

北大聯合團隊攻克一世界性難題！

北京大學 | 2022-05-23

光梳，又叫光學頻率梳

因其用途廣泛

一直是國際光學界的重要研究熱點

5月18日

北京大學王興軍教授課題組

和加州大學聖芭芭拉分校

John E. Bowers教授課題組

在Nature雜誌線上發表文章

Microcomb-driven silicon photonic systems

在世界上首次報導了

由整合微腔光梳驅動的

新型硅基光電子片上整合系統



nature

[Explore content](#) ▾ [About the journal](#) ▾ [Publish with us](#) ▾

[nature](#) > [articles](#) > [article](#)

Article | [Open Access](#) | [Published: 18 May 2022](#)

Microcomb-driven silicon photonic systems

[Haowen Shu](#), [Lin Chang](#), [Yuansheng Tao](#), [Bitao Shen](#), [Weiqiang Xie](#), [Ming Jin](#), [Andrew Netherton](#), [Zihan Tao](#),
[Xuguang Zhang](#), [Ruixuan Chen](#), [Bowen Bai](#), [Jun Qin](#), [Shaohua Yu](#), [Xingjun Wang](#)  & [John E. Bowers](#) 

[Nature](#) **605**, 457–463 (2022) | [Cite this article](#)

研究團隊歷時3年，協同攻關

終於攻克了這一世界性難題

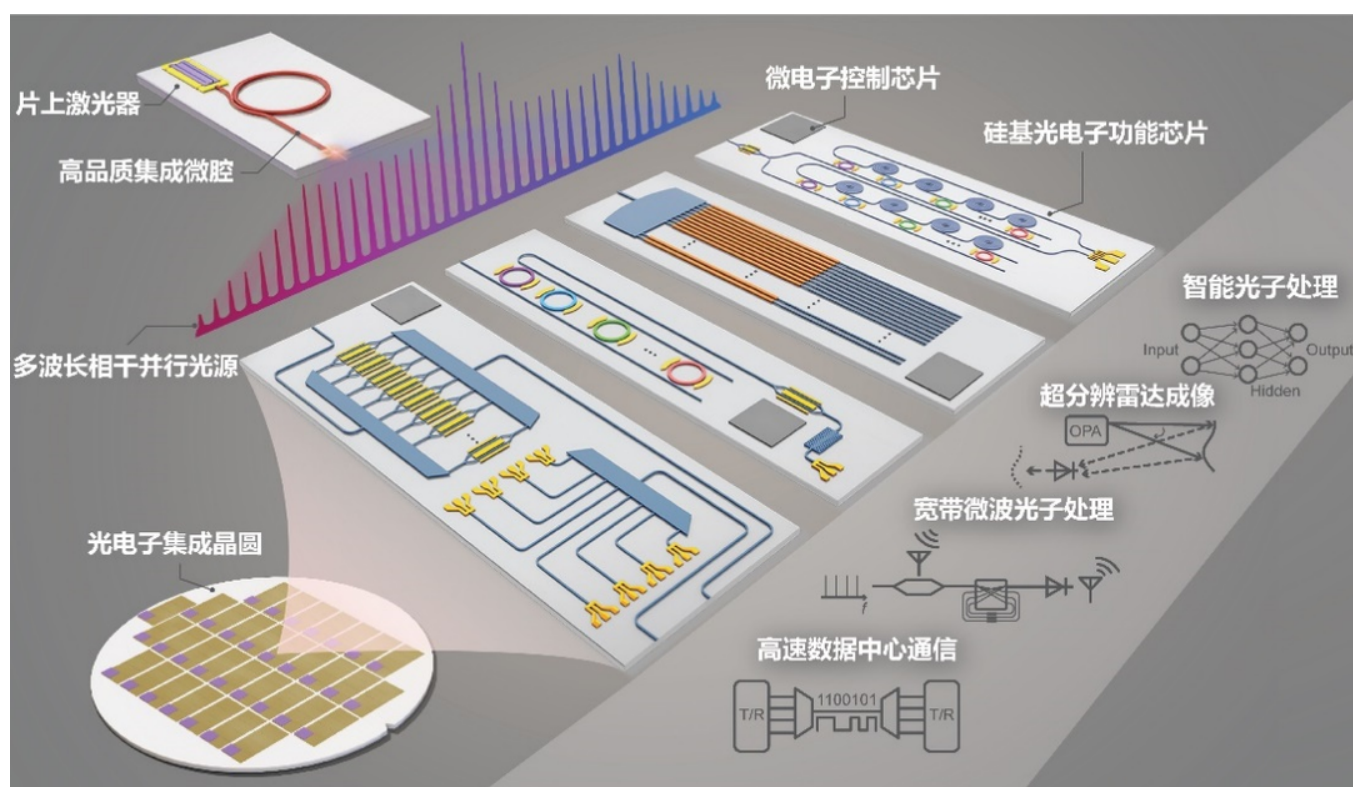
這項重大的研究成果

對我們的生活有什麼幫助

北大團隊又是如何取得突破？

讓我們和王興軍教授

展開一場對話吧！



整合微腔光梳驅動的硅基整合光電子片上系統圖

問

此項研究的領域背景是怎樣的？

光梳，又叫光學頻率梳，因其用途廣泛，一直以來都是國際光學界的重要研究熱點。美國國家標準與技術研究院 John Lewis Hall 教授和德國馬普量子光學所的 Theodor Hänsch 教授因在光梳方面的傑出貢獻，獲得了 2005 年諾貝爾物理學獎。而近年來晶片級的光梳（微腔光梳）由於緊湊的尺寸和低廉的成本極大拓展了其應用範圍。

然而，大部分基於微腔光梳的系統級應用中，僅有微腔本身為整合器件，其餘的組成部分（包括泵浦雷射器、無源/有源處理器件、電路控制單元）均未實現整合，在成本、尺寸和功耗上極大地削弱了微腔光梳晶片化帶來的優勢，因此，整合光梳系統層面的整合對光頻梳技術的實用化和普及化具有重大意義。

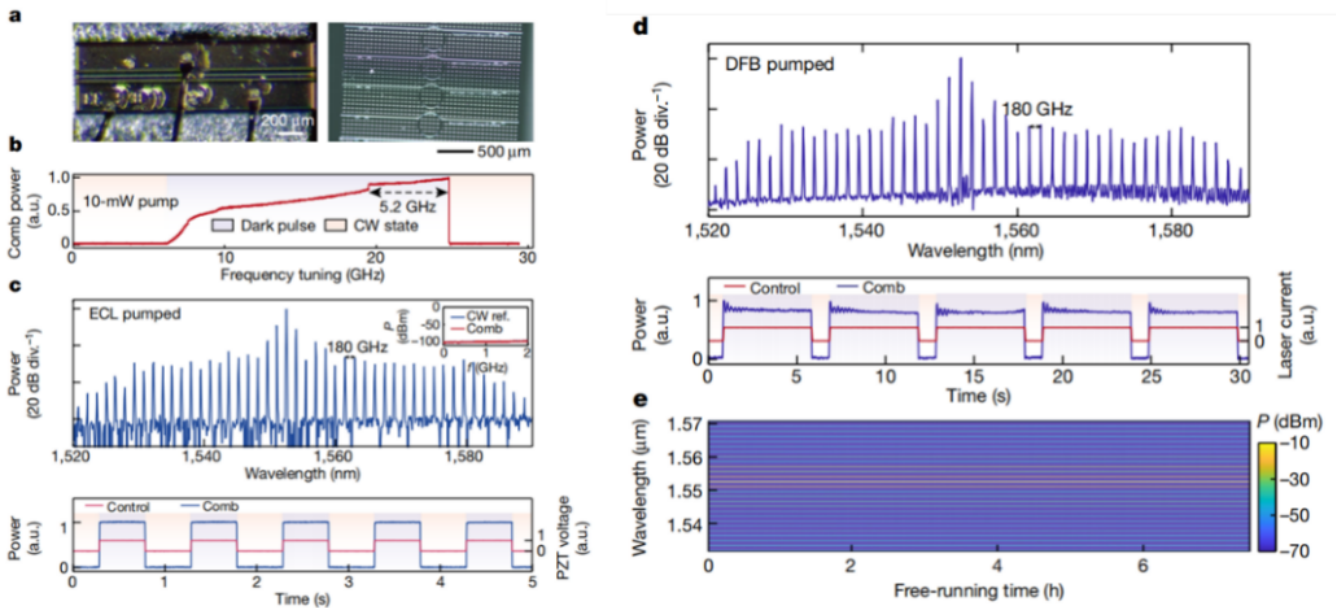
與此同時，近二十年來，硅基光電子整合晶片技術（硅光）借助成熟的CMOS工藝，可大規模整合傳統光學系統所需的功能器件，極大提升片上資訊傳輸和處理的速度和容量，可為下一代資料中心、通訊系統、高性能計算、自動駕駛等領域帶來變革型突破，是公認的現代資訊系統的功能升級和產業佈局的核心技術，是世界光電子領域競爭的主陣地。目前，隨著應用市場的拓展和系統規模的大幅度提升，硅基光電子片上系統架構正向多通道和高平行的架構演進，隨之而來的便是日趨增長的對低成本和高穩定性平行光源的需求。然而，由於硅材料本身不發光，硅基雷射器的實現一直是世界性難題，在硅基光電子晶片上研發出多路平行的硅基光源更被公認為是該領域最大的瓶頸之一。

問

北大團隊如何取得突破？

研究團隊前期圍繞高效率整合微腔光梳光源開展了長期合作研究，基於絕緣體上鋁鎵砷（AlGaAsOI）這一高非線性整合平台，已實現了超低功率閾值的光學參量振盪【Nature Communications 11, 1331 (2020)】。此次，研究團隊首次報導了在AlGaAsOI平台上的室溫下暗孤子相干光梳產生，作為整合系統平行光源的重要組成部分，其雷射泵浦功率低於10mW，可實現該光梳光源的片上泵浦和啟鑰式開關(圖2)。

同時，鋁鎵砷材料的高非線性和高熱光效應使得其在正常工作下具有較長的暗孤子存在頻率範圍(>10GHz)，因此具有極佳的工作穩定性(圖2)。上述特性使得研究團隊在不借助複雜外部反饋裝置的情況下實現穩定高效的相干光梳產生，為高整合度的系統應用實現提供了良好基礎。



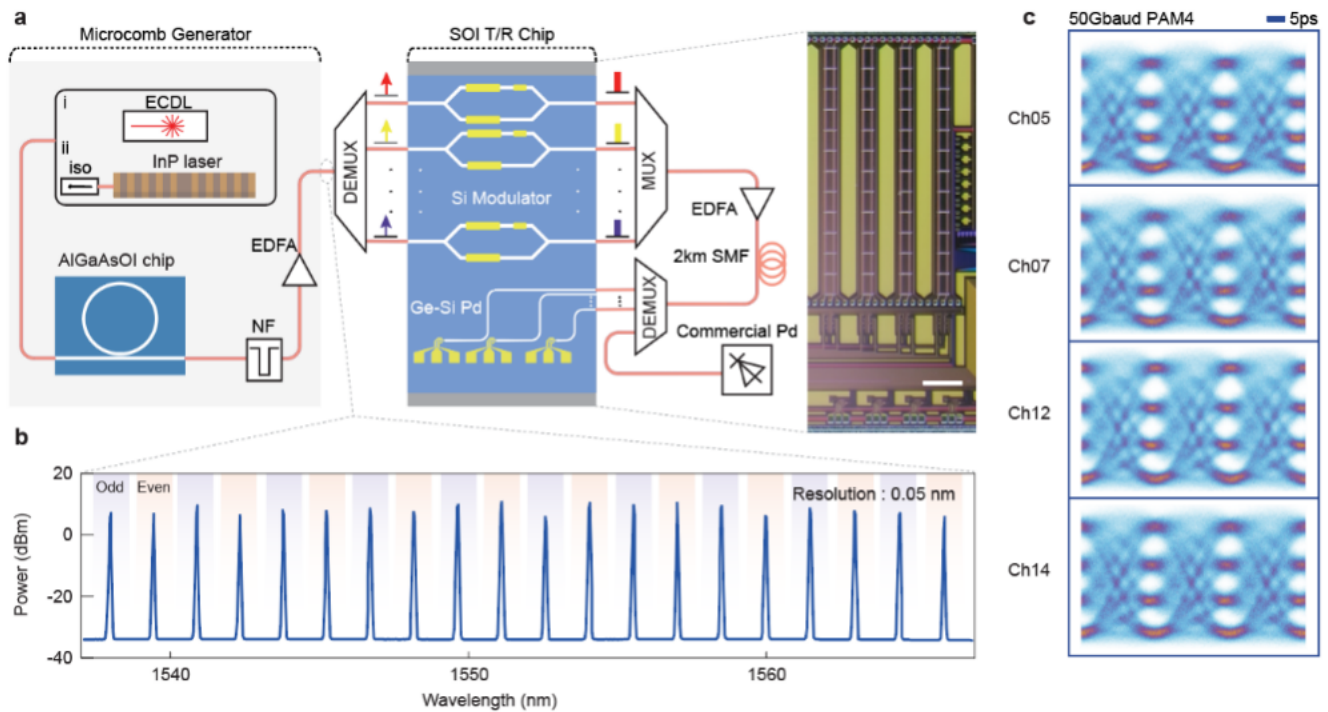
(a) 泵浦雷射器晶片(左)與微腔晶片(右)顯微鏡照片。(b)光梳產生的頻率範圍測試圖。(c)外腔雷射器模組和(d)DFB雷射器晶片泵浦光梳產生及啟鑰開關測試結果。(e)光梳長時穩定性示意圖

為配合整合微腔光梳實現大規模片上資料傳輸與靈活的訊號處理，研究團隊基於此前十餘年硅基光電子器件設計製備基礎，在片上實現了通訊波段內從訊號載入、傳輸到接收的成套高性能有源/無源器件，包括電光調製器、光電探測器、波分復用器、光濾波器、光延時線、光分束器、耦合器等。以這些核心功能器件為基礎，研究團隊分別針對大容量資料傳輸和微波光子訊號處理兩類目前被廣泛研究的光電系統，進行了原型機的設計和驗證。

問

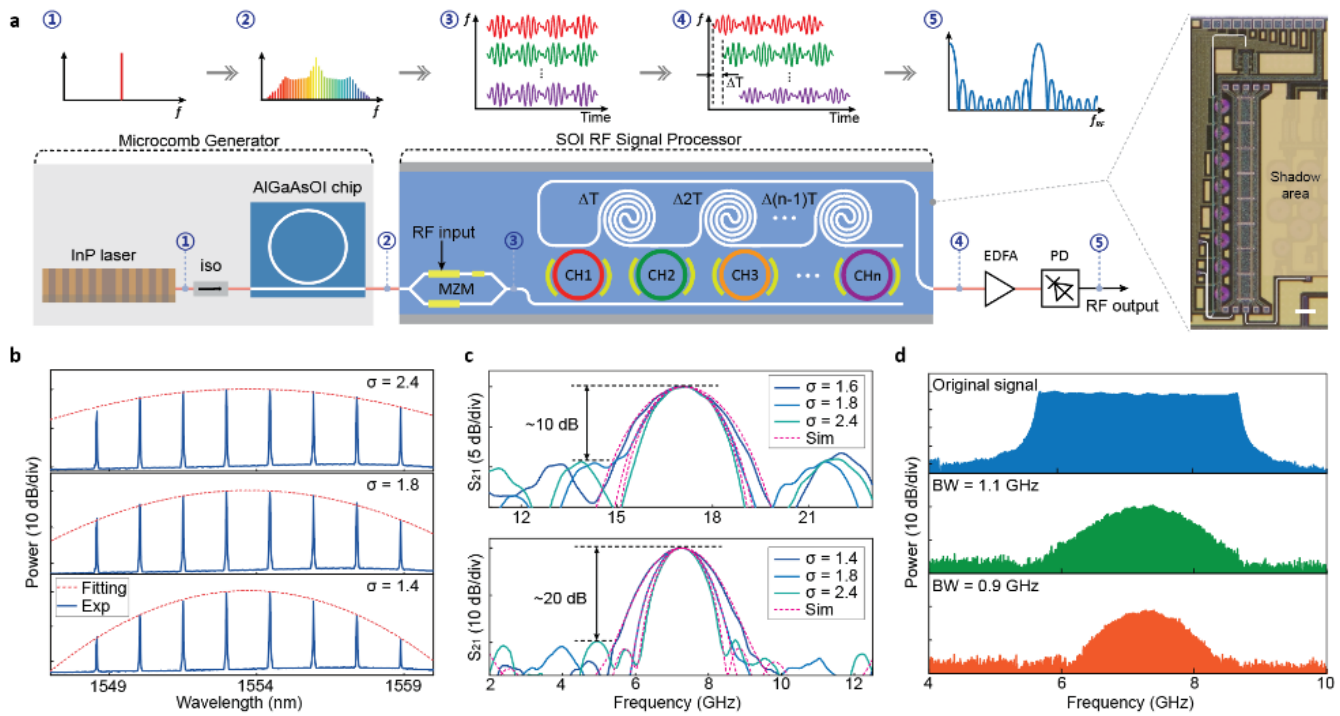
此項研究成果如何運用在生活中？

在整合資料通訊系統中，整合微腔光梳光源可作為波分復用訊號傳輸方案的平行載波，實現多通道大容量的資料傳輸。結合鋁鎵砷微腔光梳與硅基電光-光電轉換器件，在C波段內搭建了20載波的高整合度資料鏈路。面向資料中心通訊應用，成功實現了2km內單通道100Gbps，總速率2Tbps的PAM4訊號傳輸，採用商用測試系統表徵誤位元率均低於SD-FEC門限。未來配合光梳整形，片上半導體放大等技術提升光源訊號雜訊比和功率，同時配合電光-光電轉換器件的頻寬最佳化，空分復用技術和高階調製方案，有望實現十萬億位元每秒以上(>10Tbps)的大容量資料傳輸，這對下一代資料中心互聯、高性能計算等場景大有裨益。



(a)光梳型硅基資料鏈路示意圖 (b)通訊波段內放大後載波梳齒 (c)單通道100Gbps PAM4眼圖

光梳梳齒等頻率間隔的特性使得其在作為系統多波長光源之外，也可以提供靈活的訊號處理方案。研究團隊將光梳梳齒作為有限衝擊響應濾波系統的抽頭，利用硅基晶片實現後續模擬訊號載入，抽頭係數載入及通道延時，實現了可重構的整合微波光子濾波器。通過對濾波器抽頭相應通道的微環濾波器進行熱光調諧，可實現靈活的濾波通帶頻寬和中心波長的靈活調節。同時，片上系統對實際微波訊號的濾波能力也了有效驗證，結果顯示頻寬調節精度可達亞GHz，同時對噪聲訊號可實現接近20dB的抑制，驗證了其靈活高效的訊號處理能力。該系統架構有望擴展至通道化、任意波形產生及瞬時測頻等多個微波光子系統應用，有效拓展系統處理頻寬，提高調諧能力，同時在5/6G通訊，雷達偵測等領域發揮重要作用。



(a)光梳型微波光子濾波實驗示意圖 (b)梳齒高斯整形 (c)高斯型帶通濾波波形 (d)實際寬譜訊號濾波

研究團隊歷時三年協同攻關，終於攻克了硅基光電子片上系統架構中在硅基光電子晶片上研發出多路平行的硅基光源這一世界難題。

利用這種高整合度的系統，實現T位元速率微通訊和亞GHz微波光子訊號處理，提出高密度多維復用的微通訊和微處理晶片級整合系統的全新架構，開創了下一代多維硅光整合微系統子學科的發展。相關研究成果有望直接應用於資料中心、5/6G通訊、自動駕駛、光計算等領域，為下一代片上光電子資訊系統提供了全新的研究範式和發展方向。

該論文共同第一作者為北京大學電子學院博新計畫博士後舒浩文、加州大學聖塔巴巴拉分校常林博士（目前已任職於北京大學電子學院，任助理教授、研究員，獨立PI並組建課題組）、北京大學電子學院17級博士研究生陶源盛、19級博士研究生沈碧濤。王興軍教授與加州大學聖塔巴巴拉分校John E. Bowers教授為論文共同通訊作者。鵬城實驗室余少華院士參與本工作並給予了重要指導。主要合作者還包括加州大學聖塔巴巴拉分校謝衛強博士（現為上海交通大學副教授）、博士研究生Andrew Netherton，北京大學電子學院博士研究生金明、陶子涵、張緒光，博士後陳睿軒、白博文、秦軍（現為北京資訊科技大學副教授）。該工作由北京大學電子學院區域光纖通訊網與新型光通訊系統國家重點實驗室作為第一單位完成，也是和鵬城實驗室合作的重要成果，是鵬城實驗室電路與系統部重大攻關任務核心內容之一。

