

第三章 光學偏極計

3.1 前言

對掌性物質在生化科技與醫藥科技的應用上佔有重要的地位。對掌性物質可將通過的線性偏振光旋轉，這種現象稱之為光學活性(optical activity)。光學活性是瞭解對掌性分子內部構造的一項重要特性。我們可以根據此一現象來判斷對掌性物質分子的旋轉方向與旋轉能力。而要測量光學活性，則必須使用光學偏極計。目前較廣為人所使用的光學偏極計，主要有高精確度通用偏極計(High-accuracy universal polarimeter)，簡稱 HAUP[1-4]、準光學外差偏極計[5-7]及一般光學外差偏極計[8,9]。在本章中，我們首先說明光學偏極計的基本架構與對掌性物質的特性，之後再針對上述幾種方法加以說明。



3.2 光學偏極計之原理

3.2.1 光學偏極計之基本架構與原理

光學偏極計基本架構主要是由偏極板、裝有對掌性物質的試管與檢偏板所組成，如 Fig. 3.1 所示[10,11]。當一光源通過偏極板後產生線性偏振光，然後通過試管及檢偏板，而最後達到偵測器。假設偏極板與檢偏板的穿透軸最初設置為互相平行，當試管不裝物質時，我們發現大量的光線會到達偵測器。若將對掌性物質裝入試管中，從偏極板出射的線偏光通過試管後，會旋轉一個角度，此時通過檢偏板到達偵測器的光線量就不會是最大。若我們將檢偏板的穿透軸旋轉至與

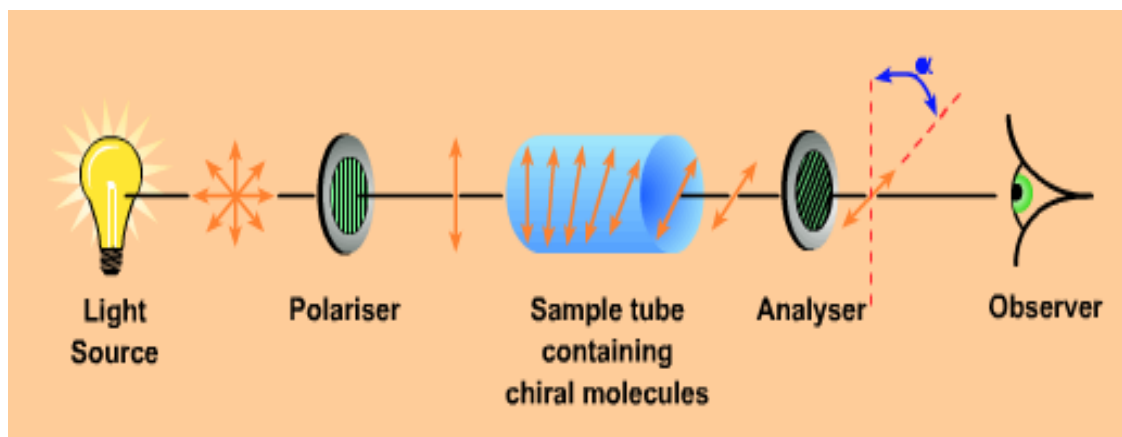


Fig. 3.1 光學偏極計的基本架構[10]

線偏光的偏振方向一致，則到達偵測器的光線量就會是最大。這時，我們可由檢偏板支架的角度刻度變化來判斷對掌性物質的旋轉方向與旋轉能力。因此這種傳統光學偏極計有穩定度低與解析度不高的缺點。

3.2.2 對掌性物質

在自然界中，有些物質不能使線性偏振光旋轉，何以有些物質卻可以？這是因為能使偏振光旋轉的物質分子是具有對掌性。要瞭解對掌性，首先必須要瞭解鏡像異構(mirror-asymmetric structure)物。何謂鏡像異構物？我們可以由Fig. 3.2來說明。由圖中可以看到，假若在手、腳、杯子、球與球棒的中間加了一面鏡子，它們會產生互相對應的像，我們稱為鏡像。而在這些物體與其鏡像之間，我們發現一個差異性，即是杯子、球及球棒，它們與自己的鏡像可以互相重疊，但是手及腳與自己的鏡像卻無法重疊，我們稱這些無法與自己鏡像重疊的物質稱為鏡像

異構物。鏡像異構物又可稱為對映異構物(enantiomer)[10]，而具有對映異構體的物質，即具有對掌性(chirality)。Fig. 3.3 為氨基酸分子與其鏡像分子的示意圖，由圖中可以看到，左旋組態與右旋組態的氨基酸分子彼此互為鏡像分子，而兩者之間也無法重疊，所以互為對映異構物，因此氨基酸分子即具有對掌性。許多物質都具有對掌性，如水晶、 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 及 TeO_2 等。有機化合物也有許多物質具有此一特性，如葡萄糖、蔗糖、果糖、酒石酸及氨基酸等。

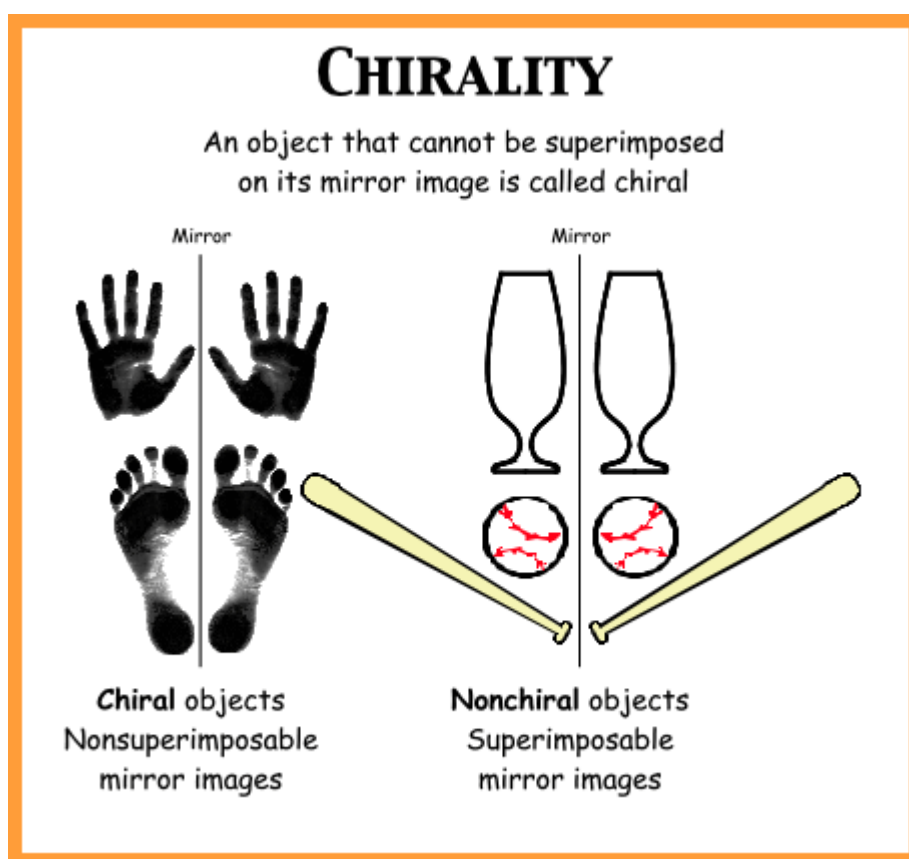


Fig. 3.2 鏡像異構物與鏡像非異構之比較[10]

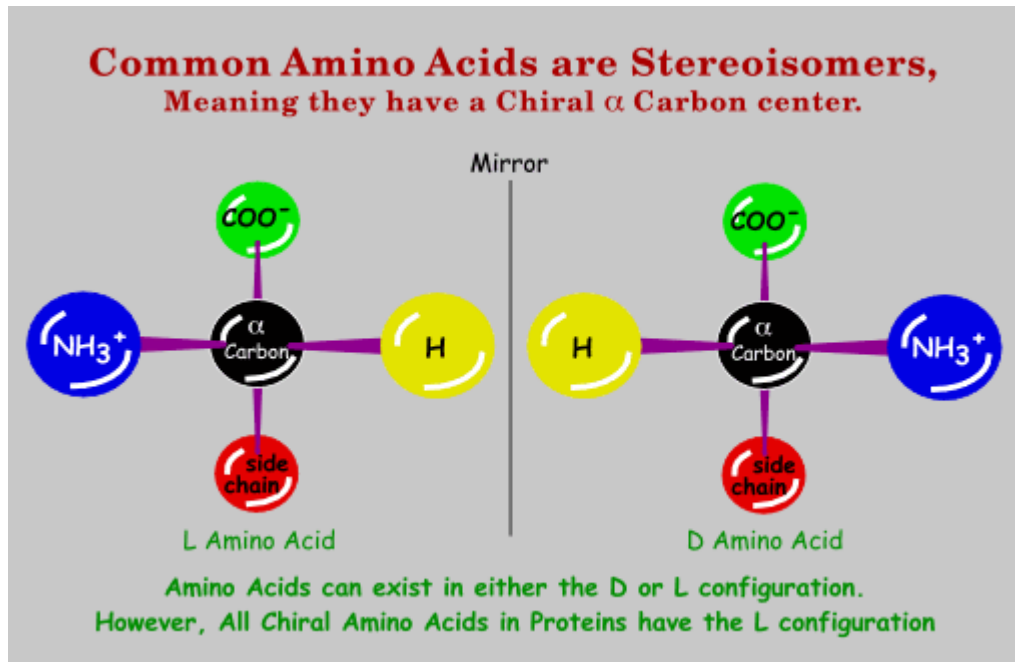


Fig. 3.3 氨基酸分子構造示意圖[10]



3.3 高精確度通用偏極計 (HAUP)

高精確度通用偏極計(HAUP: High-accuracy universal polarimeter)[1-4]可用於測量晶體的光學活性與雙折射性。HAUP 的基本架構與傳統光學偏極計相同，是由一偏極板 P、待測物系統 S (含有對掌性物質)及檢偏板 A 所組成(如 Fig. 3.4)。當一光束沿 z 軸傳播，令偏極板 P 的穿透軸與 y 軸夾 θ 角，而檢偏板 A 的穿透軸與 x 軸夾 $\gamma + \theta$ 角。其量測原理是藉由旋轉器分別去旋轉偏極板 P 與檢偏板 A 之穿透軸的方位角，當 P 及 A 的穿透軸在不同方位角的情形下，分別去測量由檢偏板 A 出射的相對光強度 I (出射光與入射光強之比值)，其表示式如下所示

$$I(\theta, \gamma, p, q) = A(\theta, p, q) + B(\theta, p, q)\gamma + \gamma^2, \quad (3.1)$$

其中

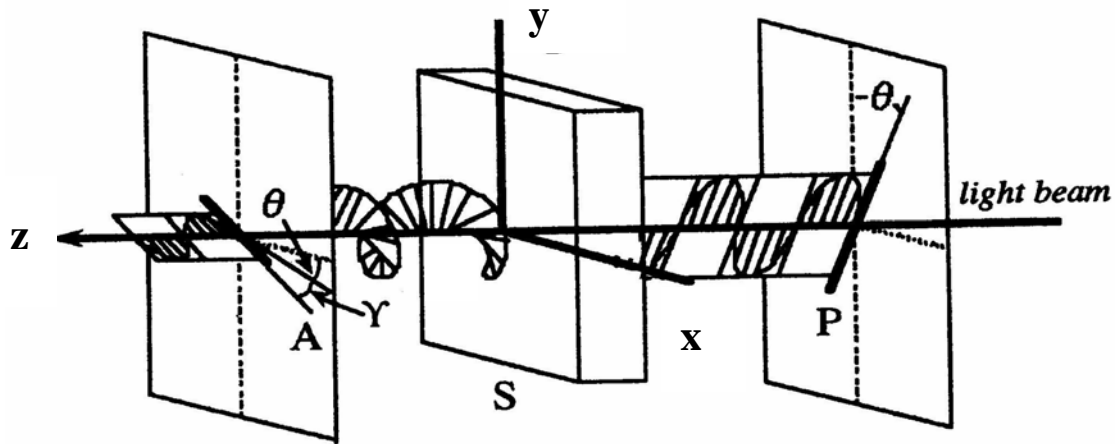


Fig. 3.4 高精確度通用光學偏極計基本架構圖[2]



$$A(\theta, p, q) = A_0 + (p + q)^2 + 4\{k^2 - k(p - q) - pq\}\sin^2(\Delta/2) + 2(p + q)\sin \Delta\theta + 4\sin^2(\Delta/2)\theta^2, \quad (3.2)$$

$$B(\theta, p, q) = -2(k - p)\sin \Delta + \sin^2(\Delta/2)\theta, \quad (3.3)$$

$$k = \frac{\delta n^{cir}}{2\delta n^{lin}}, \quad (3.4)$$

及

$$\Delta = \frac{2\pi d}{\lambda_0} \delta n^{lin}, \quad (3.5)$$

上式中的 δn^{cir} 代表與對掌性物質之光學活性相關的參數， δn^{lin} 則表示對掌性物質的雙折射參數，而 p 及 q 分別表示因偏光元件P與A所引進的系統誤差。欲將光學活性與雙折射性的相關參數求出，可將所量到的相對強度 I 值對方位角 θ 與 γ 分別作圖，並利用曲線擬合法(curve fitting) 與參考晶體法[12] 分別將Eqs. (3.1) 至Eq. (3.2)中的各個係數及系統誤差 p 與 q 求出，如此便可得到 k 與 Δ ，進而解出光學活性與雙折射性的相關參數。雖然HAUP法的解析度高，但其量測過程過於麻煩，所以無法用於即時量測上。

3.4 準光學外差光學偏極計[5-7]

準光學外差偏極計(Quasi-optical heterodyne polarimeter) 原理是以移頻器(如AO或EO等)對s-與p-偏光調變或用 Zeeman 雷射，使兩正交偏光之間產生頻差，並讓調變光源通過待測物，使測試信號產生強度變化，而由此強度變化，求得對掌性物質的光學旋轉角。Fig. 3.5 是一種以Mach-Zehnder干涉儀所組成的準光學外差偏極計[7]。當雷射光源經過偏極分光器PBS後，分成了p-與s-偏光，而兩偏光分別藉由干涉儀中的兩聲光晶體AO1 與AO2 調變，使得兩偏光之間產生頻差。之後p偏光經過面鏡 M_1 、偏極板P1 與分光器BS後，被分成反射與穿透光；同時，s- 偏光經過面鏡 M_2 、偏極板P2 與分光器BS後，同樣也被分成穿透與反射光。p- 偏光的穿透光與s- 偏光的反射光經過檢偏板 AN_r 後，最後由光偵測器 D_r 接收，做為參考信號 I_r ；p- 偏光的反射光與s- 偏光的穿透光則通過待測物與檢偏板 AN_t ，最後由光偵測器 D_t 接收，做為測試信號 I_t 。參考信號 I_r 與測試信號 I_t 的表示式分別如下：

$$I_r = a_1 a_2 \sin(2\theta_r) \cos(\Delta\omega t + \Delta\phi), \quad (3.6)$$

及

$$I_t = a_1 a_2 \sin 2(\theta_t + \theta_m) \cos(\Delta\omega t + \Delta\phi'), \quad (3.7)$$

其中 $\Delta\omega$ 為角頻差， a_1 、 a_2 、 $\Delta\phi'$ 及 $\Delta\phi$ 分別表示振幅與光學元件所引進的相位差， θ_t 及 θ_m 則是代表檢偏板 AN_r 與 AN_t 穿透軸的方位角，而 θ_m 為對掌性物質的光學旋轉角。當檢偏板 AN_t 穿透軸的方位角 θ_t 與光學旋轉角 θ_m 不大時，Eq. (3.7)可表示為

$$I_t \cong 2a_1 a_2 (\theta_t + \theta_m) \cos(\Delta\omega t + \Delta\phi'). \quad (3.8)$$

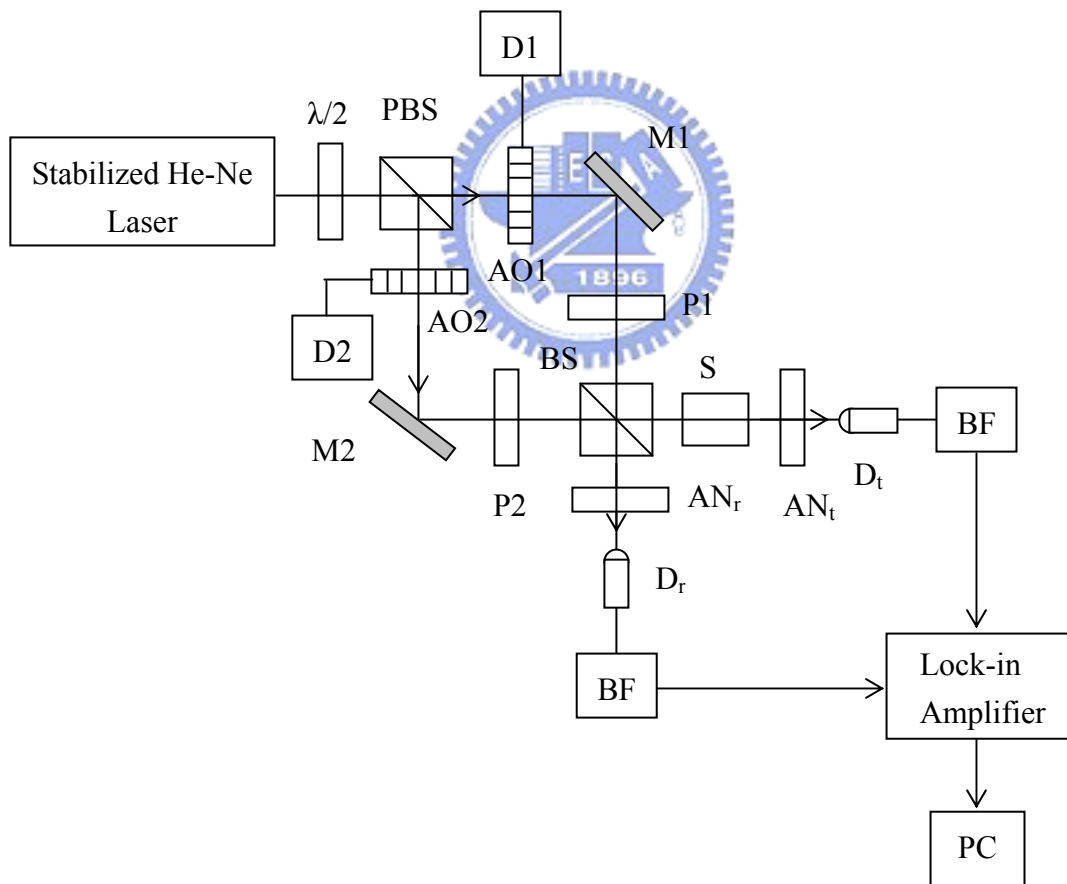


Fig. 3.5 準光學外差偏極計架構圖[7]

準光學外差偏極計的量測步驟是先將待測物移開($\theta_m=0$)，此時可以由鎖相放大器可測得最大強度 $I_{t1} = 2a_1a_2\theta_t$ 。之後再將對掌性物質置入系統中，最後所測得之最大強度為 $I_{t2} = 2a_1a_2(\theta_t + \theta_m)$ 。將兩者強度相減得 $\Delta I = |I_{t2} - I_{t1}| = 2a_1a_2\theta_m$ ，因此可以求得 $\theta_m = \Delta I / 2a_1a_2$ 。因為準外差干涉術是測量強度變化而求得光學旋轉角，所以容易受環境擾動與光源穩定度的影響，使得精確度降低。

3.5 一般光學外差偏極計[8-9]

一般光學外差偏極計的原理與準光學外差偏極計相似，也是以移頻器將s-與p-兩正交偏極光調變或使用Zeeman 雷射，使兩者之間產生頻差，並讓調變光源通過待測物，使測試信號引進一相位差，藉由測量相位差，而將對掌性物質的光學旋轉角求出。Fig. 3.6 是一種Mach-Zehnder干涉儀所組成的光學外差偏極計[9]。一偏振方向與水平軸夾 45° 的雷射光源入射至由兩分光器BS1 與BS2 及兩面鏡M1 及M2 所組成Mach-Zehnder 干涉儀中，光束被分光器BS1 分成兩路徑：(a) $BS1 \rightarrow AO1 \rightarrow M1 \rightarrow S \rightarrow BS2$ 及 (b) $BS1 \rightarrow AO2 \rightarrow M2 \rightarrow BS2$ ，其中待測物放在路徑(a) 中。(a)路徑經BS2 反射的光束與(b)路徑經BS2 穿透的光束重疊，並經過四分之一波片及偏極分光器PBS後，分成了s-與p-偏光：p- 偏光通過偏極板 P_1 ，最後由光偵測器 D_p 接收，得到光強度 I_p ；另一方面，s- 偏光則經過偏極板 P_2 後，由光偵測器 D_s 接收，得到光強度 I_s 。兩信號 I_p 及 I_s 分別為

$$I_p = 2A_r A_s \cos(\Delta\omega t + \theta_m + \phi'), \quad (3.9)$$

及

$$I_s = 2A_r A_s \cos(\Delta\omega t - \theta_m + \phi'), \quad (3.10)$$

其中 $\Delta\omega$ 、 θ_m 與 ϕ' 分別為角頻差、光學旋轉角與干涉儀光程差所引進的相位差。兩信號在鎖相放大器所得到的相位差為 $\delta=2\theta_m$ ，所以由相位差即可求得對掌性物質的光學旋轉角 $\theta_m=\delta/2$ 。這種光學外差偏極計是藉由量測相位差而得到光學旋轉角，雖然它有不變受擾動及較為精確的優點，但對於微小的光學旋轉角或是含散射物質之對掌性物質的光學旋轉角，有不易量測的缺點。此外，這種光學外差偏極計僅能測出光學旋轉角而無法同時測量出對掌性物質的折射率。

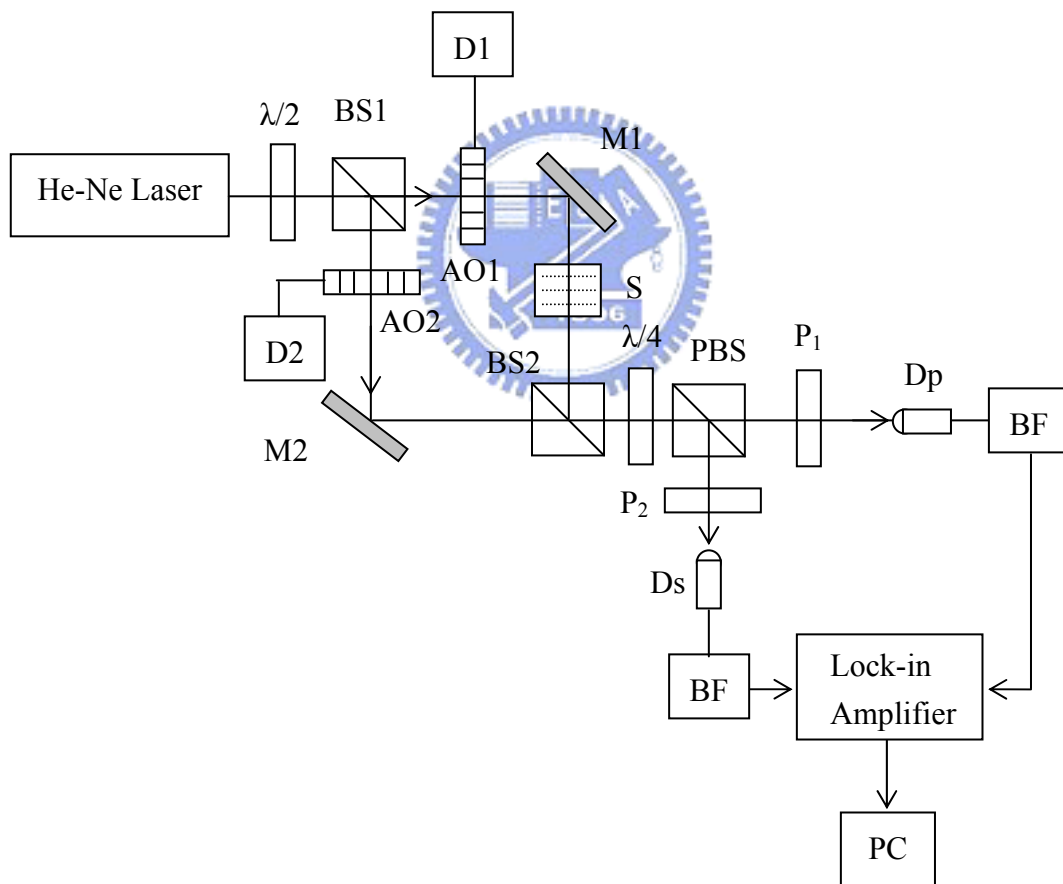


Fig. 3.6 一般光學外差偏極計架構圖[9]

3.6 小結

這一章首先說明了光學偏極計的基本原理及對掌性物質的定義。此外，我們也說明了高精確度通用偏極計、準光學外差偏極計與一般光學外差偏極計的架構、基本原理與缺點。本研究將在第四、五、六、七章針對這些缺點，提出各種不同的光學外差偏極計。



參考文獻

1. E. Dijkstra, H. Meekes, and M. Kremers, "The high-accuracy universal polarimeter," *J. Phys. D: Appl. Phys.* **24**, 1861-1868 (1991).
2. W. S. Weiglhofer, and A. Lakhtakia, "Introduction to Complex Mediums for Optics and Electromagnetics," SPIE, Bellingham, 645-676 (2003).
3. Y. Asahi, T. Osaka, and J. Kobayashi, "Optical study on a phase transition of fresnoite $Ba_2Si_2TiO_8$," *Phys. Rev. B* **63**, 09104-1~09104-13 (2001).
4. J. Jobayashi, T. Asahi, M. Sakurai, M. Takahashi, K. Okubo, and Y. Enomoto, "Optical properties of superconducting $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$," *Phys. Rev. B* **53**, 11 784-11 795 (1996).
5. H. J. King, C. Chou, H. Chang, and Y. C. Huang, "Concentration measurements in chiral media using optical heterodyne polarimeter," *Opt. Commun.* **110**, 259-262 (1994).
6. T. W. King, G. L. Cote, R. McNichols, and M. K. Goetz, "Multispectral polarimetric glucose detection using a single Pockels cell," *Opt. Eng.* **33**, 2746-2753 (1994).
7. C. Chou, Y. C. Huang, C. M. Feng, and M. Chang, "Amplitude sensitive optical heterodyne and phase lock-in technique on small optical rotation angle detection of chiral liquid," *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, 356-359 (1997).
8. G. L. Cote, M. D. Fox, and R. B. Northrop, "Noninvasive optical polarimetric glucose sensing using a true phase technique," *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **39**, 752-756 (2000).
9. 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).

10. Molecular History Research Center,

<http://www.creation-science-prophecy.com/amino/index.html>.

11. N. Berova, K. Nakanishi, R. W. Woody (Eds.), “*Circular Dichroism: Principles and Applications*,” 2nd ed., Wiley, New York, ch.1 (2000).

12. J. Kobayashi, H. Kumomi, and K. Saito, “Improvement of the accuracy of HAUP, high-accuracy universal polarimeter: Application to ferroelectric $[\text{N}(\text{CH}_3)_4]_2\text{ZnCl}_4$,” *J. Appl. Cryst.* **19**, 377-381(1986).

