

# 知識天地

## 二維半導體的電子傳輸性質

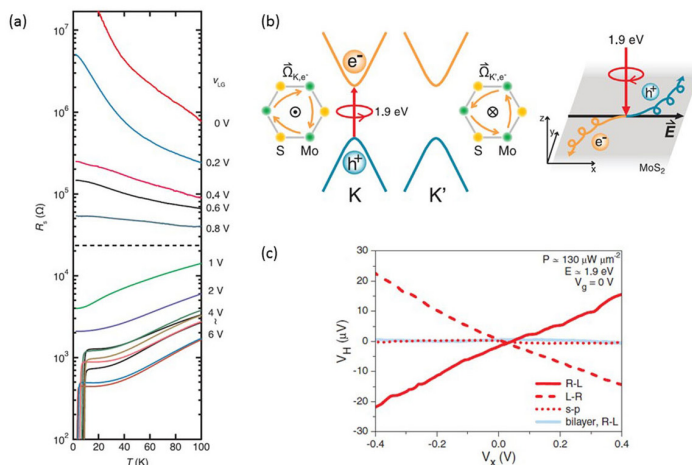
王偉華副研究員 (原子與分子科學研究所)

自單層石墨烯由A. Geim的實驗室實際製作出來後，大量研究人員與資源投入二維材料的研究，其背後的重要動機之一是二維材料作為一個較新的材料，可以以單獨或者混加的方式提供目前既有材料所無法達到的功能性。除了石墨烯以外，另外一種重要的二維材料是層狀的過渡金屬硫屬化合物（transition metal dichalcogenides, TMD），TMD的一般化學式是 $\text{MX}_2$ ，其中M是過渡金屬而X是硫族元素如S、Se或Te。以往塊材的TMD僅能透過改變化合物的組成元素來改變其電子結構，但對二維的TMD而言，除了元素組成以外，由於缺乏垂直於材料平面的鍵結，其電荷載子被侷限於二維材料平面，因此二維TMD富有迥異於塊材TMD的基本性質，並可能廣泛的應用於催化、電子學、光子學等領域。

二維TMD的基本的物理、化學、材料特性廣泛，本文僅限於討論電性中較獨特的部分。由於二維TMD的載子濃度較低，可以有效地以電場控制載子濃度，這是所有二維材料所共有的特性，根據此特性可以製做二維TMD的場效電晶體。二維TMD場效電晶體的元件特性與傳統場效電晶體具有相似之處，可以應用於電子及化學感測領域。二維TMD場效電晶體的優值（figure of merit）之一為載子遷移率，一般依元件品質的不同有很大的分佈範圍，以 $\text{MoS}_2$ 場效電晶體為例約在 $1\text{-}1000\text{ cm}^2/\text{Vs}$ [1]，若利用特殊的元件設計製作高品質的 $\text{MoS}_2$ 場效電晶體則可提高載子遷移率到 $34,000\text{ cm}^2/\text{Vs}$ [2]，如此高的載子遷移率顯示二維TMD具有很高的應用潛力。與傳統場效電晶體相比較二維TMD場效電晶體也有其特殊之處，本文將述及其獨特的部分，包含有效的場效控制、與能谷（valley）自由度相關的物理現象、以及短通道效應。

### 二維TMD的場效控制

二維TMD的場效控制可以清楚地展現在Y. Iwasa等人的實驗中[3]，實驗的樣品為層狀的 $\text{MoS}_2$ ，利用離子液體產生很高的靜電電荷摻雜，圖一(a)呈現的是樣品在不同的液體閘偏壓即不同二維載子濃度下的層電阻的溫度變化，由此電阻的溫度變化可以分析樣品的傳輸機制。在偏壓小於1 V時，樣品呈現絕緣體的傳輸行為，此時樣品的費米能位於半導體的能隙區間因此沒有可移動的載子。在載子濃度稍高的範圍，費米能位於傳導帶的邊緣，此時載子可透過熱激化與變程跳躍產生較弱的傳導，而載子以及載子遷移率亦隨著偏壓的增加而增加；在偏壓大於1 V時，樣品呈現金屬的傳輸行為，此時樣品的費米能位於半導體的傳導帶區間因而呈現帶傳輸行為；此一金屬性持續隨著偏壓的增加而增加，直到偏壓大於4 V時出現典型的超導體特性，即層電阻趨近於零。由於二維TMD 是一個層狀且組成元素單純的化合物，可以避免非均勻的摻雜分佈及相分離等材料問題，易於分析由場效所引起的超導相，因此這是在帶絕緣體中首次可以觀察到在溫度-載子濃度相圖中的圓頂形狀的超導體相。這樣在單一的材料中的電荷傳輸特性，只透過調控材料中的二維載子濃度，一路由絕緣體、金屬、一直到超導體的傳輸行為，而超導體的臨界溫度也可以藉



圖一 (a) $\text{MoS}_2$ 樣品在不同的液體閘偏壓下的層電阻的溫度變化[3]。(b)能谷自由度相關的光學選擇定則的示意圖，單層 $\text{MoS}_2$ 的電子對應於K和 $K'$ 能谷有相等大小且方向相反的有效磁場。利用圓偏振的光決定激發載子的K或 $K'$ 能谷以產生可量測的霍爾電位[4]。(c)不同的圓偏振光激發下，霍爾電位與縱向源極-汲極偏壓的關係[4]。

由二維載子濃度來調控，這樣的可調控性是二維材料的特色之一。

### 能谷自由度相關的物理現象

現今的電子科技從基礎物理的角度而言是利用電子電荷以及電子自旋的自由度為基礎，從而建立如電晶體、光偵測器、磁記憶等元件，而在石墨烯或二維TMD等蜂巢狀的晶體有一能谷的自由度可以開發並有可能應用於次世代的電子學。單層TMD的晶體結構為二維蜂巢狀晶格，其低能量的電子在相空間中位於直接能隙並可區分為K和K'能谷，由於缺乏反轉對稱性，在單層TMD的電子對應於K和K'能谷有相等大小且方向相反的有效磁場如圖一(b)所示，此一有效磁場正比於Berry曲率。當電子在二維TMD中移動時，因為此有效磁場電子受到一類Lorentz力的作用因而有垂直於漂移電流方向運動。由於電子對應於K和K'能谷有方向相反的有效磁場，因此在空間上可將對應於K和K'能谷的電子分離，導致有趣的拓樸傳輸性質即能谷霍爾效應。相反地，雙層的TMD具有反轉對稱性，因此本質上不會產生能谷霍爾效應，但如果利用垂直於二維材料平面的電場破壞其反轉對稱性，即可以產生相反的Berry曲率，因而可以利用電場調控能谷霍爾效應的強度[5]。由於二維TMD的半導體能隙相對應於可見光範圍，而且有很強的自旋-軌道交互作用，因此二維TMD的能谷相關現象較可能應用於能谷相關的光電子學與半導體自旋電子學。

在K. F. Mak等人所展示的單層MoS<sub>2</sub>能谷霍爾效應中[4]，在外加源極-汲極偏壓下產生一縱向的電流，能谷電流密度發生於橫向方向。但是由於K和K'能谷的載子同時向兩邊偏移，因此所量測到的橫向電位仍為零。在此實驗中利用圓偏振的光決定激發載子的K或K'能谷，這是由於前述的有效磁場可以定義光學選擇定則，由於反轉對稱性被破壞，自旋-軌道交互作用造成價帶和自旋的非簡併態，此一自旋的非簡併與時間反轉對稱導致能谷與自旋的耦和，因此利用圓偏振光可以只激發K或K'其中一個能谷。圖一(c)展示在不同的圓偏振光激發下，霍爾電位與縱向源極-汲極偏壓的量測結果，在正的源極-汲極偏壓下，利用右到左的圓偏振光激發導致正的霍爾電位，證實在單層二維TMD材料中能谷霍爾效應的存在[4]。此一實驗展示在現有電子技術的電荷、自旋自由度以外，可能利用能谷作為一個新的自由度，應用於次世代的電子學與光電子學。

### 短通道效應

隨著電晶體的密度增加與閘極長度縮小，直接面臨的物理限制之一是短通道效應，其根本原因為通道區間的載子同時被閘極與源極/汲極所分享，源極和汲極的界面所造成的空乏區穿透到通道區間，導致有效通道長度縮小，使得閘極控制電流的能力減小。短通道效應發生時元件特性改變，包含臨界電壓降低、次臨界斜率降低、這些效應都導致漏電流增加，嚴重阻礙電晶體持續縮小的進程。欲避免短通道效應，閘極長度須大於自然長度的6倍，而此自然長度與通道的厚度成正比[6]；因為二維TMD沒有垂直於材料平面的鍵結，即使在單層的二維TMD也有高載子遷移率的特性，這已接近通道厚度所能達到之極小值-即數個原子層，因此使用二維TMD做為通道材料可以避免短通道效應，得以製作更小的電晶體。在P. D. Ye等人的實驗中為了驗證此一概念[7]，製作不同通道長度從2微米到100奈米的MoS<sub>2</sub>場效電晶體，在比較這些場效電晶體的輸出曲線，發現這些場效電晶體的導通電阻持續隨著通道長度減小而增加，因此顯示二維TMD場效電晶體不受到短通道效應的影響，顯示利用二維TMD做為場效電晶體的潛力。然而必須注意的是，在這些MoS<sub>2</sub>場效電晶體的接觸電阻因為Schottky障壁的存在而較大，此一較大的接觸電阻使得短通道效應的分析變得困難。關於二維TMD場效電晶體的接觸電阻有許多相關的研究，例如利用同樣是二維的石墨烯做為接觸電極或是利用穿隧障壁做為電極都可以大幅減小接觸電阻，由於二維TMD的元件特性的獨特性，其做為場效電晶體的通道材料之優劣仍待詳細的研究。

### 參考資料

1. Schmidt, H., F. Giustiniano, and G. Eda, Electronic transport properties of transition metal dichalcogenide field-

- effect devices: surface and interface effects. *Chemical Society Reviews*, 2015. 44(21): p. 7715-7736.
2. Cui, X., et al., Multi-terminal transport measurements of MoS<sub>2</sub> using a van der Waals heterostructure device platform. *Nature Nanotechnology*, 2015. 10(6): p. 534-540.
  3. Ye, J.T., et al., Superconducting Dome in a Gate-Tuned Band Insulator. *Science*, 2012. 338(6111): p. 1193-1196.
  4. Mak, K.F., et al., The valley Hall effect in MoS<sub>2</sub> transistors. *Science*, 2014. 344(6191): p. 1489-1492.
  5. Lee, J., K.F. Mak, and J. Shan, Electrical control of the valley Hall effect in bilayer MoS<sub>2</sub> transistors. *Nature Nanotechnology*, 2016. 11(5): p. 421-+.
  6. Ferain, I., C.A. Colinge, and J.P. Colinge, Multigate transistors as the future of classical metal-oxide-semiconductor field-effect transistors. *Nature*, 2011. 479(7373): p. 310-316.
  7. Liu, H., A.T. Neal, and P.D.D. Ye, Channel Length Scaling of MoS<sub>2</sub> MOSFETs. *Acs Nano*, 2012. 6(10): p. 8563-8569.