



軍事教育

從2010年諾貝爾物理獎出發-了解世紀碳材石墨烯及其獲得方法

博士 吳添財

壹、前言

過去有人曾夢想搭建一座「天梯」直達月球，依據當時技術的材料強度無法達到此要求，這想法是異想天開的妄想，當時沒有人會想到鉛筆中，有著地球上強度最高的物質-石墨烯，這是因為石墨的層狀結構，可以在奈米科技的今天，將石墨剝離成原子級層數的石墨烯，展現於世人面前。其發展史是在21世紀之後，不同類型的奈米碳材的一一的出現，使得英國「曼徹斯特大學」兩名科學家Novoselov和Geim^[1]於2004年發現石墨烯，此二維(2D)的碳原子晶體，強度比世界上最好的鋼鐵還要高上100倍。這種物質不僅可以用來開發製造出紙片般薄的超輕型飛機材料，製造出超堅韌的防彈衣，甚至還可實現「太空天梯」的宇宙旅遊的夢想。一直以來，大家都知道石墨是層狀的結構，卻無人可以獲得此超強的材料，直到Novoselov和Geim的研究榮獲2010年諾貝爾物理獎，石墨烯成為本世紀的新穎材料，其中鉛筆即是石墨製成，它是由無數的碳原子薄片壓疊形成的，也因如此，Banerjee和Greber利用CMP (Chemical Mechanical Polishing) 技術獲得石墨烯^[2]，也證實了石墨烯材料可從石墨中剝離出單層碳原子面材料，正是如此，透過本文讓我們來了解世紀碳材石墨烯。

貳、漫談石墨烯

一般使用的碳材的種類有石墨(graphite)，金鋼石(Diamond)及碳黑。而奈米碳材有球碳(Fullerene)，奈米碳管(Carbon tube)及石墨烯(graphene)。依上述的順序正是碳材的發展順序，由於人類的科技發展歷程，起初因碳材在Z軸方向可導電，且垂直於Z軸方向的石墨層又極易離，極適合用在諸如電刷及鉛筆此類的應用，



也因其極簡單就可獲得，所以和我們的生活有密切關係。近代的第一次工業革命，機械工業的蓬勃發展，如此，使得「鑽石」由原來的裝飾用的富貴飾品，成為切削的金鋼石，也因為如此，人造的鑽石也成為工業發展的要角。其實大自然的物質，從宇宙形成時，應該已經都存在地球了，然而找到它的存在是人類的科技發展技術是否可以發現它，進而應用它。其中應用奈米技術成長出碳球、奈米碳管和石墨烯，就是拜近代科技已可以觀察到奈米結構而獲得大突破，如前述的研究成果，由奈米碳材所建構的「太空天梯」的實現應該指日可待。

參、石墨烯的濫觴與其獲得方法

自從2004年首篇以石墨烯做為場效電晶體(FET)的通道結構的材料^[1]，證實其優越性能，使半導體材料的應用的目光由矽轉移至二維的碳膜-石墨烯，本文將詳細介紹各種備製方法，深入了解石墨烯備製的現況。在石墨烯被發現之後，於2009年IBM公司研發了第一顆以石墨烯製成的FET，其運作頻率可達26 GHz^[3]，證實其未來的潛力。近幾年來，石墨烯的研究論文的發表如雨後春筍般，不斷在科學期中出現，諸如：最新的應用是利用石墨烯奈米的結構擔載著抗癌藥物，精確且有效

地將癌細胞消滅^[4]；還有利用石墨烯近一奈米的原子距離的鍵結空隙做為篩孔(mesh)，形成石墨烯濾膜，成功地將海水淡化為淡水^[5]；再者，有科學家利用石墨烯的表面積(Specific surface area)製作成海綿，加上碳膜對油污具超強地吸附力，順利地在油污污染的去處扮演有效的角色^[6]。

石墨烯有極佳的電性，電子在其中的移動速度極快，經量測室溫下電子遷移率(Electron mobility)可達 $15,000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ^[1]，是目前科技發展中所發現電阻率最小的材料，單層的石墨烯，其透光率可達到97.4%^[7]，幾乎是完全透明的；此外，其導熱係數、楊氏模數、強度，以及柔韌性都有極優秀的表現。

如Fig. 1所示是石墨烯的原子結構圖示意圖，其特殊的六角蜂巢狀(Honeycomb hexagonal lattice)的中孔結構，造就出其傑出的特性，垂直於石墨烯混層結構

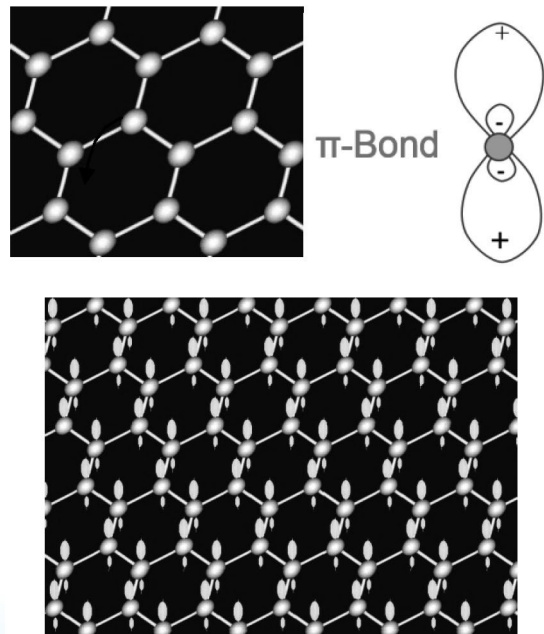
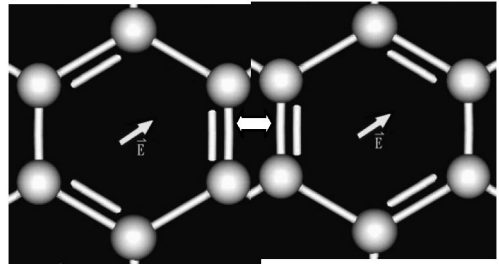


Fig. 1 石墨烯的結構圖及 π -bond 的位置

(sp²-hybrid)在其表面上的 π -bond，就是發揮出石墨烯特有性質的主角。如Fig. 2顯示，石墨烯的碳鍵結上 π -bond的電子，因外加電場提供能量下，能在垂直於石墨烯表面的 π -bond上快速移動。



此外，我們亦可利用其極高的比表面積，應用在電能儲存或新能源開發的領域中，諸如：超級電容器或鋰離子電池的研發。有鑑於此，到目前為止，科學家們無不卯足了勁著磨在石墨烯的備製方法，茲介紹以下七種方法如下：

Fig. 2在外加的電場E之下 π -bond會產生振盪

肆、石墨烯的物理特性

一、石墨烯的結構

石墨烯的碳原子排列是和石墨的單原子層相同，而其碳原子是以sp²混成軌域排列構成，是一個六角形的蜂窩型(Honeycomb structure)結構，偶爾能看到五角形或是七角型，那些則是石墨烯的標準缺陷。同理，其單層石墨烯的厚度就是一個原子的厚度(大約是0.335 nm)，而碳碳鍵僅有1.42Å，由於二維(Two-dimension)材料在熱力學觀點是極其不穩定的，可以視作它存在於一個低熵(entropy)的狀態下，很容易再自行堆疊回三維材料。

二、石墨烯的性質

1. 電子遷移率^[4](electron mobility)

從2014年以前二維材料是不存在的，可是在石墨烯出現後，經過許多專家的理論推導與及將其成功備製出來，經驗證發現石墨烯在室溫下，具有超高的電子遷移率(electron mobility)，其值逼近 $1.5 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ^[1]，早在石墨烯發現之前，無機半導體InSb是當時最高電子遷移率($7.7 \times 10^4 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)^[9]的材料，石墨烯優越的電子遷移率幾乎是InSb的十倍以上，當然，石墨烯亦高於擁有電子遷移率 $1 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ 的奈米碳管^[10]。此外石墨烯是單載子材料，其電子或電洞的遷移率是相當，當製程需使用到摻雜時對電子遷移率的影響很小，對於沒摻雜的石墨烯是很特別的零能隙(zero band gap)半導體，原因是它的導帶與價帶接觸在第一布里元區(Brillouin zone)的一點上，尤其其電子遷移率對溫度影響無關，所以在電子材料的應用中，轉換成P型或是N型半導體可以非常靈活應用。



2. 片電阻

石墨烯的片電阻值約為 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ^{[8] [11] [12]}，此片電阻值相較於目前市售的導電材料銅與銀的片電阻值都要小上許多，而這因為石墨烯擁有如此優良的電性，在積體電路或是透明導電薄膜上都相當具有發展前景，威脅到目前使用最廣的兩種透明導電薄膜ITO(Indium Tin Oxide)或是FTO(Fluorine Tin Oxide)。

3. 透光度

上面提及透明導電薄膜，其最重要的性能就是透光度，而石墨烯極優秀的透光度，在文獻的發表上，單層石墨烯只會吸收2.3%的白光^[7]，所以基本上它就是一個非常透明的材料^{[13] - [16]}，目前的應用上，其透明導電特性，可以應用在透明導電電極上，假以時日，要取代ITO及FTO，至於取代銅與銀兩大金屬導電薄膜，亦是指日可待。

4. 機械性質

在本文的前言已提及，直達月球的「天梯」所使用的的物質非石墨烯莫屬了，其原因是石墨的層狀結構，加上奈米科技讓2D石墨烯展現於世人面前，經材料測試，其引人注目的機械性質，即機械強度與可撓性。石墨烯的機械強度約130 GPa，此數值大約是單壁奈米碳管的13~53 GPa的機械強度的兩倍，這麼高的數值大約是鋼材的150倍。

5. 熱導性質

石墨烯亦擁有相當優異的熱傳導性質，它的熱傳導能力約是 $5 \times 10^3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，約是銅在室溫的熱傳導能力的十倍，相信在半導體的散熱元件的應用有很大的空間。

早期科學家認為2D結構的材料是不可能存在的；石墨烯卻在2004年由K. S. Novoselov, A. K. Geim發表的期^[1]中發現上述卓越的機械、光學、電性等性質，將其應用在半導體元件上，的確具有改變世界，成為顛覆半導體產業的先進材料，此一前景，讓K. S. Novoselov和A. K. Geim於2010年榮獲諾貝爾物理學獎的殊。由於石墨烯上述的優良性質，所以在不同領域有所應用，除了上述的應用外，還有：高速電晶體、半導體記憶元件、接線材料、雷射材料、微奈米電子元件、儲氫材料以及氣體感測器。近年來，石墨烯更是被廣泛應用於各式各樣的感測器上，包括細菌偵測、DNA定序、化學分子感測、氣體感測等，這是由於石墨烯有著特殊的二維結構，在單一分子物理或化學吸附或脫附後，都會在其表面產生電荷的轉移^{[17] - [24]}，因中有一重要性能是石墨烯的片電阻

值造成元件電性上明顯的改善，可以偵測到比其他金屬氧化物「感測」不到的微小訊號，因其極高的導電率、更低的雜訊比，挑戰了濃度感測的最低極限，所以提高了元件感測性能。

伍、石墨烯的備製方法與比較

一、石墨烯的備製方法

有鑑於新穎材料石墨烯的重要性，本論文經由已發表的眾多文獻中找出主流的石墨烯的備製方法；諸如：機械剝離法、靜電沉積法、機械研磨法、氧化石墨還原法、離子液體輔助下之電化學法、超音波剝離法、電漿輔助化學氣相沉積法、碳化矽熱裂解法、以及化學氣相沉積法等九種方法分述如下：

1. 機械剝離法

機械剝離法是2004年，由K. S. Novoselov, A. K. Geim所提出的簡易方法^[1]，在HOPG上蝕刻出一個預定電晶體元件所需通道的厚度尺寸(如20 $\mu\text{m} \times 2\text{ mm}$)將其黏貼在一塊塗有厚度1 μm 的光阻(photoresist)的二氧化矽/矽(SiO_2/Si)基板上，然後，用膠帶一層一層地將HOPG的石墨層剝除，示意圖如Fig. 3所示。最後，經過丙酮浸泡及超音波清洗掉光阻，可獲得厚度約10 nm的石墨烯，因凡德瓦力使少層的石墨烯緊密地

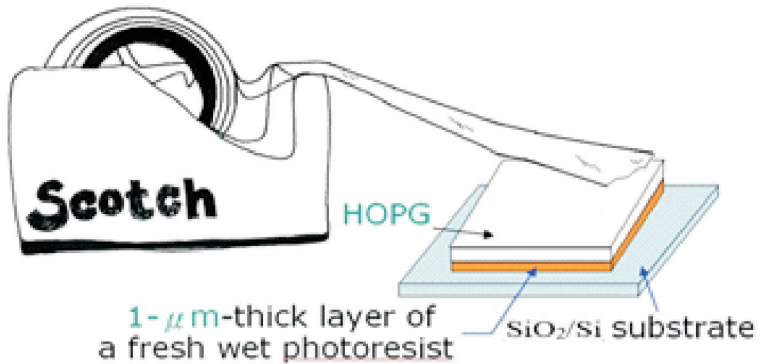


Fig. 3機械剝離法

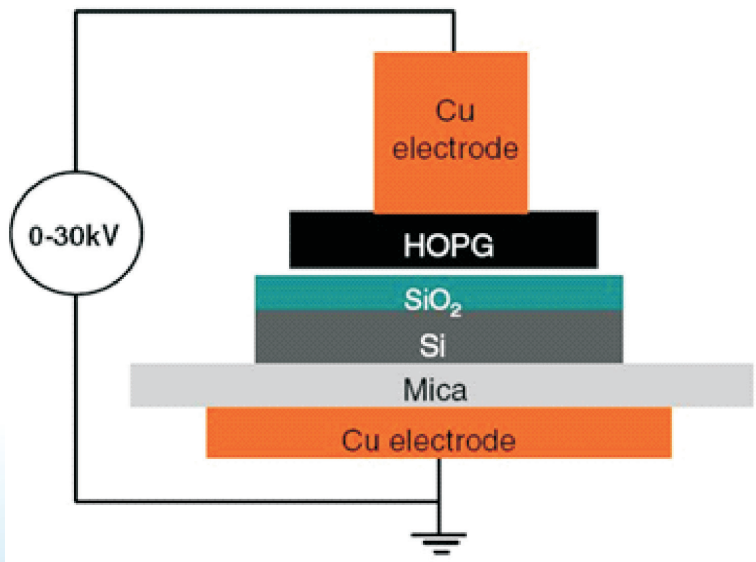


Fig. 4靜電沈積法示意圖^[25]



附著於基板上，此方法一次僅能留一片石墨烯於基板上，無法量產，故此方法僅能做學術上的研究。

2. 靜電沈積法

靜電沈積法(Electrostatic deposition of graphene)^[25]是使用外加電壓產生靜力使石墨烯附著於基板上的技術，首先是將HOPG片置於的二氧化矽(SiO₂)基板上，Fig. 4所示是其操作的結構示意圖，透過雲母(Mica)的隔離，施加以不同的靜電電位，調整值從0 V至30 kV，依不同的靜電力，可獲得1到22層不同層厚的石墨烯附著於二氧化矽基板上。通過原子力顯微鏡測量初始沈積後的一片僅僅是原子層厚(~0.35 nm)，此乃單層石墨烯。

3. 機械研磨法

這是一種看似簡單的精密機械操作，但是因為石墨烯是透明無色的薄膜，如何找到其跡，亦是一項挑戰。此方法是應用改良式的化學機械拋光方法(Chemical Mechanical Polishing, CMP)^[2]，如Fig. 5所示，將HOPG固定在光機的轉子(motor)上，就如同寫鉛筆字般將HOPG上少層的石墨烯，以非常輕微地(gently)接觸，然後輕輕地劃過基板，依轉子向下的力道，可控制依凡德瓦力(Van der Waals force)而附著於基板上的石墨烯層數。然而，因為此方式，是屬機械應力的操作，樣品必須通過退火以便移除石墨烯成形時的殘餘應力，以防止產生變形，再由經超音波處理，移除其他多餘的碎片，此精密的操作，可獲得1到4層的高度晶的石墨烯薄膜，石墨烯獲得之後，可以利用光蝕刻技術進一步備置不同形狀的石墨烯薄膜。

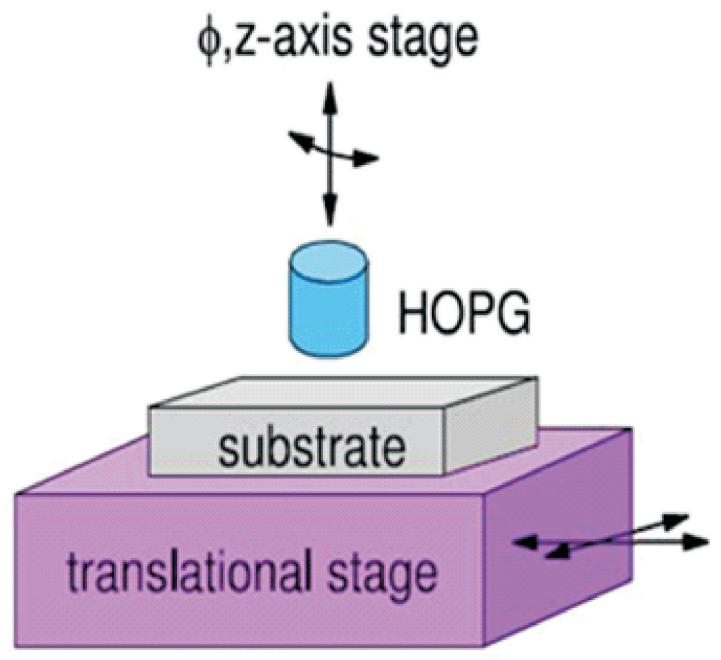


Fig. 5機械研磨法^[2]

4. 氧化石墨還原法

於1859年，氧化

石墨首次被Brodie提出，自此之後，不斷有不同的研究團隊跟隨其研究方法備製GO及分析其特性。相較之下，其中以1958年，Hummers所發明的氧化石墨(graphitic Oxide)備製方法^[26]及改良式的方法^[27]，以過錳酸鉀(potassium permanganate)做為氧化劑，大大地降低了實驗時的風險；他們先將硫酸(sulfuric acid)、硝酸鈉(sodium nitrate)，及過錳酸鉀和天然的熱解片狀石墨(pyrolytic graphite flakes)等配方依序加入冰浴的燒杯中，經一段時，在強酸、氧化劑及緩衝劑(buffer)滲入片狀石墨的石墨層中，再以滴定法(titration)滴入去離子水(deionized water；簡稱DI-water)，於是，石墨層中的氧化劑與水反應，層層剝離成少層的氧化石墨烯，經過一系列的清洗程序，將強酸及緩衝劑移除，即得少層的石墨烯粉末。若要更進一步獲得石墨烯，可將氧化石墨烯以不同的還原方法，獲得還原的氧化石墨烯，其中，最有效的方法是用聯氨(hydrazine)還原法^[28]，但聯氨係具毒性化學藥品，操作時要特別小心。此乃大量生產石墨烯的最有效率的方法之一，亦是最廣泛被使用備製氧化石墨的方法，而且可獲得單層或極少層的氧化石墨^[27]。

5. 離子液體輔助之電化學法^[29]

此方法亦是屬濕式法，係將HOPG夾於正負電極中，其示意圖如Fig. 6所示，此方法在離子液體和水的輔助下，從HOPG層中剝離出一片一片的石墨烯，並懸浮於溶液中，產生的石墨烯

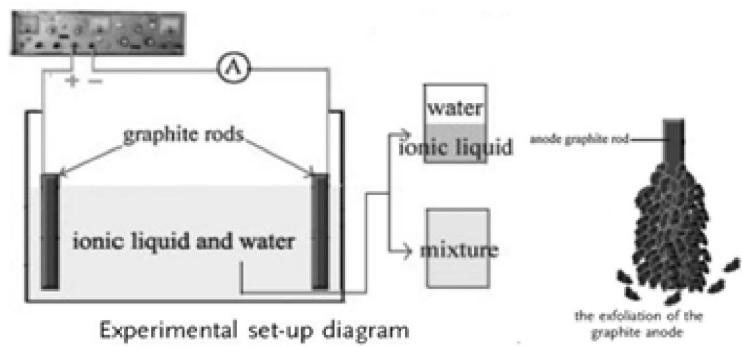


Fig. 6離子液體輔助下之電化學法^[29]

是官能化的石墨片，離子液體中充滿了被剝離的石墨烯薄膜，其不僅均勻分佈在極性非質子溶劑中，而且與Hummers不同的是，此種石墨烯並沒有被氧化，不需要進一步還原。利用不同類型的離子液體和離子液體與水，或不同比例，可備製不同官能基的石墨烯懸浮液，提供進一步應用。

6. 超音波剝離法

此方法與上述的方法相似，亦是屬濕式石墨烯備製法^[30]，將HOPG放於電解液(強酸)中，利用有機物質滲入HOPG的石墨層中，經過超音波的輔助



下，石墨烯會從HOPG上剝離，形成石墨烯懸浮液，利用離心機及真空乾燥，即可獲得石墨烯粉末，或是用不同的電解液，產生不同的石墨烯懸浮溶液，提供進一步的應用。

7. 電漿輔助化學氣相沉積法^[31]

氣相沉積法有分物理氣相沉積法 (Physical vapor deposition, PVD) 和化學氣相沉積法 (Chemical



Fig. 7 電漿輔助化學氣相沉積法備製的石墨烯^[30]

Vapor Deposition, CVD) 方法，因為石墨烯屬單晶薄膜，故採用CVD方法，讓石墨烯在腔體內重新鍵結，再結晶成結晶性佳的石墨烯，上方法是以電漿的輔助，製備石墨烯薄膜，實驗條件舉凡沉積設備，基板溫度，工作壓力，惰性維持氣體，不同的基板(本文^[30]採用矽)和施加的電壓等等。各備製參數皆會影響石墨烯成長的結果，石墨烯從矽基板的基底面(100)上垂直生長，通過微波的能量輔助，使碳原子從甲烷中解離，碳原子自由地在矽基板上重新組合，相互鍵結，於是4至6個原子層的石墨烯片以層疊方式成形，有如花瓣一般，其外形如Fig. 7所示，因為其平整性有待改善，影響其實用性。

8. 碳化矽熱裂解法^{[32] [33]}

碳化矽材料係以磊晶成長方式成長成單晶的6H-SiC，本方法依所需，備製適當的尺寸及形狀的碳化矽基板，將此基板置於真空度 10^{-9} Torr以下的石英管腔體中，加溫至1400-1900 °C，如此會將碳化矽中碳和矽的鍵結打斷，在真空的條件下，矽較碳容易氣化而蒸發被真空幫浦吸出，於是獨留下單獨的碳層，在此溫度下，碳原子間重新鍵結成六角蜂巢狀的石墨烯薄膜，稱之為熱裂解石墨烯(pyrolytic epitaxial graphene)。

9. 化學氣相沉積法^[34]

此方法是目前最佳的石墨烯的備製方法，無論在品質及尺寸上皆可以獲得最佳的石墨烯，其方法是將平面基板(如鎳或銅)，置於高溫爐中，在真空的環境下，升溫至1000°C左右，通以甲烷及氫氣，在適當的CH₄/H₂的比例



下，碳分子因高溫而裂解，重新鍵結成長於基板上，控制適當的成長時間，及適時地將高溫爐開啟，以迅速降溫，則少層且完整的石墨烯會成長在基板表面，所以基板的尺寸就是石墨烯的尺寸。將長有石墨烯的基板取出，利用化學蝕刻法將金屬基板移除，即可獲得少層的石墨烯，在理想的條件下，此方法可以獲得單層的石墨烯。

二、上述方法之優缺點比較

在以上深入介紹各種方法後，將各方法的優缺點比較建立比較表如下：

其中機械剝離法

Table 1. 各種方法及優缺點比較表

	備製方法					
	成本	產率	溫度	面積	品質	
1	機械剝離法	H	Lo	Lo	M	H
2	靜電沉積法	H	Lo	Lo	M	H
3	機械研磨法	H	Lo	Lo	M	M
4	氧化石墨還原法	Lo	H	M	S	Lo
5	離子液體輔助電化學法	Lo	H	Lo	S	Lo
6	超音波剝離法	H	M	Lo	S	M
7	電漿輔助化學氣相沉積法	H	Lo	H	M	H
8	碳化矽熱裂解法	H	Lo	H	L	H
9	化學氣相沉積法	H	Lo	H	L	H

因為一次只能產生一片石墨烯，雖其備製工具成本不高，但HOPG是昂貴的碳材，因此產率低無法量產。靜電沉積法及機械研磨法亦屬低產能，而且其備製成本相較之下，高出許多。以

其中：H: High; M: Medium; Lo:Low; S: Small; L: Larg
上三種屬機械式備製方法，石墨烯的尺寸無法獲得大尺寸的石墨烯，雖其結晶性極佳，適合學術上的研究。

氧化石墨還原法、離子液體輔助電化學法及超音波剝離法都屬濕式備製方法，前兩者的產率高，皆符合量產的商業生產方法，後者因為使用HOPG，成本較高，此三種方法雖產率佳，但因為其石墨烯缺陷多，結晶性差，相對電性差，故不適用於半導體的應用，但其極高的比表面積的特點，例用其官能基易與其他物質鍵結的特性，可廣泛的進一步地應用。

最後三種方法：電漿輔助化學氣相沉積法、碳化矽熱裂解法，以及化學氣相沉積法，所生產的石墨烯的結晶性及電性極佳，而且適合備製大尺寸的單晶石墨烯，雖然製程涉及高溫或真空製程的方法，其備製成本相對地高，若能提升其利基，有朝一日應可應用於半導體產業中。

陸、結論

從本文中對各備方法進行比較表得知，舉凡在成本、產率、製程溫度、單晶石



墨烯的面積，以及石墨烯成品的結晶結構及品質等等，因為應用層面的不同，都有其應用價值，例如應用在半導體元件上，最重要的是良率，所以相對地，能否備製出合乎需求面積大小的單晶石墨烯，且石墨烯成品的結晶結構及品質要完美無缺，則化學氣相沉積法是最佳的選擇，惟其現階段其高溫、高成本是要解決的問題之一。若是考量利用石墨烯奈米的結構擔載著其他奈米粒子，則對石墨烯的結晶性的要求就不是最重要的選項，故採用較易操作且可量產的濕式法來產生的石墨烯，是理想的方式，且成品可懸浮於液體中，更方便進一步的應用。若石墨烯是當成濾膜的功用，則視需求或品質折衷選擇採用七種方法之一；再者，石墨烯粉末是目前最高比表面積的材料之一，在近來許多表的論文中都有傑出的表現，是目前最新穎的材料。

Reference

- [1] K. S. Novoselov, A. K. Geim, "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films," *Science*, Vol. 306, 2004, p. 666-669
- [2] A. Banerjee, H. Grebel, "Depositing graphene films on solid and perforated substrates," *Nanotechnology*, Vol. 19, 2008, p. 365303
- [3] Y. M. Lin, K. A. Jenkins, etc., "Operation of Graphene Transistors at Gigahertz Frequencies", *Nano Lett.*, Vol. 9, No. 1, 2009, pp 422-426
- [4] M. Fiorillo, A. F. Verre, etc, "Graphene oxide selectively targets cancer stem cells, across multiple tumor types: Implications for non-toxic cancer treatment, via "differentiation-based nanotherapy," *Oncotarget*, Vol. 6, No. 6, 2015, p. 3553-3562
- [5] M. Hu, B. Mi, "Enabling Graphene Oxide Nanosheets as Water Separation Membranes," *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 47, No. 8, 2013, pp 3715-3723
- [6] J. Zhao, W. Ren, H. M. Cheng, "Graphene sponge for efficient and repeatable adsorption and desorption of water contaminations," *J. Mater. Chem.*, Vol. 22, 2012, p. 20197
- [7] R. R. Nair, P. Blake, etc., "Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene," *Science*, Vol. 320, 2008, p. 1308
- [8] J. H. Chen, et al., "Intrinsic and extrinsic performance limits of graphene devices on SiO₂," *Nat Nanotechnol.*, Vol. 3, No. 4, 2008, p. 206-9.
- [9] H. J. Hrostowski, et al., "Hall Effect and Conductivity of InSb," *Physical Review*, Vol. 100, No. 6, 1955, p. 1672-1676.
- [10] T. D. Drkop, et al., "Extraordinary mobility in semiconducting carbon nanotubes," *Nano letters.*, Vol. 4, No. 1, p. 35-39.
- [11] C. Lee, et al., "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene," *Science*, Vol. 321, No. 5887, 2008, p. 385-388.
- [12] G. Eda, G. Fanchini, and M. Chhowalla, "Large-area ultrathin films of reduced graphene oxide as a transparent and flexible electronic material," *Nature nanotechnology*, Vol. 3, No. 5, 2008, p. 270-274.
- [13] K. S. Kim, et al., "Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes," *Nature*, 2009. Vol. 457, No. 7230): p. 706-10.
- [14] X. Wang, L. Zhi, and K. M.ullen, "Transparent, conductive graphene electrodes for dye-sensitized solar cells," *Nano letters*. Vol. 8, No. 1, 2008, p. 323-327.
- [15] H. Yan, et al., "Enhanced thermal conductivity in polymer composites with aligned graphene



- nanosheets," Journal of Materials Science. Vol. 49, No. 15, 2014, p. 5256-5264.
- [16] O. Vargas, et al., "Electrochemical performance of a graphene nanosheets anode in a high voltage lithium-ion cell," Physical Chemistry Chemical Physics, Vol. 15, No. 47, 2013, p. 20444-20446.
- [17] X. Yang, et al., "A High-Performance Graphene Oxide-Doped Ion Gel as Gel Polymer Electrolyte for All-Solid-State Supercapacitor Applications. Advanced Functional Materials," Vol. 23, No. 26, 2013, p. 3353-3360.
- [18] A. S. Wajid, et al., "Polymer-stabilized graphene dispersions at high concentrations in organic solvents for composite production," Carbon, Vol. 50, No. 2, 2012, p. 526-534.
- [19] Y. Iyechika, "Application of graphene to high-speed transistors: expectations and challenges," Sci. Technol. Trends., Vol. 37, 2010, p. 76-92.
- [20] N. Mohanty, V. Berry, "Graphene-based single-bacterium resolution biodevice and DNA transistor: interfacing graphene derivatives with nanoscale and microscale biocomponents," Nano letters., Vol. 8, No. 12, 2008, p. 4469-4476.
- [21] F. Schedin, et al., "Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene," Nat Mater., Vol. 6, No. 9, 2007, p. 652-5.
- [22] K. S. Novoselov, et al., "Two-dimensional atomic crystals," Proc Natl Acad Sci U S A, Vol. 102, No. 30, 2005, p. 10451-3.
- [23] J. C. Meyer, et al., "The structure of suspended graphene sheets," Nature, Vol. 446, No. 7131, 2007, p. 60-3.
- [24] S. Akc ltekin, et al., "Graphene on insulating crystalline substrates," Nanotechnology, Vol. 20, No. 15, 2009, p. 155601.
- [25] A. N. Sidorov, M. M Yazdanpanah, etc, "Electrostatic deposition of graphene," Nanotechnology, Vol 18, 2007, p. 135301
- [26] W. S. Hummers, R. E. Offeman, "Preparation of graphitic oxide," J. Am. Chem. Soc., Vol. 80, 1958, p. 1339
- [27] T. T. Wu, J. M. Ting, "Preparation characteristics of graphene oxide its thin films," Surf. Coat. Technol., Vol. 231, 2012, p. 487-491
- [28] V. C. Tung, M. J. Allen, etc., "High-throughput solution processing of large-scale graphene," Nat. Nanotechnol., Vol. 4, 2009, p. 25-29
- [29] N. Liu, F. Luo, H. Wu, etc., "One-Step Ionic- Liquid- Assisted Electrochemical Synthesis of Ionic-Liquid-Functionalized Graphene," Adv. Funct. Mater., Vol. 18, 2008, p. 1518-1525
- [30] M. Teresa Cuberes, "Ultrasonic Machining at the Nanometer Scale," J. Phys. : Conference Series, Vol. 61, 2007, p. 219-223
- [31] A. Malesevic, R. Vitchev, "Synthesis of few-layer graphene via microwave plasma-enhanced chemical vapour deposition," Nanotechnology, Vol.19, 2008, p. 305604
- [32] Y. Q. Wu, P. D. Ye, etc., "Top- gated graphene field-effect-transistors formed by decomposition of SiC," Appl. Phys. Lett., Vol. 92, 2008, p. 092102
- [33] K. Kim, H. Lee, etc., "Temperature dependent structural changes of graphene layers on 6H-SiC(0001) surfaces," J. Phys. : Condens. Matter, Vol. 20, 2008, p. 225017
- [34] S. Bae, H. Kim, etc., "Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes," Nat. Nanotechnol, Vol. 5, 2010, p. 574-578

作者簡介

博士 吳添財

學歷：國立成功大學材料科學及工程學系博士，經歷：教師、行政人員、空軍航空技術學院基本學科部講師、空軍軍官學校航空機械系兼任講師，現職：空軍航空技術學院兼任講師。