

[研究成果報導]

單原子層軟性電子：石墨烯高頻 IC

清華大學電子所 蕭文婷 邱鈺蛟 邱博文

一、半導體科技的演進

在 1947 年，美國貝爾實驗室的科學家 J. Bardeen、H. W. Brattain 及 W. Shockley 成功地利用鍺元素製作了第一個可將訊號放大的點接觸電晶體後[1]，半導體產業便悄悄地走入人類的歷史。緊接著 p-n 接面和雙載子電晶體的誕生更將人類文明帶進了現代的電子紀元。

由於軍事和民生對於電子元件的大量需求，半導體產業在 50 年代快速地發展。基於體積小、耗電量低、工作溫度低與反應速度快等因素，以鍺為原料的電晶體很快就取代了多數電子產品中的真空管。但因氧化鍺易溶於水，且鍺的表面包護較困難，容易產生漏電流，所以逐漸地被擁有良好氧化層品質和易於取得的矽元素給取代。矽經高溫氧化形成的二氧化矽表面保護層，兼具不溶於水、質硬和優良絕緣體等特性，因此很快的成為電晶體的主流。

對先進的積體電路而言，最為耳熟能詳的元件—MOSFET，由於可大量縮小其體積、耗電量低、穩定性高、容易大量製造，因此成為最為廣泛應用的電子元件。隨著元件製作技術不斷提升，人們嘗試將不同元件焊接在基板上組成電路，根據所需經過設計與改良，成為我們當今最常使用的積體電路。

隨著科技的進步，擁有更高效能且更低成本的元件是促使半導體產業不斷成長的主要因素，因此人們不斷微縮電晶體尺寸，期望能在同一晶圓放上更多元件，以展現出更多功能。Gordon Moore 在 1965 年提出摩爾定律，並預測每 18 個月晶片上的電晶體數量將成長一倍，這個影響半導體產業近 50 年的定律在近幾年由於電晶體通道尺寸逐漸逼近物理極限(2 nm)，微影技術亦面臨許多瓶頸，各種難以控制的物理現象諸如短通道效應、汲極引發能帶降低效應、熱載子效應

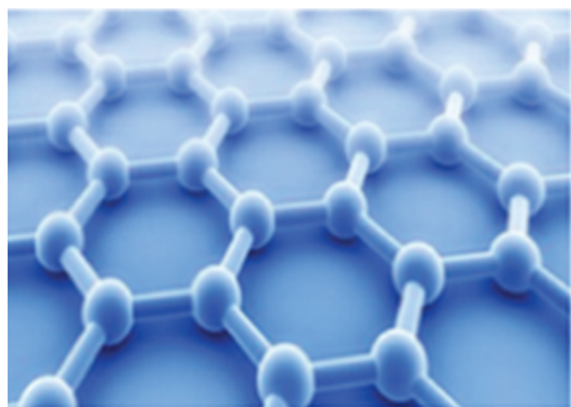
等問題，除了設計新的元件結構(Tri-gate、FinFET)，也讓半導體學家們積極尋找下一世代的半導體材料。

二、二維單原子層材料：石墨烯

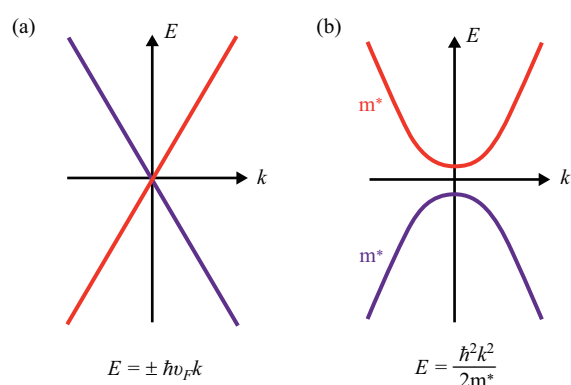
石墨烯(Graphene)的名稱源自於石墨(graphite)+烯類(ene)，是碳原子間以 sp^2 平面鍵結形成六角蜂窩狀的二維平面結構，僅具有一個碳原子層的厚度。將它往垂直方向上以週期性堆疊後便形成日常所見的石墨。因此石墨烯可視為三維石墨之單體，每一個原子皆暴露於表面。早在 1947 年，P. R. Wallace 編寫的固態物理教科書中，已經出現石墨烯的理論計算，但在發現石墨烯之前，大多數物理與材料學家認為，任何的二維結構僅能存在於絕對零度，單層二維結構的石墨烯會因受到熱擾動而不穩定。換句話說，在非零溫度下，晶體原子會因熱而在原本的晶格點產生振動而一度被認為是無法單獨穩定存在的，因此石墨烯被認為是假設性的結構。不過仍有科學家嘗試製造它，只是成果都不如預期。

2004 年，英國曼徹斯特大學物理學家 A. Geim 和 K. Novoselov，成功地從石墨塊材中撕出具有單一原子層厚度的石墨烯，並且證實它可以單獨穩定存在。ITRS 在 2008 年會議更表示在未來十年內，以「碳材料」為基礎的奈米電子，將會在半導體產業上佔有舉足輕重的地位。

在結構上，石墨烯每個碳原子在平面上擁有三個 sp^2 混成軌域，鄰近的碳原子各提供一個電子形成共價鍵 (σ 鍵)，鍵長為 1.42 Å，每個 σ 鍵間的夾角皆為 120° ，六個碳原子可用 σ 鍵圍成封閉六邊形環狀平面結構。每個碳原子在垂直方向具有 p 軌域的自由 π 電子，彼此耦合成 π 能帶。在費米面上方形成能量較高的反鍵結能帶及下方能量較低的鍵結能帶，分別構成導帶和價電帶，載子可在平面空間中自由移動。



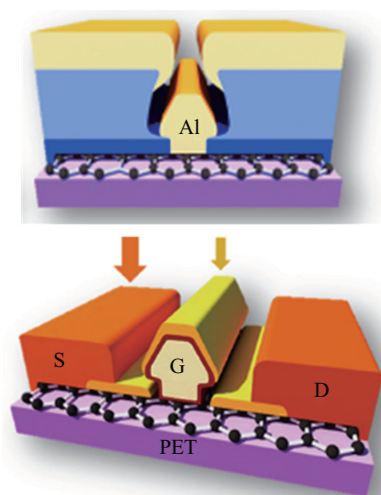
圖一 二維平面結構的石墨烯



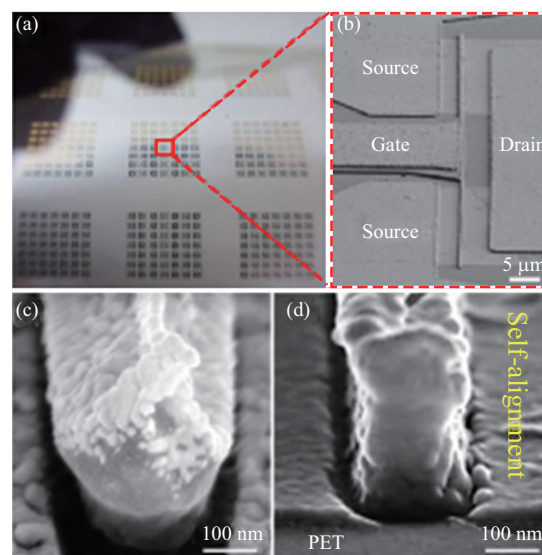
圖二 E-k 色散關係圖。(a)石墨烯：零質量狄拉克費米子。(b)傳統半導體：曲率倒數不為零，屬於具有質量之費米子

石墨烯的厚度僅有 0.334 nm (圖一)，是目前世界上最薄的材料，有許多優異的物理與材料特性，例如其電流承載能力大於一般金屬導體電流承載能力的 100 倍[2]、導熱效率約為銅的 10 倍[2]、機械強度為鋼的五倍[3]、極佳的透光率(對可見光穿透率達 97.7%) [4]以及可撓曲等多項優異且獨特的性質。

有別於傳統半導體材料，石墨烯具有極為特殊的線性電子能帶結構(圖二)，使得電子不具質量，因此擁有接近光速 1/300 的移動速度。在室溫下，石墨烯的載子遷移率，亦即載子(電子或電洞)在單位電場作用下的平均漂移速度在矽晶片上可達 $15,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ [5]，在低溫下懸空時甚至可高達 $200,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ [6]，超過在相同尺度之下矽的 10000 倍以上。超高載子遷移率的特性，加上其極佳的撓曲特性，使得石墨烯成為製作高頻軟性電子元件的極佳選項。



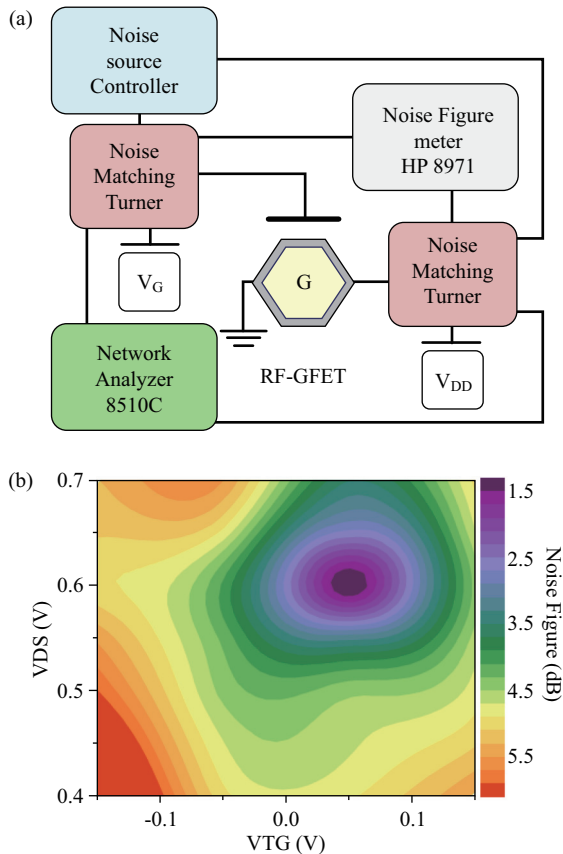
圖三 自我對準製程的示意圖



圖四 (a)在光學顯微鏡下的射頻電晶體在 4 寸軟性基板(PET)的陣列圖。(b)SEM 下的元件結構圖。(c,d)不同形狀的 T 型閘極結構圖

三、石墨烯軟性電子製備

在高頻的電子元件結構中除了通道材料要具備高載子遷移率之外，降低元件設計中的寄生電阻與寄生電容是讓元件頻率提高的重要關鍵。因此，我們在元件結構的設計上會以 T 型的閘極結構進行源/汲極間自我對準，以縮短源極和汲極間未被閘極調控的距離、降低寄生電阻與寄生電容，如圖三與圖四所示。如此製作在 PET 軟性基板上的射頻石墨烯場效電晶體之載子遷移率可高達 $3,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、截止頻率(f_T) 32 GHz、



圖五 石墨烯高頻元件在低雜訊放大器的應用。(a)低雜訊放大器的量測示意圖。(b) F_{min} vs. V_{TG} 、 V_{DS} 的雜訊指數等高線二維平面圖

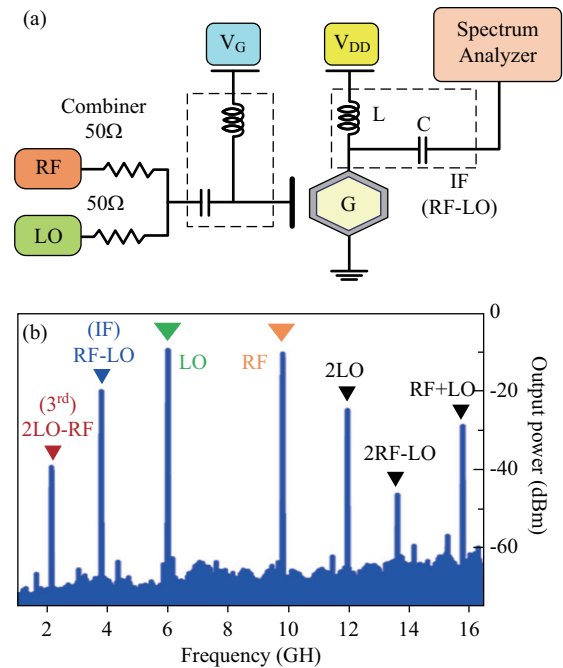
最大震盪頻率(f_{max}) 20 GHz。在外加應力產生應變達 2.5%的情況下，截止頻率仍然有 22 GHz、最大震盪頻率 13 GHz，遠超過其他目前已報導的軟性場效電晶體[7]。

四、石墨烯高頻 IC

低雜訊微波放大器(Low Noise Amplifier, LNA)

微波(Microwave)是指波長介於紅外線和特高頻(UHF)之間的射頻電磁波。因為有較寬的頻譜(300 MHz - 300 GHz)，且可穿過對流層和電離層，在無線通訊上佔有十分重要的地位。而石墨烯因為擁有超高的載子遷移率以及電流承載力，使得石墨烯適合應用在許多高頻通訊積體電路的製造上。

微波放大器主要用於通訊系統中將接收自天線的訊號放大，以便後級的電子設備處理。因為訊號在放大時不希望連同雜訊也跟著放大，所



圖六 石墨烯高頻元件在混頻器的應用。(a)混頻器的量測示意圖。(b)輸出訊號的頻率響應圖

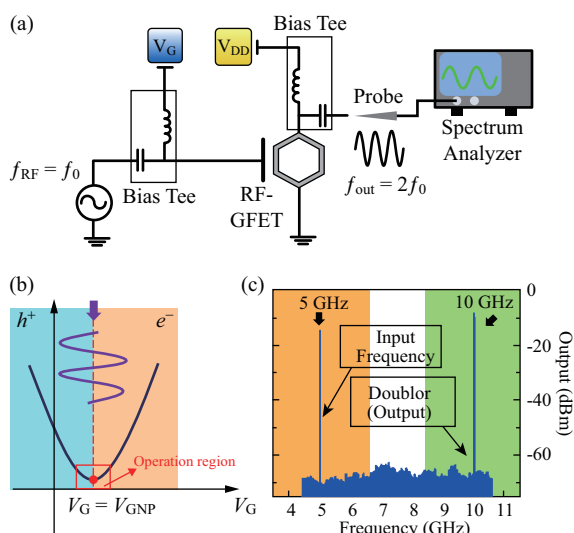
以訊雜比對放大器來說十分地重要。由於石墨烯的載子具有很長的平均自由路徑(mean free path)，呈現彈道傳輸的特性(ballistic transport)，因此，適合拿來製作低雜訊放大器(圖五)[8]。

混頻器(Frequency Mixer)

混頻器可轉換訊號的頻率，經常使用在解調(Demodulation)時的降頻或調變時的升頻(Modulation)。一般混頻器的原理是輸入兩個不同的訊號(f_{RF} 和 f_{LO})，利用二極體或電晶體的非線性特性使輸出響應產生二階甚至更高階項的和頻或差頻訊號，達到升頻或降頻的目的。在一般情況下，基頻常被拿來當作下一級電路的處理訊號，但是混頻器會產生許多諧波或不必要的乘積項，所以會搭配濾波器來得到所要的頻率成分。圖六為石墨烯高頻元件在混頻器上的應用[9]。

倍頻器(Frequency Doubler)

倍頻器常被用在無線電接收器上，可將訊號轉成較高的頻率發送出去。如圖七所示，因為石墨烯擁有特殊雙極性(Ambipolar)的傳導特性，將輸入訊號給在狄拉克點的位置上時，正半週期可



圖七 石墨烯高頻元件在倍頻器的應用。(a)倍頻器的量測示意圖。(b)訊號輸入至狄拉克點附近時由雙載子傳輸訊號示意圖。(c)輸出訊號的頻率響應圖

由電子傳導；負半週期可由電洞傳導，讓整段訊號皆能受到整流及倍頻的作用。另外，因為石墨烯倍頻器不太需要濾波器就可以將訊號倍頻輸出。頻率轉換效率較傳統需要濾波器倍頻的方式還來的高[10]。

五、結語

石墨烯擁有超高載子遷移率及高電流承載力等優勢，加上其單原子高度可撓的特性，讓它在軟性高頻元件的應用具有相當大的價值，未來可應用在穿戴式無線通訊的元件與積體電路中。

參考資料

- [1] J. Bardeen and W. H. Brattain, The transistor, a semi-conductor triode, *Phys. Rev.* 74, 230-231 (1948).
- [2] R. Murali, Y. X. Yang, K. Brenner, T. Beck and J. D. Meindl, "Breakdown current density of graphene nanoribbons," *Appl. Phys. Lett.* 94, 243114 (2009).
- [3] C. Lee, X. D. Wei, J. W. Kysar and J. Hone, "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene," *Science* 321, 385 (2008).
- [4] R. R. Nair, P. Black, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber, N. M. R. Peres and A. K. Geim, "Fine structure constant defines visual transparency of graphene," *Science* 320, 1308 (2008)
- [5] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiand, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva and A. A. Firsov, "Electric field effect in atomically thin carbon films," *Science* 306, 666 (2004).
- [6] K. I. Bolotin, K. J. Sikes, Z. Jiand, M. Klima, G. Fudenberg, J. Hone, P. Kim and H. L. Stormer, "Ultrahigh electron mobility in suspended graphene," *Solid State Commun.*, 146, 351 (2008).
- [7] C. H. Yeh, Y. W. Lain, Y. C. Chiu, C. H. Liao, D. R. Moyano, S. S. H. Hsu and P. W. Chiu, "Gigahertz Flexible Graphene Transistors for Microwave Integrated Circuits," *ACS Nao*, 8, 7663-7670 (2014).
- [8] Y. Q. Wu, K. A. Jenkins, A. Valdes-Garcia, D. B. Farmer, Y. Zhu, A. A. Bol, C. Dimitrakopoulos, W. J. Zhu, F. N. Xia, P. Avouris and Y. M. Lin, "State-of-the-art graphene high-frequency electronics," *Nano Lett.*, 12, 3062-3067 (2012).
- [9] H. Wang, A. Hsu, J. Wu, J. Kong and T. Palacios, "Graphene-based ambipolar RF mixers," *IEEE Electron Device Lett.*, 31, 906-908 (2010).
- [10] H. Wang, D. Nezich, J. Kong and T. Palacios, "Graphene frequency multipliers," *IEEE Electron Device Lett.*, 30, 547-549 (2009).
- [11] C. H. Yeh, Y. W. Lain, Y. C. Chiu, C. H. Liao, D. R. Moyano, S. S. H. Hsu and P. W. Chiu, "Gigahertz Flexible Graphene Transistors for Microwave Integrated Circuits," *ACS Nao*, 8, 7663-7670 (2014).