

《基础物理实验》实验报告

实验名称 微波布拉格衍射实验 指导教师 易栖如
姓 名 任昊霖 学号 2022K8009908022 分班分组及座号 2 - 03 - 7 号 (例: 1-04-5 号)
实验日期 2023 年 10 月 10 日 实验地点 教 717 调课/补课 ☐ 是 ☒ 否 成绩评定

微波布拉格衍射实验

一、实验目的

1. 了解并学习微波产生的基本原理以及传播和接收等特性。
2. 观测微波的衍射、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。

二、仪器用具

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）

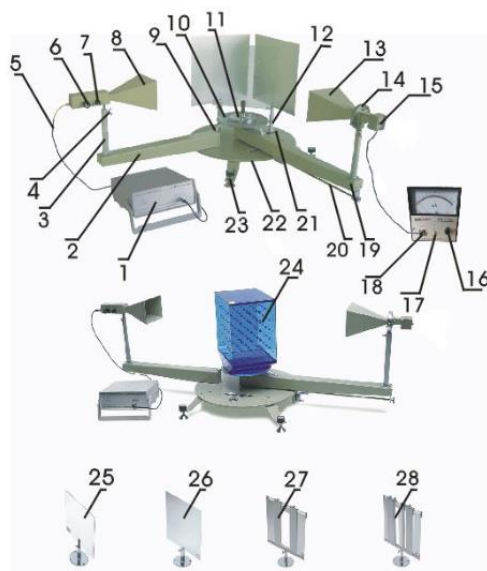


图 1 微波光学综合实验仪

- | | | | | |
|-------------|---------------|--------------|-----------|------------|
| 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 | |

三、实验原理

微波波长介于 1 m 至 0.1 mm ，因而可以在宏观尺度发生衍射和干涉；频率介于无线电波和光波之间，具有光波性质。发生器产生微波信号，检波器把微波信号转化为电信号从而显示微波相对强度。

1. 微波的双缝干涉实验

平面波垂直入射到金属板的两条狭缝上，狭缝就成为次级波波源。次级波源发出的两列波在不同角度下光程差不同，发生干涉。当双缝的缝宽 α 接近微波波长 λ 时，干涉加强的角度为：

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

干涉减弱的角度为：

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

其中 b 是两个狭缝的间距。

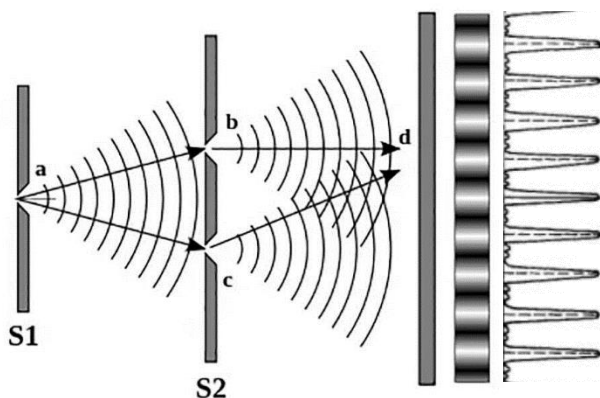


图 1 双缝干涉示意图

2. 微波的迈克尔逊干涉实验

当微波接收信号在相邻两个极值间变化时，反射板移动了 $\lambda/2$ 的距离。以第一个测量的极小值作为起点，经历的第 n 个极小值的位置为终点，设此时接收装置移动距离为 L ，那么有

$$L = \frac{\lambda}{2} \cdot n$$

可以推出

$$\lambda = 2L/n$$

(9.4)

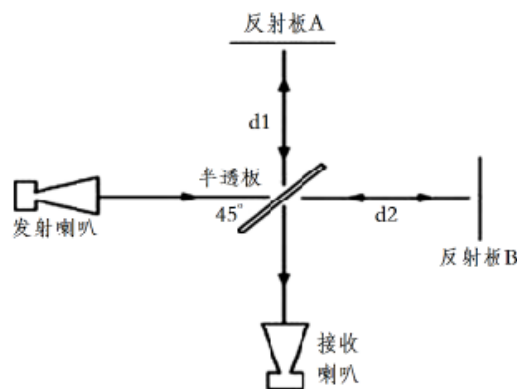


图 2 迈克尔逊干涉原理示意图

3. 微波布拉格衍射

晶体是有明确衍射图案的固体，其原子或分子在空间按一定规律周期重复地排列。在本实验中，我们研究(100)面和(110) 面。

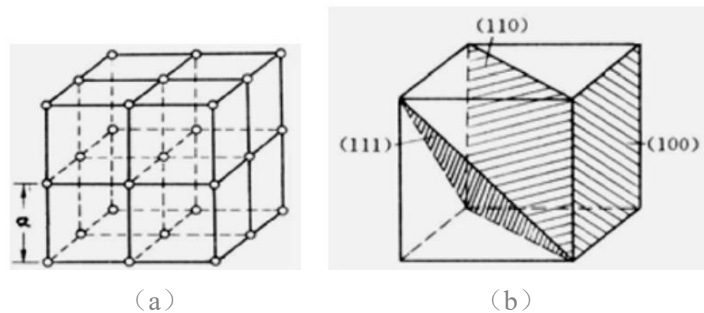


图 3 (a) 立方晶格模型 (b) 晶面指数

晶体对电子波衍射的实质是每个格点上的原子产生的散射波的可干叠加。它们的可干叠加的第一步可看作是同一晶面上各个原子发出的散射波的可干叠加，形成每一个晶面的衍射波；第二步是同一晶面族的不同晶面的衍射波之间的可干叠加。

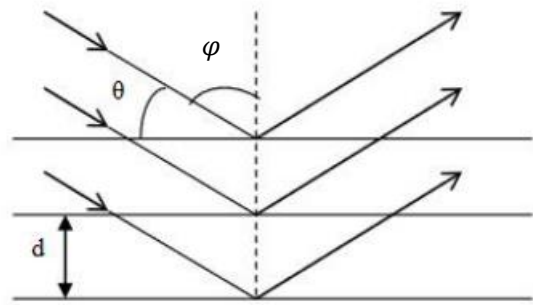


图 4 同一种晶面的散射波示意图

根据可干叠加的性质，只有当程差为波长的正整数倍时，才会出现干涉极大的现象，这称为晶体衍射的布拉格条件：

$$2d\sin\theta = k\lambda \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

即

(9.5)

$$2d\cos\varphi = k\lambda \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

在实验中测得衍射极大的方向角 φ ，并且知道波长 λ 时，可以通过此关系式求出晶面距离 d ，进一步可以确定晶格常数 a 。

四. 实验内容

打开发射喇叭电源，转动载物圆台使其 180° 刻度对准发射喇叭，调节发射喇叭使其正对中心，按照发射喇叭上的表格将频率调整至 9.4GHz ，对应波长为 3.19cm 。调节接收喇叭位置，使其正对载物圆台 0° 刻度，调节发射喇叭功率，使接收喇叭读数在 150mV 左右。不断调节接收喇叭角度，使接收喇叭在 $\pm 20^\circ$ 的度数差距在 2mV 以内。

1. 微波双缝干涉实验

调节双缝干涉板的缝宽，使其约为 3.5cm ，将双缝干涉板安装在载物平台的支架上，并调节双缝干涉板位置，使其垂直于发射喇叭和接收喇叭的连线。调节发射喇叭功率，使接收喇叭的度数在 150mV 左右。以 2° 为步长，粗扫 $\pm 50^\circ$ 范围并记录度数。之后调整接收喇叭至干涉波的零级极小、一级极小和一级极大位置附近，以 1° 为步长精扫 8° 至 10° 范围并记录度数。

2. 迈克尔逊干涉实验

将接收喇叭调节至载物圆台 90° 刻度，使其与发射喇叭成 90° 角。在载物圆台上安装一个玻璃板，使其与 135° 刻度重合。安装两个反射板，并使两个反射板成 90° 角。转动平台侧部手柄，并时刻观察接收喇叭度数，若出现过曝，则适当降低发射喇叭功率，使接收喇叭度数最大值不过曝。继续调节旋转手柄，使接收喇叭度数最小接近 0mV ，并记录此时的反射板位置刻度。反复调节四次最小度数并记录刻度。

3. 布拉格衍射实验

将模拟晶格安装在载物平台上，令接收喇叭和发射喇叭正对，调节发射喇叭功率使接收喇叭不过曝。使模拟晶格（100）面正对载物平台的 0° 刻度。然后让发射喇叭、接收喇叭位于 0° 刻度两侧相同度数位置进行步长为 2° ，刻度范围为 30° 至 80° 的粗扫并记录读书。在粗扫度数最大值附近进行步长为 1° 的精扫，记录度数。对（110）面进行类似操作。

五. 实验数据处理与分析

1. 实验条件确认：

微波频率： 9.4GHz

微波波长： 3.19cm

2. 微波实验仪对准确认

角度 ($^{\circ}$)	0	20	-20
电压 (mV)	119.0	10.9	10.8

3. 双缝干涉实验

$\theta (^{\circ})$	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$U_{\theta+}$ (mV)	94.4	91.3	80.8	47.2	6.1	0.1	0.7	4.6	17.2
$U_{\theta-}$ (mV)		88.9	78.2	44.5	5.2	0.4	1.2	6.4	19.0
$\theta (^{\circ})$	18	20	22	24	26	28	30	32	34
$U_{\theta+}$ (mV)	40.1	64.3	71.8	59.1	37.0	11.8	2.4	0.9	0.7
$U_{\theta-}$ (mV)	51.8	71.1	75.2	53.9	26.0	6.7	2.3	2.5	7.3
$\theta (^{\circ})$	36	38	40	42	44	46	48	50	
$U_{\theta+}$ (mV)	2.1	5.8	6.8	2.6	1.7	8.4	18.1	15.4	
$U_{\theta-}$ (mV)	12.3	12.7	3.6	1.0	5.4	25.5	27.1	8.4	

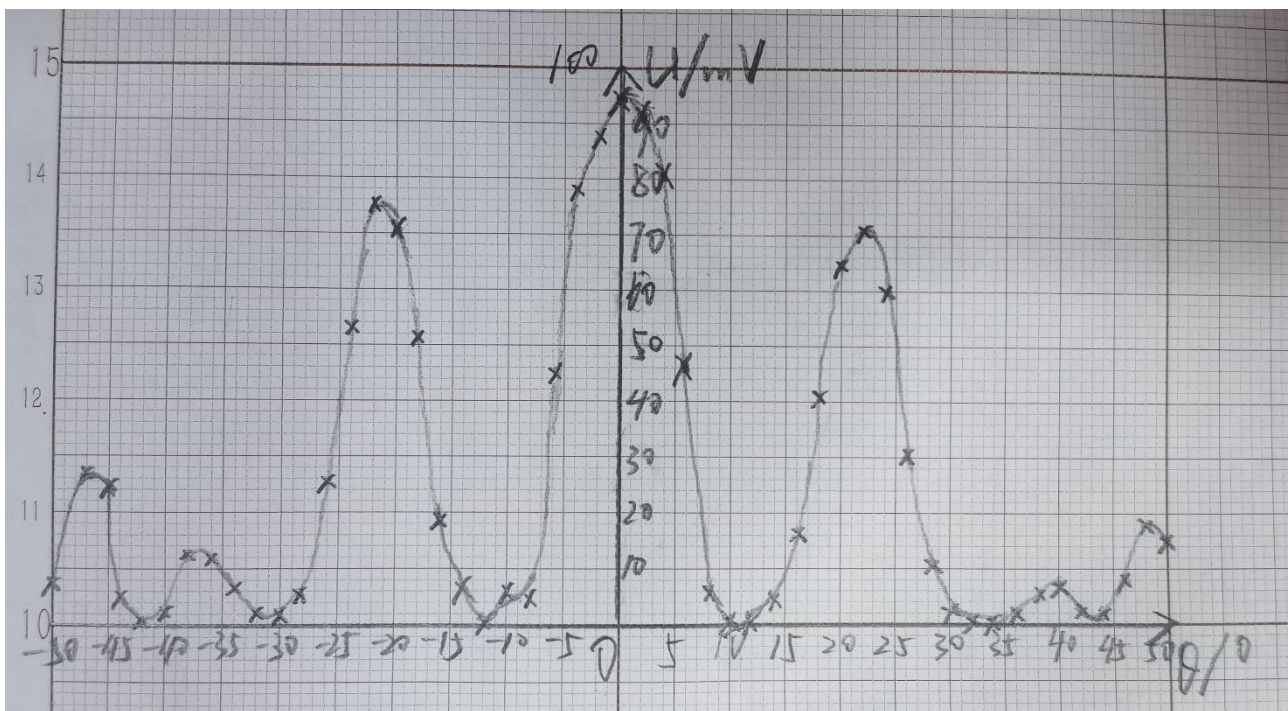


图 5 微波双缝干涉 强度-角度曲线

一级极大

根据实验数据确定扫描角度， 1° 角间隔。

$U_{\theta+}$ (mV)	522.0	61.9	71.2	69.0	65.6	58.6
θ ($^\circ$)	19	20	21	22	23	24
$U_{\theta-}$ (mV)	55.5	70.2	77.2	74.1	67.5	54.4

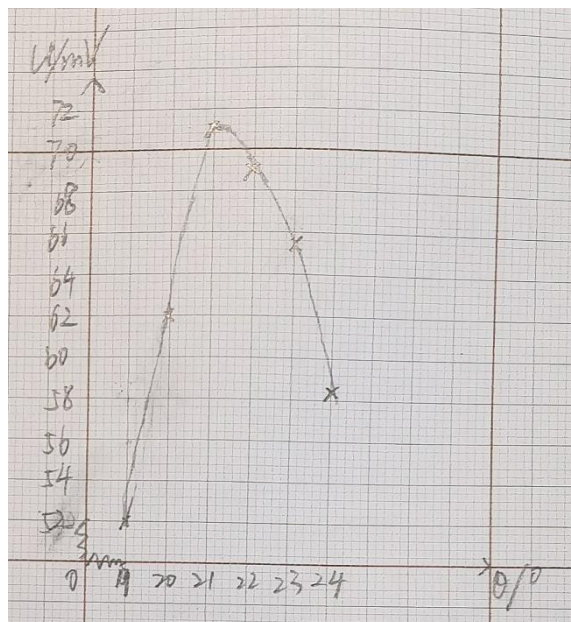


图 6 干涉一级极大精扫强度-角度曲线（正向）

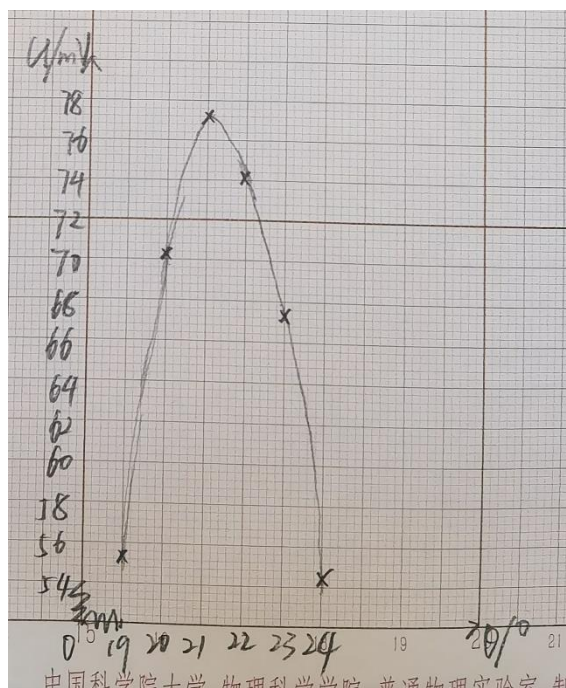


图 7 干涉一级极大精扫强度-角度曲线（负向）

零级极小

调节功率（根据实验数据确定扫描角度， 1° 角间隔）

$\theta (^\circ)$	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{\theta+} (\text{mV})$	22.6	6.6	1.2	0.1	0.1	0.7	1.8	3.9	7.8
$\theta (^\circ)$	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{\theta-} (\text{mV})$	20.1	6.4	1.2	0.5	0.8	1.3	3.5	7.3	10.7

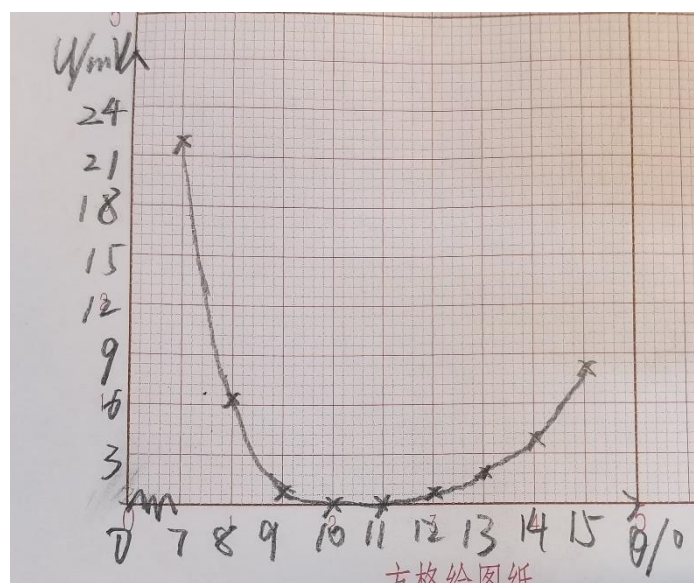


图 8 干涉零级极小精扫强度-角度曲线（正向）

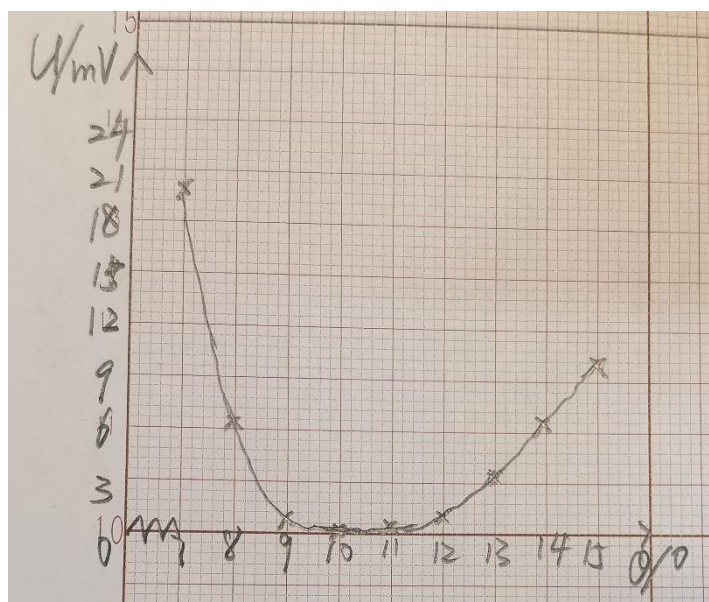


图 9 干涉零级极小精扫强度-角度曲线（负向）

一级极小

调节功率 （根据实验数据确定扫描角度， 1° 角间隔。）

$\theta (^\circ)$	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
$U_{\theta+} (\text{mV})$	6.0	2.4	1.2	0.8	0.7	0.8	1.3	2.2	4.0	6.1
$\theta (^\circ)$	28	29	30	31	32	33	34			
$U_{\theta-} (\text{mV})$	4.1	2.8	1.9	1.9	3.0	4.2	8.0			

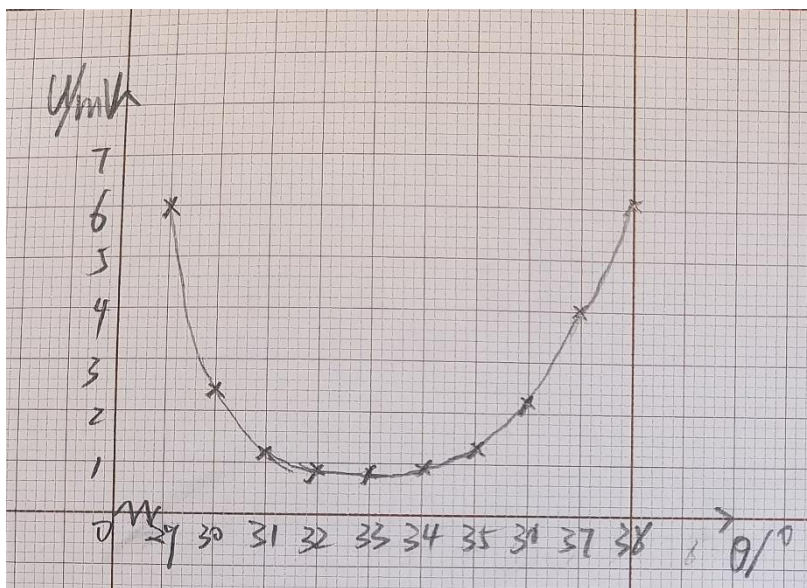


图 10 微波双缝干涉实验正向一级极小细扫图

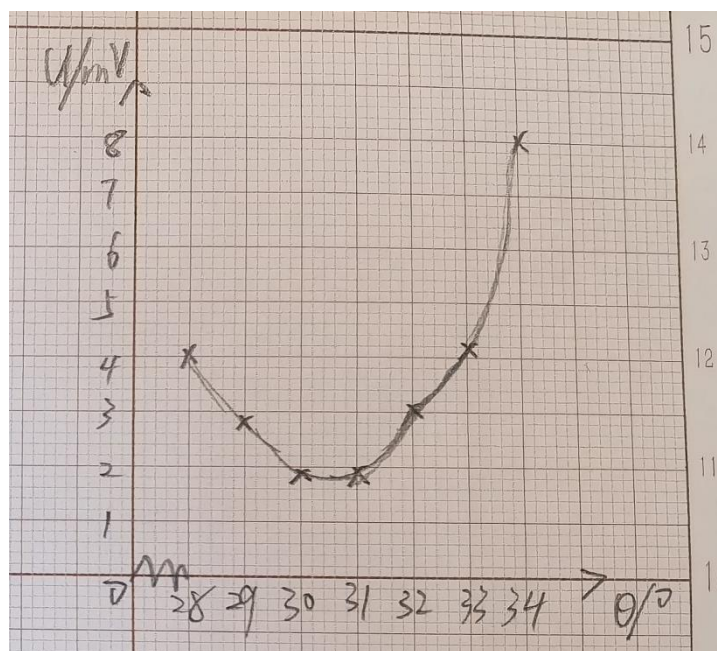


图 11 微波双缝干涉实验负向一级极小细扫图

【实验结果分析】

干涉加强角度： $\sin^{-1}\left(k \cdot \frac{\lambda}{a+b}\right)$ ，减弱角度 $\sin^{-1}\left(\frac{2k+1}{2} \cdot \frac{\lambda}{a+b}\right)$ ， $k = 1, 2, 3, \dots$

则：

$$\text{干涉加强: } \lambda_{\text{加强}} = \sin \theta_{\text{加强}} \cdot \frac{a+b}{k} \quad \text{干涉减弱: } \lambda_{\text{减弱}} = \sin \theta_{\text{减弱}} \cdot \frac{a+b}{\frac{1}{2}(2k+1)}$$

一级极大：由图 6、图 7 知： $\theta_{1,\max} = \frac{21.4^\circ + 21.2^\circ}{2} = 21.3^\circ$

$$\lambda_{1,\max} = \sin \theta_{1,\max} \cdot \frac{a+b}{k} = \sin 21.3^\circ \cdot \frac{3.5\text{cm} + 5\text{cm}}{1} = 3.088\text{cm}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda_{1,\max} - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{3.088\text{cm} - 3.19\text{cm}}{3.19\text{cm}} = -3.20\%$$

零级极小：由图 8、图 9 知： $\theta_{0,\min} = \frac{10.5^\circ + 10.5^\circ}{2} = 10.5^\circ$

$$\lambda_{0,\min} = \sin \theta_{0,\min} \cdot \frac{a+b}{\frac{1}{2}(2k+1)} = \sin 10.5^\circ \cdot \frac{3.5\text{cm} + 5\text{cm}}{\frac{1}{2}} = 3.098\text{cm}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda_{0,\min} - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{3.098\text{cm} - 3.19\text{cm}}{3.19\text{cm}} = -2.88\%$$

一级极小：由图 10、图 11 知： $\theta_{1,\min} = \frac{32.8^\circ + 30.5^\circ}{2} = 31.7^\circ$

$$\lambda_{1,\min} = \sin \theta_{1,\min} \cdot \frac{a+b}{\frac{1}{2}(2k+1)} = \sin 31.7^\circ \cdot \frac{3.5\text{cm} + 5\text{cm}}{\frac{3}{2}} = 2.978\text{cm}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda_{1,\min} - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{2.978\text{cm} - 3.19\text{cm}}{3.19\text{cm}} = -6.65\%$$

平均波长：

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_{1,\max} + \lambda_{0,\min} + \lambda_{1,\min}}{3} = \frac{3.088\text{cm} + 3.098\text{cm} + 2.978\text{cm}}{3} = 3.055\text{cm}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\bar{\lambda} - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{3.055\text{cm} - 3.19\text{cm}}{3.19\text{cm}} = -4.23\%$$

就结果而言，计算所得波长均小于理论波长，这表明发射喇叭的频率选择可能不准确，导致发射的波长小于 3.19cm。同时注意到，正负角度下的接收喇叭示数不同，这可能是两侧的环境不同、双缝间距调节不准确导致的。

4. 微波迈克尔逊干涉实验

最小点读数 (cm)	5.75	4.05	2.65	1.10
------------	------	------	------	------

【实验结果分析】

$$\lambda = \frac{2L}{n} = \frac{2 \cdot (5.75\text{cm} - 1.10\text{cm})}{3} = 3.10\text{cm}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{3.10\text{cm} - 3.19\text{cm}}{3.19\text{cm}} = -2.82\%$$

实验误差较小，说明结果较为准确。可能的误差来源有：反射板无法做到垂直安装、反射板自身不平整。

5. 微波布拉格衍射实验

微波布拉格衍射（100）晶面

面间距 $d = 4\text{cm}$ φ_1 为入射角度（反射角度）

$\varphi_1 (^{\circ})$	30	32	34	36	38	40	42	44	46
$U (\text{mV})$	14.6	13.0	9.0	13.1	26.3	38.2	17.0	5.2	11.5
$\varphi_1 (^{\circ})$	48	50	52	54	56	58	60	62	64
$U (\text{mV})$	31.4	17.2	1.6	4.7	4.8	3.6	54.0	30.0	70.4
$\varphi_1 (^{\circ})$	66	68	70	72	74	76	78	80	
$U (\text{mV})$	170.3	174.1	2.4	5.8	49.4	15.7	19.6	81.4	

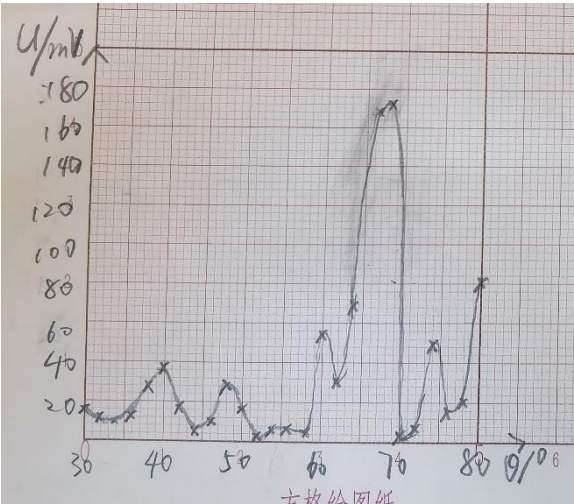


图 12 微波布拉格衍射晶面(100)衍射图
(根据实验数据调整功率，确定扫描角度，1° 间隔)

$\varphi_1 (^{\circ})$	64	65	66	67	68	69	70
------------------------	----	----	----	----	----	----	----

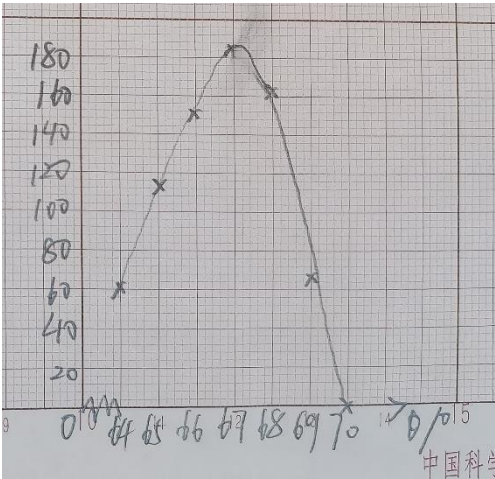


图 13 微波布拉格衍射晶面(100)极大值细扫图

U (mV)	61.5	116.2	152.5	185.3	165.9	65.5	1.9
----------	------	-------	-------	-------	-------	------	-----

微波布拉格衍射 (110) 晶面
面间距 $d = 2.828 \text{ cm}$ φ_1 为入射角度 (反射角度)

φ_1 (°)	30	32	34	36	38	40	42	44	46
U (mV)	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.7
φ_1 (°)	48	50	52	54	56	58	60	62	64
U (mV)	0.8	4.9	10.8	23.3	23.3	27.6	6.2	0.5	0.9
φ_1 (°)	66	68	70						
U (mV)	0.1	0.1	0.2						

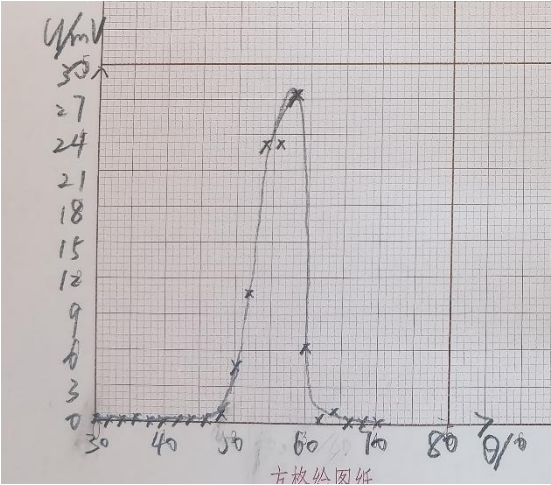


图 14 微波布拉格衍射晶面(110)衍射图
(根据实验数据调整功率，确定扫描角度，1° 间隔)

φ_1 (°)	52	53	54	55	56	57	58	59	60
-----------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----

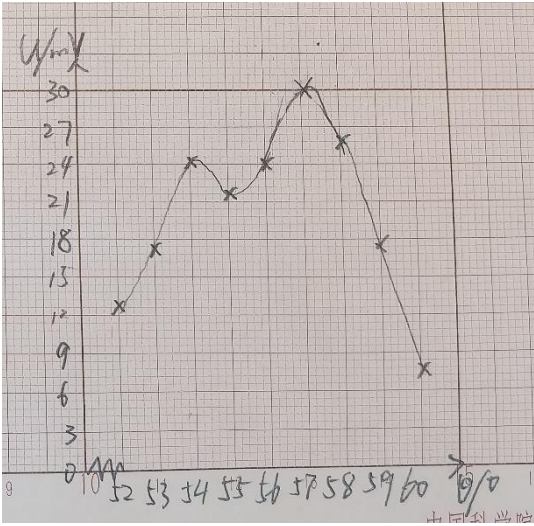


图 15 微波布拉格衍射晶面(110)极大值细扫图

U (mV)	11.0	17.2	24.3	21.5	24.3	30.4	26.7	17.4	8.0
----------	------	------	------	------	------	------	------	------	-----

【实验结果分析】

晶体衍射的布拉格条件： $= k\lambda$ $k = 1, 2, 3, \dots$

得： $\lambda = \frac{2d\cos\varphi}{k}$ $k = 1, 2, 3, \dots$

此实验中， $k=1$ ，因此 $\lambda = 2d\cos\varphi$

100 面：由图 13 知： $\varphi = 67.1^\circ$

$$\lambda = 2d\cos\varphi = 2 \cdot 4\text{cm} \cdot \cos 67.1^\circ = 3.11\text{cm}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{3.11\text{cm} - 3.19\text{cm}}{3.19\text{cm}} = -2.51\%$$

晶体模型 100 晶面的布拉格衍射在 67° 附近取极大值，接近理论预期。在极值点附近微波信号强度迅速增大，相邻晶面干涉加强时的强度明显高于其他干涉加强或者偶然波动。

110 面：由图 15 知： $\varphi = 57.2^\circ$

$$\lambda = 2d\cos\varphi = 2 \cdot 2.828\text{cm} \cdot \cos 57.2^\circ = 3.06\text{cm}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{3.06\text{cm} - 3.19\text{cm}}{3.19\text{cm}} = -4.08\%$$

晶体模型 110 晶面的布拉格衍射在 57° 附近取极大值，接近理论预期。在极值点附近微波信号强度迅速增大，相邻晶面干涉加强时的强度明显高于其他干涉加强或者偶然波动。由于晶体模型 110 晶面的性质，干涉加强的强度较小，且其他干涉加强或减弱也不明显。

就结果而言，计算所得波长同样小于理论波长，表明发射喇叭的频率选择可能不准确，导致发射的波长小于 3.19cm 。可能的误差来源有：晶体排放位置有细微偏差。衍射极大入射角为目测法估计的近似值，不完全准确。

六. 思考题

1.各实验内容误差主要影响是什么？

发射喇叭的微波频率调节并非完全准确，导致真实频率并非 9.4Ghz 。

实验所用双缝间距调节不准确、双缝板不平整。

接收喇叭度数跳动，导致度数与真实值存在差距。

调节接受喇叭角度时，无法准确调节步长为 2° 。

实验环境对于微波来说不对称，正负两方向波的相位不同。

反射板自身不平整，安装时无法保证两板完全垂直。

使用的模拟晶格小球间距存在误差。

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。

绝缘体可使微波透过，极性物质可吸收微波。

导体的电导率大，因此对微波的反射率高。非导体电导率小，对微波反射率低。因而微波会被导体反射，会穿过非导体或被非导体吸收。

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？

吸波材料成分主要为海绵。微波到达海绵时与海绵产生谐振，于是微波的能量全部转化为内能耗散掉，从而实现了对微波的吸收。吸收材料有许多的尖的凸起。这些凸起的间距应和屏蔽微波波长相等。

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，因为此时难以确定晶面法线方向，需要额外进行测量。

以任意角度放置晶面，转动接收喇叭，接收喇叭度数最大时，晶面法向为发射喇叭与接收喇叭角平分线方向。

七. 实验讨论与感想

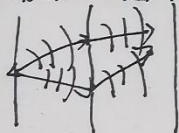
实验中因为实验仪器问题和个人操作问题导致实验结果存在着不小的误差。因此日后的实验中应当尽力认真操作，减小由个人操作问题带来的实验误差。

八. 附录

任昊霖

实验九预习

1. 微波的双缝干涉

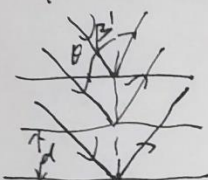


$$\theta = \sin^{-1} \left(k \cdot \frac{\lambda}{a \sin \alpha} \right)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{2k+1}{2} \cdot \frac{\lambda}{a \sin \alpha} \right)$$

测量接收信号大小、角度、缝宽，计算入及百分误差

2. 布拉格衍射

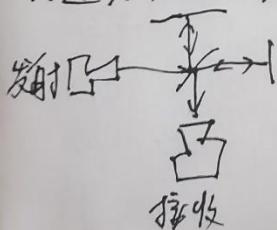


$$2d \sin \theta = k\lambda, k=1,2,3,\dots$$

$$2d \cos \beta = k\lambda, k=1,2,3,\dots$$

测量反射角与信号大小，测量估算值并附近满足 \times 射角等于反射角条件下衍射强度 I 的关系曲线。

3. 迈克尔逊干涉实验



干涉叠加强度由两束波程差决定。

相位差为 $2k\pi$ 时干涉加强，为 $2k\pi+\pi$ 时干涉最弱。

测量反射板移动距离 Δx ，求出微波波长

4、微波迈克尔逊干涉实验

(1) 微波实验仪姿态确认

(2) 实验数据记录

最小点读数	4.80 5.75	4.35 4.05	2.65	1.10
-------	----------------------	--------------	------	------

5、微波布拉格衍射实验

(1) 微波实验仪姿态确认 (放置实验晶格前)

(2) 布拉格衍射实验数据 (100) 晶面

面间距 $d = 4\text{cm}$

φ_i 为入射角度 (反射角度)

φ_i (°)	30	32	34	36	38	40	42	44	46
U (mV)	14.6	13.0	9.0	13.1	26.3	38.2	17.0	5.2	11.5
φ_i (°)	48	50	52	54	56	58	60	62	64
U (mV)	31.4	17.2	1.6	4.7	4.8	3.6	34.0	30.0	10.4
φ_i (°)	66	68	70	72	74	76	78	80	
U (mV)	170.3	174.1	2.4	5.8	49.4	15.7	19.6	81.4	

(根据实验数据调节功率, 确定扫描角度, 1° 角间隔)

63
17.)

φ_i (°)	64	65	66	67	68	69	70	71	
U (mV)	61.5	140.0	171.6	185.3	165.9	65.5	1.9		

116.2 152.5

(3) 布拉格衍射实验数据 (110) 面

面间距 2.5cm

φ_i 为入射角度 (反射角度)

φ_i (°)	30	32	34	36	38	40	42	44	46
U (mV)	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.7
φ_i (°)	48	50	52	54	56	58	60	62	64
U (mV)	0.8	4.9	10.8	23.3	23.3	27.6	6.2	0.5	0.9
φ_i (°)	66	68	70						
U (mV)	0.1	0.1	0.2						

(根据实验数据调节功率, 确定扫描角度, 1° 角间隔)

φ_i (°)	52	53	54	55	56	57	58	59	60
U (mV)	11.0	17.2	24.3	21.5	24.3	30.4	26.7	17.4	8.0

基础物理实验原始数据记录

实验名称 微波布拉格衍射 地点 教学楼 715/717

学生姓名 任景豪 学号 分班分组座号 号 (例: 1-04-5 号)

实验日期 2023 年 10 月 10 日 成绩评定 教师签字 王振如

1、实验条件确认: 微波频率: 9.4GHz 微波波长: 3.19cm

2023.10.10

2、微波实验仪对准确认

角度 (°)	0	20	-20
电压 (mV)	119.0	10.9	10.8

3、双缝干涉实验

θ (°)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$U_{\theta+}$ (mV)	41.4	91.3	80.8	47.2	26.1	20.1	20.7	24.6	17.2
$U_{\theta-}$ (mV)		88.9	78.2	44.5	28.0	20.4	1.2	6.4	19.0
θ (°)	18	20	22	24	26	28	30	32	34
$U_{\theta+}$ (mV)	40.1	64.3	71.8	59.1	37.0	11.8	22.4	20.9	22.7
$U_{\theta-}$ (mV)	51.8	71.7	75.2	53.9	26.0	6.7	2.3	2.5	7.3
θ (°)	36	38	40	42	44	46	48	50	
$U_{\theta+}$ (mV)	22.1	25.8	26.8	22.6	21.7	28.4	18.1	15.4	
$U_{\theta-}$ (mV)	12.3	12.7	3.6	1.0	5.4	25.5	27.1	28.4	

一级极大

(根据实验数据确定扫描角度, 1°角间隔)

$U_{\theta+}$ (mV)	32.0	61.9	71.2	69.0	65.6	58.6			
θ (°)	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{\theta-}$ (mV)	20.1	6.4	1.2	0.5	0.8	1.3	3.5	7.3	10.7
θ	19	20	21	22	23	24	25	26	27
零级极小	55.5	70.2	77.2	74.1	67.5	54.4			

调节功率 (根据实验数据确定扫描角度, 1°角间隔)

θ (°)	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{\theta+}$ (mV)	22.6	6.6	1.2	0.1	0.1	0.7	1.8	3.9	2.8
θ (°)	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{\theta-}$ (mV)	20.1	6.4	1.2	0.5	0.8	1.3	3.5	7.3	10.7

一级极小

调节功率 (根据实验数据确定扫描角度, 1°角间隔)

θ	31	32	33	34	35	36	37	38	
$U_{\theta+}$ (mV)	1.2	0.8	0.7	0.8	1.3	2.2	4.0	6.1	
θ (°)	27	28	29	30	31	32	33	34	
$U_{\theta-}$ (mV)	10.9	3.0	2.8	1.9	1.9	3.0	4.2	8.0	

28
29
13.2 6.0