

# 2015 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160013  
參展科別 物理與天文學  
作品名稱 鉛直奈米皂膜之厚度變化  
得獎獎項 大會獎：四等獎

就讀學校 高雄市立新莊高級中學

指導教師 呂台華、莊孟勳

作者姓名 蕭睿為、孫于婷

關鍵字 干涉、奈米皂膜、電滲透

## 作者簡介



我是蕭睿為(左)，目前就讀高雄新莊高中二年級，物理是我較喜歡也較擅長的科目，平日愛好閱讀一些課外讀物，尤其對科普文學有著較濃厚的興趣，每次想到一些奇怪問題的答案時就會有莫名的成就感，希望在未來能對科技有所貢獻。

我叫孫于婷(右)，現在就讀於高雄新莊高中二年級，喜歡動手做實驗，從小被父親養成不死記公式的習慣，讓我在自然科領域的學習上又多了些趣味，很高興能和同學一同參與科展，得到許多寶貴的經驗！

這次是我第一次參與科展這種需要表達能力的比賽。之前都認為物理只是門“寫題目”的科目，在老師教導下才瞭解到物理真正有趣之處！

希望能透過這次的參與，不僅對物理，而對所以科學相關的事物更加留心更深入的研究。

## 摘要

當皂膜鉛直立起後，其表面會因反射光形成干涉，利用反射光的干涉圖案可推知皂膜厚度。皂膜經單色光反射產生干涉圖案的數位相片，藉由 **Image J** 自由軟體可分析出不同位置之光強分布，可回推對應之皂膜厚度。結果發現鉛直皂膜的側向結構具有 3 種類型的分布，造成這 3 種不同幾何結構分佈的微觀機制是因為皂膜中的微胞分布不同。

本作品將鉛直皂膜施以鉛直方向之外加電場，發現皂膜中的陽離子受到電力帶動周遭的液體運動，形成所謂的電滲透現象，電滲透可用來增厚皂膜。此種利用電場控制皂膜厚度的方法可以設計出奈米流體二極體，是一個嶄新的研究領域。

# The thickness variation of a vertical nano soap film

## Abstract

When a soap film raises up vertically, the interference fringes caused by the surface reflection are formed. These interference patterns vary by different soap film thicknesses and these patterns can be used to infer film thickness. In the study, after the soap film interference, the digital photos of the interference patterns reflected by the soap film, analyzed with the software Image J, display the light intensity distribution by its height, which can calculate the corresponding soap film thickness by its height. The results of the analysis indicate that the lateral structure of the vertical soap film can be categorized as the three types: the film thickness is constant, the film thickness ramps downward in the form of a ladder, and the film thickness continuously increases downward. The micro-mechanism leading to the three geometry structures results from the three distributions of the soap film micelles.

In the study, the vertical soap film is applied with a vertical electric field, and the soap solution concentration is changed. In the condition that the soap film containing anionic surfactants is applied with upward electric field, the cations in the soap film dragged by the electric force will drive the surrounding liquids to move upward and form the electro-osmosis phenomenon.

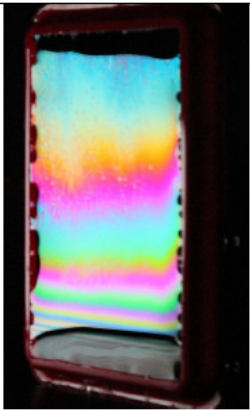
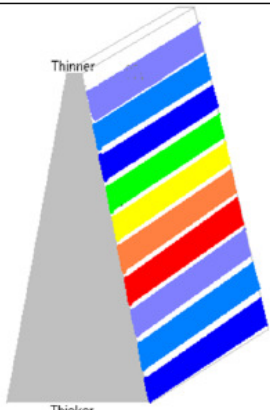
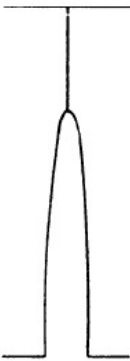

The electro-osmosis can be used to thicken the soap film. The approach to control the soap film thickness by applying electric fields may be used to design nano-fluid diode, a brand new field of study.

# 研究題目：鉛直奈米皂膜之厚度變化

## 一、前言

### (一)、研究動機

當我們觀察垂直立起的皂膜時，會看到美麗的七彩圖案(如圖 1-1a)。在高中物理課本告訴我們那是因為光線經不同厚度的薄膜干涉後形成的結果。我們查詢網路上發現[1-2]解釋鉛直皂膜因受重力、蒸發、表面張力、及凡得瓦力等因素影響，一段時間後會形成上薄下厚的楔型結構(如圖 1-1b)。但垂直立起的皂膜真的是如圖 1-1b 的楔型結構嗎？另外也有提出上方為一均勻厚度之薄膜，薄膜下方厚度呈拋物線增加的結構模型(如圖 1-1c)。若圖 1-1c 是對的，那直立皂膜上方就只能是一層固定厚度薄膜為何不能是 2 層甚至 2 層以上不同厚度的階梯狀之結構呢(如圖 1-1d)？鉛直皂膜的結構到底為何呢？有那些因素會影響鉛直皂膜的厚度呢？所以我們想對鉛直皂膜的幾何結構做一仔細的探討。

			
圖 1-1a 白光照射垂直皂膜形成的七彩干涉圖案	圖 1-1b 直立皂膜上薄下厚的楔型結構 [1-2]	圖 1-1c 直立皂膜上方為一固定厚度薄膜，較下方之厚度隨高度呈拋物線增加[1-2]	圖 1-1d 直立皂膜側向之階梯狀結構

### (二)、研究目的

- (一)、 利用皂膜對反射光的干涉圖案，探討直立皂膜的厚度隨高度變化關係。
- (二)、 探討形成鉛直皂膜幾何結構的微觀機制。
- (三)、 濃度固定，改變鉛直電場，分析鉛直皂膜厚度如何受鉛直電場影響產生變化。
- (四)、 相同鉛直電場，改變鉛直皂膜之濃度，分析皂膜厚度如何受到濃度之影響產生變化。

## 二、研究方法或過程

### (一)、實驗器材

- 1、LED 燈條(RGB 三色)、轉接器、控制器、變壓器及直流電源供應器 3 台(0-60V)
- 2、自製方型壓克力盒(450.0 mm\*300.0 mm\*60.0 mm，做為光箱使用 )
- 3、桌上型電腦( Image J 軟體)及 Sony 數位攝影機
- 4、自製皂膜框架裝置(大小分別為 250.0 mm×180.0 mm 及 50.0 mm×50.0 mm 之規格)
- 5、平面鏡、雷射筆、鋁箔紙、接線、三用電表、黑布
- 6、Dawn 清潔劑(內含陰離子界面活性劑)、甘油、水

		
<p>大皂膜干涉之觀察裝置</p>	<p>自製 LED 光箱</p>	<p>外加電場下小皂膜之觀測裝置(上下方鋪設鋁箔紙作為通電之用)</p>

### (二)、理論探討 [3]

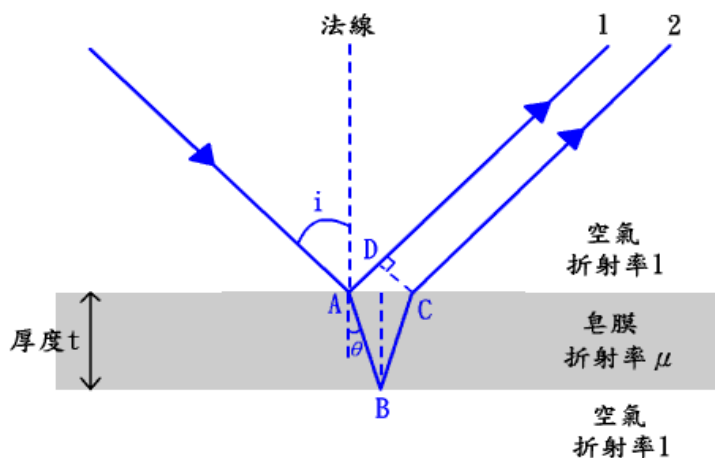


圖 2-1 光線經薄膜上下表面之反射光線干涉示意圖

要探討經皂膜上下表面之反射光干涉圖案時可用圖 2-1 中 1,2 兩道光線加以說明。已知空氣折射率為 1，若皂膜之折射率為  $\mu$ ，則此 2 道光線之光程差  $d$  為

$$d = \mu(\overline{AB} + \overline{BC}) + \frac{\lambda}{2} - \overline{AD} \quad (2-1)$$

(2-1)式中之 $\frac{\lambda}{2}$ 是由於光線 1 由空氣至薄膜及反射光線 2 由薄膜至空氣反射所形成的相位差 $\pi$ 所形成的。由圖 2-1 可知

$$d = \frac{2\mu t}{\cos \theta} - 2t \sin \theta \tan \theta + \frac{\lambda}{2} \quad (2-2)$$

$$\text{由折射定律} \quad 1 \times \sin i = \mu \times \sin \theta \quad (2-3)$$

$$\begin{aligned} d &= \frac{2\mu t}{\cos \theta} - 2t\mu \sin \theta \tan \theta + \frac{\lambda}{2} \\ \text{可得} \quad &= \frac{2\mu t}{\cos \theta} - 2\mu t \frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} + \frac{\lambda}{2} \\ &= 2\mu t \cos \theta + \frac{\lambda}{2} \end{aligned} \quad (2-4)$$

當  $d = \begin{cases} n\lambda, & \text{產生完全加強型干涉, 光線強度最大} \\ (n + \frac{1}{2})\lambda, & \text{產生完全破壞型干涉, 光線強度為 0} \end{cases}$

若 A 為光線 1 之振幅，而因皂膜甚薄，故光線 2 之振幅仍可視為 A，只是和光線 1 形成相角差 $\delta$ ，而 $\delta$ 滿足下式：

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left( 2\mu t \cos \theta + \frac{\lambda}{2} \right) \quad (2-5)$$

若光線 1、2 形成的反射光總振幅為  $A_r$ ，則

$$A_r = A + Ae^{i\delta} = A(1 + e^{i\delta}) \quad (2-6)$$

而反射光之總強度  $I_r = A_r A_r^*$ ，故

$$\begin{aligned} I_r &= A(1 + e^{i\delta})A(1 + e^{-i\delta}) \\ &= A^2(2 + e^{i\delta} + e^{-i\delta}) \end{aligned} \quad (2-7)$$

$$\text{而} \frac{e^{i\delta} + e^{-i\delta}}{2} = \cos \delta, \text{ 且} \quad 1 + \cos \delta = 2 \cos^2 \frac{\delta}{2}$$

$$\text{故} \quad I_r = 4A^2 \cos^2 \delta = 4A^2 \cos^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \mu t \cos \theta + \frac{\pi}{2} \right) \quad (2-8)$$

若入射光強度  $I_i$ ，而皂膜之反射率為  $R$ ，依 Fresnel 方程式

$$R = \frac{(\mu - 1)^2}{(\mu + 1)^2} \quad (2-9)$$

根據電磁波理論可由(2-8)式推導出

$$\begin{aligned} I_r &= 4I_i R \cos^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \mu t \cos \theta + \frac{\pi}{2} \right) \\ &= 4I_i R \sin^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \mu t \cos \theta \right) = I_{\max} \sin^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \mu t \cos \theta \right) \end{aligned} \quad (2-10)$$

(2-10)式中  $I_{\max} = 4I_i R$ 。由(2-10)式可看出，當  $\theta$  保持固定時，若皂膜為一上薄下厚的楔狀結構，也就是由上而下的皂膜厚度  $t$  呈線性增加的話，在強度均勻的單色光照射下其反射光干涉後光強度隨厚度  $t$  的變化會形成如圖 2-2 的分布。此時反射光強度  $I_r$  會與厚度  $t$  形成

$I_r = I_{\max} \sin^2(kt)$  之變化關係，此處  $k = \frac{2\pi\mu \cos \theta}{\lambda}$ 。以 470nm 之藍光為例，若折射角  $\theta$  為  $41^\circ$ ，溶液之折射率為 1.36，則其反射光干涉後之強度隨厚度變化關係如圖 2-2 所示。

由圖 2-2 可看出當皂膜厚度由上而下呈線性增加時，干涉光相對強度  $\frac{I_r}{I_{\max}}$  會隨厚度  $t$  在最大值 1 與最小值 0 之間做週期性的變化，因此單色光所形成的干涉圖案應呈現等間隔的明暗條紋排列。所以像單色光經 2 載玻片間的干涉圖案就會形成等間距的明暗相間條紋，如圖 2-3 所示，而本實驗中鉛直皂膜的干涉圖案則會在後方加以分析。

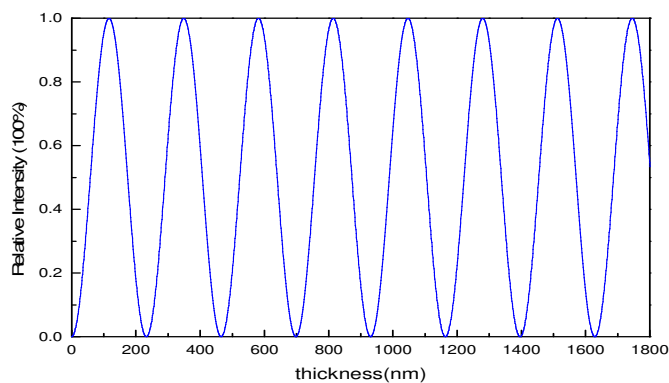


圖 2-2 藍光經薄膜干涉後之相對光強度隨薄膜厚度  $t$  之關係圖



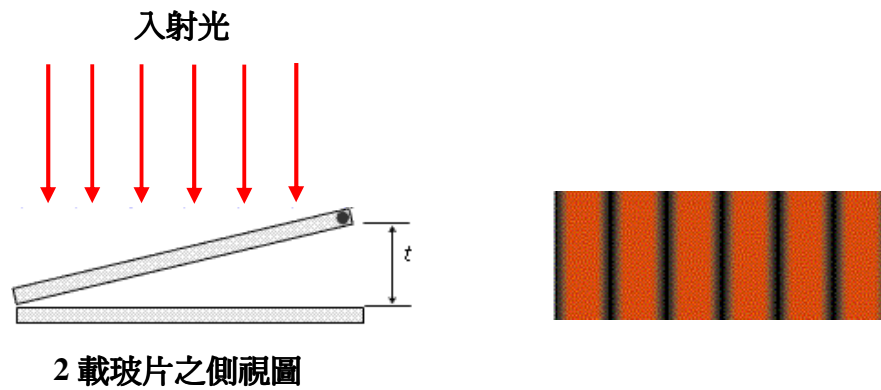


圖 2-3 平行光線經 2 載玻片之間的楔型氣膜(左)形成等間距之明暗相間干涉條紋(右)

### (三)、實驗方法

由本實驗的照片中可發現，不同時刻的皂膜，其上也有明暗相間的干涉圖案，但並非等間隔的分布，皂膜上方的亮帶寬度較寬，越下方亮帶越窄。爲了進一步討論出皂膜厚度隨高度變化關係，我們須找出能產生均勻光強的單色光源。

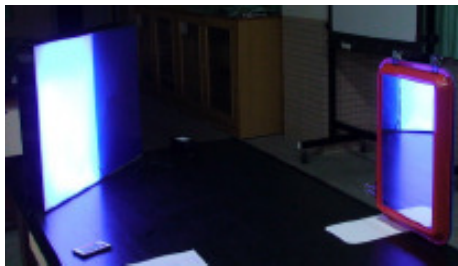
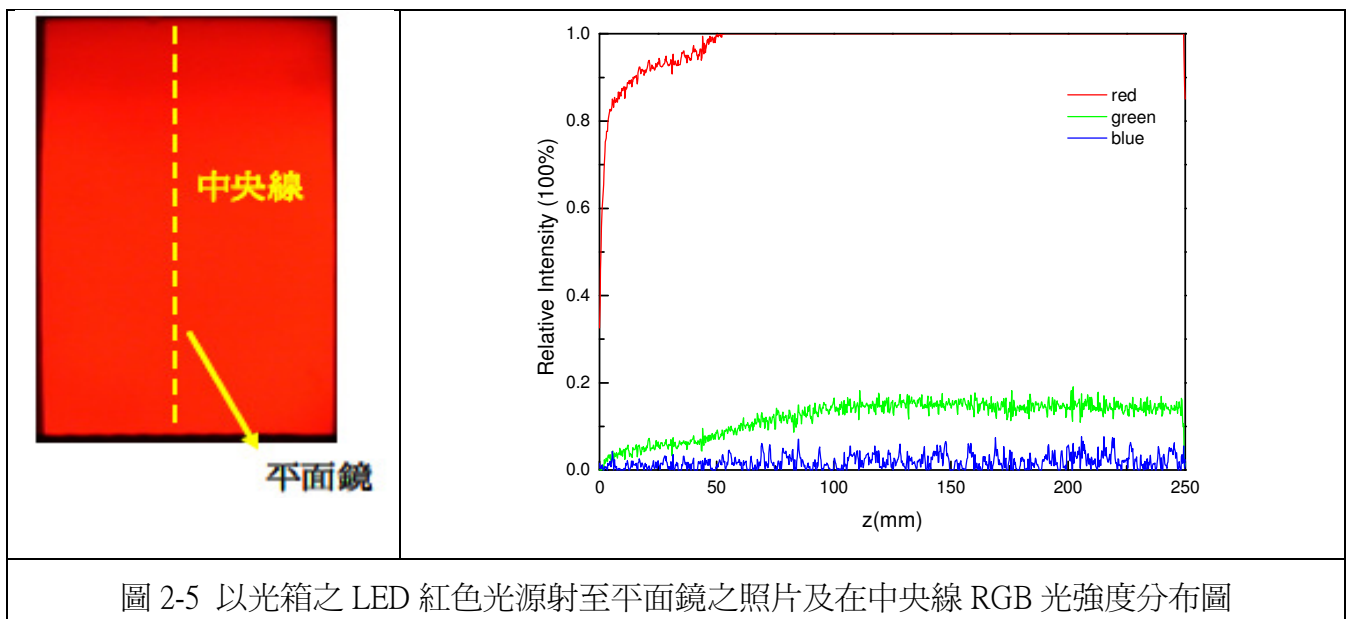


圖 2-4 以光源射至平面鏡測試光強度分布是否均勻之裝置圖



我們用壓克力設計一光箱，以 LED 燈條等距貼於光箱底部，並在光箱前側放置白色壓克力板，藉以讓光線均勻發散並對其射在皂膜位置中央處的光強度隨位置變化加以分析，

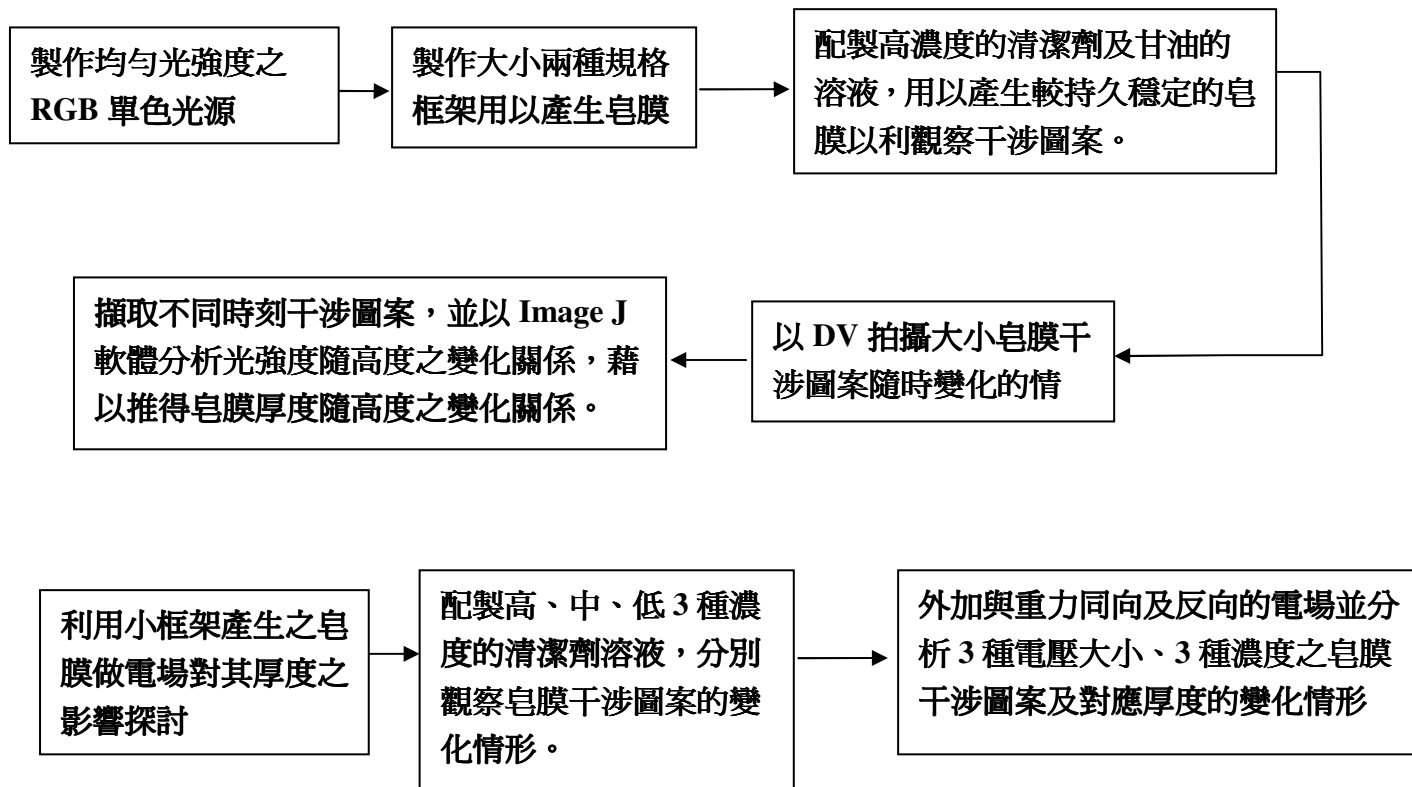
其結果如圖 2-5 所示，結果顯示 LED 光箱應能滿足本實驗光強均勻分布之單色光需求。將塑膠方盤割出框架形成皂膜產生裝置，並在框架後方以鋪滿黑布的空箱封住，可將透射至薄膜後方的光線大致吸收，防止其對前方干涉圖案的光強度分布產生影響。

本實驗因為需觀察能持續較久時間的皂膜，故參考網路哈佛大學物理演示[4]的高濃度溶液配置，溶液是以下列之體積比列配製而成，水：DAWN 清潔劑：甘油=20：2：1，配好後靜置一日後再做皂膜干涉觀測並測出配製的溶液折射率為 1.36。

另外我們為了解外加電場對薄膜厚度的影響，因大皂膜長度是小皂膜的 5 倍，施以相同電壓時，大皂膜上的平均電場約只有小皂膜的 1/5，電場的施加對大皂膜的影響小不易觀察，所以我們都用小皂膜來做電場對薄膜厚度的影響。另外為了解在外加電場下不同濃度的溶液對皂膜厚度變化的影響，另外配置了水：DAWN 清潔劑：甘油=40：2：1 為中濃度溶液，水：DAWN 清潔劑：甘油=80：2：1 為低濃度溶液，2 者的折射率分別為 1.35 及 1.33。分別施加±50V、±100V、±150V 三種電壓於 3 種濃度之皂膜，拍攝不同情形下的皂膜干涉圖案。此處電場向下(與重力同向)時電壓為正，電場向上時電壓為負。

最後將拍攝好的干涉影片擷取不同時刻之干涉圖案，並以 Image J 軟體分析光強度隨高度之變化關係，藉以推得皂膜厚度隨高度之變化關係。

以下是我們進行實驗的流程簡圖



### 三、研究結果

(一)、以 LED 光源(紅、綠、藍及白光) 拍攝皂膜不同時刻的反射光干涉照片

1、大皂膜(250.0mm×180.0mm)形成之干涉圖案隨時變化之情形

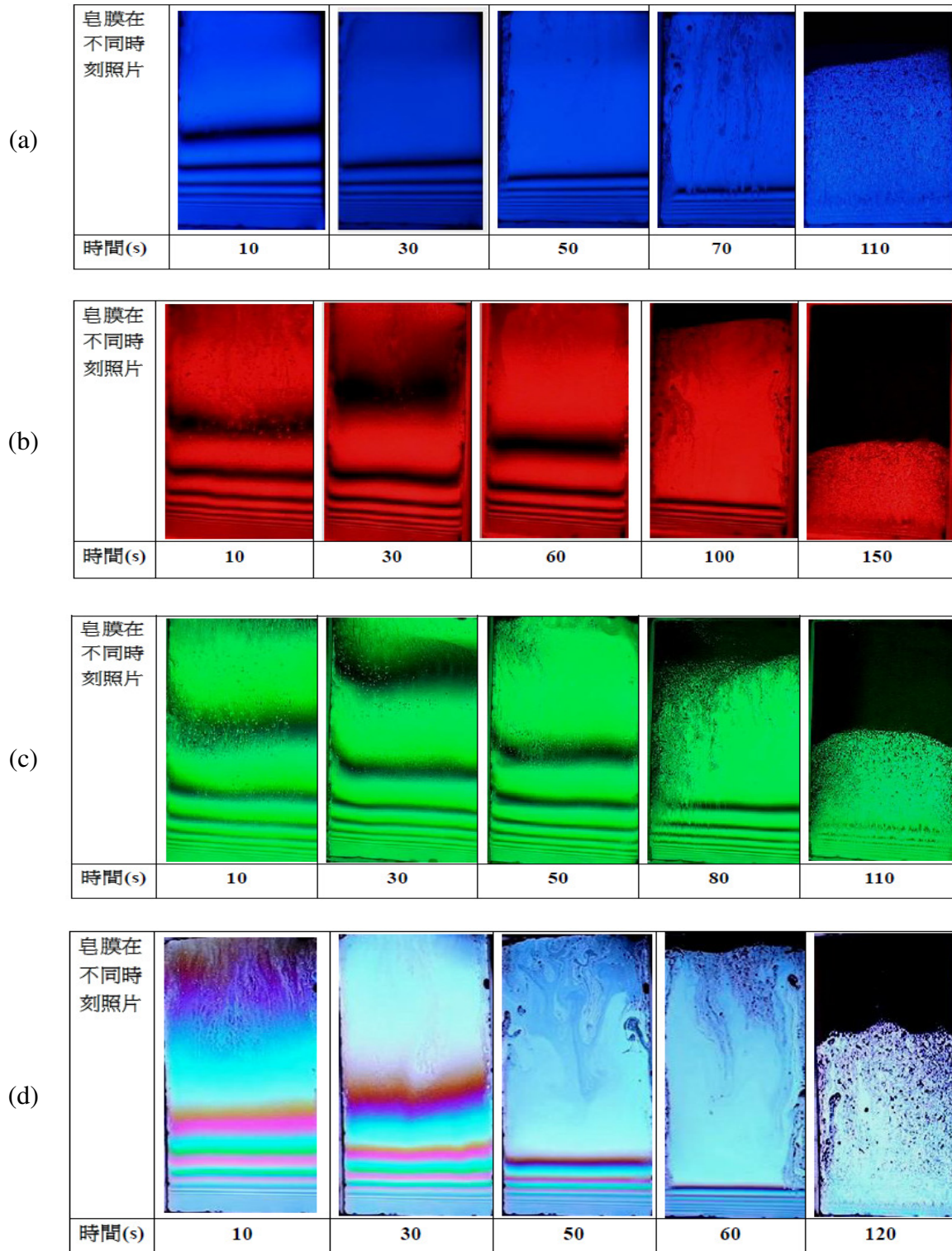


圖 3-1 以 LED 藍(a)、紅(b)、綠(c)、白光(d)拍攝大皂膜於不同時刻的干涉圖案

2、小皂膜(50.0mm×50.0mm)形成之干涉圖案隨時變化之情形

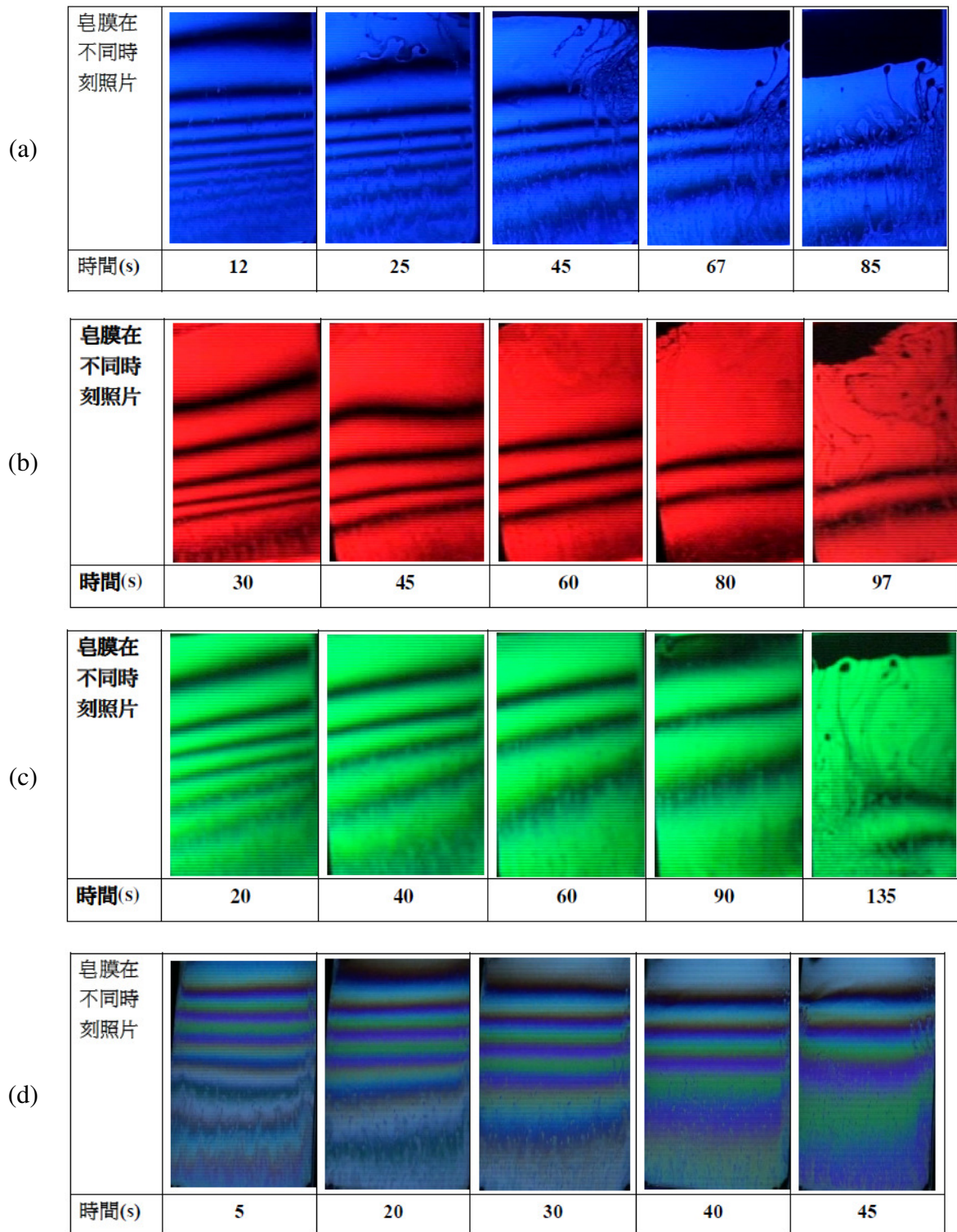
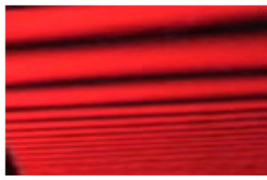

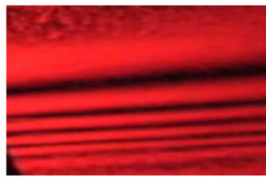
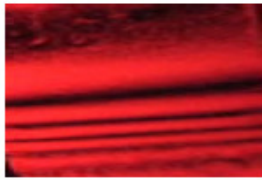

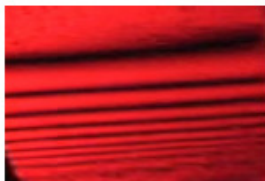
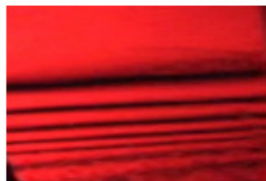


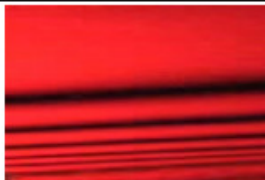
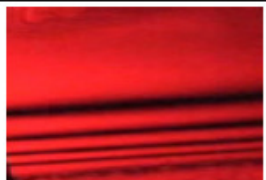









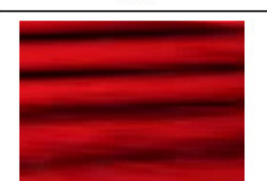


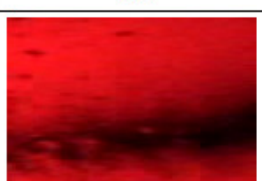

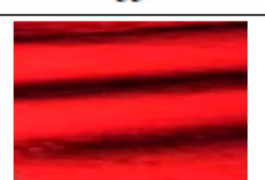




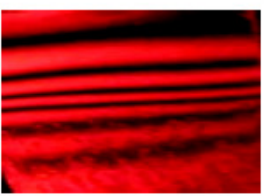
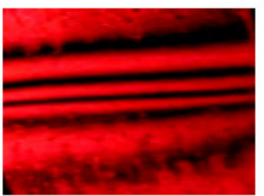
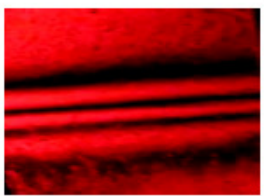

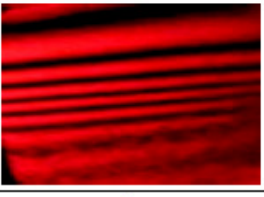
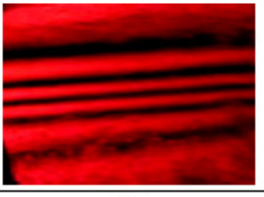
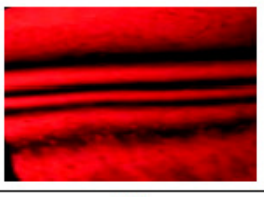
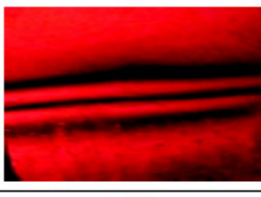
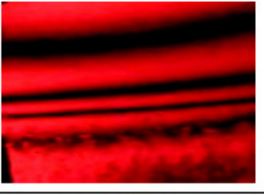
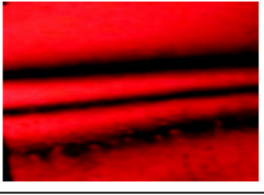
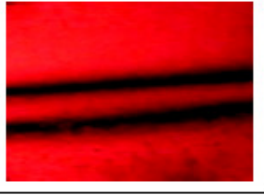
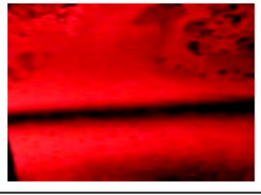
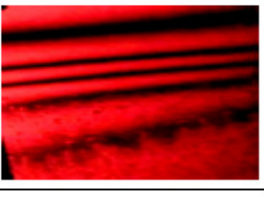
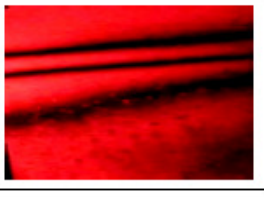

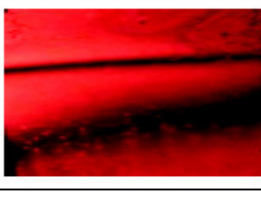
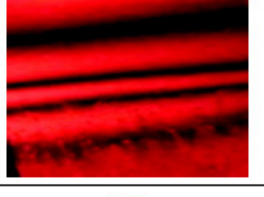
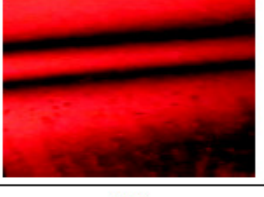
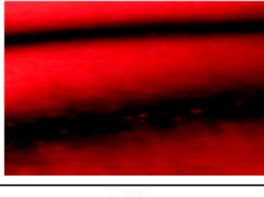

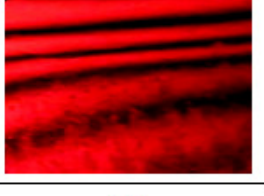
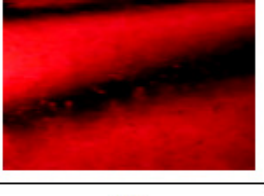
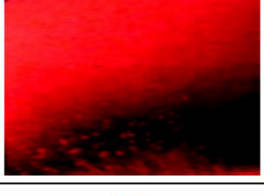


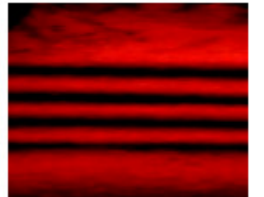
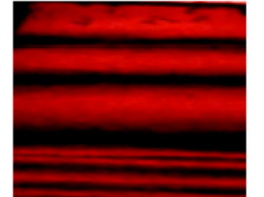
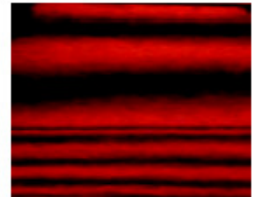
圖 3-2 以藍(a)、紅(b)、綠(c)、白光(d) 拍攝小皂膜於不同時刻的干涉圖案

(二)、以 LED 紅光拍攝小皂膜於高、中、低 3 種不同溶液濃度及 3 種不同外加電壓(150V、100V、50V)下隨時變化情形，電場向下(與重力同向)時電壓為正，電場向上時電壓為負

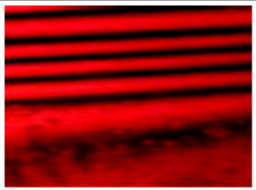

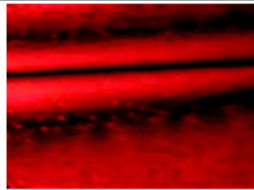
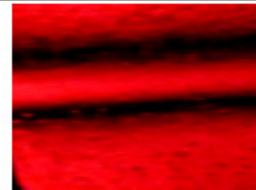
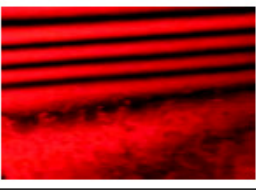
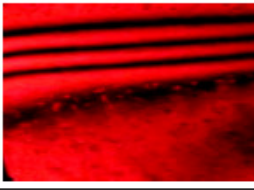
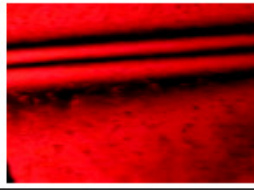

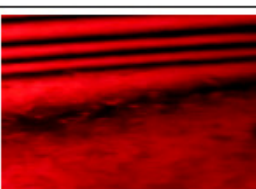
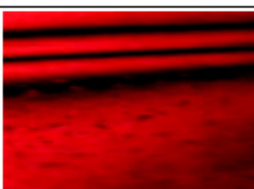


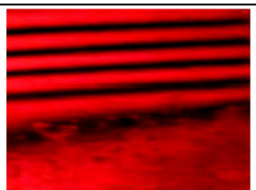
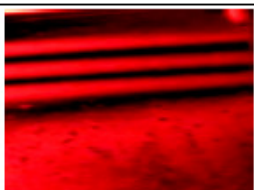
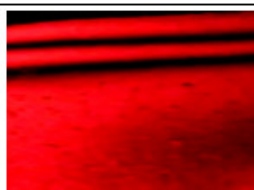
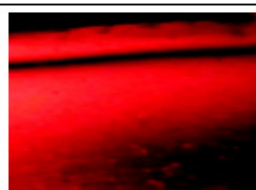
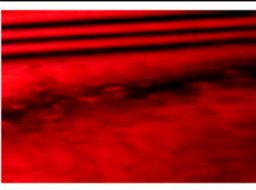
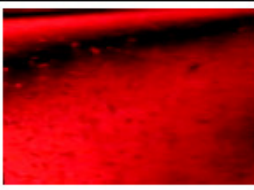
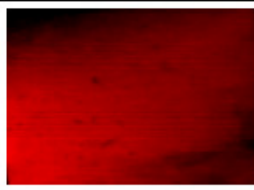

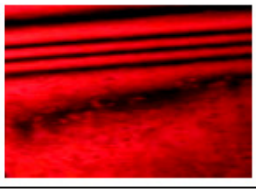


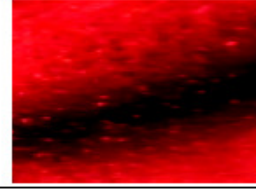
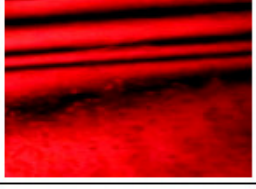
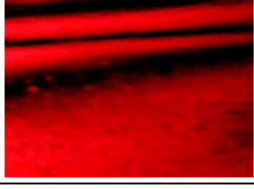

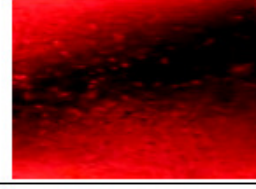
1、高濃度溶液(水：DAWN 清潔劑：甘油=20：2：1)之皂膜干涉圖案在不同外加電壓下隨時變化之情形

150V				
時間(s)	5	15	25	32
100V				
時間(s)	5	15	25	33
50V				
時間(s)	10	25	35	50
0V				
時間(s)	30	45	60	80
-50V				
時間(s)	20	35	55	80
-100V				
時間(s)	23	35	45	70
-150V				
時間(s)	25	35	48	70

2、中濃度溶液(水：DAWN 清潔劑：甘油=40：2：1)之皂膜干涉圖案在不同外加電壓下  
隨時變化之情形

150V				
時間(s)	5	15	25	32
100V				
時間(s)	5	18	25	34
50V				
時間(s)	5	18	30	50
0V				
時間(s)	25	45	65	80
-50V				
時間(s)	20	35	48	70
-100V				
時間(s)	22	35	55	70
-150V				
時間(s)	50	67	85	95

3、低濃度溶液(水：DAWN 清潔劑：甘油=80：2：1)之皂膜干涉圖案在不同外加電壓下  
隨時變化之情形

150V				
時間(s)	10	22	35	50
100V				
時間(s)	10	20	30	45
50V				
時間(s)	20	40	60	80
0V				
時間(s)	15	35	55	80
-50V				
時間(s)	20	40	60	75
-100V				
時間(s)	20	40	60	75
-150V				
時間(s)	23	35	55	70

## 四、研究分析與討論

### (一)、鉛直皂膜由形成至破裂的過程探討

肥皂膜形成後便開始變薄。它是怎麼變薄的？一般來說可分為靜力學過程(hydrostatic)和動力學 (dynamic) 兩種過程[1,3]。

**靜力學過程：**此種機制發生在膜的表面固定、沒有液體流進或流出，或是表面大規模流體運動可忽略時。有三種基本的靜力學過程：延伸(stretch)、具黏滯力的流體流動(viscous flow)以及蒸發(evaporation)。

**動力學過程：**Josiah Willard Gibbs 首先觀察到在皂膜在框架邊緣附近有很激烈的亂流(turbulence)現象。在皂膜和外框接觸的邊界，肥皂膜是向內凹的，也就是說膜內的壓力小於外界的大氣壓力，這種邊界稱為 Gibbs 環或是 Plateau 邊界，如圖 4-1 所示。若兩個厚度不同的肥皂膜和此邊界區域交接，厚膜會有較大的動力將溶液推進這個區域，造成此種在鄰近邊緣區域的溶液流動過程為邊界再生 (Marginal regeneration)。

皂膜形成至皂膜破裂，在此分成三個階段：前期、中期、後期。

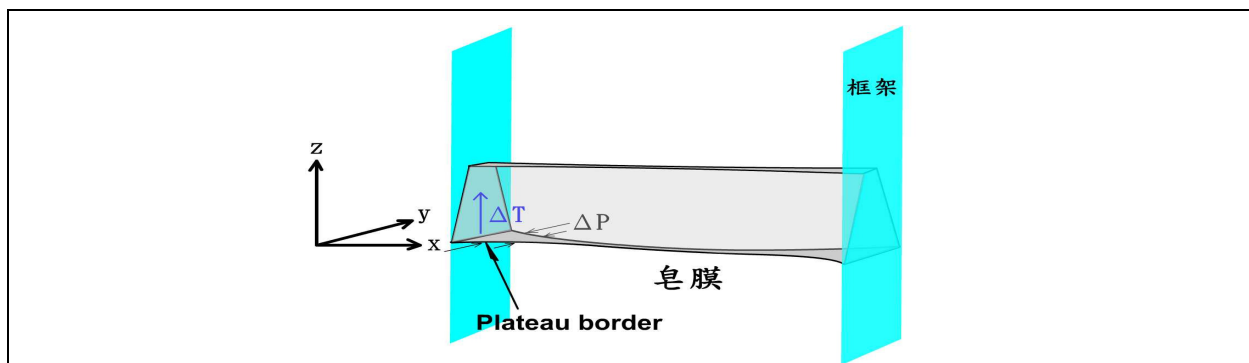


圖 4-1 部分鉛直皂膜與框架邊緣形成之 Plateau 邊界及周圍壓力、表面張力變化示意圖

**前期：**如圖 4-2(a)、(b)此時大皂膜頂部會因重力造成較不穩定的向下流動，但小皂膜頂部較無向下流動的現象；小皂膜底部產生了強烈的邊界再生現象，但大皂膜下方邊界再生現象卻不顯著。那是因為小皂膜上表面張力梯度的影響較重力來得大，故小皂膜底部邊界再生形成向上流動的現象會較強烈；而大皂膜上重力較表面張力梯度的影響來得大，故大皂膜頂部向下流動的現象會較劇烈。





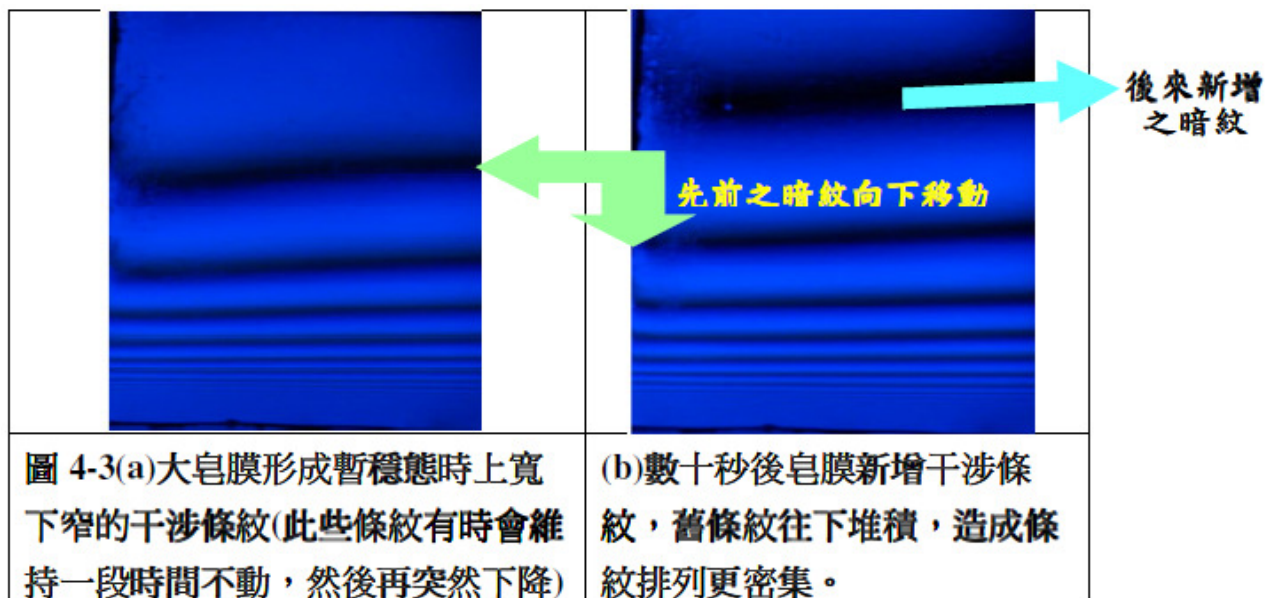
而圖 4-1 中框架側邊緣附近的液體由於 Plateau 邊界上之內外壓力差  $\Delta P$  擠壓 (如圖 4-1)，也會因馬倫哥尼效應(Marangoni effect) [1]產生向上流動(如圖 4-2(a)黃色箭頭向上)，此一過程於皂膜破裂前始終持續著。

馬倫哥尼效應是指在流體界面，因為表面張力變化  $\Delta T$ (如圖 4-1)而造成的物質傳輸現象。當不同厚度皂膜相接觸時，上方皂膜較薄，表面水分子較多，表面張力較大；下方皂膜較厚，表面水分子較少，表面張力較小，導致液體會由表面張力小的厚膜區向表面張力大的薄膜區流動，造成實驗中觀察到框架邊緣皂膜液體向上流動的現象。馬倫哥尼效應可視為皂膜自我修復能力，快破裂之薄區獲得厚區之液體補充才能避免破裂。且越靠近框架之皂膜液體因壓力差  $\Delta P$  越大，造成向上流動的量越多越明顯。如圖 4-2b 之方框內所示。

**中期：**此階段因為大小 2 皂膜此時形成之干涉條紋變化亦有所不同，故分別討論如下。

#### 1、大皂膜( 250.0 mm×180.0 mm )

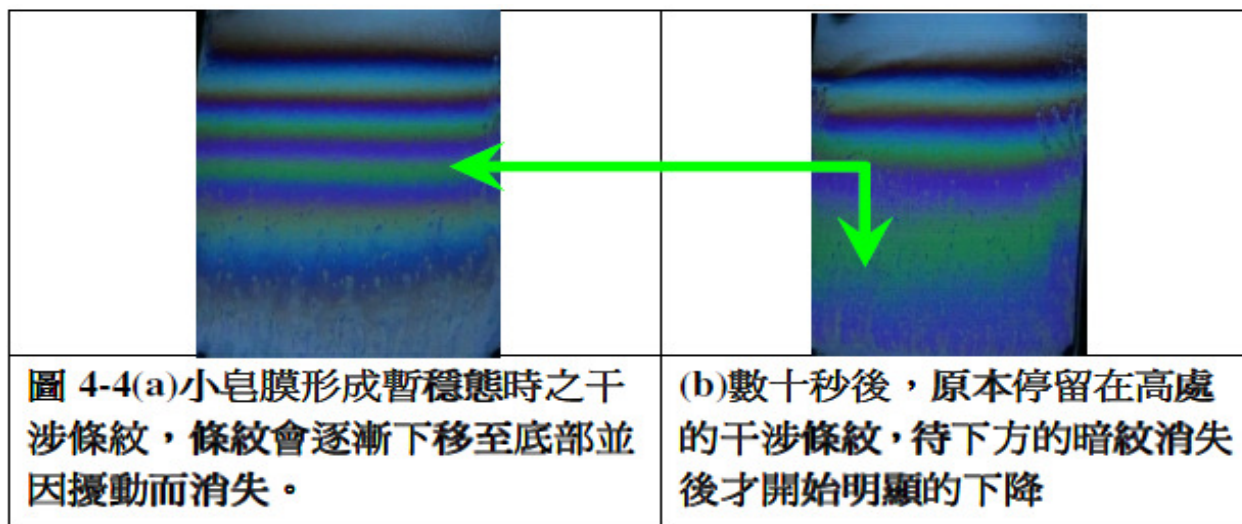
此時薄膜形成較穩定的結構，邊緣對流較不明顯，此時形成的穩定干涉圖案，稱為暫穩態(Meta stable)。暫穩態形成後，干涉條紋有時會逐漸下移，但有時干涉條紋會先停留在相同位置一段時間，數秒(或數十秒)過後干涉條紋會瞬間向下移動，此種現象在中期內會不斷產生，最後造成干涉條紋往下堆積，造成干涉圖案的條紋間距，呈現上寬下窄的現象，如圖 4-3(a)。中期有時皂膜最上方部份也會產生新的干涉條紋，如圖 4-3 (b)所示。干涉條紋上寬下窄的現象是因皂膜上的分子受重力及凡得瓦力等作用持續往下方堆積，上方薄膜的厚度逐漸變薄，下方薄膜的厚度逐漸增加所造成的。而皂膜最上方的區域會再產生新的干涉條紋是因為一開始皂膜還不夠薄，無法產生級數較小的干涉圖案；等到夠薄時，級數較小的干涉圖案就會對應產生。



#### 2、小皂膜( 50.0 mm×50.0 mm )

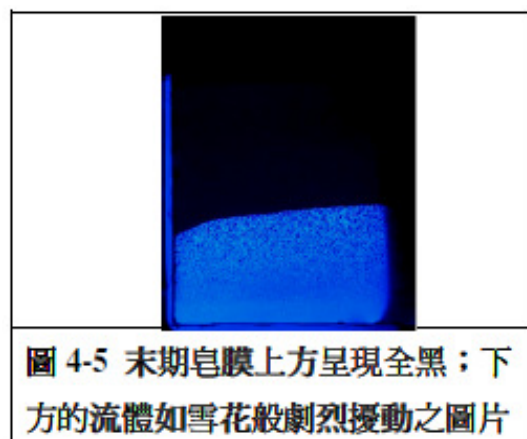
由圖 4-3 可看出，大的鉛直皂膜形成後，皂膜上的物質由頂端往下流動，底端的邊界再生現象不強，上方生成的干涉條紋會隨時間的演進逐漸往下堆積。但在小的鉛直皂膜形成

後，因底端強烈的邊界再生現象，皂膜上的物質由底端往上流動，使下移之干涉條紋無法堆積於底端，而是隱沒於底部的強烈擾動中。且較高處的干涉條紋有時也會先停留在原處，待下方的暗紋消失後才開始明顯的下降，如圖 4-4 所示。



大皂膜因底端邊界再生現象輕微，所以干涉條紋往下移動堆積在底部。造成皂膜下方形成排列密集之干涉條紋；但小皂膜因底部具有強烈的邊界再生現象，故皂膜上的干涉條紋下降至底部時，會因此處強烈的擾動而消失。所以小皂膜上的干涉條紋數目會隨時間減少。小皂膜較高處的干涉條紋有時會維持在固定的位置一段時間，待下方的條紋沒入底部區域後，才開始往下降。這可能是由於下方皂膜的物質持續向上流動，不斷補充高處皂膜流失的部分，故上方的層狀結構可以維持在相同厚度一段時間。

末期：因水分蒸發及皂膜分子持續向下堆積，使得皂膜上方厚度不斷變薄，當上方厚度夠薄時，皂膜下方開始呈現不穩定的流動，形成如雪花般的干涉圖案，皂膜上方出現黑色，且此黑色部分的面積會持續向下迅速擴大(如圖 4-5 所示)，直到皂膜破裂為止。此時因皂膜上方之厚度非常薄，遠小於入射光的波長，使得經皂膜上下表面的反射光干涉後幾乎都形成了完全破壞性干涉，所以上方皂膜形成黑色，稱為黑膜 (Black film)。在資料搜尋中發現[3]，此種黑膜可分為一般黑膜(Common Black film)，厚度約數十 nm；牛頓黑膜(Newton Black film)厚度約為數個 nm。



## (二)、由單色光干涉圖案探討鉛直皂膜厚度隨高度之變化

我們拍到大皂膜經藍光照射形成的干涉條紋，幾乎都是如圖 4-3 此種上寬下窄的分布，並非等間距的干涉條紋，所以鉛直薄膜的幾何結構應不是像圖 1-1b 的楔型構造。而明暗相間之干涉條紋，出現亮的不見得是完全加強型干涉，暗的亦不代表是完全破壞性干涉。需由拍到的干涉照片之光強度數據去回推薄膜厚度隨高度變化之真實情形。

接下來以皂膜之藍光干涉圖案(圖 4-6 系列)為例加以說明：

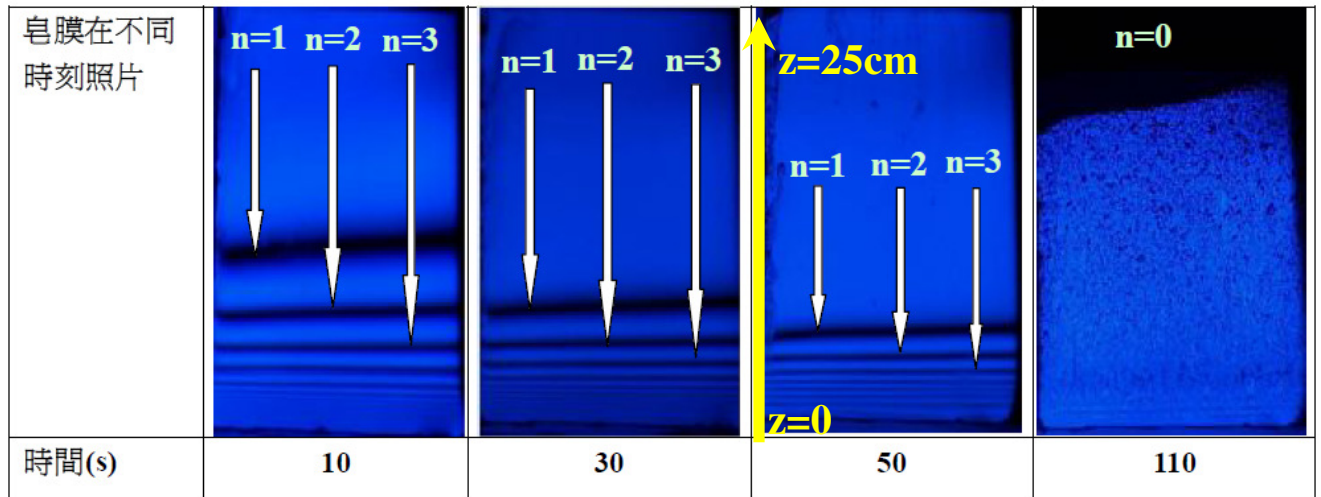


圖 4-6 皂膜之藍光干涉圖案中暗紋級數隨時間變化的對應關係圖

由前面理論推導得知，當光程差  $d = \begin{cases} n\lambda, & \text{產生完全加強型干涉, 光線強度最大} \\ (n + \frac{1}{2})\lambda, & \text{產生完全破壞型干涉, 光線強度為 0} \end{cases}$

當攝影完成後，需擷取不同時刻的照片去找出皂膜上黑膜(破壞型暗紋)出現的最後時刻，此時暗紋干涉級數為  $n=0$ ，再往前找出  $n=1$  和其他更高階暗紋的出現位置。

如圖 4-6 系列所示，皂膜在形成 10 秒內薄膜厚度不夠薄，尚無形成  $n=0$  的干涉暗紋，只生成了  $n \geq 1$  的暗紋系列。在 30 秒時，此時薄膜上方厚度變薄， $n \geq 1$  的暗紋系列往下方堆積，且暗紋間距變小。50 秒時，時薄膜上方厚度持續變薄，下方厚度持續增加，暗紋分布更密集。在 110 秒時，此時薄膜上方厚度已經薄到形成  $n=0$  的黑膜，下方干涉條紋無法分辨，110 秒後黑膜的面積持續擴大直到 168 秒時皂膜破裂。

本實驗所分析之大皂膜高度均為 250.0mm，經數位攝影機拍攝後，擷取不同時刻照片，以 Image J 軟體分析皂膜中央線不同高度之光強度，再利用 2-10 式以藍光 470nm 波長，折射率 1.36 及拍攝時與皂膜法線夾角  $63^\circ$  等條件計算，來推得厚度。

現將 4 種時刻(10s、30s、50s、110s)經皂膜反射的干涉光相對強度及皂膜厚度隨皂膜高度變化之關係做成圖 4-7，此處均定皂膜高度位置  $z$  最下方為 0，最上方為 250mm。

由圖 4-7 下圖可看出部分區域內反射光強度呈現近似平台的分布，此種平台區顯示在某些高度範圍內的皂膜厚度應保持固定，並未隨位置改變厚度，如圖 4-7 的橙色箭頭指示。另外像在 30s 時刻、位置 36.0mm( $n=2$  暗紋)，此時干涉光相對強度出現極小值 0.3(如圖 4-7 藍色箭頭所示)，而相對強度 0-0.3 的區域並未出現，依照前述理論分析所得圖 2-2 的結果，代表 423 nm 至 508 nm 之厚度範圍是不存在於此刻的皂膜結構中(如圖 4-8 所示)，故代表在皂膜

厚度隨高度變化的關係中會出現下方厚度突增現象，如圖 4-7 藍色箭頭所標示。而皂膜其餘部分的干涉光相對強度隨厚度近似正弦函數平方的變化，代表此區間之皂膜厚度為往下連續增厚，如圖 4-7 綠色箭頭所示。

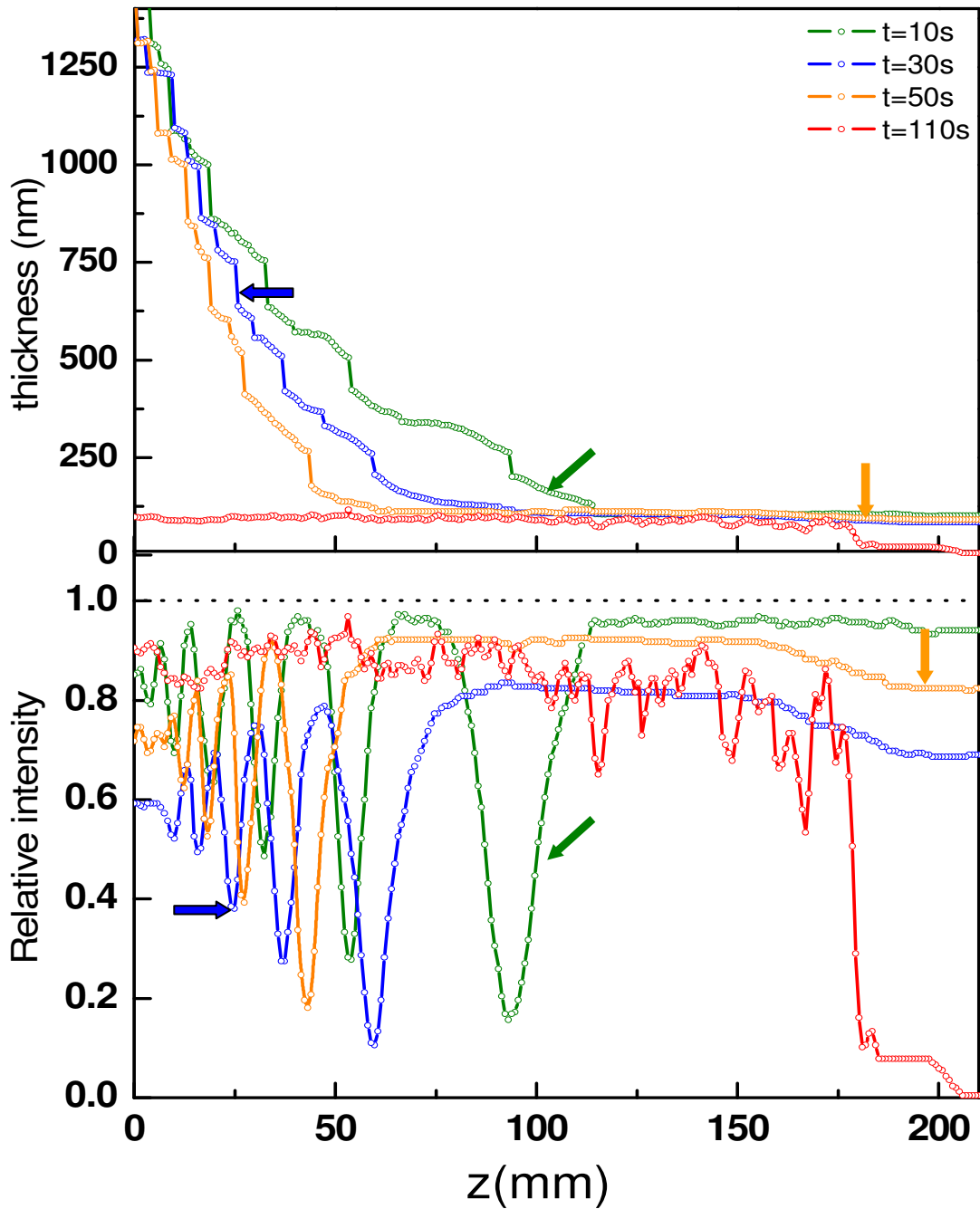


圖 4-7 皂膜厚度(上)及藍光經皂膜反射的干涉光相對強度(下)隨皂膜高度變化之關係圖

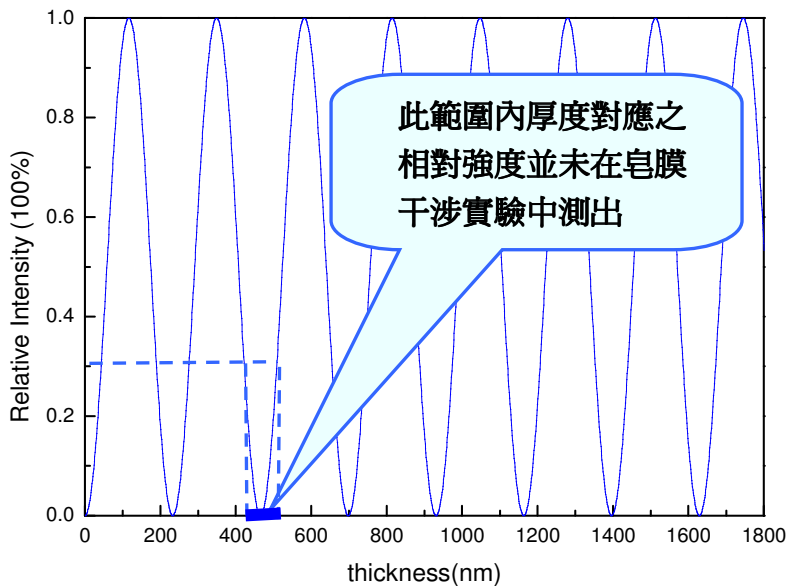


圖 4-8 當藍光經皂膜干涉後光強度=0.3 時表示 422-508 nm 間的厚度範圍不存於皂膜之說明圖

為方便看出不同時刻皂膜厚度隨高度的變化情形，我們將圖 4-7 之上圖轉換成爲圖 4-9。由圖 4-9 很容易看出在 10、30、60 秒 3 種時刻的皂膜高度-厚度關係圖中有部分區域呈現平行排列，這代表 3 種時刻皂膜的部分結構幾乎保持同樣的厚度，隨時間演進往下堆積。例如箭頭所示 3 種暗紋出現位置( $n=1$ ，厚度約爲 263 nm、 $n=2$ ，厚度約爲 420 nm、 $n=3$ ，厚度約爲 755 nm)，一段時間後會往下方堆積，且厚度幾乎保持固定。我們將數據分析中 3 種時刻、干涉級數  $n=1$  至 4 極小值位置對應之皂膜厚度臚列於表 4-1。由表 4-1 可看出  $n$  值相同下，各暗紋對應之皂膜厚度幾乎不隨時間變化。

時刻 干涉暗紋級數	t=10s	t=30s	t=50s
n=1	263 nm	260 nm	266 nm
n=2	423 nm	420 nm	418 nm
n=3	755 nm	752 nm	760 nm
n=4	1000 nm	994 nm	1002 nm

表 4-1 3 種時刻、4 種級數之光強度極小值位置所對應之皂膜厚度一覽表

爲了更清楚看出黑膜產生時皂膜的側面結構，我們將圖 4-9 中紅色標示的數據放大得到圖 4-9 之插圖。由插圖中可看出在 110s 生成之黑膜形成 2 段厚度之薄膜，分別爲 5nm 之牛頓黑膜及 24nm 之一般黑膜。由插圖可發現 5nm 之牛頓黑膜可拉長約 30.0mm，所以皂膜可形成數公分長、數 nm 薄的結構且能穩定維持數十秒以上，它的微觀機制值得深入探討，我們在後面有較仔細的分析。

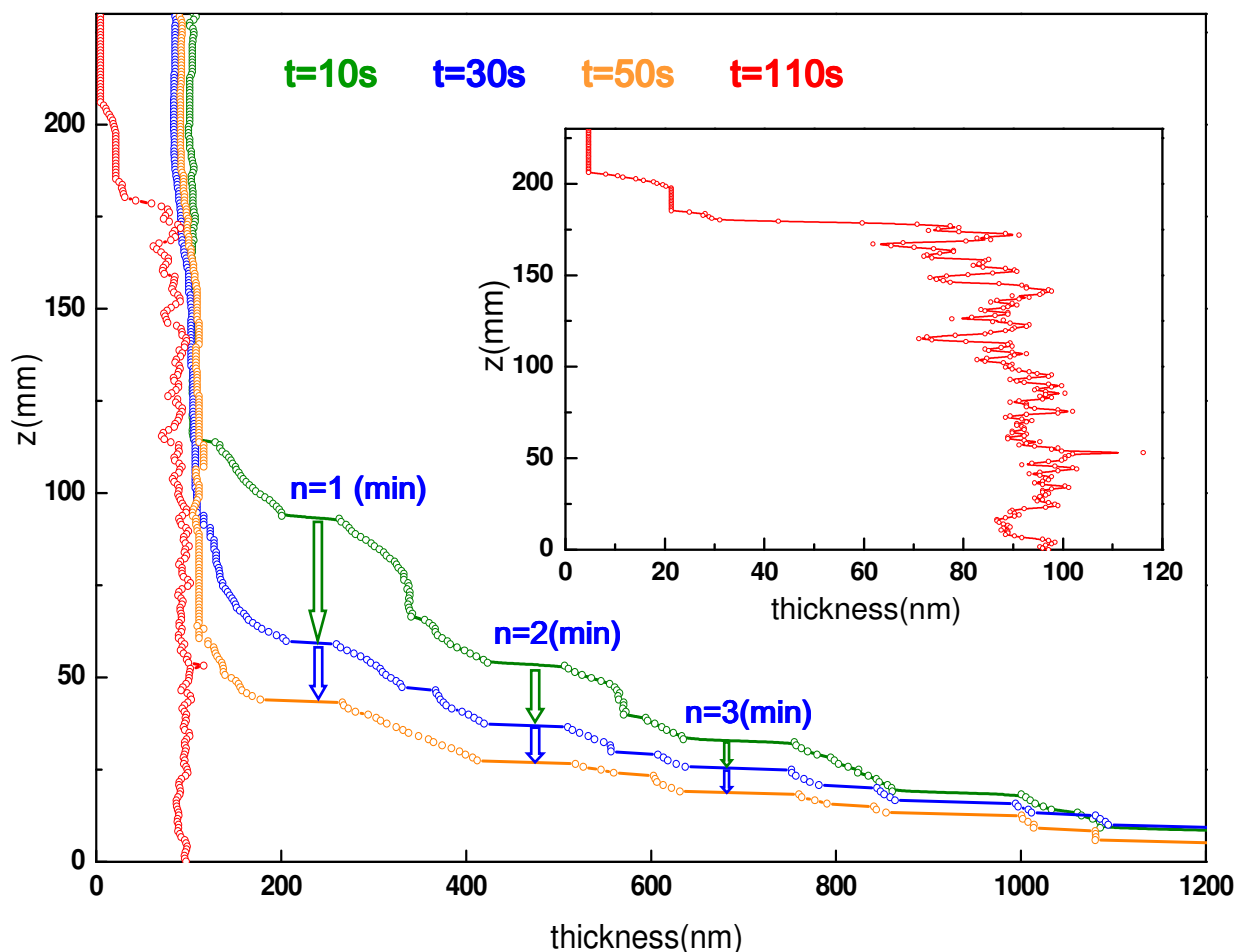


圖 4-9 藍光照射下不同時刻皂膜垂直方向厚度變化圖 (插圖：紅色標示數據之放大圖)

由圖 4-9 及上述相關說明可看出，皂膜厚度隨著位置向下之變化有下列 3 種：連續漸增、厚度固定(平台區)及不連續的突增現象。平台區就是前面提到在某些高度範圍內的皂膜厚度固定；下方厚度突增的現象出現在相對光強度於極小值不為 0、極大值不等於 1 以及圖形為階梯分布時的對應情形。所以鉛直皂膜的側面並非如圖 1-1(b)、(c)所呈現的，而是應當如圖 4-9 所示的結構圖。

### (三)、大小鉛直皂膜厚度變化的差異

由圖 3-1 系列可看出，大鉛直皂膜(250.0mm×180.0mm)上的液體會由頂端往下流動，底端的邊界再生現象微弱，故其生成的干涉條紋會隨時間的演進逐漸往下堆積。但小鉛直皂膜(50.0mm×50.0mm)底端的邊界再生現象非常強烈，皂膜的液體由底端往上強烈的流動，故其生成的干涉條紋隨時間的演進並非逐漸往下堆積，而是消失於底部，所以大小兩鉛直皂膜厚度隨高度的變化情形並不一樣。為比較大小鉛直皂膜厚度變化的差別，我們用紅光照射高濃度的大皂膜(圖 3-1(a))及小皂膜(圖 3-2(a))，以前述的方法分析不同時刻干涉暗紋級數的分布情形，以紅光 650nm 波長計算，去推得皂膜厚度隨高度變化之關係得到圖 4-10。

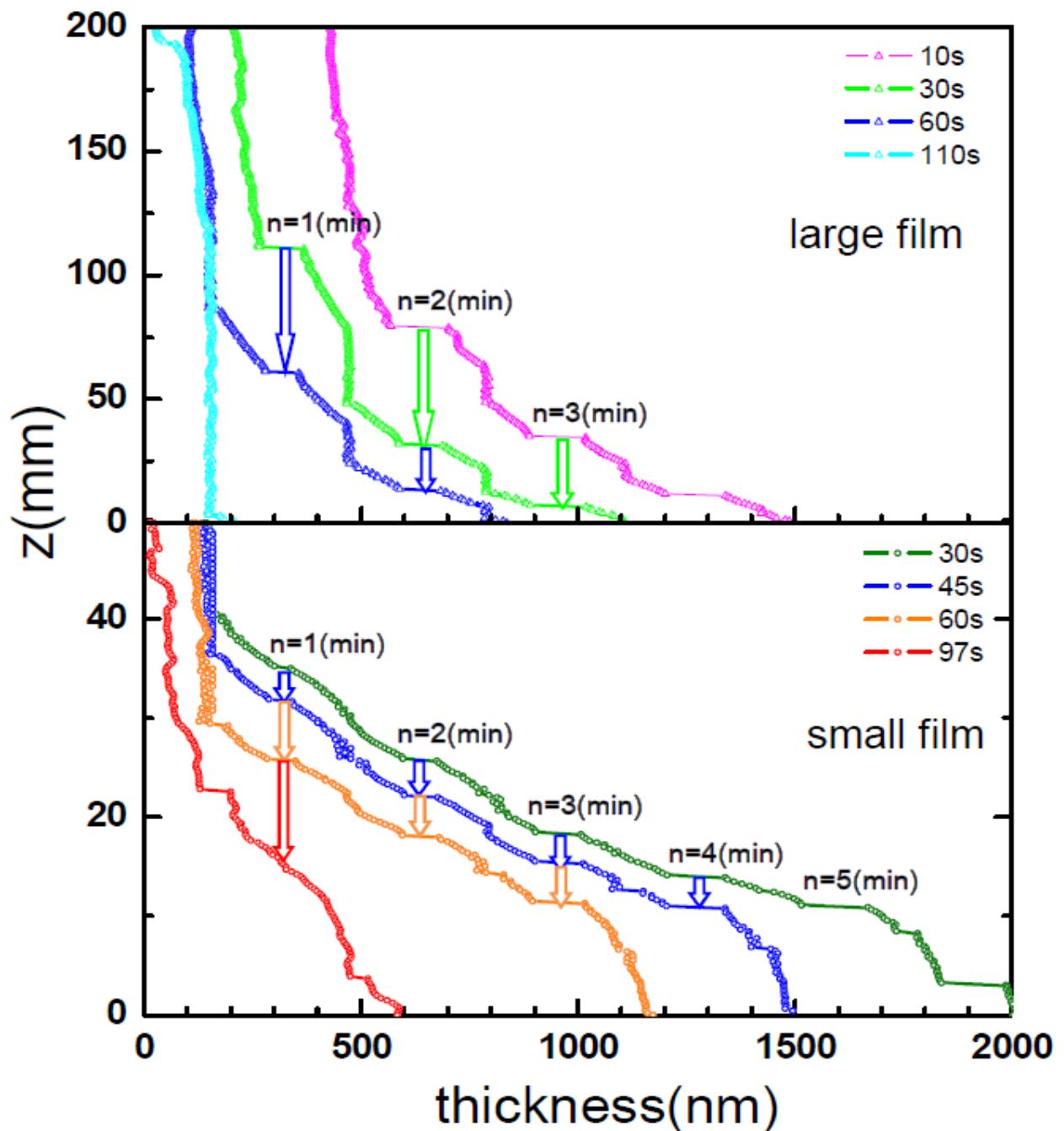
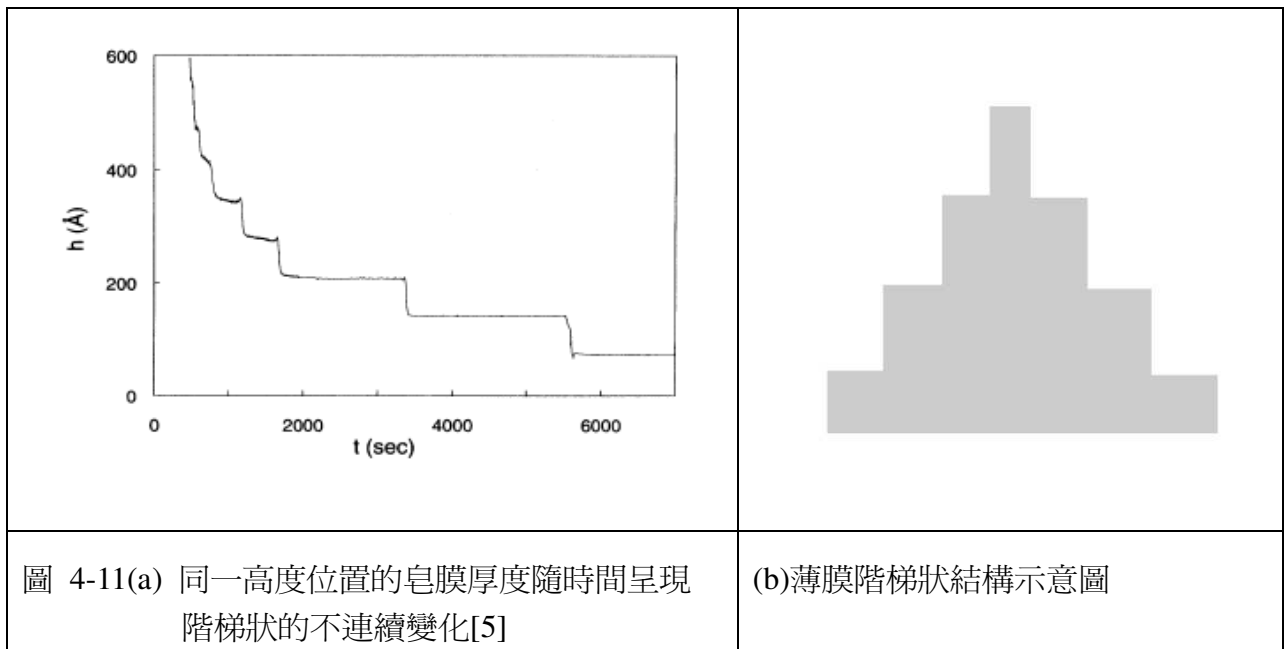


圖 4-10 大、小皂膜在紅光照射下厚度隨時間變化關係圖

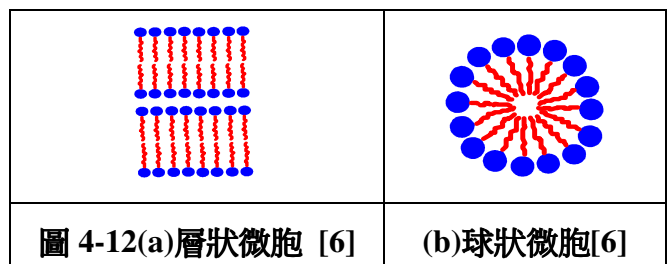
由圖 4-10 可看出因一開始大皂膜上方區域的厚度較厚，故其會隨時間逐漸變薄，所以 10s 時尚未產生  $n=1$  之暗紋，直到 30s 上方厚度夠薄時才出現  $n=1$  之暗紋。但小皂膜頂端區域 30s 時的厚度就薄到 150nm 左右，故之後不太隨時間改變，直到黑膜出現後頂端的厚度才開始有變薄的現象。小皂膜降至低處的干涉暗紋會因皂膜底端強烈的邊界再生現象而逐漸消失，造成皂膜表面干涉暗紋的數目越來越少，如圖 4-10 中 30s 時小皂膜的暗紋數目為 5，45s 降至 4，60s 降至 3，97s 時就只剩下 1 條  $n=1$  的暗紋了。大皂膜底部邊界再生現象較微弱，故暗紋減少的情形較不明顯，如圖 3-1(b)所示。大皂膜底部有堆積多條的密集暗紋相對應的厚度並未在圖 4-10 中標示呈現。

#### (四)、鉛直皂膜厚度不連續分布之微觀機制探討

搜尋網路找到有研究用紅光雷射照射皂膜同一位置[5]，由透射光強度測定推得皂膜之厚度隨時間的變化關係，結果出現了如圖 4-11(a)的不連續變化。本實驗是測量皂膜在同一時刻，厚度隨高度變化的關係；而圖 4-11(a)的實驗是測相同高度，厚度隨時間的變化關係。圖 4-11(a)呈現階梯狀，代表在同一高度的皂膜會維持相同厚度一段時間，而在某瞬間厚度突降。代表下移瞬間，部分皂膜結構會突然往下流動而導致此位置觀測之厚度有突降現象。但崩落後此位置的厚度又是另一個定值。綜合他人之論文[5]與本作品提到黑膜中厚度有 5nm 及 24nm 之特定厚度之皂膜結構，顯示出當皂膜厚度小於數十奈米時，皂膜的結構應是呈類似階梯狀不連續的分布，且其向下運動時會以特定厚度的層狀結構體向下流動，才會出現圖 4-11(a)這種不連續的階梯狀分布。



現今市售的界面活性劑大致可分類為陰離子性界面活性劑、陽離子性界面活性劑、雙離子性界面活性劑及非離子性界面活性劑[6]，**本實驗使用的為陰離子性界面活性劑**。界面活性劑分子置於水中時，疏水基和水分子產生排斥，親水基吸引水分子。因此親油性越強的界面活性劑越易由水溶液內部移動至水溶液表面上，在非常稀薄的水溶液中會溶解成單分子或離子狀態。但當界面活性劑濃度升高時，其疏水基互相吸引使分子結合形成所謂的微胞(micelle)。微胞為分子集結到 100 個以上所形成的小粒子，其形狀有球狀、層狀(如圖 4-12)等，微胞的形成會使得界面活性劑溶液呈現膠體(colloid)特性，而微胞開始形成之濃度稱為臨界微胞濃度( cmc; critical micelle concentration)，本實驗中的高濃度溶液超過 cmc，當中有微胞生成。

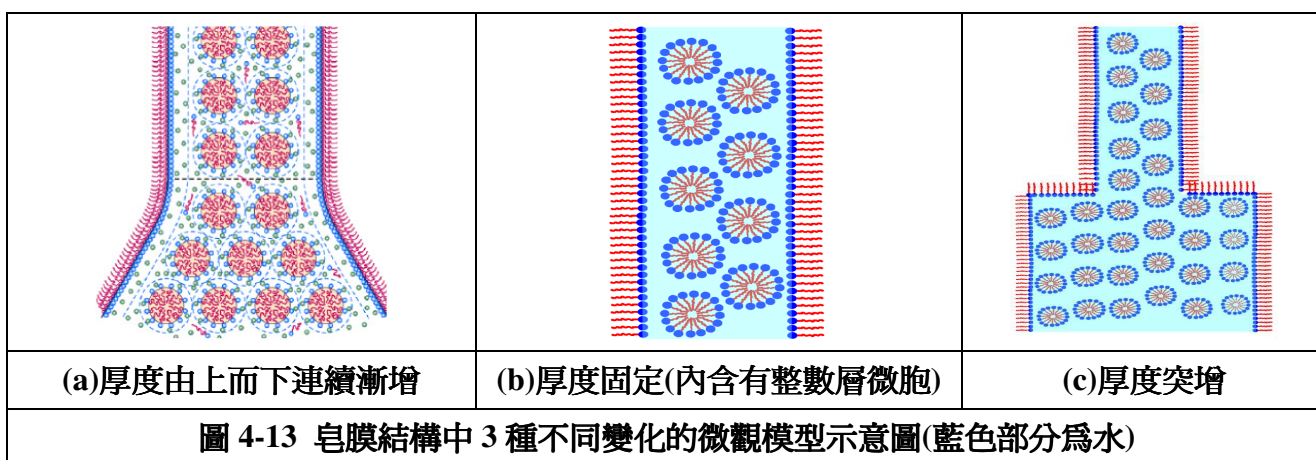




有多篇研究對此種不連續厚度分布提出說明，搜尋到資料[7]發現奈米皂膜會出現某些特定厚度的階梯狀結構，是因為皂膜中的層狀微胞或球狀微胞，都有固定的大小(約數個奈米)，所以皂膜厚度的變化時應當以微胞尺寸的整數倍作改變並非任意數值，且此種不連續分布在皂膜越薄時越明顯，故皂膜厚度會隨高度出現近似階梯狀的不連續分布。

我們將實驗中觀察到的 3 種皂膜厚度的變化情形：當位置由上而下時呈現連續漸增、厚度固定、厚度突降的相關微觀機制整理成圖 4-13 系列加以說明。

皂膜厚度隨由下而上時連續漸減類似圖 4-13(a)所示，在上下方不同厚度的皂膜內形成上窄下寬的流動通道，微胞會於通道內向下流動，所以造成厚度向下連續漸增。圖 4-13 (b) 之厚度固定是代表此刻皂膜厚度內含有整數層的微胞並形成穩定結構。而實驗中出現皂膜下方厚度突增的部分(圖 4-13 (c))，是代表有整數層的微胞累積一段時間後，瞬間一起向下流動堆積於此位置造成下方厚度突增，這種現象是類似液晶的層流現象。



鉛直皂膜中的分子為何隨時間會逐漸或瞬間下移呢？一般直觀認定是重力，但是當皂膜厚度薄到奈米尺寸時，重力的影響甚小，主要是因為分子間的凡得瓦力所造成。

因皂膜下方厚、上方薄，表示下方的分子數形成的凡得瓦引力較強，造成皂膜分子會有逐漸向下運動堆積的趨勢。而皂膜中的分子形成之穩定層狀結構可以停留在皂膜某個高度一段時間後，再集體往下流動，應當是此層狀結構本可以維持穩定不動，但當下方的凡得瓦力或其他作用的累積超過某臨界值時，造成此層狀結構無法繼續維持在此位置而產生瞬間滑落的現象。

#### (五)、外加平行皂膜表面不同強度之電場、改變皂膜濃度觀察其厚度變化

本系列實驗因大皂膜上的所產生之電場較小，無法觀察到皂膜干涉暗紋產生明顯的變化，故均採用小皂膜做實驗。而短波長的光，鑑別率越高，所以藍光可得到較精細的皂膜厚度分布。但實驗時要操作電壓開關又要能清楚拍攝皂膜干涉圖案，過程中藍光對眼睛太過刺激易生傷害，所以電場系列的皂膜干涉拍攝，均用紅光(650nm)進行實驗，而此時拍攝方向與皂膜法線夾角均為  $60^{\circ}$ 。

##### 1、外加電場向下，此時電壓為正：

在外加電場與重力同向時，皂膜底端的流體持續向上流動，但頂端的部份也出現向下

流動的現象(如圖 4-14)，導致皂膜擾動更加劇烈，很快就破了。這是為什麼呢？因為實驗使用的是陰離子性界面活性劑，由**界面活性劑分子解離出的陽離子**受到向下的電場，產生向下的電力，所以皂膜頂端的液體被陽離子帶動一起產生向下的流動。但頂端向下流動的情況在正電壓較小時(如 50V)較微弱，因此時電場較小，造成液體之流動較少；另外在通電一段時間後頂端向下流動也會較微弱，因為此時較多的陽離子都已至皂膜下方，所以皂膜頂端向下流動的情形會大為減少。

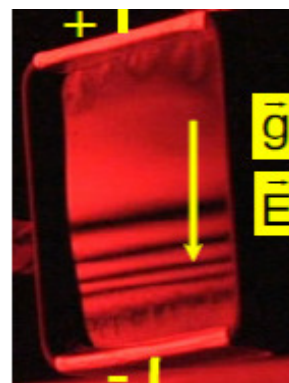


圖 4-14 小皂膜在外加電場與重力同向時之干涉圖片

測量不同正電壓、不同濃度下皂膜存在的時間，並在相同條件下拍攝數次後，加以平均求出各條件下皂膜的平均生存期做成表 4-2。由表 4-2 發現濃度固定下電壓越大時，皂膜的平均生存期越短。因為電壓越大，電場越強，陽離子所受之電力越大，形成之向下的流動越劇烈，皂膜越易破裂。而電壓固定下，濃度越高時，皂膜的平均生存期也越短。因為濃度越高，越多陽離子會受到電力產生擾動，皂膜越容易破裂。

電壓(V) \ 濃度	0	50	100	150
低	262s	235s	83s	54.3s
中	281s	77.5s	38.5s	30s
高	350s	50s	35s	22.5s

表 4-2 3 種濃度之小皂膜在外加電壓為 0、50、100、150V 4 種電壓下的平均生存期

由於外加電壓為正時，皂膜對應的干涉圖案變化與未加電壓時類似，只是皂膜表面擾動更劇烈、更快變薄且更快破裂，故在此省略正向電壓下不同時刻之皂膜高度-厚度之變化關係圖。

## 2、外加電場向上，此時電壓為負：

不論何種濃度之皂膜，此時皂膜底端的液體向上流動的效應會較電場為零時來得更明顯。將不同負電壓下 3 種濃度皂膜存在的時間加以平均做成表 4-3。由表 4-3 可看出濃度固定下，負的外加電壓越多時，皂膜的平均生存期越短；外加負電壓相同下，皂膜濃度較大者，平均生存期大都較短。因為電壓越大、或皂膜濃度越大，皂膜擾動會更強烈，易使生存期縮短。

電壓(V) \ 濃度	-50	-100	-150
低	370s	280s	108.6s
中	235s	210s	112.5s
高	170s	80s	62.5s

表 4-3 3 種濃度之小皂膜在外加電壓為 -50、-100、-150V 3 種電壓下的平均生存期

實驗中觀察到各式濃度、各種負電壓之小皂膜下方區域之暗紋大都往下移並漸消失於底端；而皂膜上方的暗紋在不同電壓、不同濃度下則有不同的變化情形。茲將觀察到不同電壓、不同濃度下小皂膜干涉暗紋之變化分類敘述如下：

### (1)、外加電壓-50V

-50V 電壓下，各式濃度皂膜下方區域之暗紋( $n \geq 3$ ,  $n$  為干涉級數)均往下移並漸消失於底端；上方暗紋( $n \leq 2$ )在低濃度時有明顯上升現象，中濃度為上升少許，高濃度只會下降，並未上移。分析原因應當是濃度較小時皂膜內陰離子界面活性劑分子解離出的陽離子受到向上之電力，可較有效帶動附近的液體向上運動，藉以補充皂膜上方之厚度，使得暗紋上移；但高濃度的皂膜其內散布大量的微胞，容易阻擋陽離子帶動附近的流體向上運動，較無法補充皂膜上方之厚度故此時上方的暗紋不會上移。

### (2)、外加電壓 -100V 及 -150V

#### 皂膜上方暗紋( $n \leq 2$ )：

-100V 及 -150V 兩種電壓下，高濃度皂膜上方的暗紋只有上移，並未消失。但中、低濃度皂膜上方的暗紋有些會上移至頂端後消失，之後又再度出現。

低、中濃度上方之暗紋上升至頂端後會消失於頂端，之後又再於皂膜出現，但高濃度上方的暗紋只有上移，並未消失。分析原因應當是中、低濃度的皂膜其內陽離子此時受到更強的向上電場，可帶動更多的流體向上運動，更能補充皂膜上方之厚度，使上方的干涉暗紋不但可上移至頂端，更在頂端消失；待皂膜上方水份蒸發，厚度變薄後消失的暗紋才會再度出現於皂膜並接著下移。濃度高的皂膜其內散布大量的微胞，同樣是阻礙陽離子帶動流體向上運動，造成皂膜上方的增厚的情形較小，故干涉暗紋會上移但不會消失於頂端。

下面就外加電壓為負時，出現暗紋上移並消失於頂端，之後又再出現的情形，舉其中 2 個暗紋變化較明顯的例子來分析其厚度變化情形。

皂膜在不同時刻照片					
時間(s)	20	32	43	132	194

圖 4-15 低濃度小皂膜在 -150V 電壓下於不同時刻之干涉圖片

第 1 個例子是低濃度小皂膜在 -150V 下，於不同時刻的干涉暗紋變化。如圖 4-15 中可看出 20 秒  $n=1$  之干涉暗紋會逐漸上移至頂端並在 32 秒時隱沒於頂端中，43 秒時皂膜只剩下  $n=2$  之暗紋，接著  $n=2$  之暗紋逐漸下移。121 秒時，消失的  $n=1$  暗紋再度由頂端出現，並往下移動，於 132 秒時移動到皂膜中央的位置。194 秒時頂端黑膜已經形成， $n=1$  暗紋此

時下移至皂膜較下方的位置，而 132 秒及 194 秒時  $n=2$  暗紋都維持在最底部並不斷受到擾動，但沒有消失。

為了解低濃度小皂膜在  $-150V$  電壓下不同時刻皂膜厚度隨高度變化關係，我們將 20s、32s、43s、132s、194s 五種不同時刻的皂膜厚度-高度關係作成圖 4-16。

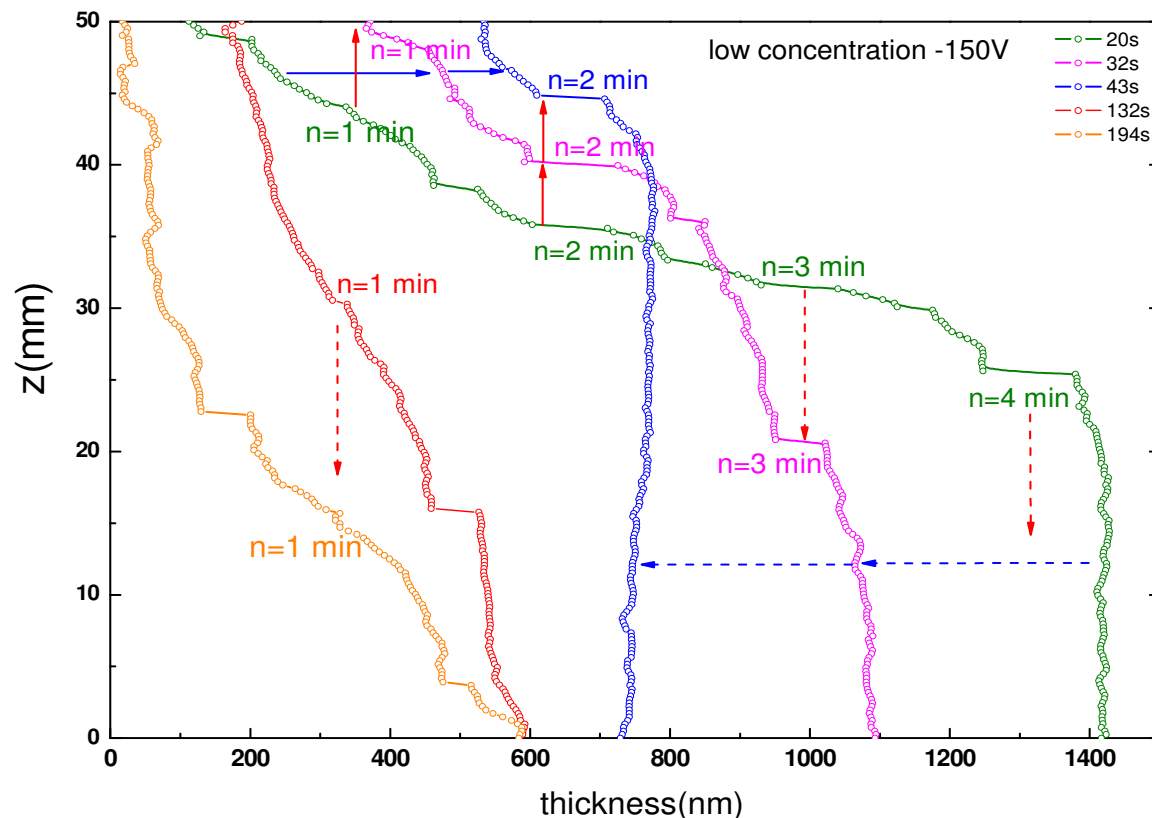


圖 4-16 低濃度小皂膜在  $-150V$  電壓下於不同時刻之高度-厚度之關係圖形

由圖 4-16 可看出在 20-43s 期間， $n=1$ 、2 的暗紋不斷向上移動(如圖紅實線箭頭所示)。其中  $n=1$  的暗紋向上移動於 32s 時漸從頂端消失，在 43s 時完全消失。20 秒時  $n=3$ 、4 的暗紋逐漸下移，直到消失於底端(如圖綠虛線箭頭所示)。此期間內皂膜上方的厚度漸增(如圖 4-16 藍實線箭頭所示)而下方的厚度漸減(如圖藍虛線箭頭所示)。此段時間皂膜下方的流體會跟著陽離子一起往上流動，使得皂膜下方厚度變薄，上方厚度變厚。

在 42-194s 期間，皂膜上下方厚度均變薄，43s 時消失的  $n=1$  暗紋於 132s 時再度出現並往下移動(如上圖紅虛線箭頭所示)。此時段內皂膜之陽離子應當大都堆積在頂端，下方缺乏陽離子帶著流體上移，而皂膜上的水分持續蒸發，使得整體厚度均變薄。

第 2 例為低濃度小皂膜在  $-100V$  下，於不同時刻的干涉暗紋變化。由圖 4-17 可看出在 20-63s 期間， $n=1$ 、2 的暗紋不斷向上移動；其中  $n=1$  的暗紋向上移動在 32s 時逐漸隱沒於頂端，40s 時  $n=1$  的暗紋完全消失，而  $n=2$  之暗紋在 63s 漸消失於頂端。20 秒時  $n=3$ 、4、5 的暗紋之後逐漸下移，直到消失於底部。代表此期間內皂膜厚度的變化類似圖 4-16 中 20-43 秒內的情形，皂膜上方的厚度變厚而下方的厚度變薄。

在 74-168s 的期間，皂膜上下方厚度均變薄，63s 消失中的  $n=2$  暗紋於 75s 時再度出現並往下移最後停留於底端；而 40s 時消失的  $n=1$  暗紋也於 112s 時再度出現並往下移動。此時段內皂膜厚度變化類似圖 4-16 中 42-194 秒內的情形，也因皂膜上的水分持續蒸發，使得整體厚度均變薄。此例對應不同時刻皂膜厚度-高度變化關係圖與圖 4-16 類似，在此從略。

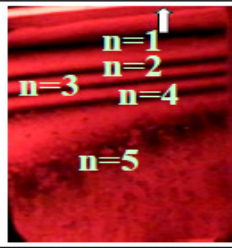
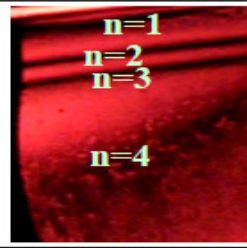
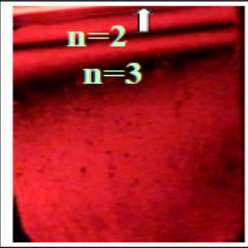


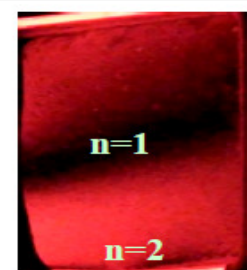
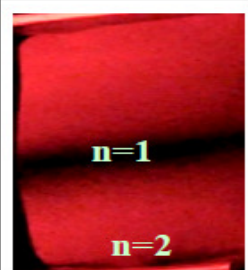
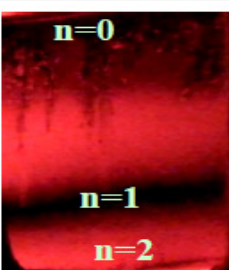
皂膜在不同時刻照片				
時間(s)	20	32	40	63
皂膜在不同時刻照片				
時間(s)	75	112	137	168

圖 4-17 低濃度小皂膜在 -100V 電壓下於不同時刻之干涉圖片

### 皂膜下方暗紋( $n \geq 3$ ):

各式濃度皂膜下方暗紋在電場向上時，大都下移並漸消失於底端，但在中、低濃度-100V 及-150V 時觀察到部份皂膜在末期時，下方的暗紋往下移動至底端消失後，又再度出現於皂膜底端，更劇烈者底端再生的暗紋會再往上移動並與上方下沉之暗紋產生夾擠的現象，現就此強烈變化的情形加以分析說明。



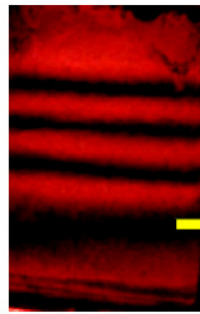
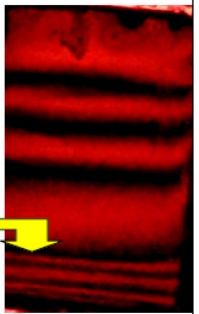

皂膜在不同時刻照片					
時間(s)	50	67	73	80	120

圖 4-18 中濃度小皂膜在 -150V 電壓下於不同時刻之干涉圖片

如圖 4-18，50-67s 內皂膜底端產生強烈的邊界再生現象使得底部的物質向上流動，隨著時間演進，皂膜的干涉暗紋逐漸下移並消失在底端。60s 開始通電，67 秒時干涉暗紋仍持續減少，此時只剩 4 條，第 5 條暗紋正消失中。但自 73 秒起皂膜底端新增生了數條干涉暗紋，表此刻起皂膜下端的厚度逐漸增加，而非變薄。73 秒時皂膜底端

新生的密集暗紋會逐漸上移，當其與上方下降的暗紋相遇時，會夾擠原來下沉中較寬的暗紋使其變得窄小，如 80s 時的黃色箭頭指示。80s 時皂膜的條紋間格為上寬下窄代表皂膜厚度上薄下厚，且下半部的厚度隨高度之變化率較大。但 102 秒時形成的干涉條紋間隔近似均勻，表此時皂膜厚度分布是近似楔型結構的。因圖 4-18 中的皂膜在破裂前尚未出現黑膜，不能得知每條暗紋對應之干涉級數，故無法對此情況做出不同時刻厚度隨高度的變化關係圖。

外加負電壓時，各種情形下的干涉暗紋變化相當複雜，現將觀察到的結果整理成表 4-4。

上方 暗紋	電壓(V) 濃度	-50	-100	-150
	低	明顯上升	上移至頂端後消失， 之後又再度出現	
	中	上升少許		
	高	均下降	均上移，但未消失	
下方 暗紋	電壓(V) 濃度	-50	-100	-150
	低	均下移並 漸消失於 底端	大都下移並漸消失於底端，但 有時會於底端重新產生，更甚 者會再往上移。	
	中			
	高	均下移並漸消失於底端		

表 4-4 3 種濃度小皂膜在外加電壓為 -50V、-100V、-150V 之上下方干涉暗紋變化情形一覽表

根據搜尋到的資料發現奈米級皂膜厚度的不連續變化已有大量的研究探討，但很少人去分析沿著重力方向外加電場時會對皂膜厚度造成何種影響。我們搜尋網路只找到一篇論文[8]是探討此種現象的。此篇研究使用的裝置示意圖及實驗結果如圖 4-19 所示。

該研究中的圓柱狀皂膜(厚度約 100 nm) [8]，濃度超過臨界微胞濃度，底部基座有溶液儲存(reservoir) 如圖 4-19(c) [8]，實驗裝置至於飽和水蒸氣壓的環境中，水分不易蒸發。通以向下的電場後，厚度會有增厚的現象，此點可由皂膜顏色的變化得知。

而由圖 4-19(c) [8]亦可看出當皂膜電導值趨向穩定後，電場越強，皂膜電導越大，表厚度越厚。他們解釋是由於當中的陽離子表面活性劑解離出的長狀的陽離子會排列在皂膜表面，而解離出的陰離子會因受到向上電力的作用帶動週遭液體向上流動(如圖 4-19(b) [8])，所以會造成皂膜變厚。

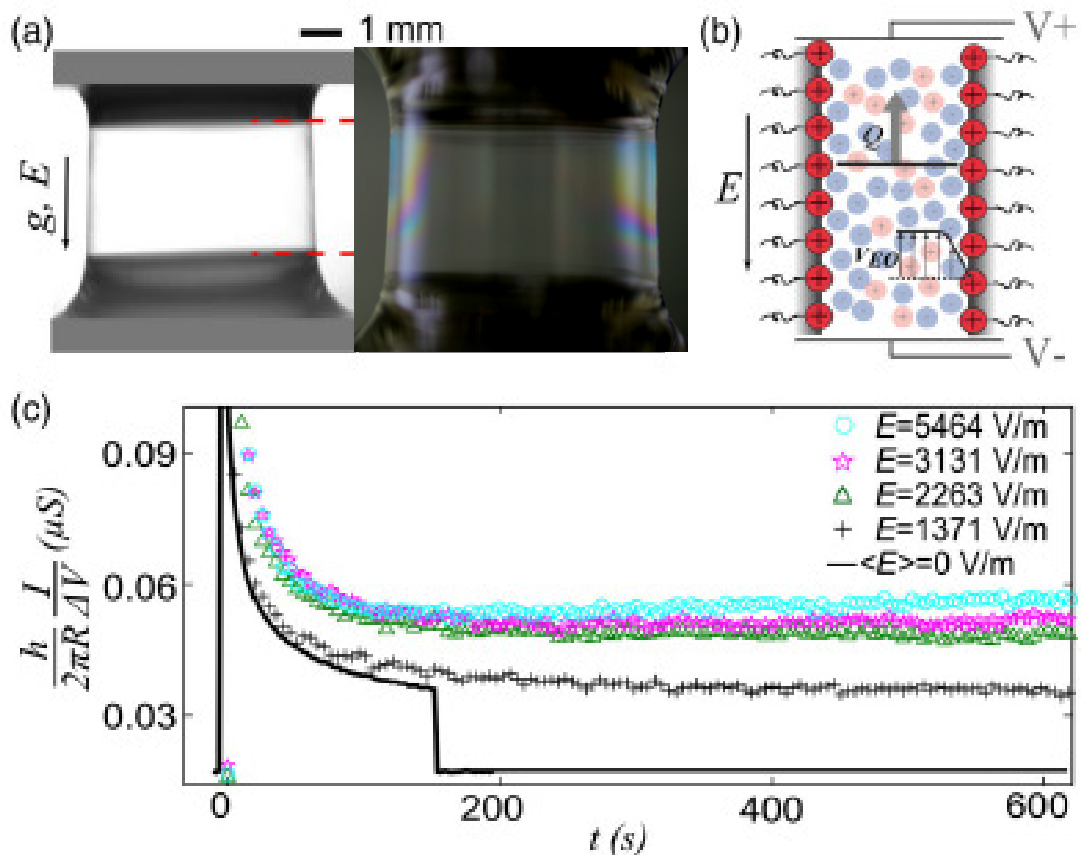
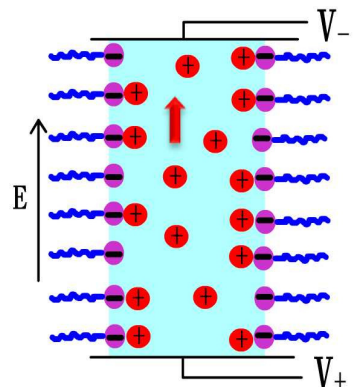


圖 4-19 (a)圓柱狀皂膜實驗裝置 (b)外加電場之示意圖 (c)在不同電場下皂膜電導-時間關係圖[8]

本實驗使用的是陰離子界面活性劑，其解離出的長狀的陰離子亦會排列在皂膜表面，而解離出的陽離子在外加電場向上時，亦會受到向上電力的作用帶動週遭液體向上流動(如圖 4-20)，所以也會造成上方皂膜變厚。但本實驗中皂膜底部基座較缺乏溶液儲存(reservoir)，所以測出皂膜上方厚度增加但下方厚度變薄。

圖 4-20 含陰離子界面活性劑之皂膜於外加向上電場之示意圖



本實驗中的 3 種電壓所形成的平均電場大小為(3000 V/m、2000 V/m、1000 V/m)，其實我們也有用三用電表測電流，但因缺乏自動化測電流裝置只能得到零星的數據點，故未列出電流隨時間變化關係圖。但基本上皂膜上方增厚時，電流讀數會增加，其餘的狀態都是電流隨時間逐漸下降；另外電壓越大時，電流越大。本實驗只在有冷氣的實驗室觀測，無法控制水分不蒸發。

我們的裝置雖然簡單，但可具體由干涉暗紋的上升看出上方皂膜變厚。另外也發現皂膜中的微胞太多時，不利於離子帶動液體向上流動，較無法讓皂膜有效增厚；電場太大時皂膜擾動過劇易破，所以要選擇適當濃度的皂膜及適當的電場大小才能有效增加皂膜的厚度，達到厚度控制的效果。論文中提到此種用電壓控制當中的離子及液體流動叫電滲透(electro-osmosis)，皂膜因電滲透產生的厚度變化，可用來設計成奈米級的流體二極體以控制電流。相較於一般固態奈米元件的電通道，他們稱此種皂膜上的電流導通為軟式奈米流

體通道(soft nanofluidic channel)。我們認為皂膜因電滲透產生的厚度變化除了可以設計成二極體外，似乎還可以設計成可變電容。此種奈米軟通道還缺乏研究探討，所以未來本實驗還有很多值得探討的物理現象。本實驗中觀察到在平均電場 3000 V/m 以下，所有實驗的皂膜最多只能讓  $n=1$  及  $n=2$  之暗紋上升甚至消失，卻不太能讓  $n \geq 3$  之暗紋上移。這代表 3000 V/m 以下之電滲透似乎只能對厚約 600nm 以下的鉛直皂膜產生厚度控制的效果，卻不太能讓厚度為 1000nm 之鉛直皂膜再增厚，所以微米級的鉛直皂膜應當不太適用來設計成流體二極體，因為無法有效調整厚度來控制電流。

茲將本作品及參考資料[8]之實驗作一比較分析，羅列於表 4-5。

實驗內容	本實驗	論文實驗
皂膜外型	方型(長度 50.0mm)	圓柱型(長度 5.5mm)
電流	無法測得電流隨時間變化之完整情形	可由電流隨時間變化之完整情形去推得皂膜厚度隨時之變化
干涉圖案	可由近似單色光干涉圖案去推得皂膜厚度隨時之變化	用白光觀察干涉圖案顏色變化，得知皂膜變厚
實驗環境	無法控制皂膜水分不蒸發	可控制皂膜水分不蒸發
皂液種類	陰離子界面活性劑，不需添加 NaCl 即可觀察到皂膜增厚的電滲透現象。	陽離子界面活性劑，需添加 NaCl 增加離子數目才能觀察到皂膜增厚的電滲透現象。
皂液濃度	不同濃度的皂膜電滲透能力有差別，高濃度皂膜電滲透能力較差，較不能有效增厚皂膜。	未討論。
液體流動速率	未討論	有深入探討

表 4-5 本作品與參考資料[8]之實驗比較一覽表



## 五、結論與應用

皂膜形成至皂膜破裂，我們將其分成三個階段：前期、中期、後期並加以分析其中的變化情形。而不同濃度的皂膜在不同的外加電場下如何改變厚度也做了相關的探討，我們將本實驗的結果歸納出下列的結論。

1. 前期：大皂膜因重力影響較強，使頂端液體向下流動；小皂膜因表面張力影響較強，造成底端產生劇烈的邊界再生現象。
2. 中期：此時干涉圖案形成暫穩態，一段時間後干涉暗紋會隨時間逐漸下移。大皂膜之暗紋往下移動堆積在底部，造成皂膜干涉條紋分布上疏下密；而小皂膜之干涉暗紋會因底部的邊界再生現象擾動而消失，造成暗紋數量減少。
3. 中期產生之皂膜側面結構具有三種主要型態：厚度固定、下方厚度突增及厚度隨位置向下逐漸增厚，這3種幾何結構是由於內部微胞分布情形不同所造成的。
4. 後期：因水分蒸發及皂膜分子持續向下堆積，使得皂膜上方厚度不斷變薄直到出現黑膜，此時皂膜下方開始呈現非常不穩定的流動。
5. 外加電場向下時，皂膜對應的干涉圖案(厚度)變化與未加電壓時類似，但頂端部分出現向下流動，且皂膜表面擾動更劇烈、更快變薄且更快破裂。
6. 外加電場向上，中低濃度皂膜上方的暗紋較易因外加電場作用產生上移甚至消失的現象，表此時之電滲透易使上方皂膜變厚，但高濃度皂膜則較不易。而皂膜下方暗紋大多下移並消失於底端；但有時消失的暗紋會於底端重生，更甚者會再往上移。

現今各式薄膜在生物、物理、電機等各大領域都有非常重要且廣泛的用途，所以薄膜研究是非常重要的技術。本實驗利用皂膜之單色光干涉，觀察到在適當的電場、合適濃度下，可以控制皂膜的厚度變厚，才能進一步去操控電流。軟式奈米流體通道此類的研究才剛開始起步，本實驗還有很多值得探討的現象，可以持續深入研究。

## 六、參考資料

1. <http://www.ch.ntu.edu.tw/~byjin/Bubble/science/>
2. <http://laser.physics.sunysb.edu/~ett/report/>
3. Cyril Isenberg (1992). *The Science of Soap Films and Soap Bubbles* (pp. 31-37). New York: Dover Publications.
4. <http://isites.harvard.edu/icb/icb.do?keyword=k16940&pageid=icb.page93273>
5. O. Krichevsky and J. Stavans, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 2752(1995)
6. 王鳳英編譯，*界面活性劑的原理與應用*(pp. 30-59)，高立圖書
7. N. D. Denkov, and K. Nagayama, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 2354(1996)
8. O. Bonhomme, O. Liot, A. Biance and L. Bocquet, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 054502(2013)

## 【評語】 160013

本作品探討奈米皂之厚度變化，發現厚度為不連續，呈現跳躍式改變，原因與液體成分中之液胞大小有關，此結果與直覺的預測不同，結果有新意值得嘉許。作者能以單色光之干涉觀察厚度變化，方法簡單結果精確。

當厚度到達奈米級，厚度的變化是夠為有趣實驗的觀察較為困難，是值得繼續探討的方向。