

《基础物理实验》实验报告

实验名称 微波布拉格衍射 指导教师 岳帅鹏
姓 名 学号 分班分组及座号 (例: 1-04-5 号)
实验日期 2023 年 11 月 16 日 实验地点 715/717 调课/补课 ☐ 是 ☒ 否 成绩评定

【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. 观察微波衍射、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. 通过迈克尔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 (如图), 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)。



1. X 波段信号源 2. 固定臂 3. 长支柱 4. 紧固蝶形螺丝 5. 信号源传输电缆 6. 频率调节旋钮 7. 功率调节旋钮 8. 发射器喇叭 9. 指针 10. 载物圆台 11. 圆形支架 12. 短支柱 13. 接收器喇叭 14. 接收旋转部件 15. 接收器信号输出插座 16. 检流计调零电位器 17. 检流计电源开关 18. 检流计信号输入插座 19. 转动臂 20. 紧固螺杆 21. 移动装置 22. 圆形底盘 23. 水平调节机脚 24. 模拟晶格 25. 玻璃板 26. 反射板 27. 单缝板 28. 双缝板

【实验原理】

1. 微波的双缝干涉实验

当一平面波垂直入射到金属板的两条狭缝上, 狭缝成为次级波波源。由两缝发出的次级波是相干波, 因此在金属板的背后面空间中, 将产生干涉现象。只考虑主要来自双缝中央的衍射波互相干涉的结果, 令双缝的缝宽 a 接近于波长 λ 。当双缝之间的间隔 b 较大时, 干涉强度受单缝衍射的影响小, 反之则影响较大。

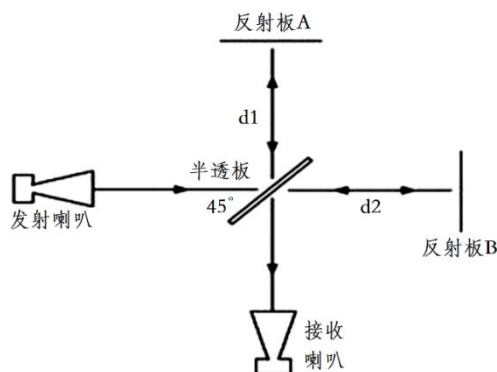
根据推导可得, 当干涉加强时, 满足公式:

$$k \cdot \lambda = (a + b) \sin \theta \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

当干涉减弱时, 满足公式:

$$\frac{2k + 1}{2} \cdot \lambda = (a + b) \sin \theta \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

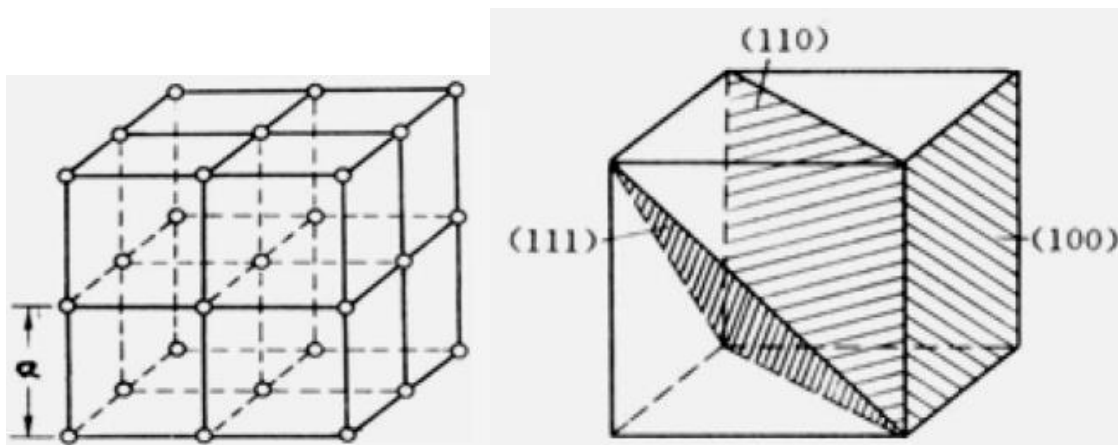
2. 微波的迈克尔逊干涉实验



在微波前进的方向上放置一个与波传播方向成 45° 角的半透射半反射的分束板（如图 8）。将入射波分成一束向金属板 A 传播，另一束向金属板 B 传播。由于 A、B 金属板的全反射作用，两列波再回到半透射半反射的分束板，回合后到达微波接收器处。这两束微波同频率，在接收器处将发生干涉，干涉叠加的强度由两束波的程差（即位相差）决定。当两波的相位差为 $2k\pi$ 时，干涉加强；当两波的相位差为 $(2k+1)\pi$ 时，干涉最弱。故当 AB 板中的一块固定，另一块沿着微波传播方向前后移动，当微波接收信号从极小值到下一次极小值，反射板移动了 $\lambda/2$ 距离。

3. 微波的布拉格衍射实验

a) 晶体结构



组成晶体的原子或分子在空间中按一定规律周期性排列。原子在直角坐标系 x 、 y 、 z 三个方向以固定的距离 a 在空间依序重复排列，形成简单的立方点阵，如图所示。其中 a 为晶格常数。常见的晶面有如图三种，分别称为 (100) 面、 (110) 面、 (111) 面，括号中的数字称为晶面指数。一般而言，晶面指数为 (xyz) 的晶面族，其相邻的两个晶面间距 $d = a/\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 。

b) 布拉格衍射

在布拉格衍射实验中，在入射角度恰好使得微波在晶体模型相邻两层晶面的反射波光程差为波长整数倍时，干涉强度极大。不相邻但平行的晶面也发生类似干涉，但在此次实验中不考虑。干涉加强角度有关系 $2d \cos \varphi = k\lambda, k = 1, 2, 3, \dots$ ，其中 d 为晶面间距， φ 为入射角， λ 为波长。

4. 微波的单缝衍射实验

当一平面微波入射到一宽度和微波波长可比拟的一狭缝时，在缝后就要发生如光波一般的衍射现象。同样中央零级最强，也最宽，在中央的两侧衍射波强度将迅速减小。根据光的单缝衍射公式推导可知，如为一维衍射，微波单缝衍射图样的强度分布规律也为：

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \mu}{\mu^2} \quad \mu = \frac{\pi \alpha \sin \varphi}{\lambda}$$

式中 I_0 是中央主极大中心的微波强度, α 为单缝的宽度, λ 是微波的波长, φ 为衍射角, $\frac{\sin^2 \mu}{\mu^2}$ 常叫做单缝衍射因子, 表征衍射场内任一点微波相对强度的大小。一般可通过测量衍射屏上从中央向两边微波强度变化来验证。

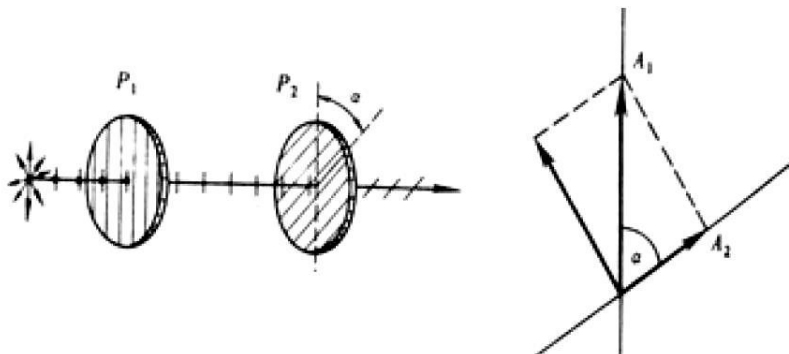
同时与光的单缝衍射一样, 当

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

时, 对应的 φ 角位置衍射强度为 0。因此, 通过测量衍射强度分布中第一级衍射最小值对应的角度 φ , 利用上述公式可求出微波波长 λ 。

5. 微波的偏振实验

电磁波是横波, 它的电场强度矢量 E 和波的传播方向垂直。如果 E 始终在垂直于传播方向的平面内某一确定方向变化, 这样的横电磁波叫线极化波, 在光学中也叫偏振光。如一线极化电磁波以能量强度 I_0 发射, 而由于接收器的方向性较强 (只能吸收某一方向的线极化电磁波, 相当于一光学偏振片, 如图。发射的微波电场强度矢量 E 如在 P_1 方向, 经接收方向为 P_2 的接收器后 (发射器与接收器类似起偏器和检偏器), 其强度 $I = I_0 \cos^2 \alpha$, 其中 α 为 P_1 和 P_2 的夹角。这就是光学中的马吕斯 (Malus) 定律, 在微波测量中同样适用。



【实验内容】

1. 微波双缝干涉实验

调整双缝干涉板的缝宽与间距。本实验中缝宽为 3.5cm, 缝间距为 5cm。将双缝干涉板放置在支座上, 使其与载物台上 90 度指示线一致。转动小平台使固定臂的指针在其 180 度处。让活动臂置于小平台 0 度处, 调整信号使液晶显示器的示数较大。在 0 度线两侧每改变 2 度读取一次显示器读数并记录。在曲线对应的一级极大、零级极小、一级极小处进行间隔 1 度的精细扫描。

2. 微波迈克尔逊干涉实验

在微波前进方向放置玻璃板, 使其与载物台 45 度线在同一面上, 固定臂指针指向 90 度, 接收臂指向 0 度。按实验要求如图安置固定反射板、可移动反射板、接收喇叭。使固定反射板固定在大平台上, 并使其法线与接收喇叭的轴线一致。可移动反射板装在一旋转读数机构上后, 然后移动旋转读数机构上的手柄, 使可移反射板移动, 测出 $n+1$ 个微波极小值。并同时从读数机构上读出可移反射板的移动距离 L (注意: 旋转手柄要慢, 并注意回程差的影响)。

3. 微波布拉格晶体衍射实验

安装晶体模型。转动接受臂和晶体模型, 使固定臂与接收臂相对于 100 晶面, 即模型表面对称, 臂与晶面法线夹角各为 30° 。从 30° 开始, 以 2° 为步长, 粗扫 $\pm (30 \sim 80)^\circ$ 范围内检波器示数并记录。每次晶体模型转动 2° , 接受臂转动 4° 。通过记录数据确定干涉极大的角度范围, 以 1° 为

步长精扫并记录检波器示数。转动接受臂和晶体模型，使固定臂与接收臂相对于 110 晶面，即垂直于模型底面的对角线对称，臂与晶面法线夹角各为 30° 。

按上述步骤记录 110 晶面数据。

4. 微波单缝衍射实验

在 $\pm 20^\circ$ 微调检波器朝向，使得检波器误差不超过 2 mV。调整缝宽为 8 cm。把单缝放置在 90° 。调整功率至 0 级极大示数约为 150 mV。从 0° 开始，以 2° 为步长，粗扫 $\pm 40^\circ$ 范围内检波器示数并记录。通过记录数据确定 0 级极小的角度范围，以 1° 为步长精扫并记录检波器示数。

5. 微波偏振实验

调整支撑臂和喇叭口方向。调整功率至 0 级极大示数约为 150 mV。从 0° 开始，以 10° 为步长，对接收喇叭角度 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内检波器示数读数并记录。

【实验数据与处理】

1. 实验条件确认

微波频率：9.4GHz 微波波长：3.19cm

2. 双缝干涉实验

(1) 微波实验仪对准确认

Table 1

角度 ($^\circ$)	0	20	-20
电压 (mV)	147.5	11.4	12.8

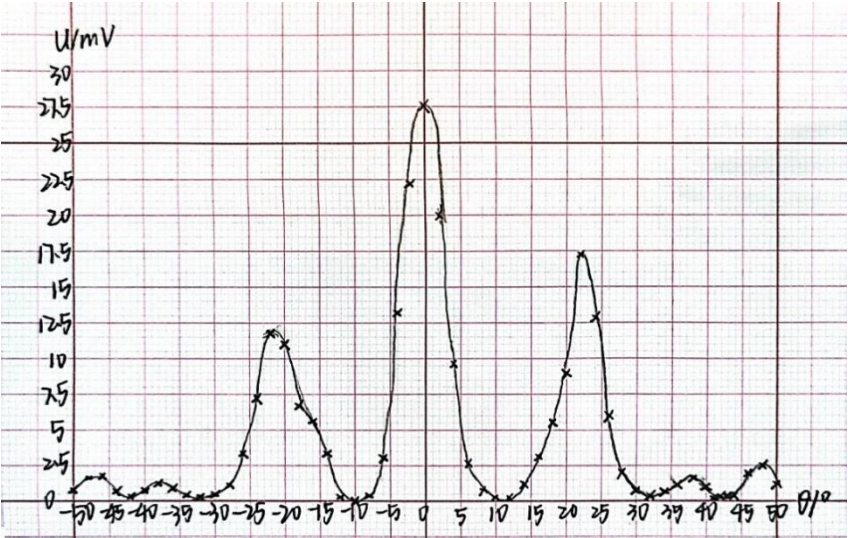
正负 20 度时，电压差值为 1.4mV，小于 2mV。故可视为接收喇叭已调节对称。

(2) 双缝干涉实验

Table 2

$\theta(^{\circ})$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
$U_{\theta+}(\text{mV})$	27.5	20.0	9.6	2.6	0.7	0.1	0.1	1.2	3.1	5.5	9.0	17.2	12.7	6.0	2.0	0.7	0.4	0.6	1.1	1.6	1.0	0.3	0.4	2.0	2.5	1.2
$U_{\theta-}(\text{mV})$	27.5	22.2	13.2	3.0	0.4	0.0	0.3	3.4	5.6	6.7	11.0	11.8	7.2	3.4	1.1	0.4	0.2	0.4	0.8	1.2	0.7	0.4	0.6	1.9	1.6	0.8

对应图像如下：

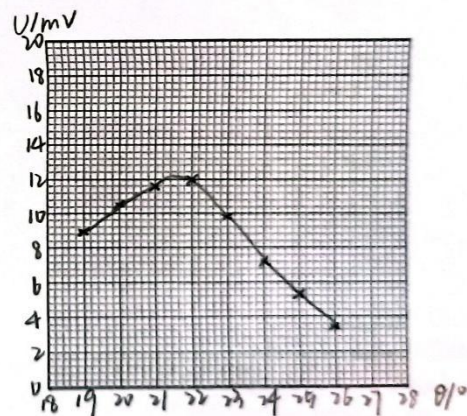
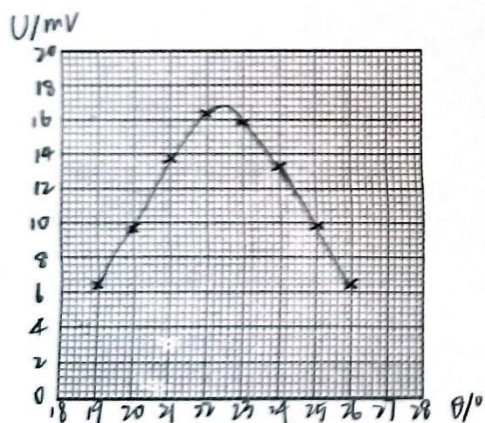


在一级极大处的细扫数据如下：

Table 3

$\theta(^{\circ})$	19	20	21	22	23	24	25	26
$U_{\theta+}(\text{mV})$	6.4	9.6	13.8	16.5	15.9	13.2	9.9	6.4
$U_{\theta-}(\text{mV})$	8.9	10.5	11.6	12.0	9.8	7.2	5.2	3.4

对应图像如下：

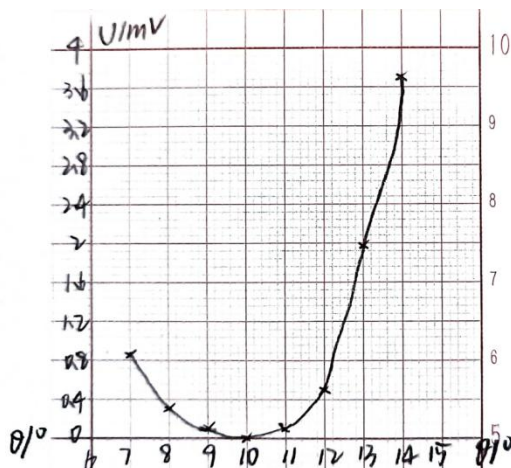
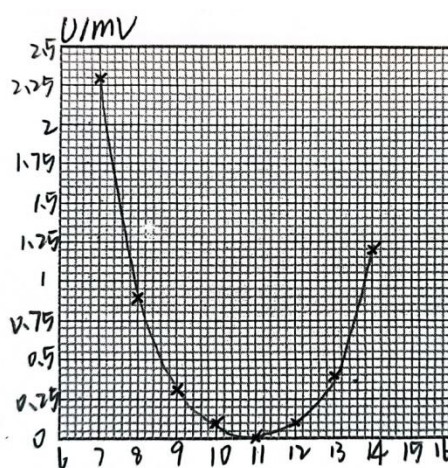


在零级极小处的细扫数据如下：

Table 4

$\theta(^{\circ})$	7	8	9	10	11	12	13	14
$U_{\theta+}(\text{mV})$	2.3	0.9	0.3	0.1	0	0.1	0.4	1.2
$U_{\theta-}(\text{mV})$	0.9	0.3	0.1	0	0.1	0.5	1.9	3.7

对应图像如下：

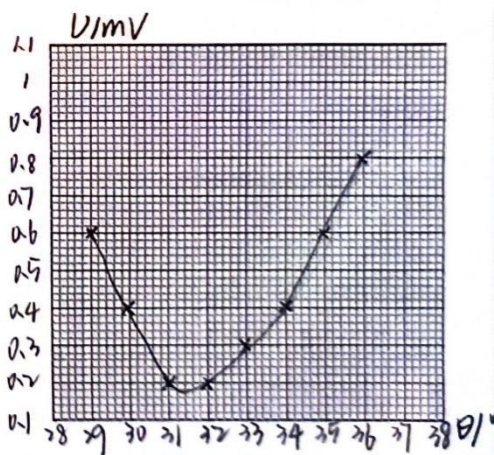
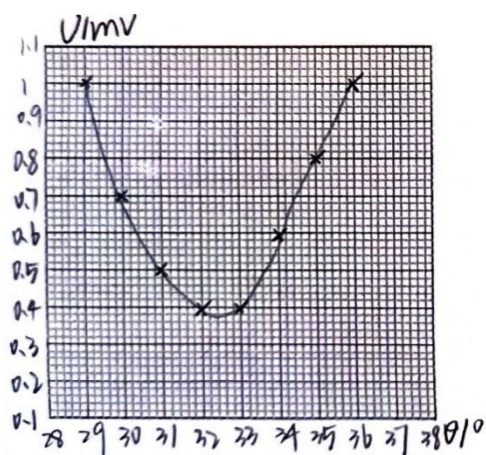


在一级极小处的细扫数据如下：

Table 5

$\theta(^{\circ})$	29	30	31	32	33	34	35	36
$U_{\theta+}(\text{mV})$	1	0.7	0.5	0.4	0.4	0.6	0.8	1
$U_{\theta-}(\text{mV})$	0.6	0.4	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8

对应图像如下：



综合上述图像，确定一级极大、零级极小、一级极小对应的极值点，通过计算，得到以下数据：

Table 6

	一级极大	零级极小	一级极小
正向 $\theta(^{\circ})$	22.4	11	32.5
反向 $\theta(^{\circ})$	21.6	9.8	31.5
$\theta(^{\circ})$	22.0	10.4	32.0
λ	3.18	3.07	3.00
相对误差	-0.3%	-3.8%	-6.0%

计算过程如下：

对于一级极大：

根据公式 $k \cdot \lambda = (\alpha + b) \sin \theta$ $k = 1$ 可知， $\lambda = (3.5 + 5) \sin 22^{\circ} = 3.18 \text{cm}$

对于零级极小：

根据公式 $\frac{2k+1}{2} \cdot \lambda = (\alpha + b) \sin \theta$ $k = 0$ 可知， $\lambda = \frac{3.5+5}{\frac{1}{2}} \sin 10.4^{\circ} = 3.07 \text{cm}$

对于一级极小：

根据公式 $\frac{2k+1}{2} \cdot \lambda = (\alpha + b) \sin \theta$ $k = 1$ 可知， $\lambda = \frac{3.5+5}{\frac{3}{2}} \sin 32^{\circ} = 3.00 \text{cm}$

计算得出相对误差均不超过 6.0%。取三个波长值的平均值为实验最终结果，即 $\lambda = 3.08 \text{cm}$ ，计算得出相对误差为 3.3%。可以视为实验结果较为准确。

3. 微波迈克尔逊干涉实验

(1) 微波实验仪器对准确认

Table 7

角度 ($^{\circ}$)	0	20	-20
电压 (mV)	137.7	14.2	14.5

正负 20 度时，电压差值为 0.3mV，小于 2mV。故可视为接收喇叭已调节对称。

(2) 迈克尔逊实验数据

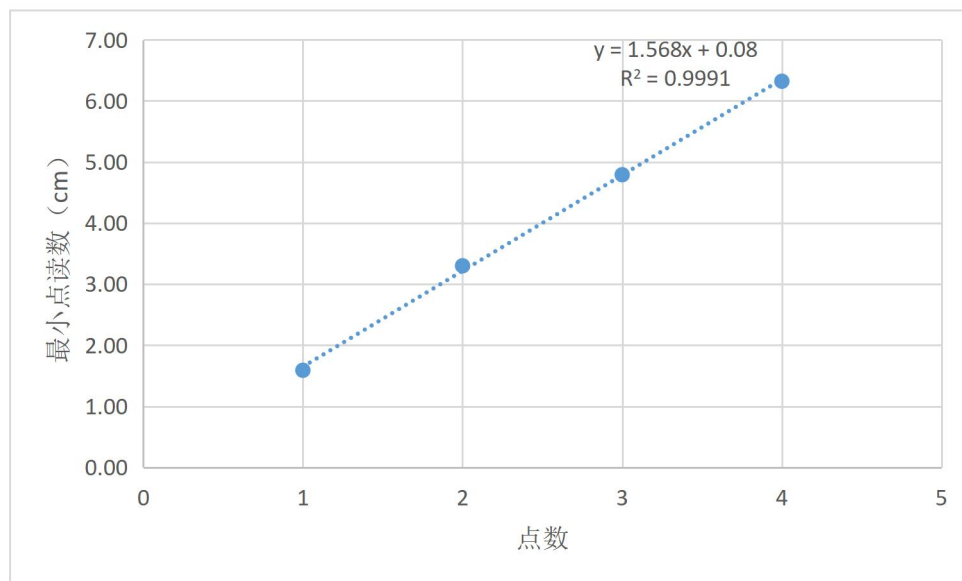
Table 8

最小点读数 (cm)	1.59	3.30	4.79	6.32
------------	------	------	------	------

$$\text{逐差法: } \lambda = 2 \Delta L = 2 \frac{L_3+L_4-L_1-L_2}{4} = \frac{4.79+6.32-1.59-3.3}{2} = 3.11\text{cm}$$

$$\text{相对误差: } \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \frac{3.11-3.19}{3.19} = -2.51\%$$

利用 Excel 通过最小二乘法拟合:



拟合结果 $y = 1.568x + 0.08$, $R^2 = 0.9991$, $\lambda = 2 \cdot 1.568 = 3.136\text{cm}$

$$\text{相对误差: } \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \frac{3.136-3.19}{3.19} = -1.69\%$$

图中直线拟合结果较好, 说明结果较为准确。

4. 微波布拉格衍射实验

(1) 微波实验仪对准确认

Table 9

角度 ($^{\circ}$)	0	20	-20
电压 (mV)	159.2	14.2	14.7

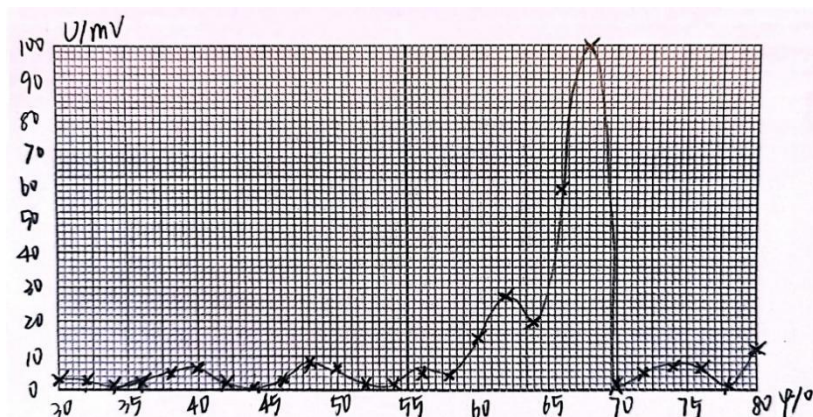
正负 20 度时, 电压差值为 0.5mV, 小于 2mV。故可视为接收喇叭已调节对称。

(2) 布拉格衍射实验数据 (100) 晶面

Table 10

$\Phi(^{\circ})$	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80
U(mV)	2.7	2.2	1.8	2.2	4.3	6.0	2.1	0.6	2.2	8.2	6.2	0.8	1.0	2.2	2.1	15.6	27.3	19.4	68.8	100.3	2.0	4.6	6.9	6.4	0.2	11.8

对应图像如下:

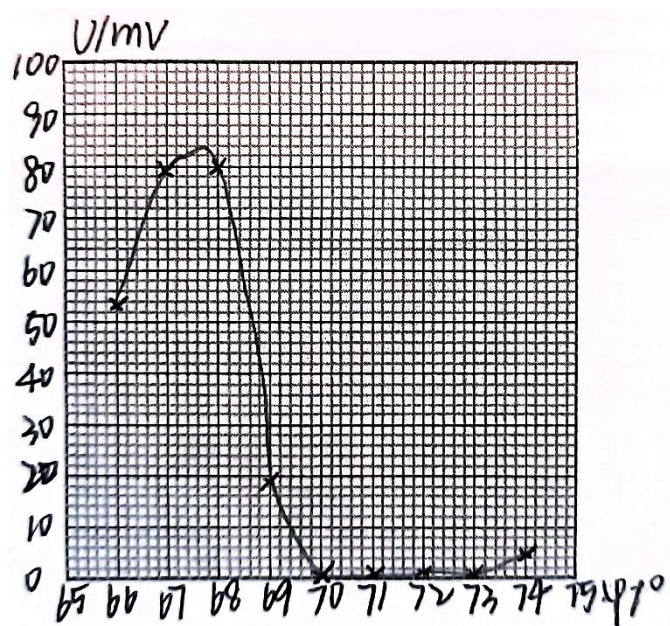


细扫数据记录如下：

Table 11

$\phi(^{\circ})$	66	67	68	69	70	71	72	73	74
U(mV)	53.8	78.8	80.0	19.2	0.0	0.5	1.3	0.7	5.2

对应图像如下：



综合上述图像，通过计算，得出以下数据：

Table 12

$\phi(^{\circ})$	67.7
$\lambda(\text{cm})$	3.036
相对误差	-4.8%

计算过程如下：

对于 (100) 面， $d = \frac{a}{\sqrt{1^2+0^2+0^2}} = 4\text{cm}$

对于干涉加强角，有 $2d \cos \phi = k\lambda, k = 1, 2, 3, \dots$

由于观察的是相邻晶面反射波的干涉，因此 $k=1$ 。

因此， $\lambda = 2d \cos \phi = 2 \cdot 4 \cdot \cos 67.7^{\circ} = 3.036\text{cm}$

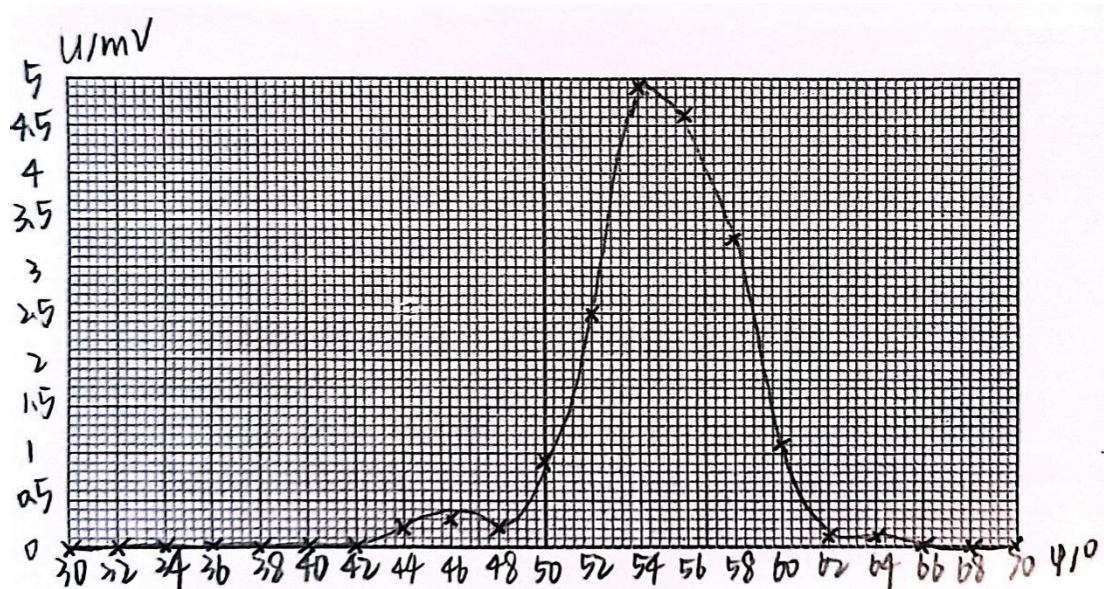
相对误差为 $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{3.036 - 3.19}{3.19} = -4.8\%$

(3) 布拉格衍射实验数据 (110) 面

Table 13

$\phi(^{\circ})$	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70
U(mV)	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.3	0.2	0.9	2.5	4.9	4.6	3.3	1.1	0.1	0.1	0	0	0

对应图像如下：

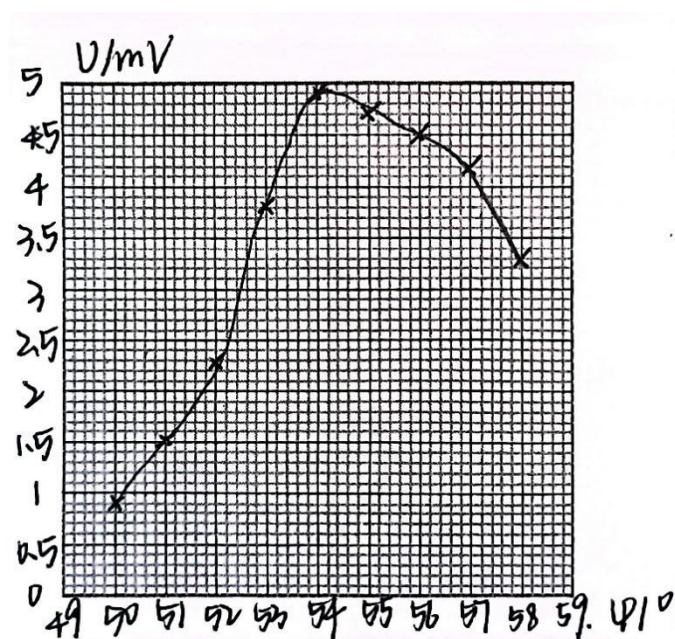


细扫数据如下：

Table 14

$\phi(^{\circ})$	50	51	52	53	54	55	56	57	58
U(mV)	0.9	1.5	2.3	3.8	4.9	4.7	4.5	4.2	3.3

对应图像如下：



综合上述图像，通过计算，得出以下数据：

Table 15

$\phi(^{\circ})$	54.3
$\lambda(\text{cm})$	3.30
相对误差	3.5%

计算过程如下：

对于 (110) 面， $d = \frac{a}{\sqrt{(1^2+1^2+0^2)}} = 2.83\text{cm}$

对于干涉加强角，有 $2d \cos \varphi = k\lambda, k = 1, 2, 3, \dots$

由于观察的是相邻晶面反射波的干涉，因此 $k=1$ 。

因此， $\lambda = 2d \cos \varphi = 2 \cdot 2.83 \cdot \cos 54.3^\circ = 3.30 \text{ cm}$

相对误差为 $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{3.30 - 3.19}{3.19} = 3.5\%$

取二者的平均值 $\lambda = 3.168 \text{ cm}$ 为实验最终得到的波长值，计算可知，相对误差为 -0.7% 。实验结果与理论值接近。

5. 微波单缝衍射实验

(1) 微波实验仪对准确认

Table 16

角度 ($^\circ$)	0	20	-20
电压 (mV)	151	12.4	12.8

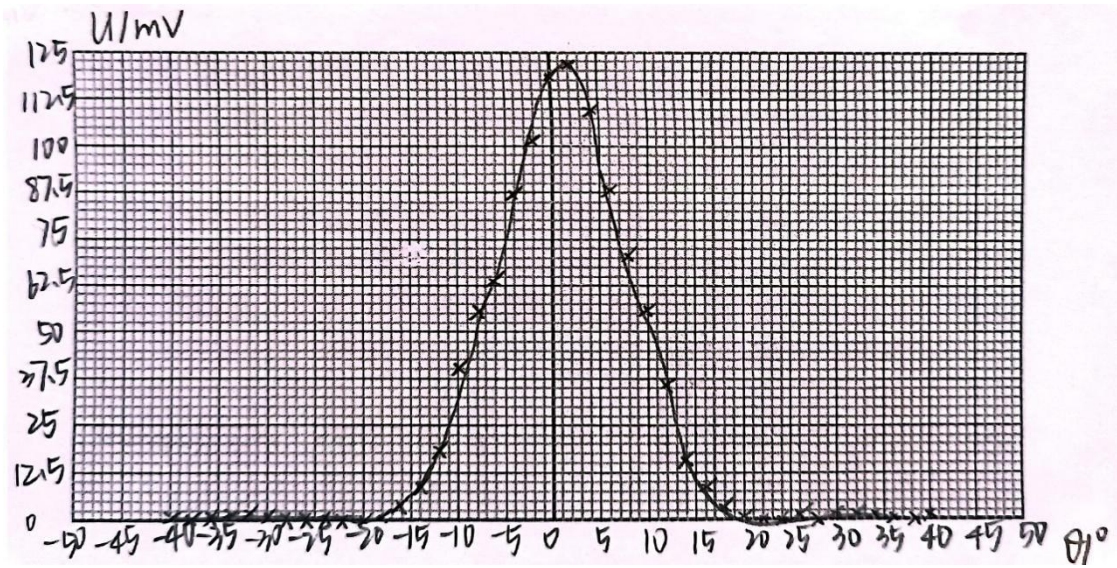
正负 20 度时，电压差值为 0.5mV，小于 2mV。故可视为接收喇叭已调节对称。

(2) 单缝实验数据

Table 17

$\theta(^{\circ})$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
$U_{\theta+}(\text{mV})$	118.4	121.9	109	87.7	71.2	56.3	35.1	15.5	8.7	3.4	0.3	0	0	0.1	0	0.1	0.4	0.9	0.6	0.1	0.1
$U_{\theta-}(\text{mV})$	118.4	101.9	87.4	62.9	55.4	41.6	18.3	8.9	3.4	0.5	0	0	0.1	0	0.1	0.5	1.1	0.7	0	0	0.7

对应图像如下：

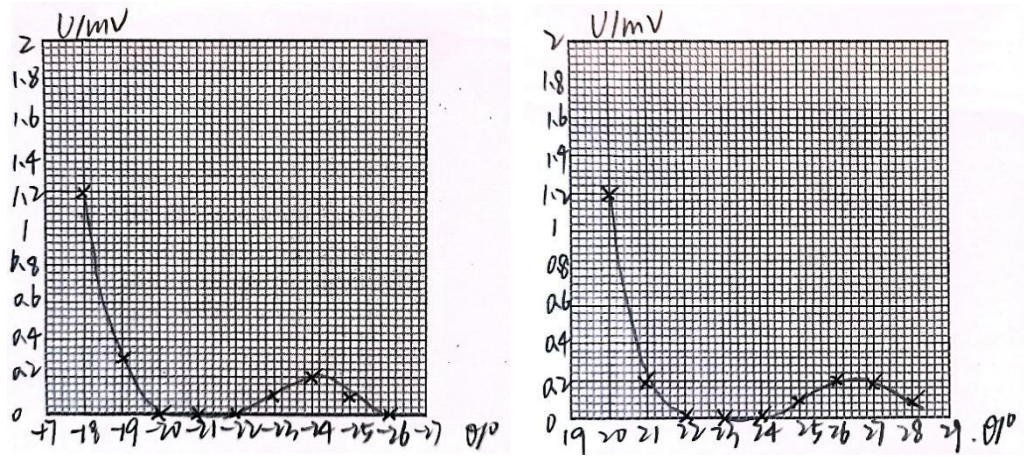


细扫数据如下：

Table 18

$\theta(^{\circ})$	20	21	22	23	24	25	26	27	28
$U_{\theta+}(\text{mV})$	1.2	0.2	0	0	0	0.1	0.2	0.2	0.1
$\theta(^{\circ})$	18	19	20	21	22	23	24	25	26
$U_{\theta-}(\text{mV})$	1.2	0.3	0	0	0	0.1	0.2	0.1	0

对应图像如下：



综合上述图像，通过计算，得到以下数据：

Table 19

正向 $\theta(^{\circ})$	21
反向 $\theta(^{\circ})$	23
$\theta(^{\circ})$	22
λ	3.00
相对误差	6.0%

计算过程如下：

根据公式 $a \sin \varphi = \pm k\lambda, k = 1, 2, 3, \dots$

由于测量的为一级极小，故 $k=1$ 。

因此， $\lambda = 8 \cdot \sin 22^{\circ} = 3.00\text{cm}$ 。

计算可得相对误差为 6.0%。

6. 微波的偏振实验

(1) 微波实验仪对准确认

Table 20

角度 ($^{\circ}$)	0	20	-20
电压 (mV)	161.2	13	12.8

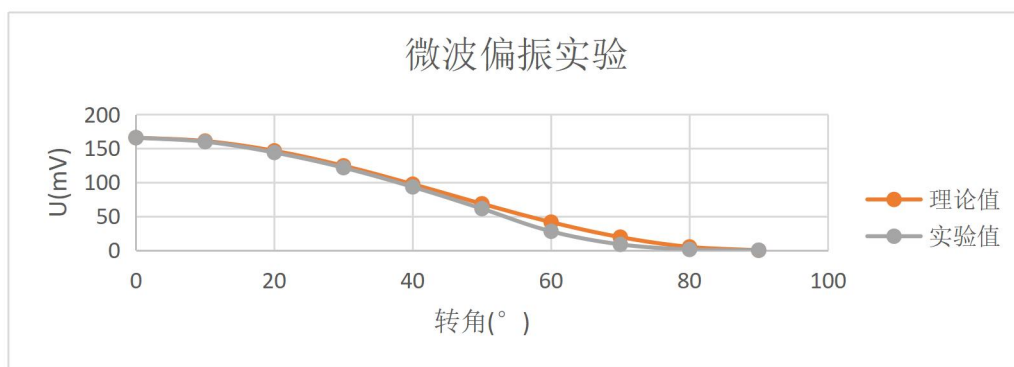
正负 20 度时，电压差值为 0.2mV，小于 2mV。故可视为接收喇叭已调节对称。

(2) 微波偏振实验数据

Table 21

转角($^{\circ}$)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
U(mV)	165.8	159.8	143.9	121.6	93.3	61.3	27.9	8.7	1.2	0.1

根据上述数据，利用 Excel 进行作图：



最初数据与理论值符合较好，后面的数据可能由于调整转角时使旋臂转动了小角度。但总体上符合马吕斯定律。

【思考题】

1. 各实验内容误差主要影响是什么？

在所有实验中，若接受喇叭没有与发射喇叭正对，则测得的数据则会有所偏差。可能在实验过程中转动时，喇叭较松，导致其角度发生变化，从而导致实验结果有误差。

双缝干涉实验的误差主要来自于环境不同导致的吸波材料影响，可能存在的双缝间距不均匀或不精确等因素。迈克尔逊干涉实验的误差主要来源于反射角对准可能受到光源和反射镜位置的不稳定性等因素的影响。布拉格衍射实验的主要误差为反射角对准和角度调整的精度可能受到实验仪器和调节装置的限制。单缝衍射实验的主要误差为环境因素、极小值判断的主观性等因素。偏振实验的主要误差为接收臂移动的不准确性，示数跳动可能由仪器本身的故障或测量仪器的误差引起。

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。

a) 导体（金属）：

- **反射特性：** 金属是优秀的微波反射器，因为导体内的自由电子能够有效地对微波进行反射。金属表面能够将微波反射回去，减小透射和吸收。
- **透射特性：** 导体对微波的透射较差，因为自由电子会导致微波的快速衰减。微波通常难以穿透金属表面。
- **吸收特性：** 金属表面对微波有很高的吸收能力，特别是在微波频率较高时。这导致微波能量被金属吸收，产生热量。

b) 非导体：

- **反射特性：** 非导体的微波反射特性取决于其介电常数，即物质对电场的响应能力。一些非导体具有较高的介电常数，因此它们在一定程度上能够反射微波。
- **透射特性：** 非导体对微波的透射能力较好，特别是在介电常数较低的情况下。一些非导体材料可以让微波穿透，尽管可能会发生一些散射。
- **吸收特性：** 非导体在一些特定频率下可能对微波有较高的吸收。这通常与分子的共振频率相关。在这些频率下，微波能量被吸收并转化为热能。

总体而言，导体（金属）对微波的反射较好，而非导体对微波的透射较好。吸收特性取决于物质的性质和微波的频率。

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？

吸波材料内部有孔洞和碳粉，这样的设计可以增加微波在材料内部的多次反射和散射，从而提高吸收效果。确保吸波材料内部结构的尺寸与要吸收的波的波长在同一数量级是合理的，因为这样可以

更好地匹配波的特性，从而提高吸收效率。在微波波段，波长通常在毫米到米的范围内，因此吸波材料内部结构的尺寸也应该在这个范围内。如果结构的尺寸远小于波长，波将很容易穿透或反射，减弱吸收效果。相反，如果尺寸太大，微波可能无法有效地进入吸波材料内部，同样会影响吸收效果。方锥的结构能够增加内部表面积，促使微波更多地与材料发生相互作用。此外，孔洞和碳粉的存在可以引导微波进行多次的反射和吸收。这些设计都有助于提高吸波材料对微波的吸收性能。

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？

会增加实验的复杂性。可以通过 X 射线衍射的方法，即使用 X 射线照射晶体并通过转动晶体找到出射 X 射线强度最强的位置，这些位置对应于布拉格衍射的条件。