

利用不同調變波形評估振幅調變於表面聲波霧化器之效能 影響

An evaluation of the influence of amplitude modulation on the performance of a surface acoustic wave atomizer using various modulation waveforms

余家泉¹, 劉舜維², 陳明光^{1,2,3}

Chieh C. Woo¹, Shun-Wei Liu², Ming K. Tan^{1,2,3}

¹蒙納許大學馬來西亞校區機械工程系, ²明志科技大學有機電子研究中心, ³明志科技大學機械工程系

摘要

隨著微尺度致動技術的進展，晶片級表面聲波（SAW）霧化器已能在晶片上直接產生氣溶膠，並展現於藥物遞送、表面消毒以及微尺度噴霧冷卻等應用中的高度潛力。然而，這類裝置的實際推廣仍受到固有限制，即其霧化速率偏低，使得整體通量與平台可擴展性受限。針對此問題，過去研究已指出，調整激發策略（如振幅調變、脈衝寬度調變及混合調變）可有效提升霧化效能；其中，振幅調變因其架構簡單、易於整合而特別受到重視。本研究進一步探討振幅調變策略，針對正弦波、方波與三角波三種調變波形進行系統性比較。量測結果顯示，在相同激發功率條件下，正弦調變能提供最高的霧化速率，同時亦使液體溫度上升幅度最低。此結果突顯波形選擇在優化 SAW 霧化效能中的重要性，並說明可在不增加熱負載的情況下提升霧化通量，為未來高效率 SAW 霧化器的設計提供關鍵指引。

關鍵詞：表面聲波、噴霧器、振幅調變、脈衝寬度調變、混合調變

Abstract

Recent advances in microscale actuation have enabled compact surface-acoustic-wave (SAW) nebulisers to generate aerosols directly on chip, offering attractive possibilities for applications ranging from point-of-care drug delivery to surface decontamination and microscale spray cooling. Despite their versatility, the broader deployment of these devices is constrained by inherently low atomization rates, which limit overall throughput and restrict practical scalability. Enhancing the excitation strategy has emerged as a promising route to overcome this bottleneck, with prior work demonstrating performance gains through schemes such as amplitude modulation, pulse-width modulation, and hybrid modulation. Among these, amplitude modulation remains particularly appealing due to its simplicity and ease of integration. In this work, we further investigate the amplitude-modulation approach by systematically comparing three different modulating waveforms—sinusoidal, square, and triangular. Our measurements reveal a clear performance distinction: under a fixed excitation power, sinusoidal modulation consistently produces the highest atomization rate while simultaneously yielding the smallest increase in liquid temperature. These results highlight the importance of waveform selection in optimizing SAW-based nebulisation and provide insight into achieving higher throughput without incurring undesirable thermal loads.

Keywords : Surface acoustic wave、atomizer、amplitude modulation、pulse width modulation、hybrid modulation

1. 前言

霧化技術在工程科學、材料製程以及生醫領域中佔有核心地位，廣泛應用於表面冷卻 [1]、藥物遞送 [2]、精密塗佈 [3]、噴墨列印 [4]、加濕 [5]、微粒合成與環境控制等多種技術場景。隨著微奈米製造、生醫工程與熱管理科技的快速發展，對於液滴尺寸均一性、霧化效率、長期穩定性與可攜式化的需求亦日益提高。因此，發展具高效能、可控性與低維護成本的霧化方法，已成為流體工程與微流體系統中的重要研究方向。

傳統霧化器多依賴噴嘴 (nozzle) 作為液滴形成的主要結構，藉由壓力、振動或高速氣流使液體通過孔徑以產生微米級液滴 [6]。噴嘴孔徑大小直接影響液滴的分布與尺寸控制，因此成為霧化性能的主要限制因素。壓電驅動噴嘴是常見的一種形式，其利用週期性壓力波使液體高速噴出，形成細緻液滴。然而，另一種電場驅動的技術—電流體動力霧化或電噴霧 (electrospray)—則利用外加電勢使液體形成 Taylor 錐並產生高度均一的霧滴 [7]。這些噴嘴式技術雖能產生高品質液滴，但仍存在共同的技术瓶頸，即噴嘴的堵塞問題。

噴嘴堵塞可能源自多種因素，例如冷凝物堆積、液汽滯留造成的氣鎖 (vapor lock) [8]、外來粒子引發的顆粒橋接 (particle bridging) [9]，甚至奈米顆粒與溶液中微米雜質的異質凝聚所造成的流致聚集現象。值得注意的是，導致堵塞的顆粒尺寸常遠小於噴嘴直徑，但只要數顆粒子同時抵達孔口即可形成阻塞。先前研究亦指出，在微通道輸運中，奈米級懸浮粒子與微米級雜質可能因流動誘發的凝聚現象而導致嚴重堵塞，即使顆粒遠小於通道尺寸亦然。由於噴嘴式裝置難以避免雜質累積，故需頻繁停機清潔，降低可長時間運作與連續處理的能力。

為克服噴嘴堵塞與液滴尺寸受限等問題，無噴嘴 (nozzle-free) 霧化技術逐漸受到重視。這類方法並不依賴固定孔徑，而是利用外加力場誘發液體自由表面的動態失穩，使其自然裂解成霧滴。無噴嘴霧化的液滴尺寸取決於液體物理性質 (如黏度、密度、表面張力) 與外加能量，而非結構性限制，因此具有液滴控制彈

性高、不易堵塞、且適合微型化整合的優勢。

其中，以表面聲波 (surface acoustic wave, SAW) 為基礎的霧化技術近年來備受關注 [10,11]。SAW 裝置由壓電基板與叉指電極 (interdigital transducer, IDT) 構成，施加高頻電訊號後於表面激發聲波，其能量侷限於表面附近的一個聲波長內。當液體置於 SAW 基板上時，部分聲能會耦合進入液體，形成聲輻射壓與體積聲流 (acoustic streaming)，誘發液體震動、流動甚至噴射。當輸入能量達到臨界值後，液面因非線性聲力作用而產生破裂，形成粒徑約 1–10 μm 、噴射速度可達 1 m/s 的微細霧滴。由於 SAW 裝置可與微機電系統與微流體平台整合，其霧化技術在可攜式霧化、藥物噴霧、生醫檢測與熱管理等領域具有高度潛力。

儘管 SAW 霧化具有無噴嘴、不易堵塞、可微型化等優點，其霧化量 (nebulization rate) 相對偏低是重要挑戰 [12]。先前研究提出數種提升霧化量的方法，包括提升主要頻率或導入不同的電訊號調變策略，如脈衝寬度調變 (PWM)、振幅調變 (AM) 與混合調變 [13]。這些調變方式透過改變能量輸入的時間分布，提高瞬時能量耦合效率，使霧化量有所提升。文獻顯示，對於某些液體，混合調變可使霧化量較單一調變方式提升超過 70%。

近期 SAW 霧化器亦被應用於電漿活化水 (plasma-activated water, PAW) 之霧化 [14]。PAW 含有高濃度的反應性氧氮物種，已被證實可用於微生物滅活、農作物促生、表面冷卻以及廢水處理等多項應用。然而，PAW 的電導度會隨反應性物種濃度的增加而上升，導致液膜受電力作用增強、潤濕性提高，使液膜在 SAW 基板上的負載量下降而降低霧化效率。文獻指出，對於電導度約 0.3 mS/cm 的 PAW，其霧化率可較去離子水下降近 70%。因此，如何在高電導度液體條件下保持高霧化效率，是 SAW 霧化技術在應用上必須突破的關鍵技術問題。

基於上述背景，本研究旨在進一步探討不同振幅調變策略，特別是方波與三角波振幅調變 (AM)，對 SAW 霧化行為的影響。透過調變波形的差異，我們希望改善能量耦合效率、提高液面動力不穩定強度，進一步提升霧化量，

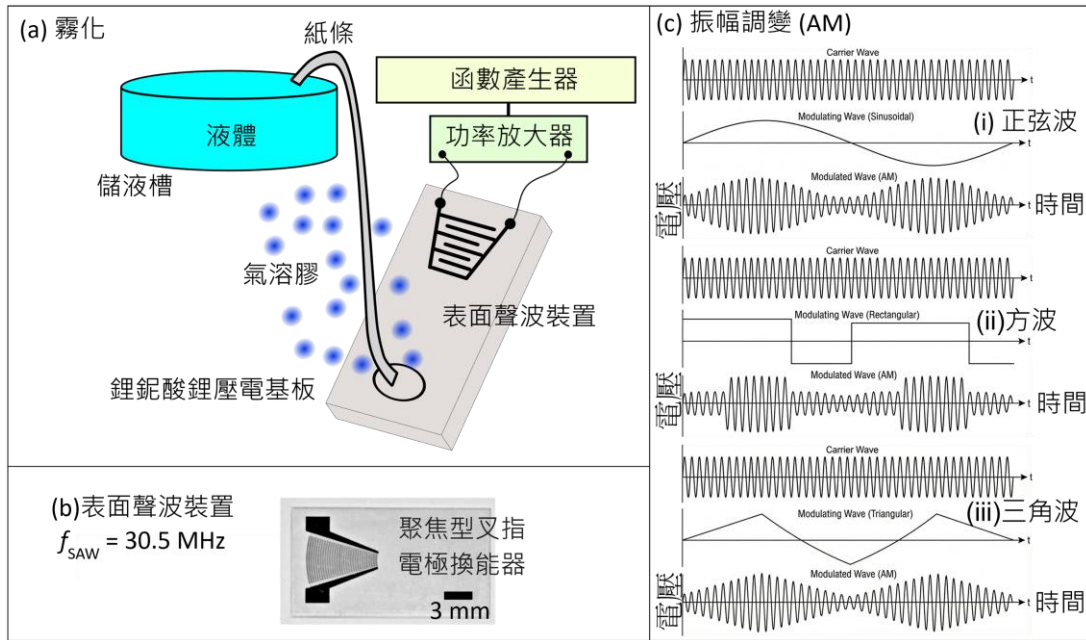


圖 1: (a) 用於量測水之霧化量的實驗架構示意圖。(a) 實驗中，儲液槽內的水透過一細長紙質毛細導液條輸送至霧化裝置；藉由調整儲液槽與聲波裝置之間的高度差來控制液體在紙條中的流速。函數產生器與放大器提供放大後的正弦訊號，並於裝置的共振頻率下驅動換能器以產生表面聲波。(b) 本研究所使用之表面聲波 (SAW) 裝置外觀。(c) 振幅調變激發方式之示意圖: (i) 正弦波, (ii) 方波, (iii) 三角波。

尤其是針對電導度較高的液體。本研究的結果將有助於理解 SAW 能量輸入與液體動態之間的關聯，並提升其在生醫、農業與熱管理領域的實際應用潛能。

2. 研究方法

本研究之表面聲波 (surface acoustic wave, SAW) 霧化器採用聚焦橢圓形單相單向換能器 (single phase unidirectional transducer, SPUDT) 設計，以提升能量聚焦效率並降低反向傳播損失，如圖 1 所示。叉指電極 (interdigital transducer, IDT) 使用 295 nm 鋁 (Al) / 5 nm 鈦 (Ti) 金屬層堆疊，並以標準紫外光微影製程圖案化於 128° Y cut、X 向傳播之單晶鋰鉍酸鋰 (LiNbO₃, LN) 壓電基板 (Hangzhou Freq Control Electronic Technology Ltd., China) 上。該基板切向可提供高機電耦合係數，有利於在較低驅動電壓下產生足夠表面加速度以啟動霧化。

為在共振條件下激發 SAW，將函數產生器 (AFG1062; Tektronix, USA) 之交變電訊號導入高頻功率放大器 (ZHL 5W 1+; Mini Circuits, USA)，再輸入至 SAW 裝置之 IDT。量測鏈路包含電壓探棒 (TPP 0201; Tektronix)

與電流探棒 (P6022; Tektronix)，並以示波器 (TDS 2012C; Tektronix) 讀取與記錄。

本研究比較三種振幅調變 (amplitude modulation, AM) 激發波形：1) 正弦波 AM、2) 方波 AM、3) 三角波 AM。為排除調變頻率對霧化行為的干擾，AM 調變頻率 f_{AM} 固定為 1 kHz (依既有研究之最佳值)，而載波則設定於裝置共振頻率附近進行掃描與比對後鎖定操作頻點。總輸入電功率以 AM 驅動之等效關係估算：

$$P_e = P_c \left(1 + \frac{m^2}{2} \right),$$

其中載波功率 $P_c = V_c I_c$, $m = V_m / V_c$, 且

$$V_m = \frac{(V_{\max} - V_{\min})}{2},$$

$$V_c = \frac{(V_{\max} + V_{\min})}{2},$$

$$I_c = \frac{(I_{\max} + I_{\min})}{2}.$$

以上電壓與電流量測均以 RMS 值表示； V_{\max} ,

V_{\min} 分別為量測到的最大與最小 RMS 電壓， I_{\max}, I_{\min} 則為最大與最小 RMS 電流。此定義使不同 AM 波形之能量輸入可合理比較。

為實現連續供液與穩定液膜形成，於儲液槽與 SAW 霧化區之間放置紙質毛細導液條 (WIP 100DLE; Suorec Sdn. Bhd., Malaysia)，尺寸為長 80 mm × 寬 8 mm × 厚 300 μm 。在 SAW 激發下，聲致效應於紙條內部形成等效負壓，與毛細作用共同驅動液體連續釋放至 SAW 表面，進而在 IDT 上方形成薄膜狀液柱 (meniscus film)。隨著基板表面加速度提高，液面受聲輻射壓與體積聲流 (acoustic streaming) 作用產生界面失穩，最終破裂為微米級氣溶膠。

SAW 裝置採倒置配置，於其下方置放預先去皮之收集燒杯，並以固定 5 分鐘的收集時間統一量測條件。霧化後液滴沉積於燒杯中，使用精密天平 (MS303S/01; Mettler Toledo, Switzerland) 量測收集前後重量差 Δm ，以計算質量型霧化速率： $\Delta \dot{m} = \Delta m / \Delta t$ 。其中 $\Delta t = 300 \text{ s}$ 。本研究主要以 \dot{m} (g/min) 呈現結果；若需體積流率可再依流體密度換算。

為比較 SAW 基板在霧化過程中對液膜熱行為的影響，將熱電偶直接接觸霧化區液體，並以資料記錄器 (GL820; Graphtec America Inc., USA) 連續紀錄溫度。量測過程保持環境條件一致，並以相同輸入功率與 AM 參數進行對照，以分離表面性質對熱流動耦合的影響。

3. 結果與討論

在探討不同調變波形對 SAW 霧化效能的影響之前，本研究首先評估了將載波由傳統的正弦波改為方波後對霧化速率的影響。由於不同波形在相同峰對峰電壓下的等效功率並不一致，因此在比較兩者性能時，方波的峰對峰電壓需適度降低，以確保兩種載波在相同激發功率條件下進行公平比較。當激發功率固定為 3 W 時，由表 1 可觀察到，以正弦波作為載波的霧化速率略高於方波載波。其原因可歸因於正弦波具有較高的峰對峰電壓，導致基板表面位移 (ξ , surface displacement) 與表面加速度 ξ 更大，使施加於液膜的表面力增強 ($F \sim m \xi$ ，其中 m 代表質量)，進而促進液氣界面的快速失

穩與氣溶膠生成。

表 1: 當激發功率固定為 $P_e = 3 \text{ W}$ 時所量測到的霧化速率 \dot{m} 和溫度上升 ΔT 。研究評估了兩種不同的載波激發訊號：正弦波與方波。需特別指出的是，此處並未施加振幅調變 (AM)。誤差線表示三次重複量測所得資料的標準差。

	載波: 30.5 MHz	
	正弦波	方波
霧化質量流率 \dot{m} (g/min)	0.58 ± 0.01	0.49 ± 0.03
溫度上升 ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	24.4 ± 0.5	25.6 ± 0.3

此外，由於較高的時空速度梯度會提升體積聲流 (acoustic streaming) 強度 (i.e., $F_{\text{dc}} \sim \rho(\mathbf{u}_1 \cdot \nabla \mathbf{u}_1)$ ，其中 ρ 代表密度， \mathbf{u}_1 代表聲粒子速度)，正弦波載波亦有助於在基板上形成更長且更穩定的薄液膜，使霧化過程更加活躍。值得注意的是，雖然正弦波載波的表面位移大於方波載波，但實驗結果顯示正弦波的液體升溫量反而稍低。液膜溫度上升主要與黏滯吸收 (viscous absorption) 相關；液體體相內的聲波衰減可透過 $\alpha \approx b\omega^2 / (2\rho_0 c^3)$ 進行估算，其中 $b = 4\mu/3 + \mu_B$ ， ρ_0 為水的平衡密度， ω 為角頻率， c 為聲速， μ 為動力黏度， μ_B 為體積黏度。儘管正弦波可達到較高表面位移，但其在單一激發週期中處於最大位移的時間較短；相對地，方波在整個週期中幾乎維持於最大位移，造成液膜受到更持續的能量輸入，使其累積熱量較多，因而呈現略高的液膜溫度。

上述結果顯示，在霧化應用中，採用 (載波) 正弦波形之性能優於方波形。因此，在後續比較不同調變波形 (正弦、方波及三角波) 的實驗中，將僅使用正弦載波作為激發訊號。

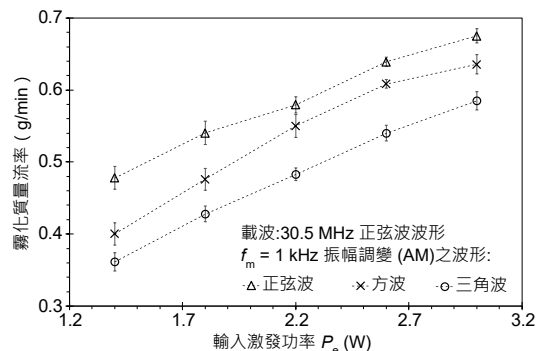


圖 2: 以三種不同的調變波形—正弦波、方波與三角

波一量測到的霧化速率，在不同激發功率 P_e 下。這三種調變波形的調變頻率皆為 $f_m = 1$ kHz。此外，其載波波形為頻率 $f_{SAW} = 30.5$ MHz 的正弦波。為了方便視覺化，圖中加入了趨勢線；誤差線則表示三次重複量測所得資料的標準差。

由圖 2 可觀察到，在三種調變波形（調變頻率皆固定為 1 kHz）之比較中，採用正弦調變於整個激發功率範圍內均展現出最高的霧化速率。針對各激發功率而言，方波調變的峰對峰激發電壓最低，使得基板之表面位移相對較小，因而其霧化速率普遍略低於正弦調變。至於三角波調變，雖具有高於正弦波的峰對峰電壓，但由於其在單一週期中達到最大位移的時間極短，加上其線性速度梯度所帶來的聲流效應較弱，相較於正弦波中較長的峰值持續時間與較陡峭的速度梯度，最終導致三角波調變的霧化速率在三者中最低。

由圖 3 可觀察到，在三種調變波形條件下的液體溫度變化中，正弦調變所造成的液體溫度上升 (ΔT) 最小，顯著低於方波與三角波調變。方波調變在三者中導致最高的溫升，其主因在於其於一完整激發週期內於最大位移位置停留的時間最長，為黏滯加熱 (viscous heating) 提供充足且持續的能量傳遞途徑。相較之下，三角波調變的溫度上升介於兩者之間；其最大位移幅度高於正弦波，因此溫升較正弦波高；然而其最大位移的有效持續時間遠短於方波，使得黏滯加熱不如方波顯著，故其溫升仍低於方波調變。

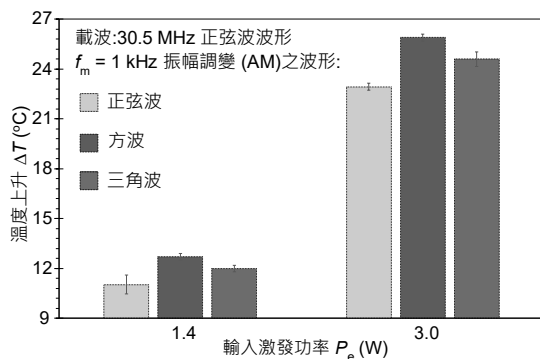


圖 3: 於兩種不同激發功率 P_e 下，量測三種調變波形（正弦、方波與三角波）所造成的液體溫度上升 ΔT 。誤差線則表示三次重複量測所得資料的標準差。

4. 結論

本研究首先比較了將載波訊號由常用的正弦波改為方波後對霧化效能的影響。於相同激發功率 3 W 的條件下，結果顯示正弦波能提供較高的霧化速率，且液體溫度上升幅度亦較低。進一步地，在振幅調變條件下針對三種調變波形（正弦、方波及三角波）進行評估後可發現，在固定激發功率下，正弦調變波形不僅可達到最高霧化速率，同時亦使液體溫度上升最小。此結果顯示，僅提高最大位移並不足以提升霧化效能，例如三角波雖具有較高的最大位移，但其在單一激發週期中處於最大位移的時間極短，因而無法轉化為更高的霧化量。同樣地，方波雖具有較長的最大位移持續時間，但由於其最大位移幅度較低，也無法使霧化速率超越正弦調變。整體而言，在三種調變波形中，正弦調變波形在霧化速率與抑制液體升溫兩方面均展現最佳整體性能。

5. 參考文獻

- Rui Zeng, Huifang Kang, Muhammad Umar, Xu Liang and Ya-nan Zhao (2025), "Design and thermal management study of fuel cell spray cooling system," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 270, pp. 126271. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126271>
- Amr Seifelnasr, Xiuhua Si, Jack Yongfeng Zhang, Mary Ziping Luo, Ray Lameng Lei and Jinxiang Xi (2025), "Improving nasal spray deposition: advances and strategies to overcome anatomical and physiological barriers," *Expert Opinion on Drug Delivery*, Vol. 22, pp. 1895. <https://doi.org/10.1080/17425247.2025.2568086>
- Vahid Vatanpour, Zahra Mehrabi, Amir Hossein Behrooz, Borte Kose-Mutlu, Recep Kaya and Ismail Koyuncu (2025), "Spray-coating technique in the fabrication and modification of membranes: A review," *Separation and Purification Technology*, Vol. 378, pp. 134752. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134752>
- Jinhong Liu, Chen Chen, Shenghui Xia, Hui Zhang and Ajit Khosla (2025), "Gas-specific adsorption capability of titanium dioxide and MXene nanocomposite thin films prepared by ultrasonic spray printing using inks oxidized at

- room temperature,” *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 681, pp. 307. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.11.158>
5. Mohammed Ziauddin, Fadi Alnaimat and Bobby Mathew (2025), “Solar humidification and dehumidification system: Integrating ultrasonic atomizer and solar still state-of-art,” *Separation and Purification Technology*, Vol. 378, pp. 134550. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134550>
 6. Shou-Shing Hsieh, Yu-Fan Hsu and Meng-Lin Wang (2014), “A microspray-based cooling system for high powered LEDs,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 78, pp. 338. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.066>
 7. Hsiu-Che Wang and Alexander V. Mamishev (2012), “Heat transfer correlation models for electrospray evaporative cooling chambers of different geometry types,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 40, pp. 91. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.061>
 8. Sheng-Chih Shen, Yu-Jen Wang and Yung-Yue Chen (2008), “Design and fabrication of medical micro-nebulizer,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.144, pp.135. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.12.004>
 9. Ayoung Lee, Kai Sudau, Kyung Hyun Ahn, Seung Jong Lee and Norbert Willenbacher (2012), “Optimization of experimental parameters to suppress nozzle clogging in inkjet printing,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 51, pp. 13195. <https://doi.org/10.1021/ie301403g>
 10. Kiing S. Wong, William T. H. Lim, Chien W. Ooi, Leslie Y. Yeo and Ming K. Tan (2020), “In situ generation of plasma-activated aerosols via surface acoustic wave nebulization for portable spray-based surface bacterial inactivation,” *Lab on a Chip*, Vol. 20, pp. 1856. <https://doi.org/10.1039/D0LC00001A>
 11. Chenhui Gai, Yu Gu, Qutong Yang, Suxiao Zhao, Yizhan Ding, Yulin Lei, Junlong Han, Hong Hu and Chen Fu (2025), “Surface acoustic wave-assisted swing-angle spray: From mechanism investigation to deposition characteristics and in vivo wound healing,” *Lab on a Chip*, Vol. 26, pp. 364. <https://doi.org/10.1039/D5LC00964B>
 12. Jie Li, Mehdi H Biroun, Ran Tao, Yong Wang, Hamdi Torun, Na Xu, Mohammad Rahmati, Yifan Li, Desmond Gibson and Chen Fu (2020), “Wide range of droplet jetting angles by thin-film based surface acoustic waves,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 53, pp. 355402. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab8f50>
 13. Chieh C. Woo, Shayan N. Nia, Darwin Gouwanda, Leslie Y. Yeo and Ming K. Tan (2023), “Efficient modulated acoustic nebulisation for aerosol delivery and detection of plasma-activated water for surface disinfection and decontamination,” *Surfaces and Interfaces*, Vol. 41, pp. 103162. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103162>
 14. Nicholas S. L. Chew, Kiing S. Wong, Wei S. Chang, Chien W. Ooi, Leslie Y. Yeo and Ming K. Tan (2022), “Nanoscale plasma-activated aerosol generation for in situ surface pathogen disinfection,” *Microsystems & Nanoengineering*, Vol. 8, pp. 41. <https://doi.org/10.1038/s41378-022-00373-3>
 15. Kar M. Ang, Leslie Y. Yeo, Yew M. Hung and Ming K. Tan (2016), “Amplitude modulation schemes for enhancing acoustically-driven microcentrifugation and micromixing,” *Biomicrofluidics*, Vol. 10, pp. 054106. <https://doi.org/10.1063/1.4963103>