

中華民國 第 49 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 物理科

第三名

040109

製作奈米的肥皂泡膜

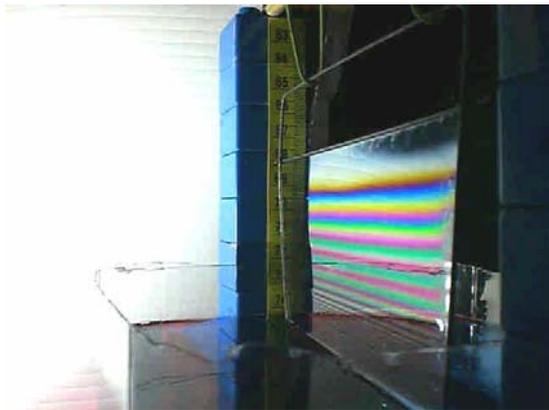
學校名稱：高雄市立高雄高級中學

作者： 高一 嚴凱傑 高一 朱柏憲	指導老師： 蔡萍實
-------------------------	--------------

關鍵詞：奈米、薄膜、干涉

摘要

我們希望能製作長時間不會破掉的肥皂泡泡，使得垂直懸掛的肥皂薄膜能一直流動到很薄的狀態 --- 希望能薄到幾十個奈米。然後從肥皂薄膜的光學干涉條紋變化，測量其厚度，並且研究肥皂薄膜流動的現象。研究結果顯示：我們可以作出能持續流動 60 秒以上不會破掉的肥皂薄膜，其中可以準確量測的最薄處大約 117 奈米，由外插法得出其頂端的厚度小於 50 奈米，用測量電阻的方法得出該處厚度大約為 15 奈米。而且我們還發現在薄膜厚度大於 350 nm 時，薄膜的電阻和厚度成很像反比的線性關係，但是在薄膜厚度小於 200 nm 時，薄膜的電阻和厚度的平方成反比。我們也由各層干涉條紋的流動，了解了肥皂薄膜流動的過程，並且觀察到可能是液晶層狀流動的現象。



壹、研究動機

肥皂泡泡是每個人從小就很熟悉、總是覺得很有趣的東西，隨風飛揚的肥皂泡泡每一個都有絢爛的色彩，每一個泡泡的顏色都不一樣，而且仔細觀察時，每一個泡泡的顏色都在不斷的變化，非常令人著迷。歷年來科展中也有很多人研究肥皂泡泡，但是大都是研究製作肥皂泡泡的方法或觀察肥皂泡泡的現象，對於肥皂泡泡的物理性質研究的較少。

另一方面，我們在書上讀到：肥皂泡泡是一種最簡單的液晶薄膜。液晶的研究雖然已經很久了，可是最近幾年液晶顯示器和液晶電視暢銷之後，一般民眾才慢慢體認到液晶的奇妙，一般媒體對液晶的科普報導也才慢慢增加，激發了大家想要更瞭解液晶的興趣。

我們對肥皂泡泡和液晶都很有興趣，我們想要從肥皂薄膜開始，學習一些液晶的物理現象。老師告訴我們高中組的科展應該比國中時有較多的原理探討和較多的分析討論，這個實驗所涵蓋的理論雖然較多一點，但也仍在高中物理有關波動、光學和電學的範圍內，正好可以讓我們複習及加強一下其中的觀念，於是我們就展開了這個有趣的研究。

貳、研究目的

1. 觀察肥皂薄膜的色彩變化。
2. 複習波的物理性質、波的行進、波的反射與透射。
3. 複習光的物理性質、光的顏色與波長、光的折射。
4. 學習波的干涉現象。
5. 研究製作不易破的肥皂薄膜。
6. 學習由色光的干涉條紋，測量薄膜厚度的方法。
7. 研究得到幾十奈米薄膜的方法。
8. 研究測量肥皂薄膜電阻的方法。
9. 測量肥皂薄膜的電阻，藉以得出肥皂薄膜的厚度。
10. 觀察垂直懸掛的肥皂薄膜流動的情形。
11. 培養對日常生活中事物之觀察與思考、並能進一步深入研究、探討的態度。
12. 學習科學方法及態度。
13. 訓練搜尋資料及尋求各種支援的能力。
14. 學習整理實驗數據、分析及思考實驗結果的能力。
15. 學習撰寫研究報告的方法。

參、研究設備、器材及實驗步驟

一. 製作肥皂薄膜的材料

我們在網路上找到可以製作長時間不會破掉的肥皂泡泡的材料及配方
清水 1800 c.c.，DAWN 洗碗精 180 c.c.，甘油 90 c.c.

其中甘油成份越多，肥皂泡泡越不容易破掉。

我們嘗試了四種配方，主要是增加甘油的濃度，希望能得到肥皂薄膜持續時間很長的結果。實驗時對每一種配方進行五次實驗，用數位相機分別錄下肥皂薄膜顏色的變化，並紀錄肥皂薄膜破掉之前的持續時間。實驗結果如下：



配方一：清水 1800 c.c.，洗碗精 180 c.c.，甘油 90 c.c.。

五次實驗 肥皂薄膜持續時間分別為：43 秒，63 秒，129 秒，67 秒，38 秒。
平均：68 秒。

配方二：清水 1800 c.c.，洗碗精 180 c.c.，甘油 120 c.c.。

五次實驗 肥皂薄膜持續時間分別為：55 秒，86 秒，106 秒，41 秒，41 秒。
平均：66 秒。

配方三：清水 1800 c.c.，洗碗精 180 c.c.，甘油 150 c.c.。

五次實驗 肥皂薄膜持續時間分別為：44 秒，81 秒，59 秒，74 秒，71 秒。
平均：66 秒。

配方四：清水 1800 c.c.，洗碗精 180 c.c.，甘油 180 c.c.。

五次實驗 肥皂薄膜持續時間分別為：36 秒，46 秒，60 秒，69 秒，96 秒。
平均：61 秒。

實驗結果：對於每一種配方，五次實驗的時間變異很大，平均值也沒有實質的意義，因此我們無法對這四種配方的優劣做結論。在之後的研究中我們就不再對配方作探討了。

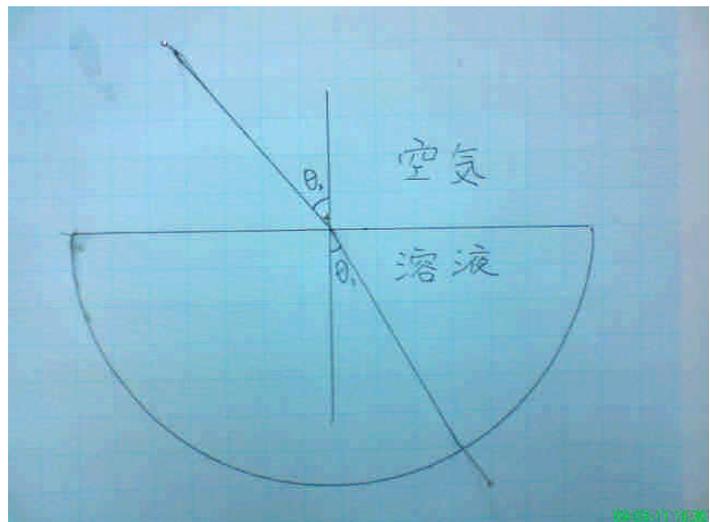
二. 測量肥皂溶液的折射率

我們用視差法測量肥皂溶液的折射率，如下圖所示：



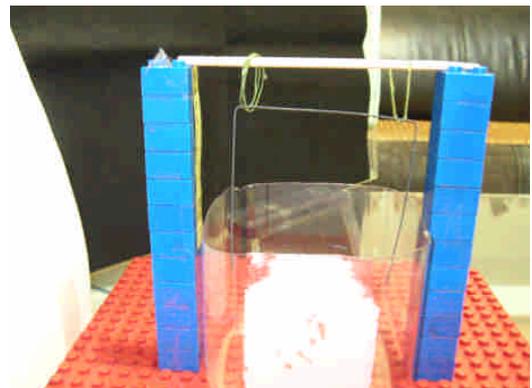
由光的折射定律得出 肥皂溶液的折射率為 1.30

由於我們的四種配方只是每次增加 30 c.c.的甘油，佔整體溶液的體積百分比很小（大約 1.4%），因此折射率的改變也會很小，因此我們就沒有一一測量每種配方的折射率，而把所有溶液的折射率均設為 1.30。



三 實驗器材

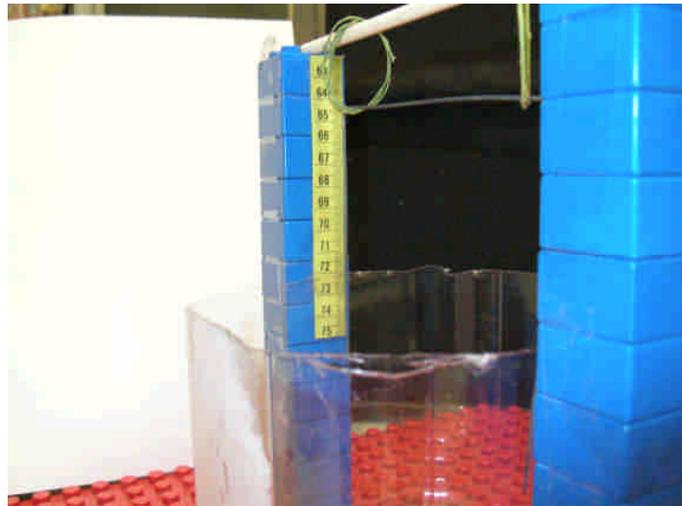
1. 實驗器材：
 - a. 肥皂泡泡溶液
 - b. 肥皂泡泡容器
 - c. U形鐵絲及架子
 - d. 日光燈及反光紙
 - e. 數位相機（需具有錄影功能）



四. 器材架設



觀測角度 60 度
(以肥皂薄膜的法線為基準)

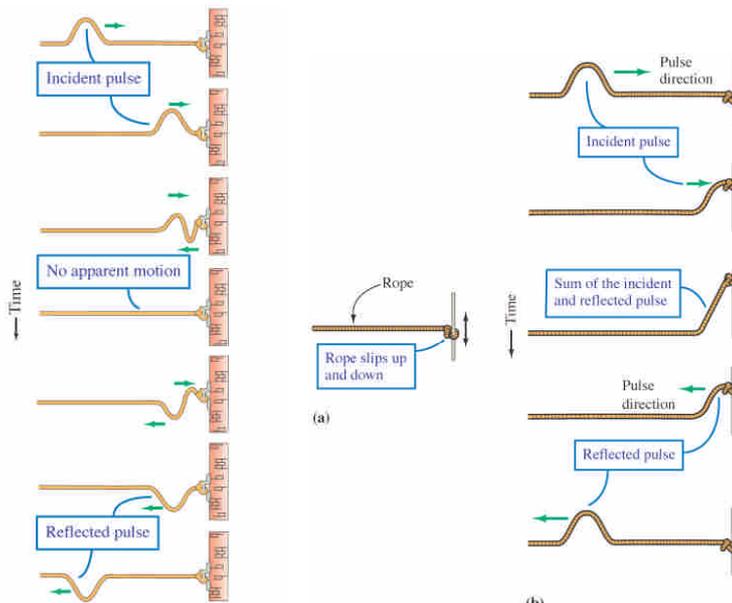


五. 實驗步驟

1. 將器材架設好，把肥皂溶液倒入容器中。
2. 把數位相機架設好，保持相機觀測角為 60 度，開始錄影。
3. 將 U 形鐵絲浸入肥皂溶液中，再慢慢將 U 形鐵絲拉起來，架到架子上。
4. 此時數位相機已在持續錄影中，而且垂直懸掛的肥皂薄膜已開始向下流動。
5. 待肥皂薄膜破掉後，停止錄影。
6. 在電腦上觀察所錄下的影片，重複地仔細觀察肥皂薄膜的變化，以電腦擷取適當時間點的畫面，進行肥皂薄膜的厚度分析。
7. 串連許多時間點，分析肥皂薄膜的流動情形。

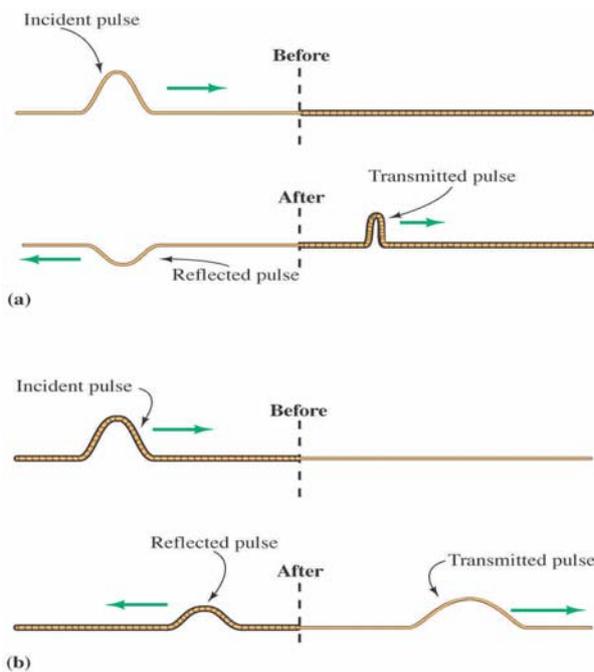
肆、實驗原理：波的反射、透射及光的干涉

4-1：波在自由端與固定端的反射



1. 繩子上的波傳遞到繩子的尾端時，由於能量守恆，會產生反射的現象。
2. 如果繩子的尾端是固定端，繩子上的波在尾端反射時，相位會相反。
3. 如果繩子的尾端是自由端，繩子上的波在尾端反射時，會維持原入射時的相位。

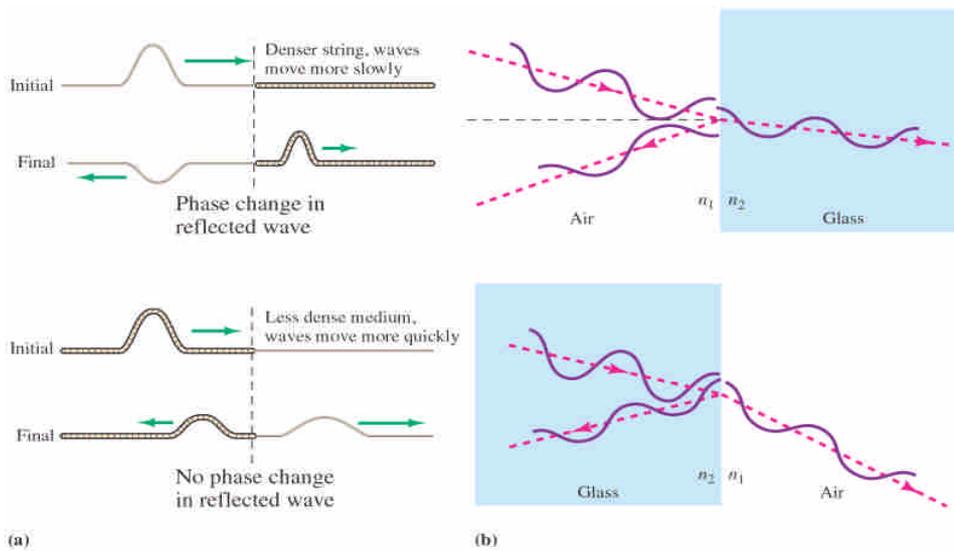
4-2：波在不同介質間的反射與透射



繩子上的波在兩種不同粗細的波之間傳遞時：

1. 繩子上的波由細繩子向粗繩子傳遞時，在介面上，細繩子會覺得尾端很沈重，不易自由驅動，反射波的相位會相反，透射波則會維持原相位。
2. 繩子上的波由粗繩子向細繩子傳遞時，在介面上，粗繩子會覺得尾端很輕鬆，能自由驅動，透射波和反射波都會維持原相位，繼續行進。

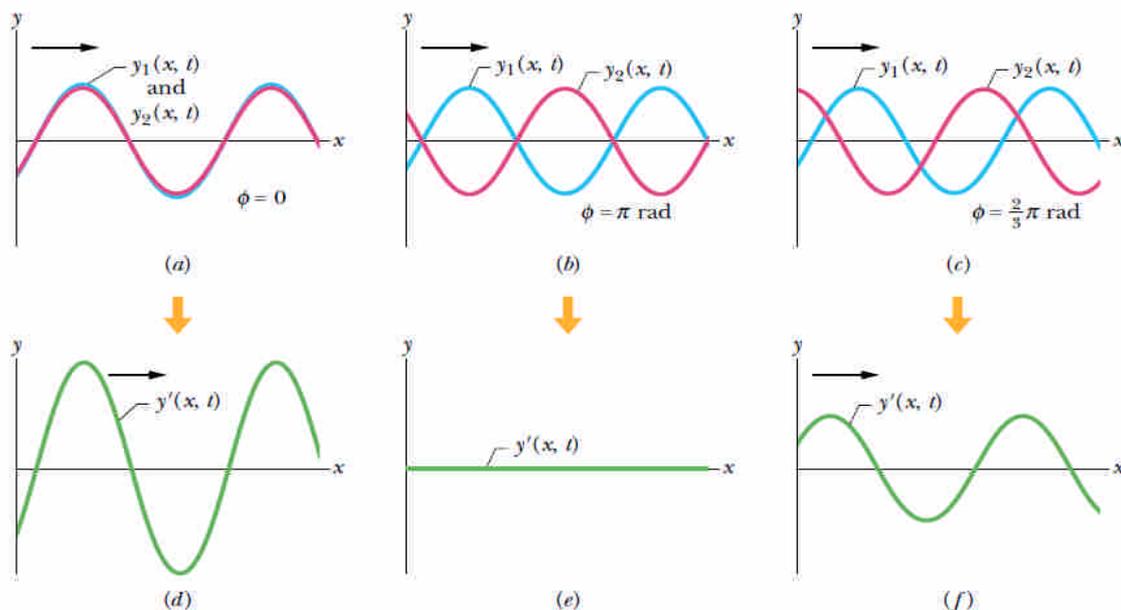
4-3：光在不同介質間的反射與透射



光在兩種折射率不同的介質間傳遞時，相位變化的情形和繩子上的波的情形相似：

1. 光由折射率低的介質入射到折射率高的介質時，透射波會維持原相位，反射波的相位則會相反。
2. 光由折射率高的介質入射到折射率低的介質時，在介面上，透射波和反射波都會維持原相位，繼續行進。

4-4：波的干涉

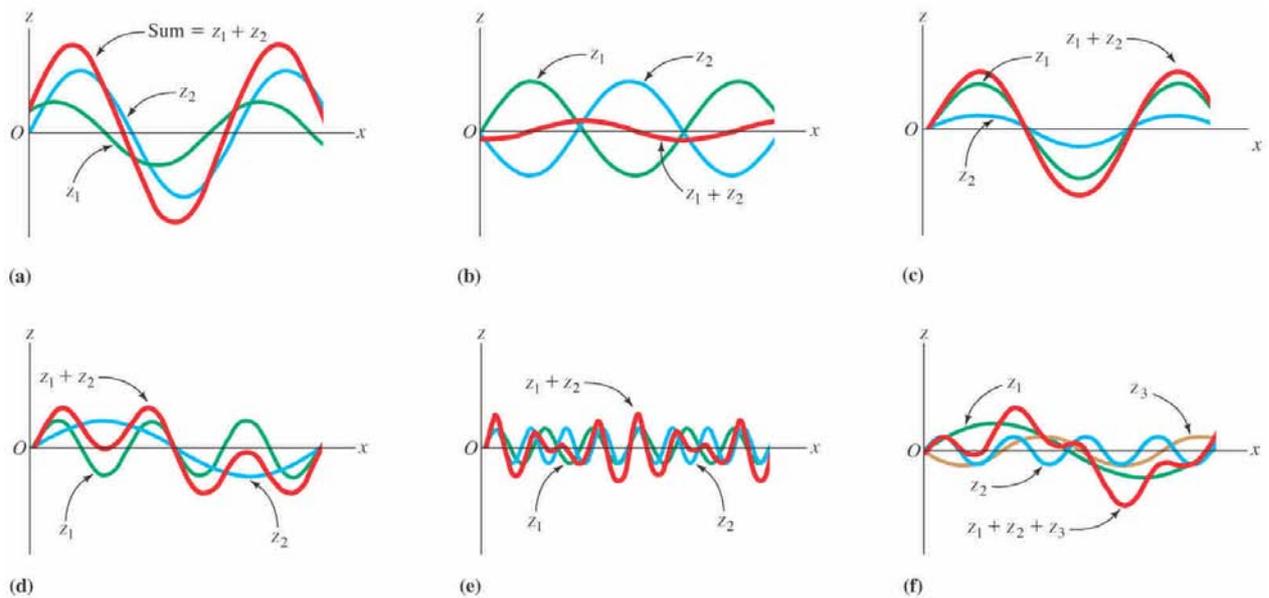


波長相同的波相加 (亦即干涉或交互作用) 時：

相位相同時，會得到最大的振幅，為建設性干涉。

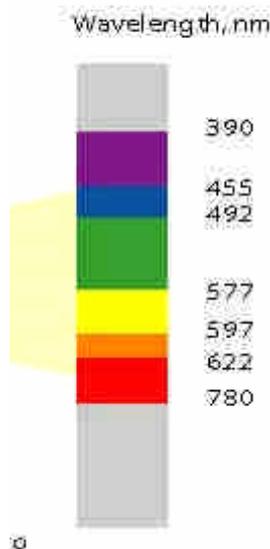
相位相反時，會互相抵消，為破壞性干涉。

其他相位干涉時，不會得到最大的振幅。



不同波長的干涉時，不會得到最大的振幅，亦即不會得到最大的強度（強度為振幅的平方）。

4-5：光的顏色與波長



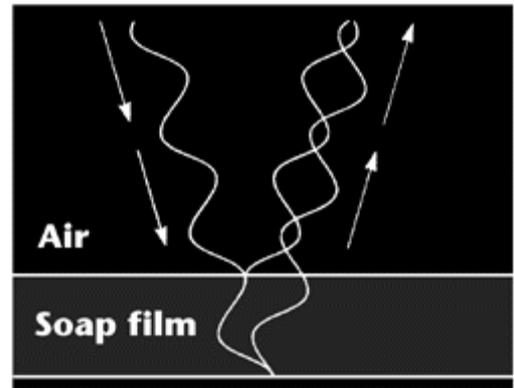
顏色（簡稱）	波長範圍	中間值
紅 (R)	622~780	700
橙 (O)	597~622	610
黃 (Y)	577~597	585
綠 (G)	492~577	530
藍 (B)	455~492	470
紫 (P)	390~455	420

4-6：光程差、折射率與相位

1. 在真空中波長為 λ 的光在折射率為 n 的介質中行進了一個 d 的距離時，由於介質中的波長變為 λ/n (光速變為 c/n)，光會覺得它行進的距離為 nd ，我們稱之為光程。兩段光程的差稱為光程差。
2. 當光程差很小時，我們會用波的相位變化表現光程差，波在一個波長中的相位變化為 $360 \text{ 度} = 2\pi$ ，因此在 nd 的光程中，波的相位變化為 $(nd/\lambda) * 2\pi = [d/(\lambda/n)] * 2\pi$ 。

4-7：光在肥皂薄膜表面的反射與干涉

1. 光由空氣中入射到肥皂薄膜時，在薄膜的前表面會有第一次反射，由於肥皂薄膜的折射率 (~1.3) 較高(空氣的折射率為 1)，光在這個界面上是由低折射率介質入射高折射率介質，因此在界面上，前表面反射波的相位會相反，相當於有一個 180 度的相位差。

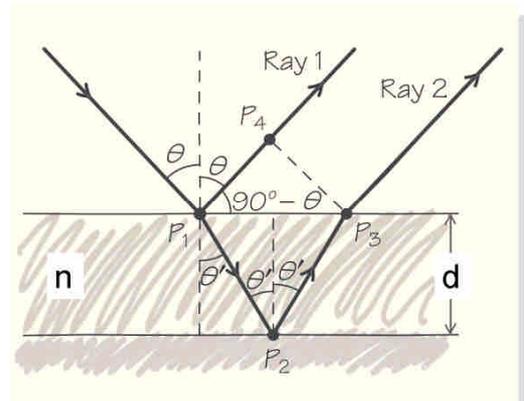


2. 透射過前表面的波，相位不會改變 (不管介質是哪一種情況，透射波的相位都不會改變)。

3. 透射波繼續行進到後表面時，產生第二次反射。光在後表面上是由高折射率介質入射低折射率介質，因此在界面上第二次反射波的相位也不會改變。

4. 後表面反射波反射回前表面再透射出來時，相位也不會改變 (它是透射波)。

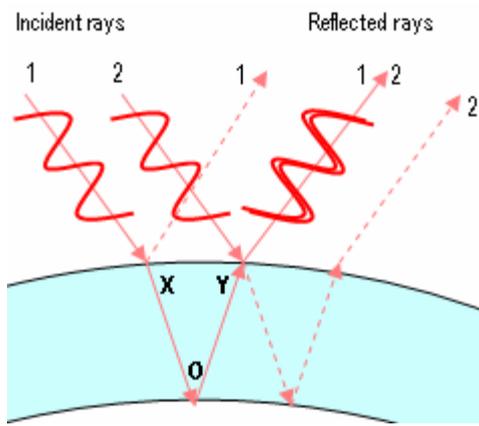
5. 因此後表面反射波回到空氣中時，它和界面有 3 次作用，但是在這 3 次作用中，介面都不會影響相位。



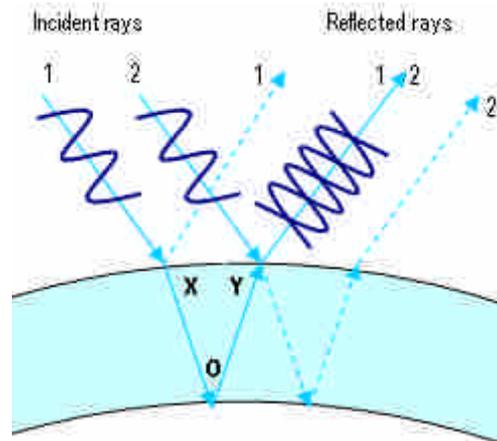
6. 後表面反射波回到空氣中時，唯一會改變它相位的因素就只有光在肥皂薄膜中所走的光程差了。

7. 當介質的厚度為 d 、折射率為 n ，光的入射角為 $\theta=60$ 度時，在考慮了右上圖中所討論的幾何關係後，干涉時前後表面的反射波之間的光程差為 $2d*0.96$ ，其中的 2 是由於光來回穿過介質兩次。這期間光的相位改變了 $[(2d*0.96)/\lambda]*2\pi$ 。

8. 如前所述，前後表面的反射波之間由光程差所造成的相位差為 $[(2d*0.96)/\lambda]*2\pi$ ，但是光在前表面反射時介面會造成波反相，相當於 180 度= π 的相位差，因此總共的相位差為 $[(2d*0.96)/\lambda]*2\pi-\pi$ 。



前表面和後表面反射的光波若是相位相同、或差 $2(m-1)\pi$ ，就會得到建設性干涉、也就是很強的反射光。(m 為大於 1 的整數)



前表面和後表面反射的光波若是相位相反、或差 π 的奇數倍，就會得到破壞性干涉、或是看不到反射光。

9. 因此我們在肥皂薄膜的干涉圖形中，若是看到一個波長為 λ 的色彩條紋，就表示 λ 的光為建設性干涉，建設性干涉的條件告訴我們此時的相位差為 $2(m-1)\pi$ ，其中 m 為大於 1 的整數。也就是 $[(2d \cdot 0.96)] \cdot 2\pi - \pi = 2(m-1)\pi$ 。

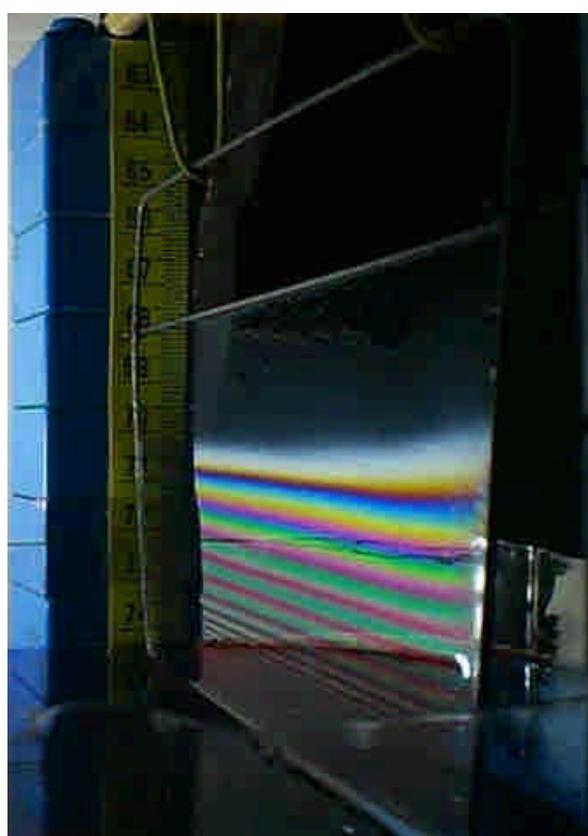
10. 由此得出 $d = (m-1/2)\lambda / (2 \cdot 0.96)$ ，近似於 $d = (m-1/2)\lambda / 2$ 。

伍、垂直懸掛的肥皂薄膜之厚度量測

由於我們不再對溶液的配方作探討，因此我們挑選了甘油量最少的溶液進行研究，我們預期甘油量較少時，垂直懸掛的肥皂薄膜的會流動得較快（甘油的黏滯性很大，非常濃稠）。我們在配方一的五個實驗結果中挑選出肥皂薄膜的持續時間為 63 秒的實驗結果進行分析。我們從影片中分別挑出第 21 秒、第 26 秒、第 31 秒、第 36 秒、第 41 秒、第 46 秒六個瞬間的圖形進行分析。

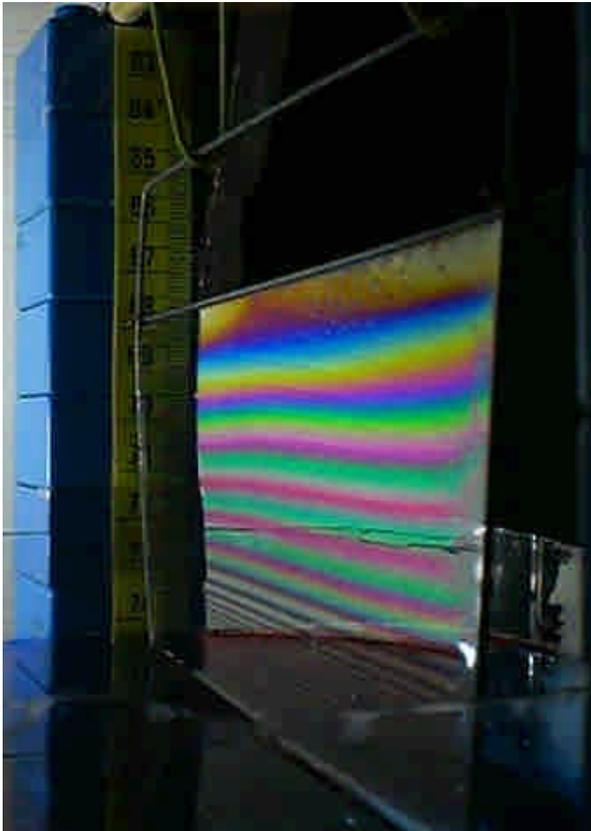
5-0：如何測量垂直懸掛的肥皂薄膜之厚度

1. 我們把肥皂薄膜掛起來之後，一開始會看到各種顏色混亂的分佈和流動，但是很快地就穩定下來，色彩呈水平的帶狀分佈，並且平行地向下穩定流動，右圖為實驗樣品第 31 秒的情形。我們可以想像此時薄膜的情況是上面最薄，越下面越厚。
2. 波長最短的色光為藍光，因此上方數起的第一道藍色（我們稱作 B1）是最重要的指標，它是藍光可以產生第一次建設性干涉的最薄的位置，也是薄膜可以產生色光建設性干涉最薄的地方，我們把藍光的波長 470 nm 帶入計算，可以得到此處的厚度為 117 nm，這也是薄膜厚度可以準確量測的最薄處。
3. B1 的上方有一大片黑色的薄膜，黑色表示此處沒有光反射，所有的光都透射過去。這是由於這裡薄膜太薄了，後表面反射光的相位變化很少，前後表面兩道反射光之間的相位差主要是來自前表面的反向反射，因此兩道光之間趨近於相位相反的破壞性干涉，以致於這一大片薄膜都看不到反射光。因此我們無法以光的干涉來準確測量這裡的厚度，只能用外插法做估計。
4. 由 B1 向下我們可以清楚的看到第一道黃光（Y1）、第一道紅光（R1）。



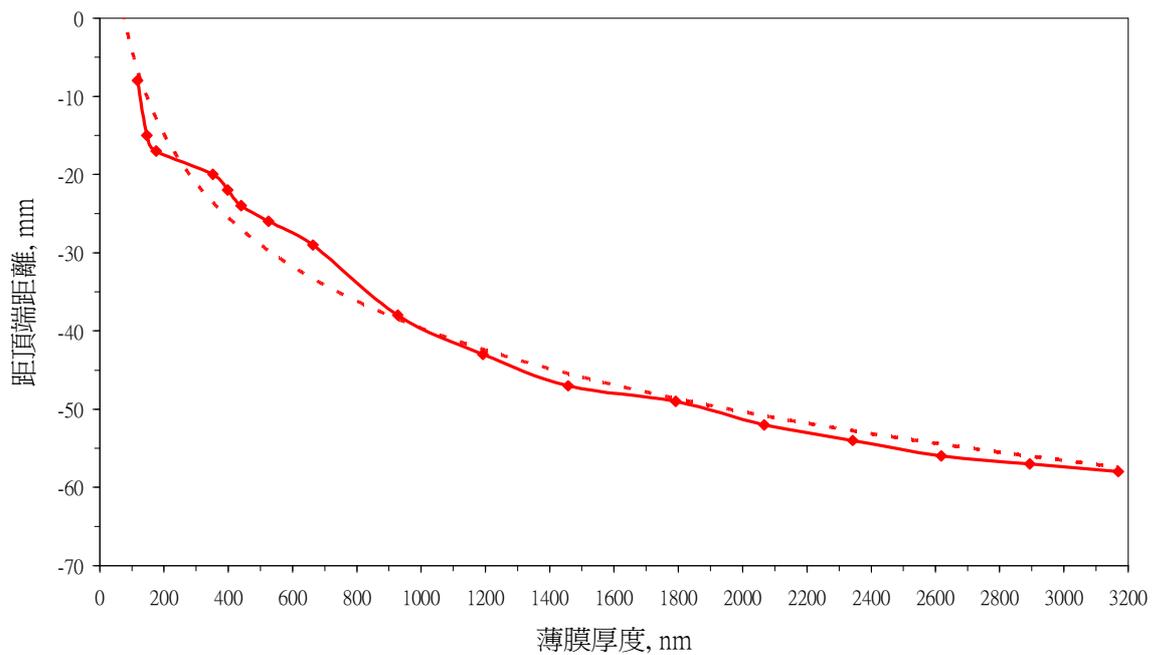
5. 再下來可以看到藍光的第二次建設性干涉 (**B2**)，以及第二道綠光 (**G2**)、第二道黃光 (**Y2**)、第二道紅光 (**R2**)。
6. 在接下來的第 3 組干涉條紋中我們就無法清楚地分辨各種顏色了。
7. 在第 3、4、5、6 這四組條紋中，光的強度較弱。其中我們只看到洋紅色（這是藍光和紅光的混合）和一種不純的綠色，我們稱之為 **MG**（我們在這裡看到 **MG** 是由於眼睛對綠光最敏感）。在這四組干涉條紋中，我們只讀取 **MG3**、**MG4**、**MG5**、**MG6**、的位置，並用眼睛最敏感的 **550 nm** 帶入計算。
8. 第 7 組干涉條紋以下，光強度更暗，我們只能看到黑白相間的條紋。此處薄膜已經很厚了，白色條紋是由於在小範圍之內，**RGB** 各色光建設性干涉條紋輪流出現而且混在一起，因此眼睛看起來是白色。黑色條紋是來自各色光在此處都不能形成建設性干涉。從第 7 組條紋開始我們只讀取白色條紋的位置 **W7**、**W8**、**W9**...，並且用 **550 nm** 帶入計算。
9. 懸掛肥皂薄膜的鐵絲的位置在 **67.9 mm** 處，我們在計算相對高度時以此處作為零點。
10. 我們在計算薄膜厚度時有效數字取到 **nm** 的個位數。

5-1：第 21 秒的圖形分析

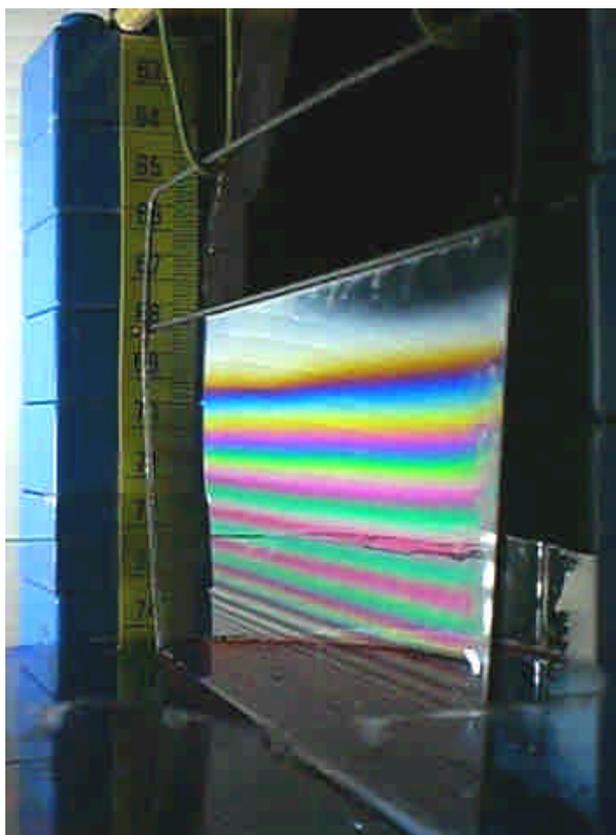


高度(mm)	色彩順序	厚度(nm)
67.9		
68.7	B1	117
69.4	Y1	147
69.6	R1	176
69.9	B2	353
70.1	G2	398
70.3	Y2	440
70.5	R2	525
70.8	MG3	663
71.7	MG4	927
72.2	MG5	1192
72.6	MG6	1457
72.8	W7	1791
73.1	W8	2067
73.3	W9	2342
73.5	W10	2618
73.6	W11	2893
73.7	W12	3169

21秒 肥皂薄膜之垂直厚度變化全圖

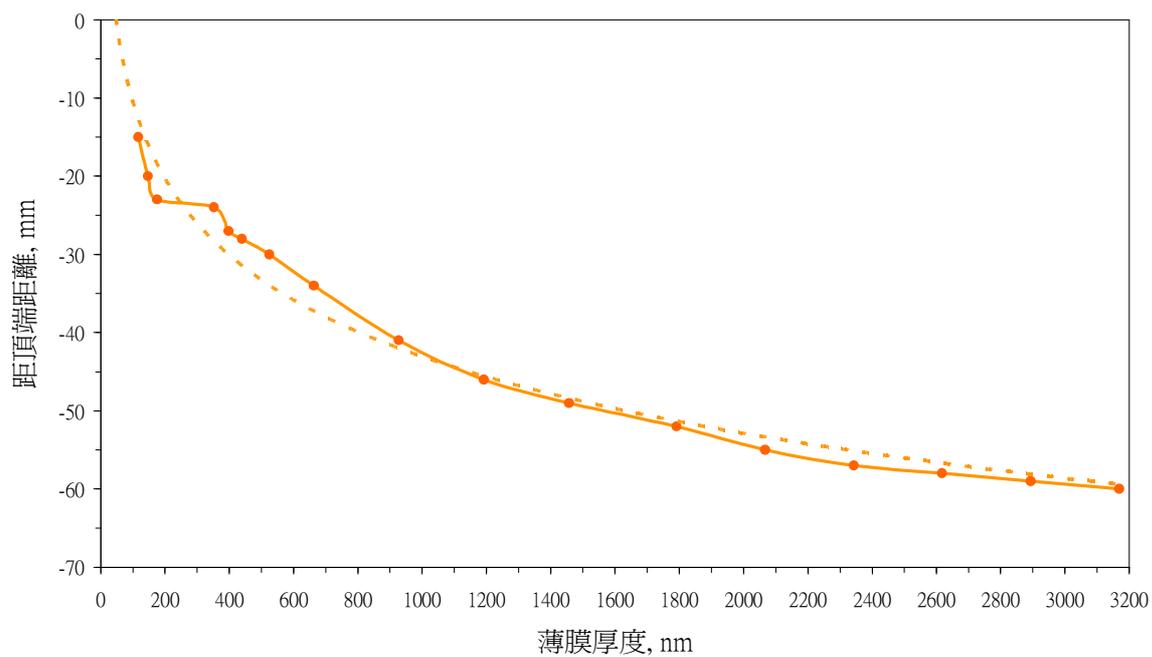


5-2：第 26 秒的圖形分析

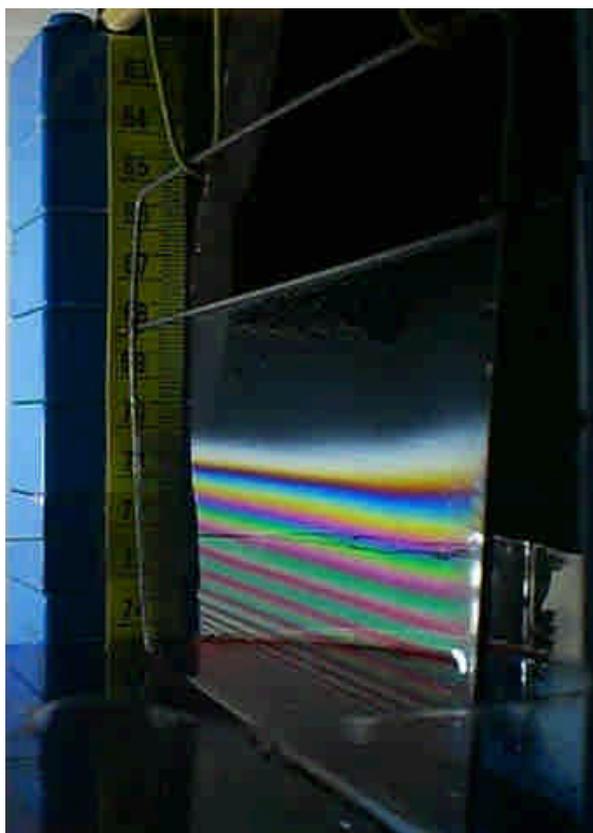


高度(mm)	色彩順序	厚度(nm)
67.9		
69.4	B1	117
69.9	Y1	147
70.2	R1	176
70.3	B2	353
70.6	G2	398
70.7	Y2	440
70.9	R2	525
71.3	MG3	663
72	MG4	927
72.5	MG5	1192
72.8	MG6	1457
73.1	W7	1791
73.4	W8	2067
73.6	W9	2342
73.7	W10	2618
73.8	W11	2893
73.9	W12	3169

26秒 肥皂薄膜之垂直厚度變化全圖

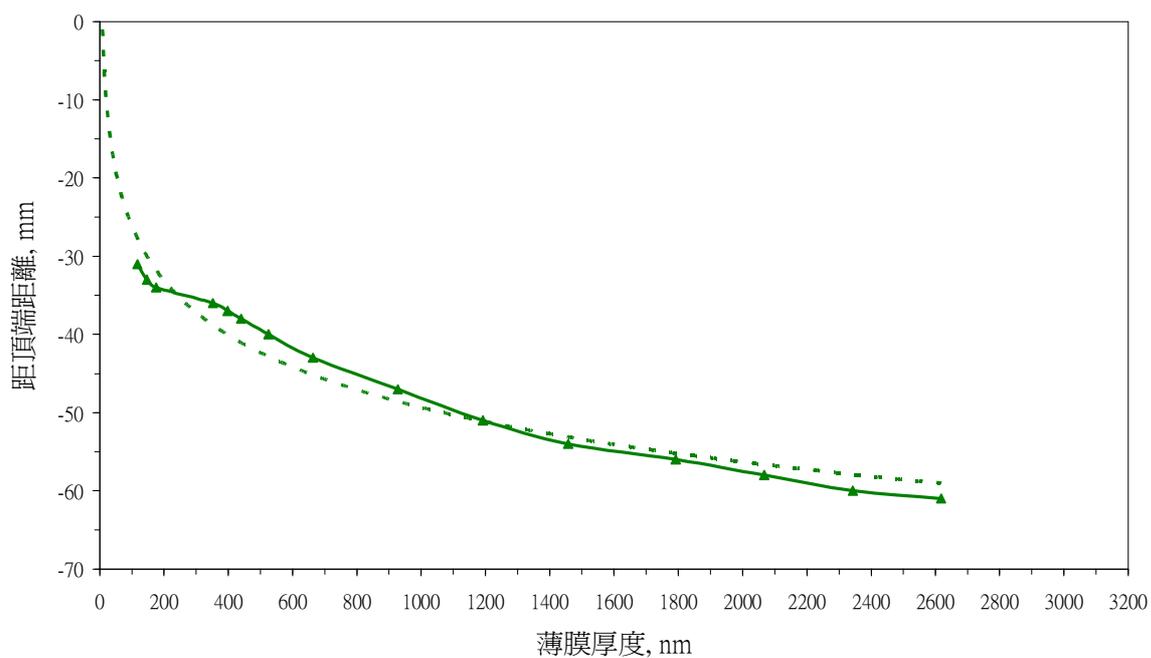


5-3：第 31 秒的圖形分析

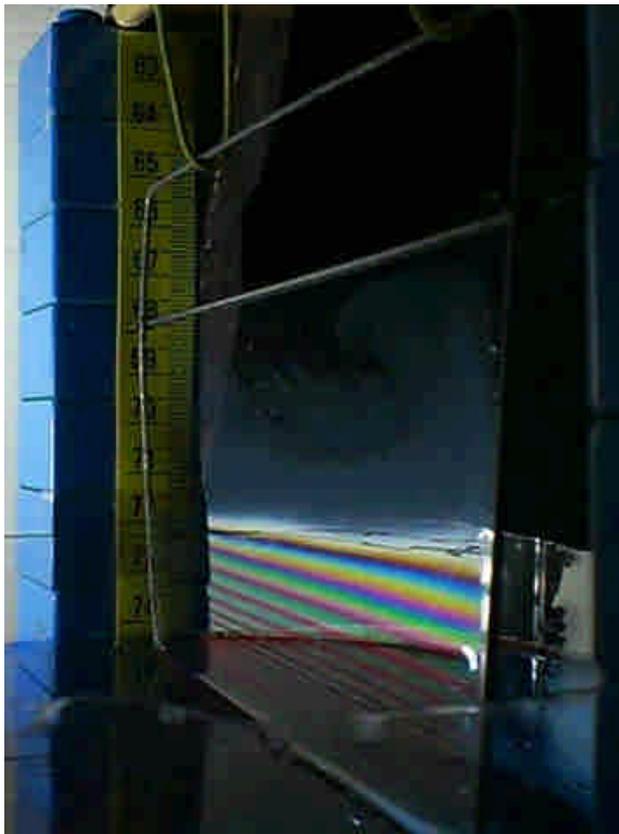


高度(mm)	色彩順序	厚度(nm)
67.9		
71	B1	117
71.2	Y1	147
71.3	R1	176
71.5	B2	353
71.6	G2	398
71.7	Y2	440
71.9	R2	525
72.2	MG3	663
72.6	MG4	927
73	MG5	1192
73.3	MG6	1457
73.5	W7	1791
73.7	W8	2067
73.9	W9	2342
74	W10	2618

31秒 肥皂薄膜之垂直厚度變化全圖

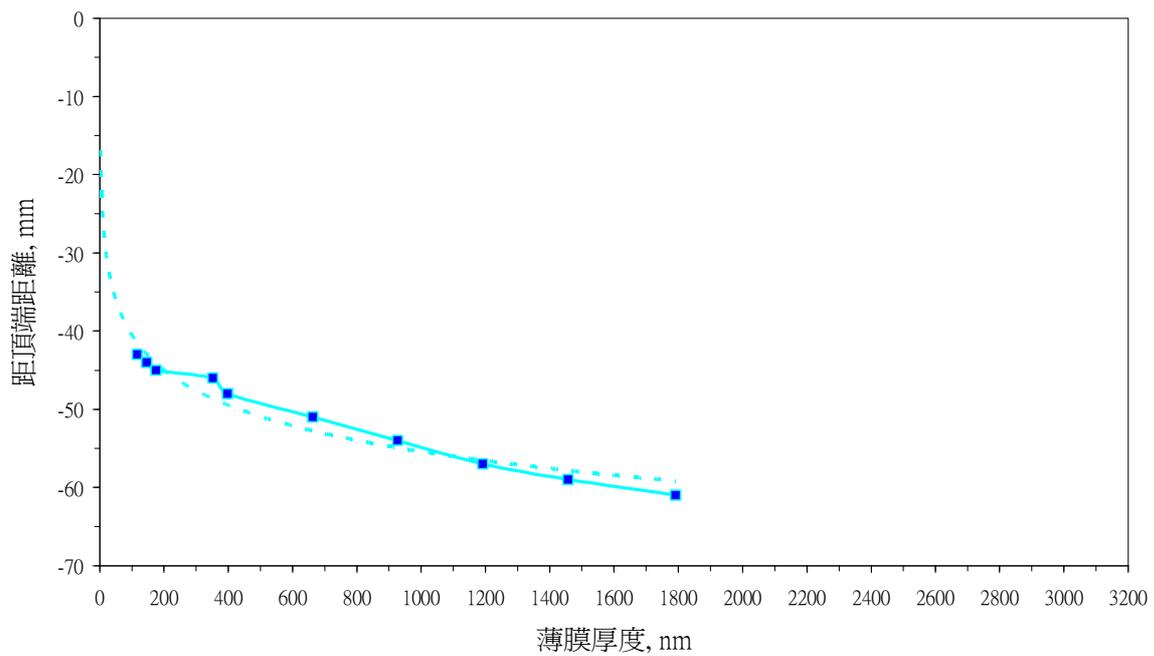


5-4：第 36 秒的圖形分析



高度(mm)	色彩順序	厚度 (nm)
67.9		
72.2	B1	117
72.3	Y1	147
72.4	R1	176
72.5	B2	353
72.7	G2	398
73	MG3	663
73.3	MG4	927
73.6	MG5	1192
73.8	W6	1457
74	W7	1791

36秒 肥皂薄膜之垂直厚度變化全圖

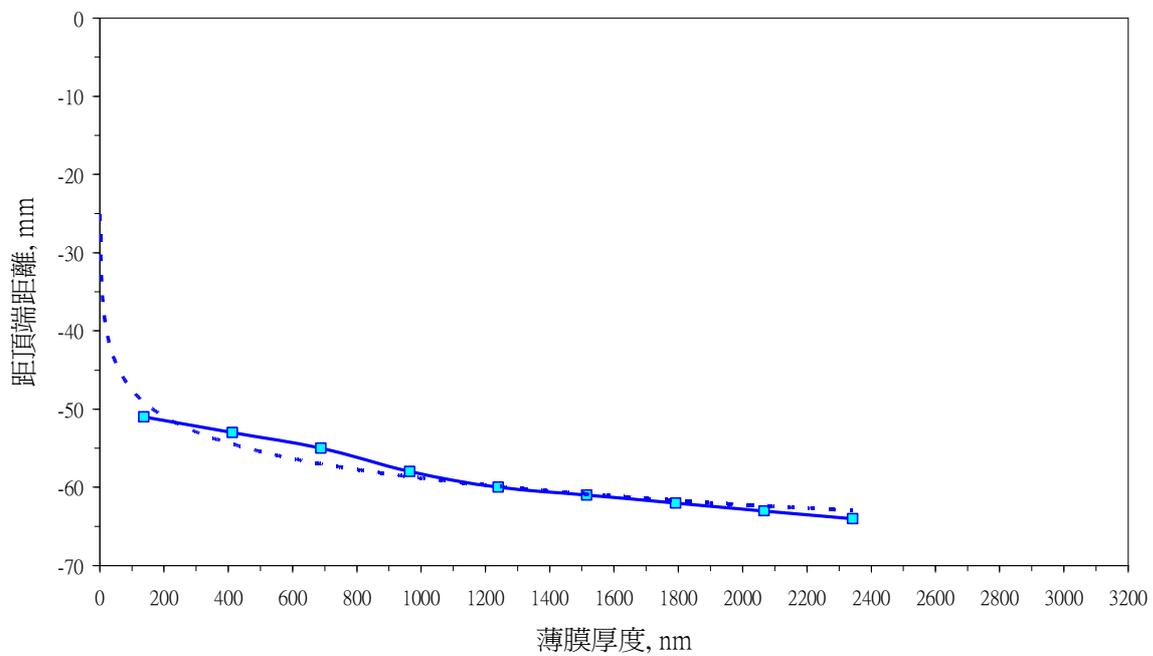


5-5：第 41 秒的圖形分析



高度(mm)	色彩順序	厚度 (nm)
67.9		
73	W1	138
73.2	W2	413
73.4	W3	689
73.7	W4	964
73.9	W5	1240
74	W6	1457
74.1	W7	1791
74.2	W7	2067
74.3	W9	2342

41秒 肥皂薄膜之垂直厚度變化全圖

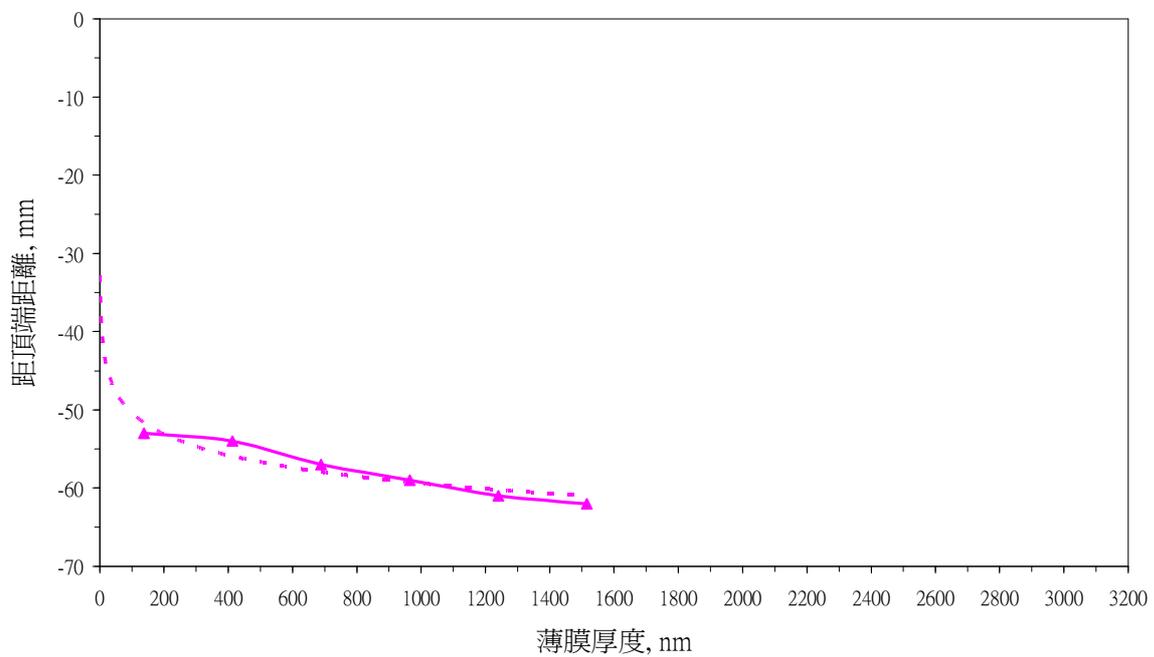


5-6：第 46 秒的圖形分析



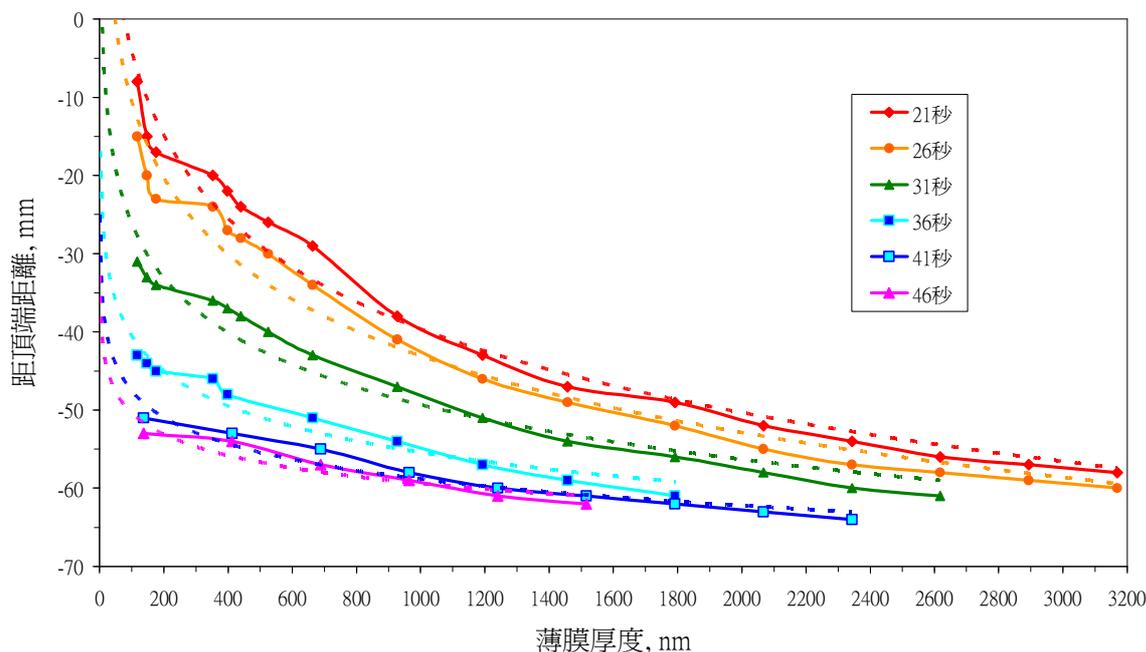
高度(mm)	色彩順序	角度(nm)
67.9		
73.2	W1	138
73.3	W2	413
73.6	W3	689
73.8	W4	964
74	W5	1240
74.1	W6	1457

46秒 肥皂薄膜之垂直厚度變化全圖



5-7：整體實驗結果分析

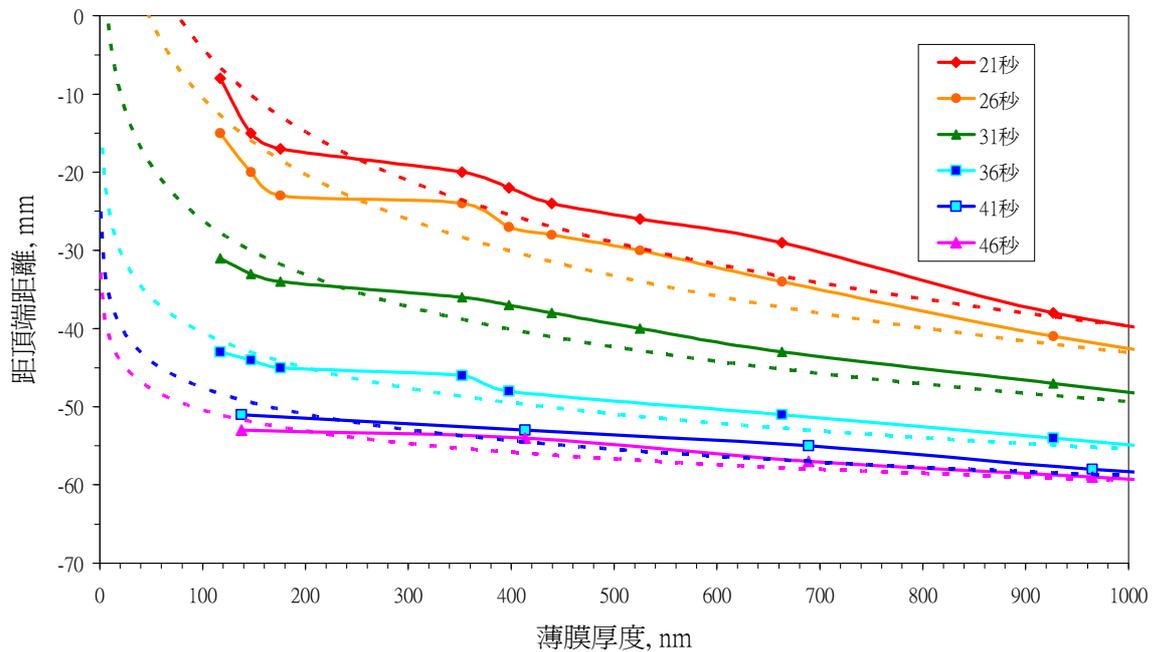
肥皂薄膜之垂直厚度變化全圖



1. 由圖中我可以清楚的看到每一個時間點肥皂薄膜的厚度變化，肥皂薄膜厚度變化的情形和我們想像的情況類似 --- 上方較薄，越下面越厚。
2. 我們把每一個時間點的厚度數據分佈，用電腦軟體求出擬合曲線，用虛線表示在上圖中，並且把擬合曲線向上延伸，外插求出最上端的薄膜厚度。
3. 上圖也可以看出，當時間增加時，肥皂溶液向下流動的情形。而且時間越久，上方薄膜越是纖薄。
4. 由於 21 秒、26 秒、31 秒的數據較多，擬合曲線的可靠度較高，外插法得到的結果也比較可信。
5. 在 41 秒、46 秒，我們可以讀取的數據很少，因此擬合和外插的結果也不可靠，突顯出這種方法的限制。
6. 圖中還有一個特殊的現象：在 R1 的位置 (176 nm) 到 B2 的位置 (353 nm)，從 21 秒到 41 秒之間，它們的相對高度都保持在 1 mm 左右。我們覺得這似乎是一種液晶層流的現象 --- 好像有幾層薄膜黏在一起，一起向下流動，他們之間沒有相對滑動，其他位置則看不到這種現象。
7. 41 秒之後，薄膜的下方流動得很少，可是此時距離薄膜底端還有 20 mm 遠，顯示薄膜的下方有堆積的現象，這也暗示薄膜的確有一層一層地流動的可能。

8. 我們把薄膜上方的圖形放大顯示於下圖：

肥皂薄膜上方之垂直厚度變化全圖



9. 由外插法得出：在 21 秒時，最上端的肥皂薄膜厚度為 80 nm 左右；在 26 秒時，最上端的肥皂薄膜厚度為 50 nm 左右。而且由於外插的位置離數據點很近，這兩個數值的可信度很高，顯示我們成功的做出了厚度為幾十個 nm 的薄膜，而且成功的測量了其厚度。

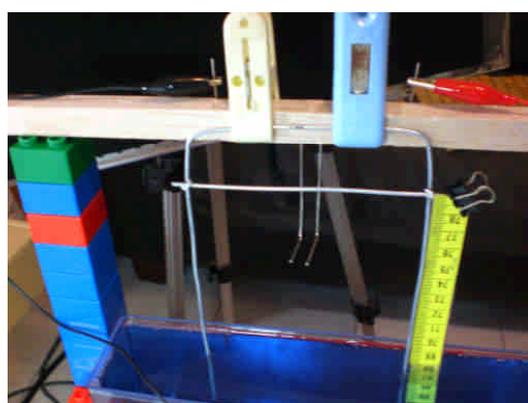
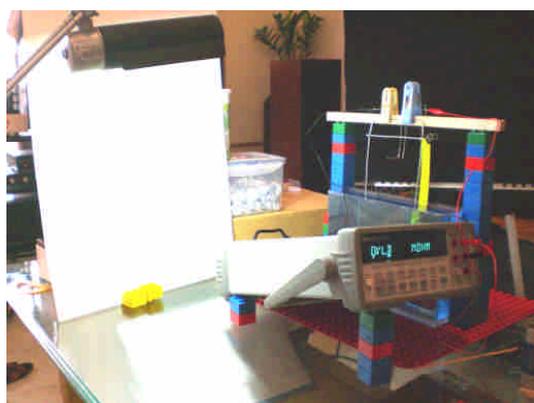
10. 在 31 秒時，最上端的肥皂薄膜厚度為 10 nm 左右，這個結果很具有吸引力，不過我們覺得離數據點外插得太遠了，可信度不高。不過我們可以確定其厚度是在 50 nm 以下。

11. 36 秒、41 秒、46 秒的數據更少，外插的結果更是不可信了。

12. 這些分析也顯示出外插法的限制：外插得太遠時，結果並不可靠。

陸、垂直懸掛的肥皂薄膜之電阻研究及討論

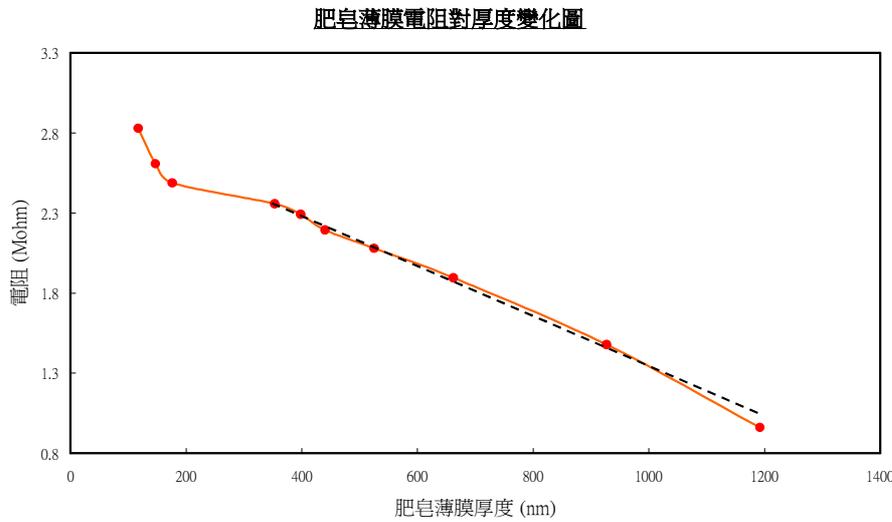
在上述的薄膜厚度的研究中，我們體認到：利用光學的干涉方法，可以準確地測量到光的波長的四分之一，越短波長的光，可以提供我們越精確的量測，但是光的波長也限制了我們測量的下限，使得我們只能測到 117 nm 左右，若想突破這個限制，需用其他的測量方法。於是我們想到了：能不能測量薄膜的電阻。經過了許多次的嘗試和失敗之後，我們研究出了如下圖中的測量方法。



我們製作了一組可以穿入肥皂薄膜的電阻探針，並且借了一個可以測量高電阻值的電錶，藉以連接探針，測量電阻。我們想先測量各色光干涉條紋的電阻，用第五節的方法測出各色光干涉條紋的厚度，得出電阻和薄膜厚度的關係。再由上方黑色薄膜的電阻值，得到黑色薄膜的厚度。如下兩張圖中所表示的情形：

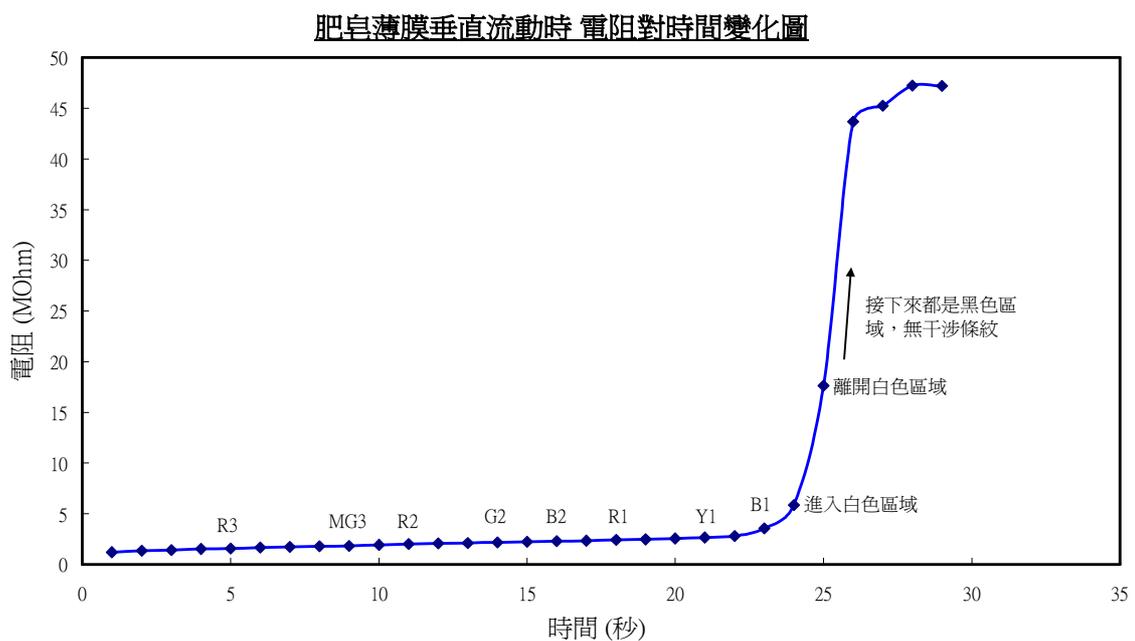


右表是一組色光干涉條紋的電阻實驗數值，我們把電阻對厚度的變化表示為圖形如下：



色光條紋	薄膜厚度(nm)	電阻值(MOhm)
B1	117	2.829
Y1	147	2.608
R1	176	2.488
B2	353	2.358
G2	398	2.292
Y2	440	2.194
R2	525	2.08
MG3	662	1.896
MG4	927	1.479
MG5	1192	0.962

由圖中我們可以看出：在薄膜厚度大約為 350 nm 以上，電阻值和薄膜厚度成很好的線性關係，薄膜越薄、電阻值越大；薄膜越厚、電阻值越小。這和一般材料的電阻和截面積（在此為薄膜厚度）成反比的觀念很類似，圖形也很像反比曲線的一部分。但是在 200 nm 以下這個線性關係明顯地不成立，而且這個線性關係在薄膜最薄時只會給我們小於 3 MOhm 的電阻，和我們觀察到的幾十個 MOhm 相差太多。下圖為薄膜垂直流動時，電阻對時間的變化，圖中顯示我們需要能得到厚度很薄時會有大約 45 MOhm 的方法。

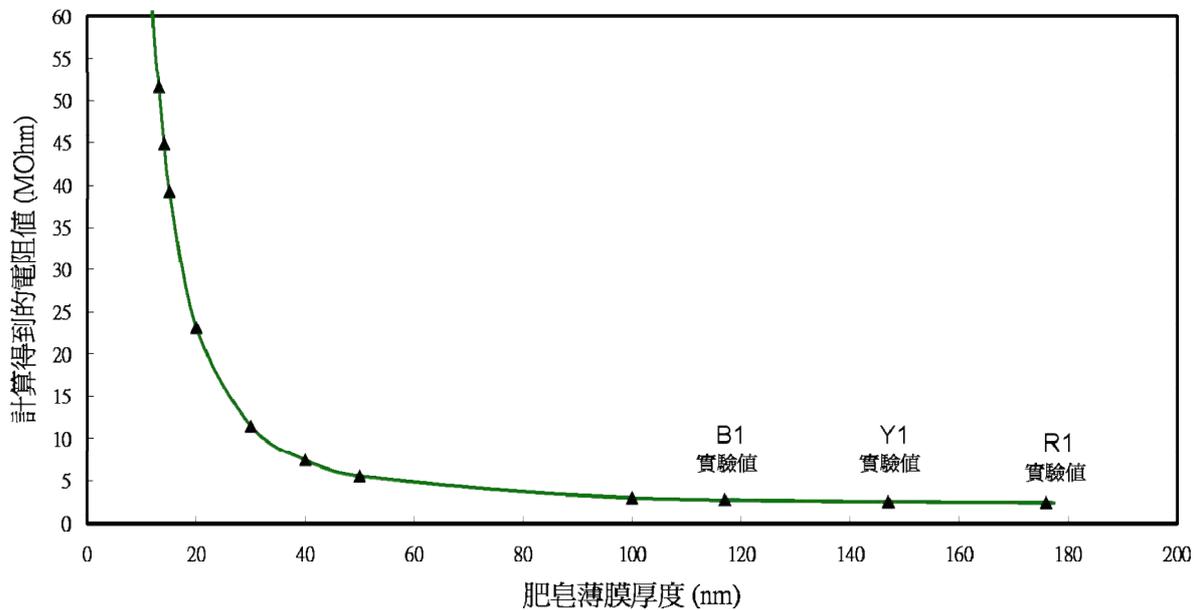


經過很多次的研究之後，我們發現用色光干涉條紋的最上方 3 個數據 (B1, Y1, R1)，可以得到一個不錯擬合的結果：

$$Y = 2.22 + 8349.71/(X^2) \quad \text{其中：} Y \text{ 為電阻，} X \text{ 為薄膜厚度}$$

下圖為利用此擬合程式計算的薄膜電阻值，圖中顯示電阻為 45 MOhm 時，薄膜厚度大約為 15 nm。此外，根據這個擬合的結果，在薄膜很薄時（200 nm 以下），薄膜的電阻和厚度的平方成反比，這是很有趣的結果。

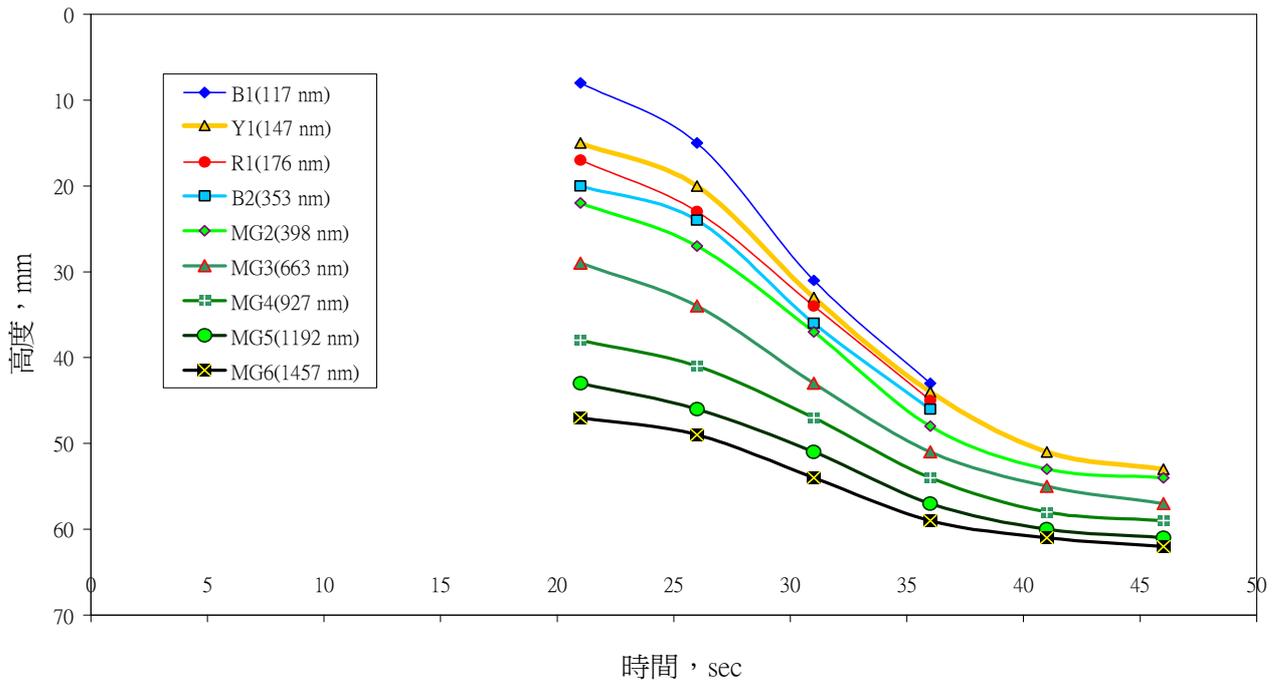
利用擬合程式計算的肥皂薄膜電阻值



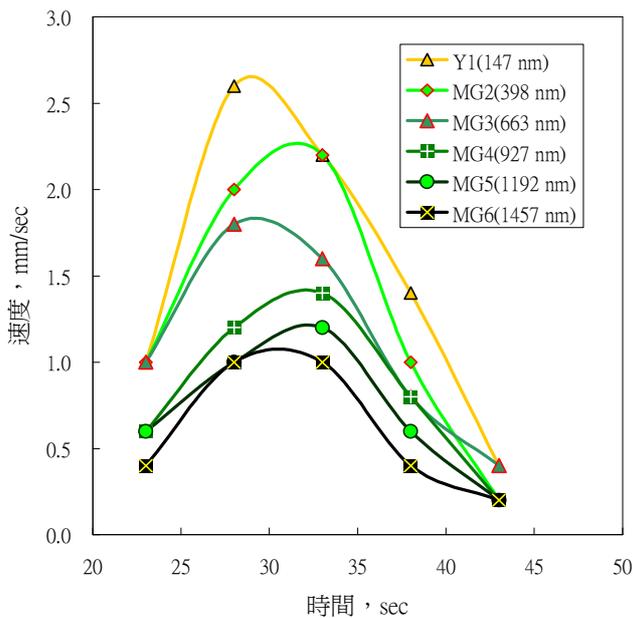
染、垂直懸掛的肥皂薄膜之流動研究及討論

運動學的標準分析包括位置、速度、加速度隨時間的變化，我們把幾個位置比較明確的色層之位置、速度、加速度隨時間的變化分析於下圖中：

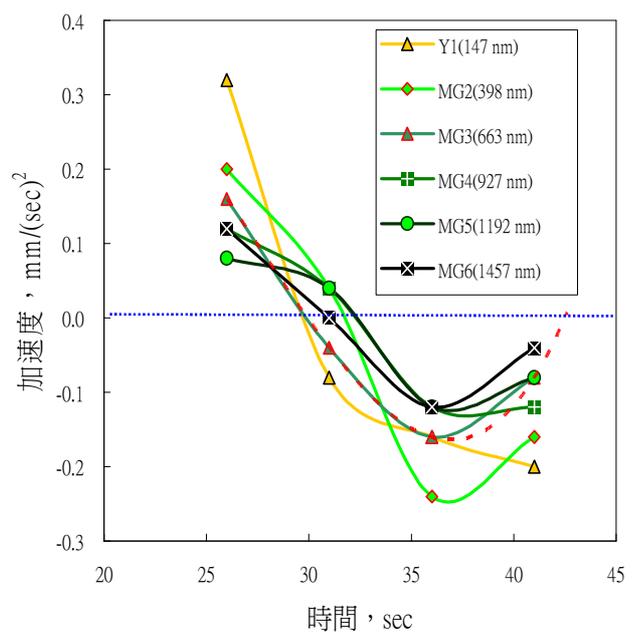
各色層流下之高度對時間變化



各色層流下之速度對時間變化圖

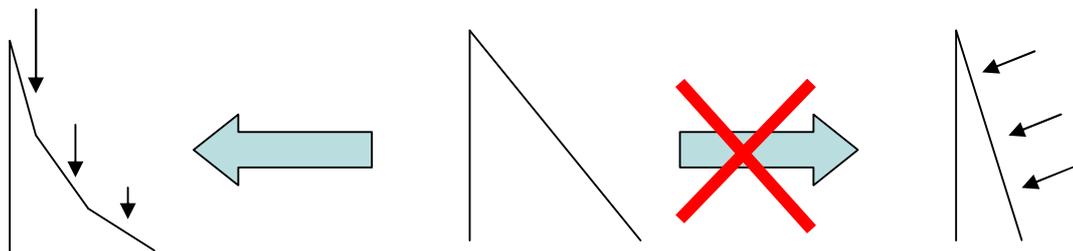


各色層流下之加速度對時間變化圖

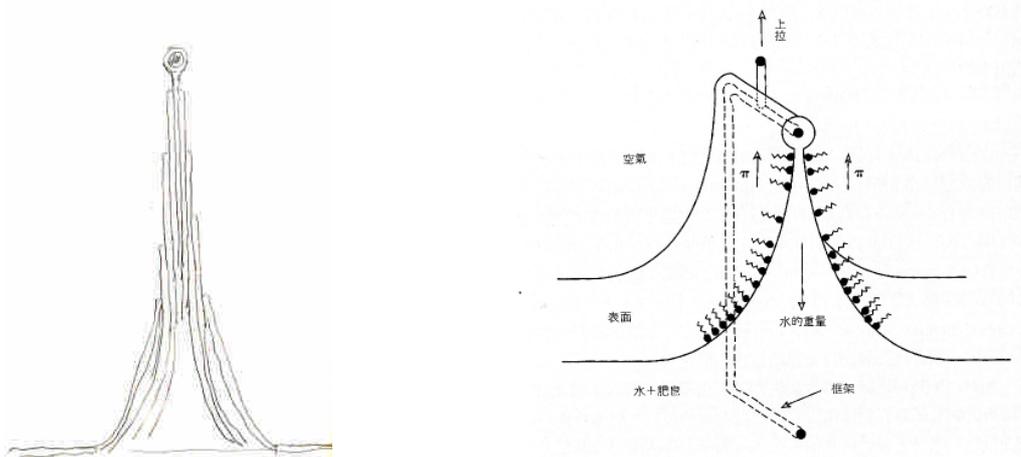


我們就圖中的結果討論於下：

1. 開始流動到 21 秒時，上層的加速度很大，下層的加速度較小，使得上層薄膜的流速快速的增加，下層流速增加得較少。
2. 在 30 秒左右，各色層的速度大約同時到達極大值，此時各層的加速度趨近於 0。
3. 然後各層都開始減速（加速度為負值），而且也是上層減速得最快，各層速度慢慢變小，幾乎同時逐漸趨近於 0 --- 各層一起停止流動，真是有趣。
4. 最後加速度和速度都趨近於 0。
5. 因此我們可以知道在整個過程中，肥皂薄膜流動的情形是如下圖的左側所顯示的情況，而不是右側圖的情況。



6. 上圖中的兩種流動情形，可以用下兩張圖表現得更清楚。肥皂薄膜的流動是像左圖一般一層一層地向下流動，而不是像右圖整個側面像翅膀般地收下來。



7. 雖然這個流動的過程似乎並不意外，但是我們的了解是有分析的基礎的，更加可靠。
8. 雖然我們只有 6 個時間點的數據，但是，仍然分析出許多重要的現象。
9. 上層的色層流動時，速度及加速度的值均較大，再度反映有層流的現象及下層堆積的現象。
10. 所謂的“下層堆積的現象”，是我們想像肥皂薄膜是像液晶一樣一層一層的流動，所想像出來的。這些現象可能也可以用表面張力解釋，不過目前我們能力不足以分析。

捌、結 論

1. 研究結果顯示：我們可以作出能持續流動 60 秒以上不會破掉的垂直懸掛肥皂薄膜，其中用光學的方法可以準確量測的最薄處大約 117 奈米。
2. 色光干涉條紋的上方有一大片透明的薄膜，無法用干涉的方法量測，我們由薄膜高度對厚度的曲線用外插法可得知：該處的薄膜厚度小於 50 nm。
3. 上述透明的薄膜，用測量電阻的方法可以得出那裡的厚度大約為 15 nm。
4. 因此，我們成功的作出了厚度為幾十個奈米的肥皂薄膜，而且成功的測量了其厚度。
5. 肥皂薄膜電阻的測量也顯示出：在厚度大於 350 nm 時，薄膜的電阻和薄膜的厚度成很像反比的線性關係，但是在薄膜厚度小於 200 nm 時，薄膜的電阻和厚度的平方成反比。
6. 我們從各層干涉條紋流動的情形，可以準確的描述肥皂薄膜流動的過程，並且觀察到一種可能是液晶層狀流動的現象。
7. 我們以後還需要尋求新的方法，把 100 nm 以下的薄膜測量得更準確。
8. 這個研究工作中的背景知識較複雜，是好幾種現象的綜合，但是各別的理论都在高中物理的範圍之內，都是我們可以了解的，只是要把幾種理論綜合起來，分析清楚後就不難了。我們也藉此機會學習、複習及加強了許多物理觀念。
9. 肥皂薄膜上呈現出許多複雜的現象，還有許多現象是我們無法解釋的，仍需我們學習更多的知識，以後繼續研究。
10. 這真是一個有趣的研究工作。

玖、參考資料

1. 肥皂泡網站 Soap Bubbles : <http://www.exploratorium.edu/ronh/bubbles/bubbles.html>
2. 巴竇(Jacques Badoz)、熱納(Pierre-Gilles de Gennes) 原著，周念縈、郭兆林 翻譯 (民 82)。
固、特、異的軟物質。台北市：天下文化出版社。
3. 高中物理教科書。台北市：翰林出版社。
4. Hyperphysics 網站 Soap Film Interference :
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/HBASE/PHYOPT/soapfilm.html#c1>
5. WiKi 百科網站 Soap bubble : http://en.wikipedia.org/wiki/Soap_bubble
6. Fishbane, P.M., Gasiorowicz, S.G., and Thornton, S.T., (2005). "*Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*", 3rd ed., London: Pearson Education Inc..

【評語】 040109

二位作者以日常生活中常用的肥皂泡為題材，配合非常簡單的實驗工具來探討肥皂薄膜的厚度，在實驗中分別利用光的干涉現象及薄膜電阻與厚度的關係來決定薄膜厚度，數據的取得及分析都很完整是件很好的作品。