

摩爾旅程－電晶體數目爆增的神奇魔力

林茂雄 (M. S. Lin)

成真股份有限公司

iCometrue

<https://www.icometrue.com/>

2024年8月4日

- 點滴在心頭 Connecting Dots

今天演講內容是根據我2021年7月30日在居禮夫人高中化學營給高中生演講的講稿。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 Poem

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。

講課內容 (Contents of Lecture)

第一課：半導體世界的起源和演化－摩爾定律

第二課：神奇的曝光機－光波波長的摩爾遊戲

第三課：「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

結語：好奇心. 想像力. 價值觀.

附錄 A：活潑主動的電晶體－積體電路因此而產生智能

附錄 B：我的摩爾人生

第一課

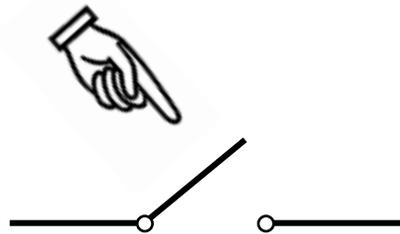
半導體世界的起源和演化－摩爾定律

- 半導體晶片是神賜給人類的神奇禮物，讓人類可以創造機械人 (AI Machine)。
- 天佑台灣，台灣得到恩賜，得以勤奮的製造這神奇禮物！
- 神賜給以色列人應許之地，也賜給台灣人摩爾定律。
(賴弘典醫師私訊)

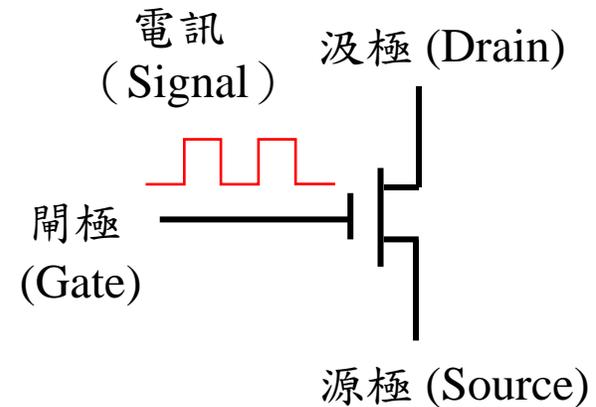
必要的基礎知識 I (Essential Basic Knowledge, EBK) – 電晶體

- 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)

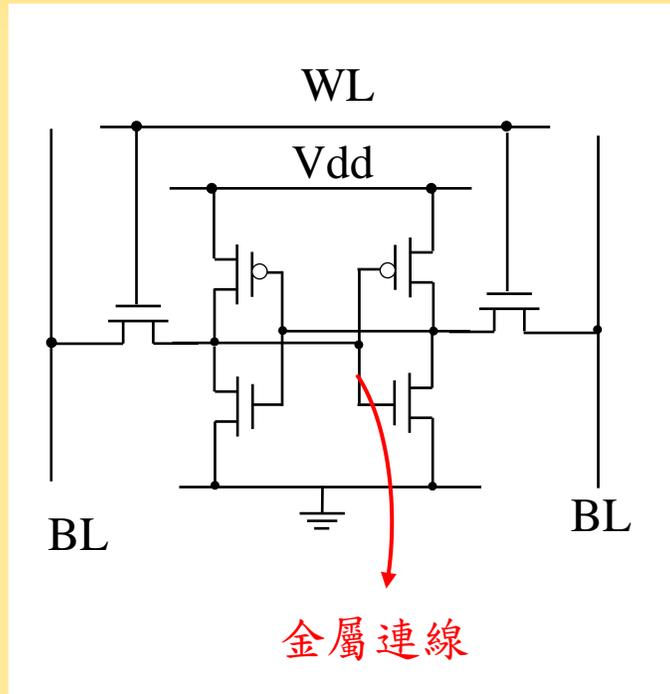


必要的基礎知識 II – 積體電路的基本電路 (Circuit)

記憶體

靜態隨機存取記憶體SRAM

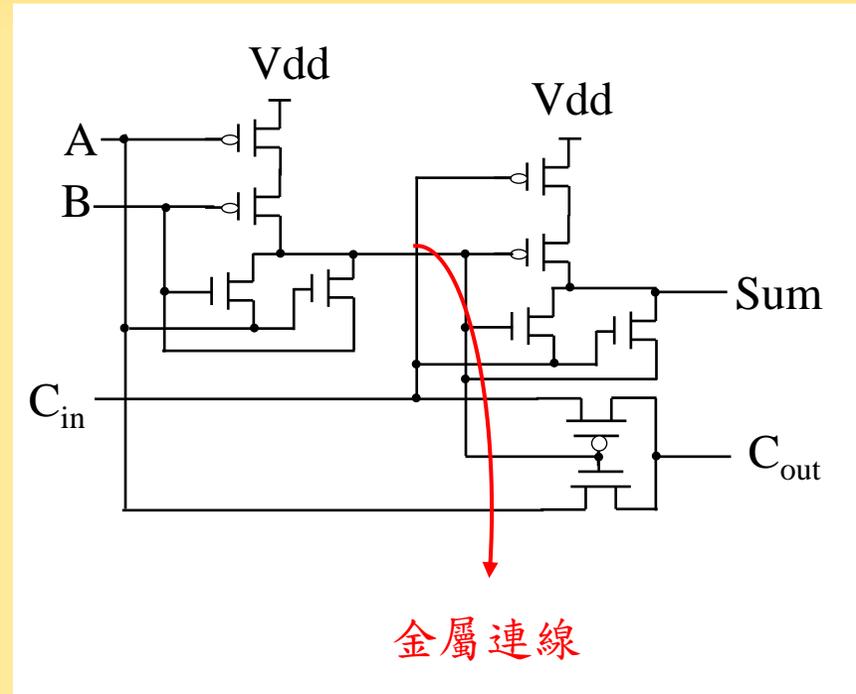
六個電晶體



計算電路

加法器

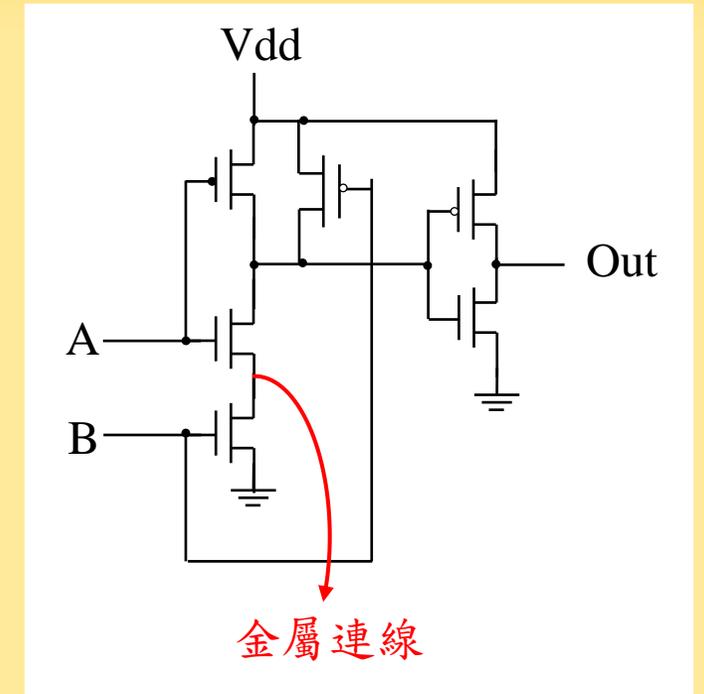
十個電晶體



邏輯電路

AND (交集)

六個電晶體

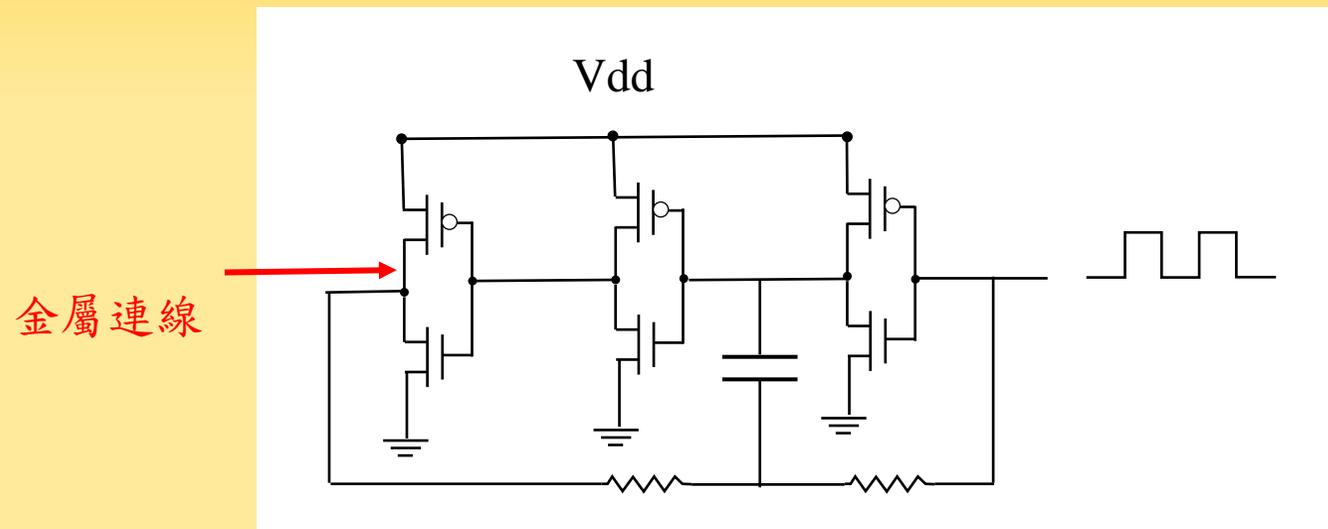


必要的基礎知識 III – 積體電路的基本電路 (Basic Circuit)

心跳線路

時鐘 (clock)

六個電晶體



- 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

必要的基礎知識 IV – 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) 非常傳神

活潑主動的電晶體—積體電路因此而產生智能

- 當你跟iPhone Siri對話時，開車用Google Map導航時，或用Skype視訊開會時，你是否曾經好奇的想知道這到底是怎麼回事？**答案很簡單，就是電晶體！**
- 可是要了解電晶體的運作原理，及電晶體何以產生此種類似人類的智能，那可就不簡單了！**需要動用到物理學的四大艱深學門：量子力學 (quantum mechanics)、量子熱力學 (quantum thermodynamics)、古典電動力學 (classical electrodynamics) 及古典熱力學 (classical thermodynamics)。**
- 當你了解電晶體的運作原理後，再低頭看看手上的iPhone，彷彿可以看到電子的形影，聽到電子的足音，進而摸到電子的身體，甚至細數電子的數目。
- 人不是神，但以人類卑微的能力，能夠**透徹了解電子行蹤，並巧妙的創造出控制操縱電子行蹤的電晶體**，著實令人讚嘆和驚豔！

半導體世界的起源和演化

- 半導體晶片擁有獨一無二的摩爾定律

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

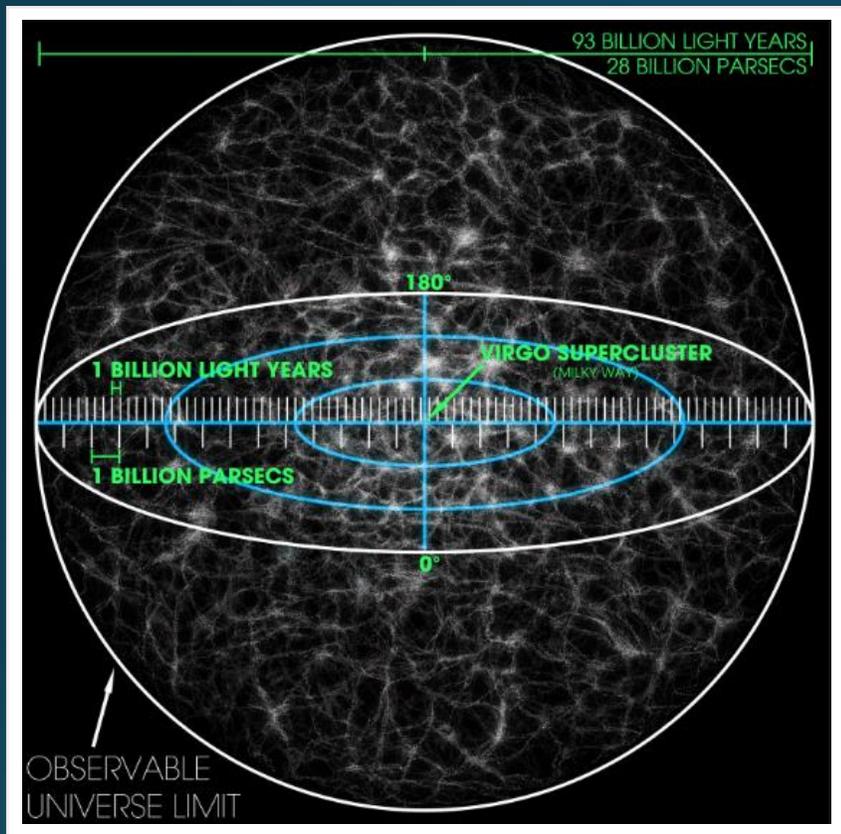


人造定律



宇宙 VS 電晶體

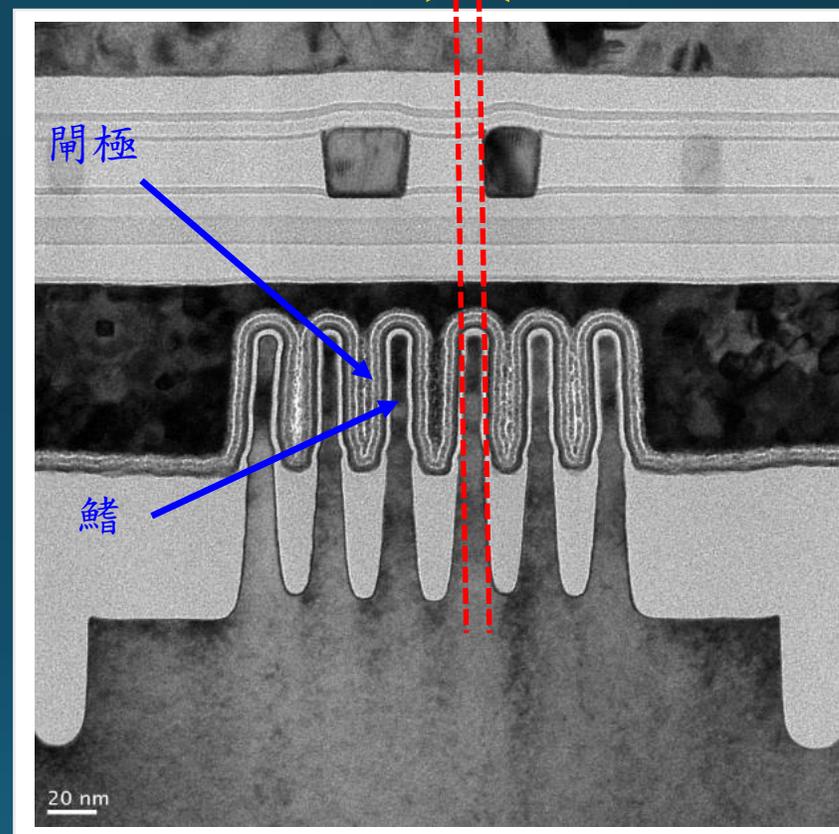
← 宇宙直徑 10^{27} 米 →



- 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

鰭的寬度5奈米



- 用電子顯微鏡觀測。
- 鰭式場效電晶體(FINFET)的鰭的寬度5奈米。一個 Apple A14 Bionic晶片有 1.18×10^{10} 個電晶體。

Source: 成真股份有限公司

穿越時空：從宇宙邊到電晶體電流通道



2022年7月12日美國太空總署發佈的照片。

韋伯太空望遠鏡(James Webb Space Telescope)拍攝到宇宙大爆炸後最早期的星系(Galaxies)，這些星系約在宇宙大爆炸後3億年形成，相當於距離我們135億光年，可以說是人類可觀察到的宇宙邊緣。照片的前景是距離我們46億光年的SMACS0723星系團(galaxy cluster)，此星系團形成重力透鏡(Gravitational Lens)，將其後方更遙遠、更古老的星系發出的光線偏折和聚焦，形成圖中無數橘紅色弧形的扭曲影像，也即宇宙大爆炸後最早期星系的影像。

右下角的照片是成真公司(iCometrue)用電子顯微鏡觀測到的Apple公司 iPhone 12 手機裡A14晶片的鰭式場效電晶體(FINFET)。每一個鰭式場效電晶體的電流通道寬度5奈米。

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 2020年含有 6×10^{10} 個 7×10^{-9} 米大小的電晶體。

每20個月(1.67年)，電晶體數目加倍：

$$2^{(2020-1958)/1.67} = 2^{37} = 6 \times 10^{10}$$

2020年 NVIDIA 推出的 A100 GPU 晶片含有594億個電晶體！

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。
- 這個演講所說到都是無窮大的”天文數字”或是無窮小的數字。可是卻找不到無窮小數字的成語，大概以前的人不知道原子或電子這麼小東西吧！
- 人腦含有 10^{22} 個神經元。我認為數字只要大於11次方 (10^{11}) 或是小於 -11次方 (10^{-11})，就會產生神奇的魔力。
- 我們的宇宙含有 10^{22} 個恆星。我認為數字一旦大於22次方 (10^{22}) 或是小於 -22次方 (10^{-22})，就會產生我們無法想像的事情。
- 一個光子的能量是 hf ，其中 f 是該光子的頻率，而 h 是蒲朗克常數 (Planck constant) 6.636×10^{-34} 焦耳秒 (Joule-second)。我認為數字一旦大到34次方 (10^{34}) 或是小到 -34次方 (10^{-34})，也就是宇宙的最大單位，或是粒子的最小單位了。我的朋友簡榮治醫師說這也就是呂氏春秋所說的「其大無外，其小無內」了。
- 我們的手有5根手指頭。我長期觀察，很多花都有5個花瓣，未免太胡扯了吧！

人體細胞分裂也有摩爾定律嗎？...

- 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)。
 - 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。
- 積體電路晶片因為人類強烈的需求，想盡辦法，使出洪荒之力，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。

LCD面板及太陽能產業沒有摩爾定律...

- 摩爾定律讓台積電可以持續領先，不像LCD面板或者太陽能產業的台灣廠商因為沒有摩爾定律加持，不能保持領先地位，而被中國廠商超車趕上。

神為人類準備了
一個矽原子、光及電子兩個基本粒子，
讓人類製造半導體晶片。

元素週期表

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period ↓																		
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
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	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
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	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
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	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
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	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			* 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		

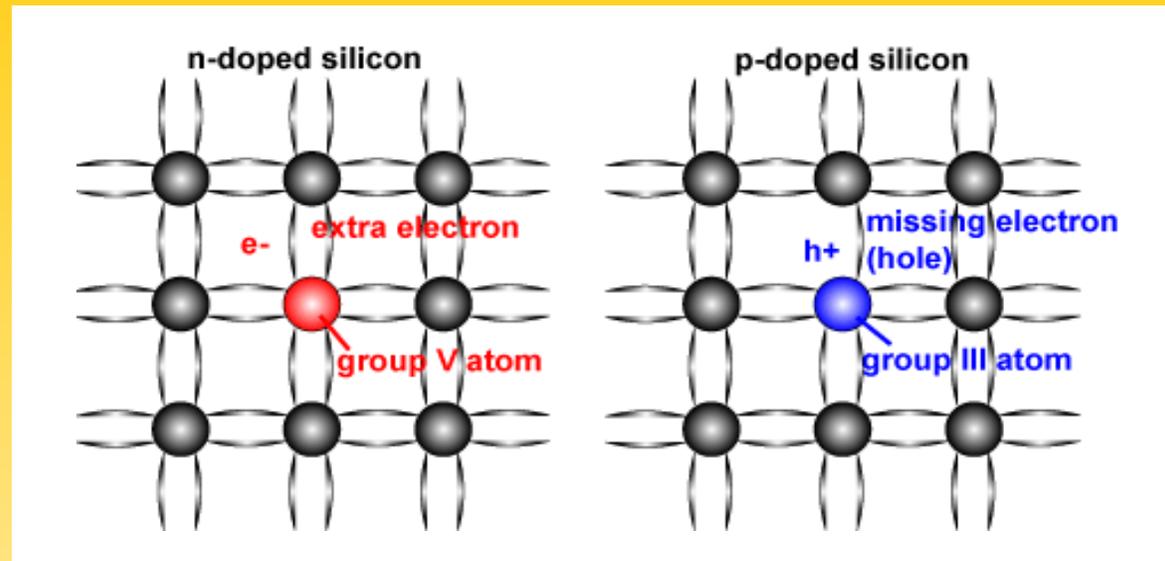
矽 Silicon
充裕而穩定

硼 Boron

砷 Arsenic

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/pvcdrom/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 (IVA 族) 形成最堅硬的鑽石立方晶格結構:

一 矽晶格

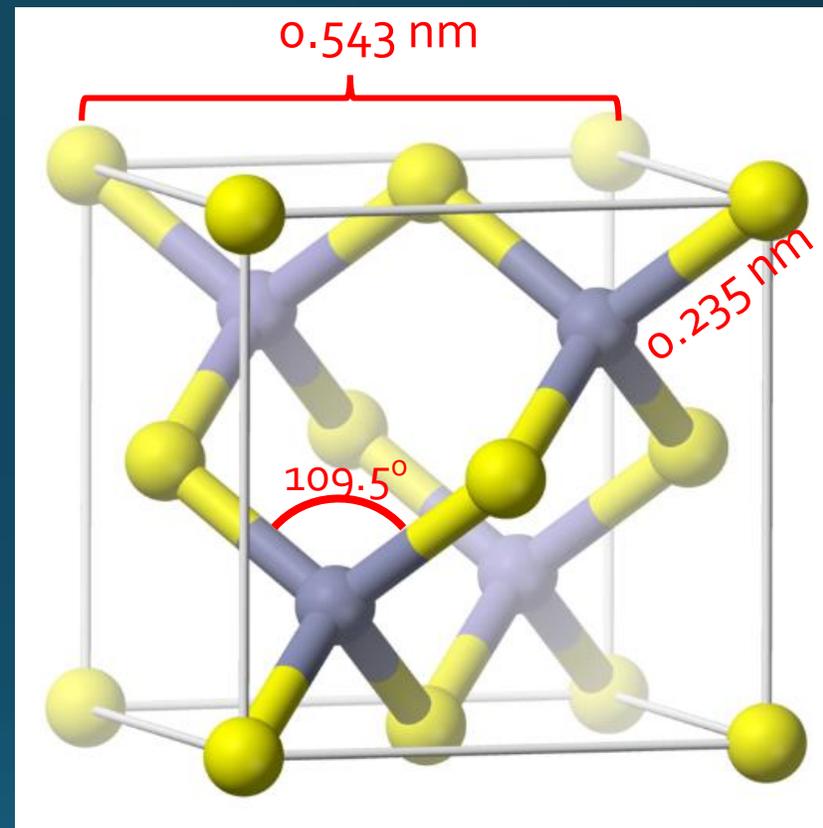
大小 : 0.543 nm

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://blogs.ams.org/visualinsight/2016/10/01/diamond-cubic/>

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

Matter, Fermion

Interaction, Boson



質量 $\approx 9.1 \times 10^{-31} \text{Kg}$
電荷 -1
自旋 1/2

質量 0
電荷 0
自旋 1

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

自然造物者給了我們兩個大家耳熟能詳的基本粒子 - 電子及光子

- 自然為人類準備了標準模型中有17個基本粒子，包括組成物質的12個費米子 (Fermion) 和5個相互作用力的玻色子 (Boson)；
- 一般人對於標準模型中的基本粒子大都無感，因為這些基本粒子單獨存在的生命週期都太短了，像希格斯粒子的生命週期就只有 10^{-22} 秒；
- 可是自然造物者就是要展現它的神奇力量，讓我們看得到、感覺得到，它給了我們兩個大家耳熟能詳的基本粒子 - 電子及光子，太神奇了！

~~半導體故事的源起~~

1. 自然

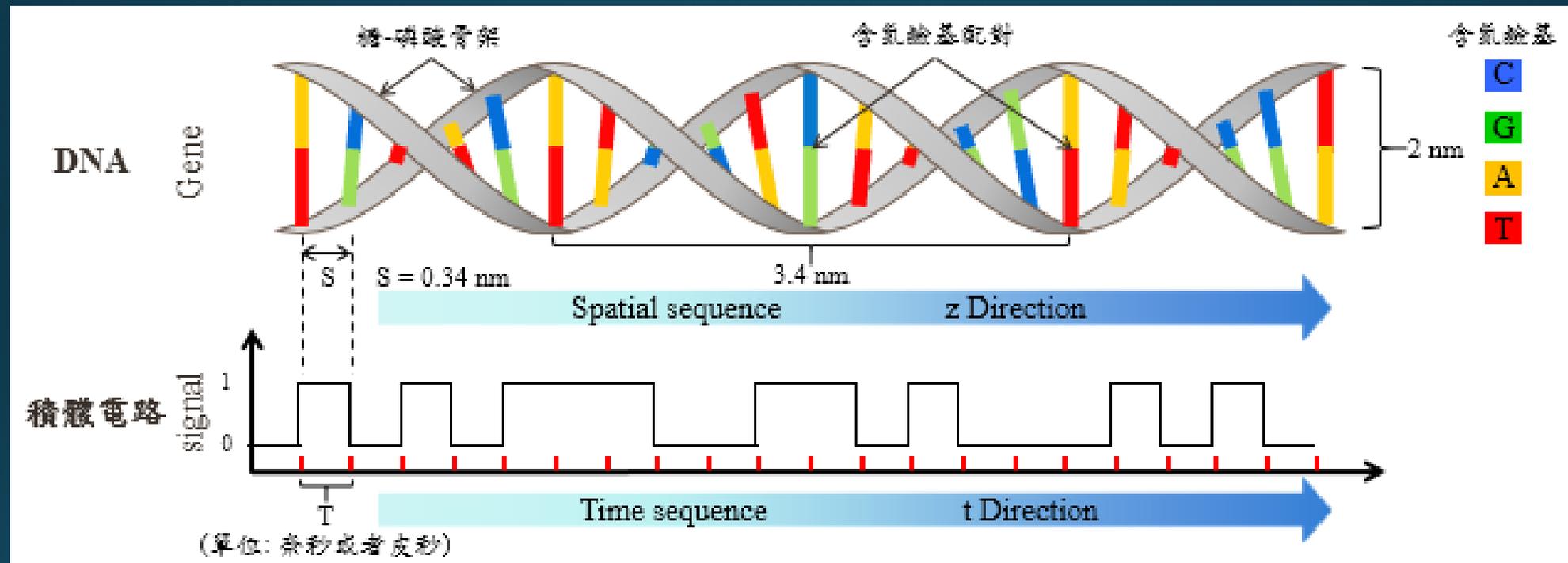
自然為人類準備了一個矽原子、光及電子兩個基本粒子。

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。

人造的積體電路和自然界的DNA有類似的信息傳遞法則

- 自然界的DNA以A、T、C以及G)四種含氮鹼基，在兩股螺旋股幹之間，形成A-T和C-G配對，並依據其中一股螺旋股幹含氮鹼基A, T, C 及G 四個位元在空間的序列(spatial sequence)，忠實精準的傳遞基因，其中空間週期(S)為0.34奈米(兩個相鄰含氮鹼基的距離)。
- 而人造晶片的積體電路則依據0和1兩個位元在時間的序列(time sequence)，忠實精準的傳遞訊號，其中時間週期(T)以奈秒或是皮秒(nano- or pico-second)為單位。



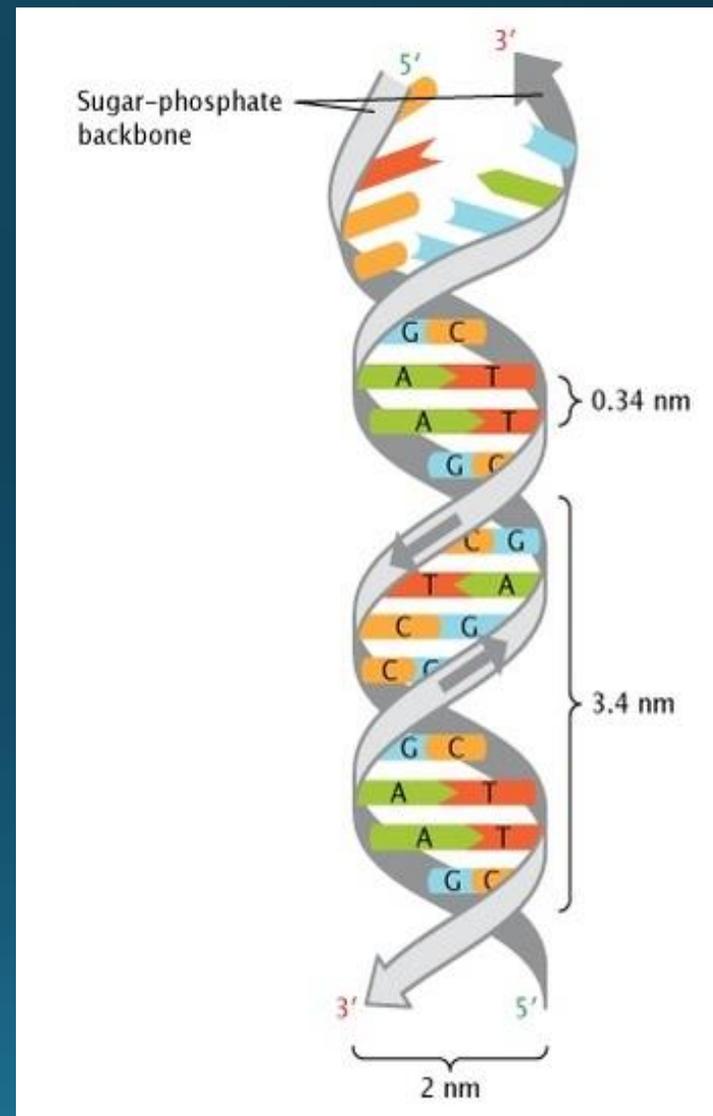
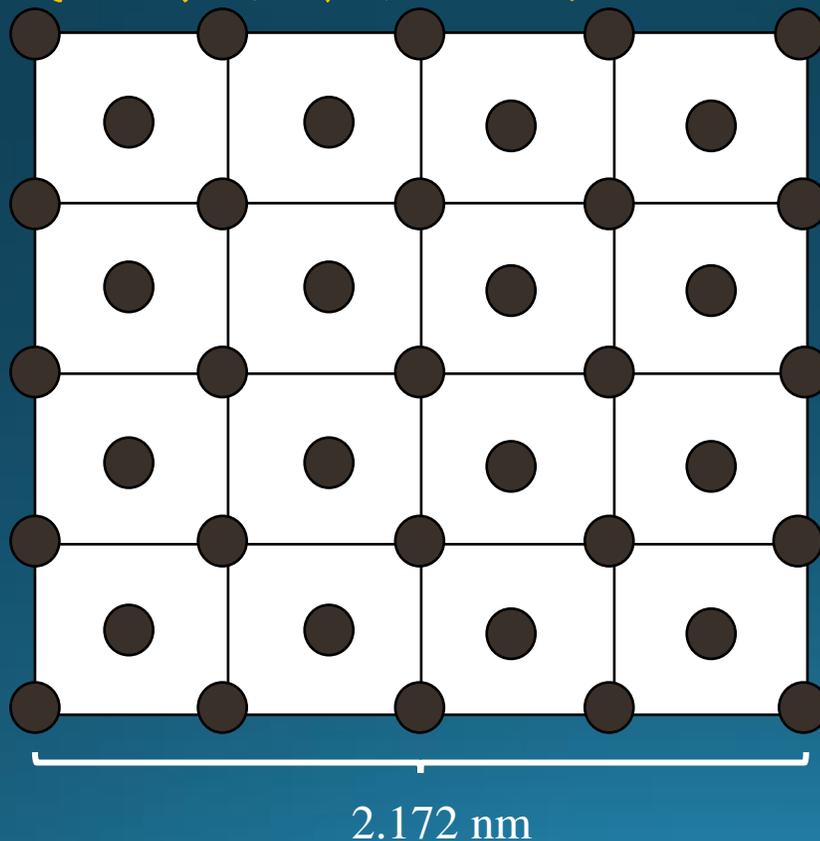
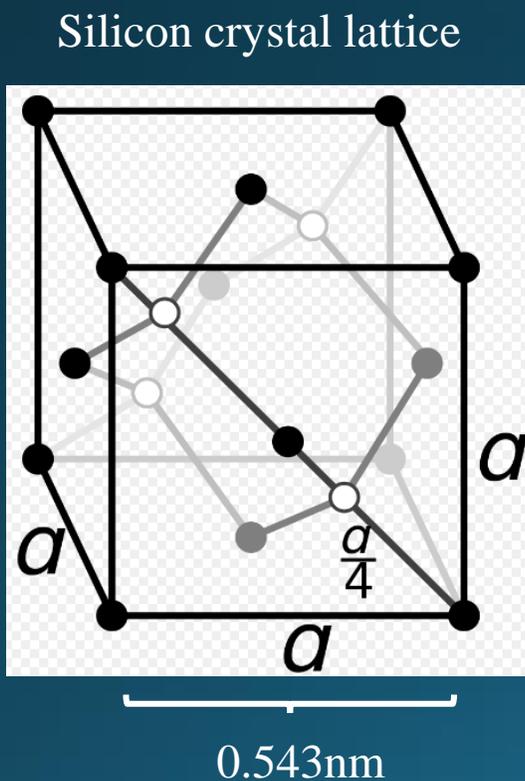
時間和空間在DNA和積體電路扮演的角色隱藏著深邃的祕密

- 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祕密，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，以致於人們陷入迷惑無法自拔的深淵。

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
- DNA兩股之間的距離是2奈米

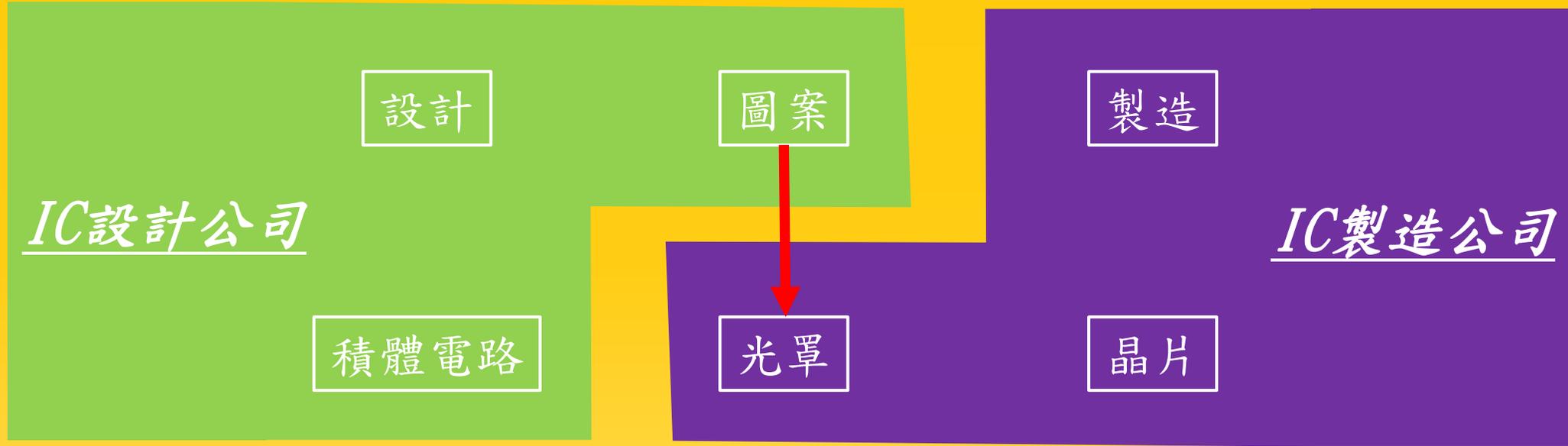
人類可以匡住幾個原子來把玩嗎？



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

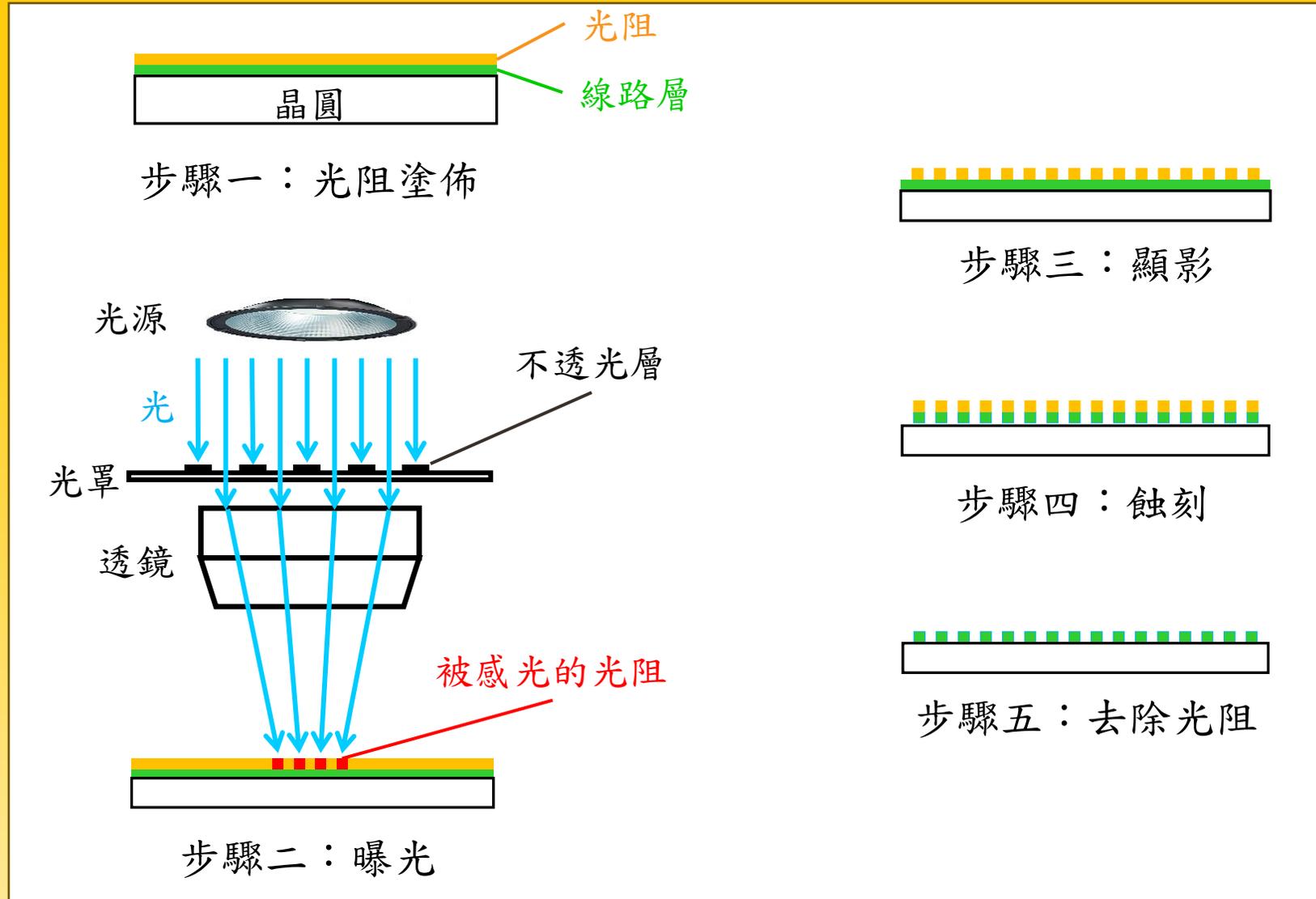


步驟：

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. 用光刻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**

必要的基礎知識 VII：神奇的曝光機(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)

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

$$NA = n \sin \theta$$

$$0.3 < n \sin \theta < 1.4 \text{ (for most optical system)}$$

$$0.5 \lambda < R < 1.5 \lambda$$

R = 解析度

λ = 用於成像的光波波長

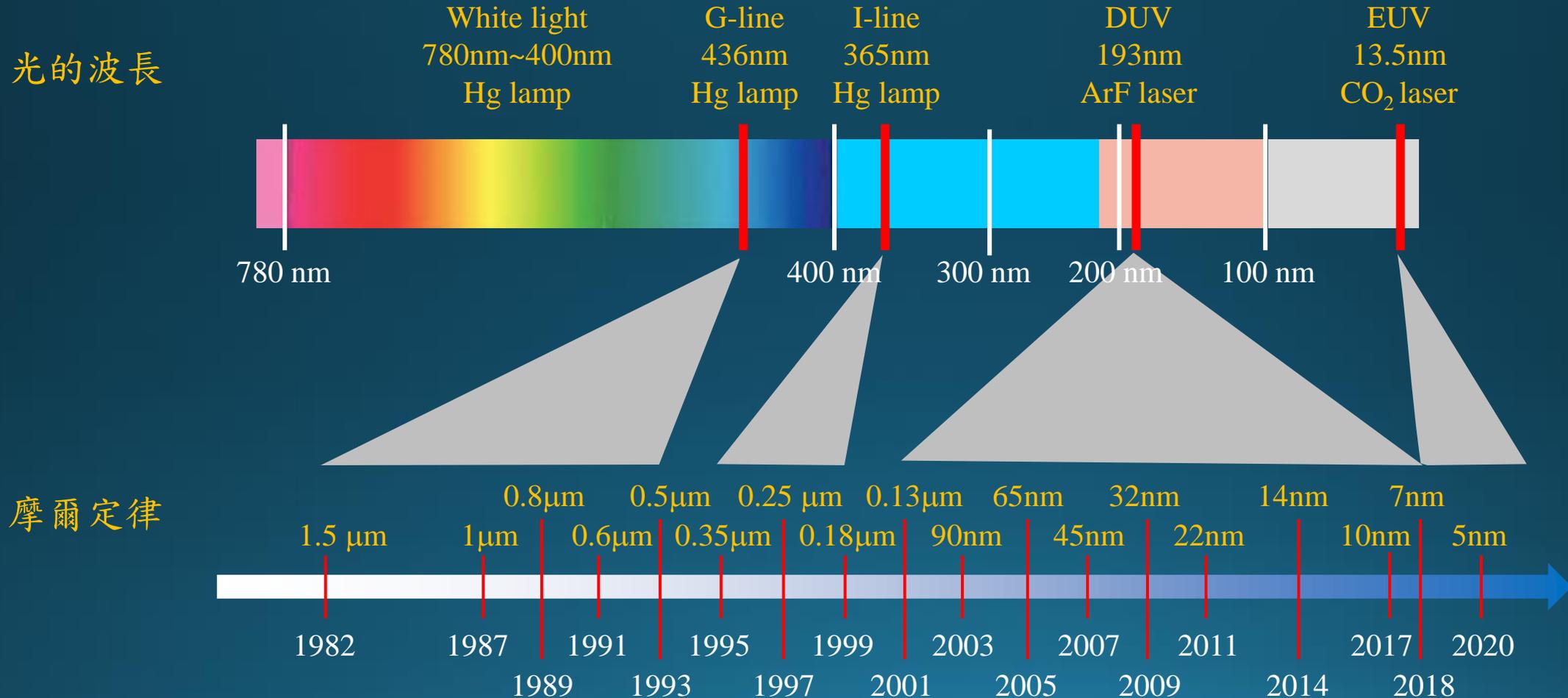
NA = 使用鏡片的數值孔徑 (numerical aperture of the lenses)，衡量光學系統收集光的能力

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光刻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 終於在2017 年10 奈米製程完勝 Intel

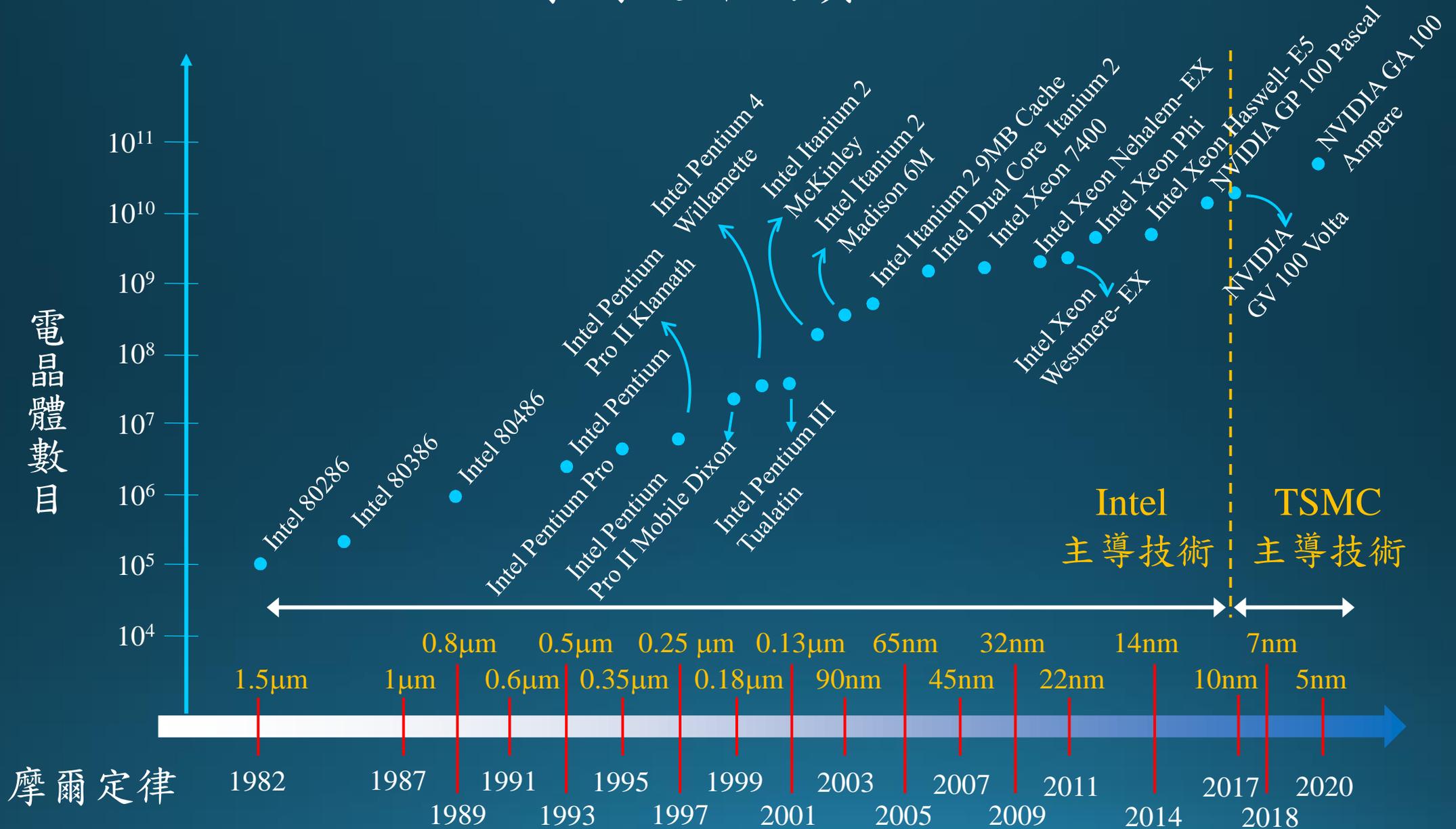
- TSMC 成功利用 193 奈米的深紫外光(DUV) 循序量產 10 奈米及 7 奈米技術節點的產品，因此可以繼續推展先進的技術節點，用極紫外光(EUV)量產 7 奈米及 5 奈米。
- Intel 用 193 奈米的深紫外光(DUV)量產 10 奈米不順利以後，進退失據，終致輸掉製程寶座。

Intel CEO Pat Gelsinger :

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



TSMC的成功就寫在公司的名字上

台灣積體電路製造股份有限公司

- TSMC 首創純代工商業模式

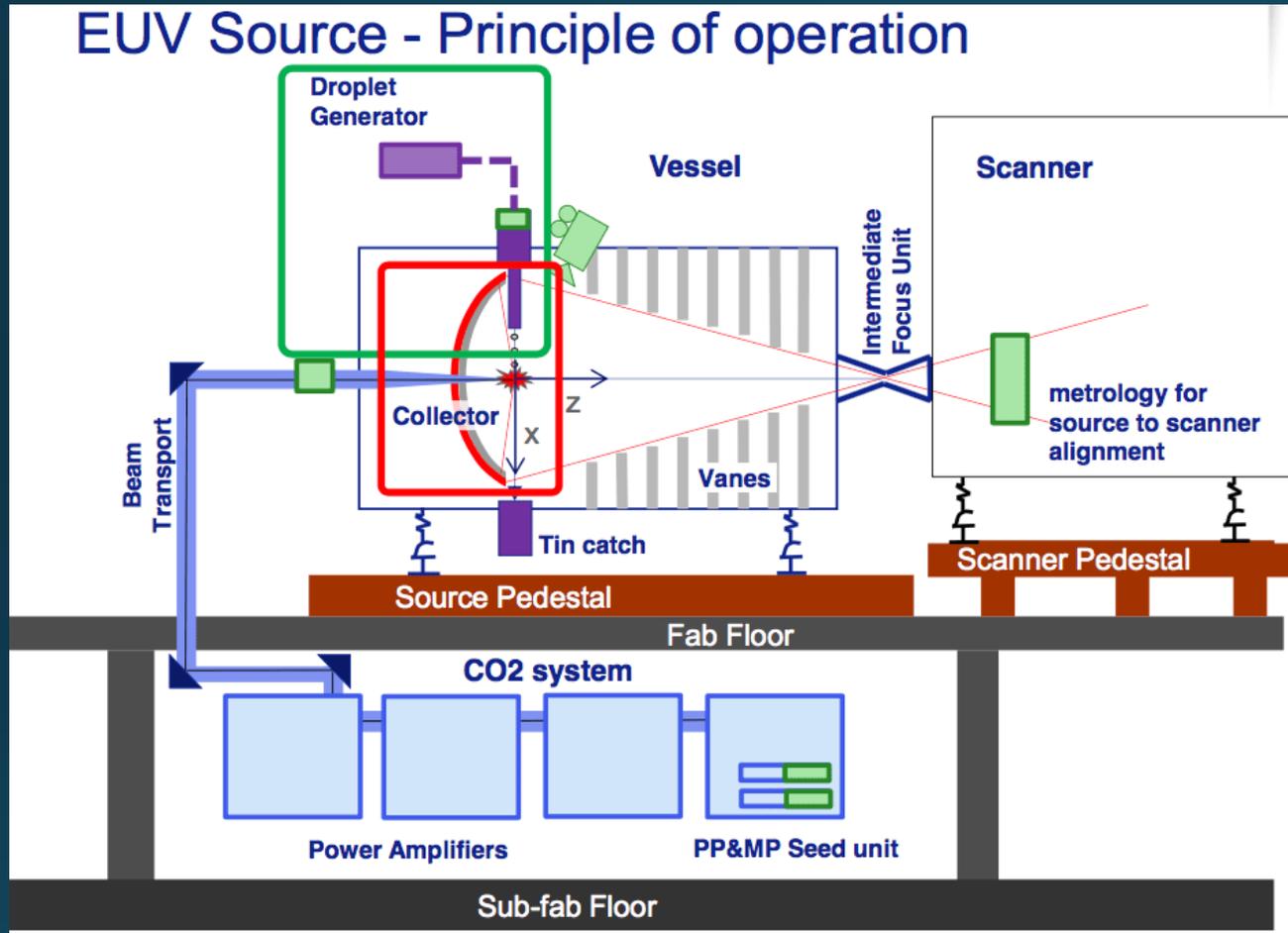
投資巨額（早期數百億元台幣，現在數千億元台幣），生產客戶設計的晶片產品，只做製造服務，自己沒有產品。

- 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。

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

鬼斧神工、巧奪天工的EUV光刻機

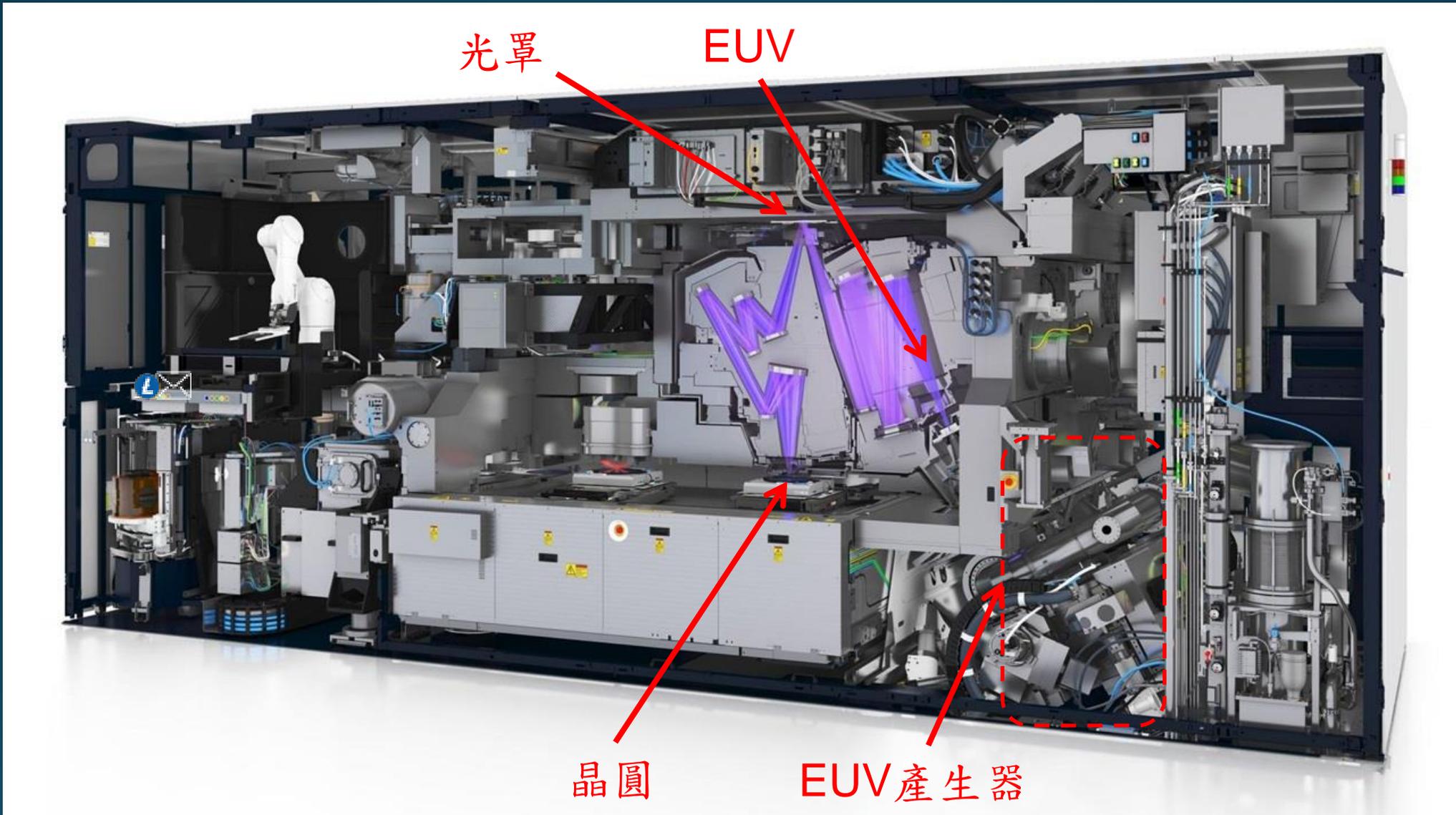


1. CO_2 雷射波長 ($\lambda=10.6$ 微米)
2. 用 CO_2 雷射轟擊錫滴(每秒五萬次)將其蒸發成為氣體並使氣體變成電漿 (Laser Produced Plasma, LPP)。
3. 電漿溫度高達 4×10^5 度(30eV)，其能量激發錫原子，形成帶多價電離子的高能狀態($\text{Sn}^{+8} - \text{Sn}^{+19}$)。
4. 當高能狀態的多價電離子和電子結合，回到較低能的離子狀態或原子時，就會產生EUV。

<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瓦的光刻機，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 光刻機



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

iCometrue / 成真 8/4/ 2024

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>

AI Machine把能量轉換成智慧的效率和人腦把能量轉換成智慧的效率相差6個次方 (order of magnitude)

- 這ChatGPT神奇的魔力並不是憑空而來，而是要耗費極大的電能 (electrical power) 才能達成。
- **NVIDIA新開發的H100 GPU晶片**，一個晶片耗電700 W，如果ChatGPT使用2萬顆NVIDIA H100 GPU晶片，則ChatGPT工作一天就會消耗33萬度電能，比本章第二節提到一台EUV曝光機一天耗電3萬度更驚人！
- 反觀，一個成年人每天消耗的熱量約2,500大卡路里 (k-calorie)，頭腦所需的能量約佔全身耗能的20%，則人腦一天耗能500大卡路里，相當於2.1百萬焦耳；也即人腦的耗能功率為24W，則**人腦工作一天只消耗約0.58度的電能**。AI Machine把能量轉換成智慧的效率和人腦把能量轉換成智慧的效率相差6個次方 (order of magnitude)！
- **人畢竟不是神，雖然可以造「機器人」，可是和自然之神造「人」相比，真的差太遠了！自然之神造的人腦溫和輕巧，而人造的ChatGPT則火熱暴烈！**

電晶體把能量轉換成智慧的效率和光合作用的葉綠體及代謝作用的粒線體，不可同日而語！

- 電晶體利用電能做開關 (0 and 1 switch) 的動作。
- 光合作用 (photosynthesis) 中，葉綠體 (chloroplast) 把吸收的CO₂和樹葉裡的水，利用太陽光合成葡萄糖，並釋放氧氣。
- 代謝作用 (metabolism) 中，粒線體 (mitochondria) 把吸收的葡萄糖和氧氣燃燒，產生能量，並釋放CO₂和水。
- 人畢竟不是神，人所造的「電晶體」非常原始 (primitive)，自然之神所造的葉綠體和粒線體精緻複雜 (sophisticated)，兩相比較，不可同日而語！

另一顆逐漸升起的人造太陽：核融合的第二顆人造太陽能

1. EUV Machine 用CO₂ 雷射去匡住高溫高熱的錫電漿，使其不碰觸反應爐的側壁，並使其產生EUV，而輸出EUV 光源；
2. 2022年12月初，美國加州Lawrence Livermore國家實驗室第一次產生輸出能量大於輸入能量的核融合反應。其核融合反應使用的是慣性局限融合 (Inertial Confinement Fusion, ICF)，利用192束雷射光聚焦在小區域範圍內，激發產生高溫 (1.5×10^8 °C) 高壓的氘/氚/電子電漿，點火引爆核融合反應而釋放巨大的能量。此種方式就和EUV曝光機中用雷射聚焦產生高溫高熱錫電漿的原理相似。

第一顆人造太陽EUV已經成功量產；受到EUV Machine 的啟發，如果核融合的第二顆人造太陽能成功運轉，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

「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**。

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。

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：

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

$$2.2 \times 10^8 \text{ 個晶片} \times 5 \times 10^{10} \text{ 個電晶體} = 1.1 \times 10^{19} \text{ 個電晶體}$$

$$1.1 \times 10^{19} \text{ 個電晶體} / 10^{11} \text{ 個腦細胞} = 1.1 \times 10^8 \text{ 個人腦}$$

- 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，已經接近全世界一整年新生嬰兒大腦所含有的神經元數目。

晶片人工智慧機器 (AI machine) 會有「機器個性」或「機性」(「Machinality」) 嗎？

- **humanity和「Machinality」的關係是什麼呢？**
 - 是主從關係 (master-slave) 嗎？還是平行關係 (parallel) 呢？
 - 是和諧 (harmony) 的呢？還是衝突 (conflict) 的呢？
 - 人類 (human being) 將如何以自己的humanity來處理機器的「Machinality」呢？
- **會有一個管理AI machine社會的法律制度嗎？**
 - 是人類幫AI machine建立的，還是AI machine自己建立的？
 - 會有AI machine的言論自由和機器權利或機權 (Machine Right) 嗎？
- 以上這些問題、論述和憂慮都是假設人類（尤其是工程師）不自我節制和覺醒，放任AI Machine發展出或被發展出毫無受限的Machinality。
- **人類又應當如何自我節制和覺醒，使得AI Machine不發展出或不被發展出毫無受限的Machinality？**

晶片可能形成「技術黑洞」－建立工程倫理

- 晶片所含數百億個電晶體產生的摩爾魔法，可能形成「技術黑洞」，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。
- 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。
- 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。

$$i^4 = 1$$

一切：

空間 10^{27} 米(宇宙)到 10^{-9} 米(半導體)

時間 4.3×10^{17} 秒(137億年宇宙)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 A

活潑主動的電晶體 - 積體電路因此而產生智能

活潑主動的電晶體——積體電路因此而產生智能

- 當你跟iPhone Siri對話時，開車用Google Map導航時，或用Skype視訊開會時，你是否曾經好奇的想知道這到底是怎麼回事？答案很簡單，就是電晶體！
- 可是要了解電晶體的運作原理，及電晶體何以產生此種類似人類的智能，那可就不簡單了！需要動用到物理學的四大艱深學門：量子力學 (quantum mechanics)、量子熱力學 (quantum thermodynamics)、古典電動力學 (classical electrodynamics) 及古典熱力學 (classical thermodynamics)。
- 當你了解電晶體的運作原理後，再低頭看看手上的iPhone，彷彿可以看到電子的形影，聽到電子的足音，進而摸到電子的身體，甚至細數電子的數目。
- 人不是神，但以人類卑微的能力，能夠透徹了解電子行蹤，並巧妙的創造出控制操縱電子行蹤的電晶體，著實令人讚嘆和驚豔！

四門物理學促成電晶體的發明

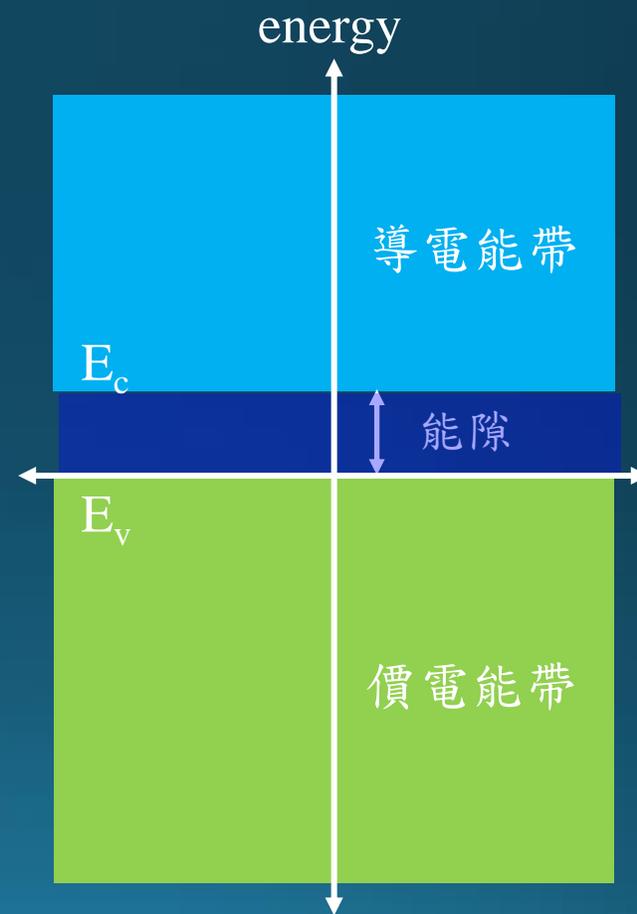
<u>量子力學</u>	<u>量子熱力學</u>	<u>古典熱力學</u> <u>古典電動力學</u>
<p>眾多原子的最外層活躍的價電子在晶體中是如何運行的呢？</p> <ul style="list-style-type: none">• 薛丁格爾微分方程式解出的布洛赫波，形成能帶，而且出現禁止能帶，形成能隙。• 量子力學的能帶和能隙的概念是半導體物理的基礎，也是了解電晶體必備的基本知識。	<p>晶體內的眾多活躍的價電子如何分佈在位能高低不同的能帶呢？</p> <ul style="list-style-type: none">• 費米-迪拉克分佈統計原理描述電子填進這些能帶的法則：<ol style="list-style-type: none">(1) 從低位能階填起，依序往高位能階填(2) 包立互斥原理• 電子分佈在矽晶能帶的概率和該能帶位能高低成指數型關係。此指數型增加的關係，奠定電晶體開關分明，毫無混淆，成為0和1數位時代的根本源頭。	<p>各能帶的電子如何在晶體內移動，形成電流的導通與否呢？</p> <ul style="list-style-type: none">• 擴散移動 由濃度差異造成的電子或電洞的移動。• 漂流移動 由位能差異造成的電子或電洞的移動。

在矽晶中，眾多矽原子最外層活躍的價電子 在晶體中又是如何運行的呢？

矽在原子狀態中的能階 ($1S^2 2S^2 2P^6 3S^2 3P^2$)



矽在晶格結構中的能帶與能隙



費米-迪拉克分佈統計原理

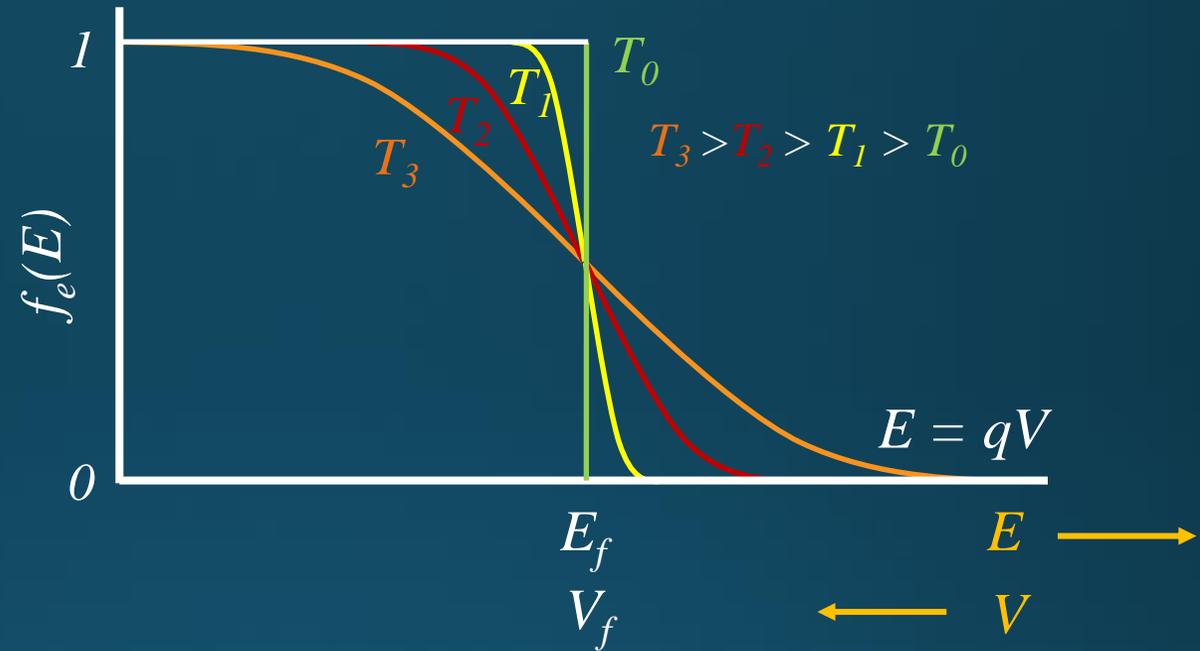
給了人類可以用雜質濃度或電壓來操控電子的基礎

- 費米-迪拉克分佈統計原理

$$f(E) = 1 / (1 + e^{(E - E_f) / kT})$$

$f(E)$ 是電子對位能的分佈概率， E 是電子的位能， E_f 是費米位能 (Fermi level)， k 是波芝曼常數， T 是絕對溫度

- 費米能階是一個的天生麗質的概念，它可以因摻入雜質，或隨外加的電壓位能 (qV) 而改變，給了人類可以用雜質濃度或電壓來操控電子的基礎；並且可以用 kT (室溫時 26 meV) 為單位來量測位能 (E) 或電壓位能 (qV)，再用 $e^{(E/kT)}$ 或 $q^{V/kT}$ 指數函數來細數半導體晶體內的電子及電洞的數目。



$$E = E_f, f(E) = 0.5$$

$$E \ll E_f, f(E) = 1$$

$$E \gg E_f, f(E) = 0$$

溫度越高，電子就往高位能移動；但在 $E = E_f$ ， $f(E)$ 仍然保持 0.5 不變。

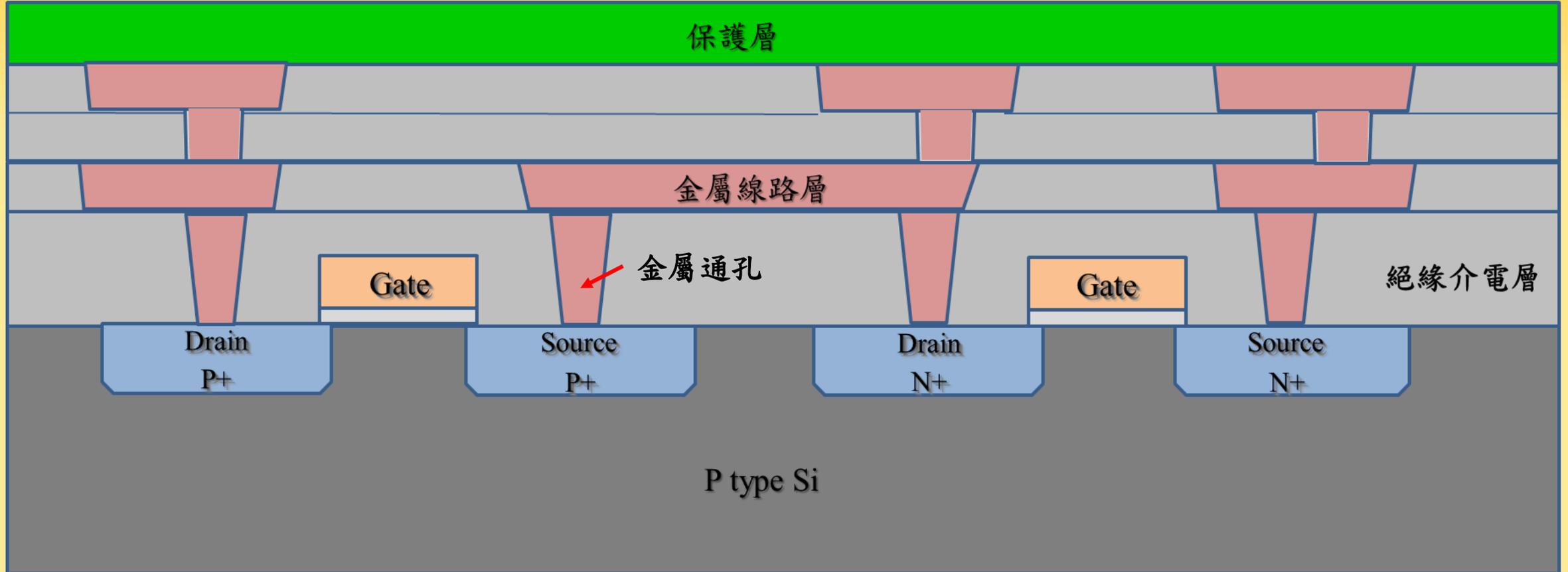
今日人類的數位文明是少數載子的遊戲

- 少數載子 (minority carrier) 的濃度隨著電壓成指數型增加，在電壓增加不到1V的情況下，少數載子 (minority carrier) 的濃度從 $10^{10}/\text{cm}^3$ 增加到 $10^{18}/\text{cm}^3$ 。
- 電晶體的電流隨電壓成指數型增加正是少數載子特徵的表現；而此特徵乃是依據統計熱力學的費米-迪拉克分佈統計原理 (Fermi-Dirac distribution statistics)，少數載子隨位能高低成指數型分佈在各個位能所導致的結果。
- 此指數型的關係是我認為電晶體物理原理的根本，使電晶體成為一個可以用電的訊號 (electrical signal) 來控制的開關 (1和0)，巧妙的把電子原有的不確定性及概率分佈的自然特徵，強制轉成毫無混淆的0和1數位，造成今日人類的數位文明。

0和1數位 vs 量子位元 Qubits...

- 神奇的電晶體把電子的量子布洛赫波 (Bloch wave) 的波動行為轉化成毫無混淆且可靠的0和1數位。
- 而現今的量子電腦，就真正直接利用量子力學的粒子波動原理以及幽靈似的 (spooky) 海森堡測不準原理的自然本性來做運算。
- 但是要用自然本性來做運算，那人又如何來和自然本性來做溝通呢？這好比神是萬能的，可以解決任何複雜的問題；但人如何和神溝通呢？又如何從神那裡得到答案呢？

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)

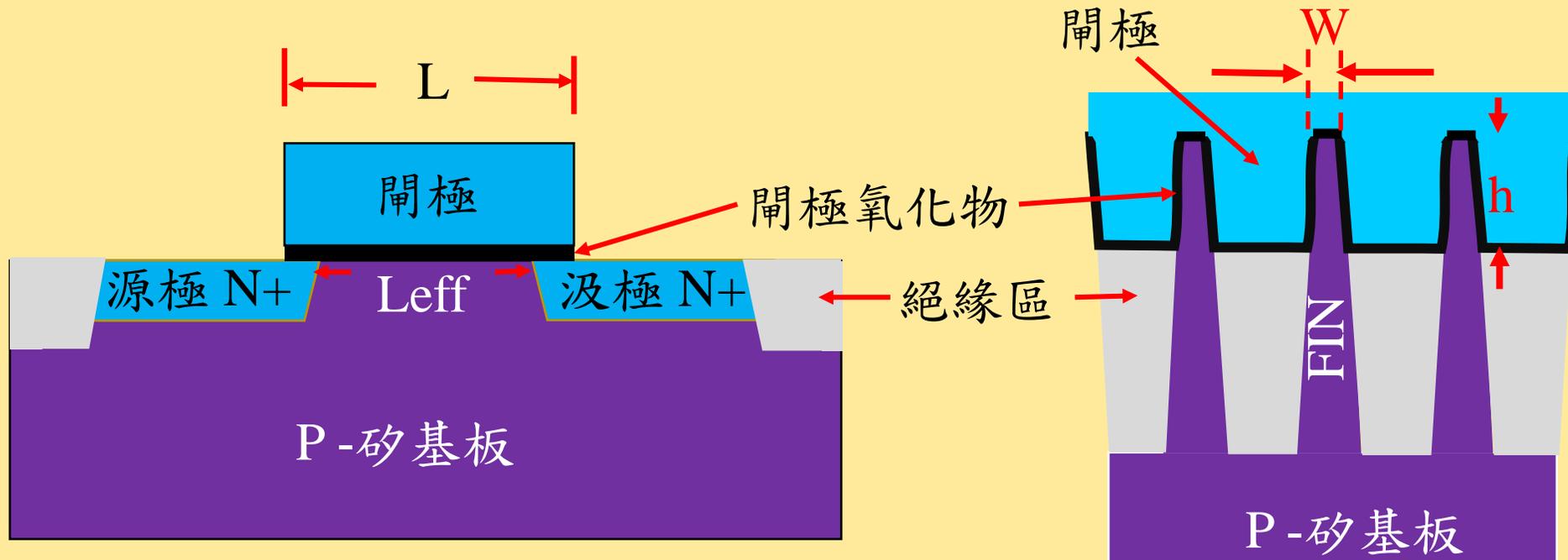
單位面積電晶體數加倍，則定義為下一個技術節點

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)



$$W_{eff} = W + 2h$$

$$\text{電流} = k W_{eff} / L_{eff}$$

7 nm FINFET

W = 6 nm,

h = 52 nm,

W_{eff} = 110 nm,

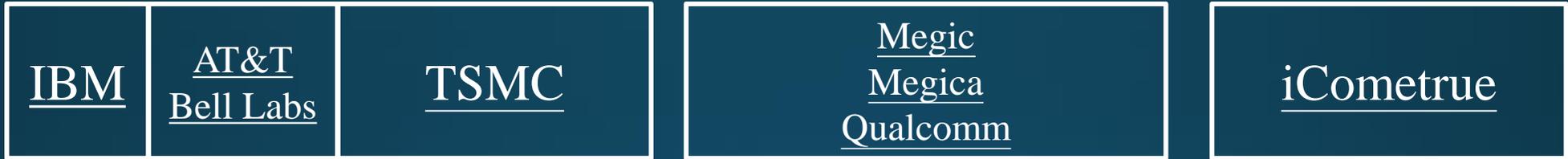
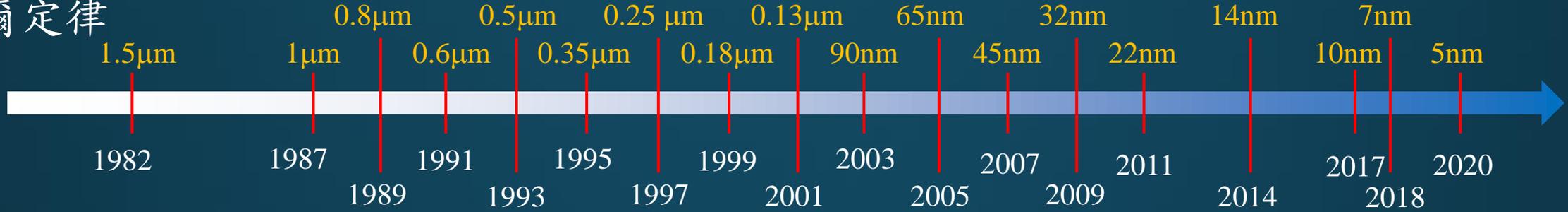
單位電流通道寬度的
電流增加 18 倍

附錄 B

我的摩爾人生

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

因為預估光刻將在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。

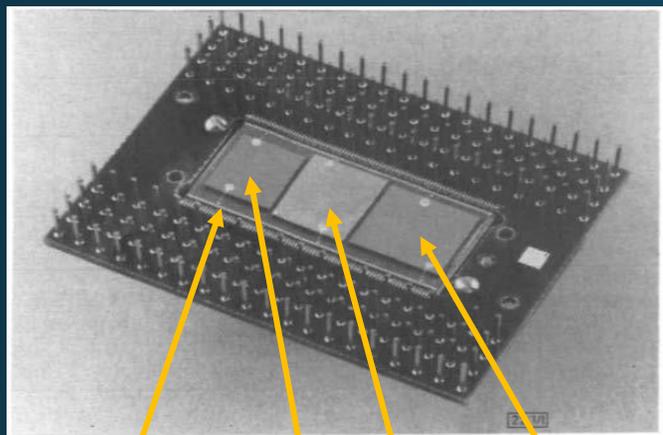
1999-2011年: Megic, Megica, Qualcomm

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

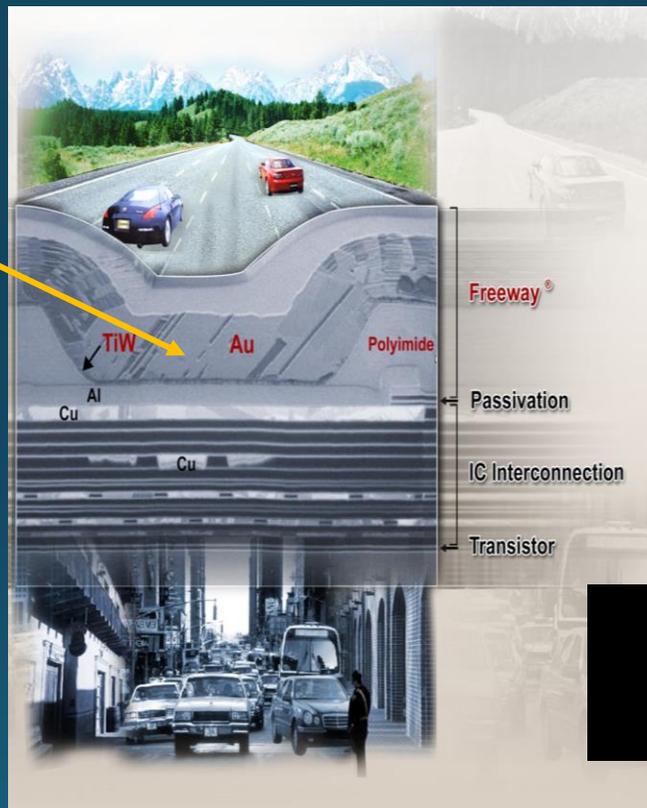


矽基板
含有金屬連線
MMU
CPU
FPU

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



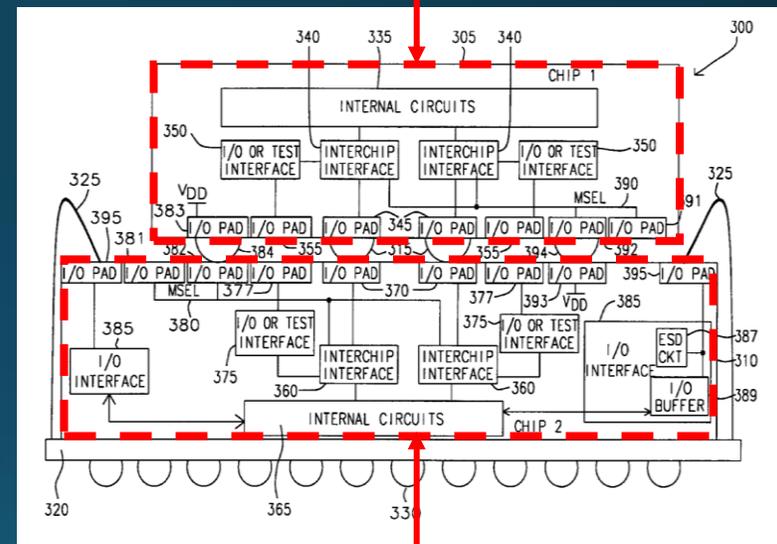
Freeway

金屬
連線

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

MeGic Technology

Memory Chip

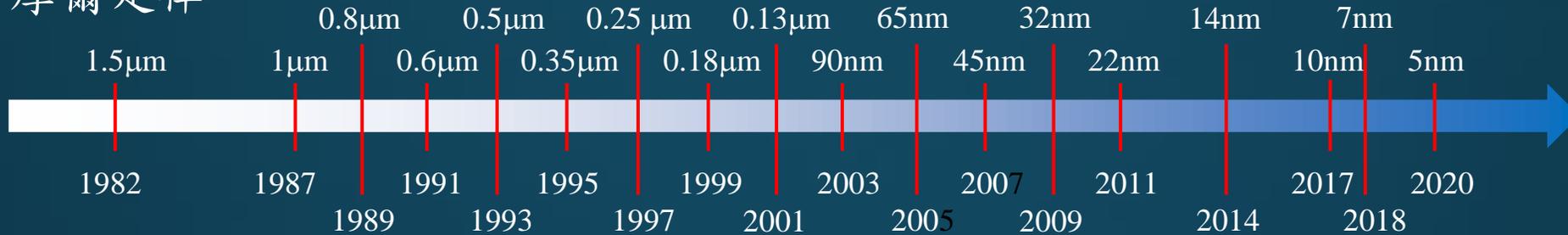


Logic Chip

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

三次意外的，而且真的離開半導體積體電路領域

摩爾定律



1988年12月–1990年5月
AT&T 貝爾實驗室
(AT&T Bell Labs)

1988年12月7日，AT&T 貝爾實驗室無預警的宣布當日即刻結束多晶片封裝(MCM)計劃。之後，我在貝爾實驗室內部轉到其他部門，加入紅外線雷射的研發。

1997年7月–1998年12月
台灣慧智股份有限公司
(WYSE)

從台積電被借調到台灣慧智股份有限公司擔任代理總經理，進入系統客戶終端設備(client terminal)產業。

2012年1月–2017年1月
成真股份有限公司
(iCometrue)

從半導體產業轉換跑道，投入生物醫學領域。