

# 納米武林基本功

## - 土四鬼月系列之一

Poly depletion vs MG

王不老說半导

# 納米武林基本功

## - 土四鬼月系列之一

Poly depletion vs MG

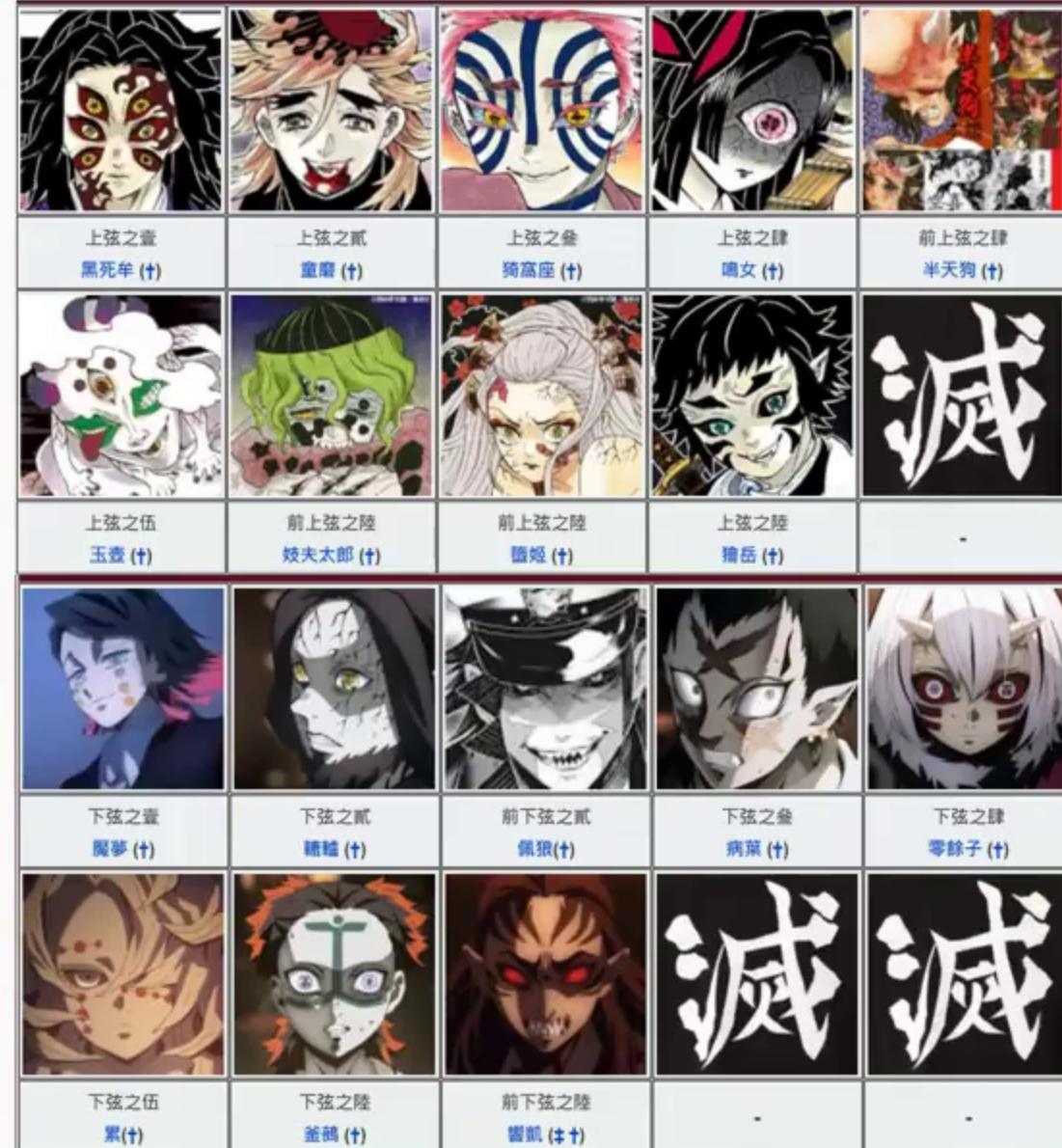
王不老說半导

# 無慘的十二鬼月

- 十二鬼月是鬼舞辻無慘的直屬部下，由上弦和下弦組成，上下弦各六個，是鬼中最強的十二個
- 江戶時代的**200**餘年間，無慘始終在日本各地來往，躲避著鬼殺隊的追殺。與此同時，他也在不停地物色著自己中意的人選，以強迫或者自願的方式將他（她）們變為強力的上下弦之鬼，並最終形成了十二鬼月的基本雛形

2018年日本動漫的海外銷售額達到1萬億日元

<https://kimetsu-no-yaiba.fandom.com/zh-tw/wiki/%E5%8D%81%E4%BA%8C%E9%AC%BC%E6%9C%88?variant=zh-hant>



# 話說回頭：硅邏輯芯片的伏尼契奧義

- 說白了，右圖(以及前頁的PDK)是顧客的理想國要求→**土四鬼月**
- TSMC/Samsung/Intel要根據此要求提供相對應的的製程，而且必須高良率才能保證品質以及利潤
- 就**7nm**而言，目前(**2020/2021**)只有TSMC能以高良率製程解芯片伏尼契奧義，滿足了大客戶的需求並，也賺了大錢，目前三星追趕中，Intel已經落後兩年以上，SMIC還在**28/14nm**中急起直追

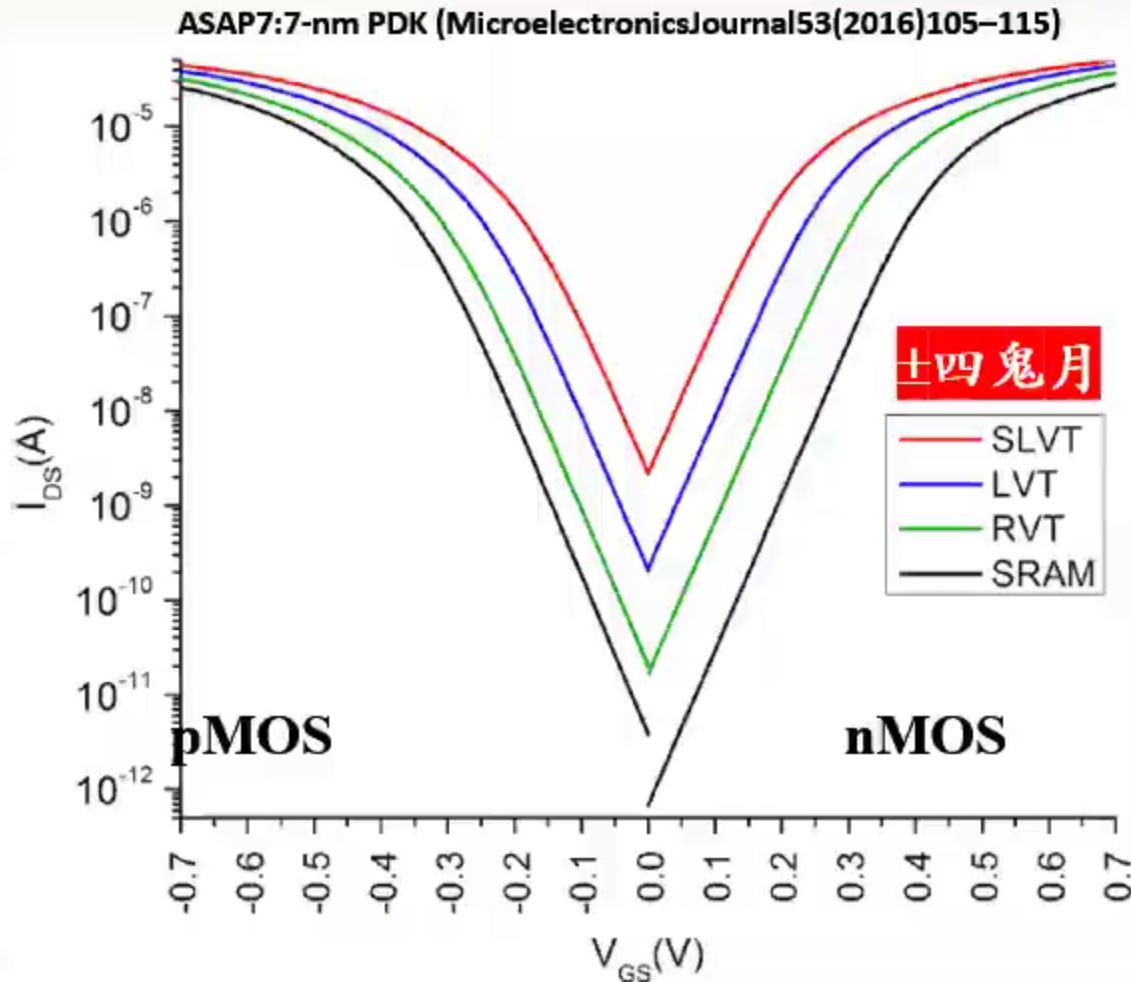


Fig. 8. Spice simulated transistor PMOS (left) and NMOS (right)  $I_{DS}$  vs.  $V_{GS}$  transistor characteristics.  $I_{off}$  drops about one order of magnitude as the  $V_{th}$  choice moves through SLVT, LVT, RVT and SRAM. PMOS  $I_{dsat}$  is approximately 90% that of the corresponding NMOS device.

# 話說回頭：硅邏輯芯片的伏尼契奧義

- 說白了，右圖(以及前頁的PDK)是顧客的理想國要求→**土四鬼月**
- TSMC/Samsung/Intel要根據此要求提供相對應的的製程，而且必須高良率才能保證品質以及利潤
- 就**7nm**而言，目前(**2020/2021**)只有TSMC能以高良率製程解芯片伏尼契奧義，滿足了大客戶的需求並，也賺了大錢，目前三星追趕中，Intel已經落後兩年以上，SMIC還在**28/14nm**中急起直追

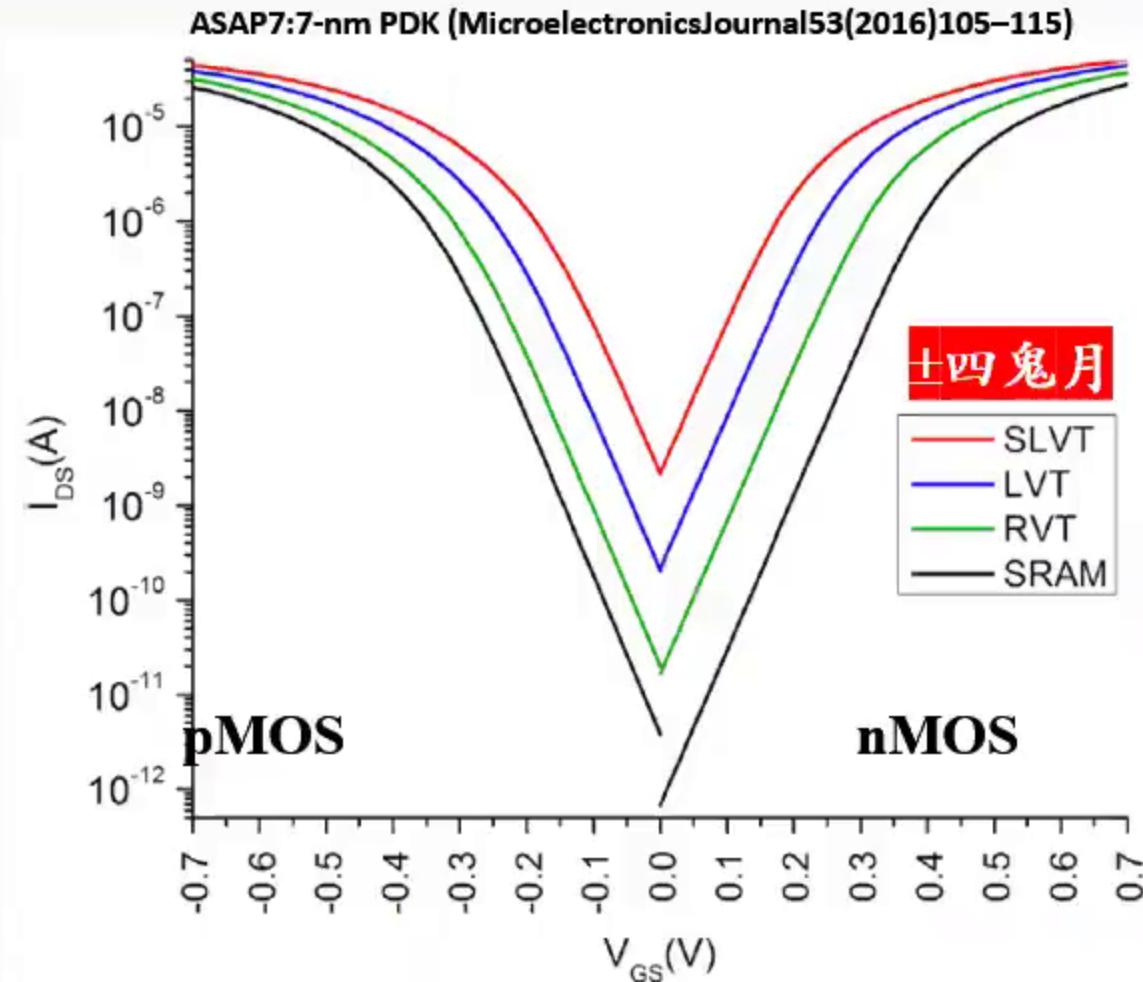
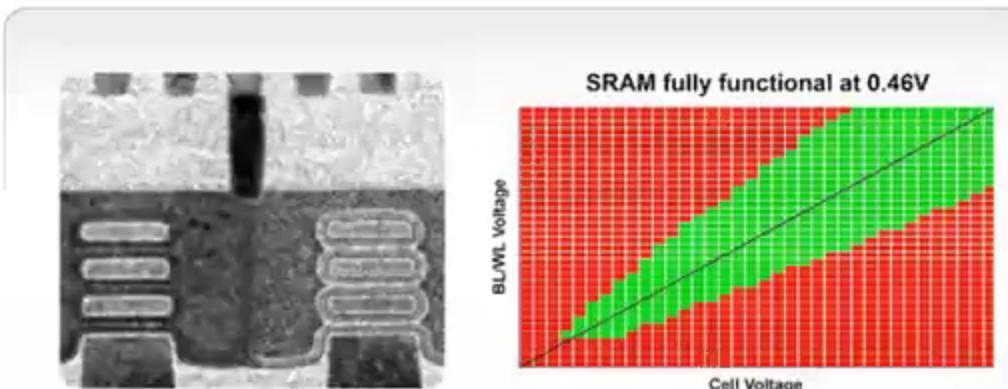


Fig. 8. Spice simulated transistor PMOS (left) and NMOS (right)  $I_{DS}$  vs.  $V_{GS}$  transistor characteristics.  $I_{off}$  drops about one order of magnitude as the  $V_{th}$  choice moves through SLVT, LVT, RVT and SRAM. PMOS  $I_{dsat}$  is approximately 90% that of the corresponding NMOS device.

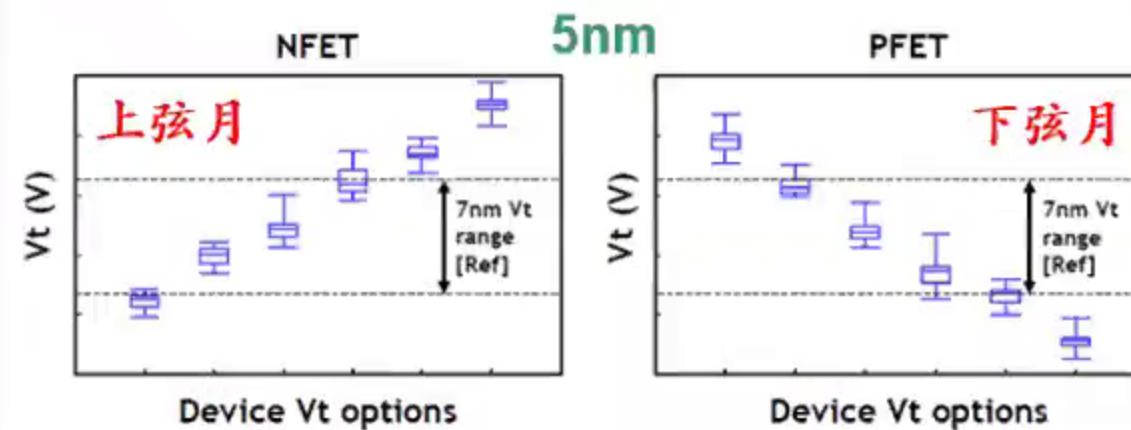
# 台积电十二鬼月(±六鬼月)

- 台积电张晓强指出，晶体管是半导体技术的核心，是二十世纪最伟大发明之一。晶体管架构不断演变下，已从二维架构到今天 3D FinFET，而未来半导体架构也会持续创新，例如 Nanosheet、GAA 进一步提升晶体管效能
- 由于 Nanosheet 当中每个 sheet 的空间很有限，因此要能提供多种不同  $v_t$  晶体管是很大挑战，通过采用创新材料技术，目前已经开发出 12 种  $V_t$  制程（也是由上弦和下弦组成，上下弦各六个），**(±六鬼月也)**

Beyond the FinFET – Nanosheet Transistor



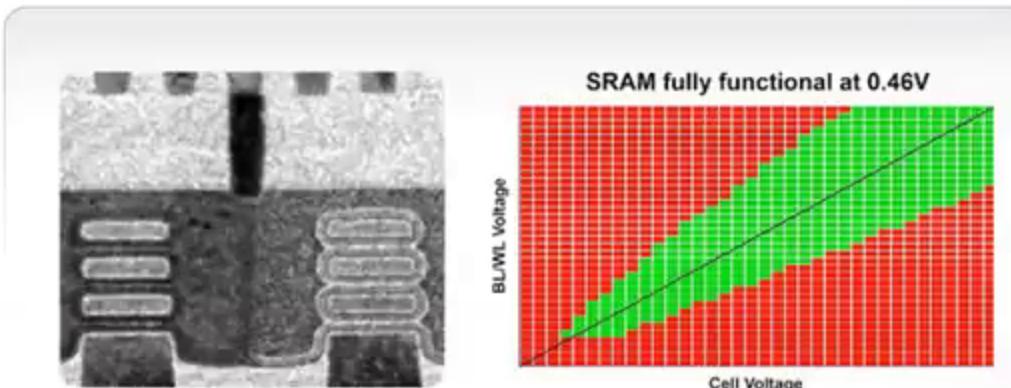
<https://www.eetimes.com/tsmc-chip-scaling-efforts-reach-crossroads-at-2nm/>



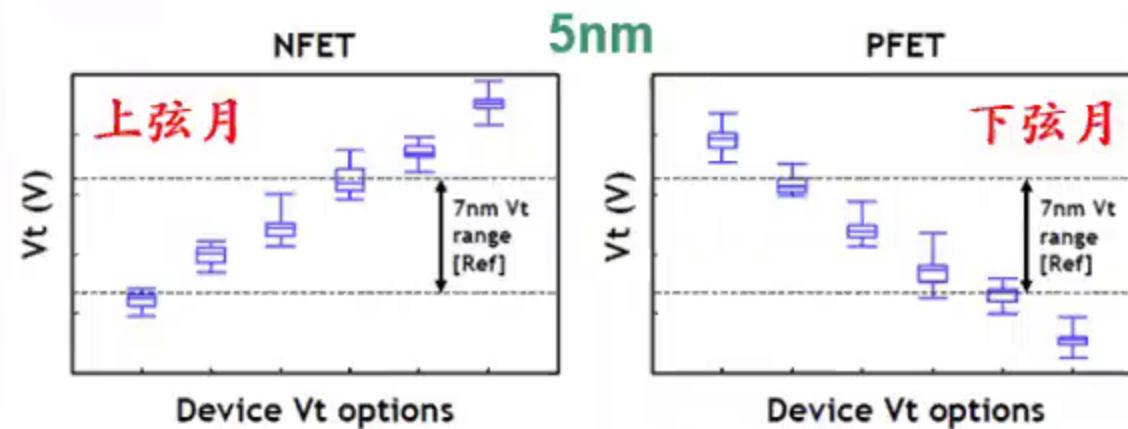
# 台积电十二鬼月(±六鬼月)

- 台积电张晓强指出，晶体管是半导体技术的核心，是二十世纪最伟大发明之一。晶体管架构不断演变下，已从二维架构到今天 3D FinFET，而未来半导体架构也会持续创新，例如 Nanosheet、GAA 进一步提升晶体管效能
- 由于 Nanosheet 当中每个 sheet 的空间很有限，因此要能提供多种不同 vt 晶体管是很大挑战，通过采用创新材料技术，目前已经开发出 12 种 Vt 制程（也是由上弦和下弦组成，上下弦各六个），**(±六鬼月也)**

Beyond the FinFET – Nanosheet Transistor



<https://www.eetimes.com/tsmc-chip-scaling-efforts-reach-crossroads-at-2nm/>

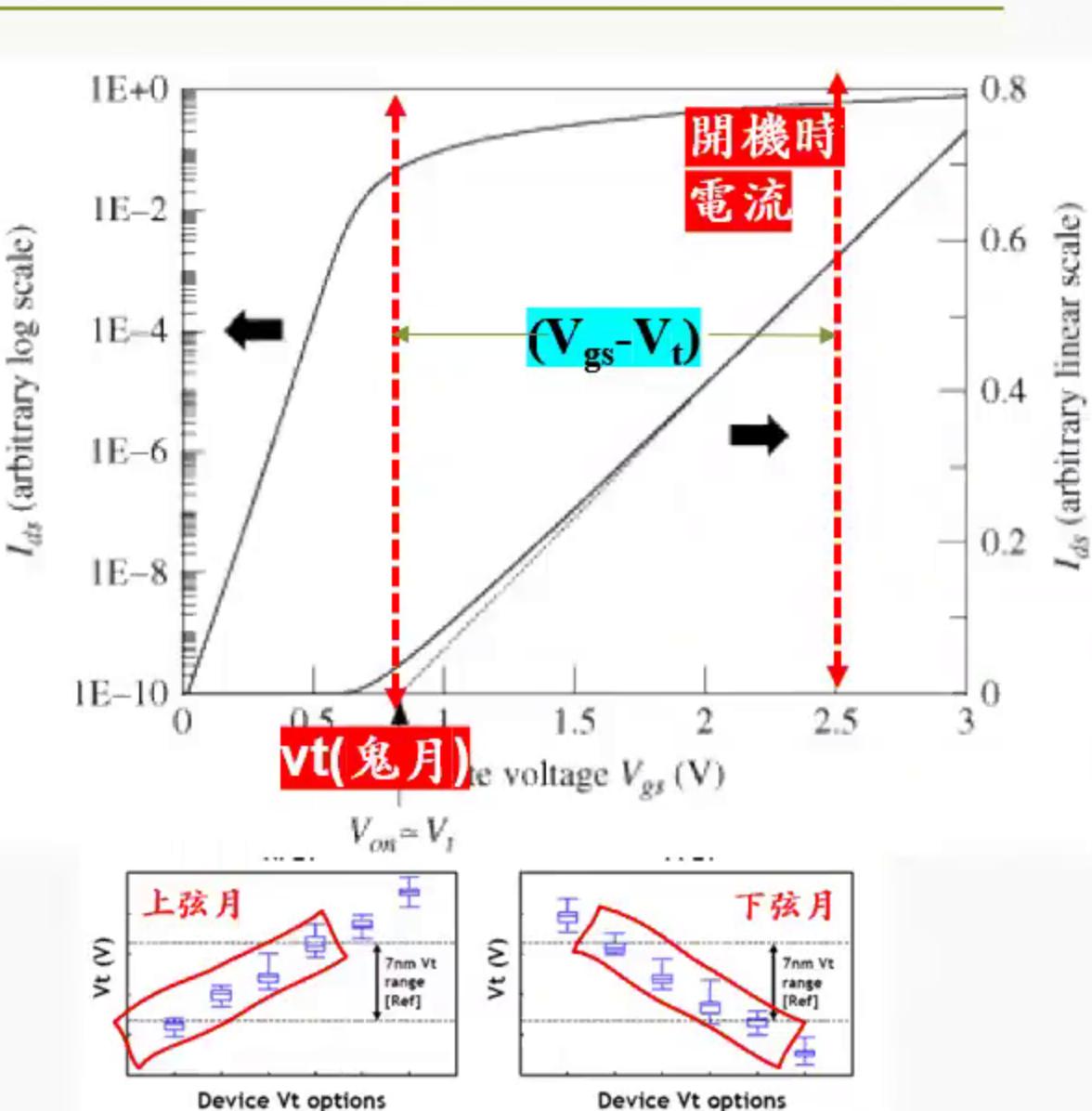


# 為什麼 $V_t$ (鬼月) 那麼重要?

- 當我們打開手機開機使用，螢幕亮了動了，這是因為手機裡頭的電路開始運作，這時候手機電路裡面的電流是

$$I_{ds} = \mu_{eff} C_{ox} \frac{W}{L} \left( (V_{gs} - V_t) V_{ds} - \frac{m}{2} V_{ds}^2 \right),$$

- 以上公式可以看出， $(V_{gs} - V_t)$  = Over drive， $(V_{gs} - V_t)$ 越大，電流當然越大，手機跑得越快，但是電壓( $V_{gs}$ )已固定，且相當小(< 1V)
- 這個意思是說， $V_t$ 越大， $(V_{gs} - V_t)$ 越小，電流自然越小，但電流越大，耗電越兇
- 手機廠商會要求至少8種大小不同的 $V_t$ (上四鬼月)規格(如右下圖，上下弦月各四個)來控制手機電流( $I_{ds}$ )，目的是要手机用時跑得快，不用時漏電少(还真是麻煩)

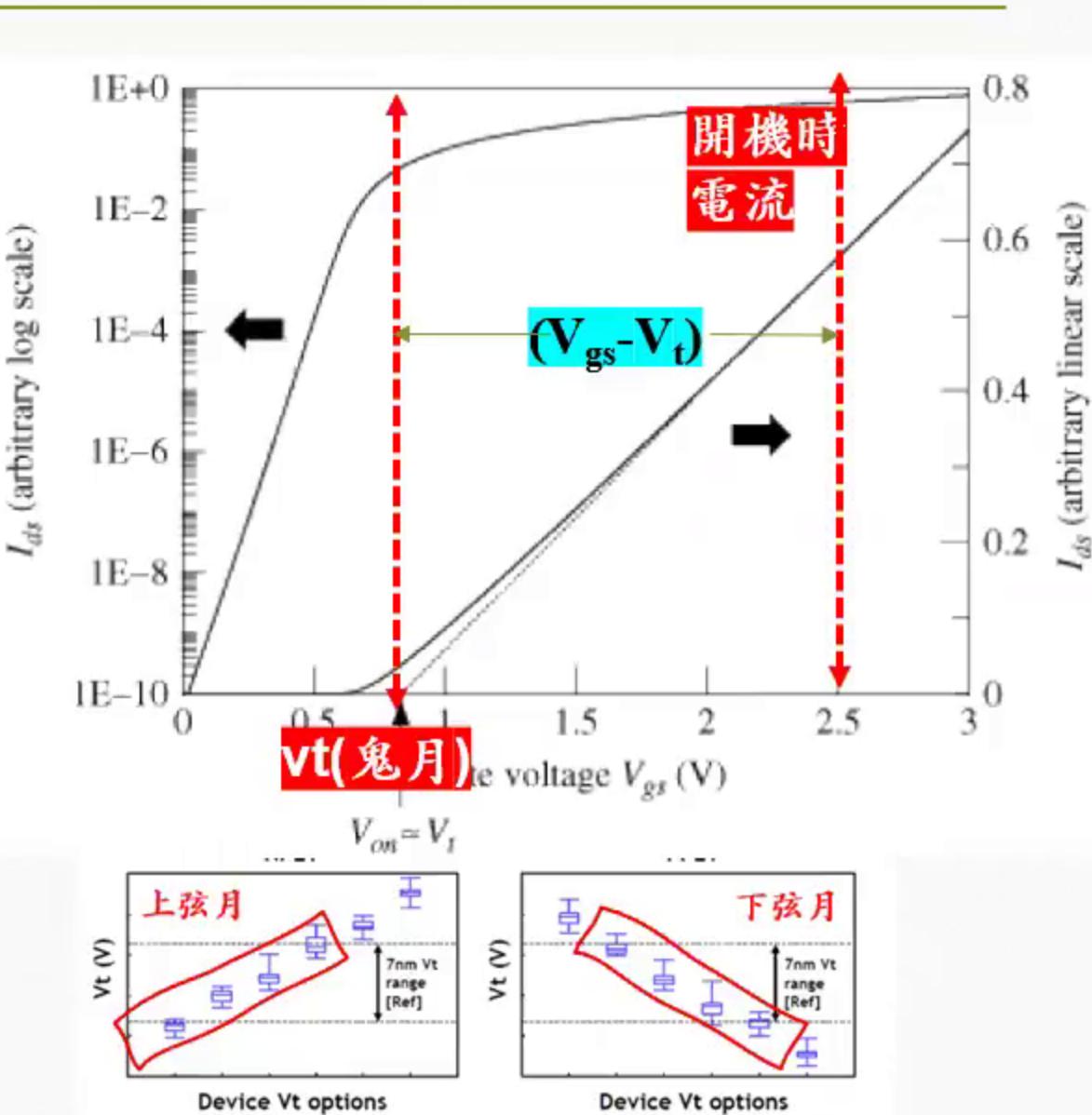


# 為什麼 $V_t$ (鬼月) 那麼重要?

- 當我們打開手機開機使用，螢幕亮了動了，這是因為手機裡頭的電路開始運作，這時候手機電路裡面的電流是

$$I_{ds} = \mu_{eff} C_{ox} \frac{W}{L} \left( (V_{gs} - V_t) V_{ds} - \frac{m}{2} V_{ds}^2 \right),$$

- 以上公式可以看出， $(V_{gs} - V_t)$  = Over drive， $(V_{gs} - V_t)$ 越大，電流當然越大，手機跑得越快，但是電壓( $V_{gs}$ )已固定，且相當小(< 1V)
- 這個意思是說， $V_t$ 越大， $(V_{gs} - V_t)$ 越小，電流自然越小，但電流越大，耗電越兇
- 手機廠商會要求至少**8種大小不同的  $V_t$** (上四鬼月)規格(如右下圖，上下弦月各四個)來控制手機電流( $I_{ds}$ )，目的是要手机用時跑得快，不用時漏電少(还真是麻煩)

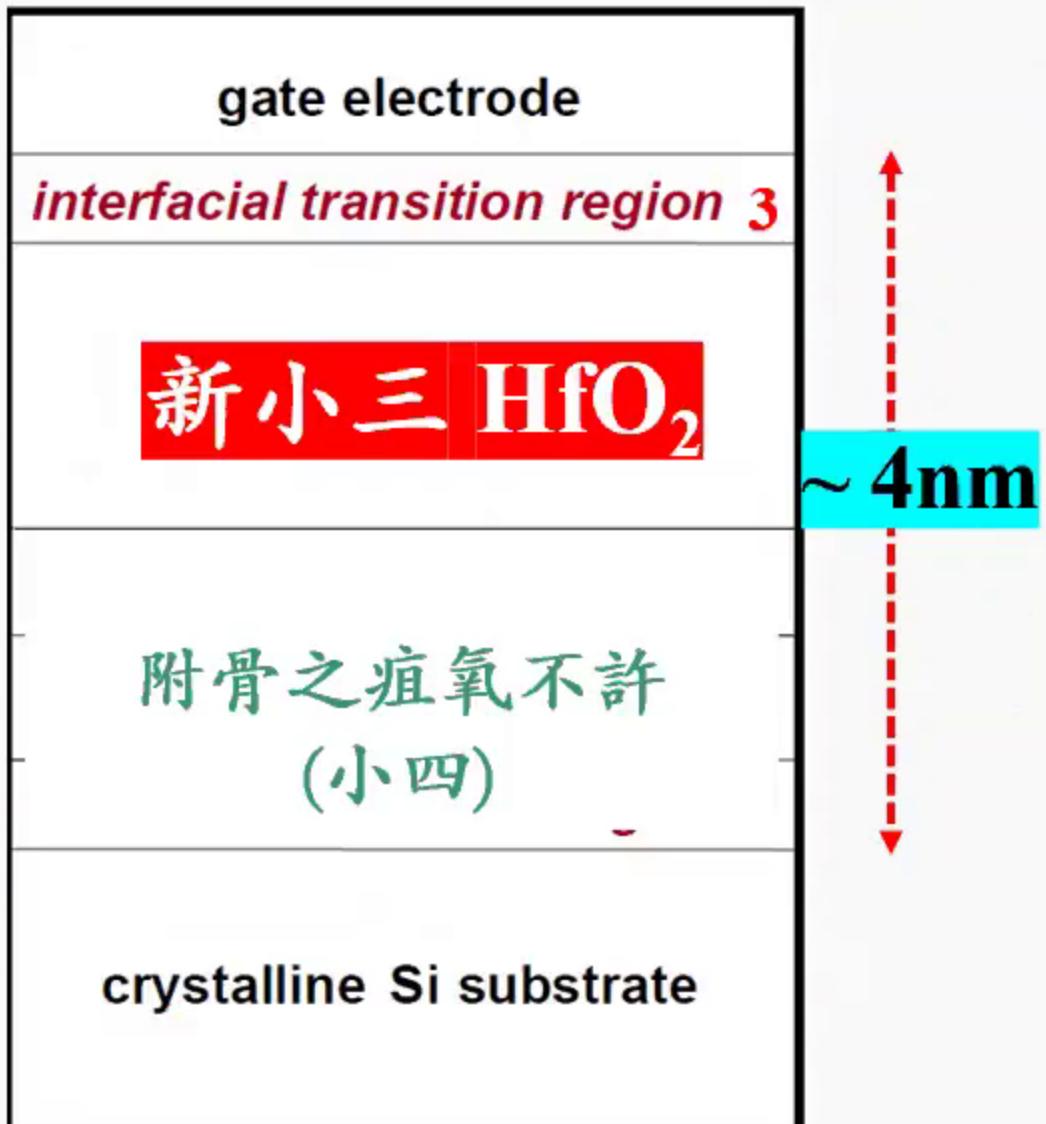


# 回味：魔鬼总在细节中，這細节到底多細？

試問：硅納米世界裡，細节到底可以有多細？

解答：在硅納米世界裡，此為围绕新小三  $\text{HfO}_2$  蛋黃区，一共只约4纳米厚而已

- 所有芯片制程工艺都必须保护这一块：
  - 減少介面缺陷密度  $< 10^{10-11}/\text{cm}^2$ ，體缺陷  $< 10^{16-17}/\text{cm}^3$
  - 至少六个臨界電壓(6 Vt)，否則嘿嘿！

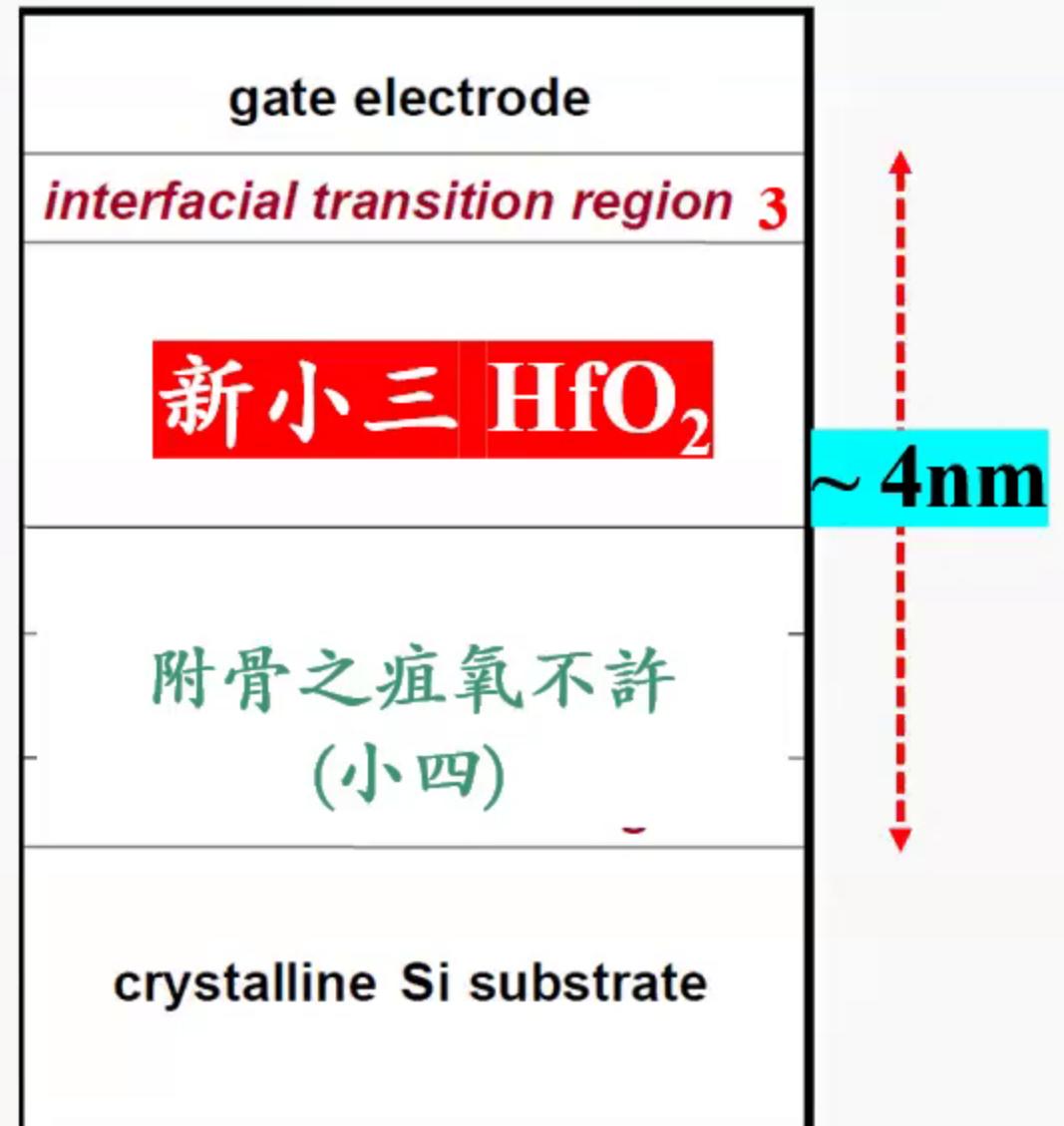


# 為何新小三 $\text{HfO}_2$ 自帶金屬閨密？

源起：原小三( $\text{SiO}_2$ )閨密是(poly-Si)，但人老珠黃，竟有poly-depletion老態(其電子密度 $N_D < 10^{20}/\text{cm}^3$ )

**HKMG:**新小三  $\text{HfO}_2$  + 閨密 = TiN/TiAlC

- No depletion (因為是金屬，其電子密度超高 $> 10^{22}/\text{cm}^3$ )， no band bending也

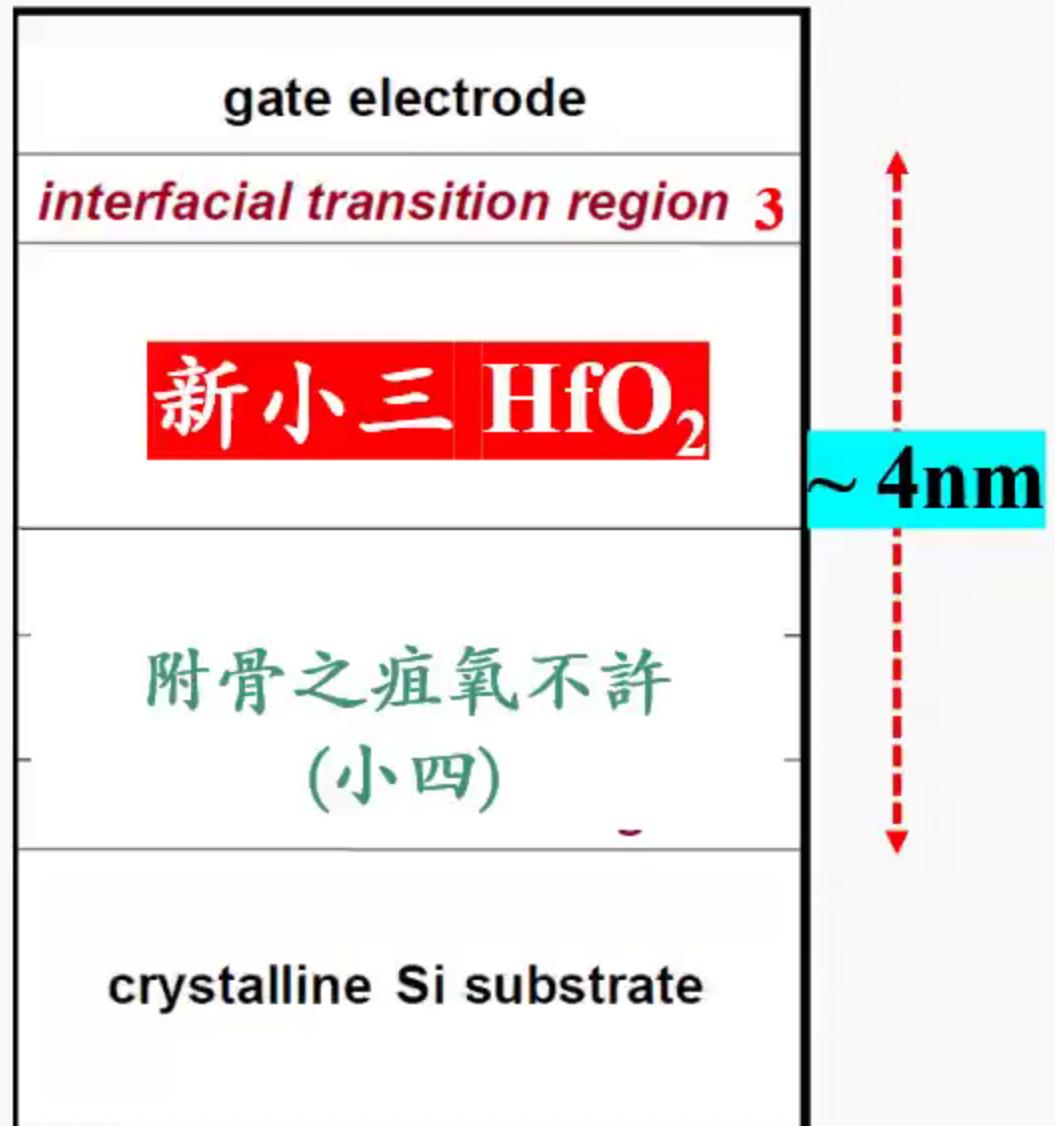


# 為何新小三 $\text{HfO}_2$ 自帶金屬閨密？

源起：原小三( $\text{SiO}_2$ )閨密是(poly-Si)，但人老珠黃，竟有poly-depletion老態(其電子密度 $N_D < 10^{20}/\text{cm}^3$ )

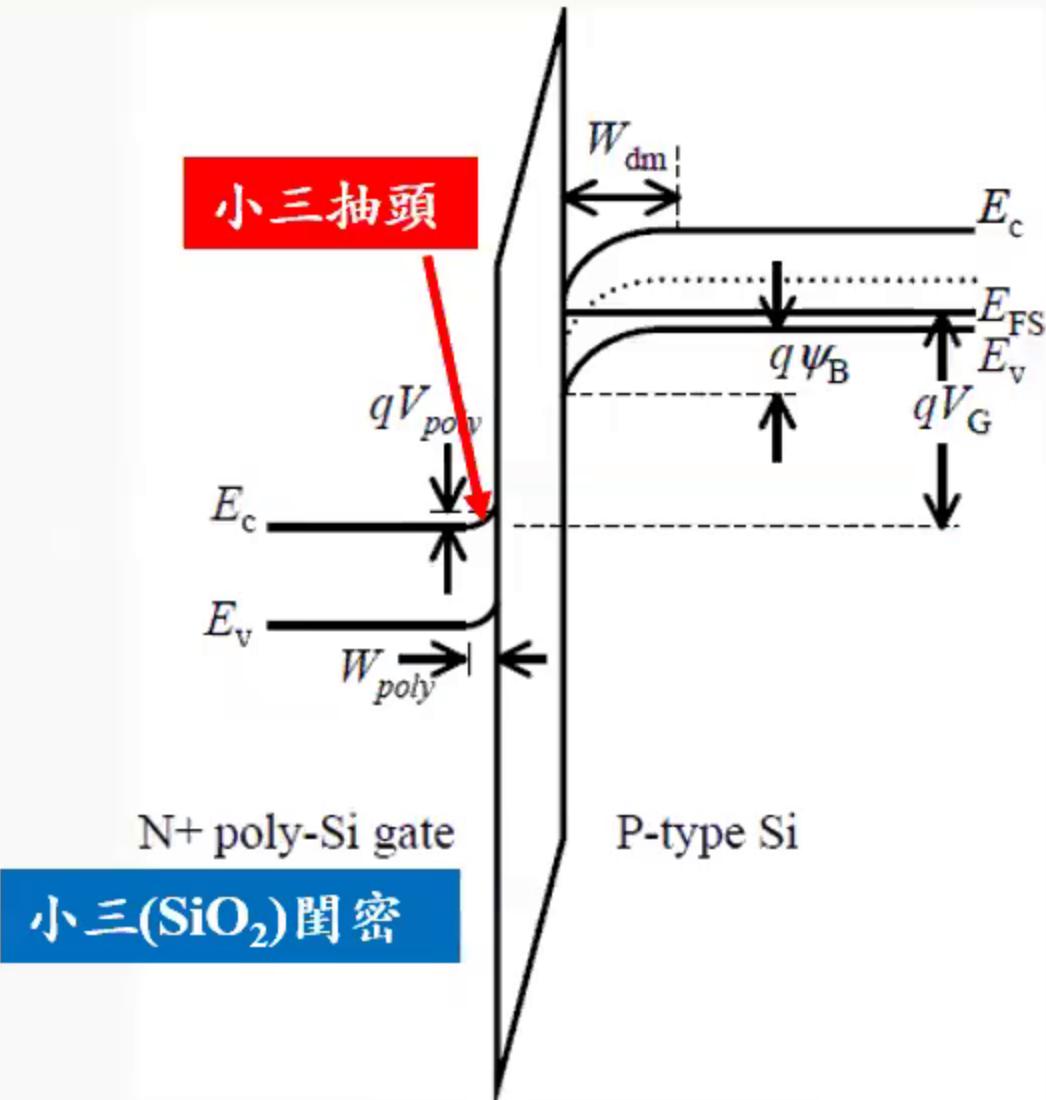
**HKMG:** 新小三  $\text{HfO}_2$  + 閨密 = TiN/TiAlC

- No depletion (因為是金屬，其電子密度超高 $> 10^{22}/\text{cm}^3$ )， no band bending也



# 差播: 什麼叫poly depletion? 抽頭也

- 源起: 原小三( $\text{SiO}_2$ )閨密是(poly-Si), 因為製程很方便(easy poly-Si deposition and doping, 電子密度  $N_D < 10^{20}/\text{cm}^3$  也夠用(band bended))
- 不過此閨密有私心, 外加電壓( $V_{DD} \sim 2\text{V}$ )來訪半導皇后(Si), 竟然一定要收小費抽頭(約 $0.1\text{V}$ ), 結果半導皇后收到的電壓 = ( $V_{DD} - 0.1\text{V}$ )
- 先進製程, 外加電壓( $V_{DD} \sim 0.7\text{V}$ ), 對poly-Si抽頭 $0.1\text{V}$ , 當然受不了, 新小三  $\text{HfO}_2$  提供免抽頭金屬閨密, 當然雀屏中選(no band bending)

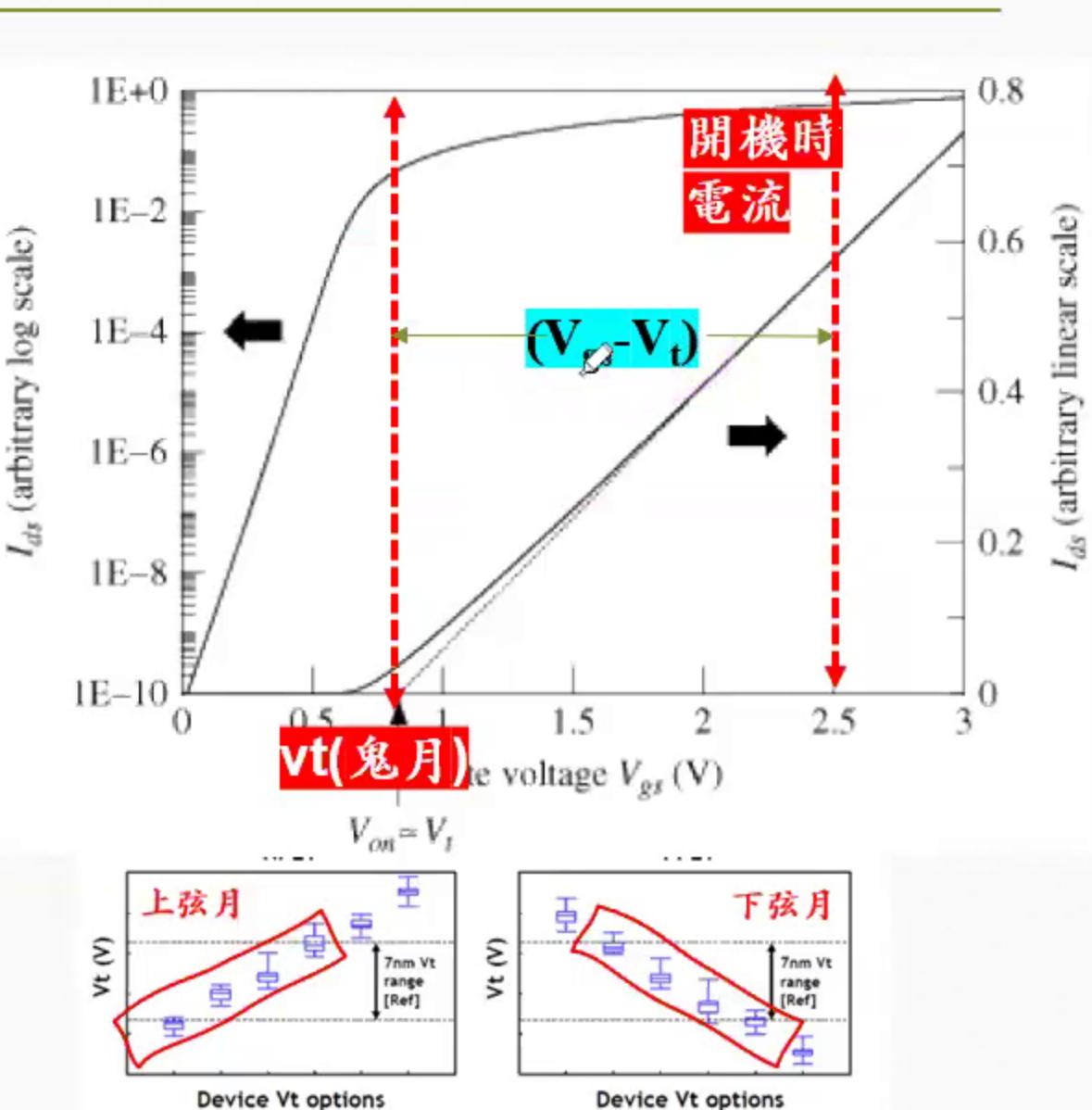


# 為什麼 $V_t$ (鬼月) 那麼重要?

- 當我們打開手機開機使用，螢幕亮了動了，這是因為手機裡頭的電路開始運作，這時候手機電路裡面的電流是

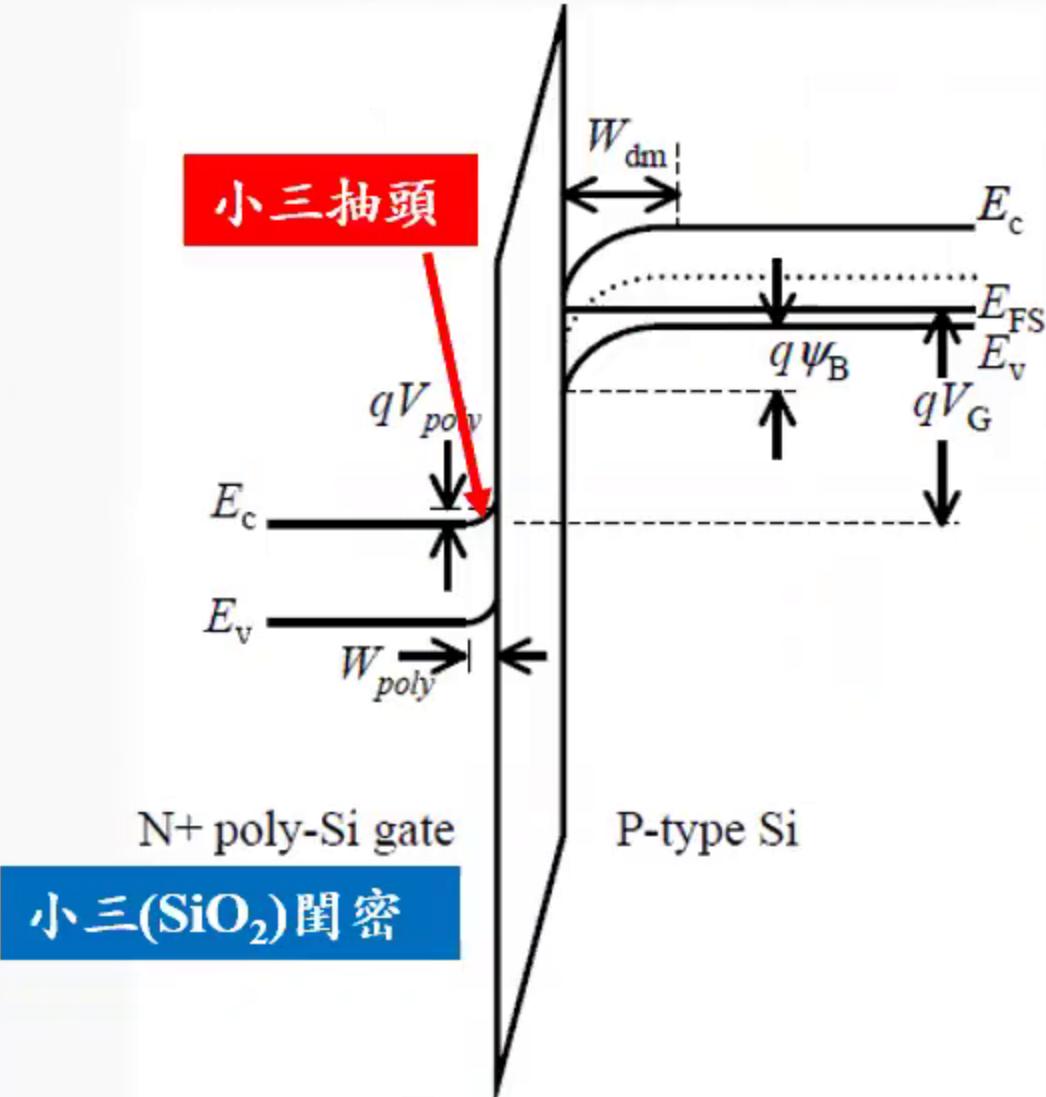
$$I_{ds} = \mu_{eff} C_{ox} \frac{W}{L} \left( (V_{gs} - V_t) V_{ds} - \frac{m}{2} V_{ds}^2 \right),$$

- 以上公式可以看出， $(V_{gs} - V_t)$  = Over drive， $(V_{gs} - V_t)$ 越大，電流當然越大，手機跑得越快，但是電壓( $V_{gs}$ )已固定，且相當小(< 1V)
- 這個意思是說， $V_t$ 越大， $(V_{gs} - V_t)$ 越小，電流自然越小，但電流越大，耗電越兇
- 手機廠商會要求至少**8種大小不同的  $V_t$** (上四鬼月)規格(如右下圖，上下弦月各四個)來控制手機電流( $I_{ds}$ )，目的是要手机用時跑得快，不用時漏電少(还真是麻煩)



# 差播: 什麼叫poly depletion? 抽頭也

- 源起: 原小三( $\text{SiO}_2$ )閨密是(poly-Si), 因為製程很方便(easy poly-Si deposition and doping, 電子密度  $N_D < 10^{20}/\text{cm}^3$  也夠用(band bended))
- 不過此閨密有私心, 外加電壓( $V_{DD} \sim 2\text{V}$ )來訪半導皇后(Si), 竟然一定要收小費抽頭(約 $0.1\text{V}$ ), 結果半導皇后收到的電壓 = ( $V_{DD} - 0.1\text{V}$ )
- 先進製程, 外加電壓( $V_{DD} \sim 0.7\text{V}$ ), 對poly-Si抽頭 $0.1\text{V}$ , 當然受不了, 新小三  $\text{HfO}_2$  提供免抽頭金屬閨密, 當然雀屏中選(no band bending)



# 誰能控制V<sub>t</sub>(鬼月)? 金屬功函數是也

試問：為什麼右圖兩綠區中的金屬群，化學個性上，有巨大的不同？對製程有何影响？

解答：

- 兩綠區中適合nMOSFET的金屬必須有較低的功函數(詳情後續)，記得功函數就是電子紅杏出牆(由金屬表面逃到真空)所需的能量
- 低功函數金屬自然其電子很容易受外界引誘，皆不安於室，易紅杏出牆，特別愛與氧苟合
- 反之，適合pMOSFET的，卻都不愛氧，品格比較高尚，所以人稱貴重金属(noble metals)

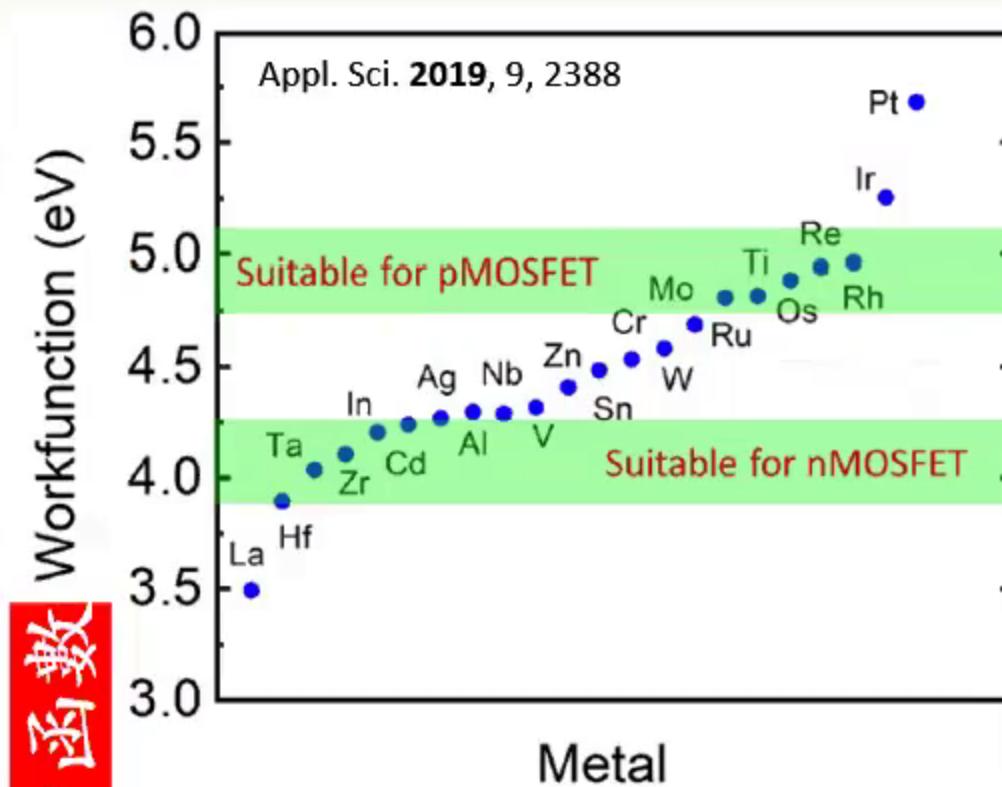
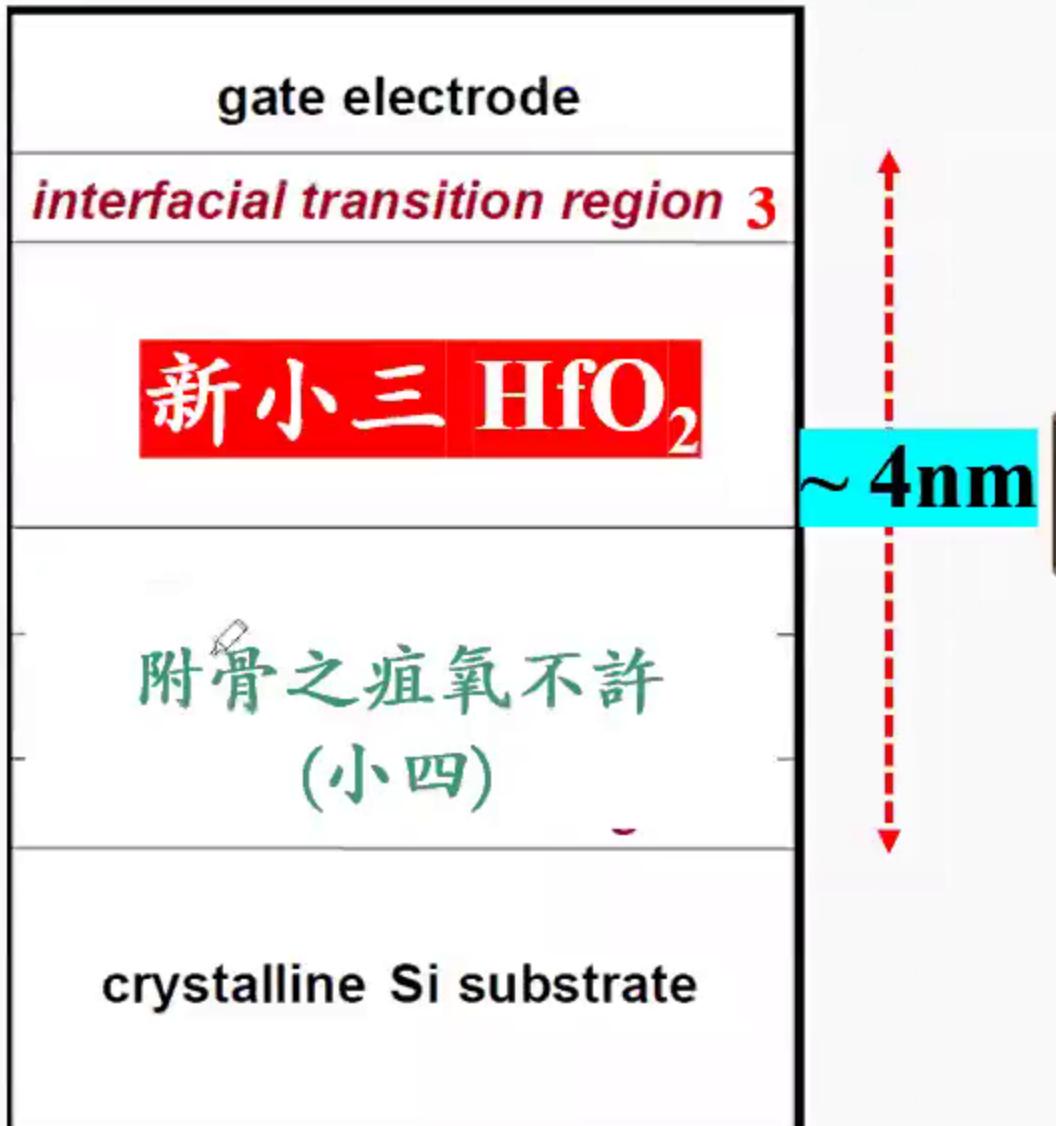


Figure 7. Work function of metals.

# 誰能控制V<sub>t</sub>(鬼月)? 金屬功函數是也

解答：以金屬鋁(Al)為例

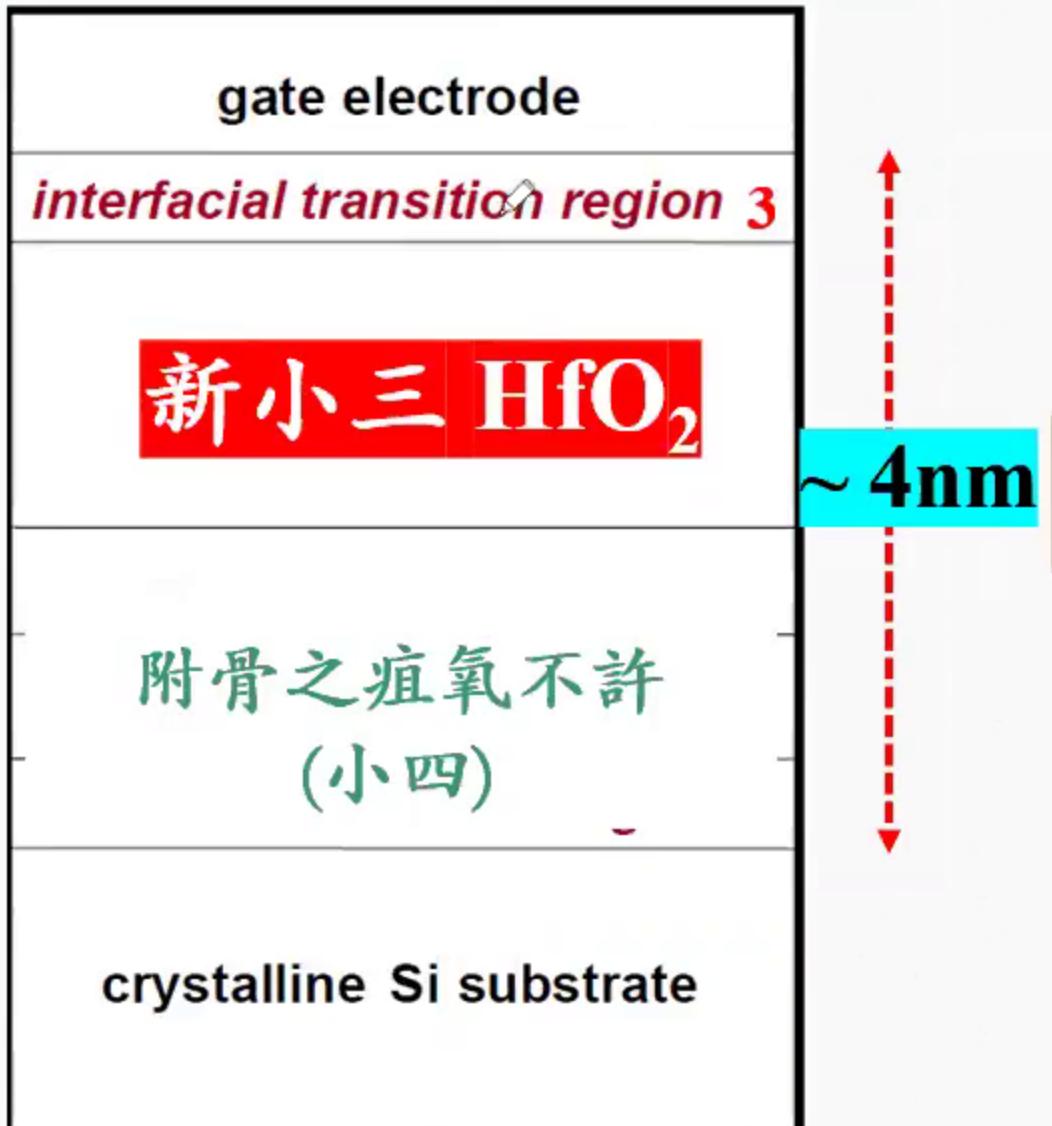
- 鋁(Al)是目前世界又紅又專的n-metal，鋁製程是由英特尔发展出来的，铝的熔点非常的低(660C)，所以很容易受到制程的影响而四處亂竄，令人痛恨的是，他的功函数竟然是“屁股决定脑袋”
- 若他最後停留在介面3，則其功函数低下，乃是隻雞，但若他飛上枝头做凤凰，來到介面2，乖乖不得了，它的功函数竟然大幅提升，属于“貴重金属”級別了
- 但是若他不上不下，跑到新小三HfO<sub>2</sub>裏頭，則会导致芯片漏电量大幅增加



# 誰能控制V<sub>t</sub>(鬼月)? 金屬功函數是也

解答：以金屬鋁(Al)為例

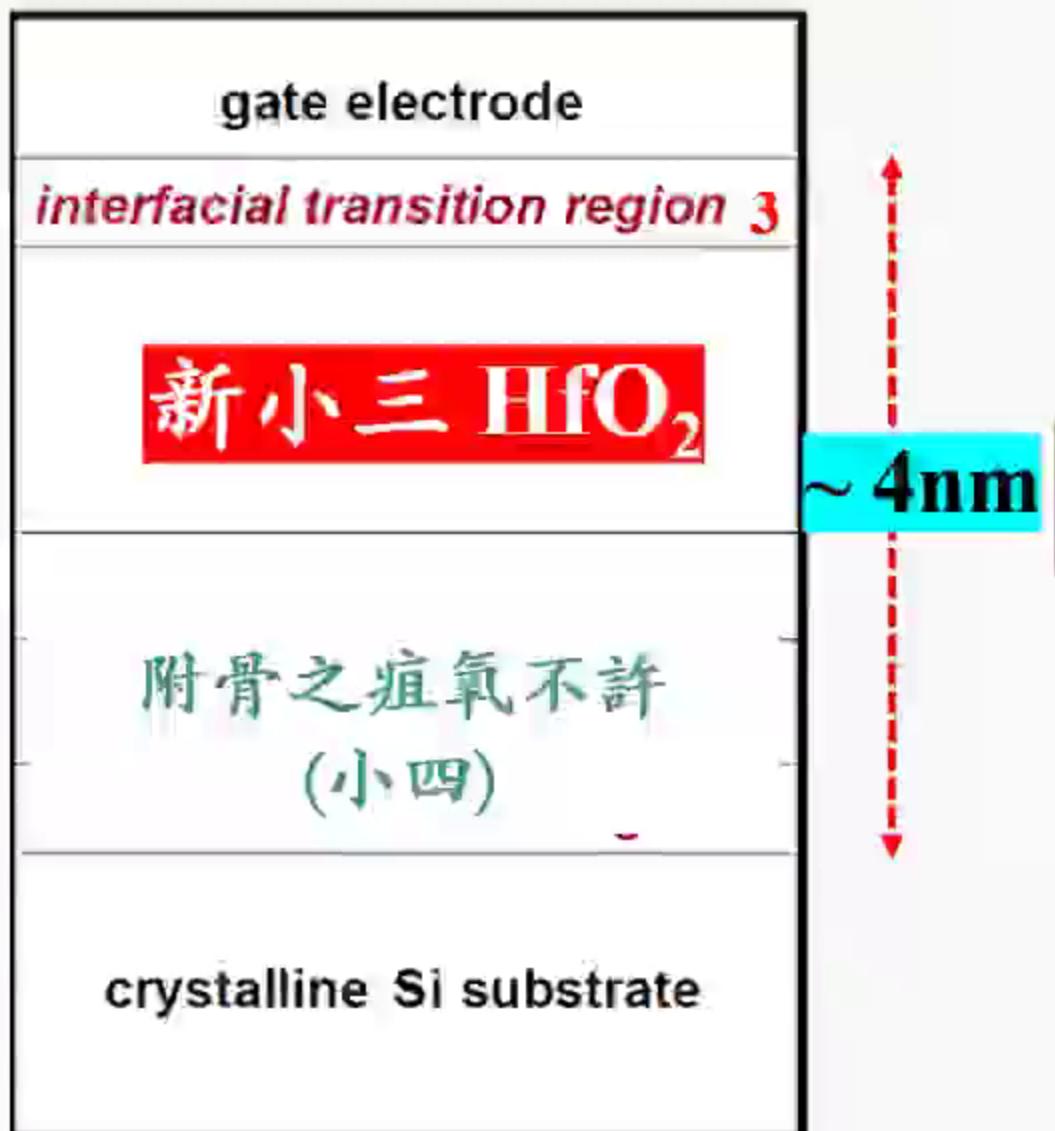
- 鋁(Al)是目前世界又紅又專的n-metal，鋁製程是由英特尔发展出来的，铝的熔点非常的低(660C)，所以很容易受到制程的影响而四處亂竄，令人痛恨的是，他的功函数竟然是“屁股决定脑袋”
- 若他最後停留在介面3，則其功函数低下，乃是隻雞，但若他飛上枝头做凤凰，來到介面2，乖乖不得了，它的功函数竟然大幅提升，属于“貴重金属”級別了
- 但是若他不上不下，跑到新小三HfO<sub>2</sub>裏頭，則会导致芯片漏电量大幅增加



# 誰能控制V<sub>t</sub>(鬼月)? 金屬功函數是也

解答：以金屬鋁(Al)為例

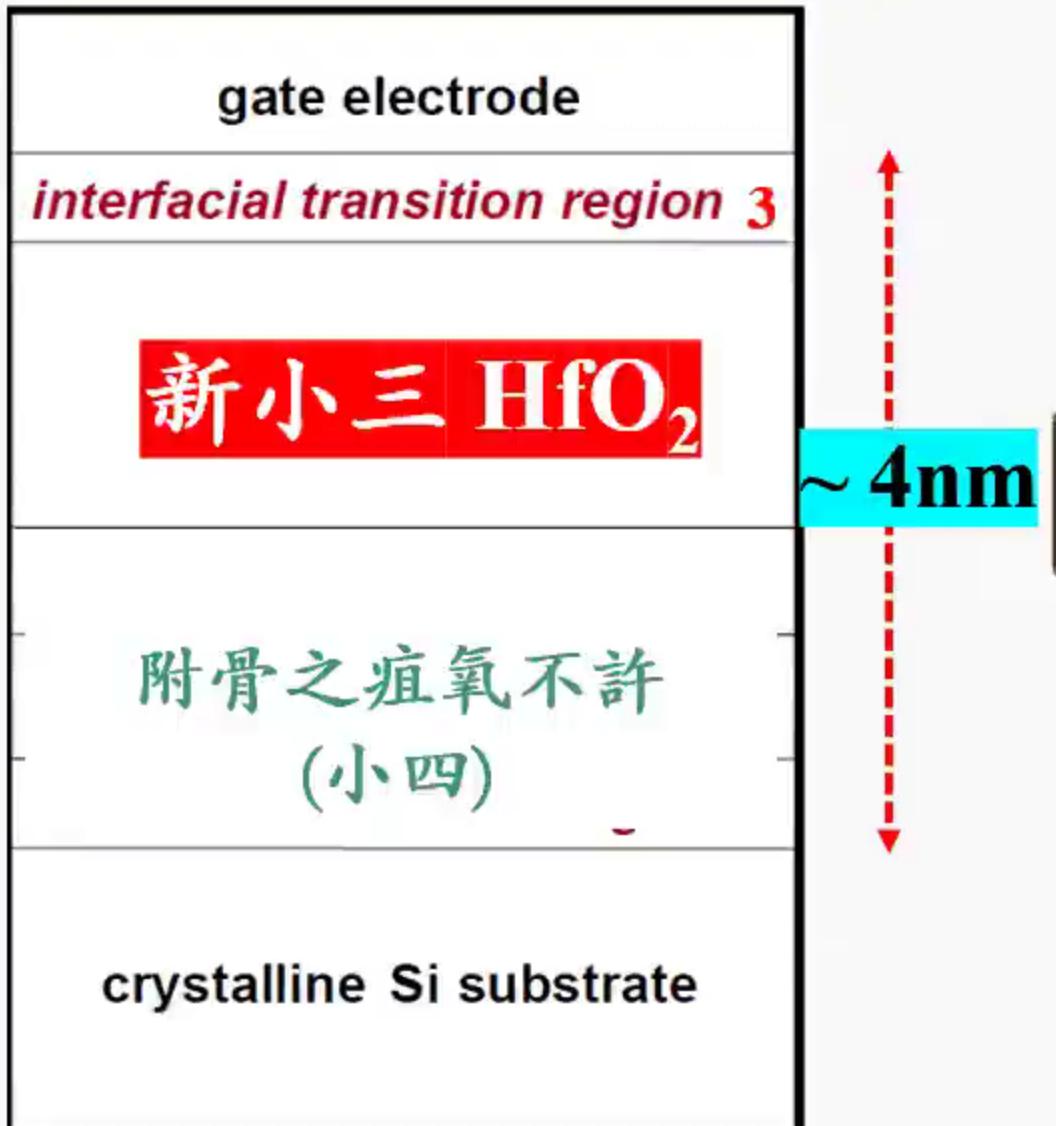
- 鋁(Al)是目前世界又紅又專的n-metal，鋁製程是由英特尔发展出来的，铝的熔点非常的低(660C)，所以很容易受到制程的影响而四處亂竄，令人痛恨的是，他的功函数竟然是“屁股决定脑袋”
- 若他最後停留在介面3，則其功函数低下，乃是隻雞，但若他飛上枝头做凤凰，來到介面2，乖乖不得了，它的功函数竟然大幅提升，属于“貴重金属”級別了
- 但是若他不上不下，跑到新小三HfO<sub>2</sub>裏頭，則会导致芯片漏电量大幅增加



# 誰能控制V<sub>t</sub>(鬼月)? 金屬功函數是也

解答：以金屬鋁(Al)為例

- 鋁(Al)是目前世界又紅又專的n-metal，鋁製程是由英特尔发展出来的，铝的熔点非常的低(660C)，所以很容易受到制程的影响而四處亂竄，令人痛恨的是，他的功函数竟然是“屁股决定脑袋”
- 若他最後停留在介面3，則其功函数低下，乃是隻雞，但若他飛上枝头做凤凰，來到介面2，乖乖不得了，它的功函数竟然大幅提升，属于“貴重金属”級別了
- 但是若他不上不下，跑到新小三HfO<sub>2</sub>裏頭，則会导致芯片漏电量大幅增加



# 誰能控制 $V_t$ (鬼月)? 金屬功函數是也

試問：為什麼右圖兩綠區中的金屬群，化學個性上，有巨大的不同？對製程有何影響？

解答：

- 兩綠區中適合nMOSFET的金屬必須有較低的功函數(詳情後續)，記得功函數就是電子紅杏出牆(由金屬表面逃到真空)所需的能量
- 低功函數金屬自然其電子很容易受外界引誘，皆不安於室，易紅杏出牆，特別愛與氧苟合
- 反之，適合pMOSFET的，卻都不愛氧，品格比較高尚，所以人稱貴重金属(noble metals)

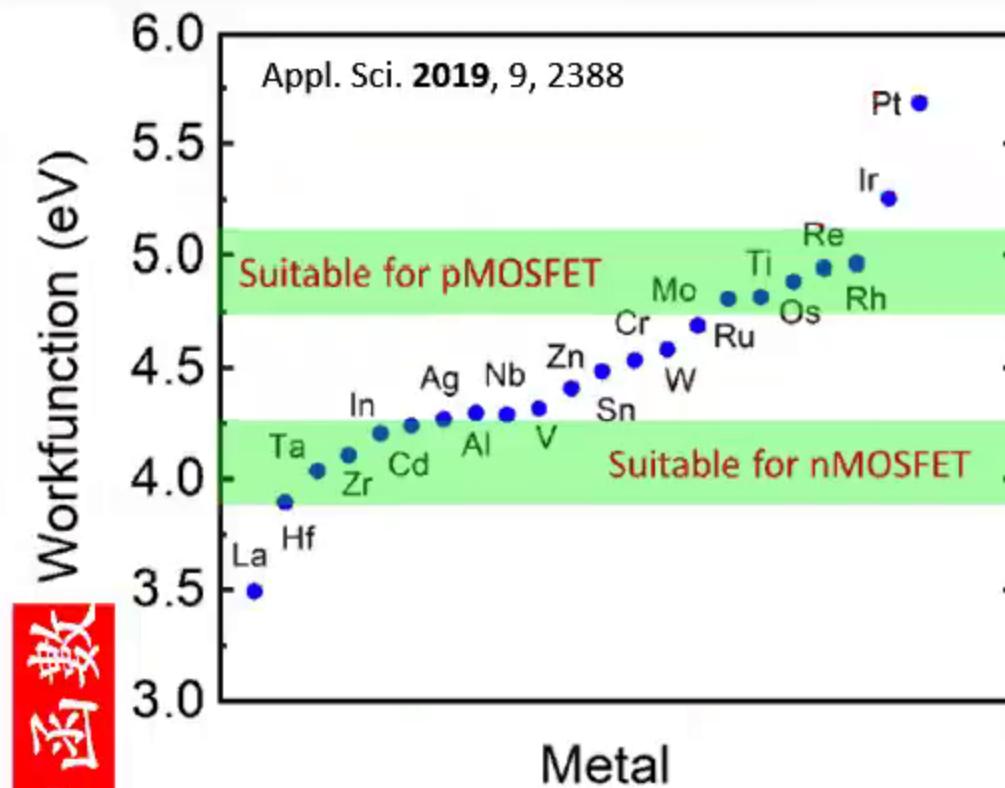


Figure 7. Work function of metals.

# 誰能控制V<sub>t</sub>(鬼月)? 金屬功函數是也

試問：為什麼右圖兩綠區中的金屬群，化學個性上，有巨大的不同？對製程有何影響？

解答：

- 兩綠區中適合nMOSFET的金屬必須有較低的功函數（詳情後續），記得功函數就是電子紅杏出牆（由金屬表面逃到真空）所需的能量
- 低功函數金屬自然其電子很容易受外界引誘，皆不安於室，易紅杏出牆，特別愛與氧苟合
- 反之，適合pMOSFET的，卻都不愛氧，品格比較高尚，所以人稱貴重金属（noble metals）

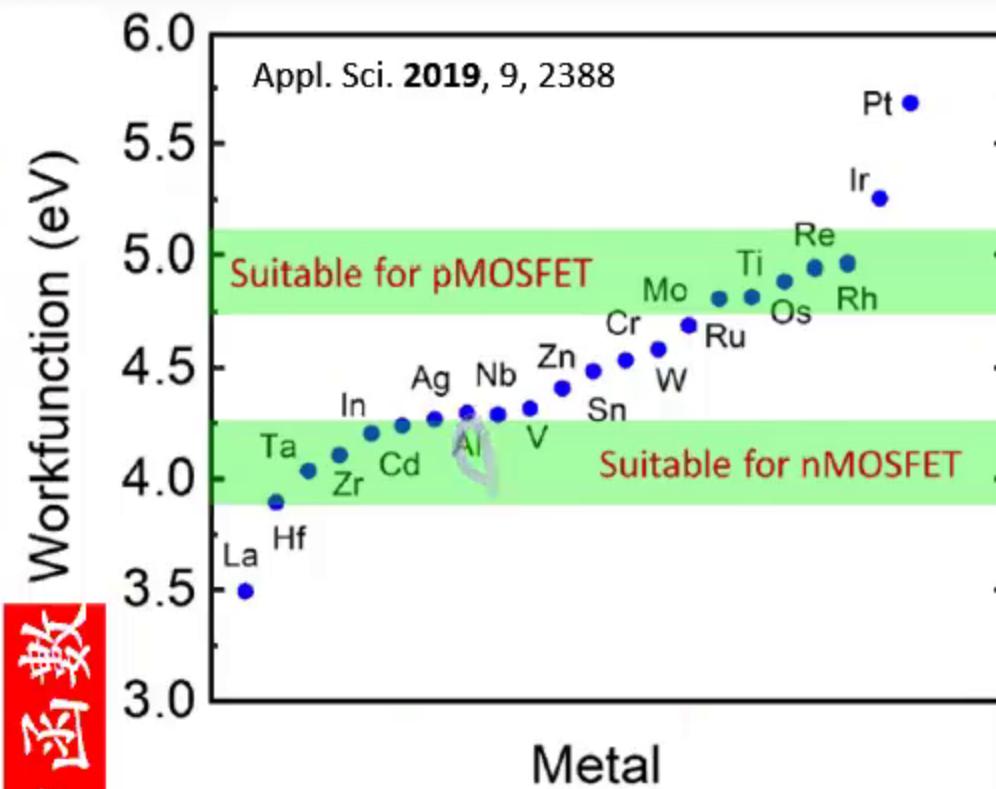


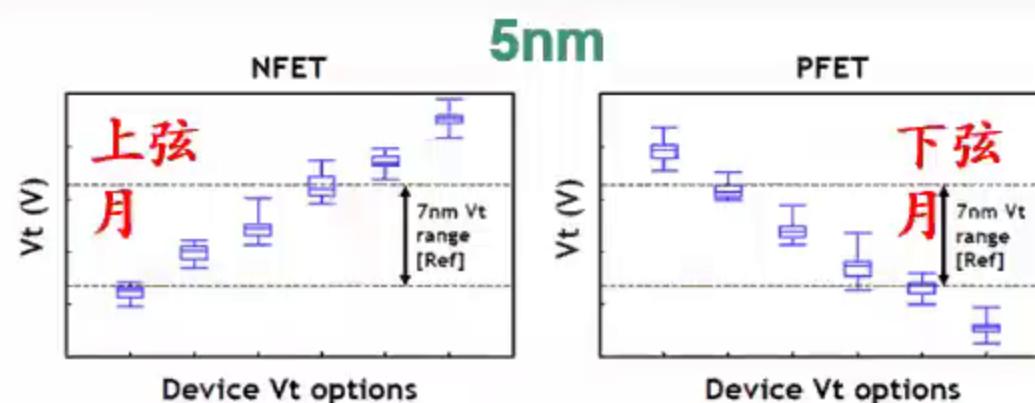
Figure 7. Work function of metals.

# 鬼月上弦和下弦在哪裡？

試問：12種vt制程（也是由上弦和下弦組成，上下弦各六個，見下圖）藏在哪裡？誰負責的金屬閨密為何？

解答：

- 上下弦各六個藏在小四或介面3（見右圖）
  - POR 1 = 介面3 + gate electrode
  - POR 2 = 小四 + gate electrode
- gate electrode = 金屬閨密們 = 同樣的屁股TiAlC + 不同厚度TiN的身體（容後再續）

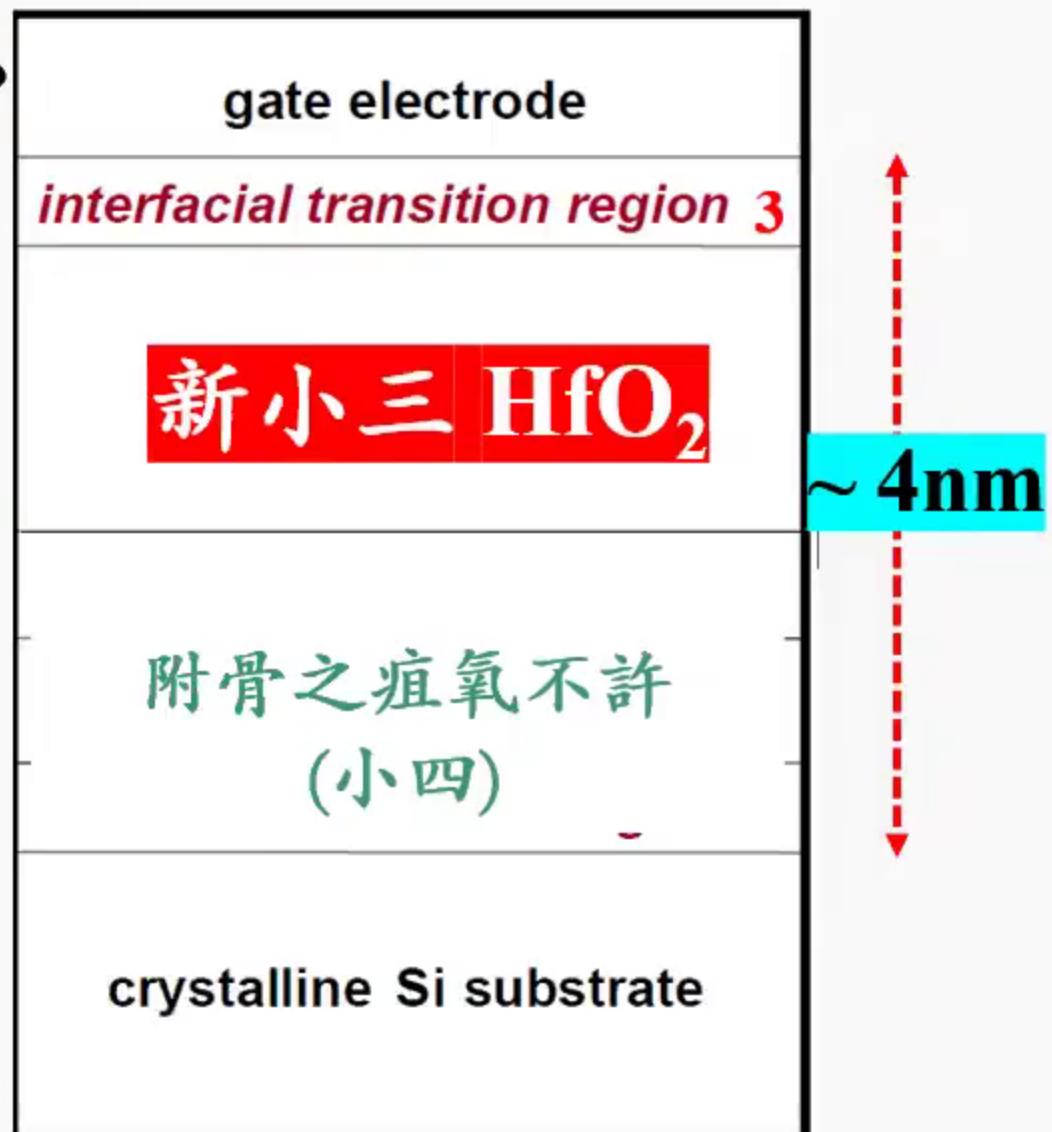
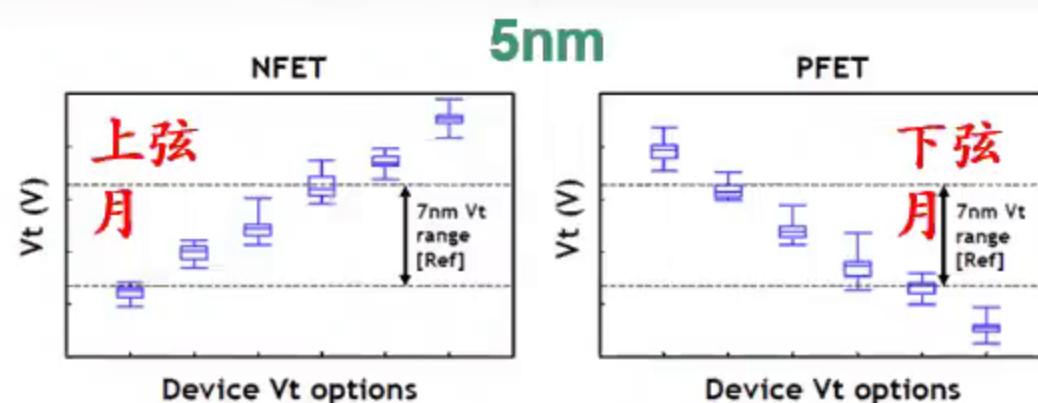


# 鬼月上弦和下弦在哪裡？

試問：12種vt制程（也是由上弦和下弦組成，上下弦各六個，見下圖）藏在哪裡？誰負責的金屬閨密為何？

解答：

- 上下弦各六個藏在小四或介面3（見右圖）
  - POR 1 = 介面3 + gate electrode
  - POR 2 = 小四 + gate electrode
- gate electrode = 金屬閨密們 = 同樣的屁股TiAlC + 不同厚度TiN的身體（容後再續）



# 廠商要求台積電： $\pm$ 四鬼月

解答：右圖是廠商要求台積電8種大小不同的 $V_t$ （鬼月）規格（上下弦月各有對稱的 $\pm$ 四鬼月）

- $(V_{gs} - V_t)$ 越大，則電流越大，當 $V_t = \text{sLVT}$ 的時候，手機跑得最快，當 $V_t = \text{HVT}$ 的時候，關機電漏的最少

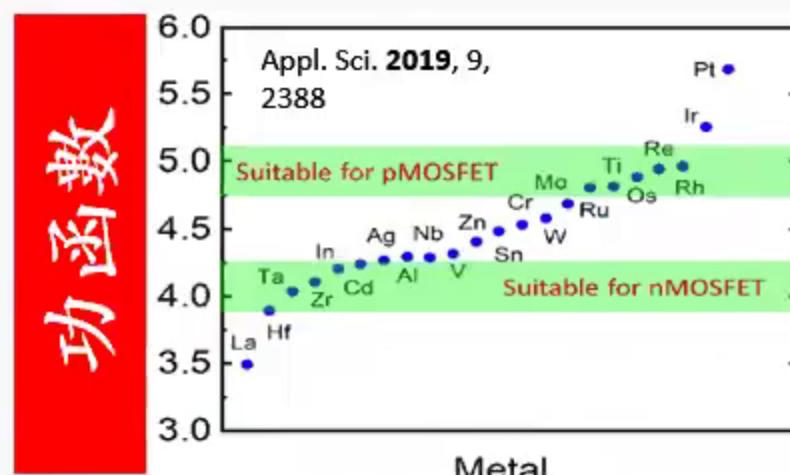
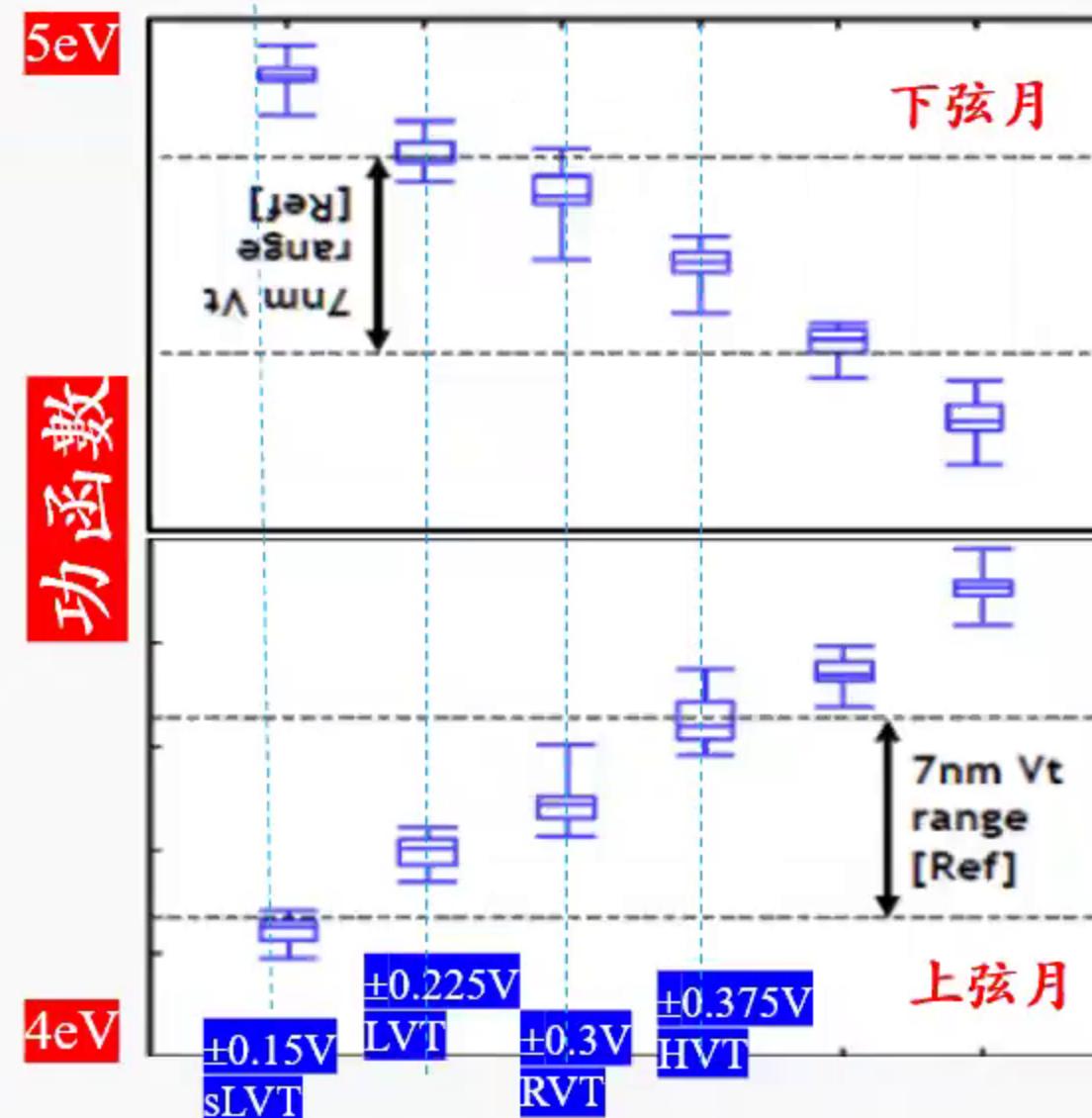


Figure 7. Work function of metals.

10/23/2021

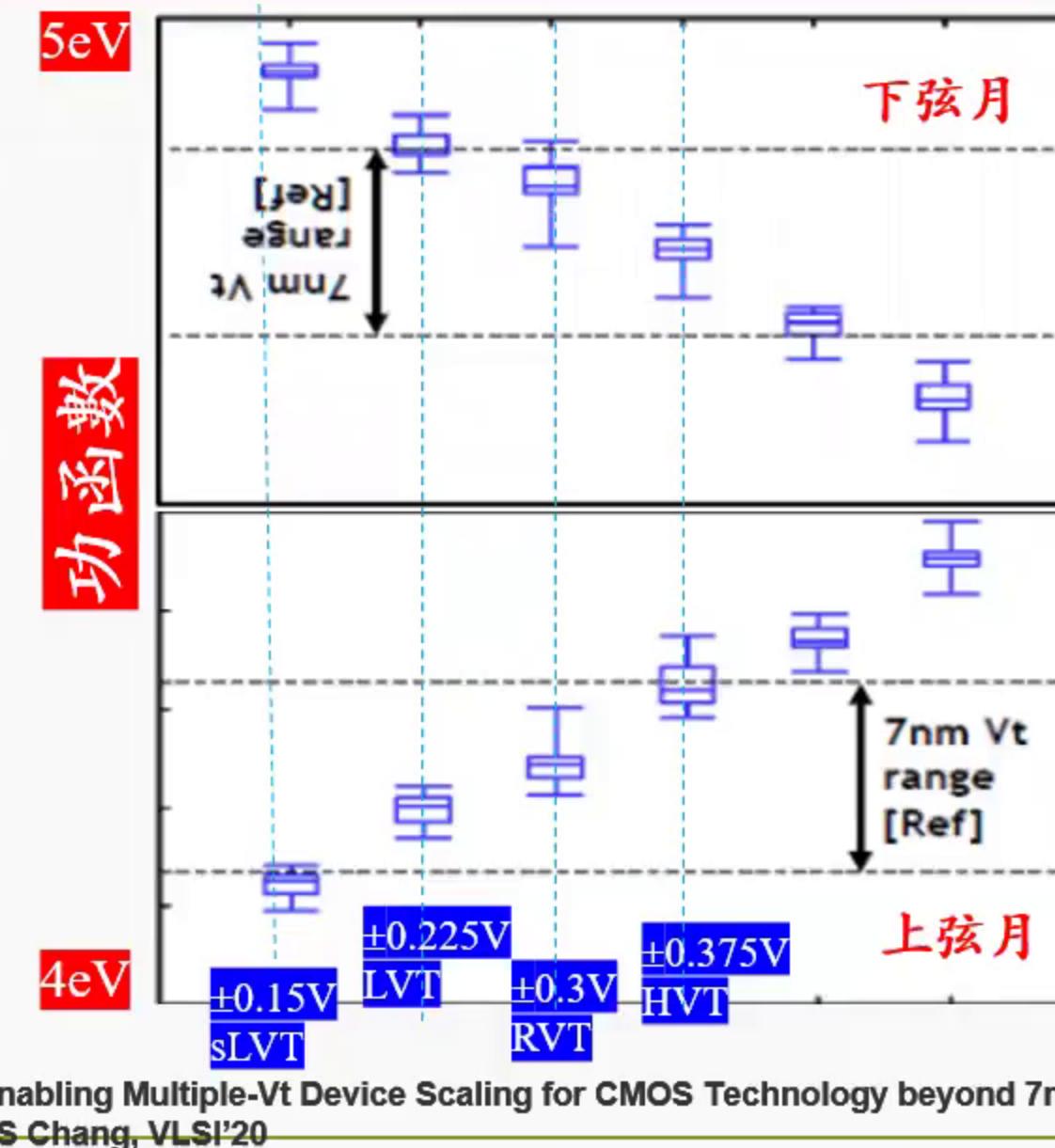
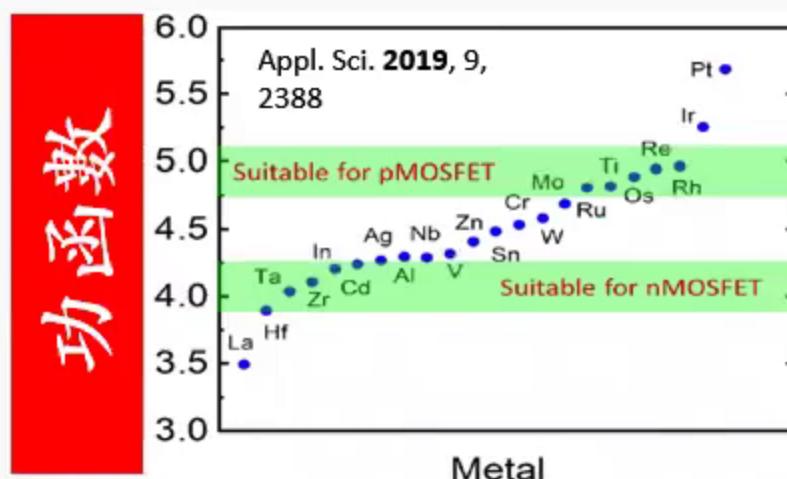


Enabling Multiple-Vt Device Scaling for CMOS Technology beyond 7nm Node  
VS Chang, VLSI'20

# 廠商要求台积电： $\pm$ 四鬼月

解答：右圖是廠商要求台积电8種大小不同的 $V_t$ （鬼月）規格（上下弦月各有對稱的 $\pm$ 四鬼月）

- $(V_{gs} - V_t)$ 越大，則電流越大，當 $V_t = \text{sLVT}$ 的時候，手機跑得最快，當 $V_t = \text{HVT}$ 的時候，關機電漏的最少

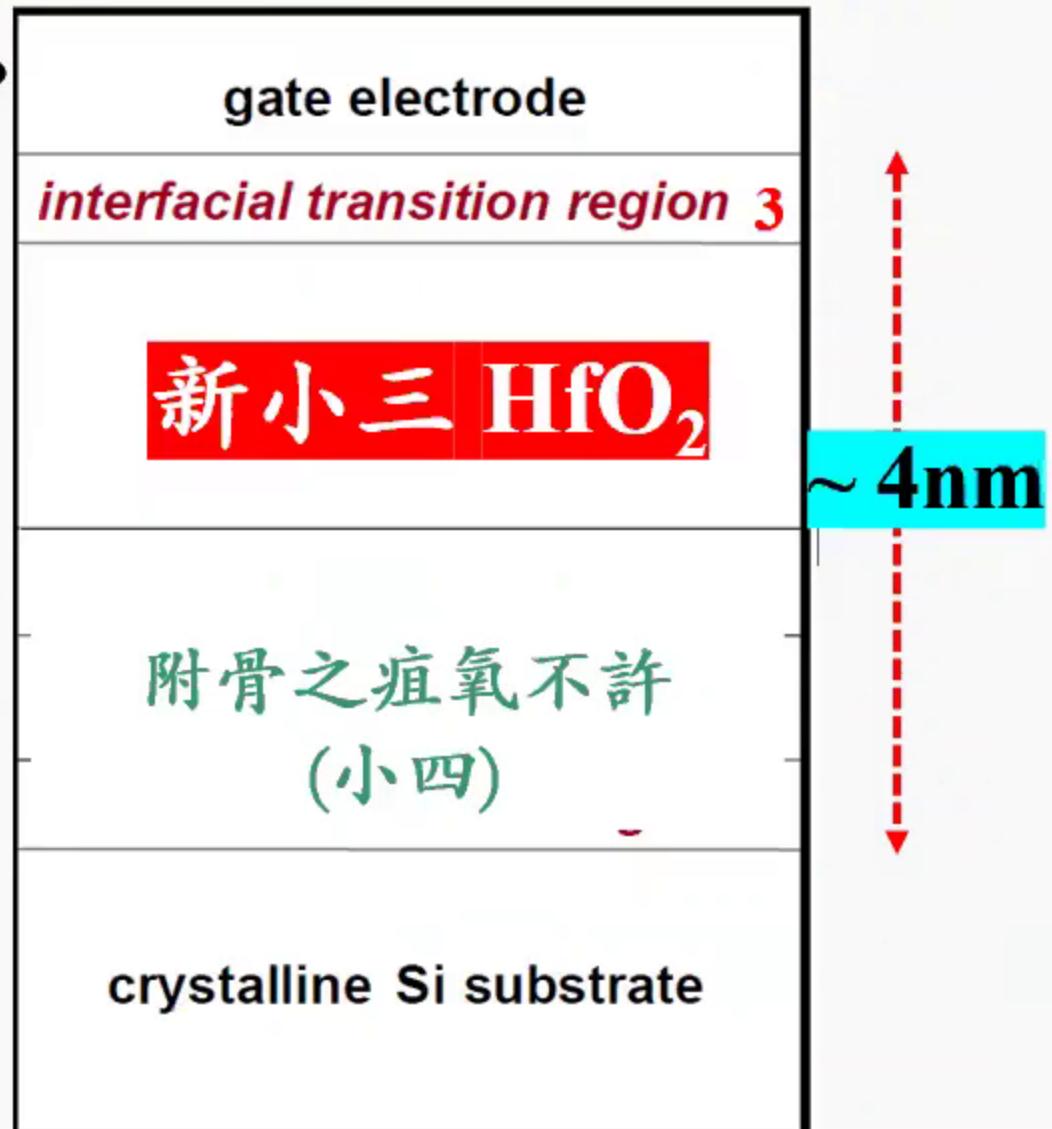
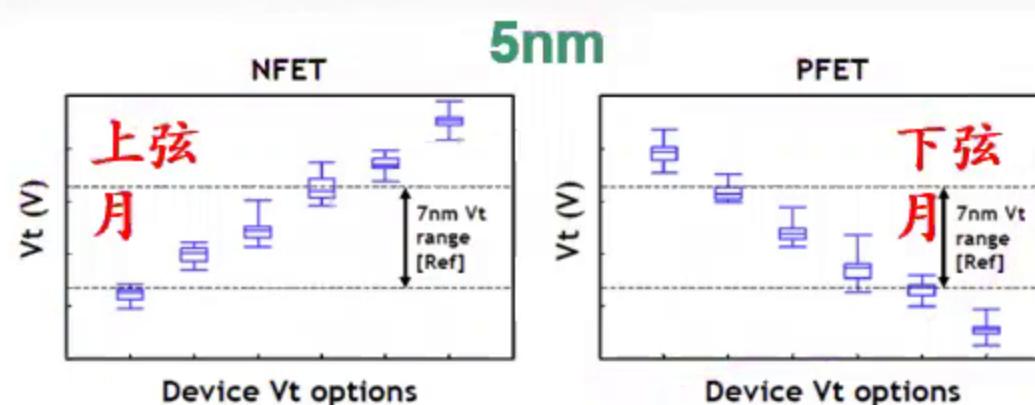


# 鬼月上弦和下弦在哪裡？

試問：12種vt制程（也是由上弦和下弦組成，上下弦各六個，見下圖）藏在哪裡？誰負責的金屬閨密為何？

解答：

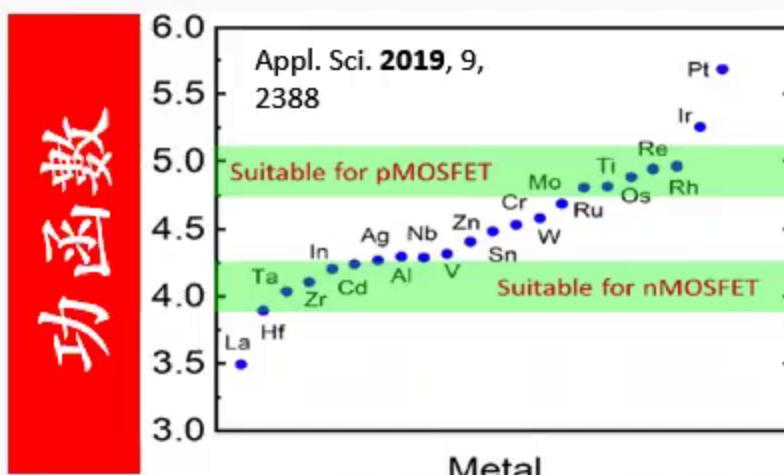
- 上下弦各六個藏在小四或介面3（見右圖）
  - POR 1 = 介面3 + gate electrode
  - POR 2 = 小四 + gate electrode
- gate electrode = 金屬閨密們 = 同樣的屁股TiAlC + 不同厚度TiN的身體（容後再續）



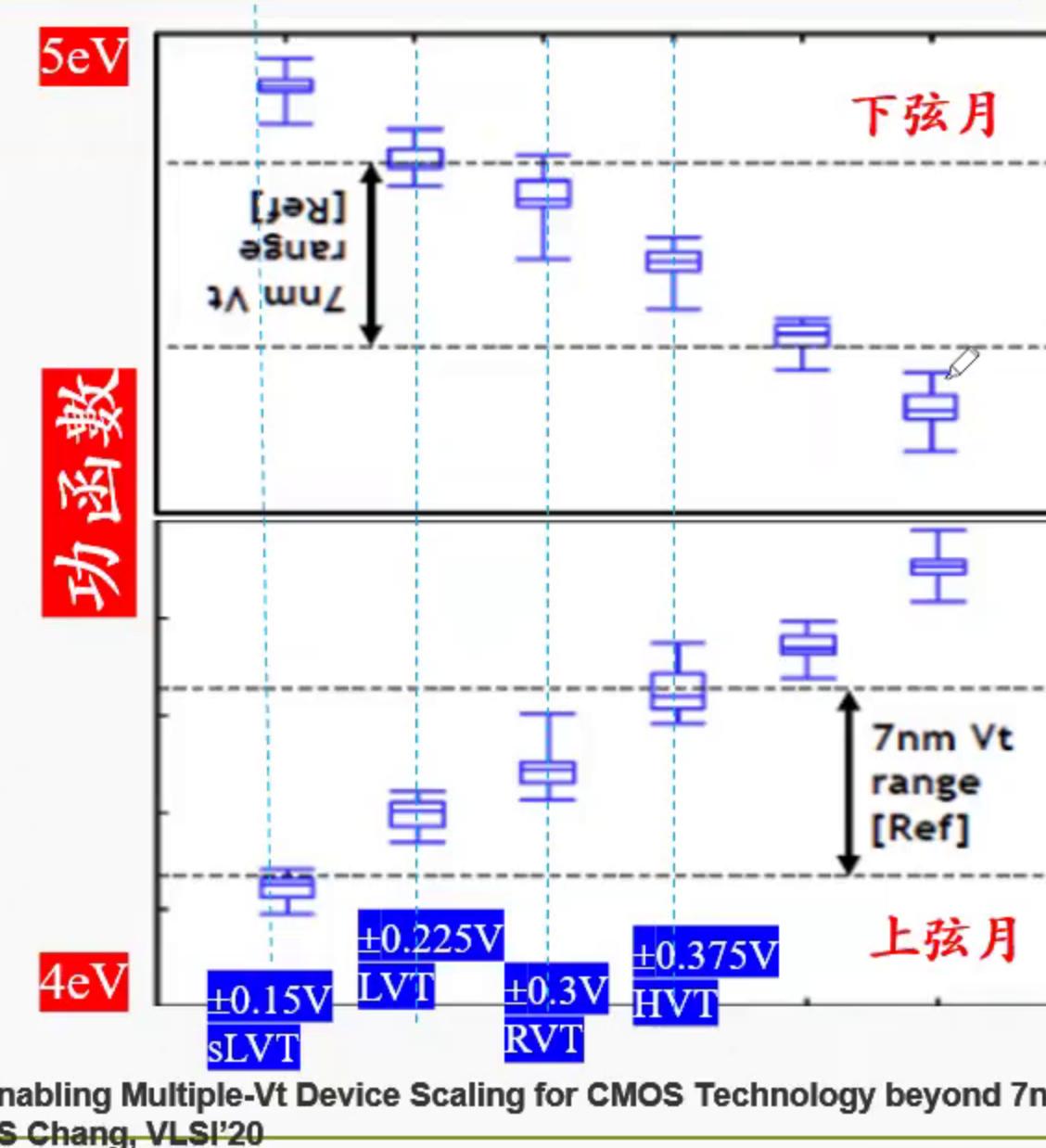
# 廠商要求台积电： $\pm$ 四鬼月

解答：右圖是廠商要求台积电8種大小不同的 $V_t$ （鬼月）規格（上下弦月各有對稱的 $\pm$ 四鬼月）

- $(V_{gs} - V_t)$ 越大，則電流越大，當 $V_t = \text{sLVT}$ 的時候，手機跑得最快，當 $V_t = \text{HVT}$ 的時候，關機電漏的最少



10/23/2021



# 廠商要求台积电：±四鬼月

試問：右圖精義解說

- 为什么將下弦倒挂金钩和上弦疊在一起？
- 為什麼有±四鬼月: sLVT, LVT, RVT, HVT?

解答：

- 先卖个关子，下集待续

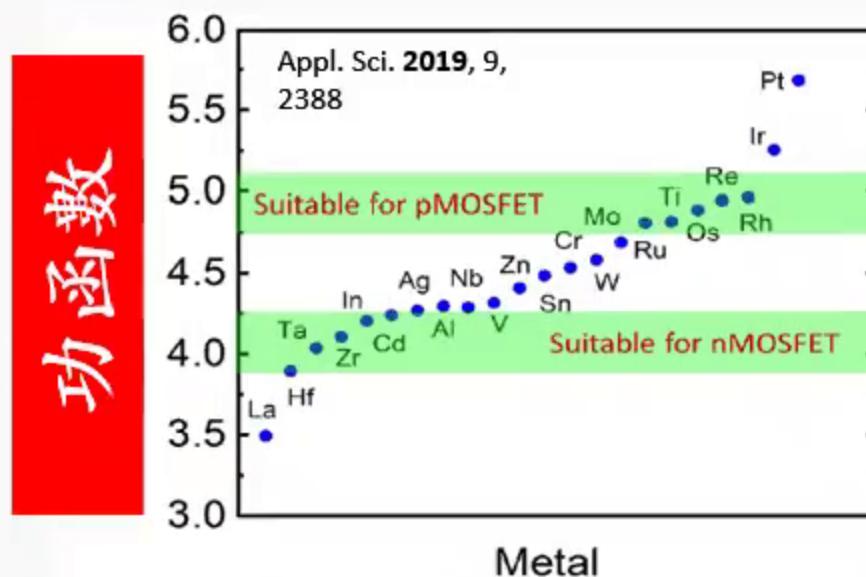


Figure 7. Work function of metals.

