



热变形表面的光干涉 ——23届亚洲物理奥赛实验第二题解答

韩道福¹ 宋峰²

(1. 南昌大学物理国家级实验教学示范中心, 2. 南开大学物理科学学院)

本实验研究亚克力(PMMA)表面激光热致形变反射引起的干涉射现象,研究内容包括干涉条纹的角直径、条纹数量、相邻条纹角间距与激光功率的关系;产生干涉图案的孔径参数(直径、高度、形状)与激光功率的关系及参考孔径参数的确定。本文在官方提供的答案和评分标准的基础上,对实验解題进行了思路引导与评析。

图1是激光加热亚克力表面时导致形变,在接收屏上产生干涉的干涉图样。

A 部分 临界功率与最外亮纹直径 [0.8分]

干涉图样在特定功率阈值内呈现出可逆性和收缩性,这表明激光功率低于某一特定值(临界功率)时,亚克力板处于热弹性区,此临界功率为屈服强度对应的功率 P_{\max} 。

A.1 确定屈服强度对应的功率 P_{\max} 。

实验操作时,从低功率开始缓慢调节激光二极管电压,逐步增加激光功率,观察干涉条纹的变化,当条纹开始出现不可逆形变(如条纹突然模糊、形状

畸变或熔斑出现)时,记录此时的功率值,即为 P_{\max} 。

实验的难点在于可逆与不可逆临界状态的判断,为了使 P_{\max} 更加准确,需进行多次实验,取 P_{\max} 的平均值(363.6 mW)作为屈服强度对应的功率值,实验数据记录如表1。后续实验激光功率均不能超过此功率值。

本小问共0.3分,评分标准:答案在350~400 mW 0.3分、300~350 mW 0.2分、400~450 mW 0.1分。

A.2 当激光功率设置为屈服强度水平时,确定最外亮条纹的直径。

实验时,将激光功率设定为 P_{\max} (363.6 mW),在距离目标 $L=49.2$ cm的屏幕上,用标尺或图像分析软件多次测量最外亮纹直径,数据如表2,平均值为27.5 cm;将屏幕定位在离目标不同的距离处,分别测量出对应的最外亮纹直径,数据见表3。

表1

I , mA	V , V	P , mW	P_{avg} , mW
97.3	3.74	363.90	
98.3	3.75	368.63	
97.6	3.74	365.02	363.6
96.5	3.73	359.95	
96.7	3.73	360.69	

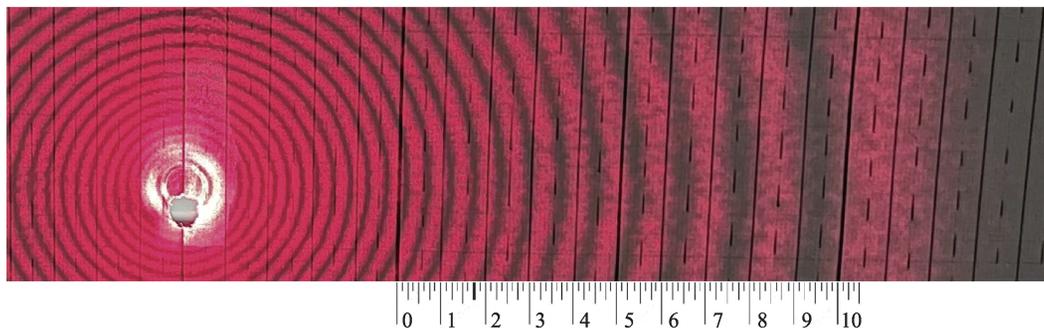


图1 屏幕上的干涉条纹图像

表2 $L = 49.2 \text{ cm}$

D_{out}, cm	$\langle D_{out} \rangle, \text{cm}$
27.0	
26.0	
28.0	27.5
28.5	
28.0	

注意:这里最外亮纹也需要多次测量,且需要明确的是屏幕在距离目标不同时,条纹直径也不同,即条纹有张角,这一点很容易被忽略。

本小问共0.5分,评分标准:通过将屏幕定位在离目标不同距离来确定最外亮纹直径,确定直径值0.3分;目标与屏幕之间的距离为0.2分。

表3

L, cm	49.2	45	40	35	30	25	20	15	10	5
D, cm	27.5	25.6	22.8	19.9	17.1	14.2	11.4	8.5	5.7	2.8

B 部分 条纹直径、数量与功率关系 [3.5 分]

B.1 测量最外亮纹直径及条纹数量与功率的关系,并将结果记录于答题表。

调节激光二极管的电压,以改变激光功率。在小于 P_{max} 的功率范围内选取多个功率点,记录每个功率下的最外亮纹直径和条纹总数,并同时记录电压表、电流表的读数,计算出激光功率。表4给出了参考答案。条纹数量可通过直接计数亮纹或暗纹确定,注意避免遗漏边缘条纹。

本小问共1.5分,评分标准:至少包含10个测量点0.3分、7-9个测量点0.2分、5-6个测量点0.1分;功率范围选取150-300 mW 得0.3分、选取100-150 mW 得0.2分;表中所有行都填满测量电压得

表4

N	I, mA	V, V	P, mW	N
1	81.9	3.62	296.5	4
2	83.3	3.62	301.5	5
3	84.2	3.63	305.6	9
4	84.3	3.63	306.0	10
5	84.9	3.64	309.0	11
6	85.3	3.64	310.5	12
7	86.5	3.65	315.7	13
8	87.6	3.66	320.6	15
9	88.3	3.67	324.1	16
10	89.0	3.67	326.6	19
11	92.1	3.70	340.8	20
12	94.3	3.72	350.8	21

0.2分、填了7-9个电压得0.1分;表中所有行都填满了测量电流得0.2分、只填了7-9个电流得0.1分;计算出所有行的功率得0.2分,7-9个功率得0.1分;有效数字统一则得0.3分。

B.2 绘制最外干涉亮纹直径与功率的关系图。

图2为不同激光功率照射下屏幕上测量的最外干涉亮纹直径(只绘制了部分数据)关系图,从图可以看出,直径随功率线性增加。

本小问共1.0分,评分标准:图中至少由10个测量点得0.4分,实验数据范围至少覆盖75%坐标长度得0.4分,坐标轴上有标签得0.2分。

B.3 绘制干涉条纹数量与功率的关系图。

用表4中的数据,绘制出干涉条纹数量与功率的关系图,如图3所示,条纹数随功率单调增加,斜率反映了形变灵敏度。

本小问共1.0分,评分标准:图中至少由10个测量点得0.4分;实验数据范围至少覆盖75%坐标长度得0.4分;坐标轴上有标签得0.2分)。

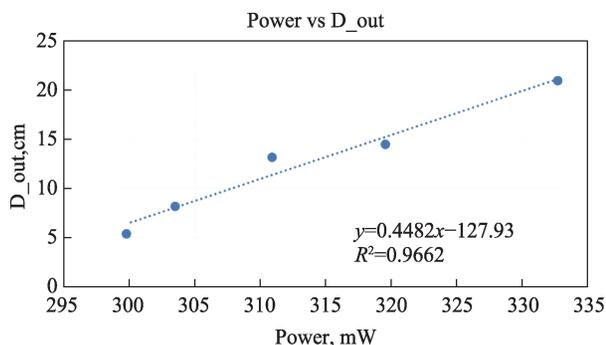


图2 最外干涉亮纹直径与功率的关系图

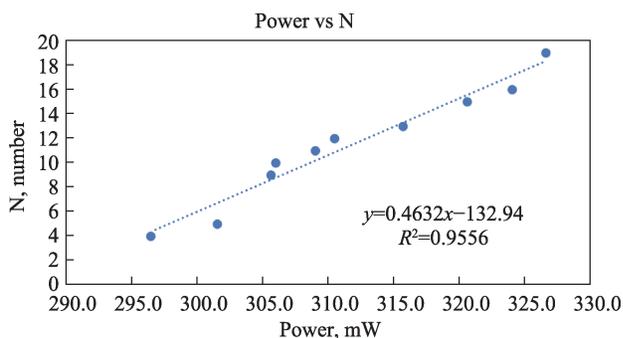


图3 干涉条纹数量与功率关系图

C 部分 角宽度与可见角分析 [3.7分]

C.1 在恒定功率下,测量暗条纹的角宽度(第n级与n+1级条纹光线夹角)和可见角(第n级条纹光线与x轴夹角),将结果填入答题表。

将激光功率值设为某值(如315.5 mW),屏幕定位距离目标49.2 cm,顺次测量屏幕上每个干涉暗纹的半径,用 $\tan(\alpha_m) = R/L$ 计算相邻暗纹的正切值,由此求出可见角 α_m 的值(分别用角度和微弧度),即可计算角宽度 $\Delta\alpha_m$ (分别用角度和微弧度),数据如表5。

本小问共1.2分,评分标准:至少包含10个测量点得0.4分、7-9个点得0.2分、5-6个点得0.2分;

给出实验时的激光功率值得0.1分;确定可见角的值得0.2分;确定角宽度值得0.3分;有效数字统一,得0.2分)。

C.2 绘制可见角与条纹级数的线性关系图。

按表5第1和第5列数据,绘制可见角与条纹级数的非线性关系图,如图4所示;

非线性关系(0.2分):

线性关系(0.8分):

图5为热变形亚克力凸块反射光形成干涉条纹的光路图,中央极大光线最大光程差为2h;对于通过可见角 α_m 观察到的第m条条纹,来自凸块顶部和底部的光线的光程差为:

$$\Delta s_m \approx 2h - OA = n\lambda - R\sin\alpha_m = n\lambda - m\lambda$$

$$R\sin\alpha_m = m\lambda \Rightarrow R = \frac{m\lambda}{\sin\alpha_m}$$

表明可见角正弦值 $\sin(\alpha_m)$ 与观条纹级数m具有线性关系,使用C1部分数据(如表6)绘制可见角正弦值与条纹级数的线性关系图,如图6所示, m' 和m分别是观察到的条纹数和实际的条纹数。

本小问共1.0分,至少包含10个测量点得0.4分,实验数据范围至少覆盖75%坐标长度得0.4分;坐标轴上有标签得0.2分。

C.3 求C.2中图线的斜率和截距。

按图6实验数据做线性拟合得直线方程: $m' =$

表5

m	R, cm	L, cm	$\tan(\alpha_m)$	$\alpha_m, ^\circ$	α_m, mrad	$\Delta\alpha_m, ^\circ$	$\Delta\alpha_m, \text{mrad}$
1	1.0	49.2	0.020	1.16	20.3	0.35	6.1
2	1.3		0.026	1.51	26.4	0.23	4.0
3	1.5		0.030	1.75	30.6	0.35	6.1
4	1.8		0.037	2.10	36.7	0.35	6.1
5	2.1		0.043	2.44	42.6	0.23	4.0
6	2.3		0.047	2.68	46.8	0.35	6.1
7	2.6		0.053	3.03	52.9	0.46	8.0
8	3.0		0.061	3.49	60.9	0.23	4.0
9	3.2		0.065	3.72	65.0	0.46	8.0
10	3.6		0.073	4.18	73.0	0.46	8.0
11	4.0		0.081	4.65	81.2	1.04	18.2
12	4.5		0.100	5.69	99.3	1.04	18.2
13	5.0		0.118	6.72	117.3		

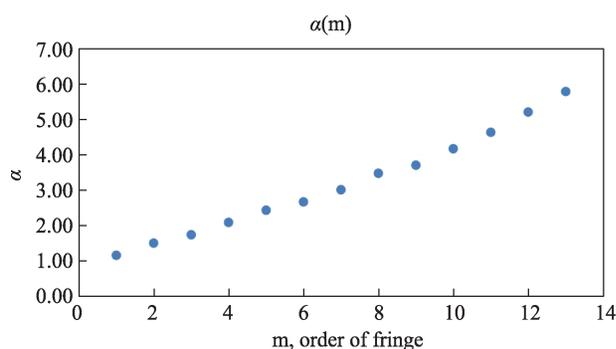


图4 可见角与条纹级数的非线性关系图

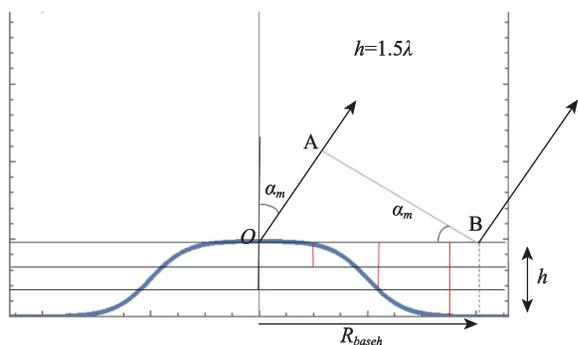


图5 热变形亚克力凸块反射光形成干涉条纹的光路原理

表6

m'	R, cm	L, cm	$\tan \alpha_m$	$\sin \alpha_m$
1	1.0	49.2	0.0203	0.0203
2	1.3		0.0264	0.0264
3	1.5		0.0305	0.0305
4	1.8		0.0366	0.0366
5	2.1		0.0427	0.0426
6	2.3		0.0467	0.0467
7	2.6		0.0528	0.0528
8	3.0		0.0610	0.0609
9	3.2		0.0650	0.0649
10	3.6		0.0732	0.0730
11	4.0		0.0813	0.0810
12	4.5		0.0915	0.0911
13	5.0		0.1016	0.1011

$167.82\sin \alpha_m - 2.1722$, 其斜率为 167.82, 截距为 -2.1722。从上述方程可以看出, m' 和 m 之间的差值为 2.1722, 这是隐藏在中心圆中的条纹数量。根据表6实验数据, $m = m' + 2 = 13 + 2 = 15$ 。

本小问共 0.5 分, 评分标准: 绘制线性回归曲线并计算斜率得 0.3 分; 计算截距值得 0.2 分。

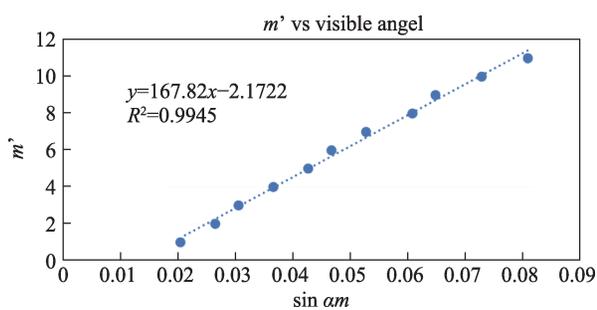


图6 可见角正弦值与条纹级数的线性关系图

C.4 绘制角宽度与条纹级数的关系图。

按表5的第1和第7列数据, 绘制角宽度与条纹级数的关系图, 如图7所示。由图可知, 角宽度有较大的测量误差, 回归曲线及斜率、截距在此省略。

本小问共 1.0 分, 至少包含 10 个测量点得 0.2 分, 实验数据范围至少覆盖 75% 坐标长度得 0.2 分; 坐标轴上有标签得 0.2 分; 绘制线性回归曲线并计算斜率得 0.2 分; 计算截距值得 0.2 分。

D 部分 热变形高度计算 [2.0 分]

利用干涉图样确定热变形参数。图8中蓝色曲线为形变剖面图, 红色曲线为干涉图案中心光强分布。光强增加时, 形变高度与亮纹数量同步增加。形变高度与干涉条纹数量满足公式 $m=2h/\lambda$ 。

D.1 通过计数确定条纹的最高级数, 确定热变形高度(以激光波长为单位)随激光功率变化的函数关系, 并绘制形变高度随功率变化的图线(数据需覆盖 200 mW 至 400 mW)。

调节激光器电压, 设置不同的激光功率, 通过计数来确定每一激光功率下条纹的最高级次 m , 根

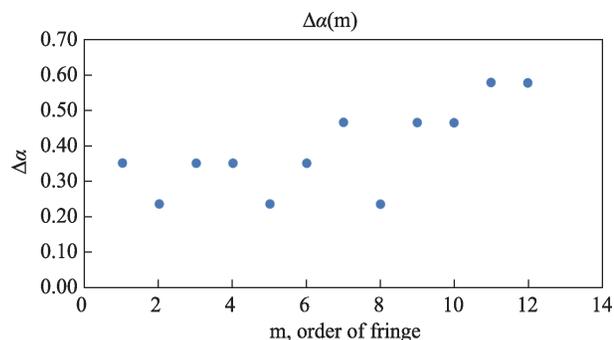


图7 角宽度与条纹级数的关系图

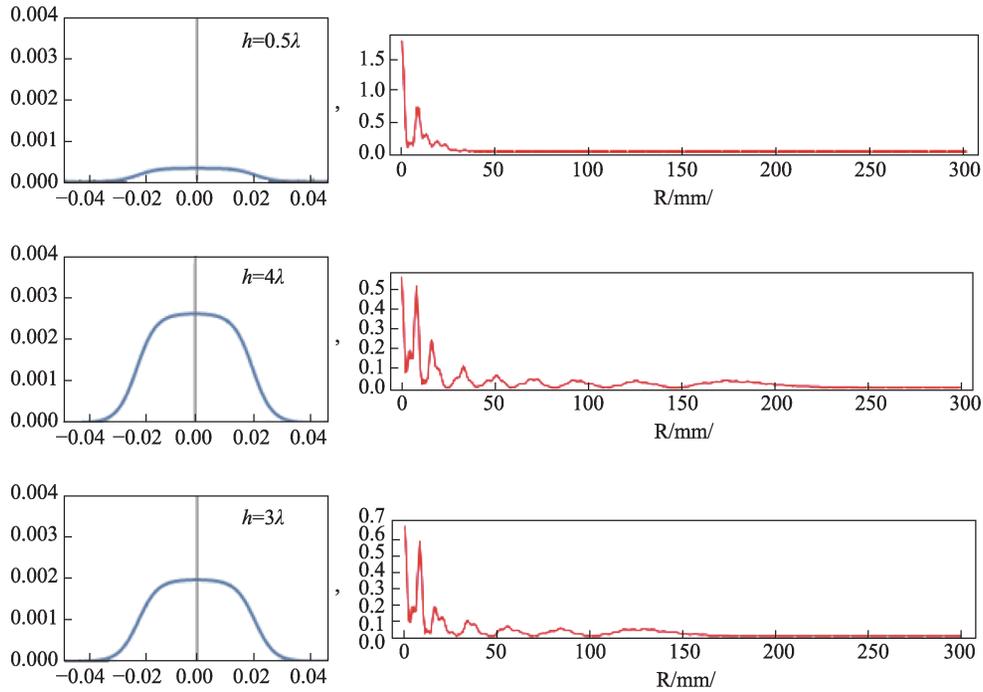


图8 不同热变形对应的干涉图案中心光强分布

据公式 $m=2h/\lambda$, 将 m 对应的形变高度 h 以激光波长为 单位表示, 获得表 7 中的数据, 并据此绘制激光功率与形变高度的关系图, 如图 9 所示。

本小问共 1.4 分, 评分标准: 图中每个数据点得 0.1 分, 此项最多为 1 分; 至少包含 8 个测量点得 0.2 分; 坐标轴上有标签得 0.2 分。

D.2 计算以下激光功率对应的形变高度(以激光波长为 单位): 200 mW, 300 mW, 400 mW。

表 7

No	m_{max}	P, mW	h, λ
1	4	296.5	2.0
2	5	301.5	2.5
3	9	305.6	4.5
4	10	306.0	5.0
5	11	309.0	5.5
6	12	310.5	6.0
7	13	315.7	6.5
8	15	320.6	7.5
9	16	324.1	8.0
10	19	326.6	9.5
11	20	340.8	10.0
12	21	350.8	10.5

将图 9 中的数据进行线性回归, 获得直线方程:

$$h=0.1618P-44.892$$

由此式, 计算功率为 $P=200 mW$ 、 $300 mW$ 、 $400 mW$ 所对应的形变高度 h , 数据见表 8。由数据可见, 中低功率($200 mW$)激光照射时, 形变高度测量误差很大, 使用线性回归分析不符合理论模型, 需检查激光校准或环境干扰; 高功率下($400 mW$)形变显著, 但已超过形变的屈服强度, 亚克力材料已经熔化, 也不符合线性回归理论模型。

本小问共 0.6 分, 评分标准: $200 mW$ 0.2 分; $300 mW$ 0.2 分; $400 mW$ 0.2 分。

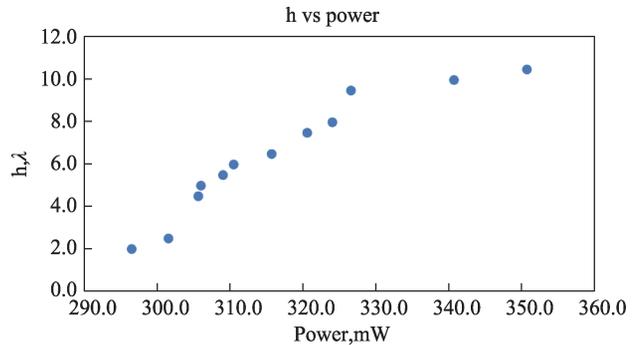


图9 激光功率与形变高度的关系图

表 8

P, mW	h, λ
200	-12.6
300	3.6
400	19.8

实验总结与启示

本实验为深入理解光热干涉机理、掌握复杂实验的设计与数据分析方法提供了生动案例。实验需注重功率控制的精度和表面清洁度,数据处理

时,需区分系统误差(如仪器精度)和随机误差(如读数偏差)。对于异常数据,应重复实验并优化操作流程。同时,可以从以下几方面进行改进,进一步助力实验能力提升:使用高精度温控模块,减少功率波动对形变的影响,引入激光干涉仪直接测量表面形变高度,提高数据可靠性;角宽度测量中,屏幕刻度分辨率不足会导致误差,可用数字图像处理技术捕捉条纹位置。本实验可以拓展到探究玻璃、金属等不同材料的热致干涉特性,比较其屈服强度和形变响应。



她用物理的情趣,引我们科苑揽胜;
她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿,欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

科技创新、科学普及是实现创新发展的两翼。《现代物理知识》旨在普及科学知识、弘扬科学精神,设有物理知识、物理前沿、科技经纬、科学源流、教学参考、中学园地、科学书屋和科苑快讯等栏目。诚邀在物理学及相关领域工作的科技、教育和科普等方面的专家学者,以公众喜闻乐见的文字,深入浅出、图文并茂地与读者分享现代物理知识、科学前沿成果和大科学装置进展等精彩故事,共襄“两翼齐飞”之盛举。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn,并将联系人姓名、详细地址、邮政编码,以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用,作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有,并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名),如不接受此协议,请在投稿时予以声明。来稿一经发表,将一次性酌情付酬,以后不再支付其他报酬。

2025 年《现代物理知识》每期定价 15 元,全年 6 期 90 元,欢迎新老读者订阅。

需要往期杂志的读者,请按下列价格付款:

2010~2021 年单行本每期 10 元;2022~2024 年单行本每期 15 元;2010~2021 年合订本每本 60 元,2022~2023 年合订本每本 90 元。

订阅方式

- 邮局订阅 邮发代号:2-824。
- 编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号,并在附言中说明“现代物理知识**年**期”)
名称:中国科学院高能物理研究所
开户行:工商银行北京永定路支行
账号:0200004909014451557
- 科学出版社期刊发行部:联系电话 010-64017032 64017539;
- 网上购买:搜淘宝店、微店店铺名称:中科期刊;淘宝、微信购买二维码:



淘宝网购刊



微信购刊