

# 科技浪潮世紀前瞻 I

科技發現、創新正在以不可思議的速度與幅度改變人類對大自然乃至自身的了解與控制，改變全球社會、經濟整體面貌。單單就「科技文化」欄所報導過的90年代重大進展而言，我們隨手就可以舉出下列十多項：碳60籠狀分子和微碳管(nanotube)的發現；頂夸克的發現；費馬最後定理之證明；利用場離子、隧道效應以及光近場效應的顯微與原子操縱技術；現代智人晚近起源(出於非洲說)的證實；玻色—愛因斯坦凝聚體的製成；多種微生物基因譜的測定；克隆羊「多利」、克隆牛、克隆鼠的誕生；胚胎幹細胞系的建立……等等。這每一項進展幾乎都意味着一個嶄新領域、一群新科學家、一連串新工業、行業，乃至多種社會變革的湧現。而且，這許多不同方向的進展相互補足、支援、刺激、影響，所謂科技成果的指數式增長或者科技資訊的爆炸性膨脹，就是由此形成。

轉瞬之間，90年代過去，《二十一世紀》即將滿十周歲，而二十一世紀也真的降臨了。在今後幾期「科技訊息」欄中，我們將就各個不同領域的飛躍發展，作簡短綜合討論與前瞻。當然，認真地說，以我們極其微薄力量與簡短的篇幅，這樣的工作實際上是不可想像的。我們實際上所能做到的，自然仍將不過是東鱗西瓜的一些窺視和臆想而已。這一點，相信讀者會見諒。

## 太空科學：人類視野的解放

43年前第一顆人造衛星升空，和31年前人類登陸月球，其真正動力來自美、蘇兩大強國的軍事與政治競爭，其意想不到的後果則是將人類視野從地球擴展至太陽系，從地面擴展至太空。然而，登陸月球雖然是激動人心的千古壯舉，「廣寒宮」畢竟和新大陸不一樣：它不但冰冷，缺乏空氣、水分、生機，是名副其實的死寂世界，而且迢迢數十萬哩，即以美國之富裕強大，不旋踵也都再衰三竭，無以為繼了。那麼，除了展示國力之外，太空計劃的實質意義究竟何在呢？

當然，最直接而實際的答案是：衛星通訊，亦即以太空中的「制高點」來克服地面曲率，以達到通過用含有大量頻道的微波來作不受干擾的全球直線聯絡這一目標。其次，自然要推氣象衛星的監測和預報功能了。但氣象並非大地上唯一重要現象，亦非孤立自然現象。舉凡地表與海水溫度、大陸上的植被、火山、冰川、覆雪，以至洋流、大氣污染及透明度、日

照吸收與反射，以及整個生態環境變化等等，其實莫不息息相關，互為影響。因此，在通訊以外，地球整體的全面和長期監測，可以說是太空科學最順理成章、最重要的第二個功能。

美國太空總署自90年代開始實施的地球觀測系統(EOS)正就是實現這功能的一個龐大計劃。在這計劃下，迄今已有三個觀測衛星升空，其搜集所得資料(那是完全向公眾開放的)綜合而成的圖像，為人類提供了前所不能想像的一個多維度地球整體概觀(左面彩頁A)。計劃中第四個，也是最新、最精巧的監測衛星「地球號」(Terra)，也已經於1999年12月升空(彩頁B)。它是個龐然大物：高3.5米，長6.8米，重5.2公噸，耗能功率2.5千瓦，廣播傳訊能力達18.5Mb/秒。這樣，「地球號」和整個EOS計劃的實施，等於把地表現象整體帶到人類眼前，令我們可以直接觀測、分析、研究它，正如研究顯微鏡下的岩石或生物一樣<sup>①</sup>。

除了我們生息於斯的地球之外，登上太空自然也完全改變了天文學的面貌。哈勃太空望遠鏡和宇宙射線、X-光、紫外光和紅外線等一

系列太空探測站所研究的，是遙遠和抽象的天文現象。若暫且撇開它們不說，那麼最能激發人類好奇心與想像力的太空計劃，恐怕無過於太陽系各天體的探測了。在這方面加州理工學院所主持的噴射推進實驗室(Jet Propulsion Laboratory，即JPL)無疑是最重要的設計、執行和研究中心。他們所建造和操控的一系列「航行者號」(Voyager)、「維京號」(Viking)和「探路者號」(Pathfinder)無人太空探測船已經把我們的視野帶到各大行星附近，揭開金星的神秘面紗，送回土星光環的細緻照片，甚至降落火星表面，開始尋找地球以外的生命了。在最近，專注於木星探測的，則有以發現四顆木星衛星(所謂「木衛」)的意大利天文學家命名的「伽利略號」。我們已報導過它所拍攝的依達(Ida)小行星近距離照片以及它在木衛二「歐羅巴」(Europa)冰外殼之下發現的海洋<sup>②</sup>。在去年底，它又飛近木衛一「愛奧」(Io)，詳細記錄了它活躍的火山活動<sup>③</sup>(彩頁C, D, E)。這十餘年來JPL所作的大量遠距離儀器觀測，徹底改變了我們對太陽系形成過程的看法，以及對各個行星的了解，從而在「地球科學」之外，打開了「行星科學」的大門，其價值是無可估量的。

然而，即使是美國，多年來對龐大太空計劃的負擔也不免感到非常吃力。吃力的重要原因之一，是由於虛榮心作祟，始終不願意承認甚至面對俄國(前蘇聯)「敬禮號」(Salyut)固定載人太空站的巨大成就，堅決不願意汲取其經驗及成果，而執意要以高科技方式另行發展自己的太空站，從而虛耗了鉅額經費。為了填補這一無底洞，太空總署從90年初開始就向JPL大力施壓，要求他們達到「更快、更省、更好」的目標。這不合理的高效率要求終於造成了去年年底兩艘火星探測船的徹底失敗(圖1)，以及隨之而來的檢討、指摘、改革<sup>④</sup>。顯然，在其壯觀和革命性的成功之後，太空科學是面臨深刻危機了。但這其實只不過是由於策略錯誤造成，並無損於太空科學的能力和價值。它在新世紀中再次飛躍發展，是可以預期的。



圖1 1999年底赴木星探測失敗，不知所蹤的氣候軌道船(Climate Orbiter，左)和極地登陸者號(Polar Lander，右)。

Reprinted with permission from *Science* 288, 32.  
Copyright 2000 American Association for the Advancement of Science.

## 電腦：衝向消失點

如所周知，電腦是過去半個世紀科技革命的核心。五十年來，這一革命始終未曾停頓：它目前就正在以瘋狂速度進行，衝向誰也不知道位於何方的消失點！所謂「消失點」，就是運作速度與記憶容量的不斷提昇，以及運作周期與記憶單元面積之相應不斷減小，以致接近於消失(圖2)。從70年代大型集積電路技術出現以來，這衝向消失點的趨勢可以歸納成簡單的摩爾(Moore)定律：電腦容量每18個月即加倍。那也就是說：每15年增加1,024倍，而速度也相應提高。目前許多個人電腦都已經達到了「雙G」指標，即十億字節(Gigabyte)容量和十億赫爾(Gigahertz)速度，那就是這一定律的體現。

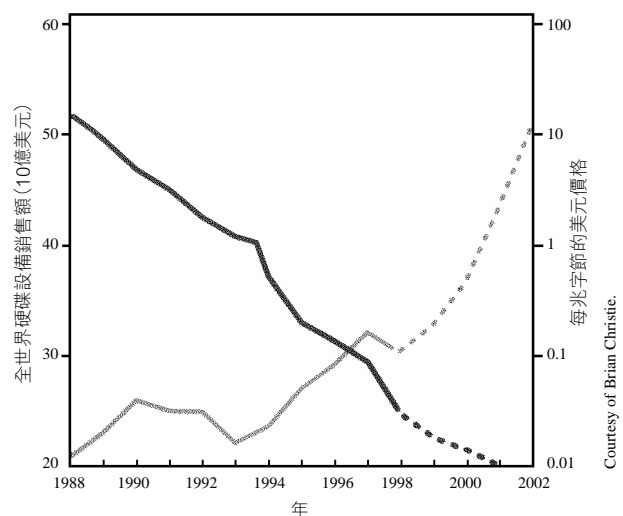


圖2 硬碟銷量之上升及價格之衝向零點正象徵其容量之不斷增加與結構單元之微觀化。注意縱軸為對數尺度。

Courtesy of Brian Christie.

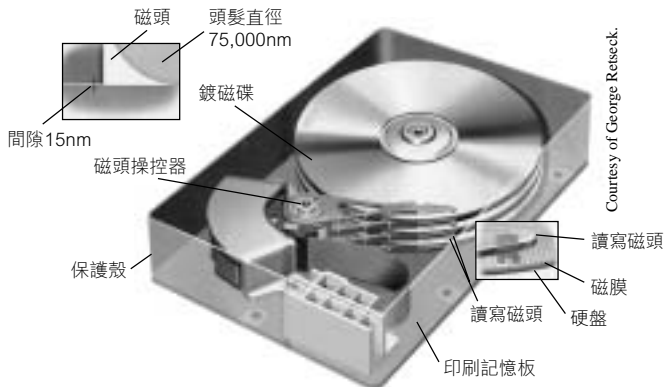


圖3 精巧的磁性記憶硬盤及其讀寫磁頭，磁頭與磁碟面的間隙只有15nm(小圖)。

電腦的不斷革命，是光蝕刻造像 (photo-lithography) 術以及磁性記憶硬盤 (圖3) 技術微型化的結果。這「微型化」基本上是靠各種工藝、技術的逐步改進，例如晶片上結構單元面積減小，那麼蝕刻所用光的聚焦必須越來越準確，因此波長必須不斷減低 (蝕刻準確度大約是光波波長之半)：從最初所用的可見光 (波長在400-700nm [微米] 之間) 變為現在所用的248nm紫外光，以及明年 (2001) 即將採用的193nm紫外光等<sup>⑤</sup>。又例如磁盤容量擴大，那麼儲存和讀取記憶內容的磁頭反應必須越來越快捷靈敏，因此所依賴的物理原理也必須改變：從最初的電磁感應，到90年代用的磁致電阻效應，再到最近出現的巨型磁致電阻效應，等等<sup>⑥</sup>。

這不斷微型化的結果是：電腦晶片上的結構單元目前已經縮小到140-200nm (磁盤上的記憶單元則為其五倍) 左右，亦即其每邊大約等於數百個原子排列起來的長度。那也就是說，這些結構單元已經逼近宏觀世界與微觀世界，經典力學與量子力量之間的界限。所以，摩爾定律是否能「維持」下去，它在今後甚麼時間會「失效」，是所謂「國際半導體技術路向」這每數年聚談一次的工業巨頭會議在認真揣測、考慮的事。其實，即在今後十年間，可以預見的主要問題已經有三項：首先，是磁盤記憶單元的態是否會受到其本身熱能干擾 (這名為超順磁效

應)；其次，是晶片上的集積電子元件過份密集，令大量接駁線路無法散熱，並由於相互感應而干擾訊號的傳遞；最後，則是蝕刻晶片的紫外光波波長不斷減低，相關的光阻材料與光學設備都必須全盤重新開發、設計。不過，這些問題雖然艱鉅，但在電腦工業巨大需求與利潤的推動之下，相信還是會順利解決的 (圖4)。

然而，在此之後，肯定會有更基本的問題出現。根據摩爾定律，15年後結構單元長度將縮減到目前的  $(2^{10})^{1/2}$  分之一或1/32，即4-6nm左右，因此每一單元內可能只有數百顆原子。在這情況下，結構單元的性質與運作無可避免必須脫離經典電磁學理論，而由全然不同的量子效應控制。否則，微電子與電腦革命即可能被迫結束，摩爾定律自然也會失效。因此，微電子工業科學家、工程師早已被迫從多方面着手研究、設計和開發克服這些困難的前緣技術了。例如，代替記憶磁盤的，也許將是以集積方式製造的微針矩陣：針尖位置用電壓效應控制，憑藉針尖與其下記憶介質之間的場電子效應或電熱效應，每枝針成為可獨立控制的寫讀工具 (圖5)。又例如，代替銅導線的，也許是光纖或超導碳微管；電流訊號可能由激光訊號乃至更精密的「自旋極化」(spin-polarised) 電流訊號所替代，令電子技術 (electronics) 變為「電旋技術」(spintronics) 也說不定<sup>⑦</sup>。

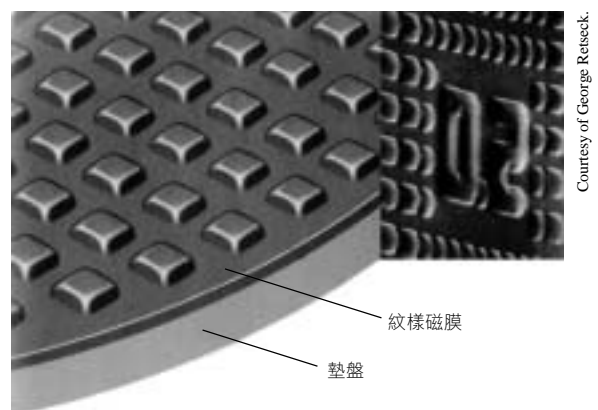


圖4 改進磁膜記憶單元的一種構想：在膜面製造記憶凸台，以減少彼此干擾。困難在於如何造出8微米大小的凸台。

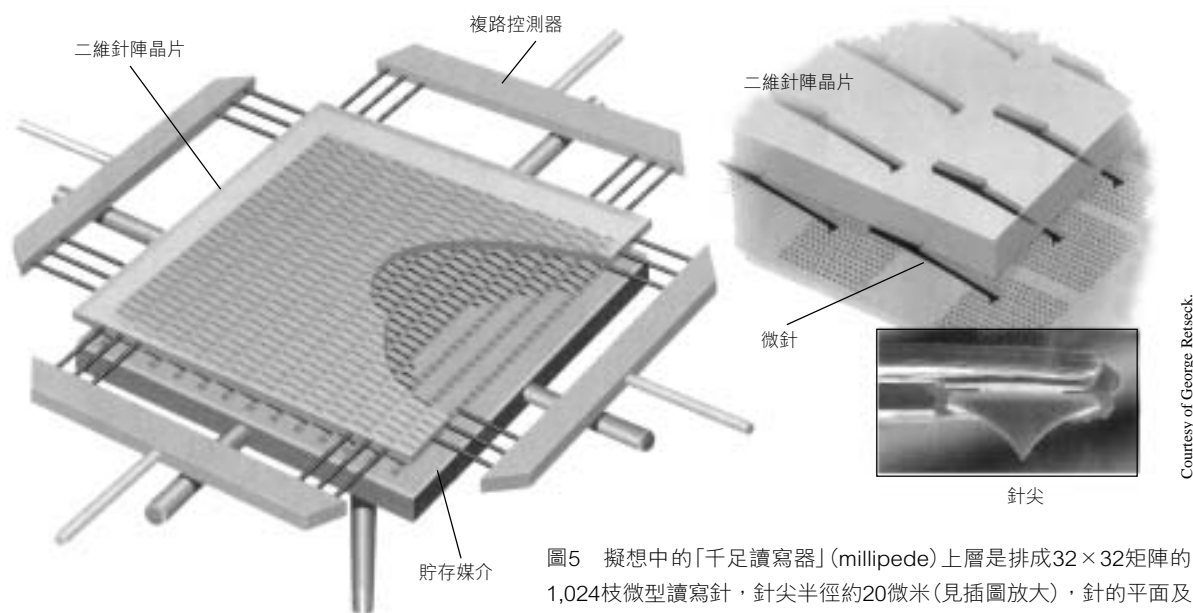


圖5 擬想中的「千足讀寫器」(millipede)上層是排成 $32 \times 32$ 矩陣的1,024枝微型讀寫針，針尖半徑約20微米(見插圖放大)，針的平面及垂直位置由電壓晶體個別控制，針尖在下層膠片壓出之凹坑即可作為二進記憶單位bit。

然而，電腦是個整體系統，它的眾多部件必須在速度、性能上緊密配合才能發揮最大功效，那也就是說，最好所有部件都是同質而非混雜的。所以，與其用電子儲存訊息和作運算，卻又要以光來傳訊，倒不如拋開電子，完全用光和能夠與光作用的宏觀介質。這就是根據全息造像 (holography) 原理而構想的光訊息儲藏和處理系統<sup>⑥</sup>。另一方面，亦有過種種「分子電腦」的構想，即完全用特殊分子通過特殊集積方法甚或「自動組合」方法，構成一部「量子計算機」<sup>⑦</sup>。這樣的計算機有兩個特點：第一，它的基本部件是難以再減縮的物質單位，即原子、分子；第二，它的運作徹底以量子力學，特別是所謂相干的 (coherent) 或者同時亦是聯結的 (entangled) 量子狀態為基礎。事實上，近年來已經有大量實驗論證這些構想的可行性，其中甚至包括以DNA分子為計算機的特殊構想<sup>⑧</sup>。

無論以光或分子為基礎的「量子電腦」，容量和速度都將遠遠超出今日的電腦，乃至我們的想像，甚或是理想「圖靈機」(Turing machine) 的限制。但這理想到底在甚麼時候能實現？是2050還是2100年？那卻誰也沒有把握——正如白壁治 (Charles Babbage) 在1833年初次構想第

一部「數位計算機」的時候，絕不可能想到它會在百多年後完全實現。但以目前爆炸性的科技發展速度來看，也許三、五十年後遺傳工程與微觀訊息工程合流，以人造超級DNA為基礎的微觀工廠可以自動組合量子計算機的主要部件也說不定——那絕不比60年前想像今日的「雙G」電腦更荒唐！但真正的量子電腦到底會對社會以及人本身產生怎樣的衝擊和變化，那可就是完全超乎想像之外的事了。

① M. D. King & D. D. Herring, *Scientific American* (April 2000), 72; *Nature* 404, 913 (27 April 2000).

② 本刊 25, 131 (1994.10)及56, 102 (1999.12)。

③ A. S. McEwen et al., *Science* 288, 1193 (19 May 2000); Rosaly Lopes-Gautier et al., *Science* 288, 1201 (19 May 2000).

④ 見 *Science* 288, 32 (1 April 2000)的報導。

⑤ 有關晶片微型化問題見D. Pescovitz, *Scientific American* (May 2000), 頁25的介紹。

⑥ 有關記憶系統特別是磁盤問題，見J. W. Toigo, *Scientific American* (May 2000), 41的長文討論。

⑦ *Nature* 404, 919 (27 April 2000).

⑧ M. A. Reed & J. M. Tour, *Scientific American* (June 2000), 69.

⑨ 例如 *Nature* 403, 269 (20 January), 869 (24 February) & 256 (16 March); *Science* 287, 463 (21 January) & 1152 (19 May).