兒童不宜篇
- 性感的硅芯片

The Sexy CMOS

王不老說半导

兒童不宜篇
- 性感的硅芯片

The Sexy CMOS

王不老說半导

風茄 - 猛龍根

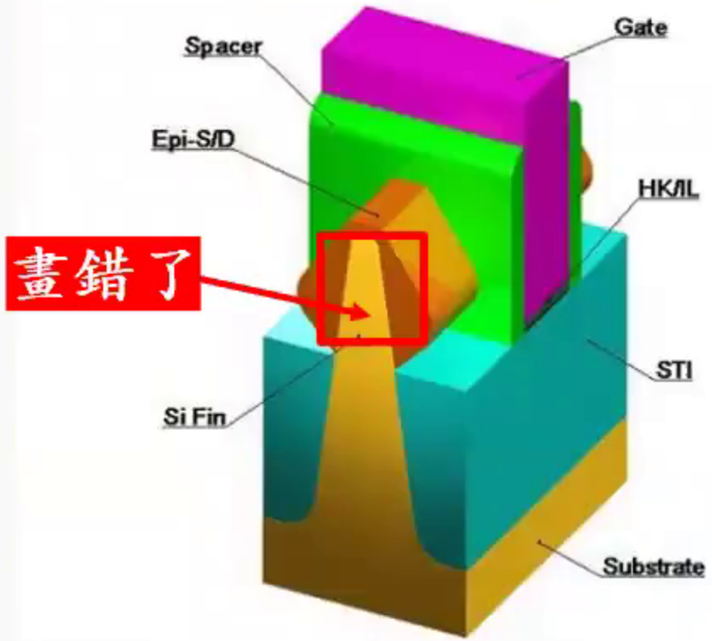
- 雅歌 7:13
  - 风茄放香，在我们的门内有各样新陈佳美的果子；我的良人，这都是我为你存留的
- 有人以為風茄就是Mandrake（Atropa Mandragora），它有手有腳，長得像極了人蔘，它也有一個類似陽具的附生根，被人們認為有強烈壯陽的功能，因此是古代西洋最著名的超級春藥

Man-drake = man + dragon = 猛龍根
古阿拉伯人称之为: **Abu'l-ruh**, 恶魔睪丸 **(Devil's testicle)**是也

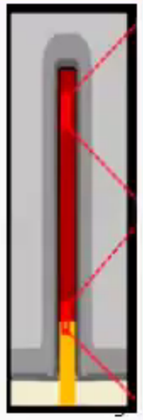
https://www.fs.fed.us/wildflowers/ethnobotany/Mind_and_Spirit/mandrake.shtml

硅鰭電晶體也是納米猛龍根

- 硅鰭(Si fin)自當是納米界的猛龍根，其進展也是越來越堅挺，右下圖顯示，由Intel 22納米的短小到台積5納米的高挺，實不一般
- 右上圖中的Epi-S/D (eSD and eSiGe)，是夾著猛龍根的2个蛋蛋，提供了大量電子(或電洞)，乃猛龍根精力(電流)之來源
- Gate提供外界電壓(Vg)，當電壓足夠(>Vt)時，Epi-S/D瞬間釋放所有電子，硅鰭高潮，電路貫通，此為(Inversion) On state (見下頁)

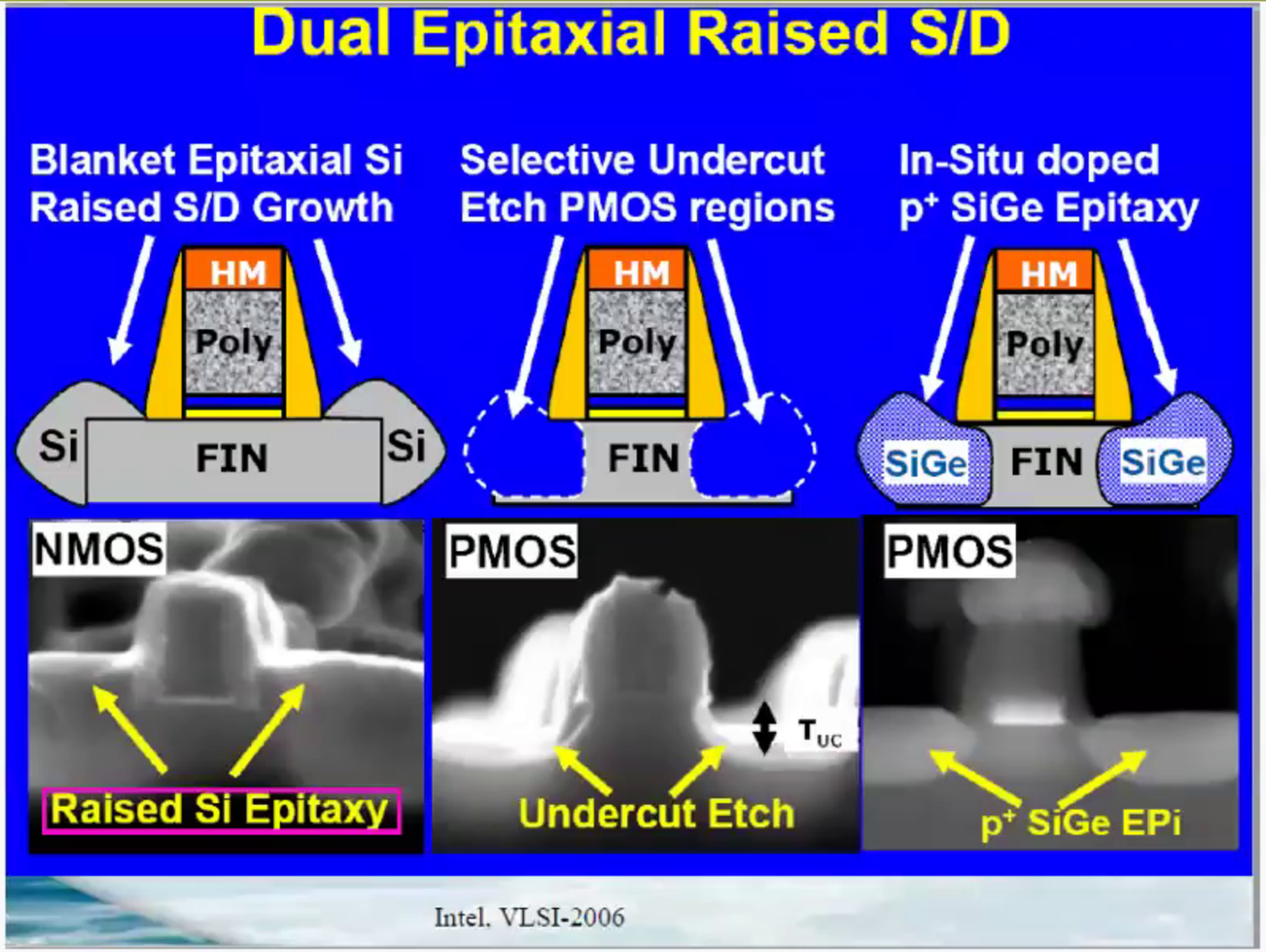


5nm TSMC



猛龍根還有2个蛋蛋 = raised eSD + eSiGe

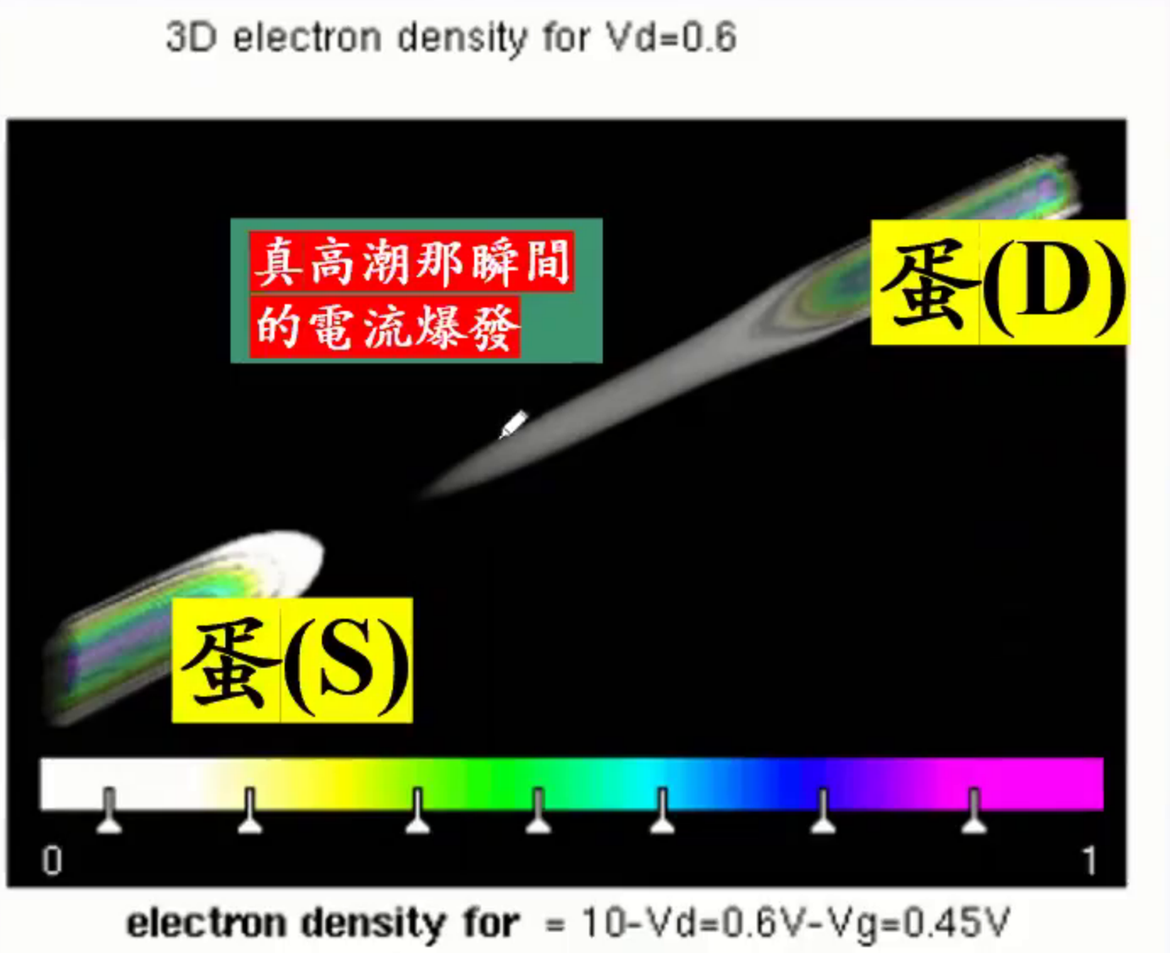
- Intel 能將蛋蛋裡頭的濃度衝到世界第一(e.g., [Ph] = $3E^{21}/cm^3$ for eSD, 嚇死人的濃, 因為~超出物理極限)



回味: 半导渣男的蛋蛋高潮

評論:

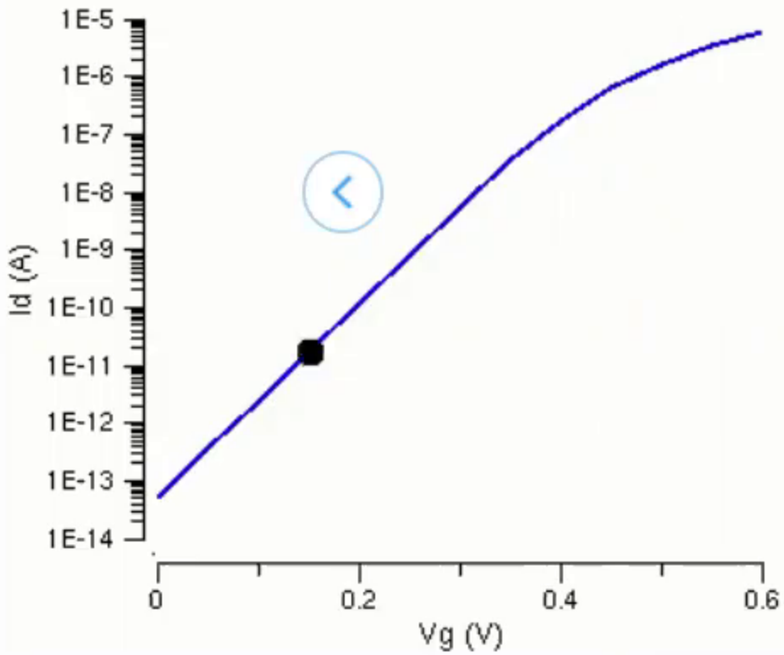
- 高潮那瞬間，电流喷出(如右图所示)，蔚为奇观，吾人曰之"inversion"

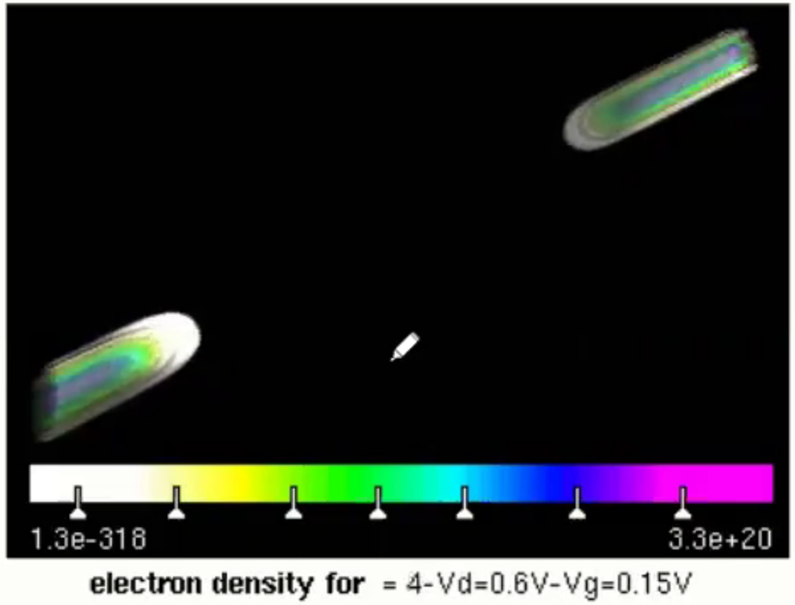


https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%87%91%E5%B1%AC%E6%B0%A7%E5%8C%96%E7%89%A9%E5%8D%8A%E5%B0%8E%E9%AB%94%E5%A0%B4%E6%95%88%E9%9B%BB%E6%99%B6%E9%AB%94

W 金属氧化物半导体场效应管 - 维基

zh.wikipedia.org/wiki/金屬氧化物半導體場效電晶體

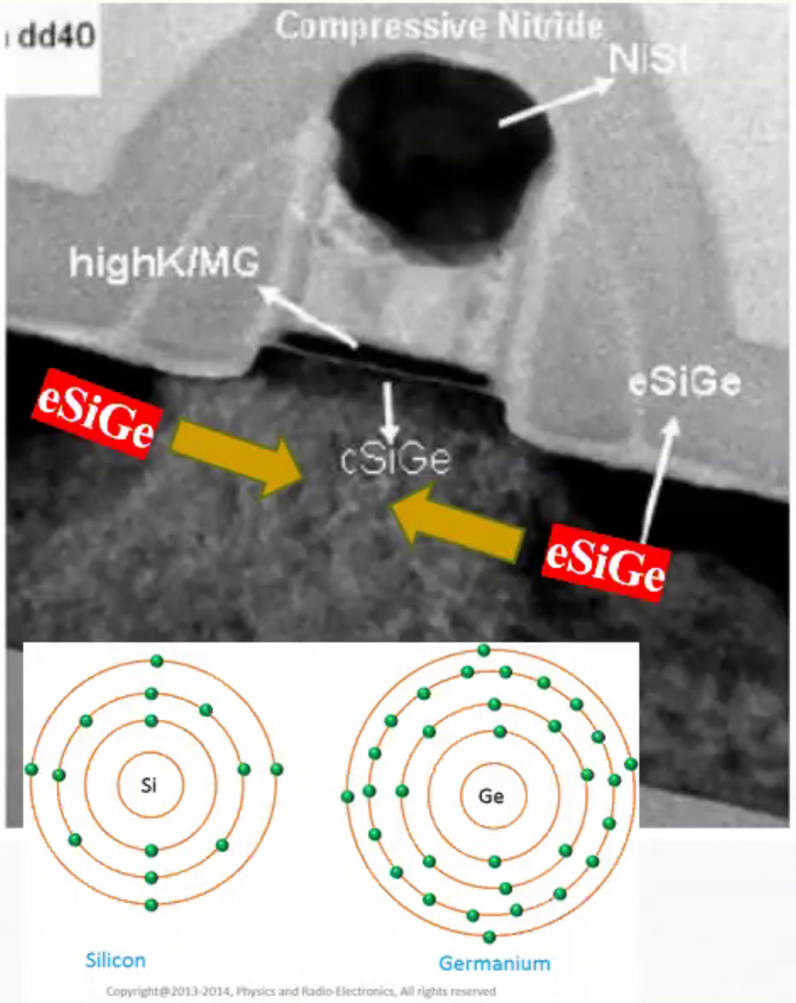




左图为$I_{DS}-V_{GS}$计算机仿真曲线。临界电压在0.45V左右。右图展现的纳米线MOSFET中反型沟道的形成（电子密度的变化）。

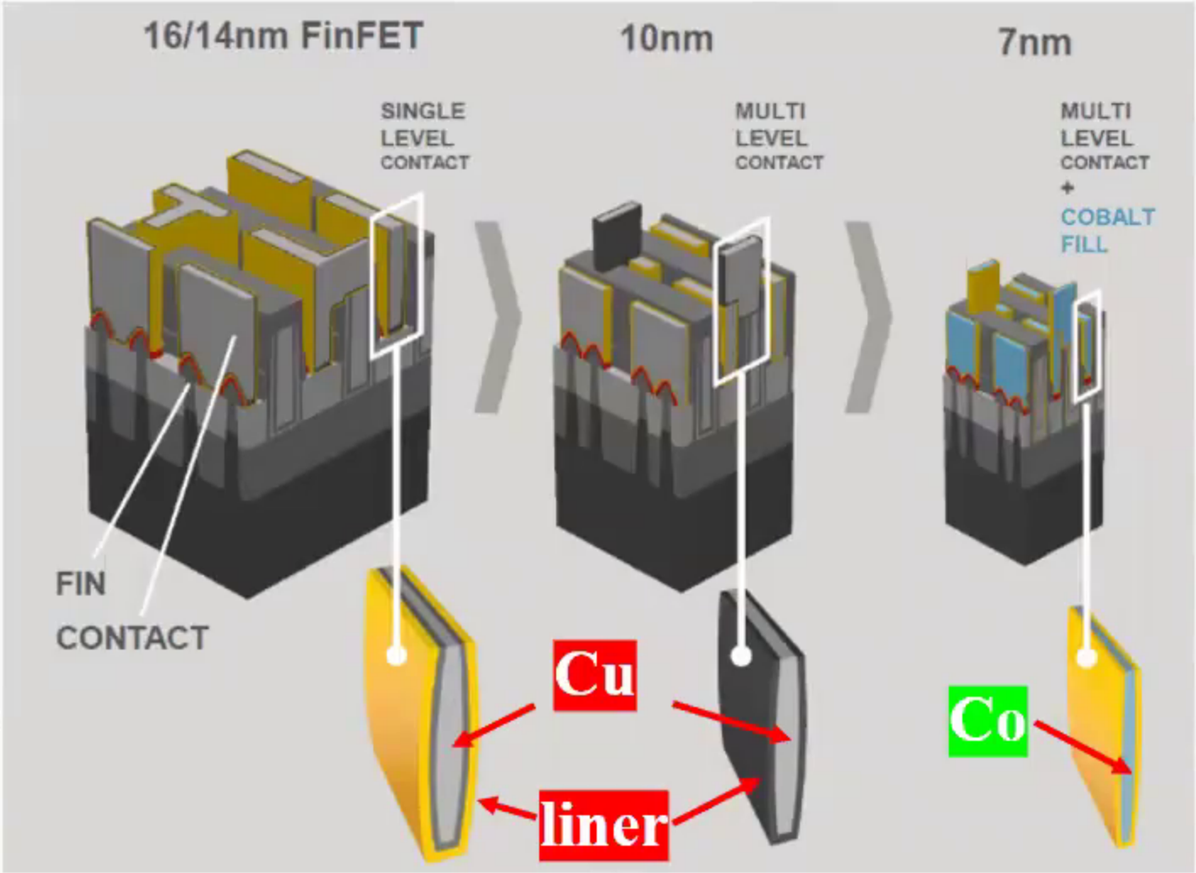
FEOL: 猛龍根的蛋蛋_eSiGe

- 在硅芯片世界里，Epi-S/D除了提供電流之外，有時竟然還可以用本身特殊制程努力加碼，增加電流
- 例如右圖中的eSiGe，以鍺原子比硅為大的原因(右下圖)，給予二者之間的硅巨大壓力(> GPa)，電洞的漂移率(mobility)，因此可以大增
- 註：傳說少林寺一指禪，就是這樣鍛鍊的(每日子午之際，盤膝按摩蛋蛋一個時辰，龍根內力可以突飛猛進)，台灣也有所謂類似所謂九陽神功，也是有不少信徒



BEOL:銅鳥的保險套實在太厚了

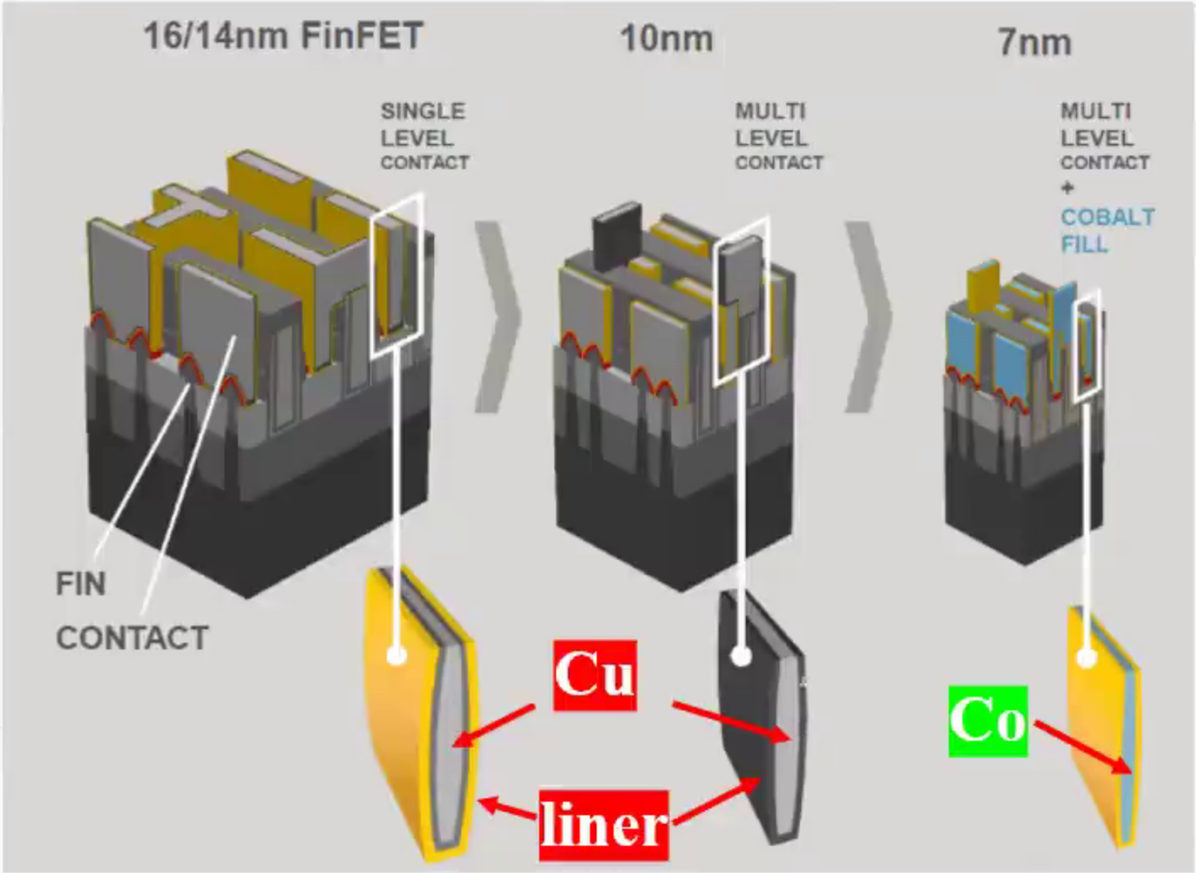
- 早期硅電晶體的內部電路用的全部是銅線，但是銅與其之間的絕緣體，卻不相容，故需要戴套(叫做liner)
- 然而隨著芯片密度越來越大，銅鳥(Cu)越來越細，然而原來的套子，卻還是沒有變更薄，相對而言，好似套子越來越厚一般
- 到了7nm，甚至某些最細的銅鳥(contact or M0/M1)也不行了，竟給鈷鳥(Co)給取代



https://semiengineering.com/dealing-with-resistance-in-chips/

BEOL:銅鳥的保險套實在太厚了

- 早期硅電晶體的內部電路用的全部是銅線，但是銅與其之間的絕緣體，卻不相容，故需要戴套(叫做liner)
- 然而隨著芯片密度越來越大，銅鳥(Cu)越來越細，然而原來的套子，卻還是沒有變更薄，相對而言，好似套子越來越厚一般
- 到了7nm，甚至某些最細的銅鳥(contact or M0/M1)也不行了，竟給鈷鳥(Co)給取代



https://semiengineering.com/dealing-with-resistance-in-chips/

插播: 世界最薄保險套 Okamoto 001

- 保險套也與銅線戴套(liner)有同樣的要求，講究越薄越好，但同時必須保證極高的可靠性(不破也)
- 世界最薄保險套，乃是日本Okamoto，其工廠(右圖)與芯片工廠也相似
- Okamoto 001號稱世界最薄，只有0.01mm
- 美國自己做不出來，竟然禁賣

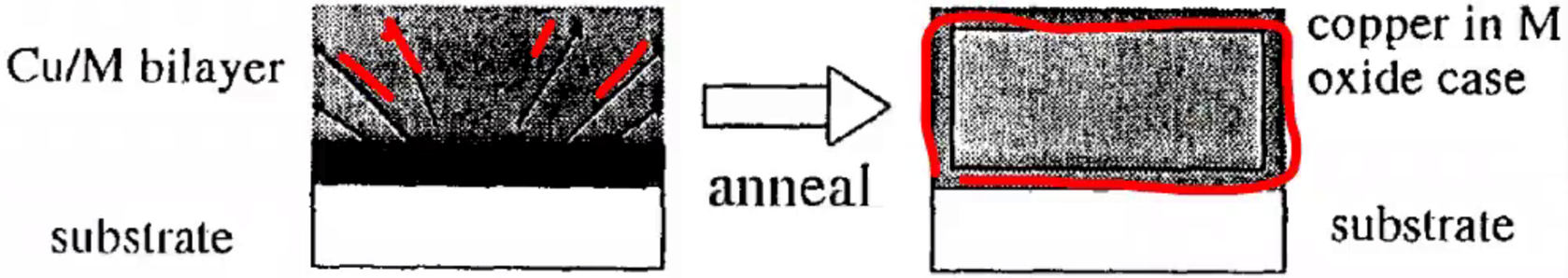
https://okamoto001mm.jp/en/

淺介: 天生保險套_SFB

- Lanford et al. 發現在銅內摻1-2%鋁(Al)或錳(Mn)，這些摻雜物金屬竟然愛上了銅，他們在加熱以後會犧牲自己，跑到銅的外面將進攻的氧敵吃掉，並形成一層氧化物保護膜，此真可謂是“落红不是无情物，化作春泥更护花”，或曰高級犧牲打，或無機世界的有情人也
- 最新製程已進步到tCoSFB(內含錳)，所以是"不是猛龍不過江"也

W.A. Lanford et al. / Thin Solid Films 262 (1995) 234–241

M = Al or Mn



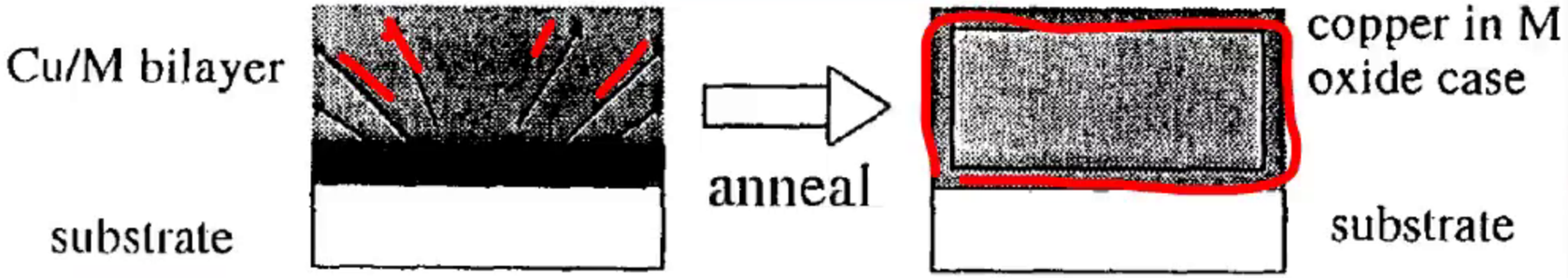
Bilayer sample transport on annealing

淺介: 天生保險套_SFB

- Lanford et al. 發現在銅內摻1-2%鋁(Al)或錳(Mn)，這些摻雜物金屬竟然愛上了銅，他們在加熱以後會犧牲自己，跑到銅的外面將進攻的氧敵吃掉，並形成一層氧化物保護膜，此真可謂是“落红不是无情物，化作春泥更护花”，或曰高級犧牲打，或無機世界的有情人也
- 最新製程已進步到tCoSFB(內含錳)，所以是"不是猛龍不過江"也

W.A. Lanford et al. / Thin Solid Films 262 (1995) 234–241

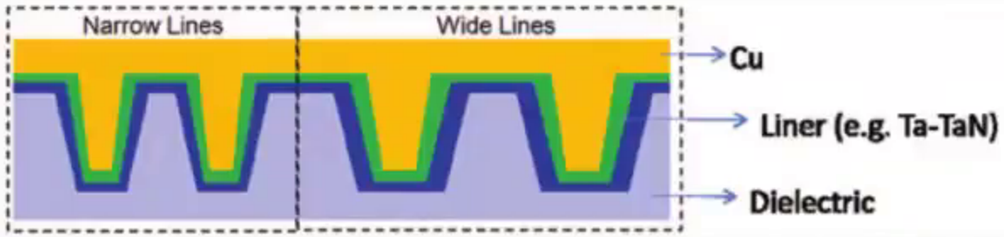
M = Al or Mn



Bilayer sample transport on annealing

銅鳥的最新保險套 - tCoSFB

- 銅鳥的保險套原來的套子(liner)為Ta/TaN雙層保護(右上圖)
- 但是在新芯片製程(5nm)，有些老套子必須換新材料(因為電阻太大)
- tCoSFB是最新流行套子的材料(右下圖)，它的名字很長，叫做 Through-Cobalt Self Forming Barrier (tCoSFB)
  - 其工藝比較複雜(未來章節詳述)
  - 其厚度約為3nm，乃是Okamoto 001的百萬分之三



CMP Challenges for Advanced Technology Nodes，Wei-tsu Tseng

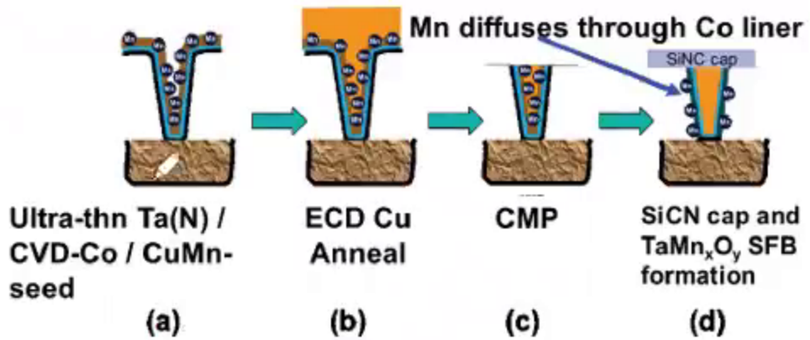


Fig. 5. Through-Co Self-Forming Barrier (tCoSFB) structure and process flow.

Through-Cobalt Self Forming Barrier (tCoSFB) for Cu/ULK BEOL，T. Nogami et al, 2017