

光學折射式之全功能氣壓量測 參加美國第五十一屆國際科技展覽會 1.美國物理教師協會及美國物理學會榮譽獎 2.美國真空學會一等獎 3.NASA美國太空總署榮譽獎



作者簡介 作者:李富峰

就讀學校:照南國中 指導老師:陳信聰

一、研究動機 當欲研究一物質於各種氣壓下的物理特性時，通常需要在腔體中進行實驗，此時腔體的氣壓量測是相當重要的。儘管有許多不同種類的壓力計可被採用，如薄膜式、壓電式、電我於1985年出生於台北，由於父親工作的關係，10歲以前住在桃園縣龍潭鄉，之後即搬回父親的故鄉-苗栗縣竹南鎮。父親是學科技的，母親則是習商，雖然專長領域不同，但他們有一個共同的心願，就是將我與弟弟撫育成對國家有貢獻的人。由於物理不是靠死背書本便可完全了解，父親從我小時候便開始訓練我獨立思考的精神，配合「散步式」教學，培養我觀察事物的能力；並且隨手取材，創造有用的東西，就像「馬蓋先」一樣。這次參展的作品就是在觀察與研究海市蜃樓的現象中所衍生出來的。我覺得科學的「原創性」很重要，如果做研究只是跟著別人的路走，那就不容易有出色的表現。在這段參展過程中，非常感謝陳信聰老師、劉立基教授與詹國禎教授的指導，科教館工作同仁的協助，以及赴美期間隨團人員的照顧。最後，謝謝家人的支持與付出，讓我能擁有這段難得的人生經驗與展望更充實的未來。容式、與派藍尼式等[1]，但是它們的量測範圍通常無法涵蓋真空至高壓。此外，它們也不適用於一些需要非接觸性的量測場合，如監測火箭噴射時的氣流變化，以及電漿的特性行為。

從觀察海市蜃樓的現象中，我發現雖然空氣密度僅有微小的變化，然而光線產生折射或全反射的偏折量會隨著光線傳播距離而放大。由於偏移量與空氣密度的變化有關，因此是否可用此偏移量來間接量得空氣壓力呢？且此種光學量測方法似乎正可克服上述壓力計的缺點。這些想法促使我進行此研究計劃。**二、研究目的** 本研究的主要目的如下：**1.發展一量測折射率的光學機制，整合特殊幾何結構設計的透明腔體，以非接觸法量測此機制中腔體內的氣體壓力。****2.量度氣體於不同壓力下的折射率變化曲線，研究氣體的莫爾折射率特性。****3.提出一個可行的量測方法，以應用於電漿研究、腐蝕性氣體與水污染的監測。****三、實驗設計與理論** 欲以光學方法量測空氣的壓力，我們必須使用一透明腔體來侷限空氣的運動。此壓力腔體之外圍可設計成方形，使得光線(雷射光束)能垂直通過第一介面而不產生偏折，這種做法可以簡化理論推導。在此種構想下，我提出一種特殊的幾何結構，叫做"外方內稜形腔體"。量測系統的架構如圖1所示，主要的部分為一稜形頂角為 θ 的外方內稜形腔體。透明腔體材質(壓克力)、環境空氣與腔體中待測氣體的折射率分別為 n_c 、 n_a 與 n_p ，且 $n_c > n_p$ 。雷射光束由右方入射至腔體，當它接觸到中央稜形區域的右側平面時，將與此平面之法線N形成一入射角 θ_2

($=\theta/2$)。若 $\theta/2$ 小於臨界角 $\theta_c = \sin^{-1}(n_p/n_c)$ ，則光束將進入待測氣體-1中。由圖一的圖形幾何與Snell's 定律，我們可得到下列關係式，此處L為稜形腔體出射點處至屏幕距離。由公式(1)-(4)，可知雷射偏折距離 $D = D(L, n_a, n_c, n_p, \theta)$ ，我們可由一大氣壓、室溫 15°C 下的 $n_p (=n_a)$ 查表值[2]，以及已知的 θ ，經由量度L與D，而獲得高精密度的 n_c 。當欲測量壓力之變化時，由於L、 n_a 、 n_c 與 θ 皆為定值，所以，偏折變化量 ΔD 僅與 Δn_p 有關，亦即 $\Delta D = \Delta D(\Delta n_p)$ 。將公式(1)-(4)微分後，可整理得，又由Clausius-Mossotti 方程式，氣體壓力與折射率的關係式可表示如下，此處 $\alpha = R_m/(RT)$ ， R_m 為莫爾折射率[ml/mole]，R為理想氣體常數[atm · ml/(mole · K)]，T為環境溫度[K]。所以，在某壓

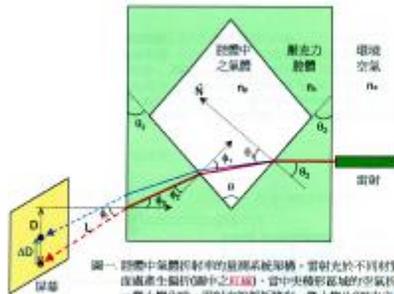
$$\sin \theta_1 = (n_c/n_a) \cdot \sin(\theta/2) \quad (1)$$

$$\sin \phi_2 = (n_b/n_c) \cdot \sin(\theta/\theta_1) \quad (2)$$

$$\sin \phi_1 = (n_c/n_a) \cdot \sin(\theta/2 - \phi_2) \quad (3)$$

力 $P_0 (=1\text{atm})$ 下，微小變化量 Δn_p 與壓力變化 ΔP_0 $D = L \cdot \sin \phi_1$ (4)

$$\Delta D = \Delta n_p \cdot L \cdot \sin \theta \cdot \cos(\theta/2 - \phi_2) / (\cos \theta_1 \cdot \cos \phi_2) \quad (5) \quad (n^2 - 1) / (n^2 + 2) = \alpha \cdot P \quad (6)$$

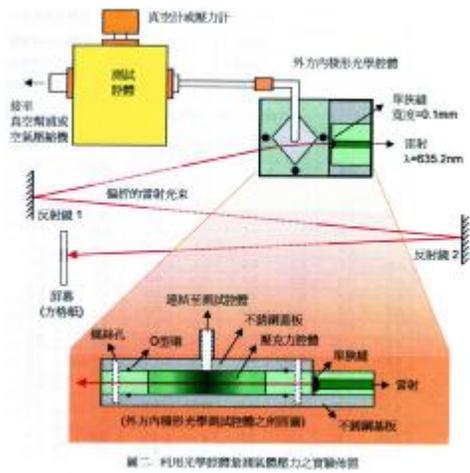


圖一、腔體中氣體折射率的量測系統架構。雷射光於不同材質的介面處產生偏折(圖中之紅線)。當中央攝影區域的空氣折射率有一微小變化時，雷射光的偏折將有一微小變化(圖中之藍線)。攝影螢幕上之偏折光點亦產生微小改變，折射率 n_c 變大，其偏折D變小。

的關係即可由微分(6)式獲得，連結(5)式與(7)式，我們即可找出 ΔD 相對於 ΔP 的理論依據。四、實驗設備與佈置 實驗佈置如圖2所示。在測試腔體上共有三個外接用的凸緣：上凸緣連結至真空計或壓力計，用來測量壓力，做為校調數據使用；左凸緣連結至真空幫浦或空氣壓縮機；右凸緣則連結至外方內稜形光學腔體。此光學腔體主要組成爲一壓克力方形腔體，內部挖出一稜形結構，上下各用一不銹鋼蓋板與不銹鋼基板密合，再配合螺絲與O型環鎖緊。雷射光則安裝於一壓克力方塊中央，在其前方置一單狹縫，細化雷射光之剖面以增加量測精確度。雷射光通過光學腔體偏折後，入射於反射鏡1，再反射至反射鏡2，最後到達屏幕，其位置被記錄在方格紙上。

$$\Delta n_p = \Delta P \cdot 3\alpha / [2n_p \cdot (1 - \alpha \cdot P_0)^2] \quad (7)$$

五、結果



表一 外方內稜形光學腔體的折射率測量值

標準空氣狀態*
雷射波長
一大氣壓下之標準空氣折射率 n_0 *
稜型頂角 θ
雷射傳播距離 L
雷射偏折距離 D
光學腔體的折射率 n_c

*依據參考資料 2.

表二 在不同稜形頂角下，壓力改變 ΔP 時

P[atm]	ΔP [atm]	$\theta = 20^\circ$		30°	
		ΔD [mm]	Δn_p	ΔD [mm]	Δn_p
0.001	-0.999	1.4	2.2		
0.01	-0.99	1.4	2.2		
0.03	-0.97	1.4	2.2		
0.05	-0.95	1.3	2.0		
0.1	-0.9	1.3	2.0		
0.2	-0.8	1.2	1.7		
0.4	-0.6	0.9	1.2		
0.6	-0.4	0.6	0.9		
0.8	-0.2	0.3	0.5		
1.0	0.0	0.0	0.0		
2.0	1.0	-1.5	-2.1		
3.0	2.0	-3.0	-4.3		
4.0	3.0	-4.2	-6.5		
5.0	4.0	-5.5	-9.0		
6.0	5.0	-7.3	-11.0		
7.0	6.0	-9.0	-13.5		
8.0	7.0	-10.5	-16.0		
9.0	8.0	-12.2	-17.5		
10.0	9.0	-13.5	-19.8		

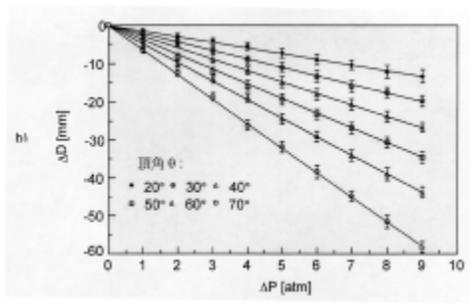
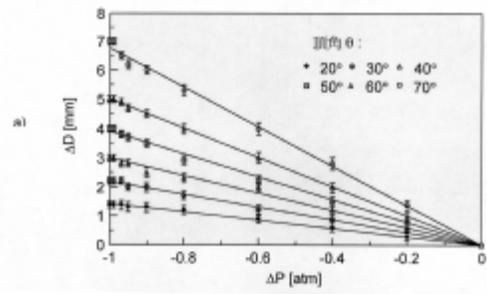
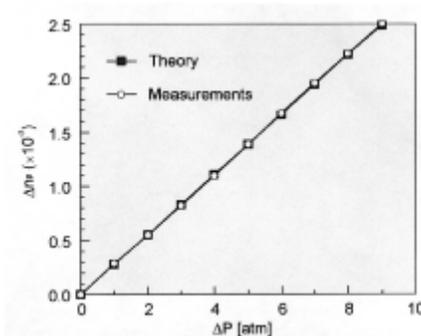


圖3 對於不同稜型頂角，於不同 ΔP 下， ΔD 的測量結果，圖中的實線為理論值：a)負壓(真空範圍) b)正壓(高壓範圍)。表三 不同 ΔP 下，

P[atm]	ΔP [atm]	$\Delta n_p (\times 10^{-5})$	
		理論計算*	測量結果**
1.0	0.0	0.000	0.00
2.0	1.0	0.276	0.28
3.0	2.0	0.553	0.55
4.0	3.0	0.829	0.82
5.0	4.0	1.106	1.10
6.0	5.0	1.382	1.38
7.0	6.0	1.659	1.67
8.0	7.0	1.935	1.95
9.0	8.0	2.212	2.22
10.0	9.0	2.488	2.50

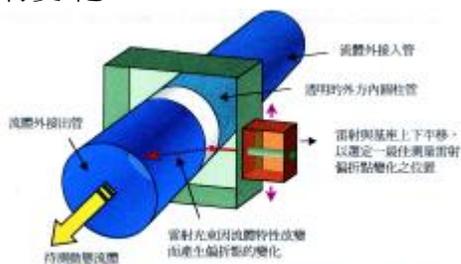
Δn_p 的理論計算值與測量結果



*利用公式 (6)，可計算出在標準空氣狀態下的莫爾折 射率 (=4.35809)。**由 ΔD 的測量值，利用公式(5)計算出 Δn_p 。圖4 不同 ΔP 下， Δn_p 的理論值與測量結果 六、討論 1.在表1中， n_c 的量度精確度主要受限於所能測到最小的雷射光點偏移量變化。以頂角60度的光學腔體而言，在傳播距離15公尺

時，折射率若於小數點以下第五位產生變化時，偏移量變化約為**0.2mm**。亦即若可量得**0.2mm**左右的變化量，則折射率的精確度可達到**0.00001**。爲了增加量度的精確度，於雷射前方設置了一個水平方向的單狹縫，狹縫寬度爲**0.1mm**，使得遠場繞射圖樣可產生一細化的垂直線段。2.利用圖2實驗佈置，可獲得壓力改變時雷射光束的偏折量變化，如表2所示。在真空度或壓力測量時，先記錄量測前（壓力爲 $P_0=1\text{atm}$ ）的雷射光點位置，然後打開真空幫浦或空氣壓縮機，在不同真空度（從真空計）或壓力（從壓力計）變化 ΔP 下，於方格紙上記錄雷射光點的變化 ΔD 。由圖3的實驗曲線知， ΔD 與 ΔP 的關係相當線性，此與理論相符。圖3a)與3b)可分別用來建立一個真空計與壓力計的校調曲線。當頂角大於**50度**，在真空度達**0.01atm**以上時，由於 ΔD 已難以解析，此時爲所能量得的最小壓力，而大壓力則似乎仍可繼續延伸($>10\text{atm}$)。實驗結果亦顯示，在不造成全反射的情況下，光學腔體的頂角愈大，靈敏度愈高。3.在圖4中，量測曲線近乎一直線，其斜率約爲**0.00028[1/atm]**，利用此斜率，由公式(7)可算出 $\alpha \sim 0.00019 [1/\text{atm}]$ 。所以，標準空氣的莫爾折射率約爲**4.41484[ml/mole]**。由於 α 值遠小於1，因此，由公式(7)可知，在壓力低於**1000atm**下， n 約等於1，故分母可近似於2。因此， Δn 與 ΔP 的關係，幾乎爲一直線。量度的結果與理論相當一致，我們可利用此方法來獲得任何氣體的莫爾折射率。

4.當欲量度動態氣體的壓力時，爲了避免稜形造成氣流不均勻，我們可將光學腔體中的稜型改設計成圓柱型，如圖5所示。氣流被侷限在管子中，然後流經一外方內圓柱型的光學腔體。雷射基座可上下移動，選擇一最佳的入射角度，以獲得最靈敏的偏折變化量。由於內部圓柱表面相當於一凹透鏡，可能會造成光點的擴散，因此雷射光束前的狹縫最好製作成與圓柱管平行的方向。此種量測結構亦可應用於流動液體特性的即時監測中，當其流經光學腔體時，若雷射光束的偏折位置改變，即可知道液體的濃度或成分已有變化。



圖五. 利用光學折射法測量動態氣體壓力或液體成分變化的實驗構型

七、結論

利用非接觸式的光學折射法來測量腔體中氣體的全範圍壓力已被驗證可行。目前的壓力量測範圍約爲**0.01atm**~**10atm**。最小值(真空度)或壓力的解析度主要受限於雷射偏折距

離的 量測精確度約為0.1mm數量級，而最大 質。可預期的，這種方法不僅能使用在 值將可延伸至數百大氣壓以上。更低的真空 一般壓 力的量測上，亦可應用於火箭動 度或更大 的精確度可適當的增加光學腔體中態推進時的監測、高溫電漿性質的確 稜型的頂角，以及增長雷射的傳播距離來達 認，以及任何無法使用 現存壓力計的場 成。此外， 光學腔體的材質可改用玻璃，以合。本研究未來將繼續探討動態流體的 提高光學品

性質，測量任何相關於折射率的物理 量，如流體的濃度、密度或溫度等。

八、致謝 感謝陳信聰老師、劉立基教授 與詹國楨教授的指導與建議；同時，也 謝謝國立科學教育 館工作人員所提供的一 切協助。

九、參考資料 1.Balzers Instruments Corporation, *Com- ponents for vacuum technique*, Balzers Instruments Corporation (1996). 2.D.R. Lipe, *CRC Handbook C and P*,CRC Press,Boca Raton (1998). 3.M.Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Ch.2,Pergamon Press, New York (1980). 4.E.Hecht and A. Zajac, *Optics*, Ch.3, Addison-Wesley Publishing Company (1974).

十、評語 折射率的測量雖非設計的題 目，作者利用菱形對角的實驗設計頗具 創意,實驗亦相當完 整。