

國立清華大學 電機工程學系

實作專題研究成果摘要

Comparison of Electricity for
Different Contact Metal of $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$
Field Effect Transistor

不同接觸金屬的碲氧化鉍場效電晶
體之電性比較

專題領域：電子領域

組 別：A389

指導教授：邱博文教授

組員姓名：徐筠喬

研究期間：2023年10月3日至2024年4月29日止，共7個月

摘要

有別於一般二維材料，碲氧化鉍($\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$)有著高載子遷移率，並且能形成有高介電常數的自氧化層，因此能夠提升場效電晶體的表現，是個相當有潛力取代矽的半導體材料。然而，在碲氧化鉍本身的電阻已經很小的情況下，如何降低接觸電阻成為了碲氧化鉍此種二維材料研究的重要議題。

本實驗透過化學氣相沉積法來製備碲氧化鉍晶體，接著進行微影以及電子槍蒸鍍等製程來製作電極分別為 Ti/Au 以及 Pd/Au 的元件，並透過元件測量系統量測其 I_D - V_G 轉移特性曲線和 I_D - V_D 輸出特性曲線，最後再藉由傳輸線模型計算不同金屬的接觸電阻值，進而了解不同金屬作為接觸金屬的效能。

實驗結果得知，Ti 電極元件在經過電漿處理後電性表現會有所提升，且 Ti 作為接觸電極有著 $65.7(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$ 的載子遷移率，其開關比達 10^6 ，效能比起載子遷移率為 $24.5(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$ ，其開關比僅有 $10^{1.5}$ 的 Pd 電極元件良好許多。Ti 電極元件的接觸電阻值為 $2.6091(\text{k}\Omega\cdot\mu\text{m})$ 及轉移通道長度為 $1.5567\ \mu\text{m}$ ，而 Pd 電極元件的接觸電阻值為 $4.9633(\text{k}\Omega\cdot\mu\text{m})$ 及轉移通道長度為 $2.9613\ \mu\text{m}$ ，數值皆比 Ti 電極元件還大。顯而易見，對碲氧化鉍而言，Ti 是較為理想的接觸金屬。

目錄

1.研究背景與目的	1
2.研究方法	2
2.1 實驗流程.....	2
3.實驗結果	3
3.1 傳輸線模型分析原理.....	3
3.2 電性測量結果分析.....	3
3.2.1 電性分析	3
3.2.2 接觸電阻分析	6
4.結論	8
5.心得感想	8
6.參考資料	9

1. 研究背景與目的

近年來隨著半導體產業的發展與進步，傳統的塊材面臨了尺寸上的極限，二維材料的出現讓科學家們看見了希望。這種材料具有原子級的厚度，比起傳統半導體，有著更好的載子遷移率[1]。其中，硒氧化鉍（ $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ ）這種材料尤為特別，除了在室溫下有相當高的載子遷移率，而且也能逐層氧化並形成極薄且高品質的高介電常數(high- κ)天然氧化介電層 Bi_2SeO_5 [2]。比起其他無法生成高品質氧化層的半導體材料，此一特性使得 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 能夠被用來製作各種性能良好的元件。

根據總電阻公式 $R_{total} = 2R_p + R_L + 2R_c$ 可知，總電阻為兩倍探針電阻、通道電阻以及兩倍接觸電阻的總和。其中接觸電阻相較於探針電阻與通道電阻，其數值大上許多。因此，對二維材料而言，降低材料與金屬間的接觸電阻是一個相當重要的議題。根據 Shiqi Liu 等人於2019年的研究指出，金(Au)、鈀(Pd)、鉑(Pt)、鈦(Ti)等金屬對於硒氧化鉍而言皆是效果相當不錯的電極[3]，但在經過電漿處理後，材料表面會發生反應，不適用此篇研究。本研究係以硒氧化鉍材料製作半導體元件，且透過電漿處理以及更換不同電極金屬(Ti, Pd)來比較其電性表現，接著透過製作傳輸線模型，再將不同通道長度與電阻繪製關係圖，並透過計算不同金屬的接觸電阻及轉移通道長度，進而比較其作為硒氧化鉍材料接觸金屬的效能。

2. 研究方法

2.1 實驗流程

實驗流程包含材料成長、轉印、微影、蒸鍍、舉離、測量，圖2.1為實驗之流程圖。

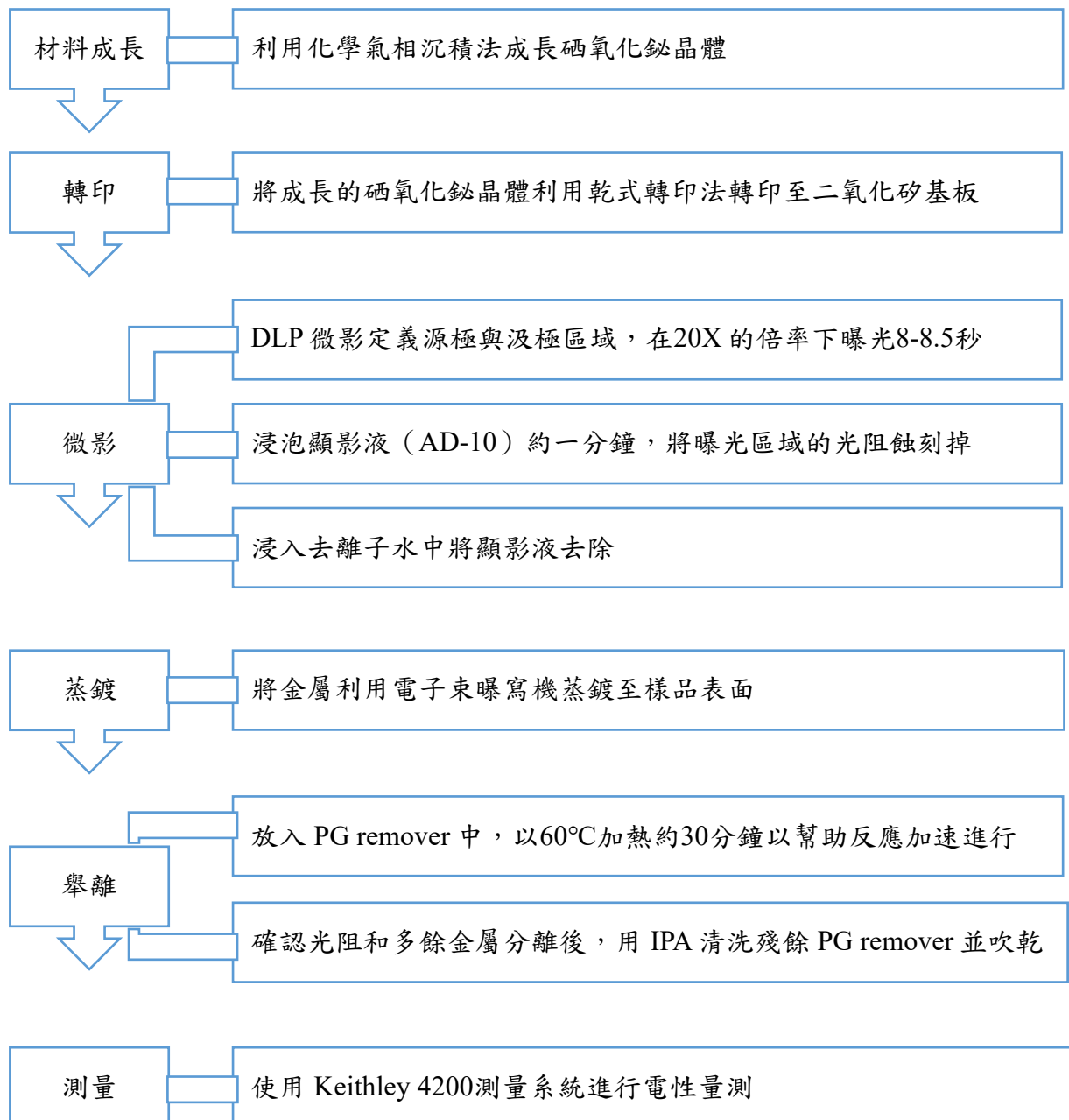


圖2.1 實驗之流程圖

3. 實驗結果

3.1 傳輸線模型分析原理

在本次實驗中，使用小汲極偏壓範圍(V_D 從-0.1V 到0.1V)測量不同通道長度的汲極電流變化，接著再對個別的輸出曲線微分以得到小汲極偏壓的總電阻值(R_{total})，最後再將每組數據點做線性擬合以得到總電阻值對通道長度的關係。而透過探針所量測到的總電阻值為：

$$R_{total} = 2R_p + R_L + 2R_c \dots\dots\dots (3.1)$$

其中， R_p 為探針的電阻，但其數值通常遠小於接觸電阻與通道電阻的尺度，通常省略不計。 R_c 為接觸電阻值，而 R_L 為通道的電阻。而 R_L 又可以換算成 $\frac{R_{sh}}{W}L$ ，其中 R_{sh} 為半導體的片電阻值。 R_c 也可以換算成 $\frac{L_T R_{sh}}{W}$ ，其中 L_T 為轉移長度。

經過重新整理，可得出總電阻值為：

$$R_{total} = \frac{R_{sh}}{W}L + 2R_c = \frac{R_{sh}}{W}(L + 2L_T) \dots\dots\dots (3.2)$$

從公式(3.2)可推算出擬合線的Y截距為 $2R_c$ 、X截距可透過換算後的關係式得到值為 $-2L_T$ 。當每一筆總電阻值先統一除以通道寬度完成歸一化，則擬合線的斜率即為 R_{sh} 值[4]。

3.2 電性量測結果分析

3.2.1 電性分析

首先，我們製作以 Ti(10nm)/Au(40nm)為電極的元件，其中一種不做任何處理，另外一種則進行氬氣電漿處理。圖3.1為未經處理與經過氬氣電漿處理的元件的 I_D - V_G 轉移特性曲線比較圖，固定汲極偏壓 $V_D = 0.1V$ ，並在閘極端給予電壓區間 V_G 從-30V 到+30V，可以看到未經處理的元件電流開關比為 10^4 ，而經過氬氣電漿處理的元件開關比則達到 10^6 。

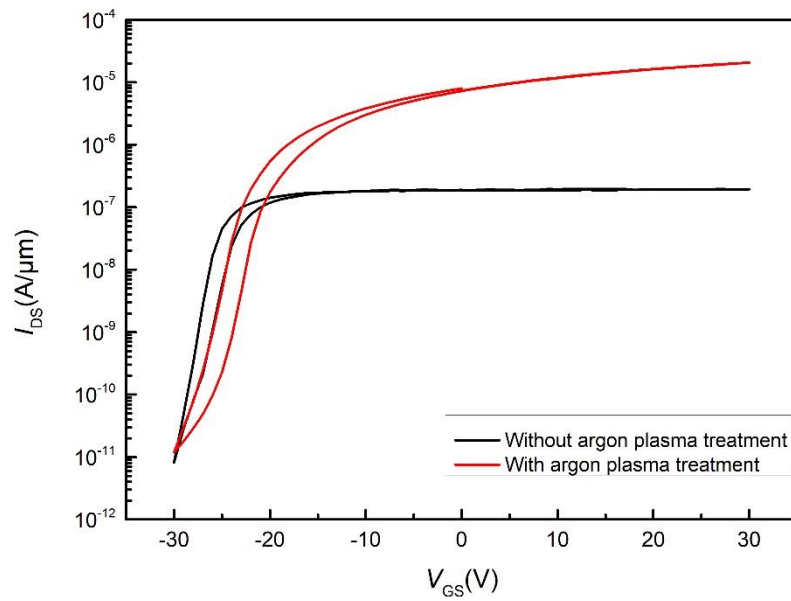


圖3.1 未經處理與經氬氣電漿處理的 Ti 電極元件的 I_D - V_G 轉移特性曲線比較圖。圖中黑色曲線為未經處理元件的 I_D - V_G 曲線，紅色曲線為經氬氣電漿處理元件的 I_D - V_G 曲線

電子遷移率公式如下式所示：

$$\mu = \frac{\Delta I_{ds}}{\Delta V_{gs}} \times \frac{L}{WC_{ox}V_{DS}} \dots\dots\dots (3.3)$$

從(3.3)式可算出未經處理元件的電子遷移率為 $9.24(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$ ，而經氬氣電漿處理元件的電子遷移率則為 $65.7(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$ 。由此可見，Ti 電極元件在經過氬氣電漿處理後，開關比與電子遷移率皆比未經處理的元件改善許多。

圖3.2則為未經氬氣電漿處理的 Ti 電極元件與經氬氣電漿處理的 Ti 電極元件的 I_D - V_D 比較圖，可以觀察到在不同的開極電壓下，經氬氣電漿處理的元件所輸出的源極電流明顯比未經處理元件大上許多。

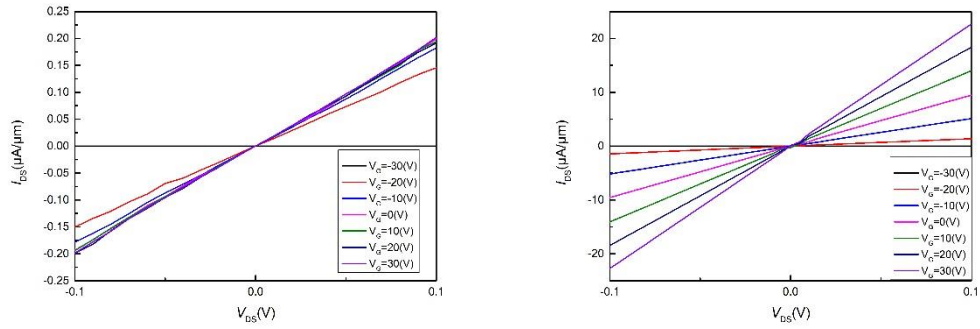
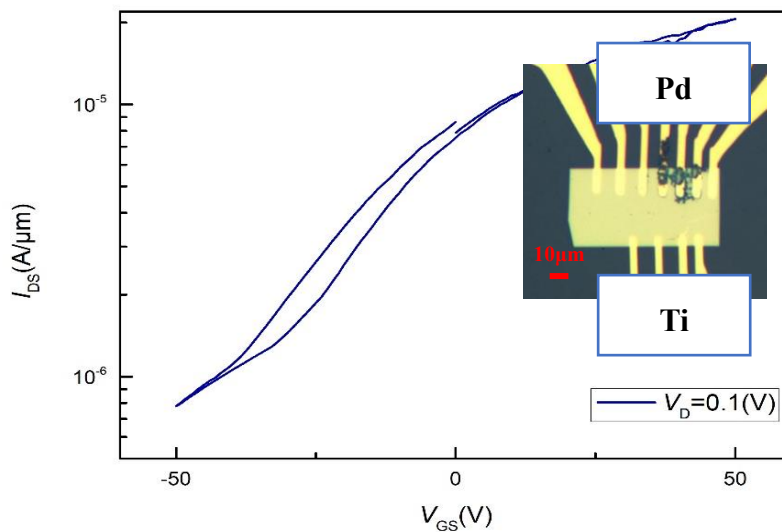


圖3.2 未經氬氣電漿處理的 Ti 電極元件(左)與經氬氣電漿處理的 Ti 電極元件(右)的 I_D - V_D 比較圖

由於氬氣電漿處理後的 Pd 電極會與二氧化矽表面起化學反應，因此不能用原本的能帶模型來判斷。於是將 Ti 改為 Pd 進行實驗來檢測其作為接觸金屬的電性及效能，並在同一片材料分別製作以 Pd(10nm)/Au(40nm)為電極的元件與 Ti(10nm)/Au(40nm)元件作比較。

圖3.3(a)為經氬氣電漿處理的 Pd 電極元件的 I_D - V_G 轉移特性曲線，固定汲極偏壓 $V_D = 0.1V$ ，並在閘極端給予電壓區間 V_G 從 -50V 到 +50V，可以看到電流開關比大約只有 $10^{1.5}$ ，而從公式(3.3)可算出此元件的電子遷移率為 $24.5(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$ ，比起以 Ti 為電極的元件，閘極控制能力較差且電子遷移率也較小。

(a)



(b)

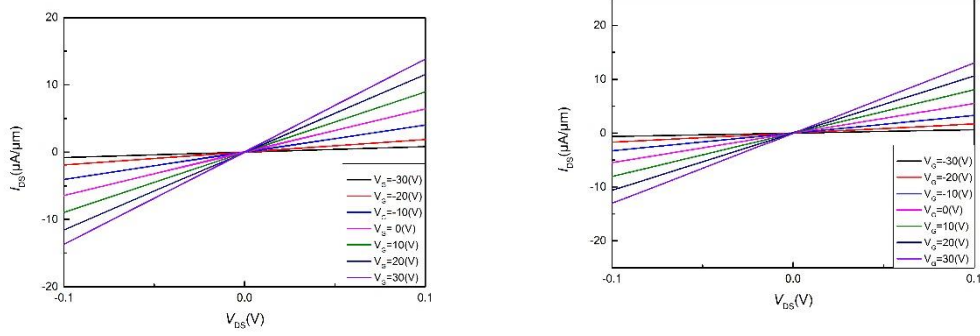


圖3.3 (a)經氬氣電漿處理後的 Pd 電極元件的 I_D - V_G 轉移特性曲線，右側插圖為在同片材料上之 Ti 電極元件與 Pd 電極元件的 OM 圖(b) Ti 電極(左)與 Pd(右)電極 I_D - V_D 輸出特性曲線比較圖

圖3.3(b)為在同片材料上的 Ti 電極元件與 Pd 電極元件的 I_D - V_D 輸出特性曲線的比較圖，由圖可看出在 V_D 從 -0.1V 到 +0.1V 的區間，使用 Ti 作為電極的元件整體所輸出的源極電流較大。

3.2.2 接觸電阻分析

接觸電阻係透過碲氧化鈹金半接觸區域經過氬氣電漿處理的傳輸線模型來分析。首先，以小的汲極偏壓範圍(V_D 從 -0.1V 到 +0.1V)測量不同通道長度的輸出曲線，再對個別的輸出曲線微分以得到小汲極偏壓範圍的總電阻值。

最後，再將每組數據點做線性擬合以得到圖3.4元件通道長度與平均電阻值關係圖。圖中的紅色數據點為每個通道長度的平均總電阻值，而黑色線為線性擬合後的結果，右下角附圖則為 TLM 元件之 OM 照。並根據公式(3.2)推導可算出接觸電阻為 $2.6091 \text{ k}\Omega \cdot \mu\text{m}$ ，轉移長度 $1.5567 \mu\text{m}$ ，片電阻為 $1.67607 \text{ k}\Omega/\square$ 。

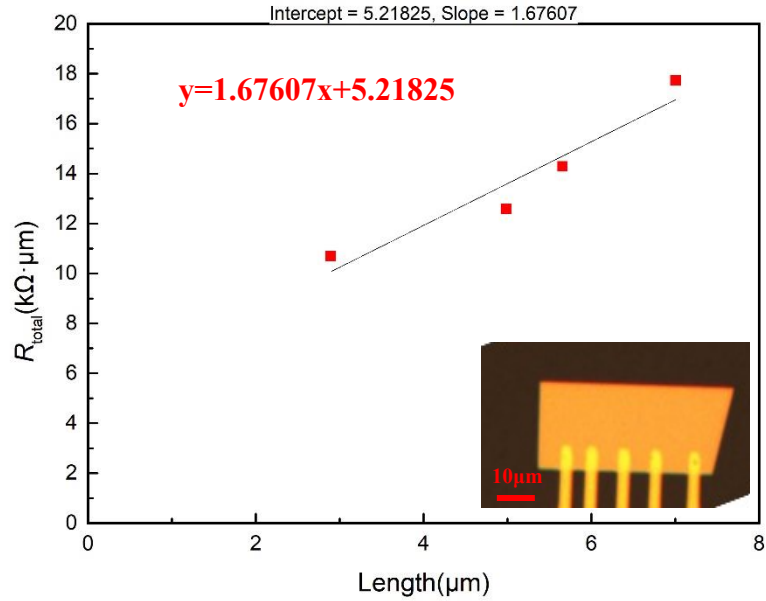


圖3.4 經氬氣電漿處理 Ti 電極元件通道長度與平均電阻值圖

至於 Pd 電極元件的接觸電阻，因為無法做出如圖3.4斜率為正的擬合線，因此改用另外一種方式估算 Pd 的接觸電阻。根據公式(3.2)可知， $R_C = (R_{total} - \frac{R_{sh}}{W}L)/2$ 。試取長度 $L = 5 \mu m$ ，總電阻為四個數據點的平均值 $R_{total} = 18.3071 k\Omega \cdot \mu m$ 帶回計算，得到接觸電阻為 $4.9633 k\Omega \cdot \mu m$ ，轉移長度為 $2.9613 \mu m$ 。相比 Ti 電極元件，Pd 電極元件的接觸電阻與轉移長度皆較大。

此外，在實驗過程中也發現，Pd 的電極容易燒毀，推測是因為 Pd 的功函數較大，當電流快速通過，電極會因為無法承受較高的功率而燒毀。

值得一提的是，實驗中也發現部分元件的電阻值並沒有如預期般隨通道長度增加而增加，常常呈現不規則趨勢，甚至隨通道長度增加而減少。推測是因為在量測時，電流並非如預期般流經兩電極間的通道，而是走了其他電阻較小的路徑。各項指標整理如下表所示。

表3.1 各項指標

	Contact metal	
	Pd	Ti
On-off ratio	$10^{1.5}$	10^6
Drive current(A/ μm)	2.059×10^{-5}	2.057×10^{-6}
mobility($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	24.5	65.7
Contact resistance($\text{k}\Omega\cdot\mu\text{m}$)	4.9633	2.6091
Transfer length(μm)	2.9613	1.5567

4. 結論

從實驗結果可以看出，Ti 電極元件經過氬氣電漿處理後，電性測量表現會獲得顯著改善。而我們使用 Pd 作為接觸金屬，並經過氬氣電漿處理而製作 Pd 電極元件，可發現其開關比與電子遷移率較小，且在同樣閘極偏壓範圍下所輸出的源極電流也較小。在接觸電阻量測中，也發現 Ti 電極元件的接觸電阻和轉移通道長度皆小於 Pd 電極元件。

綜上所述，經過氬氣電漿處理後的 Pd 電極元件雖然仍有閘極控制的能力，但電性表現皆不如 Ti 電極元件，因此 Ti 依舊較適合做為碲氧化鉍材料的接觸電極。

5. 心得感想

二維材料對我來說是一個全新的領域，最初進到實驗室可以說是什麼都不知道，必須從最基礎的二維材料的知識還有材料成長開始學起。在做專題期間學長姊們對於實驗的每個步驟都會手把手教學，還會補充每個步驟的意義，不僅讓我學到許多有關半導體的知識，也讓我從一個每次做實驗都擔心自己會出錯的小雛鳥漸漸成長為能夠獨自操作實驗的人。一開始在做實驗時材料長不好，做的元件都也都關不起來，真的非常挫折。直到後來第一次看到自己做的元件有閘極控制能力，內心非常感動，感覺辛苦沒有白費了。真的非常感謝實驗室的學長姐們在這段期間不厭其煩的幫我解決各種雜七雜八小問題，陪我討論實驗結果，讓我在最後能夠完成這份專題報告。

6. 參考資料

- [1] Xiang Ding, Menglu Li, Pei Chen, Yan Zhao, Mei Zhao, Huaqian Leng, Yong Wang, Sharafat Ali, Fazal Raziq, Xiaoqiang Wu, Haiyan Xiao, Xiaotao Zu, Qingyuan Wang, Ajayan Vinu, Jiabao Yi, and Liang Qiao1,” $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$: A rising star for semiconductor devices”.
- [2] Tianran Li, Teng Tu, Yuanwei Sun, Huixia Fu, Jia Yu, Lei Xing, Ziang Wang, Huimin Wang, Rundong Jia, Jinxiong Wu1, Congwei Tan, Yan Liang, Yichi Zhang, Congcong Zhang, Yumin Dai, Chenguang Qiu, Ming Li, Ru Huang, Liying Jiao, Keji Lai, Binghai Yan, Peng Gao, and Hailin Peng,” A native oxide high- κ gate dielectric for two-dimensional electronics,” *Nature Electronics*, vol. 3, August 2020, p.473 – 478.
- [3] Shiqi Liu, Lianqiang Xu, Yuanyuan Pan, Jie Yang, Jingzhen Li, Xiuying Zhang, Lin Xu, Hua Pang, Jiahuan Yan, Bowen Shi, Xiaotian Sun, Han Zhang, Linqiang Xu, Jinbo Yang,” Unusual Fermi-Level Pinning and Ohmic Contact at Monolayer $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ – Metal Interface,” *Advanced Theory and Simulations*, vol. 2, no. 5, p. 1800178, 2019.
- [4] Yu-Hao Chang,” Metal/Semiconductor Contact Analysis for $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ Field-Effect Transistor”.