

# 利用氫鹵酸處理使原子級單層二硒化鉬之光致螢光效應提升

## Photoluminescence Enhancement of Monolayer MoSe<sub>2</sub> by Hydrohalic Acid Treatment

韓皓惟、郭浩中譯

Translated by Hau-Vei Han, Hao-Chung Kuo

原子級厚度的二維層狀過渡金屬硫化物具有獨特的光電特性，因此被視為在未來的電子及光電產業的關鍵材料。雖然目前有許多製程技術可以提供成長高品質的單晶二維過渡金屬硫化物，但仍難免在材料中產生結構缺陷，這些缺陷會大量的捕捉自由載子與局部激子而導致導帶至價帶的複合減少。在本研究中，我們利用簡易的氫鹵酸處理方式，可以有效地修補樣品中的結構缺陷，進而使整體的發光效益增加 30 倍以上。而從我們的研究得知，氫鹵酸處理不僅可以修補材料表面的結構缺陷，也可以調變二維過渡金屬硫化物中的摻雜比例，操控其相對應的光學發光現象，提供一個可調整與控制二維過渡金屬硫化物材料本質及光電特性的可行方法，對於未來開發二維材料在微型光電元件的應用極為重要。

Atomically thin two-dimensional transition-metal di-chalcogenides (TMDCs) have attracted much attention due to their unique electronic and optical properties for future optoelectronic devices. Although there are many promising fabrication processes have been employed to produce high quality TMDCs layers with a scalable size and a controllable thickness, the grown TMDC monolayers may still incorporate unwanted structural defects. These defects significantly trap free charge carriers and localize excitons, leading to the smearing of free band-to-band exciton emission. In this paper, we introduce a simple hydrohalic acid treatment to efficiently suppress the trap state emission and promote the neutral exciton and trion emission in defective MoSe<sub>2</sub> monolayers. The overall photoluminescence intensity at room temperature can be enhanced by a factor of 30. Our results suggest that the hydrohalic acid treatment not only reduces the structural defects, but also modifies the corresponding optoelectronic characteristics in fabricated MoSe<sub>2</sub> layers, providing further insights of the control and tailoring the exciton emission from monolayer TMDCs.

### 一、前言

二維過渡金屬硫化物 (transition-metal dichalcogenides, TMDCs) 如二硫化鉬 (MoS<sub>2</sub>)、二硫

化鎢 (WS<sub>2</sub>)、二硒化鉬 (MoSe<sub>2</sub>) 與二硒化鎢 (WSe<sub>2</sub>) 等，在單層結構下具有直接能隙半導體性質，且在可見光和近紅外光譜區展現極佳的發光特性，使得這種新穎材料可以廣泛地應用於各式新型半導體元

件及光電元件的設計與製作，例如在微型電晶體<sup>(1)</sup>、發光二極管<sup>(2)</sup> 和高靈敏度光檢測器<sup>(3)</sup> 的開發等等。然而，近年來在大量的研究工作成果中，發現二維過渡金屬硫化物中的結構缺陷會造成光致發光 (photoluminescence, PL) 強度降低及發光波長隨材料品質改變而飄移的現象<sup>(4)</sup>。例如在具有結構缺陷的二維材料樣品中，可觀察到僅在樣品表面邊緣有較強的光致螢光發光強度。因此，與此同時有許多的研究工作投入於改善二維過渡金屬硫化物的材料品質，以達到所需的相對應光譜特性。

一般來說，除以不同成長方式製備不同品質的二維材料外，也可以利用化學摻雜處理、靜電閘極控制、表面電漿激發、光子晶體共振腔和應力改善等方式，進一步調節在單層二維過渡金屬硫化物的光學和電學性能。其中，化學摻雜處理被認為是最為有效的作法。例如，以機械剝離方式產生的單層二硫化鉬，其光致螢光發光強度可以由 *p* 型摻雜劑 2,3,5,6-tetrafluoro-7,7,8,8-tetracyanoquinodimethane (F4TCNQ) 來獲得增強，其中 *p* 型摻雜可以將三荷激子 (trions) 複合轉換成中性激子，其發光強度增強率約為 3 倍<sup>(5)</sup>。另外，亦有利用有機強酸處理剝離法製程之二硫化鉬，可增強光致螢光發光強度及少數載子存活時間，但確切的表面缺陷鈍化機制尚不完全清楚<sup>(6)</sup>。由此可知，對這方面仍然需要更多的實驗努力，以了解二維過渡金屬硫化物的結構缺陷和激子之間的關聯。

## 二、二維二硒化鉬製程與氫鹵酸處理架構設置

在此篇研究中，我們利用化學氣相沉積法 (chemical vapor deposition, CVD)，並以粉末狀的硒 (Se) 和二氧化鉬 ( $\text{MoO}_2$ ) 作為前驅物，製備單層二硒化鉬<sup>(7)</sup>，再以氫鹵酸蒸氣 (如氫氟酸、氫溴酸和氫碘酸) 對於二維材料中的結構缺陷進行修復，以達整體光致螢光光學強度增強約為 30 倍以上。利用化學氣相沉積法製備方式，可以大範圍地生成高純度的單晶二維過渡金屬硫化物，二維材料層數厚度也可依化學氣相沉積法的製程參數進行調控，因此以化學氣相沉積法生成的二維材料具有獨特性及可操控性，是利用機械或化學剝離法製備而得的樣

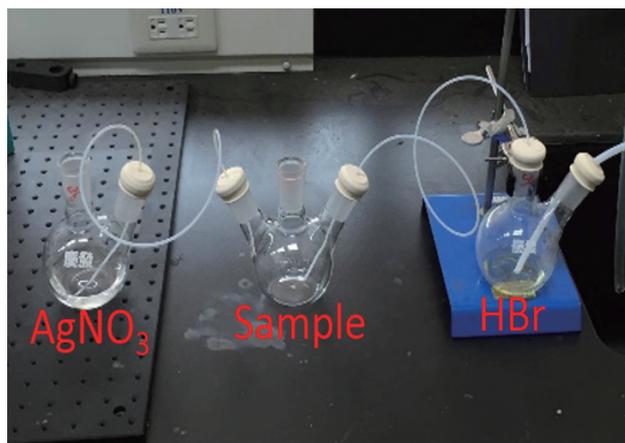


圖 1. 氫鹵酸處理二維材料實驗架設圖。

品所沒有的。

氫鹵酸處理二維材料結構缺陷的實驗設置如圖 1 所示簡要說明。首先，我們準備三個容器分別置入氫鹵酸水溶液 (如氫溴酸)、在藍寶石 (sapphire) 基板上製備的二硒化鉬二維材料樣品及硝酸銀 ( $\text{AgNO}_3$ ) 溶液。接著，將氬氣 (Ar) 注入氫鹵酸水溶液中，使其鼓泡，利用冒出的氬氣體將鹵化氫微滴帶到放置樣品的容器，使二維材料樣品暴露於氫鹵酸微滴下，在樣品表面產生反應，最後，未參與反應及產生的氣體則利用硝酸銀 ( $\text{AgNO}_3$ ) 溶液吸收。在以往的研究中，藉由表面化學處理和結構缺陷的改善來改變光致螢光發光效應，大多僅限於機械剝離的二維過渡金屬硫化物。而相比於剝離法製程，化學氣相沉積法生長二維過渡金屬硫化物更適合利用以上的簡易氫鹵酸處理過程，改善材料品質，並應用於大規模生產。

## 三、結構缺陷修補與發光效益增強

圖 2(a) 為以化學氣相沉積法生成的單層二硒化鉬的光學顯微鏡影像。宏觀來看，單層二硒化鉬為三角形形狀，邊長大約接近 10 微米。圖 2(b) 為利用波長為 532 奈米的綠光雷射作為激發光源，對於初始態及經氫鹵酸處理後的二硒化鉬進行光致螢光光譜量測結果。圖中可見光致螢光峰座落於光子能量約為 1.53 eV 的位置，此結果與其他文獻報導中所得到的單層二硒化鉬能隙 (1.55 eV) 相當接近，結果證明初始態及經氫鹵酸處理後的二硒化鉬

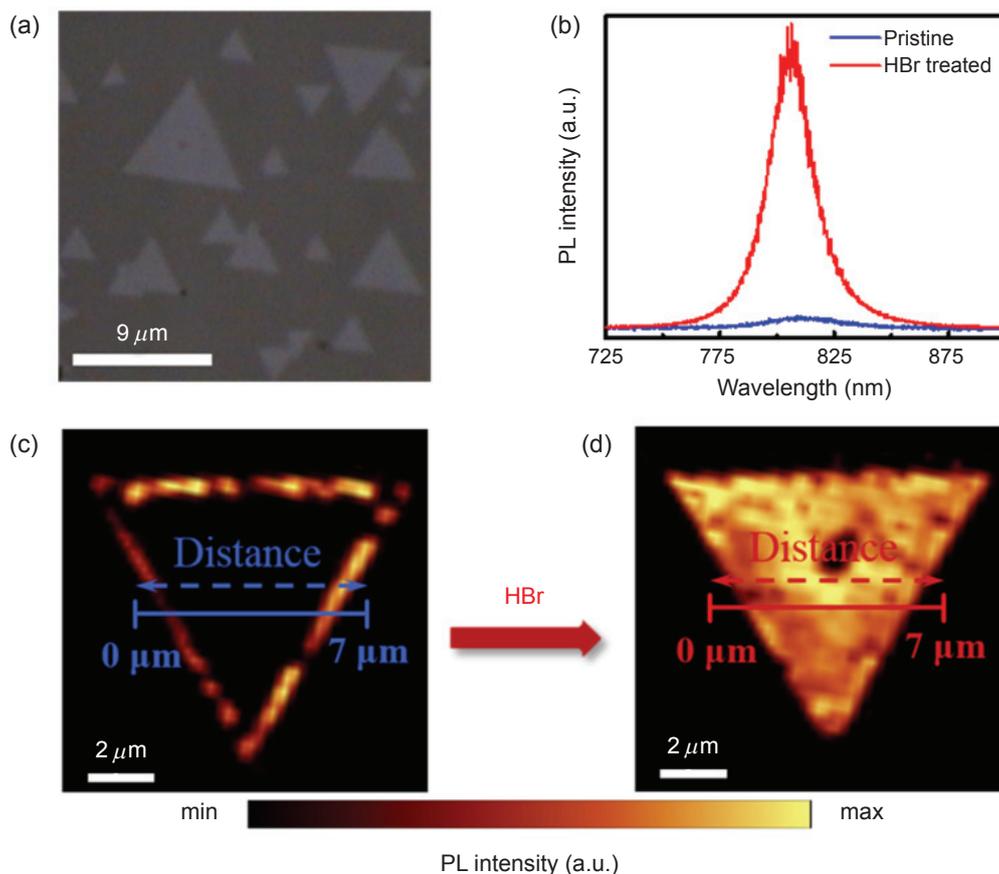


圖 2. (a) 以化學氣相沉積法生成的單層二硒化鉬的光學顯微鏡影像。(b) 初始態及經氫鹵酸處理後的二硒化鉬之光致螢光光譜量測結果。(c) 與 (d) 分別為初始態及經氫鹵酸處理的二硒化鉬空間光致螢光光譜發光強度的掃描結果。

皆為單層結構，惟其光致螢光發光強度有明顯的差異。再更進一步地比較兩種二硒化鉬樣品在空間光致螢光光譜及發光強度的掃描結果。如圖 2(c) 所示，光致螢光強度在未經處理的初始態二硒化鉬樣品邊緣較強，越往中心移動時，光學訊號則逐步降低。最近，類似的光學差異現象也在化學氣相沉積法生成的單層二硫化鎢 ( $WS_2$ ) 樣品上觀察到，推測其原因，應為晶體中的結構缺陷會形成載子非輻射複合中心，而導致光致螢光訊號減弱<sup>(8)</sup>。經氫鹵酸處理的單層二硒化鉬空間光致螢光光譜如圖 2(d) 所示，可發現二硒化鉬整體光致螢光發光較為均勻，造成經氫鹵酸處理後的二硒化鉬光致螢光強度可增加超過 30 倍以上，同時發光峰值位置更接近單層二硒化鉬的能隙，顯示化學氣相沉積法製成的單層二硒化鉬結構上的缺陷，可經由氫鹵酸處理來

修補。值得注意的是，光致螢光強度在三角形的中心顯著增加，且觀察到放光光子能量藍移現象。對於光致螢光強度和位置在空間上的分布不同，此可能由各種因素造成，包括外部靜電摻雜、結構缺陷和化學成分的變化。

光致螢光發光強度在初始態的二硒化鉬樣品中心變弱，主要歸因於結構上的缺陷，如點缺陷或錯位缺陷的存在所導致。在化學氣相沉積法生長過程中，初始成核發生在樣品的中心，隨後持續向外延伸形成比較大的單晶邊界。因此，氫溴酸分子更可能在二硒化鉬的成核中心有更明顯的吸附，而造成光致螢光的變化。除了氫溴酸外，其他氫鹵酸，如氫氯酸和氫碘酸也顯示出類似的光致螢光增強效應，如圖 3 的比較所示。在這三種氫鹵酸處理過程，氫溴酸具有最佳的光致螢光增強能力，我們在

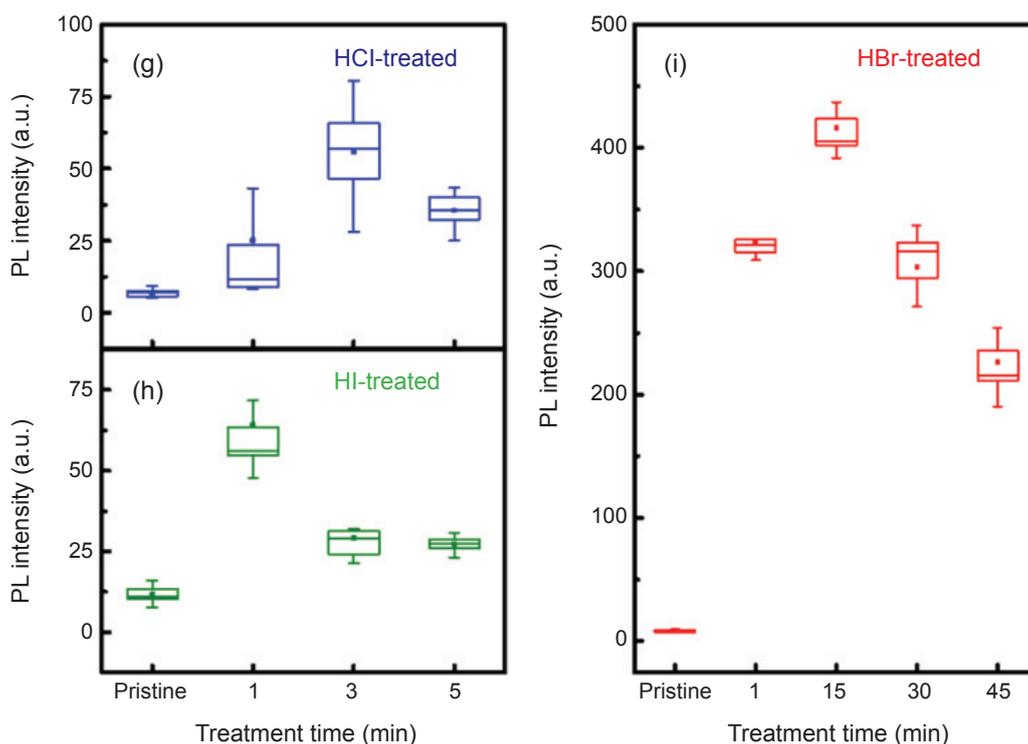
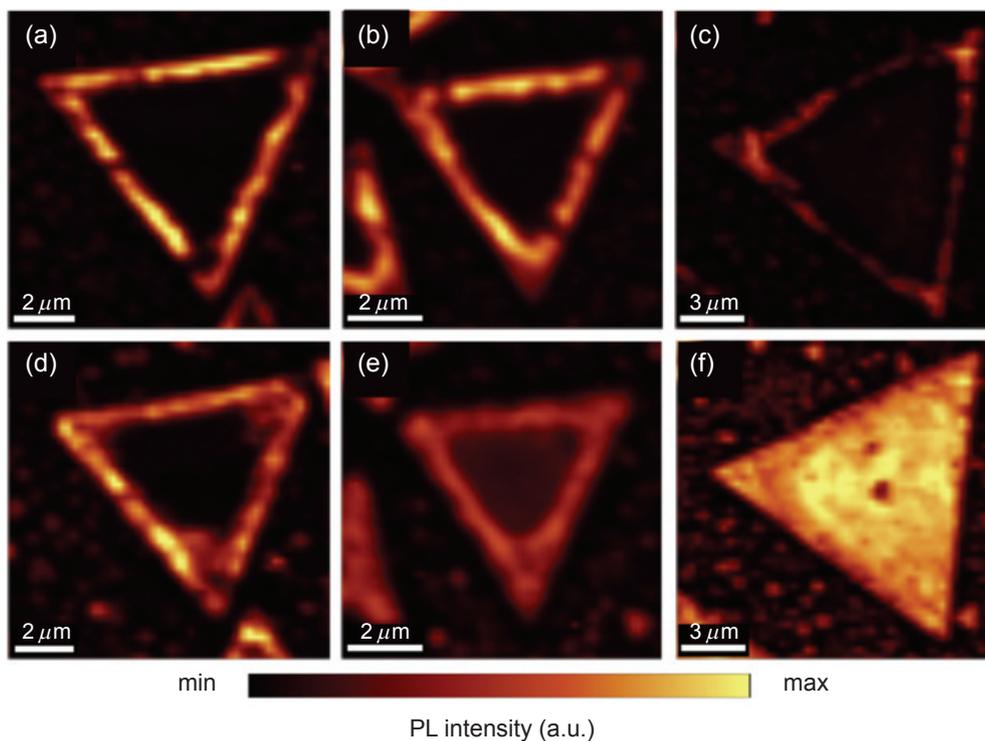


圖 3. (a)、(b) 與 (c) 分別為初始態二碲化鉍樣品空間光致螢光光譜，而 (d)、(e) 和 (f) 則分別為經過氫氟酸、氫碘酸和氫溴酸處理後的相對應結果。(g)、(h) 與 (i) 為樣品經氫氟酸、氫碘酸與氫溴酸不同時間處理所得到的光致螢光光譜強度變化。

下面的段落中將討論氫溴酸處理對摻雜濃度、結構缺陷和化學成分的效果，並進一步討論在二硒化鉬光學特性調製的機制。此處特別要提到的是，有研究指出以機械方式剝離的二維過渡金屬硫化物樣品，其發光特性對水分子的附著敏感。在此我們已分別檢測水分的影響，發現對光致螢光頻譜上，並沒有顯著的改變，如圖 4 所示。因此，水分的作用因素可以排除。

二維材料二硒化鉬中電荷與聲子間的交互作用，可藉由拉曼散射光譜量測結果進行討論，並可進一步探討二維材料的摻雜濃度結果。對於單層二硒化鉬樣品，拉曼光譜的量測結果只會觀察到一個拉曼振盪，即為垂直平面 (out-of-plane) 的  $A_{1g}$  模式，其峰值出現位置約在  $240.4\text{ cm}^{-1}$ ，結果如圖 5(a) 所示。而經氫溴酸處理後的二維二硒化鉬樣品，在拉曼量測頻譜中的  $A_{1g}$  振盪會變得更加強烈，並往更高頻率移動至  $241.1\text{ cm}^{-1}$ 。二維材料

二硒化鉬的  $A_{1g}$  振盪模式來自於 Se 原子於垂直平面的振盪模式。

根據第一原理密度泛函理論計算結果，電子摻雜會導致原本導電帶中的能量最低點移動，造成電子-聲子耦合效應增強<sup>(9)</sup>。因此， $n$  型及  $p$  型摻雜分別會導致  $A_{1g}$  訊號強度降低及增加。所以  $A_{1g}$  聲子的正規化可以用來估計二維過渡金屬硫化物在摻雜度的變化。圖 5(b) 是拉曼頻率的量測數據統計而圖 5(c) 則分別是初始態及經氫溴酸處理的二硒化鉬樣品在空間上的拉曼光譜強度掃描結果。經氫溴酸處理的二維二硒化鉬樣品  $A_{1g}$  振盪模式強度增加且頻率藍移的結果顯示為  $p$  型摻雜至二硒化鉬樣品，同時我們也可以分別對於初始態及經氫溴酸處理的二硒化鉬樣品進行摻雜度的定量分析，初始態二硒化鉬樣品的電子載流密度約為  $8.2 \times 10^1\text{ cm}^{-2}$ ，而經氫溴酸處理的二維二硒化鉬樣品則為  $6.37 \times 10^{10}\text{ cm}^{-2}$ 。

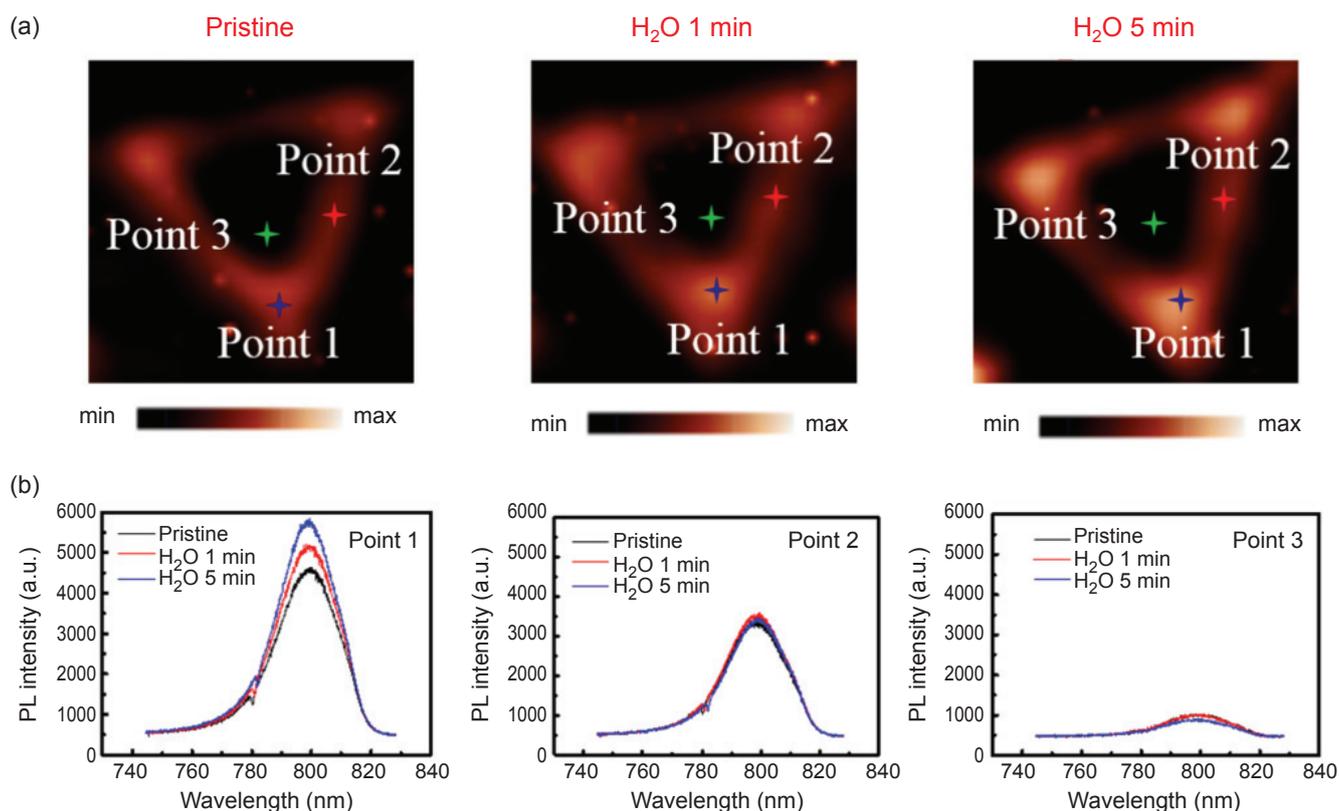


圖 4. (a) 初始態與經過 1 分鐘及 5 分鐘水處理後的空間光致螢光強度光譜。(b) 為 (a) 中不同位置點的光譜比較。

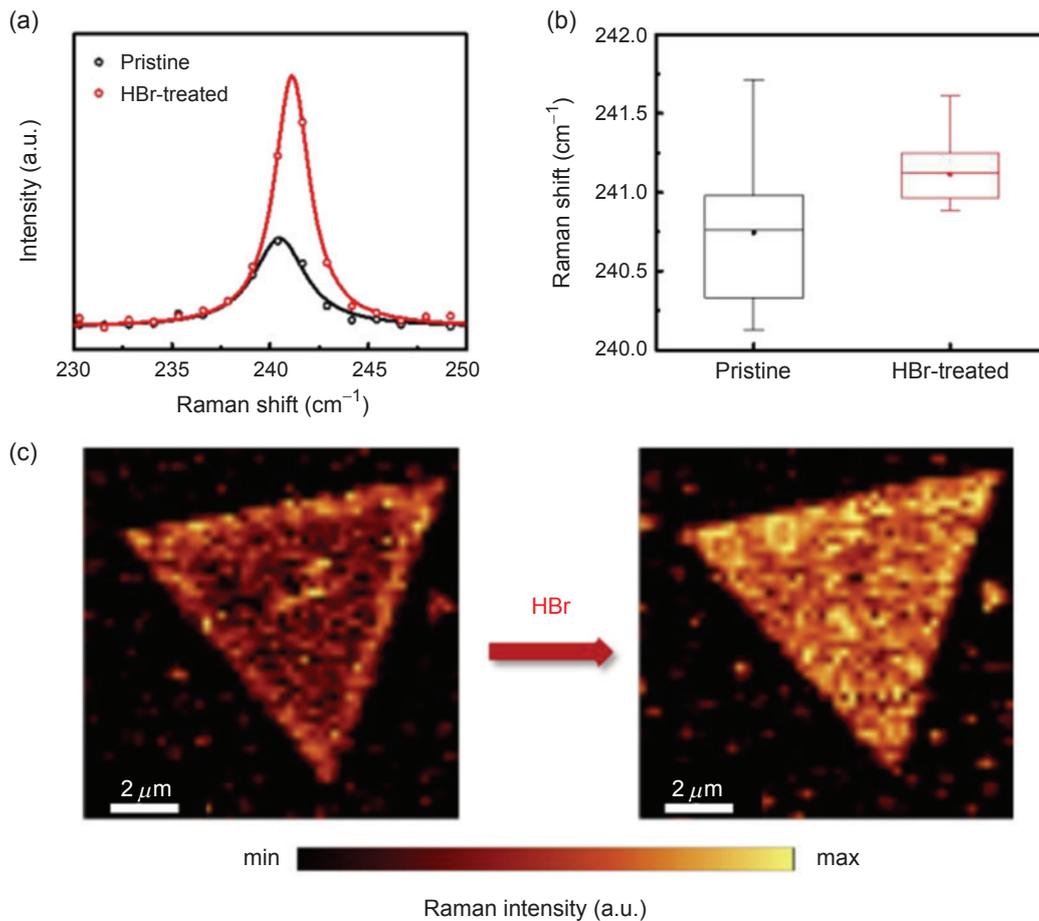


圖 5. (a) 初始態及經氫溴酸處理後的二硒化鉬之拉曼光譜量測結果，(b) 為相對應的拉曼頻率數據統計結果。(c) 初始態及經氫溴酸處理的二硒化鉬樣品在空間上的拉曼光譜強度掃描結果。

進一步探討單層二硒化鉬的激子性質和經氫溴酸處理後的影響。我們將初始態和經酸處理後的二硒化鉬進行變溫光致螢光量測分析。圖 6(a) 為兩種樣品在 10 K 下的光致螢光光譜比較。根據文獻紀錄，單層二硒化鉬的中性激子約在 1.66 eV 能量峰值處<sup>(10)</sup>。圖 6(a) 中初始態的二硒化鉬具有一個較低的能量 (約 1.56 eV)，此光譜的半高寬約為 80.6 eV。因為其能量低於原本單層二硒化鉬該有的能隙，所以可以推論此峰值為缺陷所產生的放光，在其他文獻上也可以得到同樣的結果。經氫溴酸處理後，二硒化鉬的材料缺陷會被修補，因此相對應的光致螢光光譜會展現相對應的結果。其光譜量測結果顯示，除了在大約 1.59 eV 處仍有一個缺陷放光外，我們觀察到：另外兩個峰值分別在 1.66

eV 和 1.63 eV 處，其分別為中性激子 ( $X^0$ ) 和三荷激子 ( $X^-$ ) 峰。圖 6 (b) 顯示出中性激子與三荷激子的峰值隨著溫度從 10 K 到 300 K 有所變化，而當溫度高於 150 K 時，三荷激子的訊號變得微弱到無法辨識。圖 6 (c) 與 (d) 顯示隨溫度變化下得到的  $X^0$  和  $X^-$  峰值位置與強度。另外，中性激子與三荷激子的能量差距在 30 meV，也與文獻數據吻合。 $X^0$  光譜的出現代表經氫溴酸處理後，可使初始態二硒化鉬高度  $n$  摻雜特性降低。樣品經由氫溴酸處理後，缺陷大幅地被修補，進而造成在低溫狀態下可以量測到中性激子與三荷激子的訊號。

二維過渡金屬硫化物中的陽離子和陰離子空位缺陷可以引起摻雜效果的不同，進而影響其光電特性<sup>(11, 12)</sup>。在此我們利用球面像差修正掃描穿透式

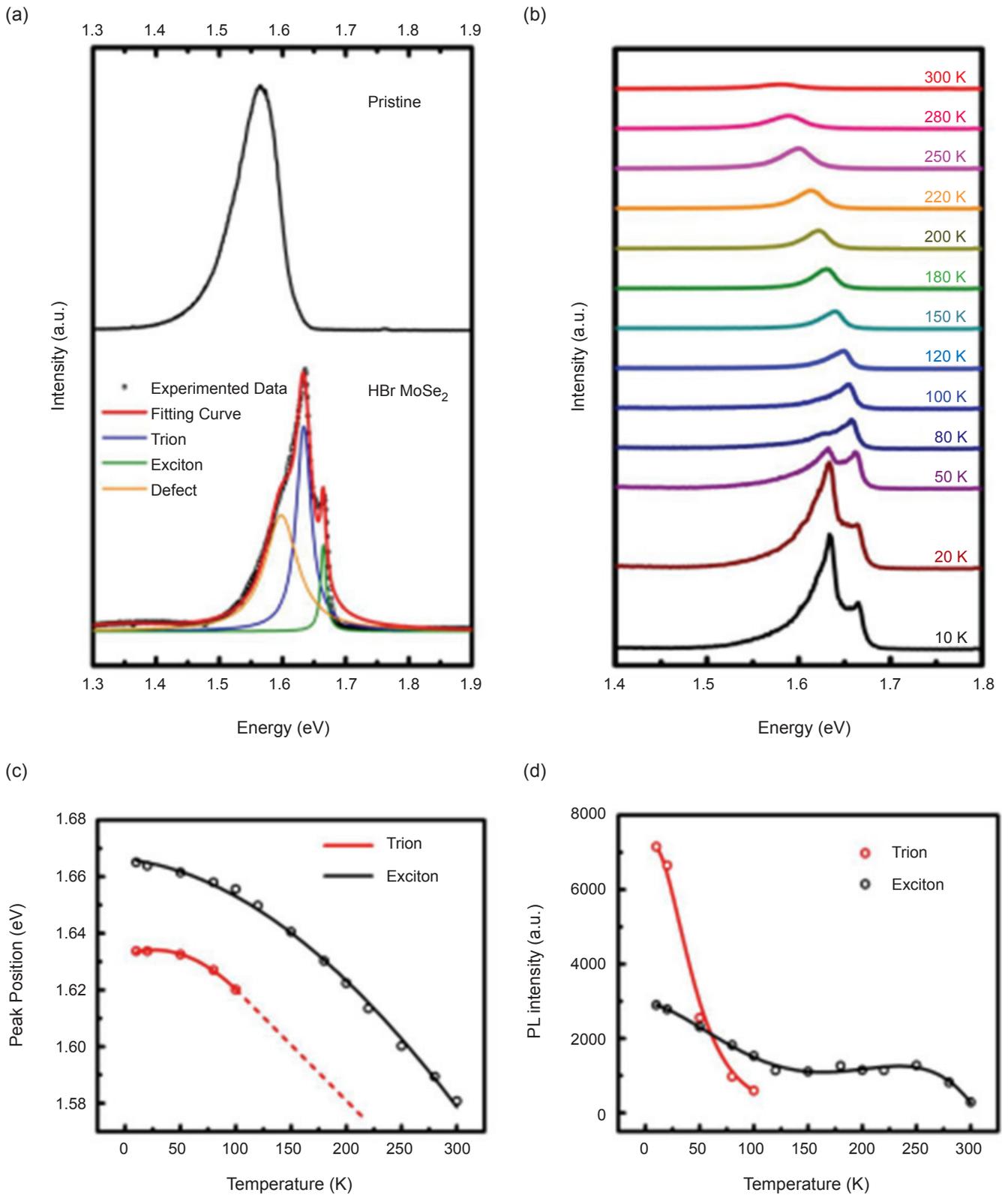


圖 6. (a) 初始態及經氫溴酸處理後的二硒化鉬樣品在 10 K 下的光致螢光光譜比較。(b) 中性激子與三荷激子的峰值隨著溫度從 10 K 至 300 K 的變化。(c) 與 (d) 顯示隨溫度變化下得到的  $X^0$  和  $X^-$  峰值位置及強度變化。

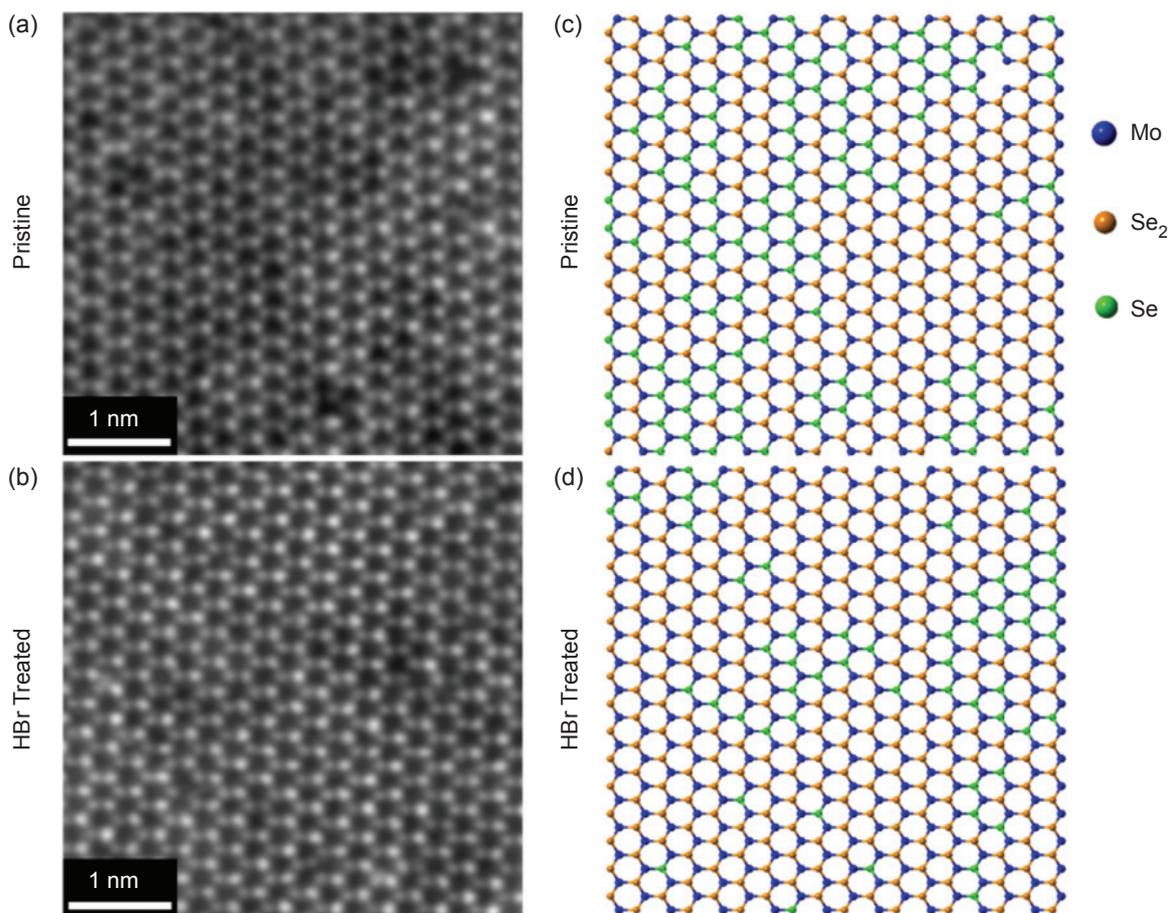


圖 7. (a) 與 (b) 為初始態及經氫溴酸處理後的二硒化鉬 TEM 影像。(c) 與 (d) 則分別為依 (a) 與 (b) 中的原子影像強度比所重建的晶格結構。

電子顯微鏡 (transmission electron microscope, TEM) 來直接觀察，並精確地測定初始態和經氫鹵酸處理的單層二硒化鉬的晶格結構，結果分別如圖 7(a) 和圖 7(b) 所示。同時我們也利用高角度環狀暗場影像技術 (high-angle annular dark-field, HAADF) 分析相對應的原子序對比影像 (Z-contrast image)，由結果我們可以從圖 7 (a) 與 (b) 中的原子影像強度比重建其晶格結構，很清楚地分辨單顆硒原子或雙顆硒原子堆疊結果。圖 7 (c) 與 (d) 分別為初始態及經酸處理的單層二硒化鉬圖示化表面原子結構。從這量測中可以發現，在初始態的二硒化鉬樣品上有大量硒原子空缺的存在，例如在圖 7 (a) 與 (c) 右上方的硒點缺陷。同時，我們也觀察到無論在初始態或是經酸處理的二硒化鉬樣品中皆沒有鉬原子空缺。硒原子空位的存在會造成二硒化鉬的  $n$  型摻雜

和光致螢光光譜強度減弱。由圖 7(d) 的結果中，我們可以發現初始態的單層二硒化鉬經氫溴酸處理後其硒空缺比在初始態單層二硒化鉬相對為少，硒空位缺陷經氫溴酸處理後被修補，並釋放被缺陷捕捉的激子。

為了獲得更多關於氫溴酸處理對單層二硒化鉬晶格結構影響的資訊，我們利用 X 射線電子能譜儀 (X-ray photoelectron spectrometer, XPS) 進一步討論化學氣相沉積法生成的二硒化鉬其化學成分在氫鹵酸處理前後的變化。如圖 8(a) 所示，四價鉬的  $3d_{5/2}$  和  $3d_{3/2}$  鍵結能分別在 229.4 eV 和 232.53 eV 的位置，同時在圖中也顯示六價鉬的  $3d_{5/2}$  和  $3d_{3/2}$  鍵結能分別出現在 233.3 eV 和 236.43 eV，此六價鉬來自於化學氣相沉積法製程中不完全硒化的前驅物。

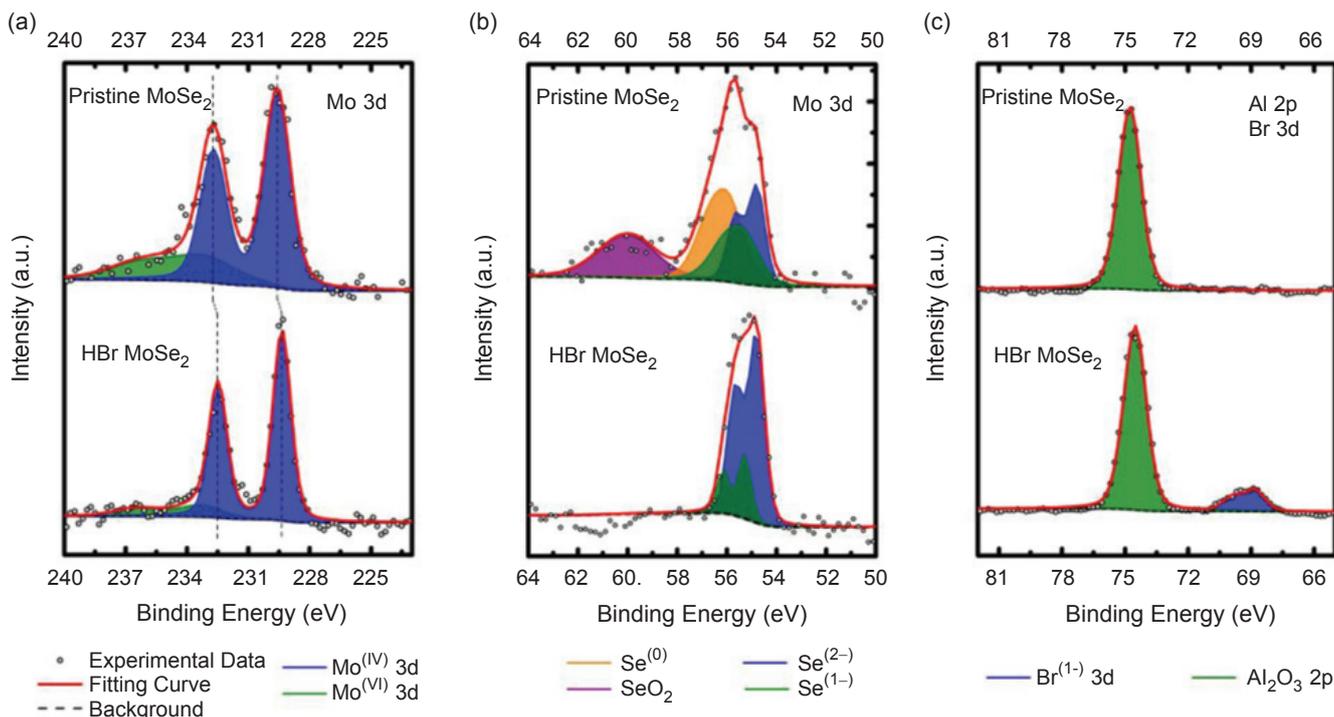


圖 8. (a)、(b) 與 (c) 分別為鉬、硒和溴的 XPS 頻譜。

經氫溴酸處理後，幾乎檢測不到單層二硒化鉬中的六價鉬，這表明氫溴酸處理亦可以去除這些不完全硒化的雜質。而經由氫溴酸處理後，四價鉬  $3d_{5/2}$  和  $3d_{3/2}$  峰值位置由 229.6 eV 紅移至 229.4 eV，這可能是由於降低鉬的氧化態或者  $p$  摻雜所造成，此結果與拉曼光譜測量結果所得出的結論是一致的。

另外，四價鉬訊號的半高寬也縮減，從 1.53 eV 到 1.06 eV，這種改變說明經氫溴酸處理後的鉬化學態更為均勻。在圖 8 (b) 中，硒  $3d_{5/2}$  和  $3d_{3/2}$  的雙峰 (54.8 eV; 55.66 eV) 和 (55.34 eV; 56.2 eV) 分別為終端的  $\text{Se}^{2-}$  和橋接的  $\text{Se}_2^{2-}$ ，這些共價鍵結訊號在酸處理前後都被觀察到。在 55.9 eV 處的  $3d_{5/2}$  鍵結能，則歸因於零價硒雜質，其是來自於硒元素或氧化二硒化鉬 (Mo-Se-O) 狀態，而在 59.2 eV 的寬峰是由於氧化硒 (如  $\text{SeO}_2$ ) 的雜質所造成，這些峰值在初始態的樣品上都可觀察到，但在經氫溴酸處理後的二硒化鉬上卻不存在。已知的是，氫溴酸能夠取代在  $\text{SeO}_2$  的氧而產生  $\text{SeBr}_4$ ，因此我們猜測氫溴酸可移除氧化態二硒化鉬，使其由 Mo-Se-O 轉變為 Mo-Se-Br，此假設與鉬的半高寬在氫溴酸處理後減縮的觀測吻合。

在圖 8(c) 中，溴離子的訊號在經氫溴酸處理後的樣品上被觀察到，這同時也證實了二硒化鉬和氫溴酸之間確存在反應作用。然而，在原子序對比影像中，我們不能特別標示出溴原子，因為溴原子和硒原子的原子序非常接近，其分別位於元素週期表上 35 及 34 的位置，因此，我們不能排除溴原子填補硒原子空缺的可能性，即如圖 9(a) 示意圖所示。我們也計算了 X 射線電子能譜儀光譜的面積作為鉬、硒和溴原子的元素比。圖 9(b) 顯示初始態及經氫溴酸處理的單層二硒化鉬中陰離子與四價鉬的原子比，初始態二維二硒化鉬樣品中的比例為 1.686，這表示硒原子空缺、 $\text{Se}^{(0)}$  和  $\text{SeO}_2$  的雜質存在。而在經氫溴酸處理後，陰離子和鉬原子的比例增加至 1.97，其增加主要來自於溴離子和  $\text{Se}^{2-}$  的增加，其中  $\text{Se}^{2-}$  的增加應該是從橋接的  $\text{Se}_2^{2-}$  轉換而成  $\text{Se}^{2-}$ 。我們還注意到，在處理後的樣品上檢測不到  $\text{SeO}_2$  的訊號。簡言之，所有的 X 射線電子能譜儀結果表明，氫溴酸處理不僅會造成樣品的  $p$  型摻雜，同時也消除  $\text{Se}^{(0)}$  和  $\text{SeO}_2$  雜質。在氫溴酸處理過程中，極有可能藉由改變  $\text{Se}_2^{2-}$  到  $\text{Se}^{2-}$ ，造成 Se 空缺填補，或也有可能是 Se 空缺被溴離子所鈍化。

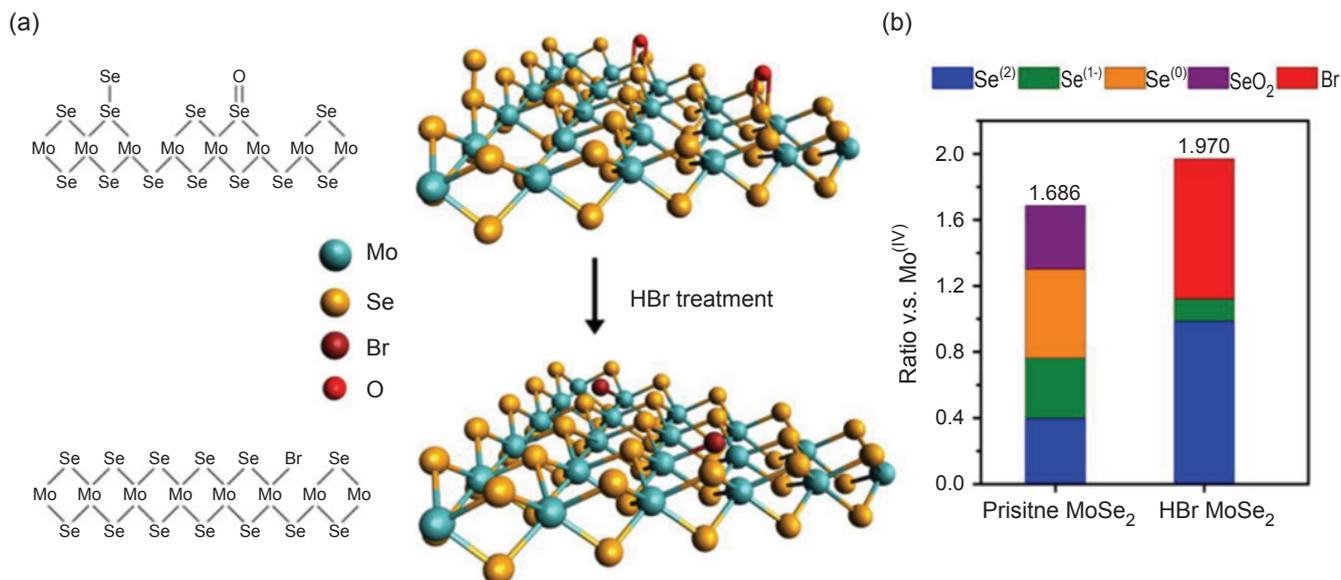


圖 9. (a) 初始態與經氫溴酸處理前後的化學組成示意圖。(b) 初始態及經氫溴酸處理的單層二硒化鉬中陰離子與四價鉬的原子比。

#### 四、結論

二維單層二硒化鉬材料中由硒原子空缺所形成的點缺陷，會捕捉自由載子，且發生非輻射複合，而造成光致螢光發光強度減弱。由本文的研究結果可知，經氫鹵酸處理過後的二維層狀過渡金屬硫化物樣品，由硒原子空缺所形成的點缺陷可被修補，使得整體的發光效率達 30 倍以上。同時在 10 K 低溫下，被束縛激子狀態可以有效地被抑制，而使得中性激子和三荷激子訊號可以被觀察到。不同的氫鹵酸處理過程，同樣顯示出類似的光致螢光增強效果，可提供光學性質的改善。推測原因，可能因經氫鹵酸處理後雜質去除、*p* 型摻雜以及改善並減少二硒化鉬的缺陷等等。總而言之，我們的方法提供了一個可調整與控制二維過渡金屬硫化物材料本質及光電特性的可行方法，對於未來開發二維材料在微型光電元件的應用極為重要。

#### 參考文獻

1. Q. H. Wang, K. K.-Zadeh, A. Kis, J. N. Coleman, and M. S. Strano, *Nat. Nanotechnol.*, **7**, 699 (2012).
2. S. Jo, N. Ubrig, H. Berger, A. B. Kuzmenko, and A. F. Morpurgo, *Nano Lett.*, **14**, 2019 (2014).
3. Z. Yin, H. Li, H. Li, L. Jiang, Y. Shi, Y. Sun, G. Lu, Q. Zhang, X. Chen, and H. Zhang, *ACS Nano*, **6**, 74 (2012).
4. P. K. Chow, R. B. J.-Gedrim, J. Gao, T.-M. Lu, B. Yu, H. Terrones, and N. Koratkar, *Nano*, **9**, 1520 (2015).
5. S. Mouri, Y. Miyauchi, and K. Matsuda, *Nano Lett.*, **13**, 5944 (2013).
6. M. Amani, D.-H. Lien, D. Kiriya, J. Xiao, A. Azcatl, J. Noh, S. R. Madhupathy, R. Addou, S. KC, M. Dubey, K. Cho, R. M. Wallace, S.-C. Lee, J.-H. He, J. W. Ager, X. Zhang, E. Yablonovitch, and A. Javey, *Science*, **350**, 1065 (2015).
7. Y.-H. Chang, W. Zhang, Y. Zhu, Y. Han, J. Pu, J.-K. Chang, W.-T. Hsu, J.-K. Huang, C.-L. Hsu, M.-H. Chiu, T. Takenobu, H. Li, C.-I. Wu, W.-H. Chang, A. T. S. Wee, and L.-J. Li, *ACS Nano*, **8**, 8582 (2014).
8. N. Peimyoo, J. Shang, C. Cong, X. Shen, X. Wu, E. K. L. Yeow, and T. Yu, *ACS Nano*, **7**, 10985 (2013).
9. J. Kibsgaard, Z. Chen, B. N. Reinecke, and T. F. Jaramillo, *Nat. Mater.*, **11**, 963 (2012).
10. J. S. Ross, S. Wu, H. Yu, N. J. Ghimire, A. M. Jones, G. Aivazian, J. Yan, D. G. Mandrus, D. Xiao, W. Yao, and X. Xu, *Nat. Commun.*, **4**, 1474 (2013).
11. Y. Ma, Y. Dai, M. Guo, C. Niu, J. Lu, and B. Huang, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **13**, 15546 (2011).
12. O. Lehtinen, H.-P. Komsa, A. Pulkin, M. B. Whitwick, M.-W. Chen, T. Lehnert, M. J. Mohn, O. V. Yazyev, A. Kis, U. Kaiser, and A. V. Krasheninnikov, *ACS Nano*, **9**, 3274 (2015).

## 本文譯自：

Hav-Vei Han, Ang-Yu Lu, Li-Syuan Lu, Jing-Kai Huang, Henan Li, Chang-Lung Hsu, Yung-Chang Lin, Ming-Hui Chiu, Kazu Suenaga, Chih-Wei Chu, Hao-Chung Kuo, Wen-Hao Chang, Lain-Jong Li, Yumeng Shi, "Photoluminescence Enhancement and Structure Repairing of Monolayer MoSe<sub>2</sub> by Hydrohalic Acid Treatment," ACS nano, Vol. 10, No 1, PP 1454-1461 (2016).



韓皓惟先生現為國立交通大學光電工程研究所博士班學生。

Hau-Vei Han is currently a Ph.D. candidate in Institute of Electro-Optical Engineering at National Chiao Tung

University.



郭浩中先生為美國伊利諾大學電機博士，現任國立交通大學光電工程研究所教授。

Prof. Hao-Chung Kuo received his Ph.D. in electrical engineering from the Electrical and Computer Engineering Department at University of Illinois, Urbana Champaign. He is currently a distinguished professor in the Department of Photonics at National Chiao Tung University.