

納米武林基本功

-**土**四鬼月系列之七

mVt vs TiAlC

王不老說半导

納米武林基本功

-~~±~~四鬼月系列之七

mVt vs TiAlC

王不老說半导

10/31/2021

1

鋁製高跟鞋

- 轻软的铝，熔点660.4C，有良好的导电导热性，而远轻于铜
- 铝容易与空气中氧反应，生成致密保护性的氧化铝 Al_2O_3 （此过程为钝化）
- 尽管铝在环境中广泛存在，但没有一种已知生命形式需要铝元素，而且吃多了，可能会得老年痴呆
- **1827**年弗里德里希·维勒用金属钾还原熔融的无水氯化铝，得到较纯的金属铝。由于取之不易，当时铝的价格竟然高于黄金
- 传说法国太阳王路易14不僅发明了高跟鞋，還规定不是他的宠臣，不准穿



後世有人用金属铝製出高跟鞋，引導世界服裝新潮流

石破天驚：英特尔鋁製程

- 2007，英特尔石破天驚宣布HKMG 製程，大家跌破眼鏡的新材料，除了HK(HfO_2)之外，就是MG(门极金属)裡面竟然含鋁
 - 右圖應是美商應用材料的4nm nWF 即含鋁 (= TiAlN or TiAlC)
 - 鋁熔点低(660.4C)，芯片製程，隨隨便便就是五六百度C，甚至更高，有鋁在內，鋁原子岂不是四处亂窜
 - 为了避免这种状况发生，HK製程必須改變

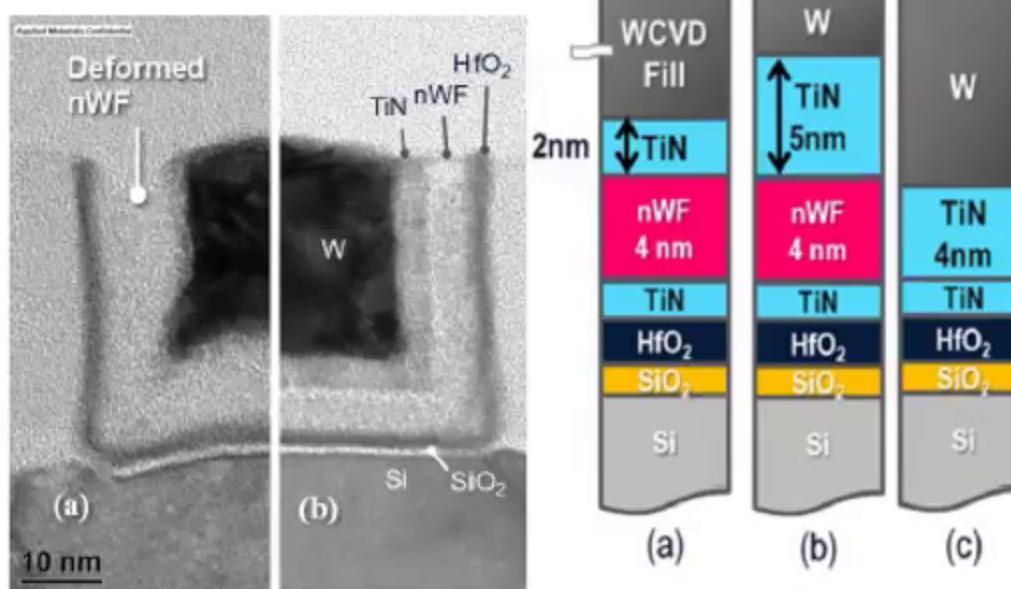


Fig. 8. Cross-sectional TEM (x-TEM) of MOSFET gate with (a) 2 nm, (b) 5 nm barrier TiN and schematics of the film stacks. No TEM image shown with the sample (c).

IEDM'17, N. Yoshida et al.

石破天驚：英特尔鋁製程

- 2007，英特尔石破天驚宣布HKMG 製程，大家跌破眼鏡的新材料，除了HK(HfO_2)之外，就是MG(门极金属)裡面竟然含鋁
 - 右图應是美商應用材料的4nm nWF 即含鋁 (= TiAlN or TiAlC)
 - 鋁熔点低(660.4C)，芯片製程，隨隨便便就是五六百度C，甚至更高，有鋁在內，鋁原子岂不是四处乱窜
 - 为了避免这种状况发生，HK製程必須改變

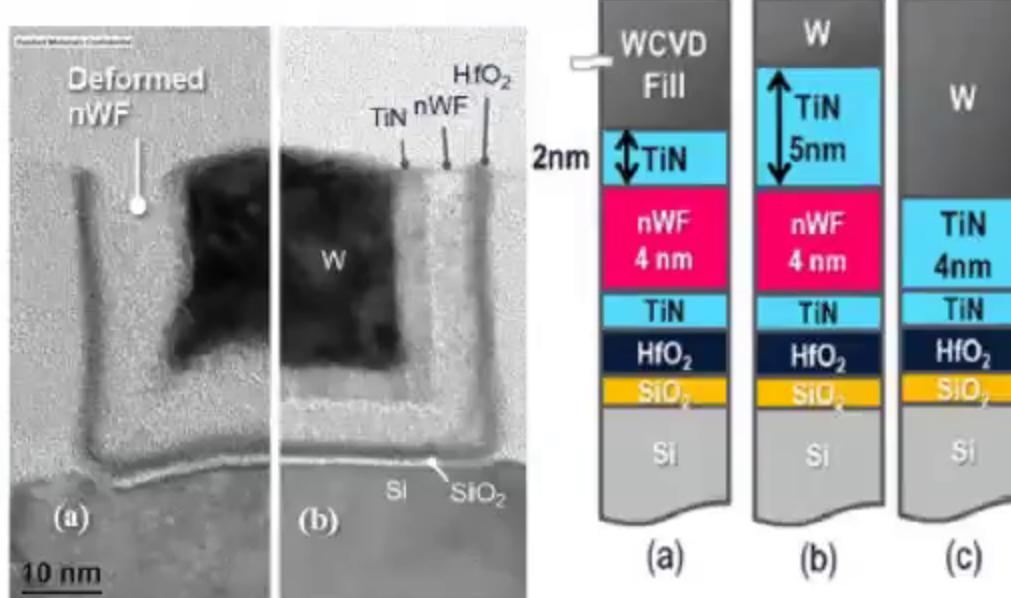
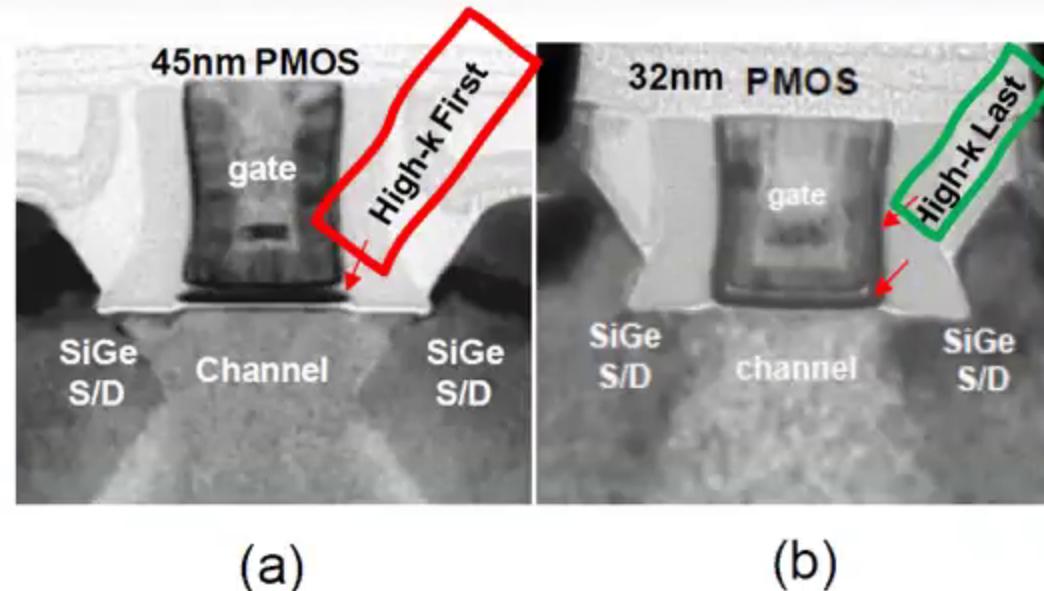


Fig. 8. Cross-sectional TEM (x-TEM) of MOSFET gate with (a) 2 nm, (b) 5 nm barrier TiN and schematics of the film stacks. No TEM image shown with the sample (c).

IEDM'17, N. Yoshida et al.

IBM大戰英特尔

- IBM不甘示弱，也发展HKMG製程與英特尔對抗，IBM認為他的工藝(HK-First)比較簡單，而英特尔的(HK-Last)因為引進了鋁，制程，有溫度限制問題，必須改變HK制程的顺序，實在有些太複雜(成本也大幅增加)
 - 当时台积电跟三星也都偷了懒，随着IBM起舞，但是最后全部都放弃了，因为IBM的制程良率實在太低，最后全部都乖乖地采用了英特尔的制程，IBM壹敗涂地
- IBM失敗後，退出PC制造产业。在2014年，他甚至倒贴15億美金，把自己最后一个半导体工厂，當做燙手山芋，白送還加錢送給了GF(後來竟然轉手以四億賣給他人)。



The past, present and future of high-k/metal gates

青出于蓝:台积电鋁製程

已知:鋁熔点低, 鋁原子四处乱窜

試問: 何等铝合金可以解决此问题?

解答: TiAlN or TiAlC

- 必须稳定(熔点要高)
- 必须是低功函数(low eWF), TiN 是高功函数, 二者搭配, TiAlC 合金符合以上要求註:TiAlC是英特尔的专利(US6689675)
- 但台积电青出于蓝打败英特尔, 以7納米称雄世界(铝成功优化也是主因之一)

<https://semiwiki.com/semiconductor-services/ic-knowledge/7259-iedm-2017-controlling-threshold-voltage-with-work-function-metals/>

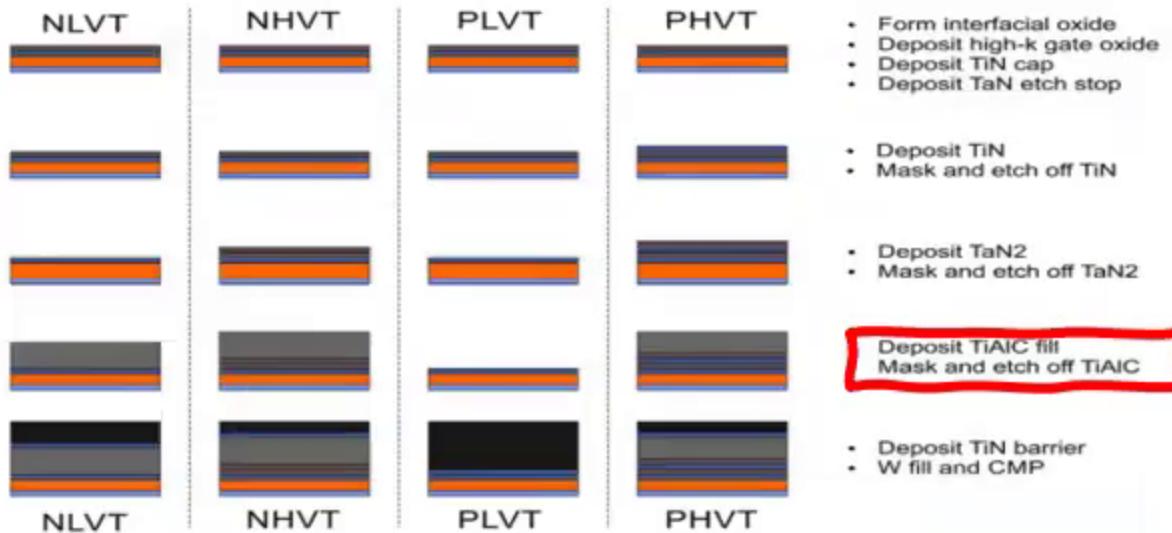


Figure 4. Four work function metals.

This process flow was developed after examining cross sections of 10nm TSMC process provided by TechInsights.

Material	Specific Heat at 298 K (J/mole·K)	Thermal Conductivity at 20°C (W/m·K)	Thermal Expansion at 20°C ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Tm	eWF(eV)
TiC	33.8	21.0	7.4	3160C	3.8-4.1
TiN	33.74	19.2	9.3	2947C	4.5-5

青出于蓝:台积电鋁製程

已知:鋁熔点低, 鋁原子四处乱窜

試問:何等铝合金可以解决此问题?

解答: TiAlN or TiAlC

- 必须稳定(熔点要高)
- 必须是低功函数(low eWF), TiN是高功函数, 二者搭配, TiAlC合金符合以上要求註:TiAlC是英特尔的专利(US6689675)
- 但台积电青出于蓝打败英特尔, 以7納米称雄世界(铝成功优化也是主因之一)

<https://semiwiki.com/semiconductor-services/ic-knowledge/7259-edm-2017-controlling-threshold-voltage-with-work-function-metals/>

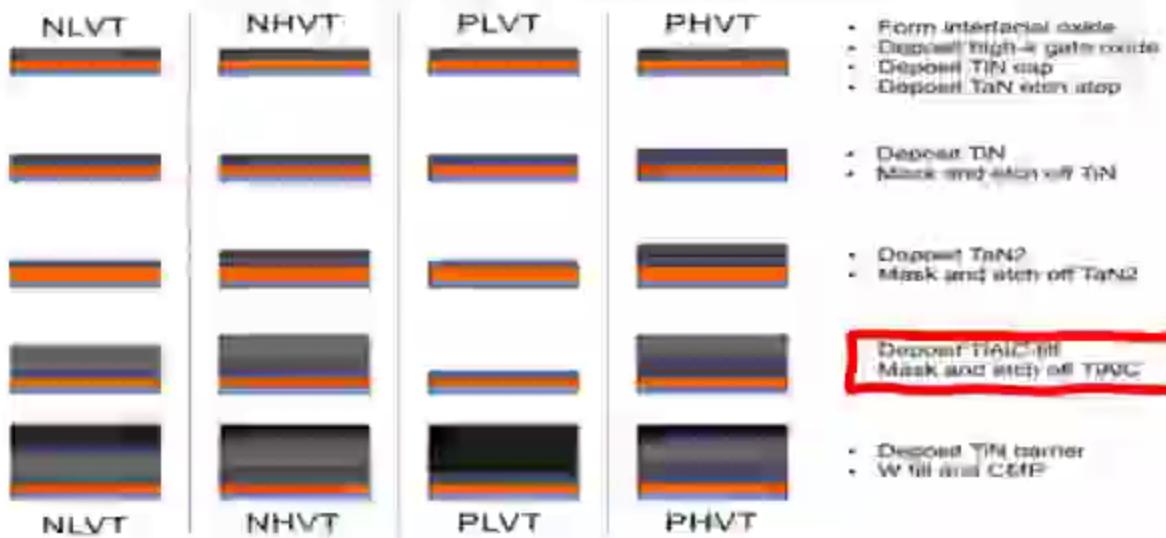


Figure 4. Four work function metals.

This process flow was developed after examining cross sections of 10nm TSMC process provided by TechInsights.

Material	Specific Heat at 298 K (J/mole/K)	Thermal Conductivity at 20°C (W/mK)	Thermal Expansion at 20°C ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	T _m	eWF(eV)
TiC	33.8	21.0	7.4	3160C	3.8-4.1
TiN	33.74	19.2	9.3	2947C	4.5-5

青出于蓝:台积电鋁製程

已知:鋁熔点低, 鋁原子四处乱窜

試問: 何等铝合金可以解决此问题?

解答: TiAlN or TiAlC

- 必须稳定(熔点要高)
- 必须是低功函数(low eWF), TiN 是高功函数, 二者搭配, TiAlC 合金符合以上要求註:TiAlC是英特尔的专利(US6689675)
- 但台积电青出于蓝打败英特尔, 以7納米称雄世界(铝成功优化也是主因之一)

<https://semiwiki.com/semiconductor-services/ic-knowledge/7259-iedm-2017-controlling-threshold-voltage-with-work-function-metals/>

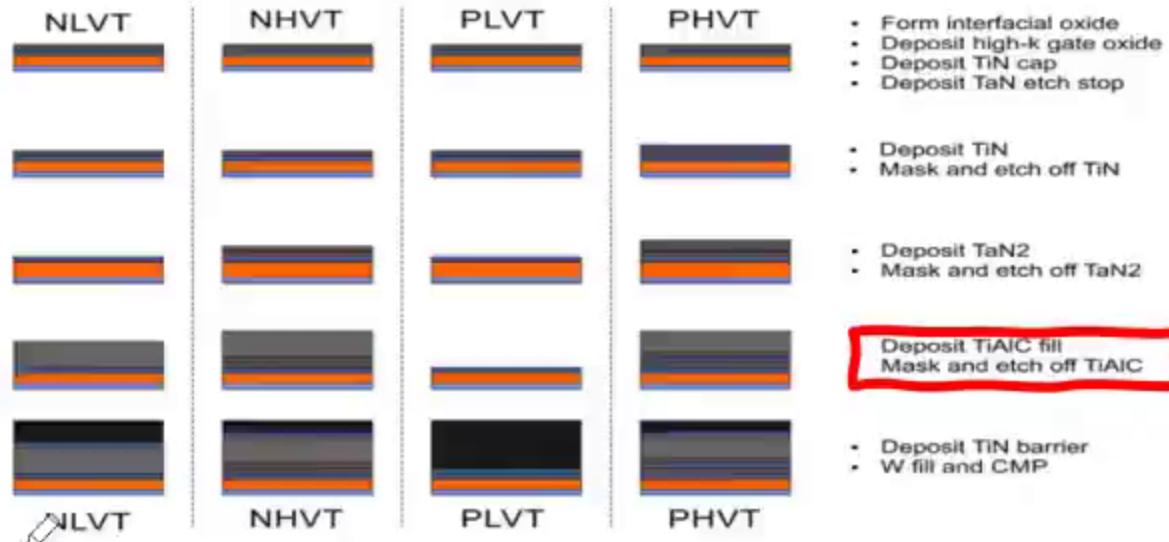


Figure 4. Four work function metals.

This process flow was developed after examining cross sections of 10nm TSMC process provided by TechInsights.

Material	Specific Heat at 298 K (J/mole·K)	Thermal Conductivity at 20°C (W/m·K)	Thermal Expansion at 20°C ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Tm	eWF(eV)
TiC	33.8	21.0	7.4	3160C	3.8-4.1
TiN	33.74	19.2	9.3	2947C	4.5-5

Handbook of Refractory Carbides and Nitrides

回味:顧客7納米的要求:土四鬼月

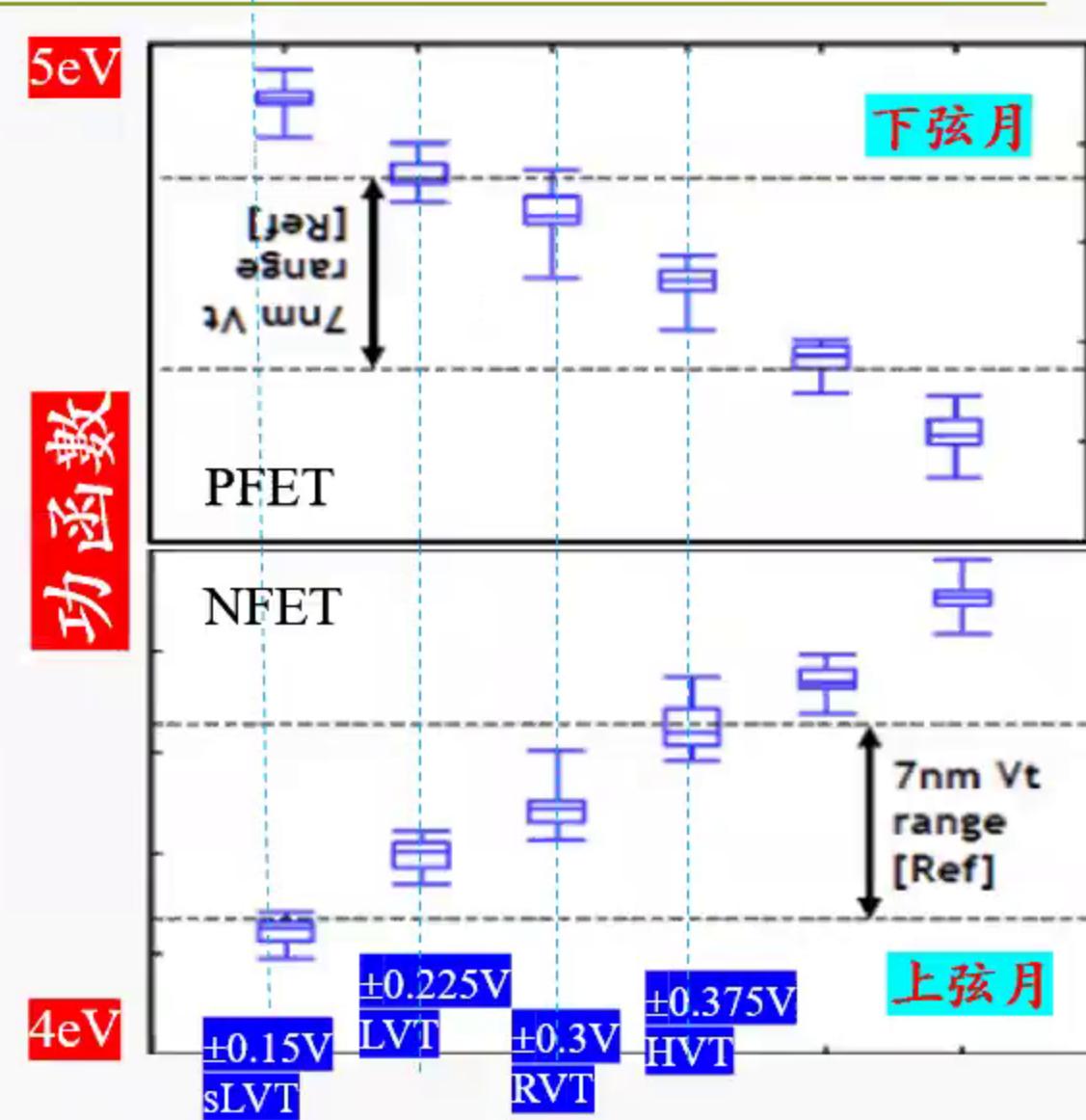
試問:為何要有土四鬼月: sLVT, LVT, RVT and HVT?

5eV

解答: 这其实是顧客因應手機使用所生之要求

- **sLVT:** super low V_t , 提供手機最大電流, 所以當你一直在快速網搜之時, 手機知道你所需急切, 會自動启动此模式(但漏电量也最大, 手機突然更熱)
- **LVT/RVT:** low and regular V_t , 提供手機大即一般電流, 所以當你普通網搜之時, 自动启动之模式
- **HVT:** high V_t , 一般而言, 自动启动此模式於手機關機時, 省電之用也

功函數

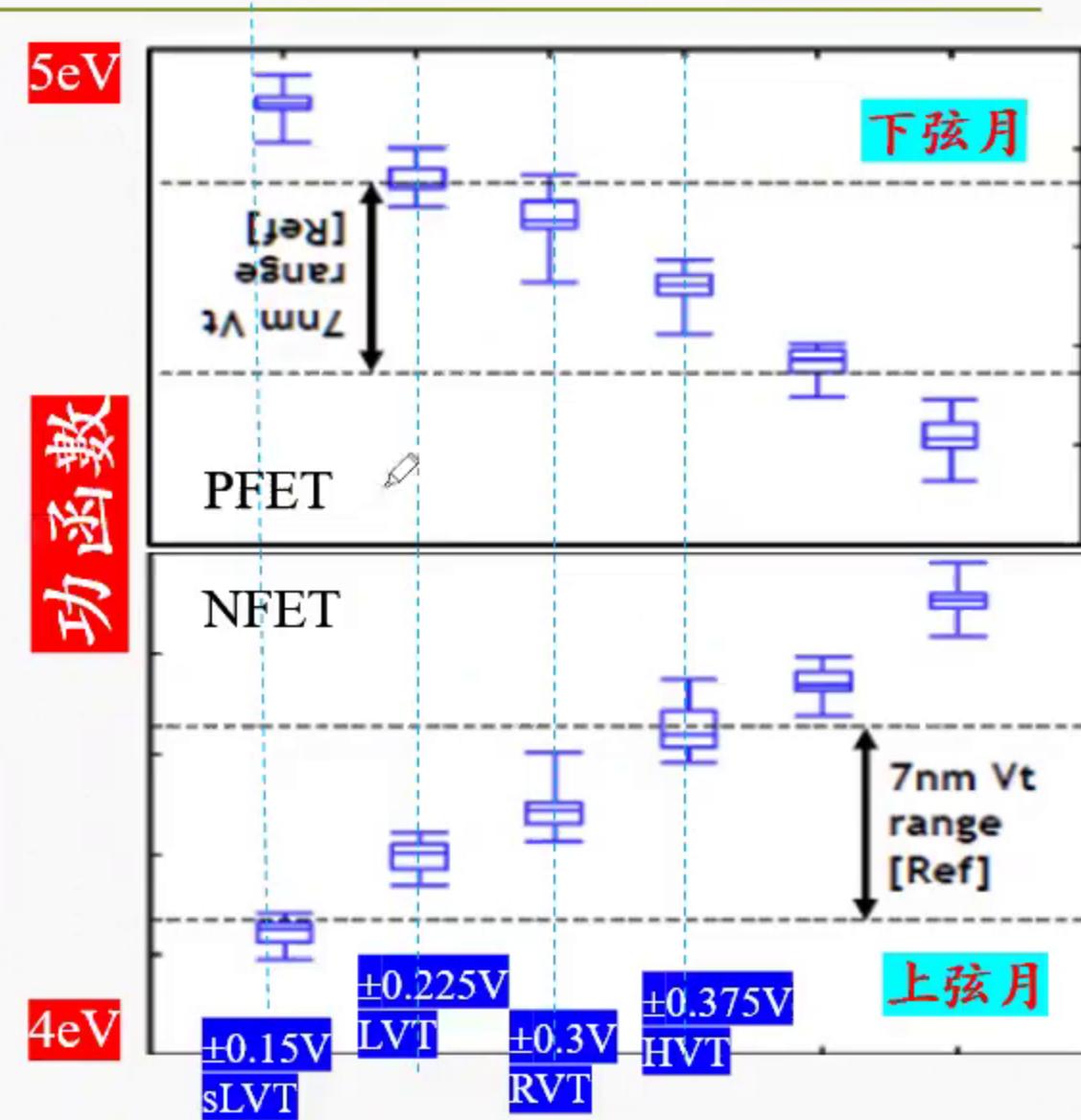


回味:顧客7納米的要求:~~土~~四鬼月

試問:為何要有~~土~~四鬼月: sLVT, LVT, RVT and HVT?

解答: 这其实是顧客因應手機使用所生之要求

- **sLVT:** super low V_t , 提供手機最大電流, 所以當你一直在快速網搜之時, 手機知道你所需急切, 會自動启动此模式(但漏电量也最大, 手機突然更熱)
- **LVT/RVT:** low and regular V_t , 提供手機大即一般電流, 所以當你普通網搜之時, 自动启动之模式
- **HVT:** high V_t , 一般而言, 自动启动此模式於手機關機時, 省電之用也



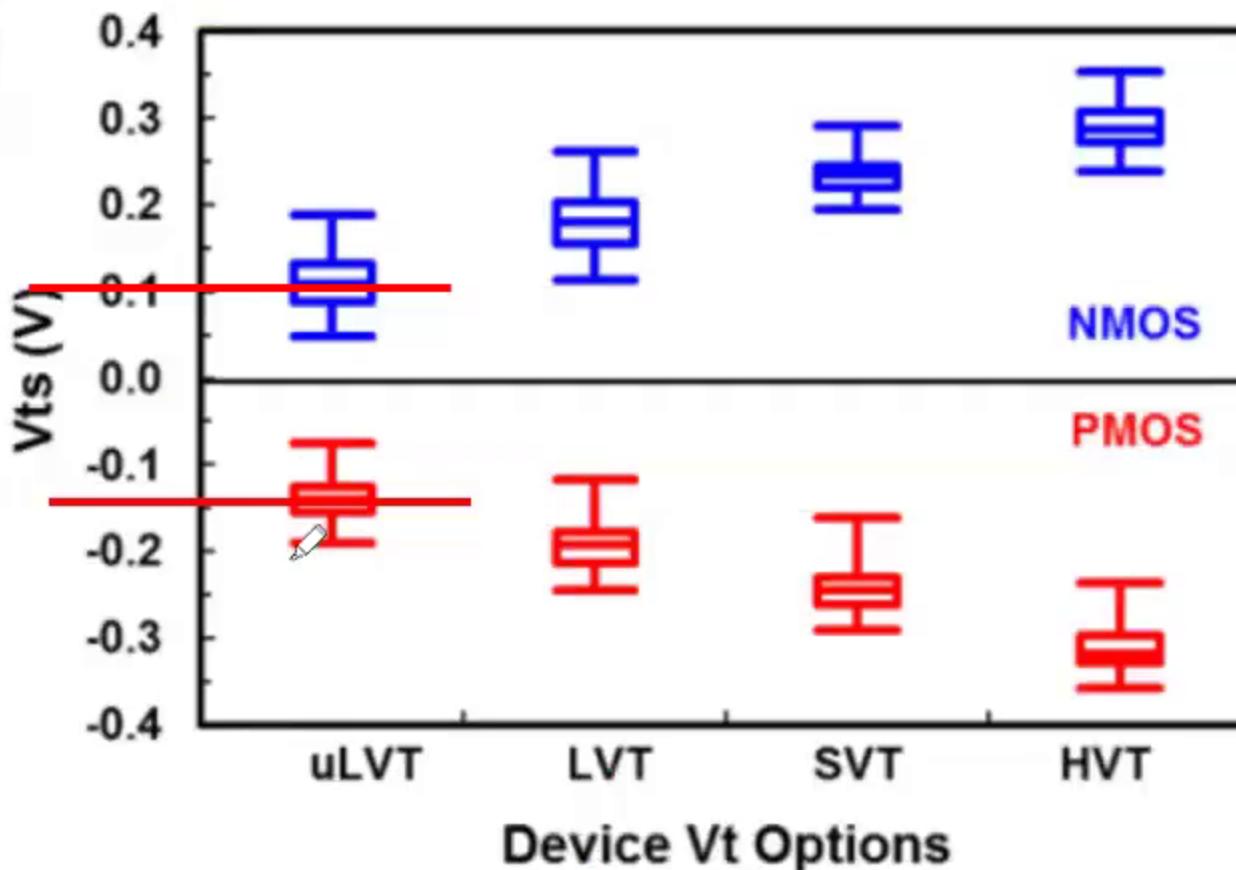
芯片成王敗寇:铝制程

已知: 台积电7纳米MG制程提供的最小阈值电压($uLVt$)為0.1V/-0.15V(右圖)

試問: (1)可否将此值降低? (2)与铝制程的关系

解答:

- (1): 应该不能再降低了, 因为热能电位值(kT)等于26mV, 而0.1V只比此值大4倍, 元件会僅因外界溫度劇烈變化, 就不稳定了
- (2): 铝制程, 由于前面所提到相容性, 是目前唯一能够提供 $uLVt$ (甚至 LVT)的制程, 但铝太多也麻烦



Four Vt options are available in the TSMC 7-nm technology [1]

https://sst.semiconductor-digest.com/chipworks_real_chips_blog/2017/01/18/iedm-2016-setting-the-stage-for-75-nm/

鋁製程與HK愛恨交加

- 虽然鋁制程与HK(HfO_2)有令人痛恨的溫度限制問題，但是它也有妙处
- 因为鋁制程的目的，就是要降低功函数(effective work function)，所以此值必須越低越妙，然而鋁制程在其他的材料上面作用不大，反而对HK(HfO_2)降低功函数的效应特別显出(如右上图)
- 研究结果认为，此特殊的作用應归功于鋁制程与HK(HfO_2)介面产生一个特殊的費米能階釘扎效應(Fermi-level Pinning Effect)，如右下图
- 鋁制程真是令人又爱又恨

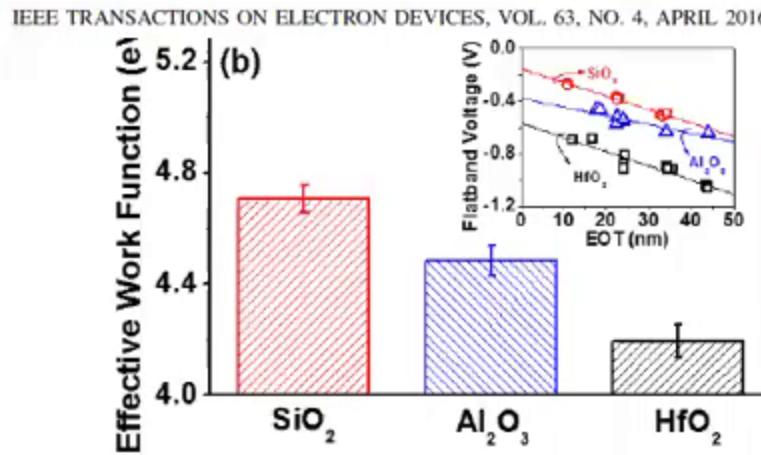
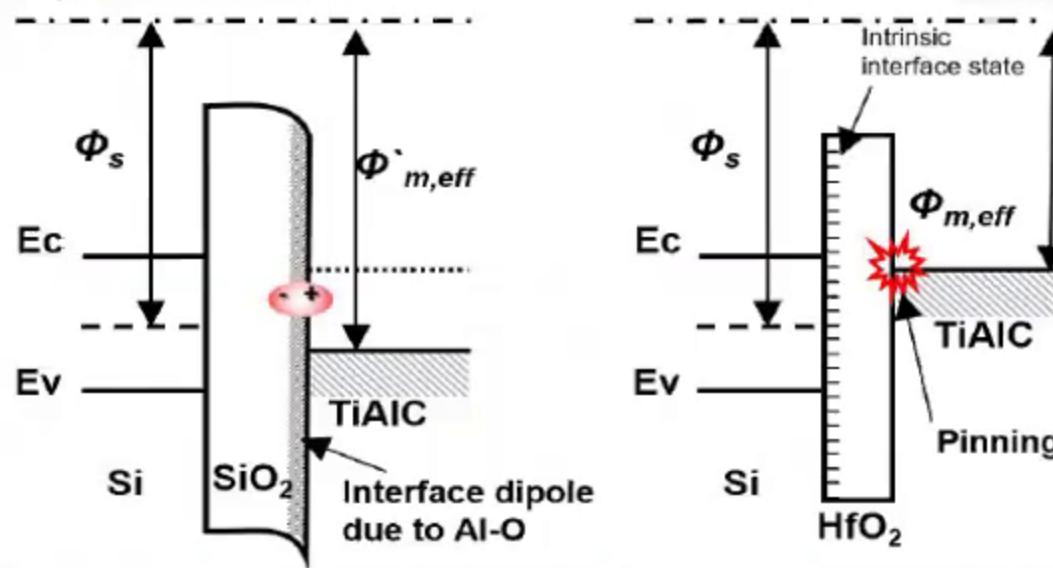


Fig. 1. (a) Normalized C-V curves of ALD-TiAlC on SiO_2 , HfO_2 , and Al_2O_3 at 100 kHz after FGA. (b) Extracted eWF of the ALD-TiAlC on three different gate dielectrics. Inset: eWF was obtained via linear fitting from the plot of V_{FB} versus EOT.

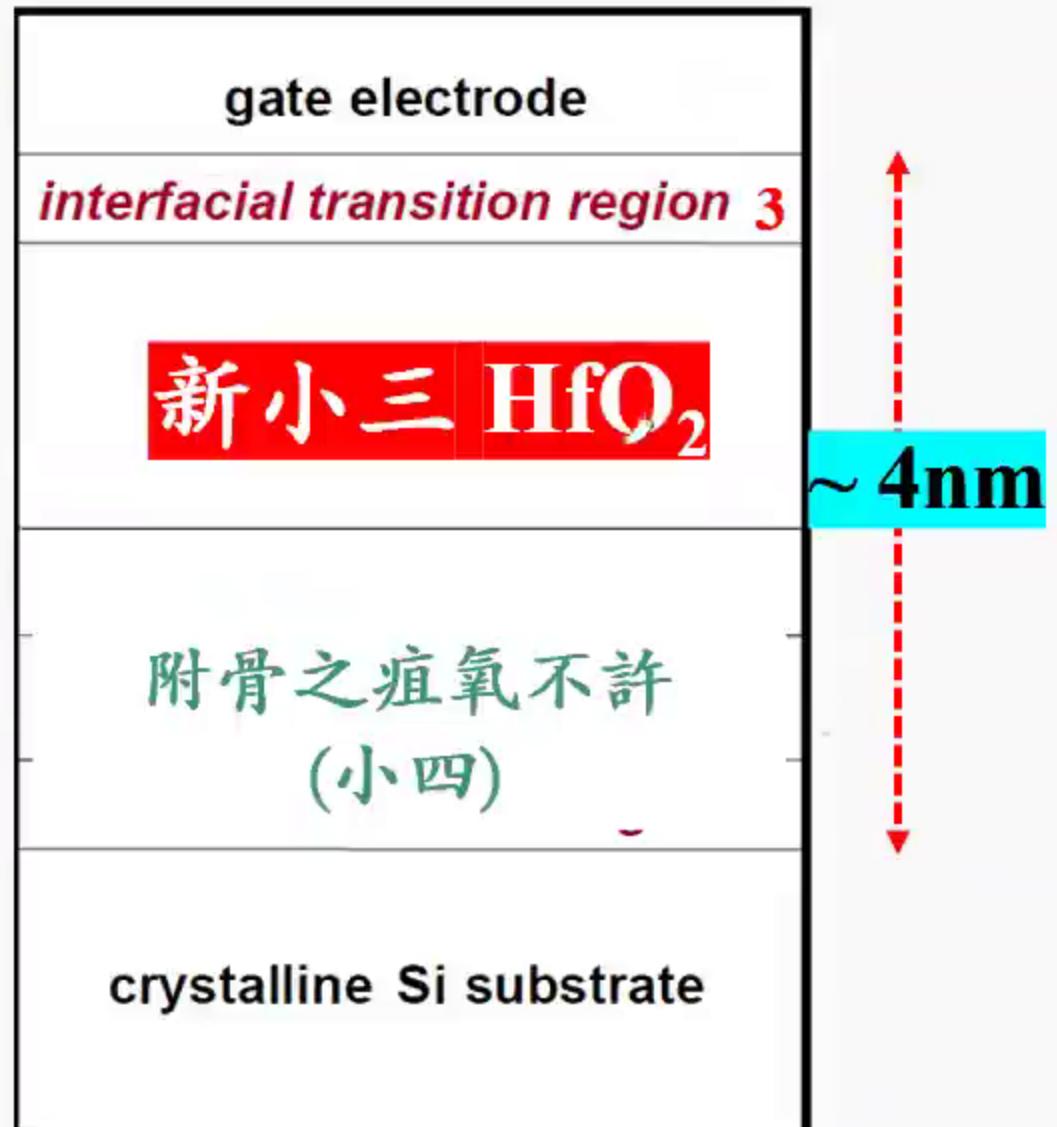


回味：魔鬼总在细节中，這細节到底多細？

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 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！



鋁製程與HK愛恨交加

討論:若前面研究屬實，則鋁的擴散將是鋁制程控制功函數的噩夢，因

- 若鋁只是乖乖擴散到 HfO_2/MG (interfacial region 3) 則他降低功函數，達到預期標準，表現良好
- 若鋁不乖，紅杏出牆擴散到 氧不許 (SiOx) 區，他必造反，提高了功函數，這與我們對鋁的期望背道而馳，麻煩大了
- Integration issue 也

