

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12月28日

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。
死靜的安寧，成了耀動的平衡；
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」在台大物理系刊《時空》寫的一篇文詞，主要是在探討如何了解自然物理：心、數學、畫、感情

我心長悠悠



禾里

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，成了耀動的安寧；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，蘆葦隨風搖曳；稍遠處，濁水無言奔流；再遠處，山峯巖繞；朝陽正從兩山交接的空隙間升起；
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！
啟天，我帶了畫架和畫具！
噴漆鋪紙，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，觀感晦暗，鮮明顯現；倘是畫筆有時而拙，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！



Life vs. AI

<h2>What Is Life ? The Physical Aspect of the Living Cell</h2>	<h2>What Is AI ? The Physical Aspect of the AI</h2>
<ul style="list-style-type: none">• 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。	<ul style="list-style-type: none">• 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，產生有低熵高度秩序的高品質智慧：牛頓、莎士比亞、貝多芬、愛因斯坦、、、
- AI可以取得足夠能量 (Energy) 往前走嗎？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：半導體精彩神奇旅程的主要里程碑

第五課：我的摩爾人生

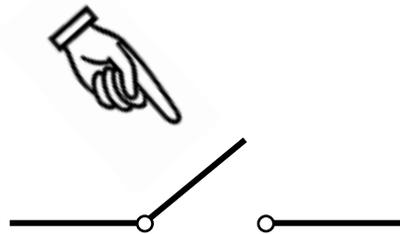
第六課：「數大便是美」數目趨近無窮大時，就會產生高端智慧及神奇魔力

結語：好奇心、想像力、價值觀

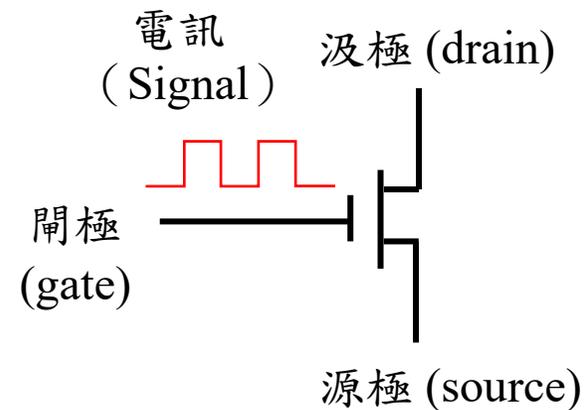
必要的基礎知識 I (Essential Basic Knowledge, EBK) – 電晶體

- 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

手動開關
(manual switch)



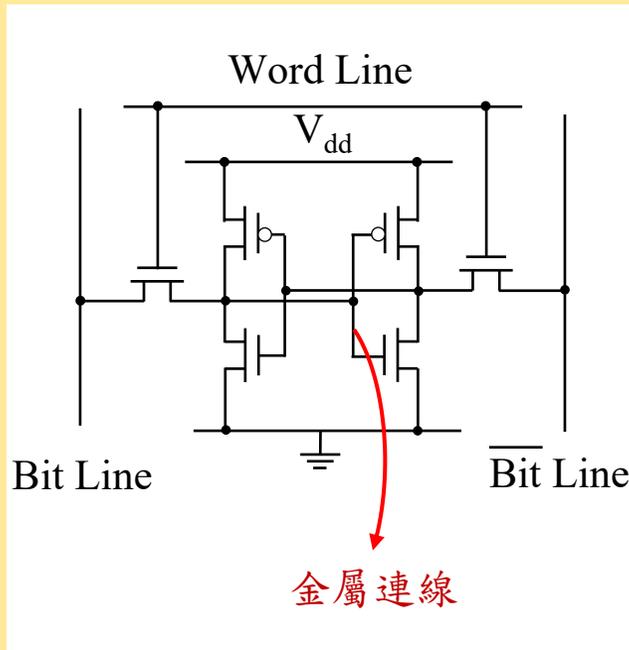
主動開關
(active switch)



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

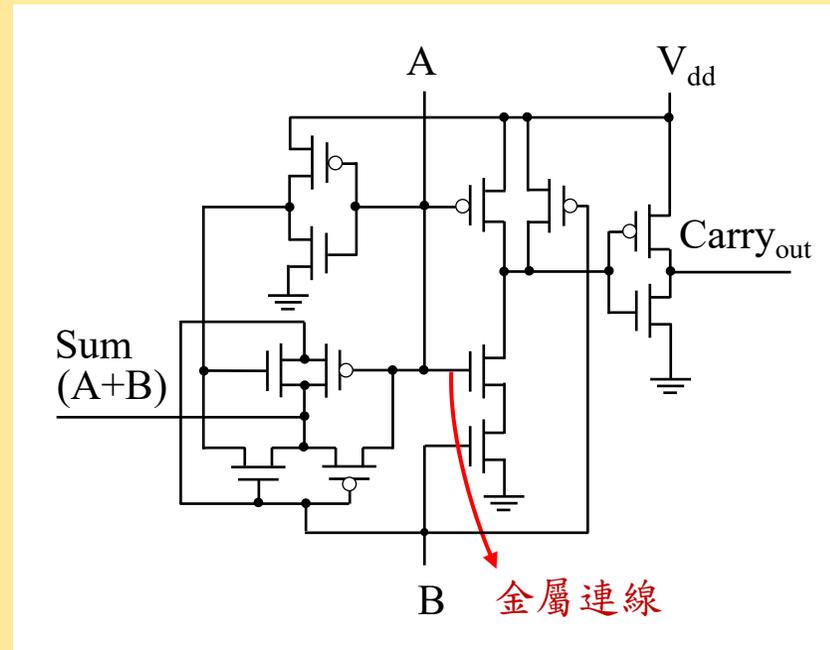
1. 記憶體

靜態隨機存取記憶體
(SRAM)
6 個電晶體



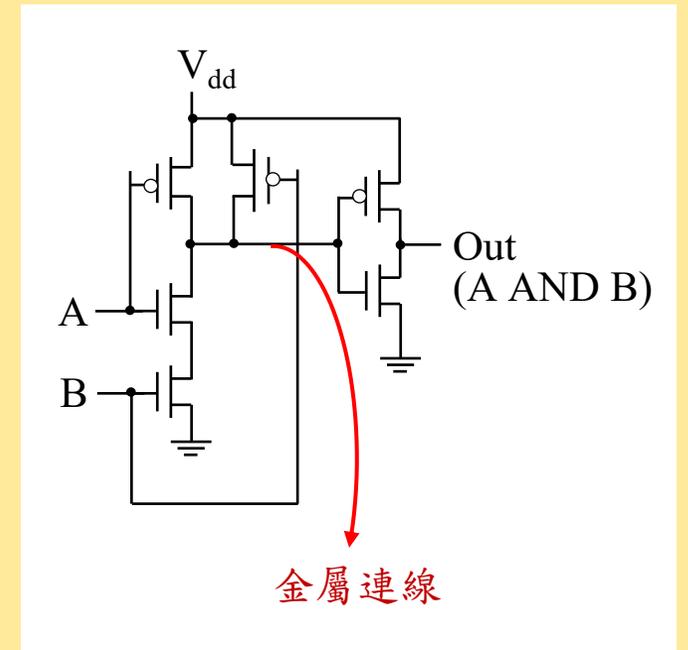
2. 計算電路

加法器 (adder)
12 個電晶體



3. 邏輯電路

AND
6 個電晶體



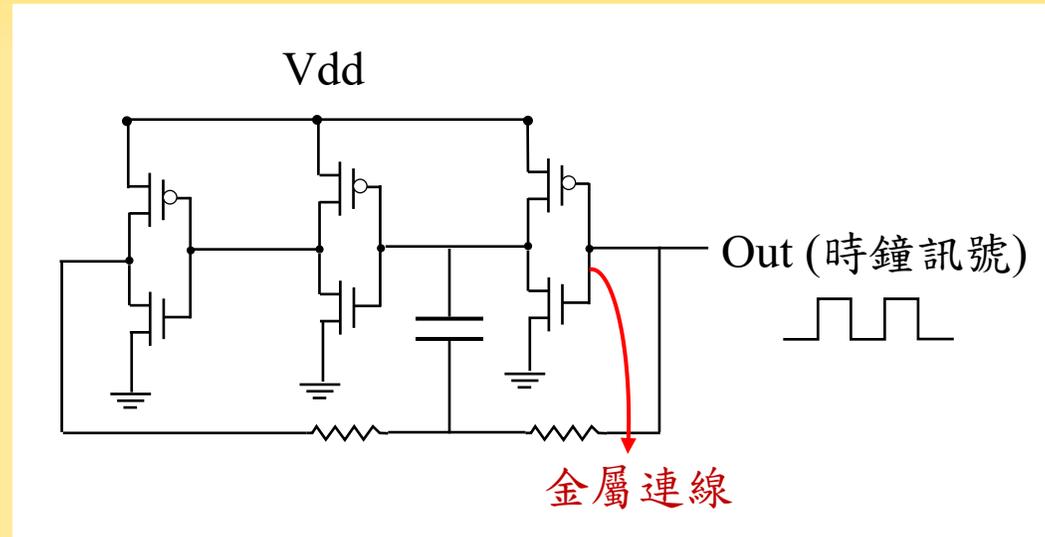
 : P型電晶體  : N型電晶體

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個含氮鹼基組成，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 (Gordon Moore) 在1965年4月19日於 Electronics 雜誌發表論文 “Cramming more components onto integrated circuit” (「塞更多元件進到積體電路晶片裡」) 寫到：

「一個以最低成本製造的電子零件其所含的複雜度，大約每年將倍增。短期來看，這每年倍增的速率，縱使不加速，也將持續。長期來看，縱使我們不相信這每年倍增的速率在未來10年或更久將會改變，或許將來增加的速率會有些不確定性。」
- 10年後，摩爾在1975年的IEEE國際電子元件會議 (IEEE International Electron Devices Meeting, IEDM) 把增加的速率從「每年將倍增」更改成「每2年將倍增」，這也是後來大家所熟知的「摩爾定律」。

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



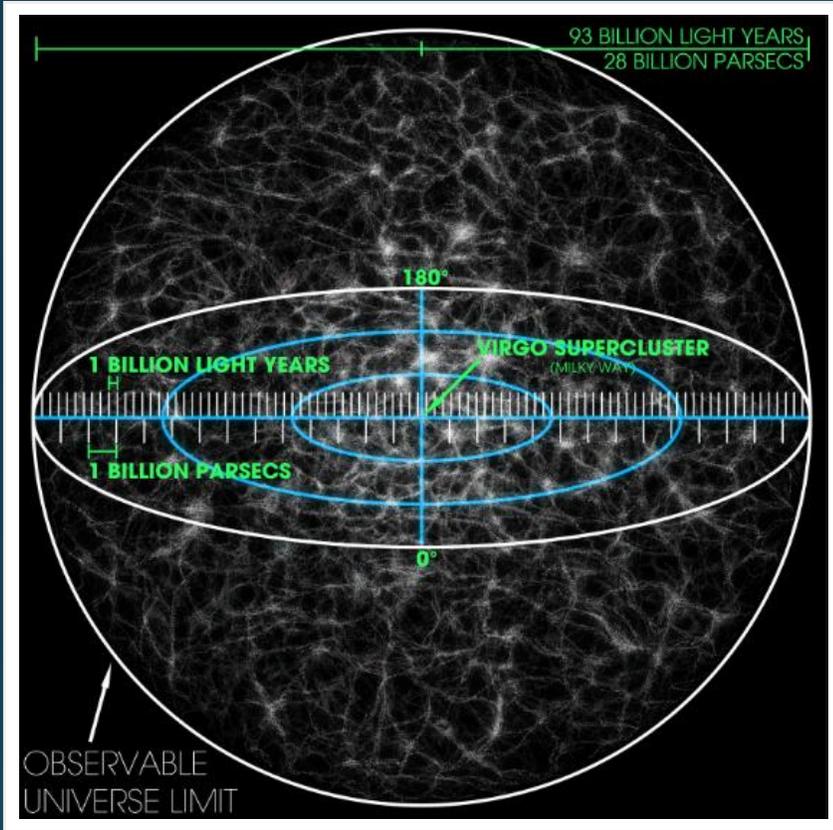
人造定律



“Seven Brief Lessons on Physics” by Carlo Rovelli

宇宙 VS 電晶體

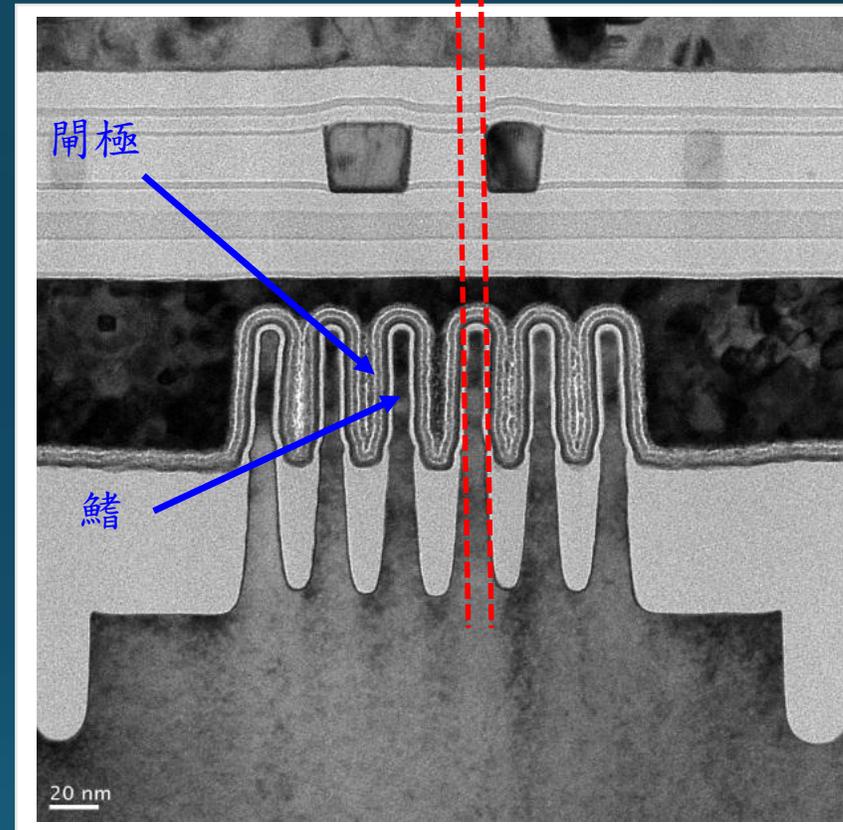
observable 宇宙
直徑 10^{27} 米



- 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

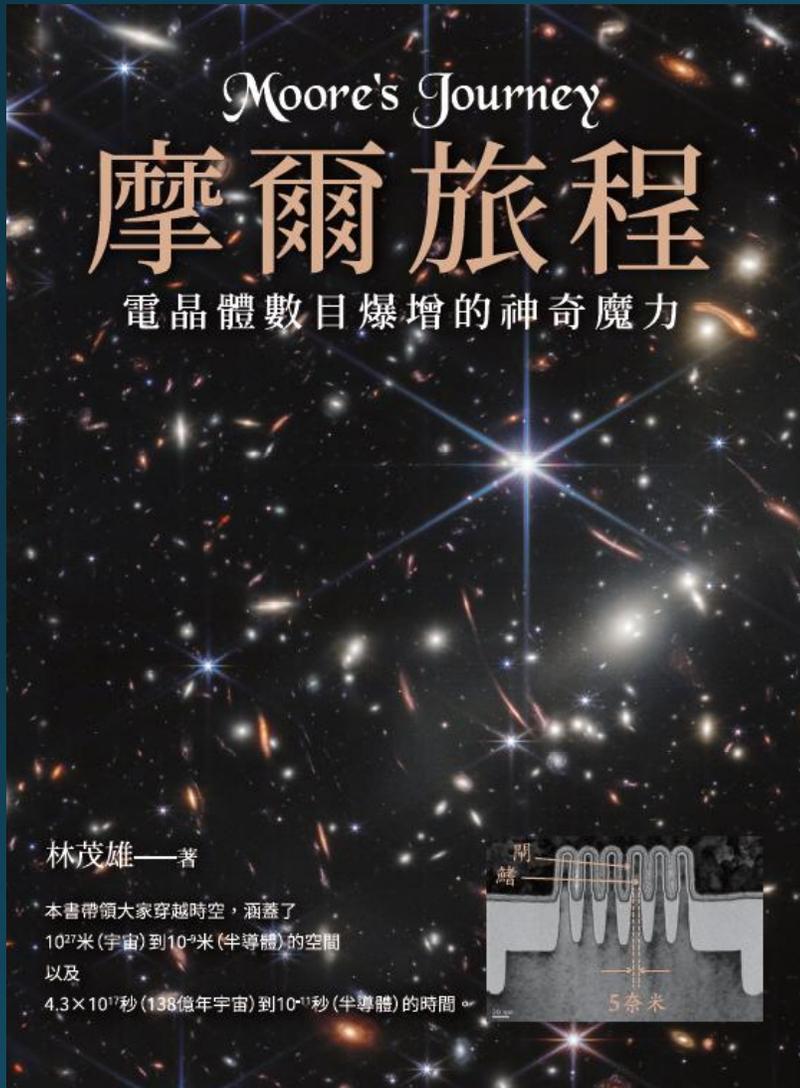
鰭的寬度5奈米



- 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：

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

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

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Period ↓	1																		2
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			

一沙一世界
矽：充裕而穩定

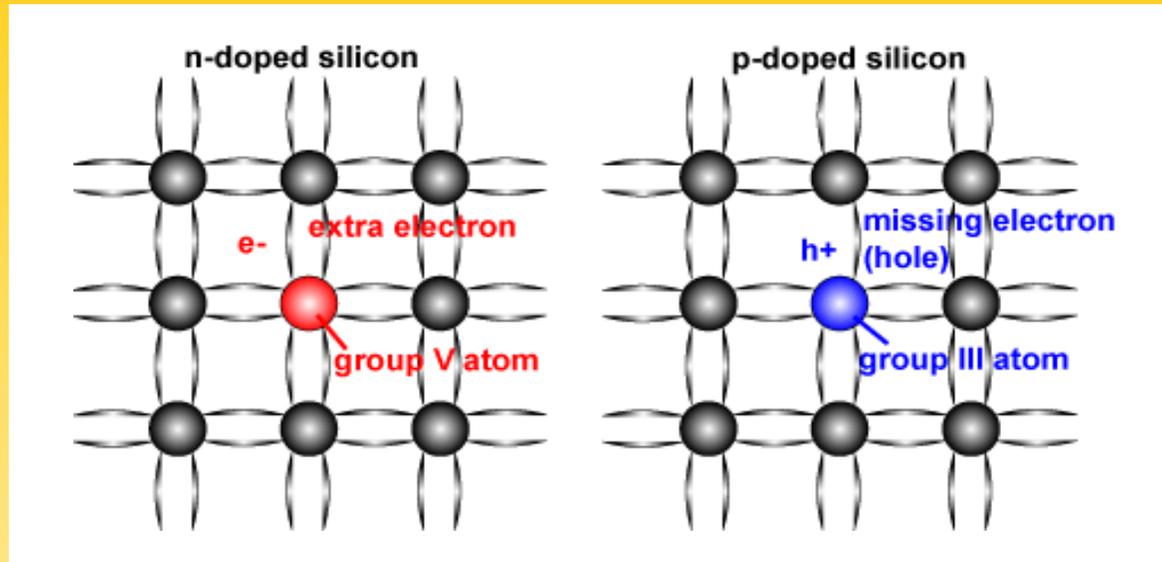
BSiAs AI智慧

硼 Boron
矽 Silicon
砷 Arsenic

HCNOPS 有機生命

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:

— 矽晶格

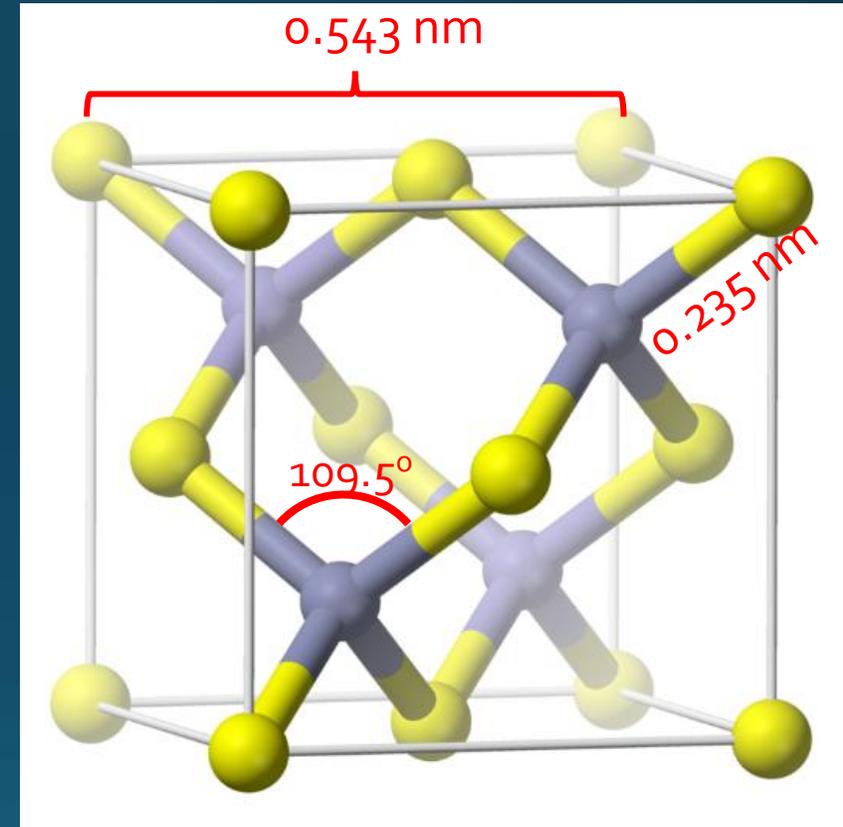
大小 : 0.543 nm

Si-Si : 0.235 nm

— 碳晶格 (鑽石)

大小 : 0.357 nm

C-C : 0.154 nm

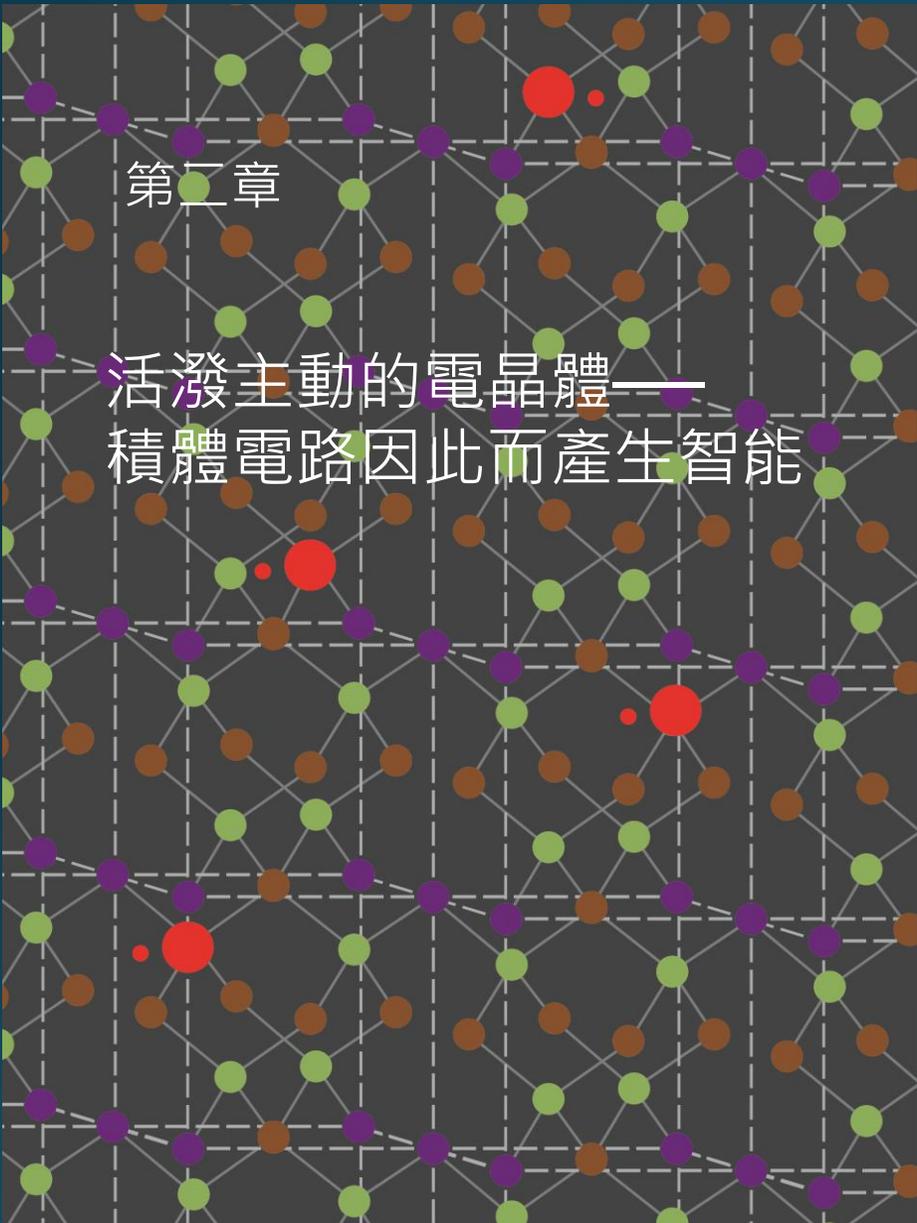


- 人工鑽石不像矽晶圓可以便宜量產

<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



第二章

活潑主動的電晶體——
積體電路因此而產生智能

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

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

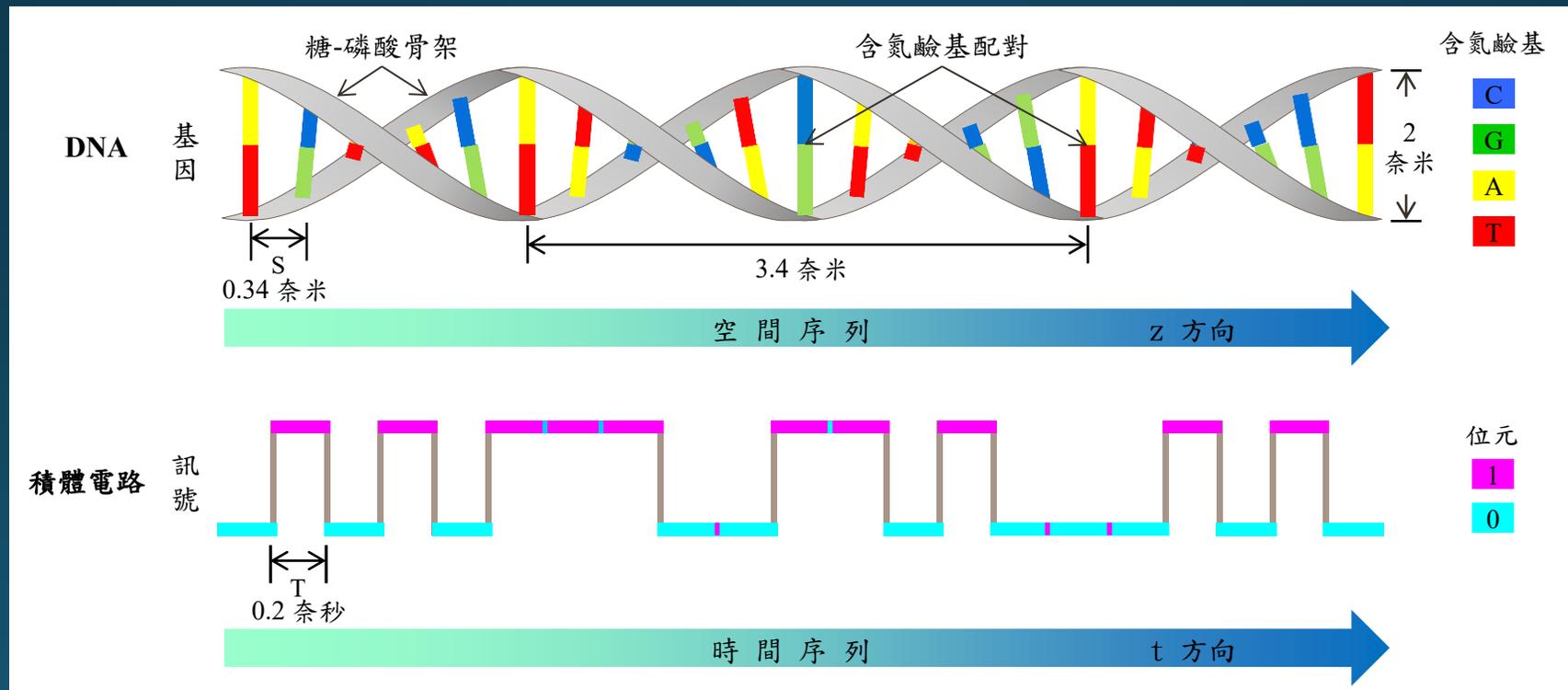
自然為人類準備了一個矽原子、光及電子兩個基本粒子。

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。



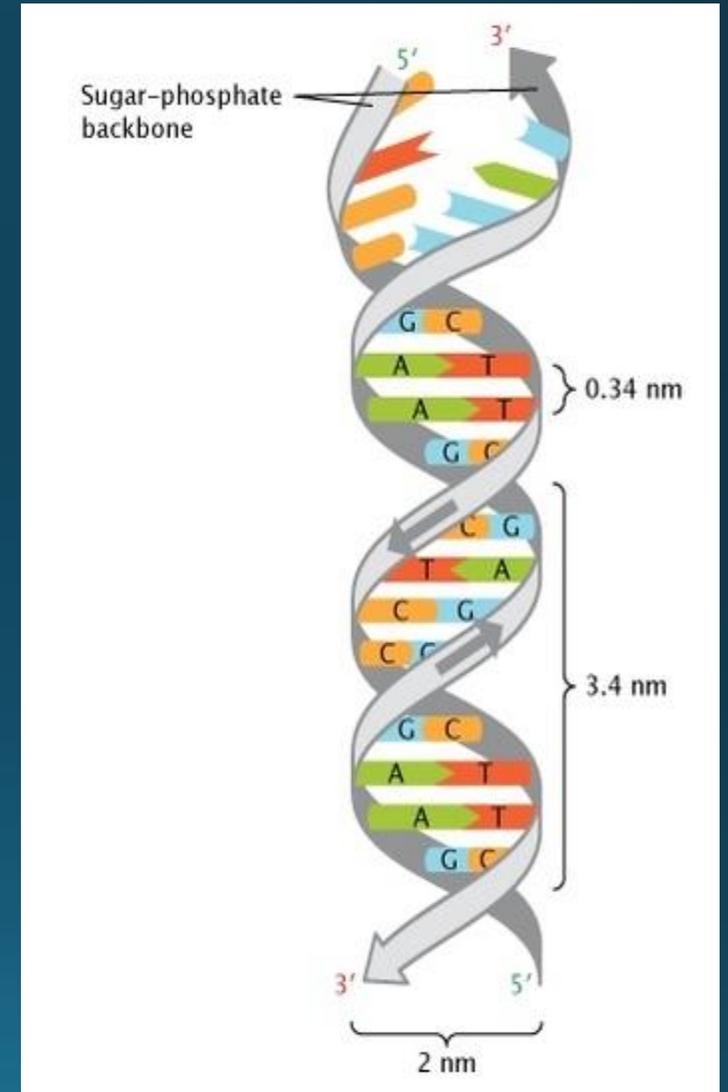
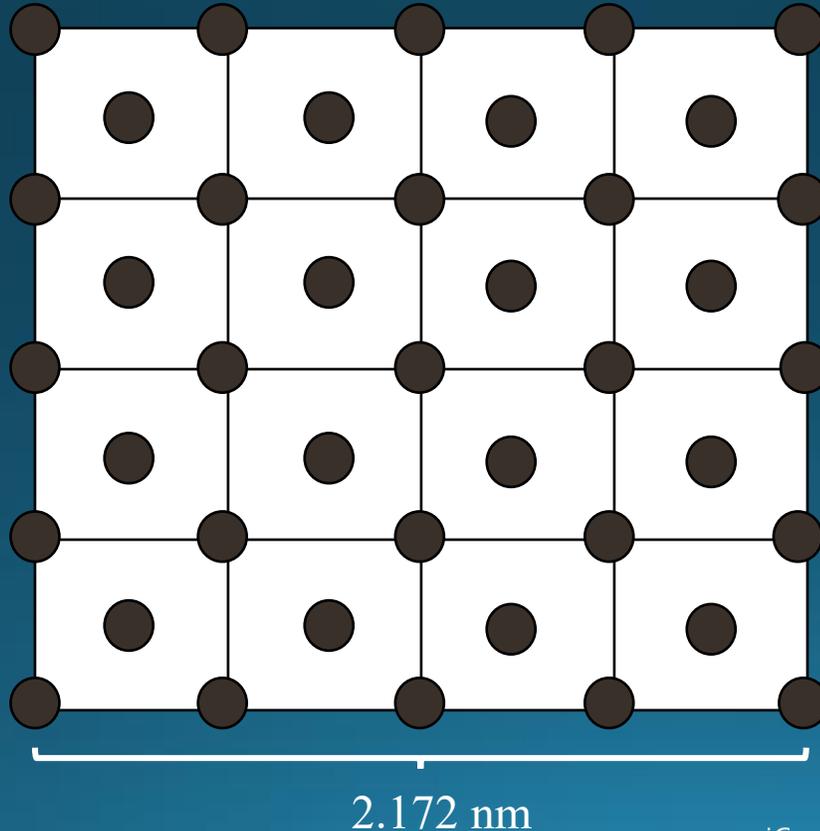
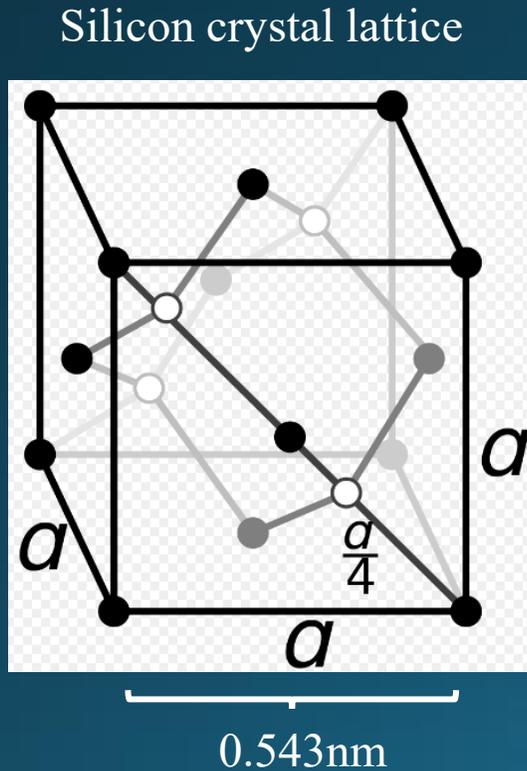
時間和空間在DNA和積體電路扮演的角色隱藏著深邃的祕密

- 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。
- 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？



第二課 積體電路的兩個基礎

- 活潑主動的電晶體
 - 積體電路因此而產生智能
- 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

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。

量子熱力學

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。

古典熱力學 古典電動力學

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。

空間的規則重複排列 vs. 空間的幾何對稱

Bravais lattice (布拉菲晶格) vs. Wigner-Seitz cell (維格納-賽馳晶胞)

薛丁格量子方程式(Schrödinger Equation) 在規則重複的晶格排列解出來的是布洛赫波 (Bloch Wavefunction)

Bravais lattice

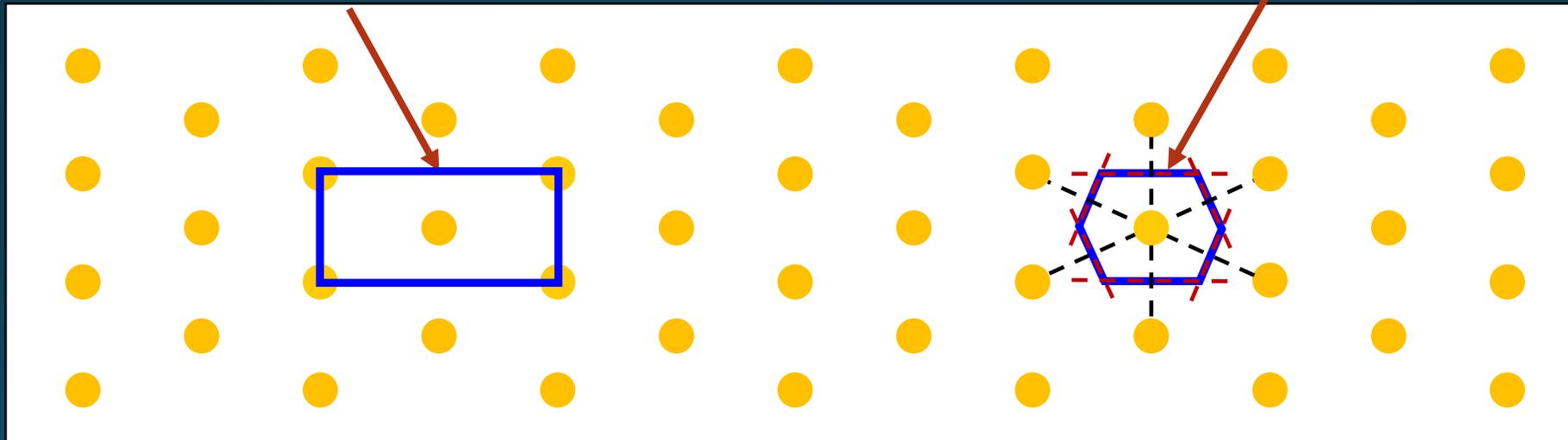
空間的晶格 (space lattice)

空間的規則重複排列

Wigner-Seitz cell

反轉晶格 (reciprocal lattice)

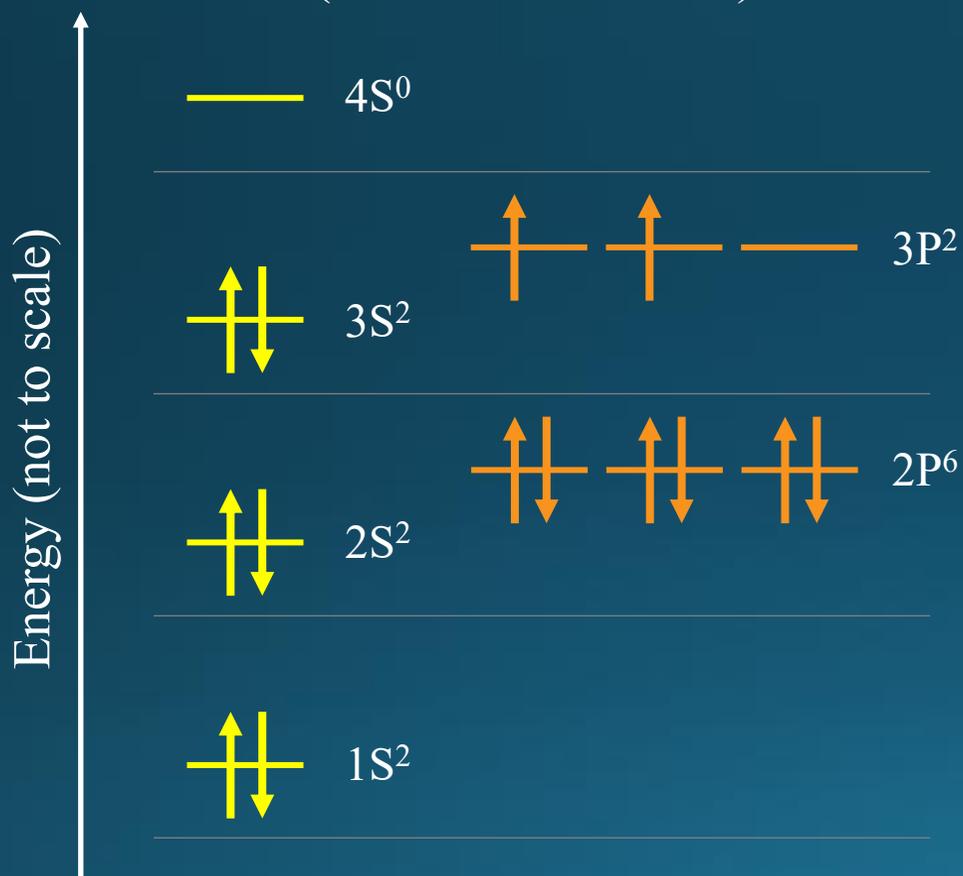
空間的幾何對稱



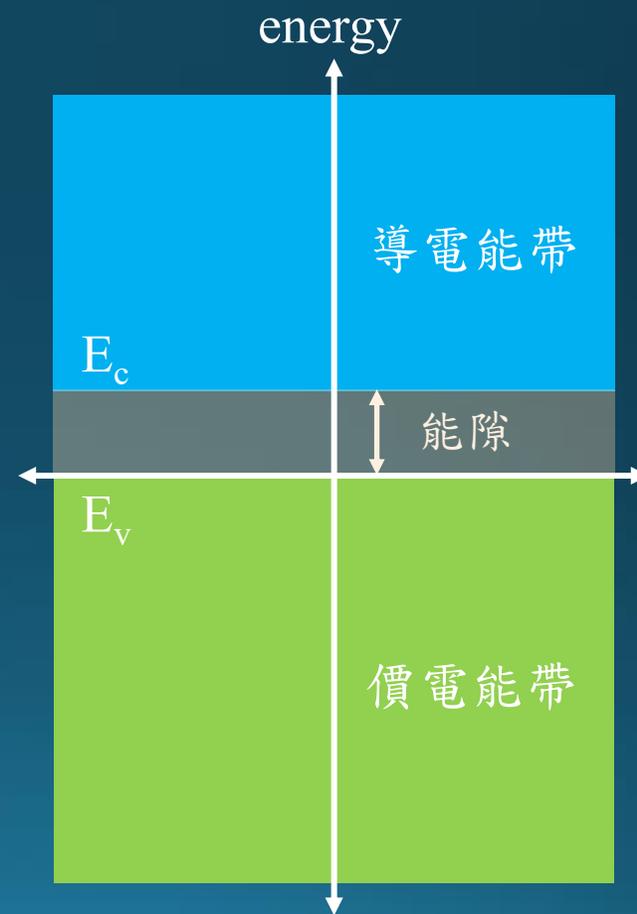
- lattice points
- - - lines connecting 2 nearby lattice points
- - - normal lines at the midpoint of the connecting lines

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

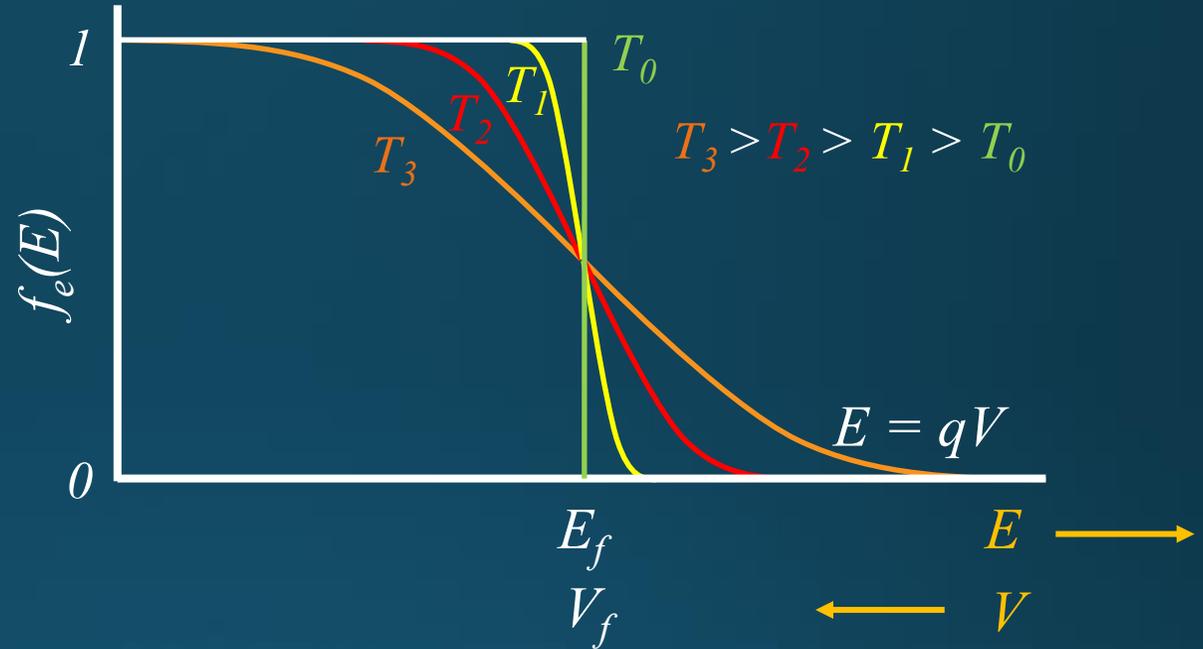
給了人類可以用雜質濃度或電壓來操控電子的基礎

- 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。



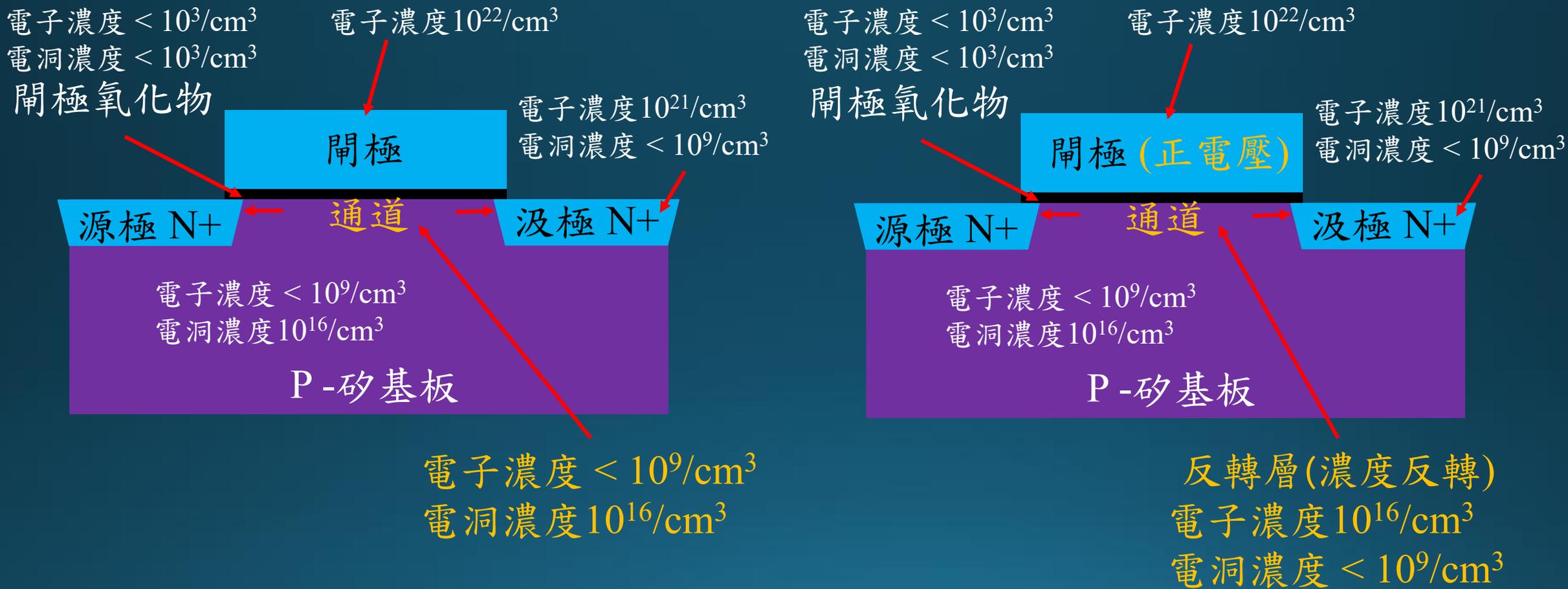
$$E = E_f, f(E) = 0.5$$

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

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

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。

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 $10^{10}/\text{cm}^3$ 增加到 $10^{18}/\text{cm}^3$ 。
- 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：

$$n_p \approx (n_i^2/N_A) e^{q((1-\alpha)V_g - V_{fb})/kT}$$

- 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鑄造AI的能力嗎？

- Quantum Computing

- 事實上所有量子計算的Qubit，就是在創造一個「人造原子 Artificial Atom」
- 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) 。 (Ref: <https://www.youtube.com/watch?v=cMe26VU5WRU>)
- 只有在接近絕對零度 (-273 °K) 時，才有量子現象 (2個能態的能階相差 0.001 eV) 。

- DNA Computing ???

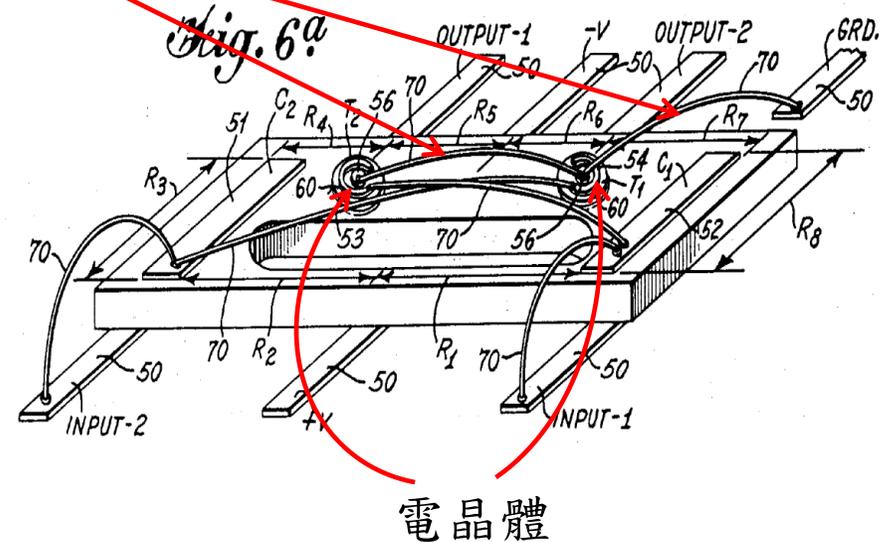
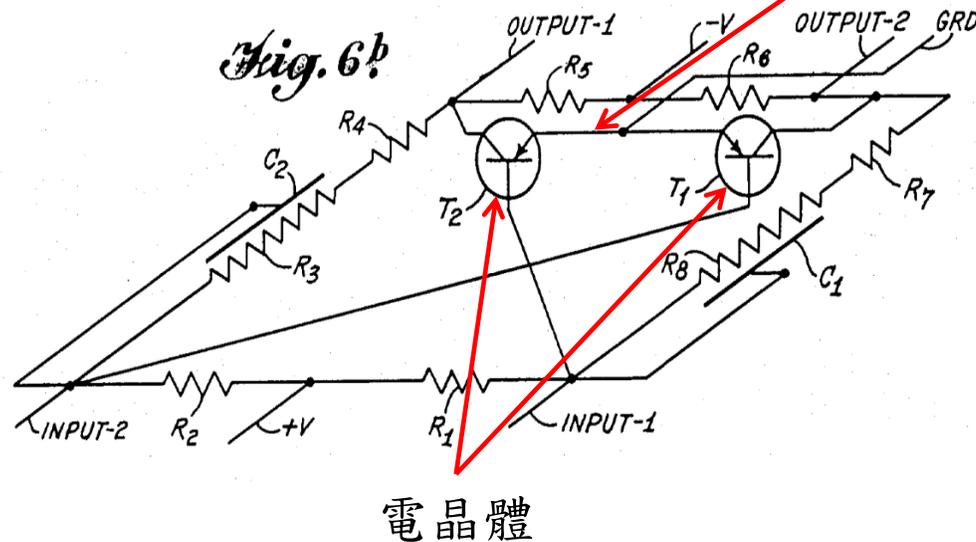
- 「人造分子 Artificial Molecule」???
- 時間和空間的物理原理可能給DNA Computing一些線索和啟發嗎？

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)

April 25, 1961 R. N. NOYCE 2,981,877
SEMICONDUCTOR DEVICE-AND-LEAD STRUCTURE
Filed July 30, 1959 3 Sheets-Sheet 2

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)

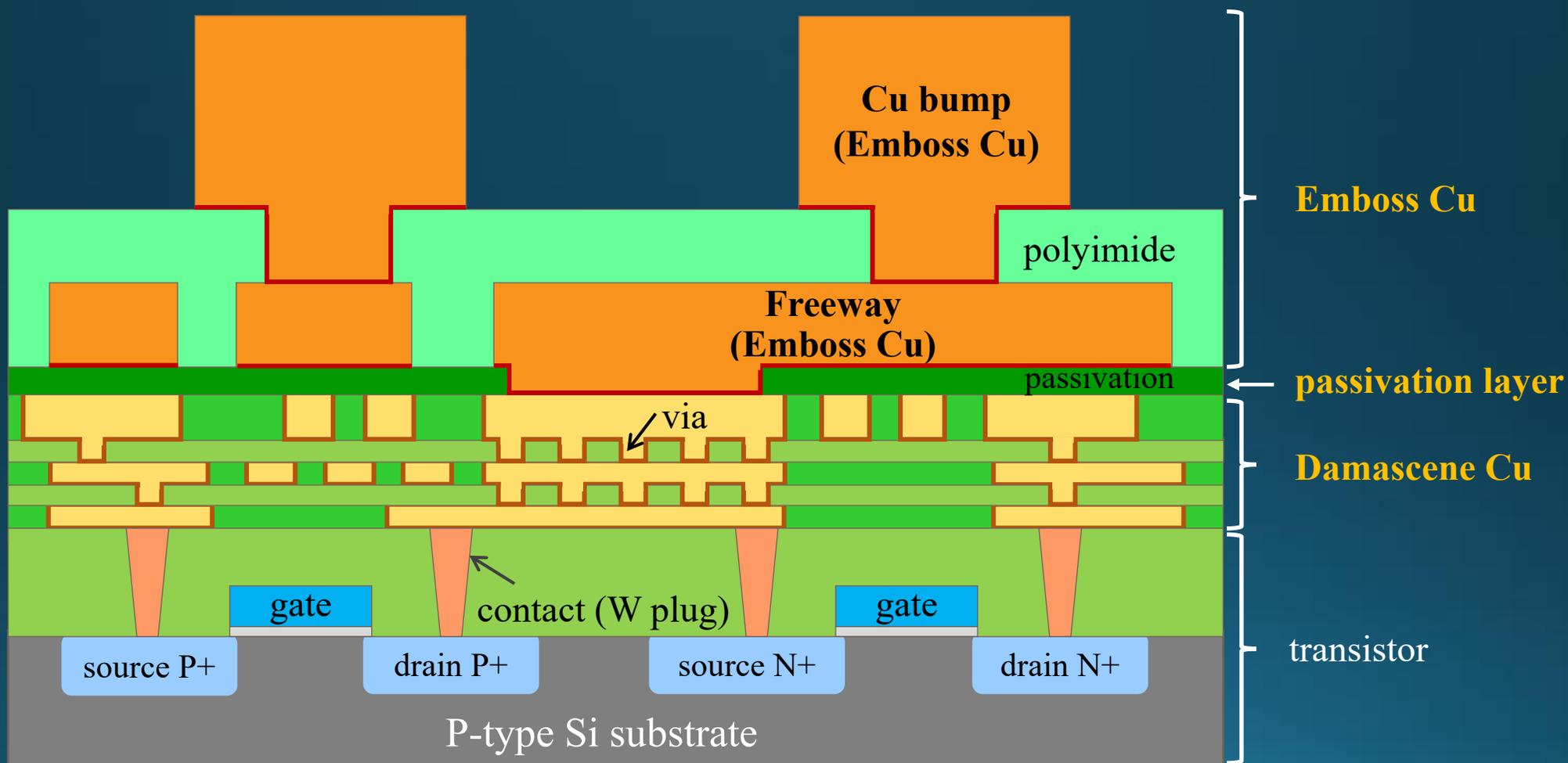
整流放大器 (rectified amplifier)
1個電晶體，2個二極體，
3個電阻，2個電容

INVENTOR. ROBERT N. NOYCE
BY *Leppincott & Kalls*
ATTORNEYS

Ref: "The Chip" by T. R. Reid

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)



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。

結語

神並沒有賜與人類鑄造AI的完整能力！

沒想到，摩爾旅程的終點可能決定在
能源及散熱。

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

What is True Event ?

想太多了？

天下本無事 庸人自擾之！

未完待續，請待下回分解…

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：半導體精彩神奇旅程的主要里程碑

第五課：我的摩爾人生

第六課：「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