

# 《基础物理实验》实验报告

分组号：01—9

实验名称 微波模拟布拉格衍射 指导教师 张龙  
姓 名 王华强 学 号 2016K8009929035 专 业 计算机科学与技术  
同组人员 无  
实验日期 2017 年 12 月 11 日 实验地点 教 709 成绩评定

---

实验名称 微波模拟布拉格衍射

## 实验目的

1. 了解与学习微波产生的基本原理以及传播和接收等基本特性。
2. 观测微波衍射、干涉等实验现象。
3. 观测模拟晶体的微波布拉格衍射现象。
4. 通过迈克耳逊实验测量微波波长。

## 实验仪器与用具

DHMS-1 型微波光学综合实验仪一套，包括：X 波段微波信号源、微波发生器、发射喇叭、接收喇叭、微波检波器、检波信号数字显示器、可旋转载物平台和支架，以及实验用附件（反射板、分束板、单缝板、双缝板、晶体模型、读数机构等）。

## 实验原理

布拉格衍射部分：

晶体对于入射电磁波的衍射可看作是三维的光栅网络对于电磁波的衍射。其取值极大位置与入射角度、晶体本身的原子排列、入射电磁波波长有关。用公式表示晶体衍射的布拉格条件如下：

$$2d\sin\theta = k\lambda$$

依此公式可在已知其中几个条件的情况下求得余下的未知值。

此实验中为降低成本并使得现象更为直观，我们使用微波衍射以及晶体模型来进行微波模拟布拉格衍射。

单双缝衍射，迈克尔逊干涉仪部分

此部分内容在光学课程中已有详细介绍(期中考试挨个考了一遍啊……)，此处不再详述。推导的关键在于把握衍射图样(光强)与相位差的关系，利用复振幅进行计算。

## 实验内容

1. 测量微波的单缝衍射，计算微波的波长，并与频谱分析仪测量的频率结果相比较；
2. 测量微波的双缝干涉，计算微波的波长，并与频谱分析仪测量的频率结果相比较；

3. 观察布拉格衍射，测量晶面（100）面和（110）面的布拉格衍射。利用第一步测量得到的微波波长和布拉格衍射信号，估算相应的晶格常数，并与模型的晶格常数相比较；
4. 迈克尔逊干涉实验，观察干涉现象，并计算微波的波长。

实验数据记录与实验数据处理

1. 实验条件 微波频率 9.4GHz 微波波长 3.2cm
2. 微波单缝衍射实验
  - 1) 微波实验仪对准确认

功率 128.3mV

|             |       |      |      |
|-------------|-------|------|------|
| 角度 (degree) | 0     | 20   | -20  |
| 电压 (mV)     | 128.3 | 0.90 | 0.83 |

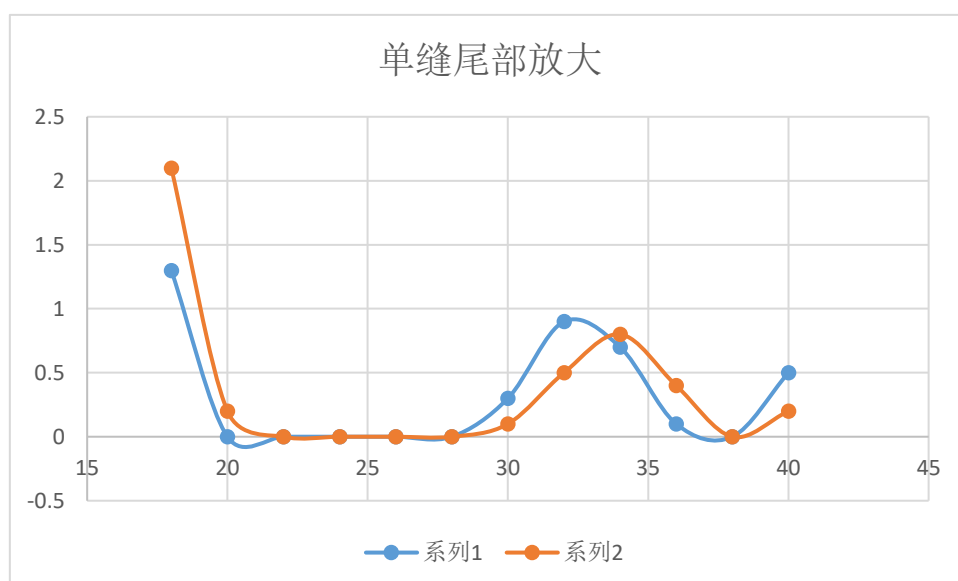
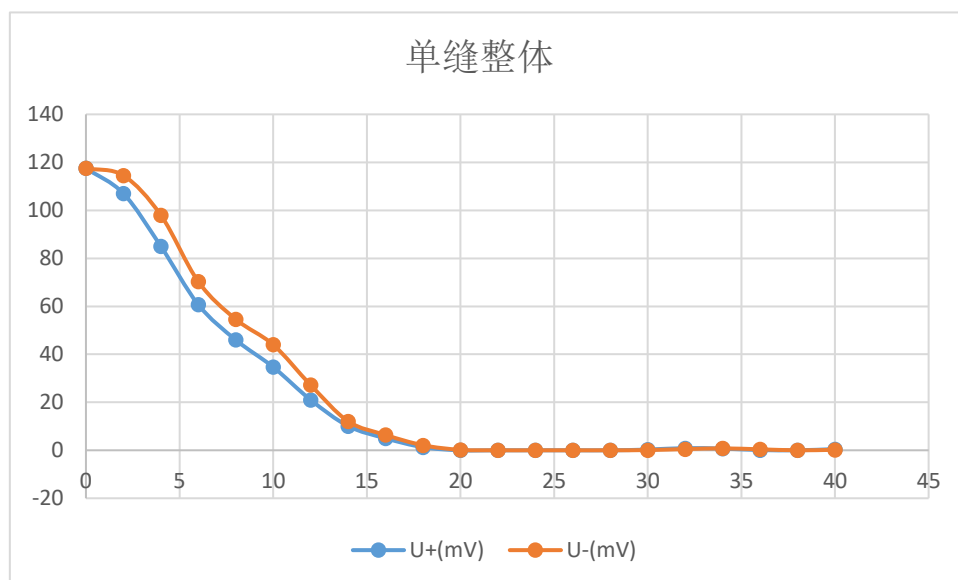
- 2) 单缝实验数据

功率 117.5mV

数据表格：

| 角度     | 0     | 2     | 4   | 6    | 8    | 10   | 12   | 14   |
|--------|-------|-------|-----|------|------|------|------|------|
| U+(mV) | 117.5 | 107   | 85  | 60.7 | 46   | 34.7 | 21   | 10.1 |
| U-(mV) | 117.5 | 114.5 | 98  | 70.3 | 54.6 | 44   | 27.2 | 12.1 |
| 16     | 18    | 20    | 22  | 24   | 26   | 28   | 30   | 32   |
| 5      | 1.3   | 0     | 0   | 0    | 0    | 0    | 0.3  | 0.9  |
| 6.4    | 2.1   | 0.2   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0.1  | 0.5  |
| 34     | 36    | 38    | 40  |      |      |      |      |      |
| 0.7    | 0.1   | 0     | 0.5 |      |      |      |      |      |
| 0.8    | 0.4   | 0     | 0.2 |      |      |      |      |      |

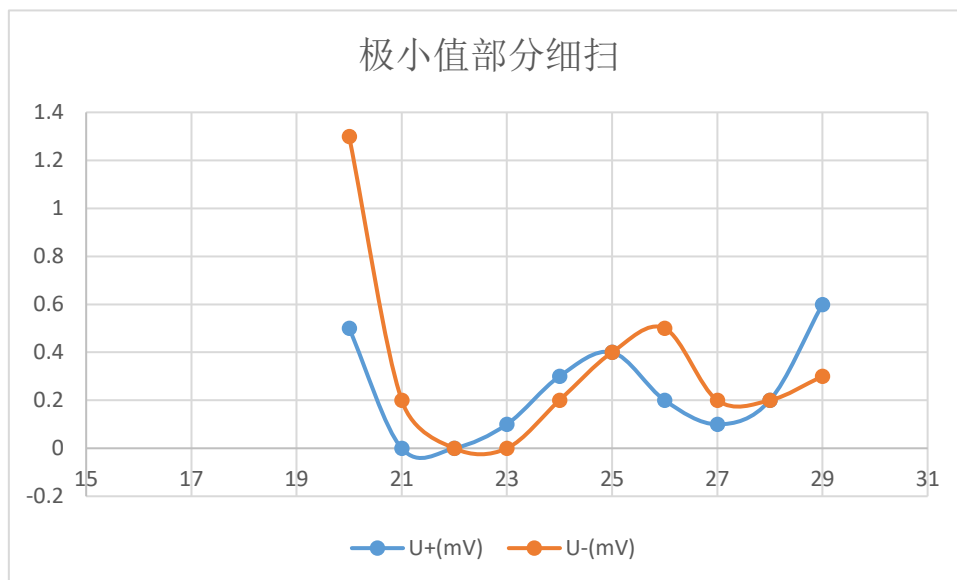
数据图像(手绘图像见附件)



单缝细扫数据：

| 角度     | 20  | 21  | 22 | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  |
|--------|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| U+(mV) | 0.5 | 0   | 0  | 0.1 | 0.3 | 0.4 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.6 |
| U-(mV) | 1.3 | 0.2 | 0  | 0   | 0.2 | 0.4 | 0.5 | 0.2 | 0.2 | 0.3 |

数据图像(手绘图详见附件)



单缝计算部分：

根据公式

$$a \sin \varphi = \pm \kappa \lambda \quad \kappa = 1, 2, 3, 4, \dots$$

可知，一级极小值在  $22^\circ$  与  $23^\circ$ ，则为  $(22+23)/2=22.5^\circ$ ，则  $\phi=22.5^\circ$ 。  $a=8\text{cm}$ ，  $k=1$ ，  
代入公式得  $\lambda=3.0614\text{cm}$

由相对误差公式：

$$\eta = \frac{|\lambda - \lambda_{\text{标}}|}{\lambda_{\text{标}}} \times 100\%$$

代入可知误差为 4.07%，相对来说误差不大，可以认为是由于仪器灵敏度不足以及喇叭方向校正准确度不高，或是单缝摆放角度误差而导致的误差，在实验允许范围内。

### 3. 微波双缝干涉实验

#### 1) 微波实验仪对准确认

功率 107.9mV

|             |       |     |     |
|-------------|-------|-----|-----|
| 角度 (degree) | 0     | 20  | -20 |
| 电压 (mV)     | 107.9 | 8.3 | 8.6 |

#### 2) 双缝实验数据

功率 132.3 (mV)

数据表格：

| 角度     | 0     | 2     | 4     | 6    | 8    | 10   | 12  |
|--------|-------|-------|-------|------|------|------|-----|
| U+(mV) | 132.3 | 123.2 | 94.9  | 31.3 | 1    | 0.7  | 4.3 |
| U-(mV) | 132.3 | 125.7 | 115.9 | 80.4 | 12.4 | 0.4  | 0.5 |
| 14     | 16    | 18    | 20    | 22   | 24   | 26   | 28  |
| 24.3   | 53.1  | 80.5  | 96.1  | 88.6 | 66.7 | 23.5 | 7.2 |

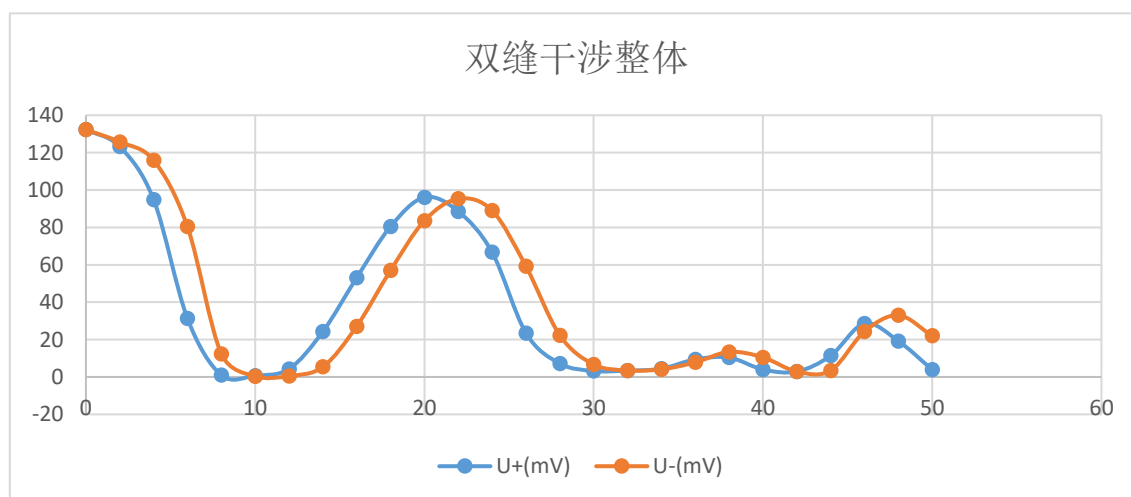
|      |      |     |      |      |      |      |      |
|------|------|-----|------|------|------|------|------|
| 5.4  | 27.1 | 57  | 83.6 | 95.3 | 89   | 59.2 | 22.3 |
| 30   | 32   | 34  | 36   | 38   | 40   | 42   | 44   |
| 3.2  | 3.4  | 4.4 | 9.4  | 10.4 | 4    | 2.9  | 11.4 |
| 6.7  | 3.5  | 4.1 | 7.8  | 13.4 | 10.5 | 2.9  | 3.4  |
| 46   | 48   | 50  |      |      |      |      |      |
| 28.6 | 19.2 | 3.9 |      |      |      |      |      |
| 24.3 | 33   | 22  |      |      |      |      |      |

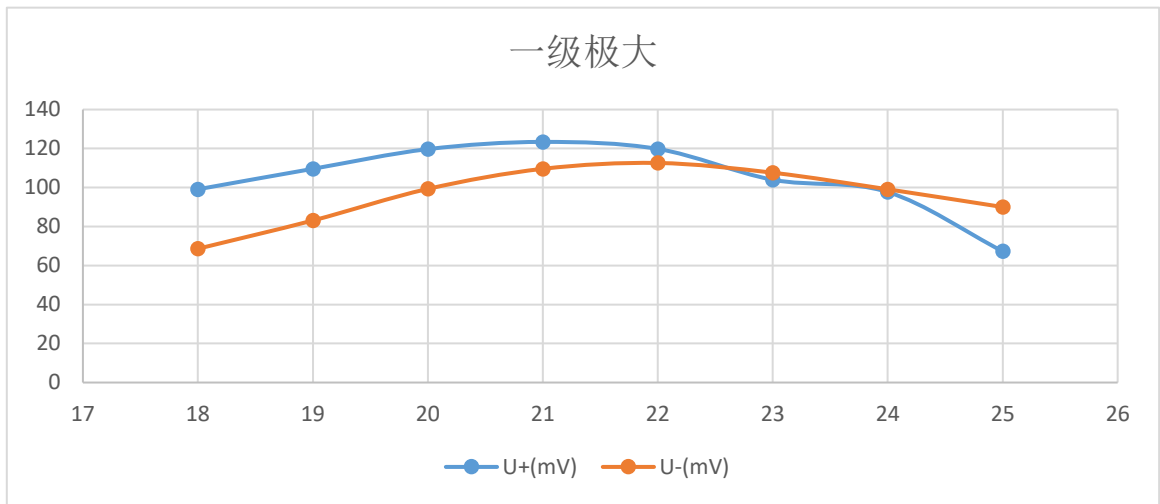
|      |        |      |       |       |       |       |       |      |      |
|------|--------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| 一级极大 | 角度     | 18   | 19    | 20    | 21    | 22    | 23    | 24   | 25   |
|      | U+(mV) | 99.1 | 109.6 | 119.7 | 123.4 | 119.8 | 104   | 97.7 | 67.3 |
|      | U-(mV) | 68.6 | 83.1  | 99.3  | 109.6 | 112.6 | 107.6 | 99.1 | 90   |

|      |        |      |     |     |     |     |      |
|------|--------|------|-----|-----|-----|-----|------|
| 零级极小 | 角度     | 8    | 9   | 10  | 11  | 12  | 13   |
|      | U+(mV) | 2.3  | 0.8 | 0.6 | 1.8 | 4.5 | 10.2 |
|      | U-(mV) | 12.7 | 2.6 | 0.3 | 0   | 0.4 | 1.8  |

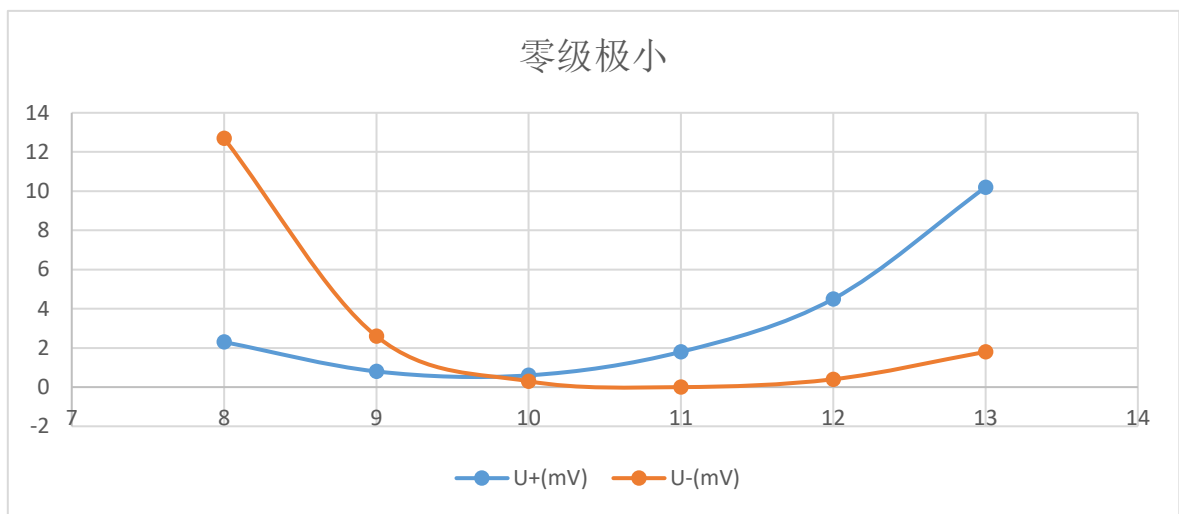
|      |        |      |      |     |     |     |     |      |      |
|------|--------|------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|
| 一级极小 | 角度     | 28   | 29   | 30  | 31  | 32  | 33  | 34   | 35   |
|      | U+(mV) | 16.8 | 9.6  | 6.5 | 3.7 | 6.4 | 7.5 | 11.7 | 14.1 |
|      | U-(mV) | 26   | 14.7 | 8.2 | 4.3 | 3.3 | 3.1 | 3.6  | 5.2  |

数据图像(手绘图见附件):

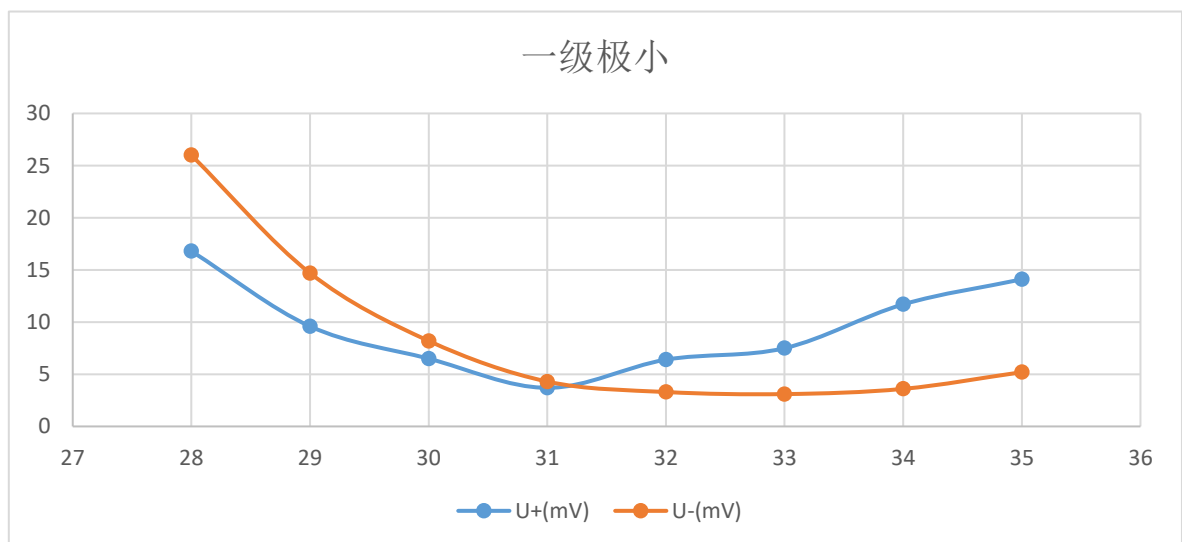




确定一级主极大为  $22.5^\circ$



确定零级极小为  $10^\circ$



确定一级极小为  $32^\circ$

双缝干涉计算部分：

将数据代入公式：

干涉加强的角度为：

$$\varphi = \sin^{-1} \left( \frac{k \cdot \lambda}{a + b} \right) \quad k=1, 2, 3, \dots$$

干涉减弱的角度为：

$$\varphi = \sin^{-1} \left( \frac{2k+1}{2} \cdot \frac{\lambda}{a + b} \right) \quad k=1, 2, 3, \dots$$

给定双缝缝宽  $a=3.5\text{cm}$ ，双缝间隔  $b=5\text{cm}$

一级极大约为  $22.5^\circ$ ，代入可得：

$$\lambda = 3.2528\text{cm}$$

相对误差：

$$\eta = \frac{|\lambda - \lambda_{\text{标}}|}{\lambda_{\text{标}}} \times 100\%$$

代入可得误差为 1.65%

零级极小大约为  $10^\circ$ ，则代入可得  $\lambda = 3.003\text{cm}$

相对误差

$$\eta = \frac{|\lambda - \lambda_{\text{标}}|}{\lambda_{\text{标}}} \times 100\% = 7.75\%$$

一级极小大约为  $32^\circ$ ，则代入可得  $\lambda = 2.9802\text{cm}$

相对误差  $\eta = \frac{|\lambda - \lambda_{\text{标}}|}{\lambda_{\text{标}}} \times 100\% = 7.9\%$

误差分析同单缝实验部分，可以认为是由于仪器灵敏度不足以及喇叭方向校正准确度不高，或是单缝摆放角度误差而导致的误差，在实验允许范围内。

#### 4. 微波迈克尔逊干涉实验

##### 1) 微波实验仪对准确认

功率 122.1mV

|             |       |      |      |
|-------------|-------|------|------|
| 角度 (degree) | 0     | 20   | -20  |
| 电压 (mV)     | 122.1 | 10.8 | 10.7 |

##### 2) 迈克尔逊实验数据

|       |      |     |      |      |
|-------|------|-----|------|------|
| 最小点读数 | 0.92 | 2.5 | 4.25 | 5.65 |
|-------|------|-----|------|------|

### 3) 迈克尔逊实验计算

由实验原理：

“

当两波的相位差为

$2k\pi$ , ( $k=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ) 时, 干涉加强; 当两波的相位差为  $(2k+1)\pi$  时, 则干涉最弱。当 A、B 板中的一块板固定, 另一块板可沿着微波传播方向前后移动, 当微波接收信号从极小 (或极大) 值到又一次极小 (或极大) 值, 则反射板移动了  $\lambda/2$  距离。由这个距离就可求得微波波长。

“

计算移动距离的均值为 1.576cm

$\lambda=3.153\text{cm}$ , 误差为 1.4%

其中误差一是由于仪器灵敏度和喇叭调整, 二是所搭建的迈克尔逊干涉仪的搭建角度不能够很精确的控制, 由此导致的干涉仪存在问题, 三是读数时由于要避免回程差的影响, 单向转动手轮读数, 读数可能存在偏差。

### 5. 微波布拉格衍射实验

#### 1) 微波实验仪对准确认

功率 122.1mV

|             |       |     |      |
|-------------|-------|-----|------|
| 角度 (degree) | 0     | 20  | -20  |
| 电压 (mV)     | 135.5 | 9.7 | 10.1 |

#### 2) 布拉格衍射实验数据

功率经过调整以获得较明显的实验效果, 此时直射方向无法读数 (超量程)

详细说明见心得体会部分。

晶面 100

数据记录表格:

整体扫描:

|   |           |           |           |           |           |           |           |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b><math>\psi 1(\text{degree})</math></b> | <b>30</b> | <b>32</b> | <b>34</b> | <b>36</b> | <b>38</b> | <b>40</b> | <b>42</b> |
| <b><math>\psi 2(\text{degree})</math></b> | 30        | 32        | 34        | 36        | 38        | 40        | 42        |
| <b>U(mV)</b>                              | 5.4       | 3.9       | 4.3       | 4.3       | 7.3       | 10.6      | 5.7       |
| <b>44</b>                                 | 46        | 48        | 50        | 52        | 54        | 56        | 58        |
| <b>44</b>                                 | 46        | 48        | 50        | 52        | 54        | 56        | 58        |
| <b>1.1</b>                                | 2.9       | 14.4      | 10.5      | 1.6       | 2         | 3.3       | 2.3       |
| <b>60</b>                                 | 62        | 64        | 66        | 68        | 70        | 72        | 74        |

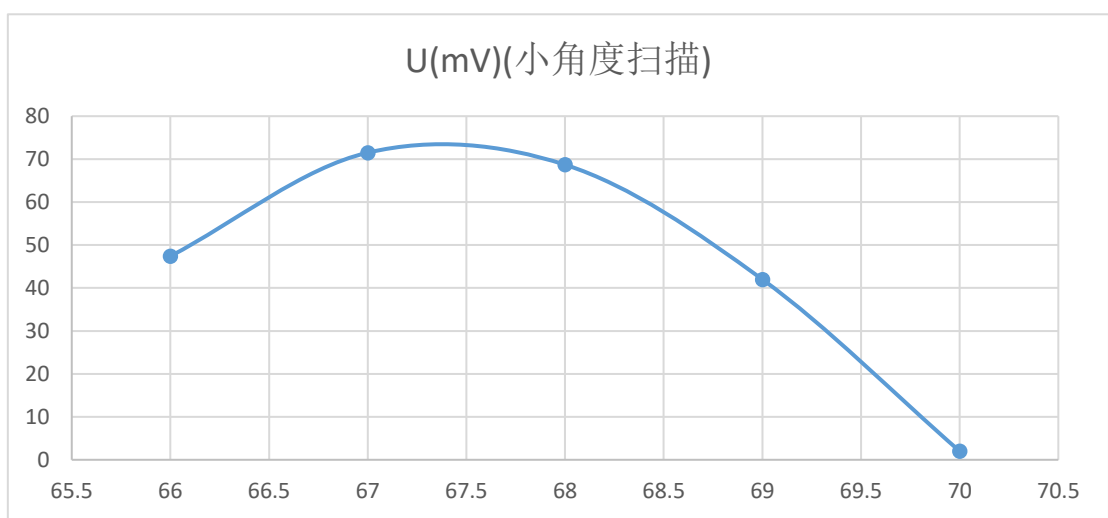
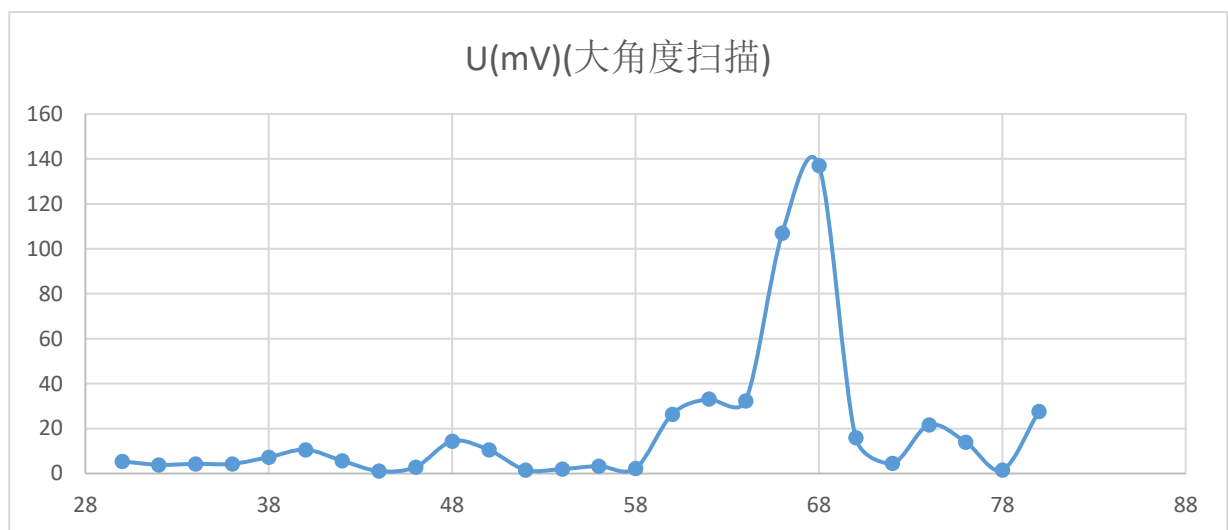


|      |      |      |     |     |    |     |      |
|------|------|------|-----|-----|----|-----|------|
| 60   | 62   | 64   | 66  | 68  | 70 | 72  | 74   |
| 26.4 | 33.2 | 32.4 | 107 | 137 | 16 | 4.5 | 21.6 |
| 76   | 78   | 80   |     |     |    |     |      |
| 76   | 78   | 80   |     |     |    |     |      |
| 14   | 1.6  | 27.7 |     |     |    |     |      |

细扫：

|                         |      |      |      |    |    |
|-------------------------|------|------|------|----|----|
| $\psi 1(\text{degree})$ | 66   | 67   | 68   | 69 | 70 |
| $\psi 2(\text{degree})$ | 66   | 67   | 68   | 69 | 70 |
| U(mV)                   | 47.4 | 71.5 | 68.7 | 42 | 2  |

绘制图像如下：



计算部分：

可知极大值  $\beta$  约为  $68^\circ$  ,  
(理论值为  $66.488^\circ$  相对误差 2.3%)

根据  $2d\cos\phi = k\lambda$  ,  $\lambda = 3.1915\text{cm}$  可得,  $d = 4.26\text{cm}$ ,

根据公式  $d = a / \sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2}$  , 则晶格常数  $a = 4.26\text{cm}$ , 则相对误差为 6.5% 误差分析同上, 可能还有转盘读数时视线斜视导致的一些偏差.

## 6. 附加实验 微波布拉格衍射 110 晶面

### 1) 微波实验仪对准确认

功率 147.6 mV

|             |       |      |      |
|-------------|-------|------|------|
| 角度 (degree) | 0     | 20   | -20  |
| 电压 (mV)     | 147.6 | 16.2 | 16.7 |

### 2) 布拉格衍射实验数据

功率 104.2mV 晶面 110

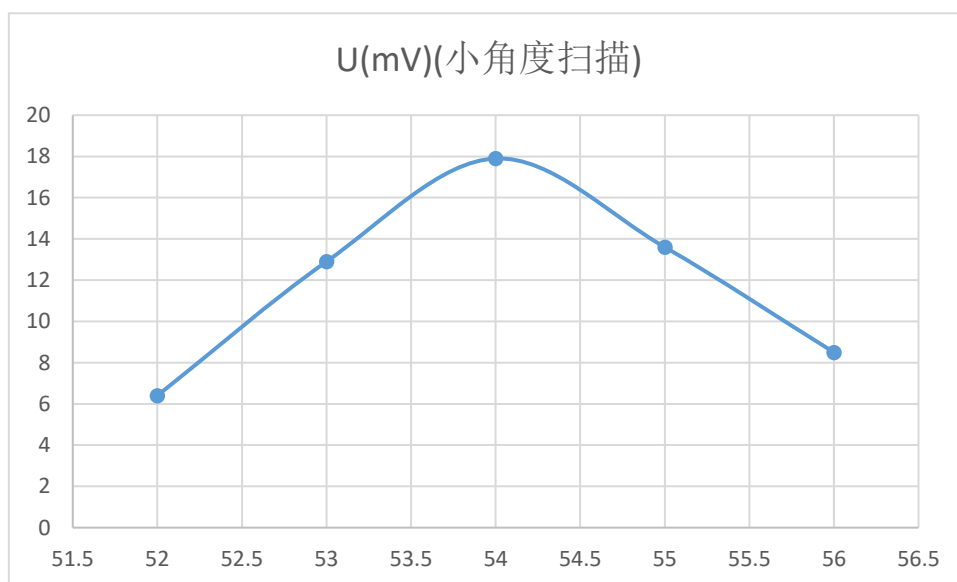
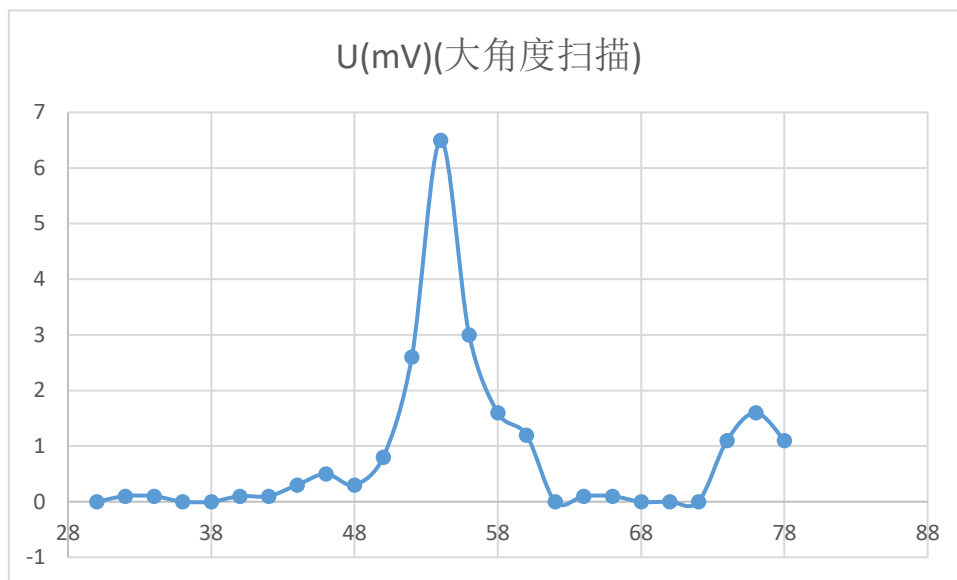
数据记录表格:

|   |           |           |           |           |           |           |           |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b><math>\psi_1(\text{degree})</math></b> | <b>30</b> | <b>32</b> | <b>34</b> | <b>36</b> | <b>38</b> | <b>40</b> | <b>42</b> |
| <b><math>\psi_2(\text{degree})</math></b> | 30        | 32        | 34        | 36        | 38        | 40        | 42        |
| <b>U(mV)</b>                              | 0         | 0.1       | 0.1       | 0         | 0         | 0.1       | 0.1       |
| <b>44</b>                                 | 46        | 48        | 50        | 52        | 54        | 56        | 58        |
| <b>44</b>                                 | 46        | 48        | 50        | 52        | 54        | 56        | 58        |
| <b>0.3</b>                                | 0.5       | 0.3       | 0.8       | 2.6       | 6.5       | 3         | 1.6       |
| <b>60</b>                                 | 62        | 64        | 66        | 68        | 70        | 72        | 74        |
| <b>60</b>                                 | 62        | 64        | 66        | 68        | 70        | 72        | 74        |
| <b>1.2</b>                                | 0         | 0.1       | 0.1       | 0         | 0         | 0         | 1.1       |
| <b>76</b>                                 | 78        | 80        |           |           |           |           |           |
| <b>76</b>                                 | 78        | 80        |           |           |           |           |           |
| <b>1.6</b>                                | 1.1       | 22.7      |           |           |           |           |           |

|   |           |           |           |           |           |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b><math>\psi_1(\text{degree})</math></b> | <b>52</b> | <b>53</b> | <b>54</b> | <b>55</b> | <b>56</b> |
| <b><math>\psi_2(\text{degree})</math></b> | 52        | 53        | 54        | 55        | 56        |
| <b>U(mV)</b>                              | 6.4       | 12.9      | 17.9      | 13.6      | 8.5       |

注意到整体扫描时, 在  $80^\circ$  时出现了反常的突然增大. 这可能是由于角度过大, 致使一部分微波不经衍射直接射入接收器, 从而导致数值的反常增大. 这里认为  $80^\circ$  时的点为误差点, 舍去.

用余下点做图如下: (手绘图见附件)



计算部分:

可知极大值  $\beta$  约为  $54^\circ$  , 而理论值为  $55.649^\circ$

相对误差为 2.9%

根据  $2d\cos\phi = k\lambda$  ,  $\lambda = 3.1915\text{cm}$  可得,  $d = 2.714$

根据公式  $d = a / \sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2}$  , 则晶格常数  $a = 3.83$  , 相对误差为 4.25%

误差分析同上

## 思考题

### 1. 各实验内容误差主要影响是什么？

误差的来源包括喇叭(是否正对)，器材的位置，摆放(如单双缝，干涉仪的摆放无法做到完全精确)，仪器跳变(无法避免)，读数误差(斜视读数导致的误差)，这些误差累积起来导致所测角度的误差。

单双缝干涉实验中所测关键点角度的误差会导致藉此算出的波长的误差，微波布拉格衍射同理。

### 2. 金属是一种良好的微波反射器。其它物质的反射特性如何？是否有部分能量透过这些物质还是被吸收了？比较导体与非导体的反射特性。

物质对微波的反射水平与介质损耗的大小有关。介质损耗指的是绝缘材料在电场作用下，由于介质电导和介质极化的滞后效应，在其内部引起的能量损耗。对于玻璃，陶瓷等不含水的常见材料，微波有着较好的穿透性，微波的能量绝大多数穿过这些材料而不能产生其他影响。然而在面对水，含水材料时，由于水分子属于极性分子，介电常数很大，介质损耗因数也很大，从而这些材料对于微波有很强的吸收作用。微波能量被这些介质吸收而转化成内能。总的来说，金属导体对微波有着较好的反射性质(这也是雷达的原理)，而非导体则会因分子极性差异所导致的介质损耗因数差异而产生或穿透，或吸收的性质。

### 3. 为避免每台仪器微波间的干扰，使用吸波材料对每套设备进行了微波屏蔽，请问吸波材料的工作机理是什么？与屏蔽微波波长的关系是什么？

注意到吸波材料使用蓬松的海绵，表面构成的三角形突起，且突起的尺寸与微波波长在同一数量级上。由实验中所用微波的波长，知微波有似声性。使用海绵这一常见的多孔吸声材料，利用海绵内部大量相连的微孔和间隙，可以使得微波进入孔内被吸收。三角形凸起不仅增大了材料表面积，而且利用与波长相似的尺寸达到更好的吸收效果。

查找资料知这里使用的是微波暗室中吸收体的原理。微波暗室采用的吸收体常做成尖劈形（金字塔形状），普通尖劈形吸收体有近似关系式 $L/\lambda \approx 1$ 。

### 4. 假如预先不知道晶体中晶面的方向，是否会增加实验的复杂性？又该如何定位这些晶面？

显然，已知晶面的方向是直接找出法向，进而判断入射角和反射角的先决条件。若预先不知道晶体中晶面的方向，则无法直接确定，自然会增加实验的复杂性(但也没复杂太多)。利用晶面反射性质的对称性，可以不断调整角度进行测试，直至找出足够的衍射峰信息，并由布拉格定理判断晶面方向(法线在入射角，反射角中心)。之后由布拉格公式 $2d\sin\theta = \lambda$ ，可以确定晶面的面间距，从而得到有关晶面的足够信息。

## 思考体会

此次实验使用多种方式测量了微波的波长，均与实际波长相差不大，从而证明了测量过程中所用到的各规律的正确性(单双缝干涉，布拉格衍射，迈克尔逊干涉仪规律)

此次实验中，值得注意的问题主要在于实验器材的使用和限制方面。由于实验中使用的微波光学综合实验仪发射和接收喇叭难以稳固的固定，所以实验过程中应尽量避免用力撞击，触碰发射/接收喇叭。在此次实验中由于种种原因误触喇叭接近十次，不仅导致此后所测数据与之前数据之间存在偏差，而且再次调整的过程也会耗费大量的时间，这是格外应该注意的。

除此之外，由于实验台设计的问题，加之实验装置两臂过长，实验中所需转动的角度很大，导致开始实验前必须规划好实验仪器的位置。

经过验证，给接收喇叭所在臂一个轻微的力，就会影响到接收装置的示数。再加上之前所述的微波吸收介质的影响，因此在读数时要远离实验装置并尽量避免接触，以减小实验误差。

在进行迈克尔逊干涉仪相关实验时，发现手柄回程差会影响实验结果。因此选择尽量慢的单向移动手柄进行读数。

最大功率相关的讨论：

在测量100晶面时，由于使用讲义上数值所测出的数值过小，按照估计的结果在 $67^\circ$ 附近调整微波强度在可读范围内，之后使用此强度进行测量。