

中華民國第 57 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

最佳(鄉土)教材獎

030118

光知道你「濃」我「濃」

學校名稱：新興學校財團法人桃園市新興高級中學附
設國中部

作者： 國一 丁相君	指導老師： 陳俐蓉
---------------	--------------

關鍵詞：反射、折射、吸收

摘要

本研究將探討不同波長的光線在水中的吸收現象。因為不同波長的光在水中行走後強度會有不同程度的衰減。為了要模擬不同深度的水深，本研究使用兩片相互平行的平面鏡放入裝滿水的玻璃缸兩側，讓藍、綠、紅雷射光在此兩片相互平行的平面鏡中進行多重反射。最後再量測藍、綠、紅雷射光在此兩片相互平行的平面鏡中行走的距離與最後出射光的強度。經實驗結果發現藍、綠、紅雷射光在水中走固定距離之後，藍光的衰減最少，紅光衰減最大。此外，這套實驗裝置還可以擴大應用來量測稀薄液體的濃度，使用多次的反射來增加光行走的距離，可增加稀薄溶質吸收光線的能力。實驗結果顯示使用此多次反射吸收裝置可以量出 0.05 wt%糖、0.05 wt%鹽以及 0.00004 wt%亞甲藍的濃度。

壹、研究動機

欣賞著海底各式各樣色彩繽紛的美麗珊瑚影片時，感覺大海的顏色隨著深度的增加而變得更加深藍色，這是為什麼呢？為了瞭解太陽光射入深海中後，其各種顏色光在海中強度衰減的情形，我們需要將光譜儀放入海中 5-10 公尺來量測海中的太陽光譜。但是儀器不易放入海中，所以我們想設計一實驗裝置來模擬並量測太陽光射入海中後，其各種顏色光在海中強度衰減的情形。除此之外，這套實驗裝置還可以擴大應用來量測稀薄液體的濃度。

貳、研究目的

- 一、研究光的折射與色散現象：不同波長光射入水中後，水中的折射角度與折射率將隨入射光波長的變化而變化。
- 二、研究不同波長光在水中的吸收現象：不同波長光在水中行走經過不同距離後強度將會有不同程度的衰減。
- 三、研究不同波長光在不同濃度之糖水、鹽水與亞甲藍水溶液中的多重反射現象：利用此多重反射與吸收現象可以計算出稀薄溶液的濃度。

參、研究設備及器材

一、設備與器材

器材名稱	數量	器材名稱	數量	器材名稱	數量	器材名稱	數量
多波長光偵測器	1	光譜儀	1	游標卡尺	1	魚尾夾	8
5 公分厚玻璃	1	各色雷射光	3	精密天平	1	鐵架	3
XYZ 精密移動平台	1	透明魚缸	1	光學桌	1	鏡子	2
角度旋轉移動平台	1	量角器	1	UV-VIS 穿透吸收光譜儀			1



圖 3-1：UV-VIS 穿透吸收光譜儀



圖 3-2：角度旋轉移動平台



圖 3-3：XYZ 精密移動平台



圖 3-4：游標卡尺



圖 3-5：雷射光左至右：藍光、綠光、紅光



圖 3-6：光偵測器



圖 3-7：精密天平

二、實驗裝置

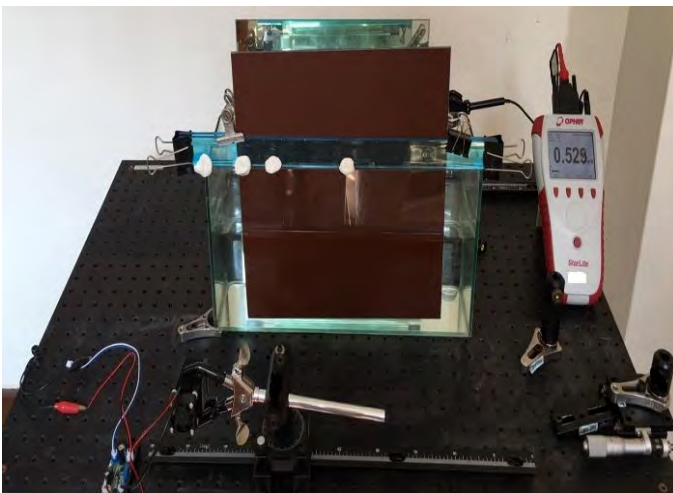


圖 3-8：整體裝置正面

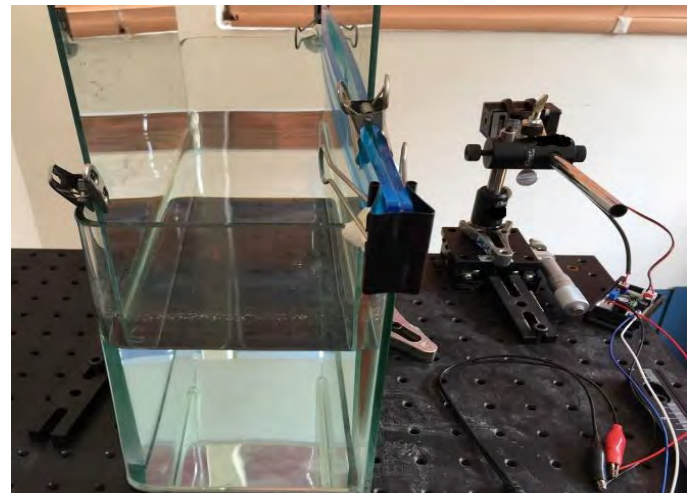
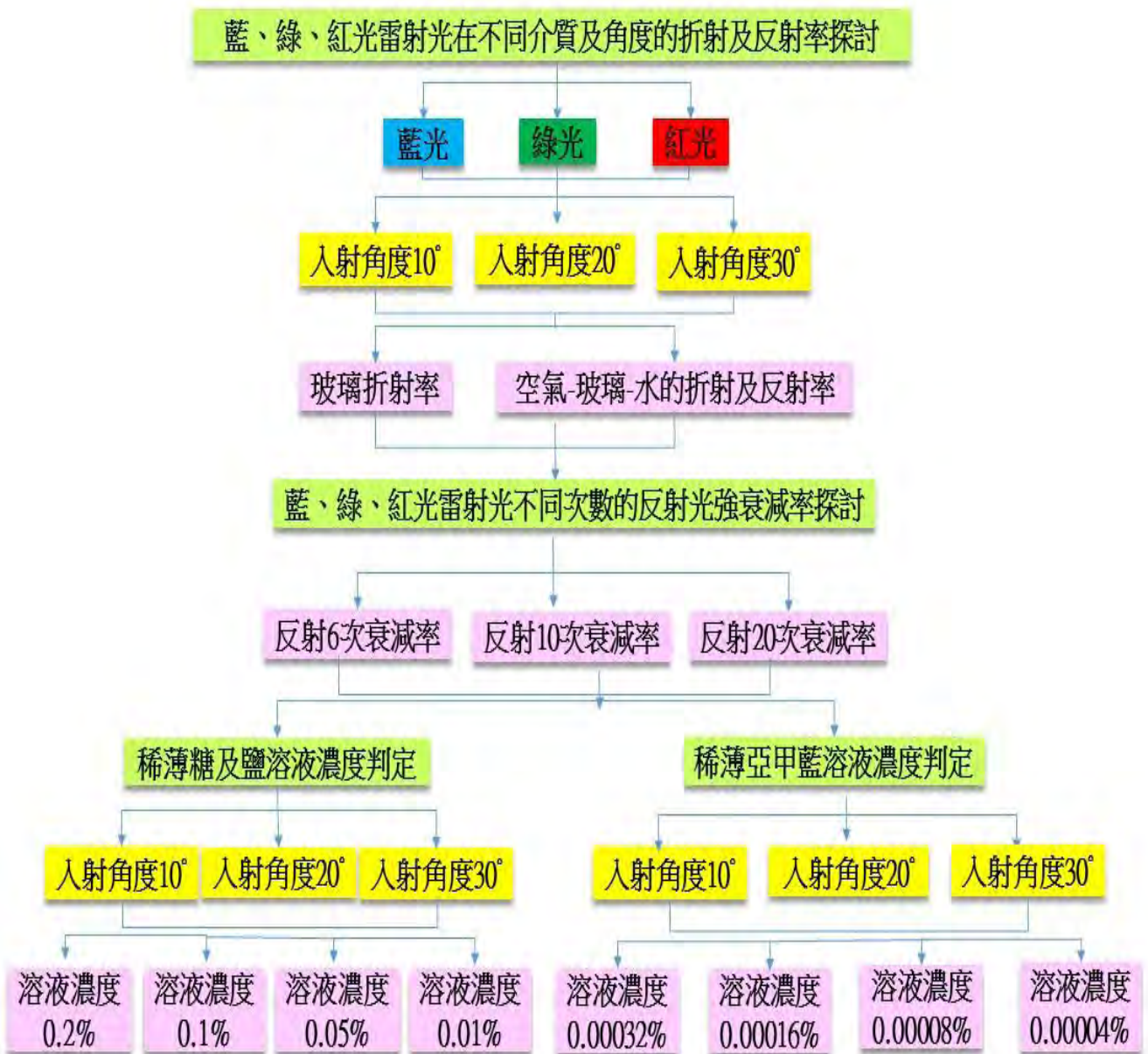


圖 3-9：整體裝置側面

肆、研究過程與方法

一、研究架構



二、實驗準備步驟

為了達到精準的實驗數據，我們特地將各光學所需實驗器材固定於光學板上，並將雷射光改成插電式的避免因電力衰減而造成的實驗誤差，此外我們發現溫度控制也很重要，所以整個測量系統是置於一恆溫的環境中以幫助雷射強度更穩定。

(一) 容器準備

首先將兩片鏡子放在玻璃水槽的兩邊，一邊用長尺及長尾夾固定住，而另一邊鏡子我們為了求實驗精準度除了用長尺及長尾夾固定外，又輔以三叉夾固定並將三叉

夾鎖在 XYZ 三軸精密移動平台上，如圖 4-1 所示。經過微調我們更能掌握實驗過程中的最佳狀態，實驗全程使用逆滲透水以避免過多的變因。

(二) 角度固定及雷射光源的架設

在角度旋轉移動平台上固定住三叉夾，夾住帶有散熱裝置的雷射頭，將雷射光至於入射光的方向，如圖 4-2 所示。利用角度旋轉移動平台能幫助我們控制精準的角度以量測正確的實驗數據，如圖 4-3 所示。

(三) 光偵測器的架設

首先將光偵測器置於出射光的地方，同樣地，利用三叉夾固定並可調整使入射光能準確的反射在光偵測器上，如圖 4-4 所示。



圖 4-1：XYZ 三軸精密移動平台

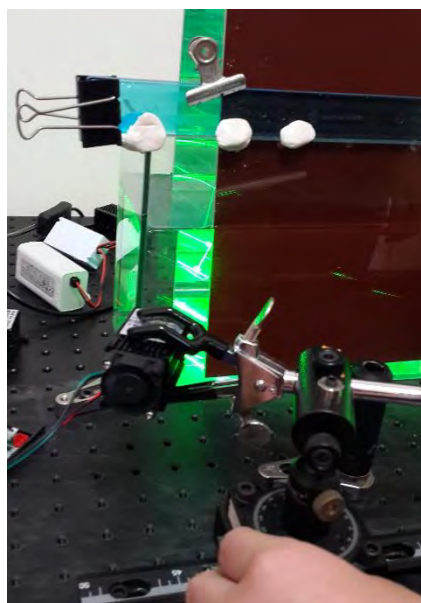


圖 4-2：雷射頭的固定



圖 4-3：角度旋轉移動平台



圖 4-4：光偵測器的固定

三、文獻探討

(一) 折射

光波在傳遞的途中從一種介質進入另一種介質，或是在同一介質中穿過了不同的溫度層及密度層，導致速率發生變化，而改變了光線的方向。在沒有介質的真空中，傳播速率最快。

(二) 折射定律

入射線、折射線各在法線的一側且與法線在同一平面上。光由傳光速度大的介質射入傳光速度小的介質(如：光由空氣射入水中)時，折射角小於入射角，折射線偏向法線，如圖4-5所示。光由傳光速度小的介質射入傳光速度大的介質(如：光由水射入空氣中)時，折射角大於入射角，折射線遠離法線，如圖4-6所示。

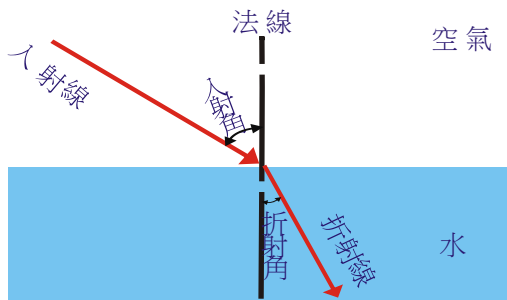


圖 4-5：光由空氣射入水中

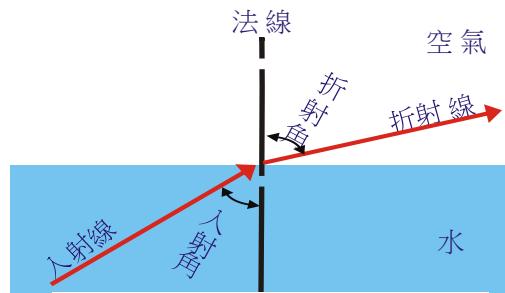


圖 4-6：光由水射入空氣中

如果光線垂直兩介面入射，即入射角為 0° 時，則此光線不會發生偏折現象，即折射角也等於 0° 。光在真空中的行進速率與光在某物質中的速率的比值 n ，稱做該物質的折射率：

$$\text{折射率}n = \frac{\text{光在真空中的速率}}{\text{光在物質中的速率}}$$

這個定量的折射定律叫做司乃耳定律，是由荷蘭天文學家兼數學家司乃耳(W.Snell,1581-1626)於1621年首先研究出來的。根據司乃耳定律，可進一步得到

$$n \sin \theta = n' \sin \theta'$$

式子中的 n 及 n' 是界面兩邊不同介質的折射率，而 θ 及 θ' 是入射角和折射角。

如果式子中的三個數值已知，就可以從這個關係式計算出第四個數值。(註 1)

(五) 吸收現象

一束單色光射於一吸收介質表面，在通過一定厚度的介質後，由於介質吸收了一部分光能，透射光的強度就要減弱。吸收介質的濃度愈大，介質的厚度愈大，則光強度的減弱愈顯著。比爾-朗伯定律的物理意義是，當一束平行單色光垂直通過某一均勻非散射的吸光物質時，其吸光度與吸光物質的濃度及吸收層厚度成正比。當介質中含有多種吸光組分時，只要各組分間不存在著相互作用，則在某一波長下介質的總吸光度是各組分在該波長下吸光度的加和，這一規律稱為吸光度的加合性。如圖 4-7 可知，當光行走距離越長，光強度越低。

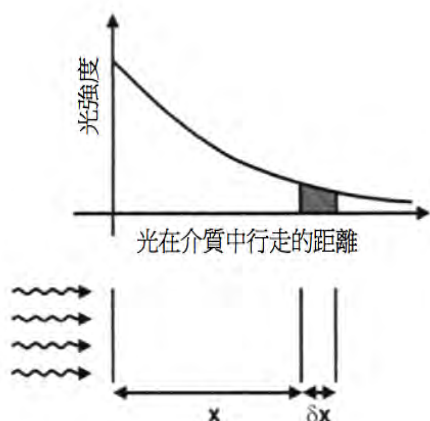


圖 4-7：光的吸收特性

$$\text{入射光強度} = \text{出射光強度} + (\text{吸收光強度} + \text{散射光強度}) + \text{反射銀透過光強度}$$

三、實驗設計

(一)藍、綠、紅 三色光在淡水反射與吸收特性

使用兩片相互平行的平面鏡放入玻璃缸的兩側，讓藍、綠、紅雷射光在此兩片相互平行的平面鏡進行多次折射與反射。最後再計算出藍、綠、紅雷射光在此兩片相互平行的平面鏡中行走的距離與測量最後出射光的強度，如圖 4-8。使用下列公式，即可算出藍、綠、紅雷射光在淡水的吸收光強度與散射光強度。

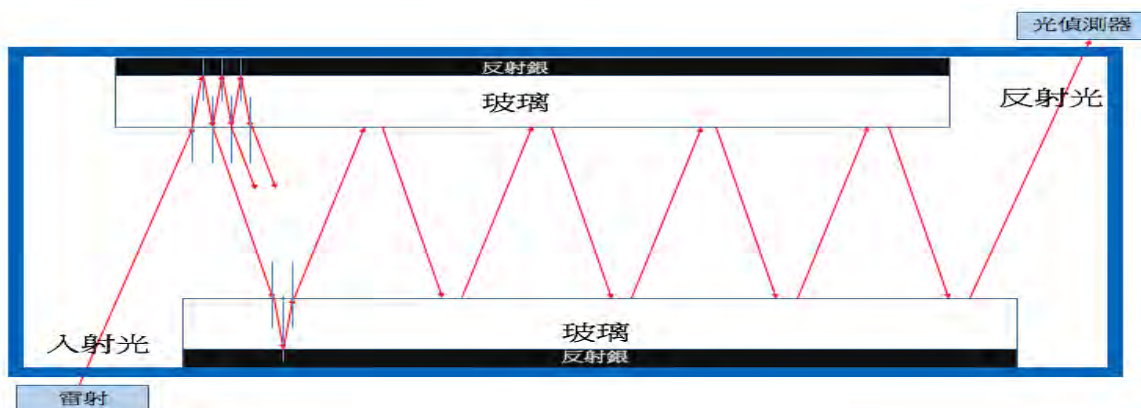


圖 4-8：光多次反射折射示意圖

(二)綠、紅光應用在不同濃度糖水、鹽水及亞甲藍溶液中的吸收特性

使用兩片相互平行的平面鏡放入玻璃缸的兩側，將不同濃度糖水及鹽水倒入缸中，讓藍、綠、紅雷射光在此兩片相互平行的平面鏡進行多重折射與反射。最後再量測出藍、綠、紅雷射光在此兩片相互平行的平面鏡中行走的距離與最後出射光的強度。使用下列公式，即可算出藍、綠、紅雷射光在淡水中的吸收光強度與散射光強度。

$$\text{入射光強度} = \text{出射光強度} + (\text{吸收光強度} + \text{散射光強度}) + \text{反射銀透過光強度}$$

伍、研究結果

一、藍、綠、紅三色光在本實驗裝置淡水中的折射與反射特性

(一)藍、綠、紅三色光在本實驗裝置玻璃中的折射特性

使用藍、綠、紅三色雷射光，經過光譜儀量測後其波長分別為 405nm, 532 nm, 664 nm，如圖5-1所示。因為光的色散現象，不同顏色的光入射厚玻璃後，其折射的角度將會有所不同。但是光射入玻璃後，偏折的角度很小，量角器的使用上並不那麼方便，所以我們使用三角幾何與司乃耳（Snell）定律的算式，搭配高精度的游標卡尺，在讀取數據時便能精確到公分的小數第二位（0.01 cm）並估計到小數第三位（0.001 cm）。

量測的裝置如圖5-3所示，雷射光穿透玻璃後打在一公尺外的白色牆上，以游標卡

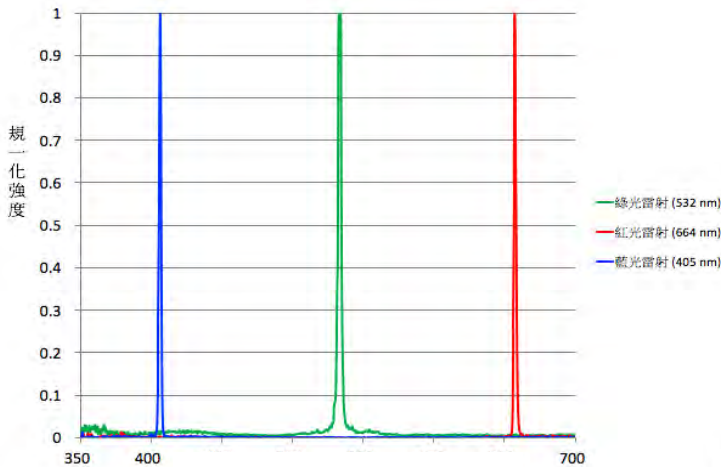


圖 5-1：各色光波長圖



圖 5-2：實際操作圖

尺量出 Z ，並帶入以下三角幾何的算式後，即可得到折射角度，再以此折射角度經過司乃耳（Snell）定律的計算來求得折射率：

$$\begin{aligned} \text{游標尺量測 } Z: Z &= X + Y \cdot \tan(\text{入射角}) \\ &= X/100, Y = Z - 100 \tan(\text{入射角}) \\ \tan(\text{折射角}) &= Y/5 \end{aligned}$$

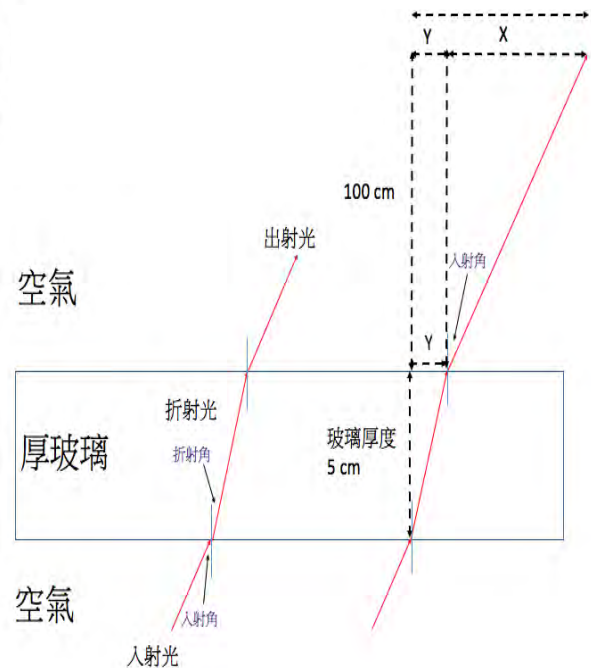


圖 5-3：光在 空氣-玻璃 中的折射特性示意圖

我們可以得到相對各波長之厚玻璃的折射率、折射角度的變化如表 5-1 所示：

表 5-1：各波長之厚玻璃的折射率及折射角度

厚玻璃	air-glass 入射角 (度)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	air-glass 折射角 (度)	玻璃折射率
藍光	10	18.205	17.633	0.572	6.526	1.5278
綠光	10	18.211	17.633	0.578	6.594	1.5122
紅光	10	18.214	17.633	0.581	6.628	1.5044
藍光	20	37.548	36.397	1.151	12.964	1.5246
綠光	20	37.557	36.397	1.160	13.062	1.5134
紅光	20	37.566	36.397	1.169	13.159	1.5023
藍光	30	59.475	57.735	1.740	19.188	1.5213
綠光	30	59.490	57.735	1.754	19.336	1.5101
紅光	30	59.505	57.735	1.770	19.494	1.4983

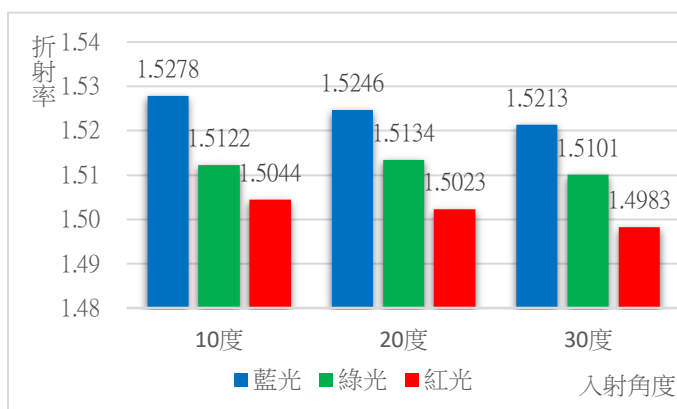


圖 5-4：各波長玻璃折射率比較



圖 5-5：各波長 空氣-玻璃 折射角度比較

由以上的數據可以得知，不同波長的光射入玻璃中折射的角度將會有所不同。藍光的折射角最小，紅光的折射角最大，因此藍光的玻璃折射率最大，紅光的玻璃折射率最小。因為折射角不同，所以光行走之距離將會不同。這計算方便我們得知多重反射與折射光的行走距離。

(二)藍、綠、紅三色光在本實驗裝置 空氣-玻璃-水 中的折射與反射特性

使用藍 綠 紅 三色雷射光，波長分別為 405 nm, 532 nm, 664 nm。因為光的色散現象，不同顏色的光從空氣射入玻璃-水中後，其折射的角度將會有所不同。因為在此系統中量角器的使用上並不那麼方便，所以我們使用三角幾何與司乃耳（Snell）定律的算式，搭配高精度的游標卡尺，在讀取數據時便能精確到公分的小數第二位（0.01 cm）並估計到小數第三位（0.001 cm）。

量測的裝置如圖5-6 所示，雷射光穿透玻璃後打在一公尺外的白色牆上，以游標卡尺量出 W，並帶入以下三角幾何的算式後，即可得到折射角度，再以此折射角度經過司乃耳（Snell）定律的計算來求得折射率：

游標尺量測 W : $W = 2X + Y + Z$, $Z = 100 \times \tan(\text{air-glass 入射角})$

$X = 0.3 \times \tan(\text{air-glass 折射角})$, $Y = W - 2X - Z$

$\tan(\text{glass-water 折射角}) = Y/12$

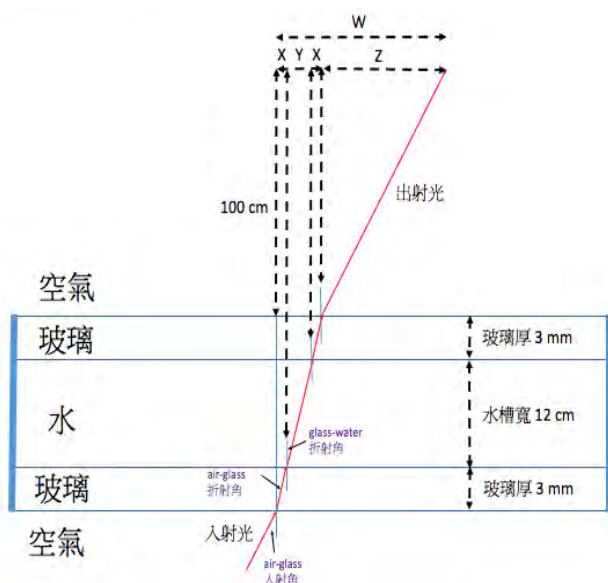


圖 5-6：光在 空氣-玻璃-水 中的折射特性示意圖

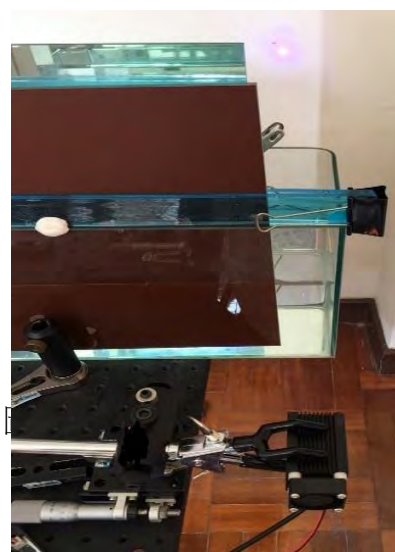


圖 5-7：實際操作圖

我們可以得到相對各波長之水的折射率、折射角度的變化如表5-2所示：

表 5-2：各波長之水的折射率及折射角度

	air-glass 入射角 (度)	air-glass s折射 角 (度)	W (cm)	X (cm)	Z (cm)	Y (cm)	glass - water 折射角 (度)	水折射 率
藍光	10	6.526	19.271	0.034	17.633	1.569	7.451	1.3392
綠光	10	6.594	19.278	0.035	17.633	1.576	7.483	1.3339
紅光	10	6.628	19.282	0.036	17.633	1.580	7.502	1.3304
藍光	20	12.964	39.708	0.069	36.397	3.173	14.818	1.3380
綠光	20	13.062	39.722	0.070	36.397	3.186	14.875	1.3328
紅光	20	13.159	39.732	0.071	36.397	3.195	14.913	1.3293
藍光	30	19.188	62.773	0.104	57.735	4.829	21.921	1.3394
綠光	30	19.336	62.796	0.105	57.735	4.851	22.017	1.3342
紅光	30	19.494	62.813	0.106	57.735	4.865	22.076	1.3307

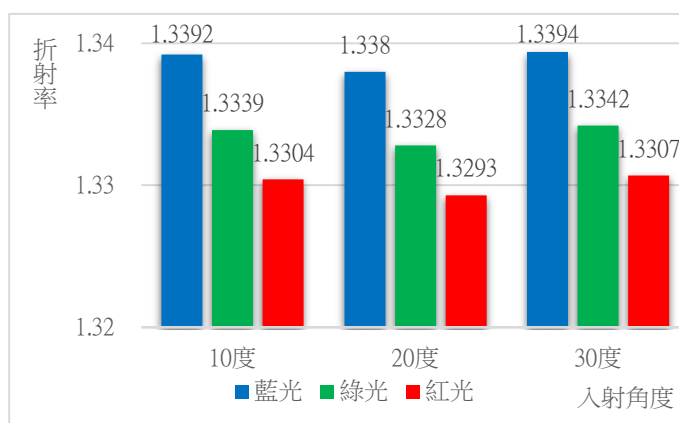


圖 5-8：各波長水折射率比較

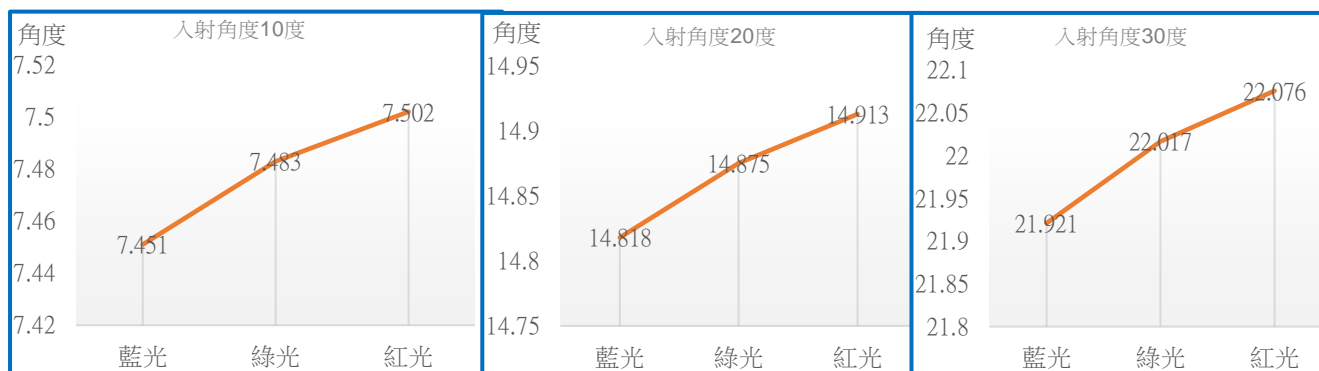


圖 5-9：各波長 玻璃-水 折射角度比較

由以上的數據可以得知，不同波長的光射入水中後，折射的角度將會有所不同。藍光的折射角最小，紅光的折射角最大，因此藍光的水折射率最大，紅光的水折射率最小。因為折射角不同，所以光行走之距離將會不同，因此這計算方便我們得知下一章節的多重反射與折射光的行走距離。

使用藍、綠、紅三色雷射光其波長分別為405 nm, 532 nm, 664 nm。以 10, 20, 30 度不同的入射角射入玻璃，這時候可量測 空氣-玻璃介面的反射光強度，因為光的色散現象，不同波長光的反射強度也不同，在經過量測後我們可以得到相對各波長之空氣-玻璃介面的反射光強度如表5-3所示：

表 5-3：各波長之 空氣-玻璃-水 的反射率

空氣-玻璃-水	air-glass 入射角 (度)	air-glass 折射角 (度)	air-glass 反射角 (度)	air-glass 入射光強度 (mW)	air-glass 反射光強度 (mW)	air-glass 反射率 (%)	glass-water 入射角 (度)	glass-water 折射角 (度)	glass-water 反射光強度 (mW)
藍光	10	6.526	10	160.15	6.98	4.36	6.526	7.451	0
綠光	10	6.594	10	64.33	2.71	4.22	6.594	7.483	0
紅光	10	6.628	10	72.29	3.01	4.16	6.628	7.502	0
藍光	20	12.964	20	160.15	7.88	4.92	12.964	14.818	0
綠光	20	13.062	20	64.33	3.07	4.77	13.062	14.875	0
紅光	20	13.159	20	72.29	3.40	4.71	13.159	14.913	0
藍光	30	19.188	30	160.15	9.64	6.02	19.188	21.921	0
綠光	30	19.336	30	64.33	3.77	5.86	19.336	22.017	0
紅光	30	19.494	30	72.29	4.16	5.76	19.494	22.076	0



圖 5-10：各波長 空氣-玻璃-水 反射率比較

以 10、20、30 度不同的入射角射入玻璃，之後光經過玻璃再射入水中，這時候玻璃-水介面並未有反射光。但當以超過 40 度的入射角射入玻璃，之後玻璃再射入水中，這時候玻璃-水介面就會有反射光。為避免複雜的多重反射干擾實驗的計算，本實驗將不探討超過 40 度的入射角度。

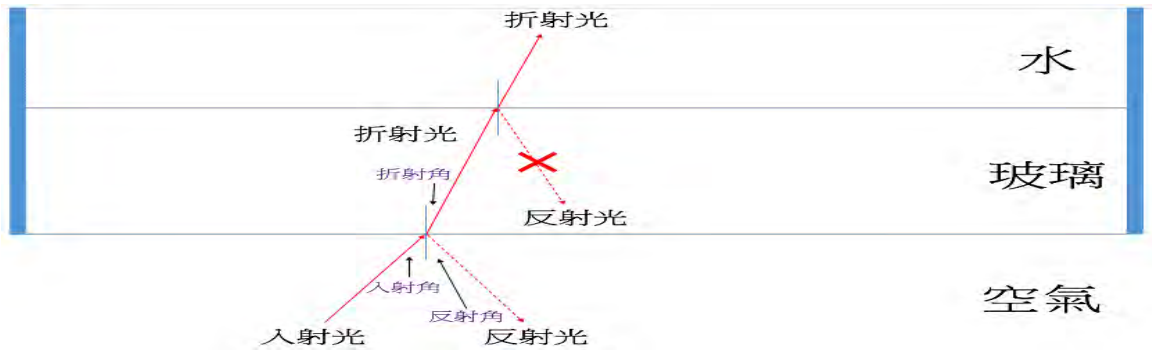


圖 5-11：光在 空氣-玻璃-水 中的反射光特性示意圖

二、藍、綠、紅三色光在本實驗裝置淡水中的折射與多次反射特性

(一)藍、綠、紅三色光在本裝置淡水中的折射與6 次反射特性

綠色雷射光從長40 cm、寬 12 cm、厚度 3 mm的玻璃缸外以30度角射入水中後，經過 6 次的反射後，光強度從 64.33 mW 降低到 22.08 mW。由以下的公式我們可以算出反射 6 次後的吸收光 + 反射 6 次後的散射光強度 + glass to air反射光強度。

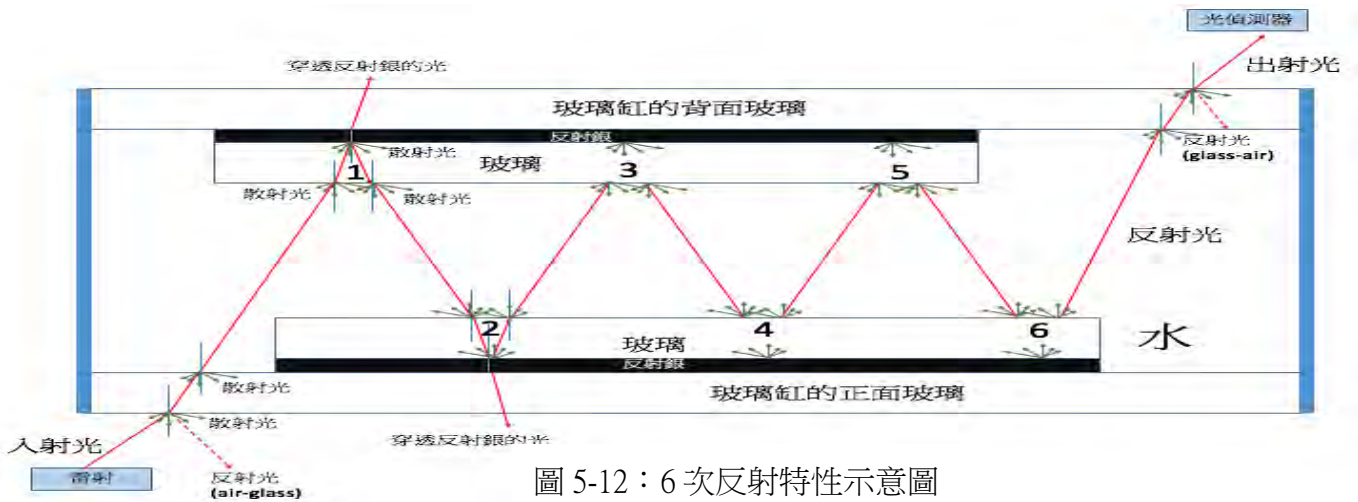
$$\text{入射光強度} = \text{出射光強度} + (\text{6次吸收光強度} + \text{6次散射光強度} + \text{glass to air反射光強度}) + \text{反射銀透過光強度} + \text{air to glass反射光強度}$$

根據實驗的量測，我們可以量測出 入射光強度、反射銀透過光強度、air to glass 反射光強度 這三個參數，然後根據這三個參數，我們僅能算出 (6次吸收光強度+6次 散射光強度+ glass to air反射光強度) 這三者之間的加總強度，無法得知這三者的各別數值。如圖5-12所示，綠色箭頭表示光在各個介面的散射光，因為玻璃表面有非常微小的粗糙表面，光打在這些非常微小的粗糙表面上會有散射現象，但在此系統中這些散射現象是無法單獨量測出來的。要得知有多少入射光損失，我們可以以入射光強度衰減率來表達，公式如下：

$$\text{入射光強度衰減率} = (\text{入射光強度} - \text{出射光強度}) / \text{入射光強度} \quad 100\%$$

由上面的計算可以發現，紅色出射光的入射光強度衰減率最大，綠光次之，藍光最小。因此藍、綠、紅三色光經過水中的吸收後，紅光會被吸收最多，綠光次之，藍

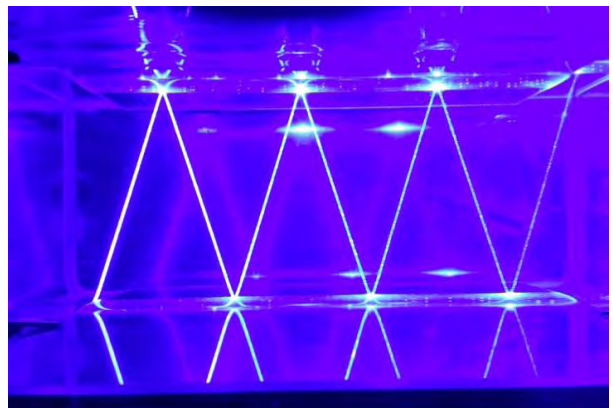
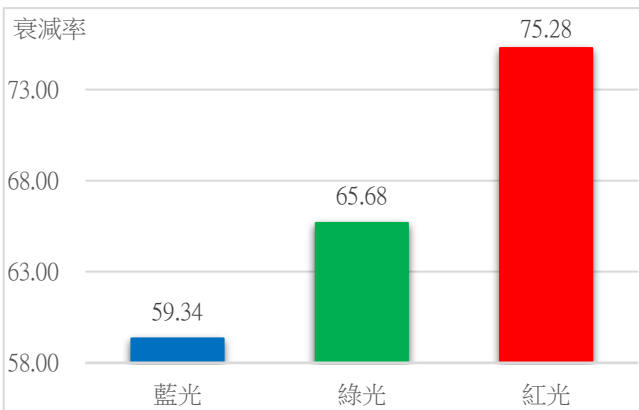
光最少。



實驗數據如表5-4所示：

表 5-4：藍、綠、紅三色光 6 次反射的入射光強度衰減率

淡水	入射角度	反射次數	光所走的距離 (cm)	入射光強度 (mW)	反射銀透光強度 (mW)	總吸收光強度 + 總散射光強度 + glass-air 反射光強度 (mW)	air - glass 反射光強度 (mW)	水 - glass 總損耗 (mW)	出射光強度 (mW)	入射光強度衰減率 (%)
藍光	30	6	89.39	160.15	0.0168	85.37	9.64	0	65.12	59.34
綠光	30	6	89.35	64.33	0.0072	38.47	3.77	0	22.08	65.68
紅光	30	6	89.32	72.29	0.0060	50.25	4.16	0	17.87	75.28



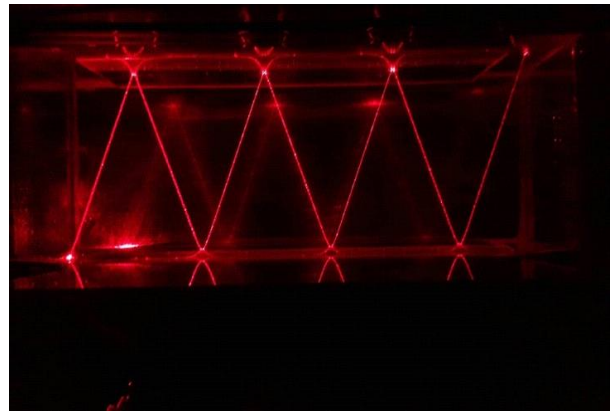
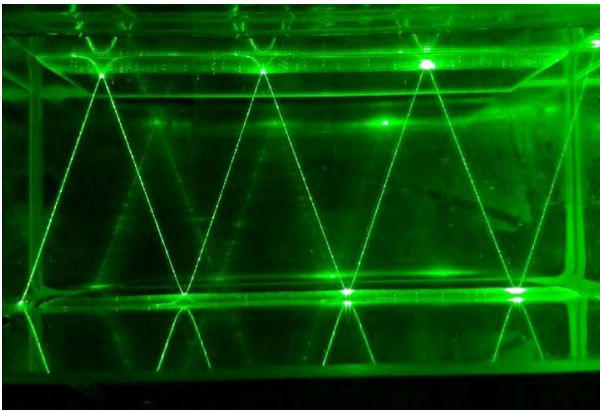


圖 5-15：綠光入射角度 30 度 6 次反射俯視圖

圖 5-16：紅光入射角度 30 度 6 次反射俯視圖

(二) 藍、綠、紅三色光在本裝置淡水中的折射與10次反射特性

綠色雷射光從長40 cm、寬 12 cm、厚度 3 mm的玻璃缸外以20度角射入水中後，經過 10 次的反射後，光強度從 64.33 mW 降低到 13.40 mW。由以下的公式我們可以算出反射 10 次後的吸收光 + 反射 10 次後的散射光強度 + glass to air反射光強度。

$$\text{入射光強度} = \text{出射光強度} + (\text{10次吸收光強度} + \text{10次散射光強度} + \text{glass to air反射光強度}) + \text{反射銀透過光強度} + \text{air to glass反射光強度}$$

由計算可以發現，紅色出射光的入射光強度衰減率最大，綠光次之，藍光最小。因此藍 綠 紅三色光經過水中的吸收後，紅光會被吸收最多，綠光次之，藍光最少。

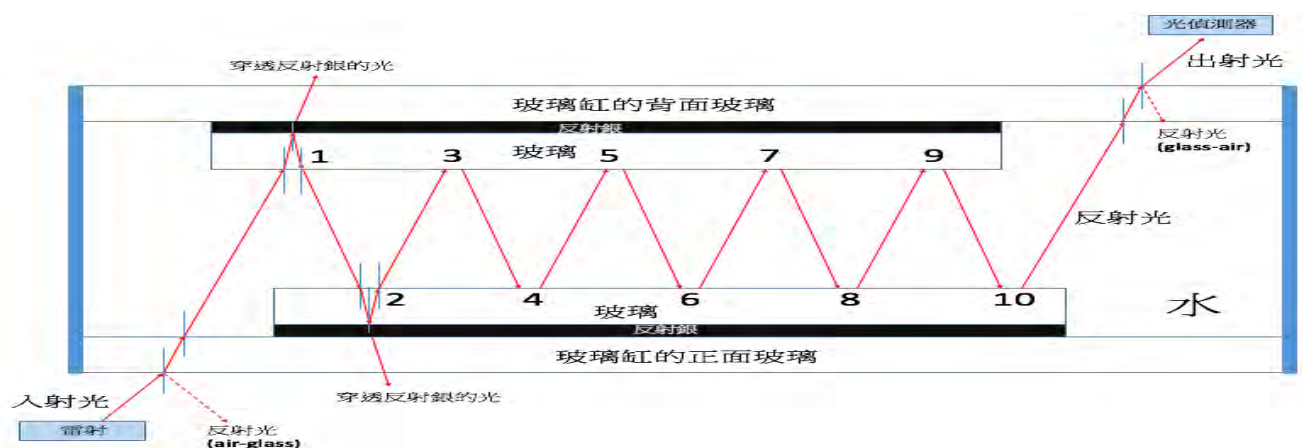


圖 5-17：10 次反射特性示意圖

實驗數據如表5-5所示：

表 5-5：藍、綠、紅三色光 10 次反射的人射光強度衰減率

淡水	入射角度	反射次數	光所走的距離 (cm)	入射光強度 (mW)	反射銀透光強度 (mW)	總吸收光強度+ 總散射光強度+ glass-air 反射光強度 (mW)	air - glass 反射光強度 (mW)	水 - glass 總損耗 (mW)	出射光強度 (mW)	入射光強度衰減率 (%)
藍光	20	10	135.65	160.15	0.0280	111.10	7.88	0	41.14	74.31
綠光	20	10	135.63	64.33	0.0120	47.85	3.07	0	13.40	79.17
紅光	20	10	135.61	72.29	0.0100	60.10	3.40	0	8.78	87.85

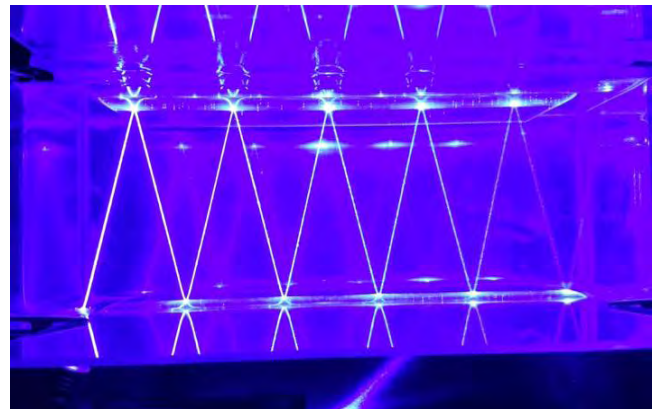
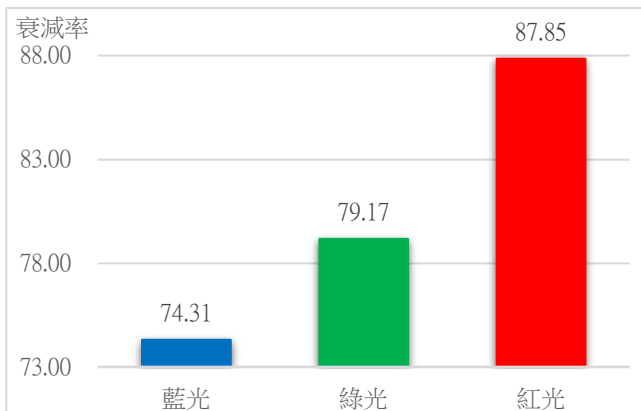


圖 5-18：10 次反射的人射光強度衰減率比較圖

圖 5-19：藍光入射角度 20 度 10 次反射俯視圖

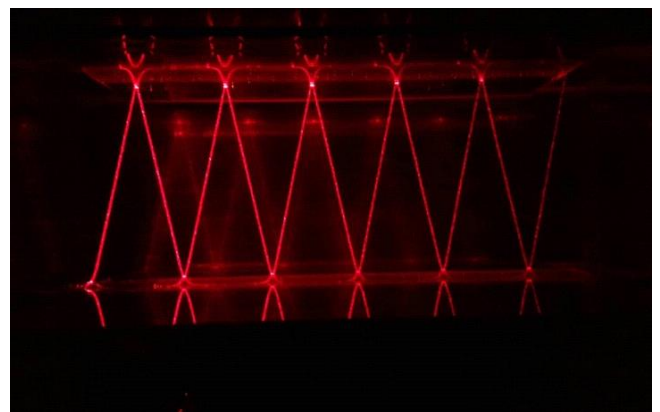
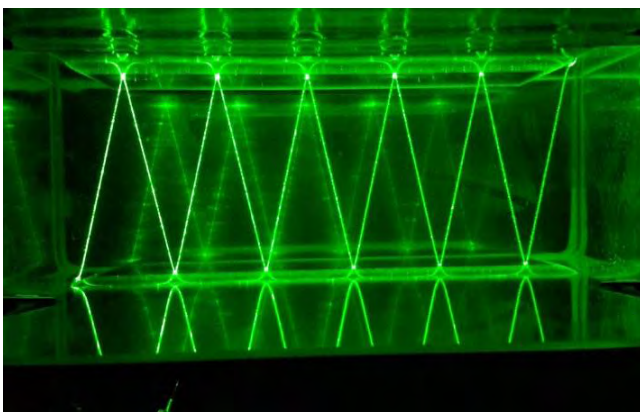


圖 5-20：綠光入射角度 20 度 10 次反射俯視圖

圖 5-21：紅光入射角度 20 度 10 次反射俯視圖

(三) 藍、綠、紅三色光在本裝置淡水中的折射與20次反射特性

綠色雷射光從長40 cm、寬 12 cm、厚度 3 mm 的玻璃缸外以10度角射入水中後，經過 20 次的反射後，光強度從 64.33 mW 降低到 4.67 mW。由以下的公式我們可以算出反射 20 次後的吸收光 + 反射 20 次後的散射光強度 + glass to air 反射光強

度。

$$\text{入射光強度} = \text{出射光強度} + (20\text{次吸收光強度} + 20\text{次散射光強度} + \text{glass to air 反射光強度}) + \text{反射銀透過光強度} + \text{air to glass 反射光強度}$$

由計算可以發現，紅色出射光的入射光強度衰減率最大，綠光次之，藍光最小。因此紅、綠、藍三色光經過水中的吸收後，紅光會被吸收最多，綠光次之，藍光最少

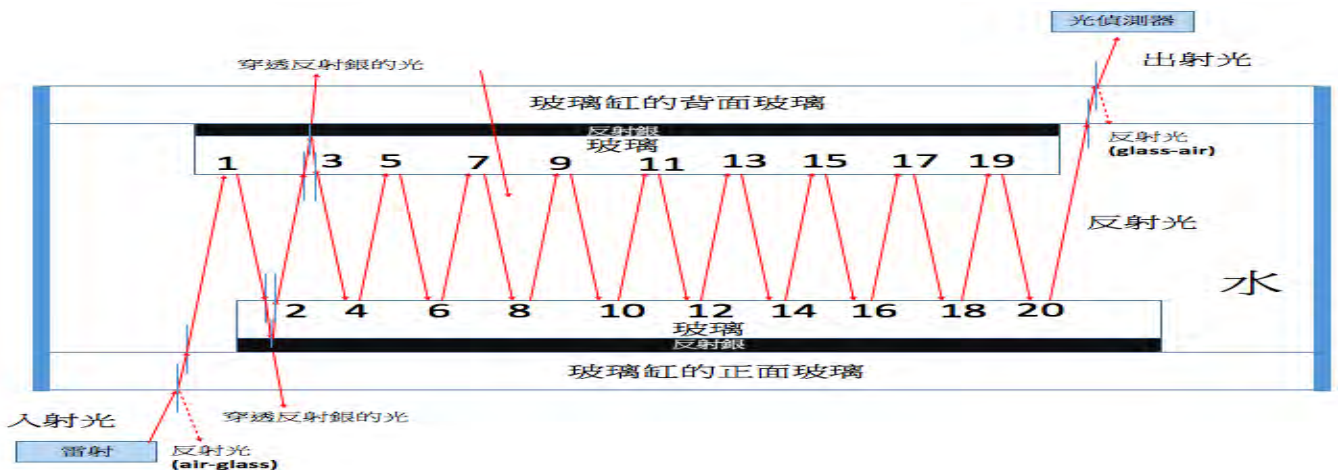


圖 5-22：20 次反射特性示意圖

實驗數據如表5-6所示：

表 5-6：藍、綠、紅三色光 20 反射的入射光強度衰減率

淡水	入射角度	反射次數	光所走的距離 (cm)	入射光強度 (mW)	反射銀透光強度 (mW)	總吸收光強度 + 總散射光強度 + glass-air 反射光強度 (mW)	air - glass 反射光強度 (mW)	水 - glass 總損耗 (mW)	出射光強度 (mW)	入射光強度衰減率 (%)
藍光	10	20	253.69	160.15	0.0560	135.23	6.98	0	17.88	88.84
綠光	10	20	253.70	64.33	0.0240	56.92	2.71	0	4.67	92.74
紅光	10	20	253.71	72.29	0.0200	67.96	3.01	0	1.30	98.20

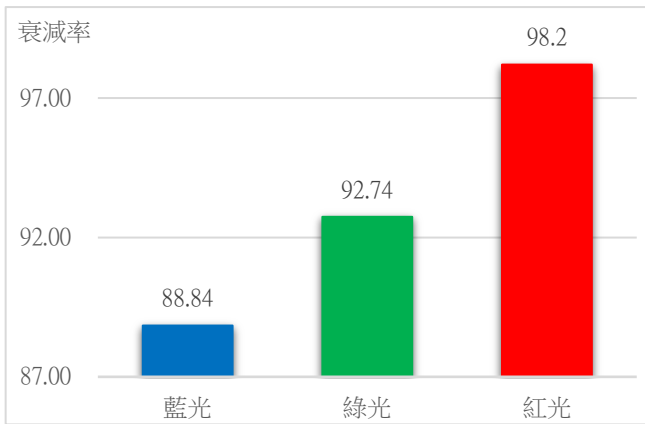


圖 5-23：20 次反射的入射光強度衰減率比較圖

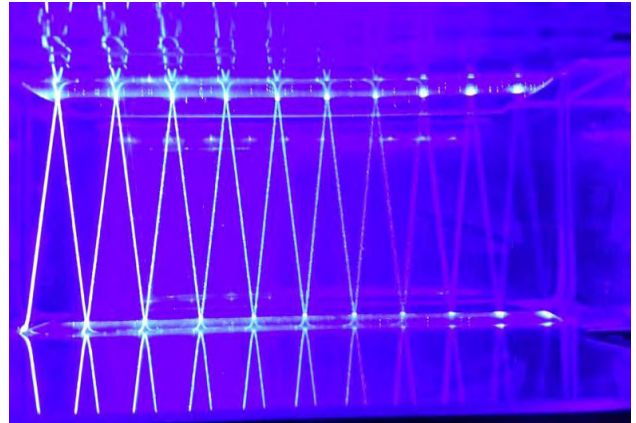


圖 5-24：藍光入射角度 10 度 20 次反射俯視圖

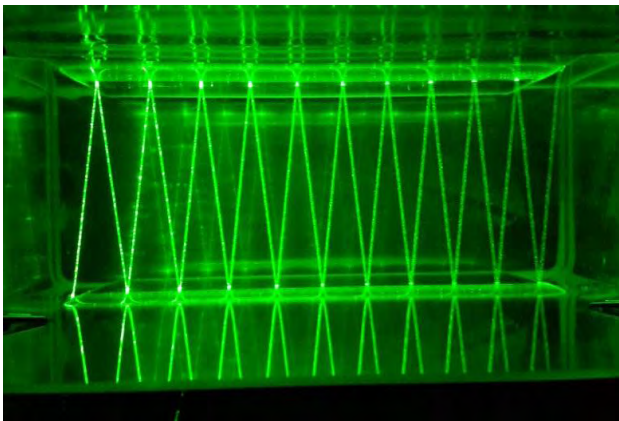


圖 5-25：綠光入射角度 10 度 20 次反射俯視圖

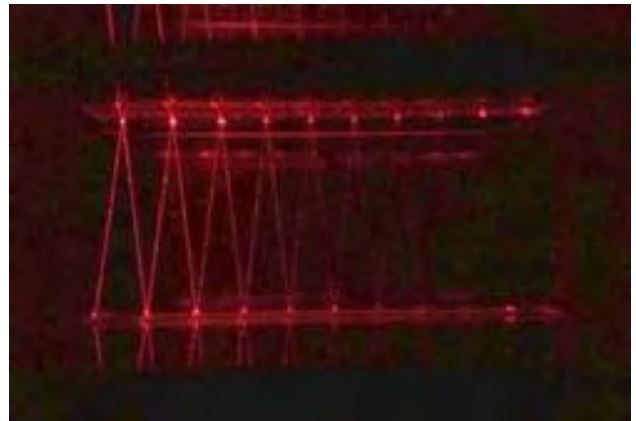


圖 5-26：紅光入射角度 10 度 20 次反射俯視圖

三、綠色光應用在不同濃度糖水及鹽水中的吸收特性

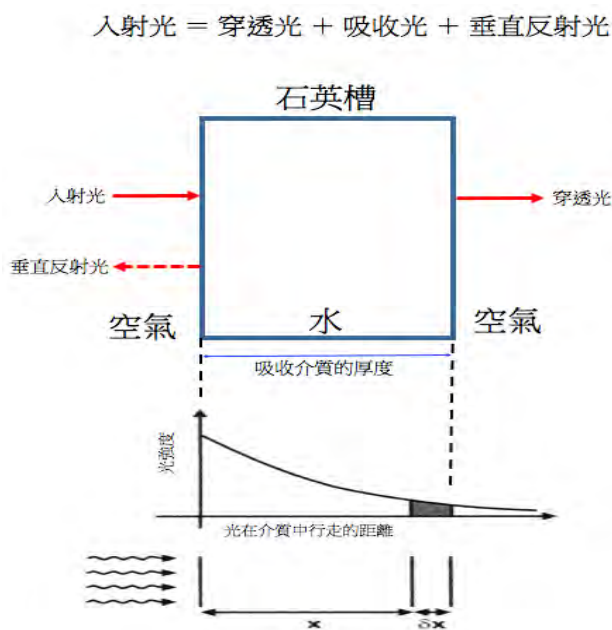


圖 5-27：吸收特性

使用商業化的紫外線-可見光穿透/吸收光譜儀來量測溶液的穿透率時，因為使用的石英槽寬度只有 1 cm (如圖5-27所示)，如果溶液的濃度很低時，這一公分的吸收路徑是不夠的。所以如果增加吸收路徑長度，將可使溶質吸收的數量增加，如此就可量測非常稀薄的溶液。

(一)糖水

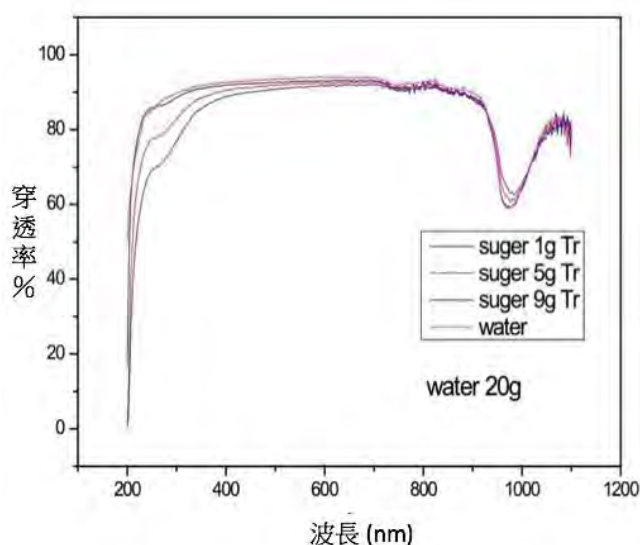


圖 5-28：20g 的水分別加入 1g、5g、9g (飽和溶液)的白糖水溶液之波長 vs. 穿透率(T%) 的穿透光譜圖

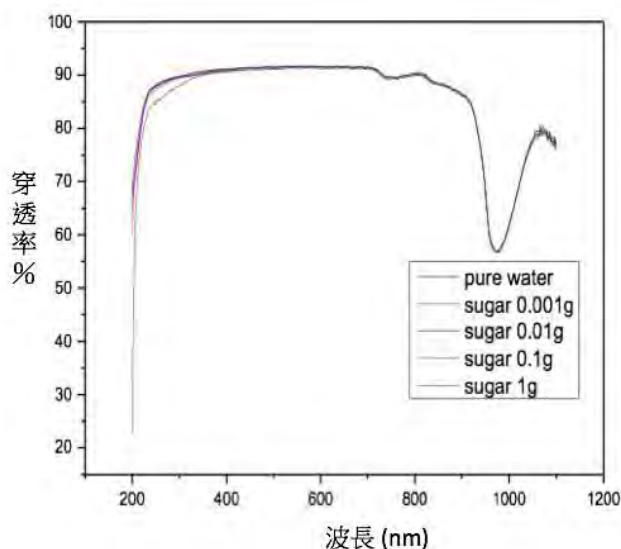


圖 5-29：20g 的水分別加入 1g、0.1g、0.01g、0.001g 的白糖水溶液之波長 vs. 穿透率(T%) 的穿透光譜圖

圖5-28是20g的水分別加入 1g、5g、9g (飽和溶液)的白糖，以商業化的紫外線-可見光穿透/吸收光譜儀量測出來的 波長 vs. 穿透率 (T%) 的穿透光譜圖。由圖5-28可知濃度越高的白糖溶液，其可見光各波長穿透率將隨濃度增加而減少。

圖5-29是20g的水分別加入 1g、0.1g、0.01g、0.001g的白糖 (即重量百分比：5%、1%、0.5%、0.1%、0.05%)，以商業化的紫外線-可見光穿透/吸收光譜儀量測出來的 波長 vs. 穿透率 (T%) 的穿透光譜圖。由圖5-29可知濃度越低的白糖溶液 (0.5%、0.1%、0.05%)，因為各條線幾乎都疊在一起，看不出來其可見光各波長穿透率將隨濃度增加而減少。

因此使用多次的反射來增加光行走的距離，如此將可增加稀薄溶質吸收光線的能力。我們使用不同濃度的白糖溶液 (即重量百分比：0.2%、0.1%、0.05%、0.01%)，以綠雷射光從長40 cm、寬 12 cm、厚度 3 mm的玻璃缸外以10、20、30度角射入不同濃度的白糖溶液中後，經過鏡子 6、10、20 次的反射後，出射光強度隨著光行走距離增長與濃度增加而降低，實驗數據如表5-7所示

表 5-7：綠色光在不同濃度糖水中的吸收實驗數據

	糖濃度 (wt%)	入射角 (度)	反射次數	光所走的距離 (cm)	入射光強度 (mW)	air - glass 反射光強度 (mW)	出射光強度 (mW)	各濃度之間出射光強度相差值 (mW)
綠光	0.20%	10	20	253.70	64.33	2.71	0.75	1.88
綠光	0.10%	10	20	253.70	64.33	2.71	2.63	1.03
綠光	0.05%	10	20	253.70	64.33	2.71	3.66	0.96
綠光	0.01%	10	20	253.70	64.33	2.71	4.62	0.05
綠光	0.00%	10	20	253.70	64.33	2.71	4.67	
綠光	0.20%	20	10	135.63	64.33	3.07	11.32	1.06
綠光	0.10%	20	10	135.63	64.33	3.07	12.38	0.53
綠光	0.05%	20	10	135.63	64.33	3.07	12.91	0.47
綠光	0.01%	20	10	135.63	64.33	3.07	13.38	0.02
綠光	0.00%	20	10	135.63	64.33	3.07	13.4	
綠光	0.20%	30	6	89.35	64.33	3.77	20.83	0.64
綠光	0.10%	30	6	89.35	64.33	3.77	21.47	0.33
綠光	0.05%	30	6	89.35	64.33	3.77	21.8	0.27
綠光	0.01%	30	6	89.35	64.33	3.77	22.07	0.01
綠光	0.00%	30	6	89.35	64.33	3.77	22.08	

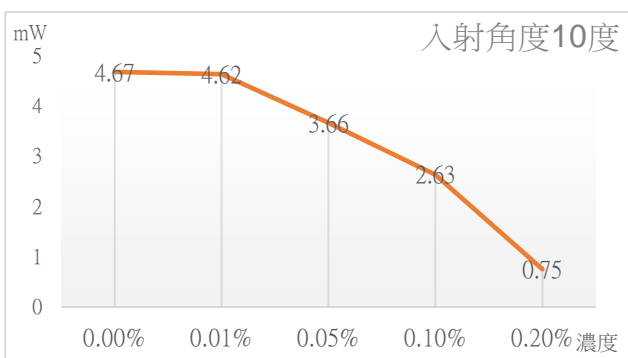


圖 5-30：糖水 10 度出射光強度比折線圖

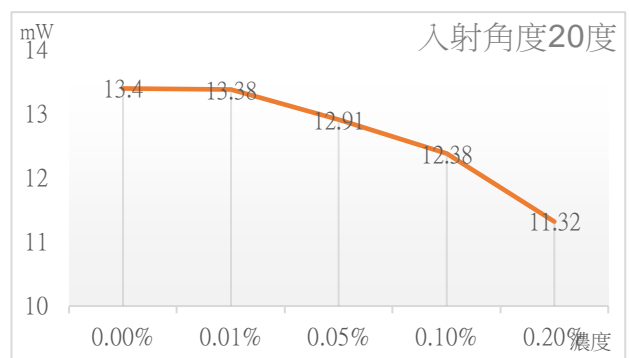


圖 5-31：糖水 20 度出射光強度比折線圖

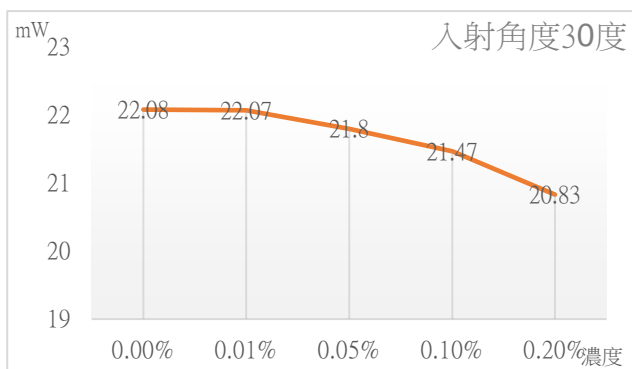


圖 5-32：糖水 30 度出射光強度比折線圖

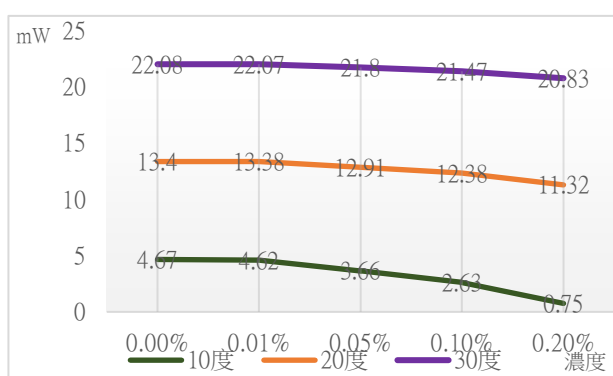


圖 5-33：糖水不同角度出射光強度比折線圖

(二)鹽水

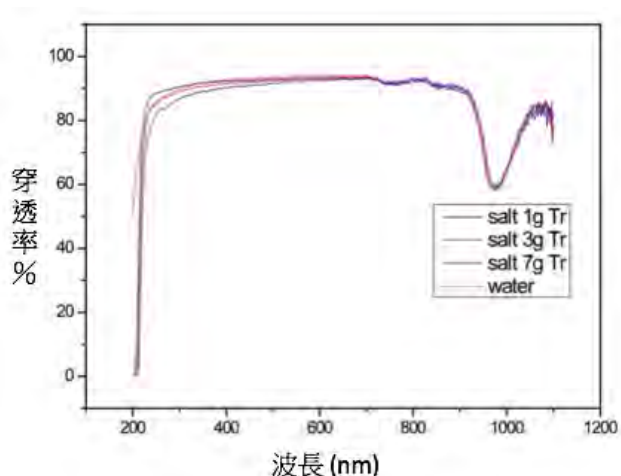


圖 5-34：20g 的水分別加入 1g、0.1g、0.01g、0.001g 的鹽水溶液之波長 vs. 穿透率(T%) 的穿透光譜圖

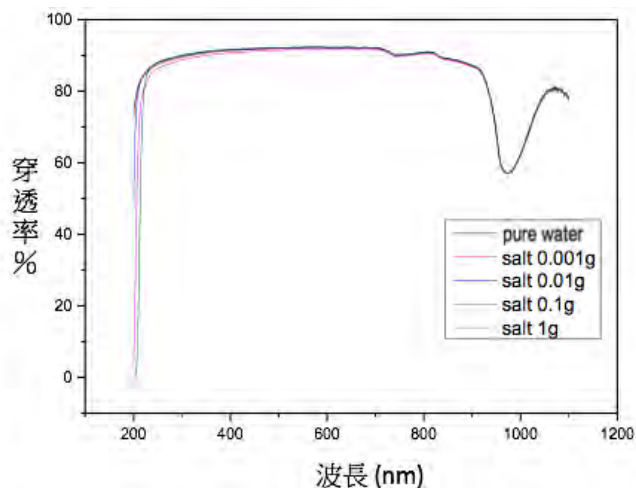


圖 5-35：20g 的水分別加入 1g、3g、7g (飽和溶液)的鹽水溶液之波長 vs. 穿透率(T%) 的穿透光譜圖

圖5-34是20g的水分別加入 1g、3g、7g(飽和溶液)的鹽，以商業化的紫外線-可見光穿透/吸收光譜儀量測出來的 波長 vs. 穿透率 (T%) 的穿透光譜圖。由圖5-34可知濃度越高的鹽水溶液，其可見光各波長穿透率將隨濃度增加而減少。

圖5-35是20g的水分別加入 1g、0.1g、0.01g、0.001g的鹽 (即重量百分比：5%、1%、0.5%、0.1%、0.05%)，以商業化的紫外線-可見光穿透/吸收光譜儀量測出來的 波長 vs. 穿透率 (T%) 的穿透光譜圖。由圖5-35可知濃度越低的鹽水溶液 (0.5%、0.1%、0.05%)，因為各條線幾乎都疊在一起，看不出來其可見光各波長穿透率將隨濃度增加而減少。因此使用多次的反射來增加光行走的距離，如此將可增加稀薄溶質吸收光線的能力。實驗數據如表5-8所示

表 5-8：綠色光在不同濃度鹽水中的吸收實驗數據

	鹽濃度 (wt%)	入射角 (度)	反射次數	光所走的距離 (cm)	入射光強度 (mW)	air - glass 反射光強度 (mW)	出射光強度 (mW)	各濃度之間出射光強度相差值 (mW)
綠光	0.20%	10	20	253.70	64.33	2.71	0.92	1.87
綠光	0.10%	10	20	253.70	64.33	2.71	2.79	1.08
綠光	0.05%	10	20	253.70	64.33	2.71	3.87	0.95
綠光	0.01%	10	20	253.70	64.33	2.71	4.82	0.03
綠光	0.00%	10	20	253.70	64.33	2.71	4.85	
綠光	0.20%	20	10	135.63	64.33	3.07	11.55	1.03
綠光	0.10%	20	10	135.63	64.33	3.07	12.58	0.57
綠光	0.05%	20	10	135.63	64.33	3.07	13.15	0.4
綠光	0.01%	20	10	135.63	64.33	3.07	13.55	0.04
綠光	0.00%	20	10	135.63	64.33	3.07	13.59	
綠光	0.20%	30	6	89.35	64.33	3.77	21.05	0.62
綠光	0.10%	30	6	89.35	64.33	3.77	21.67	0.32
綠光	0.05%	30	6	89.35	64.33	3.77	21.99	0.28
綠光	0.01%	30	6	89.35	64.33	3.77	22.27	0.03
綠光	0.00%	30	6	89.35	64.33	3.77	22.3	

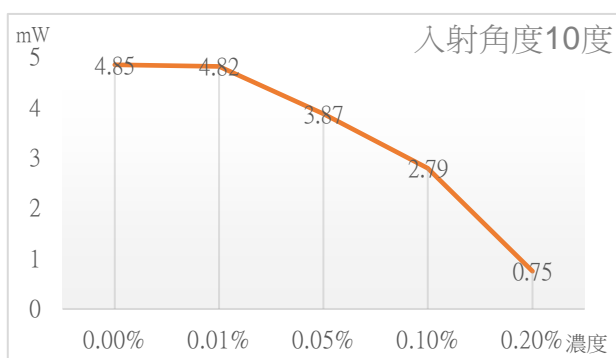


圖 5-36：鹽水 10 度出射光強度比折線圖

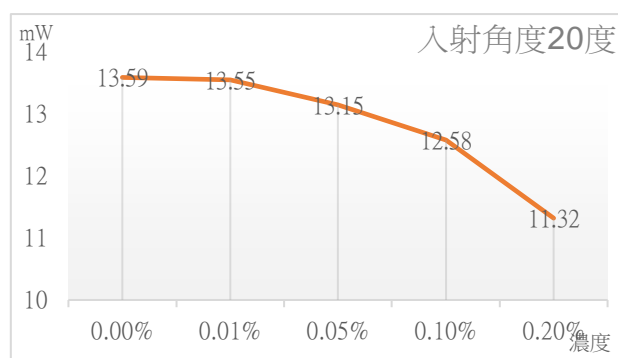


圖 5-37：鹽水 20 度出射光強度比折線圖

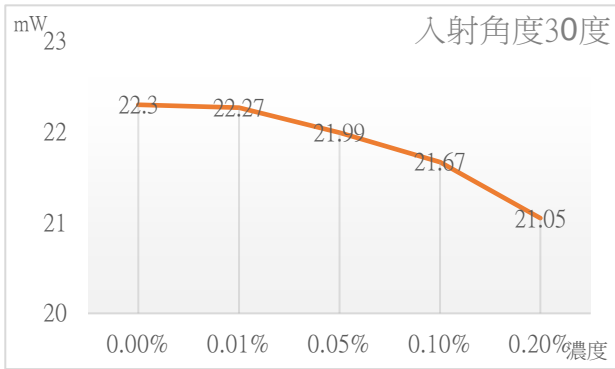


圖 5-38：鹽水 30 度出射光強度比折線圖

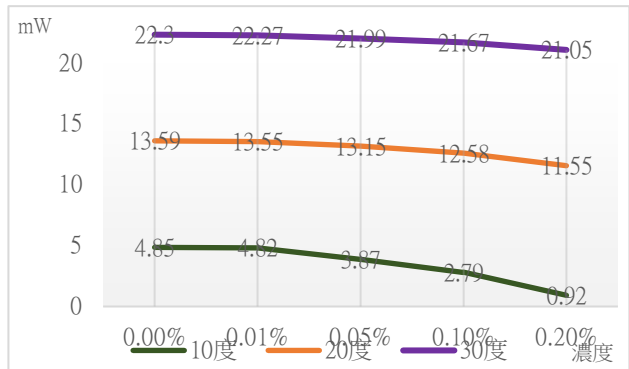


圖 5-39：鹽水不同角度出射光強度比折線圖

(四)稀薄糖水及鹽水的出射光強度比較圖

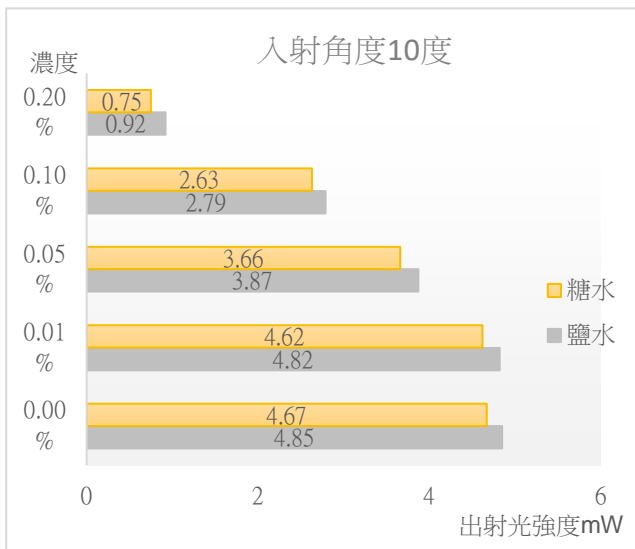


圖 5-40：10 度出射光強度比橫條圖

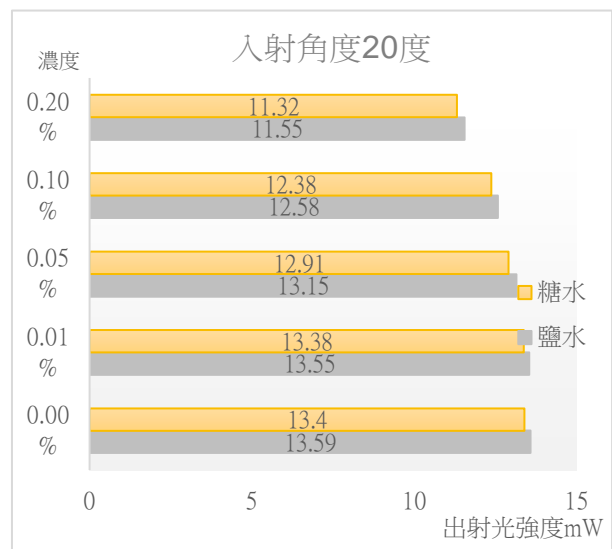


圖 5-41：20 度出射光強度比橫條圖

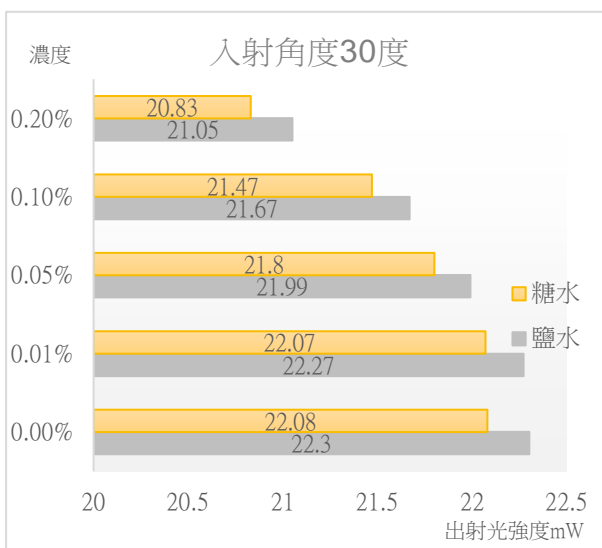


圖 5-42：30 度出射光強度比橫條圖

由圖可以看出，在相同濃度的條件下，鹽水的吸收較糖水還來得小一點。經由比爾-朗伯定律的計算：

$$A = -\log(I_t/I_0) = \log(1/T) = K l c$$

A：吸光度， I_0 ：入射光強度， I_t ：出射光強度
T：透光度，K：吸收係數，l：吸收介質厚度 (cm)，c：吸光介質濃度 (g/L)

得到以 10、20、30 度角入射 0.2 wt%的鹽水和糖水，其吸收係數將隨著行走距離的增加而增加。這是因為路徑越長，介質吸收光就越多，吸收係

數將會增加。鹽水的吸收係數較糖水還來得小，實驗與計算數據如下表。

表 5-9：鹽水和糖水中的吸收係數實驗數據

鹽水	入射角度	濃度 (%)	入射光強度 (mW)	出射光強度 (mW)	路徑長 (cm)	濃度 (g/L)	K
綠光	10	0.20%	64.33	0.92	253.70	2	0.00364
綠光	20	0.20%	64.33	11.55	135.63	2	0.00275
綠光	30	0.20%	64.33	21.05	89.35	2	0.00271
糖水	入射角度	濃度 (%)	入射光強度 (mW)	出射光強度 (mW)	路徑長 (cm)	濃度 (g/L)	K
綠光	10	0.20%	64.33	0.75	251.70	2	0.00384
綠光	20	0.20%	64.33	11.32	133.63	2	0.00282
綠光	30	0.20%	64.33	20.83	87.35	2	0.00280

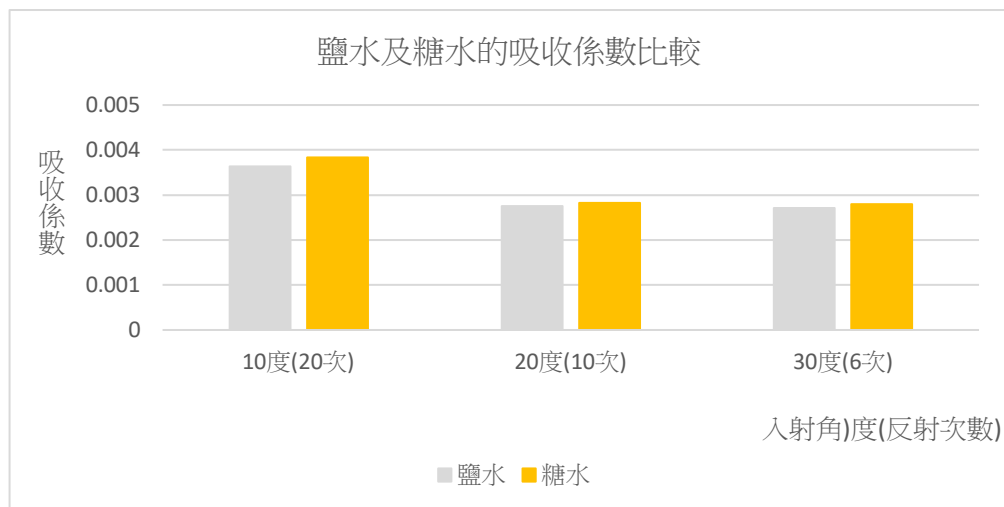


圖 5-43：鹽水及糖水的吸收係數比較圖表

四、紅色光應用在不同濃度亞甲藍水溶液中的吸收特性

圖5-44 是重量百分比分別為 0.001%、0.0005%、0.0001%、0.00005%、0.00001% 的亞甲藍水溶液以商業化的紫外線-可見光穿透/吸收光譜儀量測出來的 波長 vs. 吸收度 (A) 的吸收光譜圖。由圖5-44可知濃度越高的亞甲藍水溶液，其可見光各波長吸收度將隨濃度增加而增加。此外由圖5-44可知濃度越低的亞甲藍水溶液 (0.0001 wt%、0.00005 wt%、0.00001 wt%)，因為各條線幾乎都疊在一起，看不出來其可見光各波長吸收度將隨

濃度增加而增加。

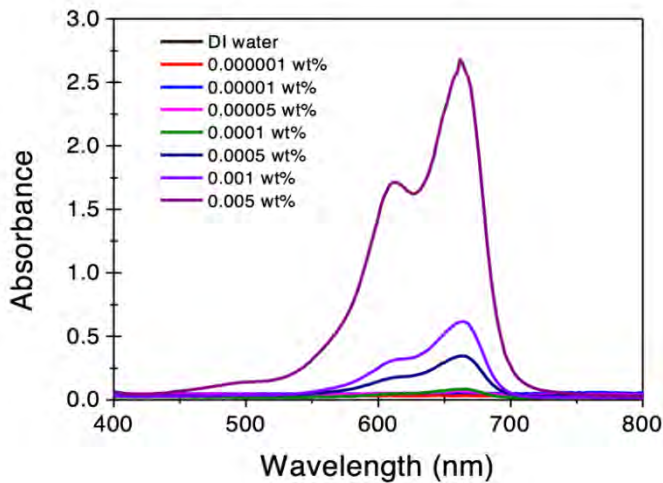
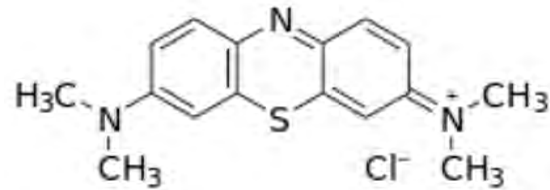


圖 5-44 亞甲藍水溶液之波長 vs. 穿透率 (T%) 的穿透光譜圖

吸收光譜顯示出其在 664 nm 紅光這個波長範圍有很強的吸收峰。因此我們將使用 664 nm 紅光來進行多重反射吸收的實驗。亞甲藍的分子結構如圖5-45所示，



亞甲藍化學式： $C_{16}H_{18}ClN_3S$

圖 5-45：亞甲藍的分子結構圖

我們使用不同濃度的亞甲藍水溶液（即重量百分比：0.00032 wt%、0.00016 wt%、0.00008 wt%、0.00004 wt%），以紅光雷射光從長 40 cm、寬 12 cm、厚度 3 mm 的玻璃缸外以10、20、30度角射入不同濃度的亞甲藍水溶液中後，經過鏡子 6、10、20 次的反射後，出射光強度隨著光行走距離增長與濃度增加而降低，實驗數據如表5-10所示。反射 20 次之後的出射光強度都為 0，表示紅光已經完全被亞甲藍所吸收。當濃度為 0.00004 wt%，反射 10 或 20 次之後，出射光就有顯示出明顯的降低現象，這表示出這樣的裝置可以測得小數第五位的重量百分比濃度。因此使用多次的反射來增加光行走的距離，如此將可增加稀薄溶質吸收光線的能力。

表 5-10：紅色光在不同濃度亞甲藍水溶液中的吸收特性實驗數據

	亞甲藍濃度 (wt%)	入射角 (度)	反射次數	光所走的距離 (cm)	入射光強度 (mW)	air - glass 反射光強度 (mW)	出射光強度 (mW)	各濃度之間出射光強度相差值 (mW)
紅光	0.00032%	10	20	253.71	72.29	3.01	0	0
紅光	0.00016%	10	20	253.71	72.29	3.01	0	0
紅光	0.00008%	10	20	253.71	72.29	3.01	0	0
紅光	0.00004%	10	20	253.71	72.29	3.01	0	1.03
紅光	0.00000%	10	20	253.71	72.29	3.01	1.03	

紅光	0.00032%	20	10	135.61	72.29	3.4	1.18	0.39
紅光	0.00016%	20	10	135.61	72.29	3.4	1.57	0.34
紅光	0.00008%	20	10	135.61	72.29	3.4	1.91	0.43
紅光	0.00004%	20	10	135.61	72.29	3.4	2.34	6.44
紅光	0.00000%	20	10	135.61	72.29	3.4	8.78	
紅光	0.00032%	30	6	89.32	72.29	4.16	1.90	1.12
紅光	0.00016%	30	6	89.32	72.29	4.16	3.02	1.26
紅光	0.00008%	30	6	89.32	72.29	4.16	4.28	1.15
紅光	0.00004%	30	6	89.32	72.29	4.16	5.43	12.44
紅光	0.00000%	30	6	89.32	72.29	4.16	17.87	

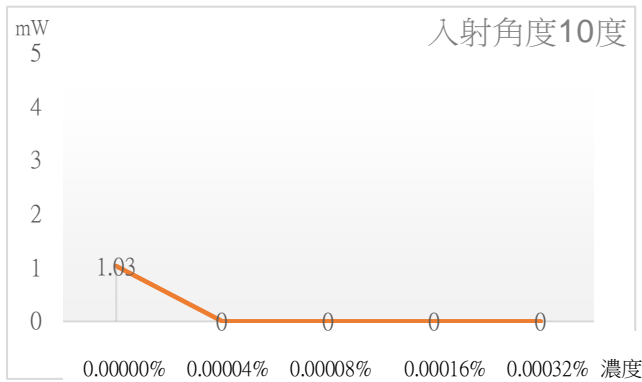


圖 5-46: 亞甲藍水溶液 10 度出射光強度比折線圖

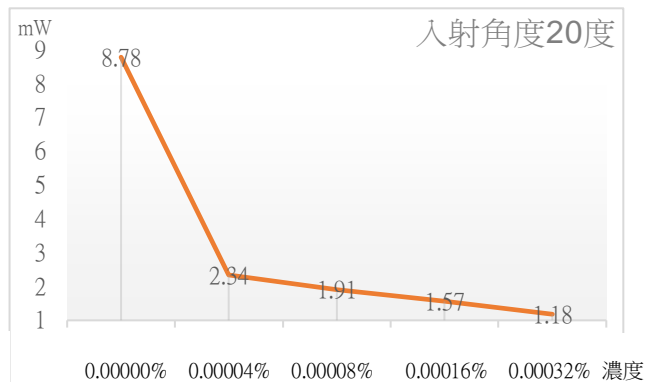
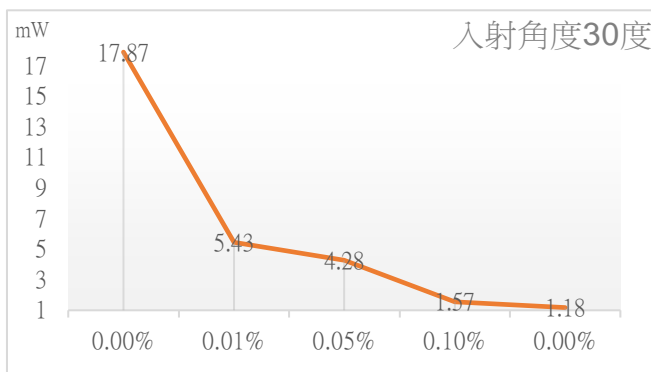


圖 5-47: 亞甲藍水溶液 20 度出射光強度比折線圖



T: 透光度, K: 吸收係數, l: 吸收介質厚度 (cm), c: 吸光介質濃度 (g/L)

經由比爾-朗伯定律的計算:

$$A = -\log(I_t/I_0) = \log(1/T) = K l c$$

A: 吸光度, I_0 : 入射光強度, I_t : 出射光強度

圖 5-48: 亞甲藍水溶液 30 度出射光強度比折線圖

如表5-11所示, 得到以 10、20、30 度角入射 0.00004 wt%的亞甲藍水溶液, 其吸收係數將隨著行走距離的增加而增加。這是可能是因為路徑越長, 介質吸收光與鏡面散射光就越多, 吸收係數將會增加。要注意的是, 此計算出的吸收係數並不是實際的吸收係數, 因為光在水中和鏡面之間反射會存在很多的散射, 我們的計算並未包含到這些散射效應。

表 5-11：亞甲藍水溶液吸收係數表

亞甲藍	入射角度	濃度 (%)	入射光強度 (mW)	出射光強度 (mW)	路徑長 (cm)	濃度 (g/L)	K
紅光	10	0.00004%	72.29	0	253.71	0.0004	----
紅光	20	0.00004%	72.29	2.34	136.61	0.0004	27.26488
紅光	30	0.00004%	72.29	5.43	89.32	0.0004	31.46771

陸、討論

一、藍、綠、紅三色光在水中的折射特性

(一)藍、綠、紅三色光在玻璃中的折射特性

本實驗使用了使用藍、綠、紅三色雷射光，經過光譜儀量測後其波長分別為 405 nm, 532 nm, 664 nm。因為光的色散現象，不同顏色的光入射厚玻璃後，其折射的角度將會有所不同。本實驗為了減少司乃耳定律計算上的誤差，入射角與折射角度的量測必須要很精準。一般的量角器本身最小刻度是一度，在讀取數據時僅能精確到個位數並估計到小數第一位。此外因為讀取者的人為誤差或光線本身寬度所造成的儀器誤差，這些都會造成數據的不準確。光射入玻璃後，偏折的角度很小，我們最後選擇利用三角幾何與司乃耳（Snell）定律的算式來算出玻璃的折射率。搭配高精度的游標卡尺，在讀取數據時便能精確到公分的小數第二位 (0.01 cm) 並估計到小數第三位 (0.001 cm)。

量測結果發現，以 10 度、20 度、30 度入射水面後，不同色光的 Y 是在小數第三位變動，因此我們的高精度的游標卡尺可估計到小數第三位是有其必要性的。經過計算，以 10 度、20 度、30 度入射水面後，不同色光的玻璃折射率的計算值是在小數第二位變動，這明顯地比水折射率的變動大了一個數量級。

(二)藍、綠、紅三色光在 空氣-玻璃-水 中的折射與反射特性

使用藍、綠、紅三色雷射光，波長分別為 405nm, 532 nm, 664 nm。因為光的色散現象，不同顏色的光從空氣射入玻璃-水中後，其折射的角度將會有所不同。實驗結果顯示藍光的折射角最小，紅光的折射角最大，因此藍光的水折射率最大，紅光的水折射率最小。量測結果發現，以 10 度、20 度、30 度入射後，不同色光的折射角度是在小數第二位變動，因此我們的游標卡尺可精確到小數第二位是有其必要性的。經過計算，以 10 度、20 度、30 度入射水面後，不同色光的水折射率是在小數第三位變

動，因此水折射率的計算值可取到小數第四位。

藍、綠、紅三色光在 空氣-玻璃-水 中除了折射之外，還有反射現象是值得注意的，空氣-玻璃介面、玻璃-水介面會有反射現象。我們先討論玻璃-水介面的反射現象，我們發現當入射角度超過 40 度時，玻璃-水介面就沒有反射現象了。而空氣-玻璃介面不管用任何角度入射都會有反射現象，這是因為反射率與兩介質之間的折射率與入射角度有關 (菲涅耳方程式，大學光學範圍，在此不明述)，因為空氣折射率=1、玻璃折射率=1.51、水折射率=1.33，空氣-玻璃之間的折射率差值為 0.51，而玻璃-水之間的折射率差值為 0.17。兩介面若折射率差值越大，則當入射角小於某一角度時，則反射光強度為零。我們利用這一點，把入射角度定在小於等於30度的範圍內，如此將可避免玻璃-水之間的反射現象，減少反射現象所造成光強度的損失，這樣會使多重反射的計算簡化下來。

而空氣-玻璃介面不管用任何角度入射都會有反射現象，這是因為反射率與兩介質之間的折射率與入射角度有關 (菲涅耳方程式)，因為空氣折射率=1、玻璃折射率=1.51，空氣-玻璃之間的折射率差值為 0.51。因此反射強度隨入射角度越大而越大，且藍光 > 綠光 > 紅光。

(三)藍、綠、紅三色光在水中的折射與多次反射特性

接下來要討論雷射光在各個介面的吸收、折射、反射與散射光強度之間的關係。為避免水中的離子或顆粒雜質對雷射光造成吸收與散射，我們實驗將全程使用逆滲透去離子水。實驗發現因為鏡子的銀反射層鍍的很薄，所以雷射光射入銀反射層後，除了反射外還會有一部分光穿透出來。但因為銀反射層的穿透光強度為微瓦(uw) 等級的，非常的弱。

藍色雷射光從長40 cm、寬 12 cm、厚度 3 mm的玻璃缸外以10、20、30度角射入水中後，經過鏡子 6、10、20 次的反射後，光強度從 64.33 mW 降低到 22.08、13.40、4.67 mW。由以下的公式我們可以算出反射 6、10、20 次後的吸收光 + 反射 6、10、20 次後的散射光強度 + glass to air反射光強度。光線碰到鏡面會有散射的現象，但因為在水中所以不易量出。此外出射光從玻璃穿透到空氣中，玻璃-空氣介面也會有反射現象，但因為反射射入水中也不易量出。要得知有多少入射光損失，我們可以以入射光強度衰減率來表達。

結果顯示紅色出射光的入射光強度衰減率最大，綠光次之，藍光最小。因為各色光的波長約相差 100 nm，各色光在玻璃表面的散射率應該一樣。此外，各色光glass to air反射率應該與air to glass反射率一樣，所以各色光的入射光強度衰減率與吸收光強度成正比。因此藍、綠、紅三色光經過水中的吸收後，紅光會被吸收最多，綠光次之，藍光最少，如圖6-1所示。

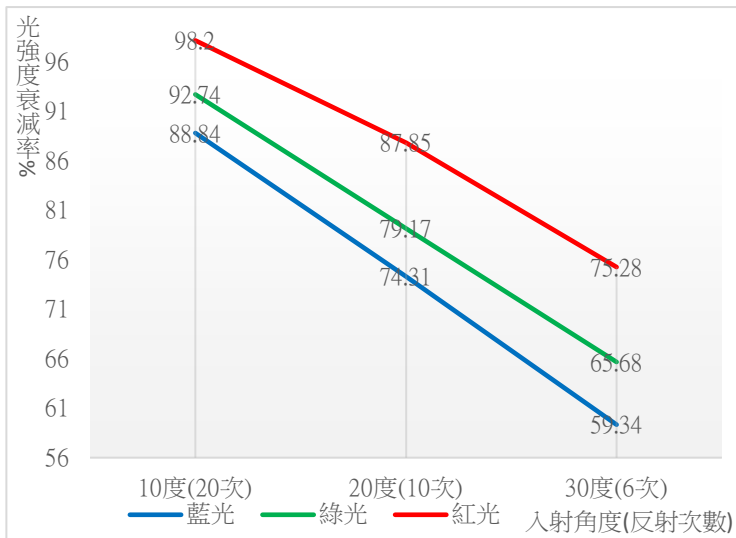


圖 6-1：不同角度入射光強度衰減比較

由以上的實驗可以發現，各色光在水中行走的距離越長，則出射光的強度越小。其中紅色出射光的強度最小，綠光次之，藍光最強。因此紅、綠、藍三色光經過水中的吸收後，紅光會被吸收最多，綠光次之，藍光最少。因此經過混光後，較深層的水中會呈現出藍色。

二、綠色光應用在不同濃度糖水及鹽水中的吸收特性

使用多次的反射來增加光行走的距離，如此將可增加稀薄溶質吸收光線的能力。

調配不同濃度的白糖(鹽)溶液 (即重量百分比：0.2%，0.1%，0.05%，0.01%)，以綠光雷射光從長40 cm、寬 12 cm、厚度 3 mm的玻璃缸外以10、20、30度角射入不同濃度的白糖(鹽)溶液中後，經過鏡子 6、10、20 次的反射後，出射光強度隨著光行走距離增長與濃度增加而降低。

實驗結果顯示出，當濃度只有 0.01% 時，出射光強度的變化只在0.01~0.05的範圍內變動，這個值太小了可能不精確，但當濃度增加到0.05% 時，出射光強度的變化就會在 0.3~1 mW 之間有明確的變化。因此我們這個裝置可以測到濃度0.05% 以上的白糖(鹽)溶液。圖6-2為 0.2~0.05% 不同白糖溶液濃度對出射光強度的比較圖，圖6-3為 0.2~0.05% 不同鹽水溶液濃度對出射光強度的比較圖，當量測一個未知濃度白糖(鹽)溶液的出射光強度，我們即可以內差的方式估計出此白糖(鹽)溶液的濃度。

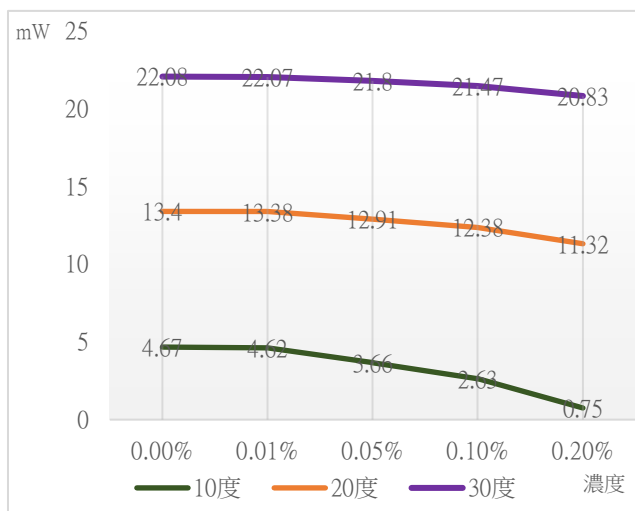


圖 6-2：糖水不同角度出射光強度比較圖

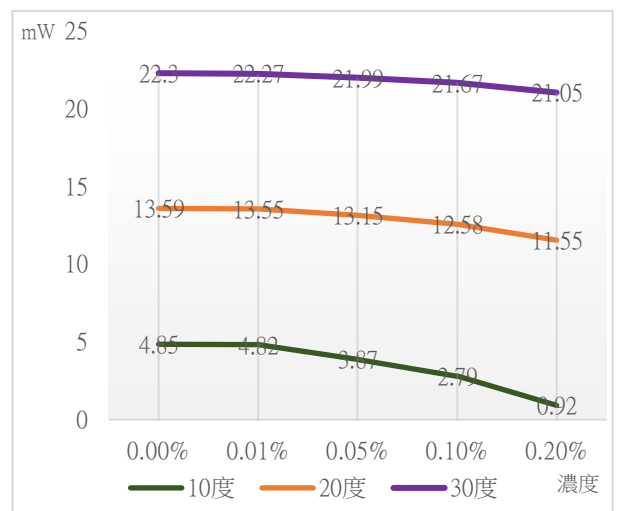
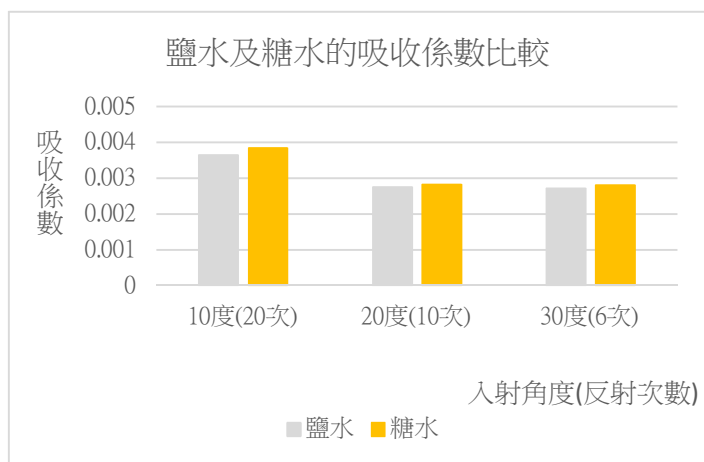


圖 6-3：鹽水不同角度出射光強度比較圖

吸收係數將隨著行走距離的增加而增加，如圖6-4。這是因為路徑越長，介質吸收光就越多，吸收係數將會增加。而鹽水的吸收係數較糖水還來得小，可能是因為糖分子與鹽分子完全不同的關係。糖是有機物，由碳氫氧原子所組成，其溶解在水中分子結構並不會變化。鹽是無機物，由鈉離子與氯離子所組成，其溶解在水中分子結構會變化，會分解成游離的鈉離子與氯離子。碳氫氧原子所組成的分子結構可能對可見光有較強的吸收。而鹽水中游離的鈉離子與氯離子可能對可見光有較弱的吸收。



三、紅色光應用在不同濃度亞甲藍水溶液中的吸收特性

亞甲藍在 664 nm 紅光這個波長範圍有很強的吸收峰。這是因為亞甲藍分子結構中的化學鍵結會對特定波長有選擇性的吸收。這種吸收非常的敏感，所以即使濃度很小也會有很強的吸收。

圖 6-4：鹽水及糖水的吸收係數比較圖

這有別於糖鹽溶液對光的吸收特性，因此我們可以利用本裝置測出比糖鹽溶液濃度更低的亞甲藍溶液。我們使用不同濃度的亞甲藍水溶液（即重量百分比：0.00032%、0.00016%、0.00008%、0.00004%），以紅光雷射光從玻璃缸外以10、20、30度角射入不同濃度的亞甲藍水溶液中，當濃度為 0.00004 wt%，反射 10 或 20 次之後，出射光就有顯示出明顯的降低現象，這表示出這樣的裝置可以測得小數第五位的重量百分比濃度。因此我們這個裝置可以測到濃度 0.00004 wt% 以上的亞甲藍溶液。圖6-5為入射30度 0.00004~0.00032 wt% 不同亞甲藍溶液濃度對出射光強度的比較圖，當量測一個未知濃度亞甲藍溶液的出射光強度，我們即可以內差的方式估計出此亞甲藍溶液的濃度。

此外以比爾-朗伯定律計算吸收係數，得到亞甲藍的吸收係數比糖或鹽還要高好幾個數量級。這是因為在亞甲藍分子結構中的化學鍵結會對 664 nm 紅光這個波長範圍有很強的選擇性吸收，而糖鹽在可見光的範圍內就沒有這樣的吸收峰。

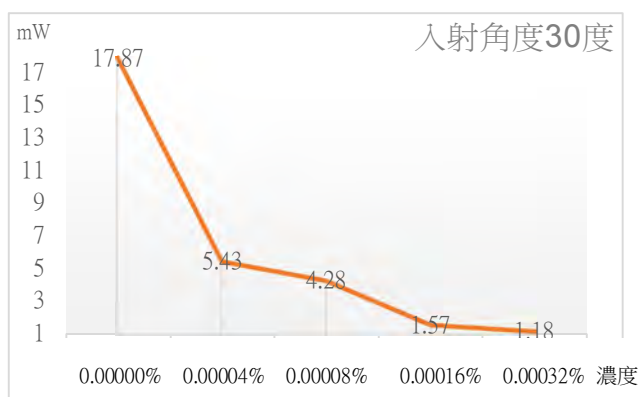


圖 6-5: 亞甲藍水溶液 30 度出射光強度比折線圖

柒、結論

- 一、本實驗使用了使用波長分別為 405 nm, 532 nm, 664 nm 的藍、綠、紅三色雷射光。因為光的色散現象，不同顏色的光入射玻璃和水中後，其折射角將會有所不同。經由精密的量測與計算，我們得知藍、綠、紅三色雷射光的水折射率以不同入射角度量測後計算的平均值分別為 1.3389、1.3336、1.3301。藍、綠、紅三色雷射光的玻璃折射率以不同入射角度量測後計算的平均值分別為 1.5246、1.5119、1.5017。
- 二、空氣-玻璃介面不管用任何角度入射都會有反射現象，此反射強度隨入射角度越大而越大，且藍光 > 綠光 > 紅光。
- 三、藍、綠、紅三色光在水中行走的距離越長，則出射光的強度越小。其中紅色出射光的強度最小，綠光次之，藍光最強。藍、綠、紅三色光經過水中的吸收後，紅光會被吸收最多，綠光次之，藍光最少。因此在較深層的水中，藍、綠、紅三色光經過混光後會呈現出藍色的樣貌。
- 四、使用多次的反射來增加光行走的距離，如此將可增加稀薄溶質吸收光線的能力。出射光強度隨著光行走距離增長與濃度增加而降低。以 0.2~0.05% 不同白糖及鹽水溶液濃度對出射光強度的做圖，當量測一個未知低濃度白糖及鹽水溶液的出射光強度，我們即可以內差的方式估計出此白糖及鹽水溶液的濃度。
- 五、以 0.00004~0.00032 wt% 不同亞甲藍的濃度水溶液濃度對出射光強度的做圖，當量測一個未知亞甲藍水溶液的出射光強度，我們即可以內差的方式估計出此亞甲藍水溶液的濃度。

捌、參考資料及其他

- 一、休伊特。觀念物理IV。遠見天下文化出版股份有限公司(註一)
- 二、史家瑩(2010)。國中自然與生活科技(第三冊)。台南市：翰林出版事業有限公司
- 三、細說高中基礎物理。建宏出版社
- 四、袁長坤主編。物理量測量 (第二版) 2009 年 12 月
- 五、維基百科 司乃耳定律 <http://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E6%96%AF%E6%B6%85%E5%B0%94%E5%AE%9A%E5%BE%8B>

【評語】 030118

1. 研究主題有趣實用且緊扣課程內容。
2. 實驗構件精巧。
3. 現象描寫呈現效果佳。
4. 推論合理。
5. 解說清楚表達良好，是相當不錯的作品，此結果可應用於量測稀薄溶液的濃度。如若能更進一步了解反射，折射，繞射在此系統的發生，應可更好的解釋相關現象。

作品海報

摘要

本研究將研究不同波長的光線在淡水中的吸收現象，因為不同波長的光在淡水中行經過後強度將會有不同程度的衰減。為了要模擬不同深度的水深，本研究使用兩片相互平行的平面鏡放入裝滿水的玻璃缸兩側，讓紅、綠、藍雷射光在此兩片相互平行的平面鏡進行折射與多重反射。最後再量測出藍、綠、紅三色雷射光行走的距離與最後出射光的強度。經實驗結果發現藍、綠、紅三色雷射光在水中走固定距離之後，藍光的衰減最少、綠光次之、紅光衰減最大。此外，這套實驗裝置還可以擴大應用來量測稀薄液體的濃度，使用多次的反射來增加光行走的距離，如此將可增加稀薄溶質吸收光線的能力。實驗結果發現，使用多次的反射可以量出0.05 wt%糖、0.05 wt%鹽以及及0.00004 wt%亞甲藍溶液的濃度。

壹、研究動機

欣賞著海底各式各樣色彩繽紛的美麗珊瑚影片時，感覺大海的顏色隨著潛入的深度增加而變得更加深藍色，這是為什麼呢？引起我的好奇心了。為了瞭解太陽光射入深海中後，其各種顏色色光在海中強度衰減的情形，我們需要將光譜儀放入海中5-10公尺來量測海中的太陽光譜。但是儀器不易放入海中，所以我們想設計一實驗裝置來模擬並量測太陽光射入海中後，其各種顏色色光在海中強度衰減的情形。除此之外，這套實驗裝置還可以擴大應用來量測稀薄液體的濃度。

貳、研究目的

- 一、研究光的折射與色散現象：不同波長光射入水中後，水中的折射角度與折射率將隨入射光波長的變化而變化。
- 二、研究不同波長光在水中的吸收現象：不同波長光在水中行走經過不同距離後強度將會有不同程度的衰減。
- 三、研究不同波長光在不同濃度之糖水及鹽水與亞甲藍水溶液中的多重反射現象：利用多重反射與吸收現象可以計算出稀薄溶液的濃度。

參、研究設備及器材

器材名稱	數量	器材名稱	數量	器材名稱	數量	器材名稱	數量
多波長偵測器	1	光譜儀	1	游標卡尺	1	透明魚缸	1
5公分厚玻璃	1	綠色雷射光	1	精密天平	1	鐵架	3
藍色雷射光	1	紅色雷射光	1	光學桌	1	鏡子	2

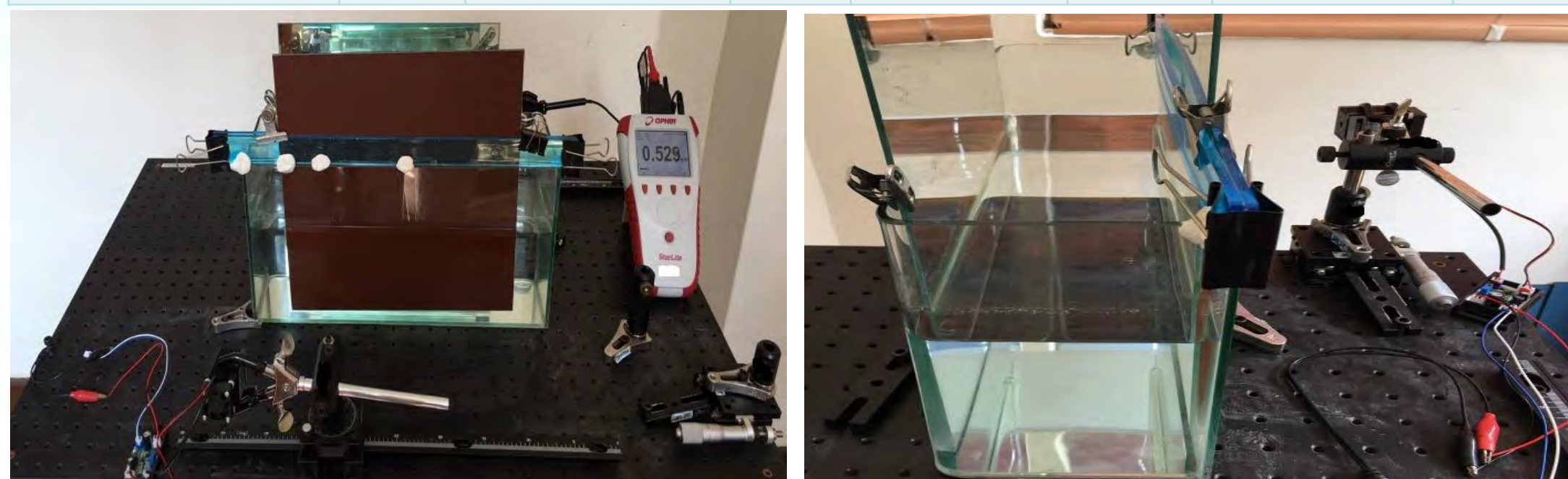


圖3-1：實驗裝置正面

圖3-2：實驗裝置側面

肆、研究過程及方法

一、研究架構



二、文獻探討

(一) 折射定律：入射線、折射线各在法线的一侧且与法线在同一平面上。光由传光速度大的介质射入传光速度小的介质时，折射角小于入射角，折射线偏向法线，如图4-1所示。光由传光速度小的介质射入传光速度大的介质时，折射角大于入射角，折射线远离法线，如图4-2所示。

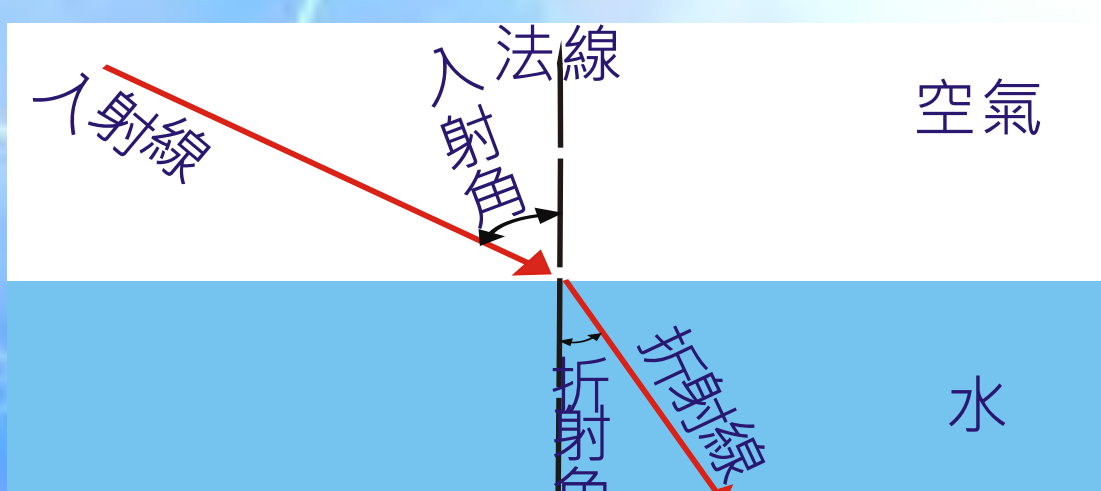


圖4-1：光由空氣進入水中

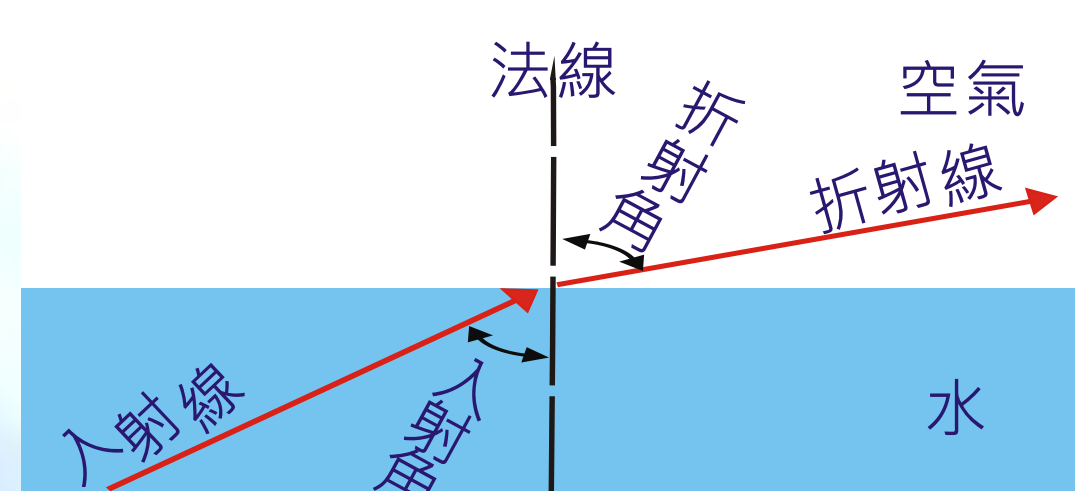


圖4-2：光由水進入空氣中

光在真空中的行進速率與光在某物質中的速率的比值n，稱做該物質的折射率：

$$\text{折射率 } n = \frac{\text{光在物質中的速率}}{\text{光在真空中的速率}}$$

這個定量的折射定律叫做司乃耳定律，是由荷蘭天文學家兼數學家司乃耳(W. Snell, 1581-1626)於1621年首先研究出來的。根據司乃耳定律，可進一步得到： $n \sin \theta = n' \sin \theta'$

(二) 吸收現象：一束單色光照射於一吸收介質表面，在通過一定厚度的介質後，由於介質吸收了一部分光能，透射光的強度就要減弱。吸收介質的濃度愈大，介質的厚度愈大，則光強度的減弱愈顯著。比爾-朗伯定律的物理意義是，當一束平行單色光垂直通過某一均勻非散射的吸光物質時，其吸光度與吸光物質的濃度及吸收層厚度成正比，如圖4-3所示。當介質中含有多種吸光組分時，只要各組分間不存在著相互作用，則在某一波長下介質的總吸光度是各組分在該波長下吸光度的加和，這一規律稱為吸光度的加合性，當光行走距離越長，光強度越低。

入射光 = 穿透光 + 吸收光 + 垂直反射光

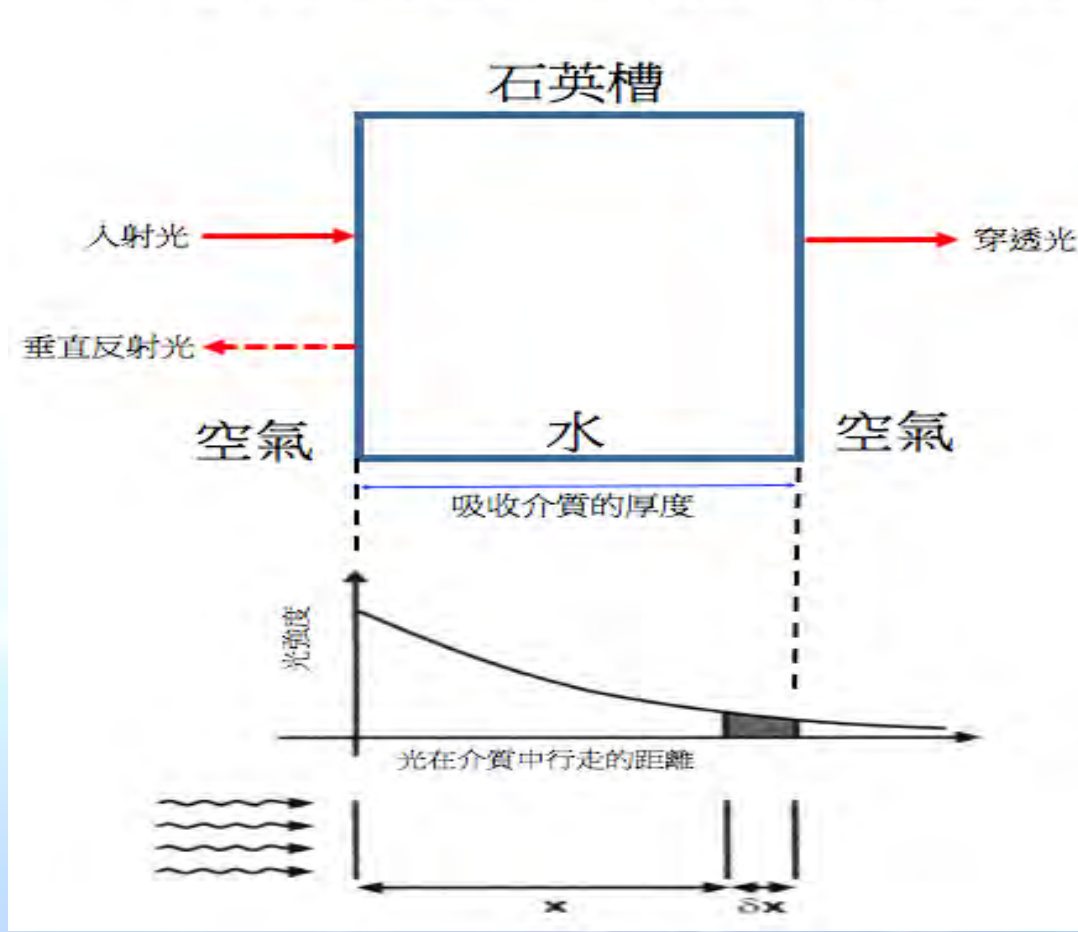


圖4-3：吸收現象

三、實驗設計

使用兩片相互平行的平面鏡放入玻璃缸的兩側，讓藍、綠、紅雷射光在此兩片相互平行的平面鏡進行折射與多次反射。最後再計算出藍、綠、紅雷射光在此兩片相互平行的平面鏡中行走的距離與測量最後出射光的強度，如圖4-4所示。

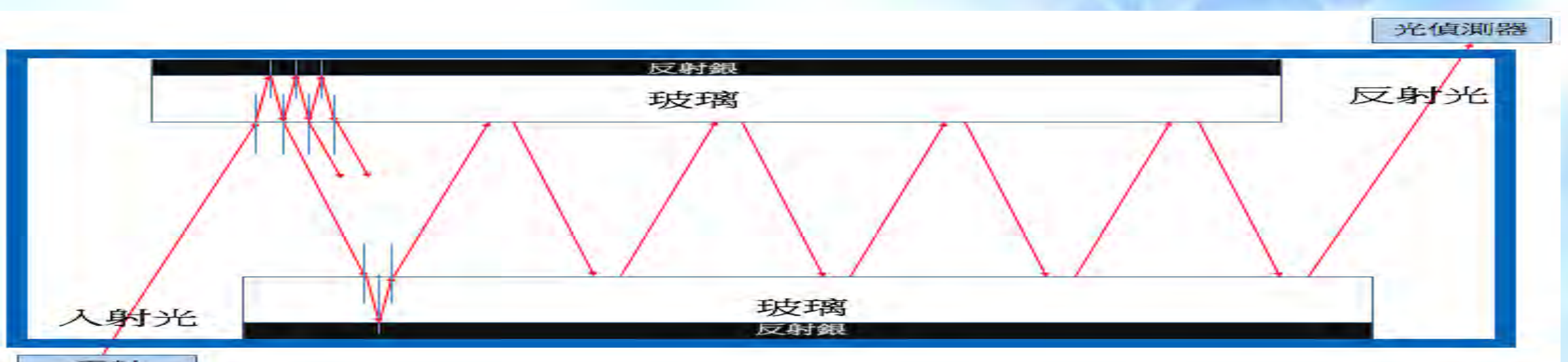


圖4-4：實驗設計示意圖

伍、研究結果

一、藍、綠、紅三色光在本實驗裝置淡水中的折射與反射特性

(一) 藍、綠、紅三色光在本實驗裝置玻璃中的折射特性
使用藍、綠、紅三色雷射光，經過光譜儀量測後其波長分別為 405 nm、532 nm 以及 664 nm。因為光的色散現象，不同顏色的光入射厚玻璃後，其折射的角度將會有所不同，如圖5-1所示。

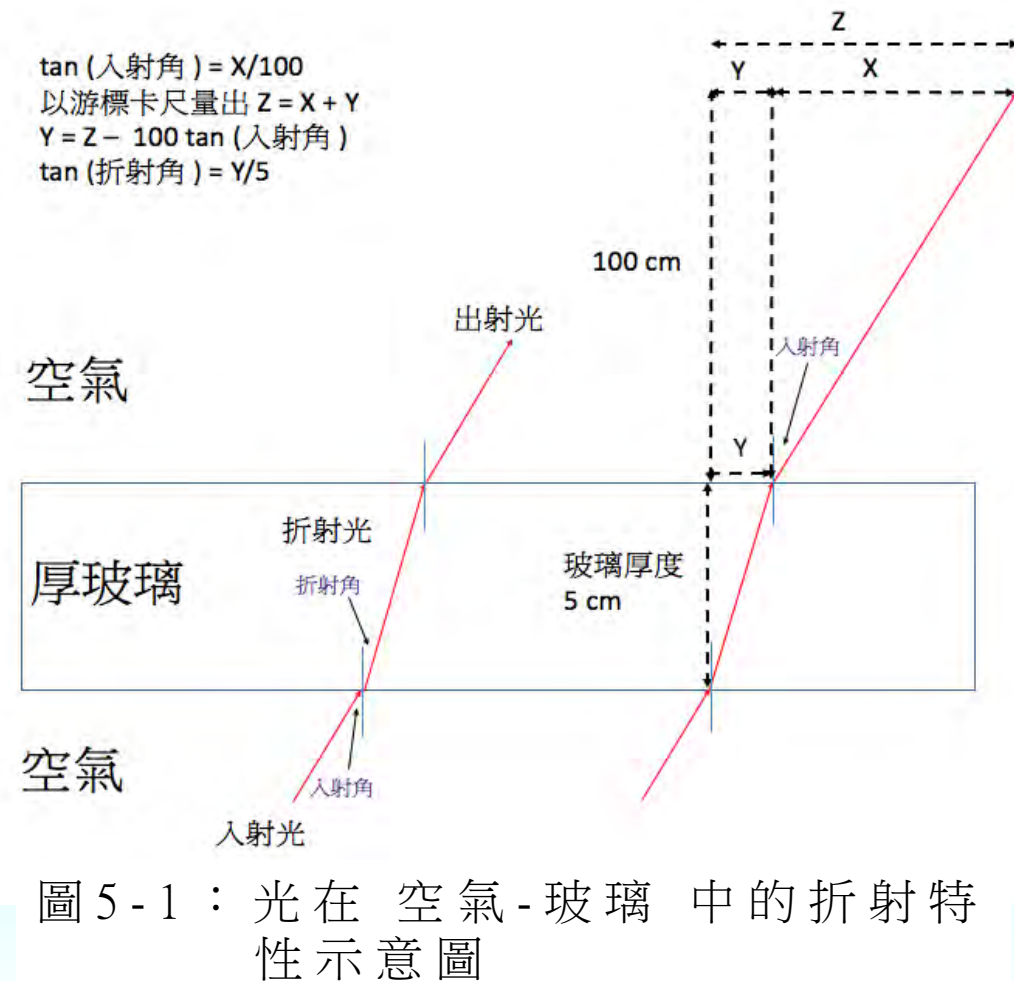


圖5-1：光在空氣-玻璃中的折射特性示意圖

表5-1：各波長之厚玻璃的折射率及折射角度

厚玻璃	air-glass 入射角(度)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	air-glass 折射角度	玻璃折射率
藍光	10	18.205	17.633	0.572	6.526	1.5278
綠光	10	18.211	17.633	0.578	6.594	1.5122
紅光	10	18.214	17.633	0.581	6.628	1.5044
藍光	20	37.548	36.397	1.151	12.964	1.5246
綠光	20	37.557	36.397	1.160	13.062	1.5134
紅光	20	37.566	36.397	1.169	13.159	1.5023
藍光	30	59.475	57.735	1.740	19.188	1.5213
綠光	30	59.490	57.735	1.754	19.336	1.5101
紅光	30	59.505	57.735	1.770	19.494	1.4983

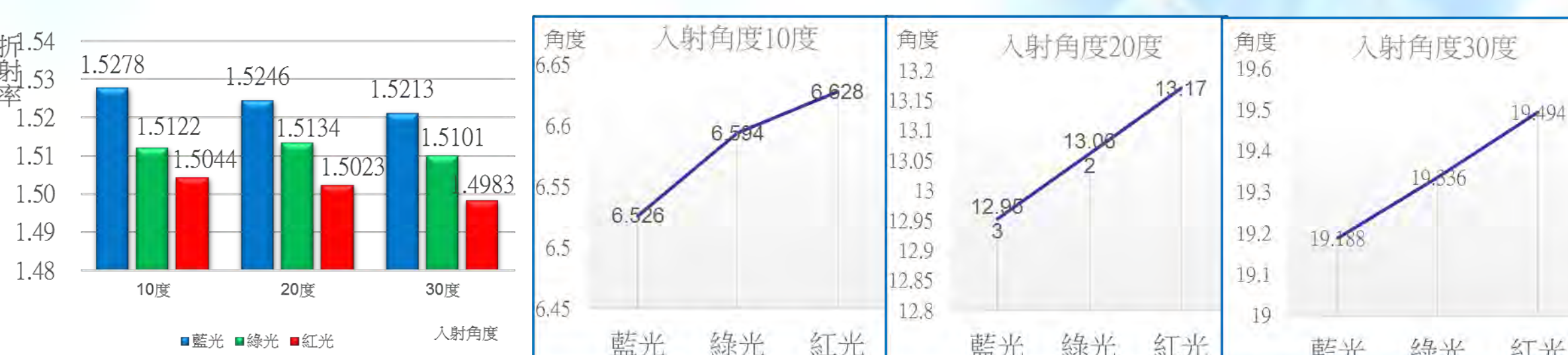


圖5-2：各波長空氣-玻璃折射率比較

圖5-3：各波長空氣-玻璃折射角度比較

(二) 藍、綠、紅三色光在本實驗裝置空氣-玻璃-水中的折射與反射特性

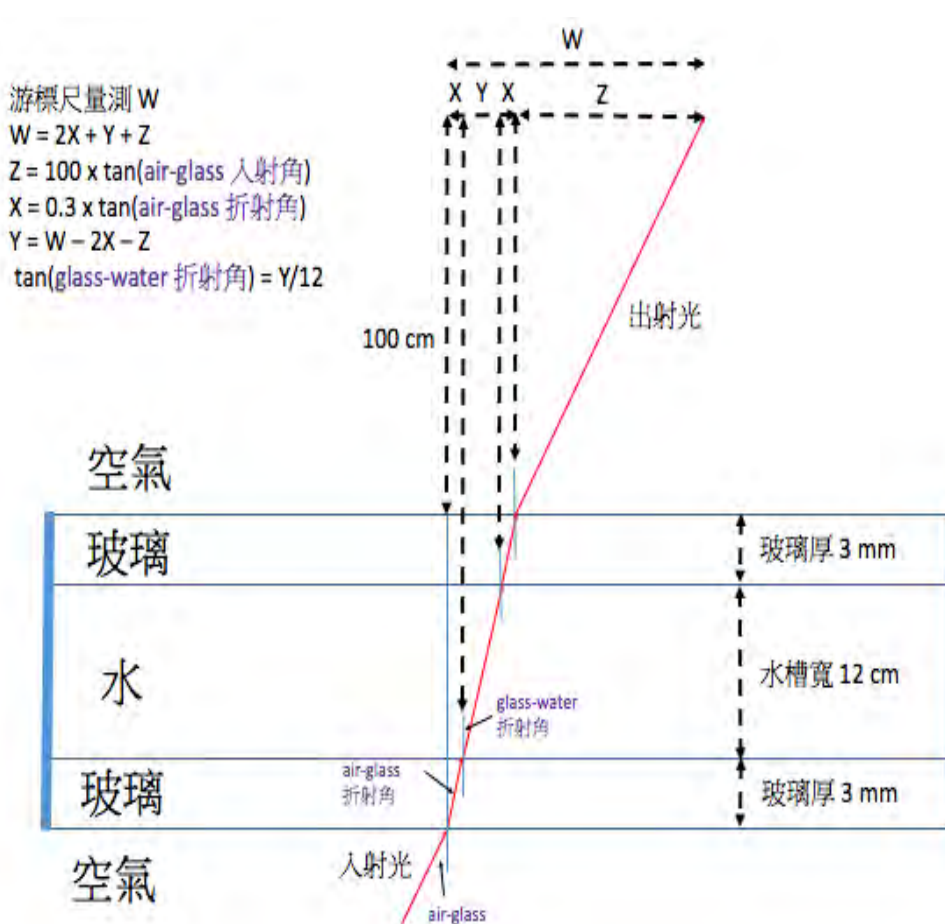


圖5-4：光在空氣-玻璃-水中的折射特性示意圖

表5-2：各波長之空氣-玻璃-水的反射率比較

空氣-玻璃-水	air-glass 入射角(度)	air-glass 折射角(度)	air-glass 入射角(度)	air-glass 反射角(度)	air-glass 入射強度(mW)	air-glass 反射強度(mW)	air-glass 反射率(%)	glass-water 入射角(度)	glass-water 反射角(度)	glass-water 反射強度(mW)
藍光	10	6.526	10	160.15	6.98	4.36	6.26	7.451	0	
綠光	10	6.594	10	64.33	2.71	4.22	6.594	7.483	0	
紅光	10	6.628	10	72.29	3.01	4.16	6.628	7.502	0	
藍光	20	12.964	20	160.15	7.88	4.92	12.964	14.818	0	
綠光	20	13.062	20	64.33	3.07	4.77	13.062	14.875	0	
紅光	20	13.159	20	72.29	3.40	4.71	13.159	14.913	0	
藍光	30	19.188	30	160.15	9.64	6.02	19.188	21.921	0	
綠光	30	19.336	30	64.33	3.77	5.86	19.336	22.017	0	
紅光	30	19.494	30	72.29	4.16	5.76	19.494	22.076	0	



圖5-5：各波長水折射率比較

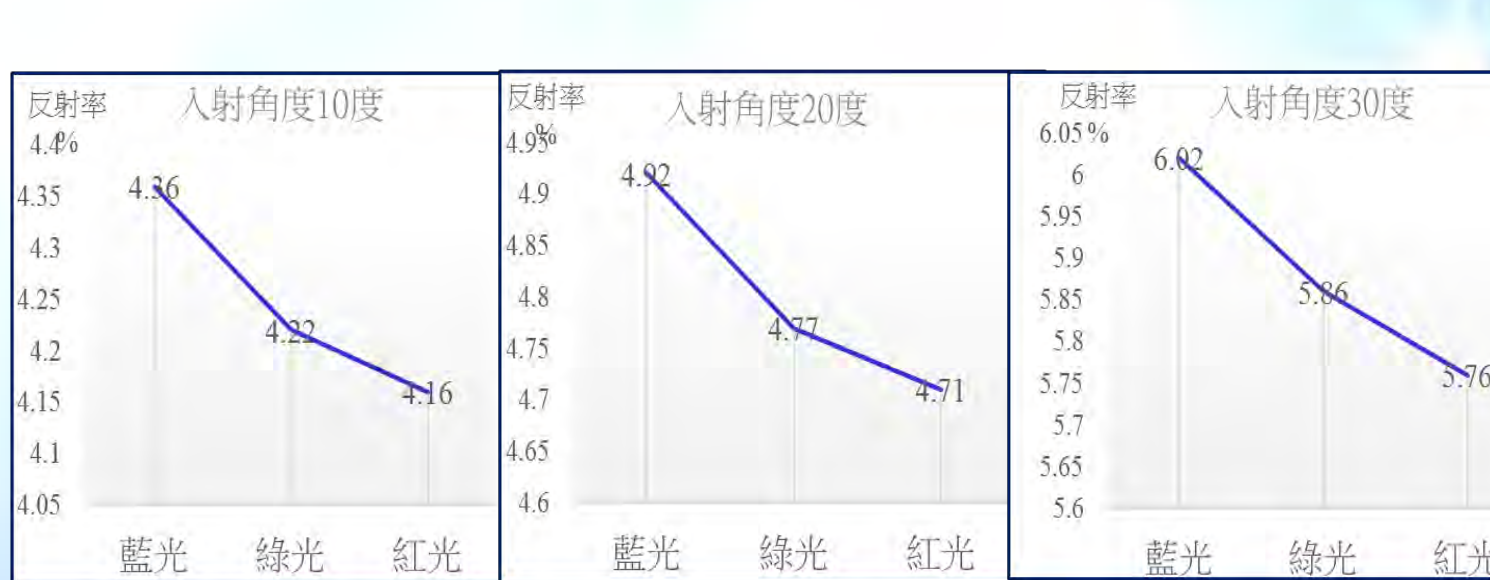


圖5-6：各波長空氣-玻璃-水反射率比較

一、藍、綠、紅三色光在水中的折射與反射特性

(一)藍、綠、紅三色光在玻璃中的折射特性

本實驗使用了使用藍、綠、紅三色雷射光，經過光譜儀量測後其波長分別為 405 nm, 532 nm, 664 nm。因為光的色散現象，不同顏色的光入射厚玻璃後，其折射的角度將會有所不同。本實驗為了減少司乃耳定律計算上的誤差，入射角與折射角度的量測必須要很精準。最後選擇利用三角幾何與司乃耳 (Snell) 定律 ($n_1 \sin_1 = n_2 \sin_2$) 的算式來算出玻璃的折射率。搭配高精度的游標卡尺，在讀取數據時便能精確到公分的小數第二位 (0.01 cm) 並估計到小數第三位 (0.001 cm)。

(二)藍、綠、紅三色光在 空氣-玻璃-水 中的折射與反射特性

藍、綠、紅三色光在 空氣-玻璃-水 中除了折射之外，還有反射現象是值得注意的，空氣-玻璃介面、玻璃-水介面會有反射現象。我們先討論玻璃-水介面的反射現象，我們發現當入射角度超過 40 度時，玻璃-水介面就沒有反射現象了。而空氣-玻璃介面不管用任何角度入射都會有反射現象，這是因為反射率與兩介質之間的折射率與入射角度有關 (菲涅耳方程式，大學光學範圍，在此不明述)，因為空氣折射率=1、玻璃折射率=1.51、水折射率=1.33，空氣-玻璃之間的折射率差值為 0.51，而玻璃-水之間的折射率差值為 0.17。兩介面若折射率差值越大，則當入射角小於某一角度時，則反射光強度為零。我們利用這一點，把入射角度定在小於等於30度的範圍內，如此將可避免玻璃-水之間的反射現象，減少反射現象所造成光強度的損失，這樣會使多重反射的計算簡化下來。

而空氣-玻璃介面不管用任何角度入射都會有反射現象，這是因為反射率與兩介質之間的折射率與入射角度有關 (菲涅耳方程式)，因為空氣折射率=1、玻璃折射率=1.51，空氣-玻璃之間的折射率差值為 0.51。因此反射強度隨入射角度越大而越大，且藍光 > 綠光 > 紅光。

接著要討論雷射光在各個介面的吸收、折射、反射與散射光強度之間的關係。為避免水中的離子或顆粒雜質對雷射光造成吸收與散射，我們實驗將全程使用逆滲透去離子水。實驗發現因為鏡子的銀反射層鍍的很薄，所以雷射光射入銀反射層後，除了反射外還會有一部分光穿透出來。但因為銀反射層的穿透光強度為微瓦(uw) 等級的，非常的弱。

藍色雷射光從長40 cm、寬 12 cm、厚度 3 mm 的玻璃缸外以10、20、30度角射入水中後，經過鏡子 6、10、20 次的反射後，光強度從 64.33 mW 降低到 22.08、13.40、4.67 mW。光線碰到鏡面會有散射的現象，但因為在水中所以不易量出。此外出射光從玻璃穿透到空氣中，玻璃-空氣介面也會有反射現象，但因為反射射入水中也不易量出。要得知有多少入射光損失，我們可以以入射光強度衰減率來表達。

(三)藍、綠、紅三色光在水中的折射與多次反射特性

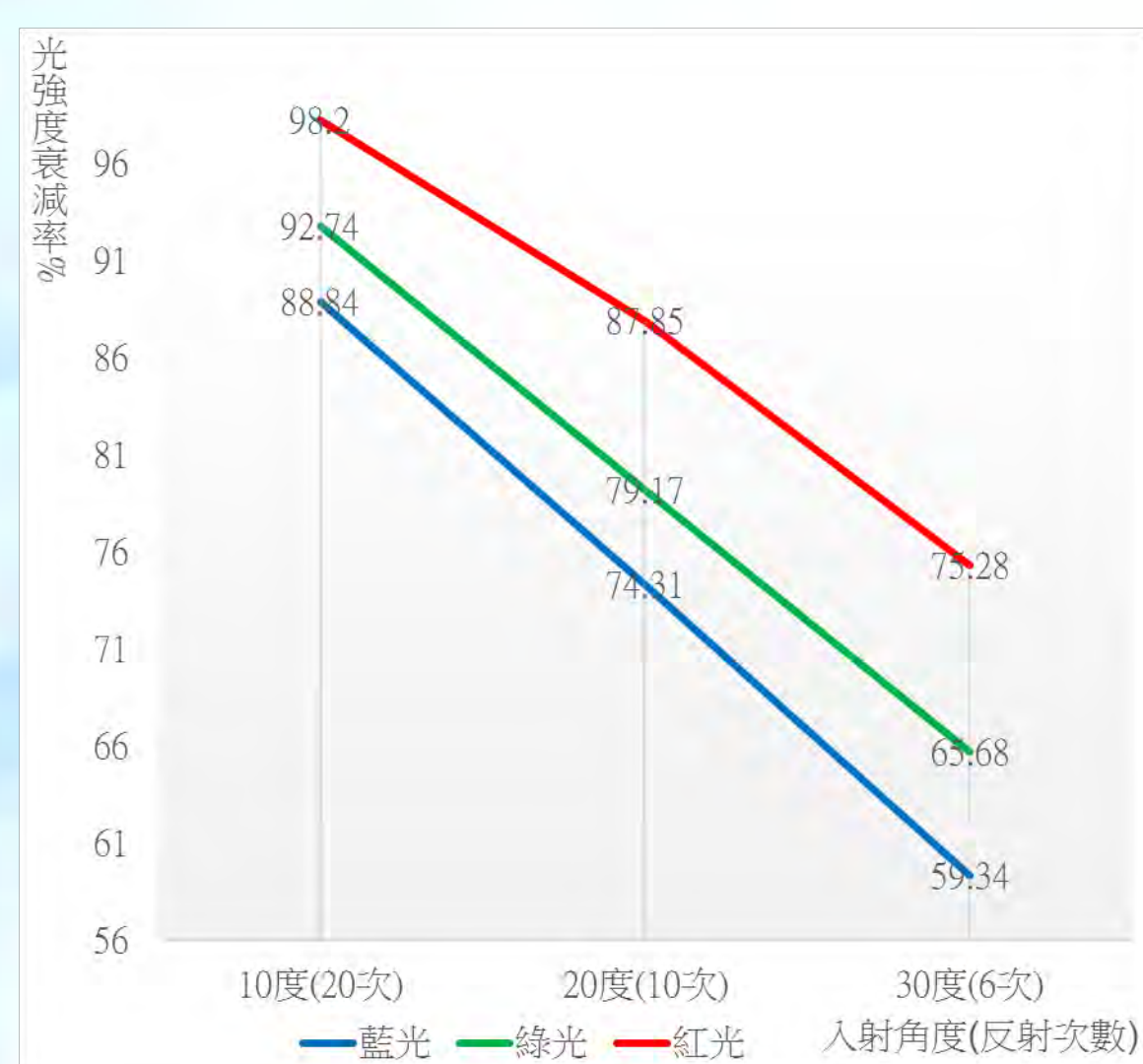


圖 6-1：不同角度入射光強度衰減比較

二、綠色光應用在不同濃度糖水及鹽水中的吸收特性

以商業化的紫外線-可見光穿透/吸收光譜儀量測出來的波長 vs. 穿透率 (T%) 的穿透光譜圖中可看出，0.5%, 0.1%, 0.05% 等濃度越低的白糖溶液，其各條線幾乎都疊在一起。這是因為使用的石英槽寬度只有 1 cm，當溶液的濃度很低時，這一公分的吸收路徑是不夠的，所以看不出來其可見光各波長穿透率將隨濃度增加而減少。為解決此一問題，我們使用多次的反射來增加光行走的距離，如此將可增加稀薄溶質吸收光線的能力。調配不同濃度的白糖及鹽水溶液(即重量百分比: 0.2%, 0.1%, 0.05%, 0.01%)，以綠光雷射光從10、20、30度角射入不同濃度的白糖及鹽水溶液中後，經過鏡子 6、10、20 次的反射後，出射光強度隨著光行走距離增長與濃度增加而降低。

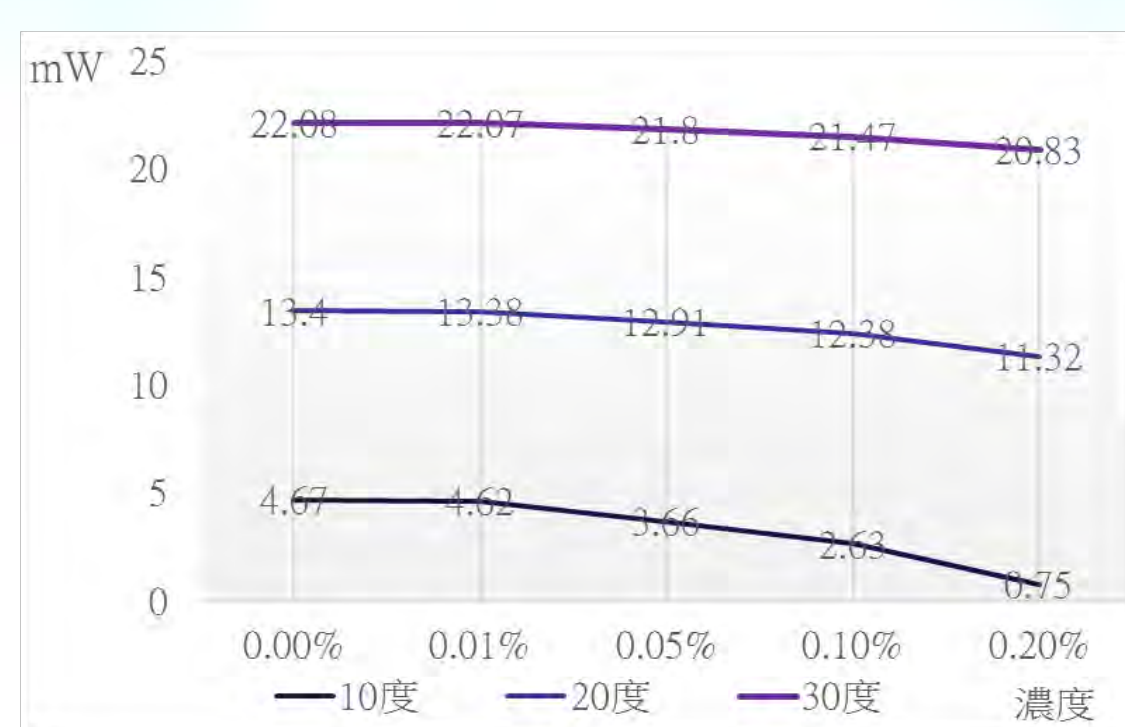


圖 6-2：糖水不同角度出射光強度比較

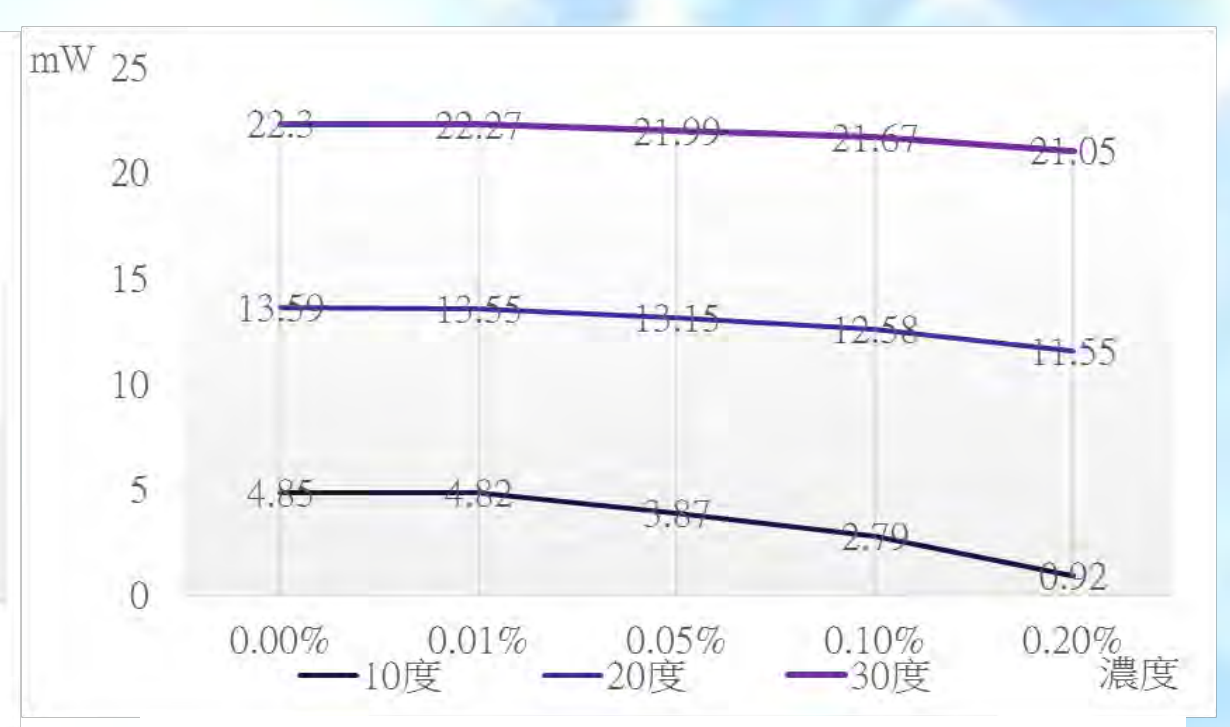


圖 6-3：鹽水不同角度出射光強度比較

實驗結果顯示出，當濃度只有 0.01% 時，出射光強度的變化只在 0.01~0.05 的範圍內變動，這個值太小了可能不精確，但當濃度增加到 0.05% 時，出射光強度的變化就會在 0.3~1 mW 之間有明確的變化。因此我們這個裝置可以測到濃度 0.05% 以上的白糖(鹽)溶液。圖 6-2 為 0.2~0.05% 不同白糖溶液濃度對出射光強度的比較圖，圖 6-3 為 0.2~0.05% 不同鹽水溶液濃度對出射光強度的比較圖，當量測一個未知濃度白糖(鹽)溶液的出射光強度，我們即可以內差的方式估計出此白糖(鹽)溶液的濃度。

此外以比爾-朗伯定律計算吸收係數，得到以 10、20、30 度角入射 0.2 wt% 的鹽水和糖水，其吸收係數將隨著行走距離的增加而增加。這是因為路徑越長，介質吸收光就越多，吸收係數將會增加。而鹽水的吸收係數較糖水還來得小，這可能是因為糖分子與鹽分子完全不同的關係。糖是有機物，由碳氫氧原子所組成。鹽是無機物，由鈉離子與氯離子所組成。碳氫氧原子所組成的結構可能對可見光有較強的吸收。而鹽水中分解的鈉離子與氯離子可能對可見光有較弱的吸收。

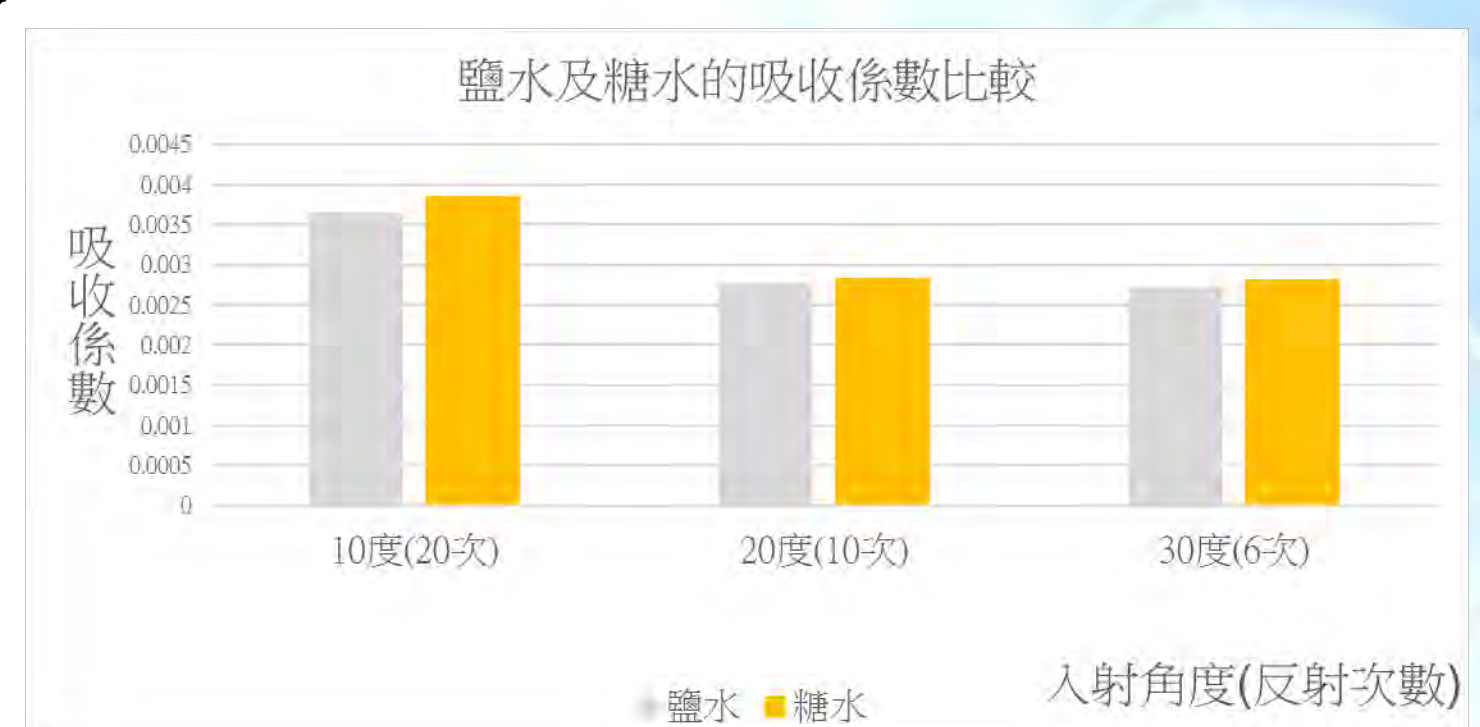


圖 6-4：鹽水及糖水的吸收係數比較圖

三、紅色光應用在不同濃度亞甲藍水溶液中的吸收特性

亞甲藍在 664 nm 紅光這個波長範圍有很強的吸收峰。這是因為亞甲藍分子結構中的化學鍵結會對特定波長有選擇性的吸收。這種吸收非常的敏感，所以即使濃度很小也會有很強的吸收。這有別於糖鹽溶液對光的吸收特性，因此我們可以利用本裝置測出比糖鹽溶液濃度更低的亞甲藍溶液。我們使用不同濃度的亞甲藍水溶液(即重量百分比: 0.00032%、0.00016%、0.00008%、0.00004%)，以紅光雷射光從玻璃缸外以10、20、30度角射入不同濃度的亞甲藍水溶液中，當濃度為 0.00004 wt%，反射 10 或 20 次之後，出射光強度就顯示出明顯的降低現象，這表示出本實驗裝置可以測得小數第五位的重量百分比濃度。因此本實驗裝置可以測到濃度 0.00004 wt% 以上的亞甲藍溶液。當量測一個未知濃度亞甲藍溶液的出射光強度，我們即可以內差的方式估計出此亞甲藍溶液的濃度。

此外以比爾-朗伯定律計算吸收係數，得到亞甲藍的吸收係數比糖或鹽還要高好幾個數量級。這是因為在亞甲藍分子結構中的化學鍵結會對 664 nm 紅光這個波長範圍有很強的選擇性吸收，而糖鹽在可見光的範圍內就沒有這樣的吸收峰。

柒、結論

- 一、本實驗使用了使用波長分別為 405 nm, 532 nm, 664 nm 的藍、綠、紅三色雷射光。因為光的色散現象，不同顏色的光入射玻璃和水中後，其折射角將會有所不同。經由精密的量測與計算，我們得知藍、綠、紅三色雷射光的水折射率以不同入射角度量測後計算的平均值分別為 1.3389、1.3336、1.3301。藍、綠、紅三色雷射光的玻璃折射率以不同入射角度量測後計算的平均值分別為 1.5246、1.5119、1.5017。
- 二、空氣-玻璃介面不管用任何角度入射都會有反射現象，此反射強度隨入射角度越大而越大，且藍光 > 綠光 > 紅光。
- 三、藍、綠、紅三色光在水中行走的距離越長，則出射光的強度越小。其中紅色出射光的強度最小，綠光次之，藍光最強。藍、綠、紅三色光經過水中的吸收後，紅光會被吸收最多，綠光次之，藍光最少。因此在較深層的水中，藍、綠、紅三色光經過混光後會呈現出藍色的樣貌。
- 四、使用多次的反射來增加光行走的距離，如此將可增加稀薄溶質吸收光線的能力。出射光強度隨著光行走距離增長與濃度增加而降低。以 0.2~0.05% 不同白糖溶液濃度及 0.00004~0.00032 wt% 不同亞甲藍的濃度水溶液濃度對出射光強度的做圖，當量測一個未知低濃度白糖溶液的出射光強度，我們即可以內差的方式估計出溶液的濃度。