

硅芯片魔鬼數字 _4與駝背的鰭

Fin width limit, Fin/Gate bending

王不老說半导

硅芯片魔鬼數字

_4與駝背的鰭

Fin width limit, Fin/Gate bending

王不老說半导

魔鬼數字 $\chi\xi\varsigma$ 與66大順

- 基督教聖經<启示錄>有提到所謂的魔鬼數字 $\chi\xi\varsigma$ (666也，希臘數字 $\chi = 600, \xi = 60$ and $\varsigma = 6$)，其發音為(kai, zai, sigma)
- 中國數字66大順卻是大吉利，有人送紅包給個36元，取其禮輕意重，也是不錯
- 不過， $(1+2+3+4+5+6+\dots+36)$ 數字的總和卻等於666，卻也是怪！
- 在硅納米製程的世界哩，又有哪些魔鬼數字呢？**



The number of the beast is 666 by William Blake

魔鬼數字 $\chi\xi\varsigma$ 與66大順

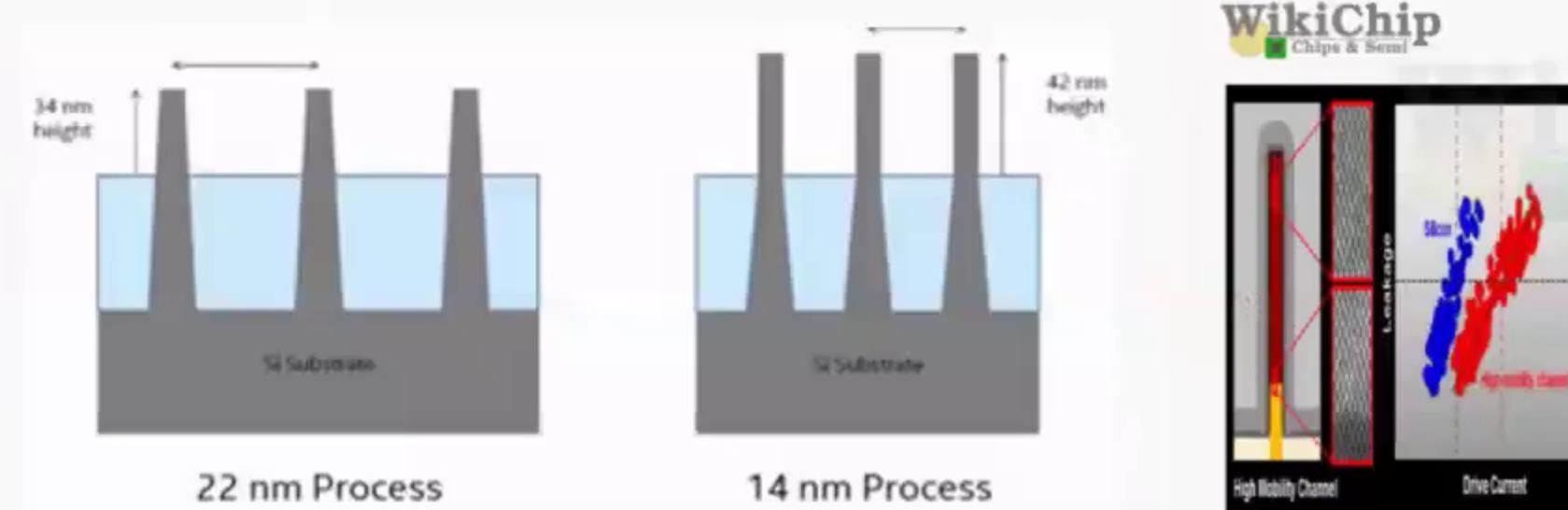
- 基督教聖經<启示錄>有提到所謂的魔鬼數字 $\chi\xi\varsigma$ (666也，希臘數字 $\chi = 600, \xi = 60$ and $\varsigma = 6$)，其發音為(kai, zai, sigma)
- 中國數字66大順卻是大吉大利，有人送紅包給個36元，取其禮輕意重，也是不錯
- 不過， $(1+2+3+4+5+6+\dots+36)$ 數字的總和卻等於666，卻也是怪！
- 在硅納米製程的世界哩，又有哪些魔鬼數字呢？**



The number of the beast is 666 by William Blake

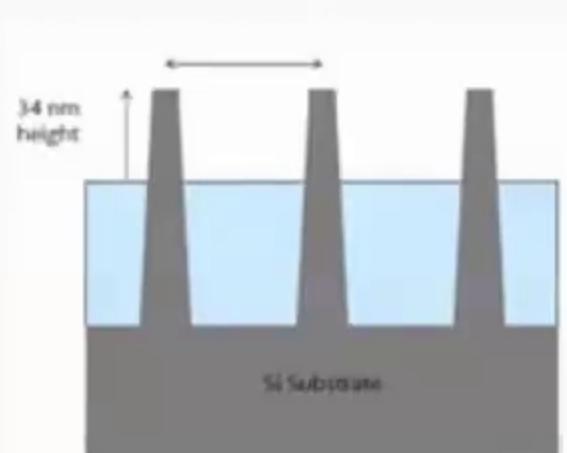
楚王好细腰，宫中多饿死

- 汉成帝愛妃赵飞燕瘦不贏骨，但因服用息肌丸減肥太過，竟然絕育
- 在硅納米鰭式场效应晶体管 (FinFET)的世界哩，人人皆是汉成帝，他們對鰭的腰圍(曰之Dfin)有嚴格要求，基本上，當然是越細越好，因為如此可更容易掌控，得以減少所謂的SCE(short channel effect)，例如左下圖所示，硅納米鰭由矮胖必須進步到高瘦，右下圖中為TSMC五納米鰭，更是瘦到嚇死人

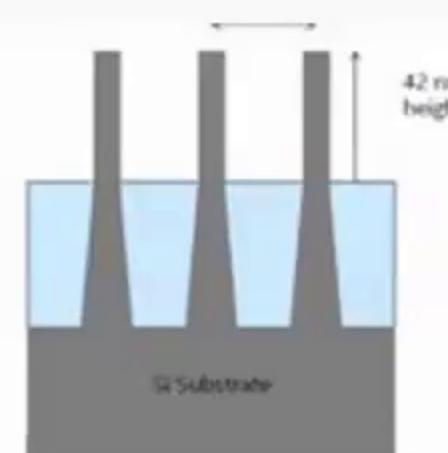


楚王好细腰，宫中多饿死

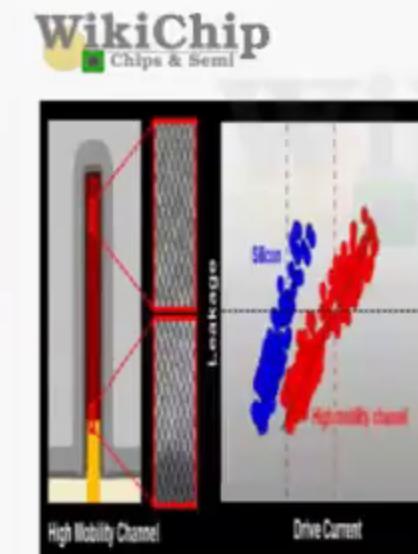
- 汉成帝愛妃赵飞燕瘦不贏骨，但因服用息肌丸減肥太過，竟然絕育
- 在硅納米鰭式场效应晶体管 (FinFET)的世界哩，人人皆是汉成帝，他們對鰭的腰圍(曰之Dfin)有嚴格要求，基本上，當然是越細越好，因為如此可更容易掌控，得以減少所謂的SCE(short channel effect)，例如左下圖所示，硅納米鰭由矮胖必須進步到高瘦，右下圖中為TSMC五納米鰭，更是瘦到嚇死人



22 nm Process



14 nm Process

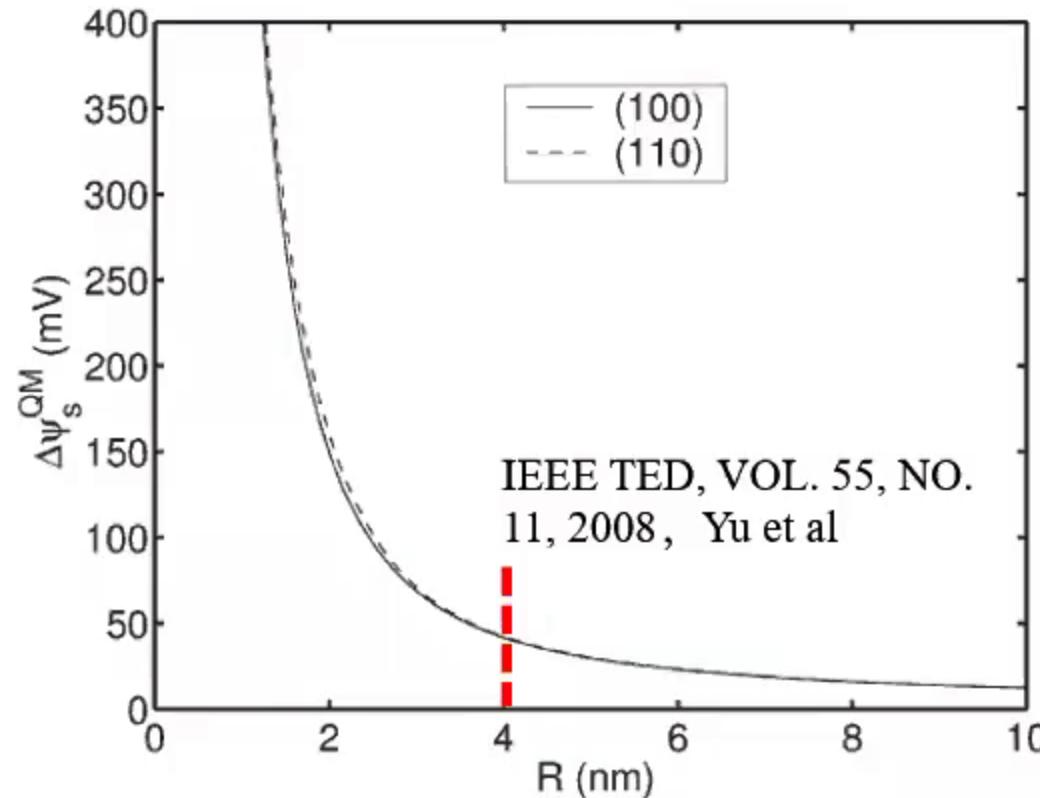


納米魔鬼數字之一：4

試問：當鰭腰圍Dfin太瘦，竟也有不育傾向（電流劇減），此魔鬼數字為何？

解答：4nm也

- 美國半導老將陶元手下能人Yu以量子力學導出，硅鰭表面電位變化($\Delta\Psi_s$)與鰭腰有嚴重親密關係如右
- 此乃因硅原子已很少(見下頁)，量子離散(discrete)效應越來越顯著之故
- 右圖顯示，5nm時， $\Delta\Psi_s$ 已現其獠牙，到了4nm，芯片已經氣喘如牛，無法正常運作了

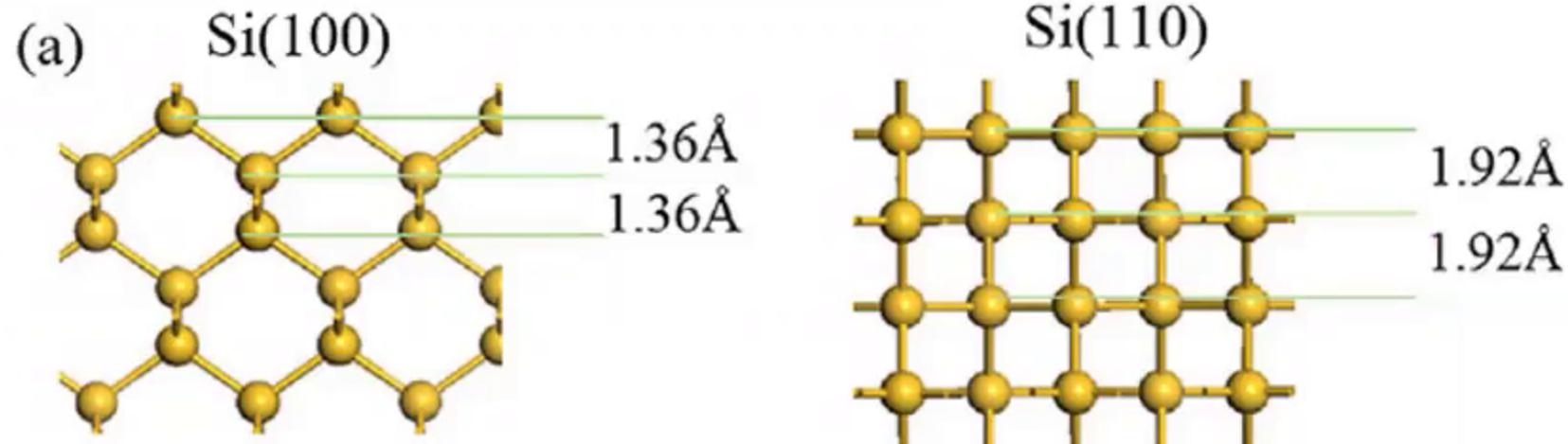


納米魔鬼數字之一：4

試問：當鰭腰圍 = 4nm，其中含有多少硅原子層？

解答： ~ 21 層

- interplanar spacing of Si(100) and Si(110) are 1.36 Å and 1.92 Å
- $40/1.92 \sim 21$ layers



試問：又瘦又高的納米硅鰭會駝背嗎？

解答：會，後果也很嚴重

- 目前鰭的高度已近50nm，腰圍~5nm，所以身高是腰圍的10倍，特別是在dummy gate後，又加了高度，雖然硅性剛強，但也可能駝背
- 如右圖所示，自由端和夾緊端的梁開始屈曲(buckling)的臨界載荷(critical load)為 $\sigma_c = \frac{\pi^2 E}{12} \times 10 = \frac{5\pi^2 E}{6}$
- 當某製程的應力大於以上臨界載荷，硅鰭必將永遠駝背，若硅鰭改為硅鍺($\text{Si}_{0.63}\text{Ge}_{0.37}$)鰭則更容易駝背
- 因為 $E(\text{Si}) \sim 140\text{GPa}$, $E(\text{Ge}) \sim 110\text{GPa}$

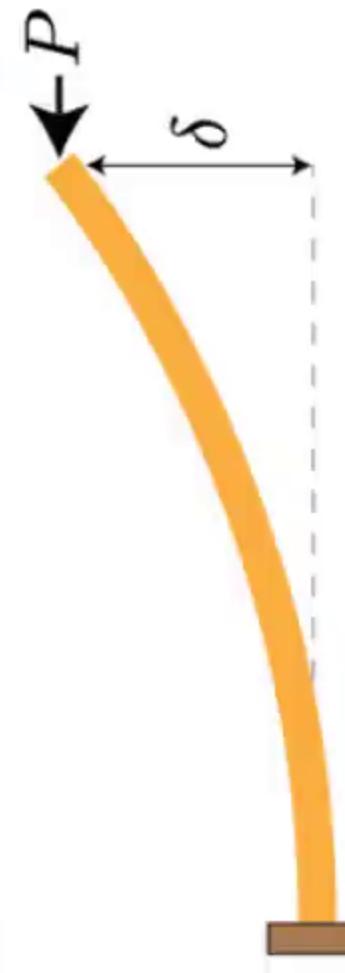


<https://www.bu.edu/moss/mechanics-of-materials-beam-buckling/>

試問：又瘦又高的納米硅鰭會駝背嗎？

解答：會，後果也很嚴重

- 目前鰭的高度已近50nm，腰圍~5nm，所以身高是腰圍的10倍，特別是在dummy gate後，又加了高度，雖然硅性剛強，但也可能駝背
- 如右圖所示，自由端和夾緊端的梁開始屈曲(buckling)的臨界載荷(critical load)為 $\sigma_c = \frac{\pi^2 E}{12} \times 10 = \frac{5\pi^2 E}{6}$
- 當某製程的應力大於以上臨界載荷，硅鰭必將永遠駝背，若硅鰭改為硅鍺($\text{Si}_{0.63}\text{Ge}_{0.37}$)鰭則更容易駝背
- 因為 $E(\text{Si}) \sim 140\text{GPa}$, $E(\text{Ge}) \sim 110\text{GPa}$

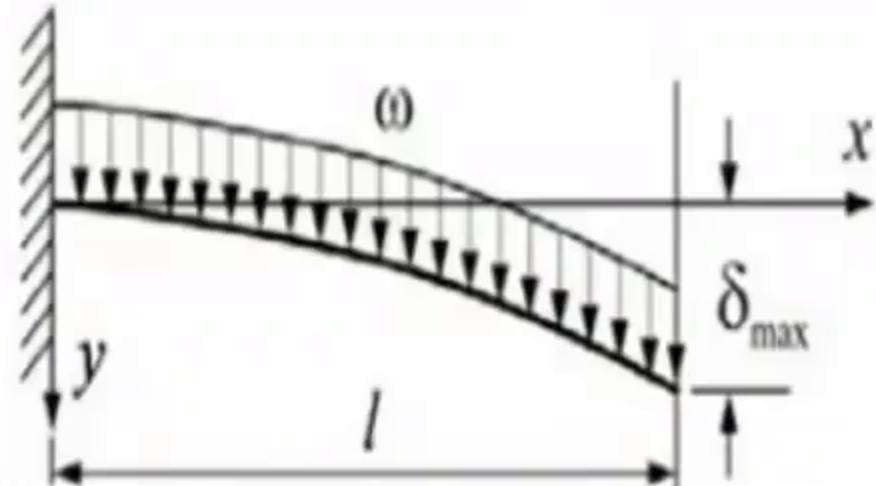


試問：又瘦又高的納米硅鰭會駝背嗎？

解答：會，但是千萬不可駝背太多

- 硅鰭又瘦又高，必將因壓力而有些駝背，只是若能伸直，也是OK，但若因種種原因不能伸直，硅鰭(+dummy gate) 駝背的程度(見下圖中 δ)超出了幾個納米，則以後的製程必然出現問題，良率大概就拜拜了

3. Cantilever Beam – Uniformly distributed load ω (N/m)



$$\theta = \frac{\omega l^3}{6EI} \quad \delta_{max} = \frac{\omega l^4}{8EI}$$

試問：又瘦又高的納米硅鰭會駝背嗎？

解答：

- 7/5/3nm的SADP的line edge roughness竟也能造成駝背的硅鰭

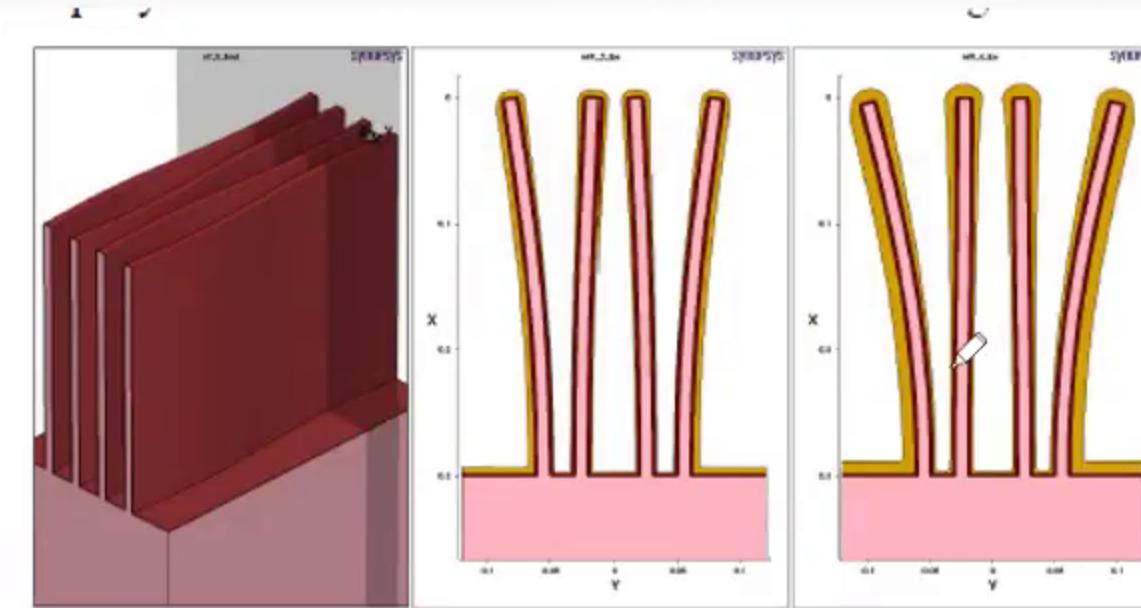


Figure 13: Fin bending behavior of irregularly spaced fins due to line edge roughness in SADP.

Fin bending due to stress and its simulation, Gencer et al, SISPAD'13

試問：又瘦又高的納米硅鰭會駝背嗎？

解答: spacer deposition之後

- 7納米制程發現：駝背的鰭 (+ dummy gate) = Gate Bending
 - → 親嘴隔壁的鰭
- 發生在spacer deposition之後
 - spacer制程的應力 $> \sigma_c = \frac{5\pi^2 E}{6}$

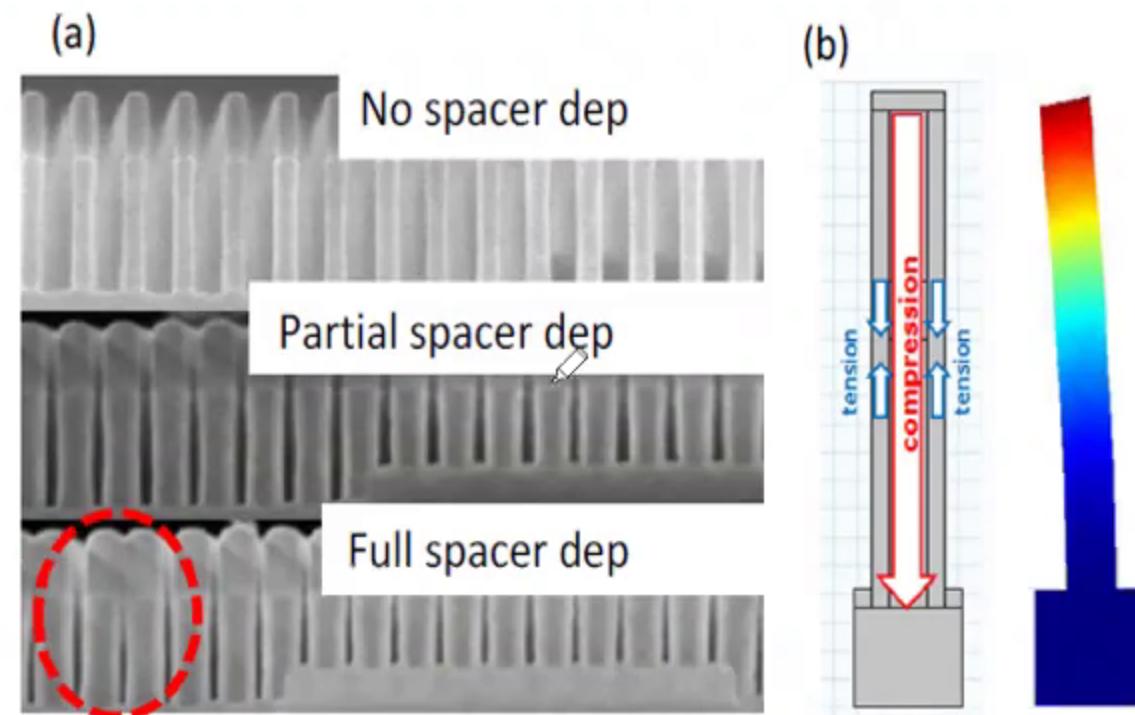


Fig. 14. (a) Gate bending after spacer deposition; (b) Analytical model output of gate buckling behavior.

台積電解決硅鰭駝背專利方案

解答:台積US2020/0020807 A1(級別最高專利),似乎解決了此一問題

- 如下圖所示, 114為新加的多層各式壓拉應力材料(Si_3N_4 及其他), 其目的為降低原來相關製程使硅鰭駝背之不良應力也, 此層還可用來做做製程所需的hard mask, 實為一石二鳥聰明之計也

