

Moore's Journey

摩爾旅程

電晶體數目爆增的神奇魔力

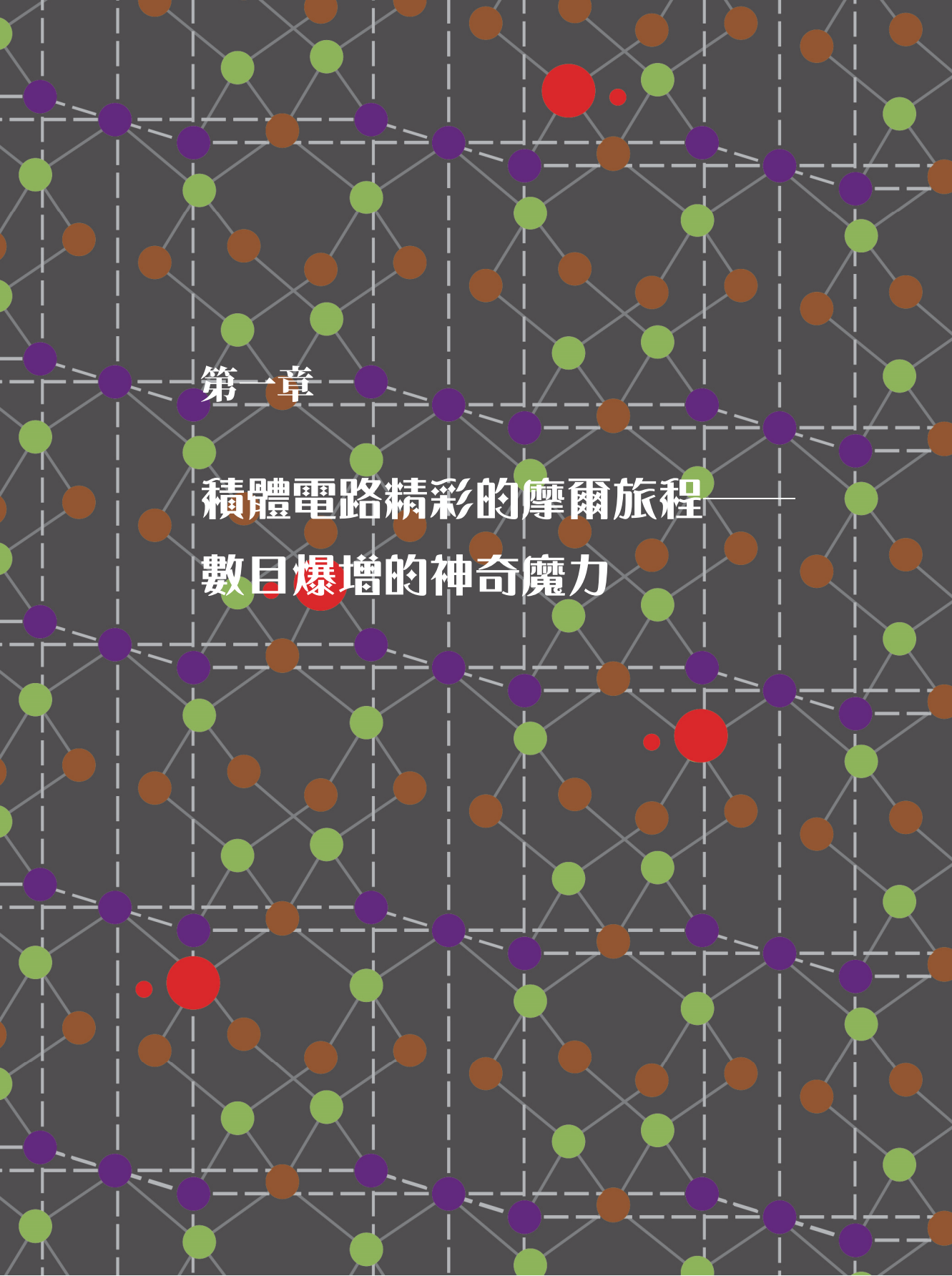
林茂雄——著

本書帶領大家穿越時空，涵蓋了

10^{27} 米(宇宙)到 10^{-9} 米(半導體)的空間

以及

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



第一章

積體電路精彩的摩爾旅程 數目爆增的神奇魔力

前言

我爲了將半導體積體電路 70 多年精彩的歷程講給高中生聽，而有這個機會把自己過去 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，點滴在心頭。也因此，自己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！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 (1895-1945 年) 量子力學的發展。只是半導體的發展，不是基礎科學，是工藝及科學的應用，而且多了金錢及利益的商業氣息。

第一節 半導體世界的起源和演化——獨有的摩爾定律

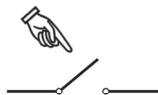
電晶體將手動的開關 (manual switch) 變成一個可以用電的訊號 (electrical signal) 來控制的開關，成為主動元件 (active device)；其主動元件的功能特性也預告了它具有人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 的能力。

積體電路則是將多個電晶體以金屬連線連接組成。積體電路的基本元件包含了可以存取資料的記憶體 (例如：靜態隨機存取記憶體 (Static Random Access Memory, SRAM))、進行數學運算的計算電路 (例如：加法器 (adder))、進行邏輯判斷的邏輯電路 (例如：AND、OR) 和計時的心跳線路 (例如：時鐘 (clock))。現在電腦的中央處理器 (CPU) 晶片或手機的應用處理器 (APU) 晶片的時鐘頻率 (frequency) 已經超過 3GHz，相當於每秒擺動 30 億下，以奈秒 (nano-second) 為時間的單位；而人類的心臟每秒跳動只有 1.2 下，以秒為時間的單位。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！

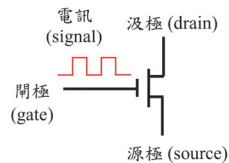
必要的基礎知識 A—電晶體

- 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)



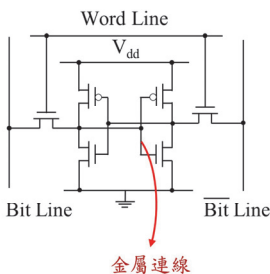
主動開關
(active switch)



必要的基礎知識 B—積體電路的基本電路 (basic circuit)

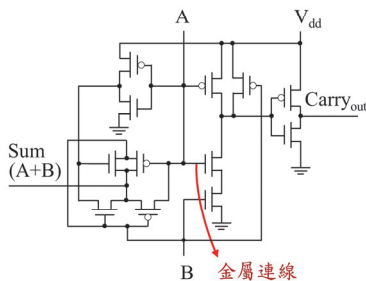
1. 記憶體

靜態隨機存取記憶體
(SRAM)
6 個電晶體



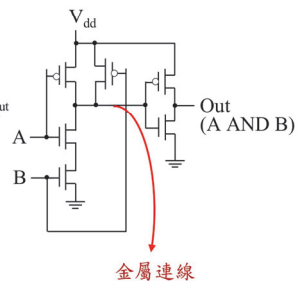
2. 計算電路

加法器 (adder)
12 個電晶體



3. 邏輯電路

AND
6 個電晶體



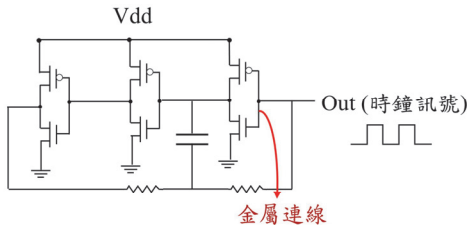
P-type symbol : P型電晶體 N-type symbol : N型電晶體

必要的基礎知識 C – 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 D – 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

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」的魔力，只是牽涉到不同的尺寸 (scale) 大小及數目 (quantity) 多寡而已。宇宙由 138 億年前的一個小點，遵循著自然界的愛因斯坦廣義相對論不斷的膨脹，達到今日 (2023 年) 直徑 10^{27} 米且含有 10^{22} 個恆星的規模。半導體晶片的發展則是遵循著人造的摩爾定律，由 1958 年含有 2 個 3×10^{-3} 米大小電晶體的晶片，不斷的微縮演進；約每 20 個月 (1.67 年)，每個電晶體的面積會減半，使得每個積體電路晶片內可以包含的電晶體數目加倍。因此，積體電路從 1958 年發明到 2020 年，總共經過了 37 個 (2^{37}) 發展週期 ($(2020-1958)/1.67 = 37$)。依據摩爾定律的預測，2020 年的晶片應該包含 600 億個電晶體 ($2^{37} = 6 \times 10^{10}$)。NVIDIA 公司在 2020 年 5 月發佈 A100 Ampere GPU 晶片，使用台積電 7 奈米製程設計及製造，含有 500 億個 7×10^{-9} 米大小的電晶體。摩爾定律如此精準，簡直不可思議！而 Apple

半導體世界的起源和演化：「數字」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



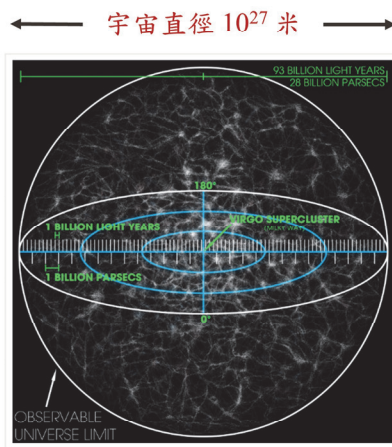
人造定律



公司也在 2020 年 9 月 15 日發佈 A14 Bionic 晶片用於 iPhone 12 智慧型手機，該晶片使用台積電 5 奈米製程設計及製造，含有 118 億個 5×10^{-9} 米大小電晶體。

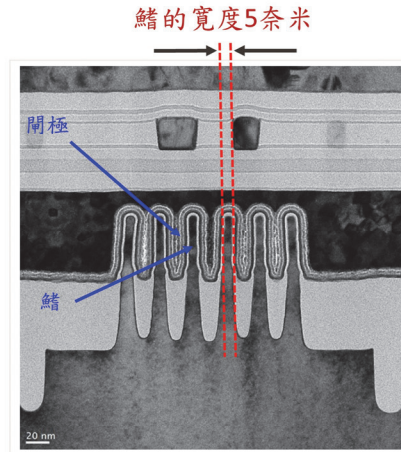
摩爾定律可以用簡單的幾何級數描述，廣義相對論則需用深奧的萊曼曲面張量 (Riemann curvature tensor) 才能闡釋。然而，人造的能力行為遵循的經驗法則 (Empirical Law) 竟然能精準的和宇宙自然的物理定律 (Law of Physics) 一樣，著實令人讚美感動！

宇宙 vs 電晶體



- 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



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

Source: 成真股份有限公司

人類文明史上沒有一樣東西像半導體積體電路 (Integrated Circuits, IC) 晶片一樣擁有摩爾定律。假設汽車工業也遵循著摩爾定律，由 1885 年德國賓士先生發明汽車發展至今的 136 年，一台汽車的大小如果遵循摩爾

定律經過 81 個 (2^{81}) 發展週期的微縮，現在汽車大小應該是 10^{-11} 公尺 (10^{-2} 奈米)，進入了測不準原理的次原子 (sub-atomic) 範圍。但人類對汽車沒有持續縮小的需求，汽車工業也就沒有摩爾定律。再說，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。

根據我自身的體認，一個事件如果不能用數學描述或用數字想像，則我對這事件可能還沒有想的透徹。誠如古希臘哲學家柏拉圖說：不懂數學幾何者，不入我門。我們可用簡單的幾何級數描述摩爾定律，然而無論是在自然界或人爲事物裡並未有其他事物呈現幾何級數現象。這是因為自然界或人爲事物的發展通常經由「活化因素」與「抑制因素」相互的競爭與抗衡，達到一個飽和的平衡狀態。例如，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增加而不斷縮短，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。只有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。

自然界爲人類準備了矽原子及光子和電子兩個基本粒子來做積體電路。要了解爲什麼矽晶成爲主宰人工智慧的物質，就必須回到大家耳熟能詳的原子週期表。矽原子屬於週期表中 IVA 族的四價元素 (電子半填滿在最外層 s 及 p 軌道)。矽原子在自然界中充裕而穩定，且可藉由摻入特定雜

質，使其因多一個電子或少一個電子而具有半導體的特性。

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 elements color-coded by groups. Three elements are specifically highlighted with blue circles and arrows pointing to them from text labels:

- 矽 Silicon** (Si, atomic number 14) is highlighted in the 14th group, 3rd period. A red arrow points to it from the label "矽 Silicon 充裕而穩定".
- 硼 Boron** (B, atomic number 5) is highlighted in the 13th group, 2nd period. A blue arrow points to it from the label "硼 Boron".
- 砷 Arsenic** (As, atomic number 33) is highlighted in the 15th group, 4th period. A blue arrow points to it from the label "砷 Arsenic".

The periodic table includes elements from Hydrogen (1) to Oganesson (118), with Lanthanide and Actinide series shown at the bottom.

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

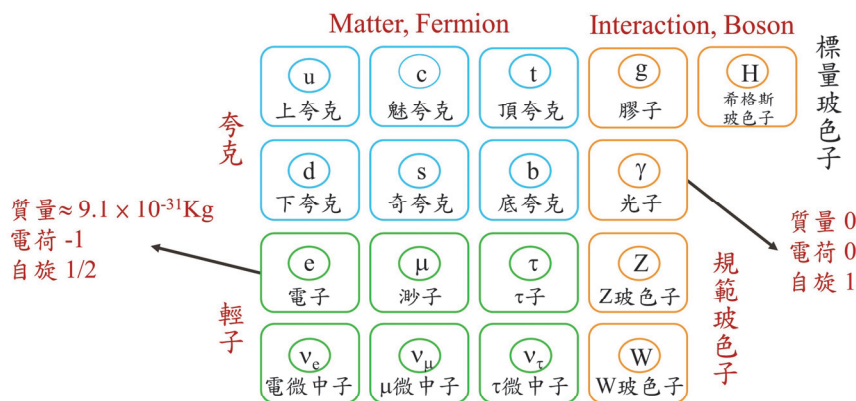
然而，週期表中的原子不是組成宇宙的基本粒子。原子是由原子核和環繞原子核的電子所組成，而原子核包含中子和質子。最神奇的是，中子和質子也還不是基本粒子，而是由基本粒子夸克 (quark) 和膠子 (gluon) 所組成。1964 年，Murray Gell-Mann 和 George Zweig 各自提出夸克粒子的理論，再經過一群傑出的物理學家們的努力 (包括兩位物理史上的巨人 Richard Feynman 和 Murray Gell-Mann)，在 1970 年代完成了基本粒子標準模型 (Standard Model) 的架構，其中的基本粒子則定義為不能再分割的粒子。2012 年，位於瑞士的 CERN (European Council for Nuclear Research，歐洲核子研究中心) 發現了希格斯基本粒子 (Higgs elementary particle)，證實了 Peter Higgs 等物理學家在 1964 年提出的希格斯場 (Higgs field)。希格斯

場在量子力學來說就是希格斯基本粒子。希格斯基本粒子和其他的基本粒子交互作用的強弱，就定義了該基本粒子的質量。原來，物質的質量是這樣來的，真令人大開眼界，嘖嘖稱奇和感動！希格斯基本粒子也被稱為上帝粒子 (god particle)，它經由實驗被發現，證實了標準模型，完成了標準模型的最後一塊拼圖。標準模型雖然不是大家所期待的最終統一的物理原理 (unified physics theory)，但至少是一個現今存在且被實驗驗證過的物理模型，是現今可以用來解釋宇宙形成的最佳模型。

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祂的神奇力量，讓我們看得到、感覺得到，祂給了我們兩個大家耳熟能詳的基本粒子 - 電

基本粒子的標準模型 - 神奇的電子及光子

自然造物者就是要展現祂的神奇力量，讓我們看得到、感覺得到，祂給了我們兩個大家耳熟能詳的基本粒子 - 電子及光子！



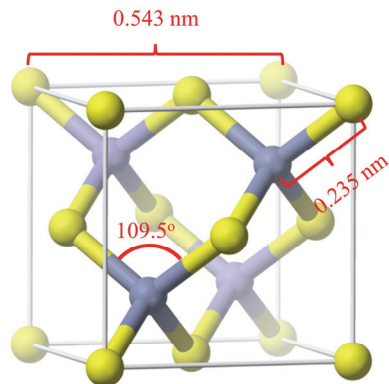
子及光子，太神奇了！而人類也不辜負自然的恩賜，很聰明的使用矽原子，再加上電子和光子這兩個基本粒子，創造出具有人工智慧的半導體產業及文明。

人類珍惜且善用自然造物者的美好安排，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。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)，但人類可以用便宜的方法長晶 (silicon crystal growth) 去量產製造矽晶圓，卻無法找到可以便宜量產人工鑽石 (碳) 的技術。如今半導體積體電路晶片深深的影響了人類生活及文明，珠寶商說「鑽石永遠保值 (Diamond is Forever)」；看到大家丟了手機，驚慌找手機失魂落魄的樣子，我說「矽晶永保活力 (Silicon is for Soul)」。

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:

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