

2009 年北京市
大学生物理实验竞赛

项目说明

参赛学校 北京邮电大学

参赛题目 测量光盘的物理参数

组队负责人 谢飞鹏

组队成员 张屹宇 付剑雄

北京市大学生物理实验竞赛组委会制

2009 年 5 月

参赛题目	测量光盘的物理参数——等效光栅常数、折射率、光盘容量、厚度			
负责人姓名	性别	出生年月	专业	年级
谢飞鹏	男	1988年4月	电子信息科学与技术	三
手机, email				
队员姓名	性别	出生年月	专业	年级
张屹宇	男	1989年3月	电子信息科学与技术	三
付剑雄	男	1990年2月	电子信息科学与技术	三

设计原理与方法:

时下使用的各种光盘其使用材料和制作工艺各不相同,但主要结构原理是一致的,主要由基板、记录层、反射层、保护层和印刷层等层面构成。本实验主要利用大学所学光学知识,对光盘的部分物理属性进行测量。

本实验测量了光盘的四个参数:(1)等效光栅常数:对于信息道呈螺旋型轨迹分布的光盘,在径向方向上的光道分布相当于一维光栅,其等效光栅常数即是光盘信息记录道间距);(2)光盘容量:所有信息道上可记录的信息量;(3)折射率:光盘表面与反射膜之间物质的平均折射率;(4)厚度:光盘透明介质的厚度以及反射层、保护层和印刷层的厚度总和。

1、等效光栅常数的测量

光栅具有分光作用,利用分光计测量光栅衍射角,计算光栅常数。可利用下面的2种方法进行测量。

①透射法

如图1所示,将光盘的反射面剥去,使光线垂直透射光盘面,读出衍射角 φ ,根据光栅衍射公式 $d \sin \varphi = \lambda$ 可得光栅常数 $d = \lambda / \sin \varphi$ 。这种方法原理清楚,计算简单,但是剥去光盘的反射面对光盘物理结构造成了破坏,因此我们采用第二种方法——反射法。

②反射法

这种方法直接测量光线经过光盘反射时的入射角 θ 和一级衍射角 φ ,在图2所示。利用光栅常数计算公式: $d = \lambda / [\sin \theta - \sin(\theta - \varphi)]$,利用绿光测量光栅常数 d 的步骤如下:

- 测出望远镜与平行光管平行时的位置 θ_1 ;
- 测出中央主极大(反射点)位置 θ_2 ;
- 测出绿光的一级主极大位置 θ_3 ;
- 由 θ_1 、 θ_2 可得入射角 θ 值,由 θ_2 、 θ_3 可得衍射角 φ 。

分光计对测量光线的偏转角度非常准确,因而所得实验结果比较准确。

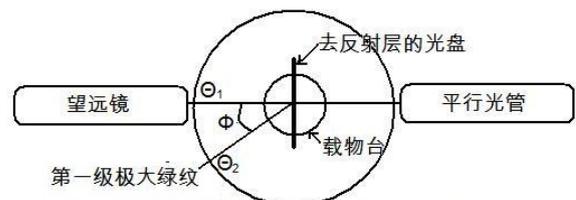


图1、透射法测量光盘光栅常数

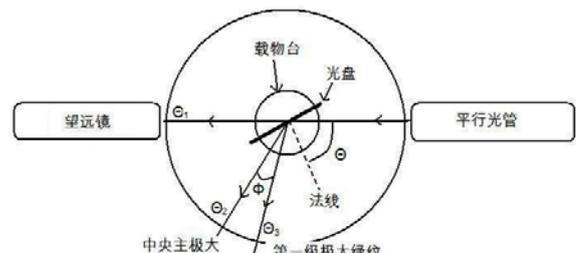


图2、反射法测量光盘光栅常数

2、光盘容量的测量

用读数显微镜测出光盘数据记录区的内径 r 和外径 R 以后，根据测得的光盘的内外平均光栅常数 d 和最小记录点的长度 Δ ，根据公式

$$V = \frac{(R+r) \cdot \pi \left(\frac{(R-r)}{d} + 1 \right)}{\Delta} \div (8 \times 1024 \times 1024), \text{ 可以推算出光盘的容量 } V。$$

3、折射率的测量

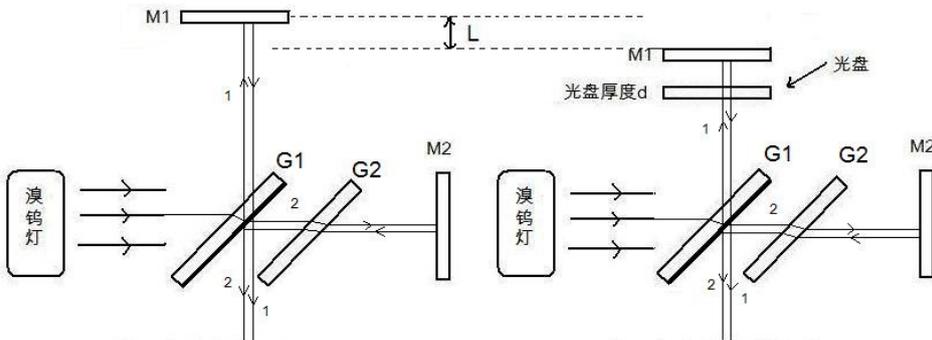


图3、迈克尔逊干涉仪测折射率光路

利用迈克尔逊干涉仪白光干涉来测量光盘的折射率，测量系统如图3所示。剥去光盘的反射面，在白光的照射下，分别在反射镜 M_1 前不加光盘和加光盘的情况下产生干涉，记录两次读数差 L ，根据等光程公式 $2D(n-1) = 2L$ ，可得光盘折射率的计算公式： $n = L/D + 1$ ，其中 D 是光盘的厚度（对 DVD，所测厚度是将光盘分离后，光面部分的厚度）。

因白光相干长度在光波长的数量级，当两次产生清晰的干涉条纹时， M_2 在 G_1 板半反射层中所成虚像 M_2' 与 M_1 之间的距离只有波长量级，所以用此法测量 L 相对误差比较小。

4、厚度的测量

光盘是由多层组成的，待测量的厚度包括：（1）透明介质的厚度；（2）反射层、保护层和印刷层的厚度；（3）信息道的厚度（深度）等。本实验测量前2项。

（1）透明介质的厚度大概为 1.2mm，可以直接用螺旋测微计来测量。下面介绍另一种简单方法：直接用激光照射，观测外表面和内表面 2 层反射膜的等倾干涉条纹，根据等倾干涉公式 $D = k\lambda / 2 / (\sqrt{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i_1)} - \sqrt{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i_2)})$ ，计算介质厚度。

在上一步中，我们已经利用螺旋测微计对光盘透明介质的厚度进行了测量，下面是利用劈尖等厚干涉原理测量光盘反射层、保护层和印刷层形成的薄膜的厚度。

如图4所示，根据劈尖干涉的计算公式 $d_{膜} = N_0 L (\lambda / 2n)$ ，计算薄膜厚度。其中 N_0 是单位长度内干涉条纹数。具体步骤如下：

a. 测出空气劈尖顶角的顶

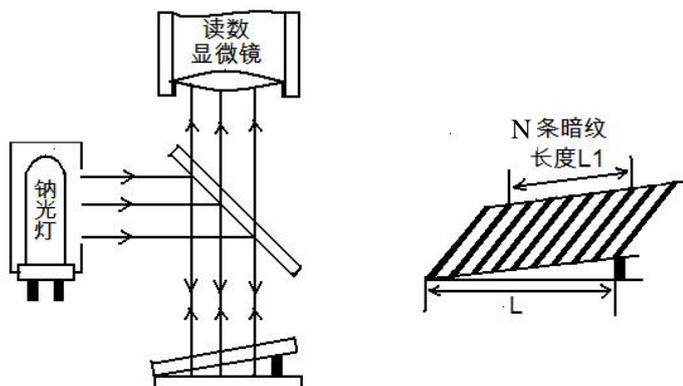


图4、劈尖干涉测薄膜厚度

点到被测薄膜的距离 L;

- b. 移动读数显微镜，测出显微镜物镜中心经过 N 条明纹时走过的距离 L'；
- c. 由 N 和 L'可得单位长度内的干涉条纹数 N_0 ；
- d. 根据公式，计算薄膜厚度 $d_{膜}$ 。

实验仪器与装置:光盘、分光计、汞灯、光学平行平板、迈克尔逊干涉仪、半导体激光器、溴钨灯、扩束镜、读数显微镜、钠光灯、劈尖、螺旋测微计、直尺、刻刀等。

数据测量与分析:

1、光栅常数的测量

①透射法

原始测量数据:

光盘类型	$\theta_{左1}$	$\theta_{右1}$	$\theta_{左2}$	$\theta_{右2}$	φ
紫光 CD-R	67°8'	247°10'	44°21'	224°22'	22°48'
SONY CD-R	67°6'	247°10'	90°4'	270°8'	22°58'
紫光 DVD-R	66°55'	246°54'	14°15'	194°17'	52°39'
SONY DVD-R	65°53'	245°52'	13°41'	193°42'	52°11'

公式: $\varphi = \frac{1}{2} |(\theta_{左1} - \theta_{左2}) + (\theta_{右1} - \theta_{右2})|$; $d = \lambda / \sin \varphi$; $\Delta_{仪} = 2'$

计算结果:

光盘类型	$\lambda(\text{nm})$	d(mm)	相对不确定度
紫光 CD-R	588.995	1.520±0.002	0.13%
SONY CD-R	589.3	1.510±0.002	0.13%
紫光 DVD-R	588.995	0.7409±0.0003	0.04%
SONY DVD-R	588.995	0.7456±0.0003	0.04%

②反射法 (取汞灯绿光的一级主极大, $\lambda = 546.07\text{nm}$ 。)

对二种不同的 DVD 盘进行测量的原始数据如下

紫光 DVD-RW (取内侧、中部靠内、中部靠外和外侧四个位置测量)

位置	$\theta_{左3}$	$\theta_{右3}$	$\theta_{左2}$	$\theta_{右2}$	$\theta_{左1}$	$\theta_{右1}$	θ	φ
内	345°30'	165°27'	31°59'	211°58'	123°55'	304°2'	44°0'	46°30'
中内	339°51'	159°46'	25°28'	205°28'	123°40'	303°42'	40°53'	45°40'
中外	345°2'	165°1'	31°32'	211°30'	123°55'	304°2'	43°46'	46°29'
外	8°40'	188°9'	60°59'	241°0'	123°40'	303°42'	58°0'39"	52°35'

紫光 DVD-R

位置	$\theta_{左3}$	$\theta_{右3}$	$\theta_{左2}$	$\theta_{右2}$	$\theta_{左1}$	$\theta_{右1}$	θ	φ
内	353°59'	173°57'	41°34'	221°55'	123°40'	303°42'	49°1'	47°46'

中内	353° 20'	173° 17'	41° 16'	221° 18'	123° 40'	303° 42'	48° 48'	47° 58'
中外	343° 3'	162° 59'	28° 59'	208° 59'	123° 40'	303° 42'	42° 39'	45° 58'
外	341° 35'	161° 30'	27° 42'	207° 40'	123° 40'	303° 42'	42° 0'	46° 8'

计算公式： $\theta = [180^\circ - (|\theta_{左1} - \theta_{左2}| + |\theta_{右1} - \theta_{右2}|) / 2] / 2$

$$\varphi = (|\theta_{左3} - \theta_{左2}| + |\theta_{右3} - \theta_{右2}|)$$

$$d = \lambda / [\sin \theta - \sin(\theta - \varphi)]$$

计算结果：

光盘类型（包括 DVD 的测量位置）	$d(\mu\text{m})$	相对不确定度
紫光 DVD-RW 内侧	0.7397 ± 0.0006	0.08%
紫光 DVD-RW 中内侧	0.7402 ± 0.0006	0.08%
紫光 DVD-RW 中外侧	0.7387 ± 0.0006	0.08%
紫光 DVD-RW 外侧	0.7298 ± 0.0006	0.08%
紫光 DVD-R 内侧	0.7448 ± 0.0007	0.09%
紫光 DVD-R 中内侧	0.7399 ± 0.0007	0.09%
紫光 DVD-R 中外侧	0.7426 ± 0.0007	0.09%
紫光 DVD-R 外侧	0.7366 ± 0.0006	0.08%

2、容量的测量

光盘类型	1(mm)	2(mm)	3(mm)	4(mm)	r(mm)	R(mm)	容量(MB)
BENQ-CDR	71.831	109.170	154.553	191.628	22.692	59.898	741.09
BENQ-CDR	70.787	107.707	152.994	190.388	22.644	59.800	738.61

$$\text{公式： } V = \frac{(R+r) \cdot \pi}{\Delta} \left(\frac{(R-r)}{d} + 1 \right) \div (8 \times 1024 \times 1024)$$

，其中 Δ 取 0.83 微米，其中 d 是实验 1 中

所得光栅常数，1、2、3、4 位置代表如图 5 所示位置。

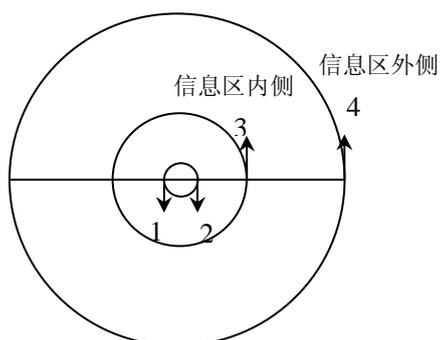


图 5 测量位置图示

3、折射率的测量

光盘透明介质平均厚度 D （零点误差为 0.155mm）

光盘类型	1 (mm)	2(mm)	3 (mm)	4(mm)	5 (mm)	6(mm)	D (mm)
清华紫光 CD-R	1.277	1.279	1.279	1.276	1.280	1.277	1.123 ± 0.004
清华紫光 CD-RW	1.329	1.327	1.329	1.328	1.328	1.331	1.174 ± 0.004
清华紫光 DVD-R	0.754	0.751	0.751	0.753	0.750	0.753	0.597 ± 0.004

光线多走光程的一半 L

L_1		L_2		L (mm)
L_{11} (mm)	L_{12} (mm)	L_{21} (mm)	L_{22} (mm)	
33.42201	33.47816	34.17499	34.17993	0.727375
33.77512	33.80948	34.17580	34.18069	0.385945
33.38105	33.42856	34.15385	34.15947	0.75186

光盘折射率 n

光盘类型	L(mm)	D(mm)	n	相对不确定度
清华紫光 CD-R	0.727375	1.123±0.004	1.648±0.004	0.24%
清华紫光 CD-RW	0.75186	1.174±0.004	1.642±0.004	0.24%
清华紫光 DVD-R	0.385945	0.597±0.004	1.646±0.007	0.42%

4、厚度的测量

等倾干涉测量光盘厚度

光盘类型	R_1 (cm)	R_2 (cm)	L (cm)	n (光盘)	k	D(mm)
清华紫光 DVD-R	2.0	4.9	52.3	1.646	5	0.604
清华紫光 CD-R	2.4	5.2	52.3	1.648	10	1.136
清华紫光 DVD-RW	3.2	5.5	52.3	1.646	5	0.606

其中 R_1 、 R_2 分别是相距 k 条暗纹对应的干涉条纹半径， n 是上一实验内容测得的光盘折射率， L 是光盘距接收屏的距离。

劈尖干涉(取紫光 CD-R 上三个位置的薄膜进行测量)

L_1 (mm)	L_2 (mm)	L (mm)	N	$d_{膜}$ (mm)	相对不确定度
35.598	22.080	34.5	30	22.57±0.16	0.7%
33.221	19.772	33.7	30	22.17±0.16	0.7%
42.885	29.309	36.0	30	23.44±0.18	0.8%

公式： $d_{膜} = [N/(L_1 - L_2)]L(\lambda/2n)$ ，其中 $\lambda = 589.3\text{nm}$ ， $n = 1$ 。

结论：

本实验利用大学所学的光学知识及大学物理实验室中提供的设备，对光盘的道间距、平均折射率、容量、厚度等进行了一系列的测量。实验内容涉及大学物理中光学部分的光栅衍射、迈克尔逊干涉、等厚干涉、等倾干涉、光学放大等基本原理，原理清晰，方法简单。另所有测量内容均采用实验室现有设备，因而投入成本低，且实验结果准确度较高。

制作成本（明细）(*论文这里是参考文献)：

光盘（10 张） 20 元