

積體電路精彩的摩爾旅程 - 數目爆增的神奇魔力

林茂雄 (M. S. Lin)

創辦人、董事長兼發明家

成真股份有限公司 (iCometrue Company)

2022年4月18日

本檔案係根據林董事長於2021年7月30日在居禮夫人高中化學營演講
「積體電路精彩的摩爾旅程 - 數目爆增的神奇魔力」的投影片修訂而成

- 點滴在心頭 Connecting Dots

- 為了要把精彩的半導體積體電路60多年的歷程，講給你們高中生聽，讓我有機會把過去40年在半導體生涯中所親身經歷見證的點點滴滴串連起來，自己也才真正體會其中奧妙的意義，驚訝讚美自然的神奇及人造工藝的美妙！

- 史詩般的壯麗動人 Fabulous Epic

- 半導體發展的過程及歷史就像史詩一般，其精彩刺激程度，幾乎可以比擬20世紀初期量子力學的發展。只是半導體的發展，不是基礎科學，是工藝及科學應用，而且多了金錢及利益的商業氣息。

課程(Lessons)

第一課: 半導體世界的起源和演化 – 摩爾定律

- 數字的神奇魔力

第二課: 神奇的曝光機 – 光波波長的摩爾遊戲

第三課: 半導體精彩神奇旅程的主要里程碑

第四課: 我的摩爾人生

- 在摩爾定律及非摩爾定律間沉浮的職場生涯

第五課: 「數大便是美」數目趨近無窮大時，就會產生高端智慧及神奇魔力

- 人工智能
- 工程倫理

結語: 好奇心. 想像力. 價值觀

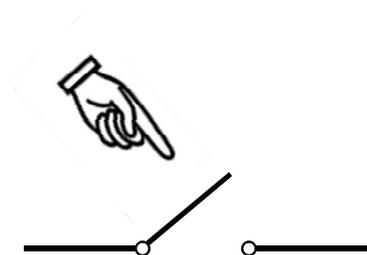
第一課

半導體世界的起源和演化－摩爾定律

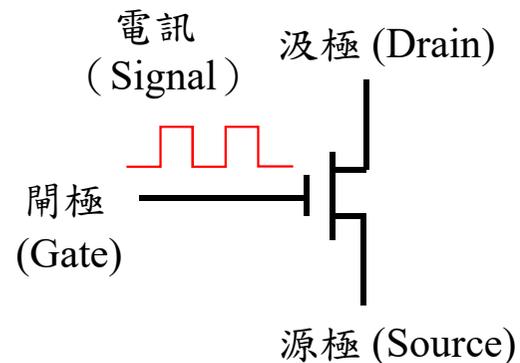
必要的基礎知識 I (Essential Basic Knowledge, EBK) – 電晶體

- 電晶體 (Transistor): 可以用電訊(Signal)主動(Active)控制的開關
- 電晶體主動開關的功能特性暗示預告它具有人工智慧

手動開關
(Manual Switch)



主動開關
(Active Switch)



必要的基礎知識 II – 積體電路 (Integrated Circuit, IC)

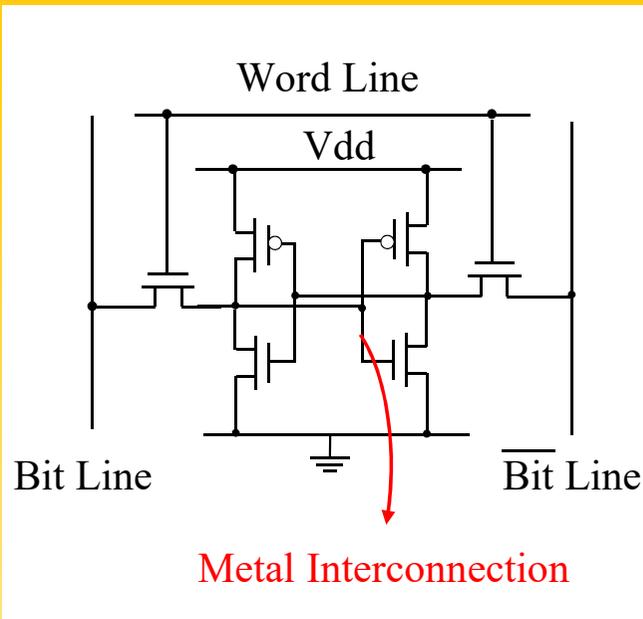
- 由多數個電晶體經由金屬連線(interconnection)連接組成
 - 記憶體 – 例如: 靜態隨機存取記憶體(Static Random Access Memory –SRAM)
 - 計算電路 – 例如: 加法器(Adder)
 - 邏輯電路 – 例如: AND(交集)、OR(聯集)
 - 心跳線路 – 時鐘(Clock)
- 積體電路根據人寫的軟體程式指令(Instruction)，按照其時鐘，進行記憶體的存取、數學計算及邏輯判斷，這不就是人腦嗎？
- 中文把“Computer”叫做電腦(Electric Brain)，實在非常傳神!

必要的基礎知識 III – 積體電路的基本電路 (Basic Circuit)

記憶體

靜態隨機存取記憶體(SRAM)

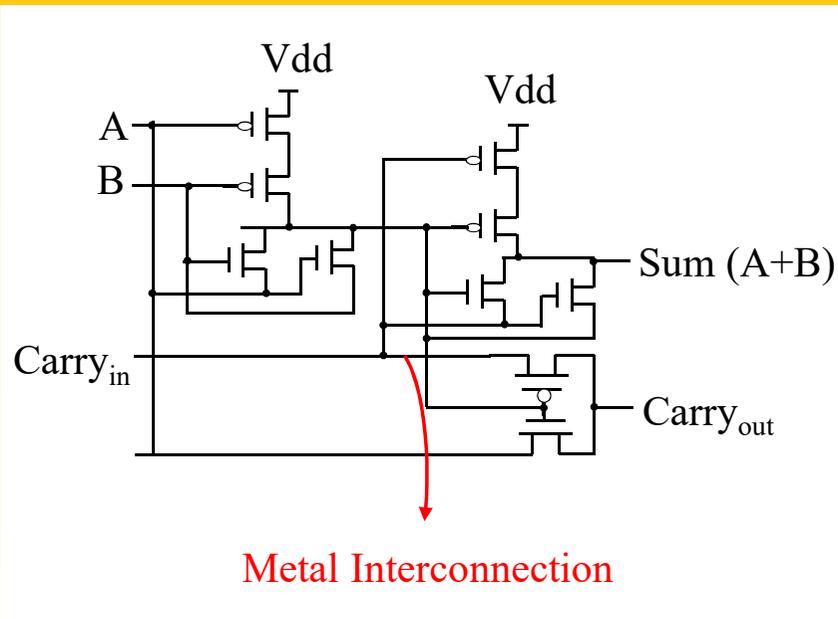
6 個電晶體



計算電路

加法器

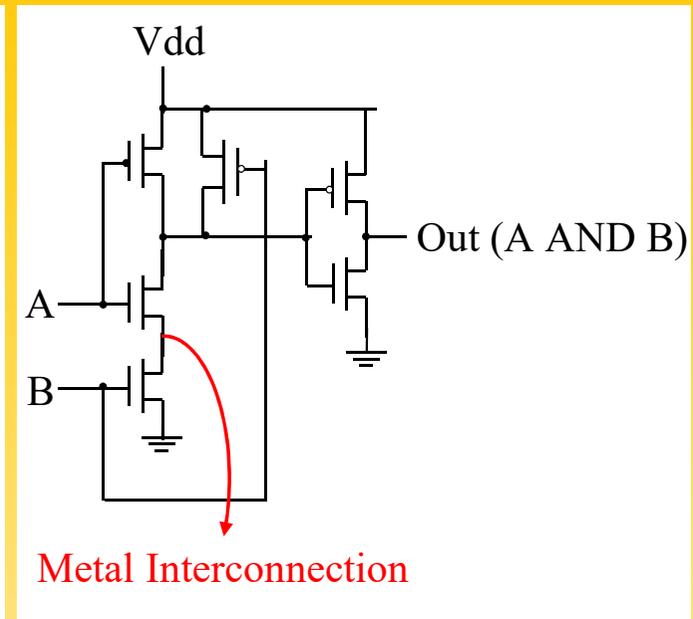
10 個電晶體



邏輯電路

AND

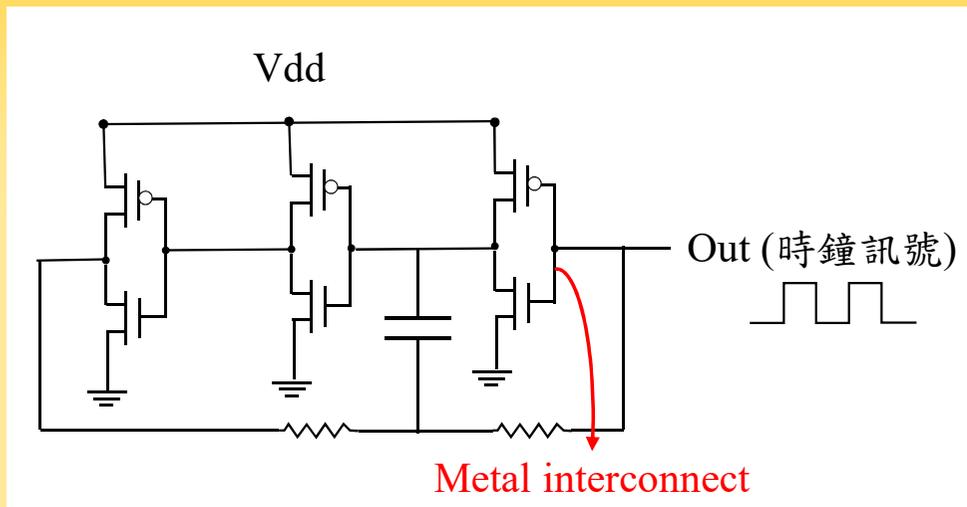
6 個電晶體



: P型電晶體 : N型電晶體

必要的基礎知識 IV – 積體電路的基本電路 (Basic Circuit)

心跳線路
時鐘 (clock)
6 個電晶體



- 現在電腦CPU晶片或手機APU晶片的時鐘頻率(Frequency)已經超過 3GHz，相當每秒擺動30億下，時間以 nano-second 奈秒為單位
- 人類的心臟每秒跳動1.2下，時間以 秒為單位

當積體電路根據人們所寫的程式指令，按照其時間次序，進行資料的存取、數學運算及邏輯判斷，這不就是和人腦的功能一樣嗎？中文把「Computer」稱做電腦 (Electric Brain)，實在非常傳神！

半導體世界的起源和演化：「數字」(number)的神奇魔力

半導體世界的起源和演化，和我們這個宇宙的起源和形成一樣，都是「數字」(number)的魔力，牽涉到尺寸(scale)大小及數目(quantity)多寡而已！

自然界定律

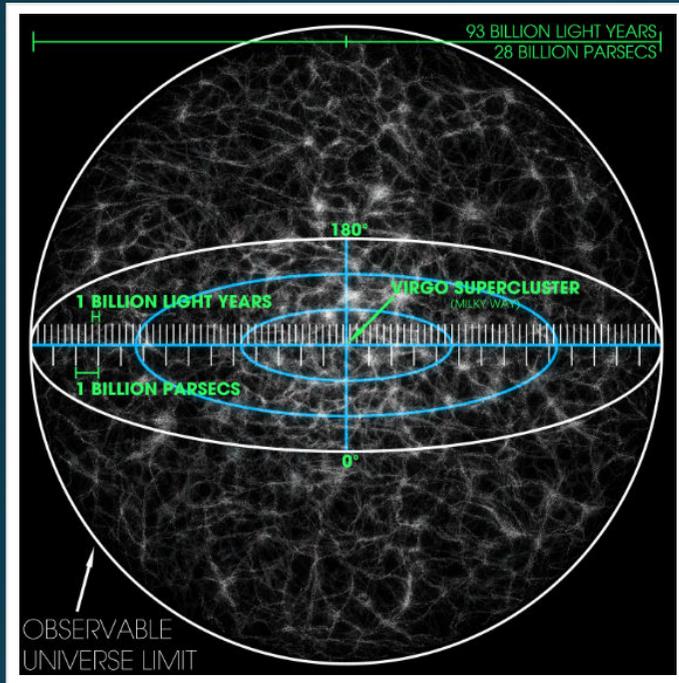


人造定律



宇宙 VS 電晶體

直徑 10^{27} 米



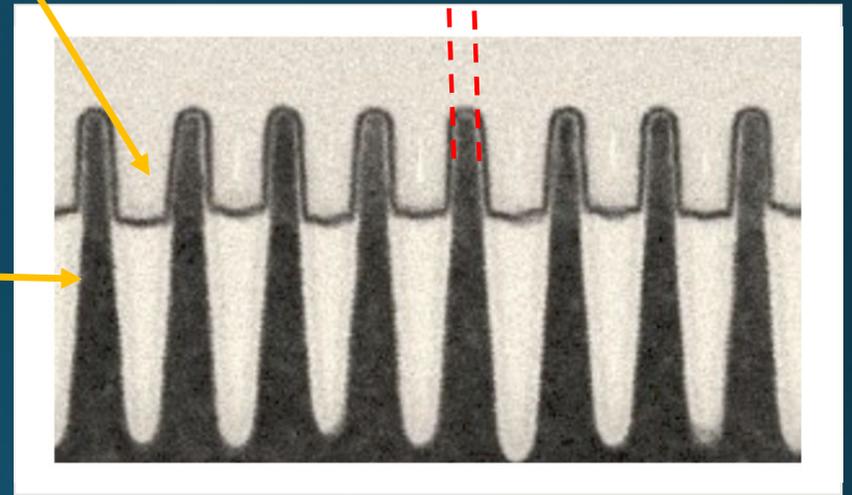
- 用哈伯太空望遠鏡觀測。
- 每一小白點就是一個星系 (galaxy)，觀察到的宇宙有 1.25×10^{11} 星系，每一星系有 10^{11} 恆星。

https://en.wikipedia.org/wiki/Observable_universe

閘極
(Gate)

電流通道寬度5奈米

鰭
(Fin)



- 用電子顯微鏡觀測。
- 每一立體電晶體 (FINFET) 的通道寬度5奈米。一個晶片有 5×10^{10} 個電晶體。

<https://wccftch.com/tsmcs-5nm-will-enter-mass-production-in-2021-claims-source/>

半導體世界的起源和演化：「數字」(number)的神奇魔力

- 半導體晶片從 60 多年前(1958年)只含有2個 10^{-3} 米大小的電晶體，到現在 (2021年)含有 5×10^{10} 個 3×10^{-9} 米大小的電晶體。

每20個月(1.67年)，電晶體數目加倍：

$$2^{(2020-1958)/1.67} = 2^{37} = 6 \times 10^{10}, \text{ 令人驚奇的接近 } 5 \times 10^{10}$$

人造的能力行為遵循的經驗法則(Empirical Law)竟然精準的和宇宙自然的物理定律(Law of Physics)一樣，令人讚美感動！

- 摩爾定律用簡單的幾何級數即可描述；而廣義相對論則需用深奧的萊曼曲面張量(Riemann Curvature Tensor)才能闡釋。

如果汽車工業也有摩爾定律...

如果汽車工業也有摩爾定律，汽車從 1885年德國工程師卡爾·賓士在曼海姆製造出汽油引擎裝置，架設在馬車上的三輪汽車，136年前(1885年)三輪汽車大小 3公尺長2公尺寬，根據摩爾定律：

每20個月(1.67年)，汽車面積縮小一半：

$$2^{(2020-1885)/1.67} = 2^{81} = 5 \times 10^{22}$$

到現在汽車面積應該是：

$$6 \text{ 平方公尺} / 5 \times 10^{22} = 1 \times 10^{-22} \text{ 平方公尺}$$

也就是說現在汽車大小應該是 10^{-11} 公尺(10^{-2} 奈米)，進入物理的測不準原理的次原子(Sub-Atomic)範圍

- 汽車工業因為人類沒有持續縮小的需求，也就沒有摩爾定律。
- 人類文明史上沒有一樣東西像半導體積體電路晶片一樣擁有摩爾定律

如果飛機工業也有摩爾定律…

- 美國萊特兄弟在1903年發明飛機之後，雖然人類希望飛機能夠製造得越大越好；可是經過70個(2^{70})週期的發展，現在最大的飛機 Airbus Beluga 機身長度的才56公尺。
- 因為技術上的物理限制及人類沒有強烈的需求，飛機的大小也就沒有遵循幾何級數持續的增大
- 人類文明史上沒有一樣東西像半導體積體電路晶片一樣擁有摩爾定律

驚天動地的幾何級數機制 (Geometric Mechanism)

- 我自己一生深刻的經驗，一個事件 (Event) 如果我不能用**數學**描述及用**數字**想像，我可能對這事件還沒有**想的透徹**。古希臘哲學家柏拉圖說：**不懂數學幾何者，不入我門**。
- 自然界或人為事物大部分沒有呈現幾何級數現象，是因為有**活化因素(Activator)**和**抑制因素(Inhibitor)**相互競爭抗衡，達到飽和的**平衡狀態(Equilibrium)**。
 - 新冠病毒 - 抑制因素：口罩、洗手、社交距離、疫苗、藥物治療
 - 人體細胞分裂 - 人體細胞分裂機制中有**活化因素CDK (Cyclin Dependent Kinase) 激酶**，刺激細胞分裂；也有**抑制因素CDKI (CDK Inhibitor) 分子**，抑制細胞分裂；另外，細胞分裂的過程中，**染色體末端的端粒(Telomere)**長度會隨著細胞分裂次數而不斷縮短，當Telomere縮短至無法維持染色體的穩定時，細胞將停止分裂且逐漸死亡。由於**CDKI調控細胞分裂的進展以及Telomere調控細胞死亡的機制**，人體細胞數目不致於成幾何級數的失控增長。

驚天動地的幾何級數機制 (Geometric Mechanism)

積體電路晶片因為人類強烈的需求，想盡辦法，增加活化因素，挑戰物理極限，經過37個 (2^{37}) 發展週期，到現在尚未停歇，當然會產生驚天動地的後果。

元素週期表 - 神奇的矽原子

- 自然界為人類準備了矽原子來做積體電路。
- 矽原子($3s^23p^2$)和碳原子($2s^22p^2$)同屬IVA族的四價元素，兩者的固態晶體結構都是鑽石立方結構 (Diamond Cubic Lattice)。
- 珠寶商說「鑽石永遠保值，Diamond is Forever」；我說「矽晶永保活力，Silicon is for Soul」。

The image shows a standard periodic table with several elements highlighted and annotated. Silicon (Si) is circled in red and labeled '矽 Silicon' with the note '充裕而穩定'. Boron (B) is circled in blue and labeled '硼 Boron'. Arsenic (As) is circled in blue and labeled '砷 Arsenic'. Red and blue arrows point from the text labels to their respective elements in the table.

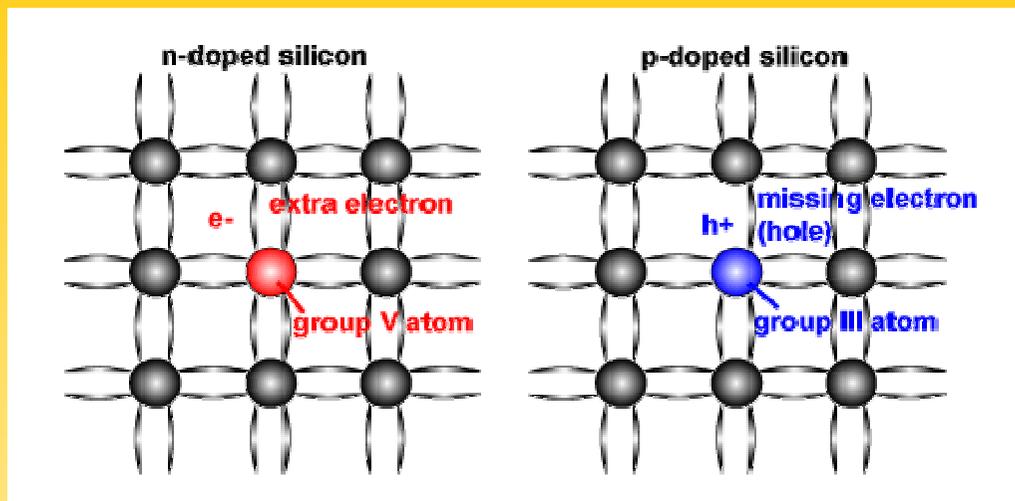
Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Period 1	1 H												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	2 He
Period 2	3 Li	4 Be											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
Period 3	11 Na	12 Mg											31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
Period 4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
Period 5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
Period 6	55 Cs	56 Ba *	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og	
Period 7	87 Fr	88 Ra *	103 Lr *	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn							
			* 57 La	* 58 Ce	* 59 Pr	* 60 Nd	* 61 Pm	* 62 Sm	* 63 Eu	* 64 Gd	* 65 Tb	* 66 Dy	* 67 Ho	* 68 Er	* 69 Tm	* 70 Yb			
			* 89 Ac	* 90 Th	* 91 Pa	* 92 U	* 93 Np	* 94 Pu	* 95 Am	* 96 Cm	* 97 Bk	* 98 Cf	* 99 Es	* 100 Fm	* 101 Md	* 102 No			

https://en.wikipedia.org/wiki/Periodic_table

必要的基礎知識 V: 電子(Electron)與電洞(Hole)

四價矽：可以摻入雜質(Doping Impurity)

- 摻入五價磷或砷，多出一個電子，則成為 N型半導體(n-type semiconductor)
- 摻入三價硼，缺少一個電子形成電洞(Hole)，則成為 P型半導體(p-type semiconductor)



<https://www.pveducation.org/pvc/drom/pn-junctions/doping>

最堅固的晶體結構：鑽石立方結構 (Diamond Cubic)

- 神奇的四價鍵元素形成最堅硬的
鑽石立方晶格結構:

- 一 矽晶格

大小 : 0.543 nm

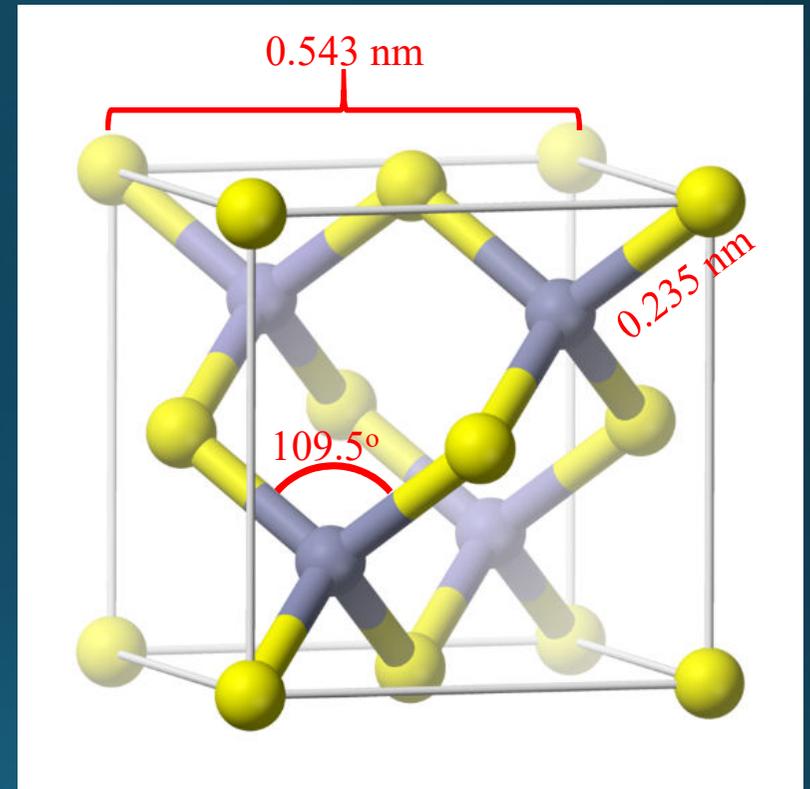
Si-Si : 0.235 nm

- 一 碳晶格 (鑽石)

大小 : 0.357 nm

C-C : 0.154 nm

- 人工鑽石不像矽晶圓可以便宜量產



https://en.wikipedia.org/wiki/Cubic_crystal_system

Diamond is Forever, Silicon is for Soul

鑽石永遠保值，矽晶永保活力

基本粒子的標準模型 - 神奇的電子及光子

- 自然界為人類又準備了矽光子和電子兩個基本粒子來做積體電路。
- 而人類也很聰明的使用光子基本粒子當影印機/雕刻刀，在矽原子長晶而成的晶圓(Wafer)上雕刻圖案線路，然後在圖案線路上操縱玩弄電子基本粒子。



<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%9F%BA%E6%9C%AC%E7%B2%92%E5%AD%90>

~~半導體故事的源起~~

1. 自然

自然為人類準備了一個矽原子、光及電子兩個基本粒子

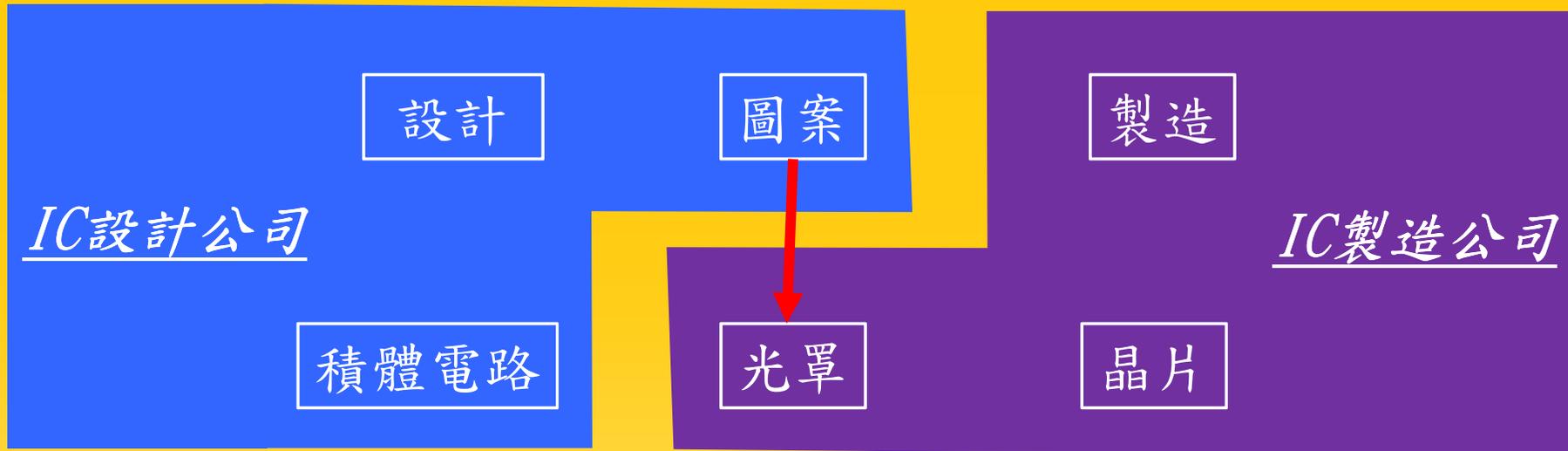
2. 人造

半導體產業是人類用光基本粒子當影印機/雕刻刀在矽原子長晶而成的晶圓 (Si wafer) 上雕刻圖案線路，然後在圖案線路上操縱玩弄電子基本粒子的把戲

第二課

神奇的曝光機 - 光波波長的摩爾遊戲

必要的基礎知識 VI：形成積體電路的程序

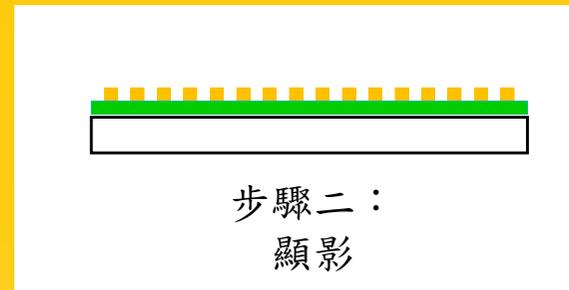
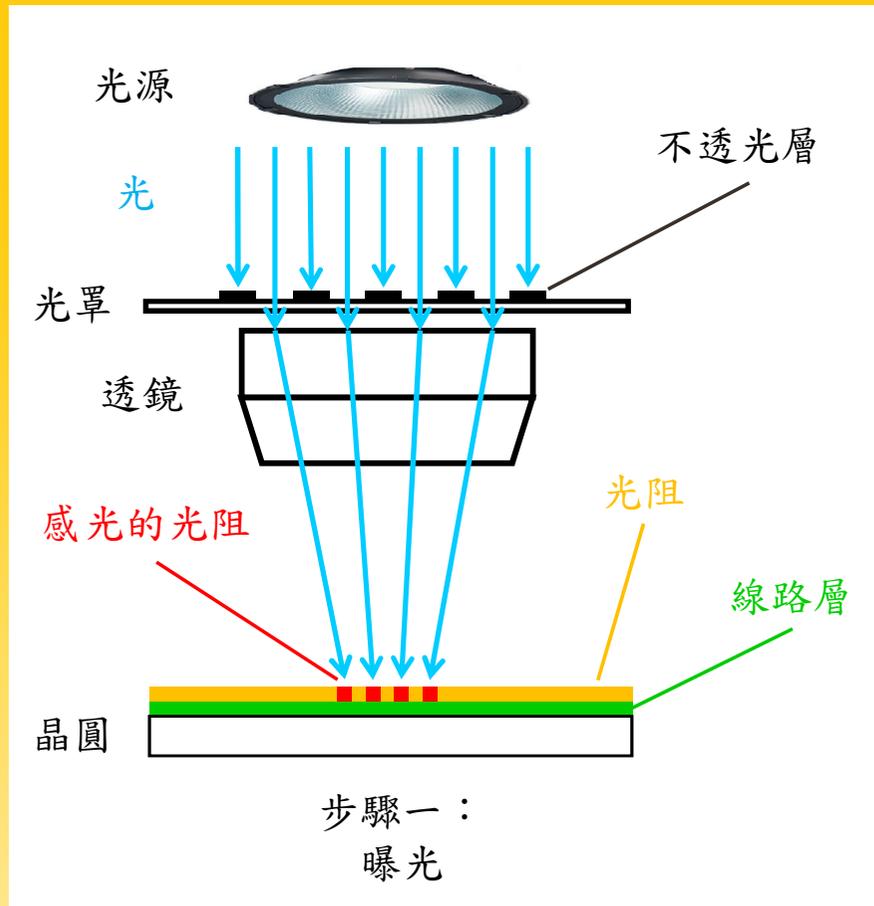


步驟：

1. 把設計的積體電路轉化成多層的圖案，根據每一層的圖案製作每一層的光罩
2. 用曝光機把每一層的光罩圖案依序轉化成在晶圓上的圖案線路層
3. 各層的圖案線路在晶圓上堆疊成積體電路，然後切割成IC晶片。

必要的基礎知識 VII： 曝光機 (影印機/雕刻刀)

曝光技術 (Photolithography)



必要的基礎知識 VIII: 曝光機(影印機/雕刻刀)的基本原理

- 光波波長與解析度 (Wavelength and resolution)

$$R = \lambda / (2NA)$$

$$NA = n \sin \theta < 0.4$$

$$R \sim \lambda / n \sim \lambda$$

R = 解析度

λ = 用於成像的光波波長

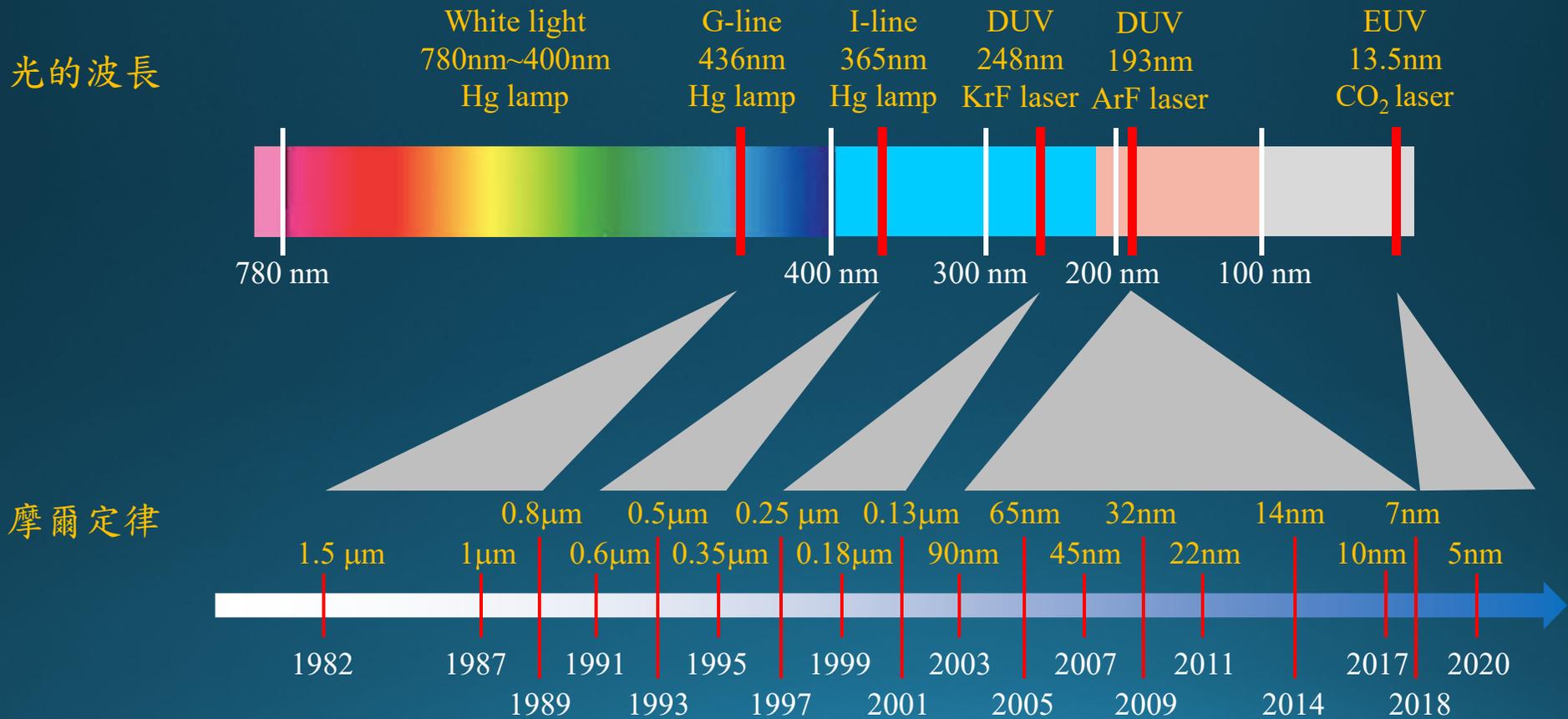
NA = 使用鏡片的數值孔徑 (numerical aperture of the lenses , < 0.4 for most optical system) , 衡量光學系統收集光的能力

θ = 鏡片收集光的角度

n = 介質折射率 (refractive index of medium)

摩爾定律(Moore's Law)：光波波長的摩爾遊戲

- 半導體產業所使用的曝光機的光源從早期的可見光(White light)、紫外光(G-line/I-line)、深紫外光(DUV)，一直到現在的極紫外光(EUV)。



摩爾定律 (Moore's Law)

- 約每20個月(1.67年)，積體電路內可以包含的電晶體數目會加倍(每個電晶體面積減半)。
- 因此每世代的半導體製程技術節點(Technology Node)以70%比例微縮。



TSMC 如何在製程完勝 Intel ?

1. TSMC挑戰光波的物理極限，成功的把193奈米的深紫外光(DUV)延續應用至7奈米的技術節點
2. TSMC接著採用極紫外光(EUV)成功量產7奈米及5奈米的技術節點

TSMC成功挑戰光波的物理極限 – 奇蹟 勤能補「拙」(自然的拙)

- TSMC首創24小時三班輪班研發制度以縮短摩爾定律的週期
- 台灣的摩托車文化：擠、彈性
一個技術節點的製程模組或使用的材料，繼續使用到下面幾代技術節點，直到真正無法使用，才更換新的模組及材料。
- 龜兔賽跑：持續逐步改善(Continuous & Incremental Improvement)的文化
例如1990年到1995年5年內，沒有完全遵循摩爾定律，而是漸進式的逐步開發了0.8、0.7、0.65、0.6、0.55、0.5、0.45微米到0.35微米八代製程技術。

TSMC成功挑戰光波的物理極限 – 奇蹟

193奈米的深紫外光(DUV)如何被應用於7奈米的技術節點 (I)

I. 浸潤式曝光(Immersion Lithography)：

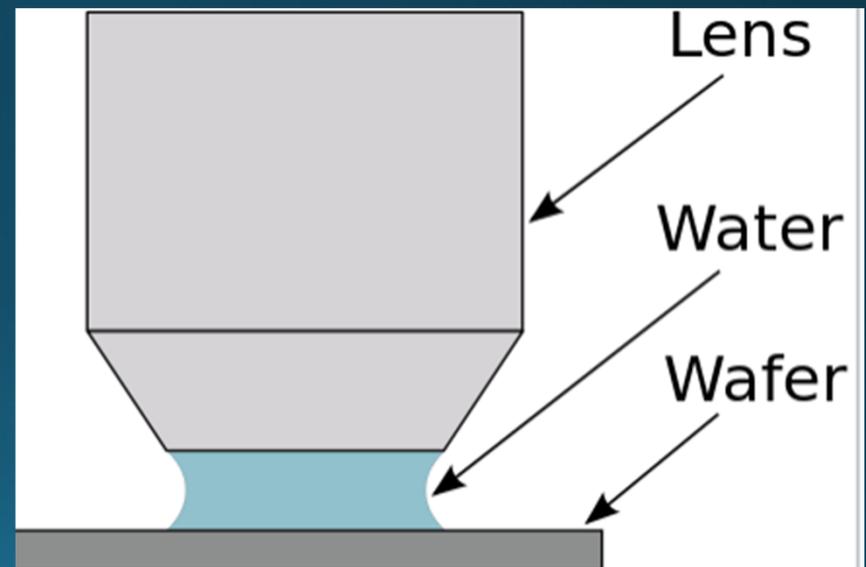
在光學鏡頭和晶圓之間加上一層水，讓光波波長變短。

$$\lambda_w = \lambda_a / n = 193nm / 1.33 = 145nm$$

λ_w = 光於水中的波長

λ_a = 光於空氣中的波長

n = 水中折射率 (refractive index in water, 1.33)



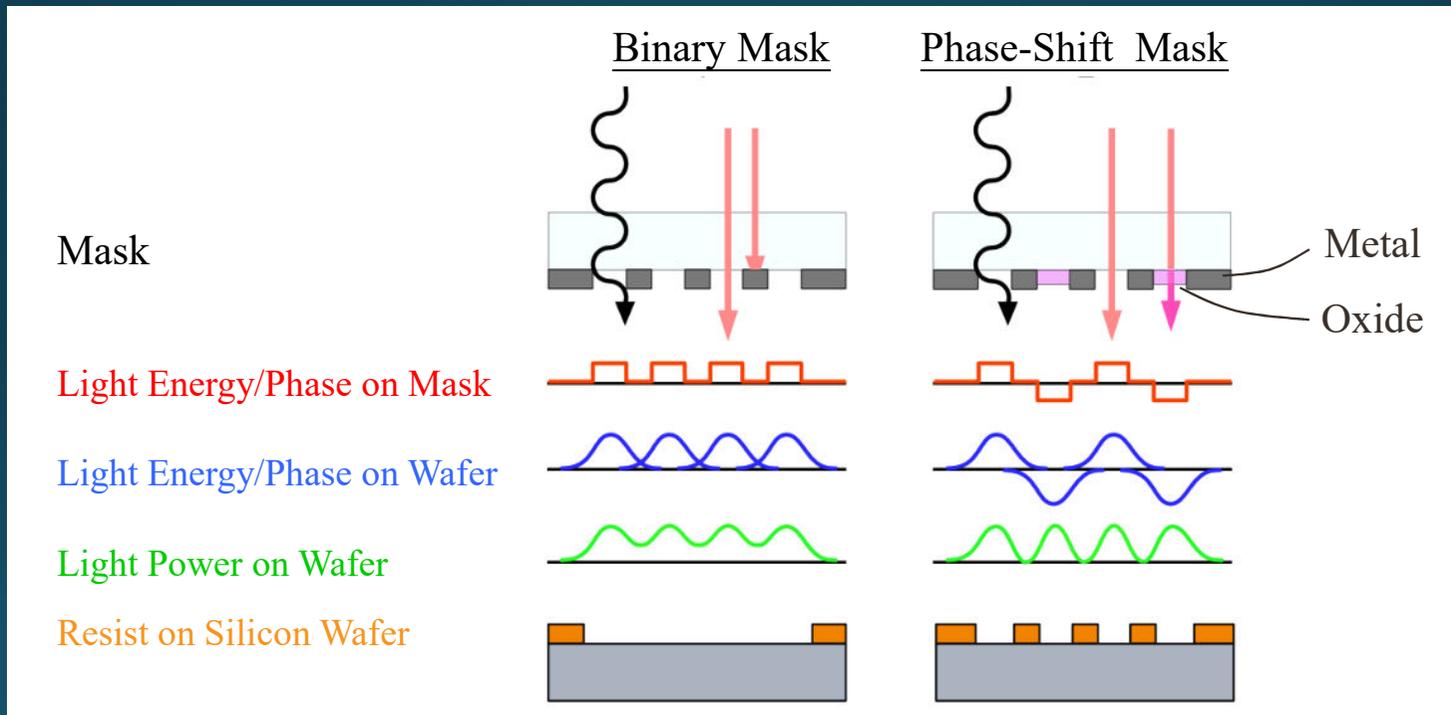
https://en.wikipedia.org/wiki/Immersion_lithography

TSMC成功挑戰光波的物理極限 – 奇蹟

193奈米的深紫外光(DUV)如何被應用於 7奈米的技術節點 (II)

II. 相位移光罩(Phase-Shift Mask) :

在光罩上加一層位移氧化物，產生干涉圖案在晶圓上，以增強光波解析度。



https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-shift_mask

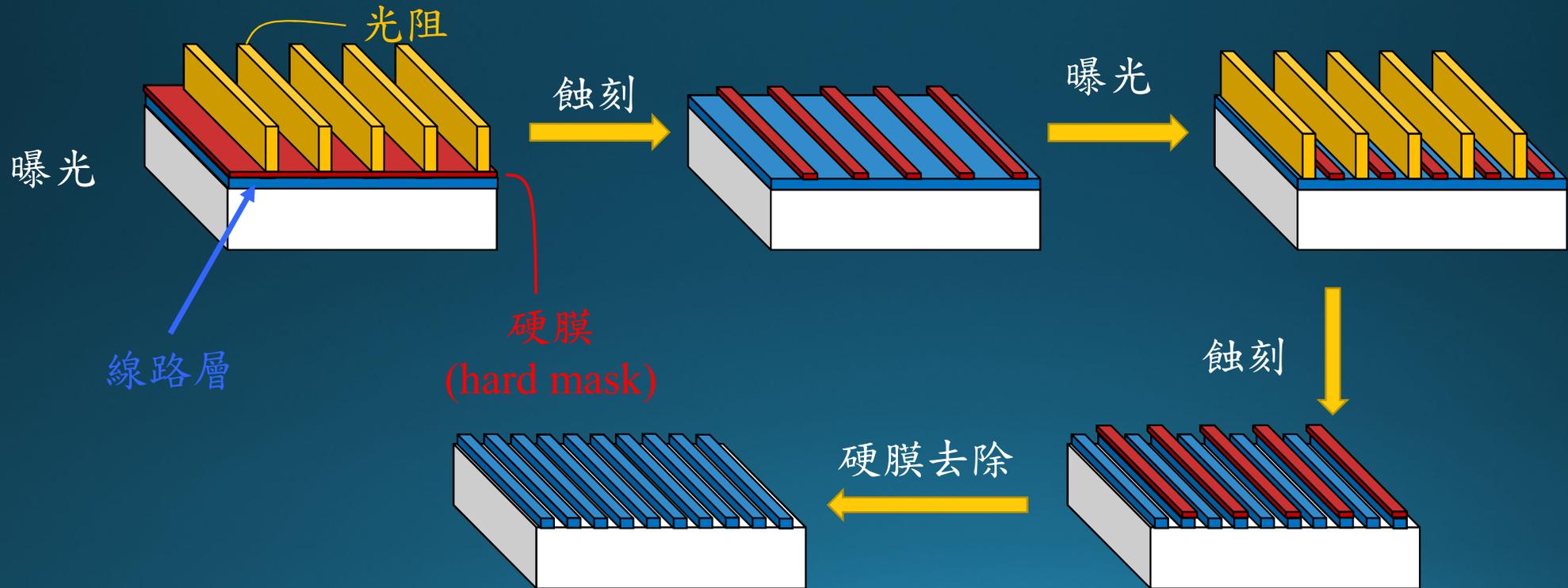
iCometrue / 成真 4/2022

TSMC 挑戰光波的物理極限成功 – 奇蹟

193奈米的深紫外光(DUV) 如何被應用於 7奈米的技術節點 (III)

III. 多重曝光(Multiple Exposure)：

在晶圓上沈積一層硬膜，並將硬膜先曝光圖案，再蝕刻線路層。可多次重複此步驟。



TSMC 終於在2017 年10 奈米製程完勝 Intel

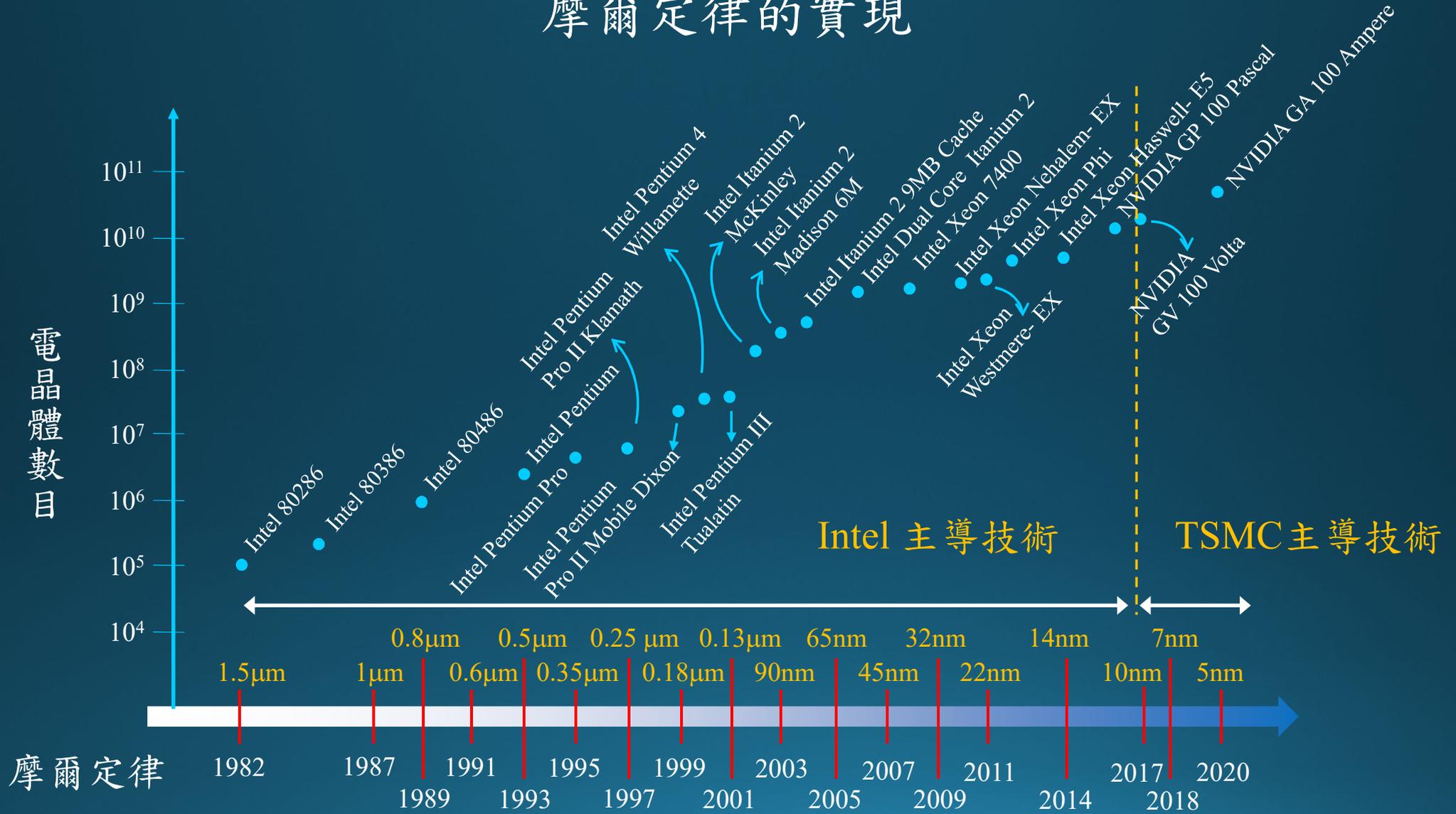
- TSMC成功利用193奈米的深紫外光(DUV)循序量產10奈米及7奈米技術節點的產品，因此可以繼續推展先進的技術節點，用極紫外光(EUV)量產7奈米及5奈米。
- Intel用193奈米的深紫外光(DUV)量產10奈米不順利以後，進退失據，終致輸掉製程寶座。

Intel CEO Pat Gelsinger (於2021/3/23 “Intel Unleashed: Engineering the Future”的線上演講)：

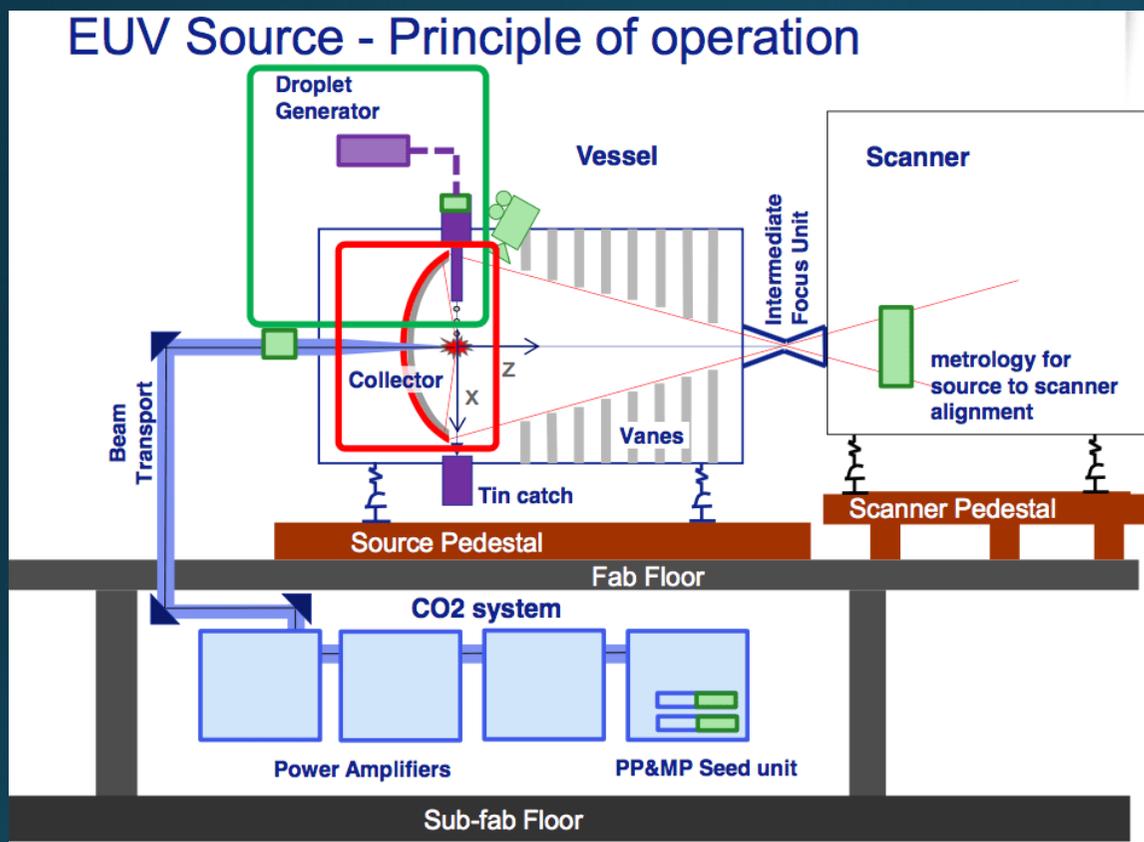
When Intel initially designed 7 nanometers, EUV was still a nascent technology so we developed our process to limit the use of EUV. But this also increased the process complexity. As EUV then matured and became more reliable, **we experienced the domino effects (骰牌效應) of our 10-nanometer delay which pushed out 7-nanometers and ultimately put us on the wrong side of the EUV maturity curve.**

<https://www.nextplatform.com/2021/03/24/the-once-the-future-and-the-fabulous-intel/>

摩爾定律的實現



鬼斧神工、巧奪天工的EUV曝光機

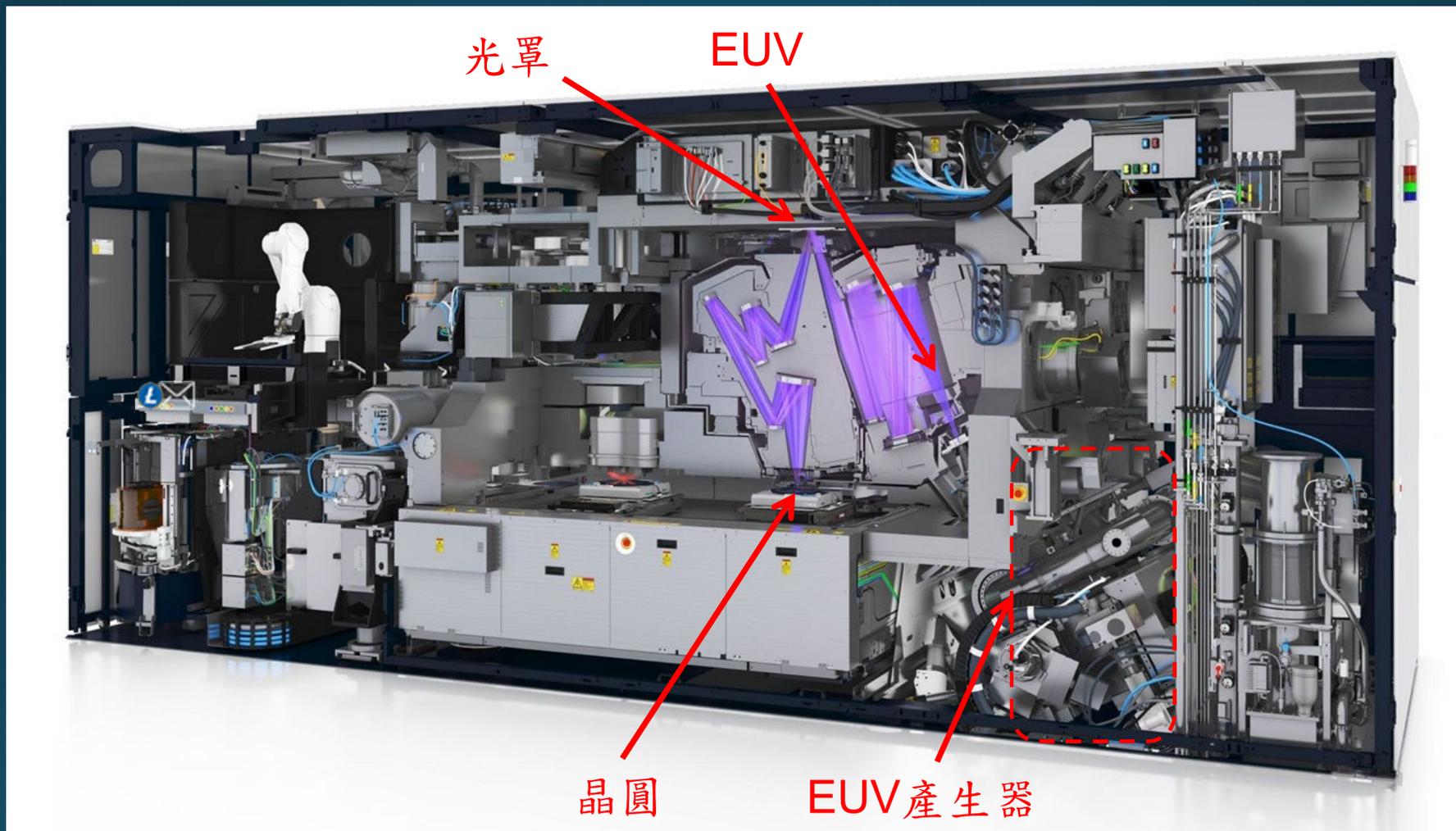


1. CO₂ 雷射波長 ($\lambda=10.6$ 微米)
2. 用CO₂雷射轟擊錫滴(每秒五萬次)將其蒸發成為氣體並使氣體變成電漿 (Laser Produced Plasma, LPP)。
3. 電漿溫度高達 4×10^5 度(30eV)，其能量激發錫原子，形成帶多價電離子的高能狀態(Sn⁺⁸ – Sn⁺¹⁹)。
4. 當高能狀態的多價電離子和電子結合，回到較低能的離子狀態或原子時，就會產生EUV。

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6595/ab3302/pdf>
<https://semiengineering.com/why-euv-is-so-difficult>

- 高溫高熱產生離子，就像太陽(恆星)用高溫高熱的能量暴力產生光一樣。
- 一台輸出功率為250瓦的曝光機，需要輸入1.25 MW的電力(轉換效率 0.02%)；工作一天就會消耗3萬度電。

EUV 曝光機



<https://technews.tw/2021/02/15/euv-mass-production-of-lithography-technology/>

iCometru / 成真 4 / 2022

三台大卡車載著EUV到TSMC台南晶圓廠，2020年8月



<https://www.ctwant.com/article/67825>

另一顆逐漸升起的人造太陽— MIT Commonwealth Fusion Systems

1. EUV曝光機是用CO₂雷射在光束焦點(Beam Focus)小區域範圍內激發產生高溫(4×10^5 °C)高熱的錫電漿，因此這高溫高熱電漿便不會碰觸到反應爐的側壁，當高能狀態錫離子掉回低能狀態時，就產生EUV光源。
2. CFS的核融合用磁場去匡住高溫(1×10^8 °C)高熱的質子/電子電漿，使其不碰觸反應爐的側壁，並使其產生核融合反應，而輸出巨大能量。

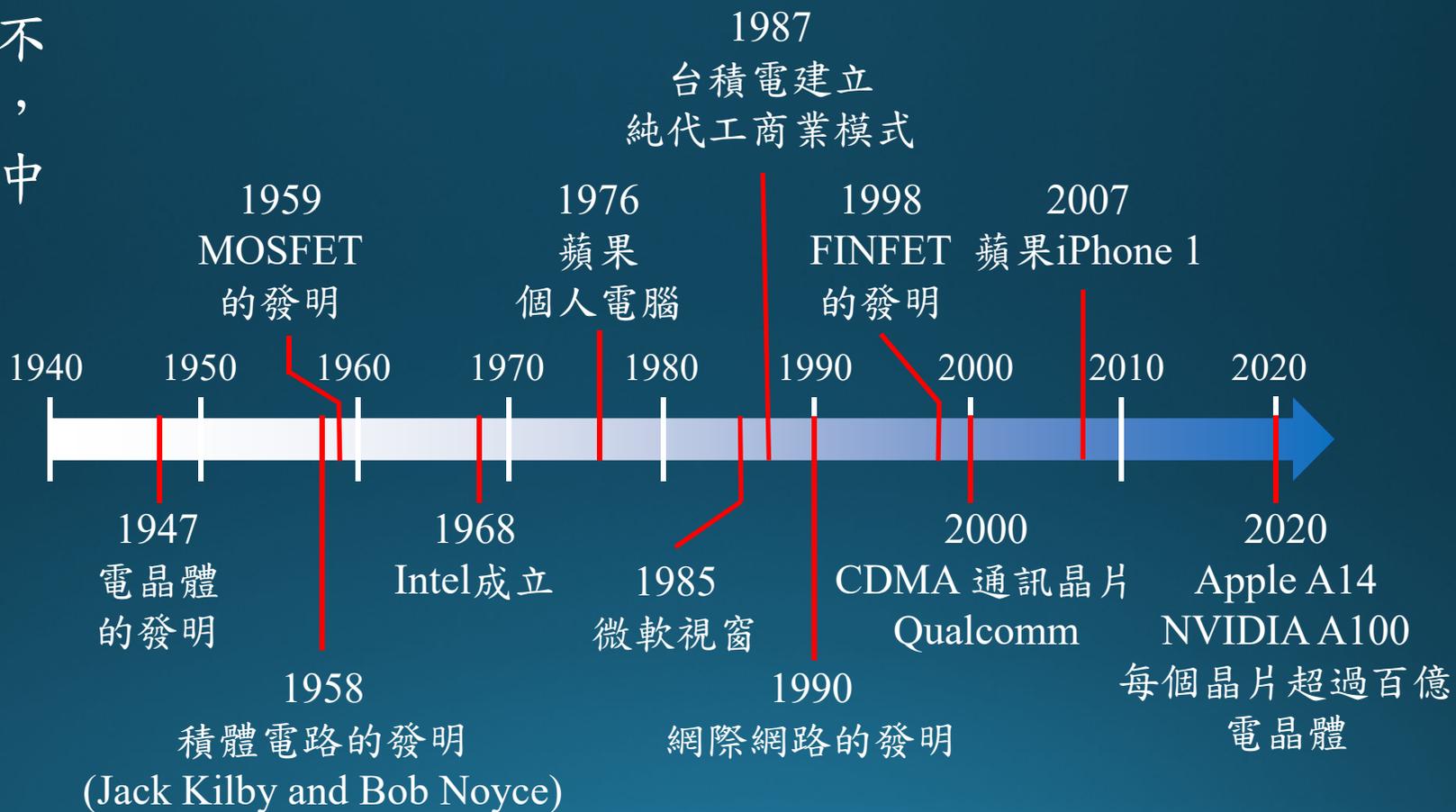
第一顆人造太陽EUV已經成功量產；如果MIT CFS核融合的第二顆人造太陽能受到EUV Machine的啟發和鼓勵，成功運轉，輸出巨大能量，則這兩顆人造太陽，將徹底改變人類的文明。

第三課

半導體精彩神奇旅程的主要里程碑

半導體世界發展中主要里程碑 – 譜成一部史詩 (Epic Poem)

積體電路精彩神奇旅程中有數不完的美麗景點，我個人選出其中12個景點：



兩個我最有感的里程碑

1. 2007 年蘋果的智慧型手機 iPhone 1
 - 我創辦的米輯電子公司賣給美國最大的智慧型手機晶片公司 (2009年)
2. 1987 年台積電的純代工製造商業模式
 - 我有幸參與其中(1990 年 - 1997 年)

兩個我最有感的里程碑 – 故事1

2007年蘋果 iPhone 1 的誕生



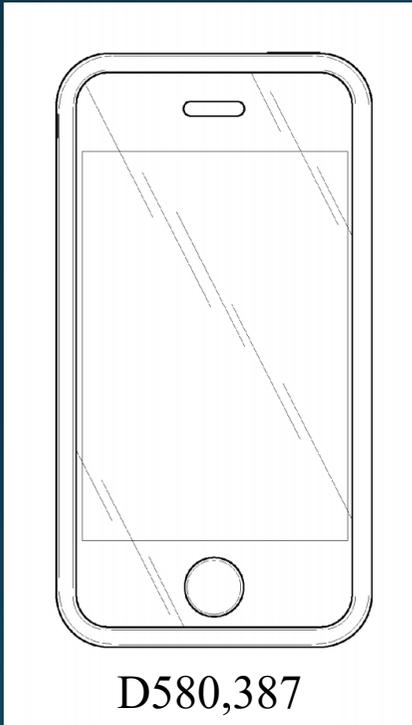
iPhone 1

[https://en.wikipedia.org/wiki/IPhone_\(1st_generation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/IPhone_(1st_generation))

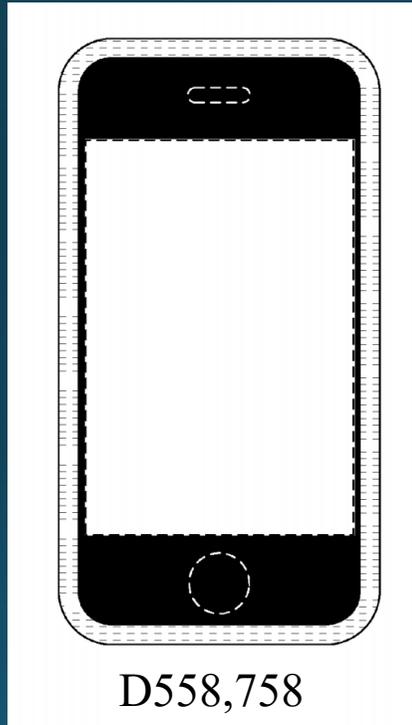
- 大眾開始意識體會到半導體對人類的重要，可以很清楚的說是在2007年：蘋果第一支智慧型手機iPhone問世時(蘋果在2004年開始iPhone產品開發，以Project Purple為代號)。
- 1976年個人電腦的發明只是改變人類的工作方式(working style)；但是2007年智慧型手機iPhone 1的發明則完全改變人類的生活方式(lifestyle)及人文文明。

iPhone的創新設計專利 (Design Patent)

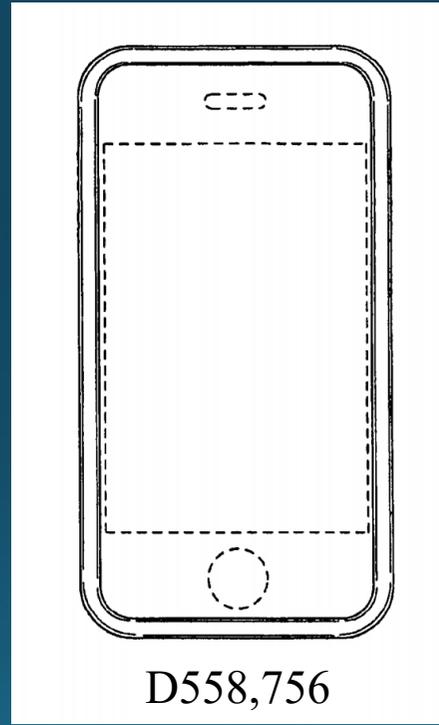
Filing Date:
1/5/2007



Filing Date:
1/5/2007



Filing Date:
1/5/2007



外觀：

沒有鍵盤

發明虛擬觸控鍵盤

我常想，如果賈伯斯現在還活著的話，智慧型電視及智慧型車輛會是什麼樣子？

2007 iPhone 1 S5L8900 處理器



設計: PA Semi

製造商: 韓國三星

規格:

- 90奈米節點
- 估計 1.375×10^8 個電晶體
- 晶片面積 72平方毫米 (8.8 mm x 8.5 mm)

https://second.wiki/wiki/samsung_s5l

<https://www.quora.com/How-many-transistors-were-on-the-first-iPhones-processor>

“The one Device: The Secret History of the iPhone” by Brian Merchant

2020 iPhone 12 A14 仿生 (Bionic) 晶片



設計: Apple

製造商: 台積電

規格:

- 5奈米節點
- 1.18×10^{10} 個電晶體
- 晶片面積 88平方毫米 (10.3 mm x 8.6 mm)

运算能力: 其神經引擎每秒可以執行 11×10^{18} 個任務

<http://news.moore.ren/industry/261391.htm>

兩個我最有感的里程碑 – 故事1 (續)

2007年蘋果 iPhone 1 的誕生

- 美國最大的**智慧型手機晶片公司**買了我創辦的**米輯電子公司**(2009年)
 - 革命性的iPhone 將原來兩個沒有關聯的**通訊產業**和**電腦產業**結合在**智慧型手機**內。
 - iPhone 1 出現後，引發許多有關的專利訴訟案及通訊專利購買潮
 - ◻ 2011年，**Apple**，**Microsoft**，**Sony**和**RIMM**以45億美元，合買了加拿大**Northern Telecom**的**通訊專利**。
 - ◻ 2012年，**Google**為了**通訊專利**，以125億美元買下**Motorola Mobility**。
 - 美國最大的**智慧型手機晶片公司**進入**電腦晶片**領域，為了嚇阻強大的**電腦晶片公司**提出**專利侵權**訴訟，因此買了我創辦的**米輯電子公司**(2009年)。
- **哈佛大學**在2007年成立了**工學院**
 - 哈佛大學多年來一直在爭辯是否應該把「**Division of Engineering and Applied Sciences**」(DEAS)提升為「**School of Engineering and Applied Sciences**」(SEAS)。
 - 哈佛大學總認為旁邊已經有個工程很強的麻省理工學院(MIT)，哈佛沒有必要把工程科系擴大成工程學院。
 - 直到2007年，哈佛大學才很清楚的體認到**科技**已經開始影響了哈佛一直引以為傲的**人文社會科系**。也就在同一年，哈佛成立了**工學院**。

兩個我最有感的里程碑－故事2

台積電的純代工商業模式

- TSMC 首創純代工商業模式：

投資巨額(早期數百億元台幣，現在數千億元台幣)，生產客戶設計的晶片產品，只做製造服務，自己沒有產品，視客戶的產品如自己的產品，不和客戶競爭；客戶也視TSMC的工廠如自己的工廠。

- TSMC: Taiwan Semiconductor Manufacturing Company
台灣積體電路製造股份有限公司

天佑台灣！TSMC取名時，強調了台灣及製造兩大特色；果真台灣製造 (Made In Taiwan, MIT)終於在半導體製造贏過 Intel，成為台灣的護國神山。

兩個我最有感的里程碑－故事2 (續)

台積電的純代工商業模式

- 台積電首創半導體產業的純代工商業模式，此純代工商業模式乃是「共享產能」的概念。台積電辛勤及聰慧的把「共享產能」的商業模式成功地發揮到極致。有趣的是，後來其他產業的新創公司，例如Airbnb「共享住宿」，Uber「共享乘車」以及WeWork「共享辦公室」也成功地採用了「共享產能」相同概念的商業模式。
- 尤有甚者，台積電純代工商業模式更擁有「共享製程技術」的獨特優勢。台積電每一代製程技術的開發及生產，都經過眾多不同客戶設計的產品驗證。每一客戶的產品應用(Application)不同，設計的習性(Style)不同，因此可以多方偵錯(Debug)製程技術的弱點。台積電根據各個客戶產品設計偵查到的弱點，展開失效模式分析(Failure-Mode Analysis)，找出失效原因；然後再根據失效原因，修改製程技術，或是訂定新的設計準則(Design Rules)。因此台積電的每一代製程都成為眾多不同客戶應用的，具有寬大製程窗口(Wide Process Window)的高良率共同製程(Common Process Technology)。

<https://www.cw.com.tw/article/5034316>

兩個我最有感的里程碑－故事2 (續)

台積電的純代工商業模式

- 為了增加製造在產業供應鏈中的價值，台積電一開始就注重開發高良率低成本的「大量生產」技術，這樣的量產技術每個月必需生產達到1萬片以上的晶片且具穩定良率，才算開發技術開發成功。這樣具有成本效益的量產技術跟產出1片，10片，或1000片的小量生產技術有很大的不同。
- 還有一個重要的晶片製造概念是，台積電很早就用非常昂貴的失效模式分析儀器做為生產中重要製程步驟的線上監控，例如KLA 晶圓缺陷檢驗(wafer defect inspection)儀器，掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)等。當時一般半導體公司都只用這些昂貴的儀器來執行生產完成後成品的失效模式分析，台積電卻拿它們來做生產線上的製程監控；也就是說台積電的晶圓製造過程，不是摸黑走暗路，而是一路點著燈，睜大眼睛往前走，因此晶圓可以平安順利抵達終點。這個線上監控的觀念大大的提升了晶片的生產良率。

台積電從早期的大眾創新平台到現在的貴族創新平台

• 大眾創新平台(Public Innovation Platform)

- 1990年到1997年我在台積電任職的時候，一個有創意的IC設計高手，只要募資幾十萬、或一兩百萬美元，就可以創辦IC設計公司，設計IC晶片，到台積電利用1微米到0.35微米製程技術，實現他的夢想。
- 現在的輝達Nvidia、高通Qualcomm、博通Broadcom、邁威爾Marvell、瑞昱及當年數百，數千的IC設計公司都是這樣起家的。
- 當時，群雄並起，百家爭鳴，有些公司一路長紅至今；有些公司興盛一時，成為一代拳王；有些公司血本無歸，黯然退場。這劇烈的競爭，也造就了2007年改變人類生活方式的iPhone的誕生(2007年的iPhone用了很多新創IC設計公司在台積電生產的晶片)。

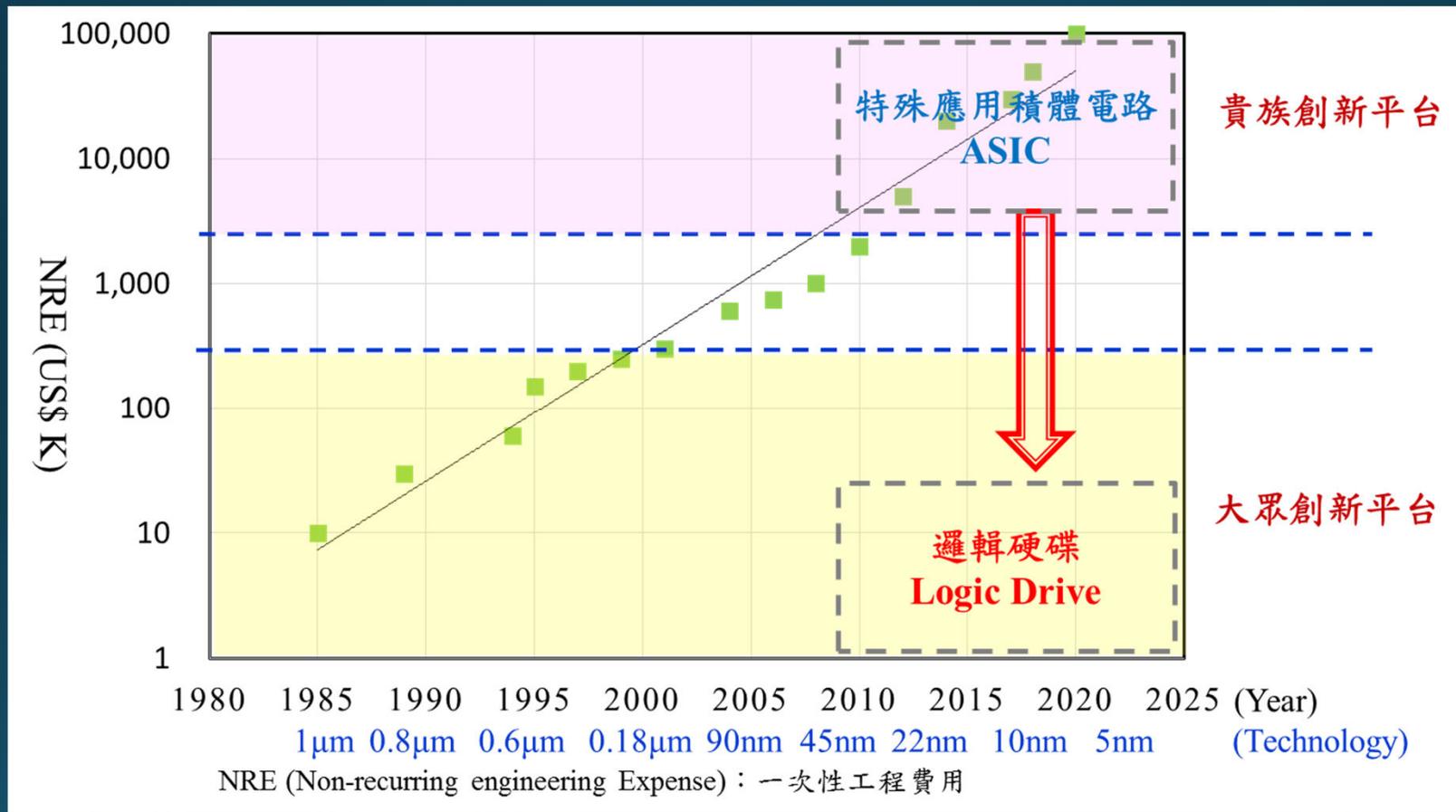
• 貴族創新平台(Club Innovation Platform)

- 建立一條完整的7奈米製程產線設備成本大約150億美元。
- 開發一個10奈米IC晶片大約要幾千萬美元，或甚至上億美元。單是10奈米光罩一套就是300萬美元，7奈米光罩一套就是900萬美元。
- 只有像Apple等系統公司或是大型IC設計公司如高通、聯發科、NVIDIA及AMD等，才有資源玩10奈米以下先進製程的遊戲。

成真公司提出「邏輯硬碟」(Logic Drive) 的概念

- 2016年，成真公司提出「邏輯硬碟」(Logic Drive)的概念：
 - 希望提供一個新的途徑，讓有創意的晶片設計高手，只要募資幾十萬或一兩百萬美元，就可以創立新的IC設計公司，把他的創意用台積電10奈米以下的先進製程實現。
 - 邏輯硬碟也可以經由重新編程組態(Re-Configuration)改變硬體線路來改變邏輯運算，並加以儲存在先進封裝內的非揮發性快閃記憶體晶片；這就像固態硬碟(SSD: Solid-State Drive 或Solid-State Disk)儲存記憶數據一樣，可以改變、儲存並重複使用(Re-Use)記憶數據；只是邏輯硬碟改變、儲存並重複使用(Re-Use)的是邏輯運算而已。

邏輯硬碟使貴族創新平台回到從前的大眾創新平台



「邏輯硬碟」(Logic Drive) 的概念

- 利用軟體定義改變硬體線路的IC晶片。
- 邏輯硬碟使用標準大宗FPGA(現場可程式化邏輯閘陣列)小晶片(chiplet)：
 1. 10奈米以下，FPGA晶片電晶體數目夠多，速度快、耗能低。
 2. 把FPGA晶片標準化，成為像DRAM一樣的大宗商品(Commodity)，價錢便宜。
 3. 將多顆標準大宗FPGA小晶片，利用先進的封裝技術做成硬碟，更倍增電晶體數目。
 4. 新的FPGA晶片架構及演算法: FPGA晶片具有類似人腦的可塑性(Elasticity)及整合性(Integrality)，在人工智慧的應用及機器學習，可以不斷的激發出新的架構及演算法，例如Coarse-Grained Reconfigurable Architecture (CGRA)，預期未來FPGA功能的提升可能會超出想像。
- 如此一來，FPGA晶片價格大幅下降，耗能低且速度及功能大增。
- 聰明有創意的IC設計者，買了邏輯硬碟就可以把他的創意，透過軟體寫進10奈米以下先進製程的FPGA晶片，很便宜的實現他的理想。

台積電同時提供大眾創新平台和貴族創新平台

- 如果台積電能夠提供一部分10奈米以下先進製程的產能，生產大宗標準FPGA小晶片(Standard Commodity FPGA Chiplet)，用來組成「邏輯硬碟」。
- 讓99%有創意的積體電路設計者，也能參與10奈米以下先進製程的遊戲，則台積電首創的純代工商業模式更臻近完美，對人類文明的貢獻及影響，將永留青史。

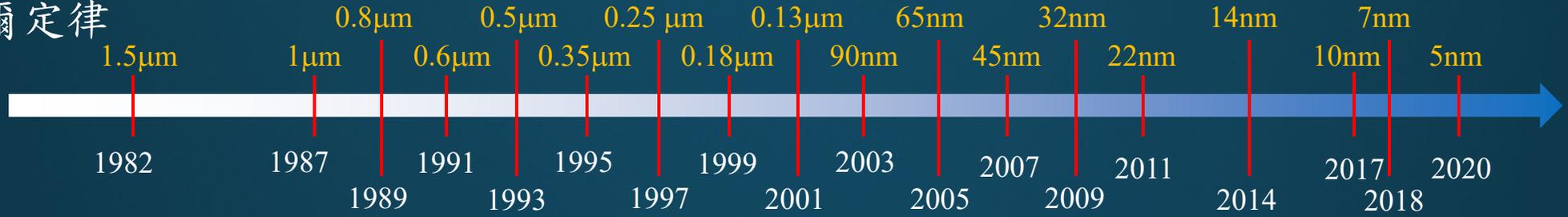
第四課

我的摩爾人生

-- 兩進兩出摩爾定律

我的摩爾人生－我的職場生涯沈浮在摩爾定律的浪潮中

摩爾定律



Moore's Law

More than Moore

Moore's Law

More than Moore

Moore's Law and More than Moore

1982-1984年: IBM

進入摩爾定律，參與開發第一代和第二代CMOS製程，CMOS 1(1.0 微米)及CMOS 2(0.8 微米)

1990-1997年: 台積電

帶領研發團隊，遵循摩爾定律，開發從 0.8, 0.7, 0.65, 0.6, 0.55, 0.5, 0.45 微米到 0.35 微米八代製程技術。

1985-1990年: AT&T Bell Labs

因為預估曝光將在0.1-0.2微米時，達到光波長解析度的物理極限，決定離開摩爾定律的浪潮，開發非摩爾定律的技術。

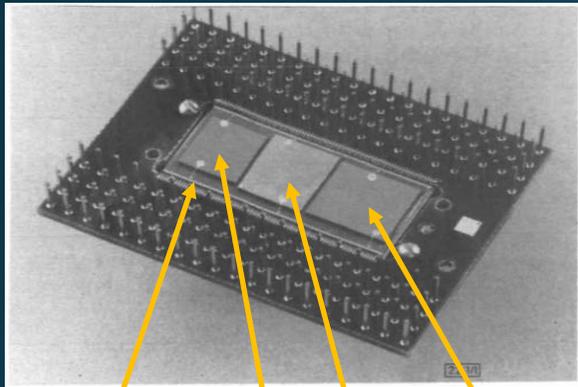
1999-2011年: Megic, Megica, Qualcomm

二度離開摩爾定律的浪潮，創辦米輯科技公司(Megic)，提倡開發MeGic技術。在摩爾定律浪潮中，很幸運的及格收場。

離開摩爾定律的艱難有趣歲月

AT & T Bell Lab

Multi-Chip Module based on Silicon Substrate

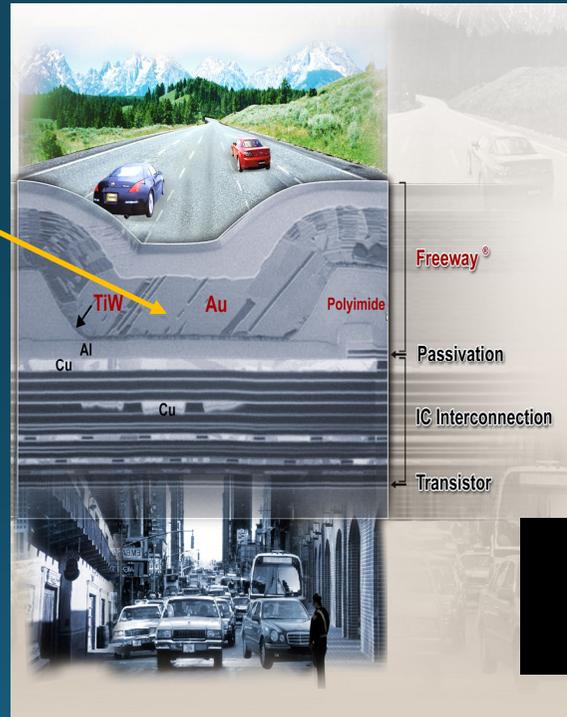


矽基板
含有金屬連線
MMU
CPU
FPU

Cryogenic performance of a CMOS 32-bit microprocessor subsystem built on the silicon-substrate-based multichip packaging technology; M.S. Lin ; A.S. Paterson ; H.T. Ghaffari; Electronics Letters, Volume 26, Issue 14, 5 July 1990, p. 1025 – 1026

Megic 米輯科技 / Megica 米輯電子

Freeway Technology



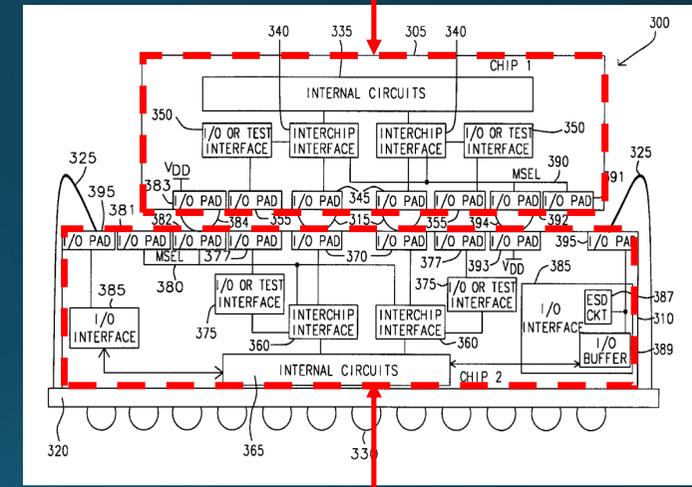
Freeway

金屬連線

US Patent #6,383,916
Filing Date: 2/17/1999
Inventor: Mou-Shiung Lin

MeGic Technology

Memory Chip



Logic Chip

US Patent #6,180,426
Filing Date: 3/1/1999
Inventor: Mou-Shiung Lin

在摩爾定律及非摩爾定律之間，現在的我是如何抉擇呢？

- 如前所述，我在2016年提出邏輯硬碟的概念，把摩爾定律及非摩爾定律結合在一起：
 - 一方面，利用摩爾定律的神奇魔力，應用10奈米以下先進製程製作的標準大宗FPGA晶片所提供超過百億個高效能、低耗電的電晶體；
 - 另一方面，利用非摩爾定律的先進微縮的多晶片封裝技術，將多顆標準大宗FPGA晶片與一些輔助及協同晶片封裝在一個包裝內，以倍數增加電晶體的數目。
- 有趣的是，先進的多晶片封裝的尺寸微縮(Miniaturization)過程也走上像晶片發展一樣的摩爾定律老路：每單位面積或體積內的電晶體數目逐年不斷的增加。

第五課

「數大便是美」

當數目趨近無窮大時，就會產生 高端智慧及神奇魔力

徐志摩散文「西湖記」

「數大」便是美

碧綠的山坡前幾千隻綿羊，挨成一片的雪絨，是美；
一天的繁星，千萬隻閃亮的眼神，從無極的藍空中下窺大地，是美；
泰山頂上的雲海，巨萬的雲峰在晨光裏靜定著，是美；
大海萬頃的波浪，戴著各式的白帽，在日光裏動盪著，起落著，是美；
愛爾蘭附近的那個「羽毛島」上棲著幾千萬的飛禽，夕陽西沉時只見一個
「羽化」的大空，只是萬鳥齊鳴的大聲，是美；……數大便是美。
數大了似乎按照著一種**自然律**，自然的會有一種特別的**排列**，一種
特別的**節奏**，一種特殊的**式樣**，激動我們**審美的本能**，激發我們**審
美的情緒**。

這段描述也許是這場演講內容最佳、最美、最動人的寫照。

當數目趨近無窮大時，就會產生 高端智慧及神奇魔力

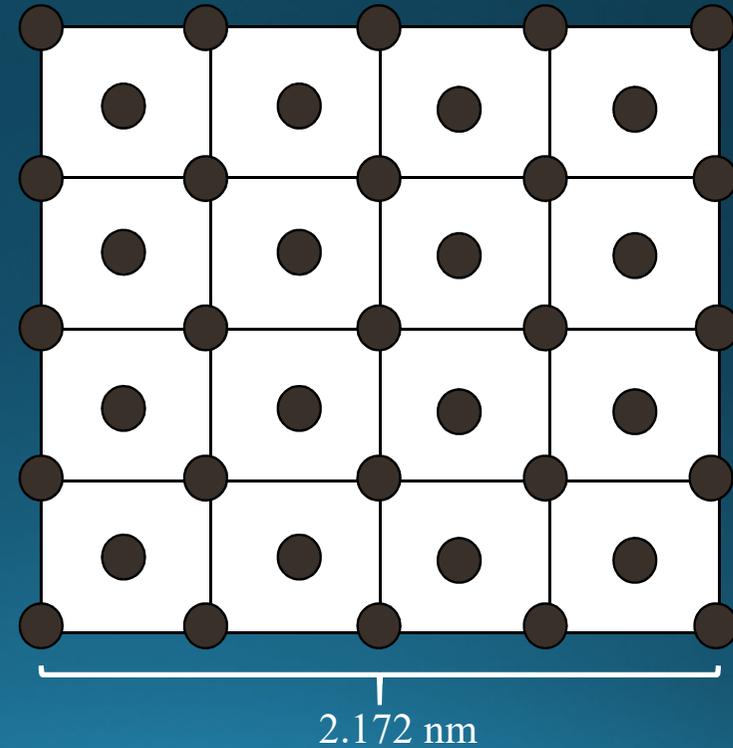
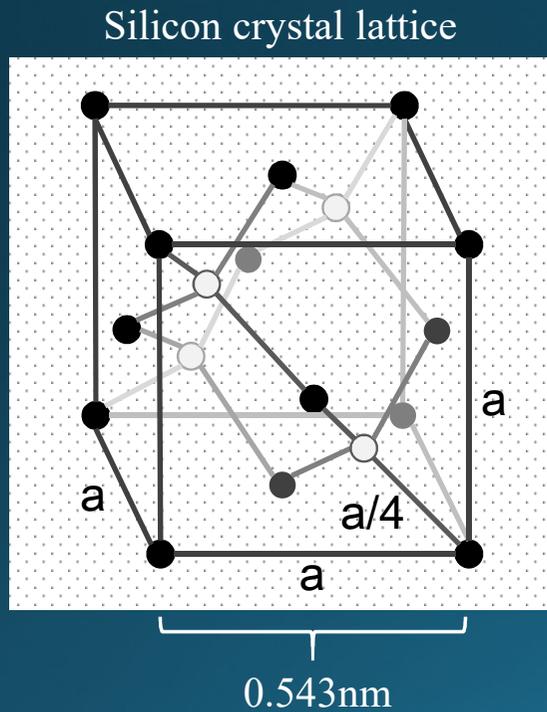
- 人腦有 10^{11} 個腦神經元 (Neuron) 細胞，而現在的一個半導體晶片遵循摩爾定律已經含有 5×10^{10} 個電晶體。
 - 2015年，人類偵測聽到重力波，證實了百年前愛因斯坦提出的廣義相對論
 - 2016年，人工智慧 AlphaGo 打敗世界最頂尖圍棋高手

這些震驚世人事件的背後，都有半導體晶片電晶體數目暴增到百億的影子。

驚人的工藝：2奈米的尺寸的電晶體

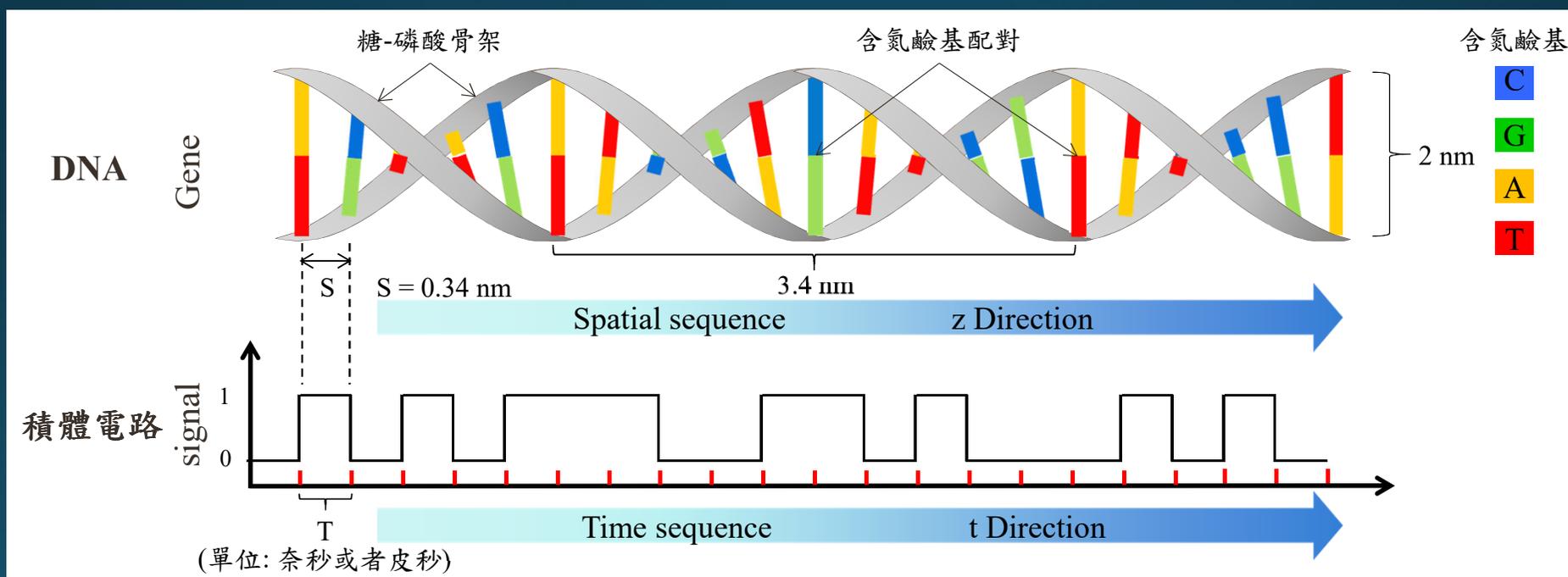
- 2奈米×2奈米的面積含有41個矽原子
- 人類已經有能力可以利用2奈米技術節點設計並量產只含41個原子的區域

人類可以匡住幾個原子來把玩嗎？



人造的積體電路和自然界的 DNA 有微妙深邃的相似性

特性	積體電路	自然界的DNA
信息傳遞法則	以0和1兩個數位，依據在 時間的序列(Time sequence) 忠實精準的傳遞訊號，其中時間週期(T)以 奈秒或者皮秒(pico-second) 為單位。	以A(腺嘌呤)、T(胸腺嘧啶)、C(胞嘧啶)以及G(鳥糞嘌呤)四種含氮鹼基，形成A-T和C-G配對，依據含氮鹼基配對在 空間的序列(Spatial sequence) 忠實精準的傳遞基因，其中空間週期(S)為 0.34奈米 (兩個相鄰含氮鹼基配對的距離)。
摩爾定律	工作法則遵循時間的序列，但其 尺寸大小 卻依據摩爾定律做 空間的微縮(Space Miniaturization) 。	工作法則遵循空間的序列，但其 基因定序所需的時間 卻是依據類似摩爾定律做 時間的縮短(Time Shortening) 。
複製法則	光罩當模板(Molding Plate) ，精準的大量複製電路。	以兩股螺旋股幹當模具(Mold) ，精準的大量複製基因。



可能蘊藏著DNA Computing或是Quantum Computing 的線索和啟發？

- 從人造的積體電路和自然界的DNA有微妙深邃的相似性來觀察，時間和空間在自然界的DNA和人造晶片的積體電路扮演的角色也許隱藏著深邃的秘密。
 - 這和複雜的時間和空間物理原理有關嗎？
 - 這可能蘊藏著DNA Computing或是Quantum Computing的線索和啟發嗎？
- 時間和空間源遠流長、浩瀚無邊，其中隱含的物理深不可測，令人無法透徹了解，以致人們陷入迷惑無法自拔的深淵。

晶片產生驚人的智能

- 人腦有 10^{11} 個神經元數目，而現在的一個半導體晶片已經含有 5×10^{10} 個電晶體
- 一台EUV 1小時可以印150片晶圓，每片12吋晶圓上可以有2,000個晶片，一台EUV 1年可以產出：

$$2000 \times 150 \text{ 片} \times 20 \text{ 小時} \times 365 \text{ 天} = 2.2 \times 10^8 \text{ 個晶片}$$

$$2.2 \times 10^8 \text{ 個晶片} \times 5 \times 10^{10} \text{ 個電晶體} / 10^{11} \text{ 個腦細胞} = 1.1 \times 10^8 \text{ 個人腦}$$

- 一台EUV 1年可以產出的電晶體數相當於 1.1×10^8 個人腦的神經元數目，此人腦的數目已經接近2020年全世界1億4千萬新生嬰兒的數目。

閉起眼睛，深呼吸，想一想...
是歡欣，還是驚恐？

晶片產生驚人的智能－影響人類文明

• 增進人類文明

- － 半導體未來在解開自然奧秘，增進人類醫療健康及生活文明的活動中，將持續做出突破性的驚人貢獻。
 - 例如：最近芝加哥費米實驗室發現基本粒子Muon(渺子)在磁場中自旋的速度和現在已知的物理定律不合。以現在晶片的人工智能，一定可以找到答案，可能發現第五種基本力量或未知的基本粒子。

• 破壞人類文明

- － 自由民主制度和集權專制制度的劇烈衝突與對抗，可能產生：
 - 自由民主制度的菁英利用演算法，操作控制數據，予取予求。
 - 極權專制制度的獨裁政府利用合成造假洗腦，濫用人工智慧侵犯隱私，監視控制人民思想及行動。當人失去了思想和行動自由時，人也不成為人，將無異於禽獸了，這將是畢生從事半導體產業且有良知及人性的工程師所最擔憂不安的事情。

晶片產生驚人的智能－建立工程倫理

- 電晶體數目的暴增也同時帶來科技可能被濫用而產生巨大破壞毀滅性的危險，因此年輕的科學家及工程師必須及早建立工程倫理 (Engineering Ethics) 的道德及紀律。
- 跟隨摩爾定律，每一、兩年推出新一代的iPhone是對的嗎？對地球環境是友善的嗎？
 - Apple 致力於環保，但是否想過5、6年才推出一代iPhone，減少製造晶片、製造電池的耗電耗水耗材及到處挖礦？
 - 是否應該考慮改用邏輯硬碟，以軟體更新(Reconfiguration) 的方式重複使用晶片？
- 哈佛大學工學院和法學院共同任命教授，在2013年設立了Professor of Engineering and Law。
- 哈佛大學工學院在2018年首創開設工程倫理課程Embedded Ethics for Computer Science (EthiCS)，並在2019年1月舉辦第一屆全球「Conference on Ethics of Engineering」。現在正在計劃增加AI and Responsibility (AIR) 的研究與課程。

*i*Cometrue :

$$\textit{inspire} \times \textit{imagine} \times \textit{innovate} \times \textit{invention} \\ = \textit{i}^4 = \textit{1}$$

*i*⁴ 的真正意義：

- i*. 要充滿好奇心，用眼睛去看去讀，用耳朵去聽，用腦筋去想去得到啓發 (inspiration)；
- i*². 然後無邊無框的 (out of box) 去想像(imagine)；
- i*³. 最後把想像去蕪存菁，產生創新(innovation)；
- i*⁴. 並找出創新的實施例 (Embodiment)，這個實施例就是專利發明 (invention)。

$$i^4 = 1$$

一切：

空間 10^{27} 米(宇宙)到 10^{-9} 米(半導體)

時間 4.3×10^{17} 秒(138億年宇宙) 到 10^{-11} 秒(半導體)

存乎一心：

一即一切，一切即一

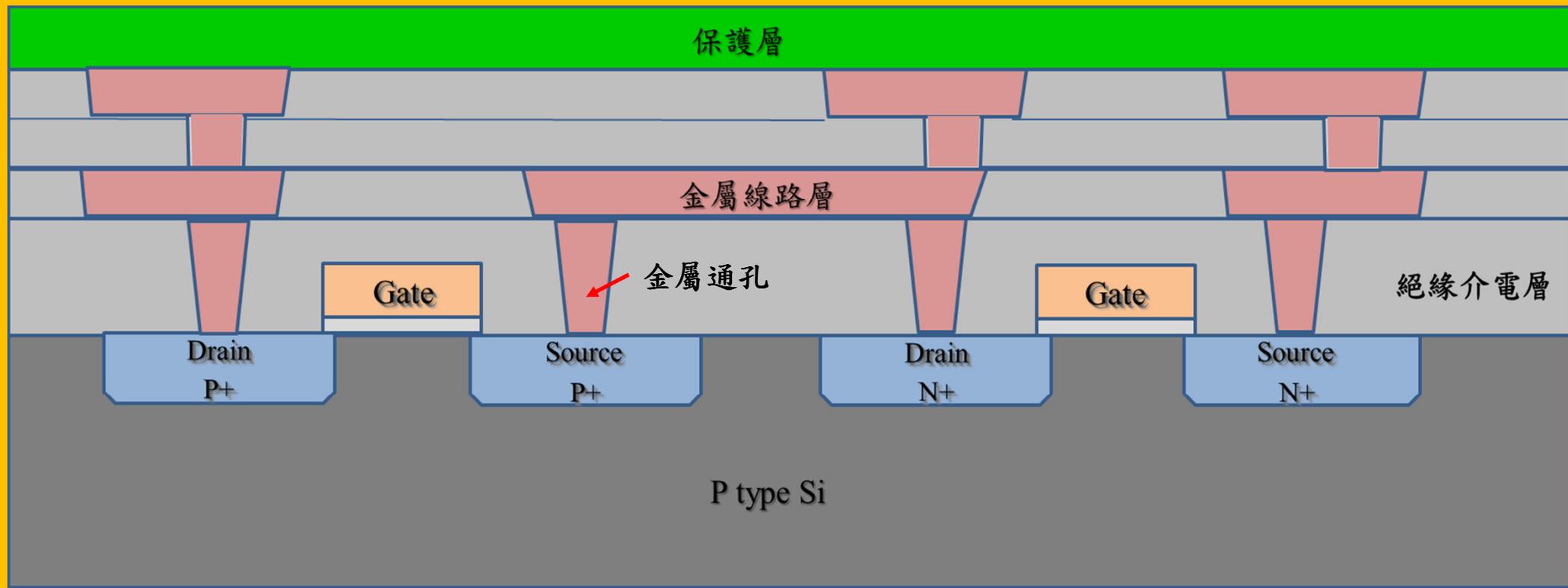
好奇心 想像力 價值觀

哈佛大學一直認為教育最重要的宗旨是建立學生**善良的道德倫理的價值觀**，而不只是知識的學習。哈佛大學認為學生畢業後，不管是當了總統、國會議員、公務員、軍人、教師、律師、醫師、會計師、工程師、企業家或商人，在做**生死存亡或關鍵抉擇時**，憑藉的是心中的**道德倫理觀及宗教信仰**，而不在於在學校所學習的知識。



附 錄

必要的基礎知識：積體電路積層 (IC Structure Layers)



必要的基礎知識：半導體技術節點(Technology Node)定義

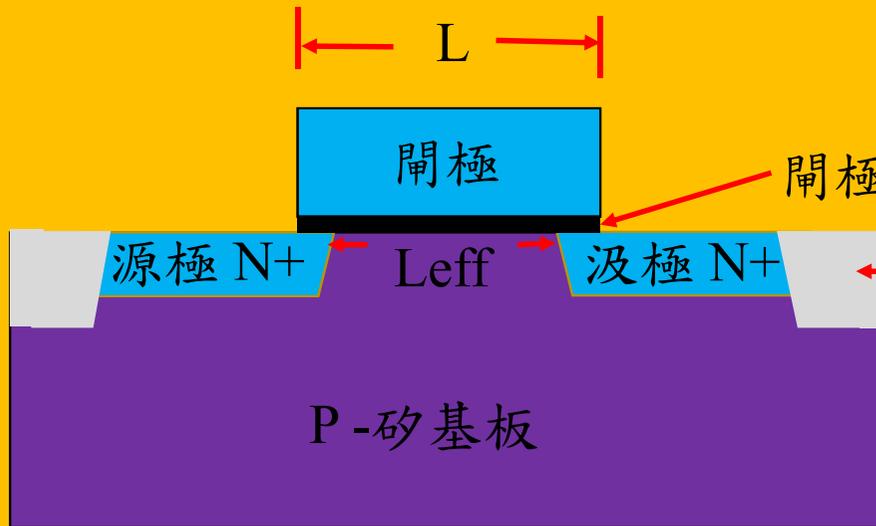
L/Leff 的尺寸就是技術節點

電流通道長度 (Channel Length, L)

有效電流通道長度 (Effective Channel Length, Leff)

平面電晶體 Planar MOSFET

20 奈米以前 (2014以前)



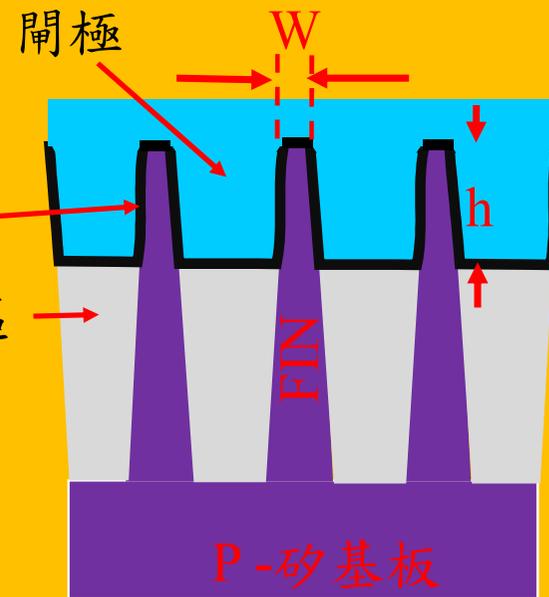
單位面積電晶體數加倍，則定義為下一個技術節點

電流通道寬度 (Channel Width, W)

有效電流通道寬度 (Effective Channel Width, Weff)

立體電晶體 FINFET

20 奈米以後 (2014以後)



$$W_{eff} = W + 2h$$
$$\text{電流} = k \frac{W_{eff}}{L_{eff}}$$

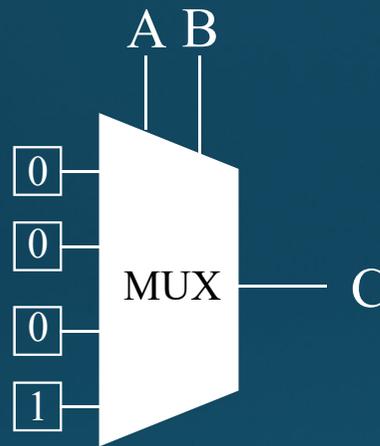
7 nm FINFET
W = 6 nm,
h = 52 nm,
Weff = 110 nm,
單位電流通道寬度的
電流增加 18 倍

邏輯硬碟 (Logic Drive)

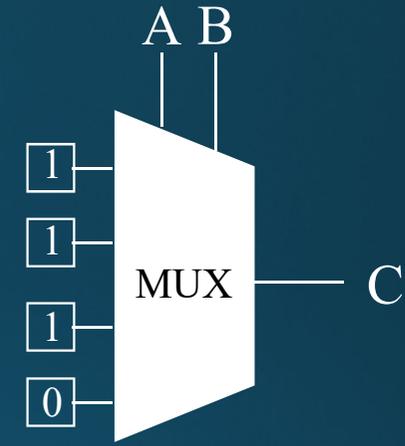
Software-Defined Hardware 用軟體改硬體晶片線路

FPGA Look Up Table 查找表

例如：一個硬體電路，只要在晶片上的記憶體存入不同的資訊，就可以做AND或OR不同的邏輯運算



A	B	C = A AND B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



A	B	C = A OR B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1