

低雜訊與高再現性之全蒸鍍鈣鈦礦/銀複合基板用於表面增強拉曼感測

All-Evaporated Perovskite/Ag Surface-Enhanced Raman Sensing with Low Noise and High Reproducibility

郭芷妍

黃詩翰

劉舜維*

明志科大有機電子研究中心

明志科大有機電子研究中心

明志科大有機電子研究中心

摘要

表面增強拉曼散射 (SERS) 技術在微量檢測中極具潛力，但傳統純金屬基板常面臨高背景雜訊與重現性不佳等瓶頸。為突破此限制，本研究提出一種無溶劑的全蒸鍍真空製程 (all-evaporation process)，成功製備出高均勻度的全無機鈣鈦礦/銀 (CsPbI₃/Ag) 複合 SERS 基板。與傳統純銀奈米結構相比，引入 CsPbI₃ 底層不僅顯著抑制了基板的背景雜訊，更有效調控了銀奈米顆粒的生長形貌；在最佳化的銀層厚度 (22 nm) 下，成功激發了強烈的電磁增強 (EM) 熱點，並結合界面電荷轉移所帶來的化學增強 (CM)，大幅放大了分析物的拉曼訊號。為驗證其實務應用價值，我們將此最佳化基板應用於農業殺菌劑噻苯達唑 (TBZ) 之微量檢測。實驗結果顯示，該基板在 10⁻⁷ M 至 10⁻⁴ M 的寬廣動態範圍內展現出優異的線性定量能力，最低檢測極限 (LOD) 低至 1 × 10⁻⁷ M。此外，多點量測下的訊號相對標準偏差 (RSD) 僅為 9%，展現出極佳的重現性與均勻度。本研究不僅為高效能複合 SERS 基板提供了創新的製程策略，更充分突顯了其在實際農藥殘留與食品安全監測中的巨大應用潛力。

關鍵詞：表面增強拉曼散射、鈣鈦礦、化學品感測、化學增益機制、低雜訊

Abstract

Surface-enhanced Raman scattering (SERS) exhibits immense potential in trace detection; however, traditional pure metal substrates frequently suffer from high background noise and poor reproducibility. To overcome these limitations, this study proposes a solvent-free all-evaporation process to fabricate highly uniform all-inorganic perovskite/silver (CsPbI₃/Ag) composite SERS substrates. Compared to conventional pure Ag nanostructures, the introduction of the CsPbI₃ underlayer not only significantly suppresses the background noise of the substrate but also effectively modulates the growth morphology of the overlaid Ag nanoparticles. At an optimized Ag thickness of 22 nm, intense electromagnetic (EM) hotspots are successfully excited. Coupled with the chemical mechanism (CM) induced by interfacial charge transfer, this synergistic effect drastically amplifies the Raman signals of the analytes. To evaluate its practical applicability, the optimized substrate was employed for the trace detection of the agricultural fungicide thiabendazole (TBZ). Experimental results demonstrate that the substrate exhibits excellent linear quantitative capability across a broad dynamic range from 10⁻⁷ M to 10⁻⁴ M, achieving a limit of detection (LOD) as low as 1 × 10⁻⁷ M. Furthermore, the signal relative standard deviation (RSD) from multi-point measurements is merely 9%, indicating exceptional reproducibility and uniformity. This work not only provides an innovative fabrication strategy for high-performance composite SERS substrates but also highlights their tremendous potential for real-world pesticide residue and food safety monitoring.

Keywords: surface-enhanced raman scattering, perovskite, chemical sensing, chemical enhancement mechanism, low noise

1. 介紹

表面增強拉曼散射 (Surface-Enhanced Raman Scattering, SERS) 作為一種具備極高靈敏度與無損檢測特性的分析技術, 已成為環境監測、食品安全與生物感測等領域中不可或缺的強大工具。SERS 技術有效克服了傳統拉曼散射截面積極小、訊號微弱的先天限制。透過金屬奈米結構所產生的局域表面電漿共振 (Localized Surface Plasmon Resonance, LSPR) 效應, 大幅放大分子的拉曼訊號, 甚至可達單分子偵測等級。其核心的電磁增強機制 (Electromagnetic Mechanism, EM) 源自於入射光激發金屬奈米結構中的自由電子集體振盪, 進而在顆粒間狹窄間隙產生高度侷限的局部電場區域, 亦即所謂的熱點 (hot spots)。在眾多金屬材料中, 銀 (Ag) 因其較低的介質損耗與優異的電漿共振特性, 被廣泛應用於 SERS 基板設計中[1-5]。

然而, 傳統純銀奈米結構的 SERS 基板仍面臨若干關鍵挑戰。純金屬基板不僅存在訊號再現性 (reproducibility) 不足的問題, 銀表面也極易因氧化或硫化導致長期穩定性衰退。此外, 在成膜過程中, 銀容易由島狀結構聚集成連續薄膜, 造成電漿阻尼與訊號衰減[6-9]。為突破單一物理增強的限制, 近年研究逐漸導入半導體-金屬的混合結構, 藉由引入化學增強機制 (Chemical Mechanism, CM) 來產生協同效應[10-14]。相較於純金屬, 半導體在調控 SERS 活性方面提供了更高的靈活性, 透過設計其晶格、能帶結構、摻雜濃度、尺寸與形貌可有效調整性能。其中, 鈣鈦礦材料因具備超高光吸收係數、可調控的帶隙、優異的載子遷移率及製程成本低等特性而脫穎而出。將鈣鈦礦與銀奈米顆粒結合, 不僅能藉由能階匹配促進基板與分析物之間的電荷轉移 (Charge transfer, CT), 更因為鈣鈦礦的覆蓋, 能有效保護金屬免受環境干擾, 同時抑制基板本身的背景螢光雜訊, 這對於獲取高

訊噪比的拉曼光譜至關重要[15-17]。

目前, 本研究團隊已透過溶液製程 (solution process) 成功開發出鈣鈦礦或鈣鈦礦/金屬複合 SERS 基板, 並展現出優異的分子檢測能力[15]。然而, 溶液製程在邁向高可靠度 SERS 感測器的道路上, 存在不可忽視的侷限性: 首先, 製程中常需使用有毒溶劑, 且殘留的溶劑分子極易干擾 SERS 訊號; 其次, 溶液法難以精確控制並製備厚度低於 50 nm 的超薄膜, 且容易產生針孔 (pinholes), 導致大面積成膜的均勻性不佳, 同時, 鈣鈦礦前驅液體中的溶劑或鹵素離子在殘留的液體中, 極易在製程中腐蝕並破壞上層共存的金屬奈米結構, 導致 SERS 活性的不可逆衰減。

為徹底解決溶液法的痛點, 並實現高

均勻性與高穩定性的 SERS 檢測, 本研究提出一種全蒸鍍製程 (all-evaporation process) 來製備新型複合式 SERS 基板。我們首先於裸玻璃基板上, 利用熱共蒸鍍技術精準沉積全無機鈣鈦礦 (CsPbI_3) 薄膜, 經退火處理使其結晶後, 再於其上沉積銀奈米顆粒。此無溶劑 (solvent-free) 的真空製程不僅能實現極佳的薄膜保形性 (conformal deposition) 與大面積均勻性, 更徹底避免了溶劑對金屬界面的腐蝕破壞。利用濃度為 1×10^{-5} M 的羅丹明 6G (R6G) 水溶液作為檢測分子, 並追蹤 613 cm^{-1} 處的拉曼峰強度以進行結構 (如薄膜厚度與顆粒密度) 的最佳化; 隨後, 我們將此最佳化之 CsPbI_3/Ag 基板實際應用於農業殺菌劑噻苯達唑 (Thiabendazole, TBZ) 的動態檢測。實驗結果顯示, 該基板在 10^{-7} M 至 10^{-4} M 的極低濃度範圍內展現出優異的檢測靈敏度, 充分證明了全蒸鍍 CsPbI_3/Ag 複合基板在環境監控與食品安全微量檢測中的巨大應用潛力。

2. 實驗步驟

2-1 基板製備

本研究使用商用玻璃基板 (UNI-ONWARD UR-GLASS, 28 mm × 18 mm × 0.7 mm) 作為基底材料。基板先以中性清潔劑清洗, 隨後依序置於去離子水 (DI water)、丙酮 (acetone) 與異丙醇 (Isopropyl Alcohol) 中以超音波震盪機進行清洗, 每道步驟分別清洗 10 分鐘, 完成後取出基板並以氮氣槍去除表面殘留溶液後將基板轉移至充氮手套箱中, 基板透過傳遞系統進入高真空熱蒸鍍腔體 (真空度 $< 1 \times 10^{-6}$ Torr) 進行薄膜沉積。

2-2 CsPbI₃ 薄膜沉積

採用熱共蒸鍍方式沉積 CsI (99.999%, Alfa Aesar) 與 PbI₂ (>99.999%, Sigma-Aldrich), 蒸鍍速率分別為 1 Å/s 與 0.9 Å/s, 總厚度控制為 20 nm。沉積完成後, 基板轉移至氮氣手套箱內以加熱板, 在溫度 100 °C 的條件下退火 3 分鐘, 使混合層轉化為 CsPbI₃ 鈣鈦礦結構。

2.3 銀奈米粒子沉積

基板再次轉移至蒸鍍腔體, 在真空度 1×10^{-6} Torr 下以 0.3 Å/s 速率沉積銀至不同厚度。其中, 22 nm 為最佳化條件, 形成最終 Glass/CsPbI₃/Ag 的複合 SERS 基板。

2.4 分析物製備與量測

將 R6G 與 TBZ 溶解於去離子水製備不同濃度溶液。SERS 測試時, 將 2 μL 分析物滴於 SERS 基板表面, 待其乾燥後進行量測。Raman 測試使用商用微拉曼光譜系統, 激發波長為 532 nm (亦具 633 nm 與 785 nm 選項)。雷射經 ND 濾光片後, 由 50× 物鏡 (NA = 0.5) 聚焦至樣品表面。散射光經邊緣濾光片與單色儀 (HORIBA IHR550) 分光後, 由冷卻式 CCD 偵測。基板晶相使用 XRD (Bruker D2 Phaser) 分析。

3. 結果與討論

在本次實驗中, 我們利用真空熱共蒸鍍技術, 製備了厚度僅 20 nm 的超薄全無機鈣鈦礦 (CsPbI₃) 薄膜作為 SERS 基板的活性底層。在沉積過程中, CsI 與 PbI₂ 的蒸鍍速率分別被精確控制在 1 Å/s 與 0.9 Å/s, 以確保最佳的化學計量比

(stoichiometry), 並於沉積後進行熱退火處理以促進晶體成長, 圖 1 為該薄膜的 X 光繞射 (XRD) 光譜。如圖所示, 光譜中呈現出兩個清晰且銳利的繞射峰, 分別位於 $2\theta = 13.49^\circ$ 與 28.01° 。這兩個特徵峰精準對應於具備高光電活性的黑相 (black-phase) CsPbI₃ 之 (100) 與 (200) 晶面, 顯示出薄膜具有優異的結晶性與高度的晶面取向 (preferred orientation)。在該圖譜中並未觀察到位於 $2\theta \approx 9.8^\circ$ 的非活性黃相 (δ -phase) 繞射峰, 亦無殘留未反應的 PbI₂ 特徵峰 (位於 $2\theta \approx 12.6^\circ$)。這項結果有力地證實, 透過精確的共蒸鍍速率調控, 前驅物已完全轉化為高純度的相態。更重要的是, 即使在 20 nm 這樣的極薄尺度下, 全蒸鍍製程依然能長出高度結晶且無雜質的連續薄膜, 徹底克服了傳統溶液法在製備超薄膜時易產生針孔與均勻性不佳的限制。此一平整且高純度的 CsPbI₃ 底層, 為後續沉積均勻的銀奈米顆粒提供了理想的介面基礎, 對於提升整體基板的 SERS 訊號再現性具有關鍵作用。

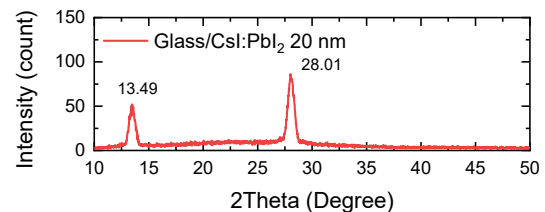


圖 1. 鈣鈦礦 CsPbI₃ 之 XRD 光譜。

為了探討底層材料對金屬奈米結構生長行為的影響, 我們利用掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察了相同厚度 (22 nm) 的銀層分別沉積於裸玻璃與 CsPbI₃ 鈣鈦礦薄膜上的表面形貌。如圖 2(a) 所示, 直接沉積於玻璃基板上的銀呈現出形狀不規則且部分區域相互連接的網絡狀結構。此現象表明, 銀在玻璃表面具有較高的擴散性, 導致其在生長過程中容易發生團聚, 表現出向連續薄膜演變的趨勢。這種互連的二維結構不容易引發電漿效應, 大幅削弱局域表面電漿共振 (LSPR) 的強度, 進而不利於 SERS 訊號的增強。相較之下, 當 22 nm 的銀沉積於 CsPbI₃ 薄膜上時 (圖 2(b)), 其表面形貌發

生了顯著的改變。銀原子在 CsPbI_3 表面展現出典型且明顯的島狀生長模式 (Volmer-Weber growth mode)，形成了密集分佈、形狀飽滿且尺寸相對均勻的三維銀奈米顆粒。這顯示 CsPbI_3 薄膜的引入有效改變了界面的表面能 (surface energy) 與潤濕性 (wettability)，限制了銀原子的過度擴散。值得注意的是，這些緊密排列的銀奈米顆粒之間形成了大量且分佈均勻的狹窄奈米間隙。在 SERS 機制中，這些奈米間隙正是激發強烈局域電磁場 (即 hot spots) 的最佳區域。因此，SEM 影像的結果有力地證明， CsPbI_3 底層不僅在化學機制上具有潛力，更能實質地引導並優化上方銀奈米結構的物理形貌，為實現高靈敏度的 SERS 檢測奠定了極佳的結構基礎。

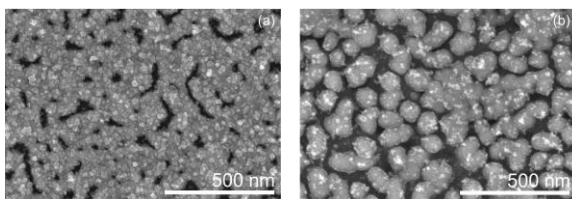


圖 2. 厚度 22 nm 之銀層分別沉積於 (a) 裸玻璃與 (b) CsPbI_3 鈣鈦礦薄膜上之掃描式電子顯微鏡 (SEM) 影像。

在探討探針分子的增強訊號之前，基板本身的背景訊號 (background noise) 是決定實際檢測極限與準確性的關鍵因素。基板平均光譜所示，可以明顯觀察到沉積於裸玻璃上的純銀基板 (圖 3a)，隨著銀層厚度的增加，基板本身的雜訊與背景信號也隨之顯著攀升。這種強烈的背景干擾會嚴重掩蓋分析物的微弱特徵峰，導致傳統單一金屬 SERS 基板在檢測低濃度樣品時，面臨解析度與準確度大幅降低的困境。反觀導入鈣鈦礦底層的 CsPbI_3/Ag 複合結構 (圖 3b)，則展現出截然不同的優異特性。即使銀層厚度逐漸增加，該複合基板依然能維持極為平坦且乾淨的背景基線，完全排除了純銀基板上的雜訊現象。這項結果有力地證明， CsPbI_3 薄膜的引入不僅能引導上方銀奈米結構的優化生長，更能有效抑制基板本身的背景雜訊，進而為獲取高訊噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 的 SERS 檢測結

果提供了極佳的介面優勢。

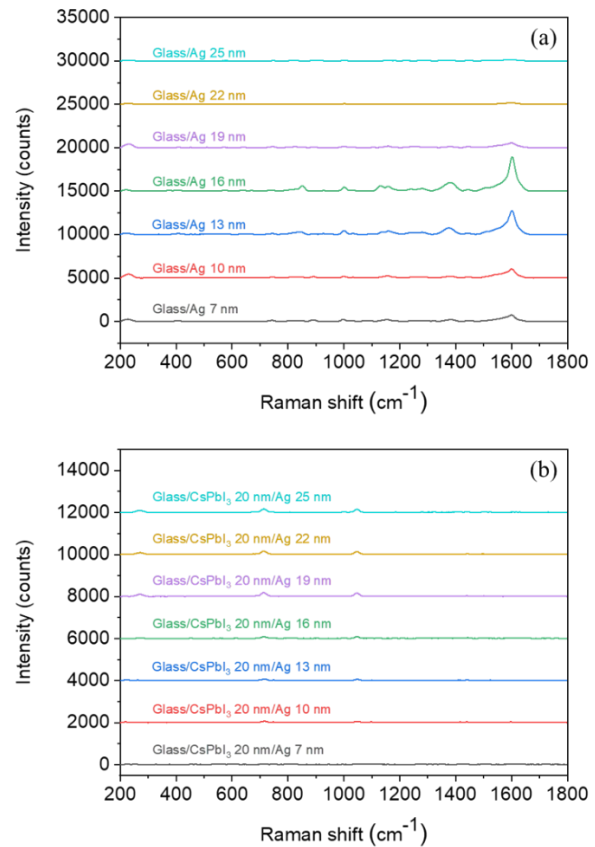


圖 3. 沉積不同厚度 (7–25 nm) 銀層之 (a) 裸玻璃與 (b) CsPbI_3 薄膜基板的平均光譜圖。

為優化 SERS 效能，本研究以濃度 $1 \times 10^{-5} \text{ M}$ 的 R6G 作為探測之分析物，系統性探討銀奈米基板以及鈣鈦礦-銀基板中銀的厚度對效能的影響，實驗中在玻璃基板以及鈣鈦礦結構上分別鍍上厚度為 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25 nm 的銀薄膜，量測其基板對濃度為 $1 \times 10^{-5} \text{ M}$ 的 R6G 水溶液之拉曼光譜訊號，並以 613 cm^{-1} 的峰值強度作為檢驗標準，作為 SERS 基板性能的評估的標準。綜合圖 4 與圖 5 的量化結果，可以清楚觀察到沉積於裸玻璃基板上的純銀薄膜，其 613 cm^{-1} 處的拉曼峰值強度隨厚度增加呈現先升後降的趨勢。在厚度較低時，銀奈米粒子之間形成狹窄間隙，產生了強烈的局域電場 (即 hot spots)，進而放大拉曼訊號。然而，隨著銀層持續增厚，銀奈米粒子容易發生橫向融合並逐漸演變為連續薄膜，使得 LSPR 強度大

幅衰減，進而削弱 SERS 的電磁增強效應。然而，在引入全無機鈣鈦礦做為基材底層，能有減少此訊號衰退的瓶頸，如圖 5(b) 所示，當 Ag 厚度達到 22 nm 時，複合基板的 613 cm^{-1} 拉曼峰強度攀升至最大值，展現出極佳的增強潛力。同時，經多點量測計算出的相對標準差 (RSD) 僅為 9%，充分證明了該基板在訊號均勻性與重現性上的卓越表現。這項優異結果可歸因於複合基板所引發的雙重增強機制，在物理結構調控上 CsPbI₃ 晶格的表面能有效限制了銀原子的過度擴散與延展，使厚達 22 nm 的銀層仍能維持獨立的島狀奈米粒子樣貌，不僅保留了大量產生 hot spots 的奈米間隙；其次，在化學增強上，CsPbI₃ 與 Ag 接觸後形成的異質介面會促使費米能階 (Fermi level) 發生重排。此能帶匹配效應極大地促進了基板與吸附分子間的介面電荷轉移，為整體 SERS 訊號提供了額外增強貢獻。

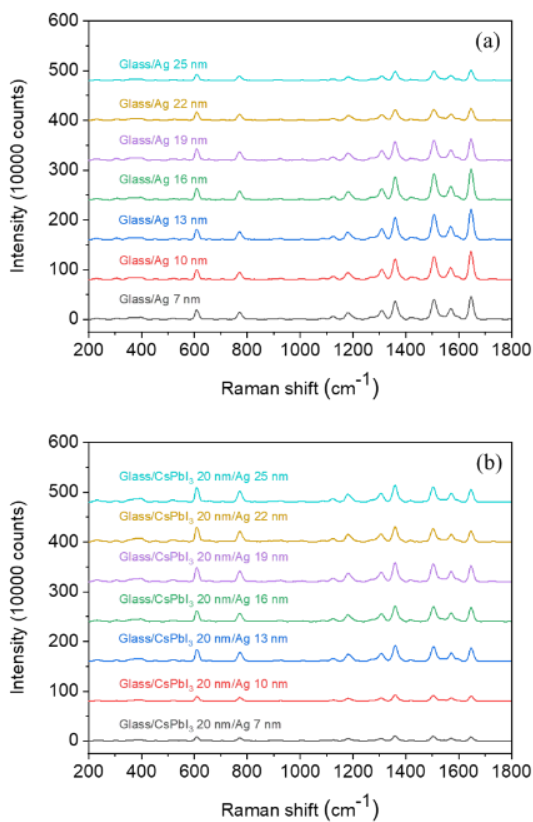


圖 4. 量測分子 R6G 於沉積不同厚度 (7–25 nm) 銀層之 (a) 裸玻璃與 (b) CsPbI₃ 薄膜基板上的表面增強拉曼 (SERS) 平均光譜。

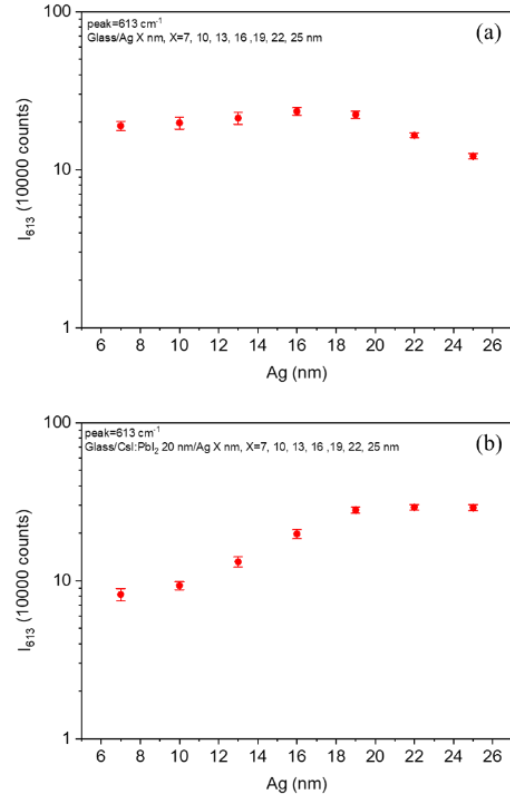


圖 5. 量測分子 R6G 於 (a) 裸玻璃與 (b) CsPbI₃ 薄膜 (分別沉積 7–25 nm 銀層) 上，在 613 cm^{-1} (I_{613}) 處之 SERS 峰值強度變化。

在確認了 CsPbI₃/Ag 複合基板具備卓越的雙重增強機制 (EM 與 CM) 與高度均勻性後，我們進一步評估其在真實環境中的實用性，在 SERS 偵測中的動態範圍至關重要，因為它決定了對分析物在寬廣濃度範圍內進行偵測與定量的能力。本研究使用 TBZ 溶液系統性地進行評估，實驗中分別配置了濃度介於 1×10^{-4} M 至 1×10^{-7} M 的 TBZ 水溶液，為確保數據的統計可靠性，每種濃度皆在基板上隨機選取 16 個不同位置進行量測，其所得的平均 SERS 光譜如圖 6 所示。從圖中可清晰觀察到，TBZ 分子位於 1578 cm^{-1} 等處的特徵拉曼峰強度，隨著待測物濃度的降低呈現出規律的遞減趨勢。為了定量評估，繪製 TBZ 濃度與 1578 cm^{-1} 峰值強度之間的關係於圖 7。其中數據上呈現明顯的線性趨勢，證實鈣鈦礦-銀基板能夠在寬廣濃度範圍內進行定量檢測。而由於誤差值與標準差其範圍足夠小，且未並出現重疊情況，這一現象進一步

的證明 SERS 測量的準確性與可靠性。上述結果驗證了鈣鈦礦-銀基板在 SERS 分析中對於濃度的鑑定具備高靈敏度與高可靠性，值得注意的是，國際食品法典委員會 (Codex) 規定 TBZ 的最大殘留限量 (MRL) 為 5 ppm (約為 2.5×10^{-5} M)，亦涵蓋於本研究的動態範圍內。這些結果突顯了鈣鈦礦-銀 SERS 基板在真實樣品中進行可靠且定量的鑑定潛力。

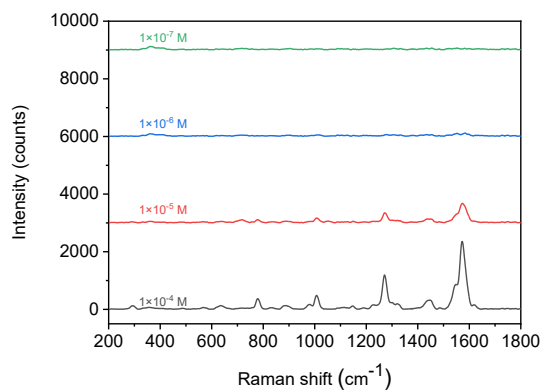


圖 6. 不同濃度 (10^{-4} 至 10^{-7} M) 殺菌劑 TBZ 水溶液於最佳化 CsPbI₃/Ag 複合基板上之平均 SERS 光譜。

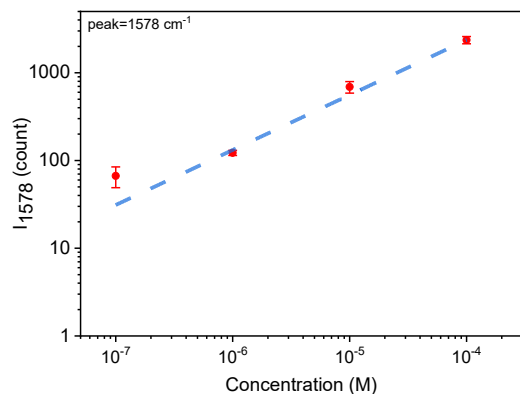


圖 7. TBZ 於 1578 cm^{-1} 處之 SERS 峰值強度 (I_{1578}) 與其濃度變化之對數線性關係圖。

結論

在本研究中，我們成功透過無溶劑的全真空沉積製程，開發出具備高均勻性與高靈敏度的 CsPbI₃/Ag 複合 SERS 基板，為克服傳統溶液法製程提供了創新的解決方案。實驗結果證實，引入 20 nm 的全無機 CsPbI₃ 底層不僅能有效抑制純金

屬基板常見的背景雜訊干擾，更能透過改變界面表面能，引導上方銀奈米結構的最佳化生長。當銀層厚度達 22 nm 時，該複合基板能維持高密度的獨立島狀結構，不僅保留了豐富的 hot spots 以提供強大的電磁增強，更藉由界面電荷轉移貢獻了額外的化學增強。在實際檢測應用上，此最佳化的 CsPbI₃/Ag 複合基板對農業殺菌劑 TBZ 展現出極佳的感測效能。其不僅具備寬廣且呈現高度線性相關的動態範圍 (10^{-7} M 至 10^{-4} M)，更展現出優異的訊號重現性 (RSD = 9%)。值得注意的是，該基板對 TBZ 的最低檢測極限 (LOD) 可達 1×10^{-7} M，遠低於國際食品法典委員會 (Codex) 所規範的最大殘留限量標準。總結而言，本研究所提出之全蒸鍍 CsPbI₃/Ag 基板，完美整合了精準的結構調控與卓越的拉曼訊號增強效率，未來在農藥殘留快速分析、環境汙染物監測及生物醫學感測等領域，皆展現出極具商業化與實務應用的巨大潛力。

參考文獻

1. Chen ST, Chu YC, Liu CY, Huang CH, Tzeng Y (2012), "Surface-enhanced Raman spectroscopy for characterization of nanodiamond seeded substrates and ultrananocrystalline diamond at the early-stage of plasma CVD growth process." *Diamond and Related materials*, Vol.24, No.,pp.161–6.
2. Choi H-K, Lee KS, Shin H-H, Koo J-J, Yeon GJ, Kim ZH (2019), "Single-molecule surface-enhanced Raman scattering as a probe of single-molecule surface reactions: promises and current challenges." *Accounts of Chemical Research*, Vol.52, No.11,pp.3008–17.
3. Cong S, Liu X, Jiang Y, Zhang W, Zhao Z (2020), "Surface enhanced Raman scattering revealed by interfacial charge-transfer transitions." *The Innovation*, Vol.1, No.3,pp.
4. Fang Y, Seong N-H, Dlott DD (2008), "Measurement of the distribution of site

- enhancements in surface-enhanced Raman scattering."Science, Vol.321, No.5887,pp.388–92.
5. Hu H, Pal AK, Berestennikov A, Weber T, Stefanu A, Cortés E, et al. (2024), "Surface-enhanced Raman scattering in BIC-driven semiconductor metasurfaces."Advanced Optical Materials, Vol.12, No.14,pp.2302812.
 6. Li Z, Huang X, Lu G (2020), "Recent developments of flexible and transparent SERS substrates."Journal of Materials Chemistry C, Vol.8, No.12,pp.3956–69.
 7. Liu C-Y, Guo J-Y, Lin J-Y, Aeimwiratchai S, Uma K, Li W-Y, et al. (2025), "Significantly enhancing SERS sensitivity to distinguish pesticide concentrations at ppm levels in juices through inherent and added internal standards."Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, Vol.167, No.,pp.105848.
 8. Liu C-Y, Liang K-C, Chen W, Tu C-h, Liu C-P, Tzeng Y (2011), "Plasmonic coupling of silver nanoparticles covered by hydrogen-terminated graphene for surface-enhanced Raman spectroscopy."Optics express, Vol.19, No.18,pp.17092–8.
 9. Liu C-Y, Ram R, Kolaru RB, Chang S-H, Chakraborty S, Lin Y-N, et al. (2023), "Developing highly reliable SERS substrates based on Ag grown on alumina nanomeshes anodized under 1 V for efficiently sensing Raman-active molecules."Sensors and Actuators B: Chemical, Vol.386, No.,pp.133739.
 10. Berestennikov A, Hu H, Tittl A (2025), "Molecular spectroscopies with semiconductor metasurfaces: towards dual optical/chemical SERS."Journal of Materials Chemistry C, Vol.13, No.23,pp.11499–514.
 11. Liu Y, Ma H, Han XX, Zhao B (2021), "Metal–semiconductor heterostructures for surface-enhanced Raman scattering: synergistic contribution of plasmons and charge transfer."Materials horizons, Vol.8, No.2,pp.370–82.
 12. Lu J, Du X, Li Z, Song Y, Zhang C, Yu J, et al. (2020), "Preparation of 3D ZnTiO₃/Ag NPs composite as the photocatalytic SERS-active substrate with well reusability."Applied Optics, Vol.59, No.18,pp.5589–95.
 13. Rajput V, Gupta RK, Prakash J (2022), "Engineering metal oxide semiconductor nanostructures for enhanced charge transfer: fundamentals and emerging SERS applications."Journal of Materials Chemistry C, Vol.10, No.1,pp.73–95.
 14. Tang X, Fan X, Yao L, Li G, Li M, Zhao X, et al. (2022), "Electromagnetic mechanisms or chemical mechanisms? Role of interfacial charge transfer in the plasmonic metal/semiconductor heterojunction."The Journal of Physical Chemistry Letters, Vol.13, No.33,pp.7816–23.
 15. Liu C-Y, Guo J-Y, Lin J-Y, Uma K, Liu S-W (2024), "Fabrication of Ag-perovskite substrates for surface-enhanced Raman scattering via all-vacuum deposition."Journal of Materials Chemistry C, Vol.12, No.27,pp.10172–80.
 16. Niu M, Shan C, Xue C, Xu X, Zhang A, Xiao Y, et al. (2025), "High-stability printable perovskite SERS substrates in an aqueous environment via plasmon-induced resonance energy transfer."ACS Applied Materials & Interfaces, Vol.17, No.9,pp.13538–51.
 17. Pan N, Shi Z, Wu P, Xi H, Gao Y, You T, et al. (2022), "Surface enhanced Raman scattering of adsorbates on Au–CsPbI₃ perovskite-based nanocomposites: charge-transfer and electromagnetic enhancement."Nanoscale, Vol.14, No.29,pp.10469–76.