

预习报告		实验记录		分析讨论		总成绩	
20		30		30		80	
年级、专业：		2022 级物理学		组号：		教学班 1	
姓名：		黄罗琳		学号：		22344001	
实验时间：		2024/3/21		教师签名：			

CD1 光学像差测量与分析

【实验报告注意事项】

1. 实验报告由两部分组成：

(a) 预习报告：课前认真研读实验讲义，弄清实验原理；实验所需的仪器设备、用具及其使用、完成课前预习思考题；了解实验需要测量的物理量，并根据要求提前准备实验记录表格（可以参考实验报告模板，可以打印）。（30 分）

(b) 实验记录与分析：认真、客观记录实验条件、实验过程中的现象以及数据。实验记录请用珠笔或者钢笔书写并签名（用铅笔记录的被认为无效）。保持原始记录，包括写错删除部分，如因误记需要修改记录，必须按规范修改。（不得手记的值输入到电脑打印）；离开前请实验教师检查记录并签名。（50 分）
2. 本实验报告可提前打印出来，当场记录分析完成交给带实验的老师，课后无需再提交。若当场完成不了，则请课后完成，再扫描并通过 seelight 提交。

注意：本文档已留出填写空间，若填写空间不够的话请提前规划留白，做到报告的美观）
3. 注意事项：

(a) 实验中避免激光器伤到眼睛

(b) 避免用手直接接触镜片的光学面

(c) 安装镜片时需在光学平台上尽量靠近台面的高度操作，以免失手跌落摔碎镜片

(d) 实验平台配件所用固定螺钉需拧紧，以免镜架晃动；但不可过紧，以免损坏

(e) 实验前需按仪器清单检查光学元件是否齐全，实验结束后按照顺序放回元件盒

目录

1	CD1 光学像差测量与分析 预习报告	3
1.1	实验目的	3
1.2	仪器用具	3
1.3	原理概述	4
1.4	实验前思考题	4
2	CD1 光学像差测量与分析 实验记录	6
2.1	实验内容、步骤与结果	6
2.1.1	操作步骤记录	6
2.1.2	实验原始数据	7
2.1.3	实验图像汇总	8
2.2	实验过程遇到问题及解决办法	8
3	CD1 光学像差测量与分析 分析与讨论	10
3.1	实验数据处理	10
3.1.1	色差测量实验	10
3.1.2	慧差测量实验	10
3.2	实验后思考题	11
4	CD1 光学像差测量与分析 结语	12
4.1	实验心得和体会、意见建议等	12
4.2	附件	12

CD1 光学像差测量与分析 预习报告

1.1 实验目的

1. 了解七种几何像差产生的原理、基本规律；
2. 了解各种像差对光学成像质量的影响；
3. 掌握慧差、色差产生的原理及其测量表征；
4. 掌握光学系统的基本调试方法；

1.2 仪器用具

产品编号	产品名称	规格	数量
1	激光光源	波长 $\lambda=632.6\text{nm}$	1
2	激光器夹持器	3 维调整	1
3	显微物镜	$10\times/0.25$	1
4	针孔	$\varnothing 100\mu\text{m}$ 或 $\varnothing 50\mu\text{m}$	1
5	五维调整机构	装配显微物镜和针孔用	1
6	衰减片 1	0.0001 (衰减系数)	1
7	衰减片 2	0.01 (衰减系数)	1
8	双凸透镜 1	焦距 $f=300\text{mm}$	1
9	平凸透镜 2	焦距 $f=100\text{mm}$	1
10	平凸透镜 3	焦距 $f=150\text{mm}$	1
11	白屏	SZ-13, 一面白屏, 一面带坐标纸	1
12	成像相机	大恒的 MER-130-30UM 或元启智能的 REV-13AMU2C	1
13	数据线	图像采集数据线	1
14	计算机	台式或笔记本, 安装有成像相机图像采集软件	1
15	光学导轨	长度 1 米, 带刻度	1
16	二维平移台	行程 $>10\text{mm}$	4
17	平移滑块		8
18	支杆	50mm 长和 75mm 长	3+5
19	磁性表座		4
20	旋转调整台	可调角度 $> \pm 5^\circ$	1
21	白光灯	GY-6 型, 亮度可调, 即溴钨灯	1
22	滤光片 1	透光波长: 435nm	1
23	滤光片 2	透光波长: 630nm	1

1.3 原理概述

当光线穿过透镜或其他光学元件时，由于光的波长不同，其在介质中的折射率也会有所不同。这导致了色差和慧差这两种光学现象的产生。

1. 色差：

色差主要由两个因素引起：球面色差和色散色差。

- **球面色差：**当光线通过球面透镜或球面镜面时，由于球面形状的限制，不同部位的光线折射程度不同，导致不同颜色的光聚焦于不同位置。具体而言，透镜的中心部位对光线的折射程度比较大，而边缘部位则较小。因此，蓝色光会被更多地折射，使其焦点位置比红色光更接近透镜，从而导致不同波长的光聚焦位置不同。
- **色散色差：**不同波长的光在透明介质中传播时，其折射率会有所不同，即介质对不同波长的光有不同的折射率。因此，当白光通过透镜或透明介质时，不同波长的光会以不同的角度折射，导致不同颜色的光被分散开来，形成彩色边缘或色彩偏移。

解决色差问题的方法包括使用复合透镜、消色差镜片、非球面透镜等，以及在设计光学系统时考虑到色差校正的需求。

2. 慧差：

慧差是由于球面透镜或球面镜面的几何形状限制而引起的。当光线通过球面透镜或球面镜面时，焦点位置不再是一个确定的点，而是在一定的范围内分散，使成像产生模糊、失真或虚影。

慧差的解决方法包括使用非球面透镜或透镜组合、添加补偿光学元件等。非球面透镜具有非常复杂的曲率，可以根据需要设计，使光线聚焦到更小的焦点上，从而减小慧差带来的影响，提高成像质量。

在光学系统设计中，通常需要综合考虑色差和慧差以及其他光学畸变，以确保获得高质量的成像效果。这涉及到对光学元件的选择、设计和优化，以满足特定应用的要求。

1.4 实验前思考题

思考题 1.1：慧差与孔径、视场的关系？

1. 慧差与孔径、视场的关系：

(a) 慧差与孔径的关系：

随着孔径的增大，慧差的影响会增加。较大的孔径会导致更多的光线经过光学元件的边缘部分，而慧差通常是由于边缘部分的光线与中心部分的光线聚焦位置不同而引起的。因此，较大的孔径会加剧慧差的影响。

(b) 慧差与视场的关系：

视场的大小也会影响慧差的表现。当视场较大时，光线来自不同方向和角度的目标会聚焦在像平面上不同的位置，这可能会加剧慧差现象。特别是对于较大的视场，由于不同位置的光线需要通过透镜或镜面，而不同位置的光线折射程度可能会有所不同，导致成像的模糊和失真现象更加显著。

思考题 1.2: 产生色差原因? 列举几种消色差的方法

产生色差原因见实验原理。以下是几种消色差的方法:

1. 使用复合透镜, 由不同玻璃材料制成, 以抵消不同波长光线的色散效应。
2. 使用非球面透镜, 具有非球形曲率, 可以根据需要设计, 减少色差现象。
3. 使用消色差棱镜, 由不同材料制成的棱镜组合, 减少色差。
4. 使用色散补偿镜片, 设计用于校正色散, 使得不同波长的光线具有相同的光程, 减少色差效应。

思考题 1.3: 针孔滤波的工作原理

针孔滤波器的工作原理基于衍射现象。当光线通过非常小的孔口时, 光波会在孔边缘发生衍射, 形成一系列明暗相间的环形条纹或衍射图样。主要包括以下几点:

1. 点光源会聚: 针孔滤波器利用激光的特性, 将其会聚成一个非常小的点光源。这个点光源近似于理想的球面波, 对光学系统非常有用。
2. 高度相干性激光: 激光具有高度的相干性, 但同时也容易受到空中灰尘、光学元件或激光本身产生的散射光的干扰。
3. 杂散光的干扰: 在激光会聚的点上, 放置一个小孔(针孔)。这个针孔的直径通常约为 25 微米, 如果使用 10 倍显微镜物镜聚焦。针孔的作用类似于无线电中的滤波器, 它不允许其他空间频率的光通过, 从而阻止了杂散光的干扰。
4. 滤波效果: 针孔滤波器的作用是过滤掉杂散光, 使得会聚点上的成像更清晰。总之, 针孔滤波器在光学系统中起到类似滤波器的作用, 确保只有理想的点光源通过, 从而提高成像的质量。

因此, 针孔滤波器可以根据衍射现象实现光学滤波的目的

专业:	物理学	年级:	2022 级
姓名:	黄罗琳	学号:	22344001
室温:	23°C	实验地点:	A512
学生签名:	黄罗琳	评分:	
实验时间:	2024/3/21	教师签名:	

CD1 光学像差测量与分析 实验记录

2.1 实验内容、步骤与结果

2.1.1 操作步骤记录

实验光路如图 1 所示。实验步骤如下：

1. 色差测量实验

- (a) 按图示光路，先摆放溴钨灯、透镜、白屏，调整透镜 4 的中心高与光源等高，使光源在透镜 4 的物方 1-2 倍焦距处，调整白屏的位置，找到溴钨灯灯丝最清晰的像位置，并记录该位置；
- (b) 按图示光路，放置滤光片 1，调整白屏的位置，找到溴钨灯灯丝最清晰的像位置并记录白屏位置；
- (c) 更换为滤光片 2，再调整白屏的位置，找到这时溴钨灯灯丝最清晰的像位置并记录白屏位置；
- (d) 计算位置色差；判断波长与折射率之间的关系。

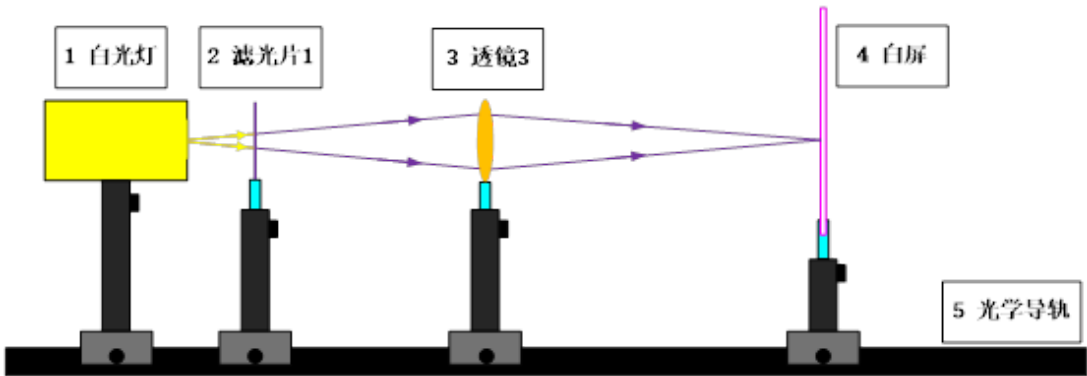


图 1: 位置色差测量光路图

2. 光路调试与慧差测量实验

实验光路如图 2所示。实验步骤如下：

- (a) 根据图示布局及元器件参数，估计各器件的摆放位置，并做初步的预调整。

- (b) 放置激光器，打开光源，安装白屏在滑块上，移动白屏以调整激光器方位和俯仰，使光点位置基本不变；固定白屏，并标记光斑位置。
- (c) 安装显微物镜和针孔到五维调整机构上，让激光正入射显微物镜。调整针孔位置，使其位于焦点位置，产生环形衍射光斑。微调五维调整机构，使光斑中心位于标记位置。固定显微物镜和针孔位置。
- (d) 安装双凸透镜 1，对发散球面波进行准直。调整透镜位置，使光斑与镜面同心，并使针孔位于透镜焦点位置，得到近似平行光。
- (e) 安装平凸透镜 2（或平凸透镜 3），调整位置使入射光斑与镜面同心，并方便后续角度调整。
- (f) 安装衰减片 1 和成像相机。调整相机位置，使其靶面位于平凸透镜 2 焦点处，采集图像。
- (g) 调整旋转调整机构的角度，使平凸透镜 2 发生偏转，观察并记录焦点图像、焦前图像、焦后图像，并记录偏转角度。选取 5 个角度点，记录对应的图像，分析慧差随角度变化关系。

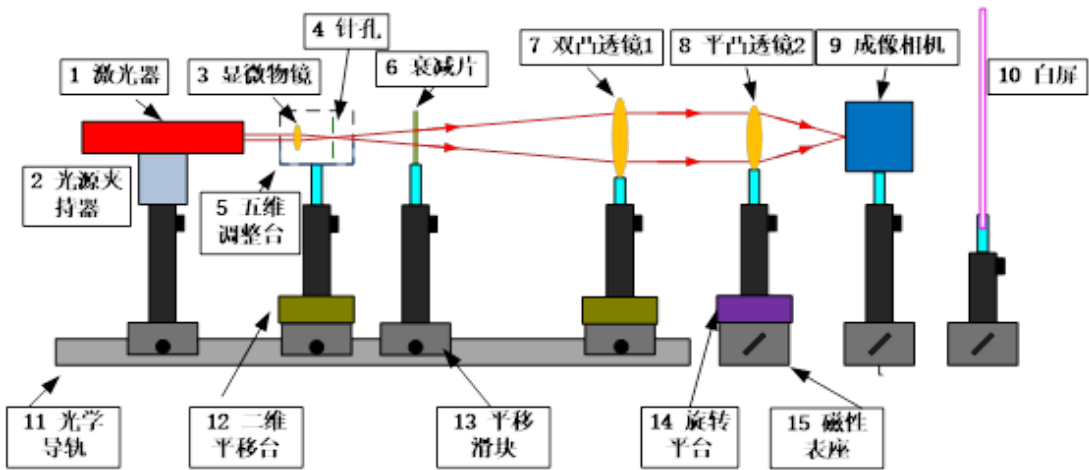


图 2: 慧差观测光路图

2.1.2 实验原始数据

1. 色差测量实验：

$f = 100mm$

仪器	位置 (cm)
白光灯	30.0
透镜	47.30
无滤光片	72.70
蓝色滤光片	72.02
红色滤光片	73.35

表 1: 光学器件位置

2. 慧差测量实验:

透镜向逆时针方向旋转, 彗尾向右; 顺时针方向旋转, 彗尾向左。

2.1.3 实验图像汇总

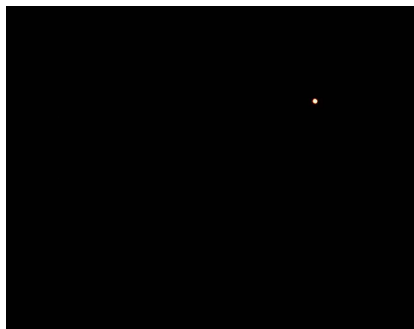


图 3: 焦点图像

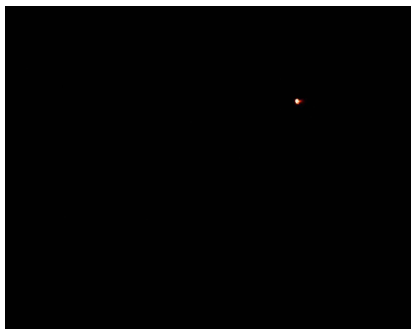


图 4: 逆时针 5°

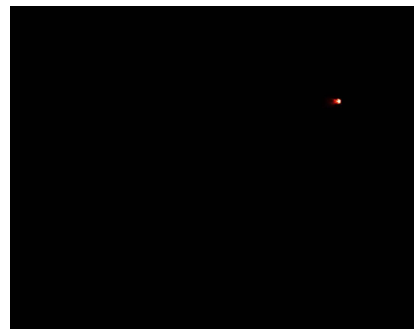


图 5: 顺时针 5°

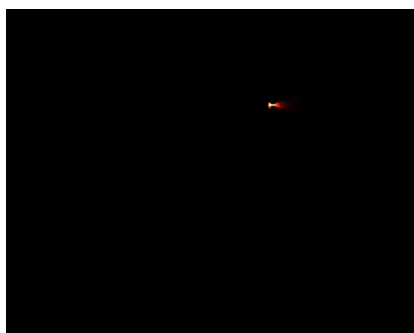


图 6: 逆时针 10°

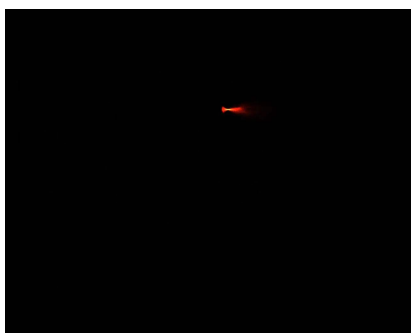


图 7: 逆时针 15°

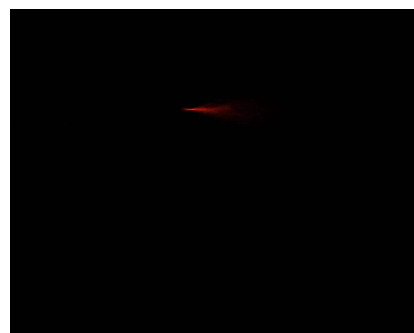


图 8: 逆时针 20°

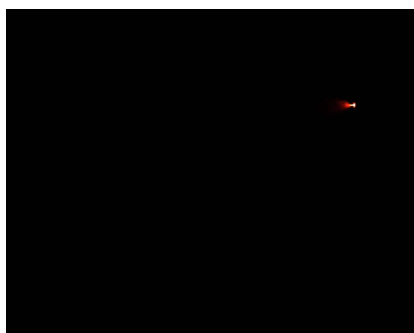


图 9: 顺时针 10°

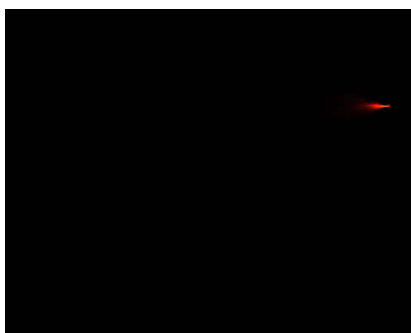


图 10: 顺时针 15°

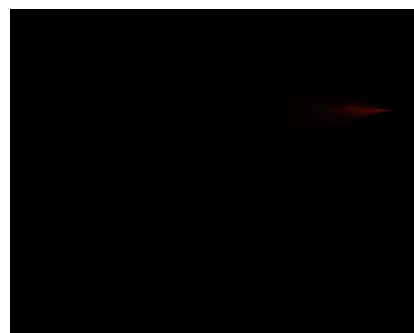


图 11: 顺时针 20°

2.2 实验过程遇到问题及解决办法

1. 首先由于仪器 14 旋转平台的高度存在最低限度, 从而需要将实验光路整体上移, 其中出现问题的五维调整台, 其出现了一根支撑柱高度不够, 两根支撑柱又过高的问题, 最终通过多次调整后, 使得最终众多实验仪器同心, 实验获得成功。

2. 其次，在实验初期，我出现一个错误的图像，因为我并没有很好的将所有光学仪器同心（所有的光学镜片的中心在一条直线上），所以尽管出现了慧差，但是这个实验图像是不完美的。
3. 还有就是在调整好同心之后，我并没有将成像相机调整至实验仪器 8 的焦点处，导致整体实验图像较大，并没有形成一个极小的原点。

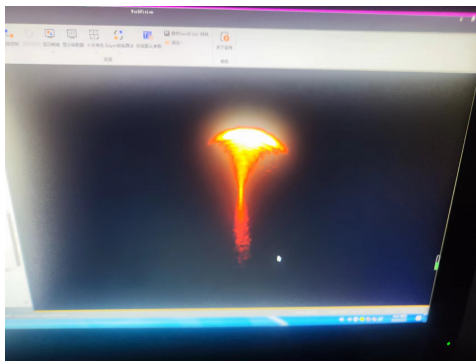


图 12: 错误实验图像

专业:	物理学	年级:	2022 级
姓名:	黄罗琳	学号:	22344001
日期:	2024/3/21	评分:	

CD1 光学像差测量与分析 分析与讨论

3.1 实验数据处理

3.1.1 色差测量实验

仪器	位置 (cm)
白光灯	30.0
透镜	47.30
无滤光片	72.70
蓝色滤光片	72.02
红色滤光片	73.35

表 2: 实验数据

根据位置色差公式:

$$\Delta L'_{FC} = L'_F - L'_c$$

代入位置数据得:

$$\Delta L'_{FC} = -1.33cm$$

分析数据可知, 折射率越大, 波长越小。

3.1.2 慧差测量实验

- 1. 在焦点处弥散斑最小, 之后调整角度后弥散斑均会变大。
- 2. 透镜向逆时针方向旋转, 彗尾向右; 顺时针方向旋转, 彗尾向左。
- 3. 慧差的大小与角度成正比, 最后逐渐无法观察图像。

3.2 实验后思考题

思考题 3.1: 有没有办法通过图像计算光学系统的像差？请给出方法说明。如果通过相机采集图像进行判断的话，相机象元尺寸应如何选择？

当光学系统对相干照明物体或自发光物体进行成像时，我们可以将物体上的光强分布视为无数个具有不同强度的独立发光点的集合。每一个发光点经过光学系统后，由于衍射、像差以及其他工艺疵病的影响，在像面处得到的星点像光强分布呈现为一个弥散光斑，即点扩散函数 PSF。在等晕区内，每个光斑都具有完全相似的分布规律，像面光强分布是所有星点像光强的叠加结果。因此，星点像光强分布规律决定了光学系统成像的清晰度。[1]PSF 描述了光学系统中单个点源所产生的像。通过分析 PSF，可以确定系统中的各种像差。

下面是一种简单的方法说明：

首先，需要通过光学系统拍摄一些测试图像，然后计算点扩散函数, 对于每个图像，可以通过将其与理想的点源或线源进行比较来计算其 PSF。可以使用各种图像处理技术，如傅里叶变换来计算 PSF。

分析 PSF：一旦得到了 PSF，就可以分析它以确定系统中的各种像差。例如，球差可能表现为 PSF 的不对称性，而色差可能导致不同波长的光具有不同的焦点位置。

选择相机象元尺寸：在使用相机采集图像时，相机的象元尺寸应根据所需的分辨率和灵敏度进行选择。一般来说，较小的象元尺寸可以提供更高的空间分辨率，但可能需要更多的光量来获得足够的信噪比。因此，选择相机的象元尺寸需要在空间分辨率和信噪比之间进行权衡。

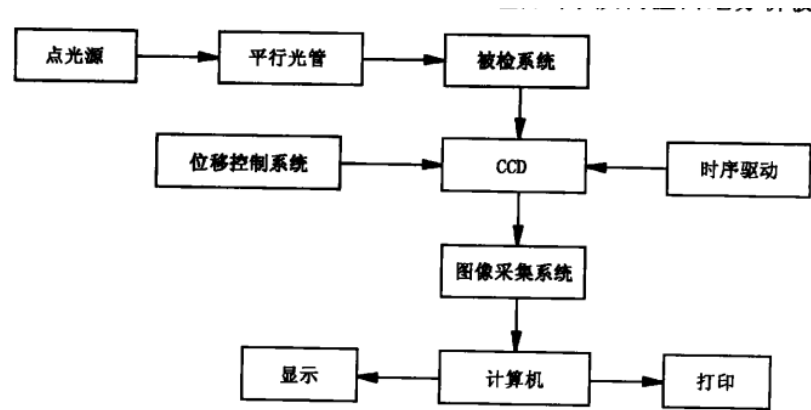


图 13: 检测系统功能图 [1]

具体实验原理摘自：[1] 朱瑶. 光学系统的星点检验方法 [J]. 红外,2004(09):31-37.

CD1 光学像差测量与分析 结语

4.1 实验心得和体会、意见建议等

- 1. 实验要求很大的耐心，例如实验主光路的调整会存在高度的问题，需要进行一次又一次的调整，秉持着“就高又就低”的原则，既要保证有最低高度限制的设备能够进入光路，也要保证最高有效调整高度的仪器能够稳定调节高低（五维调整机构），所以也要在试验一次次探索中了解到实验仪器的合适的高度区间。
- 2. 对于实验总体效果，我发现了在实验一中，我在调整色差时会出现灯丝的像很亮从而无法分辨哪一个位置是最清晰的，我们可以使用添加在实验二中用到的衰减片，这样会很明显的找到像最清晰的地方

4.2 附件

试验台桌面整理

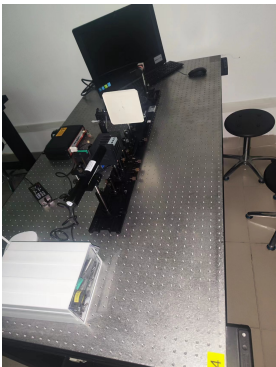


图 14: 桌面

实验数据

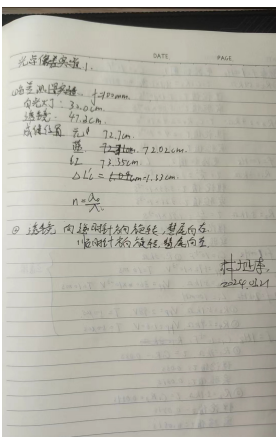


图 15: 实验数据与签字