

# 光盘彩色线现象研究

DarkSharpness

2023.06.17

## 摘要

## 摘要

当光盘接受来自灯的光线照射后，表面可以清晰地看到一条彩色的亮线。我们对这一现象进行了理论解释，并设计实验与理论计算进行比对。

**Keywords:** 光栅

## Contents

1 引言	1
2 实验原理	2
3 实验设计	4
4 实验结果	4
5 结果讨论	5

## 1 引言

CD 和 DVD 是广泛使用的光学存储介质，利用光的反射和衍射原理进行数据的存储和读取。这些光盘由聚碳酸酯基片、具有反射性金属层（通常是铝）和保护涂层组成。反射层包含一条螺旋状的凹坑和平地轨迹，代表二进制信息，如图 1 所示。

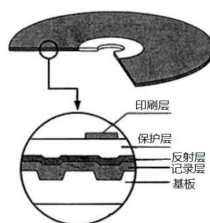


图 1: 光盘轴面剖面局部放大图



图 2: CD 在白光台灯照射下的照片

当光照射到 CD 或 DVD 表面的时候, 我们常常可以观察到其表面出现彩色的光, 如图 2 所示。

当白光从不同的角度入射, 在不同的角度观察, 我们可以看到不同颜色的彩色线, 而颜色在光盘上的分布位置也会随之改变。这种现象可能的一种解释是, CD 和 DVD 表面的凹坑和平地呈周期性排布, 构成了类似反射光栅的光学结构。由于光的衍射, 不同颜色的光在空间中有不同的光强分布, 因此在不同位置, 我们能观察到不同颜色的光。

为了研究这一现象, 我们将固定入射角度, 并观察不同角度观察到的颜色。通过分析实验数据, 确定反射角度和观察到的颜色之间的模式和相关性。此外, 我们建立了理论模型来定量计算衍射效应, 用实验验证该模型, 进而对现象做出合理的解释。

## 2 实验原理

CD 和 DVD 表面的凹坑和平地围绕圆心, 沿半径方向呈周期性排布, 如图 3 所示。

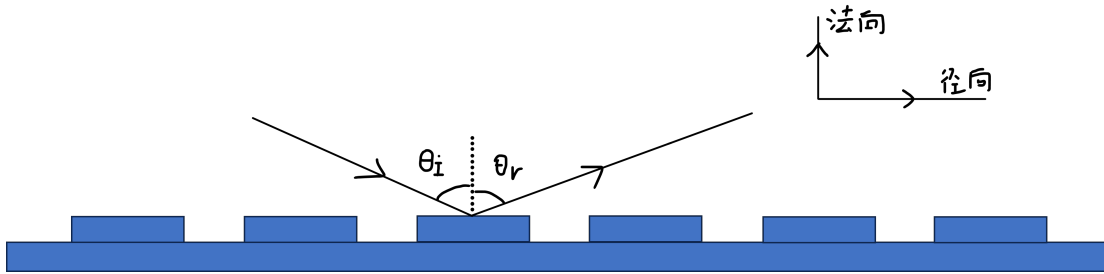


图 3: 光盘反射面光路图

由于凸起部分的反射率要大于凹坑部分, 且当入射角度较大, 射入凹坑的光线在内部会多次反射, 出射光的强度较弱, 可以忽略。因此, 我们只需考虑凸起部分带来的影响即可。

假设某照射点的入射角为  $\theta_i$ , 反射角为  $\theta_r$ 。在相对该照射点距离为  $x$  处, 设新的入射角、反射角为  $\theta'_i, \theta'_r$ , 设光源距离入射点距离为  $D$ 。如图 4 所示。

此时, 两束光的光程差为  $\Delta s = D(\sec \theta_i - \sec \theta'_i)$ , 且满足约束条件  $D(\tan \theta'_i - \tan \theta_i) = x$ 。由于入射点较远, 满足  $D \gg x$ 。因此, 可近似  $\theta'_i = \theta_i + \Delta \theta$ 。由约束条件,  $D \sec^2 \theta_i \Delta \theta = x$ 。代入, 得光程差为:

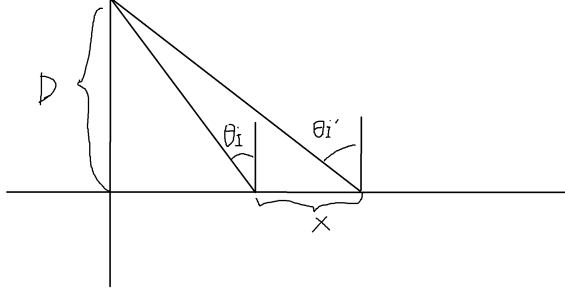


图 4: 光盘反射面光路图

$$\begin{aligned}
 \Delta s &= D(\sec \theta_i - \sec \theta_i') \\
 &= D \sec^2 \theta_i \sin \theta_i \Delta \theta \\
 &= x \sin \theta_i
 \end{aligned}$$

反射光同理。因此，当照射点的距离差为  $x$ ，光程差满足  $\Delta s = x(\sin \theta_i - \sin \theta_r)$ 。

对于某个凸起，假设其长度为  $s$ ，记其左端点相对坐标为 0，相对光程差为 0。由于  $D \gg x$  我们可以假设入射光强矢量大小在  $[x, x + \Delta x]$  范围内近似为  $\alpha \Delta x$ ，其中  $\alpha$  近似为常数。设入射光为单色光，角波数为  $k$ ，记  $\beta = k(\sin \theta_i - \sin \theta_r)$ 。此时，该突起上的合光强矢量为：

$$\begin{aligned}
 \vec{E} &= \int_0^s \alpha \exp(-i\beta x) dx \\
 &= \frac{\alpha}{i\beta} (1 - \exp(-i\beta s)) \\
 &= \frac{2\alpha}{\beta} \sin \frac{\beta s}{2} \exp(-i\frac{\beta s}{2})
 \end{aligned}$$

因此每个凸起内的衍射效应，可以等效为在  $\frac{s}{2}$  处的一束光，即相位同凸起中心处的一束光。由于  $D \gg x$ ，因此不同凸起对于同一反射角的反射光强也近似相同。

对于不同凸起之间的衍射效应，我们将最中间的凸起编号为 0，相对光程差为 0。假设所有凸起编号范围为  $[-N, N]$ ，相邻凸起中心的距离为  $d$ ，设每束反射光强矢量大小均为  $E_0$ ，则合光强矢量为：

$$\begin{aligned}
 \vec{E} &= \sum_{n=-N}^N E_0 \exp(-i\beta nd) \\
 &= E_0 \frac{\sin(\frac{2N+1}{2}\beta d)}{\sin(\frac{1}{2}\beta d)}
 \end{aligned}$$

因此，总光强为：

$$I = I_0 \frac{\sin^2(\frac{2N+1}{2}\beta d)}{\sin^2(\frac{1}{2}\beta d)}$$

分析该函数，如图 5 所示。

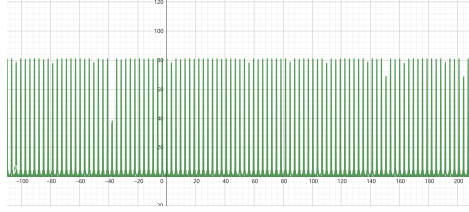


图 5:  $N = 4, \beta = 1$  的函数图像

可以看出，当  $\frac{\beta d}{2} \rightarrow m\pi (m \in \mathbb{Z})$  时， $I \rightarrow I_0(2N+1)^2$ 。在附近展开，设  $\delta = \frac{\beta d}{2} - m\pi \rightarrow 0$ ，则当  $N \gg 1$ ，满足  $I \approx I_0(2N+1)^2(1 - \frac{1}{3}N^2\delta^2)$ 。可以看出，光强在极大值点附近快速衰减。因此只有特定的方向才能观察到明显的衍射条纹。而极大值的条件为  $\frac{\beta d}{2} = m\pi$ ，即：

$$k(\sin \theta_i - \sin \theta_r)d = 2m\pi$$

而角波数  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ，因此代入，得到极大值条件为：

$$\theta_r = \arcsin(\sin \theta_i - m \frac{\lambda}{d})$$

其中，当  $m = 0$ ， $\theta_i = \theta_r$  为满足反射定律的特殊情况。

### 3 实验设计

#### 实验设备

标准的 CD 和 DVD；一盏台灯，选用条形台灯充当线光源；直尺等测量工具；白纸若干。

#### 实验方法

为了排除环境光的干扰，我们在暗室内进行试验。我们选择桌面作为水平面，将光盘竖直放置，用光线照射光盘平面与通过光盘中心的水平面相交得到的半径区域，如图 6 所示。同时，我们在反射光所在一侧，平行于光盘面放置白纸，用来观察反射光的情况。

为了达到理想的效果，我们对光盘进行遮光处理，使仅有一小部分区域作为反射面。需要注意的是，该区域不宜过窄或过矮，否则反射光太弱，难以观测，会增大误差。该区域也不宜过宽，否则不能满足入射距离  $D \gg x$  的条件，因此不可近似认为入射角处处相等，进而带来误差。该区域也不宜过高，否则在偏离该半径圆心角为  $\alpha$  处，光栅的方向不再沿水平面，光栅的横向有效长度  $d' = d \cos \alpha$  存在偏差，进而会带来误差。

在放置完成设备以后，调整台灯位置，控制并固定以大角度入射，并尽可能的使反射光强度明显以在纸上有清晰的图像。

为了定量的测量反射角，我们在白纸上标注了刻度，记录光盘中心的投影所在的刻度为 0，固定白纸到光盘反射面的距离。通过测量光线在白纸上的位置和光盘中心的投影的水平距离，用三角函数求出反射角度。

而为了控制入射角，我们在光盘前放置小障碍物，此时入射角即为障碍物的影子与光盘水平半径的角度。

## 4 实验结果

在实验中，我们固定入射角度  $\theta_i = 70^\circ$ ，白纸平面到光盘平面的距离为  $h = 20.0\text{cm}$ ，测量色带中心位置，得到以下数据：

表 1: DVD 实验数据记录表

条纹级数 $m$	色带中心位置 $x/\text{cm}$		
	蓝色	绿色	红色
0			
1			
2			

表 2: CD 实验数据记录表

条纹级数 $m$	色带中心位置 $x/\text{cm}$		
	蓝色	绿色	红色
0			
1			
2			

## 5 结果讨论

## 参考文献

- [1] 这是引用文献