

新聞稿

即時發放

恢復無損傳輸：港大物理學家利用合成複頻率 解決光學損耗 有望推動光子積體電路的發展

2024 年 1 月 24 日

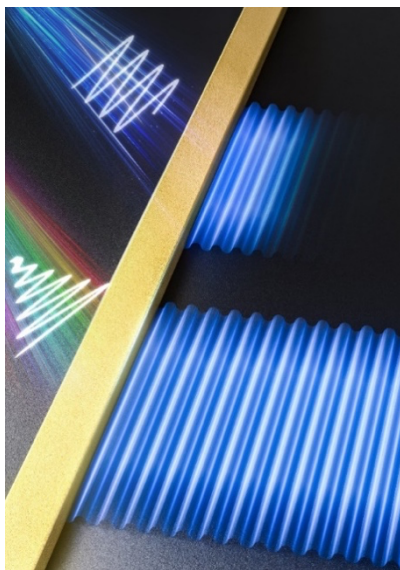


圖 1. 實頻率和合成複頻率激發下的極化子傳播示意圖。雖然在實頻率下的極化子波傳播距離有限，但是基於來自不同實頻率入射波組合的複頻率激勵，可以實現近乎無損的傳播。

由香港大學（港大）物理學系系主任（暫任）張霜教授與中國國家納米科學中心戴慶教授共同領導的合作研究團隊，在納米光子學領域中提出了一個解決光學損耗問題的方案。研究團隊提出了一種利用合成複頻率波(Synthetic Complex Frequency Wave, CFW) 來解決極化子傳播 (Polariton Propagation) 中光學損耗的方法。此發現提供了解決實際應用中的損耗問題。通過極化子傳播，可以在光學設備中實現更高效、更快速和更小尺寸的數據存儲和處理，這有利於提升電腦芯片和數據存儲設備、以及提升傳感器、成像技術和安全系統的精密度。他們的研究成果最近已在學術期刊《自然材料》(*Nature Materials*)上發表。

當光束與某些材料的表面相互作用時，會產生一種稱為表面等離激元（Surface Plasmon Polaritons）的現象，這種現象可以在微小的尺度範圍內限制光束，使光能夠在該材料的表面上傳播。聲子激化激元（Phonon Polaritons）則是一種將聲子（物質中的振動）和光束耦合在一起的現象。類似於表面等離激元，聲子激化激元也可以在微小尺度範圍內限制光束的傳播。這兩種激元現象具有高效能量儲存、局域場增強和高靈敏度等優點。然而，當它們與自然材料發生相互作用時會受到歐姆損耗（Ohmic Loss）的限制而導致能量耗散，從而令實際應用受到局限。

在過去三十年中，這個限制一直阻礙了納米光子學在傳感、超分辨成像和納米光子電路方面的進展；如能克服此損耗，將會顯著提升設備性能，促進傳感技術、高分辨成像和先進納米光子電路的發展。論文通訊作者張霜教授對其研究重點作出解釋：「為了解決光學損耗在應用上的問題，我們採用了一種創新的合成複頻率激發方法，透過實現虛擬增益，抵消了極化子系統中的固有損耗。為了驗證其成效，我們將其應用於聲子極化子傳播的系統，並觀察到極化子傳播性質因而得到顯著的改善。」論文的第一作者、港大物理學系博士後研究員管福鑫博士補充道：「我們通過在光頻範圍內使用聲子極化子材料（如 hBN 和 MoO₃）進行實驗來證明此方法的可行性。結果正如預期一樣，獲得了幾乎無損的傳播性質，與我們的理論預測一致。」

多頻率方法補償光學損耗

在這項研究中，研究團隊開發了一種創新的多頻率方法，以解決極化激元傳播中的能量損失問題。他們使用了一種特殊類型的波，稱為「複頻率波（Complex Frequency Waves）」，以實現虛擬增益來補償光學系統中的損耗。

一般音波保持恆定振幅 (Amplitude) 或強度 (Intensity)，而複頻率波可同時表現出振盪和衰減行為。這種特性令波的行為能夠更全面地展示，並能夠對能量損失進行補償。雖然頻率通常是實數的形式來表達，但它也可以具有虛部 (Imaginary Part)。這個虛部告訴我們波隨着時間的推移是增強還是衰減。具有複頻率的波，其虛部為負 (正) 數，會隨時間衰減 (放大)。然而，在光學中直接對複頻率波的激發進行測量是具有挑戰性的，因為須運用複雜的時域測量 (Complex Time-Gated Measurements)。

為了克服這個問題，研究人員採用了傅里葉變換 (Fourier Transformation) ——一種數學工具，將截斷的複頻率波 (CFW) 分解成具有各自實頻率的多個分量。情況好比在烹飪時，廚師運用多種較常見的材料配製風味，以取代一些難以買到的特定配料，研究人員正正採用了類似的思路。他們將複頻率波分解成更簡單的組成部分，就像在食譜中使用多種替代配料一樣。每個組成部分代表了不同頻率的波。這就像使用替代配料來製作美味佳餚，以獲得所需的風味。通過在不同頻率下測量，研究人員結合這些組成部分的數據，重建了受複頻率波照射的系統的行為。這有助於他們理解並補償能量損失。

這種方法顯著簡化了應用複頻率波的過程，包括極化激元傳播和超分辨成像等領域。通過數學上組合不同實頻率下的光學響應，我們可以在固定時間間隔內，使用不同實頻率進行光學測量，從而重建對複頻率下構造系統的光學響應。這種方法使我們能夠更有效地探索和利用複頻率波的特性，並在成像技術等領域中實現潛在的提升。

這項研究的另一位通訊作者、中國科學院國家納米科學中心的戴慶教授表示，這項工作為解決納米光子學中長期存在的光學損耗問題提供了實用的解決方案。他強調了合成複頻率方法的重要性，並指出

它可以輕鬆應用於其他各種應用中，如分子傳感和納米光子集成電路。他進一步強調：「這種方法非常出色且具有普適性，因為它還可以用於解決其他波系統中的損耗問題，包括聲波、彈性波和量子波，從而將成像質量提升到前所未有的水平。」 這項研究獲得了新基石科學基金和香港研究資助局的支持。

有關論文的連結：‘Compensating losses in polariton propagation with synthesized complex frequency excitation’，發表於《自然材料》(*Nature Materials*)，網址：<https://www.nature.com/articles/s41563-023-01787-8>

關於張霜教授的更多資料：<https://shorturl.at/efCN1>

傳媒查詢，請聯絡港大理學院外務主任杜之樺女士（電話：3917 4948；電郵：caseyto@hku.hk / 助理傳訊總監陳詩迪女士（電話：39175286；電子郵件：cindycst@hku.hk）。

圖片下載及說明文字：<https://www.scifac.hku.hk/press>

補充資料：有關實驗的詳細內容

作為概念驗證，團隊以光頻率約為 1450 cm^{-1} 的聲子極化激元 (PhPs) 在 hBN 薄膜中傳播行為為基礎，在 hBN 膜上放置了一根較長的金天線來激發 1D PhPs。圖 2a 和 2b 中顯示了兩個實頻率和兩個複頻率的場分布。實驗結果表明，儘管實頻率下的傳播受到強烈衰減，但複頻率下的極化激元在傳播過程中幾乎不會衰減。

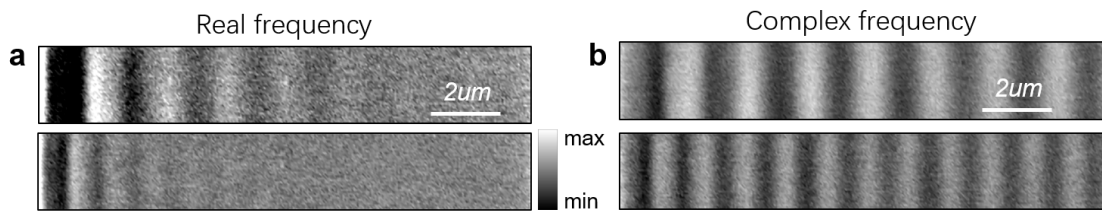


圖 2. 光頻段下 1D 極化子傳播（從左到右）在 hBN 薄膜的傳播行為。(a) 實頻率的圖像在傳播方向上呈現出明顯衰減的傳播行為。(b) 複頻率測量結果展示了幾乎無耗散的傳播行為。原圖取自《自然材料》，2024, doi.org/10.1038/s41563-023-01787-8。

團隊進一步用複頻率方法研究了 van der Waals 晶體 α -MoO₃ 薄膜上所支持的更複雜場分布的傳播行為。 α -MoO₃ 是高度各向異性的，並支持自然的面內雙曲線極化激元。如圖 3a 所示，在 α -MoO₃ 膜上放置了一根金屬天線作為激發源。場分布的變化呈現出具有凹面波前的雙曲線傳播的特徵行為，如圖 3b 所示。隨着頻率的增加，波長減小，場的約束更強，同時傳播衰減也更明顯。所有這些實頻率圖根據複頻率的比列進行合併，得到圖 3c 中的複頻率結果。

團隊最後使用複頻率方法研究了極化激元的干涉行為。在 MoO₃ 膜上製備了兩個不同直徑的圓形天線來激發聲子極化子，如圖 3d 所示。雖然實頻率圖無法顯示出明顯的干涉條紋，如圖 3e 所示，但通過合併不同實頻率的結果，可以合成出清晰的複頻率圖中的干涉條紋，如圖 3f 所示。

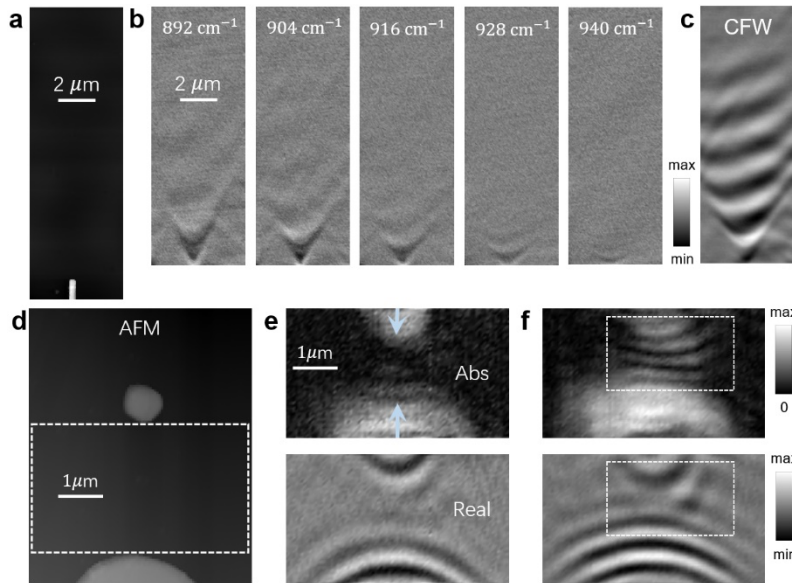


圖 3. α - MoO_3 薄膜上雙曲線聲子極化子和橢圓形聲子極化子的傳播行為。(a) 在 α - MoO_3 膜上放置天線的原子力顯微圖像。

(b)不同實頻率下測量的雙曲極化子的成像結果。(c)複頻率測量結果展示了超長的距離傳播。(d)兩個間距不同的金天線的原子力顯微圖像。(e)在實頻率 $f=990\text{cm}^{-1}$ 下

的幅度和實部測量結果。

(f) 在複頻率 $f=(990-2i)\text{cm}^{-1}$ 下的幅度和實部測量結果。

原圖取自《自然材料》，2024, doi.org/10.1038/s41563-023-01787-8。