

奈米科技史及其展望

孫郁興

（清雲科技大學，本會會友）

前言：

『奈米科技』有可能是繼蒸汽機，內燃機和電腦之後的第四波產業革命，將全盤改寫人類的生活和工作型態。採用“Bottom Up”做為建構基礎的奈米科技是具有高度的學術和技術性。一方面需要學理基礎研究，另一方面也期待產業應用能早日實行。這種奈米產業化基礎的推動於產、官、學都有責任，其中培養奈米科技高教人材是當務之急。

人類應用以及創作材料（materials）的歷史就是科學史。近 20 年來，科學家發現介觀（mesotropic）物質的性質遠非肉眼所見物質那麼穩定，猶如同在超高真空或超低溫度的情況下，物質的特性就會有改變。同樣地，任何物質被微縮到奈米尺寸之後，也會引發意想不到的特殊物理及化學性質的變化。例如矽（silicon）被腐蝕到數奈米（nanometer）的厚度之後就變為發冷光體（luminescent），或者原本不導電的物質變成導電性，原本導電的物質反變不會導電等等。這樣難以想像的細微世界中，是蘊藏著許多仍不為人知的神秘現象。直至 1992 年，兩位服務於瑞士 IBM 公司的科學家發明了「掃描穿遂式顯微鏡」（STM），可以在電腦螢幕觀察到奈米結構後，這個神秘世界的謎團才一步一步被解開。這奈米世界的現象令人大為讚嘆其神奇，也從此正式開端了全球奈米科技研究的熱潮！

定義奈米科技

分子奈米科技（molecular nanotechnology）或簡稱為奈米科技（nanotech）是一種操控物質在分子水準（molecular）相當於一米的 10 億分之一； 10^9m ）一奈米相當於 5 個碳原子的大小或大約一個糖分子那麼大。奈米科技就是一種將物質縮小到分子尺寸操作的技術。因之，奈米科技可定義在 1~100 奈米等級之下控制和操作（control and manipulate）個別原子和分子的科技，如圖 1 所示。

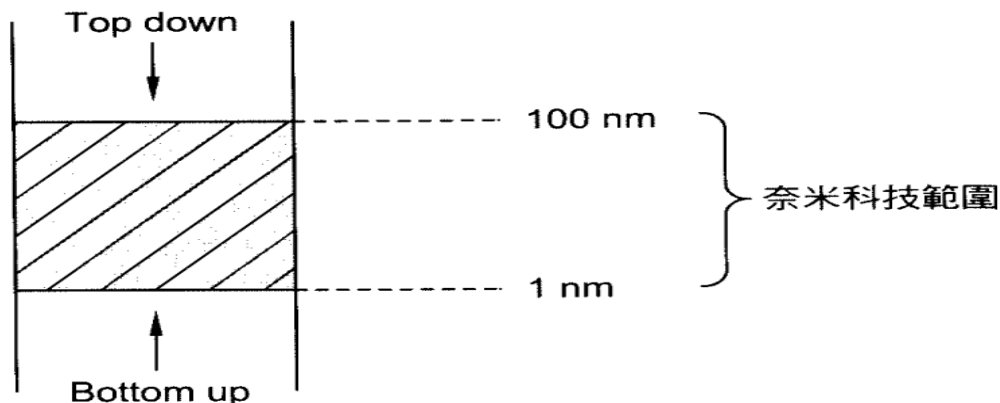


圖 1 圖示奈米科技範圍

自然界的奈米結構

在大自然中，處處可見「奈米結構」和「奈米組裝」的自然神秘現象。例如『出污泥而不染』蓮花葉的『不沾水』能力，蜜蜂腹部具磁性奈米顆粒的導航作用，都是『奈米結構』（nano structure）所引起的特殊效應。人類的牙齒可以歷經百年不壞，就是因為牙齒外表排列著奈米尺寸的微小晶體結構（crystalline structure）。蜘蛛絹絲（silk）巨大強度的秘密也在於其分子奈米結構的組合。奈米的尺寸用實物來比擬，一根針尖的直徑大約為 100 萬奈米，一根頭髮的直徑約是 7 萬奈米，可穿透陶瓷孔隙的濾過性病毒（virus）都有 1 百奈米！



圖 2 蜘蛛絹絲（silk）

在奈米科技的領域裡，人類正在學習模仿（imitate）這種自然律（natural laws）的應用。在施行的矽微細加工（silicon micromachining）的技術，從分子結合為有用的物質的機制（mechanism）到結晶（crystal）成長的經過都是循從自然律而進行。今日的矽技術（silicon technology），正在利用並操作自然律的化學反應將矽原子變成為矽結晶，從矽結晶製作為矽微晶片（silicon micro chip）。

依 Werner Heisenberg 的「不確定原理」（Uncertainty Principle），半導體的摻雜（dope）效果，電子只能在約 100 個原子直徑之內定位（localized）。這就是物理的極限。回顧電子器材（electronic devices）的發展歷史，肇始於 1950 年代奠基於矽半導體產業的『微米化』製程。「註：1 微米（micrometer）等於 1 千奈米（nanometer）： $1\mu = 1000\text{ nm}$ 」在 1964 年半導體專家摩爾（Gordon Moore），也是英特爾（Intel）公司總裁，曾經提出所謂「摩爾定律」（Moore's law）預測在可見的未來中，「每逢 18 個月，半導體晶片內的電晶體數目可得倍增（double）」。四十年來半導體業一直遵循著摩爾倍增定律發展，在晶片（chips）上植入數以千萬計的電晶體，讓電腦的體積越小性能越強大。半導體晶片每二年將其速度和容量（speed and capacity）加速加倍。就半導體製程而言，0.25 微米（晶片上的金屬線距）製程已逼近物理學的極限（limit），連 Moor 本人也曾設定 0.25 微米為極限。但今日半導製程已邁向 0.08 微米（相當於 80 奈米）製程（韓國三星的 1 Giga Byte Flash ROM 晶片即是 80 奈米製程），甚至 0.045 微米製程也已在釀造中。這樣製

程幾乎逼近物理學的極限（limit）。已逼近「摩爾定律」的真正極限。過去微米製程（micro-manufacturing method）是“Top down “（頂下）製程則利用光刻、切割、或研磨等方法。由於物理的極限，傳統的“Top down “製程確已遇到障礙（barrier），科學界只能以“Bottom up “（底上）製程的物質構造方式來突破這種障礙，亦就是期望於所謂的“奈米科技“了。Intel 公司研發經理 Gerald Marcyk 曾公開說：「我尚未發現極限呢！」（I haven't found the limit yet），於半導體製程上，美國史丹福大學實驗室已推出小於 15 奈米的技術了。如此” Top down “的物理極限似乎在 10 奈米左右。無論” Top down “（頂下）或” Bottom up “（底上）製程，凡能在自 100nm 至 1nm 範圍內操作工程（conduct engineering）者，目前都可歸範於奈米科技。這是在人類歷史上，繼蒸氣機、內燃機和電腦之後，奈米科技即將引爆的「第四次」產業革命。

奈米科技的歷史

西元 1959 年諾貝爾獎金得主，著名的物理學家費曼（Richard Feynman）在 American Physical Society 年會（December 29, 1959 在加州舉行）上演講專題 “there's Plenty of Room at the Bottom” 中提出：『從物理定律而言，我看不出不可以將金屬線直徑造成為 10 至 100 原子之下，而回路造成為數千 Å（即數百奈米）四方之內』 Feynman 的預言，為奈米科技開拓了新視野和遠景。

西元 1962 年日本物理學家久保亮五提出了著名的久保理論的『量子限制理論』（the Quantum Confinement Theory）來解釋金屬超微粒子所呈現的能量不連續現象。是後，科學家開始瞭解到物質在超微型態（奈米尺寸）下，會表現不同於平時所見的性質。

西元 1974 年日本科學大學教授谷口紀男（Norio Taniguchi）率先著作“Nanotechnology”一書，來描述採極精密機械加工的技術來製造極精密產品。谷口構想運用“次微米機械加工”（submicron machining）則是促進微電子機械系統（MEMS）建立的基礎。同年代中美國 MIT 的 K. Eric Drexler 則構想未來的原子與分子機器（molecular and atomic size devices），但被當時主流派科學家視為一派胡言。

西元 1982 年 IBM 公司於 Zürich Research Center 的兩位科學家 Gerd Binnig 和 Heinrich Rohrer 研製了世界第一部『掃描穿隧式顯微鏡』（Scanning Tunneling Microscope, STM），可以觀察到金屬物質表面上單一原子的排列。從此，人類可以窺察奈米世界的奧妙。

西元 1986 年 Binnig 和同事又進一步發明『原子力顯微鏡』（Atomic Force Microscope; AFM），可以觀察非導電性材料表面上的原子排列，又使奈米科技邁向一大步。在 AFM 之幫助之下，科學家從此可以在原子等級（atomic scale）操作並設計分子排列。

西元 1984 年德國科學家 Herbert Gleiter 發現奈米級二氧化鈦（titanium dioxide）陶瓷粉粒具有極強的韌性，開啓了研究者對各種奈米級材料的探索熱潮。

西元 1985 年英國 Sir Harold W. Kroto (University of Sussex) 和美國 Robert F. Cui jr. 和 Richard E. Smalley (Rice University) 從石墨中純化出『碳 60』奈米結構的第三種（石墨、鑽石以外）碳結晶體稱為富勒體（fullerene）。因此一發現而獲得西元 1996 年的諾貝爾化學獎。

西元 1990 年美國 IBM 公司研究員 Don Eigler，在低溫中利用掃描穿隧式顯微鏡（STM），成功的將 35 個氙（Xe）（Xenon）原子於鎳（Ni）基板上排出 IBM 三個英文字母，這是人類史上第一次依自己的意志操作原子排列原子書法（atomic calligraphy）如圖 3 所示，換言之，原子可以從表面移走也可以放在另一地方表面上。

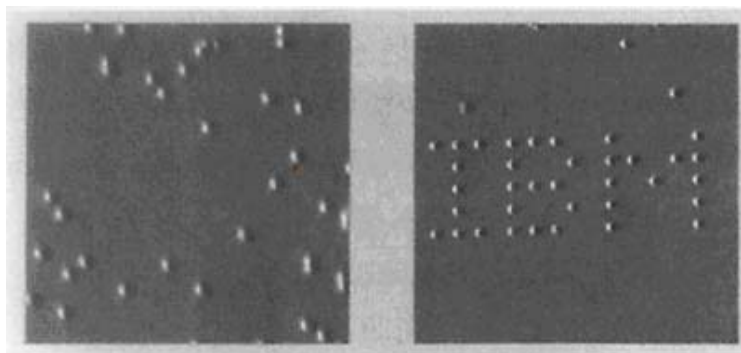


圖 3 原子排列原子書法

西元 1990 年 7 月第一屆國際奈米科技會議在美國舉行，從此奈米科技正式成爲一門獨立學科並每年在各國主要城市輪流舉行年會。

西元 1991 年日本 NEC 研究員飯島澄男 (Sumio Iijima) 發現『奈米碳管』(carbon nanotubes)，成爲奈米科技的主要原料從此衍生出許多重要的奈米材料，。

西元 1991 年 D. Eigler 和同事用 Xenon/Nickel 系統製作原子開關（atomic switch）。藉此原理，人類可以藉單一原子的動力而製作一種 STM 基記憶器材（STM-based memory device）之可能。如此，在 100 個 原子/bit 的密度將比任何磁性器材中記憶容量多幾百倍。

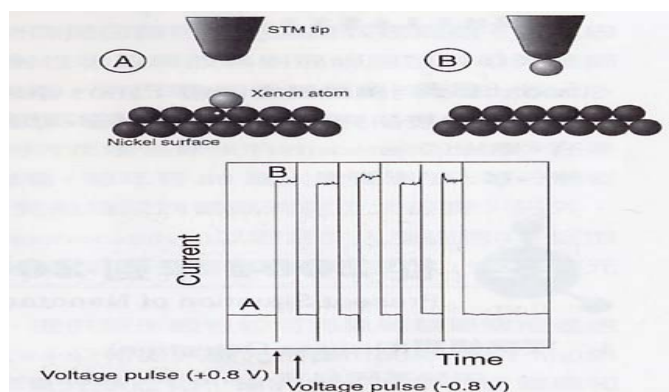


圖 4 原子開關原理圖 (a) Xe 原子在 Ni 表面時隧道電流小
(b) Xe 原子在 STM 尖端時隧道電流大

西元 1993 年 D. Eigler 和同事在一磁性（magnetism）實驗中從 STM 觀察到銅表面的鐵原子受表面電子波（surface electron waves）而波動。銅表面電子被限制於柵欄內，而由於銅在表面的反射跳動而產生波動，圖 5 則為電子波動的 STM 影像。如此，物資的介觀涉及量子物理（quantum physics）領域，奈米科技就是已進入量子境界的波性質（wave nature）的應用。科學家在奈米微細化技術中，不使用電線（wire）而改採用波來傳送資訊的時代來臨。奈米電腦的實現，屆時藉由分子大小的元件所組裝的各種器件不僅體積更小、速度更快、成本也將愈來愈低，而這種電腦將由量子動力來操作。

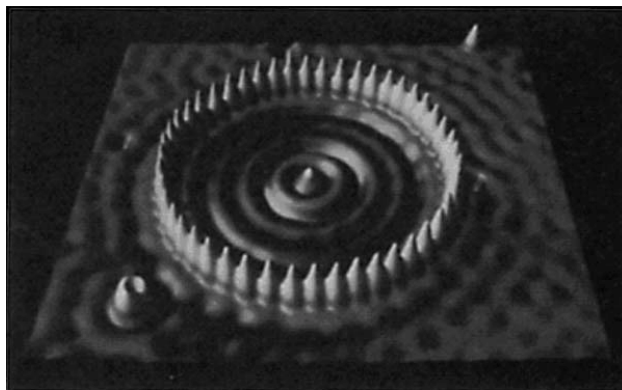


圖 5 電子波動的 STM 影像

西元 2003 年 5 月美國國會通過『2003 奈米技術研究發展法案』（H. R. 766）在未來為奈米科技研究撥款 2 千億美元，以期讓美國在奈米科技擁有領先地位。

奈米科技的基本建築磚塊

奈米科技產業，可歸納為三種基本分子建築磚塊即蛋白質、高分子、及奈米碳管，可開拓運用於下列領域的產品：

- (1) 複合材料（composite）
- (2) 構造和管能化（structure and functionalizing）
- (3) 自我組裝（self-assembly）
- (4) 晶化和結晶成長（nucleation and crystal growth）
- (5) 樣板的應用（use of templates）
- (6) 化學控制（chemical control）
- (7) 總體設計（grand design）

蛋白質是生命內細胞（CELLS）的建築磚塊（The building block of life），細胞中除水以外主要成分就是蛋白質，所以細胞被稱為天然的製造機器（nature's machinery）。蛋白質屬於天然高分子（natural polymer）由 20 種不同的低分子單位稱為氨基酸（amino acid）所連結而長鏈。氨基酸中含有一種羧基（carboxyl group）和一氨基（amine group）也就是所謂鹼基（base）。鹼基有一傾向爭取一氫離子而形成為一帶正荷的化學根群。相反的，酸（acids）有傾向脫離一氫離子而形成為

一帶負荷的化學根群，氨基酸構成蛋白質的建築磚塊。圖 6 表示四種氨基酸構造的圖形（大黑圓圈為氧原子，灰圓圈為氮原子，白圓圈為碳原子，小黑圓圈為氫原子）。此處的 Glycine 為氨基乙酸, Alanine 為丙氨酸, Serine 為絲氨酸, Glutamic acid 為麩胺酸。

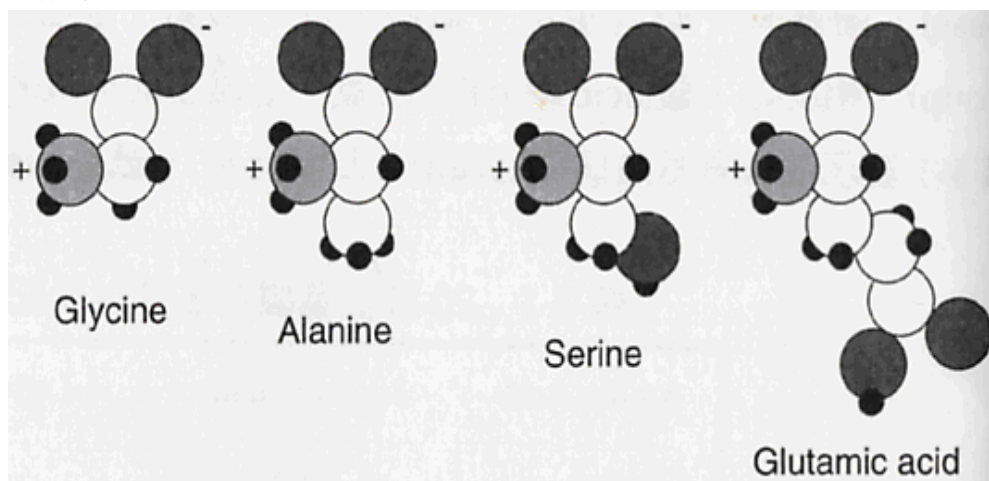


圖 6 四種氨基酸構造的圖形

由氨基酸連結反應而形成的高分子（即蛋白質）稱為多肽類（polypeptides）。然而由氨基酸所連結的蛋白質的反應都需要靠觸媒（酵素）的作用，蛋白質成分中含有許多（C=O）基和（N-H）基，因而產生氫鍵（hydrogen bonds），並構成其第二級（secondary）構造的圖形稱為 α -helix 的螺旋形（spiral），這第二級 α -helix 型的蛋白質會自動主裝成為第二級的蛋白質單位（subunit）又稱為束群（clusters），甚至更集合為第三及第四級的多次單位組合體（multi-sub-unit-assembly）（請看圖 7）。

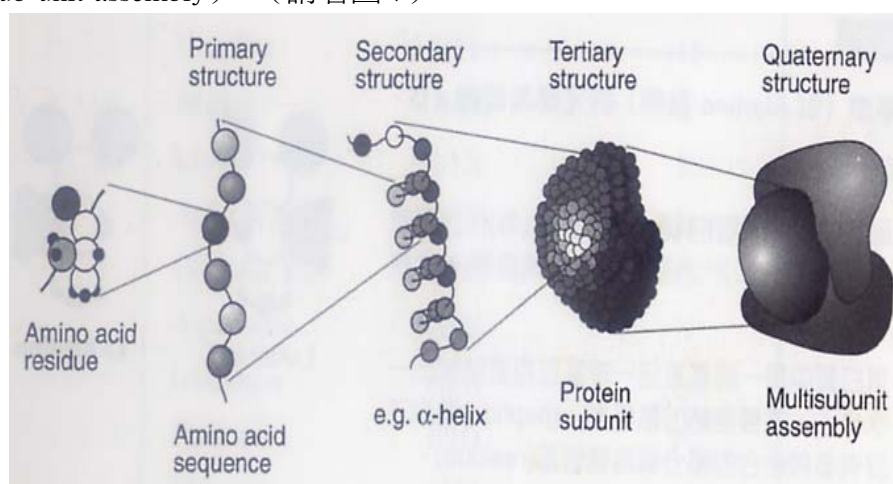


圖 7 各級蛋白質的形態

去氧核糖核酸（Deoxyribo Nucleic Acid, DNA）是細胞生命的基礎，除少數的病毒（virus）以外，所有的生命體（living organism）內基因訊息（genetic information）都被記錄在此一分子內構造密碼中。DNA 是以蛋白質為建築基礎的線狀高分子（linear polymer），而以兩條高分子主幹成為雙螺旋輪（double helix）圖形的構造。由四種不同分子鹼基（base）（即 Thymine，Adenine，Cytosine，和 Guanine）附加

於由磷酸鹽（phosphate）和去氧核糖（deoxyribose）分子團基所構成爲兩條的主幹。然而附加於兩條主幹的四種分子鹼基中的兩種特定鹼基成爲鹼基對（base pair）以氫鍵構成爲雙螺旋輪中的階梯台（staircase）。這種鹼基配對必定是 Adenine（A）（腺嘌呤）配對 Thymine（T）（胸腺嘧啶）而 Guanine（G）（鳥糞鹼）配對 Cytosine（C）（氧氨嘧啶）。圖 8 則爲此一 DNA 的構造示意圖。

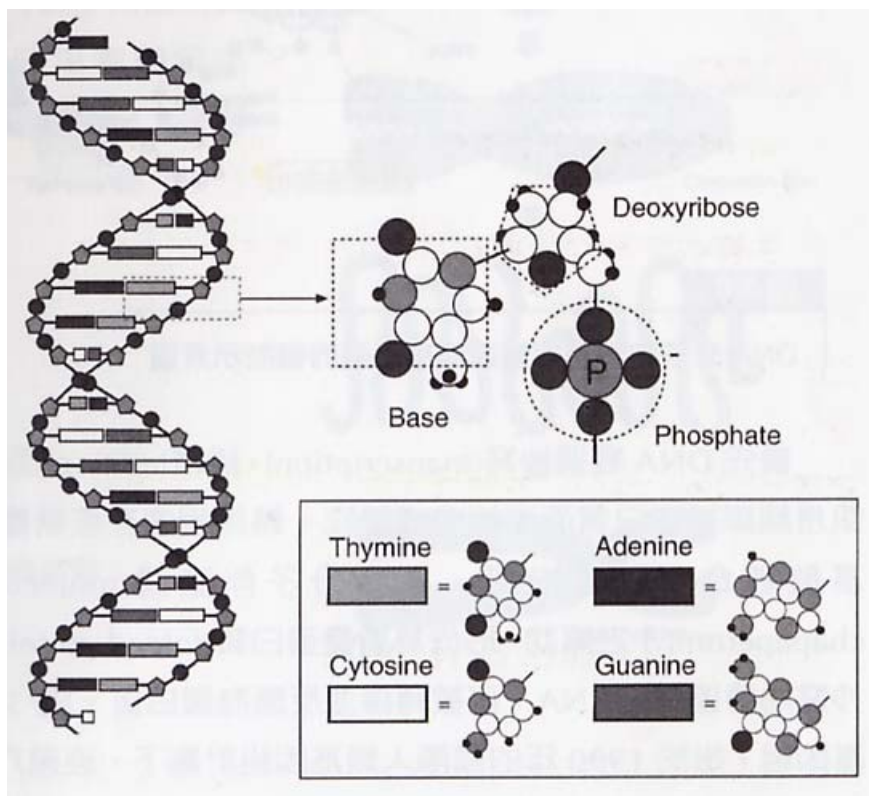


圖 8. DNA 構造示意圖

DNA 依這四種分子鹼基的排列秩序而分別寫出一種密碼（code）稱爲基因（gene），傳達給蛋白質分子進行生化作用而形成各所指定的器官組織，科學家最後發現人類基因數目約爲 3.5 萬個。DNA 分子緊密地封裝在細胞之內，雙螺旋輪型的 DNA 圈繞在稱爲組織蛋白（histone）的蛋白粒（beads），然後組合爲染色質纖維（chromatin fiber）。這染色質纖維長線捲成爲螺旋輪（helix）狀，螺旋輪封裝爲緊密的束群爲染色體（chromosome）。這情形表於圖 9。

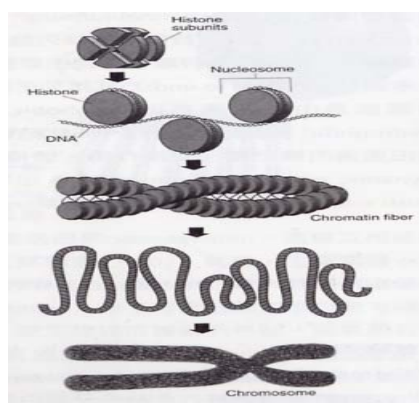


圖 9. DNA 被封裝在染色體內的情形

染色體在細胞分裂時細胞核中所形成的棒狀而易染色的構造，是傳遞遺傳的物質，而染色質分成爲 DNA。我們需要了解整個生物體系與環境相互作用的方式與機制，而後人們可以使用這些資訊做爲基礎來指導並研究生物學自然律，以便於運用人類諸問題的解決，這是奈米科技在生物學領域的一大任務。

在奈米科技中高分子是另一種重要的有機建築方塊，單體（Monomer）藉自由基聚合反應（free radical polymerizatia）而形成爲高分子材料。利用活性聚合反應，科學家可以設計並控制新種的高分子人造產品。在奈米科技中奈米碳管則是另一種重要的有機建築方塊，科學家可以設計並控制新種的人造產品。

碳原子若相結合爲六角(hexagon)就形成爲石墨(graphite)的結晶薄(sheet)。這時，每一個碳原子與三個鄰近碳原子化學結合。石墨的結晶構造表示於圖 11。

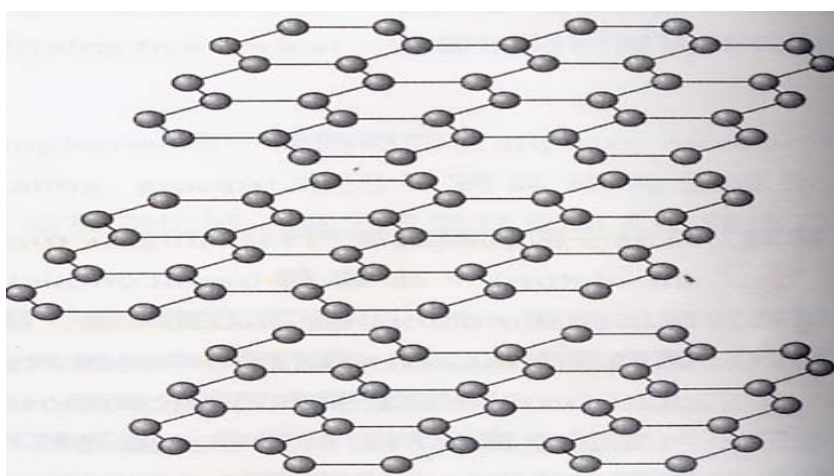


圖 11 石墨（graphite）的結晶薄

每一結晶薄片和另一互相重疊只以比較弱的力量相引。碳原子若相結合而形成爲每一碳原子成爲四面體(tetrahedron)的角隅(corner)者就是鑽石(diamond)的結晶。這樣，每一個碳原子與四個鄰接的碳原子化學結合，結果碳結合鍵短而強，成爲三次元都很強硬的結晶體。鑽石的結晶結構表示於圖 12。

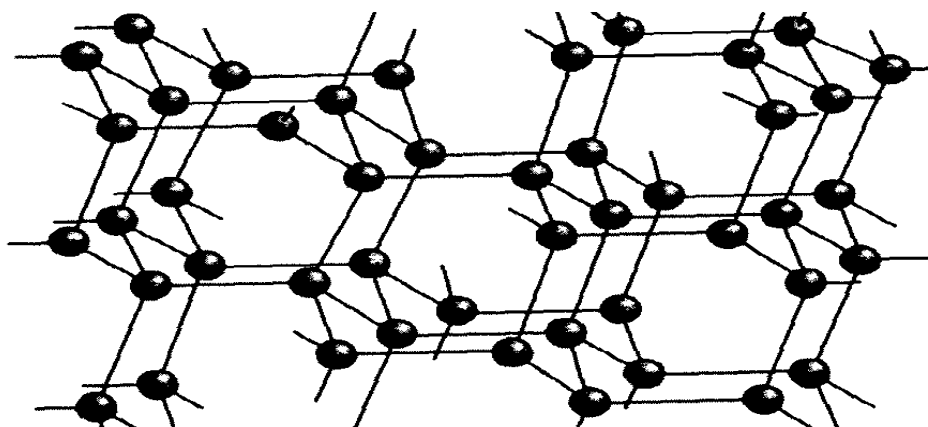


圖 12 鑽石的結晶結構

到了 1985 年 Robert F. Curl Jr. and Richard E. Smalley [Rice University in Houston] 和 Sir Harold W. Kroto [University of Sussex in England] 共同發現第三種純碳的結晶體叫著“fullerenes”，這三位科學家因此獲得 1996 年諾貝爾化學獎。富勒體（Fullerenes）俗稱為“巴克球”（Buckyball），其名稱沿自建築家富勒體（Buckminster Fuller）所設計測地學圓屋頂（geodesic dome）的創意而取名，因為富勒體（巴克球）的結晶體形成為球狀介殼（spherical shell）構造與富勒（Fuller）所設計圓屋頂構造相似。這球狀介殼正由許多六角形（hexagons）將包圍為一個五角形（pentagon）而所形成。理論上，這樣的球狀介殼可由 20，60，70，76，78 和 84 個碳數配置就可形成。

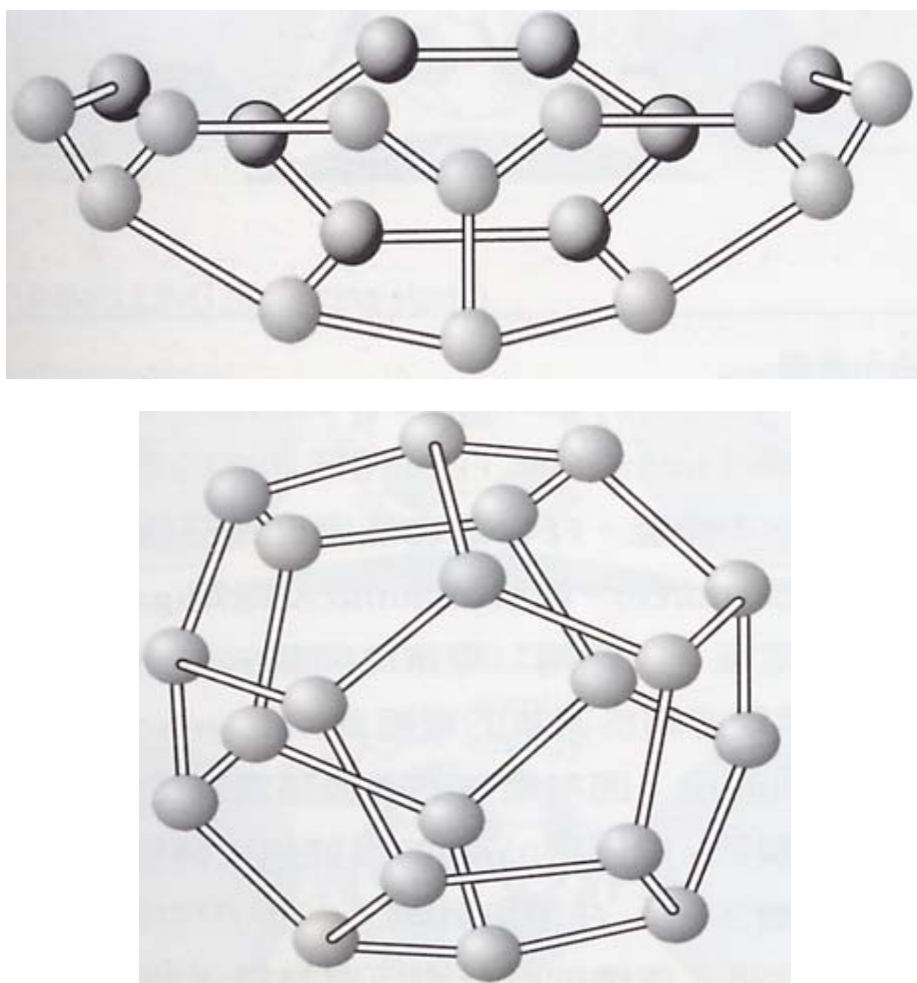


圖 13 C-20 的巴克球

圖 13 表示 C-20 所形成的巴克球構造，是碳數最小的巴克球，只有五角形（12 個）而無六角形。其中，C-60 結晶有 12 個五角形，各五角形由六個六角形所召圍所形成的球狀介殼型，相似於典型的足球（soccer ball）的形狀，如圖 14 所示。

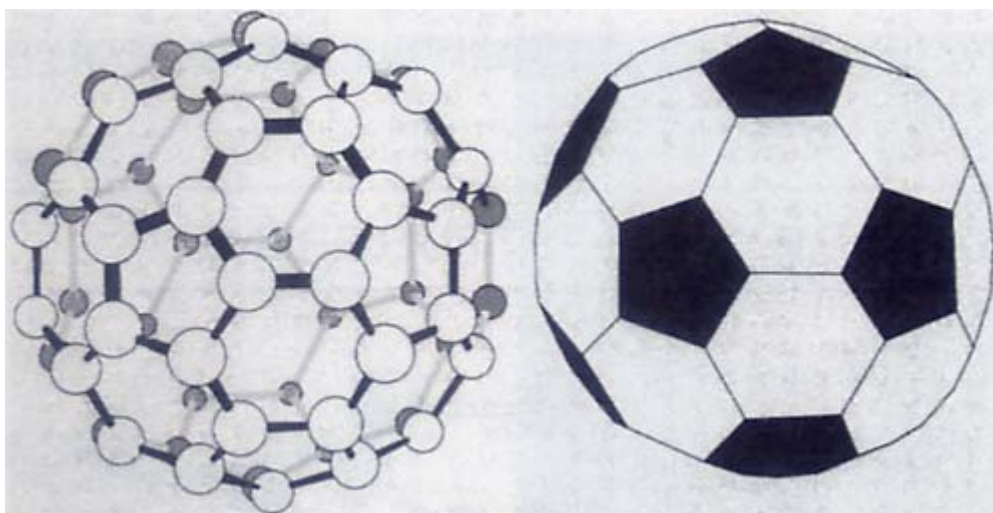


圖 14 C-60 結晶有 12 個五角形所召圍形成的球狀介殼

顯然 C-60 若依所謂隔離五角形規則 (Isolated pentagon rule)，就比 C-20 安定得多。依這隔離五角形規則，五角形平均分佈而且沒有直接鄰近時，結晶體最穩定。所以一般富勒體的五角形面是相隔離的。C-20 籠型是只有五角形，顯然違背了隔離五角形規則，這也為什麼 C-20 籠型異構體只能在氣態相下才容易存在之原因。C-60 巴克球的直徑只 0.7 奈米 (nanometers) 被認為標米科技微電子器件的明星材料，無論在電氣性質或機械質上最適合於電子器件之特殊奈米級設計應用。在奈米世界裡物質大大改觀，例如 C-60 巴克球中，雖是一個電子的移動的能量，都會影響到整個巴克球的運動 (motion)。從這種微電子機械構造 (microelectromechanical structure; MEMS) 作用始可設計出救命的汽車空氣袋 (air-bag) 等。Hongkun Park (University of California at Berkeley) 由 C-60 巴克球設計出與一般場效電晶體 (field-effect transistors、FETs) 相同功能的奈米 FET 電晶體。FET 是今日電腦晶片 (chips) 的基本機能。FET 的功能原理是三個電極 (electrodes) 包圍著半導體材料，構成爲電源 (source)、以及電閘 (gate)。電流從“電源”通過半導體流出“電洩”電極。“電閘”可做爲開關 (switch) 作用，讓電流開啓 (on) 或者讓電流關閉 (off)。電閘連結於適當的電壓源 (voltage source)。如此，FET 的功能也可做爲增幅器 (amplifiers)，因爲電流的通過隨電閘的壓而可改變。FET 也可做爲音響 (stereo) 的擴器，使磁帶 (tape) 的信號擴大轉變爲可聽音。這種奈米等級的 FET 原理表示於圖 15。

在這設計中，C-60 巴克球與微小三個電極 (source、drain、gate) 不緊相連結著。這樣的設計也可做爲電晶體的開關作用 (switch)。C-60 巴克球的直徑只是 0.7 奈米。由巴克球所設計的 FET 將是人類所造最小的電晶體。其中，C-60 巴克球當做半導體的作用，將代替了傳統的矽 (silicon) 的功能。同理，Dekker 研究群 (Delft University of Technology、Netherlands) 採用奈米管製作奈米場效電晶體 (FET)。

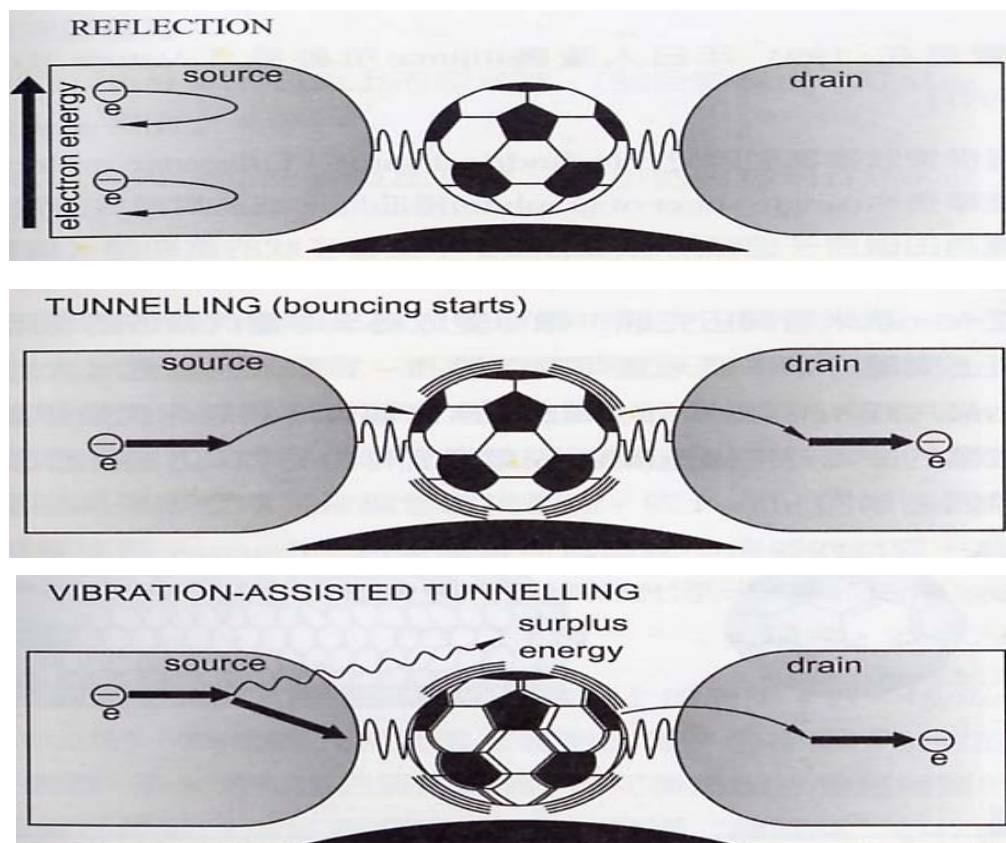


圖 15 奈米等級場效電晶體（FET）的設計與原理

上：當電子具太高或太低的能量被分子反射（reflect）時，無電流是“關”。

中：當電子擁有正好使 C-60 球跳動時，電流通是“開”。

下：當電子三過剩的能量正好相當於 C-60 球的振動（vibration）時，電子將會拋棄過剩的能量並騎越通過 C-60 球流通。電閘（gate）的電壓決定過剩能量大小，也就是決定一電子的通過與速度。這是一個奈米場效電晶體的原理。

奈米管是在 1991 年日人飯島（Iijima）所發見〔Nature（London）、354, 56~58（1991）〕奈米管係管狀碳富勒體分子（cylindrical carbon fullerene molecules），其構造類似於石墨單張片（single sheet of graphite）捲曲而形成為無縫合的管狀。因此，奈米管可定義為由碳原子連結所構成的微小中空管子狀的富勒體。奈米管是巴克球的異構體具有導電性，質輕而且異常的強度，為奈米科技最重要建築磚塊之一。奈米管與巴克球一樣可變成為半導體代替矽的功用。其實，碳和矽在週期表上同屬一類。奈米管可製作為 1~3 奈米的寬度（大約數個原子寬）可做為現今晶片約 1/10 的尺寸。如此，奈米管意謂將來可替矽晶而製作更小，更快而更效率的微電器件構造（MEMS）電子元件的材料。這為什麼矽晶被認為是夕陽工業的原因。

奈米科技的應用

奈米科技涉及從微電子器材產業，包括資訊，通訊，微電腦等，到生物醫學，材料科學以及國防等多方面領域。在微電子器材（microelectronics）方面，奈米科技以「極快、極小、極低成本」的「超級晶片」為訴求發展更節能、更便宜微處理器，使得電腦效率提高百萬倍，出現寬頻網和巨量記憶體以及集傳真資料處理、通訊於一體的智慧性產品。由於「奈米碳管」（carbon nanotube）的發現，使得微電子元件生起革命性的變化發展為可裝成各種分子電子器件（molecular electronic devices）的奈米產業。在奈米材料（nano materials）方面，工程師將奈米級顆粒的添加物（additives）與高分子混合製得複合奈米材料（nano composites），變成為導電性更佳，透氣性或阻氣性更好，鋼性或延展性更強的材料。例如奈米級碳黑與橡膠混合就能製成耐久 100 年的輪胎。金屬或陶磁顆粒細到奈米等級時，該產品加工所需溫度大大降低，不單節省能量，加工成型容易，而且產品的性能（耐熱，耐久）大大提升。美國太空梭（space shuttle）外牆絕緣磚塊襯裏（tile lining）就是由奈米顆粒所造的陶磁材料。

在生醫和農業方面，基因科技促進對動物和植物的基因移植。這種技術對新的動、植物品種以及新醫藥的製造有相當的貢獻。比如能創造抗旱、抗鹽、抗寒稻米、麥子和蕃茄，或高產奶牛等。生物學融入奈米技術之後，新奇的醫學診斷、感應器、資料儲存等相繼出現。美國 Quantum Dot 公司出售一種奈米矽顆粒（silicon nanospheres）可與醫藥/抗體相連結直接放置入人體內，做為生物標記物（biological markers），供為診斷或治療之用。奈米陳列（生物晶片）可測試 DNA，瞭解生物基因運作機制，對生命科學領域將有突破性的貢獻。利用 DNA 分子的近親，稱為 PNA 分子，具有選擇性鍵合的能力，與奈米碳管相連結裝成為分子電子器材的可能性大有希望，將在五年至十年內實現。在環境與能源方面，奈米科技使奈米級材料變成自淨，及抗菌、除臭作用，而發明出永久免洗的衣服，或者經雨水輕輕沖洗就能光潔如新的自淨式摩天大樓。奈米級二氧化鈦（titanium dioxide），由於其「光觸媒」（photocatalyst）特性，可有效地處理有機廢水協助清理海面油污以及除臭、抗菌、除霉的作用。高精密的感應圖可有效地協助處理核子廢料 在國防上，美國從 911 事件以來，國家安全成為最重要的議題之一。奈米科技晶片應用於感應器，可偵測到化學武器，成為反恐利器之一。從蓮花葉的撥水作用可容易聯想到鯊魚般快速潛水艦的出現。輕而韌的防彈衣將使每一士兵變成打不死的勇士。奈米科技在國防上的貢獻（包括太空，衛星）是無限大。

展望奈米科技的未來

1. 矽的功蹟和障礙（Silicon Success and A Brick Wall）

過去 40 年來，矽是一直佔在通訊材料的君王寶座。但是依摩爾定律將在近 10 年內碰到物理法則的限制，不得不將這君王寶座讓給奈米材料了。其理

由有三：

- (1) 當電晶體 (transistors) 微小化到某一程度後，電晶體的絕緣層無法避免漏電 (leakage current) 而將損害晶片的功能。
- (2) 當半導體內積成更多的電晶體數目，就需要更多的電力，結果產生更多的熱。
- (3) 製造微小化晶片的設備，變成更精密也更昂貴。依專家的估計，以 Top-down 法製作微細晶片的設備將達一百億至五百億。這樣昂貴的生產設備非隨便可投資。

2· 超級晶片 (Super Chips)

矽元素一直是晶片的基本材料。過去半導體製造業投資了莫大的設備下去，一時不容易廢掉。今後半導體的製造，需要靠奈米科技將新材料 (new materials) 加上於矽上面以提高其功能而不必廢掉原來的製造設備，以便將其壽命延至 2010 年代。新材料之一就是砷化鎵 (Gallium arsenide)。因砷化鎵與矽在構造上無法相容 (structurally incompatible)，因此，砷化鎵和矽之間必須介有一種奈米層的相容材料。砷化鎵是操作無線通訊和傳遞光線的材料，故矽和砷化鎵相結合的晶片就構成爲“超級晶片”。

其實，砷化鎵應用爲行動電話 (cell phone)，氮化鎵 (gallium nitride) 應用爲記憶儲存 (memory storage)，磷化銦 (indium phosphide) 應用爲光學網路 (optical networks) 以提高各功能而比採用單爲矽的晶片更有效率。Motorola 公司已準備 2006 年以前推出砷化鎵超級晶片以代替傳統的單爲 (plain silicon) 的晶片。

由於超級晶片加上無線能力 (wireless capability) 使得設計出更多的智慧新產品。例如你的行動電話可以隨時聽到最新的新聞或者讀到你的 e-mail。家裡的冷凍機 (冰箱) 自動可調節你的冷凍電力採用最便宜時段的價錢的電力公司電力。這樣的智慧器件若裝設在汽車輪胎內，就隨時告訴你的輪胎何時需要充氣或調節。假設將智慧器件裝設在你的產品上，你就能隨時追蹤你產品何時出廠何時出售，對企業管理更爲精細又正確。

3· 塑膠半導體 (Plastic Semiconductors)

與超級晶片一樣，塑膠半導體 (高分子半導體) 將在 2006 年代到 2008 年時代時在市場出現。這種塑膠半導體的技術將奈米顆粒的高分子溶液以一般油墨噴射 (inkjet) 印刷機一樣原理噴射 (spray) 爲一薄膜 (thin film) 在一柔軟性基質 (flexible materials) 上。目前 Plastic Logic 公司 (Cambridge, England) 和 FLEXIC 公司 (Milpitas, California)，都在開發這種塑膠半導體材料。這種塑膠半導體的特點是 (1) 具有柔軟性；(2) 不需要矽半導體一樣昂貴製造設備 (例如：淨潔室 clean rooms)；(3) 不需要化學腐蝕程序 (毒性)。總之，塑膠半導體在成

本上比矽半導體便宜且方便。雖然塑膠半導體在細小化觀點尚無法取代矽半導體，但由於積成回路的製作可用印刷程序 printing process，加上半導體的柔軟性，將來積成回路（IC）的設計以及產品器件將有很大的改變。這種塑膠半導體被稱呼為“電器紙張”（electronic papers）-薄、輕又柔軟。

這種電器紙張和無線接收器連接就可以接收網路（internet）隨時可將資料或影像出現在紙張上。將來報紙業、書籍出版業、廣告業（各擁 600 億、1000 億和 890 億美元市場），是否需要改變營業策略？電器紙張的潛力，因為奈米碳管的開發可提供光亮（bright）而鮮明（vivid）的畫面的光焦點（pixels），保證應用在平面顯示器將在 2003 年時就實現。

4· 超級晶片 + 塑膠半導體（Super Chips + Plastic Semiconductors）

假如『超級晶片』與塑膠半導體相結合造成為電子器件，就可設計出許多新產品。例如，鮮乳瓶裝有這樣的智慧晶片，你可以在你電腦中看出你在冰箱中的乳瓶內乳奶的存量和有效期限。

新加坡政府規定汽車中裝設這種智慧晶片以記錄汽車路費依據。在新加坡汽車行駛每一段路收費都不相同（繁街和閒街的收費不一樣）而每一街段有不同的訊號記錄不同的路費。這樣智慧晶片的應用是無窮的，也因時代的進步促進這種智慧晶片的市場顯得多采多姿。

5· 奈米碳管和奈米電線（carbon nanotubes and Nanowires）

第三代的電腦將採用以固態奈米電線（solid nanowires）或超薄奈米碳管（1.4 奈米寬）連結矽電晶體（silicon transistor）的構造。這種超薄奈米管可由碳（carbon），砷化鎵（gallium arsenide）或其他半導體材料所製成。由這種材料所製造的電腦目前相當昂貴，但由於其功能比一般電腦高出 10~100 倍，而且體積小、耗電少，故已在某些需要用途上被採用。這種超級電腦在處理巨大資料時，例如長期天氣預測、地球溫室效果等測量都需要如此超級電腦來計算數百的因子（factor）所構成的現象變化。

6· 商店材料（“Boutique” materials）

奈米材料的應用涉及國防上。美國國防部正開發強而輕且防雷達可偵測的戰鬥機材料。美國海軍正開發像鯊魚皮膚一樣材料來製造快速潛水艇。國防的研究成果也將應用到一般商店產品上。由這樣強而輕又安全的材料，將在 2006 年以前開發出小型飛船（blimps）來運輸郵件或貨品而避免公路上的交通堵塞現象發生。新奈米材料可製作超輕而由太陽能驅動的滑翔機（gliders）而全年不必著路，可充為衛星通訊用的補助設備。

新奈米材料也改變太空船（spacecraft）的設計。最近的貢獻就是衛星（satellites）的重量可造為輕質，因之發射的費用大大降低。

奈米材料的商業應用，包括生化毒素偵測器（E. Coil sensors），以及適量適時而自動的醫藥釋放器。軍隊製作笛條狀防彈衣（slimmer bulletproof clothing）以及人力增強機（enhanced human performance）使得士兵能跳越6到12英尺之高牆也易如反掌。

因天候氣溫而改變顏色的衣服出現在市場商店，衣服因天候而改變顏色意味平常不必購置許多衣服應付四季的變化，旅行時也不必帶很多衣服。奈米材料在營造材料（construction materials）方面也有用途，因奈米材料的混合，橋樑不會因氣溫的高低而產生膨脹或縮小的現象而致使破裂。以奈米材料所建造的建築物，將更能耐風雨和耐地震。假如建築物因氣候而改變顏色或將對隔熱，保溫的絕緣發揮效果。

7· 醫藥和食療（Drug and Diet）

奈米材料的另一貢獻將在醫藥遞送系統（drug delivery system）上。換言之，“可提醫藥”（portable pharmacies）的開發。這可提醫藥是細小而可植入身體內的器件，而這器件中包含有奈米顆粒的多種醫藥可電氣的定時、定量長期的釋放於人體內。這種可提醫藥，對糖尿病、老人癡呆症等慢性病患者的服藥給予許多方便。

奈米科技的另一應用是健康食品工業（diet industry）。開發一種奈米味道增加劑（taste-enhancers）添加於低熱量食品內，使其芳味增加。這種健康食品工業年有400億美元市場，而食療補助品市場也有420億美元。食療補助品中一個例子就是Nutrlease公司所開發的膽固醇降低藥（Cholesterol reducing drug）稱為“phytosterol”可直接服用或添加於飲料。Nutrlease公司也另外開發能搬運蕃茄紅色素（lycopene）的奈米顆粒做為食療補助品，以減低祇乳癌或大腸癌的危險率。到2006年以前，美國政府可能批准Nutrlease公司的新種奈米顆粒（nanoparticles）的使用，到時食療補助品的市場將大大改變。

8· 環境保護（Environmental clean up）

在未來30年內美國政府將花7500億的經費，清潔受污染的場地。奈米科技將對這方面的政策有所貢獻。因為奈米顆粒可與有害化學品反應而清除污染場地。例如，由99.9%鐵（Fe）和0.1%鈀（Pd）所構成的奈米顆粒用唧筒抽入地下水中清除地下水以及土壤中的致癌溶劑（carcinogenic solvents）。（註：這些致癌溶劑大多來自乾洗工業）

奈米顆粒對環境被殺蟲劑（pesticides）以及其他農藥污染的清除也是最好辦法。這種環境污染危害是全球性嚴重問題。由於奈米科技的進展，更多的污染場地將被清除乾淨。

三次元奈米材料（three-dimensional nanomaterials）被看如做為原子能電廠廢棄物放射性離子的包圍（encapsulation），由這種包圍材料無裂縫，可完全密封

放射性物質在內。假如這種科技成熟，將可使核子發電工業為大眾所接受。

這樣的遠景也有些困難點需要克服。

第一困難在於要操控原子級的技术需要莫大的能量以便分開或是結合原子。就是說，理論上難免有所謂“灰色感傷”（gray goo）問題。換言之，任何自己組合的程序難免發生相反本事意外的可能。

第二困難在於“粗肥手指”（fat fingers）問題，一個手指若要挑一個比它更小的東西時，將無法正確同時操作許多的小東西排置於所欲的位置上。顯然，這是不可能的事。

第三困難在於“粘著手指”（stiky fingers）問題。組裝者的手指或針頭若粘住原子，就很困難將原子放置在所欲的位置上。但大自然既然能順利實行自己組裝，那麼奈米科技總會找出一條路生產自己組裝的“奈米幼虫”吧。目前的希望就是：奈米碳管、蛋白質、高分子三大建築磚塊。

結 論：

奈米科學的真正意義是當材料尺寸減小到奈米等級後，這所表現出的一些新奇的物理效應。發現、操作、利用這些效應，可能會在資訊、生物、能源領域帶來深刻的技術革命。從這個意義上講，奈米科技更需基礎性的學理，也更需與許多領域的交叉配合，才能深入其領域。換言之，奈米科技需要廣泛的領域智識技術相配合才能發揮其力量，這個方面學理包括物理，化學，生物，醫學，材料等個各學問。

過去的科技致力於使用傳統電子工程「由上而下」的微細化技術來製作微回路，但奈米科技就是恰恰相反，「由下而上」的技術，就是讓分子的自動組裝特性主動解決這個麻煩的過程。分子的自動組裝（合）是任何活著的有機體的特質，分子可以自動組成細胞，而細胞組織再組成器官等等，隨著自然律而進行。從以上的說明可知奈米科技基本上是藉三種基本分子建築磚塊：即，1-蛋白質（proteins），2-高分子（polymers）和奈米碳管（carbon nanotubes）再依自動組合的自然律形成為聰明材料或器件產品的科技。

奈米科技的遠景是無限的廣泛又深淵。以上所舉列的奈米科技應用，已不是不可可能的問題，而在於何時實現或者技術上需要採取那一條路的問題。發現、掌握並利用這些奈米效應，可能會在資訊、生物、能源領域帶來深刻的技術革命。因此，奈米科技不單影響高科技新領域，也會影響到所有傳統的產業，包括製造業、保健醫療、農業、交通、營造等等。科學家對奈米科技這麼樂觀，因為奈米科技正在它生命期的開端，而矽科技卻已處在它們生命期的終點。

表 1 奈米科技在各產業的應用

光電產業	碳基微電子器件 奈米管分子間連結 奈米管電場發射 微波電力增強器 碳奈米材料的工業生產
生醫產業	分子計算機 生物晶片 基因醫療法及工程技術 奈米醫藥遞送系統 智慧微晶片 細胞感應器 生物鋼鐵—絹
高分子產業	官能化導電性高分子薄膜製作技術 電誘化學發光導電性高分子薄膜 柔軟性塑膠電晶體 IBM 馬陸晶片 金塑膠二極體 自我組織分子結構高分子 微米接觸印刷法, 鋰/電分子電池 奈米結構材料, 自重治療塑膠材料 感應計及觸媒
機械產業	奈米筋肉 形狀記憶合金 機器人和電腦 機器魚和機器猴 Casimir 效應和微米機器 合金和原子等級器材
化工產業	觸媒轉化器 觸媒的奈米科學 沸石的孔隙結構 凍結煙霧 化工技術和生物高分子結構分析
傳統產業	塗料工業 各種奈米複合材料 水泥工業 中草藥產業

參考書目：

- [1] “The next big thing is really small” by Jack Uldrich with Deb Newberry, Grown Business, New York (2003) .
- [2] V. Joachin, J. K. Gimzewski, A. Aviram, Nature 408, 541, (2000) .
- [3] <http://www.2facts.com/TSOF/Search/s1000470.asp>
- [4] “Structural and electronic properties of molecular nanostructures” , American of physics, p.537, 2002.
- [5] Guillard, T., Flamant, G., Laplaze, D., Robert, J. F., Rivire, b., and Giral, J., “Towards the large scale production of fullerenes and nanotubes by solar energy” , Solar Forum 2001, Washington, DC, April 21-25, 2001.
- [6] “Spider Silk Fibers Spun from Soluble Recombinant Silk Produced in Mammalian Cells.” , A. Lazaris et al. Science, January 18, p.472, 2002.