

2000 年諾貝爾物理獎簡介

——半導體異質結構與積體電路

陳永芳

台大物理系

2000 年的諾貝爾物理獎，頒給俄羅斯艾爾菲物理技術學院(Ioffe Physico-Technical Institute)的阿法洛夫(Z. I. Alferov)、美國加州聖塔巴巴拉大學的克洛姆(H. Kroemer)、以及美國德州儀器公司的基爾比(J. S. Kilby)。他們三個人的得獎理由，是因為研究成果奠定了現代資訊科技的基石，尤其是有關於快速電晶體、雷射二極體和積體電路的發明。

人類的文明歷經石器時代、農業社會、工業社會，到現在已步入了資訊社會。現今的資訊科技進展快速，著實令人目不暇給，我們正面臨著另一次的文化變革。我們現在透過電腦能很快地接收或傳遞世界各地的信息，經由光纖網際網路能和全球各式各樣的社群交往；而藉著人造衛星，行動電話可以無孔不入的找到需要溝通的人。二十年前，我們很難想像資訊科技會將人類社會引導入如此的境地，而現在它正變化快速地向不可知的未來邁進。

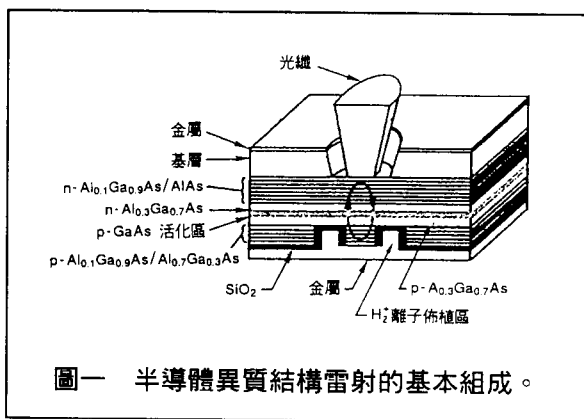
導致現代資訊科技發展的兩個主要條件，就是組成資訊系統的元件必需運作快速，且必需是輕、薄、短、小。這些電子元件因為運作快速，所以能在短時間內處理大量資訊；又因為體積很小，所以能隨身攜帶，為一般的家庭、辦公室所接受。

阿法洛夫和克拉姆利用半導體異質結構所發明的快速，光電元件是現代資訊科技的必備元件，

例如人造衛星與行動電話中的快速電晶體，在光纖中傳遞訊息的雷射二極體，以及雷射唱盤所使用的雷射。基爾比所發明的積體電路，將各種不同的電子元件聚集在同一晶片上，使得功能強大、複雜的電路系統能被微小化，促成了現今微電子工業的蓬勃發展。以下就簡單介紹半導體異質結構的基本特性與應用、積體電路的發展沿革，以及未來的展望。

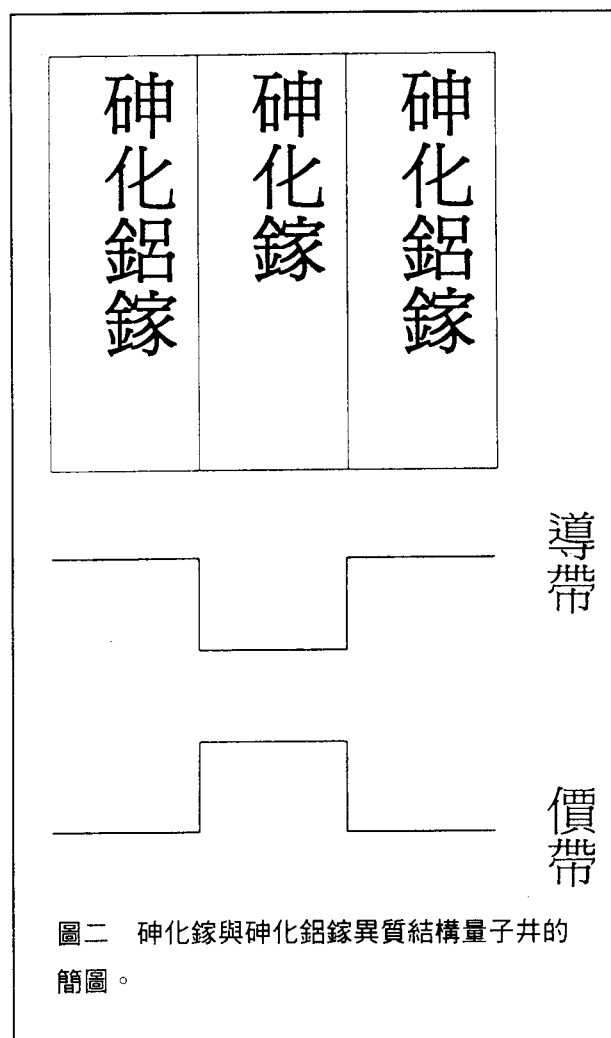
半導體異質結構的基本特性

所謂半導體異質結構，就是將不同材料的半導體薄膜，依先後次序沈積在同一基座上。例如圖一



之基本架構。為了說明半導體異質結構的基本特

性，就以最簡單的結構作為例子，如圖二所示。在圖二中，中間有一層砷化鎵，其被二邊的砷化鋁鉀夾住，因為砷化鎵的能隙較砷化鋁鉀小，所以就產

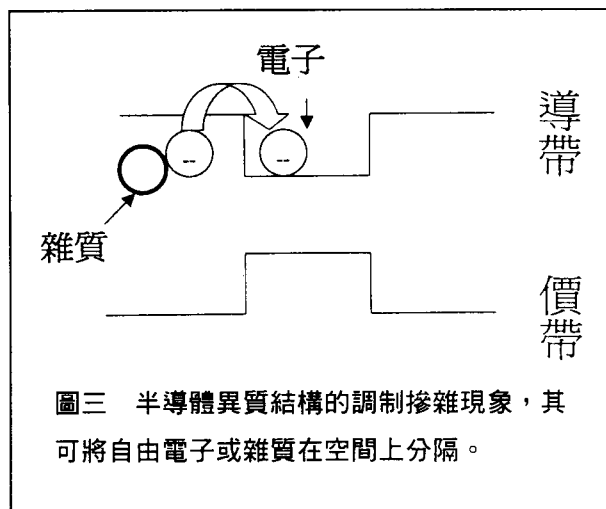


生了如圖二下半部的能帶排列結構，下面就簡單描述一些半導體異質結構的特性。

(1)量子效應：因中間層的能階較低，電子很容易掉下來被侷限在中間層，而中間層可以只有幾十埃（1 埃 = 10^{-10} 米）的厚度，因此在如此小的空間內，電子的特性會受到量子效應的影響而改變。例如：能階量子化、基態能量增加、能態密度改變等，其中能態密度與能階位置，

是決定電子特性很重要的因素。

(2)遷移率(Mobility)變大：半導體的自由電子主要是由於外加雜質的貢獻，因此在一般的半導體材料中，自由電子會受到雜質的碰撞而減低其行動能力。然而在異質結構中，可將雜質加在兩邊的夾層中，該雜質所貢獻的電子會掉到中間層，因其有較低的能量（如圖三所示）。因此



在空間上，電子與雜質是分開的，所以電子的行動就不會因雜質的碰撞而受到限制，因此其遷移率就可以大大增加，這是高速元件的基本要素。

(3)奇異的二度空間特性：因為電子被侷限在中間層內，其沿夾層的方向是不能自由運動的，因此該電子只剩下二個自由度的空間，半導體異質結構因而提供了一個非常好的物理系統可用於研究低維度的物理特性。低維度的電子特性相當不同於三維者，如電子束縛能的增加、電子與電洞複合率變大，量子霍爾效應，分數霍爾效應.....等。科學家利用低維度的特性，已經已作出各式各樣的元件，其中就包含有光纖通訊中的高速光電元件，而量子與分數霍爾效

應分別獲得諾貝爾物理獎。

(4)人造材料工程學：半導體異質結構之中間層或是兩旁的夾層，可因需要不同而改變。例如以砷化鎵來說，鎵可以被鋁或銦取代，而砷可以用磷、銻、或氮取代，所設計出來的材料特性因而變化多端，因此有人造材料工程學的名詞出現。最近科學家將錳原子取代鎵，而發現具有鐵磁性的現象，引起很大的重視，因為日後的半導體元件，有可能因此而利用電子自旋的特性。此外，在半導體異質結構中，如果鄰近兩層的原子間距不相同，原子的排列會被迫與下層相同，那麼原子間就會有應力存在，該應力會改變電子的能帶結構與行為。現在該應力的大小已可由長晶技術控制，因此科學家又多了一個可調變半導體材料的因素，產生更多新穎的元件，例如砷鎵異質結構高速電晶體。

從以上的描述，可以理解到半導體異質結構提供一個很好的方向，可以用來調變半導體的特性，不論是在學術上或是應用上都具有很大的潛力。然而該研究在早期確是受到很大的質疑，其主要原因在於要用什麼樣的方法，才能長出平整的薄膜，而且只具有一個原子大小的厚度。著名的物理學家諾貝爾獎得主宜沙基(Esaki)，早期有關此方面的論文曾被退稿(Physical Review Letters)，其中評審的意見是“理論太過簡單，而實驗上不可行”，至今他仍然忿忿不平。因此在此領域的研究先驅，必須有足夠的膽識與毅力才能有今日的成就。

半導體異質結構的應用

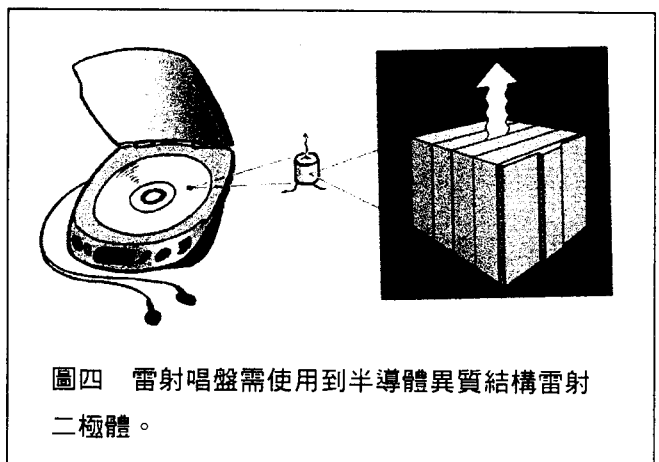
(1)發光元件(light emitting devices, LED)：

因為半導體異質結構能將電子與電洞侷限在

中間層內，電子與電洞的復合率因而增加，所以發光的效率較大；同時改變量子井的寬度亦可以控制發光的頻率，所以現今的半導體發光元件，大都是由異質結構所組成的。半導體異質結構發光元件，相較其他發光元件，具有高效率、省電、耐用等優點，因此廣泛應用於剎車燈、交通號誌燈、戶外展示燈……等。值得一提的是在1993年，日本的科學家研發出藍色光的半導體元件，使得光的三原色紅、綠、藍，皆可用半導體製作，因此各種顏色都可用半導體發光元件得到，難怪大家預測家庭用的燈泡、日光燈，即將被半導體發光元件所取代。

(2)雷射二極體：

半導體雷射二極體的基本構造，與上述的發光元件極為類似，只不過是雷射二極體必須考慮到受激發光(stimulated emission)與共振的條件。使用半導體異質結構，因電子與電洞很容易掉到中間層，因此載子數目反轉(population inversion)較易達成，這是具有受激發光的必要條件，而且電子與電洞因被侷限在中間層內，其結合率較大。此外，兩旁夾層的折射率與中間層不同，因而可以將光侷限在中間層，致使光不會流失，而增加雷射強度，是



圖四 雷射唱盤需使用到半導體異質結構雷射二極體。

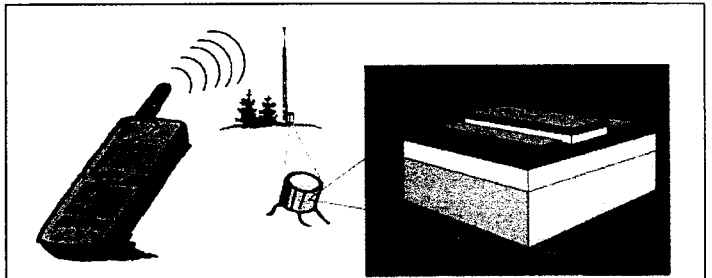
故利異質結構製作雷射，有很大的優點。第一個室溫且連續發射的半導體異質結構雷射，是在 1970 年由阿法洛夫領導的研究群所製作出來的，而克拉姆則在 1963 年發展了有關半導體異質結構雷射的原理。半導體雷射二極體的應用範圍亦相當廣泛，如雷射唱盤（如圖四所示），高速光纖通訊、雷射印表機、雷射筆……等。

(3) 異質結構雙極電晶體：(heterojunction bipolar transistor, HBT)

在半導體異質結構中，中間層有較低的能帶，因此電子很容易就由旁邊的夾層注入，是故在電晶體中由射極經過基極到集極的電流，就可以大為提高，電晶體的放大倍率也為之增加；同時基極的厚度可以減小，其摻雜濃度可以增加，因而反應速率變大，所以異質結構得以製作快速電晶體。利用半導體異質結構作成電晶體的建議與其特性分析，是由克接拉姆在 1957 提出的。半導體異質結構雙極電晶體因具有快速、高放大倍率的優點，因而廣泛應用於人造衛星通訊或是行動電話……等。

(4) 高速電子遷移率電晶體 (high electron mobility transistor, HEMT)

高速電子遷移率電晶體，就是利用半導體異質結構中雜質與電子在空間能被分隔的優點，因此電子得以有很高的遷移率。在此結構中，改變閘極 (gate) 的電壓，就可以控制由源極 (source) 到洩極 (drain) 的電流，而達到放大的目的。因該元件具有很高的響應頻率 (600GHz) 且低雜訊的優點，因此廣泛應用於無限與太空通訊（如圖五所示），以及天文觀測。



圖五 行動電話基地台的電波發射與接收需使用到半導體異質結構高速電子遷移率電晶體。

(5) 其他應用：

半導體異質結構除了用於上述元件外，亦大量使用於其他光電元件，如光偵測器、太陽電池、標準電阻或是光電調制器……等。又因為長晶技術的進展，單層原子厚度的薄膜已能控制，因此半導體異質結構提供了高品質的低維度系統，讓科學家能滿足探求低維度現象的要求。除了在二度空間觀測到量子與分數量子霍爾效應外，科學家已進一步在探求異質結構中的一維與零維的電子行為，預期將來還會陸續有新奇的現象被發掘，也會有更多新穎的異質結構元件出現。

積體電路的演進

積體電路因涉及將不同元件製作在同一晶片上，因此其成就較偏重於技術的突破，對於物理原理的貢獻較缺乏。然而其影響層面極為廣泛，從電腦、洗衣機、電視、汽車、手錶、醫療器材……等，含蓋了所有現代的電子科技，其重要性難以估計。

發明積體電路的人，除了今年諾貝爾物理獎主基爾比外，還必須歸功於諾宜斯 (Robert Noyce)。

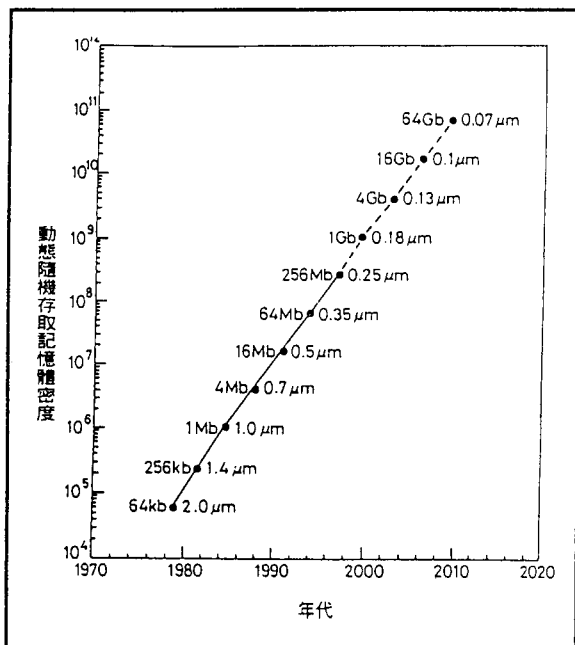
雖然基爾比在 1958 年首先製作出第一個積體電路元件，然而諾宜斯是第一得到積體電路專利的人，並且真正使用於大量製造積體電路的材料組合（矽、二氧化矽、鋁）也是諾宜斯發展出來的，他同時又是現今全世界最大的半導體公司英代爾 (Intel) 的共同創辦人，諾宜斯在 1990 年過逝。

爲了說明微小化的重要性與方便性，筆者先描述第一個電腦的特性 (ENIAC)。它是在 1946 年完成製造，含有 17468 個真空管，重達 6 萬磅，體積達 1 萬 6 千 2 百立方呎，耗電量爲 174 千瓦。它能在 30 秒完成彈道的計算，而使用計算尺需 40 小時。相較於現在的科技，如今一個掌上型計算器的運算能力，早已經超越它的幾仟倍了。ENIAC 在 1955 年就停止使用，原因是維持費用太過昂貴。

隨著積體電路的發明，電子科技的微小化速率非常快速，使得電子工業突飛猛進。然在這發展過程中，1947 年電晶體的發明，亦扮演相當重要的角色。相較於真空管，電晶體具有體積小、省電、耐用的優點，也因此電晶體的三個發明者在 1956 年共同得到了諾貝爾獎。任職於英代爾公司的摩爾 (Moore) 提出了一個經驗定律：每隔 18–24 個月，每單位面積的晶片所包含的電子元件數目會增加一倍。就以微處理器晶片來說，從 1971 年每個晶片含有 2300 個電晶數，1982 年的 134000 個，1993 年的 3100000 個，到 2000 年的 8000000 個，可說進展神速。

筆者再介紹另一個重要的積體電路晶片：半導體記憶體。從 1970 年的 1kb，1986 年的 1Mb，到 2000 年的 1Gb，在這三十年中，記憶體的容量增加了一百萬倍（如圖六所示），而記憶體中最重要的元件，金屬氧化物半導體場效應電晶體

(MOSFET)，其閘極的寬度也從 15 微米一路降到 0.18 微米。也因為功能如此強大的積體電路能被壓縮在很小的體積內，資訊的傳遞、運算、組織才得以快速準確，而資訊的運作工具，得以變得輕、薄、短、小，使之能攜帶方便，進而爲一般大眾接受，導致人類生活形態的改變。



圖六 摩爾定律描述動態記憶體密度隨年代增加的情形。

未來展望

鑑於人類對新知識的追求與渴望，資訊的產生、交換、傳遞將更爲頻繁、殷切；尤其是寬頻網路的發展正方興正艾，將來必會入侵到每個家庭，可以推測半導體異質結構高速光電元件之未來角色將日益吃重，其發展是可以預期的。而在 1993 年研發成功的高亮藍光半導體異質結構二極體，使

得利用半導體元件展示全彩光譜已能實現。此方面的研究正加速進行，可以預測未來的汽車剎車燈、交通號誌燈，乃至於家庭用的照明設備，將由半導體異質結構發光元件所取代。有關積體電路的發展，依照目前的進展速度，預測在 2014 年閘極的寬度將縮小到 0.035 微米，而動態記憶體密度將達一億 Mb，微處理路將包含 36 億個電晶體，亦即在未來的 15 年，半導體工業還會繼續蓬勃發展，然而會是如此快速而無止鏡的發展下去嗎？

摩爾第二定律說到：新一代的晶圓廠造價大約是上一代的兩倍。例如在 1995 年一座晶圓廠約需 10 億美金，這大約是全世界晶片市場金額的百分之一，到 2010 年一座晶圓廠約需 300 到 500 億美金，這大約佔了全球晶片市場金額的百分之十。依照這個比率發展下去，假如單一元件的尺寸縮小到毫微米大小，一座晶圓廠所需的造價已相當於全球晶片市場的總金額，如此一來將毫無利潤可圖。因此單就經濟方面的考量，現今製作積體電路的技術是有其極限的，如果再考慮到技術方面所需克服的障礙，也是困難重重，那麼到底未來的路要往那裏走？

藍道(Rolf Landauer)從熱力學的觀點出發，他估計將一個位元的資訊從一個元件傳遞到另一個元件所需要的最低能量為 $kT \ln 2$ (k 是波茲曼常數， T 是絕對溫度)。在室溫時，他預測每一瓦在一秒內可以有 10 的 20 次方個位元的運算，而費因曼(Richard Feynman)則估計可以有 10 的 18 次方面位元的運算。將兩個 10 位數相加需要 100 個位元的運算，因此純粹從能量的觀點考量，再一焦耳可以達到 10 的 16 次方個加法運算，這個速度是現在電腦的 10 億倍，然而問題是如何才能達到如此高

的運算速度？

假設現今的積體電路製程不可行的話，替代方案將會是什麼？利用化學合成法或是其他自我組織(self-organized)所獲得的微結構，可以只有幾十埃的大小，因而可以製成單電子電晶體，或是分子元件。但是利用這些方法所作成的元件含有太多缺陷，可靠度成了一個很大的問題，同時如此小的元件要如何連接呢？其他熱門的替代方案，例如利用量子邏輯所架構起來的量子計算(quantum computation)，或是光腦(optical computer)但是目前只在剛起步的階段，離實用還非常遙遠，是否可行還是未知數。看來很明顯的，人類還有很長的路要走呢！

參考資料

1. J. Birnbaum and R.S. Williams, Physics Today, January 2000, p.38.
2. Quantum Technology by Gerard Milburn, Allen and Unwin 1996.
3. Z. Alferov, Physica Scripta, Vol. T68, p.32, 1996.
4. J. S. Mayo, Scientific American, October 1986, p.50.
5. P. chaudhari, Scientific American, October 1986, p.14.
6. M. F. Wolff, IEEE Spectrum, Vol. 13, no.8, August 1976, p.45.
7. J. S. Kilby, IEEE Transaction on Electron Devices, Vol. ED-23, no.7, July 1976, p.648.
8. H. Kroemer, Physica Scripta, Vol. T68, p.10, 1996.
9. Advanced information on the Nobel Prize in Physics 2000, The Royal Swedish Academy of Sciences, <http://www.nobel.se/announcement/2000>.