

電腦光碟片繞射實驗

陳惠玉、楊凱賢、李偉

中原大學物理系

(投稿日期：90年7月4日 接受刊登日期：90年7月24日)

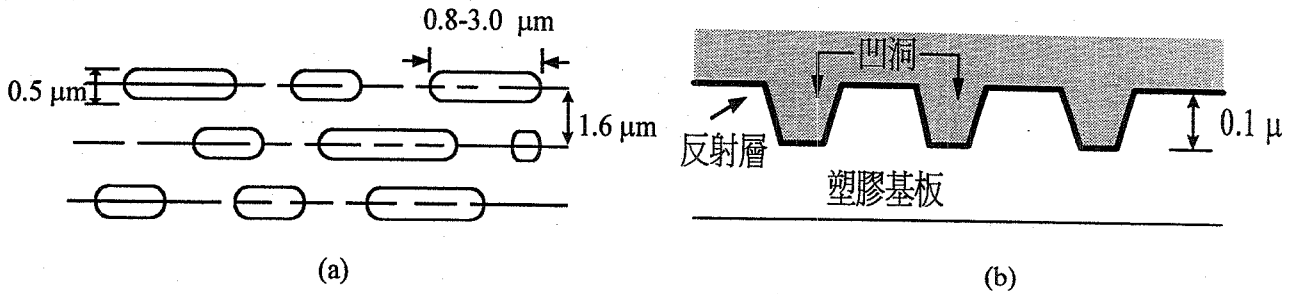
「哇！彩虹！」這是許多孩童在第一次見到光碟 (compact disc) 時的反應。即便在大學校園裡，一般學生在被光碟所展現的七彩光芒給吸引住的同時，心中也不免產生好奇與疑惑：「這是什麼原理？」中原大學物理系在本(八十九)學年度第二學期的光學實驗課中，特別在實驗手冊裡編列一個無特定主題、方法、步驟之光學實驗單元，即〈實驗一、光學實驗 DIY〉，其目的在使學生能有機會利用實驗室所提供的日常生活物品，自行設計實驗內容以驗證所學並探索新的現象；這種另類教學實驗，已普遍獲得學生們正面的迴響。上述實驗單元中有一項物品便是隨手可得的的光碟，實驗過程中我們將光碟片視為一反射式繞射光柵 (reflection diffraction grating) 以進行光碟片繞射現象的研究，並進一步探討光柵繞射公式的適用性及比較唯讀式電腦光碟片 (compact disc-read-only memory；簡稱 CD-ROM) 與可錄一次 (多讀單寫) 式電腦光碟片 (compact disc-recordable, 簡稱 CD-R) 繞射現象的不同。就我們所知，現有相關文獻所探討的均為聲碟或數位音樂光碟 (compact disc digital audio；簡稱 CD 或意義更明確的 CD-DA) 的繞射示範，而非電腦光碟片之繞射

實驗 (Nöldeke, 1990; Kettler, 1991; Kruglak, 1993)。

上述各類型的光碟片皆為飛利浦、太陽誘電以及新力三家公司所發明，其規格也由這些廠商共同制定並相互授權 (黃昭勇, 2001)。在實驗開始之前，有必要先了解光碟片的構造，如此便能明白它的繞射原理。以發展近二十年的聲碟為例 (Rossing and Chiaverina, 1999)，其儲存資訊的方式是利用 CD 上的凹洞 (pit) 為記號，而這些凹洞或訊號坑的長度為 $0.8\text{--}3.0\ \mu\text{m}$ ，寬度約 $0.5\ \mu\text{m}$ ，深度為 $0.1\ \mu\text{m}$ ；凹洞的排列的方式為一螺旋式的溝槽，相鄰溝列間距為 $1.6\ \mu\text{m}$ ，如圖(一)所示。

注意同屬唯讀式光碟的 CD-ROM 與上述 CD 的載訊原理相同，但是 CD-R 在製程上卻與唯讀式光碟片不盡相同。CD-R 的製作是先將螺旋式溝槽製作於塑膠基板上，溝列間距為 $1.6 \pm 0.1\ \mu\text{m}$ ，基板被覆一層有機染料材質，寫入的資訊是記錄在有機染料層上；CD-ROM 則是直接把資訊記錄於基板上，因此在沒有寫入資料的部分也就沒有螺旋溝槽的構造 (楊武智, 1999)，當然光碟片的這部分區域也就無法產生繞射現象。

實驗中所利用到的主要器材有：氦氖雷射



圖(一)：CD 上的軌道與凹洞，(a)凹洞的大小及光軌的距離，(b)光碟片的構造。

(He-Ne Laser, 波長 $\lambda = 633 \text{ nm}$)、二極體雷射 (diode laser)——我們採用波長標示為 650 nm 之雷射投影筆、CD-ROM、CD-R 及捲尺。根據 Nöldeke (1990) 的方法，我們採用實驗架設如圖(二)所示。

屏幕間的距離，利用光柵方程式

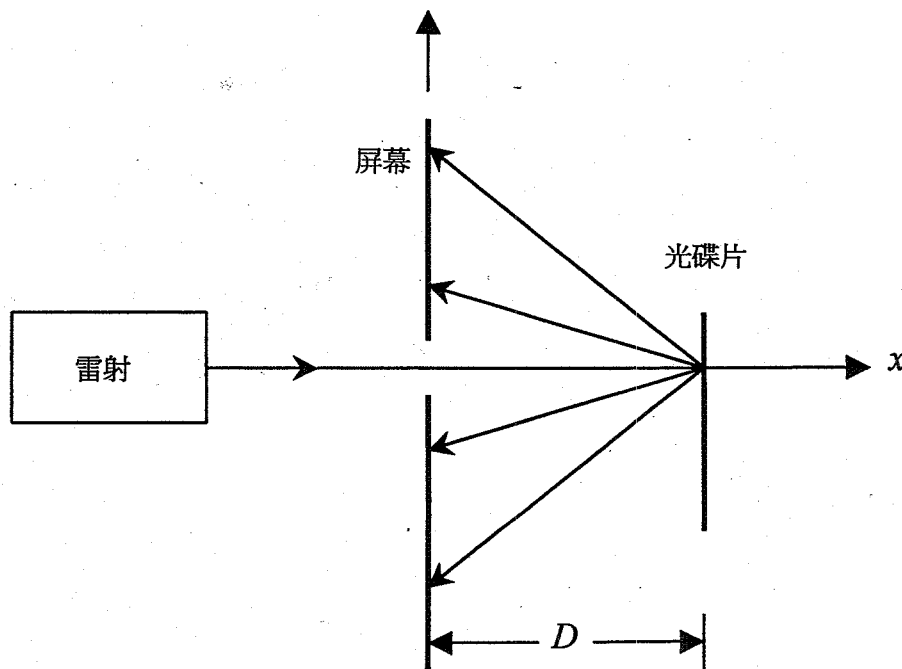
$$n\lambda = d \sin \theta_n = \frac{y_n d}{\sqrt{D^2 + y_n^2}}, \quad (1)$$

一、軌距 (track spacing) 的量測：

利用氦氖雷射作為入射光源，分別以 CD-ROM、已記錄資料的 CD-R 及空白 CD-R 為研究對象，並記錄繞射點——繞射主極大 (primary maxima)——的相關數據。若整數 n 表繞射的階數 (order of diffraction), y_n 為屏幕上 $\pm n$ 階繞射點間距離的一半, D 為電腦光碟片到

吾人便可計算出光碟溝槽的間距 d 。另外在傳統的狹縫繞射實驗中，我們常會採用數學上簡化的形式，即

$$n\lambda = d \tan \theta_n = \frac{y_n d}{D}; \quad (2)$$



圖(二)：實驗架設。

表(一)：CD-ROM 的光軌間距量測數值

D (m)	$n = 1$			$n = 2$		
	y_1 (m)	$d^{(1)}$ (μm)	$d^{(2)}$ (μm)	y_2 (m)	$d^{(1)}$ (μm)	$d^{(2)}$ (μm)
0.1000	0.0465	1.501	1.361	0.1415	1.550	0.909
0.1500	0.0725	1.454	1.309	0.2165	1.540	0.893
0.2000	0.0910	1.528	1.391	0.2715	1.572	0.945
0.2500	0.1130	1.536	1.400	0.3385	1.573	0.948
0.3000	0.1370	1.523	1.386	0.4070	1.572	0.946
0.3500	0.1560	1.554	1.420	0.46850	1.580	0.958
0.4000	0.1810	1.535	1.400	0.5390	1.576	0.952
0.4500	0.2020	1.545	1.410	0.6030	1.579	0.957
0.5000	0.2250	1.542	1.406	0.6225	1.623	1.026

表(二)：已有寫入資料的 CD-R 的光軌間距量測數據

D (m)	$n = 1$			$n = 2$		
	y_1 (m)	$d^{(1)}$ (μm)	$d^{(2)}$ (μm)	y_2 (m)	$d^{(1)}$ (μm)	$d^{(2)}$ (μm)
0.1000	0.0500	1.415	1.266	0.166	1.478	0.790
0.1500	0.0700	1.496	1.356	0.2410	1.491	0.809
0.2000	0.0930	1.501	1.361	0.3265	1.484	0.798
0.2500	0.1170	1.493	1.352	0.4075	1.485	0.799
0.3000	0.1360	1.533	1.396	0.4810	1.492	0.811
0.3500	0.1620	1.507	1.367	0.5565	1.495	0.817
0.4000	0.1855	1.504	1.365	0.6125	1.512	0.845
0.4500	0.2110	1.491	1.350	0.7085	1.499	0.824
0.5000	0.2275	1.528	1.391	0.7690	1.510	0.842

表(三)：空白 CD-R 的光軌間距量測數據

D (m)	$n = 1$			$n = 2$		
	y_1 (m)	$d^{(1)}$ (μm)	$d^{(2)}$ (μm)	y_2 (m)	$d^{(1)}$ (μm)	$d^{(2)}$ (μm)
0.1000	0.0495	1.426	1.278	0.17	1.468	0.769
0.1500	0.0690	1.514	1.376	0.2385	1.495	0.817
0.2000	0.0945	1.481	1.339	0.326	1.485	0.799
0.2500	0.1135	1.531	1.394	0.3985	1.494	0.815
0.3000	0.1400	1.496	1.356	0.4775	1.495	0.816
0.3500	0.1610	1.514	1.376	0.558	1.494	0.815
0.4000	0.1840	1.514	1.376	0.63	1.499	0.824
0.4500	0.2105	1.493	1.353	0.7185	1.493	0.814
0.5000	0.2320	1.503	1.364	0.8045	1.490	0.808

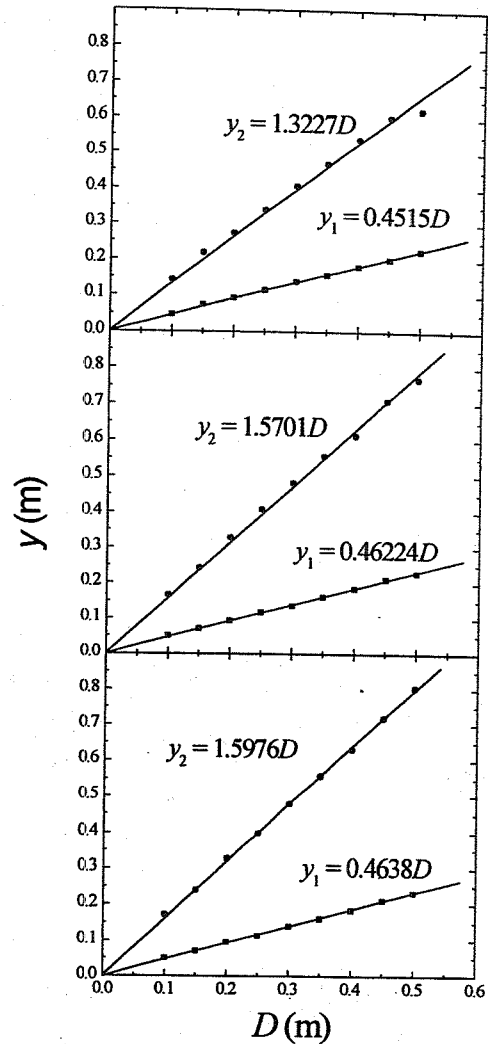
然而就光碟片繞射而言，(2)式是否適用？其正確性如何？利用(1)、(2)式所求的結果兩者又有何差異？表(一)–(三)可以清楚揭示上述疑點。

由表中 ($d^{(1)}$ 、 $d^{(2)}$ 分別代表利用公式(1)及公式(2)計算出的結果) 大致可以看出，以 $\tan \theta$ 的概念來作計算時，所得的結果和真實值 $d = 1.6 \mu\text{m}$ 相較不僅誤差太大也不約略為 $1.6 \mu\text{m}$ 的整數倍，其結果自然不可信。其實由理論預測的結果就可以知道：就固定屏幕距離而言，當光柵間距愈小時，其繞射點間的距離會愈大，即繞射角 θ 變大，使得簡化的光柵公式變得不適用；因此對於光軌間距在微米等級的各類光碟片繞射實驗而言，我們絕對不能採用所謂的近似公式(2)。

理論上，由於式(1)可改寫為

$$y_n = \frac{n\lambda}{\sqrt{d^2 - n^2\lambda^2}} D, \quad (3)$$

可知 y 與 D 應呈線性關係。利用前述表中所列數據作圖(三)，並以最小平方差法找出直線方程式，如此便可由直線斜率推算出電腦光碟軌道間距，見表(四)。其結果顯示，就 CD-R 來說，是否有存入資訊並不會影響我們的觀察，更不會發生如同 CD-ROM 在未存入資料的部分無法觀察到繞射現象的結果，其原因與 CD-ROM 及 CD-R 製程上的不同有關，這一點我們已在前面提過。



圖(三)：數據圖，(a) CD-ROM，(b) 已存資料 CD-R，(c) 空白 CD-R。

表(四)：三種光碟片的光軌間距

間距		樣品		
		CD-ROM	CD-R (已寫入資料)	CD-R (空白片)
$d (\mu\text{m})$	$n = 1$	1.54	1.51	1.51
	$n = 2$	1.59	1.50	1.49

二、繞射圖樣的觀察：

由實驗第一部份的內容我們可以得知，在進行光軌量測時使用唯讀式或可寫入式的光碟片並不至於對結果有太大的影響；但是就整個現象觀察而言，我們還是建議使用唯讀式光碟片，其原因如下：

(一) 由 CD-ROM 所獲得的繞射圖樣可以清楚顯現典型的多狹縫繞射結果；也就是我們不僅可以清楚地看見繞射主極大，還可以輕易地觀察到發生在繞射點附近的次極大 (secondary maxima)，而此細微結構不易在 CD-R 中觀察到 (見圖(四))。



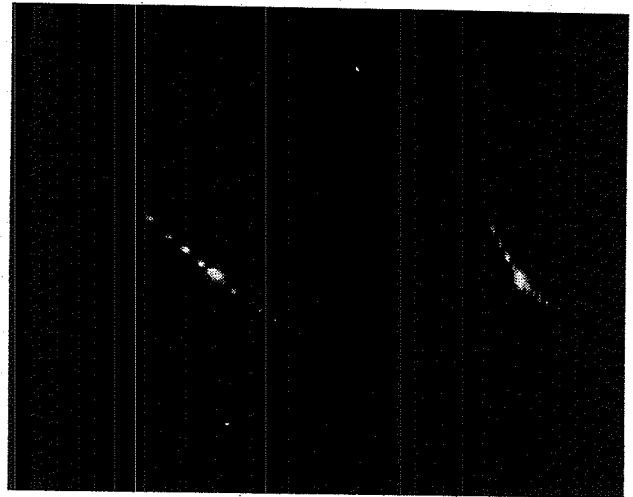
(a)



(b)

圖(四)：左側為一階繞射點，右側為二階繞射點。(a) CD-ROM，(b) CD-R。

(二) CD-R 的繞射圖樣較為複雜。由圖四(b)中我們可以觀察到 CD-R 第一階繞射點附近有類似圖(四)(a) CD-ROM 的次極大干涉條紋，不過當我們試著慢慢傾斜光碟片時 (即入射光不再是正向入射光碟片)，CD-ROM 與 CD-R 的繞射圖樣變化行為就不大一樣了：CD-ROM 繞射點與干涉條紋會如預期的一起



圖(五)：傾斜光碟片使入射光不為正向入射的第一階(右)、第二階(左)繞射點。

平移，但 CD-R 的繞射圖樣變化就不是這麼一回事了，我們會觀察到如圖(五)的情形，且隨著光碟片傾斜角度的改變，繞射點附近的光點鏈條會以繞射點為圓心轉動，我們認為其機制應與 CD-R 凹洞深度的傾斜狀況有關。儘管 CD-ROM 與 CD-R 的軌道類似圖(一)所示之 CD 結構，但是它們的規格不盡相同，使得繞射現象具有些微差異；當然，進一步的確認將有助於我們對圖(四)繞射圖形差異的解釋，只是這類表面結構的觀察，有賴如電子顯微鏡設備的使用，這是我們目前無法作更進一步探討的原因。

三、入射光波長量測：

我們改採一般市面販售的雷射投影筆作為光源，並利用 CD-ROM 作為光柵，其實驗架設仍然與圖(二)相同。在定性觀察的部分，我們發現利用氦氖雷射與雷射投影筆作為入射光源時，兩者繞射圖形最顯著的差異導因於雷射同調度的不同——使用同調度較差的雷射投影筆所得的繞射圖形無法顯現次極大條紋。在定量量測方面，已知 CD-ROM 溝槽間距大約為 $1.6 \mu\text{m}$ ，吾人可同樣利用(1)式反推雷射投影筆之光波長，其結果列於表(五)。根據第一階繞射點的相關數據，換算其波長大約為

表(五)：由 CD-ROM 一、二階繞射求入射光波長

D (m)	$n = 1$		$n = 2$	
	y_1 (m)	λ (nm)	y_2 (m)	λ (nm)
0.100	0.080	594	0.240	615
0.150	0.128	638	0.390	634
0.200	0.172	632	0.509	629
0.250	0.218	640	0.650	634
0.300	0.253	622	0.769	631
0.350	0.297	625	0.893	630
0.400	0.338	623	1.015	628
0.450	0.387	632	1.142	628
0.500	0.435	638	1.285	631

626 nm，而利用第二階繞射的數值，可得波長為 629 nm，根據雷射投影筆所標示的波長（約在 650 nm），其誤差皆在 3-4% 左右。

生活中有許多物品都可以是最實際且良好的教學器材，就像本實驗一樣，我們只需要使用一些容易取得的日常用品，便可以驗證繞射的知識並觀察新的現象；整個實驗的架設簡單，卻可以帶給學生一些重要的觀念；而整個現象的觀察，更可以提高學生的學習興趣，使學生獲得難忘的學習經驗。本文前兩位作者為本系學生，他們在實驗課中受到啟發，進一步利用課外時間測試數位影音光碟 (digital versatile disc, 簡稱 DVD) 的繞射性能，而發現在不採用更短波長之入射光的情況下，只能觀察到第一階繞射主極大，因為 DVD 的軌距為 $0.74 \mu\text{m}$ ，且其凹洞的大小較 CD 來的更小。有興趣的讀者，不妨利用本文提供的方法，觀察可複寫式光碟 (compact disc-rewritable, 簡稱 CD-RW) 及影音光碟 (video compact disc, 簡稱 VCD) 的繞射現象。

參考資料：

1. 黃昭勇，〈台灣 CD-R 廠商爭取調降權利金費率功虧一簣〉，《光電科技》第 24 期 89-93 頁，2001 年。
2. 楊武智，《CD 技術大全》台北：全華科技圖書股份有限公司，1999 年。
3. Kettler, J.E., The compact disk as a diffraction grating, Am. J. Phys., Vol. 59: 367-377, 1991.
4. Kruglak, H., Diffraction demonstration with a compact disc, Phys. Teach., Vol. 31: 104, 1993.
5. Nöldeke, C., Compact disc diffraction, Phys. Teach., Vol. 28: 484-485, 1990.
6. Rossing, T.D. and Chiaverina, C.J., Light Science: Physics and the Visual Arts, New York: Springer, pp.263-265, 1999