

2010 年兩岸暑期學術交流 專題報告

利用電紡絲製備石墨烯奈米纖維的最佳方法

The optimal method of the precursor of graphene oxide to produce graphene nanofibers by electrospinning.

作者 李偉任

國立清華大學 工學院 材料科學工程學系

指導老師 林紅 教授

清華大學 材料科學與工程學系

2010 年 8 月 21 日

摘要(Abstract)：

石墨烯，是在 2004 年被發現的新興材料，應用於太陽能電池或光電電子產業上，由於他的製備成本低且資源豐富，被期待成為導電玻璃 ITO 的替代品；而石墨烯的機械性質及物理性質相當優異，若是將其製成纖維應用在複合材料上，應能大大提升複合材料的性能！

電紡絲，是製備奈米纖維最常被使用的一種技術，通常使用的都是高分子溶液所紡出的奈米纖維，而本專題研究方向就是將石墨烯溶液利用電紡絲的技術來實驗看看是否能夠成功的紡出石墨烯的奈米纖維來，並且希望可以應用在各種光電產業上，像是太陽能電池。

實驗的設計主要是透過不同實驗變因，來嘗試製備石墨烯奈米纖維，其實驗的操作變因有電紡絲的工作電壓還有 GO 及 PVP 混合漿料的黏滯度，經過實驗後可以找出較適當的工作電壓大概在 22.0kV 到 23.0kV 左右，太低的話紡不出纖維來，太高的話又可能會造成混合漿料直接滴下試片上；另外混合漿料黏滯度的比例大約在 1.5:1 到 1:1 的比例都還可以紡的出奈米纖維來。

在這次實驗遇到的困難是許多分析的儀器設備在暑假期間都沒有開放，所以我做的實驗結果有很多都無法進一步的做檢驗，來確認我的推測是否正確，若有更多時間的話，應該可以做出更多組數據，並且進行更多檢驗與分析，來確認石墨烯纖維的性質與形貌，還有 SEM 照片上的許多現象或許經由儀器的分析可以得到解答。

關鍵字：石墨烯(Graphene)、電紡絲(Electrospinning)、奈米纖維(Nano fiber)

目次(Contents)

摘要.....	I
目次.....	II
圖表目錄.....	III
第一章 前言.....	1
第二章 研究動機與背景.....	3
第三章 實驗設計與流程.....	5
第四章 實驗結果與討論.....	10
第五章 結論.....	18
致謝.....	19
參考文獻.....	19

圖表目錄

圖一、電紡絲裝置示意圖.....	3
圖二、以電紡絲法所製備之奈米纖維膜 SEM 照片	4
圖三、實驗儀器與實驗材料照片示意圖.....	5
圖四、實驗流程圖.....	7
圖五、白紙上所呈現之結果.....	10
圖六、鋁片上所呈現之結果.....	12
圖七、SEM 照片所呈現出結果.....	15
表一、實驗材料.....	5
表二、實驗設備及器材.....	5
表三、實驗參數.....	9

第一章 前言

石墨烯，是近期(2004 年)被發掘出來的新穎材料[1]，應用在許多方面，像是新興電子元件，或是太陽能電池以及一些可撓曲式顯示螢幕上，都有人開始從事相關研究；石墨烯也可做為透明導電極，傳統人們所常使用的 ITO 導電玻璃，專家們已預期可漸漸被取代，且石墨烯的製備成本低且資源豐富，不像 ITO 成本昂貴。另外石墨烯之相關化合物也有人開始研究，最著名的石墨烯與奈米碳管的組合是人們特別有興趣的。

以下是近年來石墨烯所做的相關研究介紹，可使我們對石墨烯材料有更進一步的瞭解。

一、石墨烯導線[2]

美國喬治亞理工大學(Georgia Tech)的研究人員發現，用石墨烯(graphene)細線做成的純碳導線，可超越銅導線將寬度微縮到 30 奈米以下，而且這種石墨烯導線不僅具備低電阻，還可提供高電子遷移率以及更佳的熱傳導性、更高的機械強度，並減少相鄰導線間的電容耦合(capacitive coupling)效應。

研究人員表示，石墨烯導線可達僅 18 奈米寬，且其性能會跟同寬度的銅導線相當、甚至更好。不同於銅導線電阻會隨著其線寬越細而增加——由於分散在晶粒邊界(grain boundaries)與邊牆(side walls)，石墨烯導線反而會在奈米尺寸等級，因量子效應而使傳導性增加。

研究人員是先從一大塊純石墨烯上切割出薄膜，這些取下的小薄片接下來會放到絕緣基板上，利用電子束微影產生石墨烯細線，並連接電極；這些被測試的石墨烯奈米線寬度在 18 奈米到 52 奈米之間。

二、石墨烯透明電極[3]

美國史丹佛大學(Stanford University)的研究人員表示，相較於稀有且昂貴的氧化銦錫(indium tin oxide, ITO)石墨烯(graphene)可望能成為更廉價、更薄、速度也更快的替代品。ITO 一般是做為 OLED 顯示器的透明電極，一旦可用石墨烯做為替代品，就可避免 ITO 短缺的問題，並讓軟性顯示器技術的發展路程更順利。

石墨烯要直接組裝到大面積的基板上有困難度，不過史丹佛大學的研究團隊聲稱，他們已經成功開發出一種低成本的、以溶液為基礎的旋轉塗佈(spin-coating)分散式技術，能用以製作 OLED 顯示器用的石墨烯透明電極。

目前的 OLED 顯示器採用無機 ITO 製作透明電極，用以開關畫素；不過該種材料成本高昂，由於也在 LCD 平面顯示器的製程中應用，供應量時常不足。研究人員表示，

若改用石墨烯，成本只有 ITO 的不到百分之一；此外，石墨烯的電子遷移率較高，能把電極做得更薄、更透明、導電性也更佳，並因此能催生超薄的軟性 OLED 顯示器。

三、石墨烯電晶體[4]

IBM 宣佈研發出號稱全世界速度最快的石墨烯(graphene)場效電晶體(FET)，可在 26GHz 頻率下運作。該公司 Thomas J. Watson 研究中心的研究人員並預測，碳元素更高的電子遷移率，可望使該種材料超越矽的極限，達到 100GHz 以上的速度跨入兆赫(terahertz)領域。

「我們迄今所量測到的最快石墨烯電晶體速度為 26GHz，閘極(gate)長度則為 150 奈米。」IBM 院士、該公司奈米科技部門經理 Phaedon Avouris 表示：「由於峰值頻率會與閘極長度成反比，我們相信，當石墨烯電晶體閘極長度進一步縮減至 50 奈米，其速度將可達到兆赫等級。」

石墨烯的組成結構與類似雞籠鐵絲網、蜂巢狀晶格的碳奈米管一樣；不過要把蜂巢狀晶格做成奈米等級的管子有些困難，石墨烯電晶體是將碳原子沉積成薄膜，且能使用傳統的微影工具來製圖。

過去 IBM 能展示過一種層狀的石墨烯技術，能解決用狹窄帶狀石墨烯做為電晶體通道時所產生的雜訊問題。在最近一次的展示中，IBM 宣稱毫米波(millimeter-wavelength)通訊電路所需的兆赫頻率，能在石墨烯薄膜內達成。

IBM 表示，閘極在頂部的石墨烯電晶體是使用絕緣上覆矽(silicon-on-insulator)晶圓片所製造，並透過執行不同的閘極電壓與長度來達到高頻的運作。研究結果顯示，石墨烯內的電流增益，會隨著頻率升高而降低的 FET 響應曲線(response curve)變化。

而峰值截止頻率(cut-off frequency)，則是與閘極長度成反比，目前 150 奈米閘極長度、26 GHz 運作頻率是最高紀錄。

美國國防部高等研究計畫署(DRAPA)贊助了上述研究的一部份；DRAPA 旨在探討碳電子元件在 RF 領域的應用，並希望能使用 8 吋以上晶圓所製造的石墨烯薄膜電晶體，製作出能運作於 100GHz 以上的寬頻、低雜訊放大器，以實現毫米波通訊。

IBM 的研究團隊下一步將改善閘極介電質材料，以實現能在兆赫頻率範圍運作的 RF 電路。

第二章 研究動機與背景

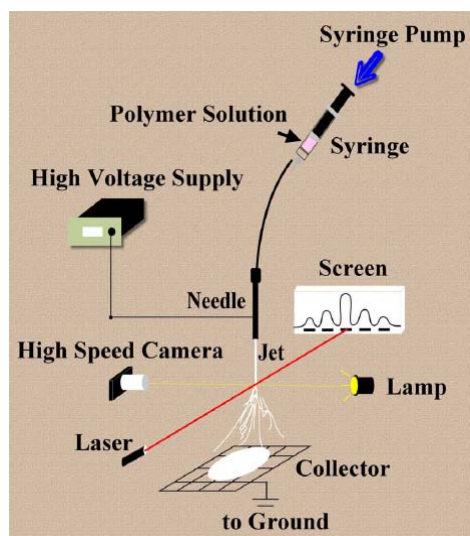
一、研究動機

電紡絲是製備奈米纖維常見的技術，其中又以高分子材料為大宗。查看文獻中發現石墨烯為近期被發現且熱門的研究題材，其中又以石墨烯與奈米碳管組合而成的化合物最感興趣，所以想嘗試將石墨烯利用電紡絲技術來製成石墨烯奈米纖維，並且測試纖維之機械、光電等物理性質以及觀察纖維之顯微結構，來了解石墨烯奈米纖維的材料本質，希望未來可以應用在太陽能電池上，當做透明電極，在太陽能電池領域中，能有一些成果及收穫！或是將石墨烯纖維應用在機械及力學領域上，靠著石墨纖維的高硬度以及高性能，在複合材料中有一些新的突破與構想！

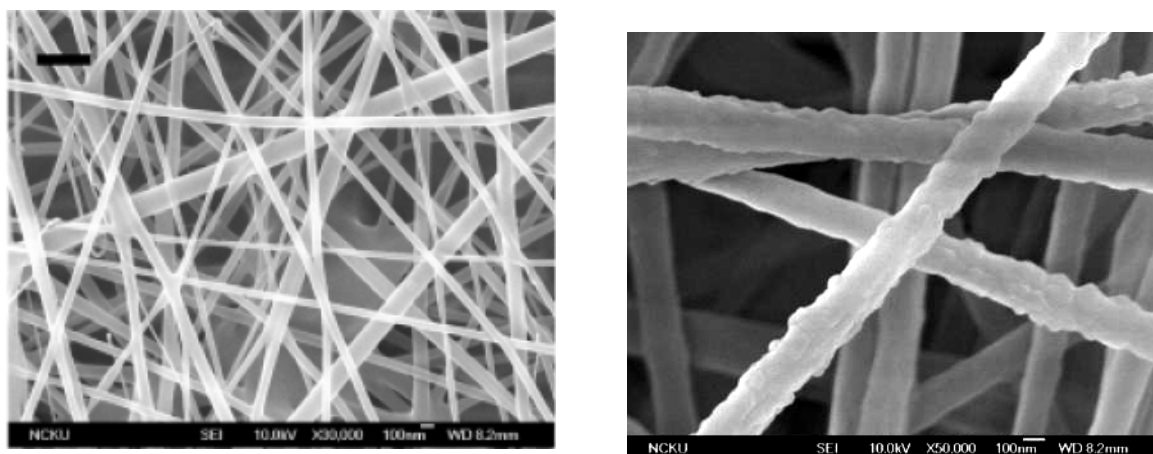
二、研究背景

1.電紡絲原理與簡介[5]

電紡絲加工技術，如圖一，係將溶液輸送至針頭形成液滴，當施加一高壓電後，高分子液滴表面充滿電荷，隨著施加電壓的增高，液滴表面電荷密度上升而產生斥力，當電斥力克服液體表面張力後，液滴表面將噴射出一帶電液柱(jet)，液滴形狀亦隨之改變成為習知的 Taylor cone，噴射出的帶電液柱在電場作用下劇烈的甩動延伸，在這過程中使得液柱溶液中的溶劑迅速的揮發，最後可在接地的收集板上取得纖維直徑為奈米等級的不織布膜(non-woven mats)，如圖二。



圖一、電紡絲裝置示意圖。



圖二、以電紡絲法所製備之奈米纖維膜 SEM 照片，(a)高溫電紡所得 PAN 奈米纖維，(b)室溫電紡所得 PLA/奈米碳球複合纖維，表面突出物即為 CNC 奈米顆粒。

2. 石墨烯(Graphene)簡介

石墨烯是已知材料中最薄的一種，且牢固堅硬；它在室溫下傳遞電子的速度比已知導體都快。石墨烯在原子尺度上結構非常特殊，必須用相對論量子物理學(relativistic quantum physics)才能描繪。

石墨烯結構非常穩定，尚未有人發現石墨烯中有碳原子缺陷的情況。石墨烯中各碳原子之間的連接非常柔韌，當外部施加機械力時，碳原子面就彎曲變形，使碳原子不必重新排列來適應外力，也就保持了結構穩定。

這種穩定的晶格結構使碳原子具有良好的導電性。石墨烯中的電子在軌道中移動時，不會因晶格缺陷或引入外來原子而發生散射。由於原子間作用力十分強，在常溫下，即使周圍碳原子發生擠撞，石墨烯中電子受到的干擾也非常小。

石墨烯具有超高的強度，碳原子間的強大作用力使其成為目前已知的力學強度最高的材料，並可作為添加劑廣泛應用於新型高強度複合材料之中。另外石墨烯良好的導電性及其對光的高透過性又讓它在透明導電薄膜的應用中獨具優勢，這類薄膜在液晶顯示以及太陽能電池等領域至關重要。石墨烯在高靈敏度感測器和高性能儲能器件方面也已經展示出誘人的應用前景。

第三章 實驗設計與流程

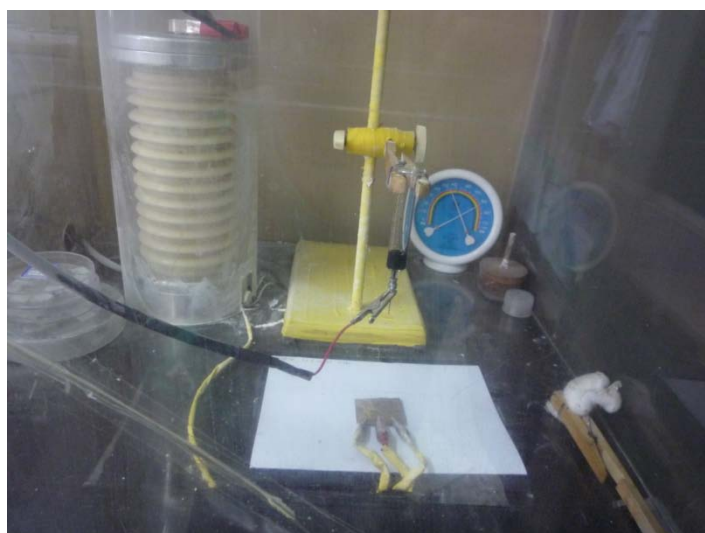
一、 實驗材料—表一

GO 溶液	
Graphene Oxide	DI water(去離子水)
PVP 溶液	
PVP-K90(聚乙烯 咯烷酮)	DMF(N,N-二甲基甲酰胺)

二、 實驗設備及器材—表二

項目	數量	項目	數量
電紡絲設備	1 台	燒杯(小)	5 個
超音波震盪器	1 台	磁攪拌子	5 個
實驗針筒	1 根	鋁片	1 片
實驗針頭	1 支(6 號)		
燒杯(大)	2 個		

電紡絲儀器設備



電紡絲高壓電控制台



超音波震盪器



加熱攪拌器



秤重器

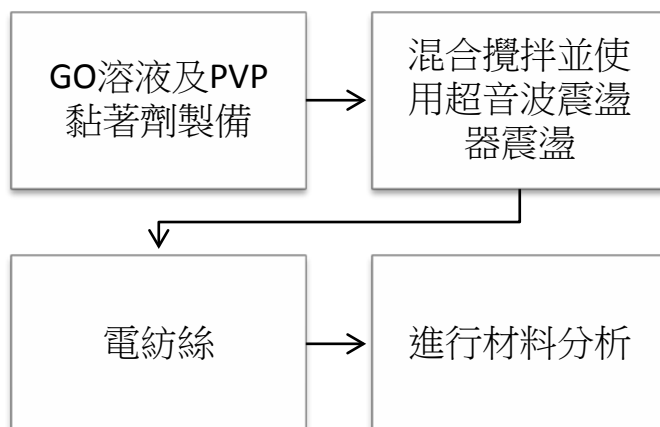


GO 溶液以及 PVP 溶液



圖三、實驗儀器與實驗材料照片示意圖

三、實驗流程圖



圖四、實驗流程圖

1. GO 溶液及 PVP 黏著劑製備

(1)GO 溶液製備[6]

GO 溶液是使用 Hummer' s method 來製備且過程手續較繁複，其步驟及簡介如下：

- a. 先將石墨片(1.5 克)加入硫酸(69 毫升)中，並且在冰浴下用力攪拌。
- b. 當石墨形成黑色漿料後，再緩慢加入硝酸鈉(NaNO_3)1.5 克，並在冰浴中待至 15 分鐘後，緩慢將溫度升回室溫後，再攪拌 1 個小時。
- c. 之後再將去離子水 120 毫升加入溶液中，並且在溫度 90°C 下攪拌 30 分鐘。
- d. 將此混合漿料倒入 300 毫升的水中，再緩緩加入二氧化氫(H_2O_2)10 毫升。
- e. 將此混合漿料過濾至顏色從黑轉變成棕色最後變成黃色，並且將此材料在過濾與去離子水中重新分散，使漿料之 pH 值達到中性。
- f. 將濾液在真空下烘乾後，即可得到 GO 產物，再加去離子水，依所需濃度配製成 GO 溶液。

(2)PVP 黏著劑製備

將 PVP 粉末秤重，且 DMF 溶液取若干毫升，依所需的濃度將其充分混合，再使用磁攪拌器，使溶液均勻。

2. 混合攪拌及超音波震盪

將(1)及(2)步驟配置的溶液，依一定比例相互混合，製成 GO 及 PVP 之漿料溶液，準備進行電紡絲，在電紡絲之前，為了使漿料達到充分且均勻化，會使用磁攪拌器以及超音波震盪器來達到成效。

3. 電紡絲

- (1)使用針頭 6 號，剪掉尖端，使開口平整，目的為了使電場均勻，讓紡出來的纖維可以較均勻的散佈在鋁片上。
- (2)將已準備好的漿料溶液倒入針筒中。
- (3)將電板接好：正極部分夾住針頭，負極部分夾著鋁片。
- (4)開始進行電紡絲：先將電壓旋鈕旋至零的位置歸零，打開開關，再推上高壓，帶高壓穩定後，再調整電壓至合適的電壓，開始電紡絲。
- (5)結束後，將電壓旋鈕旋回零的位置，推回電壓，等過壓後，再關掉開關。
- (6)為了避免殘留電壓，所以使用接地栓，將金屬部分接地，以確保安全。

4. 材料分析—掃描式電子顯微鏡

進行完電紡絲後的試片，再進行材料分析，首先先觀察其顯微結構，因此使用掃描式電子顯微鏡(Scanning electron microscopy, SEM)，SEM 是用來觀察物體的表面型態，最常使用的工具，藉由觀察試片的表面來確認奈米纖維是否有成功紡出。

四、實驗設計數據

為了能夠成功的紡出絲來，我首先考慮電紡絲實驗中的兩種因素：1.工作電壓、2.前驅物之濃度，分別改變兩種因素來進行電紡絲之實驗，並且探討實驗結果與其兩種因素之因果關係，並且找出最恰當的製備參數。

實驗參數一表三

不同工作電壓	不同前驅物濃度(GO:PVP)
18KV	10:1 (PVP:10%、20%)
20KV	8:1 (PVP:10%、20%)
22KV	6:1 (PVP:10%、20%)
22.1KV	4:1 (PVP:10%、20%)
30KV	2:1 (PVP:10%、20%)
	1:1 (PVP:10%、20%)
	1.5:1 (PVP:20%)
	1.4:1 (PVP:20%)
	1.3:1 (PVP:20%)
	1.2:1 (PVP:20%)
	1.1:1 (PVP:20%)

備註 1：在本次實驗中，PVP 分別使用了 10%與 20%的濃度來調整前驅物之黏度。

備註 2：KV 為千伏(kilovolt)

第四章 實驗結果與討論

一、實驗結果：

為了確認 GO 溶液有成功地經由電紡絲製得奈米纖維，且落在鋁片上，所以我在鋁片底下放置一張白紙，因為 Graphene 是黑色的，所以若 GO 溶液有落下鋁片，則白紙上應該也有痕跡，故依此來判斷。

實驗參數	照片
GO:PVP 比例：1.5:1 工作電壓：22.1kV 電紡絲時間：0.5hr	
GO:PVP 比例：1.4:1 工作電壓：22.1kV 電紡絲時間：2hr	

GO:PVP 比例：1.4:1

工作電壓：23.0kV

電紡絲時間：0.5hr



GO:PVP 比例：1.3:1

工作電壓：23.0kV

電紡絲時間：0.5hr



GO:PVP 比例：1.2:1

工作電壓：23.0kV

電紡絲時間：0.5hr



GO:PVP 比例：1.1:1

工作電壓：23.0kV

電紡絲時間：0.5hr



圖五、白紙上所呈現之結果

實驗參數與說明

照片

初始試驗階段，尚還在抓參數，實驗結果發現鋁片上有黑色點滴狀，是混合漿料直接滴下，推測結果應該是漿料濃度太稀所致。



1.5:1, 1hr, 22.1kV

從夾子夾住的部位與未夾夾子的部位可明顯看出，鋁片上有一層白色薄膜，右上角被剪掉的地方是送去拍 SEM 的部分。



1.4:1, 2hr, 22.1kV

再將濃度往下調整至 1.4:1，且延長時間至 2hr 後可發現右上角處有明顯的黑色薄膜在鋁片上，由此可以知道電紡絲的時間越久，在鋁片上越可以明顯的看出黑色薄膜。



1.4:1, 0.5hr, 23.0kV

電紡絲的時間較短，黑色薄膜區域就較不明顯，但還是可以看出白色薄膜在鋁片上。



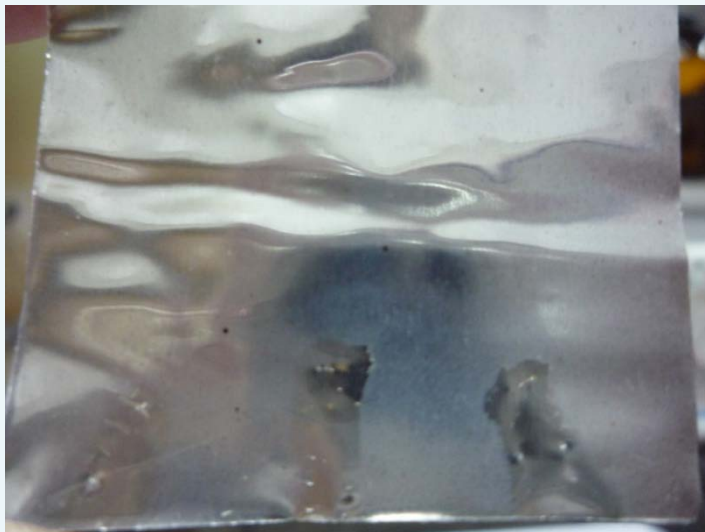
1.3:1, 0.5hr, 23.0kV

結果與 1.4:1 的實驗參數類似，右上角有一點黑色薄膜，但整體上還是能看出白色薄膜。



1.2:1, 0.5hr, 23.0kV

鋁片上可看到白色薄膜，但是也可發現零星的黑點在鋁片上，白紙上也可看出明顯的黑點。



圖六、鋁片上所呈現之結果

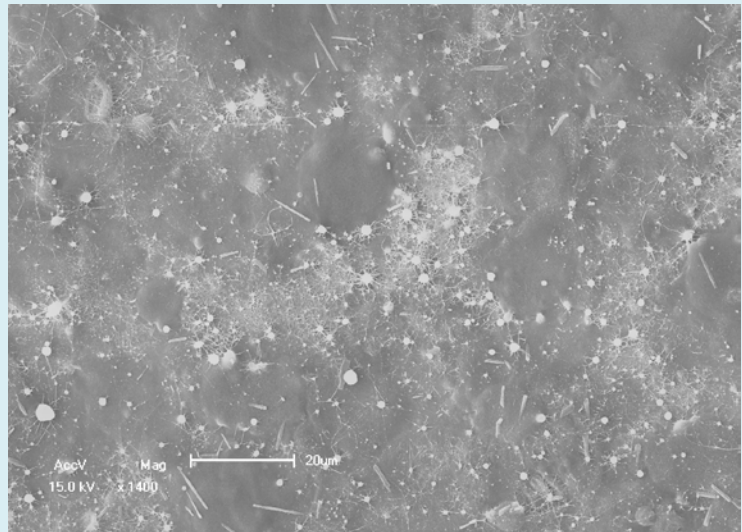
將試片(參數為 15:1, 1hr, 22.1kV)取樣片進行 SEM 拍攝，以下為拍攝結果：

說明

SEM 照片

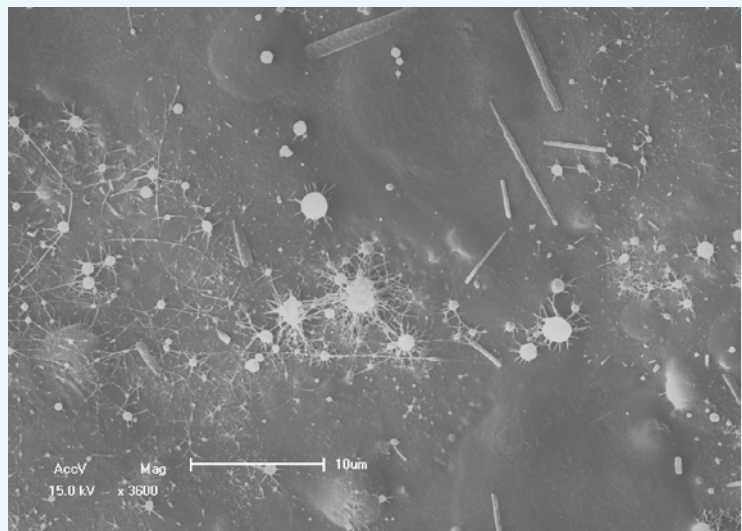
放大倍率：1400x

可看見有絲狀纖維，另外還有一些白點，還有一些柱狀物存在，可看出混和尚未均勻。



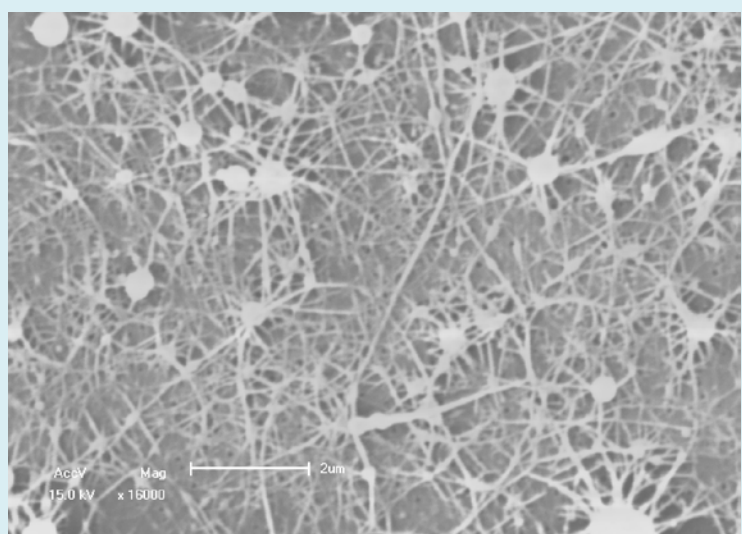
放大倍率：3600x

上面有柱狀物，具體尚不知道是什麼，需要進一步的分析與檢驗才可以了解。

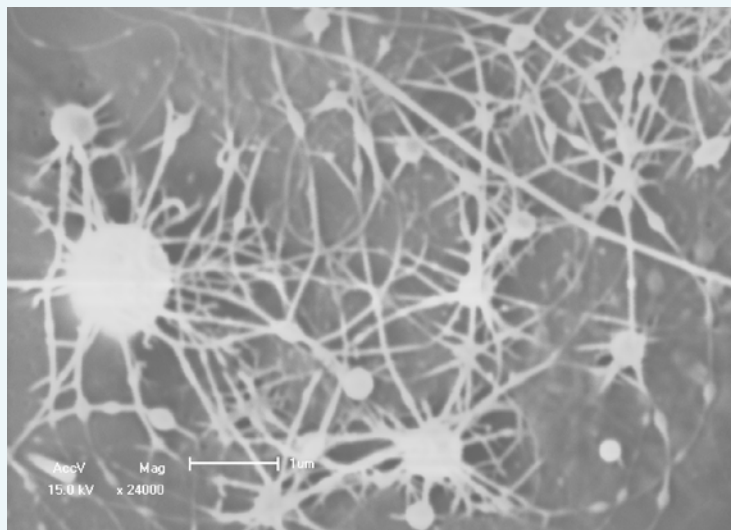


放大倍率：16000x

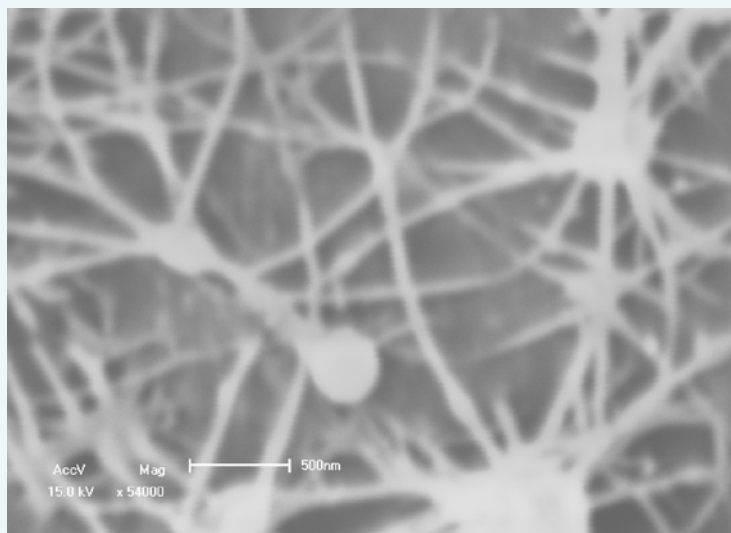
放大更大倍數後，可以發現放出來的絲(纖維)，還蠻細的，大約是幾個奈米的等級，白色圓珠狀物是混合沒有均勻所造成的。



放大倍率：24000x



放大倍率：54000x



圖七、SEM 照片所呈現出結果

二、GO 與 PVP 之混合漿料黏滯度對石墨烯纖維之影響

針對混合漿料之黏滯度，我做了幾個不同的參數，來觀察黏滯度對於石墨烯纖維的影響，一開始先分別調配 10:1、8:1、…到 1:1 的比例，從實驗結果來看，可以知道一開始，我所調配的混合漿料黏滯度還是太稀，所以可以在鋁片上看到明顯的液珠，證明尚未紡出奈米纖維來，隨著調整黏滯度(GO 與 PCP 之比例)，漸漸可以發現，有霧狀的一層薄膜鍍在鋁片上且白紙上出現黑色霧狀物，第一次發現有薄膜在鋁片上時的參數為：1.5:1, 0.5hr, 22.1kV；於是將黏滯度的範圍縮小，從 1.5:1、1.4:1…1.1:1，隨著不同比例的混合漿料，紡出來的奈米纖維在 1.5:1 到 1.3:1 之間都還可以成膜，但是 1.2:1 與 1.1:1 比例卻看似紡不出來，我所觀察到的結果是，在白紙上有出現黑色點狀物，可以在鋁片上卻還是可以看的到一層白色薄膜。具體推測結果會在「四、想法與討論」中詳述。

三、工作電壓的大小對石墨烯纖維之影響

一開始嘗試實驗的時候，首先先使用了文獻上他人利用電紡絲紡出矽纖維的工作電壓參數(18.0kV)套用在石墨烯上，但是卻紡不出來，實驗結果可清楚看見黑色液滴，滴落在鋁片上，故推測可能是工作電壓太小，導致電場的拉力無法將混合漿料連續的拉出纖維來，於是漸漸的提升電壓，經過多次實驗後，當工作電壓調至 22.1kV 的時候，開始可以紡的出絲來，經過多次驗證後，其適當的工作電壓範圍約在 22kV~23kV 之間，都還可以紡的出纖維來。

四、想法與討論

透過這一系列的實驗結果顯示，在白紙上，已經從一開始的滴狀，改變參數後，漸漸的可以在擺紙上看見霧狀的結果，在調配混合漿料比例的過程中，也開始縮小了能成功紡出奈米纖維的範圍，但是漿料比例到了 1.2:1 的時候，在白紙上卻又出現黑點，卻還是可以清楚看見一層薄膜鍍在鋁片上，推測原因可能是 GO 與 PVP 混合的不夠均勻的關係所致[7]，所以才會發現白紙上有黑點(GO)，而鋁片上卻可看出一層白色膜狀物(PVP)，另外從 SEM 照片上也可以加以佐證，在 SEM 照片中，可以看出有點狀物以及絲狀物，推測原因我認為點狀物應該是 GO，而絲狀物主要成分應為 PVP，而兩者因為混合不均勻的關係，所以導致 SEM 照片上可看出點狀物以及絲狀物纖維，也可以大致推測出白紙上有黑點，鋁片上卻有白色薄膜存在的原因，但是其具體原因還需要更多材料分析以及檢測，才可以確認，但是目前大致可往均勻度不夠的方向來推測。

五、需改進與修正之部分討論

這次的專題及實驗部分，算是我第一次自己設計實驗，自行獨立完成的一個報告，雖然有常常與俊峰學長討論我所面臨的問題並且商討出解決方法，但是綜觀整個實驗以及研究部份，尚有許多地方是需要改進及修正的。

第一，此實驗尚需要更多材料分析技術及檢驗儀器來確認透過電紡絲所紡出的奈米纖維之成份以及性質，這次交流的時間稍短，所以並沒有進行類似的檢驗，另外此次交流時間剛好遇到暑假假期期間，許多儀器都沒有開放，若是要使用就都要等到開學後才可以進行。

第二，對於實驗設計，實驗參數部分尚未嚴謹，綜觀此次的實驗數據，我發現尚有許多遺漏的地方，在處理實驗數據或決定實驗參數的時候並沒有特別嚴謹，應於每次都改變一個參數，才可以正確的判斷出在某種因素的改變下，對於整體實驗結果有什麼改變，下次對於實驗設計應先謹慎設計好後，再進行實驗！

第三，另外，在實驗的過程中，常常出現一個現象，在進行電紡絲的時候，不知道為什麼黑色薄膜都會從右上角開始出現，而且還有白色薄膜與黑色薄膜兩種不同顏色的薄膜出現在鋁片上，這個問題需要再進一步釐清與檢驗，並查出原因才行。

第五章 結論

經過以上實驗與實驗結果討論後，可以推論出以下幾點結論：

1. 進行石墨烯電紡絲的時間需要比矽奈米纖維電紡絲的時間要來的長好幾倍，一般進行矽奈米纖維電紡絲時間僅約需幾分鐘，而石墨烯電紡絲的時間則需要 30 分鐘以上，或更久，才可以得到類似的效果。
2. 石墨烯電紡絲實驗的工作電壓經過實驗後可以推論出在 22kV 到 23kV 之間為最適合的工作電壓，相對於矽電紡絲實驗為 18kV 較高許多。
3. GO 與 PVP 的混合漿料比例在 2:1 到 1:1 之間較恰當，另外混合攪拌的時間還需要更久才會更均勻，另外在攪拌之前可以先使用超音波震盪器震盪，讓混合漿料更加均勻。
4. 紡出來的奈米纖維需要再經過更多的材料分析以及相關物理性質或化學性質的檢驗才可以知道更多石墨烯的相關資料並且應用在更多方面上。

致謝

能完成這份專題報告，首先要先感謝學校有提供兩岸學術交流的機會，讓我可以到北京清華大學來學習交流，也謝謝材料系的林紅教授，讓我在這個暑假期間可以到實驗室來學習，並且嘗試一些新的實驗，更感謝指導我的師兄「俊峰」學長，時常與我討論專題研究上面的問題，並且提供我許多建議與方法，也讓我在陶瓷領域以及太陽能電池這方面有所認識，另外也要感謝實驗室裡的其他成員，李曼、焦焦、昌哥、申大姐、璟爺、郝爺、青島三人組…，在實驗中一起討論並解決實驗中所出現的問題。

在這次交流機會中，除了學術上的研究交流之外，還有到北京、上海、壩上草原等大陸各地去交流，認識了許多新的朋友也見識到了許多大陸的美景與歷史文化背景所創造出來的人文古蹟！

在這次的短期 45 天中也認識了好多人，除了同是從台灣過去交流的其他 9 位成員們之外，還有北京清華星火班的許多同學，各個都是箇中高手，都是各個省份的精英會聚在一起！除此之外，也感謝林紅老師實驗室中，有許多交流生，讓我在這短短的時間內認識了許多好朋友，有從美國 RICE University 來的 Robby、還有附近實驗室的從英國 Oxford University 來的 Chris，另外還有最近才進實驗室從日本 Tokyo University 來的王昌麟，雖然語言不同，但同是材料系的，也有許多學術上的分享，假日的時候也有一同出遊！

希望未來還有機會能夠到其他國家交流，除了學術上的交流之外還能夠多拓展自己的視野！

參考文獻

- [1] Novoselov, K. S. *et al.* (2004). ["Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films"](#). *Science* **306** (5696): 666
- [2] R. Colin Johnson [Graphene said to outperform copper interconnects](#) (2009) EETimes
- [3] Graphene's the right stuff for organic LEDs, says Stanford team, by R. Colin Johnson
- [4] R. Colin Johnson [IBM claims fastest graphene transistor](#) (2008) EETimes
- [5] 國立成功大學王紀教授, 奈米纖維前瞻製程---電紡絲技術暨相關應用
- [6] Qiaolian B. *et al.* (2010). Graphene-Polymer Nanofiber Membrane for Ultrafast Photonics
- [7] Jiang W. *et al.* (2009) Fabrication and characterization of electrospun mullite nanofibers