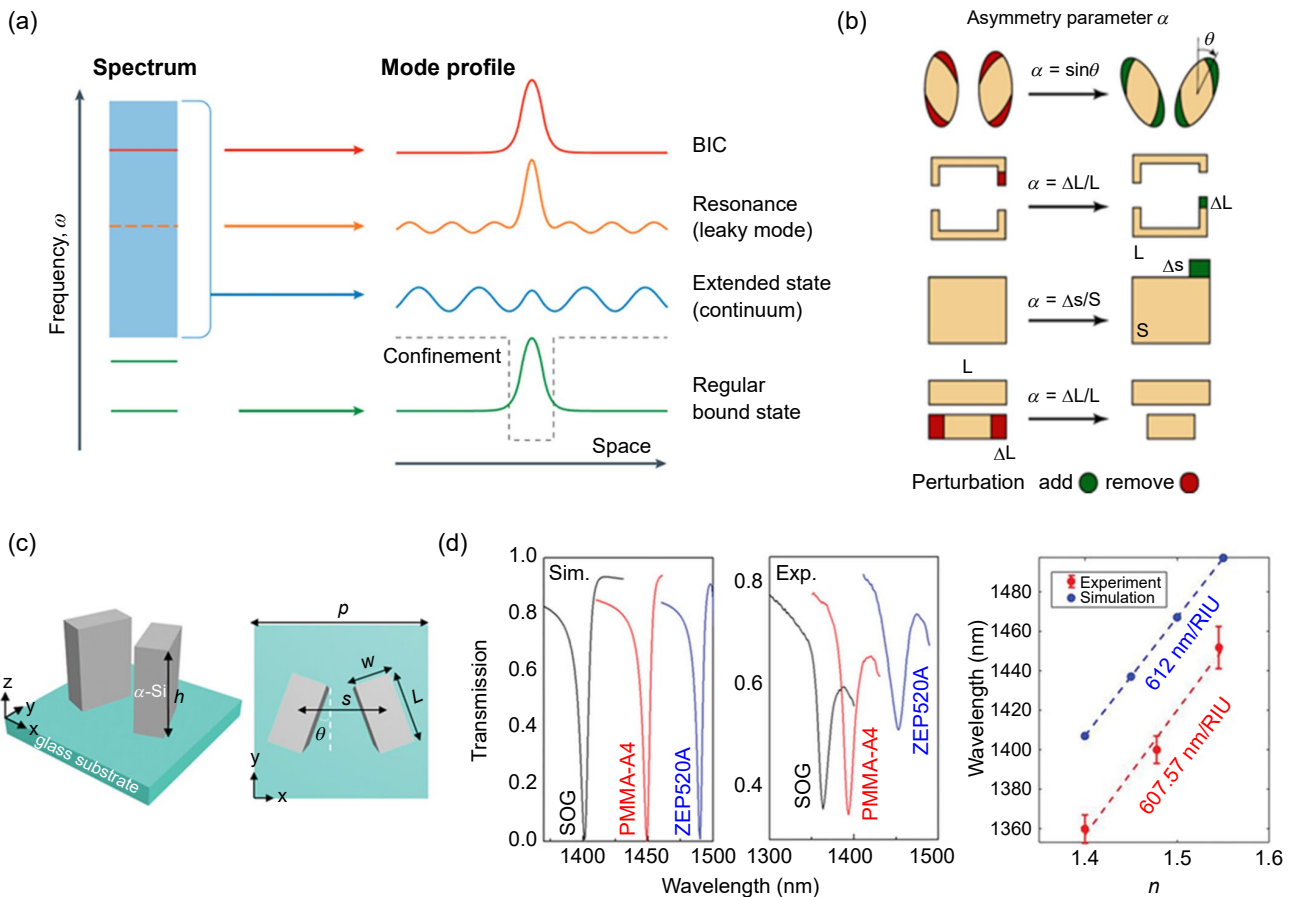


圖 5. (a) 在結構中引入微小的不對稱性，打破原本的對稱保護，使 quasi-BIC 共振可在光譜中被觀察到⁽⁹⁾；(b) 各種不同破壞結構對稱性的設計⁽¹⁰⁾；(c) 週期性成對矽奈米柱陣列設計，藉由調控奈米柱旋轉角來控制其對稱性；(d) 當覆蓋不同折射率的材料於元件表面上時，可從光譜上觀察到明顯的共振波長位移，以計算感測靈敏度⁽¹¹⁾。

四、非線性超穎材料

除了在線性光學上應用，環形磁偶矩超穎材料在非線性光學中也展現出巨大潛力。傳統的非線性晶體通常需依賴高功率雷射光源，同時滿足相位匹配條件以產生顯著的干涉增強效應。相對地，非線性超穎材料透過結構共振增強光與物質的交互作用，進而放寬了非線性轉換中的相位匹配需求，同時可利用現今的半導體製程技術製作於各式基板上，這些特性使得非線性超穎介面極具潛力整合於積體光路平台中。過去各式非線性金屬或介電質超穎介面已被開發並產生二倍頻／三倍頻訊號 (second harmonic generation, SHG/third harmonic generation, THG)、高次諧波訊號 (high harmonic generation, HHG) 和四波混頻訊號 (four wave mixing, FWM) 等。舉例來說，非線性三倍頻是一種典型的頻率轉換過程，當入射光強度足夠高時，材料中的三階極化率 (third-order susceptibility) 將不再可忽略，進而導致三倍頻的產生，也就是三個具有相同頻率的光子在非線性材料中相互作用，產生一個頻率為原來三倍的新光子。這種過程可將近紅外光轉換為可見光，廣泛應用於高解析顯微鏡、光學成像與光源開發中。如圖 6(a) 所示，介電質超穎介面透過改變圓柱的直徑，有效調控磁偶極矩、電偶極矩與環形磁偶矩之間的共振條件，藉由這三種模態之間的交互作用成功

激發廣義 Kerker 效應 (Kerker effect)。這種效應能增強在介電質共振腔內的偏域電場強度，並同時抑制光的背向散射，使得其三倍頻訊號強度在實驗中相較於單一環形磁偶矩樣品有 17 倍以上的增益，理論模擬計算甚至預測可達 200 倍以上⁽¹²⁾。

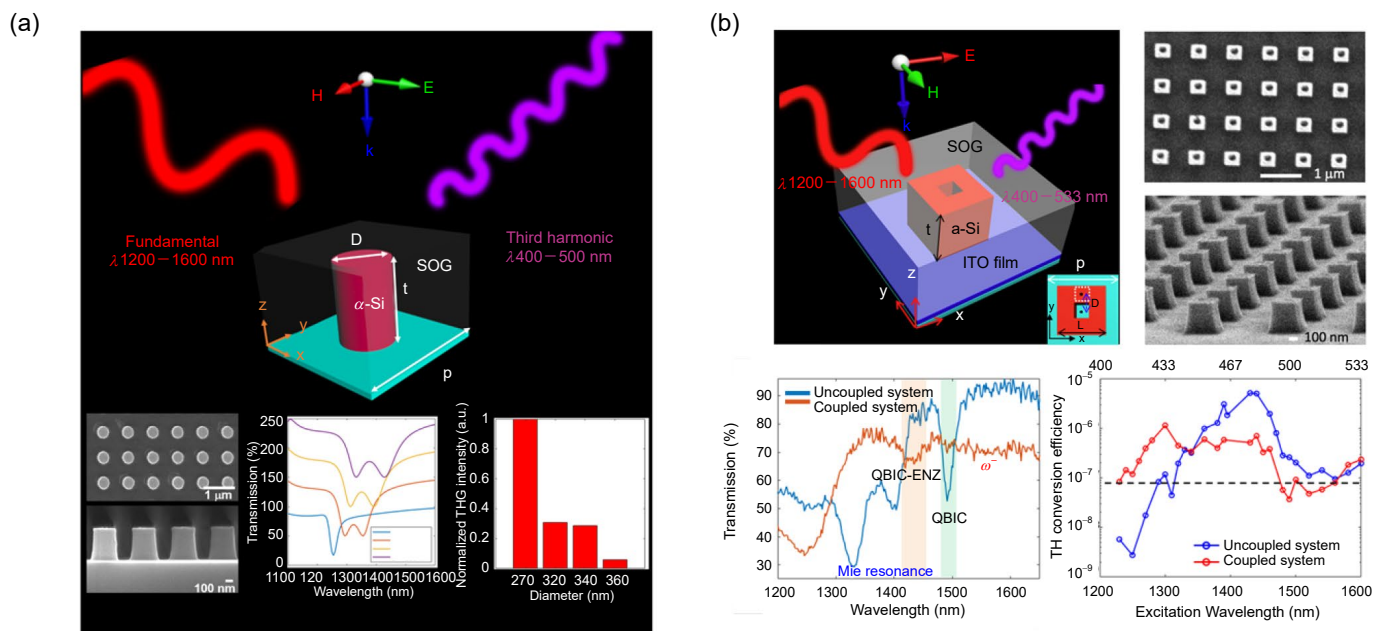


圖 6. 環形磁偶矩超穎材料於非線性三倍頻之應用。(a) 矽奈米圓柱之多模態耦合設計⁽¹²⁾。(b) 矽奈米立方體與氧化銦錫薄膜的強耦合結構⁽¹³⁾。

為了進一步增加非線性訊號的頻寬，許多研究團隊開始著重於將超穎介面設計與功能性材料結合，形成複合式系統，這些功能性材料如透明導電氧化物或二維材料本身具有很高的非線性極化率，可進一步提升非線性光學元件的轉換效率並拓展其工作頻寬。例如：氧化銦錫 (ITO) 薄膜由於本身具有很高的二階與三階非線性極化率，同時具有電導率 (permittivity) 實部數值在近紅外波段趨近於零的特性，稱為 ENZ (epsilon-near-zero) 波長。過去已有一些研究發現利用氧化銦錫薄膜，在斜向入射時可有效激發電漿模態進而產生很強的非線性效應；近年來，許多研究更進一步結合金屬奈米天線設計與氧化銦錫薄膜的 ENZ 模態發生強耦合，可用以增益材料折射率的非線性效應。圖 6(b) 則顯示了結合矽奈米立方體陣列設計與氧化銦錫薄膜之複合材料系統，藉由調控 Mie 共振、Q-BIC 與 ENZ 模態之強耦合，實驗結果顯示，在 1230 至 1600 奈米的入射光波長範圍內，皆可產生轉換效率達到 10^{-7} 的三倍頻訊號，涵蓋藍光波段範圍 (410 至 450 奈米)⁽¹³⁾。

五、超穎材料的製程

超穎材料的製備流程與過去製造半導體積體電路的方法有許多共通之處，舉例來說，奈米光刻技術、電子束微影術與聚焦離子束微影術等為現今常見的超穎材料製造方法。奈米光刻技術為將欲製作的微影圖案先設計於對應的光罩上，並在樣品上塗布適當的光阻層，即可利用光刻機將光罩的圖案轉印到樣品的光阻上，之後經由曝光、顯影便能將元件的圖案顯現

出來，再經過沉積材料與舉離等步驟，便可製做出設計好的超穎元件，而結構的精密度、製造速度，則與微影圖案的設計、光阻種類、光刻機設計等等因素皆有關聯。電子束微影術與聚焦離子束微影術則是利用聚焦後的高能量電子束或離子束與樣品表面的光阻反應，可以直接在樣品的表面繪製奈米尺寸的任意圖案，聚焦離子束甚至可以利用單一步驟同時達成圖案的繪製與材料的移除，相較於傳統的光刻技術，他們提供了不一樣的設計彈性與製程精密度，但因受循序寫入的限制，製程時間往往遠高於傳統的光刻技術，更適合用於新型設計的開發與測試環節。

除了高精密度的製造要求以外，超穎材料在應用上更需面對低成本、大面積快速製造的挑戰，因此更多的複合型技術逐漸被開發出來，例如干涉型光刻、自組裝與奈米壓印光刻等技術。干涉型光刻技術是一種特殊形式的光刻，要求其光刻圖案要符合兩個或多個相干雷射光源的干涉，在製備大面積、簡單的週期性光柵時較常使用，當然此技術也可以用於更複雜的週期性二維結構，但需要先確定可以達成需要的干涉圖案；自組裝光刻則是利用分子、粒子間的吸引力與排斥力相平衡來達成大面積上的自組裝現象，此方法簡單且高效，可以用於大面積奈米結構的圖形化，但對微觀細節的控制則相對不甚完美；奈米壓印是另一種低成本、大面積、高產量的技術選擇，只要利用預先準備好的奈米壓印雕版，即可將奈米圖案壓印到樣品表面的可塑性塗層上，其原理就是利用可塑性塗層的機械變形來複製奈米圖案。上述這些複合型技術雖然相較於奈米光刻技術或微影術在製作上較為迅速、利於大面積製造，但往往犧牲了製程的極限線寬，故目前尤其在可見光波段的超穎元件製作上，仍存在技術上的突破與成本考量的挑戰。

六、結論

這些利用次波長微結構精密設計的超穎材料或超穎介面，藉由與電磁波之間的各種複雜交互作用，可實現許多有趣的光學現象與應用。其中環形磁偶矩超穎材料由於其特殊的電磁場分布，使得其光譜訊號對於微小尺度的折射率感測提升顯著，同時在共振腔中的強侷域近場也可用以增益非線性光學效應。而非線性介電質超穎介面具高熔點、可忍受較大雷射功率，同時也可利用現今的半導體製程技術製作於各式基板上，這些特性使得非線性超穎介面極具潛力整合於積體光路平台中，推動非線性奈米光學的發展與應用。近年來，這些超穎介面設計更進一步與功能性材料整合，除了利用功能性材料本身優異的光電性質外，並藉由強耦合效應可進一步提升非線性光學元件的轉換效率並拓展其工作頻寬，甚至可以透過光學調控或電控調制，來實現全光開關或電控開關，未來應用於高速光子元件中。

參考文獻

1. H.-H. Hsiao, C. H. Chu, and D. P. Tsai., *Small Methods*, **1** (4), 1600064 (2017).
2. N. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, *et al.*, *Science*, **334** (6054), 333 (2011).
3. F. Aieta, P. Genevet, N. Yu., *et al.*, *Nano Letters*, **12** (3), 1702 (2012).
4. D. Neshev, and I. Aharonovich, *Light Science & Application*, **7** (1), 58 (2018).
5. Z. P. Zhuang, R. Chen, Z. B. Fan, *et al.*, *Nanophotonics*, **8** (7), 1279 (2019).
6. V. Savinov, N. Papisimakis, D. P. Tsai, *et al.*, *Communications Physics*, **2** (1), 69 (2019).
7. C. Zhang, T. Xue, J. Zhang, *et al.*, *Nanophotonics*, **11** (1), 101 (2021).
8. H.-H. Hsiao and A. Y. Liu, *Laser and Photonics Reviews*, **16** (3), 2100404, 2022.

9. C. W. Hsu, B. Zhen, A. D. Stone, *et al.*, *Nature Reviews Materials*, **1** (9), 1 (2016).
10. K. Koshelev, S. L. epeshov, M Liu, *et al.*, *Physical Review Letters*, **121** (19), 193903 (2018).
11. H.H. Hsiao, Y. C. Hsu, A. Y. Liu, *et al.*, *Advanced Optical Materials*, **10** (19), 2200812 (2022).
12. A. Y. Liu, J. C. Hsieh, K. I. Lin, *et al.*, *Advanced Optical Materials*, **11** (19), 2300526 (2023).
13. A. Y. Liu, K. I. Lin, S. H. Tseng, *et al.*, *Advanced Optical Materials*, **13** (19), 2500084 (2025).

作者簡介

蕭惠心小姐為國立臺灣大學光電工程學研究所博士，現為國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系與光電工程學研究所副教授。

Hui-Hsin Hsiao received her Ph.D. in Graduate Institute of Photonics and Optoelectronics from National Taiwan University. She is currently an Associate Professor in the Department of Engineering Science and Ocean Engineering and Graduate Institute of Photonics and Optoelectronics at National Taiwan University.

張元蔚先生為國立交通大學材料科學與工程研究所博士，現為國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系博士後研究員。

Yuan-Wei Chang received his Ph.D. in the Department of Materials Science and Engineering from National Chiao Tung University. He is currently a Postdoctoral Researcher in the Department of Engineering Science and Ocean Engineering at National Taiwan University.

劉艾音小姐為國立臺灣大學光電工程學研究所博士。

Ai-Yin Liu received her Ph.D. in Graduate Institute of Photonics and Optoelectronics from National Taiwan University.

沈品甄小姐現為國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系碩士生。

Ping-Chen Shen is currently a M.S. student in the Department of Engineering Science and Ocean Engineering at National Taiwan University.

曾思瑾小姐現為國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系碩士生。

Ssu-Chin Tseng is currently a M.S. student in the Department of Engineering Science and Ocean Engineering at National Taiwan University.