

掠射光线下的光盘

组员: 江语、李紫燕、王鲲鹏、徐子绎、张世奇

作者: 徐子绎

2023.06.17

摘要

当光盘接受来自掠入射的灯光照射后，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，并设计实验与理论模型进行比对，实验结果证明了其合理性。

Keywords: 光盘; 衍射

Contents

1 引言	2
2 理论模型	2
3 实验设计	5
3.1 实验设备	5
3.2 实验方法	5
4 实验结果	6
5 结果讨论	7
5.1 数据处理	7
5.2 误差分析	8

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。

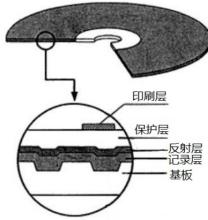


图 1: 光盘轴面剖面局部放大图

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。



图 2: CD 在白光台灯照射下的照片

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，并观察不同角度反射光的颜色。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 理论模型

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。

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。

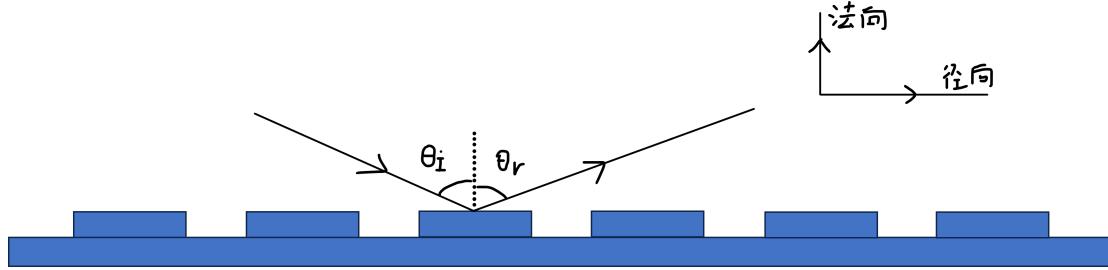


图 3: 光盘反射面光路图

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

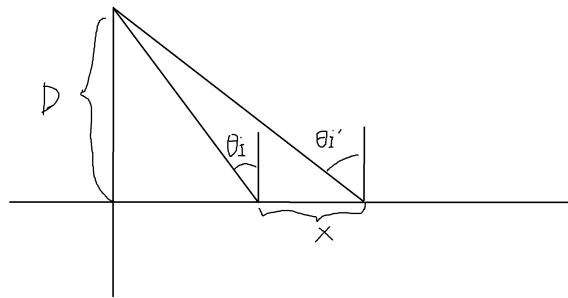


图 4: 光盘反射面光路图

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：

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

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，假设其总长度为 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 α 近似为常数。设入射光为单色光，角波数为 k ，记 $\beta = k(\sin \theta_i - \sin \theta_r)$ 。在 x 处，光程差 $\Delta = x(\sin \theta_i - \sin \theta_r)$ ，因此相位差 $\Delta\phi = -k\Delta = -\beta x$ 。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。

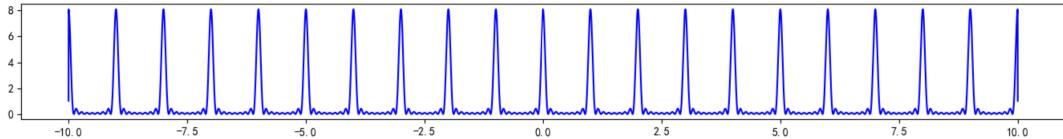


图 5：函数图像

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

3.1 实验设备

标准的 CD 和 DVD (外加遮光涂层); 一盏台灯, 选用条形台灯充当光源; 直尺等测量工具; 白纸若干。



(a) 涂有遮光图层的 CD 和 DVD



(b) 条形台灯

图 6: 部分实验器材展示

3.2 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 α 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。当然, 为了更好的对比度, 我们将入射光遮挡, 限制为一条平行的线光源, 减少白纸上接收到的漫反射的背景白光, 从而提高彩色线的清晰程度。

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。



图 7: 实验装置示意图 (实际没有这么近, 而且入射光也会受到一定的遮挡)

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 $h = 10.0\text{cm}$, 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/cm		
	蓝色	绿色	红色
1	2.9	2.2	0.3
2	-2.3	-5.8	—

表 2: CD 实验数据记录表

条纹级数 m	色带中心位置 x/cm		
	蓝色	绿色	红色
1	9.5	6.7	6.5
2	5.0	3.0	1.5

下图为实验图片。需要注意的是, 虽然图中彩色线条不太清晰, 但是实际观测时, 其实彩色线非常清晰 (尤其是第一级), 而肉眼观测的结果就更加清晰了。



图 8: 实验图片 (实际效果比图片里清晰很多)

5 结果讨论

5.1 数据处理

借助三角关系 $\tan \theta_r = \frac{x}{d}$ ，我们可以求出反射角。

表 3: DVD 实验数据处理表

条纹级数 m	出射角 $\theta_r/^\circ$		
	蓝色	绿色	红色
1	16.2	12.1	1.7
2	-12.7	-29.9	—

表 4: CD 实验数据处理表

条纹级数 m	出射角 $\theta_r/^\circ$		
	蓝色	绿色	红色
1	43.5	34.0	33.0
2	26.6	16.7	8.5

我们取蓝光波长为 450nm，绿光波长为 550nm，红光波长为 650nm。查阅资料^[1]可知，DVD 的凸起间隔长度 $d = 740\text{nm}$ ，而 CD 则为 $d = 1600\text{nm}$ 。由此，我们可以画出下图：

可以看出，理论值与实际的偏差不大，因此可以认为，我们的理论基本可以解释该现象。

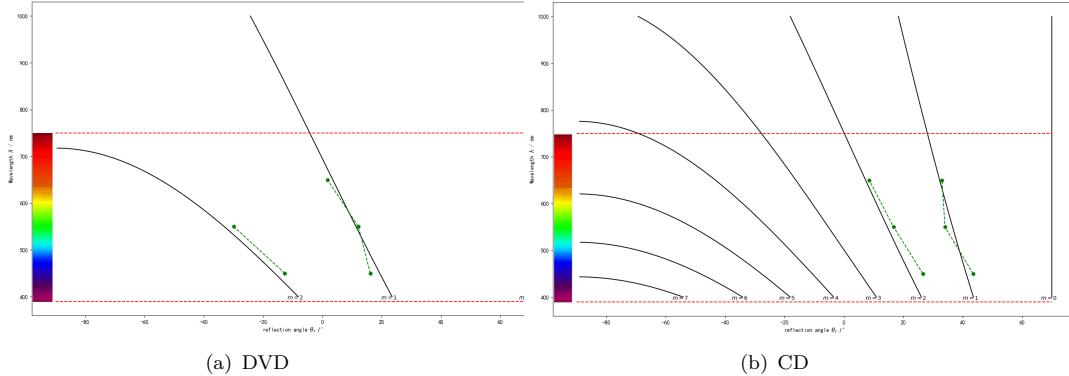


图 9: 实验数据与理论值

5.2 误差分析

尽管理论值与实际的偏差不大，但该实验依然有很大的改进空间。首先，对于光波长的界定，本实验采用的是近似估算，并非精确值。同时，照射在光盘上的区域过高或过窄都会引入一定的误差。因此，后续实验可以通过使用发射确定波长的光波的激光笔作为平行点光源，一方面减少波长估算带来的巨大误差，一方面可以减小入射面的大小进而减少偏离带来的误差。

同时，由于该实验中角度均为间接测量，通过三角关系得到，而实验器材又相对比较简陋，因此，可能在测量角度时带来相当的误差。为了减小误差，后续实验可以借助分光计精准确定光路，从而极大地减小角度测量方面的误差。

总之，由于条件限制，该实验相对比较粗糙，但是依然得到了不错的结果，理论模型基本与实际吻合，可以认为该模型能够比较精确的描述光在光盘表面产生的衍射现象。而后续实验可以采用激光笔作为更好的点光源，并用分光计更准确地测出角度，进而减少误差。

参考文献

- [1] A compact disc under skimming light rays(2018). <https://doi.org/10.1119/1.5021904>