次兆赫光電通訊元件之頻譜特性檢測技術

劉子安 / 林高祺 / 吳俊斌 / 湯士源 / 黎宇泰

下世代高速通訊相關元件開發過程中，需要合適的檢測技術。在高速矽光子光電轉換元件方面，說明目前利用電子式與光學式頻寬量測方式，預期可達到>200 Gb/s的量測頻寬。在通訊材料與電磁波空間分布量測方面，開發以兆赫時域頻譜分析系統搭配可量測穿透與不同反射角的架構，以0度入射角為例，接收反射角度從14度到 90度; 以 90度入射角為例，接收反射角度從-76度到 90度，解析度1度，可量測上述水平角在0.1 THz ~ 1 THz間之兆赫波強度。實際量測四氟乙烯、ε-Fe2O3等高頻材料的介電與磁導常數頻譜，以及十字型重複性金屬結構的繞射空間頻譜分布。

一、 簡介

下世代資通訊產業應用將朝向6G行動寬頻、物聯網(internet of things; IoT)、運用機器學習之人工智慧(artificial intelligence; AI)、生醫感測、量子運算、運用光達(LiDAR)之自駕車等領域。日本6G技術發展以2020年12月成立的「Beyond 5G新經營戰略中心」主導，關鍵技術的研發主要為兆赫波(terahertz wave)、傳送媒介轉換(如光與兆赫波)、全光子網路(all photonics network)...等，具體內容包括富士通(Fujitsu)主導的「使用兆赫茲波的光束控制通訊系統的研發」、KDDI主導的「具經濟性與傳送性的分區多工光網路基礎技術的研發」等【1】。因此利用高頻通訊用矽光子之共同封裝、6G兆赫波通訊，例如可重構智慧表面(reconfigurable intelligent surface; RIS)元件等相關技術，利於優化訊號的傳輸速率與傳播特性。在矽光子部分，為解決高速/高效能需求帶來之技術瓶頸，目前開發的過程中，廠商開發低耗損光電載板及超高速光電訊號相關元件技術，需要相關頻寬量測技術，滿足資料中心伺服器高速傳輸需求。

在6G兆赫波的自由空間傳播方式上，韓國三星公司於2022年5月發表 6G頻譜白皮書，說明(92~300) GHz的次兆赫(sub-THz)頻段可提供超高速數據傳輸。兆赫波頻率上可用的豐富頻譜資源可以顯著提高無線通訊

的資料速率【2】。然而由於6G頻段對於空氣的損耗大，使傳播距離短。為了解決6G通訊的電磁波覆蓋率不佳問題，目前迫切需要一種能夠將兆赫波訊號偏轉到所需方向的波束形成技術，以補償兆赫波的嚴重路徑損耗，提高指向性。因此，隨著下一代無線通訊的發展，對智慧波束形成和電磁訊號處理的需求日益增長【3】。新興的可重構智慧表面(RIS)為透過控制其元件的複雜反射係數來重建電磁波傳播環境提供了一個有前景的訊號中繼傳輸解決方案【4】。RIS是由大量的被動反射元件組成，可快速且準確的預估通訊頻道，並可藉由調整各個元件的相位，將入射的電磁波訊號通過反射、折射、聚焦等組合調整入射電磁波訊號至特定方位；透過調整RIS接收與發射角度可提升 sub-THz覆蓋範圍，適合安裝在大量建築物、公共汽車、火車甚至採礦隧道中。RIS近幾年備受關注，被視為未來無線通訊架構下極具潛力的節能技術，也是實現6G情境中相當重要的關鍵組件。目前5G高頻通訊頻段在10 GHz以下，6G通訊標準或產品尚未出來，國外相關少數單位已有RIS產品開發，國內並無寬頻與簡便的量測技術，可快速優化製程參數，使這些元件能工作在符合相關規格，降低開發成本。

在通訊用高速、高容量矽光子相關光電轉換元件之頻寬檢測方面，目前超高頻元件的頻寬量測相當困難，相關元件的頻寬檢測顯得日益重要，利用電子式儀器檢測矽光子光電轉換元件的頻寬可達100 GHz，日後勢必會有更高頻的需求，這時就需要用到光學式的量測方式，本文將簡單說明目前與未來可能的頻寬量測方式。

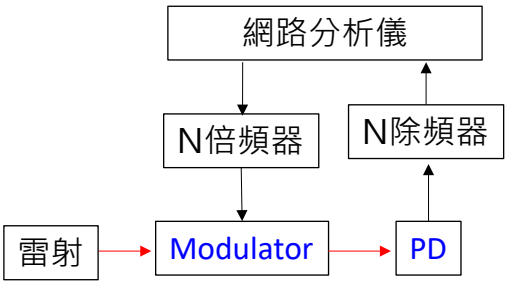
而在6G材料開發之材料特性頻寬與空間分布量測方面，本文將介紹利用兆赫茲（或簡稱兆赫）時域頻譜分析法(terahertz time domain spectroscopy; TDS)，對6G高頻磁性材料進行介電與磁導相關參數的檢測與數據處理方法。兆赫波為0.1 THz~10 THz的非游離輻射電磁波，同時具有對樣品的高穿透性與光譜分析等優點，主要用於非破壞性檢測。由於下世代智慧型手機等元件間的間距變小，使晶片與晶片、晶片與天線間的輻射干擾日益嚴重【5】。為抑制此干擾現象，電磁干擾(electromagnetic interference; EMI)屏蔽膜將派上用場，因此相關材料的開發相當重要，鐵磁性材料對於高頻電磁波具良好的吸收特性，在開發過程中需要知道其介電或磁導率等參數，以提供調整材料製程參數(recipe)方向的依據。

而6G兆赫波通訊最主要問題為較高的電磁波傳輸損耗，目前利用可重構智慧表面可將其傳播到不同方向以利於提高傳輸能量，

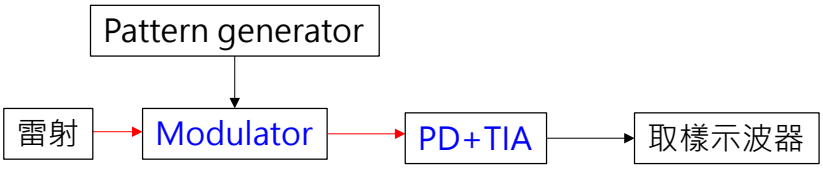
已有相關廠商進行開發，需要進行精確的頻譜與空間分布的量測。業界有相關電子式的檢測技術，利用光學法是一種提高檢測頻寬的方法。本文以類似RIS的週期性結構為樣品，利用合適的架構設計，建構兆赫波空間分布量測架構，達到二維(2D)空間電磁波分布的量測目的，以利於未來拓展到RIS的相關應用。

二、高頻光電通訊元件之頻譜檢測原理

通訊用矽光子元件中與頻寬有關最重要的元件是電光調制器與光偵測器，元件頻寬以類比式的量測為主，如**圖一**所示。利用雷射打入矽光子晶片內的高速電光調制器，而電光調制器的電訊號輸入部分，以網路分析儀輸出高頻訊號或倍頻產生更高頻的訊號來進行調制，因此雷射經過此電光調制器後會產生載有高頻訊號的雷射，打入高速光偵測器後，經過除頻器降頻由網路分析儀所接收，若頻率太高可與內部高頻訊號混頻產生中頻訊號以利於接收。當待測物為電光調制器時，需要有經校正後的高頻光電偵測器，以反推其頻寬，反之亦然。



圖一 電子式的矽光子光電轉換元件類比(元件)頻寬量測法



圖二 電子式的矽光子光電轉換元件數位(系統)頻寬量測法

在矽光子的系統面上，以量測數位傳輸的眼圖情形，從而得知其是否可傳遞夠高數據率(data rate)，意即所謂的數位頻寬的量測法，如**圖二**所示。以波形產生器產生一組

只包含0和1的偽隨機二進制序列(pseudo-random binary sequence; PRBS)，輸入到電光調制器，將雷射進行被動式調制，輸出的光載PRBS訊號打入光偵測器，經轉阻放大器(transimpedance amplifier; TIA)將電流訊號放大並轉為電壓訊號，以利取樣示波器進行眼圖分析。

為了克服電子式的訊號產生器頻寬極限，可採用光學式的高頻訊號產生方式，利用雙波長雷射拍頻的方式產生連續波兆赫波作為高頻電訊號產生器，並可利用高頻探針將訊號耦合到矽光子的電光調制器，將光載微波訊號經光譜儀得到調制後的光譜旁模，並藉由調整雙波長差改變調製頻率，進而得到量測頻寬；或與本地震盪器混頻得到中頻訊號，最後以電子式頻譜儀量得頻寬【6】。而在系統面的數位頻寬量測方面，可利用光學式的邏輯數位閘【7-9】，產生多倍頻的PRBS訊號，後端搭配高速取樣示波器分析眼圖，達到數位頻寬的分析，預期可達到>200 Gb/s的量測頻寬。

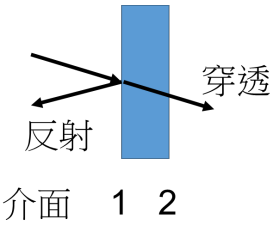
三、次兆赫頻段屏蔽材料的介電常數與磁導常數特性量測

1. 電性與磁性分析

如**圖三**所示，脈衝式兆赫波經過材料後可量到反射與穿透波，介面的穿透係數 t_1、t_2 與反射係數 r_1 分別為:

$$t_1 = t_2 = \frac{2\sqrt{z}}{z+1} \quad (1)$$

$$r_1 = \frac{z-1}{z+1} \quad (2)$$



圖三 兆赫波經過樣品的穿透與反射之示意圖

其中 z 為材料的電磁波阻抗。因此，最低階(第一個脈衝)的穿透係數與反射係數分別為

$$t(f) = |t(f)|e^{i\phi} = t_1(f) * t_2(f) = \frac{4z}{(z+1)^2} e^{2\pi i(n-1)fd/c} \quad (3)$$

$$r(f) = \frac{z-1}{z+1} \quad (4)$$

其中 n 為材料折射率，因為一般材料反射後與入射波的相位差可假設為 180 度，

令 $n=n_r+in_i$，代入上式後可以化簡為

$$n_r = 1 + \frac{\varphi c}{2\pi fd} \quad (5)$$

$$n_i = -c \times \ln \frac{|t(f)|}{[1-r^2(f)] \times 2\pi fd} \quad (6)$$

其中ϕ為經過樣品前後的兆赫波相位差，c 為光速，f 為頻率，d 為樣品厚度。另知折射率或阻抗皆與介電常數ε(f)與磁導常數μ(f)有關

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu} \tag{7}$$

$$z = \sqrt{\mu/\varepsilon} \tag{8}$$

將上式待入後可得到而材料的介電常數ε(f)與磁導常數μ(f)：令$\varepsilon=\varepsilon_r+i\varepsilon_i$；$\mu=\mu_r+i\mu_i$，則

$$\mu_{\mathrm{r}} = n_{\mathrm{r}} \times \frac{1+r}{1-r} = n_{\mathrm{r}} \times \frac{1-|r|}{1+|r|} \tag{9}$$

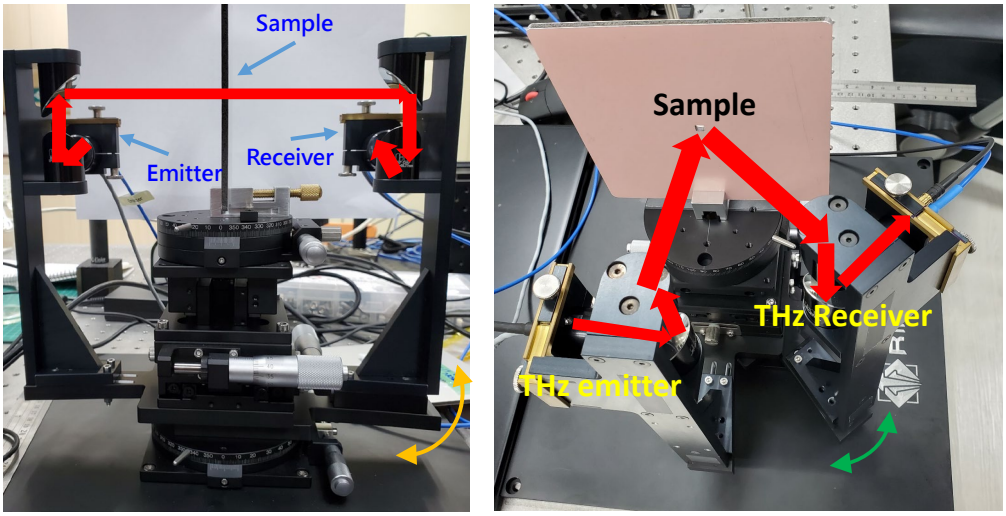
$$\mu_{\mathrm{i}} = n_{\mathrm{i}} \times \frac{1+r}{1-r} = n_{\mathrm{i}} \times \frac{1-|r|}{1+|r|} \tag{10}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{r}} = n_{\mathrm{r}} \times \frac{1-r}{1+r} = n_{\mathrm{r}} \times \frac{1+|r|}{1-|r|} \tag{11}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{i}} = n_{\mathrm{i}} \times \frac{1-r}{1+r} = n_{\mathrm{i}} \times \frac{1+|r|}{1-|r|} \tag{12}$$

2. THz-TDS量測系統

針對 RIS 的檢測需要空間分布的量測，建立具有偵測臂可旋轉的光纖耦合兆赫時域頻譜系統，以利於分析兆赫波束轉向的性能，使此系統可同時量測樣品的穿透率與反射率。本文以商品化的 THz-TDS 系統(Toptica Photonics 公司的 TaraFlash Pro)做為材料特性量測模組。圖四為利用此系統進行高頻通訊吸收材料或波束轉向元件之(a)穿透式與(b)反射式等檢測方式，樣品置放平台為四維(直角坐標之三維加平面一維旋轉)移動的樣品系統，使樣品除了可三維移動外，另可旋轉 360 度，以最佳化樣品置放的位置，並固定在旋轉台的中心。從兆赫波發射器產生的線偏極化兆赫波經一對拋物面鏡聚焦到樣品上，聚焦大小約 5 mm，並以可變入射角(0° ~ 90°)的方式打到樣品上，穿透或反射樣品後，經過另一對拋物面鏡將帶有樣品資訊的兆赫波導入固定在旋轉台臂另一端的光導偵測器，並經由後端擷取時域波形，由程式自動轉換為兆赫波的振福與相位頻譜。由於天線模組與機械架構限制，以 0 度入射角為例，可接收反射角度從 14 度到 90 度;以 90 度入射角為例，可接收反射角度從-76 度到 90 度，解析度 1 度，可量測每個方向在 0.1 THz ~ 1 THz 間之全譜強度響應。



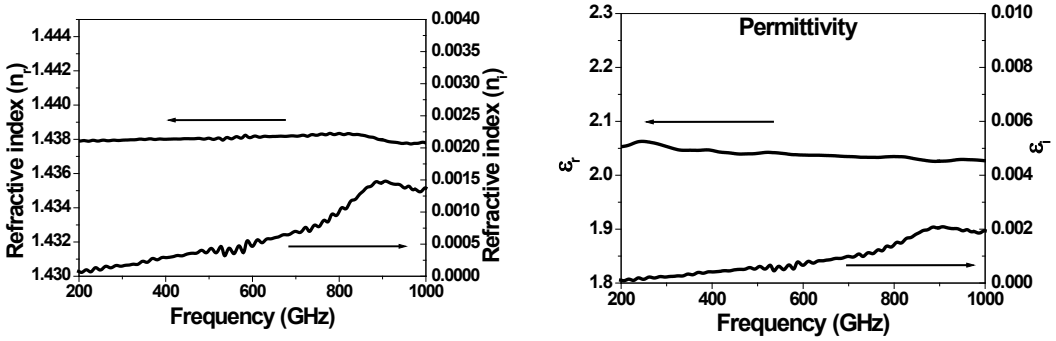
(a) (b)

圖四 兆赫波脈衝時域頻譜分析系統搭配波束轉向量測架構之(a)穿透式與(b)反射式量測實體圖

3.量測結果與分析

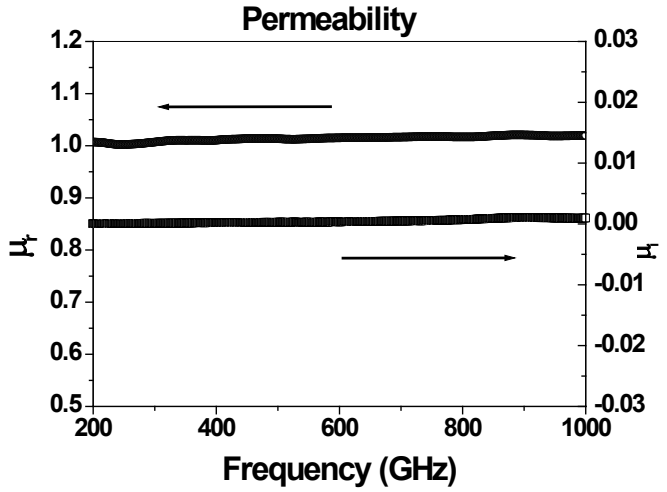
(1)PTFE 標準材料特性量測

為了測試系統量測材料的能力，以一般做為微波材料量測標準之低損耗聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene; PTFE)樣品(厚度約 10 mm)，搭配上述系統進行量測。**圖五**(a)與(b)分別為將量測出來的兆赫波穿透率與反射率頻譜經過上述公式推導出來的折射率與介電常數(permittivity)等之實部與虛部頻譜，與之前單純用穿透式量測結果吻合。**圖六**為計算其磁導常數(permeability)實部與虛部，由於其為非磁性材料，因此與理論值接近(i.e. μ_r~1，μ_i~0)。



(a) (b)

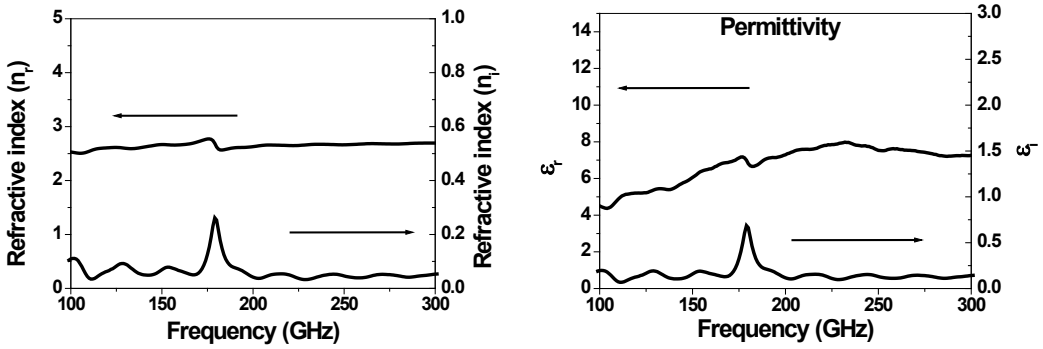
圖五 10 mm 厚 PTFE 樣品之(a)折射率與(b)介電常數之實部與虛部頻譜圖



圖六 10 mm厚PTFE樣品之磁導常數之實部與虛部頻譜圖

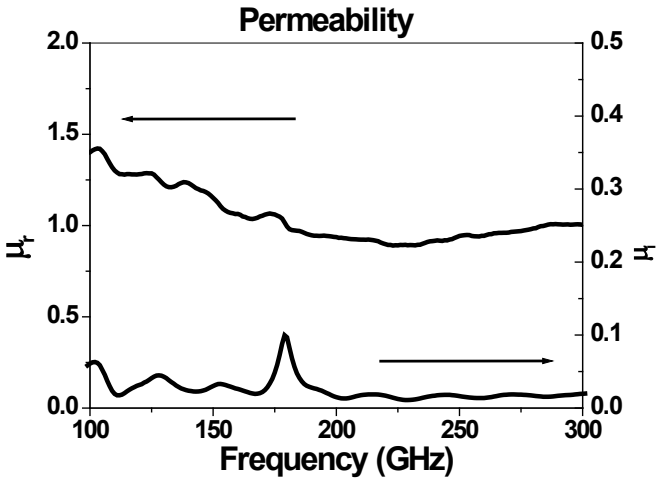
(2) ε-Fe_2O_3 磁性材料特性量測

以一般做為高頻 EMI 屏蔽材料ε-Fe_2O_3 材料(厚度約 0.87 mm)進行量測。圖七(a)與(b)分別為折射率與介電常數(permittivity)等之實部與虛部頻譜，可看到在 180 GHz 的吸收區有明顯的非正常色散與尖峰現象，與之前單純用穿透式量測結果吻合。**圖八**為計算其磁導常數(permeability)實部與虛部，在 EMI 屏蔽區的μ_r 並非趨近 1，μ_i 也非趨近 0。



(a) (b)

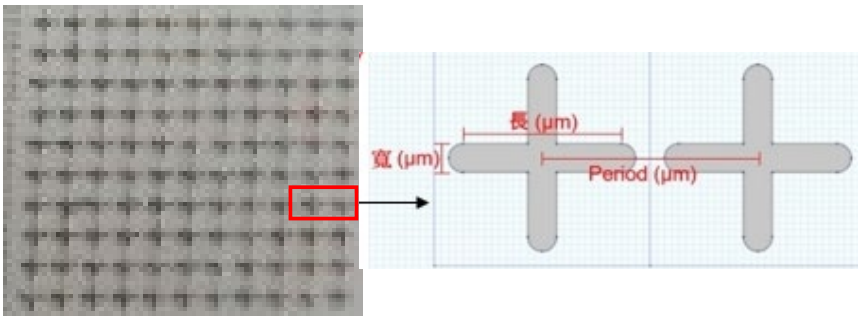
圖七 0.87 mm 厚ε-Fe_2O_3 樣品之(a)折射率與(b)介電常數之實部與虛部頻譜圖



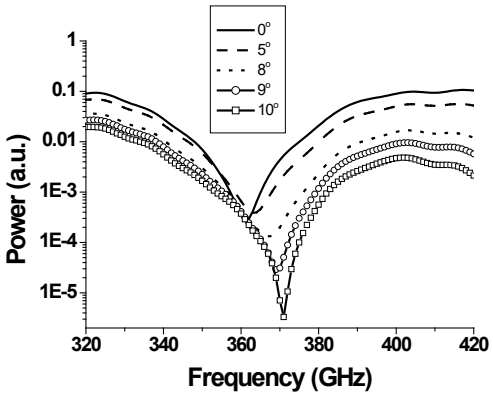
圖八 0.87 mm 厚ε-Fe_2O_3 樣品之磁導常數實部與虛部頻譜圖

(3)週期性結構材料

為了測試系統量測週期性結構材料的能力，以十字型的重複性金屬結構做在 PP 塑膠基板上，如**圖九**所示，十字之長、寬與週期(period)分別約為 265 μm、50 μm 與 400 μm。這種結構除了具有共振吸收峰，可利用不同附在上面的材料改變峰值的位置，做為一般生醫樣品的成分檢測外，其週期性結構也會有類似光柵的繞射效應，在不同角度看到不同頻率響應。**圖十**為量測其穿透頻譜，並改變接收角所看到的頻偏效果，確認機械架構進行高解析角度量測的可行。



圖九 PP塑膠基板上的十字型重複性金屬結構實體圖



圖十 改變不同接收角所看到元件吸收頻譜改變的效果

結論

本文提出說明未來可利用雙波長拍頻方式可產生高頻訊號，並利用光譜儀或頻譜儀量測矽光子光電轉換元件的類比頻寬，並可搭配光學式的數位邏輯閘產生高頻數位訊號，藉由高速示波器的眼圖分析，得到系統的數位頻寬資訊。此技術未來可推廣於高速矽光子製程與頻寬檢測等相關廠商。

工業技術研究院建立了具有旋轉與升降功能的光纖耦合兆赫時域頻譜系統，除了可分析鐵磁性材料的EMI屏蔽材的介電與磁導常數外，也可分析樣品轉折或繞射兆赫波束的空間分布與頻譜特性，藉由拋物面鏡將兆赫波聚焦到樣品上，底部具旋轉台除了可以從穿透式改為反射式外，搭配樣品旋轉台可同時具有選擇入射角與反射角的功能。量測具有週期性結構的兆赫波束轉折樣品，可接收兆赫波反射角度從-76度到 90度，角度解析度1度，並可量測每個方向在0.1 THz ~ 1 THz間之全譜強度分布，以利於快速回饋相關產業進行製程修正。完成快速且全域式6G RIS相關元件之空間與頻域特性量測技術，可降低國內產、學、研相關元件開發與測試的成本與時間，並推廣於6G高頻通訊用介電、屏蔽、半導體材料等之生產或檢測廠商。

參考文獻

1. 胡儀芳，日本官民齊力投入6G關鍵技術研發　以戰略性取得核心專利與標準為目標，台北，電子時報，2021，網址:
https://www.digitimes.com.tw/tech/rpt/rpt_show.asp?CnlID=3&v=20211029-

253&n=1。日期：2021-10-29

2. S. Koenig, D. Lopez-Diaz, J. Antes, F. Boes, R. Henneberger, A. Leuther, A. Tessmann, R. Schmogrow, D. Hillerkuss, R. Palmer, T. Zwick, C. Koos, W. Freude, O. Ambacher, J. Leuthold, I. Kallfass, Wireless sub-THz communication system with high data rate. Nat.Photonics 7, 977–981 (2013).
3. S. Dang, O. Amin, B. Shihada, M.-S. Alouini, What should 6G be? Nat. Electron. 3, 20–29 (2020).
4. S. Hu, F. Rusek, O. Edfors, Beyond massive MIMO: The potential of data transmission with large intelligent surfaces. IEEE Trans. Signal Process. 66, 2746–2758 (2018).
5. 陳靖函，軟板訊號傳輸之抗干擾材料，新竹，IEK產業情報網，2019，網址 :https://ieknet.iek.org.tw/iekrpt/rpt_more.aspx?actiontype=rpt&indu_idno=2&domain=10&rpt_idno=498413229。日期：2019-12-16
6. Burla, M., Hoessbacher, C., Heni, W., Haffner, C., Fedoryshyn, Y., Werner, D., ... & Leuthold, J. 500 GHz plasmonic Mach-Zehnder modulator enabling sub-THz microwave photonics. APL Photonics, Vol. 4, pp. 056106-1~056106-1-11166, 2019.
7. Kouloumentas, C., Stamatiadis, C., Zakynthinos, P., & Avramopoulos, H., Repetition rate multiplication of pseudorandom bit sequences. IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 21, No. 7, pp. 456-458, 2009.
8. Hossain, M., Rakshit, J. K., & Zoiros, K. E. (2022). Microring resonator-based all-optical parallel pseudo random binary sequence generator for rate multiplication. Optical and Quantum Electronics, 54(8), 525.
9. He, L., Zhang, F., Zhang, H., Kong, L. J., Zhang, W., Xu, X., & Zhang, X. (2022). Topology-Optimized ultracompact all-optical logic devices on silicon photonic platforms. ACS Photonics, 9(2), 597-604.

作者簡介

劉子安 / 工業技術研究院 量測技術發展中心 淨零碳智慧計量儀器實驗室 / 資深研究員

林高祺 / 工業技術研究院 量測技術發展中心 淨零碳智慧計量儀器實驗室 / 研究員

吳俊斌 / 工業技術研究院 材料與化工研究所 電磁材料元件研究室 / 研究員

湯士源 / 工業技術研究院 材料與化工研究所 電磁材料元件研究室 / 經理

黎宇泰 / 工業技術研究院 量測技術發展中心 淨零碳智慧計量儀器實驗室 / 經理