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/

師大演講
2025年12月10日

緣起

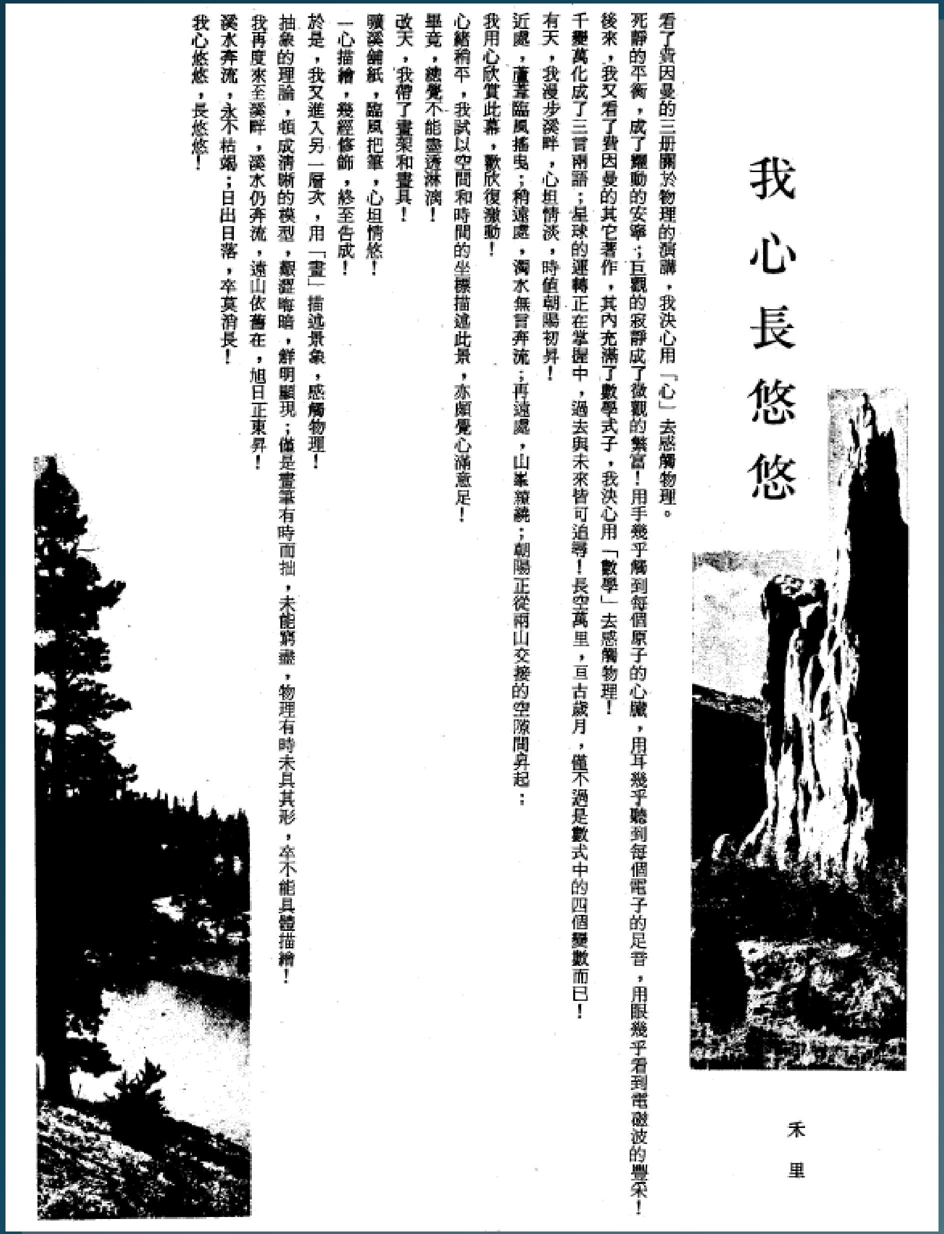
- 事實上，今天要講的內容，起緣我於2021年在「居禮夫人高中化學夏令營」的演講。

  那次為了要對高中生演講，讓我有機會把我自己在半導體40多年的生涯中，所親身經歷見證的點點滴滴，串連起來，才真正體會出其中奧妙的意義，更驚訝讚美自然的神奇及人造工藝的美妙。

- 這次該如何對大學新鮮人大一的學生演講呢？

  同樣地，為了準備今天給你們大一新生的演講，讓我再度有機會沈思這輩子半導體人生的真正意義。

我心長悠悠


我心長悠悠

看了費因曼的三冊關於物理的演講，我決心用「心」去感觸物理。
死靜的平衡，成了躍動的安寧；巨觀的寂靜成了微觀的繁富！用手幾乎觸到每個原子的心臟，用耳幾乎聽到每個電子的足音，用眼幾乎看到電磁波的豐采！
後來，我又看了費因曼的其它著作，其內充滿了數學式子，我決心用「數學」去感觸物理！
千變萬化成了三言兩語；星球的運轉正在掌握中，過去與未來皆可追尋！長空萬里，亘古歲月，僅不過是數式中的四個變數而已！
有天，我漫步溪畔，心坦情淡，時值朝陽初昇！
近處，蘆葦臨風搖曳；稍遠處，濁水無言奔流；再遠處，山峯環繞；朝陽正從兩山交接的空隙間昇起；
我用心欣賞此幕，歡欣復激動！
心緒稍平，我試以空間和時間的坐標描述此景，亦頗覺心滿意足！
畢竟，總覺不能盡透淋漓！
改天，我帶了畫架和畫具！
曠溪鋪紙，臨風把筆，心坦情悠！
一心描繪，幾經修飾，終至告成！
於是，我又進入另一層次，用「畫」描述景象，感觸物理！
抽象的理論，頓成清晰的模型，艱澀晦暗，鮮明顯現；僅是畫筆有時而拙，未能窮盡，物理有時未具其形，卒不能具體描繪！
我再度來至溪畔，溪水仍奔流，遠山依舊在，旭日正東昇！
溪水奔流，永不枯竭；日出日落，卒莫消長！
我心悠悠，長悠悠！

禾里

50多年前，我在大學時如何看世界？
用心、數學、畫圖、情感

看了費因曼的三冊關於物理的演講，
我決心用「心」去感觸物理。
死靜的安寧，成了躍動的平衡；
巨觀的寂靜，成了微觀的繁富！
用手幾乎觸到每個原子的心臟，
用耳幾乎聽到每個電子的足音，
用眼幾乎看到電磁波的豐采！

– 我在1974年大學三年級時用筆名「禾里」在台大系刊《時空》寫的一篇文詞，主要是在探討如何了解自然物理。

Life vs. AI

What Is Life ? The Physical Aspect of the Living Cell	What Is AI ? The Physical Aspect of the AI
• 1944年 Erwin Schrödinger 用時間/空間以及事件 (event) 的物理原理來解釋生命這個事件，啓發當時很多的科學家開始用物理原理來研究生命，促成1953年DNA的發現。 • 細胞是生命的基本單元 (unit)。一個細胞大約含有40兆個原子，而一個人體大約含有100兆個細胞。	• 本演講嘗試用時間/空間以及事件 (event) 的物理原理來解釋AI這個事件，希望可以啓發當前的科學家開始用物理原理來研究AI。 • 電晶體是AI的基本單元 (unit)。一個電晶體含大約含有10億個的原子，而一個晶片大約含有500億個電晶體。

了解AI比了解生命簡單的多。AI的硬體電晶體是人設計製作的，AI的軟體指令也是人設計撰寫的。照道理來說，人類應該100%了解並完全控制AI才對。但電晶體數目遵循摩爾定律爆炸性的增大，AI是否會產生讓人不了解而失控的神奇魔力呢？

Natural Intelligence vs. Artificial Intelligence

Natural Intelligence	Artificial Intelligence
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。	NVIDIA新開發的H100 GPU晶片，一個晶片耗電700W，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。

- 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。
- 神並沒有賜給人類完全及完整創造AI的能力。人雖然可以造「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！
- 驅動世界的動力是熵 (Entropy)。但能量 (Energy) 和演化 (Evolution) 可以對抗熵，產生有高度秩序低熵的高品質智慧：牛頓、莎士比亞、貝多芬、愛因斯坦、、、
- AI可以取得足夠能量 (Energy) 嗎？AI可能突變 (Mutation) 和演化 (Evolution) 嗎？

Ref: “Until the End of Time” by Brian Greene

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：積體電路的兩個基礎 – 電晶體和金屬連線

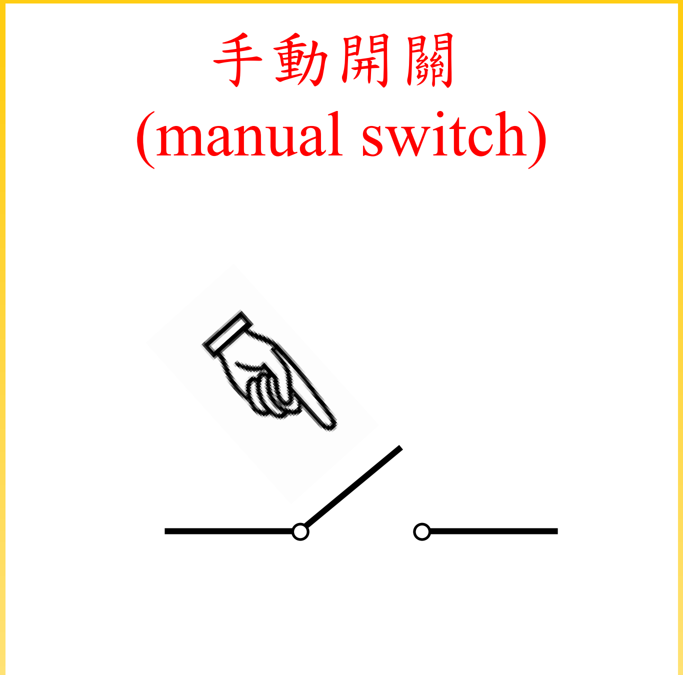
第三課：神奇的曝光機 – 光波波長的摩爾遊戲

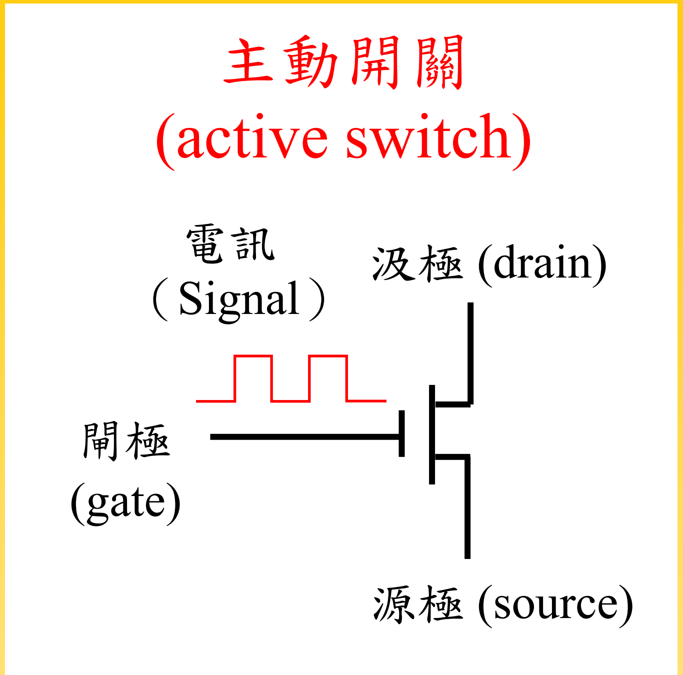
第四課：「數大便是美」數目趨近無窮大時，就會產生高端智慧及神奇魔力

結語：好奇心、想像力、價值觀

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



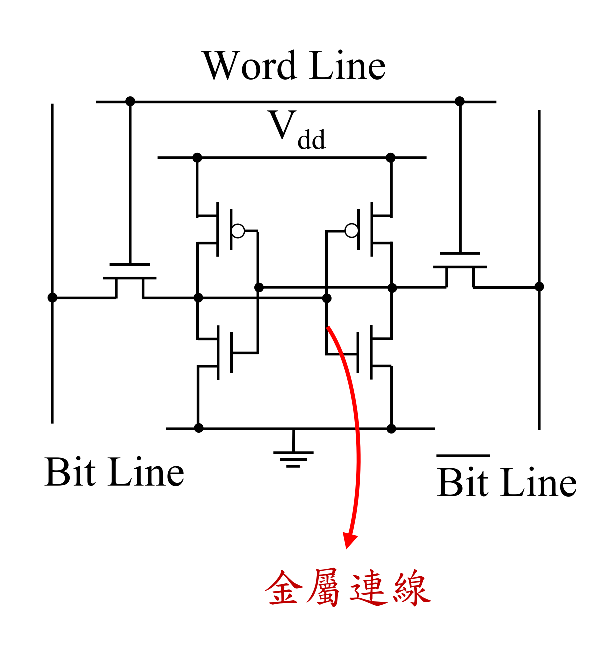


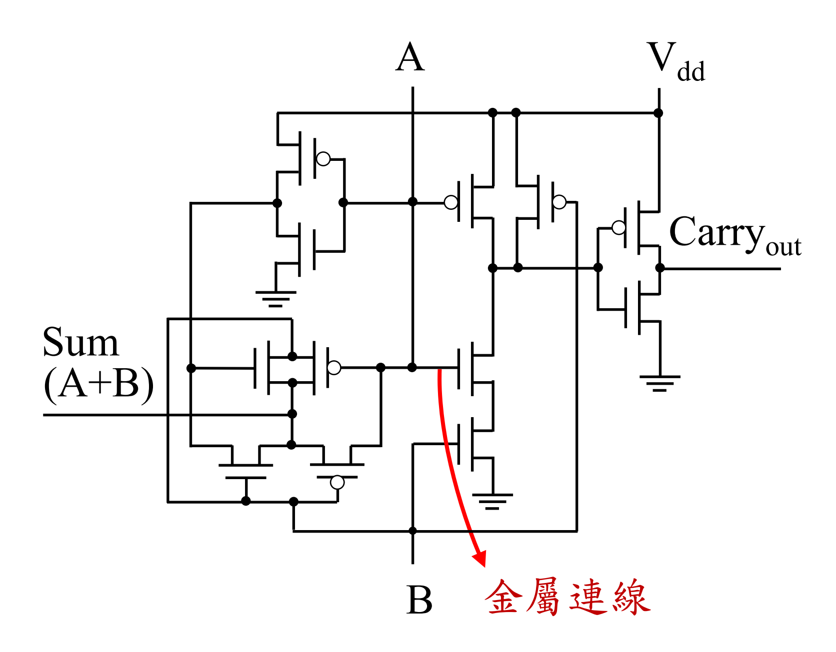
必要的基礎知識 II – 積體電路的基本電路 (Circuit)

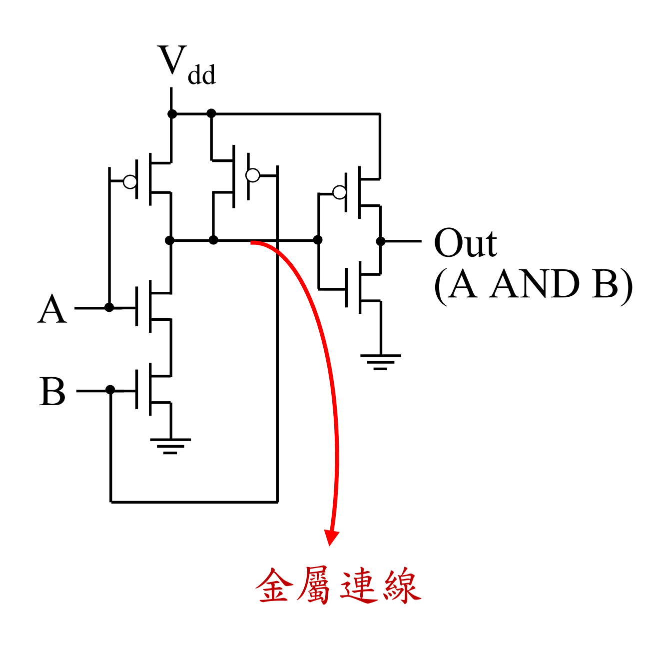
1. 記憶體
靜態隨機存取記憶體
(SRAM)
6 個電晶體

2. 計算電路
加法器 (adder)
12 個電晶體

3. 邏輯電路
AND
6 個電晶體





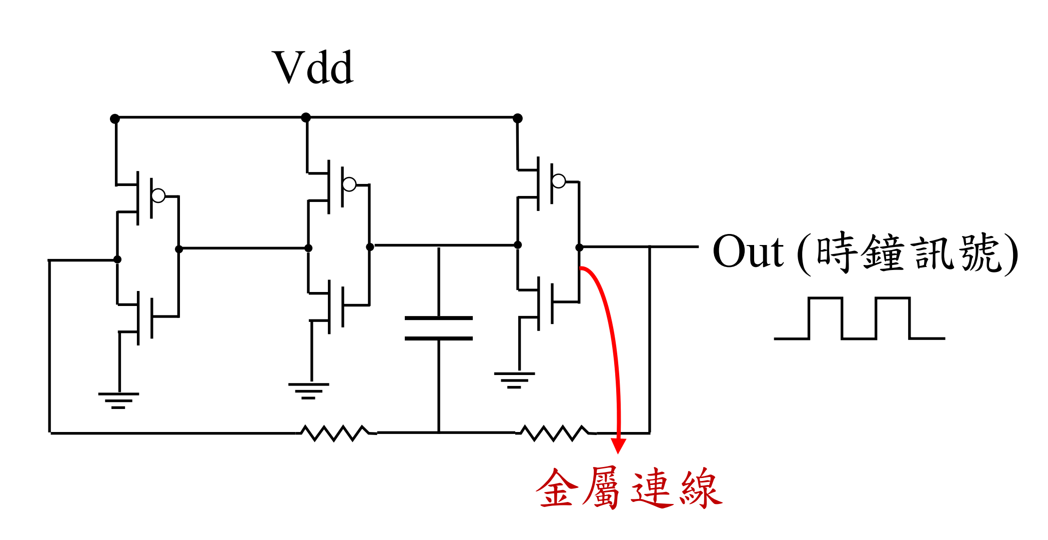


必要的基礎知識 III – 積體電路的基本電路 (Basic Circuit)

4. 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。

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)

  就像複雜的蛋白質由20種胺基酸組成，每種胺基酸由3個含氮鹹基组成，例如 CTA 白胺酸 (leucine), GCT 丙胺酸 (alanine)、、、

- 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

第一課

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

摩爾定律…摩爾教…

- 摩爾定律不是一個自然界的物理定律 (physical law)，而是一個經驗法則 (empirical rule)。
- 摩爾定律是摩爾 (Gordon Moore) 在1965年4月19日於 Electronics 雜誌發表論文提出的。

「一個半導體晶片所含的電晶體數目每隔18-24月倍增」

朋友說：Gordon Moore 真幸運，遇到一個虔誠的使徒傳播宣揚「摩爾教」。

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。

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

138億年前 — 2021

愛因斯坦的廣義相對論 (law of physics)

宇宙為一小點

宇宙不斷膨脹

宇宙具有10^{22}個恆星，直徑 10^{27} 米 (可觀察到的宇宙大小)

人造定律

1958 — 2021

摩爾定律 (empirical law)

2個電晶體
每個為 3×10^{-3} 米大小

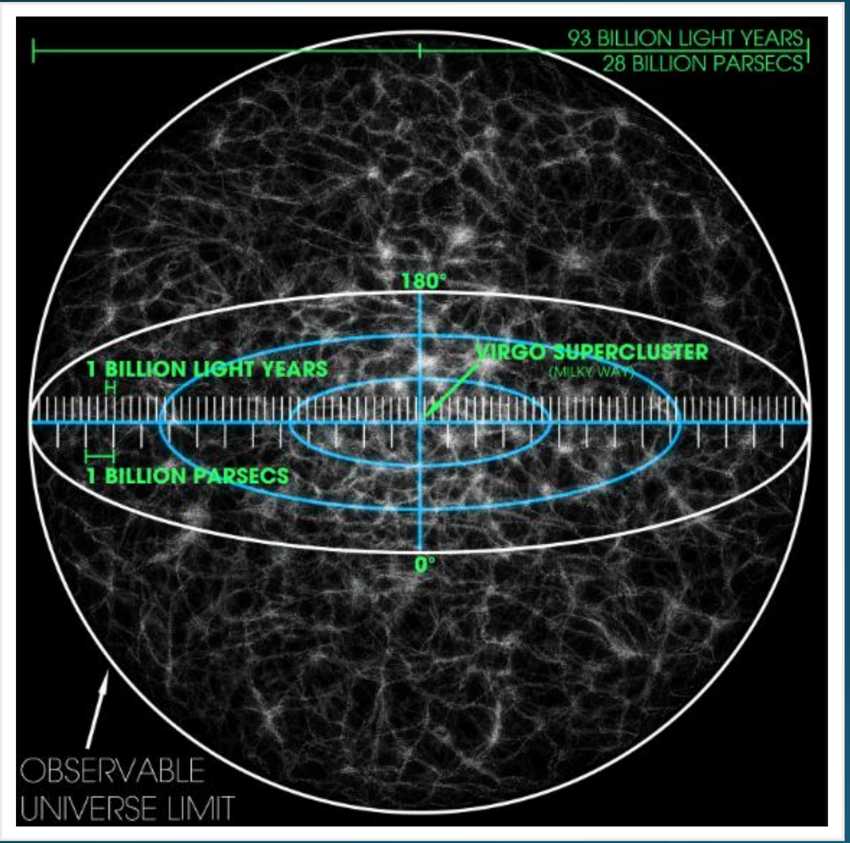
電晶體不斷縮小

6×10^{10}個電晶體
每個為 7×10^{-9} 米大小

"Seven Brief Lessons on Physics" by Carlo Rovelli

宇宙 vs 電晶體

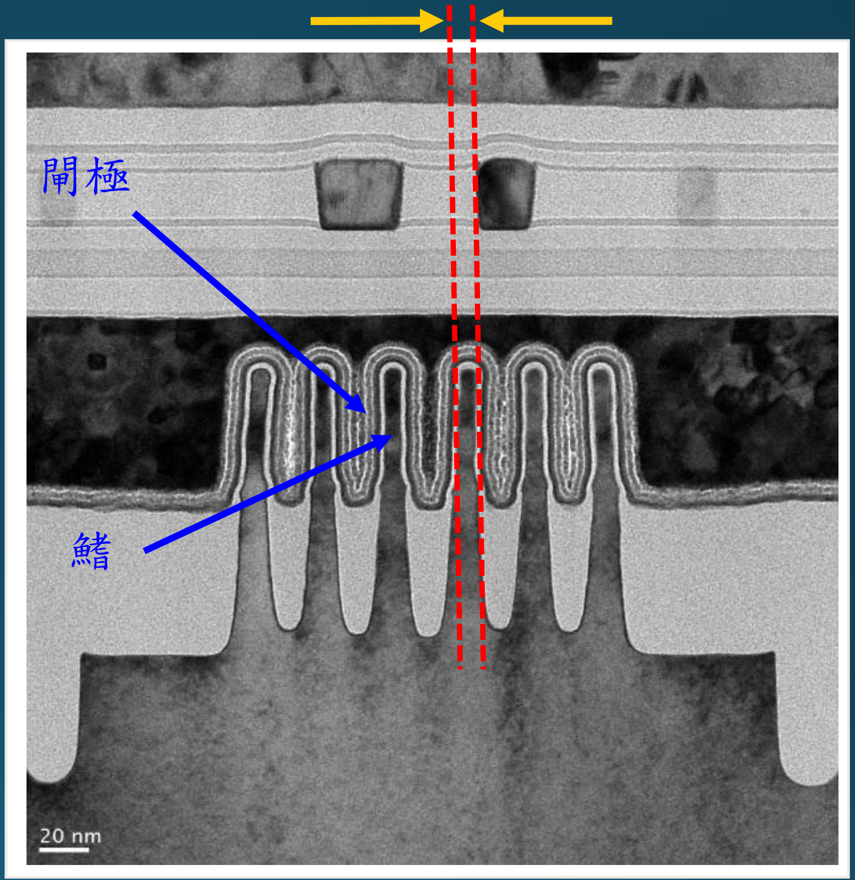
Observable 宇宙
直徑 10^{27} 米



- 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

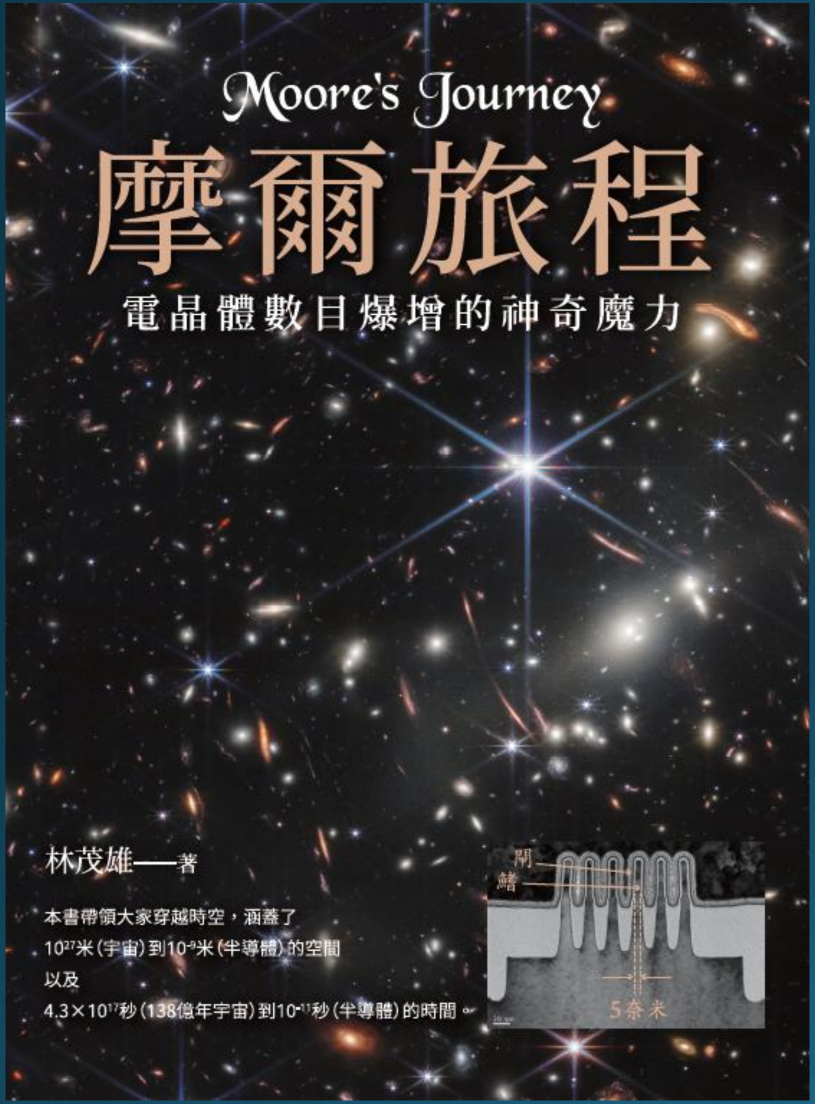
鰭的寬度5奈米



- 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



背景是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效應 (gravitational lensing)，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：

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

  到現在汽車面積應該是：

  6平方公尺$/\ 5 \times 10^{22} = 1 \times 10^{-22}$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 機身長度也才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。

- 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。

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^{11}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。

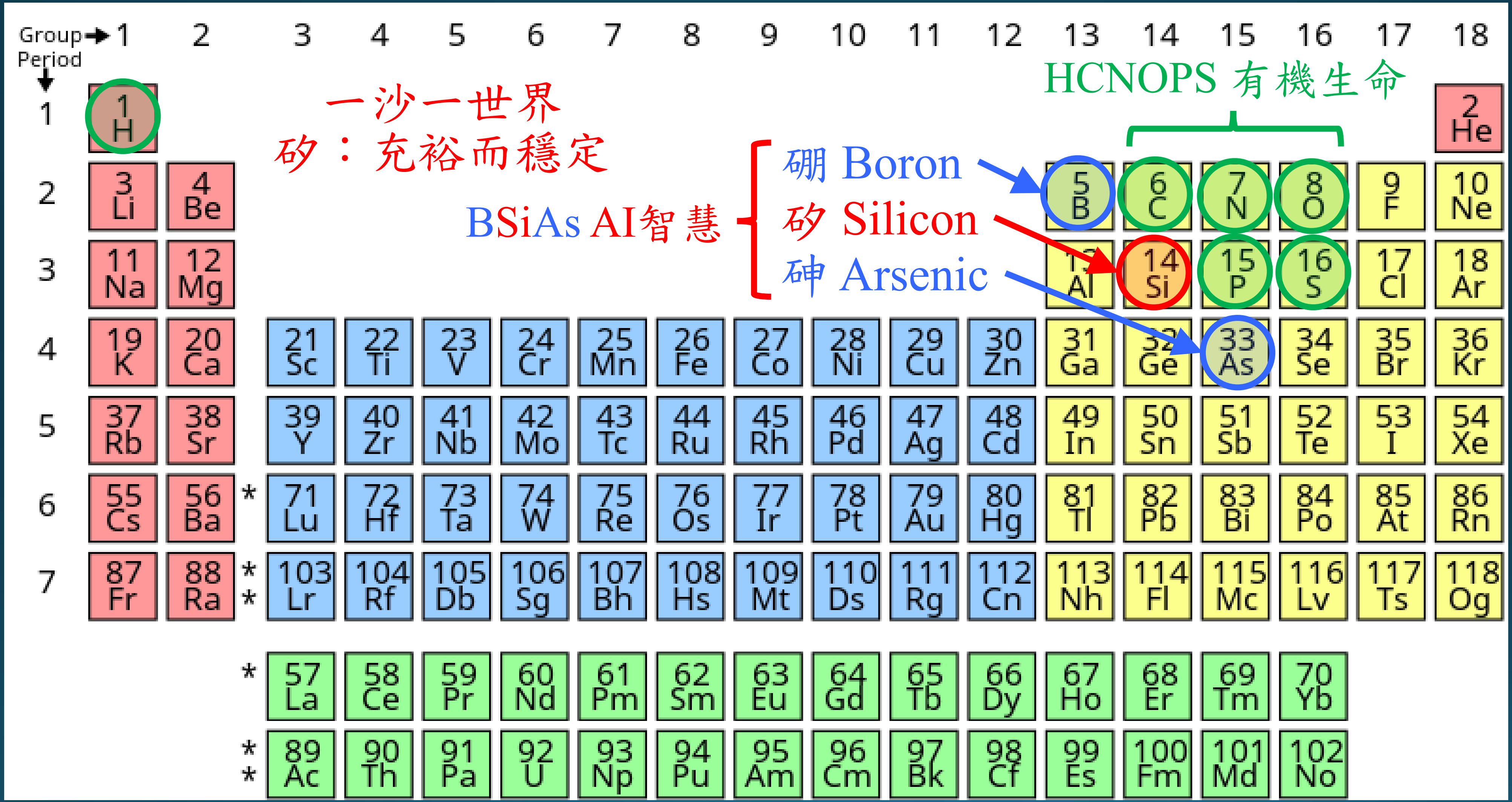
- 一個光子的能量是 hf，其中 f 是該光子的頻率，而 h 是蒲朗克常數 (Plank constant) 6.636×10^{-34} 焦耳秒 (Joule-second)。我認為數字一旦大到34次方 (10^{34}) 或是小到-34次方 (10^{-34})，也就是宇宙的最大單位，或是粒子的最小單位了。

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。

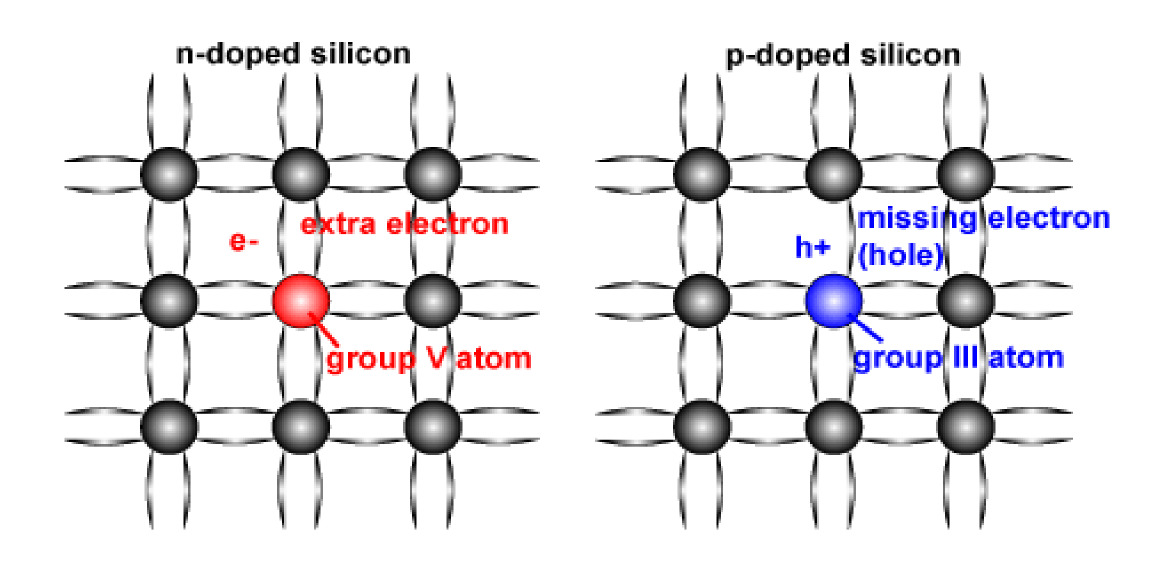
元素週期表



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

必要的基礎知識 V：電子 (electron) 與電洞 (hole)

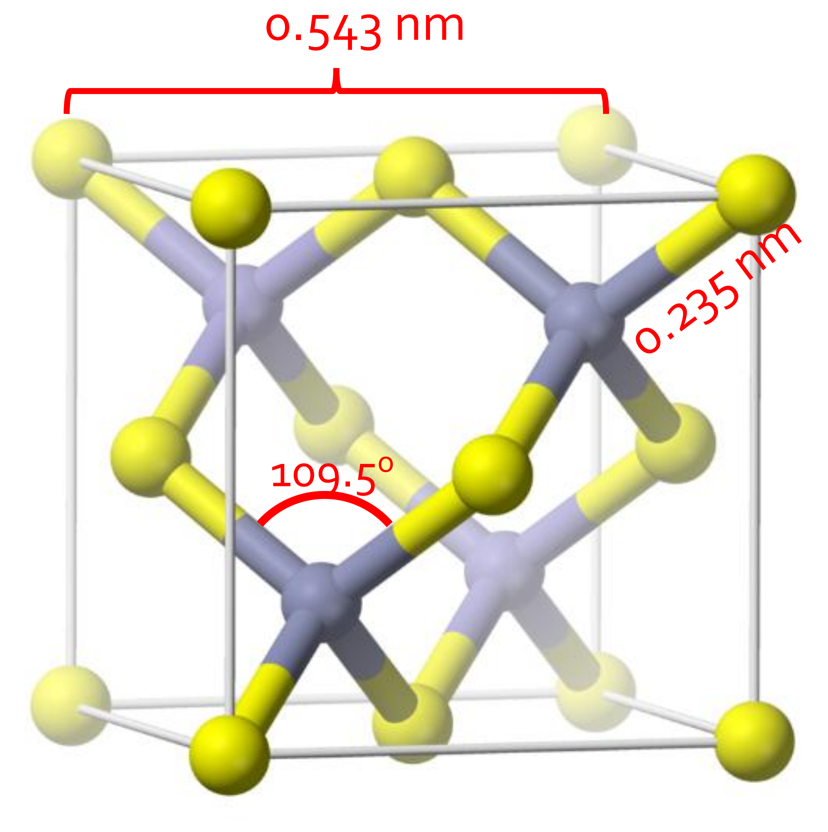
- 四價矽：可以摻入雜質 (doping impurity)
  - 摻入五價磷或砷，多出一個電子，則成為 N型半導體 (n-type semiconductor)
  - 摻入三價硼，缺少一個電子形成電洞 (hole)，則成為 P型半導體 (p-type semiconductor)



https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/doping

最堅固的晶體結構：鑽石立方結構 (Diamond Cubic)

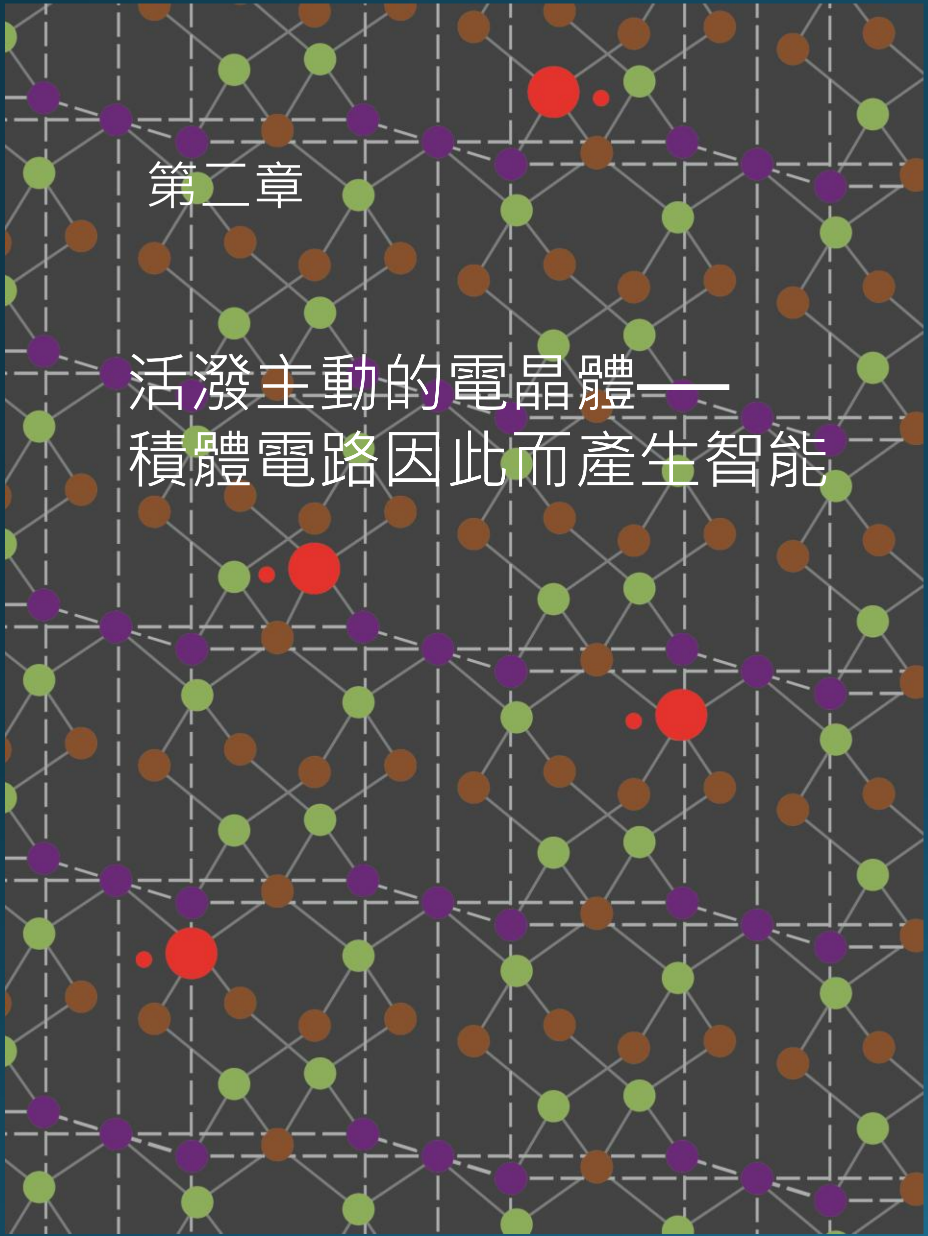
- 神奇的四價鍵元素 (IVA 族) 形成最堅硬的鑽石立方晶格結構。
- 有了這個神奇的結構，才可以在矽晶蝕刻穿洞。
  - 矽晶格
    大小 ：0.543 nm
    Si-Si ：0.235 nm
  - 碳晶格 (鑽石)
    大小 ：0.357 nm
    C-C ：0.154 nm



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

- 人工鑽石不像矽晶圓可以便宜量產

Diamond is Forever, Silicon is for Soul
鑽石永遠保值，矽晶永保活力



低頭看看你手上的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。

基本粒子的標準模型

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

	Matter, Fermion			Interaction, Boson		
夸克	u 上夸克	c 魅夸克	t 頂夸克	g 膠子	H 希格斯玻色子	標量玻色子
夸克	d 下夸克	s 奇夸克	b 底夸克	γ 光子		
輕子	e 電子	μ 渺子	τ τ子	Z Z玻色子	規範玻色子	
輕子	ν_e 電微中子	ν_μ μ微中子	ν_τ τ微中子	W W玻色子	規範玻色子	

光子：
質量 0
電荷 0
自旋 1

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

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個交互作用力的玻色子 (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！

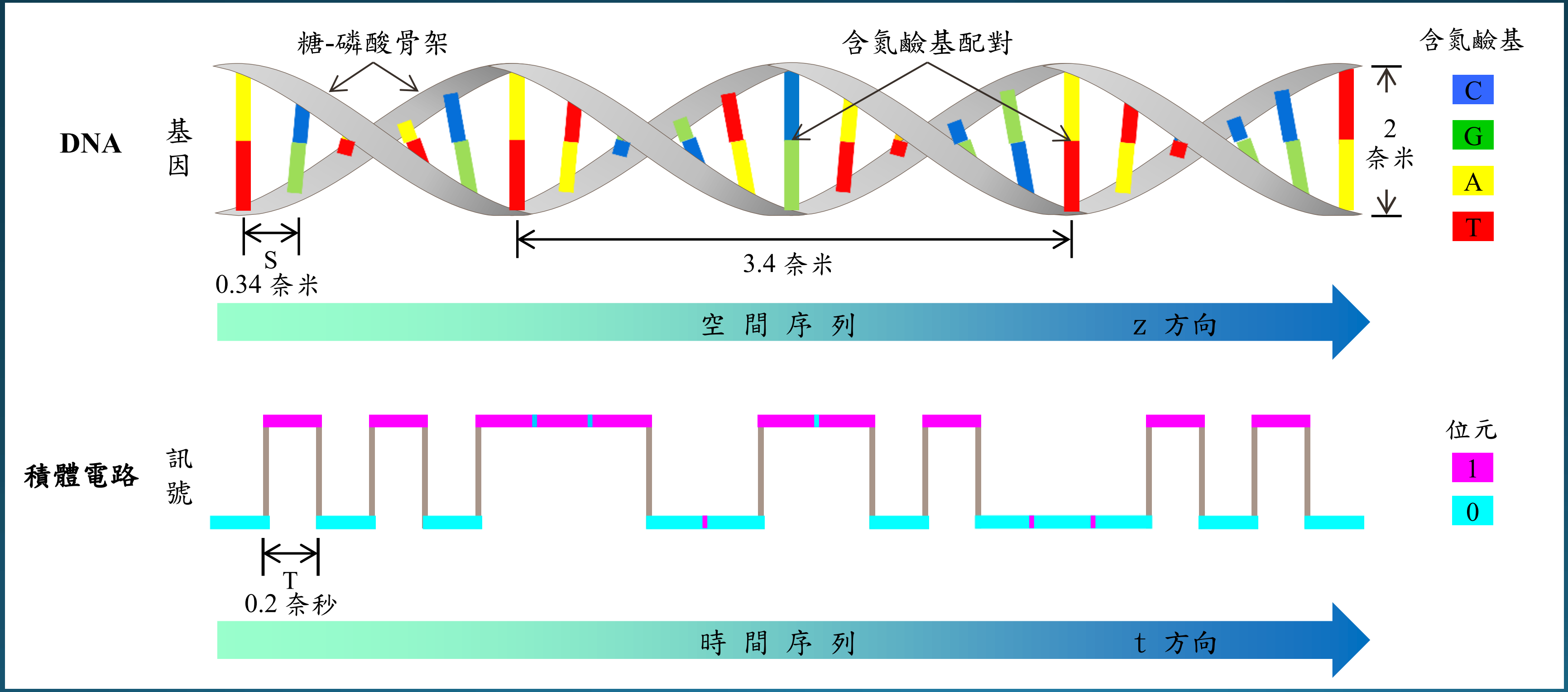
~~半導體故事的源起~~

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

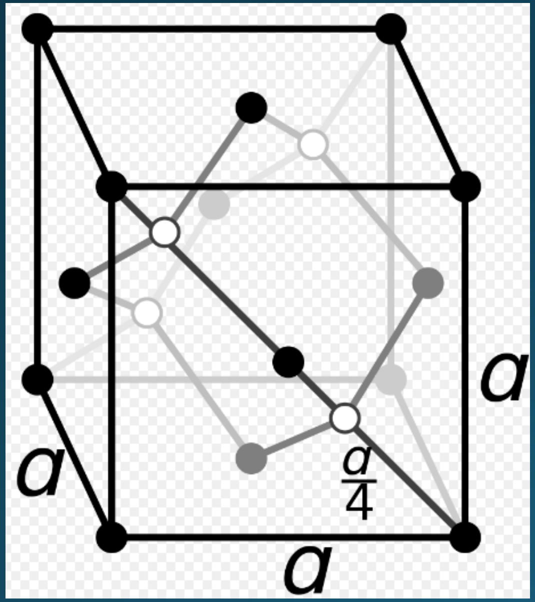
- 時間和空間在自然界的DNA和人造晶片的積體電路扮演的角色也許隱藏著深邃的祕密，這和複雜的時間和空間物理原理有關嗎？這可能蘊藏著DNA Computing或是Quantum Computing的線索和啟發嗎？
- 時間和空間源遠流長、浩瀚無邊，其中隱含的物理深不可測，令人無法透徹了解，以致於人們陷入迷惑無法自拔的深淵。
- 值得帶著回家的信息：你所知道的時間和空間不是真正的時間和空間。

驚人的工藝：2奈米的尺寸的電晶體

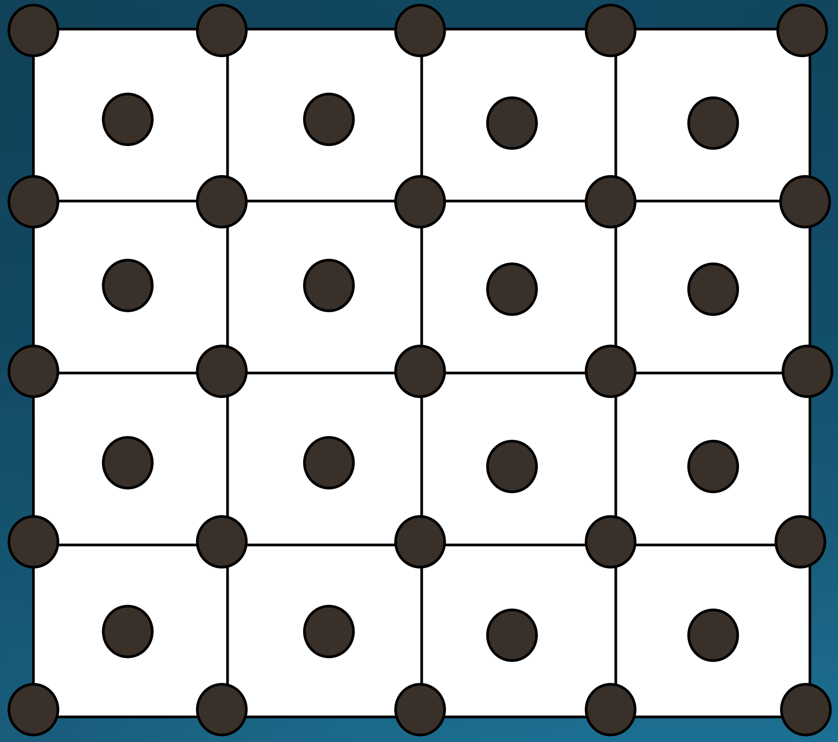
- 2奈米×2奈米的面積含有41個矽原子
- 人類已經有能力可以利用2奈米技術節點設計並量產只含41個原子的區域
- DNA兩股之間的距離是2奈米

人類可以匡住幾個原子來把玩嗎？

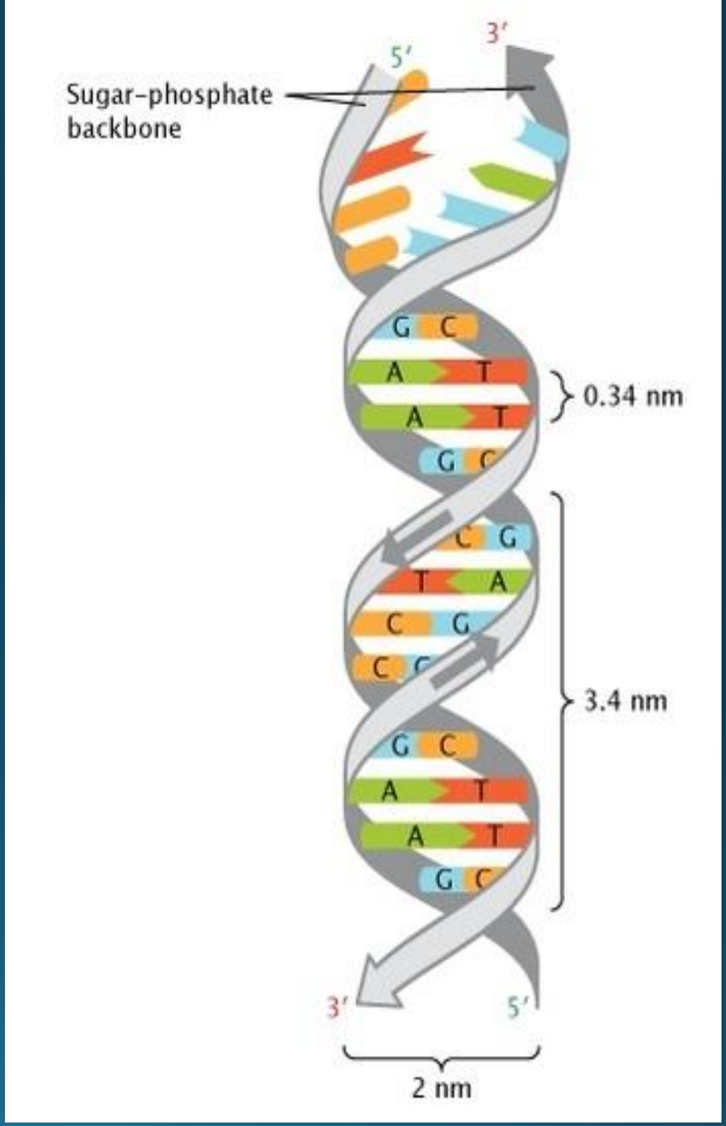
Silicon crystal lattice



0.543nm



2.172 nm



第二課　積體電路的兩個基礎

1. 活潑主動的電晶體
   - 積體電路因此而產生智能

2. 千絲萬縷的金屬連線
   - 積體電路因此而誕生

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

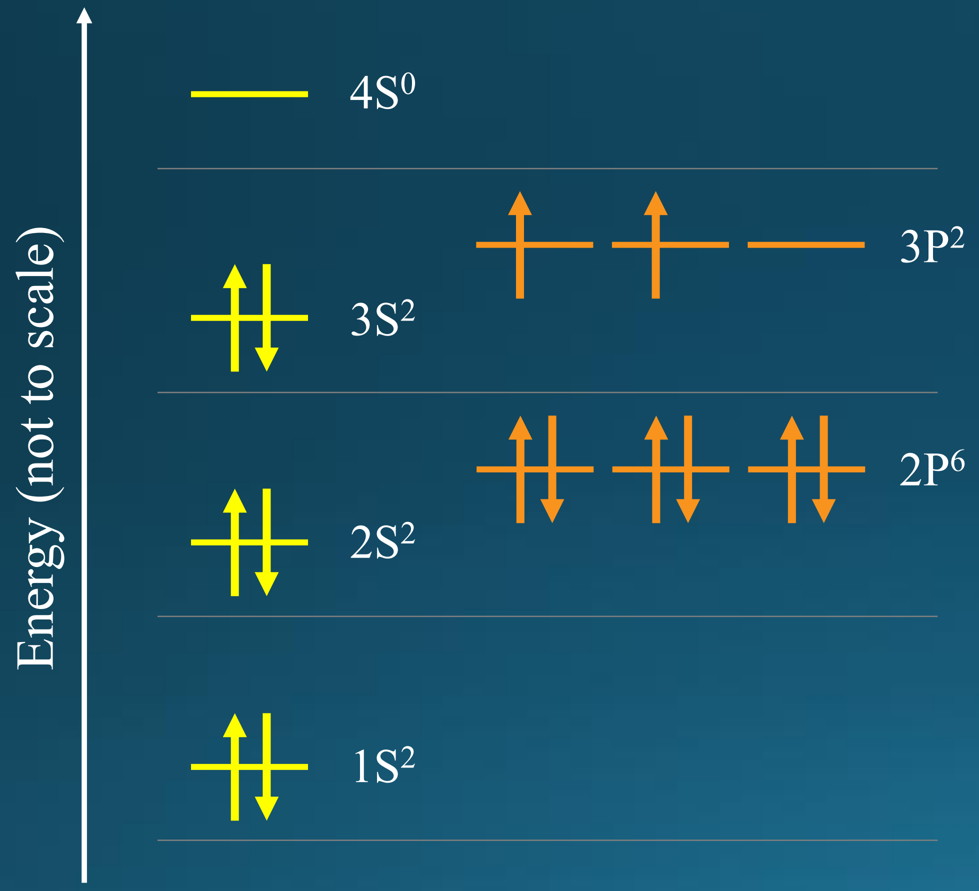
闡釋了電晶體的兩個基本機制 – P/N界面的空乏層及MOS電容的反轉層

量子力學	量子熱力學	古典熱力學 古典電動力學
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？ • 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。	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？ • 費米-迪拉克分佈統計原理描述電子填進這些能帶的法則： (1) 從低位能能階填起，依序往高位能能階填 (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。	各能帶的電子如何在晶體內移動，形成電流的導通與否呢？ • 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。

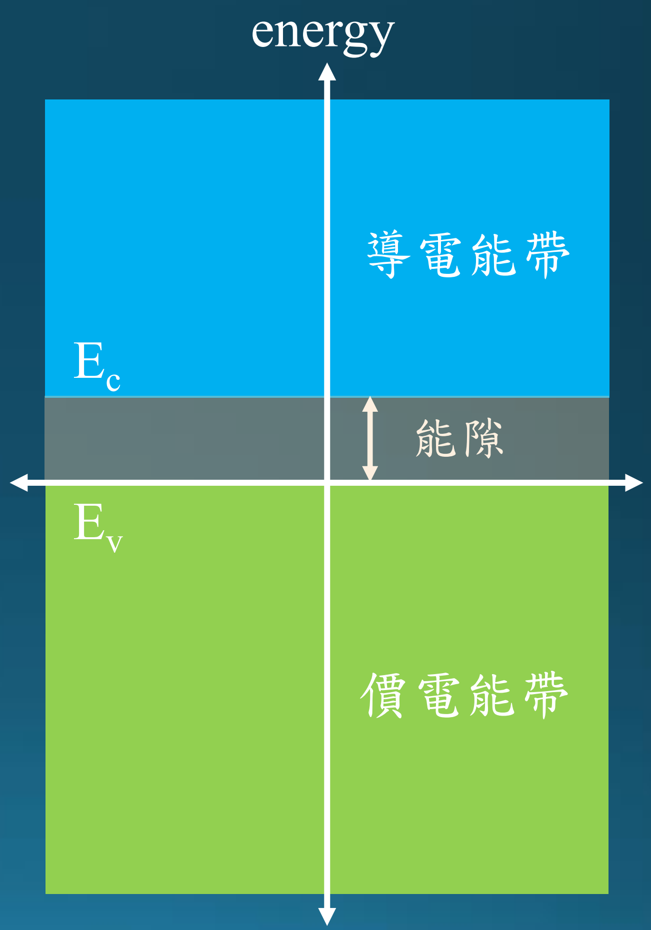
在矽晶中，眾多矽原子最外層活躍的價電子在晶體中又是如何運行的呢？

矽在原子狀態中的能階

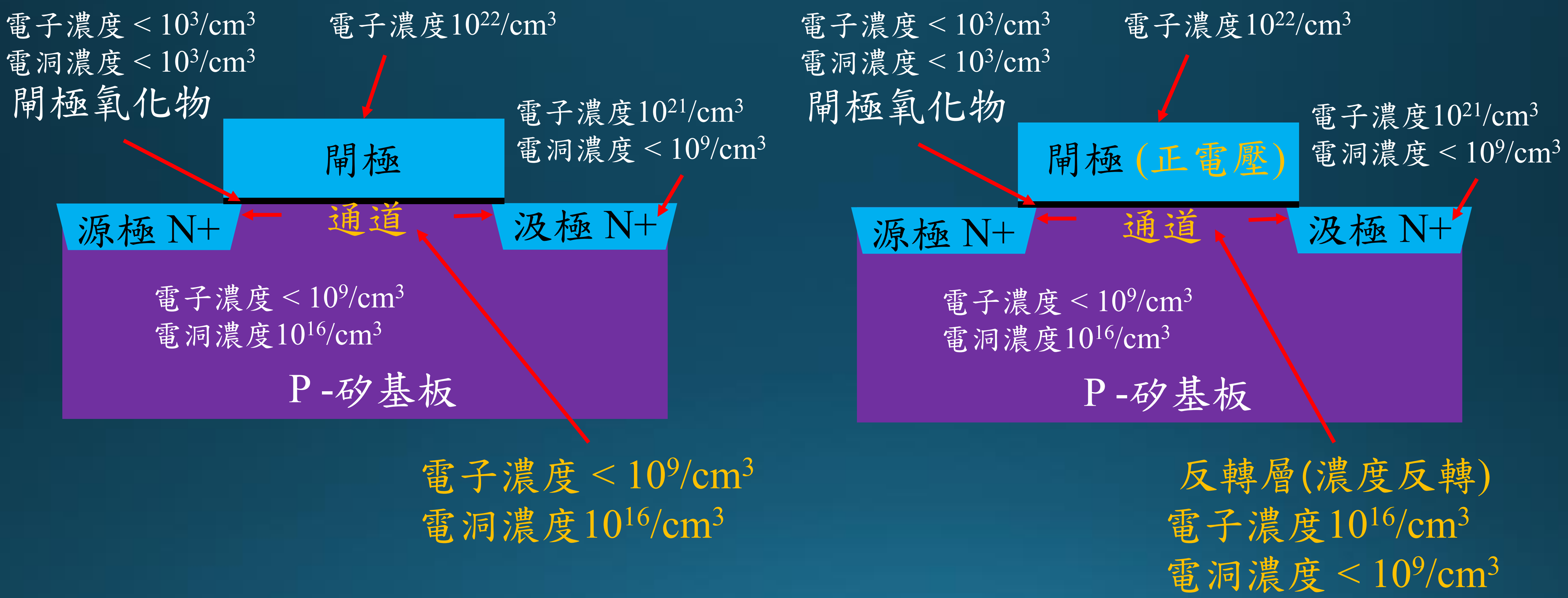
($1S^22S^22P^63S^23P^2$)



矽在晶格結構中的能帶與能隙



電晶體是少數載子的遊戲 – 反轉層 (Inversion Layer)



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$10^{10}/cm^3$ 增加到$10^{18}/cm^3$。
- 同時我也特別花了一點巧思，利用近似方法 (approximation)，導出一個我想要的公式，並利用這個公式來明白的揭露電晶體的電流隨外加電壓成指數型增加。此近似方法也許有點隨意 (casual)，不夠嚴謹 (rigorous)，但很高興此近似公式能夠非常清楚的指出電晶體的電流隨電壓成指數型增加 ：

$$n_p \approx (n_i^2/N_A)\, e^{q((1-\alpha) Vg - Vfb)/kT}$$

- 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？

神真的會賜給人類完全及完整創造AI的能力嗎？

- 事實上所有量子計算的Qubit，就是在創造一個「人造原子 Artificial Atom」(AA)。
- 為什麼不用「自然原子 Nature Atom」(NA) 呢？因為 NA 很難觀察和溝通，而 AA 比較容易觀察和溝通。
- Superconducting Qubit – Transmon (Artificial Atom) 包含一個約瑟夫森界面 (Josephson Junction) 和1個電容，形成2個能態：基態(Ground State)和激態(Excited State)。
- 只有接近絕對零度(-273 ºK)，才有量子現象 (2個能態的能階差 0.001 eV)。

第二課 積體電路的兩個基礎

1. 活潑主動的電晶體
   - 積體電路因此而產生智能

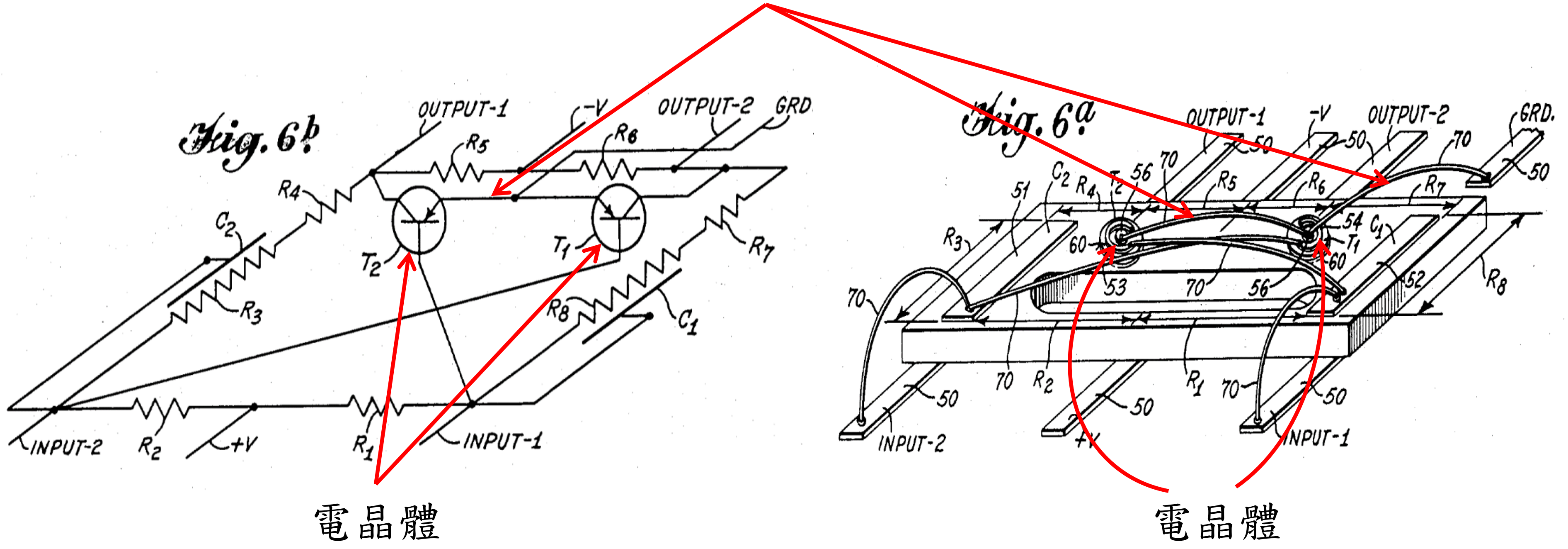
2. 千絲萬縷的金屬連線
   - 積體電路因此而誕生

千絲萬縷的金屬連線- 積體電路因此而誕生 (1)

金屬飛線 (flying wire)

Jack Kilby 在1959年2月6日申請的積體電路專利 (US Pat. 3,138,743)

利用金屬飛線來連接元件

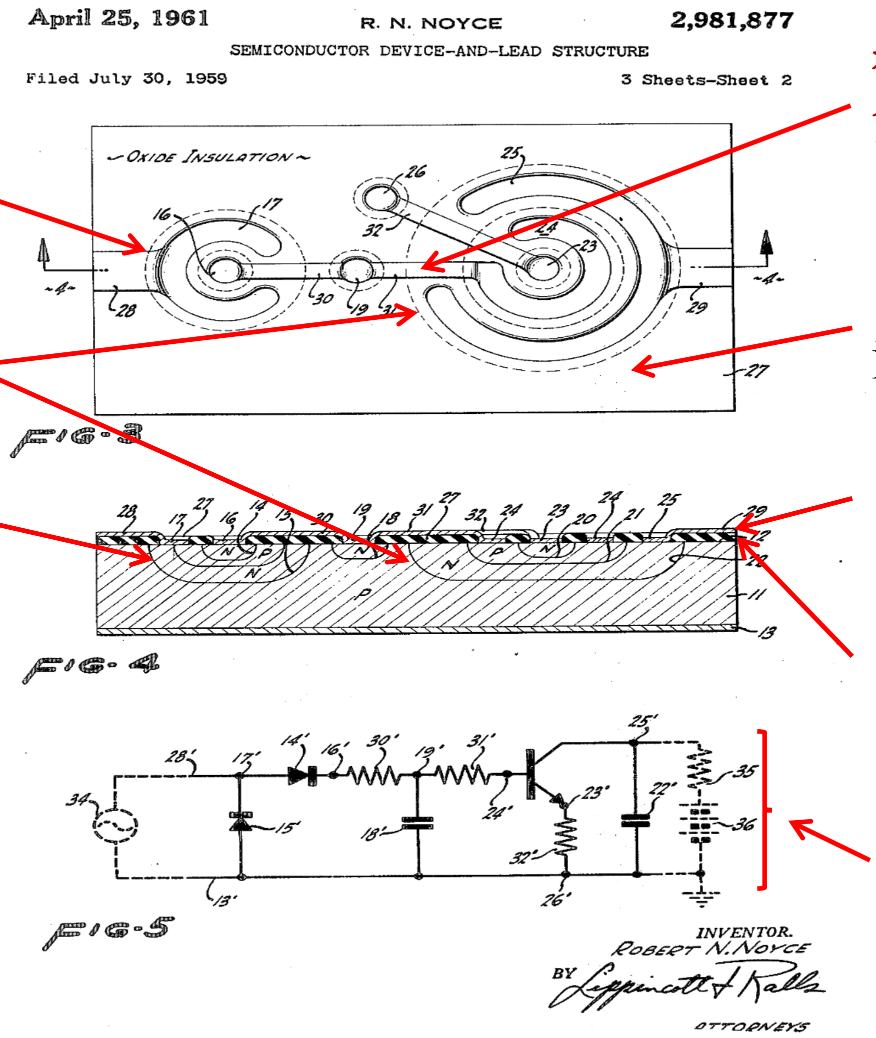


複振盪器 (multi-vibrator)
2個電晶體，8個電阻，2個電容

千絲萬縷的金屬連線- 積體電路因此而誕生 (2)

金屬貼線 (adhering wire)

Robert Noyce在1959年7月30日申請的積體電路專利 (US Pat. 2,981,877)



二極體
(diode)

NPN 電晶體
(transistor)

二極體
(diode)

利用黏貼在絕緣層(SiO_2)表面的金屬連線來連結電晶體和二極體

氧化物絕緣層 (SiO_2)是由Fairchild的Jean Hoerni所發明

導電金屬連線
(conductive strip)

氧化物絕緣層
(oxide insulator)

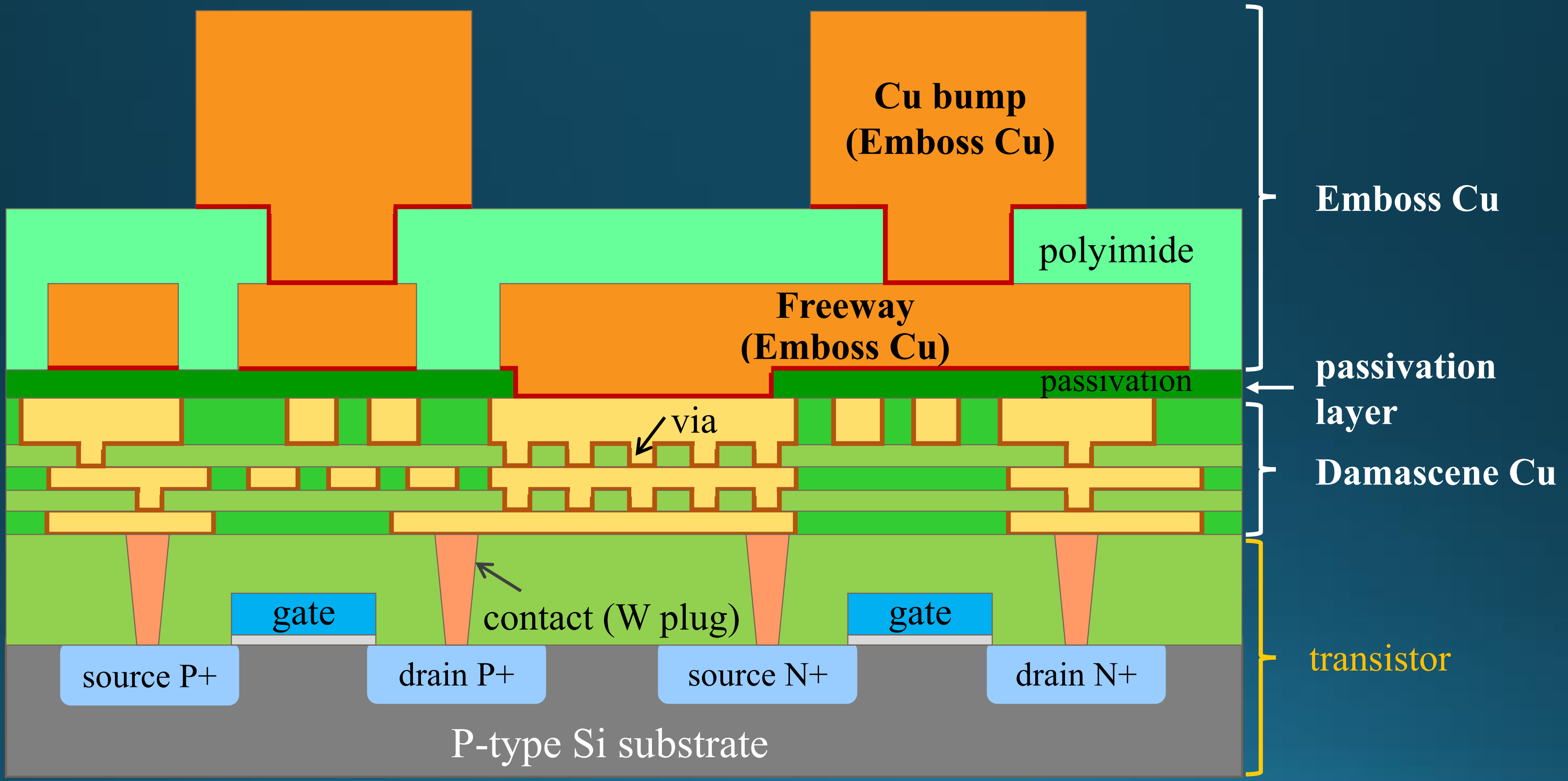
整流放大器
(rectified amplifier)
1個電晶體，2個二極體，
3個電阻， 2個電容

積體電路的發明將「數目暴力」轉變成「數大便是美」

積體電路的發明，也即矽晶上金屬連線的發明，解決了當年「數目暴力」的困境，使得一個晶片所含的電晶體數目，可以遵循著摩爾定律，達到百億個；將「數目暴力」(The Tyranny of Numbers) 轉變成「數大便是美」(The Beauty of Big Numbers) 的美麗境界。

當年米輯公司構想中晶片上金屬連線的理想方案

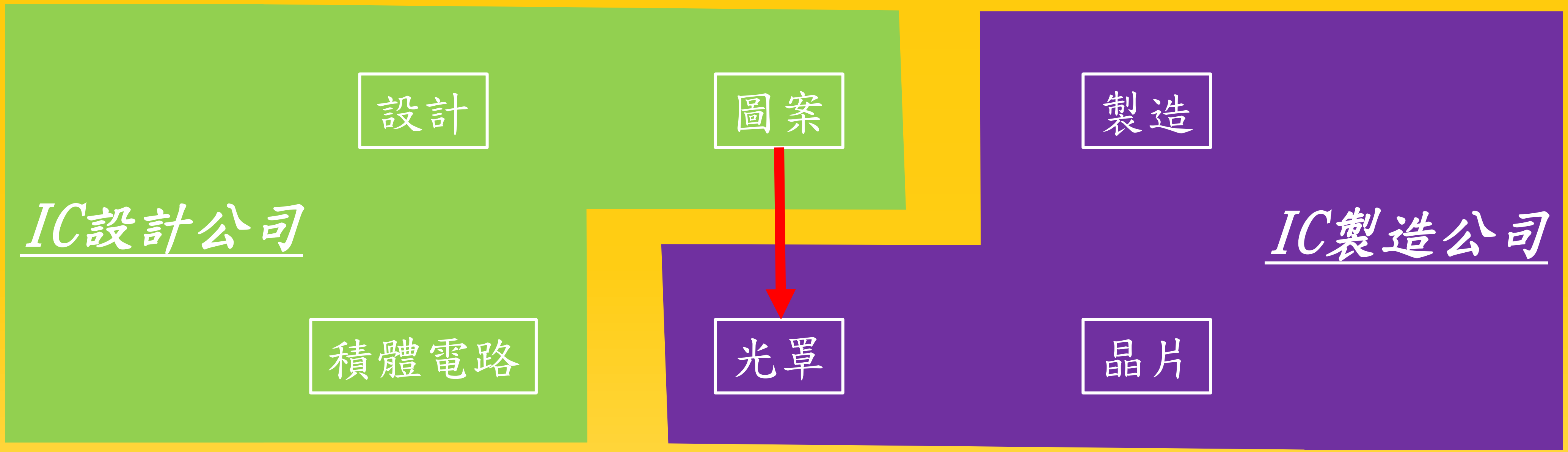
Damascene Cu (fine line interconnection) + Emboss Cu (Freeway + Cu bump)



第三課

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：

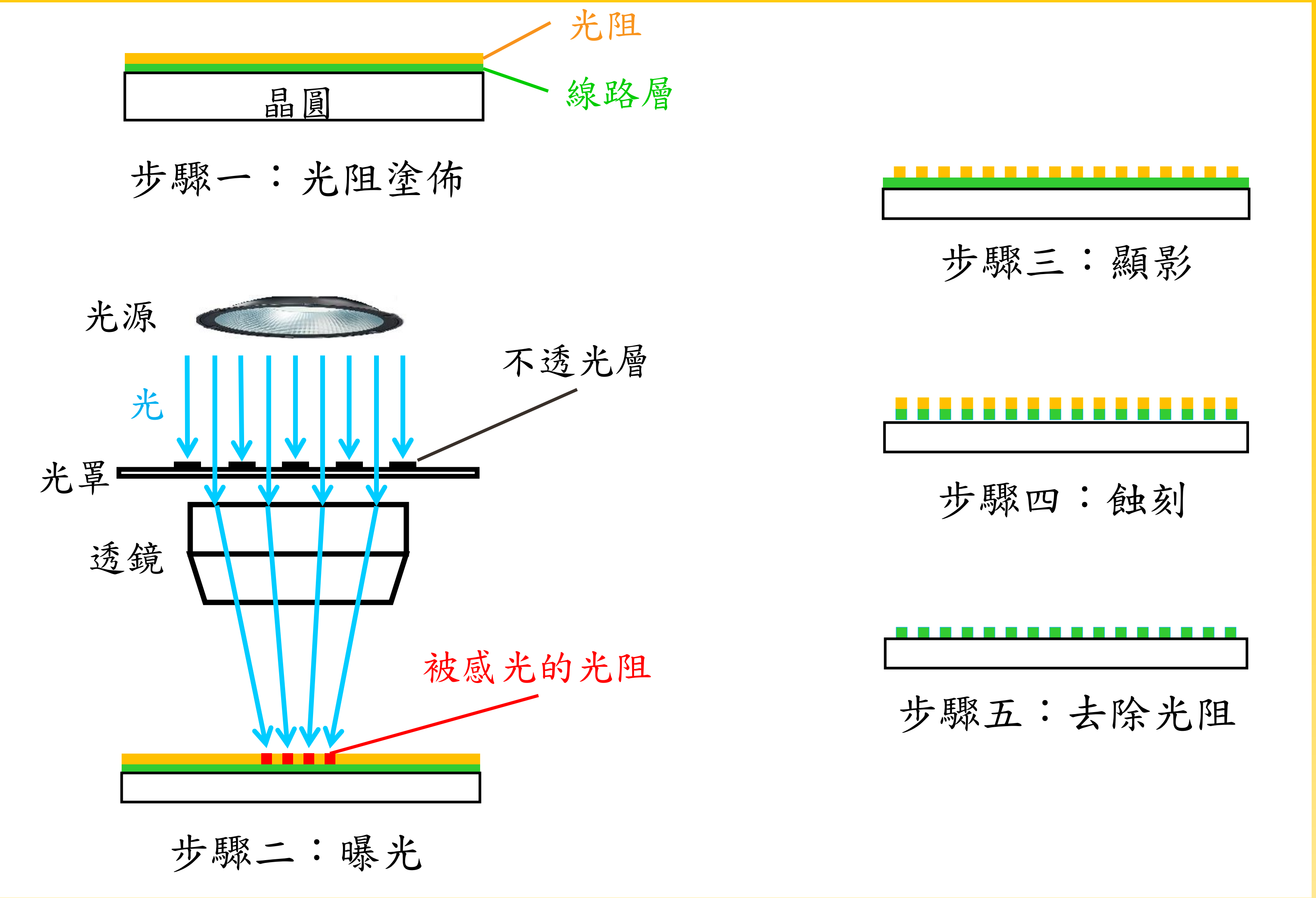
1. 把設計的積體電路轉化成多層的圖案，根據每一層的圖案製作每一層的光罩

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)

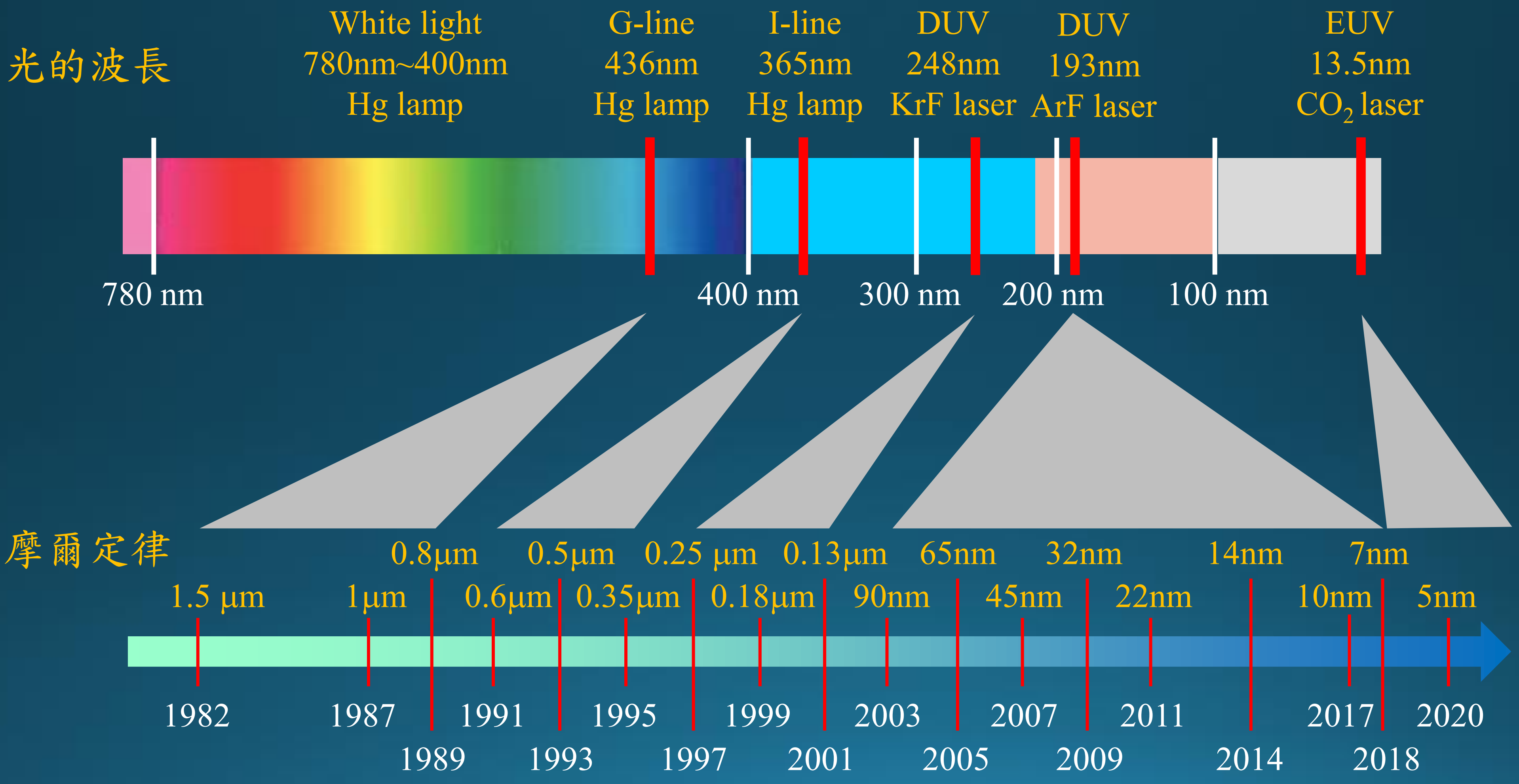


必要的基礎知識 VIII：曝光機(影印機/雕刻刀)的基本原理

- 光波波長與解析度 (wavelength and resolution)
  $R = \lambda / (2NA)$
  $NA = n \sin \boldsymbol{\theta}$
  $0.3 < n \sin \boldsymbol{\theta} < 1.4$ (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
  - $\boldsymbol{\theta}$ = 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)。



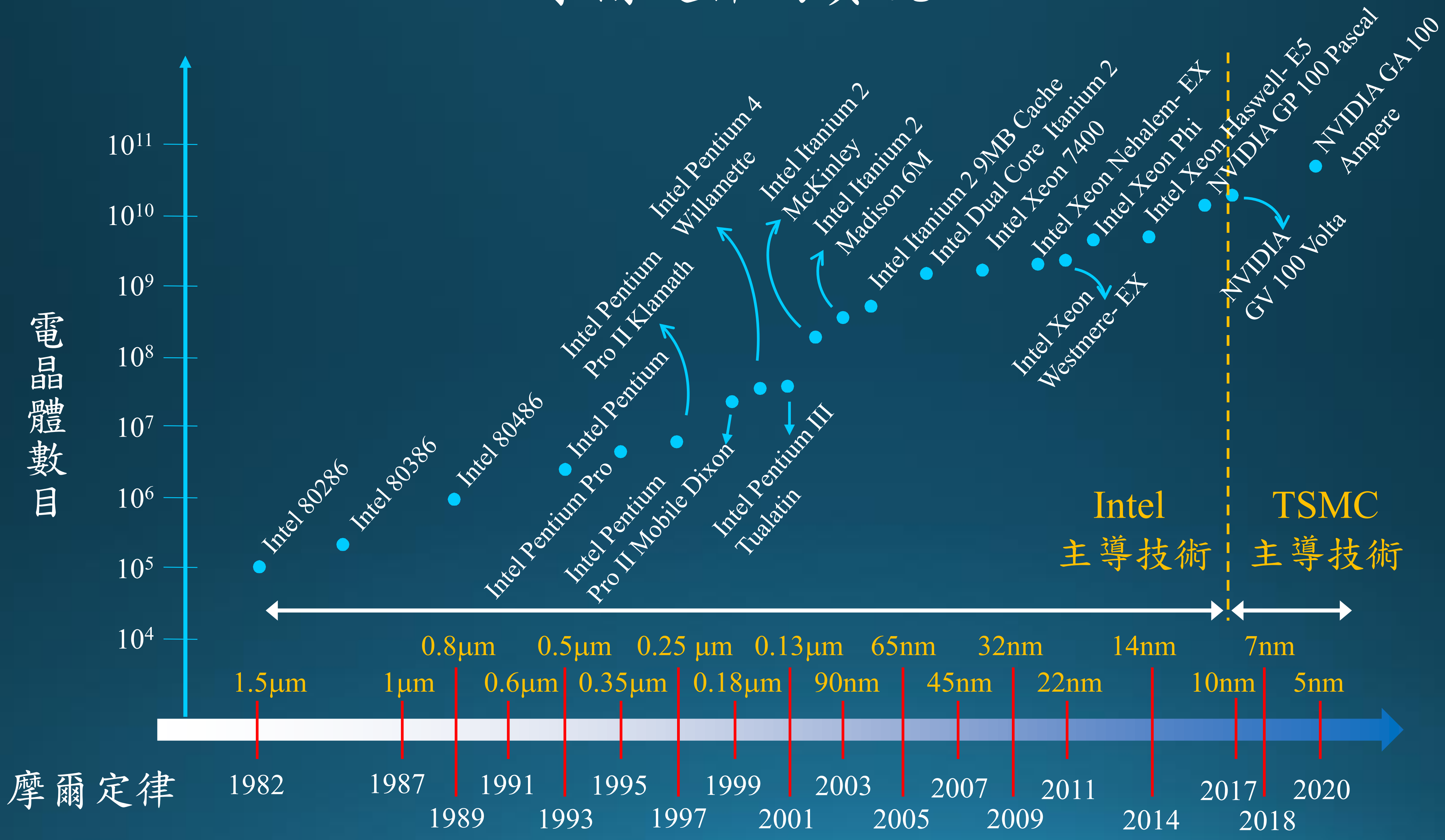
摩爾定律 (Moore’s Law)

- 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 。

40 奈米 $\xrightarrow{70\%}$ 28 奈米 $\xrightarrow{70\%}$ 20 奈米 $\xrightarrow{70\%}$ 14 奈米 $\xrightarrow{70\%}$ 10 奈米

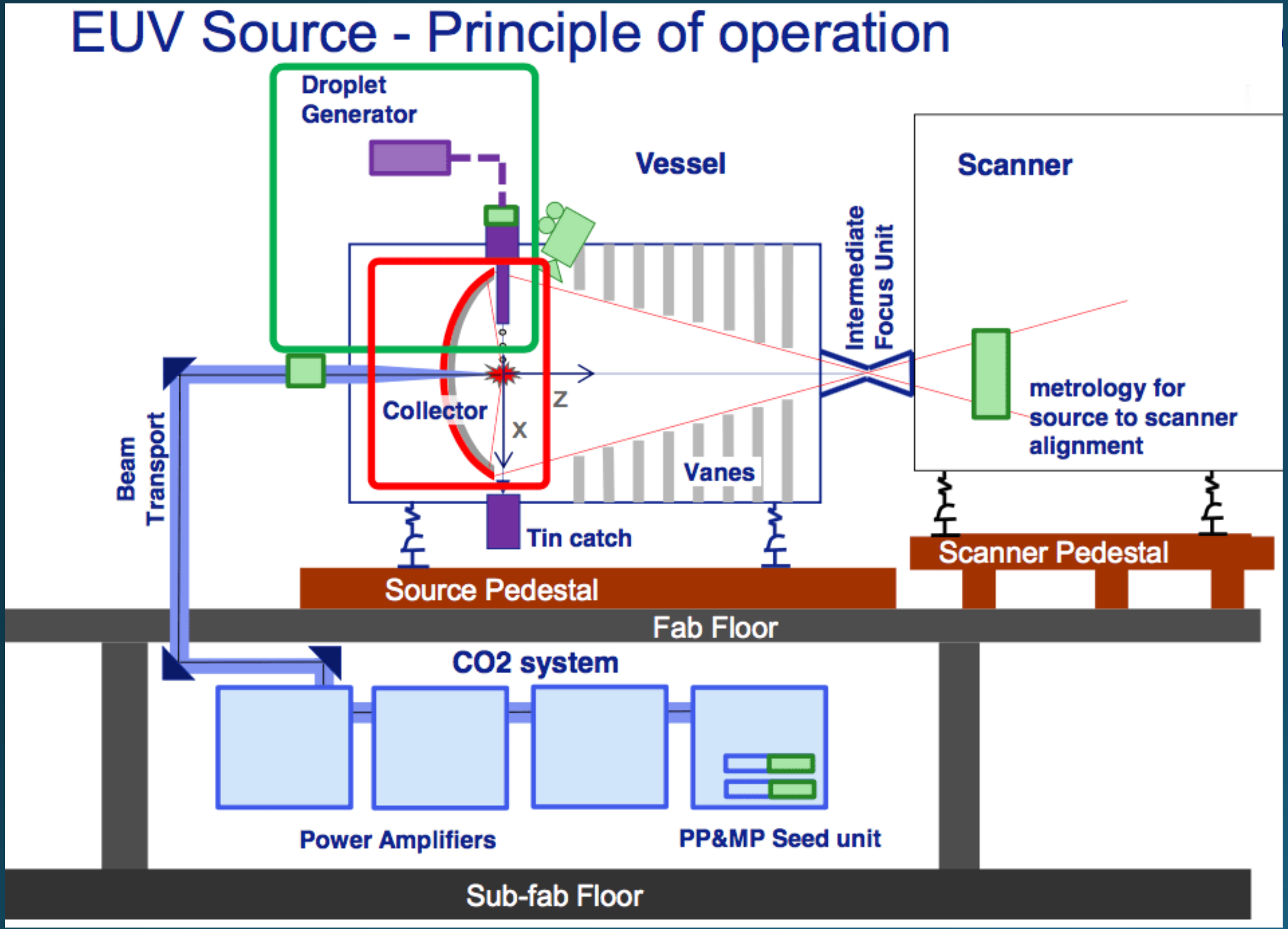
$\xrightarrow{70\%}$ 7 奈米 $\xrightarrow{70\%}$ 5 奈米 $\xrightarrow{70\%}$ 3 奈米 $\xrightarrow{70\%}$ 2 奈米

摩爾定律的實現



電晶體數目
10^{11}
10^{10}
10^{9}
10^{8}
10^{7}
10^{6}
10^{5}
10^{4}
Intel 80286
Intel 80386
Intel 80486
Intel Pentium Pro
Intel Pentium
Intel Pentium Pro II Klamath
Intel Pentium Pro II Mobile Dixon
Intel Pentium 4 Willamette
Intel Pentium III Tualatin
Intel Itanium 2 McKinley
Intel Itanium 2 Madison 6M
Intel Itanium 2 9MB Cache
Intel Dual Core Itanium 2
Intel Xeon 7400
Intel Xeon Nehalem- EX
Intel Xeon Westmere- EX
Intel Xeon Phi
Intel Xeon Haswell- E5
NVIDIA GP 100 Pascal
NVIDIA GV 100 Volta
NVIDIA GA 100 Ampere
Intel
主導技術
TSMC
主導技術
0.8µm
0.5µm
0.25 µm
0.13µm
65nm
32nm
14nm
7nm
1.5µm
1µm
0.6µm
0.35µm
0.18µm
90nm
45nm
22nm
10nm
5nm
摩爾定律
1982
1987
1989
1991
1993
1995
1997
1999
2001
2003
2005
2007
2009
2011
2014
2017
2018
2020

鬼斧神工、巧奪天工的EUV曝光機

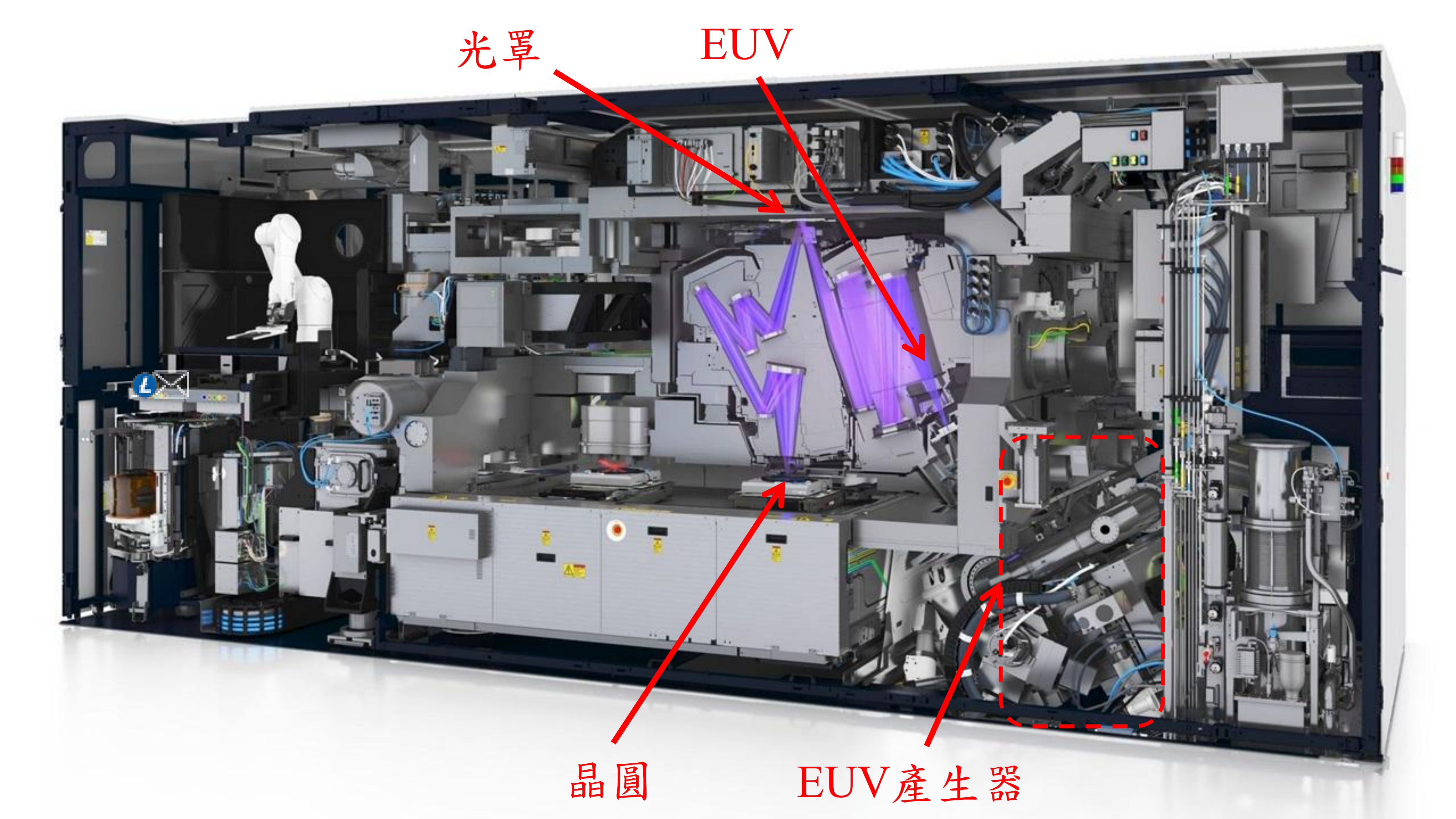


1. CO_2 雷射波長 (λ=10.6微米)
2. 用CO_2雷射轟擊錫滴 (每秒五萬次) 將其蒸發成為氣體並使氣體變成電漿 (Laser Produced Plasma, LPP)。
3. 電漿溫度高達4 × 10^5度 (30eV)，其能量激發錫原子，形成帶多價電離子的高能狀態 (Sn^{+8} – Sn^{+19}) 。
4. 當高能狀態的多價電離子和電子結合，回到較低能的離子狀態或原子時，就會產生EUV。

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/

另一顆逐漸昇起的人造太陽：核融合的第二顆人造太陽能

1. EUV Machine 用CO_2 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. 2021年9月初，MIT的Commonwealth Fusion Systems (CFS) 大力投入研發核融合系統核融合。用高能中性粒子束 (neutral particle beam) 或高頻電磁微波 (microwave) 在小區域範圍內激發產生高溫 (1.0×10^8 ºC) 高熱的氘 (deuterium) /氚 (tritium) /電子電漿 (氘和氚都是氫的同位素)，同時用磁場去匡住此高溫 (1×10^8 ºC) 高熱的氘/氚/電子電漿，使其不碰觸反應爐的側壁，進而產生核融合反應，輸出巨大的能量。此種用磁場匡住核融合反應的方式，屬於磁侷限融合 (Magnetic Confinement Fusion, MCF)。

3. 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 ºC) 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 的啓發，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。

第四課

「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：

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

2.2×10^8 個晶片 $\times$ 5x10^{10} 個電晶體 $=$ 1.1×10^{19} 個電晶體

1.1×10^{19} 個電晶體 / 10^{11} 個腦細胞 $=$ 1.1×10^8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。

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，不可相提並論!

- 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CO_2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CO_2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，天差地遠!

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。

結　語

*i*Cometrue：

*i*nspire × *i*magine × *i*nnovate × *i*nvent

$= i^4 = 1$

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(inspire)；

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(innovate)；

i^4. 並找出創新的實施例(embodiment)，這個實施例就是專利發明 (invent)。

$i^4 = 1$

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。

從一粒沙看世界 ~~~~
從一張圖看人生 ~~~~

The Starry Night ~ Vincent van Gogh.

- 星空
  - 一輪彎月外，有11顆星。
  - 有人說，畫中下方最亮的那顆是金星，其餘的星星就是梵谷所屬的星座白羊座。
  - 星空中湍流渦旋的銀河
- 地上
  - 平靜的小鎮
- 銜接小鎮和星空
  - 象徵信仰和宗教的教堂尖塔
  - 象徵不安和死亡的柏樹

要驗證這個可能性，我們可以借助星圖軟件的幫助。只要將星圖軟件的設定調校到畫作完成的日期和地點：1889年6月22日前後，時間是日出前，地點在歐洲 (法國南部)，我們會發現當時金星、白羊座和月亮的相對位置跟畫中的描繪大致吻合。

http://www.hokoon.edu.hk/weeklysp/1208_1.html#gsc.tab=0