

第六章 液體濃度及液體微小折射率差異之測量

6.1 前言

近幾年來，表面電漿共振的特性已經被廣泛應用在生物與化學領域研究方面的測量上[1~3]。在這些測量上，常常又以濃度和待測物彼此間微小的折射率變化之量測為最重要；對於濃度的測量將可以進一步探討與分析化學中的物質特性、成份解析和溶液的辨識[4,5]。而待測物彼此間微小的折射率變化之測量則可以進一步探討生物分子間親和力的交互作用，例如：DNA-DNA、DNA-RNA、protein-DNA、protein-protein 等；而生物分子親和力的分析可以藉此瞭解生物分子間交互作用所代表的生物訊息，進而可以廣泛地應用在免疫醫學[6]、感染性疾病篩檢[7]等研究上。其次在化學上也可以瞭解液體濃度和酸鹼值等的變化量。

所以，在本章中首先將針對液體的濃度提出一種量測方法，它主要是利用表面電漿共振外差干涉儀的架構；接著將再設計一套測量的模組，而此測量的模組對於液體溶液彼此間的微小折射率之變化量將可以提供一個即時且精準的測量結果。

6.2 液體濃度之測量

濃度的量測通常被使用在化學、生化和生物分子分析的過程上。為了要讓這些研究進行的較為平順，因此有必要發展一個容易、簡單且可以即時測量液體濃度的方法。至目前為止，已經有幾個測量液體濃度的方法被提出[8~11]；但其中大部份的方法都是以測量穿透光的強度為主；也有一些方法是利用表面電漿共振的反射光強度特性，然而上述之方法皆容易受到光源的穩定性、色散光、內反射

和其它因素的影響，使得測量的準確度及靈敏度大大的降低。至於其它的方法雖然是測量相位差的變化[8]，但由於測量方式是需要穿透樣品，因此液體的光學路徑長度必須事先知道，同時此測量的架構也較為複雜。有鑑於此，本節將提出一種液體濃度之檢測法，而此方法將可以有效改善上述之缺點，且量測的靈敏度也比上述方法還要高出許多。

6.2.1 原理

(a) 反射光之相位差

當一線性偏振光入射至表面電漿共振裝置的其中一面，其如Fig. 6.1 所示；此裝置即為Kretschmann結構[12]。而表面電漿共振裝置的結構是一等腰三角形稜鏡在底面鍍上厚度為 d_2 的金屬膜所構成，第三層則是待測液體；為了方便，將Fig. 6.1 結構分別標示代號 1(玻璃稜鏡)、2(金薄膜)和 3(待測液體)，折射率可表示為 n_1 、 $n_2=n+ik$ 和 n_3 。假設線性偏振光的入射角 θ 等於表面電漿共振角時，則表面電漿波會被激發，因此，p-偏光和s-偏光的反射係數可以表示為[11]:

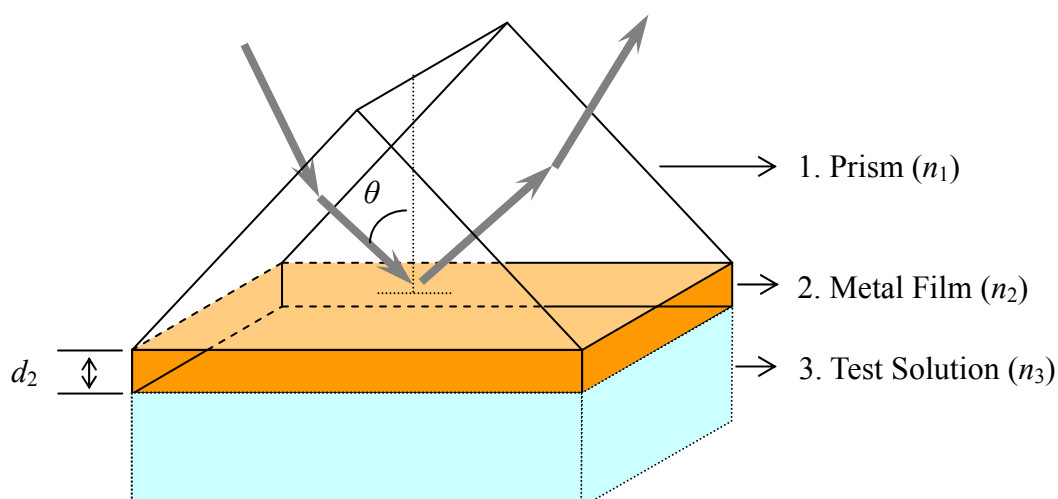


Fig. 6.1 Kretschmann 結構裝置。

$$r_q = \frac{r_{12}^q + r_{23}^q e^{i2k_z d_2}}{1 + r_{12}^q r_{23}^q e^{i2k_z d_2}} = |r_q| e^{i\phi_q} \quad q = p, s, \quad (6.1)$$

式中 d_2 是金屬膜的厚度； r_{ab}^p 和 r_{ab}^s 表示p-偏光和s-偏光從介質 a 層進入介質 b 層的Fresnel反射係數； k_{za} 為入射光於介質 a 中，沿著 z 方向傳播的波向量；它們可以被寫成：

$$r_{ab}^p = \frac{n_b^2 k_{za} - n_a^2 k_{zb}}{n_b^2 k_{za} + n_a^2 k_{zb}} \quad a, b = 1, 2, 3, \quad (6.2a)$$

$$r_{ab}^s = \frac{k_{za} - k_{zb}}{k_{za} + k_{zb}}, \quad (6.2b)$$

和



$$k_{za} = k_0 (n_a^2 - n_1^2 \sin^2 \theta)^{1/2}, \quad (6.2c)$$

其中 k_0 是真空中波向量。而在表面電漿共振條件下經由表面邊界所反射回來的p-偏光和s-偏光之間的相位差可以表示為：

$$\phi = \phi_p - \phi_s. \quad (6.3)$$

由(6.1)式~(6.3)式可以看出，相位差 ϕ 和介質3的折射率 n_3 是有關的；一般介質3的折射率 n_3 和液體濃度又有一定的關係[11,13]；因此，當介質3的液體濃度改變時，(6.3)式中的 ϕ 也會跟著改變，所以利用(6.1)式~(6.3)式，同時透過相位差

ϕ 的測量，即可推得液體的濃度。

(b) 利用共光程外差干涉術測量相位差

測量相位差的光學架構如Fig. 6.2 所示。當一線性偏振光通過一個快軸與x軸夾角為 $\beta/2$ 的二分之一波片H後，經電光晶體EO調制變成為外差光源。此外差光源以非常接近表面電漿共振角 θ_{sp} 的角度入射至表面電漿共振裝置的底面，而反射光會通過方位角為 45° 的檢偏板AN，最後則由光偵測器D接收成為測試信號。架構中的電光晶體EO則是被一角頻差為 ω 和半波電壓為 $V_{\lambda/2}$ 的鋸齒波信號所調制。因此，在光偵測器D上測到測試光的振幅為：

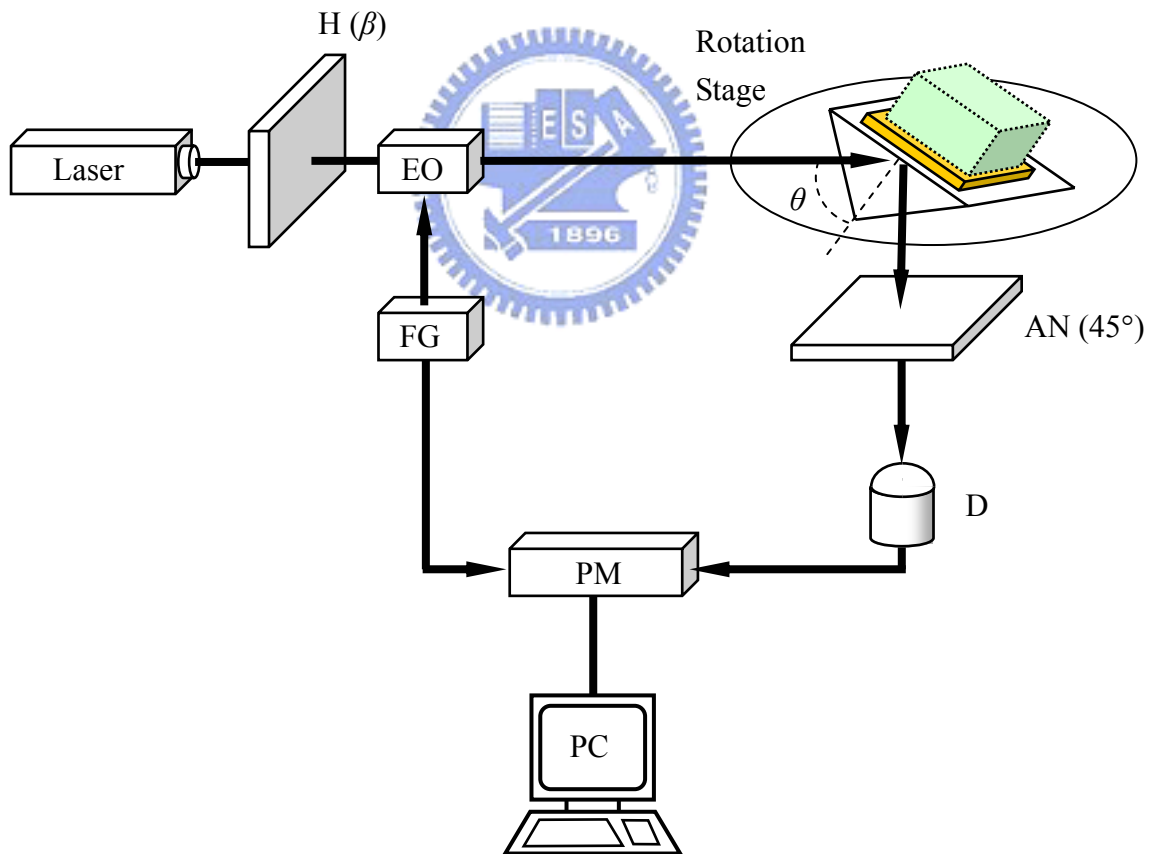


Fig. 6.2 測量相位差之光學架構。

$$\begin{aligned}
E_t &= \frac{1}{2\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta e^{i\frac{\omega t}{2}} \\ \sin \beta e^{-i\frac{\omega t}{2}} \end{pmatrix} \\
&= \frac{1}{2\sqrt{2}} \begin{pmatrix} r_p \cos \beta e^{i\frac{\omega t}{2}} + r_s \sin \beta e^{-i\frac{\omega t}{2}} \\ r_p \cos \beta e^{i\frac{\omega t}{2}} + r_s \sin \beta e^{-i\frac{\omega t}{2}} \end{pmatrix}. \tag{6.4}
\end{aligned}$$

最後在偵測器 D 上所得到的測試光強度可表示為：

$$I_t = |E_t|^2 = \frac{1}{4} [r_p^2 \cos^2 \beta + r_s^2 \sin^2 \beta + 2r_p r_s \cos \beta \sin \beta \cos(\omega t + \phi)], \tag{6.5}$$

其中 I_t 為測試信號；另外，電子訊號被帶通濾波器濾波後則形成為一參考訊號，其形式可表示為：

$$I_r = \frac{1}{2} (1 + \cos \omega t). \tag{6.6}$$



將測試信號 I_t 和參考信號 I_r 送入相位計 PM 後，則相位差 ϕ 可被精確地測出。將相位差 ϕ 代入已知的相位差和濃度之關係裏，則液體之濃度將可以被估計出。

6.2.2 實驗與結果

為了驗證本方法的可行性，我們分別將鹽水、丙酮和乙醇在室溫 20°C 下當作待測液體。表面電漿共振裝置的製造是在 BK7 玻璃稜鏡底面鍍上厚度為 35nm 厚的金薄膜。光源使用 632.8nm 的 He-Ne，電光晶體 EO(Model 4002, New Focus) 則被頻率為 1kHz 和半波電壓為 125V 的鋸齒波所調制。BK7 玻璃稜鏡和金薄膜的折射率則經由橢圓儀(Model eta, Steag Inc.) 測得為 1.5151 和 $0.1973+i3.5631$ 。表面電漿共振裝置和待測液體則放置在角解析度為 0.001° 的精密旋轉平台(Model URM 80, Newport) 上；二分之一波片 H 的方位角 $\beta/2$ 被設定為 10° ；相位計的解

析度為 0.01° ，同時利用個人電腦去記錄及分析數值。首先，我們利用量測 p-偏光最低反射率的技術[11]，測量鹽水、丙酮和乙醇在 10mg/ml 時的表面電漿共振發生角度，由測量結果可知鹽水、丙酮和乙醇的共振角分別發生在 71.21° 、 71.09° 和 71.07° ；因此，本實驗裝置將設定入射角在 71.21° 、 71.09° 和 71.07° 下，分別量取這三個液體在不同濃度下所引起的相位差值；實驗結果和擬合曲線如 Fig. 6.3 所示。Fig. 6.3 上的標記■、* 和●分別表示為鹽水、丙酮和乙醇的測量值。由結果可以顯示出，它們有非常好的線性關係。因此，本方法對於其它的待測液體將可以提供一相位差的變化 ϕ 和液體濃度 C 的關係曲線，藉此關係曲線，即可以由外差干涉術測量出 ϕ 值進而估計出其它液體之濃度值。

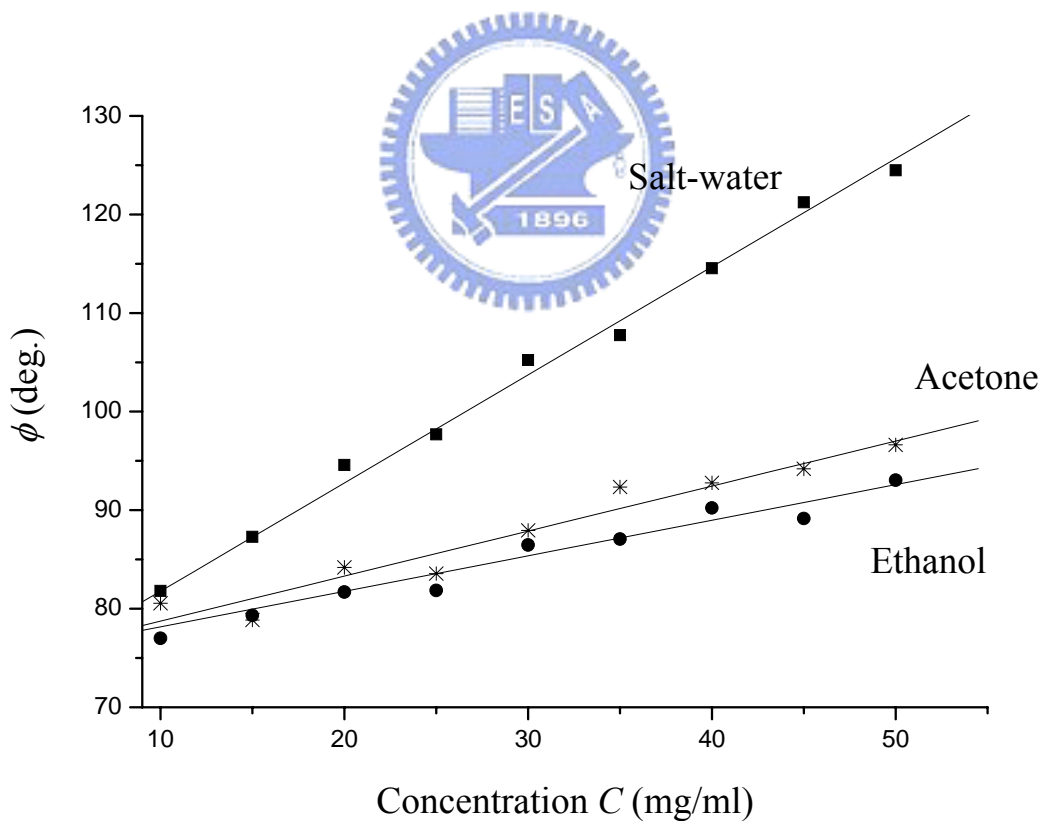


Fig. 6.3 相位差 ϕ 與液體濃度 C 之關係圖。

6.2.3 討論

本研究中的入射角 θ 是非常接近表面電漿共振角 θ_{sp} ，因此， r_p 的反射係數是非常的小；所以在實驗中，我們將二分之一波片放置在電光晶體EO前，用以調整p-偏光的分量，提高干涉信號的對比度。在實驗上，二分之一波片H的方位角設定為 10° 時，則測試信號的對比度可以提高到0.88。

在Fig. 6.3 中分別計算鹽水、丙酮和乙醇曲線的斜率，其值為 1.092 deg·ml/mg、0.474 deg·ml/mg 和 0.364 deg·ml/mg。同時考慮相位計的解析度、偏極混合誤差和偏振旋轉誤差，其總相位差的誤差 $\Delta\phi_{err}$ 約為 0.03° [14]。將上述之值代入下式：

$$\Delta\phi_{err} = s\Delta C_{err}, \quad (6.7)$$

則可以計算出液體濃度 ΔC_{err} 的誤差量；計算結果，鹽水、丙酮和乙醇濃度的誤差量分別為 2.75×10^{-2} mg/ml、 6.33×10^{-2} mg/ml和 8.24×10^{-2} mg/ml。

另外，我們將測量的結果代入(6.1)式~(6.3)式中，即可以計算出鹽水和乙醇的靈敏度與 r_p 反射率隨著金薄膜厚度變化的關係，其結果如Fig. 6.4 所示。由Fig. 6.4 可以清楚看到，當金薄膜的厚度約等於45nm時，其靈敏度是最高的，但 r_p 的反射率也是最低的，也就是信號不易偵測。因此，在本方法中我們選擇金薄膜的厚度為35nm。

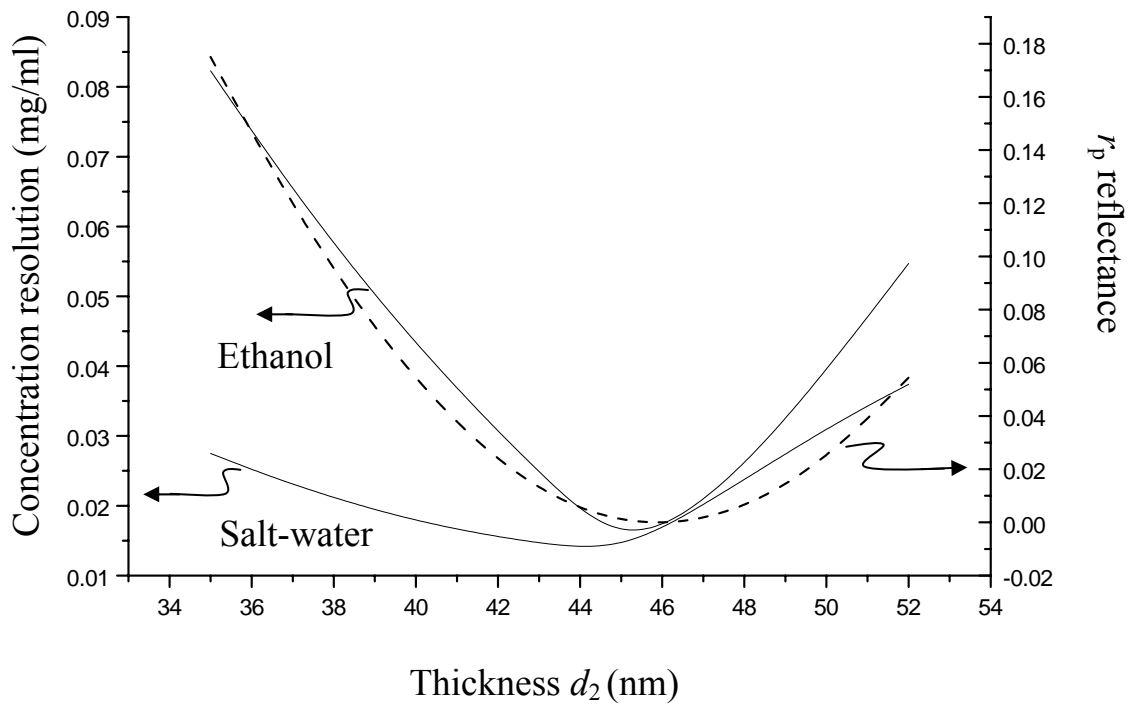


Fig. 6.4 鹽水和乙醇的靈敏度與 r_p 反射率隨著金薄膜厚度變化之關係圖。



最後在不同濃度的待測液體上，其表面電漿共振角的變化是非常地小；在我們的實驗上，液體濃度的變化量是由 10 mg/ml 到 50 mg/ml，而鹽水、丙酮和乙醇共振角的變化分別是 71.21° 到 72.08° 、 71.09° 到 71.46° 和 71.07° 到 71.35° ；為了實驗上的便利，我們分別將鹽水、丙酮和乙醇的入射角固定在濃度 10mg/ml 的共振角 71.21° 、 71.09° 和 71.07° 下。而 Fig. 3 的結果也只適合這三個液體在濃度 10 mg/ml 到 50 mg/ml 的範圍內使用。假若其它液體的相位差 ϕ 和其濃度 C 之間的關係是已知的話，則可以利用本方法測量出相位差 ϕ 來，進而估算出液體的濃度值。

6.3 液體微小折射率差異之測量

液體的折射率在生化上是一個相當重要的參數。當液體發生些微的變化時，由液體的折射率變化，便可推知液體相關參數的變化量，例如：濃度、酸鹼值等。同時也可以藉由此微小折射率的變化，觀察生物與化學反應進行的程度。所以在這一小節中，將提出一種測量液體微小折射率變化的方法。由於此方法利用了表面電漿共振的特性和共光程外差干涉術，因此具有容易操作、即時、快速且有高靈敏度的測量優點，同時此方法也可以被運用到生物分子間的交互作用、環境的污染及微小液體濃度的變化之檢測上。

6.3.1 原理

本研究所設計的光學架構如Fig. 6.5 所示。它是由外差光源、兩組的導光模組、一個特製的探頭裝置、兩個檢偏板AN₁和AN₂、兩個偵測器D₁和D₂、一個電子訊號處理單元ESPU及數位顯示器所組合而成。而導光模組是由四個透鏡—兩個耦合透鏡L₁、L₂和兩個準直透鏡L₃、L₄與兩個偏振保持光纖PMF所組成；在特製探頭裝置的設計上，是由底角為 71°的等腰梯形稜鏡及底角面上鍍上 40nm厚的金薄膜所構成，同時金薄膜分別與左邊的參考液體和右邊的待測液體相接觸，其結構如Fig. 6.6 所示。

為了方便起見，定+z為光行進的方向，+x為水平軸的方向。當雷射光經過一個快軸與x軸夾角為 $\beta/2$ 的二分之一波片H調制成一線性偏振光後，經電光晶體EO則調制成為外差光源，而此電光晶體EO快軸在x軸上，同時由一角頻差 ω 和半波電壓 $V_{\lambda/2}$ 的鋸齒波信號所調制。之後外差光源經分光器BS後分成兩束光：反射光束和穿透光束。穿透光束經耦合透鏡L₁進入偏振保持光纖PMF傳播，再經準直透鏡L₃後垂直穿透probe的其中一面，並以入射角 71°入射在左邊的表面電漿共振裝置和參考液體的邊界上，因為底角被設計成 71°，所以入射角為共振角。而反

射後之光通過穿透軸與x軸成 45° 的檢偏板 AN_1 後，經由光偵測器 D_1 接收成為參考信號。此參考信號可以表示為：

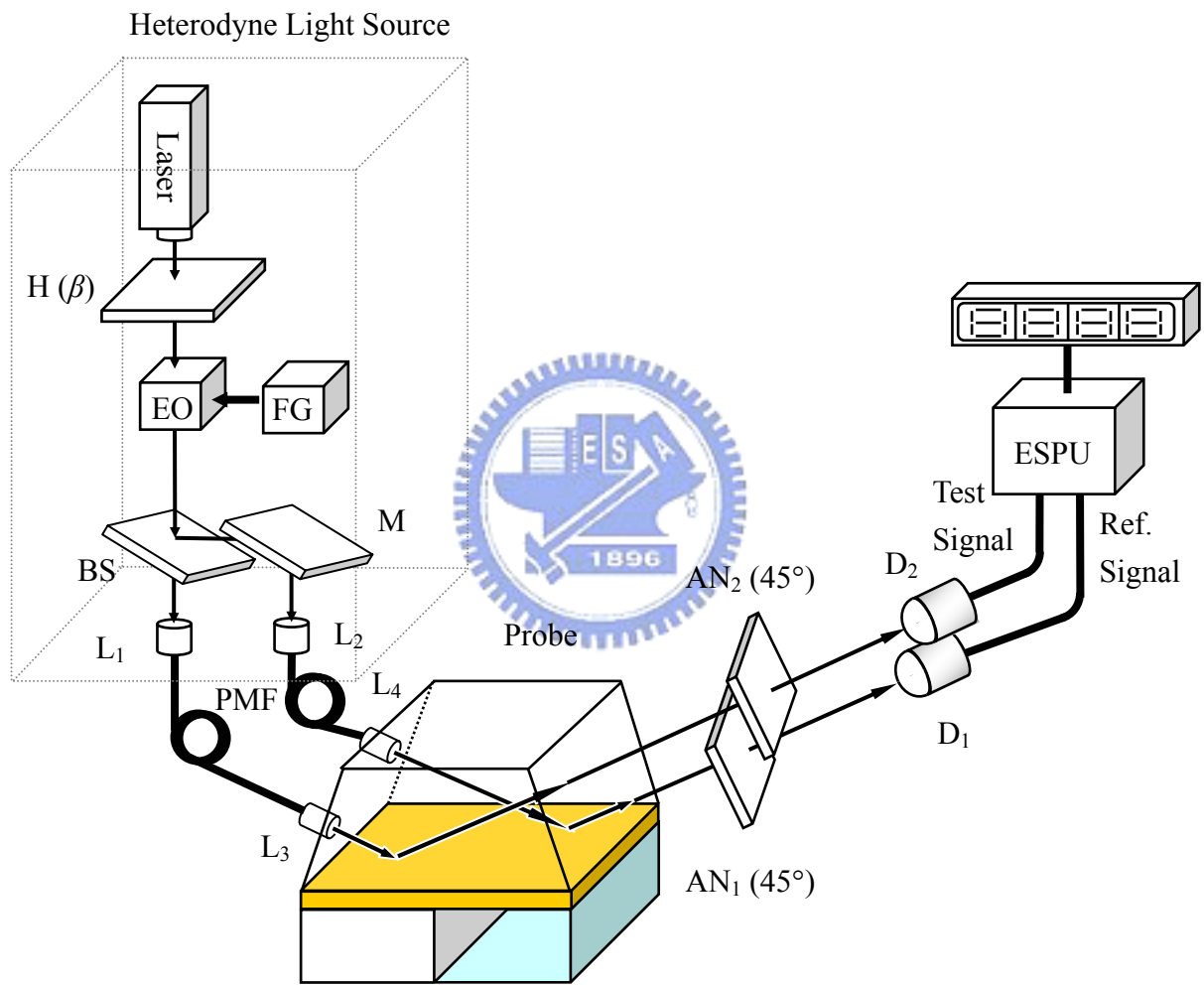


Fig. 6.5 液體微小折射率差異之測量裝置。

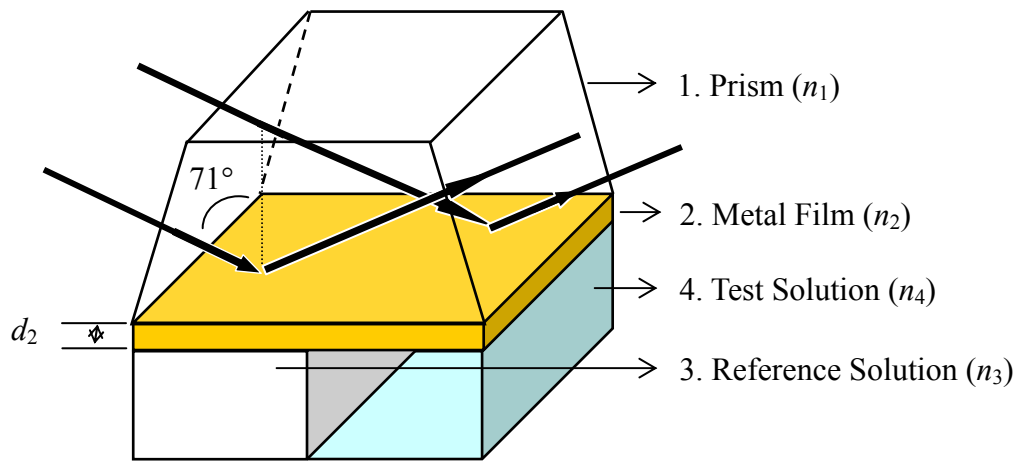


Fig. 6.6 特製 Kretschmann-Raether 結構裝置。

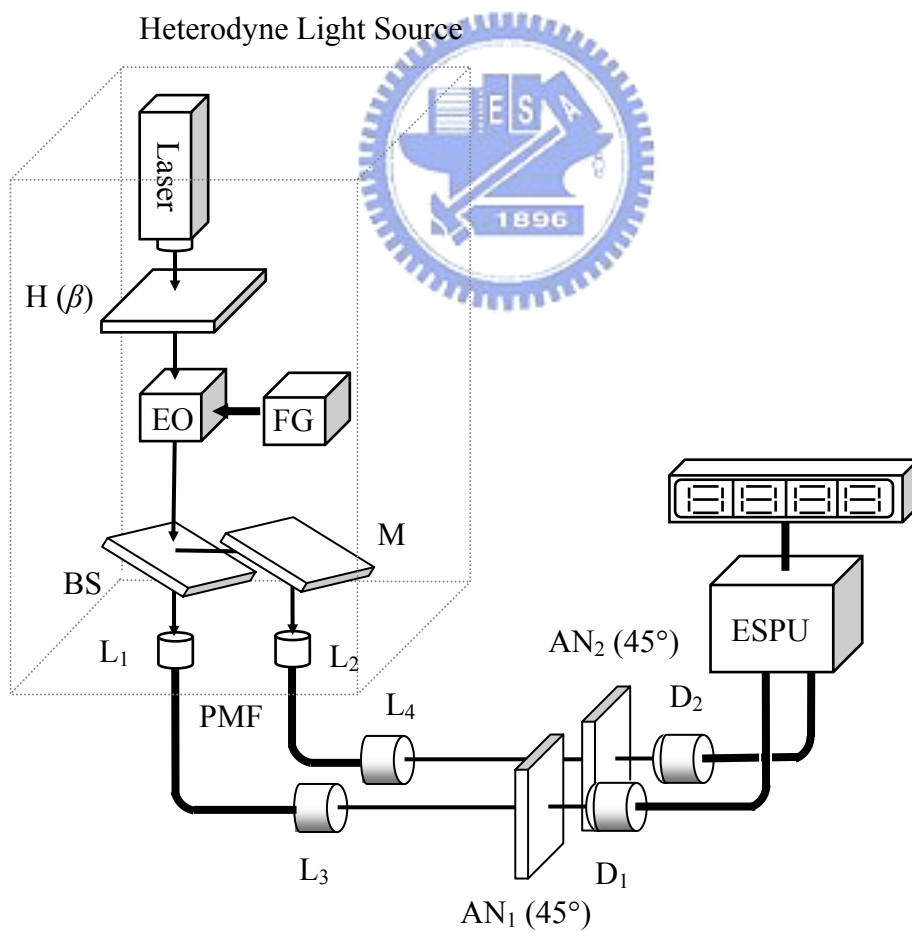


Fig. 6.7 初始相位測量裝置。

$$I_r = \frac{1}{4} \left[r_{p1}^2 \cos^2 \beta + r_{s1}^2 \sin^2 \beta + r_{p1} r_{s1} \cos \beta \sin \beta \cos(\omega t + \phi_1) \right], \quad (6.8)$$

其中 I_r 是參考信號。另一方面，反射光束經高反射面鏡M反射後經耦合透鏡L₂進入偏振保持光纖PMF傳播，再經準直透鏡L₄後垂直穿透probe的其中一面，同時以入射角 71° 入射在右邊的表面電漿共振裝置和待測液體的邊界上，因為底角被設計成 71° ，所以入射角是非常接近共振角。而反射後之光通過穿透軸與x軸成 45° 的檢偏板AN₂後，最後由光偵測器D₂接收成為測試信號。此測試參考信號可以表示為[15]:

$$I_t = \frac{1}{4} \left[r_{p2}^2 \cos^2 \beta + r_{s2}^2 \sin^2 \beta + r_{p2} r_{s2} \cos \beta \sin \beta \cos(\omega t + \phi_2 - \phi_r - \phi_M) \right], \quad (6.9)$$

其中 I_t 是測試信號、而 ϕ_r 和 ϕ_M 分別為光束經BS和M反射後所產生的p-偏光和s-偏光的相位差。由(6.8)和(6.9)式可知， $r_{p,m}$ 和 $r_{s,m}$ 為p-偏光和s-偏光在m等於1(金薄膜和參考液體相接觸)或2(金薄膜和待測液體相接觸)的反射係數，其可以表示為[11]:

$$r_{q,m} = \frac{r_{12}^q + r_{2w}^q e^{i2k_z d_2}}{1 + r_{12}^q r_{2w}^q e^{i2k_z d_2}} \quad q = p, s, \text{ and } \begin{cases} \text{if } m = 1 \text{ then } w = 3; \\ \text{if } m = 2 \text{ then } w = 4; \end{cases} \quad (6.10)$$

式中的 r_{ij}^q 代表從介質*i*層進入介質*j*層的p-偏光和s-偏光的Fresnel反射係數，下標的1,2,3,4分別代表玻璃稜鏡、金薄膜、參考液體和待測液體，其折射率分別可以表示為 n_1 、 $n_2 = n + ik$ 、 n_3 和 n_4 。 k_{z2} 則是在金薄膜上的波向量， d_2 為金薄膜的厚度。另一方面， ϕ_m 是在表面電漿共振條件下的表面電漿共振裝置之左邊與右邊邊界上的p-偏光和s-偏光所產生的相位差，其可表示為:

$$\phi_m = \phi_{p,m} - \phi_{s,m}, \quad m = 1, 2, \quad (6.11)$$

其中 $\phi_{p,m}$ 和 $\phi_{s,m}$ 又可以表示為:

$$\phi_{q,m} = \tan^{-1} \left[\frac{q_1 \cdot \sin \phi_{q1} \cdot (1 - q_2^2 \cdot e^{-4bd_2}) + q_2 \cdot e^{-2bd_2} \cdot \sin(\phi_{q2} + 2ad_2) \cdot (1 - q_1^2)}{q_1 \cdot \cos \phi_{q1} \cdot (1 + q_2^2 \cdot e^{-4bd_2}) + q_2 \cdot e^{-2bd_2} \cdot \cos(\phi_{q2} + 2ad_2) \cdot (1 + q_1^2)} \right], \quad q = p, s, \quad (6.12)$$

其中

$$p_1 = \frac{\sqrt{[(n^2 + k^2)^2 A^2 - n_1^4 (a^2 + b^2)]^2 + 4n_1^4 A^2 C^2}}{[(n^2 - k^2)A + n_1^2 a]^2 + (2Ank + n_1^2 b)^2}, \quad (6.13a)$$

$$p_2 = \frac{\sqrt{[n_{m+2}^4 (a^2 + b^2) - (n^2 + k^2)^2 B^2]^2 + 4n_{m+2}^4 B^2 C^2}}{[(n^2 - k^2)B + n_{m+2}^2 a]^2 + (2Bnk + n_{m+2}^2 b)^2}, \quad (6.13b)$$

$$\phi_{p1} = \tan^{-1} \left[\frac{2n_1^2 AC}{(n^2 + k^2)^2 A^2 - n_1^4 (a^2 + b^2)} \right], \quad (6.13c)$$

$$\phi_{p2} = \tan^{-1} \left[\frac{-2n_{m+2}^2 BC}{n_{m+2}^4 (a^2 + b^2) - (n^2 + k^2)^2 B^2} \right], \quad (6.13d)$$

$$s_1 = \frac{\sqrt{(A^2 - a^2 - b^2)^2 + 4A^2 b^2}}{(A + a)^2 + b^2}, \quad (6.13e)$$

$$s_2 = \frac{\sqrt{(a^2 + b^2 - B^2)^2 + 4B^2b^2}}{(B + a)^2 + b^2}, \quad (6.13f)$$

$$\phi_{s1} = \tan^{-1} \left[\frac{-2Ab}{A^2 - a^2 - b^2} \right], \quad (6.13g)$$

$$\phi_{s2} = \tan^{-1} \left[\frac{2Bb}{a^2 + b^2 - B^2} \right], \quad (6.13h)$$

$$A = k_0(n_1^2 - n_1^2 \cdot \sin^2 \theta_1)^{1/2}, \quad (6.13i)$$

$$B = k_0(n_{m+2}^2 - n_1^2 \cdot \sin^2 \theta_1)^{1/2}, \quad (6.13j)$$

$$C = 2ank - b(n^2 - k^2), \quad (6.13k)$$

$$a = \text{Re} \left[k_0 n_2 \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta \right) \right) \right], \quad (6.13l)$$

和

$$b = \text{Im} \left[k_0 n_2 \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta \right) \right) \right], \quad (6.13m)$$

其中 θ 為入射角； k_0 為真空中的波向量。此時，將參考信號 I_r 和測試信號 I_t 送入相位計，經由電子信號處理單元ESPU後，即可以得到兩者間的相位差為：

$$\phi = \Delta\phi - \phi', \quad (6.14)$$

其中

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 , \quad (6.15a)$$

$$\phi' = \phi_r + \phi_M . \quad (6.15b)$$

在第二個步驟上，將穿透光和反射光不經過probe直接由偵測器D₁和D₂接收，其裝置如Fig. 6.7 所示；在偵測器D₁和D₂接收的信號和(6.8)與(6.9)式有相同的形式，但此時 $\Delta\phi=0$ 。因此，在Fig. 6.7 中的電子信號處理單元可以將 ϕ' 測得，此時將 ϕ' 代入(6.14)式中，便可解出 $\Delta\phi$ 。由(6.11)~(6.13)式中，可以觀察到 $\Delta\phi$ 和 n_4 有強烈的關係，當待測液體的折射率有微小的變化時，藉由共光程外差干涉術，將量測到的 $\Delta\phi$ 代入(6.11)~(6.13)式中，便可以計算出以某液體為參考，相對於此參考液體，待測液體之折射率微小變化值 $\Delta n=n_4-n_3$ 。



6.3.2 實驗與結果

為了驗證本方法之可行性，我們以乾淨的水作為參考液體，其折射率為1.3317[15]。另外，分別將鹽水、葡萄糖溶液、丙酮和乙醇在室溫 20°C 下且在不同濃度的折射率變化下作為我們的待測液體。本實驗所使用的 He-Ne 雷射之波長為 632.8nm，而電光晶體 EO (Mode 4002, New Focus) 則被 FG 產生的頻差為 1kHz 和半波電壓為 125V 的鋸齒波信號所調制。另外，測試裝置則利用一 BK7 的玻璃等腰梯形稜鏡和厚度為 40nm 的金薄膜所組成，等腰梯形稜鏡和金薄膜的折射率分別經由橢圓儀(Model eta, Steag Inc.)測得為 1.5151 與 0.2108+i3.5963。在此為了提高對比度，在電光晶體 EO 前放置與水平軸夾角為 5°的半波片 H。為了實驗上的便利，我們將導光模組除去，而使外差光源直接入射至表面電漿共振裝置上。實驗的結果和擬合曲線分別如 Fig. 6.8(a)、(b)、(c)和(d)所示。Fig. 6.8 (a)、

(b)、(c)和(d)分別表示為乙醇、丙酮、葡萄糖溶液和鹽水的量測結果，由結果可以顯示出它們與先前的研究有非常好的對應性。因此，本方法將可以提供一個經由測量相位差變化 $\Delta\phi$ 的過程，而估算出其它的待測液體與某參考液體間的折射率之變化量。

6.3.3 討論

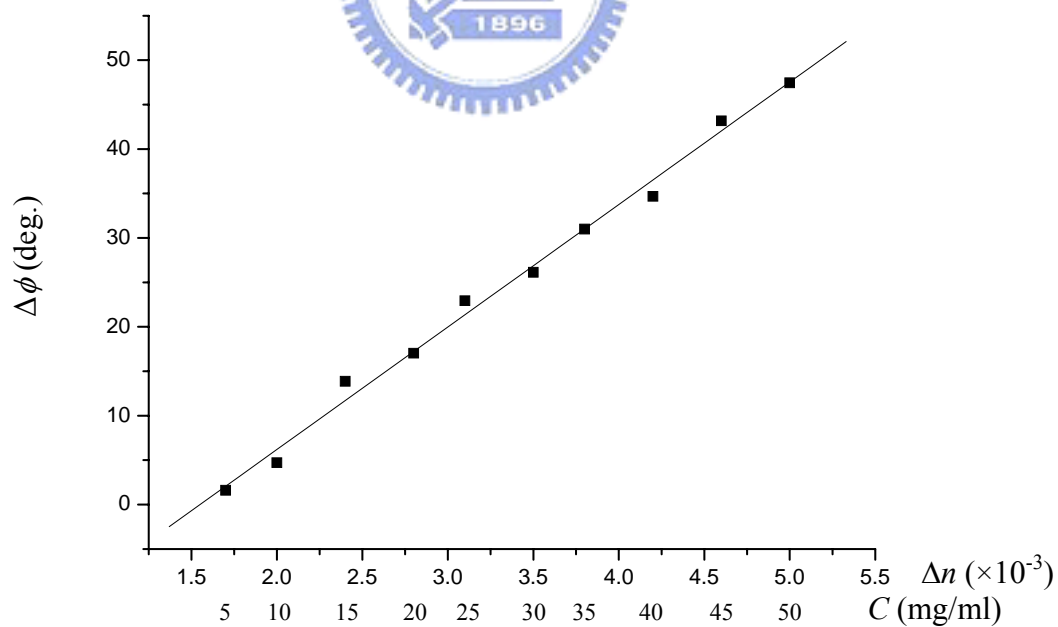
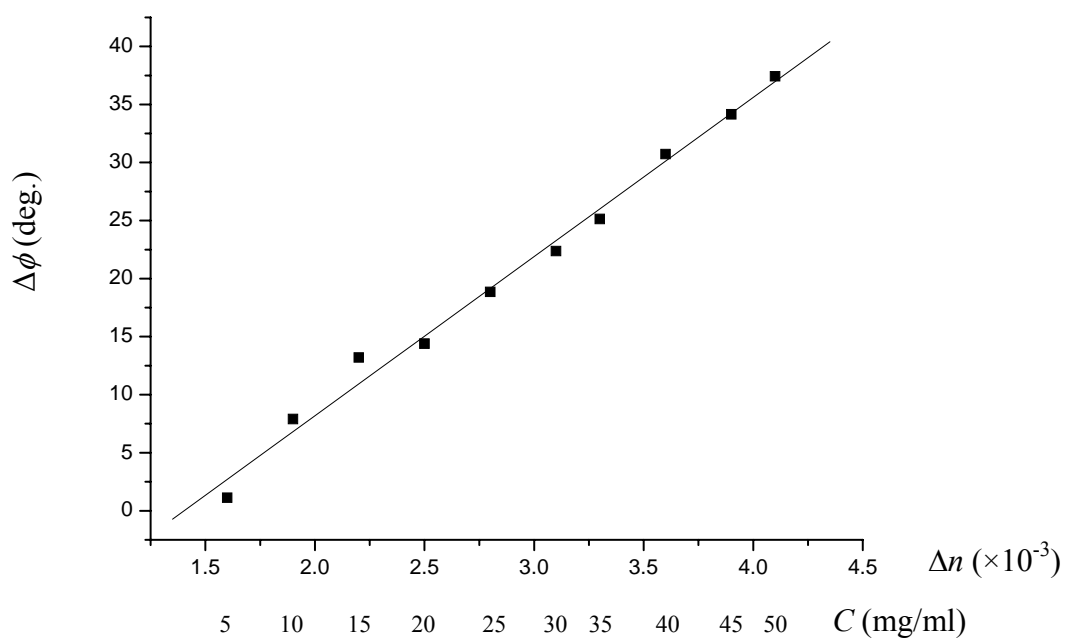
在Fig. 6.7(a)、(b)、(c)和(d)的乙醇、丙酮、葡萄糖溶液和鹽水之擬合曲線斜率分別為 1.39×10^4 deg/RIU, 1.34×10^4 deg/RIU, 1.13×10^4 deg/RIU 和 1.05×10^4 deg/RIU。考慮相位計的解析度、偏極混合誤差和偏振旋轉誤差，其總相位差的誤差 $\Delta\phi_{\text{err}}$ 約為 0.03° [14]。將上述之值代入下式方程式中

$$\Delta\phi_{\text{err}} = s\Delta n_{\text{err}}, \quad (6.16)$$



則可以計算出折射率 Δn_{err} 的誤差量；由計算的結果可以得知，乙醇、丙酮、葡萄糖溶液和鹽水的誤差量分別為 2.16×10^{-6} 、 2.24×10^{-6} 、 2.66×10^{-6} 和 2.85×10^{-6} 。

在本實驗中，將Kretschmann-Raether結構設計成底角為 71° 的等腰梯形稜鏡，此目的是為了讓入射光能垂直入射於等腰梯形稜鏡邊上，方便我們實際上的量測；另外，並可將此特製的Kretschmann-Raether結構的裝置、檢偏板 AN_1 和 AN_2 、偵測器 D_1 和 D_2 、電子訊號處理單元及數位顯示器組裝在一硬體上，則成為一測試模組單元(module)。如果利用偏振保持光纖PMF(polarization maintaining fiber)與耦合透鏡 L_1 、 L_2 及準直透鏡 L_3 、 L_4 所做成的導光模組，將外差光源導入測試模組單元內，則可做成一個方便移動、操作簡單的液體折射率微小變化測量計。除此之外，本裝置可以運用到實際的環境污染、生物分子間的交互作用及微小液體濃度的變化之量測上。



(b) 丙酮。

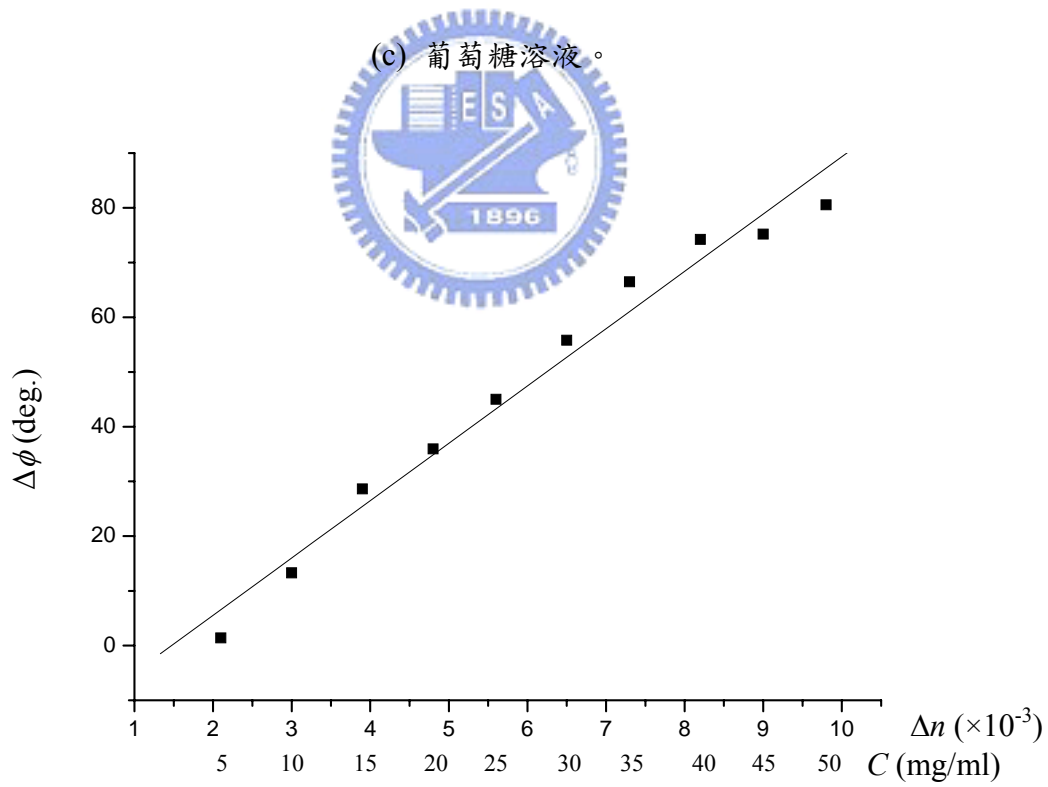
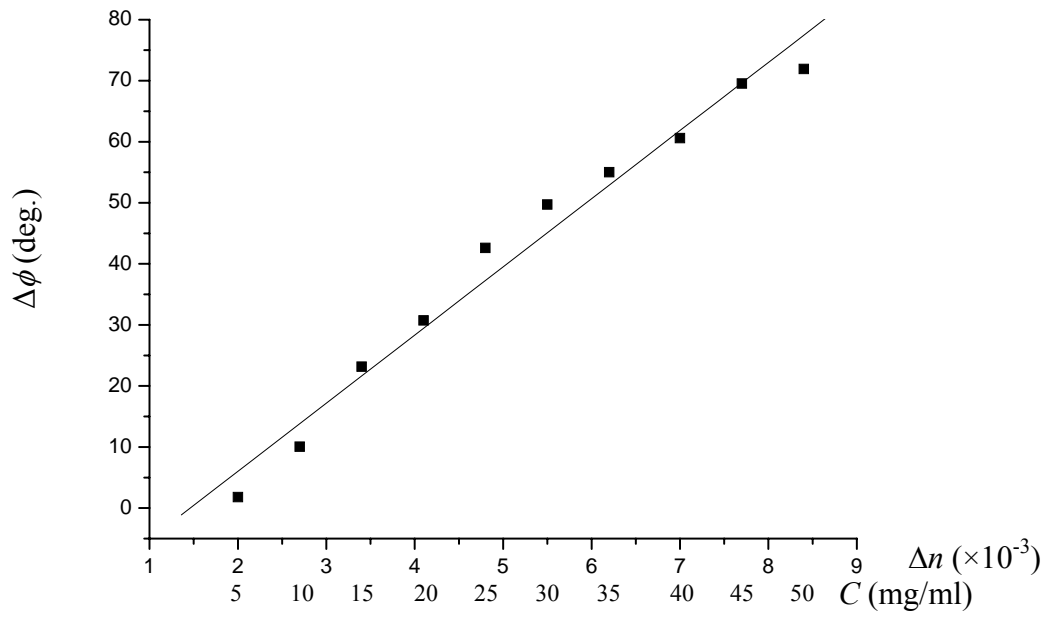


Fig. 6.8 相位差 $\Delta\phi$ 和折射率變化 Δn 與濃度 C 之實驗結果。

6.4 小結

本章針對在化學和生物上的相關物理常數，提出了架構簡單、操作容易且具有即時測量的方法。在本章中首先對於液體濃度之量測，提出了表面電漿共振外差干涉儀的測量架構，其經由實驗的結果證明本方法確實是可行的，同時在測量上也具有相當高的靈敏度；因此本方法將可以有效的應用於化學中的物質特性分析、成份解析和溶液的辨識上。其次也提出了液體微小折射率變化之測量方式，此架構不但具有模組化之功能，同時對於生物與化學反應進行的程度可以作即時的觀察，而此折射率變化的靈敏度也高達 10^{-6} 。



參考文獻

1. C. C. Jung, S. B. Saban, S. S. Yee, and R. B. Darling, "Chemical electrode surface plasmon resonance sensor," *Sensors and Actuators B* **32**, 143-147 (1996).
2. P. Pfeifer, U. Aldinger, G. Schwotzer, S. Diekmann, and P. Steinrucke, "Real time sensing of specific molecular binding using surface plasmon resonance spectroscopy," *Sensors and Actuators B* **54**, 166-175 (1999).
3. P. I. Nikitin, A. A. Beloglazov, V. E. Kochergin, M. V. Valeiko, and T. I. Ksenevich, "Surface plasmon resonance interferometry for biological and chemical sensing," *Sensors and Actuators B* **54**, 43-50 (1999).
4. Y. C. Cheng, W. K. Su, C. M. Lee, L. B. Chang, J. J. Liou, J. M. Shen, and T. W. Soong, "Design and measurement of dielectric sensor based on surface plasma wave excitation," *Appl. Surf. Sci.* **136**, 260-267 (1998).
5. A. A. Kolomenskii, P. D. Gershon, and H. A. Schuessler, "Sensitivity and detection limit of concentration and adsorption measurements by laser-induced surface-plasmon resonance," *Appl. Opt.* **36**, 6539-6547 (1997).
6. A. Brecht, and G. Gauglitz, "Label free optical immunoprobes for pesticide detection," *Analytica Chimica Acta* **347**, 219-233 (1997).
7. B. Nicoletta, R. Cristina, T. Marina, F. Giordana, Z. Francesco, "Biosensor technology and surface plasmon resonance for real-time detection of HIV-1 genomic sequences amplified by polymerase chain reaction," *Clinical and Diagnostic Virology* **8**, 199-208 (1997).
8. C. M. Feng, Y. C. Huang, J. G. Chang, M. Chang, and C. Chou, "A true phase sensitive optical heterodyne polarimeter on glucose concentration

- measurement," *Opt. Commun.* **141**, 314-321 (1997).
9. Y Lin, P. Hering, M. O. Scully, "An integrated optical sensor for measuring glucose concentration," *Appl. Phys.* **B 54**, 18-23 (1992).
 10. K. S. Johnston, K. S. Booksh, T. M. Chinowsky, and S. S. Yee, "Performance comparison between high and low resolution spectrophotometers used in a white light surface plasmon resonance sensor," *Sensors and Actuators* **B 54**, 80-88 (1999).
 11. Y. C. Cheng, W. K. Su, and J. H. Lion, "Application of a liquid sensor based on surface plasma wave excitation to distinguish methyl alcohol from ethyl alcohol," *Opt. Eng.* **39**, 311-314 (2000).
 12. E. Kretschmann, "The determination of the optical constants of metals by excitation of surface plasmons," *Z. Phys.* **241**, 313-324 (1971).
 13. W. Lu and W. M. Worek, "Two-wavelength interferometric technique for measuring the refractive index of salt-water solution," *Appl. Opt.* **32**, 3992-4002 (1993).
 14. M. H. Chiu, J. Y. Lee, and D. C. Su, "Complex refractive-index measurement based on Fresnel's equations and the uses of heterodyne interferometry," *Appl. Opt.* **38**, 4047-4052 (1999).
 15. D. C. Su, J. Y. Lee, and M. H. Chiu, "New type of liquid refractometer," *Opt. Eng.* **37**, 2795-2797 (1998).