

# 光學實驗：CD-ROM 的繞射現象

李偉<sup>1</sup> 陳惠玉<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中原大學應用物理研究所 <sup>2</sup>中原大學物理系

(投稿日期：90年10月6日；修正日期：91年1月4日；接受日期：91年2月7日)

## 摘要

中原大學物理系於八十九學年度第二學期光學實驗課中安排了〈光學實驗 DIY〉的單元，其目的在訓練學生具備將所學應用於生活問題解決，使學生得有機會體認光柵繞射原理及相關公式簡化前後的適用性，並就唯讀式電腦光碟片的繞射現象進行定性觀察與定量測量，針對所觀察到的現象作深入討論。我們發現，藉由這樣的單元設計，正統教學實驗可以變得更加活潑，不但能引發學生主動學習的興趣，更能提供學生更大的思考空間，從中發現學習的樂趣。我們相信本文所討論的實驗內容，也適用於現階段國民小學自然科教學示範或實驗活動之課程設計。

關鍵詞：自然科學、物理教育、實驗課程

個人電腦 (PC) 與光碟 (compact disc) 的使用在現今社會已漸成爲不可或缺的日常生活用品，處於 e 世代的莘莘學子對於電腦光碟片的萬丈光芒自然毫不陌生，不論在初等、中等或高等教育環境裡，稍具自然或物理背景訓練的學生或能將光碟片展現的七彩與光學現象產生聯想，卻也不免要問：「這是什麼光學原理？」爲了使學生能更進一步了解此現象的產生原因，中原大學物理系在八十九學年度第二學期的光學實驗課中，特別在實驗手冊裡的第一個實驗編列一項無特定主題、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，包括唯讀式電腦光碟片 (compact disc - read-only memory; 簡稱 CD - ROM)，自行設計實驗內容以驗證所學；這種非傳統教學實驗不僅能刺激學生思考，並且訓練學生的觀察能力，一個學期以來在近八十名修課學生中普遍獲得正面的迴響。

光碟繞射實驗中我們可將 CD-ROM 視爲一反射式光柵 (reflection diffraction grating) 以進行光碟片繞射觀察並探討光柵繞射公式的適用性；就我們所知，現有相關文獻所探討的均爲聲碟—或稱數位音樂光碟 (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)。實驗之初，我們有必要先讓學生了解光碟片的構造，如此便能明白它的繞射原理。以 1980 年誕生的聲碟爲例 (Rossing and Chiaverina, 1999)，其儲存資訊的方式是利用 CD 上的凹洞 (pit) 爲記號，而這些訊號坑的長度爲  $0.8 - 3.0 \mu\text{m}$  (微米；即百萬分之一公尺)，寬度約  $0.5 \mu\text{m}$ ，深度爲  $0.1 \mu\text{m}$ ，凹洞的排列的方式爲一螺旋式的 (spiral) 溝槽，軌距 (track pitch) 爲  $1.6 \mu\text{m}$ ；同屬唯讀式光碟的 CD - ROM 與上述 CD 的載訊原理相同，都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。

實驗所需主要器材包括：波長  $\lambda$  爲  $633 \text{ nm}$  (奈米；即十億分之一公尺) 之氦氖雷射 (He-Ne laser)、二極體雷射 (diode laser)—我們採用波長標示爲  $650 \text{ nm}$  之雷射投影筆、CD-ROM 及捲尺。根據 Nöldeke (1990) 的方法，可採用實驗架設如圖 (一) 所示。

## 壹、軌距的測量

利用氦氖雷射作爲入射光源，觀察並記錄繞射點—繞射主極大 (primary

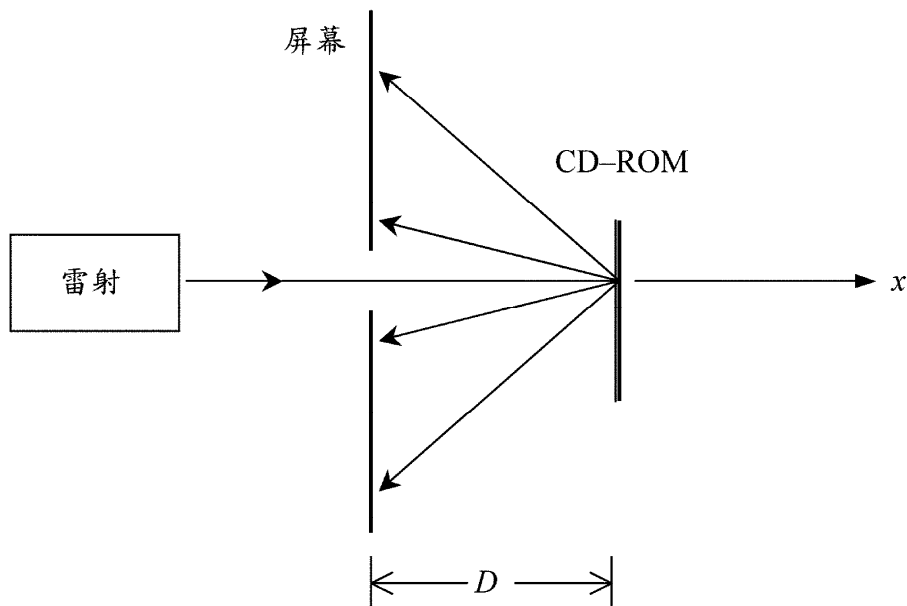
## 光學實驗：CD-ROM 的繞射現象

maxima) 一的相關數據，藉此計算出溝列間距，即軌距。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

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

吾人便可計算出光碟溝槽的間距  $d$ 。不過一般進行真的狹縫繞射實驗時，實際上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（一） 光碟繞射實驗配置

表（一）列出屏幕上繞射光點位置的實驗測量數據，以及利用公式(1)與公式(2)所得的相關軌距，分別以  $d^{(1)}$ 、 $d^{(2)}$ 表示。

表（一） CD-ROM 的軌距測量數值

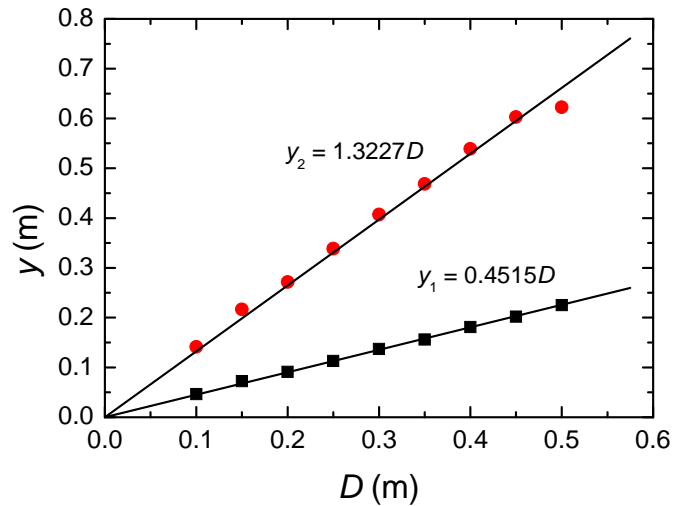
$D$ (m)	$n = 1$			$n = 2$		
	$y_1$ (m)	$d^{(1)}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d^{(2)}$ ( $\mu\text{m}$ )	$y_2$ (m)	$d^{(1)}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d^{(2)}$ ( $\mu\text{m}$ )
0.1000	0.0465	1.501	1.361	0.1415	1.550	0.909
0.1500	0.0725	1.454	1.309	0.2165	1.540	0.893
0.2000	0.0910	1.528	1.391	0.2715	1.572	0.945
0.2500	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

其實在軌距上依工業標準—即  $d = 1.6 \mu\text{m}$ —所製作出的唯讀式光碟，其軌距在允許範圍內仍不免會有些微的誤差，儘管如此，表中數值顯示：與標準值相較，以  $\tan \theta$  的概念所推導出的結果具有極大的誤差，這些軌距值自然不可採信。根據理論預測的結果，吾人必須考量：就固定屏幕距離而言，當光柵間距愈小時，繞射角  $\theta$  愈大，使得簡化的光柵公式變得不適用，因此對於在本實驗中所使用光軌間距在微米等級的各類光碟片而言，我們絕對不能採用所謂的近似公式(2)。

數學上，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。若進一步利用前述表中所列數據作圖，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 CD-ROM 儲存訊號的軌距，其值為  $1.54$  ( $n = 1$ ) 或  $1.59$  ( $n = 2$ )，其實驗誤差皆在 4%的範圍內，見圖（二）。

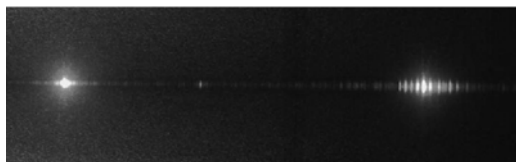


圖（二） CD-ROM 繞射實驗數據圖

為有效進行本項實驗並減低實驗誤差，操作中宜配合適當的支架或夾具之使用，以利光路的調整並確保測量數據的可靠性與精確度。

## 貳、繞射圖樣的觀察

由 CD-ROM 所獲得的繞射圖樣（diffraction pattern）可以清楚顯現典型的多狹縫繞射結果；換句話說，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），如圖（三）左邊的光點屬第一階繞射，右邊的光斑為第二階，其繞射細部結構明顯可見。



圖（三） CD-ROM 繞射圖形

## 參、入射光波長測量

之前兩個部分的實驗所採用的氦氖雷射對一般想自行完成課外相關實驗活動的學生而言取得不易，因此我們也可以利用一般市售雷射投影筆作為光源，並利用 CD-ROM 作為光柵。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，不過對於軌距的量測而言，使用哪一種雷射並不會有所影響。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：

$$\lambda = \frac{y_n d}{n \sqrt{D^2 + y_n^2}}, \quad (4)$$

其結果列於表(二)。根據第一階繞射點的相關數據，換算其波長大約為 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。

表(二) 由 CD-ROM 的第一、二階繞射數據求入射光波長

D (m)	n = 1		n = 2	
	y <sub>1</sub> (m)	λ (nm)	y <sub>2</sub> (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

## 光學實驗：CD- ROM 的繞射現象

本文所述旨在分享作者的實驗教學心得，儘管我們在學習成效上未作深入研究，但深信生活中有許多物品都可以是最經濟、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，卻可以提高學生的學習興趣，帶給學生重要的觀念，使學生獲得難忘的學習經驗。我們同時相信，電腦普及的結果，使現階段就讀於國民小學的學生得有機會接觸電腦光碟，而本文所述的現象觀察，甚至定量實驗，都適合引用於國小自然科教學示範或實驗活動。本文作者已就軌距同為  $1.6\ \mu\text{m}$ 、最短訊號坑為  $0.843\ \mu\text{m}$  之多讀單寫式電腦光碟片（compact disc - recordable；簡稱 CD - R）進行類似教學實驗可行性之研究，其結果已發表於《物理教育》學刊（陳惠玉、楊凱賢、李偉，2001）。另有本系學生在光學實驗課中受到啟發，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，發現只能觀察到第一階繞射主極大，這是因為 DVD 的軌距只有  $0.74\ \mu\text{m}$ ，且其凹洞也比 CD 的凹洞小，所以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點。

### 參考文獻

1. 陳惠玉、楊凱賢、李偉（2001）：電腦光碟片繞射實驗。《物理教育》，5，46 - 51。
2. 楊武智（1999）：《CD 技術大全》。台北市：全華科技圖書股份有限公司。
3. Kettler, J.E. (1991). The compact disk as a diffraction grating. *Am. J. Phys.* 59, 367-377.
4. Kruglak, H. (1993). Diffraction demonstration with a compact disc. *Phys. Teach.* 31, 104.
5. Nöldeke, C. (1990). Compact disc diffraction. *Phys. Teach.* 28, 484-485.
6. Rossing, T.D. and Chiaverina, C.J. (1999). *Light Science: Physics and the Visual Arts*. New York: Springer, pp.263-265.

# Optics Experiments: CD-ROM Diffraction

Wei Lee      Hui-Yu Chen

Department of Physics, Chung Yuan Christian University

## Abstract

“Do-It-Yourself Optics Experiments” was arranged as part of Optics Laboratory in the undergraduate physics program offered at Chung Yuan Christian University in the second semester of the academic year of 2000–2001. The objectives were to train the students enrolled in the course to be able to apply what they learned from the textbook to solving everyday-life problems and to recognize the principles underlying grating diffraction as well as validity of the associated simplified diffraction formula. “Do-It-Yourself Optics Experiments” allowed the learners to carry out both qualitative observation of and quantitative measurements on CD-ROM diffraction. Furthermore, it provided them with the opportunity to discuss in depth the observed phenomena. It is found that a formal teaching laboratory with an appropriate design of this kind make the teaching more vivid, inspiring and challenging and, in turn, result in the fun of learning. It is believed that the experiments described in this paper would also be suitable for classroom demonstration or experimental activities in the current natural-science curriculum of elementary schools.

Key words : Natural Science, Physics Education, Laboratory Activities