

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/>

台灣產業科技推動協會 (TITA) 晚宴演講

2024年9月5日

穿越時空：從宇宙邊緣到電晶體電流通道



本書帶領大家穿越時空，涵蓋了

10²⁷米 (宇宙) 到 10⁻⁹米 (半導體) 的空間

以及

4.3 × 10¹⁷秒 (138 億年宇宙) 到 10⁻¹¹秒 (半導體) 的時間

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。

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！

人造的積體電路和自然界的DNA有類似的信息傳遞法則

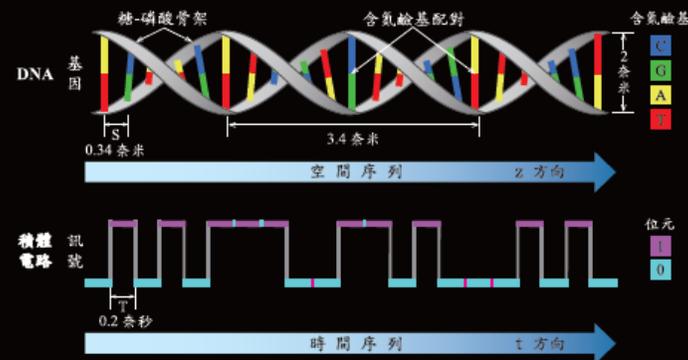
時間和空間在自然界的DNA和人造晶片的積體電路扮演的角色也許隱藏著深邃的秘密

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，以致於人們陷入迷惑無法自拔的深淵。



人造的積體電路和自然界的DNA有微妙深邃的相似性：

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(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，

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。



- 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。

摩爾旅程－電晶體數目爆增的神奇魔力

目錄

目錄

序	8
二版修改摘要	30
第一章 積體電路精彩的摩爾旅程——數目爆增的神奇魔力	33
前言	34
第一節 半導體世界的起源和演化——獨有的摩爾定律	35
第二節 神奇的曝光機——光波波長的摩爾遊戲	44
第三節 半導體精彩神奇旅程的主要里程碑	57
第四節 我的摩爾人生	73
第五節 數大便是美——數大便產生神奇的魔力	76
結語	87
第二章 活潑主動的電晶體——積體電路因此而產生智能	89
前言	90
第一節 四門物理學闡釋了電晶體的空乏層及反轉層	91
第二節 量子力學促成電晶體的發明——矽晶的能帶及能隙概念	97
第三節 量子熱力學規範了電子填進分佈在矽晶能帶的法則	111
第四節 古典熱力學和古典電動力學描述了電子在矽晶的移動行為	116
第五節 電晶體的發明及演化	137
第六節 平面金氧半場效電晶體——主導了 1970-2010 年代的摩爾定律	147
結語	153

第三章 千絲萬縷的金屬連線——積體電路因此而誕生	159
前言	160
第一節 積體電路的發明——把「數目暴力」轉變成「數大便是美」	161
第二節 晶片上金屬連線的演化	167
第三節 晶片封裝承擔保護晶片及信號輸入輸出的重責大任	175
第四節 貝爾實驗室在 1980 年代開發多晶片模組技術，期望延續摩爾定律	181
第五節 米軋的奇異旅程——MeGic 及 Freeway 兩個創新的願景及夢想	188
結語	211
第四章 類似人腦的 FPGA 晶片——具有可塑性 (plasticity) 及整合性 (integrality)	215
前言	216
第一節 用軟體改變記憶體內的數據資料來改變電路的功能及連結方式	217
第二節 我和 FPGA 頗有緣分	221
第三節 我提出了邏輯硬碟 (Logic Drive) 的構想	225
第四節 數據記憶儲存的革命——固態硬碟及 USB 快閃隨身碟	239
結語	245
第五章 回首前塵，點點滴滴串連成章	247
前言	248
第一節 創立成真公司進入生命科學領域	250
第二節 從台積電借調到台灣慧智擔任代理總經理	257
第三節 加入紅外線雷射研發，如魚得水，發揮我所擅長的物理和數學	273
第四節 為什麼我一直執著堅持要留在半導體積體電路這個行業呢？	275
第五節 點點滴滴，在不可逆的時間長流中，串連成章	287

結語	290
附錄	293
附錄 A 夢想與恐懼——單封裝系統與單晶片系統	294
(收錄 2002 年 2 月 21 日出刊的「今周刊」雜誌，由資深記者林宏文報導的一篇文章)	
附錄 B 展技歐陸——台積電 1992 年到歐洲 Road Show	300
(收錄 1992 年 12 月出刊的第 13 期台積電公司刊物《晶園雜誌》(Silicon Garden) 裡，我寫的一篇文章)	
附錄 C 活在四度空間裡	324
(收錄 1976 年出刊的第 19 期台大物理系系刊《時空》，我寫的一篇文章)	
附錄 D 我心長悠悠——禾里	332
(收錄 1974 年出刊的第 17 期台大物理系系刊《時空》，我以筆名禾里寫的一篇文章)	
附錄 E 反摩爾定律的高速公路 Freeway 傳輸技術	335
(收錄我在 2005 年 9 月 (Vol.12, No.3) 出刊的《無晶圓廠半導體聯盟》(Fabless Semiconductor Alliance, FSA) 雜誌發表的一篇文章)	

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。

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！

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

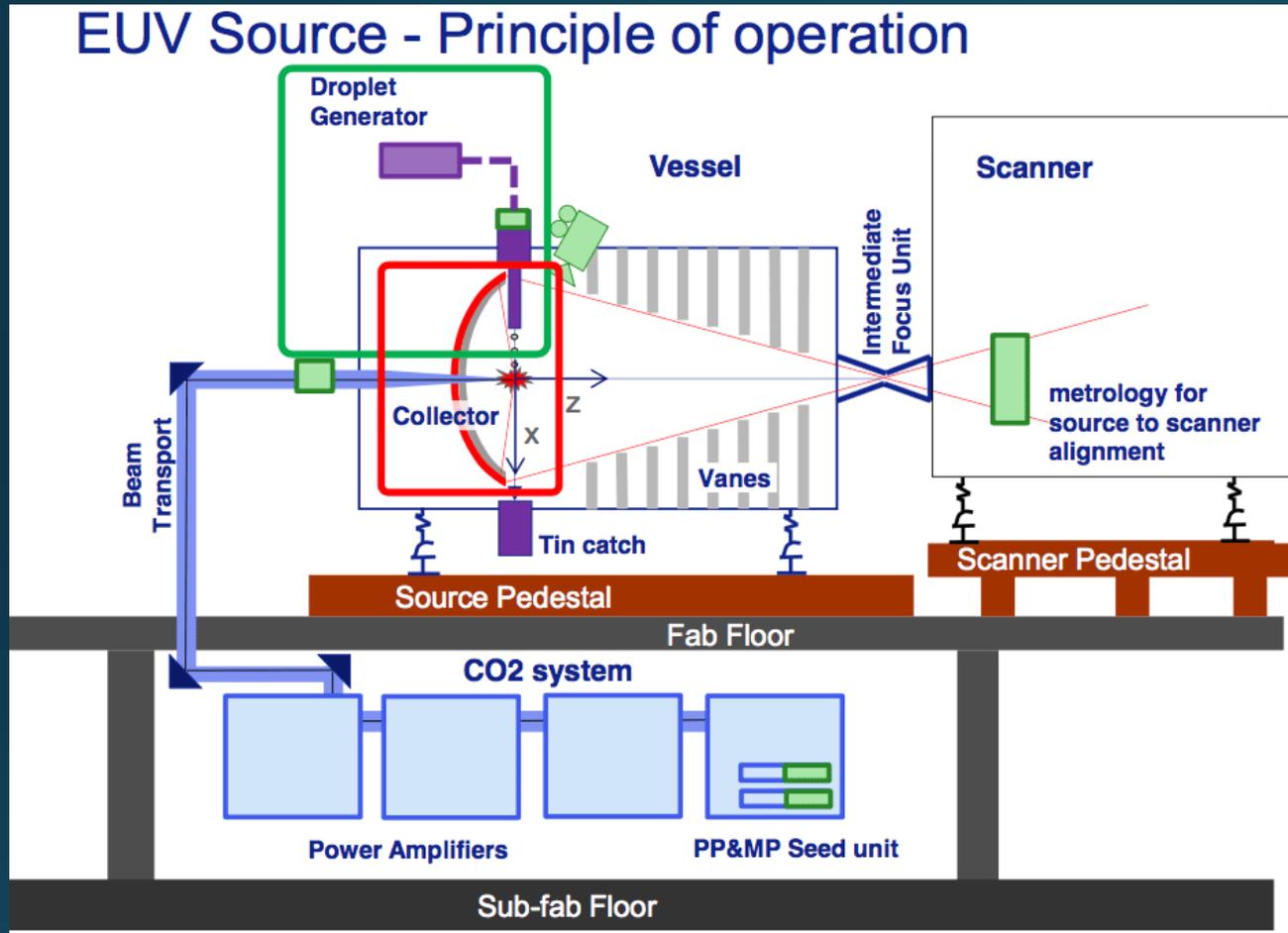
投資巨額（早期數百億元台幣，現在數千億元台幣），生產客戶設計的晶片產品，只做製造服務，自己沒有產品。

- 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。

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！

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。

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？**

$$i^4 = 1$$

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。

