

大中衔接

CD 光盘光栅衍射中的三类彩色线现象分析

於高冲 陈永翔 鲍成章 徐 刚

(浙江省萧山中学, 浙江 杭州 311200)

摘 要 本文从干涉、干涉与衍射共同作用、反射角度分析光盘在白炽灯光掠入射情况下所产生的三类彩色线现象。以绿线的产生为例, 本研究基于光盘构造从不同入射方式出发, 讨论不同入射方式对 CD 光盘上的彩色线位置产生的影响, 解释三类彩色线产生原因, 分析其产生条件和影响因素。通过实验本研究对理论模型进行了验证, 研究发现: 第一、二类彩色线产生在本质上受光阑限制影响, 并对光强分布式的形式产生影响, 其中从基板上方入射光线会形成第一类彩色线, 主要受干涉因子影响; 而从基板侧方入射光线会形成第二类彩色线, 同时受干涉与衍射因子影响; 第三类彩色线的由于中央金属环的反射作用, 产生在视线方位。

关键词 彩色线; CD 光盘; 干涉; 衍射

ANALYSIS OF THREE KINDS OF COLOR LINE IN GRATING
DIFFRACTION OF CD DISCSYU Gaochong¹ CHEN Yongxiang¹ BAO Chengzhang² XU Gang²

(Zhejiang Xiaoshan High School, Hangzhou, Zhejiang 311200)

Abstract Three types of color line phenomena generated by optical discs under grazing incidence of incandescent light are analyzed from the perspectives of interference, the combined effect of interference and diffraction, and reflection. This paper takes the generation of green lines as an example, based on the construction of optical discs and starting from different incident modes, discusses the impact of different incident modes on the position of color lines on CD discs, explains the reasons for the generation of three types of color lines, and analyzes the conditions for their generation and the factors that affect them. The theoretical model was validated through experiments. It is found that the generation of the first and second types of color lines is essentially influenced by aperture limitations and affects the form of light intensity distribution. The incident light from above the substrate forms the first type of color lines, which are mainly affected by interference factors. While, the incident light from the side of the substrate forms the second type of color line, which is also affected by interference and diffraction factors. The third type of color line is generated in the line of sight direction due to the reflection effect of the central metal ring.

Key words color lines; CD; interference; diffraction

收稿日期: 2023-07-22

通信作者: 鲍成章, 浙江省萧山中学一级教师, 610330609@qq.com。

引文格式: 於高冲, 陈永翔, 鲍成章, 等. CD 光盘光栅衍射中的三类彩色线现象分析[J]. 物理与工程, 2024, 34(3): 123-130.

Cite this article: YU G C, CHEN Y X, BAO C Z, et al. Analysis of three kinds of color line in grating diffraction of CD discs[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(3): 123-130. (in Chinese)

在观察光盘表面时,常会发现其表面呈现多条彩色线现象如图 1(a)所示。为使现象明显,使用来自白炽灯的光并选择具有大入射角(掠入射)的光线的方式照射光盘时,可以观察到更为清晰的彩色线。对于该现象的已有研究,主要多为分析光盘所产生的多种光学现象^[1-2],分析基于光盘构造所产生衍射亮点特点^[3],或依据光盘光栅计算光盘相关参数^[3-4],但缺乏涉及颜色产生的相关研究。如图 1(b)(c)(d)所示,在通过增加光阑遮光并视角,可以独立观察到光盘中的三类彩色线现象。

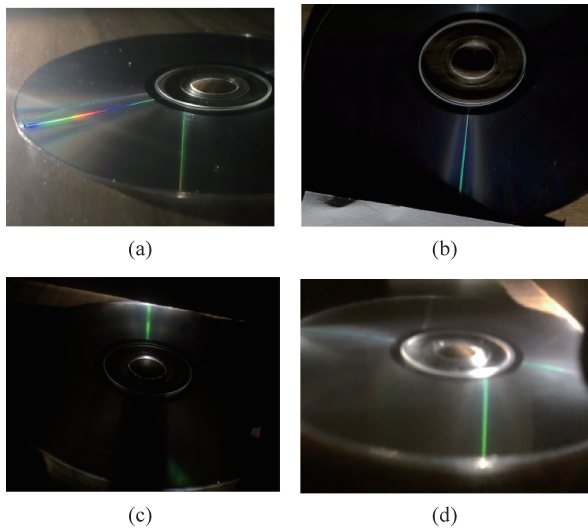


图 1 CD 光盘上产生的三类彩色线现象
(a) CD 光盘上的多条彩色线;(b) 第一类彩色线;(c) 第二类彩色线;(d) 第三类彩色线

其中第一、二类彩色线出现在入射光线方位,二者伴随产生,位置差距在 0.01 弧度以内,而通过增加光阑,可将第二类彩色线单独分离出来。第三类出现在视线方位。本研究中以绿线为例,分析光盘构造,结合理论与实验从干涉、衍射、反射作用分析不同入射情况下的光强分布,定量解释三类彩色线产生的原因。

1 理论分析

本研究中所定义的符号意义如表 1 所示。

1.1 光盘结构、记录层光道结构

本研究所分析的光盘为未经刻录的可记录光盘(CD-R),由基板、记录层、反射层、保护层、印刷层、中央金属环六部分组成^[5],如图 2 所示。

表 1 理论分析中所定义的符号及意义

符号	意义	符号	意义
A	光栅表面正弦状的振幅	n	透明基板介质折射率
N	光栅级数	d	光栅常数
α	入射光在光盘面上投影线与光源和光盘中心连线在光盘平面上投影的夹角	β	出射光在光盘平面上投影线与光源和光盘中心连线在光盘平面上投影的夹角
θ	入射光相对光盘平面的高度角	φ	出射光相对光盘平面的高度角
r_0	光盘中心空心部分的半径	r	平面电磁波通解中的光程差
L	光程	l	光源与观察点连线到光盘中心距离
ΔL	光程差	m	位于未被轨道覆盖区域上方的轨道数量
I	光强	ω	电场振荡频率
x	光线射至光栅上交点横坐标	λ	波长(其中绿光波长 550nm)
x_1	与光栅相切的光线与光栅另一交点横坐标	x_n	光线与光栅切点横坐标

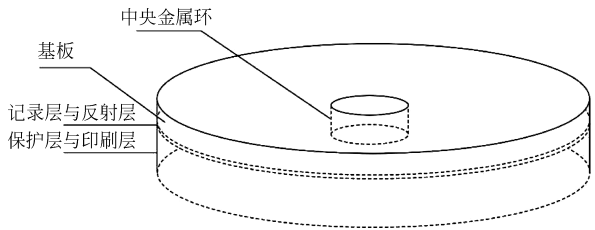


图 2 CD-R 光盘结构

其中与本研究现象所相关的有:

- (1) 基板,其材料为聚碳酸酯(PC),透射率高,且存在一定的厚度,为光线经过的第一层;
- (2) 记录层与反射层,是刻录信号的地方,其中凹坑结构所形成的光道是数据存储的关键,根据相关研究中通过原子力显微镜对光盘微结构的探测可知,其结构呈刻沟槽组成螺旋状的轨道如图 3(a)所示^[6]。其沟槽轮廓沿径向(x 轴)分布,由于小范围内径向变化较小,故本研究中近

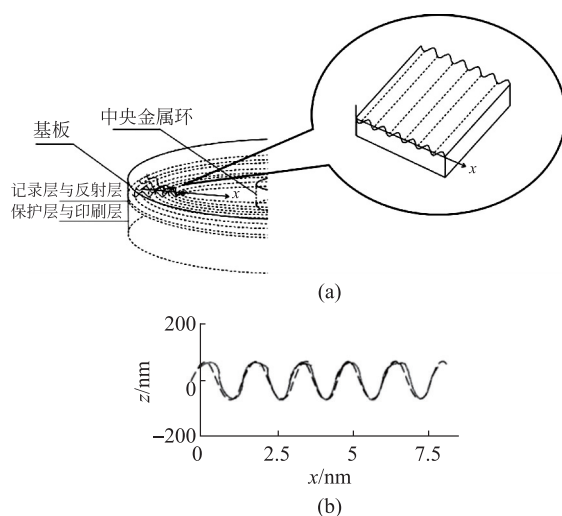


图3 CD-R光盘记录层与反射层微观结构
(a) CD-R光盘沟槽组成螺旋状的轨道；(b) 径向剖面轮廓(与文献[6]中的剖面近似)

似为径向平行的沟槽。而其径向剖面轮廓近似于正弦函数,而如图3(b)所示^[6],构建剖面方程 $y = A \sin \frac{2\pi}{d}x$ 。立体结构下,记录层沟道近似同心圆状,反射层以高反射率材料制成并紧贴在记录层下,故反射层与记录层可视为光栅。

(3) 金属环,位于光盘中心位置有着较高的反射率^[5]。

根据《可录类光盘 CD-R 常规检测参数》^[7],以及已有研究的测定结果^[5-6,8],其中各结构的机械参数如表2所示。

表2 CD-R 相关机械参数

参数名称	参数数值
光栅表面正弦状的振幅 A	137.5nm
光栅级数 N	500
透明基板介质折射率 n	1.59
光栅常数 d	1.5 μ m

1.2 自透明基板上表面入射：第一类彩色线的产生机理

对于同一结构下出现的三类彩色线现象,其主要是由于不同的入射方式所导致的。其中第一类彩色线的入射方式为:掠入射的光线透明基板上表面照射至记录层与反射层,发生干涉现象而看到彩色线。为解释该种情况,构建模型如图4(a)所示,需要构建四个角:入射光与出射光在光

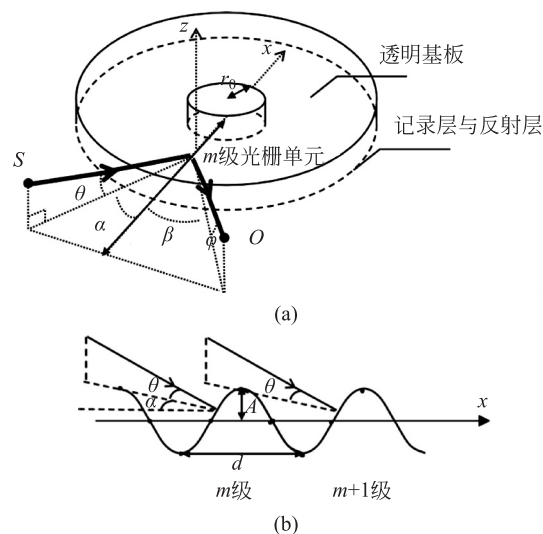


图4 自透明基板上表面入射情况
(a) 光线照射光盘光路图；(b) 光线照射沟槽光程示意图

盘面上投影线与光源和光盘中心连线在光盘平面上投影的夹角 α 、 β ；入射光与出射光相对光盘平面的高度角 θ 、 φ ,其中大入射角(掠入射)即入射高度角 θ 趋向于0。S点为光源,O点为观察者位置,改变两点位置即可改变四个角大小。

1.2.1 第一类彩色线(以绿线为例)的光强分布

为解释第一类彩色线产生原因,以绿线为例,代入绿光波长,分析绿线的光强分布与上述角参数的关系。为方便研究,将立体问题转化为平面问题,(1)可控制 $\theta = \varphi$,改变 α 进行分析,即在同一高度下,改变水平夹角观察彩色线;(2)可控制 $\alpha = \beta = 0$,改变 φ 进行观察,即在同一竖直面改变竖直入射角观察彩色线。

1) 对于 $\theta = \varphi$ 的情况

如图4(b)所示,计算照射至沟槽上 m 级上的光程。

由几何关系计算由光源 S 至沟槽上 m 级光栅单元入射处的光程

$$L = \frac{\sqrt{l^2 + (r_0 + md)^2} + 2l(r_0 + md)\cos\theta}{\cos\alpha} \cdot n \quad (1)$$

在大入射角即考虑 θ 为掠入射角的下,式(1)近似为

$$L \approx \frac{(l + (r_0 + md)\cos\theta)n}{\cos\alpha} \quad (2)$$

计算第 m 级和第 $m+1$ 级光线的光程差为

$$\Delta L_1 \approx \frac{n \cdot d \cos\theta}{\cos\alpha} \quad (3)$$

由平面电磁波通解 $\tilde{E} = E_0 e^{-i(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r)}$, 令 $m = 1$ 时光程为零, 则第 K 级光程差为 $k\Delta L_1$, 并将各电磁波叠加得

$$\tilde{E} = \sum_{k=1}^N E_0 e^{-i(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} k \Delta L_1)} \quad (4)$$

对式(4)取实部得

$$E_m = E_0 \frac{\sin\left(\frac{N\pi d \cos\theta}{\lambda \cos\alpha} \cdot n\right)}{\sin\left(\frac{\pi d \cos\theta}{\lambda \cos\alpha} \cdot n\right)} \quad (5)$$

对式(5)平方即得光强分布式

$$I = I_0 \left[\frac{\sin\left(\frac{N\pi d \cos\theta}{\lambda \cos\alpha} \cdot n\right)}{\sin\left(\frac{\pi d \cos\theta}{\lambda \cos\alpha} \cdot n\right)} \right]^2 \quad (6)$$

通过 matlab 作出光强 I 随角 α 的分布情况如图 5(a)所示。

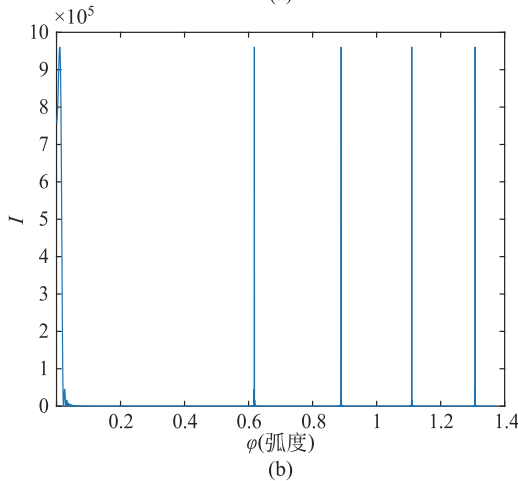
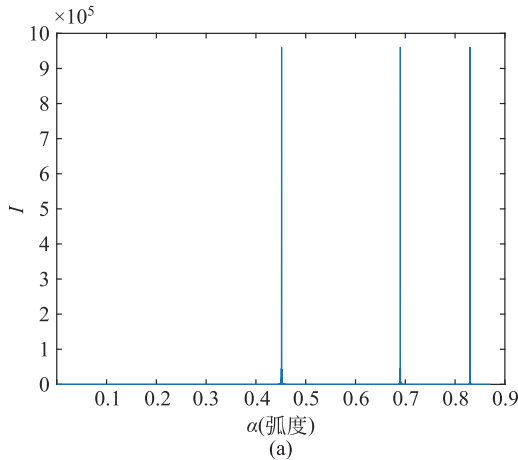


图5 第一类绿线光强 I 随角 α 与角 φ 的分布情况
(a) $\theta = \varphi$ 情况下光强 I 随角 α 的分布情况; (b) $\alpha = \beta = 0$ 情况下光强 I 随角 φ 的分布情况

2) 对于 $\alpha = \beta = 0$ 的情况

当 $\alpha = \beta = 0$ 时, 如图 4(b)所示, 光程差为

$$\Delta L_2 = n \cdot d (\cos\varphi + \cos\theta) \quad (7)$$

由 1.2.1.2 中类似计算过程, 代入电磁波表达式叠加得到光强为

$$I = I_0 \left[\frac{\sin\left[N \frac{\pi}{\lambda} d (\cos\varphi + \cos\theta) \cdot n\right]}{\sin\left[\frac{\pi}{\lambda} d (\cos\varphi + \cos\theta) \cdot n\right]} \right]^2 \quad (8)$$

通过 matlab 作出光强 I 随角 φ 的分布关系如图 5(b)所示。

上述计算, 给出了两种“光源-观察”情境下的所产生的绿线光强 I 随角分布情况: 在 $\theta = \varphi$ 即观察者和光源在同一高度情况下, 在 $\alpha = 0.46, \alpha = 0.68, \alpha = 0.83$ 三个观察角方位可观察到绿线; 在 $\alpha = \beta = 0$ 即观察者和光源在同一竖直面情况下, 在 $\varphi = 0, \varphi = 0.61, \varphi = 0.89, \varphi = 1.11, \varphi = 1.32$ 五个观察角方位可观察到绿线。若实验与该结果符合则可说明第一类彩色线产生的原因为: 光线自透明基板上表面入射至沟槽上所发生的干涉现象。为使后续实验观测与讨论方便, 后续均讨论 $\alpha = \beta = 0$ 即观察者和光源在同一竖直面情况的彩色线产生情况。

1.3 自透明基板侧面入射: 第二类彩色线的产生机理

由于光盘存在一定厚度, 故存在掠入射光线从侧面射入光盘的情况。第二类彩色线产生的入射方式为: 掠入射光从侧面射入透明基板后照射到底部的记录层与反射层上发生干涉、衍射现象。为使现象更加明显, 可以增加如图 6(a)所示的光阑。

1.3.1 第二类彩色线(以绿线为例)的光强分布

由于光盘较薄, 光线发散角受光阑限制大, 可认为入射光为较严格的平行光, 入射到光栅表现时需同时考虑干涉与衍射的影响。由于透明基板较薄, 入射光为近似的平行光, 通过对平行光进行光程差的计算与光场强度的相位叠加, 以得到绿光光强与光盘倾角及出射角之间的关系。

令 $\alpha = \beta = 0$, 如图 6(b)所示, 入射至 x 处的光线与入射至 $x + dx$ 处的光线的光程差为

$$d\Delta L_3 = \left[(1 + \cos\varphi) - \frac{2\pi A}{d} \sin\varphi \cos\left(\frac{2\pi x}{d}\right) \right] \cdot n dx \quad (9)$$

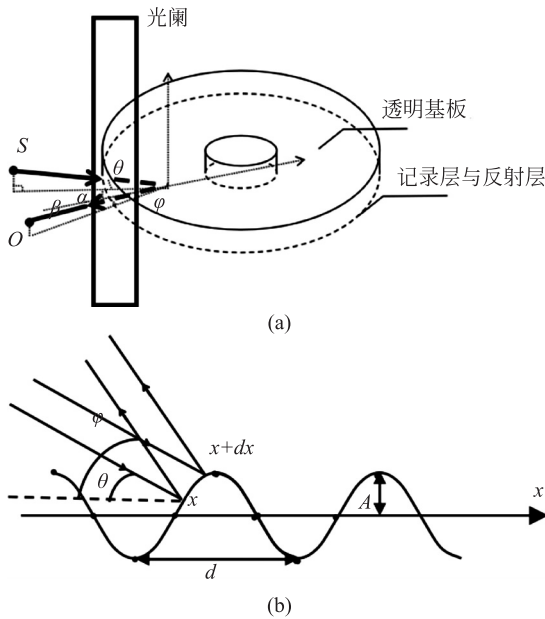


图6 自透明基板上表面入射情况
(a) 光线照射光盘光路图; (b) 光线照射沟槽光程示意图

对式(9)由 x_1 积分至 x 处,定义射至 x_1 光线的光程为 0,得 x 处光线光程

$$\Delta L_3 = n \cdot \int_{x_1}^x \left(1 + \cos\varphi - \frac{2\pi A}{d} \sin\varphi \cos \frac{2\pi}{d}x \right) dx \quad (10)$$

计算得

$$\Delta L_3 = \left[(1 + \cos\varphi)(x - x_1) - A \sin\varphi \left(\sin \frac{2\pi}{d}x - \sin \frac{2\pi}{d}x_1 \right) \right] \cdot n \quad (11)$$

其中 x_0 与 x_1 满足

$$\begin{cases} -\tan\theta = \frac{2\pi A}{d} \cos \frac{2\pi}{d}x_0 \\ A \sin \frac{2\pi}{d}x_1 = -\tan\theta \cdot x_1 + \tan\theta \cdot (x_0 - d) + A \sin \frac{2\pi}{d}x_0 \end{cases} \quad (12)$$

掠入射情境下,对 ΔL_3 在 $x=x_1$ 做泰勒展开至线性项

$$\Delta L_3 = \left[\left(1 + \cos\varphi - \frac{2\pi A}{d} \sin\varphi \cos x_1 \right) (x - x_1) \right] \cdot n \quad (13)$$

基于惠更斯-菲涅尔原理^[9],可推得

$$\tilde{E}_3 = E_0 e^{-i(\omega t - kx)} \int_{x_1}^{x_0} \frac{e^{i\frac{2\pi}{\lambda}\Delta L_3}}{x_0 - x_1} dx \quad (14)$$

再计算干涉因子,对式(14)取实部,得到衍射因子

$$\frac{\sin \left[\frac{\pi}{\lambda} \left(1 + \cos\varphi - \frac{2\pi A}{d} \sin\varphi \cos x_1 \right) (x_0 - x_1) \cdot n \right]}{\frac{\pi}{\lambda} \left(1 + \cos\varphi - \frac{2\pi A}{d} \sin\varphi \cos x_1 \right) (x_0 - x_1) \cdot n} \quad (15)$$

由 1.2.1.2 中类似计算可得干涉光程差

$$\Delta L_4 \approx n \cdot d (\cos\varphi + \cos\theta) \quad (16)$$

将式(16)代入平面电磁波通解 $\tilde{E} = E_0 e^{-i(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}r)}$,并将各电磁波叠加得

$$\tilde{E} = \sum_{k=1}^N E_0 e^{-i(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}k\Delta L_4)} \quad (17)$$

取实部得到干涉因子

$$\frac{\sin \left[N \frac{\pi}{\lambda} d (\cos\varphi + \cos\theta) \cdot n \right]}{\sin \left[\frac{\pi}{\lambda} d (\cos\varphi + \cos\theta) \cdot n \right]} \quad (18)$$

结合式(15)与式(18)的干涉衍射因子,获得光强分布

$$I' = I'_0 \left\{ \frac{\sin \left[N \frac{\pi}{\lambda} d (\cos\varphi + \cos\theta) \cdot n \right]}{\sin \left[\frac{\pi}{\lambda} d (\cos\varphi + \cos\theta) \cdot n \right]} \right\}^2 \cdot \left\{ \frac{\sin \left[\frac{\pi}{\lambda} \left(1 + \cos\varphi - \frac{2\pi A}{d} \sin\varphi \cos x_1 \right) (x_0 - x_1) \cdot n \right]}{\frac{\pi}{\lambda} \left(1 + \cos\varphi - \frac{2\pi A}{d} \sin\varphi \cos x_1 \right) (x_0 - x_1) \cdot n} \right\}^2 \quad (19)$$

可以发现式(19)中第一项平方项为干涉影响,第二项为衍射影响,二者结构对称且有较好的相似性。利用 matlab 作出作出光强 I 随角 φ 的分布关系如图 7 所示。

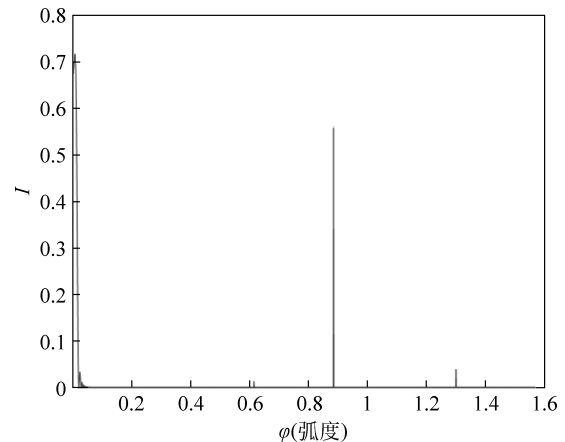


图7 第二类绿线光强 I 随角 φ 的分布情况

上述理论给出了绿线光强 I 随观察角分布情况:在 $\alpha=\beta=0$ 情况下,将在 $\varphi=0, \varphi=0.89, \varphi=1.30$ 三个观察角方位可观察到绿线。若实验与该结果符合则可说明第二类彩色线产生的原因:光线自透明基板侧面入射至沟槽上发生明显干涉、衍射现象。根据上述理论可以看出在 $\alpha=\beta=0$ 情况下,第一类绿线与第二类绿线光强极大值在三个观察角上($\varphi=0, \varphi=0.89, \varphi=1.30$)非常接近,相差在 0.01 弧度以内,这与现实观察到两类绿线所产生的现象一致。

1.4 经金属环反射:第三类彩色线的产生机理

在各个观察角度都能观察到彩色线,且方向与视线方向一致,一端在视线与金属环交点。此种彩色线为第三类彩色线,其成因是金属环良好的反射性能使点光源发出的发散光线在金属环各位置发生反射,人眼观察到视线所对应的彩色线对应在该几何光路。光线经反射改变方向后射至沟槽上发生干涉衍射等现象,出现彩色线。

2 实验验证

通过实验对上述理论中所提及不同参数情况下的三类彩色线已经进行观察。

2.1 实验操作

2.1.1 设备搭设

分光计与光盘搭设的示意图如图 8 所示,其中保证光源以大入射角掠入射进行并操作分光计观察不同角度下所形成的彩色线情况。

其中分光计采用 ZOC 浙光 JJY1 型分光计,仪器的测角精度 $1'$,平行光管、望远镜系统物镜焦距:170mm,望远镜系统目镜焦距:24.3mm。光谱仪采用瞬达便捷式光栅光谱仪,可检测光谱范围为 380~800nm。

2.1.2 三类彩色线的分离

将光盘置于水平面上,首先通过光阑对透明基板侧面进行遮光处理,分离出第一类绿线并使用分光计与光谱仪进行测量。然后改变光阑位置,仅留出透明基板侧面透光,分离出第二类绿线并使用分光计与光谱仪进行测量。撤去光阑,改变观察角度,对第三类绿线进行观察测量。

2.1.3 通过分光计与光谱仪观察三类绿线位置

操作分光计观察三类绿线出现时的出射角并记录,其中 550nm 为绿光中心波长处,且是人眼

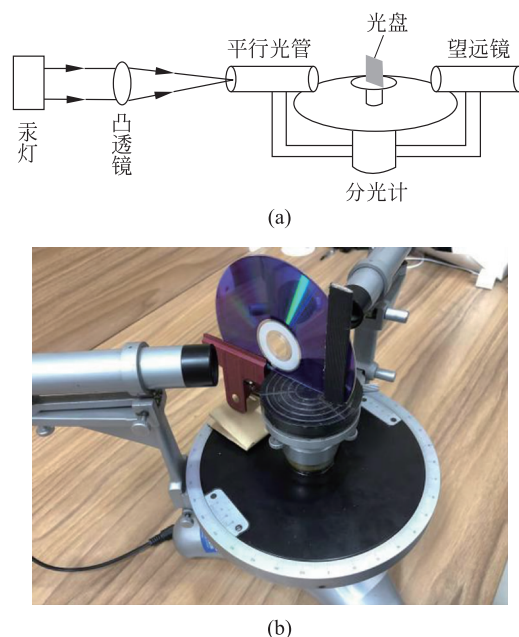


图 8 实验设备搭设

(a) 分光计实验示意图; (b) 分光计搭设实物图

较最敏感波长处。在实验中考虑 $\lambda=550\text{nm}$ 的光作为绿线所在位置的估计,首先通过人眼粗测绿线中心波长出现位置。同时以光谱仪测定对应谱线波长调整角度以观测到 550nm 波长绿线。

2.2 实验数据

2.2.1 第一类绿线中 $\theta=\varphi$ 情况下的观测数据

实验测量角与理论预测角数据如表 3 所示。

表 3 第一类绿线中 $\theta=\varphi$ 情况下理论值与实验值对比

级数	1	2	3
理论角 φ /弧度	0.46	0.68	0.83
实验角 φ /弧度	0.48	0.69	0.85
偏差	4%	2%	2%

2.2.2 第一类绿线中 $\alpha=\beta=0$ 情况下的观测数据

实验测量角与理论预测角数据如表 4 所示。

表 4 第一类绿线中 $\alpha=\beta=0$ 情况下理论值与实验值对比

级数	0	1	2	3	4
理论角 φ /弧度	0	0.61	0.89	1.12	1.30
实验角 φ /弧度	0	0.64	0.87	1.13	1.25
偏差	0%	4%	2%	1%	4%

2.2.3 第二类绿线中 $\alpha=\beta=0$ 情况下的观测数据

实验测量角与理论预测角数据如表 6 所示。

表 6 第二类绿线中 $\alpha=\beta=0$ 情况下理论值与实验值对比

级数	0	1	2
理论角 φ /弧度	0	0.89	1.30
实验角 φ /弧度	0	0.87	1.25
偏差	0%	2%	3%

3 讨论

3.1 第一类与第二类彩色线成因的对比

对比两类彩色线(绿线)产生的理论预测角与实验观测角,如图 9(a)(b)所示。

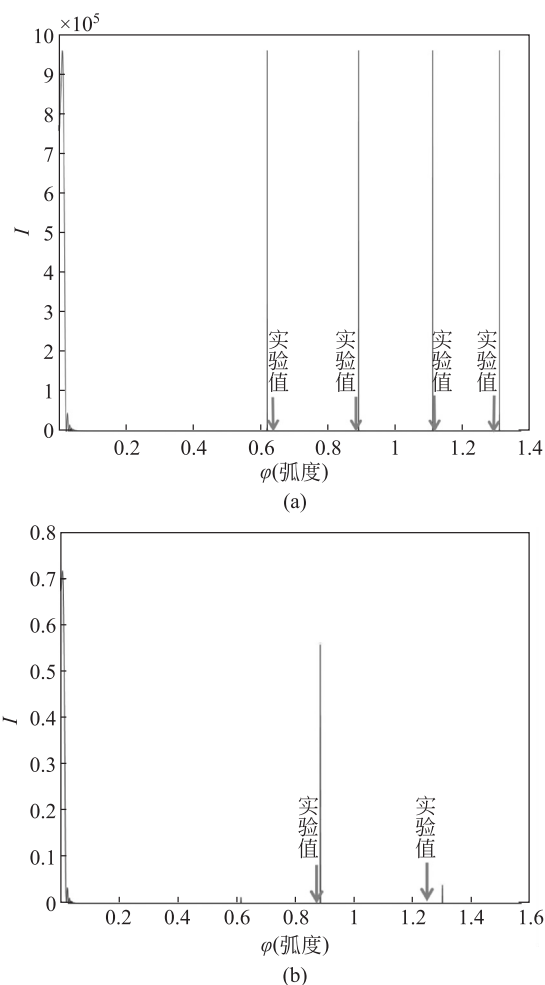


图 9 两类绿线的理论预测与实验结果对比

(a) 第一类绿线对比; (b) 第二类绿线对比

通过理论与实验结果进行比较,可以发现理论预期与实验较为相符。这可以说明第一类绿线的成因是光线自透明基板上表面入射至沟槽上发生明显干涉现象被观察到。第二类绿线的成因是

光线自透明基板侧面入射至沟槽上发生明显干涉、衍射现象被观察到。在观测角位置上,在共有的三级绿线上($\varphi=0$ 、 $\varphi=0.89$ 、 $\varphi=1.30$),两类彩色线的理论值与实验值都比较接近,这是符合现实观察中两类彩色线二者伴随产生,位置差距在 0.01 弧度以内的。

3.2 对于第一、二类绿线光强分布以及缺级现象讨论

对比图 9 中一、二类彩色线的光强分布情况,发现第二类彩色线相较于第一类彩色线存在缺级现象(缺 $\varphi=0.61$ 、 $\varphi=1.11$ 两级),如图 10 中圈出部分所示。对比两类绿线产生的理论式(8)与式(19),根据光栅衍射强度分布是衍射因子和干涉因子的乘积,可以明显发现式(19)较式(8)存在衍射项

$$\left\{ \frac{\sin \left[\frac{\pi}{\lambda} \left(1 + \cos \varphi - \frac{2\pi A}{d} \sin \varphi \cos x_1 \right) x_0 - x_2 \cdot n \right]}{\frac{\pi}{\lambda} \left(1 + \cos \varphi - \frac{2\pi A}{d} \sin \varphi \cos x_1 \right) (x_0 - x_1) \cdot n} \right\}^2 \quad (20)$$

对式(20)衍射项的成因可作出如下解释。从入射侧面入射较之上表面入射而言受到光阑对光线的较大限制,该限制导致侧面入射光成角 θ 改变极小,近似为平行光入射,衍射效应明显,出现缺级现象进而导致无法在实验中观测到绿线入射而言无光阑限制,入射角 θ 变化较大,导致衍射非线性程度较大,几乎所有光能集中于主极大的几何光路,且无法发生缺级现象。同时较大的角度变化使基尔霍夫倾斜因子影响显著,更进一步趋向于几何光路,因此第一类绿线中无须考虑等衍射因子。

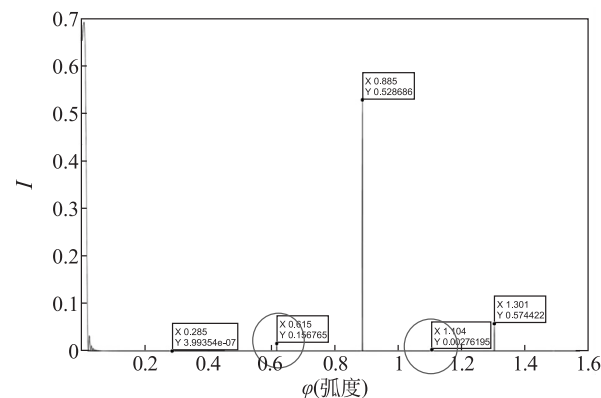


图 10 第二类绿线的缺级现象

4 结语

本研究通过模型建立,数值模拟,实验验证对CD光盘在掠入射光线下观察到彩色浅的现象给出了定量解析,有以下发现。

(1) 基于光源与观察点所形成的两对高度角与水平夹角可以描绘光线以不同入射情况进入光盘的情景,不同的入射情况形成了不同类型的彩色线现象。

(2) 通过遮挡透明基板侧面后使用白炽灯以掠入射方式照射光盘而产生的第一类彩色线的成因主要是光线在光盘沟槽表面发生的干涉。

(3) 通过遮挡透明基板上表面后使用白炽灯以掠入射方式照射光盘而产生的第二类彩色线的成因是光线在光盘沟槽表面干涉衍射共同作用,值得注意的是基于此给出的式(19)不仅与光栅光强分布式十分相似,结构对称,与实验中的绿线出现的弧度以及缺级现象也吻合。

(4) 金属环对现象产生的影响在于反射点光源发出的发散光线,使其于各处均能观察到对应的彩色线,故因反射产生第三类彩色线。

参 考 文 献

- [1] 鲁斌. 光盘上的折射 衍射 偏振实验[J]. 物理通报, 2022(7): 111-113.
LU B. Refractive diffraction polarization experiment on optical disk[J]. Physics Bulletin, 2022(7): 111-113. (in Chinese)
- [2] 王文麒, 乐永康. 光盘结构及实验中的光学现象[J]. 物理实

验, 2013, 33(4): 44-47.

- WANG W Q, LE Y K. [J]. Physics Experimentation, 2013, 33(4): 44-47. (in Chinese)
- [3] 魏波, 黄丽, 辛丽, 等. 居家DIY光栅衍射系列实验[J]. 物理与工程, 2023, 33(2): 131-135.
WEI B, HUANG L, XIN L, et al. DIY grating diffraction series experiments at home[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(2): 131-135. (in Chinese)
- [4] 单会会, 马书炳, 张辉, 等. 基于CD/DVD光盘的光栅衍射演示实验[J]. 物理实验, 2018, 38(2): 34-35+46.
SHAN H H, MA S B, ZHANG H, et al. Demonstration experiment of grating diffraction based on CD/DVD disc[J]. Physics Experimentation, 2018, 38(2): 34-35+46. (in Chinese)
- [5] 陈昱. CD-R光盘常规检测参数和质量控制[J]. 记录媒体技术, 2003(3): 35-39.
CHEN K. Conventional detection parameters and quality control of CD-R Disc[J]. Recording Media Technology, 2003(3): 35-39. (in Chinese)
- [6] 徐琳, 李伯全, 丁建宁, 等. 基于原子力显微镜的光盘表面微结构的检测[J]. 光学仪器, 2008(4): 1-5.
XU L, LI B Q, DING J N, et al. Detection of surface microstructure of optical disc based on atomic force microscopy [J]. Optical Instruments, 2008(4): 1-5. (in Chinese)
- [7] CY/T 38—2007, 可录类光盘CD-R常规检测参数[S]. 行业标准-新闻出版, 2007.
- [8] 黄振永, 林学春, 赖康, 等. 光盘等效光栅常量和存储容量的测量[J]. 物理实验, 2008(1): 5-8.
HUANG Z Y, LIN X C, LAI K, et al. Measurement of e-quivalent grating constant and storage capacity of optical disc[J]. Physics Experimentation, 2008(1): 5-8. (in Chinese)
- [9] 姚启钧. 光学教程[M]. 6版. 北京: 高等教育出版社, 2019: 78.