



國立台北科技大學

103學年度光電工程系

專題實務報告

微管內填入摻染料高分子分散液晶
之隨機共振雷射

Random laser from Polymer dispersive
liquid crystal in cylindrical
microcavities

指導教授：林家弘 教授

專題生：張哲瑋、邱柏瑜

中華民國 103年

目錄

- 一、緒論
- 二、介紹
 - 2.1 液晶介紹
 - 2.2 向列型液晶(Nematic LC)
 - 2.3 層列型液晶(Smectic LC)
 - 2.4 膽固醇液晶(Cholesteric LC)
 - 2.5 Norland Optical Adhesive 65(NOA65)
 - 2.6 雷射原理
 - 2.7 雷射種類
 - 2.7.1 氣體雷射
 - 2.7.2 固體雷射
 - 2.7.3 液體雷射
 - 2.7.4 液晶雷射
 - 2.8 螢光
- 三、製作原理
- 四、實驗材料與架構
 - 4.1 實驗材料
 - 4.2 實驗步驟
 - 4.3 實驗裝置
- 五、成果與討論
- 六、結論
- 七、未來發展與應用
- 八、致謝
- 九、參考文獻

圖目錄

- Fig.1(a) 向列型液晶排列
- Fig.1(b) 層列型液晶排列
- Fig.1(c) 膽固醇液晶
- Fig.1(d) 膽固醇液晶會將與液晶旋性相同的入射光反射
- Fig.1(e) NOA65 成分結構圖和氫鍵示意圖
- Fig.1(f) 雷射基本架構圖
- Fig.2(a) 液晶之雙折射變化
- Fig.4 PM5975 之結構
- Fig.4(a) 液晶瓶放至微量天秤內並歸零示意圖
- Fig.4(b) 測量並混合適當比例的染料和高分子和液晶示意圖
- Fig.4(c) 並將調配好的液晶混合物放至加熱台上加熱攪拌至完全混合示意圖
- Fig.4(e) 將玻璃微管放置液晶瓶中示意圖
- Fig.4(d) 使用 AB 膠將灌有液晶混合物之玻璃微管封口示意圖
- Fig.4(f) 並將玻璃微管放置 UV 光下示意圖
- Fig.4(g) 實驗架構圖
- Fig.5-1 雷射染料的自發輻射光譜和激發光譜
- Fig.5(a) 樣品 1(不摻雜 NOA65)激發光譜
- Fig.5(b) 樣品 2(10wt%之 NOA65)激發光譜
- Fig.5(c) 樣品 3(20wt%之 NOA65)激發光譜
- Fig.5(e) 樣品 4(30wt%之 NOA65)激發光譜
- Fig.5-2(a)(b) 泵能量(E_p)從 $5 \mu\text{J}/\text{pulse}$ 增加至 $50 \mu\text{J}/\text{pulse}$ 樣品 II(10% NOA65) 的發光光譜
- Fig.5-3(a)(b) 顯示出相對於泵浦能量輸出發光光譜的變化
- Fig.5-4(a)(b) 工作溫從 11°C 到 50°C 對樣本 III (20% NOA65) 雷射光譜的變化影響
- Fig.5-5(a)(b) DD-PDLCs 的毛細管 (樣品 II, 20 wt% NOA65) 在 11°C 時隨機

雷射的特性

表目錄

表 3-1、MDA-98-1602 與 NOA65 折射率之比較

表 5-1、個樣品的中心波長、線寬和 Q-Value

表 5-2、表示樣品 III 在各個不同的溫度下，所產生的峰值頻帶寬度及半高寬和

Q 參數

一、緒論

我們主要研究在空心玻璃管內填入摻染料高分子分散液晶隨機雷射特性之研究，其中液晶混合物是由摻有雷射染料的向列型液晶混合物中加入不同濃度的單體(10%, 20% 與 30% NOA65)製作而成，其中利用毛細現象使液晶混合物填入空心玻璃微管中，接著利用紫外光曝曬此時單體會轉變成為高分子聚合物，並將光學膠塗抹於空心玻璃微管的兩端；利用 Q-開關 Nd:YAG 雷射作為泵激光源，並使用光譜儀收集摻染料雷射高分子分散液晶隨機雷射的頻譜，在此雷射中除了利用液晶作為散射介質，由於高分子聚合物與液晶的折射率不同，使得空心玻璃微管內光散射的強度增加，因此發現在自發性輻射光譜上產生多根窄頻的雷射譜線，其中液晶混合物所激發之雷射譜線的數量和線寬及雷射的臨界功率會受到單體的密度和大小所影響，因此在加入 20% 單體所得到隨機雷射的特性最明顯，當濃度增加到 30% 時由於散射損耗的增加，使得所得到的輸出光頻譜強度會下降；最後，我研究摻入 20% 單體高分子分散液晶隨機雷射在不同溫度下的特性，發現在較低溫度情況下，所激發的模態數目較多且雷射具有低的臨界功率，由計算得到的 Q 因子的數值也較高，推究其原因為低溫環境下，液晶的雙折射會大於高溫環境，因而造成玻璃微管內的散射強度增加。

二、介紹

2.1 液晶介紹(Liquid crystal)

液晶(liquid crystal)的首度發現，由歷史文獻記載是於西元 1888 年，奧地利的植物學家 F. Reinitzer 研究膽固醇的脂化合物時，發現加熱此化合物，出現了二次溶解的現象。此化合物加熱至 145°C 時，呈現一種介於固相和液相間的半熔融流動白濁狀液體，而當溫度升高到 179°C，則變成透明的等向性液體(isotropic liquid)。1889 年，德國物理學家 O. Lehmann 對此化合物做詳細的分析。他在偏光顯微鏡下發現，此白濁液體化合物具有異向性(anisotropic)結晶所具有的雙折射率

(birefringence) 的光學性質，故將這種似晶體的液體命名為液晶。因此，對於『液晶』的詮釋，我們可以說它是在某一特定溫度的範圍內，將同時具有液體及晶體的特性，換言之，既有液體的流動性質，亦有晶體的光學異向性質。

2.2 向列型液晶 (Nematic LC)

向列型液晶為棒狀分子作平行排列，其分子軸方向保持平行，但不具有層列型液晶般的層狀構造，只有一維的規則度。它具有光學上的正折射性。與層列型液晶比較，該液晶分子於長軸方向容易自由運動，因此其分子間作用力小，黏度也較小，且易於滑動，為所有的種類液晶中，流動性最大者，是液晶成員中最重要的，也是最廣泛被使用者。如果以高倍顯微鏡觀察液晶分子，可以看到如細帶狀的外形，其命名 Nematic 在希臘語中是細扁帶狀的意思，結構如圖(a)所示，而本實驗則採用 MDA-98-1602 向列型液晶。

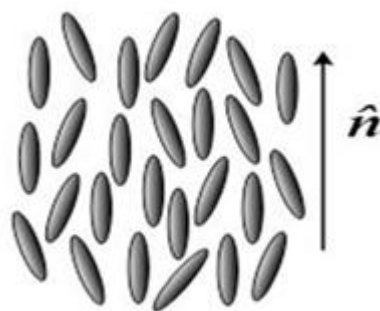


Fig. 1(a) 向列型液晶排列

2.3 層列型液晶 (Smectic LC)

這類型的液晶為棒狀分子以層狀構造排列，各個分子與層面垂直或具有一傾斜角度，而且所構呈的分子均為互相平行排列，其細分有 A、C、B、F、I、M、L、G、J、E、H、K 等多種。由於分子層間分子的互相結合力較弱，易於滑動，故層列型液晶具有二維的流體性質與二維的規則性。此液晶中，垂直於分子的光速

比平行方向的光速慢，光學上稱之為光的複折射性。而且，這類液晶的黏度比一般液晶顯著為大，是其一大特徵。

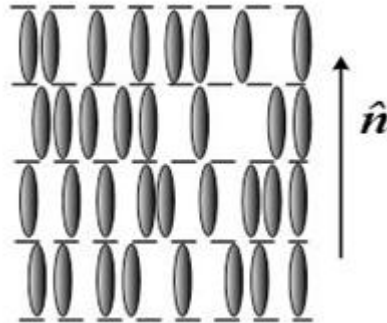


Fig.1 (b) 層列型液晶排列

2.4 膽固醇型液晶 (Cholesteric LC)

當手性分子 (chiral) 摻雜在向列相液晶中，會使液晶產生螺旋畸變，而得到一種螺旋向列相，其液晶分子排列仍有共同取向 (即導軸)，其分子平行堆積層狀排列，層和層間互相平行，在每一層中分子有一向列型一般彼此同向排列著，其長軸和層面平行。在相鄰的兩層之間，分子的長軸方向規則性地依次旋轉一定角度，層層旋轉下來形成一個螺旋狀結構。液晶分子的長軸方向再旋轉一圈 360 度後，又回到相同方向，而螺距約為可見光的波長。這類液晶分子基於特殊的螺旋構造，可以使得入射光偏轉，在光學上具有旋光性、選擇性光反射、圓偏光二色性等性質。定義導軸繞螺旋軸旋轉 2π 的長度為一個螺距 (Pitch)，因為這種螺旋型的排列結構類似生物學中的膽固醇結構，因此稱為膽固醇液晶，如圖(c)所示。膽固醇液晶會將與液晶旋性相同的入射光反射[1]，示意圖如下圖(d)。

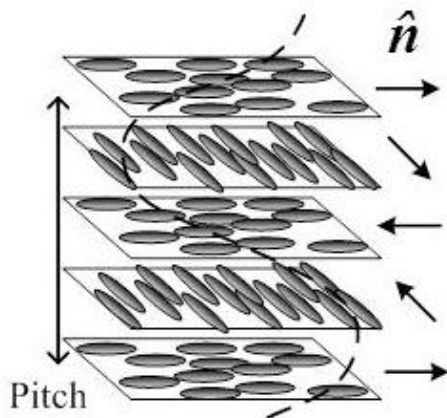


Fig.1(c)

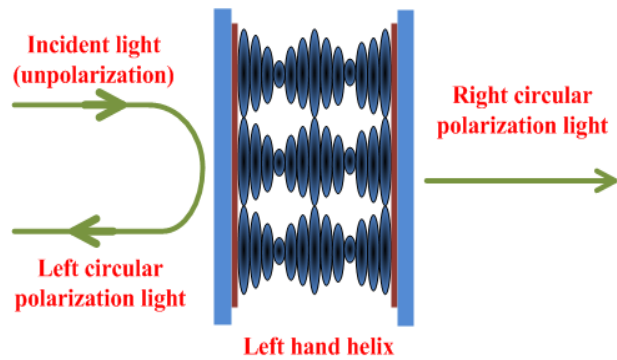


Fig.1 (d)

2.5 Norland Optical Adhesive 65 (NOA65)

NOA65 是屬於一種透明無色液體狀的 photopolymer，曝照紫外光時，會由原來的透明黏稠液體因聚合反應硬化成透明的固體，其性質如下：

- (1) 最大吸收波長範圍：350~380nm
- (2) 黏製係數(Viscosity)： $\eta=1000\sim1200\text{cps}$
- (3) 折射率：單體折射率為 1.485~1.505(溫度為 $75^\circ\text{C}\rightarrow 20^\circ\text{C}$) 聚合物折射率為 1.524。

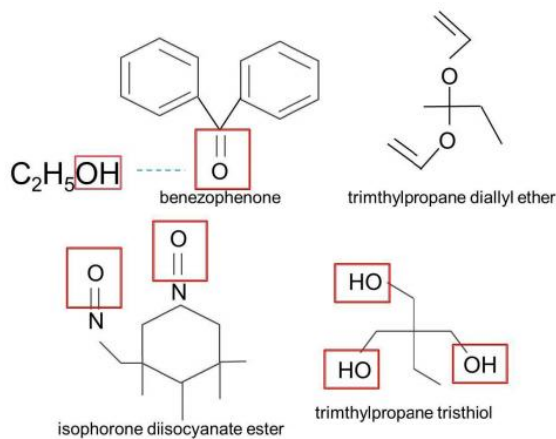


Fig.1(e) NOA65 成分結構圖和氫鍵示意圖

2.6 雷射原理(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

雷射是指通過受激輻射而產生放大的光，即受激輻射的光放大。當外加能量以電場、光子、化學等方式注入到一個能級系統並為之吸收的話，會導致電子從低能級向高能級躍遷，當自發輻射產生的光子碰到這些因外加能量而躍上高能級的電子時，這些高能級的電子會因受誘導而遷到低能級並釋放出光子

一般雷射發產生器有三個基本要素：

「激發來源」(pumping source)：把能量供給低能級的電子，激發使其成為高能級電子，能量供給的方式有電荷放電、光子、化學作用...

「增益介質」(gain medium)：被激發、釋放光子的電子所在的物質，其物理特性會影響所產生雷射的波長等特性。

「共振腔」(optical cavity/optical resonator)：是兩面互相平行的鏡子，一面全反射，一面半反射。作用是把光線在反射鏡間來回反射，目的是使被激發的光經過增益介質多次以得到足夠的放大，當放大到可以穿透半反射鏡時，雷射便從半反射鏡發射出去。因此，此半反鏡也被稱為輸出耦合鏡(output coupler)。兩鏡面之間的距離也對輸出的雷射波長有著選擇作用，只有在在兩鏡間的距離能產生共振的波長才能產生雷射。

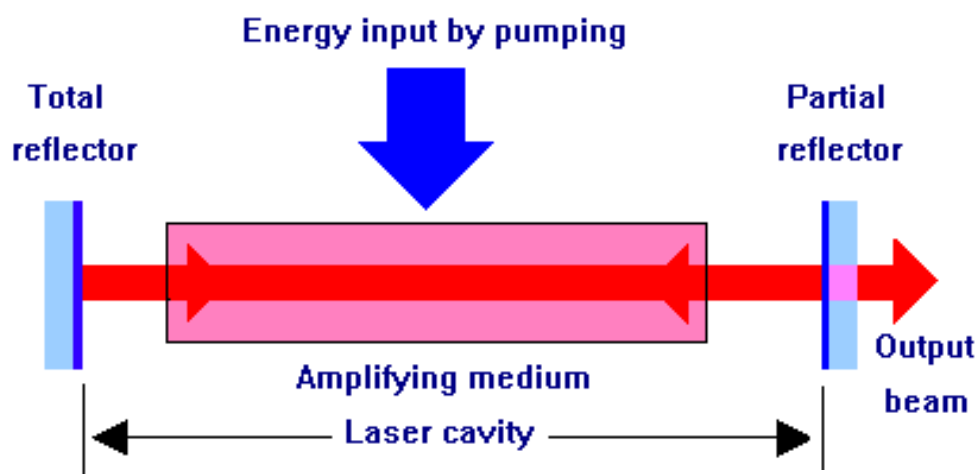


Fig.1 (f) 為雷射基本架構圖

2.7 雷射種類

2.7.1 氣體雷射

介質是氣體的雷射器，此種雷射器通過放電得到激發。

氬氖雷射：最重要的紅光放射源（632.8 nm）。

二氧化碳雷射：波長約 10.6 μm （紅外線），重要的工業雷射。

一氧化碳雷射：波長約 6-8 μm （紅外線），只在冷卻的條件下工作。

氬離子雷射：具有多個波長，457.9 nm（8%），由藍光到綠光）。

2.7.2 固體雷射

介質是固體的雷射器，此種工作物質通過燈、半導體雷射器陣列、其他雷射器光照泵浦得到激發。熱透鏡效應是大多數固體雷射器的一項缺陷。

紅寶石雷射：世界上第一台雷射器，1960年7月7日，美國青年科學家梅曼宣布世界上第一台雷射器由誕生，這台雷射器就是紅寶石雷射器。

Nd:YAG（摻釹鈮鋁石榴石）：最常用的固體雷射器，工作波長一般為 1064nm，這一波長為四能級系統，還有其他能級可以輸出其他波長的雷射。採用光學激勵的方法，就是利用普通的光來激勵雷射的工作物質以產生雷射光。普通的光照射到工作物質，引起工作物質內部的粒子數反轉而振盪產生雷射。

鈦藍寶石雷射器：具有較寬的波長調節範圍（670nm~1200nm）

半導體雷射器：電驅動的二極體。施加電流產生的大量電子與電洞複合時，便產生受激發射作用的光增益。在晶體的解理面端點處的反射形成光學諧振腔。

2.7.3 液體雷射

染料雷射，使用有機染料作為增益介質。相較於氣體和固態激射媒體，染料雷射被用於更廣泛的波長範圍內。

2.7.4 液晶雷射

液晶雷射是將液晶當作共振腔，使用染料作為增益介質。從雷射激發介質發射波長和偏振。激發介質通常是摻雜到液晶的染料。液晶雷射大小和二極體雷射相當。液晶雷射也可以說是染料雷射的一種。

本文主要就是探討液晶雷射。

2.8 螢光

當某種常溫物質經某種波長的入射光照射，吸收光能後進入激發態，並且立即退激發並發出出射光（通常波長比入射光的波長長，在可見光波段）因此螢光本身能量比吸收的光還低，然而，當吸收的光能量很高時，會有雙光子吸收可導致比吸收的輻射更短的波長輻射發射，發出的輻射也可能是所吸收的輻射波長相同，[2]；而且一旦停止入射光，發光現象也隨之立即消失。具有這種性質的出射光就被稱之為螢光。

在日常生活中發生的螢光的最顯著的例子是在紫外線光譜區中時，所吸收的輻射，從而對人眼不可見的，所發出的光在可見光區域。人們通常廣義地把各種微弱的光亮都稱為螢光，而不去仔細追究和區分其發光原理。

三、 製作原理

由於液晶為雙折射材料，所以可以適用液晶來當作散射介質，如加入增益介質即可以用來產生隨機共振雷射，其中我們在實驗中加入高分子聚合物，因為高分子聚合物 **MDA-98-1602** 與 **NOA65** 的折射率與液晶的折射率差異很大，所以可以大大的增加液晶混合物的散射強度。

NOA65 特性:

表(3-1) MDA-98-1602 與 NOA65 折射率之比較

	折射率
NOA65	單體折射率 1.485~1.505(溫度為 75°C →20°C) 聚合物折射率為 15.24。
MDA-98-1602	$n_e=1.7779$ $n_o=1.5113$ $\Delta n=0.2666$

實驗中我們還利用液晶於不同溫度下其折射率會變化的特性來控制液晶混合物的散射強度，下圖 2(a)為液晶之雙折射變化:

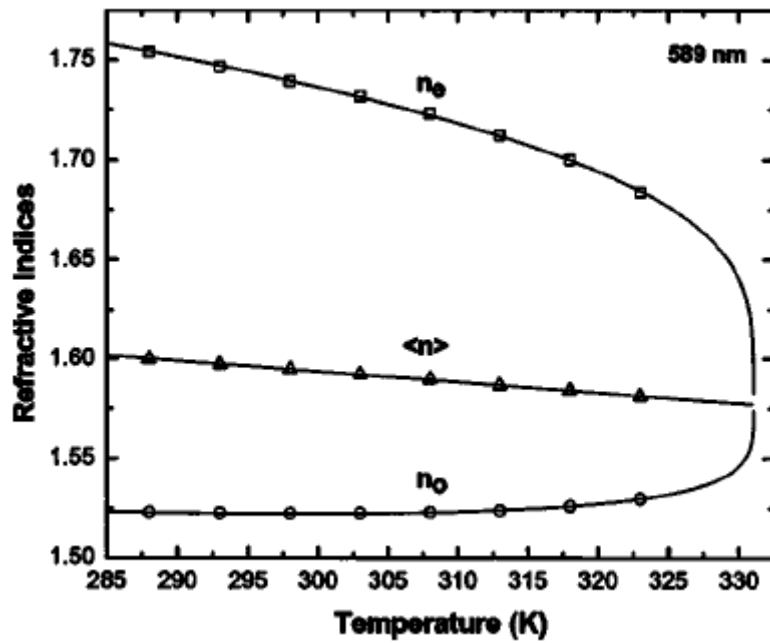


Fig. 2(a) 液晶之雙折射變化

四、 實驗材料與架構

4.1 實驗材料

(a) Norland Optical Adhesive 65 (NOA65)

NOA65 是屬於一種透明無色液體狀的 photopolymer，曝照紫外光時，會由原來的透明黏稠液體因聚合反應硬化成透明的固體。

(b) PYRROMETHENE 597(PM597)

PM597 為本實驗所採用的 laser dye，其目的在於增益介質，結構在 Fig. 4 所示

Pyrromethene 597

Chemical Formula: $C_{20}H_{33}BF_2N_2$

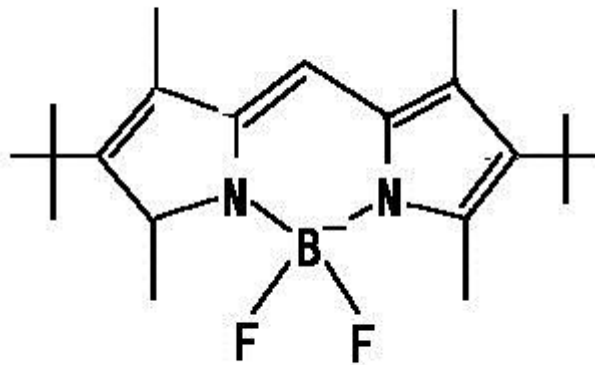


Fig. 4 PM597 之結構

本實驗在內徑為 125nm 的空心玻璃微管內填入摻雜染料及高分子的液晶混合物，其中染料的比例為 0.5 wt%，再加入不同比例的高分子到液晶中，為了產生隨機共振雷射我使用 Q-switched Nd:YAG laser(532nm, Pulse duration 5.8ns, NL200 series, EKSPLA)做為泵激光源，並使用光譜儀(HR4000)量測雷射頻譜的變化。

4.2 實驗步驟

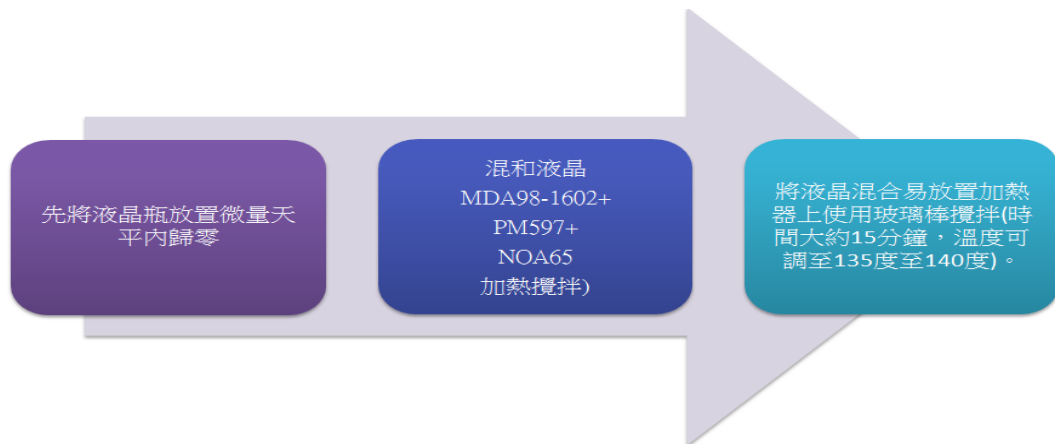
1. 取一液晶瓶放入微量天秤，歸零後取出(圖四(a))，先加入 0.5%之染料(PM-597)約略 0.00002g，其中一款樣品不加入單體，提他三種依照比重分別加入 10% 和 20% 和 30% 的單體(NO A65)，最後加入液晶(MDA98-1602) (圖四(b))，再放至加熱器上使用玻璃棒攪拌(圖四(c))；時間大約 15 分鐘，溫度可調至 135 度至 140 度)，四種樣品如下：

樣品 I：0.5% PM597 + 99.5% MDA-981602

樣品 II：0.5% PM597+89.5% MDA-981602+10% NOA65

樣品 III：0.5% PM597+79.5% MDA-981602+20% NOA65

樣品 IV：0.5% PM597+69.5% MDA-981602+30% NOA65



(a)



(b)



(c)

圖四(a)液晶瓶放至微量天秤內並歸零，(b)測量並混合適當比例的染料和高分子和液晶，(c)並將調配好的液晶混合物放至加熱台上加熱攪拌至完全混合。

2.取一小段長約3公分之玻璃微管，將玻璃微管放入裝有事先調配好的液晶瓶中，利用毛細現象將瓶中之液晶混合物灌入至玻璃微管中，約略等待2-5分鐘(圖四(d))，取出後並在頭尾兩端利用AB膠黏著劑封住(圖四(e))，再放至UV光下照約略40分鐘即可(圖四(f))。





(d)



(e)



(f)

圖四(d)將玻璃微管放置液晶瓶中(e)使用 AB 膠將灌有液晶混合物之玻璃微管封口，(f)並將玻璃微管放置 UV 光下。

4.3 實驗裝置

使用 Q-switched Nd:YAG 雷射當作激發光源(波長為 532nm，重複頻率 150Hz，脈衝持續時間 5.8ns)，打入由兩個透鏡使之擴束(焦距分別為 2.5cm 和 7.5cm)，再將灌有液晶混合液的玻璃微管放至三微平台上，利用 10x 的顯微物鏡聚焦，使激發光源聚焦到玻璃微管上，最後接上光譜儀讀取數值(圖 4(g))，並且記錄下來。



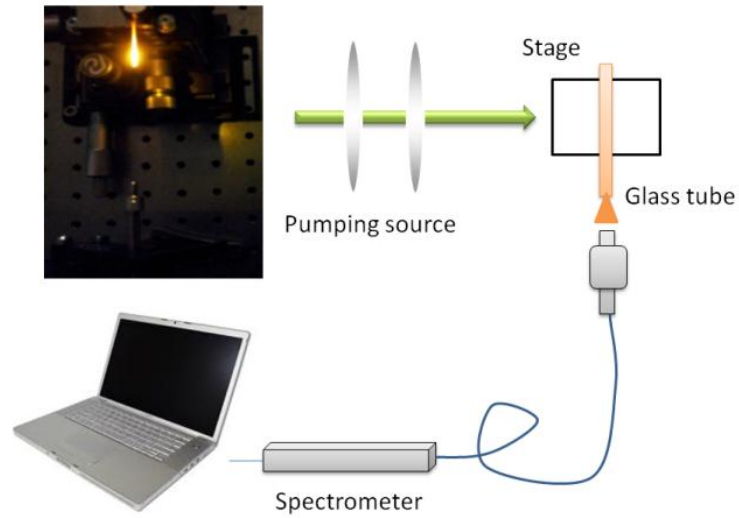


圖 4(g)、實驗架構圖 利用 Q-switched Nd:YAG laser 作為激發光源，打在灌有摻雜染料以及加入高分子聚合物之液晶混合物上，並使用光譜儀 HR4000 進行實驗結果分析。

五、 成果及討論

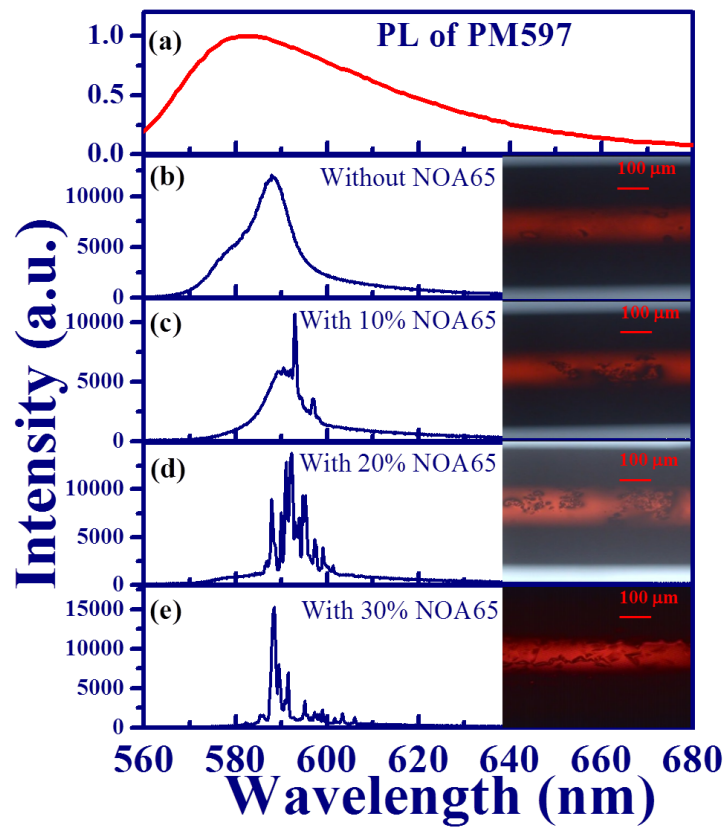


圖 5-1 雷射染料的自發輻射光譜和摻雜不同濃度的高分子聚合物所產生的激發光譜；右小圖則

是在偏光顯微鏡下觀察到摻雜不同濃度的高分子聚合物在液晶的排列情形。(圖 5(a)-5(e))。

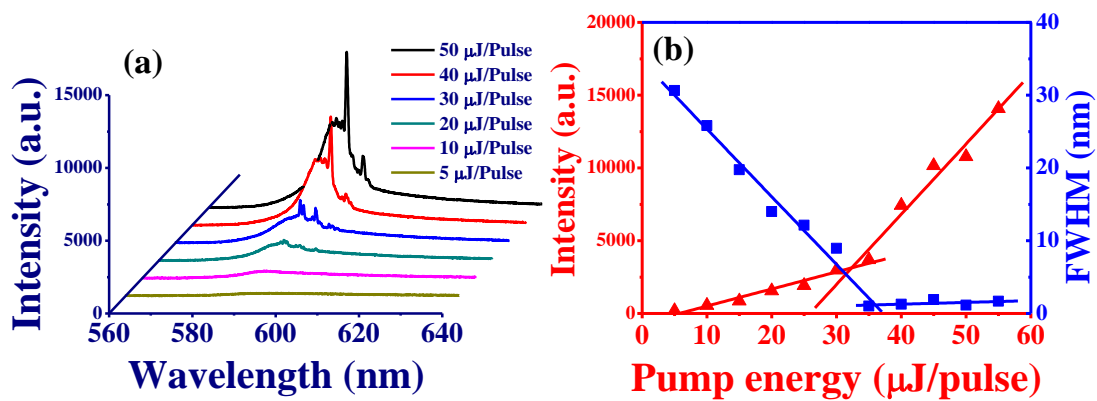
由 Q 開關 Nd:YAG 雷射激發在玻璃微管內摻染料高分子分散液晶混合物之激發光譜。其中沒有摻雜高分子的液晶混合物其激發光譜半高寬約 11.36nm。而在加有 10%，20%，30%的液晶混合物(樣品 II，樣品 III，樣品 IV)，發現激發脈衝出現在自發性輻射光譜的頂部且其線寬均小於 1 nm，如圖 5(c)-5(e)。相較於樣品 II(10wt% NOA65，圖 5(c))，樣品 III (20wt%，圖 5(d))有較多的激發脈衝且激發脈衝對於自發輻射的振幅強度對比度有明顯的增加。然而，樣品 IV (30wt%4，圖 5(e))，其激發脈衝數量減少。

為了觀察個種濃度之液晶混合物在玻璃微管內的排列，我們使用偏光顯微鏡 (POM)觀察三個樣品的圖像如圖 5 右所示，增加單體濃度是產生多激發脈衝最主要的原因，但樣品 IV 的單體濃度增加至 30 wt%時激發脈衝強度減小，由於液晶混合物內的散射損失增加。

(表 5-1)各個樣品所表示的中心波長、線寬和 Q-Value.

	樣品 I (no NOA65)	樣品 II (10% NOA65)	樣品 III (20% NOA65)	樣品 IV (30% NOA65)
λ_p (nm)	588.21	593.07	590.01	591.58
FWHM (nm)	11.36	0.94	0.52	0.67
$Q(\lambda_p/\Delta\lambda)$	51.8	630.9	1134.6	882.9

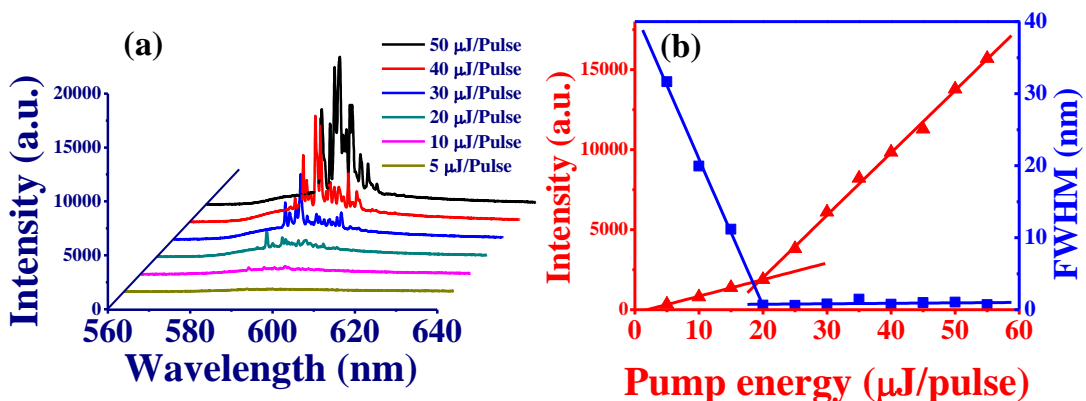
(表 5-1) 表示在摻雜不同濃度的高分子聚合物中，每個樣品所量測到的峰值頻帶寬度及半寬高和 Q 參數。在這三個比較中發現，樣品 3(20wt%NOA65，圖 5(d))顯示出擁有最窄的半寬高約是 0.52nm 及最大的 Q 參數約是 1134.6。



(圖 5-2)表示當泵能量 (E_p) 比較從 $5\mu\text{J}/\text{pulse}$ 慢慢增加至 $50\mu\text{J}/\text{pulse}$ 的情況下，樣品

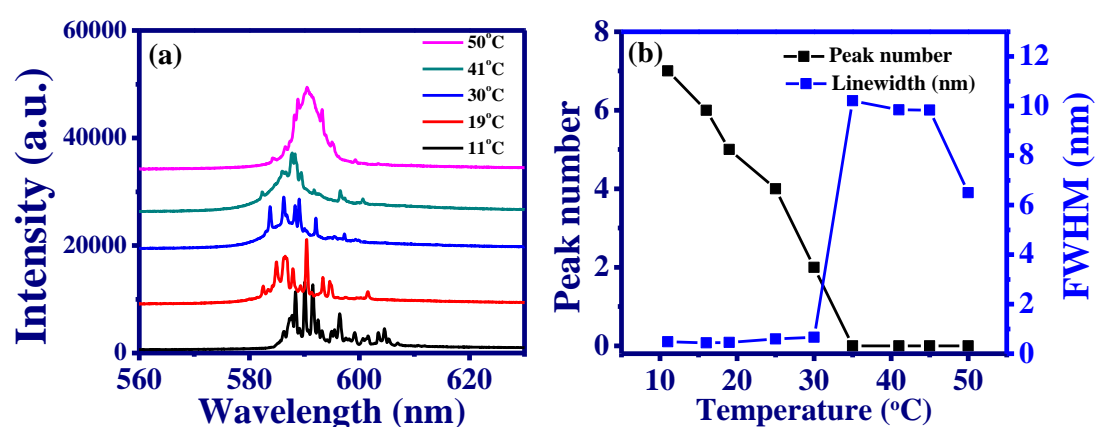
II(10wt%NOA65)所產生的激發光譜與半高寬範圍

觀察在較低的激發功率時 ($E_p=5\mu\text{J}/\text{pulse}$)，半高寬只有 30 nm 左右，當泵浦能量高於 $30\mu\text{J}/\text{pulse}$ 時，有些較窄的發光峰值在頂部開始被激發，在圖 5-2 (a) 用 $E_p=50\mu\text{J}/\text{pulse}$ 均明顯看出兩個同時在中心波長 593 nm 和 596nm 的發光峰值(黑色曲線)是隨機雷射的特性，如圖 5-2(b)分析了激發光譜和半高寬的強度變化，當低於臨界功率時($E_p=25.6\mu\text{J}/\text{pulse}$)，脈衝強度的變化較為緩慢，當強度大於臨界功率時脈衝強度明顯的增強。其中半高寬的變化的趨勢與脈衝強度完全相反。當激發功率大於 $35\mu\text{J}/\text{pulse}$ 時，期限寬均小於 1nm，值得注意的是，脈衝強度和半高寬的斜效率轉折點幾乎發生在同一激發能量，如圖 5-2 (b)。



(圖 5-3)表示當泵能量 (E_p) 比較從 $5\mu\text{J}/\text{pulse}$ 慢慢增加至 $50\mu\text{J}/\text{pulse}$ 的情況下，樣品 III(10wt%NOA65)所產生的激發光譜與半高寬範圍

圖 5-3(a)說明了樣品 III 的頻譜變化，和樣品 II 不同的是其頻譜有較多的模態產生，激發功率和半高寬的變化趨勢大致相同，但臨界功率有大幅的下降，約為 $20\mu\text{J}/\text{pulse}$ ，這樣的變化是因為我們加入較高濃度的 NOA65 造成玻璃微管內的液晶混合物之散射強度增加，如圖 5-3(b)所示。



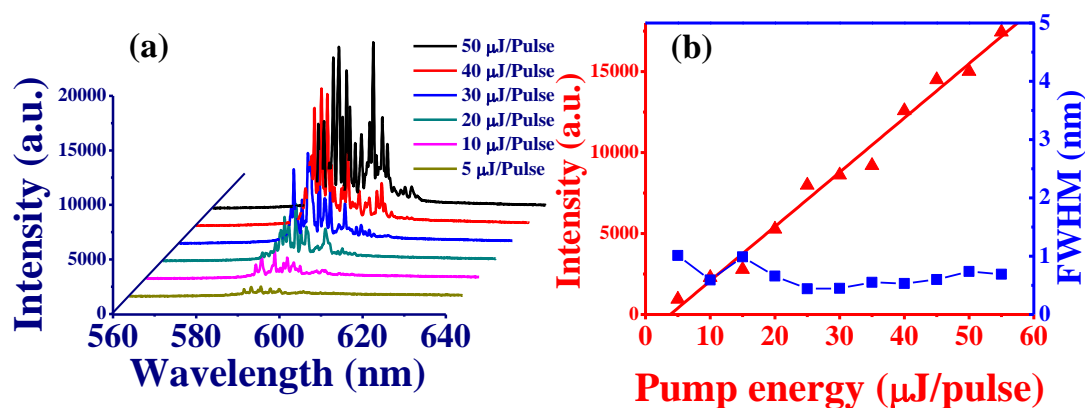
(圖 5-4)討論工作溫度從 11°C 到 50°C 對樣本 III(20wt% NOA65)對雷射光譜的影響，發現到當溫度到達 30°C 時是一個轉折點。

上圖 5-4 (a) 說明的不同溫度下樣品 III 的頻譜變化，可以發現當溫度低於室溫時，其頻譜有較多的模態，因為在低溫環境下液晶的雙折射差較大，因而造成液晶混合物的散射增加。圖 5-4 (b) 分析了不同溫度下頻譜的變化，當溫度小於 30°C 時均出現小於 1nm 的激發脈衝。

(表 5-2) 表示樣品 III 在各個不同的溫度下，所產生的峰值頻帶寬度及半高寬和 Q 參數

Temperature (°C)	11°C	19°C	30°C	41°C	50°C
λ_p (nm)	590.13	590.34	589.06	588.19	590.49
FWHM (nm)	0.47	0.5	0.58	9.85	6.5
$Q(\lambda_p/\Delta\lambda)$	1255.6	1180.7	1015.6	59.5	90.8

(表 5-2) 從表格中我們可以發現，在溫度越低時(11°C)樣品 III 擁有最窄的半高寬(0.47nm)以及最大的 Q 參數(1255.6)，當溫度越來越高時半高寬以及 Q 參數都會明顯的降低。



(圖 5-5)顯示樣品 II(20wt%NOA65)在 11°C 時產生之隨機共振雷射特性表示在圖 5-5(a)和 5-5(b)。

最後我們取樣品 III 在低溫下進行變功率實驗，發現在低功率情況下就有少許的激發脈衝產生，如圖 5-5(a)，其臨界工率約為 3.8 μJ /pulse，因為在較低的溫度(11°C)時，液晶的雙折射性的增加，因此多重散射光會增加，以減少液晶混合物內光傳播的擴散係數。

六、 結論

1. 本次實驗在毛細管中摻雜染料聚合物液晶來驗證隨機雷射的特性，在沒有加入單體與加入單體 (NOA65) 的毛細管中做比較，加入單體 (NOA65) 進入染料摻雜液晶混合物後，其激發頻譜出現較多的激發脈衝產生在自發輻射的頂部，是因為 NOA65 與液晶的折射率差，使液晶混合物的散射增加，進而產生較多共振回路。
2. 當單體的摻雜濃度為 20wt% 時，隨機雷射具有較低臨界功率的特性，請其半高寬的寬度也較窄。但是當濃度增加到 30 wt% 時，因為高分子的粒子變大，接觸面積變小，造成迴路減少，因而減少激發脈衝的數量。
3. 最後，在較低的溫度情況下，我們證明了隨機雷射的臨界激發功率較低，約 $3.8\mu\text{J}/\text{pulse}$ 和較高的 Q-factor 約 1255.6，由於液晶在低溫環境下雙折射增加所造成。

七、 未來發展及應用

(1) 未來發展

1. 搭配不同的高分子，來達成更低臨界功率的隨機共振雷射。
2. 探討電壓對此液晶雷射的特性變化。
3. 發展出穩定調變的隨機雷射系統。

(2) 應用

1. 發展出小體積的雷射系統。
2. 可發展出一套搭配隨機共振雷射的雷射投影顯示器。

八、 致謝

感謝指導教授林家弘老師，老師用心地指導我們，使我們對於雷射、液晶有更深入的了解，在整個實驗的過程中，只要有問題她都會隨時為我們解答，並不時指點我們正確的方向和我們做討論。

感謝蕭英利學長，從我們一開始就帶我們做實驗，液晶調配、儀器操作...等，學長都細心的教導我們按部就班的學習，在過程中遇到有任何問題都可以發問，讓我們的實驗能夠順利完成。

九、 參考文獻

- [1] S. Furumi, S. Yokoyama, A. Otomo, and S. Mashiko, “Electrical control of the structure and lasing in chiral photonic band-gap liquid crystals,” *Appl. Phys. Lett.* vol.82, pp.16–18 January 2003.
- [2] Harry coles* and Stephen Morris, “Liquid-crystal lasers” *Nature Photonics* 4, 676, (2010)
- [3] <http://lienhe.com.cn/uvadh/NOA65.htm>