



2010 年諾貝爾物理獎介紹 石墨烯 graphene 完美二維系統

林志遠 楊贊樺 簡世森

東海大學 物理系



圖 1：諾貝爾 2010 物理獎得主 Andre Geim (左) 和 Konstantin Novoselov (右)。[1]

2010 的諾貝爾物理獎頒給了兩位英國曼徹斯特大學的物理學家，Andre Geim 和 Konstantin Novoselov。他們獲獎的原因，除了成功地製造了「傳說中的」二維材料，也為實驗手法開創了一種全新的思維，奈米級的樣品竟然可以用再平凡不過的 3M 膠帶備製！他們不僅實現了理論中完美的二維系

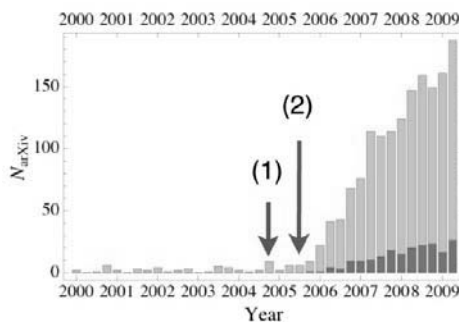


圖 2：近年石墨烯相關論文發表數目。[2]

統，也帶出這個系統中各種獨特又迷人的物性。他們第一篇相關的論文在 2004 年發表，到去年得獎，也僅短短七年的時間。而相關的論文數目，也在這七年之間呈現指數型的成長[圖 2.]，可見石墨烯在科學界受到重視的程度。

石墨烯是蜂窩狀的單層碳結構，如圖 3 所示。早在 1947 年，P. R. Wallace 編寫的固態物理教科書中，已經出現石墨烯的理論計算，但是單層原子的二維結構會因為熱擾動變得很不穩定，學界甚至懷疑它無法單獨穩定存在。不過仍有科學家嘗試製造它，只是成果都不如預期。直到 2004 年，Geim 團隊辦到了！他們使用 3M 膠帶，剝離出單獨且穩定的石墨烯，並放在有特定厚度氧化矽的基板上，利用光學干涉的方式辨識出單層的石墨烯。令學界感到驚訝的是，這個奈米級的產物，竟然在一點都不「奈米」的方法中誕生了。

圖 4. 為原子力顯微鏡所取得的石墨烯表面形貌圖。單層的石墨烯其原子層厚度約為 0.35 nm。但由於在大氣下水膜的影響，所測得的高度都略高於此值。利用機械剝削法的方式雖然可以得到乾淨純的石墨烯片，但是缺點為石墨烯的大小都約為 10~100 μm 左右。石墨烯的製造方式除了利用剝削法外

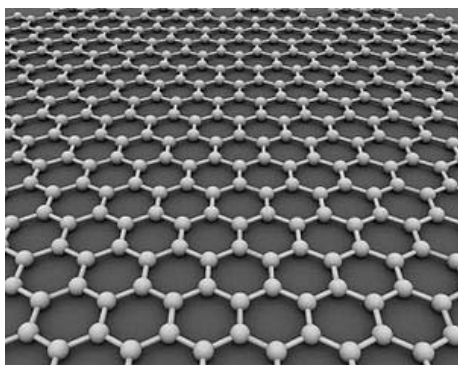


圖 3：石墨烯的原子排列示意圖。[3]

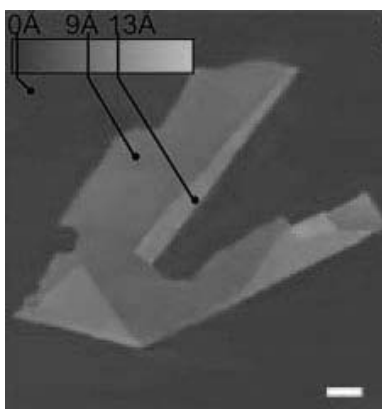


圖 4：利用 3M 膠帶機械剝削法製作的石墨烯片，其大小約為 10 μm 。[4]

，其它的可製造大面積的薄碳膜製方式陸續也被研究。例如將碳化矽 (SiC) 加熱到 1300°C 退火時，此時碳將稀出於基板表面形成一薄碳膜，或是利用化學氣相沉積法 (CVD)，將甲烷(CH₄)於氫氣氣份下於溫度約 1000°C 以上裂解沉積於銅或是鎳的表面。目前使用 CVD 方式已經可成長面板尺寸的大小的碳薄膜，提高了其未來應用性。

石墨烯的電子結構可以看成六對互相倒立的角錐如圖 5。在沒有任何摻雜的情況下，費米能階位在導帶與價帶間連接的點，在這個點上的電子有效質量等於零，速度是光速的 300 分之 1。1984 年，G. W. Semenoff 用 Dirac 方程式描述佔據這個態的電子，也

因此以這個點被稱為 Dirac 點。沒有質量的費米子在垂直入射電位障時，可以完全穿透 (Klein tunneling)。值得注意的是，在沒有載子傳輸的情況下，石墨烯仍有一個最小的導電率 $=e^2/h$ 。石墨烯的電阻值會隨著外加垂直電場的變化而改變，稱為 ambipolar field effect。例如圖 6，利用改變閘極電壓來調控外加垂直電場的大小，可以發現在某個閘極電壓值時石墨烯有一最大的電阻值，當改變閘極電壓大於此值時石墨烯為電子參雜，當小於此值時為電洞參雜。所以可用閘極電壓的來控制石墨烯為 N 型或是 P 型半導體，甚至可將它的能隙打開。而量子霍爾效應也可以在它完美的二維系統中展現，甚至可以在室溫中觀察到量子化的霍爾電阻與 SdH 震盪。

石墨烯其載子遷移率在理論上因受到聲學聲子的限制在載子密度 $n=10^{12}\text{cm}^{-2}$ 下其載子遷移率為 $\mu=200,000\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ 。其層數較多的石墨稀其塊材導電度約為 $0.96 \times 10^6 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 稍微大過於銅的導電度 $0.6 \times 10^6 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 。在熱導方面也具有良好熱傳導能力約為 $5000\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ，大約高過於在室溫下銅 ($401\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) 的 10 倍。石墨烯具有良好的透光特性，單層的石墨稀對於可見光波長的吸收大

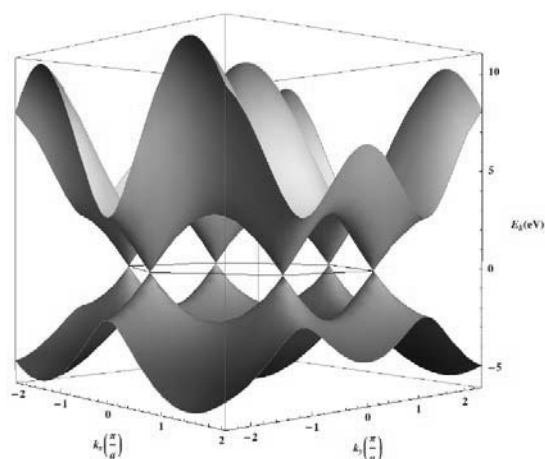


圖 5：石墨烯的電子能帶結構圖。[5]

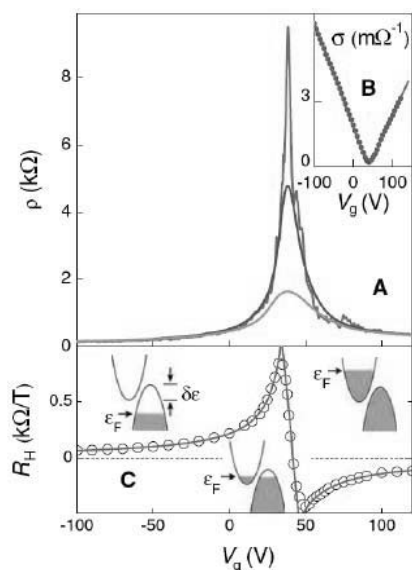


圖 6：A. 3 種不同溫度下量測的石墨烯隨閘極電壓變化的縱向電阻值(5 K 綠色、70 K 藍色、300 K 橘色)。B. 在 77 K 下的隨閘極電壓變化的導電度 C. 隨閘極電壓變化的霍爾電阻值。[6]

約只有 2.3%。

因石墨烯它是個薄膜、機械結構又強壯、光穿透度又高並且又是個可撓式導體。且導電度可透過化學參雜或是電場控制的方式來調控，並且其載子遷移率也相當大。在未來可取代現有的 Indium-Tin-Oxide (ITO) 等透明導電薄膜，可應用於太陽能，顯示器面板上。並且在應用於氣體偵測器上也有相當的潛力。是故石墨烯的發現除了帶來了在二維材料的物理特性研究上有更進一步的突破，並可作為未來光電等元件新的應用方向，所以其發現對人類的生活與科學有很大的貢獻。

參考文獻

1. A. H. C. Neto, *Materialstoday* **13**, 1 (2010).
2. http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/la

ureates/2010/.

3. <http://en.wikipedia.org/wiki/Graphene>.
4. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, *Science* **306**, 666 (2004).
5. K. S. Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, T. J. Booth, V. V. Khotkevich, S. V. Morozov, and A. K. Geim, *PNAS* **30**, 10451 (2005).
6. “Scientific Background on the Nobel Prize in physics 2010,” The Royal Swedish academy of sciences, 5 October (2010).