

奈米材料的製程及其潛在的應用

文/李思毅、李佳穎、曾俊元

在著名的物理學家費曼(Richard P. Feynman)對未來的詮釋下“*There's plenty of room at the bottom.*”，我們所能明瞭與確切掌握的世界不斷的向前延伸。近年來，諸多領域隨著科學技術的進展而突飛猛進，藉著向下縮減(Top down)與向上組裝(Bottom up)兩個主要製作技術的相輔相成，導致諸如電子、材料、物理、化學、生物等領域的發展，急劇地邁入了奈米世紀，向更深遠的原子領域邊緣前進，幾個重大突破性的相關研究，更使得奈米技術在二十一世紀獨領風騷。現今的奈米技術跳脫了傳統的單調製程技術演進過程，邁入了要知道如何操控與講求精確的需求，這樣的進展，值得我們充分的了解。在本文中，我們將對於奈米製程技術的演進過程加以敘述，包括零維、一維、二維結構及材料，並介紹他們的特性及可能的應用。

一、前言

最初期的材料製作方式是一種從上而下的過程，亦即是一種由大至小的縮減過程，這樣的過程以半導體製程的演進為例最具代表性。最初的元件尺寸，在發明初期可以擁有公分級的尺度，接著迅速的縮減至數十微米的範圍，此後，隨著摩爾定律的預測，進行尺寸縮減而製程複雜度也隨之增加。直至現今，這樣的製作過程已經面臨了很大的瓶頸需要突破，在後摩爾定律時代，商業應用的元件尺寸在 65 奈米後遭致極大的製程挑戰。因此在二十世紀末期，基礎物理學家所提出的基本原子操控與性質控制的技術被重新地加以提出與研究[1]，如此造就了一個全新的世紀性領域，在邁過了千禧年之後，許多人即稱這樣的二十一世紀為奈米世紀。許多新的應用技術與製作方式如雨後春筍般的紛紛出現，使得奈米領域的應用範疇已經不單單只是為了半導體製程的需要而開發，在很多的生活應用領域，如醫藥、生物、化學與物理等等的應用普及化程度都快的讓人驚訝。在本文中我們以現今所具備的奈米技術為經，未來可能的應用範圍為緯，加以評述，希冀可以針對奈米材料的各項應用與製作的技術，給一個清楚而簡要的介紹。

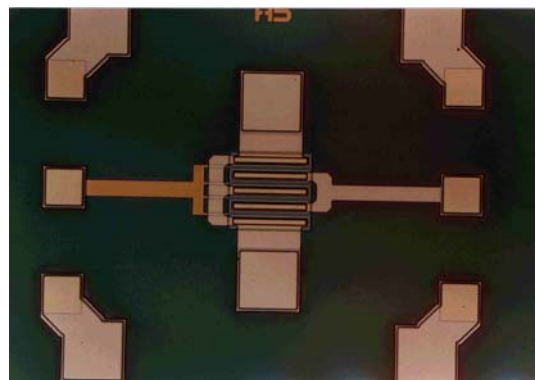
二、向下縮減製程的演進

整個半導體元件與積體電路的製程，可以說是傳統的向下縮減製程的最佳例證。當然製作過程早先遭遇到許多的困難，經過不斷的改良與製程的標準化作

業後，演變至今，在奈米世紀裡，仍然扮演著相當吃重的腳色。經過標準化的製程過程，可以概略的區分為三個較具代表性的時期，以製作的線寬來區分，分別是微米時代，次微米時代與奈米製程。

微米時代

在微米時代的製作技術，尺寸的限制與挑戰均較為容易，以半導體製程為例，並不需要繁複的黃光及光罩製作與濕式蝕刻技術就可以輕易達到所需要的目標(圖一)，這時期的製作技術瓶頸一直到了一至二微米附近才遭遇到困難，進而導入了多樣化的光罩製作技術與化學反應電漿乾式蝕刻製程。

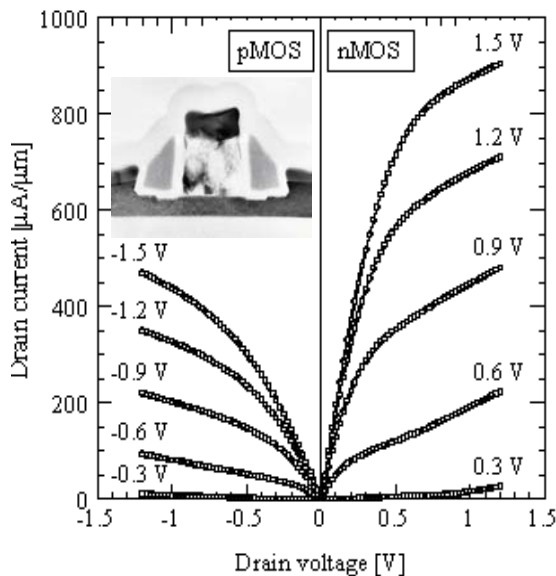


圖一 微米世代的大尺寸雙界面電晶體(BJT, Bipolar junction transistor)

次微米世代

次微米製程是一個微米製程的向前延伸，其所面

臨的技術密集層面較微米時代的製程為繁複，其中最大的演進就在於新一代的黃光技術與精確的各式蝕刻技術的導入(圖二)，在堆疊各式不同性質薄膜的技術上，也做了很大的突破與改進，各種化學氣相沉積的技術取代了傳統的物理沉積方式，此時八吋晶圓製程被推進至十二吋的先進製程，以更大的面積，更小的元件尺寸以及更高的良率來達到各式消費性電子產品的廣大需求。



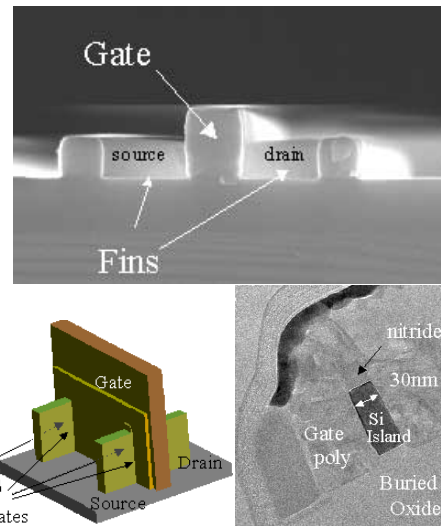
圖二 次微米時代的場效電晶體(MOSFET)截面圖與特性曲線

奈米世紀

根據摩爾定律的推算，元件製程的向下縮減程度與製程複雜度相當，現今的先進半導體製程將目標大約放在 65 奈米甚至 35 奈米左右，這樣的製程條件已經相當的嚴苛，不是一般傳統的向下縮減製程技術所能輕易達到的(圖三)，最後終將會採用何種製程做為標準化的依據還難已決定，但是已經有許多研究單位與工業界的領先者，投入大量的資金與人力，試圖為往後的半導體製程技術謀求新的突破。

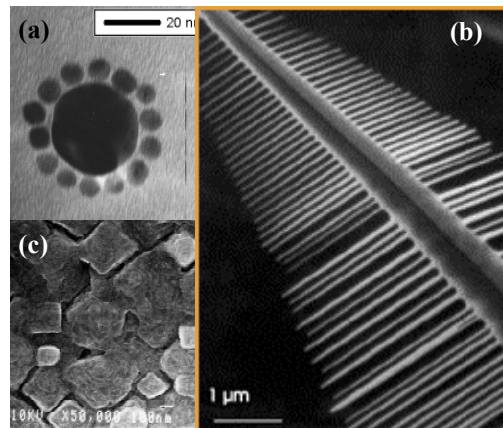
三、向上組裝與自我組裝

在向下縮減製作過程遭遇到瓶頸之後，以探討材料基本性質為主的幾個製作方式陸續被提出研究，根據材料的不同性質，精確的控制成長的方式與型態，來達到應用所需的電學、光學及物理特性。現今廣泛應用的技術可以依照所需的型態不同而加以區分，以下就針對不同維度的製作方式與應用來說明。



圖三 奈米世代的雙鰭狀場效電晶體(Fin-MOSFET)截面圖

現今的奈米尺度製作與應用技術，是以泛稱一百奈米以下的領域為主，而以維度上的奈米尺寸來區分，若一個維度的尺寸沒有被限制在奈米尺度時稱之為一維奈米結構，這樣的應用領域多為一些奈米尺度的奈米棒或是奈米線，以這樣的定義推之，產生了二維的奈米結構如奈米薄膜或積層膜，與零維的量子點或奈米粒子等奈米結構(圖四)。



圖四 奈米世代(a)零維，(b)一維，(c)二維之不同奈米結構。

零維奈米結構

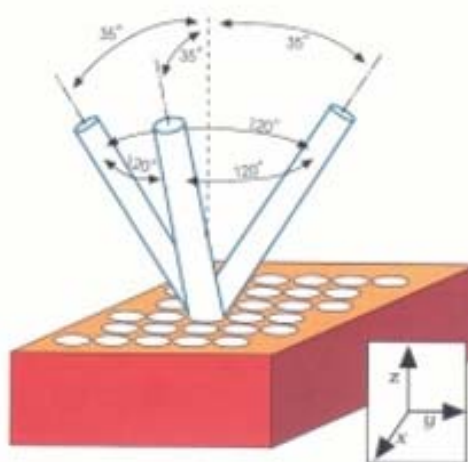
零維奈米結構是在空間中的三個方向均受到奈米尺度的限制所形成的一種奈米結構包括有奈米粒子和

量子點。

量子點(quantum dot)是一三維的奈米材料，由少量的原子所構成。粗略地說，量子點三個維度的尺寸都在 100 奈米(nm)以下，但是並非尺寸小到 100 奈米以下的材料就是量子點，而是由電子在材料內的費米波長來決定。因為在量子點內部電子在各方向上的運動都受到侷限，所以量子侷限效應(quantum confinement effect)特別顯著。由於量子侷限效應會導致類似原子的不連續電子能階結構，因此量子點又被稱為人造原子(artificial atom)。科學家已經發明許多不同的方法來製造量子點，並預期這種奈米材料在二十一世紀的奈米電子學(nanoelectronics)上有極大的應用潛力。量子點可視為電子物質波的共振腔，電子在量子點內會有類似電磁波在一般共振腔中的共振現象。當侷限位能壁(potential wall)較薄時，量子點中的電子可因穿隧效應(tunneling effect)而逃離，我們稱之為開放式量子點(open quantum dot)，其類似一開放式共振腔(open cavity)，此時電子能階不再是穩態(stationary state)而是一種準穩態(quasi-stationary state)；電子停留在準穩態約一個生命週期(lifetime)後，就會逃離量子點。這類量子點在光電方面也有許多應用潛力，例如：可用於藍光雷射、光感測元件、單電子電晶體(single electron transistor, SET)、記憶儲存、觸媒以及量子計算(quantum computing)等，在醫療上更利用各種發光波長不同的量子點製成螢光標籤，成為生物檢測用的「奈米條碼」。量子點是目前理論與實驗上的熱門研究題目，世界各國無不積極投入研究，主要領先的國家有美國、日本、歐盟及俄羅斯等，臺灣也正在急起直追中。

奈米粒子在電子，磁性和光電應用，能源，催化和結構應用，以及生物應用三方面，在文獻上都有廣泛的報導[2-4]，光子晶體就是其中之一，光子晶體早在半個世紀前就已經為人所研究，晶體(如半導體)中的電子由於受到晶格的週期性位勢(periodic potential)散射，部份波段因破壞性干涉而形成能隙(energy gap)，導致電子的色散關係(dispersion relation)呈帶狀分佈，此即電子能帶結構(electronic band structures)(圖五)。然而在西元 1987 年，Yablonovitch 及 John 指出類似的現象也存在於光子的系統之中：在介電係數呈週期性排列的三維介電材料中，電磁波經介電函數散射後，某波段的電磁波強度會因破壞性干涉而有指數衰減的情形，在系統內無法傳遞，這相

當於在頻譜上形成能隙，因此色散關係也具有一帶狀結構，稱之為光子能帶結構(photonic band structures)。具有光子能帶結構的介電物質，就稱為光子晶體(photonic crystals)。

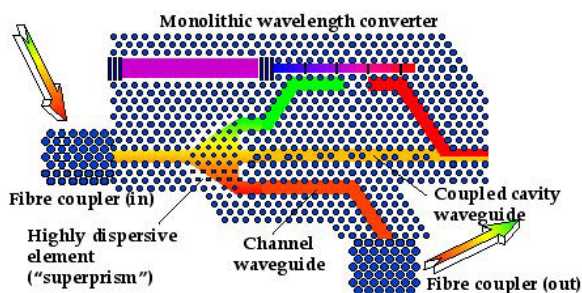


圖五 光子晶體的缺陷傳播波導示意圖

發展至今，光子晶體的研究，無論是理論上或實驗上都已有大量的成果出現：在三維方面，光子能隙已在許多晶格結構不同的系統如面心立方、體心立方(body-centered cubic)及其他準晶格(quasi-crystal)結構中觀察到；在二維方面，三角(triangular)、四角(square)、蜂巢(honey comb)及其他晶體結構也被證實具有光能隙的存在。雖然只有完美的光子晶體才可能擁有絕對能隙，但就應用的角色來看，不完美的光子晶體更具潛力，因為其具備有雜質態(impurity state)。實驗上發現，在二維或三維的光子晶體中加入或移去一些介電物質，便可以產生雜質或缺陷(defect)。這與半導體的情況類似，光子系統的雜質態也多半落在能隙內，這使原來被視為禁區的能隙出現了新的應用。能隙具有侷限電磁波的能力，而雜質使我們有導引電磁波的可能，這點在光電上極具應用價值。因此，在光子晶體相關領域內，目前雜質態是個重要的研究課題。對於一個雜質態而言，由於雜質四周都是光子晶體形成的禁區，電磁波在空間分佈上只能侷限在雜質附近，因此一個點狀缺陷(point defect)相當於一個微空腔(micro-cavity)。如果可以接連製造幾個點狀缺陷，形成線狀缺陷(line defect)，電磁波便可能沿著這些缺陷傳遞，就相當於一個波導(waveguide)，這對於未來的光電子傳輸應用上有重要

的價值(圖六)。

奈米釋放技術是奈米粒子在生物醫學方面的應用之一，需要更加精確的控制生物或人體的各種反應，我們在疾病控制或是遺傳科學上才能夠有所突破，奈米生物科技主要重點著重在原子和分子的層次與系統上的創造、操控生物及生物化學的材料，研發探索生物體及疾病的奈米感測器如生物晶片等和生醫材料的重新建構上，不但可作為醫學診斷、監測和治療，甚至可控制、改變細胞基因。奈米生醫科技的概念，是從物質的最基本單位—原子和分子層次的操控物質，組合出極其微小的新材料和新機器。



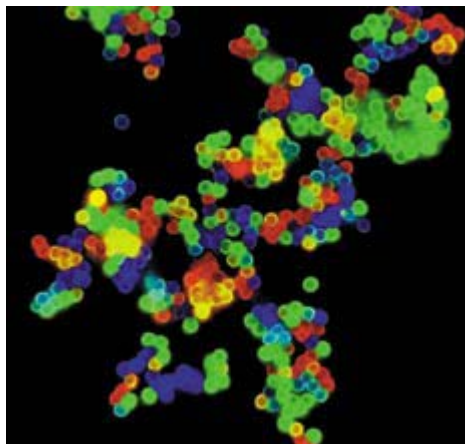
圖六 光子晶體的波導構成光子電路示意圖

而現今的奈米科技確實具有改變生物醫學研究工具的能力。譬如說，在發掘新藥的實驗中，提供新的標記方式；或是顯示細胞在不同情況下，有哪一批基因受到活化。更進一步，奈米尺度的器械還能在快速篩檢診斷及基因檢測中扮演重要的角色，從而顯示某人對不同疾病的敏感程度。在非侵入式的顯影技術上，研究人員也想利用奈米粒子作為加強對比的物質，以及當作投藥的載具。在一塊非常小（接近一個蛋白質分子）的無機半導體上雕刻出奈米晶體，或是稱作為一個量子點。一如磁性奈米顆粒，也對生物醫學的研究者可是有很大的用處。顧名思義，量子點或奈米粒的特性與量子力學的規則有關；相同的規則也將原子裡的電子限制在某些特定能階。利用量子點與奈米粒放出光線的波長與粒子大小的密切關係而來產生一整個系列的有色標籤(圖七)，就可作為醫學上的顯示指示劑之用。

一維奈米結構

若同時在兩個維度上受到限制，此種奈米材料的型態即為線形的型態，這樣結構的應用領域包括微型半導體元件製作，如單電子電晶體，場效電晶體等。

微型光電元件如光子晶體，以及奈米雷射元件的應用，在未來前瞻顯示元件可以藉助一些特殊材料的絕佳場發射特性，導入奈米線型結構來得到最佳的效果。



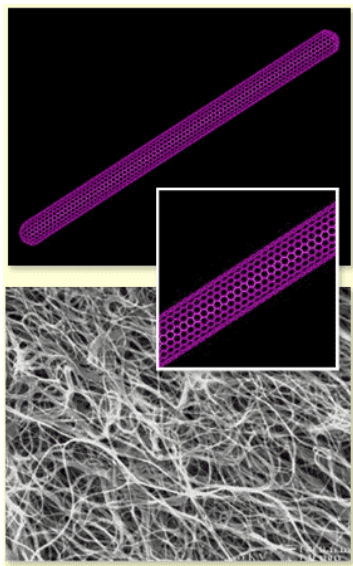
圖七 生物型奈米醫學應用的顯示指示劑

較為人所知的奈米線型材料，是在 1991 年飯島臣男博士所發現的奈米碳管(圖八)，此後奈米碳管的研究與應用也就是許多科學界的頂尖研究團隊紛紛投注很大心力研究的領域，奈米碳管不但具備有質輕與高強度的特點，經過適度的改變碳原子的順序，還可擁有導體或半導體的特性，這些特殊的材料特性，使得許多團隊認為奈米碳管可能是未來材料應用界的超級明星[5-6]。

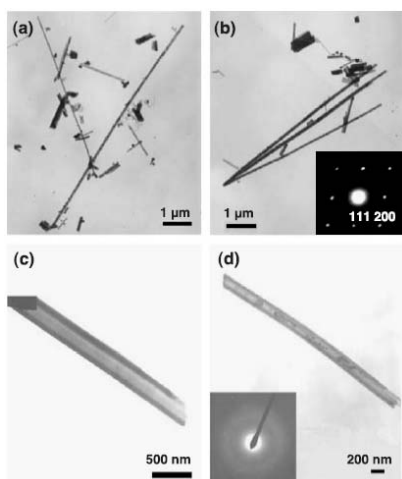
一維奈米結構的線型材料可以概略的分為純金屬與金屬氧化物兩大類別，純金屬型態的奈米線型材料如金(Au)、銀(Ag)、鉑(Pt)等，在未來可以進一步的開發成為積體電路的內連線之用，亦或可以藉助其沒有缺陷的自我組裝過程所產生的高強度特性，在微型機械領域有著極佳的發展潛力(圖九)。

在金屬氧化物的奈米線型結構之中，以幾個寬頻帶(wide band gap)的材料，如氧化銦(In_2O_3)、氧化鋅(ZnO)、氧化鈦(TiO_2)、氧化鎂(MgO)、氧化錫(SnO_2)等最具代表性，其中氧化銦及氧化鋅本身具備有二六族半導體的特性，在光學激發的應用範疇上，有著很廣泛的研究價值。以氧化鋅奈米線而言，其在光學激發的頻段屬於紫外光的範圍，在製作短波長的奈米雷射元件上將會有相當傑出的表現，而且以此種奈米線作為場發射顯示元件的研究也正在積極的進行(圖十)，利用氧化鋅所具備的寬能帶與激發特性，初步發

現經過適當的成長型態與結晶方向的調控，加上精確的載氣氣流控制，使得載氣氣流是一平順且一致的流動層，使用氣液固法(Vapor-Liquid-Solid process)可以製

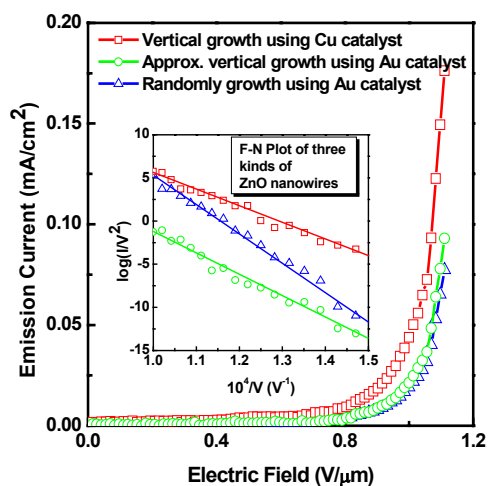


圖八 奈米碳管的結構與群集結構圖。



圖九 銀奈米線的結構與群集結構圖。

作出單晶且方向一致性的氧化鋅奈米線陣列，其場發射的驅動電壓與激發電流都明顯的較其他的二六族材料來的傑出，甚至有趨近於以奈米碳管製作的場發射元件的品質，這樣的研究結果相當的令人振奮與鼓舞。此外，對於氧化鋅奈米線的成長控制方面，由於不同氣體的黏滯係數會對成長環境造成一定程度的影響，較小的黏滯係數將擁有較薄的邊界層，導致氧化鋅奈米線成長的直徑下降，因直徑下降而使得其在光學與電學的激發行爲，更趨於量子化的結果，目前本研究

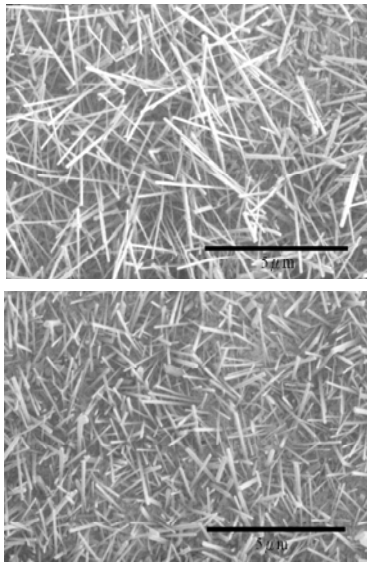


圖十 氧化鋅奈米線的場發射效應。

室所能成長的氧化鋅奈米線尚未達到可以產生量子效應的尺寸需求，但已可以藉由不同氣氛來調整所需要的線徑大小，範圍大約在 30 至 120 奈米之間(圖十一)[7-8]。

現今以氧化鋅奈米線的研製而言，如何增加氧化鋅奈米線的電導度，多層次摻雜的技術以增進其在電學特性上的應用，能源轉換的元件應用上的研究，配合不同的透光與反射的機制製作光電轉換的儲能元件等。以上幾個方向都是大家正在積極努力的目標，希望可以製作出品質良好的二維奈米結構，同時也尋求更爲有效而廣泛的應用。

除了氣液固法，其他發表的成長方式，有使用陽極氧化之氧化鋁模板(AAO template)爲支架基礎，填入一些金屬氧化物材料，再經過熱處理等手續來製成一些金屬氧化物奈米線，也是一種可以大量製作奈米線的方式之一，同時，這樣的方式可對奈米線材料作添加處理，以增進其導電度或是改變其半導體特性，對於製作出下一世代的奈米級電晶體或是單電子電晶體的元件應用上，相當的具有發展潛力(圖十二)。利用化學氣相沉積(MOCVD)的方式也是製作氧化鋅奈米線的技術之一，這樣的方法是採用一些有機金屬源爲起始原料，在載氣氣氛中進行化學的取代和置換的行爲，進而製作出氧化鋅奈米線，這方法可以精確的控制其所成長出的奈米線高度及大小，但是在氣相沉積的過程之中，存在有化學成分比例難以控制的缺點，目前在實驗室的研究階段，距離商業化的規模仍有一段距離需要進一步的改良與開發(圖十三)。

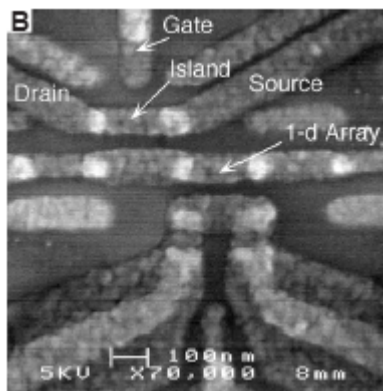


圖十一 氣氛控制下的不同線徑之氧化鋅奈米線

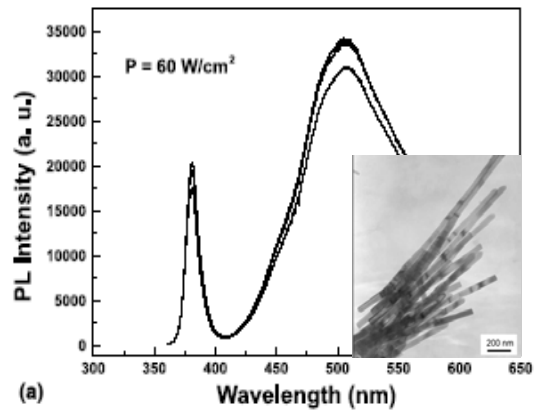
二維奈米結構

這一類型的奈米結構，屬於薄膜的型態，亦即在水平的方向(X 與 Y 軸)並未受到奈米尺度的限制，而在 Z 軸的方向上有著奈米尺度的表現，此等型態的奈米結構在積體電路的應用領域之中，被廣泛的大量使用在電容元件，超薄閘極氧化層，絕緣層方面，均有相當突破性的表現與發展[9-11]，另外，新型態的透光導電層或液晶配向層的應用在現今相當熱門的液晶顯示器產業中，在能源應用的領域上，也試圖使用這些性質突出的奈米級薄膜，得到高性能的效果(圖十四)。

以電容元件而言，要製作出介電係數高同時具備低電流密度的奈米級薄膜，是許多研究者持續努力改進之處[12]。



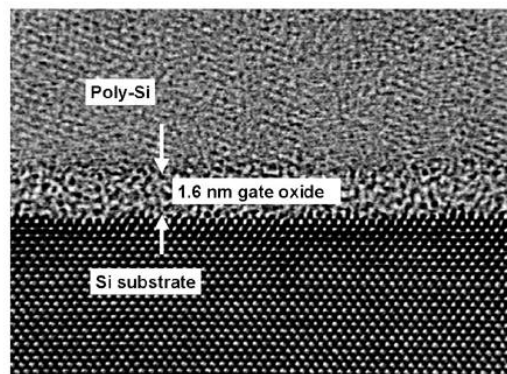
圖十二 單電子電晶體的穿透式電子顯微鏡圖像



圖十三 MOCVD 成長之氧化鋅奈米線光學性質與穿透式電子圖像

四、無限可能的奈米世紀

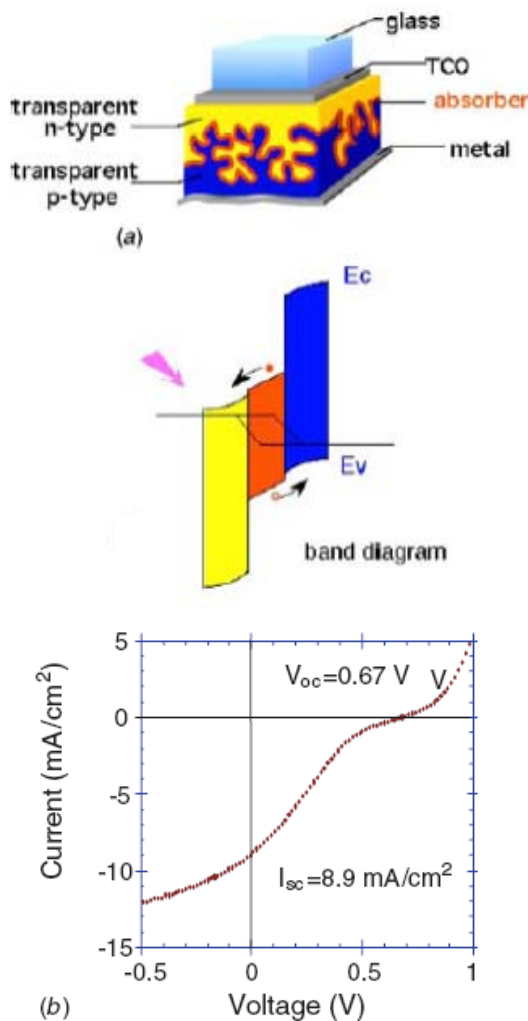
由於奈米科技對產品性能的改進和製造的發展，預期在新世紀會引起許多產業革命，現以發展迅速的奈米線型材料為例，說明其在未來光學與電學甚至半導體工業的可能應用。



圖十四 奈米世代的超薄奈米極積層膜截面圖。

以光學的應用來說，許多先前作為發光材料的二六族或是三五族半導體材料，如氧化鋅，硒化鋅，氮化砷等等，均是極為有潛力的奈米光學材料，以氧化鋅奈米棒為例，研究結果顯示其為一種優異的奈米雷射材料，其所被激發的波長頻段又位於短波長範圍的紫外光頻段，這對於發展短波長奈米雷射元件的應用相當合適，利用其線型特性，將激發光源耦合至這一奈米尺度的微型共振腔之中，透過完美單晶晶體的多次震盪，而激發產生出雷射效應，如能製作成紫外光頻段的奈米雷射，可供為光學元件的讀寫機或是記憶儲存的讀取元件之用，因其波長相當的短，因此可以

大幅的提升資訊位元所能儲存的容量與傳輸的數量。此外，氧化鋅奈米線在其他的光學應用還包括在太陽能儲能元件應用，是利用氧化鋅光吸收特性，設計出新型的太陽能儲能元件，再配合技術成熟的多晶硅太陽能電池製程，即可製作出轉換效率較高的奈米太陽能電池。再者，因氧化鋅材料本身具有的高透光性，可經添加其他元素而來改善其電阻率來製作出導電性良好透光性佳的透明導電內連線，在以面積與效能成正比的太陽能電池發電應用上，更具有潛在的價值(圖十五)。此外線型材料中的量子效應近幾年也不斷的被提出討論，藉著不同的侷限理論，我們可以探討有不



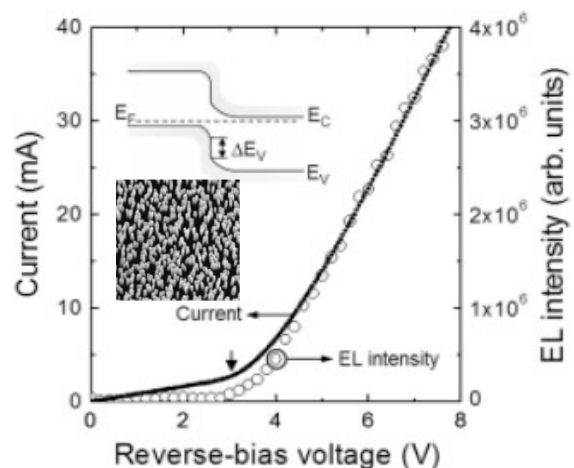
圖十五 (a)奈米太陽能電池的應用與(b)原理及特性分析圖

同的添加物在氧化鋅奈米線裡的量子化行爲，期能對其量子效應能有進一步的了解而開展出更好的應用。

以電學應用而言，可以分爲下列幾個方向，在基礎的電學性質探討上，透過材料本身的改質工程，試圖製作出一系列的不同半導體界面，例如金屬半導體界面，正負型(PN)界面，異質界面等，在線型的奈米材料上，在如此小的範圍內所形成的界面，其電子的行爲可能十分有趣而引起廣泛的討論，相關基本物理性質的建立，有助於將來奈米電子領域的延伸與擴張。

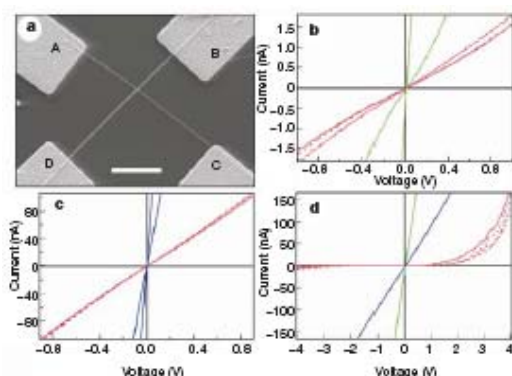
舉例來說，已有報導透過不同的添加物添加製程，氧化鋅奈米線可製作出具有周期性的量子井結構，並量測這類量子井諸多特性，目前積極進行的 PN 界面製作上，有待進一步的探討，根據報導已能在 P 型的超薄奈米薄膜上成功的成長 N 型的氧化鋅奈米線陣列(圖十六)，且得到初步的電學特性量測結果，這些研究最終的目的是希望可以尋求一個穩定且可靠度佳的添加物製程，在同一線型結構上能夠製作出同時具備 P 型與 N 型的奈米線[13-14]。

在奈米電子系統的研究上，近年來也是大家積極投入的目標之一，許多研究團隊試圖以幾個簡單的線型排列方式，組成幾何簡單的邏輯電路，且能進行簡單的運算與執行功能，這種電路預計在未來幾年內可望整合進入現今的半導體製程所製作的電子電路元件之中，目前在這一方面的研究已提出很多極具創新想法與實驗(圖十七)，預期可以利用這些方式迅速的縮小元件的尺寸，在未來以微型化爲主的製作領域有相當大的激勵作用，然而，如何將這樣的觀念與製作方式能夠大量複製，以因應在工業生產中一定會遭遇的良率與成本控制的課題，則是這樣的研究尚待克服的瓶頸，因爲唯有能夠實際大量製造與應用才能在未來的商業化過程中，佔有一席之地[15-16]。

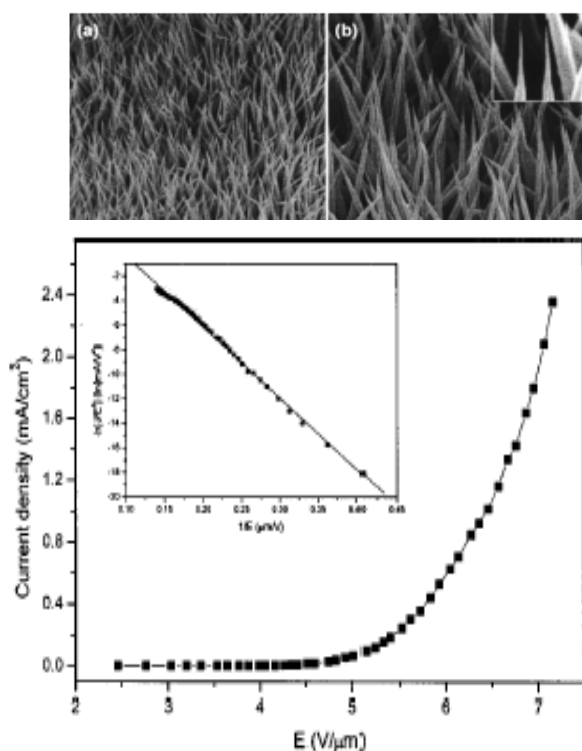


圖十六 添加 Ga 的氧化鋅奈米線電致發光與型態

另外，在大面積的奈米線陣列研究與應用領域方面，著重於未來的平面顯示器的面板應用範疇，利用氧化鋅奈米線的場發射特性與發光特性，將來極有可能應用在顯示器上(圖十八)。



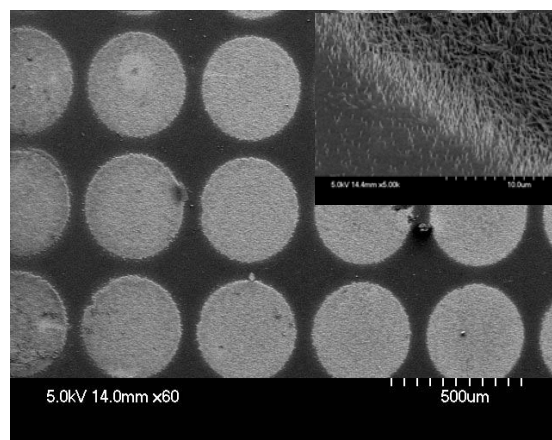
圖十七 磷化鋅奈米線構成的簡單邏輯電路



圖十八 針尖型態之奈米線的良好場發射特性分析

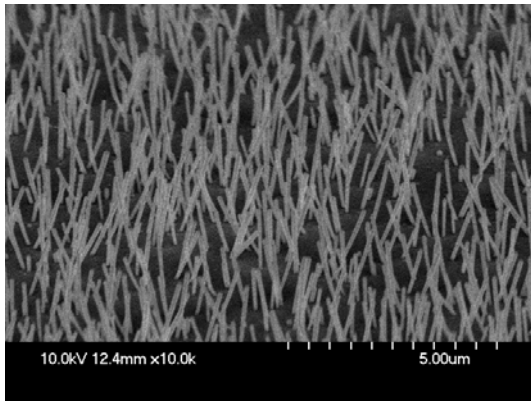
舉例來說，現今的製作技術，可以將氧化鋅奈米線的場發射激發電場下降至接近至與奈米碳管相同但能達到與奈米碳管相近的激發電流密度，這樣的技術可能應用到下一世代的平面顯示器技術之上，但仍需要許多其他方面的配合製程，有待掌握的技術包括精確定位的成長技術，幾何型態上的準確控制，物理特性與材料特性的掌握等，在精確定位的技術上，應會

引入半導體製程中成熟的黃光與光罩技術，利用先行定位的觸媒金屬奈米級顆粒或是晶核作為定位的依據，再將氧化鋅奈米線製作在所需的位置之上，如此可以將現今的氧化鋅奈米線製程導入元件應用的領域(圖十九)，再者，關於幾何型態的控制方面，也可以從幾個方面加以著手，一是在觸媒金屬的氣液固製程中設法引入較小的觸媒金屬顆粒，利用奈米級顆粒微型化來製作出線徑較小的奈米線，如此可以提高激發的電流密度，而能大幅的降低所需要的能量密度，進而達到省能及環保的需求(圖二十)，二是在傳統的觸媒金屬材料上加以改良，利用不同的金屬合金溫度的差異，造成氧化鋅奈米線成長的型態有所改變，期能從傳統常見的棒狀線型轉變而成為針狀線型，如此可以縮小在激發電流中所需要考量的有效激發面積，進而大幅的提高可能的激發電流密度或是激發光的能量密度(圖二十一)，三是改變製作過程中的基板種類，不同種類的基板將會對氧化鋅奈米線的成長狀況有影響，基板本身的結晶方向與表面平整程度都可以考量為調整的因素，可以利用先前已經開發相當完善的積層膜製程來配合，針對所需要的結構與型態來製作不同的氧化鋅奈米線陣列。

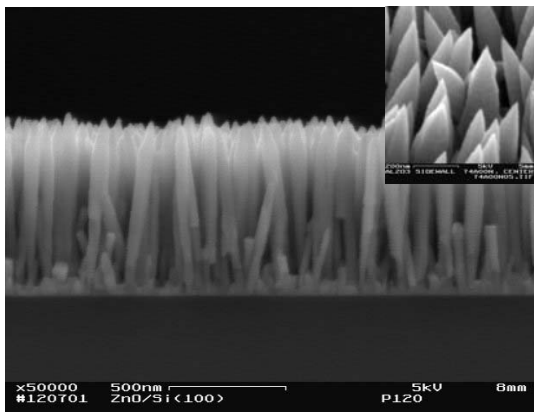


圖十九 氧化鋅奈米線的定位成長圖形

此外，另一個方向的思考與研究重點在於使用一些自我組裝或是外在控制的添加方式來增強氧化鋅奈米線的性能(圖二十二)，再用其製作半導體電子元件，而來提高其功效，或許可以利用二六族半導體在光電領域的優勢，在未來隨著操作頻段愈來愈高而導入光學領域時，透過許多有潛力的光電整合概念，集合相關的研究經驗與成果，應用於此領域來發展創造出下一世代的奈米電子世紀。



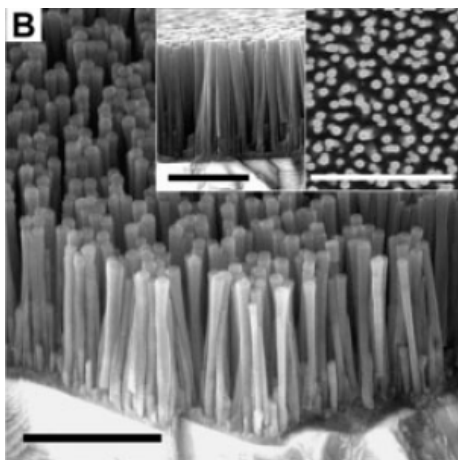
圖二十 氧化鋅奈米線的較大間距成長圖形



圖二十一 針尖狀氧化鋅奈米線的成長圖形

五、結論

以一維線型的奈米材料來說，在氧化鋅奈米棒在顯示器方面的應用，預計將利用氧化鋅奈米棒在紫外光頻段的短波長發光特性，朝著作為大面積平面顯示器或場發射元件的開發應用研究，此外，奈米等級的氧化鋅奈米棒雷射也在積極研發中，將使用在光子晶體之共振腔或短波長雷射檢測，同時，也有研究團隊

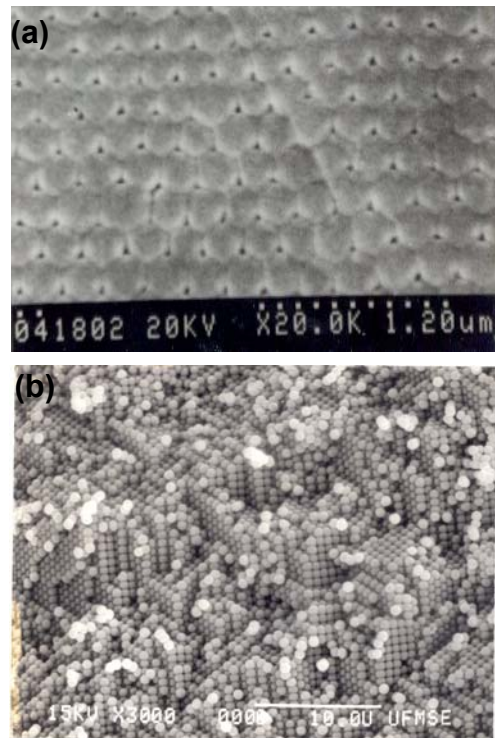


圖二十二 周期性的氧化鋅奈米線的成長圖形

希藉由電學特性參數的萃取與計算，尋找出氧化鋅奈米棒電致發光的根本機制，設計出電致發光特性優良的氧化鋅奈米棒，以供未來的奈米光電或奈米電學領域應用。

其他諸多形式的奈米材料與結構，也是值得深入研究的領域，在零維結構中的新型奈米顆粒製作與應用方向，諸如奈米顆粒的有序排列與特定位置的置放及分散技術，還有本身材料製作過程與新製程方法的開發，都是需要再進一步研究的重點，以奈米顆粒的排列與佈放為例，如果可以加以控制，不但可以經由位置的控制將光加以導入或成為一光學的波導[3-4]，同時也可以經由位置的控制，作為其他奈米結構製作的前趨過程(圖二十三)。

奈米級薄膜的技術開發極為重要，因為它在未來積極發展的積體電路製程扮演極關鍵的角色，面對奈米世紀的來臨，如何在不斷微型化的積體電路製程裡提供高效率與高性能同時高可靠度的超薄各型薄膜，是奈米結構與材料研究學者與團隊最迫切的工作之一，預期這樣的製作技術將被研發成功並正式加入積體電路的生產流程可把現今的積體電路製作技術拓展至奈米尺度的微型領域，朝著 35 奈米甚至更極限的線



圖二十三 (a)氧化矽的多孔奈米結構與(b)三維堆疊之奈米顆粒

寬挑戰，製作出性能更為傑出且尺寸更小的各式電子
電路元件。

綜合來說，採用奈米科技的技術將現今的矽積體
電路製程和三五族光電元件製程加以改進與創新，預
期在電學與光學應用的領域內都會有極大的突破與發
展。

六、致謝

感謝國科會、交大奈米中心、國家奈米元件實驗
室、中興大學奈米中心與工研院材料所複光組於研究
上的協助與建議。

七、參考資料

- [1] Mon-Shu Ho, I. S. Huang, and T. T. Tsong, *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 5792, (2000)
- [2] T. Y. Tseng and J. C. Lin, *IEEE Trans. on Magnetics*, **25**, 4405, (1989)
- [3] T. Y. Tseng and J. J. Yu, *J. Mater. Sci.*, **21**, 3615 (1986)
- [4] K. P. Jayadeven and T. Y. Tseng, *Encyclopedia of nanoscience & nanotechnology*, edited by H. S. Nalwa, Am. Sci. Publisher, Vol. 8, 333, (2004)
- [5] M. H. Huang, S. Mao, H. Feick, H. Yan, Y. Wu, H. Kind, E. Weber, R. Russo, P. Yang, *Science*, **292**, 1897 (2001).
- [6] Y. C. Kong, D. P. Yu, B. Zhang, W. Fang, and S. Q. Feng, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 407, (2001).
- [7] S. Y. Li, C. Y. Lee and T. Y. Tseng, *J. Cryst. Growth*, **247**, 357(2003)
- [8] S. Y. Li, P. Lin, C. Y. Lee, and T. Y. Tseng, *J. Appl. Phys.*, **95**, 3711, (2004)
- [9] 林群傑，曾俊元，材料會訊，第十卷 第四期，92 年十二月
- [10] T. Y. Tseng, *Ferroelectrics*, **232**, 881 (1999)
- [11] C. Y. Liu, H. T. Lue, and T. Y. Tseng, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 4416, (2002)
- [12] M. Nayak, S. Ezhilvalavan and T. Y. Tseng, Chap. 2 in *Handbook of Thin Film Materials*, Vol. 3, 99, edited by H. S. Nalwa Academic. Press, NY (2002)
- [13] T. Thurn-Albrecht, J. Schotter, G. A. Kastle, N.

Emley, T. Shibuachi, L. Krusin-Elbaum, K. Guarini, C. T. Black, M. T. Tuominen and T. P. Russell, *Science*, **290**, 2126 (2000).

- [14] Y. Kondo and K. Takayanagi, *Science*, **289**, 606 (2000).
- [15] Hou Tee Ng, Bin Chen, Jun Li, Jie Han, M. Meyappan, J. Wu, S. X. Li, and E. E. Haller, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 2023, (2003).
- [16] Y. Wu, R. Fan, and P. Yang, *Int. J. Nano.*, **1**, 1, (2002).

八、作者簡介

李思毅，為國立交通大學材料科學暨工程學系所博士班學生，其專長為奈米材料製作與應用及前瞻材料開發應用。

E-mail: tseng@cc.nctu.edu.tw

李佳穎，為國立交通大學電子工程學系所博士班學生，其專長為奈米材料製作與應用及前瞻材料開發應用。

曾俊元教授，為國立交通大學電子工程系所講座教授，美國普渡大學博士，主要研究領域為奈米材料與元件，電子構裝，電子陶瓷材料與元件。