



修訂版

# 奈米科技導論

羅吉宗 戴明鳳 林鴻明 鄭振宗 蘇程裕 吳育民 編著

 全華圖書股份有限公司 印行

# 序

奈米科技相信將是 21 世紀科技與產業發展的最大驅動力，未來奈米科技所產生的新材料及其衍生的新裝置、新應用之影響，將遍及光電與資訊產品、醫療保健、基因工程、化學工業、能源儲存與環境保護、奈米檢測與加工技術等，因此加速擴散奈米技術的應用能力至相關產業，並引發奈米技術帶動傳統產業升級，已成為今日先進國家最重要的研究課題。

培養人才是發展科技的重要工程，我們承全華科技圖書公司陳董事長與黃顧問之邀請，寫這本「奈米科技導論」，以基礎觀念闡述奈米科技特性，並力求深入淺出，詳細介紹各種奈米技術與應用。盼以此書引發讀者興趣，廣植新興奈米產業之生力軍。

本書內容分為六章，第一章“總論”由大同大學光電工程研究所羅吉宗教授將奈米科技作提綱性簡介。第二章“奈米世界中意想不到的特性”由中正大學物理研究所戴明鳳教授闡述奈米材料的各種新奇特性。第三章“奈米材料合成技術”由大同大學材料工程研究所林鴻明教授詳細介紹各種合成技術，並比較其優缺點。第四章“奈米加工技術”由台北科技大學機械系機電所蘇程裕博士和鄭振宗博士共同完成。第五章“奈米材料分析與檢測技術”由羅吉宗教授執筆。第六章“奈米科技之應用”由工業技術研究院生物醫學工程中心吳育民博士與羅吉宗教授合力完成。

本書可供普通大學、科技大學、技術學院或專科學校當教科書，提供物理、化學、生物、電機、電子、材料、機械、化工等各科系之大三以上同學或研究生使用，也可供產業界工程師參考。

作者們才疏學淺，雖已竭盡全力，然而匆忙中難免有錯或交代不夠清楚處，尚請各位前輩先進，同學不吝賜教，您們的批評是使這本書止於至善的原動力。奈米科技的發展一日千里，我們將長期服務讀者，不定期更新資料，並加強所應用原理之說明。

主編 羅吉宗

大同大學光電工程研究所

# 編輯部序

「系統編輯」是我們的編輯方針，我們所提供給您的，絕不只是一本書，而是關於這門學問的所有知識，它們由淺入深，循序漸進。

本書廣泛探討奈米科技，從奈米的尺度世界到前瞻技術作開場介紹，進而介紹奈米材料的特性、物理性質及檢測技術等，將奈米科技作廣度及深度的討論，是一本最佳教科書及參考書。

若您在這方面有任何問題，歡迎來函連繫，我們將竭誠為您服務。

# 目錄

<b>第 1 章</b>	<b>總論</b>	<b>1-1</b>
1-1	奈米尺度的世界	1-1
1-1-1	奈米的定義	1-1
1-1-2	奈米尺度的物性與巨觀世界截然不同	1-2
1-1-3	奈米科技觀在 20 世紀 60 年代才萌芽	1-3
1-1-4	認識碳奈米管	1-4
1-1-5	國家型奈米科技發展計畫	1-7
1-2	什麼是奈米科技	1-8
1-2-1	奈米科技的內涵	1-8
1-2-2	大自然蘊藏很多奈米科技概念	1-9
1-2-3	顯微技術與電腦促進奈米時代來臨	1-11
1-3	奈米科技的前瞻	1-12
1-3-1	改變世界的工業革命	1-12
1-3-2	目前全球正陷入能源危機、經濟衰退困頓期	1-13
1-3-3	奈米科技可能帶來第四波工業革命	1-13
	習題	1-14
	參考文獻	1-15
<b>第 2 章</b>	<b>奈米世界中意想不到的特性</b>	<b>2-1</b>
2-1	介觀空間中的奈米世界	2-1
2-1-1	小尺寸效應	2-7
2-1-2	體積效應和量子尺寸效應	2-11
2-1-3	表面效應和表面能	2-16
2-1-4	巨觀的量子穿隧效應	2-25
2-1-5	庫倫堵塞效應與量子穿隧效應	2-26

2-1-6	介電限域效應和量子限域效應	2-31
2-2	奈米材料的結構和奇特的物理性質	2-34
2-2-1	奈米結構材料與形貌	2-34
2-2-2	奈米半導體的各種性質簡介	2-54
2-2-3	各種效應衍生出的應用	2-56
	習題	2-57
	參考文獻	2-58

## 第 3 章 奈米材料合成技術 3-1

3-1	簡介	3-1
3-2	氣相法	3-6
3-2-1	氣凝合成技術	3-12
3-2-2	濺射法	3-27
3-2-3	流動液面真空蒸鍍法	3-28
3-2-4	活性氫-熔融金屬反應法	3-29
3-2-5	混合電漿法	3-30
3-2-6	電弧放電法	3-33
3-2-7	導體電爆炸法	3-35
3-2-8	化學氣相合成法	3-36
3-3	液相法	3-41
3-3-1	沉澱法	3-41
3-3-2	噴霧法	3-43
3-3-3	溶膠-凝膠法	3-46
3-3-4	水熱法	3-48
3-3-5	輻射化學合成法	3-50
3-4	奈米碳管之合成技術	3-52
3-4-1	奈米碳管的特性	3-52
3-4-2	奈米碳管的成長機制	3-56
3-4-3	奈米碳管之製備方法	3-57
3-4-4	奈米碳管之純化技術	3-67
3-5	結語	3-70

習題	3-72
參考文獻	3-72

## 第 4 章 奈米加工技術 4-1

4-1 掃描探針顯微加工術	4-1
4-1-1 掃描穿隧顯微術	4-2
4-1-2 STM 原子操縱術	4-6
4-1-3 表面原子蒸發操縱術	4-9
4-1-4 原子力顯微儀	4-10
4-1-5 掃描探針微影術	4-11
4-1-6 熱機械式原子力顯微術	4-13
4-2 微影製版術	4-15
4-2-1 微影技術	4-16
4-2-2 蝕刻技術	4-24
4-2-3 微影加工技術總結	4-31
習題	4-32
參考文獻	4-33

## 第 5 章 奈米材料分析與檢測 5-1

5-1 目前最常用的微結構特性檢測工具	5-1
5-1-1 掃描探針顯微鏡	5-1
5-1-2 電子束分析技術	5-7
5-2 電子結構與成分分析	5-11
5-2-1 光學特性分析技術	5-11
5-2-2 X 射線分析技術	5-19
5-3 奈米材料特性分析實例	5-26
5-3-1 奈米顯微技術應用實例	5-26
5-3-2 光譜儀的奈米解析與監控技術	5-29
習題	5-31
參考文獻	5-31

<b>第 6 章</b>	<b>奈米科技之應用</b>	<b>6-1</b>
6-1	奈米材料與製造技術	6-1
6-2	奈米電子與光電產品	6-3
6-2-1	基礎奈米電子學	6-3
6-2-2	場發射顯示器	6-8
6-3	奈米生物技術與醫療檢測之應用	6-11
6-3-1	奈米生物技術	6-11
6-3-2	奈米科技於生醫檢測的應用	6-13
6-4	能源與環境	6-39
6-5	航太工業與國防安全	6-40
	習題	6-41
	參考文獻	6-42

**附錄****附-1**

# 總論

## 1-1 奈米尺度的世界

### 1-1-1 奈米的定義

奈米(nanometer)是長度的單位，我們日常生活長度通常以公尺或米(m)為單位。將一米分割成千分之一的毫米(mm)還可用肉眼分辨其大小，再將一毫米分割成千分之一叫微米( $\mu\text{m}$ )，如細菌、紅血球等是微米級大小，需以光學顯微鏡觀察其影像形貌。微米的千分之一就是奈米(nm)，奈米級尺寸需藉高倍率電子顯微鏡才可顯現出此世界。

$1\text{ nm} = 10^{-3}\ \mu\text{m} = 10^{-6}\text{ mm} = 10^{-9}\text{ m}$ 。人類的頭髮直徑約 100 微米， $100\ \mu\text{m} = 10^{-4}\text{ m}$ ，因此一奈米僅是頭髮直徑的十萬分之一大小。一般的分子、生物的 DNA 及各種病毒的大小都是奈米級。病毒比細菌小，體積小但表面積大，吸附力強，擴散活力相當驚人。因此最近中國廣東、香港出現的非典型急性肺炎(SARS)病毒感染病例，馬上引起世界衛生組織重視，各國都如臨大敵警戒。其實奈米級物質需建構在微米甚至是巨觀結構上使用，奈米級的病毒當然也需藉家禽、牲畜或人體為存活的溫床。因此不管它是藉空氣、口沫或接觸傳播，隔離傳媒、控制病毒存活空間，才可阻止可怕的病毒蔓延。



## 1-1-2 奈米尺度的物性與巨觀世界截然不同

奈米科技所探討的世界比牛頓力學藉人類的感官直接觀察的巨觀(macroscopic)物理小很多，但比量子力學所研究的原子、電子、質子等粒子運動的微觀(microscopic)物理還大。當分子結構的尺寸介於 1~100 nm 之間時，物質的很多性能發生質變，將呈現出既不同於巨觀物體，也不同於各獨立原子的奇異現象。

研究發現奈米尺度的材料，有四種特殊效應：

1. 大部分原子都成為表面原子，易與其他原子結合，其 Van der Waal 力很大，有表面界面效應。
2. 當奈米粒大小與光波長或電子物質波(de Broglie)波長相當或更小時，晶體週期性邊界條件被破壞，而呈現小尺寸效應。
3. 奈米粒尺寸小到某臨界值時原子數目有限，費米能階(Fermi level)附近的電子能階變為不連續，電子會呈現顯著的量子效應。
4. 絕緣層薄到奈米級其絕緣性會因電子穿隧而導通，Fowler-Nordheim 電子穿隧效應請參考 6-2-2 節說明磁性奈米粒量子干涉元件中的磁通量也有穿隧效應，這統稱為巨觀量子穿隧效應。

這些效應造成奈米材料與傳統材料產生以下不同的物理特性：

1. 機械性質：由於表面界面效應，使得奈米複合材料、奈米陶瓷的強度、耐磨性、韌性、延展性、耐老化性、緻密性和防水性等都顯著改善。
2. 聲學性質：由於小尺寸效應，粒徑小則孔隙度減少，表面原子傳遞聲波敏感度較高，使得訊號傳遞較不受干擾，訊號雜訊比(SNR)提高，聲譜因而改善。
3. 熱學性質：表面界面效應使得奈米材料的熔點比塊材低很多。這將使粉末冶金的技術更上層樓。奈米微粒在低溫時熱阻很低可作為低溫導熱材料。
4. 電學性質：表面界面效應使得奈米微粒的表面原子易引起表面電子自旋和電子能階改變。量子尺寸效應使奈米金屬之電阻率隨粒徑減小而增大。奈米絕緣體的低頻介電常數隨粒度減小而增大。巨觀量子穿隧效應使奈米氧化物的絕緣性隨尺寸下降而減小，如絕緣的  $\text{SiO}_2$  在 20 nm 尺度時會導電。
5. 磁學性質：小尺寸效應使奈米磁性顆粒的磁矩增強，有很高的磁矯頑場  $H_c$ (coercive field)。而奈米粒尺寸小於 10 nm 則  $H_c$  降為零，磁域(domain)由多域變成單域，乃量子尺寸效應使小於 10 nm 的奈米磁粒由硬磁變成超順磁，其  $\mu$  值很大容易磁化。在高頻交流下，集膚效應使導體有效截面積減小、電阻增大，而奈米薄膜的電阻隨磁場變化很顯著，這現象叫巨磁電阻(giant magnetic reluctance GMR)。

6. 光學性質：小尺寸效應使奈米金屬的光反射能力顯著下降到低於 1%，即它有很強的光吸收能力。奈米氧化物對紅外線和微波有良好的吸收能力，奈米粒徑小於雷達波的波長則波的穿透和吸收率很高。而量子尺寸效應使奈米粒對某種波長的光吸收帶有藍移現象，且對各波長光的吸收帶有寬化現象，奈米氧化物對紫外線的吸收效果很好即利用這兩種特性製成。奈米矽和某些奈米氧化物在室溫下具有較強的光致發光(PL)效應。二氧化鈦奈米塗料若充分照射可見光，則對碳氫化合物會有很強的光催化作用，具有自清、殺菌、去污的環境保護功能。

當奈米尺度的材料或元件無法以傳統的理論說明各種新奇的奈米現象時，物理領域正在發展介觀(mesoscope)物理、化學領域有「超分子」化學、生物學中有「奈米生物學」、機械領域有「奈米機電」、「奈米加工」等同時在進行研究，看似各領域獨立發展，其實這些不同領域的技術中有一共通點，即奈米。奈米這個關鍵字賦予開發團隊共同目標，正在突破阻隔而橫跨領域，逐漸出現整合的機會，這是奈米科技衍生的新觀點。今後所有的組織都必須有共識，而相互尋求合作，提升技術交流注入組織活力，將會演變出一種讓組織改變的風潮。

### 1-1-3 奈米科技觀在 20 世紀 60 年代才萌芽

諾貝爾物理學獎得主，理查費曼(Richard Feynman)被認為是奈米觀念的始祖。他在 1959 年的演說題目「窺探究竟仍有很多空間(There is plenty of Room at the Bottom)」中提到「……我想說操縱與控制微小物體是可能的，因為當物體被縮小後，在微小世界仍有許多的空間……我認為物理原理不違反操縱原子的可能性。在原子世界將有新的力量、新的可能性、新的影響，但問題是如何製造原子尺度的材料與重複生產，因為原子世界的所有事物將與普通世界不同。……若能夠在原子或分子的尺度下製造材料與元件，將會有許多引人入勝的新發現。……欲實現此一理想，有賴新的微型化儀器設備的產生，以達到操控及量測這些微小的奈米結構……。」

1963 年日本物理學家久保亮武(R.Kubo)提出超微粒量子限制理論。當金屬超微粒的原子數目減少，將使金屬原子間距離加大，金屬的電子能量間隙增大，使能量由連續變成不連續能階。由於這個能量不連續，使超微粒的物理特性不同於金屬塊。現在半導體元件的應用就是利用這個理論而製作，將來的奈米元件也用到此物理效應。

直到 1980 年代，費曼先生所想像的儀器終於被開發出來了，掃描式穿隧電流顯微鏡(scanning tunneling microscopes, STM)，原子力顯微鏡(atomic force microscopes, AFM)，和近場光學顯微鏡(near-field optical microscopes, NFOM)相繼問世，為奈米結構提供了如雙手與雙眼般的量測與原子操控工具。

1985 年英國化學家科魯特(Kroto)等人，以雷射激光於石墨上使其蒸發成碳灰，將收集的碳灰去雜質純化後得到的碳簇，置於質譜儀上分析，結果發現兩種不明物質，其重量分別是碳重量的 60 倍與 70 倍，故稱這兩種碳簇為  $C_{60}$  與  $C_{70}$ 。科魯特到加拿大旅遊時見到巨蛋體育場的屋頂造型為五角形與六角形結構的球體，得到靈感解出碳 60 像一顆足球形狀，有 20 個六邊形和 12 個五邊形的面，共 32 面所構成的封閉中空球形分子，直徑小於 1 nm。他為了紀念這巨蛋建築師的名字 Buckminster Fuller，將碳六十命名為 Buckminsterfullerene，但此名字太長後來又被簡稱為巴克球(Buckyball)或富勒(Fullerene)分子結構，如圖 1-1。

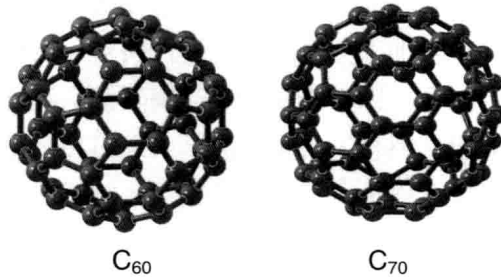


圖 1-1 碳簇結構(奈米期刊網站：<http://pubs.acs.org/journal/journals/nalefd/index.html>)

金是良導體，電阻很小不受磁場影響。但 1986 年發現奈米金粒有磁阻現象，1988 年法國科學家巴比克(M.Baibich)等人做出 Fe/Cr 奈米多層膜於低溫下電阻會隨著磁場的改變而有急劇的變化，這現象叫巨磁阻效應。我們可利用具有巨磁阻效應的材料製成磁性開關的電子元件，在不加磁場時，巨磁阻電子元件的電阻很大，形同斷路，加一磁場後巨磁阻電子元件的電阻可降為零，形同通路。

1991 年 NEC 公司的飯島澄男(Sumio Iijima)用碳電弧放電法合成  $C_{60}$  時發現一些針狀物，利用高解析穿透式電子顯微鏡(HR-TEM)觀察這些針狀物時，發現針狀物是奈米級的多層中空同軸碳管，稱它為多壁碳奈米管(multi wall carbon nanotube, MWCNT)，後來經純化後又發現單層壁碳奈米管(SWCNT)。這些發現馬上引起奈米科技研究高潮，從了解奈米碳管的結構與其特殊物性的探討，到多方面的應用技術已快速進展，潛在的經濟效應與前景有相當大的想像空間，世人已意識到奈米科技對 21 世紀的人類社會不僅具有產業上的意義，對於整體人類生活將具有革命性的影響。

#### 1-1-4 認識碳奈米管

碳奈米管又叫巴基管(Bucky tubes)，是屬於富勒(Fullerene)碳系，圖 1-2 是鑽石、石墨、 $C_{60}$  和碳奈米管等碳系材料的結構圖。碳奈米管的側面是由六邊型碳原子環構成的石墨片

捲曲而成的無縫中空之奈米尺度管體，但在管身彎曲處和管端口封頂的半球帽型，則有含一些五邊形和七邊形的碳環結構。捲成碳奈米管的石墨片若僅是一層則叫單壁碳奈米管(SWCNT)，若是由多層石墨片捲成的則叫多壁碳奈米管(MWCNT)。一般單壁碳奈米管的直徑約 1~6 nm，單壁碳奈米管的長度要比多壁碳奈米管短很多。碳奈米管的形成取決於六邊形碳環構成的石墨片是如何捲起來成圓筒形的，不同的捲起方向和角度將會得到不同類型的碳奈米管。依碳奈米管的截面邊緣形狀，單壁碳奈米管又分為扶椅形(*armchair*)奈米管、拉鍊形(*zigzag*)奈米管和對掌形(*chiral*)奈米管，如圖 1-3 所示。

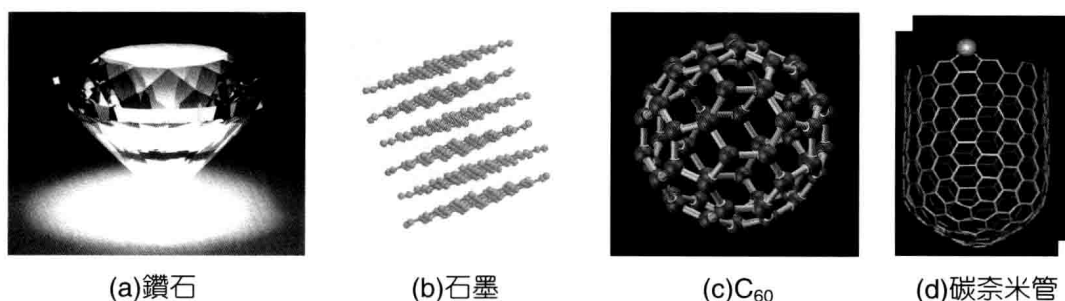


圖 1-2 碳系材料結構圖(<http://www.sinica.edu.tw>) (見附錄圖片)

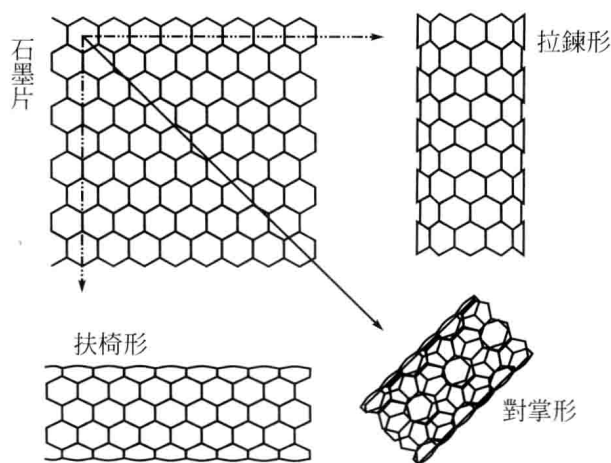


圖 1-3 碳奈米管結構(<http://www.sinica.edu.tw>)

理論計算和實驗顯示，單壁碳奈米管的楊氏係數和剪切係數都與鑽石相當，其強度是鋼的 100 倍，而密度只是鋼的 1/6，是一種超級纖維材料，碳奈米管的力學性能不僅强度高，同時具有很大的超塑性和韌性，將有很多應用潛力，例如可當複合材料的增強劑、做 STM、AFM 的探針等。

電子在碳奈米管中通常只能在同一石墨片中沿著碳奈米管的軸向運動，沿徑向的運動受到量子限制。實驗顯示不同類型的碳奈米管，其導電性能不同，例如，椅臂形單壁碳奈米管是金屬性，而鋸齒形與手性形碳奈米管則部分為半導體性，部分為金屬性。隨著碳奈米管直徑的增大，半導體能帶間隙( $E_g$ )變窄，因此當管徑很大時能障為接近零而呈現金屬性。

在很多特定的結構中，奈米碳管會形成具有整流特性的界面(junction)結構。例如，當兩種不同類型或不同管徑的碳奈米管相連時，它們之間的過渡結構會具有界面的特性，圖 1-4(a)(b)都是金屬性與半導體性奈米碳管相連而成的界面。即使是同種類型的奈米碳管，若結構的缺陷使碳奈米管彎曲也會形成界面的特性，如圖 1-5。若一根碳奈米管分支成 Y 或 T 型碳奈米管，在它們的分支處也有界面的特性，如圖 1-6。以上這些奈米碳管的過渡結構通常是由一個或數個五邊形和七邊形的碳環對組成，如果在連結部位或奈米管中出現 5/7 碳環對時都會形成界面的整流特性。碳奈米管的這種界面整流特性可設計出很多奈米電子元件。目前人們在製備奈米碳管時無法準確地控制奈米碳管的金屬性或半導體性，若透過化學摻雜的方式製備 n 型或 p 型碳奈米管將較易實現高速、低耗能的奈米大容量記憶體。

碳奈米管的端口細小且穩定，加上電場很容易尖端放電，將是下一代平面顯示器極佳的陰極材料。奈米碳管也是貯氫容量最大的吸附材料，不需高壓就可貯存高密度氫氣，可望解決氫燃料汽車能夠在室溫下工作的低氣壓大容量貯氫技術的需求，可貯存高能量的小型電池問世後則電動環保汽車即可上路了。在生物醫學方面，奈米碳管被用於製作微陣列生物晶片和微型實驗室晶片(lab-on-a-chip)，不僅大幅提高基因定序效率，在細胞基因傳遞、體內藥物傳遞、分子生物偵測的進展都令人興奮。

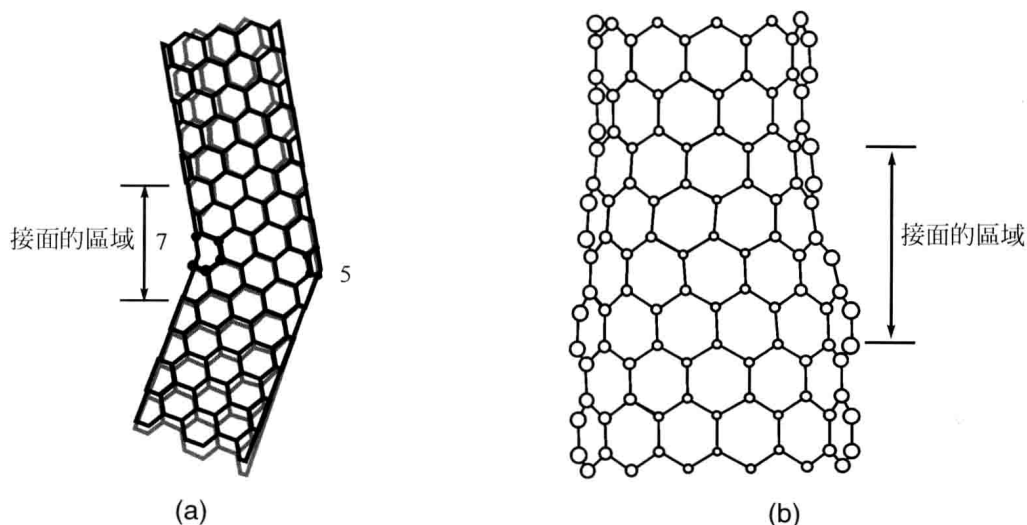


圖 1-4 碳奈米管過渡界面(IBM 奈米電子期刊網站：<http://www.research.ibm.com/journal/rdimg.html>)

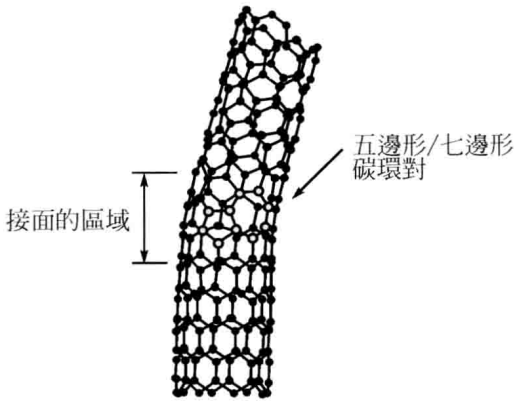


圖 1-5 碳奈米管彎曲的介面  
(IBM 奈米電子期刊網站：<http://www.research.ibm.com/journal/rdimg.html>)

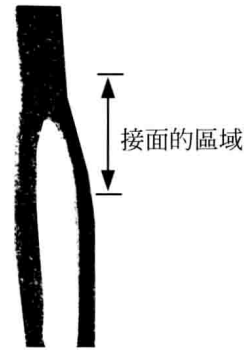
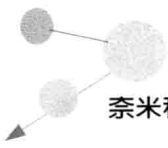


圖 1-6 碳奈米管分支處的介面  
(IBM 奈米電子期刊網站：<http://www.research.ibm.com/journal/rdimg.html>)

### 1-1-5 國家型奈米科技發展計畫

鑑於奈米技術產業潛力無限，全球目前已超過 30 個國家將奈米科技列入國家型重點發展計畫。美國在 1991 年正式把奈米級技術列入「國家關鍵技術」和「2005 年的戰略技術」，並指出奈米技術的發展可能使許多領域產生突破性進展。美國前總統柯林頓於 2000 年提出「國家奈米技術先導計畫」(national nanotechnology initiative, NNI)，在 2001 年奈米研發經費為 4.97 億美元。2002 年小布希總統又提高為 6.4 億美元，除了建立美國政府在尖端技術上的領先地位，更帶動了全球奈米技術投資與應用發展的風潮。

日本政府早在 20 世紀 80 年代就斥巨資資助奈米技術研究，1991 年起又實施一項為期 10 年，耗資 2.25 億美元的奈米技術開發計畫，從 2001 年起開始實行「產官學」聯合加速開發的做法，在未來 5 年科技基礎計畫中把奈米技術的新材料技術、生命科學、資訊通訊和環境保護並列為四大重要發展領域，研究重點在奈米級材料的製造技術和功能，通訊用高速度、高密度的電子元件和光儲存器等。德國在 1993 年提出 10 年重點發展的九個關鍵技術領域中有四項是奈米技術，以漢堡大學(Hamberg Univ.)和美茵芝大學(Mainz Univ.)為奈米技術研究中心，政府每年資助 6500 萬美元支持微型技術的研究與開發。歐盟計畫在 2002 至 2006 年投入 13 億歐元，到目前為止歐洲已有 50 所大學，100 多個國家級研究機構在發展奈米技術。中國擁有一支比較精幹的奈米科技隊伍，集中在中科院和一些知名大學，中國的研究主力是奈米材料的合成和製備、掃描探針顯微技術(SPM)的應用等，整體上與開發中國家的研發實力還有一段差距，但最近投注不少經費在奈米科技研發上急起直追。我國在 2003 年初推出「挑戰 2008 國家發展重點計畫」中自 2003 年起政府在未來 6 年內將投入新台幣 231 億元，推動奈米科技產業化。



目前全世界對於奈米的研究都還在起步階段，奈米技術的領域又很廣泛，我國有半導體產業的深厚基礎，因此在奈米科技產品的發展上不必從頭開始，且我們有應用既有知識，快速轉變為新產品的能力，把握這個優勢，結合政府、學術界與產業界的力量，共同努力開創未來的奈米技術產業製造王國不是夢。

## 1-2 什麼是奈米科技

### 1-2-1 奈米科技的內涵

奈米科技是一種處理極小物質的加工技術，其處理技術有兩種方式，傳統的加工方式，由大而小是精雕細琢的工藝。例如在故宮博物院展覽的「在橄欖核上刻山水人物」和「在米粒上刻字」等，經放大鏡顯示其大小都是微米級的。半導體工業的微影與蝕刻技術目前也是微米級，而半導體元件和光電元件精細加工技術正邁向奈米製程中。

顛覆傳統由小而大的奈米加工方式，是在分子的層級下藉由操控逐一原子，創造出具有新的分子結構之科學與技術。這是夢想效法上帝創造生物的 DNA，以調整原子或分子的排列方式，而製造出有價值的東西。例如，鑽石與石墨同樣是碳原子組成，但原子的排列方式不同，其物理特性就差異很大，石墨是  $SP^2$  的片狀結構，其導電性很好，鑽石是  $SP^3$  的四角錐結構，其鍵能很強硬度很高，亦可將碳原子排列成巴克球的  $C_{60}$  或排成碳纖維或奈米碳管等，不同結構其應用價值就有不同的活用空間。因此，理解與操作如 DNA 般的基本物質的資訊，正是奈米科技的重點。

面對這兩種不同的加工方式，將發展出什麼樣的產業時，不是要捨去那一種方法，而是要把這兩種方法統合，且提高其相互整合的能力，才是發展奈米科技的重要工作。例如，適當的調配由上而下的微影與蝕刻製程與由下而上的薄膜製程是創造不同奈米產品的方法之一。

奈米結構必須與微米甚至是巨觀結構結合，方能展現其卓越的特性。因此探討如何有效率地製造奈米材料與元件及如何使用這些奈米元件在微觀或巨觀的層級間維持穩定的介面，乃是奈米科技要實用化的研發重點。奈米科技已發展出非常重要的「顯微觀察技術」、「微細加工技術」、「由下累積結構的技術」，現在正是踏入奈米領域的時機。現階段奈米技術尚未成熟，還沒有能力輕易操控這種超微小的奈米結構，對奈米材料的運用原理更未充分了解，這正是現今奈米科技研究之主要課題，加強這方面的研發工作與人才培訓，對產業升級與國家經濟發展是刻不容緩的事。

## 1-2-2 大自然蘊藏很多奈米科技概念

奈米科技雖然是一項高科技，但奈米現象早就存在我們身邊。例如，上帝創造萬物時，就將其生命訊息儲存在奈米尺度的「去氧核糖核酸」(deoxyribonucleic acid, DNA)上，它隱藏了遺傳基因的訊息。DNA 由四種不同的核苷酸分子(nucleotide)組成，其代號分別為 A、T、C、G。在細胞中 DNA 是由兩條單股的 DNA 以一定的配對型式所組成之雙螺旋的三度空間結構，如圖 1-7 所示。由於各個核苷酸有不同的化學官能基，故在雙螺旋的 DNA 中，A 一定與 T，C 則與 G 互補配對。生物就是靠 DNA 中不同核苷酸分子的序列，將遺傳訊息一代一代地傳遞下去，不同的排序列造成不同的生物，也造成不同長相特徵的差異。所謂基因(gene)其實是指一段帶有特定遺傳訊息的 DNA 片段，此片段可經由細胞中聚合酶的作用產生蛋白質與各種酵素，來調控生物體中某個特定的生命功能。自然界生物的演化等於是 DNA 之 A、T、C、G 核苷酸自然排序的過程，自然的奈米技術早在盤古開天時就應用在生物物種的繁衍上，人類努力要揭露此神秘面紗，到最近才有點進展。

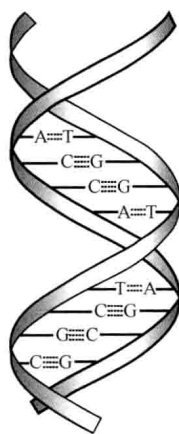


圖 1-7 DNA 的雙螺旋結構及其 A : T 和 C : G 鹼基配對特性

蓮是生長於沼澤的宿根草本植物，它在夏季開花，花葉俱清香，色澤鮮豔。蓮葉只是經由天然的雨水沖刷不必人工清洗就可以保持表面潔淨，這種具有自潔功能的表面被稱為「蓮花效應」。何以蓮花、蓮葉具有出污泥而不染的能力？科學家作接觸角的實驗結果發現，水滴在蓮葉上的接觸角高達  $160^\circ$ ，如圖 1-8。接觸角的大小代表什麼意義？液體滴在固體表面上時，固體表面和液滴切線的夾角叫接觸角。水滴在固體表面的接觸角  $\theta$  很小，它易濕潤固體表面，而水銀掉在固體表面的接觸角  $\theta$  很大，它不易濕潤固體表面。當液體濕潤固體表面時，氣體與固體的界面被液體與固體的界面所取代，在圖 1-9 中表面張力平衡式為：



$$\sigma_{\text{固-氣}} - \sigma_{\text{固-液}} = \sigma_{\text{液-氣}} \cos \theta \dots\dots\dots(1.1)$$

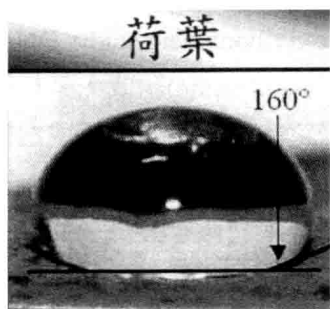


圖 1-8 荷葉接觸角(見附錄圖片)

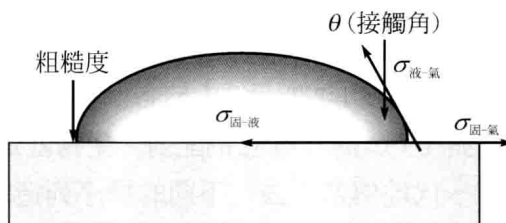


圖 1-9 表面張力平衡圖

(ITRS 網站：<http://public.itrs.net/Files/2001ITRS/Home.htm>)

而固-氣表面能與固-液表面能之差異叫它為濕潤張力。接觸角為銳角時， $\cos \theta$  為正值，固體被濕潤， $\sigma_{\text{固-液}}$  表面能較低，液體會在固體表面擴張。若接觸角為鈍角則  $\cos \theta$  為負值， $\sigma_{\text{固-液}}$  表面能較大，液體不易濕潤固體。水滴在蓮葉表面的接觸角很大，表示蓮葉的表面能較低，水滴在蓮葉上易成水珠，水珠不易濕潤蓮葉表面。蓮葉表面的化學組成為石蠟，蠟是飽和的碳氫化合物，其電偶矩極性較低，有較低的表面能，故水在一般石蠟上的接觸角約  $110^\circ$ ，有疏水性。然而蓮葉除了蠟的化學組成外，還有什麼原因使水在蓮葉上的接觸角高達  $160^\circ$  呢？在掃描式電子顯微鏡的觀察發現蓮葉表面有很多粗糙的小突出物且有疏水性纖毛結構，這些纖毛結構的尺寸約一百多奈米，請參考文獻[9]。液體與微觀粗糙的表面接觸，只有部份接觸到葉面，另一部份為氣體，因此液滴與粗糙孔隙間的空氣無粘著濕潤的現象，致接觸角變大使水在蓮葉上的接觸角高達  $160^\circ$ 。當污泥附著在蓮葉表面上，污泥比蓮葉表面的纖毛結構大很多，奈米纖毛減小了污泥與蓮葉的接觸面積和兩者間的吸附力(濕潤張力)，當水滴由葉面上滾過時，由於污泥與水滴間的接觸面積大，污泥與水滴有較強的吸附力就很容易被水沖走。因此蓮葉表面同時擁有奈米尺度的物理結構和有疏水性的化學組成，才具有出污泥而會自潔的功能。

我們小時候常聽到收購破銅爛鐵的環保尖兵叫嚷要買鴨毛與鵝毛，奇怪，為何他們只要活用鴨毛與鵝毛而不要雞毛呢？我們常看到鴨、鵝在水中戲水覓食，卻未曾見過雞做水上活動。原來鴨毛、鵝毛有防水保暖功能也是奈米現象，鴨與鵝有層層的鬆軟奈米小絨毛，水與這些小絨毛的接觸角很大，有疏水防水透氣保暖的功能。鯨魚和海豚的皮膚擁有奈米尺寸的孔洞，不但有自潔功能、防止有害微生物附著，還可減小游行時所產生的摩擦力。蛾的眼睛有奈米尺度的纖毛，可減少光的反射，飛行時不易被敵人發現等。自然界蘊藏有奈米科技概念的實例還很多，當然還有不少未被生命科學家揭露的。