

太赫茲

2018 June.

季刊

03

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

THz gap

electronics

THz

photonics

microwaves

visible

x-ray

γ-ray

MF, HF, VHF, UHF, SHF, EHF



亞洲太赫茲產業發展協會

Asia Terahertz Industry Development Association

目錄

About Technology

2 太赫茲發射器技術簡介

7 太赫茲技術於畫作藝術品之應用

Activities

11 「一窺mmWave / THz測試新境界 - 無縫接軌5G測試」活動花絮報導

13 運籌帷幄·開創台灣太赫茲/毫米波新契機

14 活動預告



出版者：亞洲太赫茲產業發展協會 (ATIDA)
 發行人：饒達仁
 執行編輯：湯凱元
 地址：新竹縣竹北市台元街28號2樓之1
 電話：03-5525633
 傳真：03-6561379
 電郵：ATIDA@acebiotek.com
 網址：http://www.acesolution.com.tw/tw/company/company_ATIDA.html

太赫茲發射器技術簡介

■ 清華大學電子所 楊尚樺助理教授

簡介

近兩百年，科學家著手研究電磁波譜上不同的波段，這使得人類在通訊、醫療、照明、粒子結構、宇宙探測等許多領域有長足的進展與提升。隨著文明進步，人類幾乎可以掌控各頻段的電磁波，發展出相對應的科技。然而在擁有豐沛應用價值的電磁波譜上，太赫茲波段的整體研究成果與已應用成果相較其他波段遠遠不及。其原因在於高效能、高可靠度太赫茲元件難以實現，以至於目前社會大眾依舊無法享用太赫茲波段可帶來的便利以及其獨特的功能。感謝這半世紀半導體、光學以及微波科技的高速進展，太赫茲間隙得以逐漸被縮小。近十年來，可實現太赫茲科技的相關工具漸漸趨於實用，這使得太赫茲領域開始成為科學上重要的研究課題之一。太赫茲系統可針對密閉毒性化學藥劑、有毒氣體、爆炸物及生化機構提供相當完整的識別，對於醫療透視影像及軍事探測上更有極大的影響[1-3]。這是因為大多數的化學藥劑在太赫茲頻譜上有特定的熱發射強度、轉動及旋轉發射頻率[4, 5]。除了在安全及軍事用途外，太赫茲系統在工業環境偵測、地理空間研究、生物檢體分析、藥劑投遞反應、高速無線資訊傳輸、宇宙探測及工業品質控制也提供了相當可靠的平台。然而目前太赫茲系統大多使用於實驗室，原因在於其最重要的部份：太赫茲發射器，普遍存有低太赫茲輸出功率、極低轉換效率、以及高成本且結構複雜等問題。這些不良因素使得高效能太赫茲系統難以普及及量化實現。

太赫茲發射器實現方法

從圖1可以了解現今同調太赫茲源在輸出功率以及可調頻率上的表現 [6]。至今，分子氣體雷射 [7]、p型銻雷射 [8] 和自由電子雷射 [9] 等同調太赫茲源已可

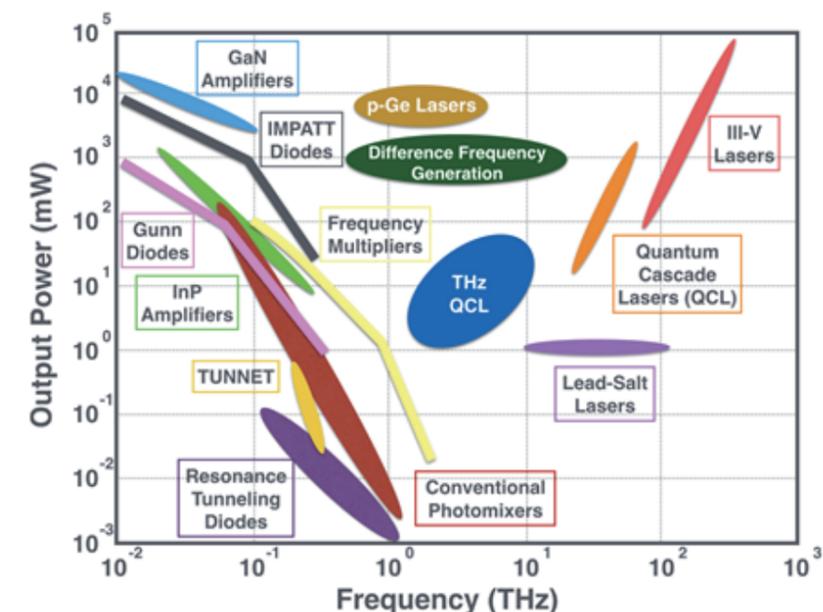


圖1 太赫茲發射器於輸出功率與可調頻率關係圖

提供太赫茲系統足夠的輻射輸出功率。然而這些太赫茲源所茲不菲並且佔據極大空間，這使得它們較難以適用於未來可攜式太赫茲系統。此外，電子束器件像是返波振盪器 [10] 以及行波管再生放大器 [11] 可在次微米波段提供不錯的功率強度。可惜因為其物理極限，電子束器件難以調動輻射頻率而且其在太赫茲波段的功率轉換效率遠低於在次微米波段的表現。

固態太赫茲源有相當大的潛力可以成為可攜式太赫茲系統的核心元件。在太赫茲頻段的低頻區，眾多固態太赫茲源例如倍頻器 [12]、衝渡二極體、耿氏二極體以及諧振穿隧二極體 [13, 14] 和主動式單石微波積體電路等可提供最佳的整體表現。然而由於其元件寄生電容以及高載子傳渡時間所帶來的負面影響，固態太赫茲源在頻率可調度以及功率效益上有極大的限制。以蕭特基倍頻器為例，其可在太赫茲頻段輸出不錯的功率 (在1THz操作頻率下，產生超過0.1毫瓦功率)、極窄的頻譜線寬，更能夠將頻率調移至將近 3 THz [15]。不過當倍頻的次數增加，其功率效益以及相位雜訊將會有數個數量級的降解。諧振穿隧二極體已成功地展示在超過 1 THz的極優太赫茲輸出功率，可是相對的，其犧牲頻率可調範圍與跟隨著相對不佳的相位雜訊[16]。在太赫茲頻段的高頻區(3 – 10 THz)，以光子來產生太赫茲輻射是目前最可行且成熟的技術之一。太赫茲量子級聯雷射可以在連續波操作下產生將近 200 mW 高功率太赫茲輻射 [17, 18]。然而，鮮少太赫茲量子級聯雷射可操作在非極低溫環境，而且操作頻率難以低於 2 THz。此外，若要將線寬限縮在 1 MHz以下，必須要另行整合非常複雜的鎖相環系統，這也同時大幅犧牲了其頻率可調範圍。近年來，內腔式差頻太赫茲量子級聯雷射已展示出在室溫下操作的可能性。若要用於可攜式太赫茲系統，其頻率可調範圍和功率轉換效益尚須大幅提升 [19]。

基於非線性光學方法，將光頻段降轉至太赫茲頻段可在室溫下產生可用強度的太赫茲輻射。相較於太赫茲量子級聯雷射以及固態太赫茲源，這類的太赫茲源雖然只可提供相對低的太赫茲輻射功率，但其可在室溫環境提供極寬的可調頻率範圍，並且有潛力與現今積體電路整合成太赫茲微縮器件。然而，在非線性塊材材料中，光降頻轉換功率效益在本質上被有效場交互反應長度所限制。這項限制的原因在於：光波與太赫茲波在非線性塊材材料當中傳遞時，難以在長距離保持相位以及速度匹配 [20]。透過使用非線性導波介質 [21-23]、准相位匹配週期性極化反轉介質 [24, 25]或者利用波前傾斜泵波 [26] 可達到最佳的相位匹配控制，進而延展有效場交互反應長度。根據選用非線性材料的吸收特性，與生成太赫茲波呈正相關的有效反應長度至多可至公分級別。若透過非線性光學方法產生高功率太赫茲輸出，基於有效反應長度限制，選用的光激發源必須能夠提供極高的峰值功率。這樣的光源不僅龐大且昂貴，使得可攜式太赫茲系統難以達成。

光導式太赫茲天線

光導式太赫茲天線方法是另一種將光轉至太赫茲頻段的技術。至今，其已被應用在許多領域上，包括：生物領域、化學領域物質分析、生醫顯像系統、安全系統、天文感測、監控系統以及藥物的成分分析。光導式太赫茲天線由一個高速光電導體、一個太赫茲天線

以及一個超快雷射光源(脈衝波模式)或兩個發射頻率稍異的雷射(混頻模式)所構成 (如圖2所示)。當光源進入高速光電導體區，光電導體會將入射光吸收轉化為光耦合載子。透過施加偏壓於太赫茲天線，所採集之光電子會被電場驅使移動，所採集之光耦合電流將成為天線的電流源，進而驅動太赫茲天線，產生太赫茲輻射波。依脈衝波模式操作，太赫茲天線可產生數太赫茲頻寬的寬頻太赫茲輻射。若以混頻模式操作，經由調控兩個雷射源的頻率差值，光導式太赫茲天線可產生出以差頻頻率為中心頻率的太赫茲輻射。

1993年E. R. Brown團隊使用低溫成長砷化鎵作為光導式太赫茲天線的高速光電導體材料，在實驗與理論上成功的展示此型太赫茲源在0.01–1 THz範圍的元件操作特性 [27]。至今，世界各地的研究團隊皆致力於改善此型太赫茲發射器的光至太赫茲轉換功率效益，各自在半導體材料、元件幾何結構、載子傳輸動態特性、半導體物理特性、天線輻射機制、光與物質交互作用等基本元件物理機制著手。其中E. Peytavit團隊設計出Fabry–Pérot腔體光電導體[28]、Hiroshi Ito團隊整合單載子傳輸光偵測器 [29]、Vitaly Rymanov團隊研發出三級傳輸區域光偵測器 [30]，C. Berry團隊整合電漿子電極於光導式太赫茲天線上[31]，持續讓此型太赫茲源的操作頻率範圍和輻射功率向上提升。由於近年來固態電子以及雷射技術有不斷的重大突破，這讓光導式太赫茲天線技術得以成為產生高太赫茲功率、高穩定度、可室溫操作太赫茲發射器的熱門候選之一。

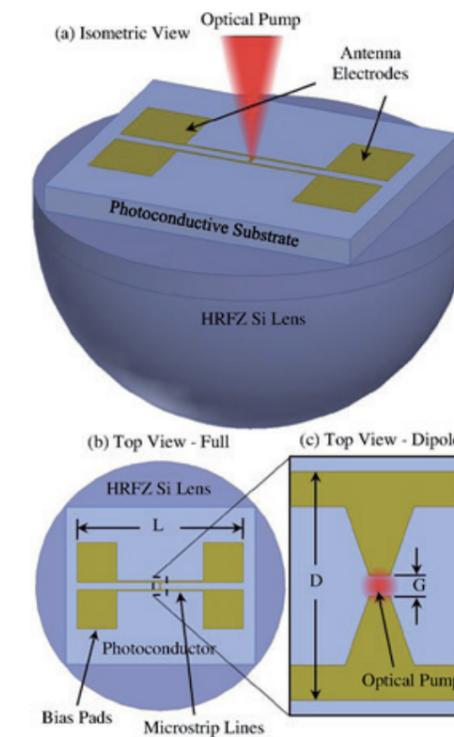


圖2 光導式太赫茲天線

電漿子光導式太赫茲天線

自1944年H. A. Bethe發表入射波與次波長孔洞的繞射關係以來 [32]，許多科學家認為電磁波幾乎無法通過比其波長要小的孔洞孔徑，這是通稱的繞射極限。不過這半世紀研究團隊發現，利用次波長尺度金屬週期性排列結構，入射電磁波可與金屬週期性排列結構的表面電子交互作用而生成表面電漿子。利用表面電漿子，可幫助電磁波集中至遠小於次波長尺度，進而引導電磁波通過次波長孔洞[33-37]。至今，由次波長尺度金屬週期性結構構成的電漿子奈米結構已廣泛應用於許多領域像是超高解析度頻譜分析與顯微技術[38-42]、奈米微影技術[43, 44]、大容量資料儲存[45]、非線性現象增益[46]、雷射功率增益[47-50]以及高效率光偵測器[51, 52]等領域。

C. Berry團隊將二維電漿子奈米結構整合至光導式太赫茲天線上 [31]。相較於傳統光導式太赫茲天線，此電漿子型太赫茲天線可平均分散入射光至有效工作區域上，並且集中更多的光耦合載子於電極旁側。在相同操作情況下，其輻射功率可達到傳統型的十倍(圖3a)。P. Y. Chen團隊設計出以石墨烯為基底的電漿子光導式太赫茲天線理論模型[53]。此型太赫茲源可連續操作在1-10 THz頻率範圍，並且穩定提供超過1W太赫茲輻射功率。相較於以石墨烯為基底的傳統光導式太赫茲天線，可達兩個數量級以上的光至太赫茲轉換功率效益(圖3b)。T. Harter團隊於2016年發表全世界第一個以矽基底電漿子光導式太赫茲天線 [54]，元件效能如圖3c所示。圖3d顯示目前光導式太赫茲天線於不同頻譜下之太赫茲輻射功率表現。

透過整合電漿子奈米結構，可大幅增加光導式太赫茲天線功率轉換效益及輻射功率。若再加以整合高度成熟的半導體科技、奈米製程技術、雷射科技，可望將高效能光導式太

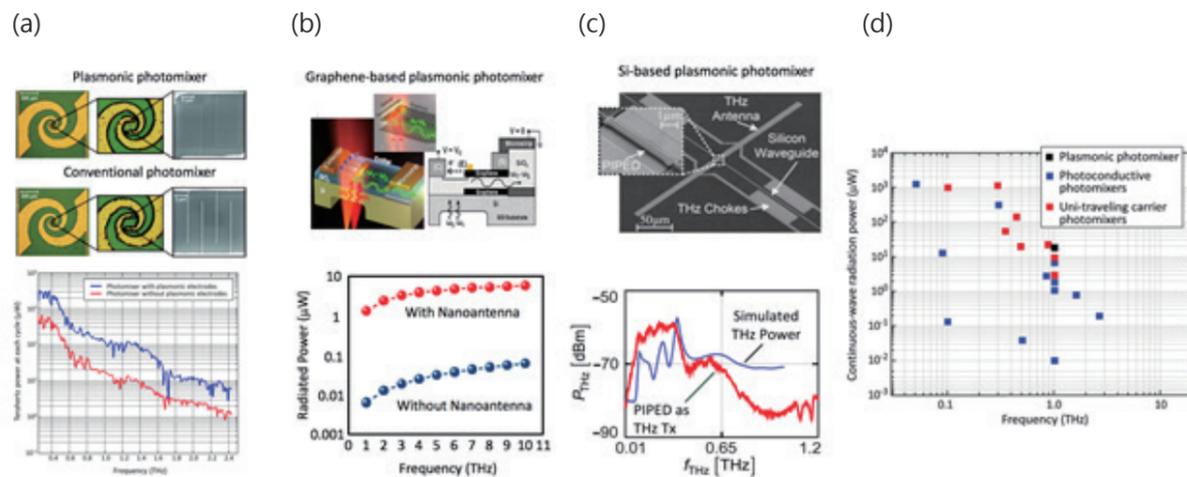


圖3 (a) 摻鉬錳砷化鎵電漿子光導式太赫茲天線與傳統摻鉬錳砷化鎵光導式太赫茲天線之比較 [31]。(b) 石墨烯電漿子光導式太赫茲天線 [53]。(c) 矽電漿子光導式太赫茲天線 [54]。(d) 光導式太赫茲天線於不同頻譜下之太赫茲輻射功率表現

赫茲天線於晶片尺度下實現，更可成為下一代可攜式太赫茲系統的核心，以推進太赫茲系統於化學物質偵測、藥物投遞偵測、環境偵測、遠端透視偵測、超高速無線網路傳輸、高解析度三維生醫影像、生物檢體分析、宇宙探測等領域的應用價值。

Reference:

1. C. Samuels, J. O. Jensen, R. D. Suenram, A. H. Walker, L. D. Woolard, "Microwave spectroscopy of chemical warfare agents," Proc. SPIE 3703, p. 121-129, Passive Millimeter-Wave Imaging Technology III, 1999.
2. D. Woolard, R. Kaul, R. Suenram, A. H. Walker, T. Globus, A. Samuels, "Terahertz electronics for chemical and biological warfare agent detection," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest 3, p. 925-928, 1999.
3. M. C. Kemp, P. F. Taday, B. E. Cole, J. A. Cluff, A. J. Fitzgerald, W. R. Tribe, "Security applications of terahertz technology," Proc. SPIE 5070, p. 44-52, 2003.
4. N. Nagai, R. Kumazawa, R. Fukasawa, "Direct evidence of inter-molecular vibrations by THz spectroscopy," Chemical Physics Letters, 413, p. 495, 2005.
5. L. Ho, M. Pepper, P. Taday, "Terahertz spectroscopy: signatures and fingerprints," Nature Photonics 2, p. 541, 2008.
6. M. Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology," Nature Photonics 1, p. 97, 2007.
7. <http://www.edinst.com/profile.htm>
8. A. Bergner et al., "New p-Ge THz laser spectrometer for the study of solutions: THz absorption spectroscopy of water," Review of Scientific Instruments, 76, 063110, 2005.
9. G. P. Williams, "Far-IR/THz radiation from the Jefferson laboratory, energy recovered linac, free electron laser," Review of Scientific Instruments, 73, pp. 1461-1463, 2002.
10. S. H. Gold and G. S. Nusinovich, "Review of high-power microwave source research," Review of Scientific Instruments, 68, 3945, 1997.
11. J. Tucek, K. Kreischer, D. Gallagher, R. Vogel, R. Mihalovich, "A compact, high power, 0.65 THz source," Proc. 9th Int. Vacuum Electronics Conf., Monterey, CA, pp. 16-17, Apr. 2008.
12. S. Martin et al., "Fabrication of 200 to 2700 GHz multiplier devices using GaAs and metal membranes," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1641, 2001.
13. H. Eisele and G. Haddad, "Two terminal millimeter-wave sources," IEEE Transaction of Microwave Theory Technology, 46, 739, 1998.
14. M. Reddy et al., "Monolithic Schottky-collector resonant tunnel diode oscillator arrays to 650 GHz," 8th Int. Space Terahertz Technology Symposium, 149, 1997.
15. <http://radiodes.com/>
16. S. Suzuki, M. Asada, A. Teranishi, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, "Fundamental oscillation of resonant tunneling diodes above 1 THz at room temperature," Applied Physics Letters, vol. 97, pp. 242102, 2010.
17. R. Köhler, A. Tredicucci, F. Beltram, H. E. Beere, E. H. Linfield, A. G. Davies, D. A. Ritchie, R. C. Iotti, and F. Rossi, "Terahertz semiconductor-heterostructure laser," Nature, vol. 417, pp. 156-159, 2002.
18. B. S. Williams, "Terahertz quantum-cascade lasers," Nature Photonics, vol. 1, pp. 517-525, 2007.
19. M. A. Belkin, F. Capasso, F. Xie, A. Belyanin, M. Fischer, A. Wittmann, and J. J. Faist, "Room temperature terahertz quantum cascade laser source based on intracavity difference-frequency generation," Applied Physics Letters, vol. 92, pp. 201101, 2008.
20. S. Ya. Tochitsky, J. E. Ralph, C. Sung, and C. Joshi, "Generation of megawatt-power terahertz pulses by noncollinear difference-frequency mixing in GaAs," Journal of Applied Physics, 98, 026101, 2005.
21. J. I. Nishizawa, K. Suto, T. Tanabe, K. Saito, T. Kimura, and Y. Oyama, "THz generation from GaP rod-type waveguides," IEEE Photonics Technology Letters, 19, 143, 2007.
22. G. Chang, C. J. Divin, J. Yang, M. A. Mushehish, S. L. Williamson, A. Galvanauskas, and T. B. Norris, "GaP waveguide emitters for high power broadband THz generation pumped by Yb-doped fiber lasers," Optics Express, 15, 16308, 2007.
23. K. L. Vodopyanov, Yu. H. Avelisyan, "Optical terahertz wave generation in a planar GaAs waveguide," Optics Letters, 33, 2314-2316, 2008.
24. Y.-S. Lee, T. Meade, V. Perlin, H. Winful, T. B. Norris, A. Galvanauskas, "Generation of narrow-band terahertz radiation via optical rectification of femtosecond pulses in periodically poled lithium niobate," Applied Physics Letters, 76, 2505-7, 2000.
25. K. L. Vodopyanov, M. M. Fejer, X. Yu, J. S. Harris, Y.-S. Lee, W. C. Hurlbut, V. G. Kozlov, D. Bliss, C. Lynch, "Terahertz wave generation in quasi-phase-matched GaAs," Applied Physics Letters, 89, 141119, 2006.
26. A. Stepanov, J. Kuh, I. Kozma, E. Riedle, G. Almási, and J. Hebling, "Scaling up the energy of THz pulses created by optical rectification," Optics Express 13, 5762-5768, 2005.
27. E. R. Brown, F. W. Smith, and K. A. McIntosh, "Coherent millimeter-wave generation by heterodyne conversion in low-temperature-grown GaAs photoconductors," Journal of Applied Physics, vol. 73, pp. 1480, 1993.
28. E. Peygavit, C. Coloin, and J.-F. Lampin, "A metal-metal Fabry-Pérot cavity photoconductor for efficient GaAs terahertz photomixers," Journal of Applied Physics, vol. 109, pp. 016101, 2011.
29. H. Ito, T. Yoshimatsu, H. Yamamoto, and T. Ishibashi, "Widely Frequency Tunable Terahertz-Wave Emitter Integrating Uni-Traveling-Carrier Photodiode and Extended Bowtie Antenna," Applied Physics Express, vol. 6, pp. 064101, 2013.
30. V. Rymanov, A. Stöhr, S. Dülme, and T. Tekin, "Triple transit region photodiodes (TTR-PDs) providing high millimeter wave output power," Optics Express, vol. 22, pp. 7550, 2014.
31. C. W. Berry, N. Wang, M. R. Hashemi, M. Unlu, M. Jarrari, "Significant Performance Enhancement in Photoconductive Terahertz Optoelectronics by Incorporating Plasmonic Contact Electrodes," Nature Communications, 4, 1622, 2013.
32. H. A. Bethe, "Theory of Diffraction by Small Holes," Physical Review, 66, 163, 1944.
33. C. Genet and T. W. Ebbesen, "Light in tiny holes," Nature, vol. 445, 39-46, 2007.
34. J. A. Schuller, E. S. Barnard, W. Cai, Young C. Jun, J. S. White and M. L. Brongersma, "Plasmonics for extreme light concentration and manipulation," Nature Materials, vol. 9, pp. 193-204, 2010.
35. W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, "Surface plasmon subwavelength optics," Nature, vol. 424, pp. 824-830, 2003.
36. F. J. Garcia-Vidal, L. Martin-Moreno, T. W. Ebbesen, and L. Kuipers, "Light passing through subwavelength apertures," Reviews of Modern Physics, vol. 82, pp. 729, 2010.
37. H. Liu and P. Lalanne, "Microscopic theory of the extraordinary optical transmission," Nature, vol. 452, pp. 728-731, 2008.
38. E. Betzig and J. K. Trautman, "Near-field optics: microscopy, spectroscopy, and surface modification beyond the diffraction limit," Science, vol. 257, pp. 189-194, 1992.
39. J. V. Coe, J. M. Heer, S. Teetlers-Kennedy, H. Tian, and K. R. Rodriguez, "Localized Surface Plasmon Resonance Spectroscopy and Sensing," Annual Review of Physical Chemistry, vol. 58, pp. 267-297, 2007.
40. M. E. Stewart, C. R. Anderton, L. B. Thompson, J. Maria, S. K. Gray, J. A. Rogers, and R. G. Nuzzo, "Nanostructured Plasmonic Sensors," Chemical Reviews, vol. 108, pp. 494-521, 2008.
41. R. Gordon, D. Sinton, K. L. Kavanagh and A. G. Brolo, "A New Generation of Sensors Based on Extraordinary Optical Transmission," Accounts of Chemical Research, vol. 41, pp. 1049-1057, 2008.
42. B.-Y. Hsieh, N. Wang, and M. Jarrari, "Toward Ultrafast Pump-Probe Measurements at the Nanoscale," Optics and Photonics News, vol. 22, pp. 48, 2011.
43. W. Sitaravanich, N. Fang, C. Sun, Q. Luo, and X. Zhang, "Plasmonic Nanolithography," Nano Letters, vol. 4, pp. 1085-1088, 2004.
44. D. B. Shao and S. C. Che, "Surface-plasmon-assisted nanoscale photolithography by polarized light," Applied Physics Letters, vol. 86, pp. 253107, 2005.
45. X. Shi and L. Hesselink, "Mechanisms for Enhancing Power Throughput from Planar Nano-Apertures for Near-Field Optical Data Storage," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 41, Part 1, 1632, 2002.
46. A. Nahata, R. A. Linke, T. Ishi, and K. Ohashi, "Enhanced nonlinear optical conversion from a periodically nanostructured metal film," Optics Letters, vol. 28, 423-425, 2003.
47. J. Vuckovic, M. Loncar, and A. Scherer, "Plasmon enhanced optical near-field probing of metal nanoaperture surface emitting laser," Optics Express, vol. 12, pp. 6391-6396, 2004.
48. J. Hashizume, F. Koyama, "Surface Plasmon Enhanced Light-Emitting Diode," IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 36, pp. 1131-1144, 2000.
49. C. Liu, V. Kamaev, and Z. V. Vardeny, "Efficiency enhancement of an organic light-emitting diode with a cathode forming two-dimensional periodic hole array," Applied Physics Letters, vol. 86, pp. 143501, 2005.
50. A. Polman, "Plasmonics applied," Science, vol. 322, pp. 868, 2008.
51. E. Ozbay, "Plasmonics: Merging Photonics and Electronics at Nanoscale Dimensions," Science, vol. 311, pp. 189, 2006.
52. J. White, G. Veronis, Z. Yu, E. S. Barnard, A. Chandran, S. Fan and M. L. Brongersma, "Extraordinary optical absorption through subwavelength slits," Optics Letters, vol. 34, 686-688, 2009.
53. P. Y. Chen, A. Alu, "A Terahertz Photomixer Based on Plasmonic Nanoantennas Coupled to a Graphene Emitter," Nanotechnology, 24, 455202, 2013.
54. T. Harter, S. Muehlbrandt, S. Ummethala, A. Schmid, A. Bacher, L. Hahn, M. Kohl, W. Freude, and C. Koos, "Silicon-Plasmonic Photomixer for Generation and Homodyne Reception of Continuous-Wave THz Radiation," Proc. Conference of Lasers and Electro-Optics, SMI4E.5, 2016.

■ 筑波醫電研究專員 羅士杰博士

太赫茲(Tera-Hertz; THz)波其廣義的頻率範圍位於 10^{11} Hz~ 10^{13} Hz (100 GHz~10 THz)之間。由於太赫茲波對於一般塑料、橡膠、纖維、塗料或黏合劑這類的高分子材料具有高穿透率，因此相當適合應用於畫作藝術品的鑑定或研究上。而透過太赫茲時域譜的訊號分析以及影像重建，將可以透視畫作內的每一層結構，達到無損檢測的境界。利用太赫茲技術分析畫作藝術品，其具有的優勢是使用X光、紫外光和紅外線技術所無法達到的。

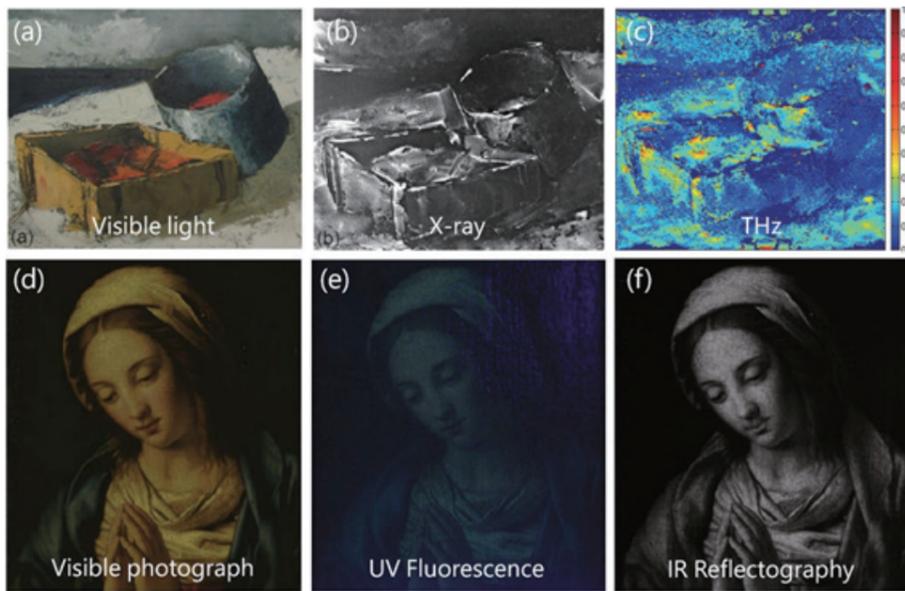


圖1 知名畫作在各種光譜檢測技術下所呈現的結果。(a - c) 畫作After fishing，在可見光、X光以及太赫茲波訊號下的影像 [1]；(d - f) 畫作Madonna in Preghiera，在可見光、紫外光及紅外光下的影像 [2]

利用太赫茲技術於畫作應用所發表的國際期刊論文並不多，如圖2所示。最早從2005年開始有第一篇利用太赫茲技術可以鑑定畫作塗料的厚度，並與其他技術比較，尤其對比於同樣為非接觸式的檢測法：光學同調斷層掃描(Optical coherence tomography; OCT)，其受畫作染料的限制更小。從2013年後，這類發表的論文漸漸變多，可見引起了許多研究學者想利用太赫茲技術對歷史知名的畫作一窺究竟，探討知名畫作背後的玄機。而在這些論文中，在此將其研究類型分成兩部份：(1) 畫作內部結構分析；(2) 太赫茲波用於畫作之訊號處理分析。

(1) 畫作內部結構分析

太赫茲技術應用於分析畫作內部結構主要仰賴脈衝式太赫茲訊號(THz pulse wave)的特性。透過發送脈衝訊號到待測物，藉由接收每一層結構之間反射的

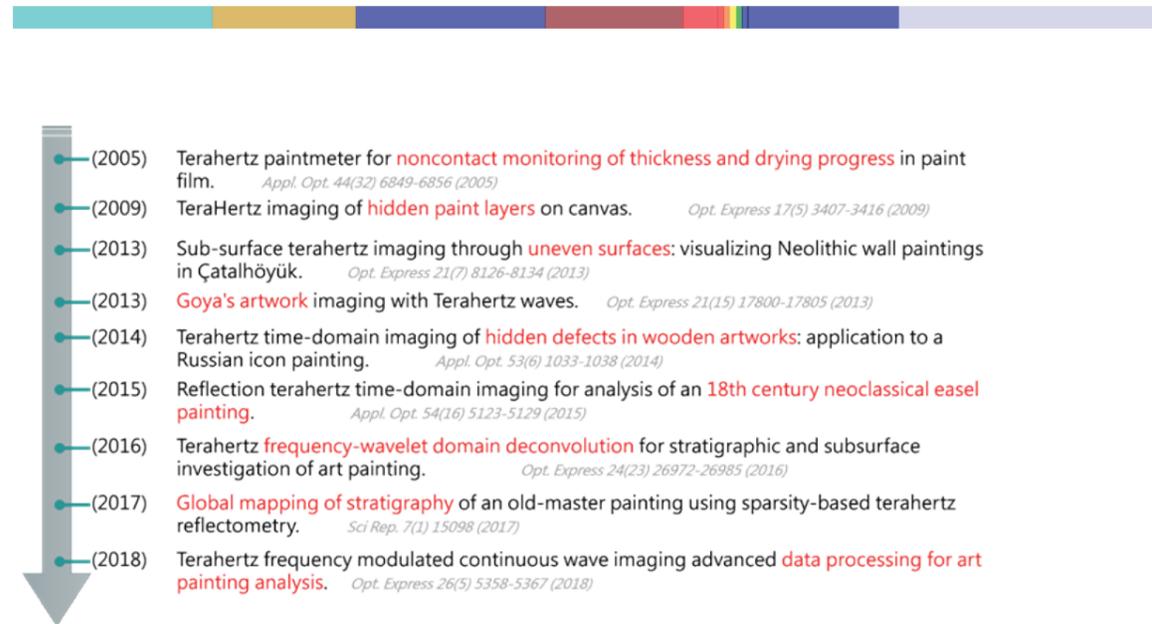


圖2 歷年來太赫茲技術用於畫作藝術品所發表之國際期刊論文

始訊號，可以了解各畫作內部的樣貌。早期的研究在於驗證太赫茲技術在畫作檢驗的可行性，如圖3(a)。利用線掃描的方式，透過偵測樣品不同時間反射回來的脈衝太赫茲訊號，以時間與相對位置為兩軸，利用顏色表示訊號強度，將結果以影像方式呈現，可以看出待測物中結構分層的情況。隨後便有研究利用此技術應用於探測畫作中塗層的貼合度缺陷，如圖3(b)，可以從影像看出夾層中有明顯的空隙存在。亦或是做為探測畫作背後損壞情況的工具，提供藝術品修復人員資訊 [3]。此外有趣的是，有研究利用太赫茲技術掃描西班牙畫家Goya的畫作，意外地發現在作品內部有Goya的簽名，但是在畫作外觀上並無法得知此訊息，如圖3(c)。如果進一步地分析畫作中反射回來的太赫茲時域訊號，將不同時間的訊號分段並與已知多層訊息的結構比對，則可以重現該畫作中類似剖面的多層結構圖，如圖4。而該研究中也將面掃描的原始資料，擷取同一個時間區段的太赫茲反射訊號以影像方式呈現，則可以看出畫作中每一層的影像，利用反射訊號的時間差區段來透視畫作中的內部結構。

(2) 太赫茲波用於畫作之訊號處理分析

基於上述利用脈衝太赫茲時域訊號重建影像的應用，有部份研究開始利用訊號處理的方式，針對所記錄的反射太赫茲時域訊號去除雜訊，尋找特徵峰值。目的就是為了更容易地辨別出多層結構的每一個交接面，也利用二元化數值影像的方式，讓讀者更容易看清楚內部每一層的分布狀況。如圖5(a)所示，原始訊號在經過反摺積以及濾波後，可以看出隱藏在原始訊號內部的塗層介面訊號。而經過訊號處理後的資訊，再尋找峰值的位置並且利用1或0的方式呈現，將可以清楚的看到內部的分層結構，如圖5(b)。另外，也有其他研究團隊使用不同的訊號處理方式，如圖5(c)。目的一樣是為了更輕易地從太赫茲時域訊號中標記出內部多層結構的每一個介面，換句話說也就是找尋內部結構是否存在缺陷。另一

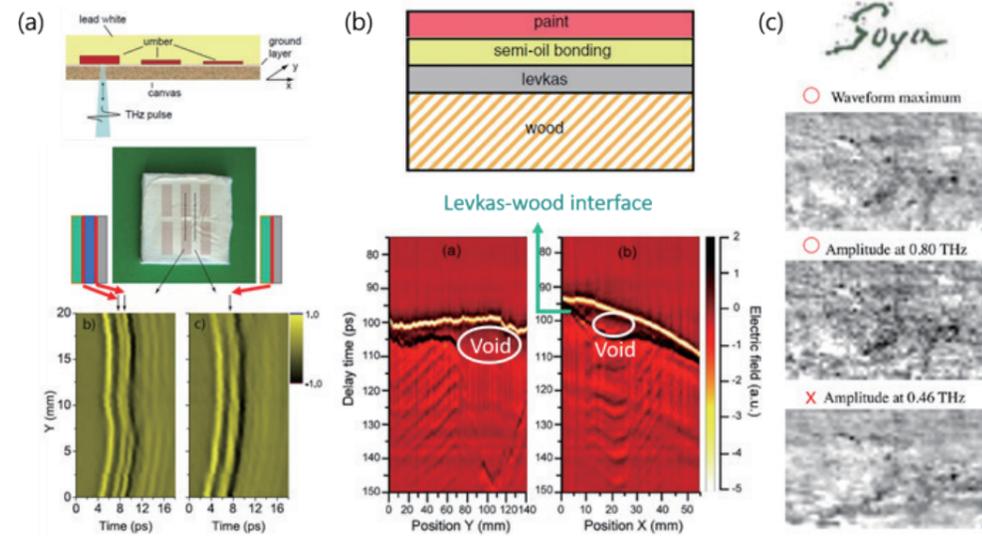


圖3 利用脈衝太赫茲波透視畫作內部結構。(a) 重組反射的太赫茲訊號可以看出分層影像[4]；(b) 利用太赫茲技術檢測塗層黏合情況[3]；(c) 利用太赫茲脈衝訊號轉換成特定頻率呈現影像，可以看出畫家Goya在畫布上的簽名。簽名可以在使用最大峰值強度以及0.8THz頻率的影像呈現看出[5]

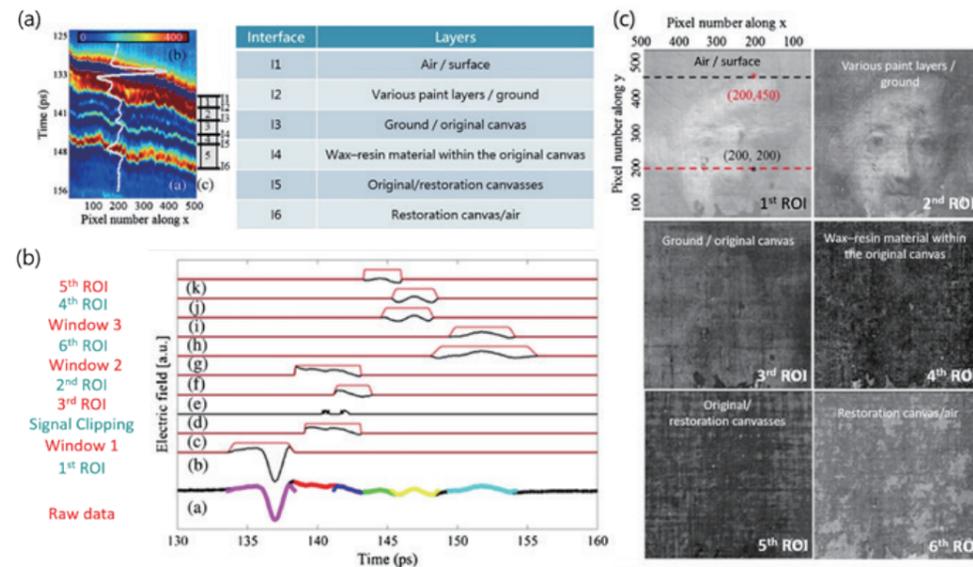


圖4 利用分析脈衝太赫茲時域訊號，透視並重建畫作內部多層結構。(a) 單一脈衝時域訊號(白色線)與線掃描後重建影像(色階圖)的對比，表格為每一層結構的敘述。該脈衝訊號來自於(c)圖的(200,200)位置；(b) 單一脈衝時域訊號分段，該訊號來自於(c)圖的(200,450)位置；(c) 面掃描的脈衝訊號依照不同時間區段以影像方式呈現，可以重建出內部結構的影像[6]

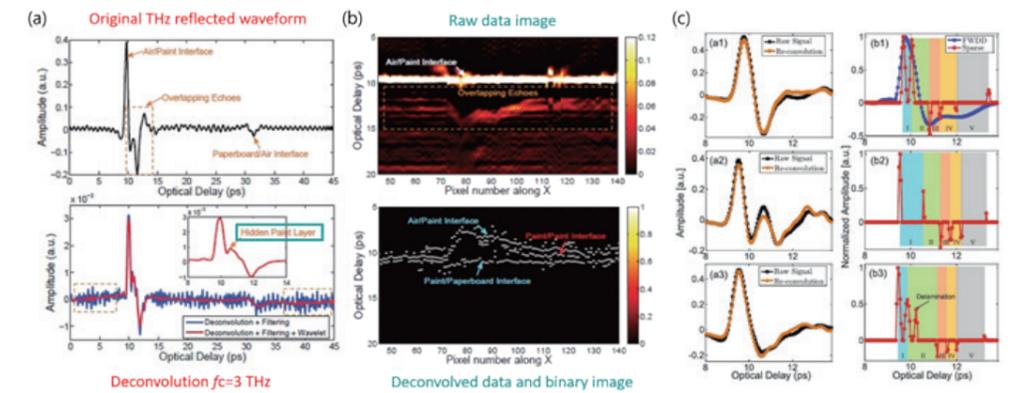


圖5 (a) 原始太赫茲時域訊號經過訊號處理後可以發現原本訊號中所看不見的特徵峰值[1]；(b) 原始訊號經過訊號處理後並二元化用影像方式呈現內部多層結構[1]；(c) 太赫茲時域訊號利用其他訊號處理方式(FWDD及Sparse)所得的結果比較，可看出Sparse方法可以正確的找出介面所在位置[2]

方面，從太赫茲影像上可以看出，表面平整性也是影響後續訊號分析以及重建影像的真實性，如圖3(b)以及圖4(a)，因此也有研究針對表面不平整的待測物提出解決的方式[7]。

由以上研究資料顯示，太赫茲技術得以應用於畫作內部結構的分析，仰賴著(1)太赫茲波本身的特性，得以穿透許多畫作藝術品所用的材料，並且收到其反射回來的太赫茲波訊號；(2)短脈衝太赫茲訊號(皮秒等級)具有高時間解析度，因此有助於畫作內部的微距分層結構分析；(3)同調式(Coherent)的太赫茲波偵測技術，讓微弱的反射太赫茲訊號仍然可被偵測到並做後續的訊號處理。而太赫茲技術應用於分析多層結構的領域，除了在畫作藝術品之外，目前英商TeraView已經開發專屬於汽車烤漆檢驗的設備，提供一種新型非接觸式可以量測烤漆厚度的工具[8]。太赫茲技術在全球已如火如荼的發展中，而在台灣產業界才剛起步而已，相信隨著太赫茲技術的研究精進，未來大家都將能享受到太赫茲技術所帶來的益處以及便利性。

Reference
 [1] J. Dong, J. Bianca Jackson, M. Melis, D. Giovanacci, G. C. Walker, A. Loquet, et al., "Terahertz frequency-wavelet domain deconvolution for stratigraphic and subsurface investigation of art painting," *Opt Express*, vol. 24, pp. 26972-26985, Nov 14 2016.
 [2] J. Dong, A. Loquet, M. Melis, and D. S. Citrin, "Global mapping of stratigraphy of an old-master painting using sparsity-based terahertz reflectometry," *Sci Rep*, vol. 7, p. 15098, Nov 8 2017.
 [3] A. S. Skryl, J. B. Jackson, M. I. Bakunov, M. Menu, and G. A. Mourou, "Terahertz time-domain imaging of hidden defects in wooden artworks: application to a Russian icon painting," *Appl Opt*, vol. 53, pp. 1033-8, Feb 20 2014.
 [4] A. J. Adam, P. C. Planken, S. Meloni, and J. Dik, "Terahertz imaging of hidden paint layers on canvas," *Opt Express*, vol. 17, pp. 3407-16, Mar 2 2009.
 [5] C. Seco-Marborell, V. Lopez-Dominguez, G. Arauz-Garofalo, A. Redo-Sanchez, J. Palacios, and J. Tejada, "Goya's artwork imaging with Terahertz waves," *Opt Express*, vol. 21, pp. 17800-5, Jul 29 2013.
 [6] C. L. Koch-Dandolo, T. Fillenborg, K. Fukunaga, J. Skou-Hansen, and P. U. Jepsen, "Reflection terahertz time-domain imaging for analysis of an 18th century neoclassical easel painting," *Appl Opt*, vol. 54, pp. 5123-9, Jun 1 2015.
 [7] G. C. Walker, J. W. Bowen, W. Matthews, S. Roychowdhury, J. Labaune, G. Mourou, et al., "Sub-surface terahertz imaging through uneven surfaces: visualizing Neolithic wall paintings in Çatalhöyük," *Optics Express*, vol. 21, pp. 8126-8134, 2013/04/08 2013.
 [8] TeraView. (2018). Measuring Automotive Paints with the TeraCot: A Non-Contact, Multi-Layer Coating Thickness Sensor. Available: <http://www.teraview.com/applications/nondestructive-testing/paint.html>

一窺mmWave / THz測試新境界 無縫接軌5G測試

花絮

ATIDA秘書長 湯凱元

市面上在過往十幾年常用的數位通訊技術，例如蜂巢式手機、WiFi、Bluetooth，是使用由1 GHz ~ 6 GHz之間的微波頻段，然而隨著這些通訊裝置愈來愈普及，使得頻段空間更顯擁擠，工程師想盡辦法避開這個頻段，另外現階段資料傳輸速度也無法跟上未來要求更高速的無線資料傳輸應用，例如高解析度數位電視、虛擬實境VR等。我們知道在通訊系統應用領域中，如果載波的頻率愈高，其可以承載的資料量就愈大，所以往更高頻段邁進是通訊系統的發展趨勢。

一般定義太赫茲訊號的頻率範圍是在0.1 THz至10 THz，其中波長在毫米波(mmWave)區段的0.1 THz (100 GHz)訊號，被工程師看是最適合提升做為載波的頻段，3GPP聯盟所規範的第五階段(5G)行動裝置，或WiFi聯盟所規範的下一代所謂WiGig(802.11ad)，甚至隨著無人車技術發達所採用的車用雷達裝置，都是使用0.1 THz左右的頻段，這使得過往研究太赫茲的技術人員找到一個應用領域的新藍海。

Virginia Diodes, Inc. (VDI)是全球領先的mmWave與Terahertz元件開發專家，早從1996年起，以獨有的Schottky Diodes技術，輕易將RF工程師所用的微波訊號轉換至50 GHz ~ 3THz等mmWave/ THz頻段，或者將高頻訊號降頻下來，過程中甚至可以執行調變或解調變，所有難掌握的高頻訊號可由波導管(waveguide)或喇叭天線(horn antenna)來傳輸。如果將這些元件搭配RF工程師常用的頻譜分析儀、訊號產生器，以及網路分析儀，瞬間就可將這些傳統儀器拿來使用在mmWave/ THz量測。

這個幾近天方夜譚的技術，多年前已由我們ATIDA廠商會員筑波科技代理進來，為因應近來5G技術的研發熱潮，於日前3/1主辦、ATIDA協辦之研



筑波科技許深福董事長分享通訊領域新趨勢



VDI CFO Dr. Stephen介紹該公司技術發展沿革



VDI Marketing Director Cliff詳細說明實驗架構

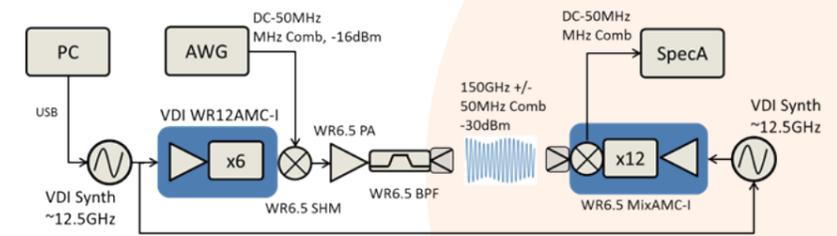
討會實體展示，並邀請VDI原廠Dr. Stephen 與 Cliff Director分享相關案例與測試技術，同時也邀請奕葉國際唐葆魁總經理分享mmWave頻段之探針平台。

研討會一開始是由筑波科技許深福董事長分享近來毫米波與太赫茲波在通訊領域的新趨勢，隨著5G技術的逐漸成熟，很明顯28、39 GHz頻段是所謂5G NR (New Radio)的熱門頻段，但將來也可能採用70、80 GHz，甚至100 GHz以上，跨入太赫茲領域，為滿足這麼高頻段使用，材料的選擇也變得很重要，例如量測材料在高頻下的介電係數是否符合系統設計，這已不是傳統工程師以常用的網路分析儀搭配昂貴治具可測得，但是用太赫茲領域普遍的時域分析儀(Time-Domain Spectroscopy; THz-TDS)就可輕易完成。

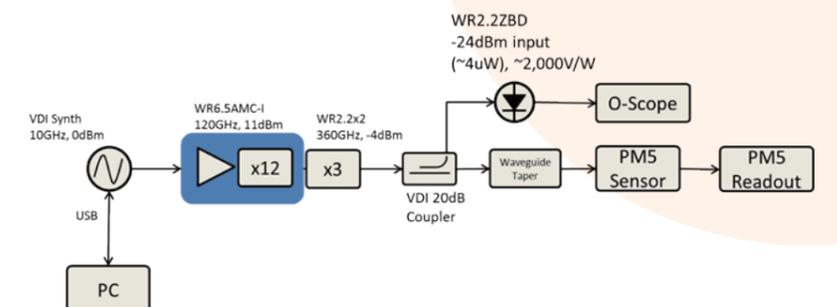
VDI CFO Dr. Stephen特別介紹該公司的技術發展沿革，以其卓越的mmWave/ THz技術，協助客戶在航太、通訊、材料等有非常多成功案例，面對5G技術的研發熱潮，採用其各式倍頻器、混頻器，可沿用現有的高頻設備，輕易擴充到 mmWave 頻段而節省鉅額成本。

在會場中，VDI Marketing Director Cliff 直接展示二種mmWave應用情境：

一、直接將10 GHz 連續波訊號倍頻到360



mmWave應用情境1.



mmWave應用情境2.

GHz，並證明可以直接以該公司power meter PM5讀取功率數值，另外也可以簡單使用Zero Bias Detector (ZBD)元件，將mmWave能量轉成直流電壓，直接使用示波器量，搭配VDI提供的數據轉換表，就可以得到與PM5一樣的數值。

二、模擬5G NR通訊應用，5G通訊很在意高頻載波是否可承載寬頻訊號，所以其特別展示將12.5 GHz連續波訊號倍頻到150 GHz，同時以任意波形產生器(AWG)產生寬達50 MHz之梳行訊號，以二部頻譜分析儀觀察調變前後的頻譜，結果是一致的。

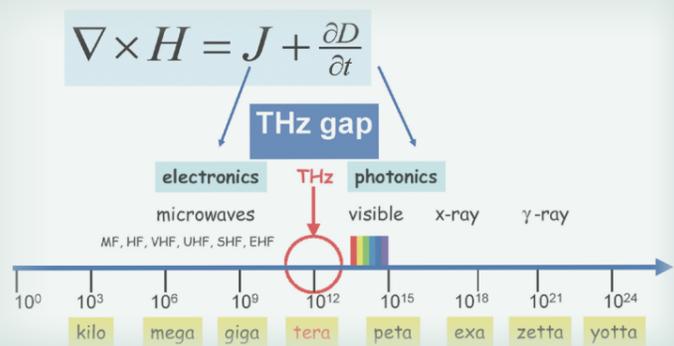
研討會最後是邀請奕葉國際唐葆魁總經理，介紹由該公司自行研發的mmWave頻段之探針平台，在mmWave頻段量測時，頂針與待測物因不同接觸面積、壓力，造成阻抗改變而測試失真，奕葉已克服這些問題，會場當中，也一一回覆學員提出實際應用時所遭遇的各項問題。

這次研討會報名人數因超出預期，所以主辦單位特別安排上下午二場，透過現場實際功能展示，證明mmWave / THz測試不再是困難重重，隨著5G技術在市場上迅速成長，我們一方面可以精進太赫茲的技術，同時找到殺手級的應用領域，讓產業與研究人員共創雙贏。

運籌帷幄 · 開創台灣太赫茲/毫米波新契機

太赫茲與毫米波是近年來逐漸受到重視的科技，在通訊、半導體、醫藥、材料都有突破應用，尤其是近來熱門的5G話題，全世界學研與產業均積極研發，然而跨入門檻非常高，各國政府已積極投入開發，為迎上技術精進潮流，台灣更應善用國際資源以加速競爭力。

ATIDA協會特別邀集國內外專家，分享最新太赫茲與毫米波資訊，其中饒理事長受邀參加七月中旬在成都舉行的太赫茲科學技術年會並發表演說，將帶回第一手大陸最新訊息。近來大陸科技發展進步飛快，全力往「中國製造2025」目標邁進，其中太赫茲技術扮演重要關鍵角色，因此了解其技術現況對我們極為重要，另外我們邀請資深產學菁英專家與精密設備商蒞臨分享，期待透過與會專家學者激盪，共同精進台灣太赫茲技術發展實力，歡迎產業、學界先進，一同報名參加。



| Time | Topic | Speaker |
|-------------|---|----------------------------|
| 13:00-13:30 | Welcome 現場報到 | |
| 13:30-13:40 | Opening 歡迎致詞 | 許深福 發起人/ATIDA |
| 13:40-14:10 | 太赫茲大陸發展現況與發展趨勢 | 饒達仁 理事長/ATIDA |
| 14:10-14:50 | 兆赫波元件製作與其應用 | 謝卓帆 主任/工研院量測中心 |
| 14:50-15:30 | CMOS Devices and Circuits for THz Applications | 李俊興 教授/中央大學電機系 |
| 15:30-15:50 | Tea Break / Demo 應用展示 | |
| 15:50-16:30 | Recent Advances in Terahertz Spectroscopy And Imaging | Dr. Philip Taday/ TeraView |
| 16:30-17:00 | mmWave probe station在量測之重要性與注意事項 | 詹宏安 經理/奕葉國際 |
| 17:00-17:30 | Forum 論壇 | Panelists |
| 17:30-17:40 | Closing 圓滿閉幕 | 饒達仁 理事長/ATIDA |

活動日期：2018/7/27 PM13:00 – 17:40
 活動地點：新竹生醫園區筑波醫電大樓(竹北市生醫二路66號)
 主辦單位：亞洲太赫茲產業發展協會；協辦單位：筑波科技醫電分公司
 費用說明：原價NT\$1000元，會員優惠價NT\$300元

聯絡窗口：洪小姐 連絡電話：03-5525633 分機 513
 電子郵件：ATIDA@acebiotek.com
 入會資訊：https://goo.gl/qG9TPL

活動預告



全國太赫茲科學技術學術年會

活動日期：2018, 7/13~15

活動地點：中國成都

主辦單位：中國電子學會太赫茲分會、太赫茲科學協同創新中心

活動網址：<http://www.thznetwork.org.cn/shownews.asp?id=988>

聯絡窗口：張雅鑫：zhangyaxin@uestc.edu.cn

鍾任斌：rbzhong@uestc.edu.cn

全國太赫茲科學技術學術年會於今年邁入第四屆，理事長親自帶隊參與且將於年會上做特別報告，歡迎會員一同前往。中國太赫茲的應用與研究在時程上已大幅領先，相信有許多地方值得借鏡與參考，期待與中國在太赫茲方向的接軌與合作。



ATIDA太赫茲論壇

「運籌帷幄·開創台灣太赫茲/毫米波新契機」

活動日期：2018, 7/27

活動地點：新竹生醫園區筑波醫電大樓

主辦單位：亞洲太赫茲產業發展協會(ATIDA)

聯絡窗口：03-5525633 ext.513 洪小姐 ATIDA@acebiotek.com

亞洲太赫茲產業發展協會於去年十一月舉辦第一次「太赫茲發展現況與應用趨勢論壇」迴響熱烈，今年，在協會理事長從中國的全國太赫茲科學技術學術年會回國後兩週舉辦「運籌帷幄·開創台灣太赫茲/毫米波新契機」，將帶回中國在太赫茲技術發展的最新消息，敬請期待，報名從速。



IRMMW – THz 2018

活動日期：2018, 9/9~14

活動地點：日本名古屋

主辦單位：IEEE, MTT-S, TeraTech, JSPS...

活動網址：<http://www.irmmw-thz2018.org/>

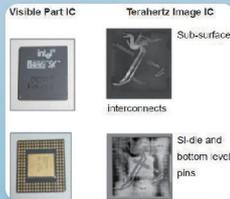
全球性的IRMMW研討會可以說是太赫茲的一大盛會，今年是第四十四個年頭，三年一度回到亞洲，已有許多會員將會前往一同參加，機會難得，歡迎共襄盛舉。

Asia Terahertz Industry Development Association

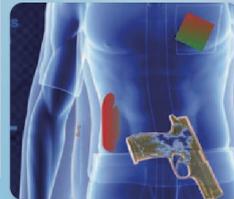
非接觸式檢驗



半導體測試



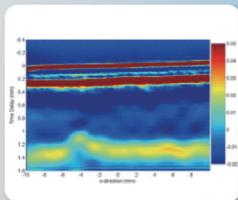
安檢



醫學檢驗



非破壞性材料分析



藥物發展



食安

