

《基础物理实验》实验报告

分组号：01—9

实验名称 微波布拉格衍射 指导教师 张龙
姓 名 李奉治 学号 2016K8009929036 专 业 计算机科学与技术 组内编号 08
实验日期 2017 年 12 月 07 日 实验地点 教 717 成绩评定

微波布拉格衍射

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。

二、仪器用具

DHMS-1 型微波光学综合实验仪一套

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

实验用附件

反射板、分束板、单缝板、双缝板、晶体模型

三、实验原理

1.微波

微波是指频率为 300MHz~300GHz 的电磁波，是无线电波中一个有限频带的简称，即波长在 1 毫米~1 米之间的电磁波，是分米波、厘米波、毫米波的统称。

2.微波单缝衍射实验

衍射是指波遇到障碍物时偏离原来直线传播的物理现象。当一束微波入射到一个宽度 a 和波长 λ 可以比拟的狭缝时会发生衍射。接收器汇聚各衍射方向上的微波，而每个方向上的微波都可以看成这个方向上小范围内的平面波，因此可以认为这是夫琅禾费衍射。使用夫琅禾费衍射的推导方法，沿着 θ 的方向衍射的微波强度为：

$$I_{\theta} = (I_0 \sin^2 u) / u^2$$

上式中 I_0 是中央主极大中心的微波强度， $u = (\pi a \sin \theta) / \lambda$ ， a 为单缝的宽度， λ 是微波的波长， θ 为衍射角。可以发现，当 $u = k\pi$ 时， $I_{\theta} = 0$ 。这就要求 $k\pi = (\pi a \sin \theta) / \lambda$ ，进而解出 $\lambda = (a \sin \theta) / k$ 。在本实验中， a 是固定的，取 $k = 1$ 的情况，那么 λ 就可以由测量得出的 θ 计算出来。

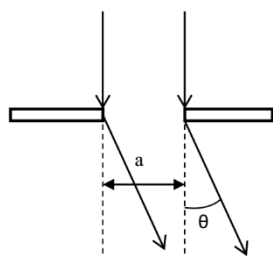


图 1 单缝衍射示意图

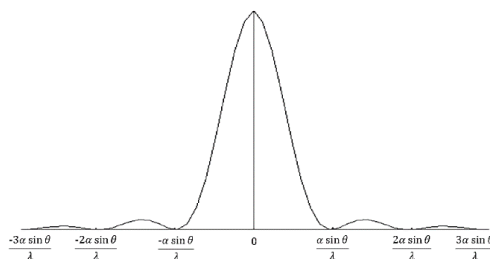


图 2 单缝衍射强度分布

3.微波双缝干涉实验

干涉在物理学中，指的是两列或两列以上的波在空间中重叠时发生叠加，从而形成新波形的现象。当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。由两缝发出的次级波是相干波，因此在金属板后的空间中，将产生干涉现象。使用光程差进行计算，可以得到干涉加强的角度为：

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

干涉减弱的角度有：

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{2k + 1}{2} \cdot \frac{\lambda}{a + b} \right) \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

上式中 a 是狭缝的宽度， b 是两个狭缝的间距， λ 是微波的波长。在本实验中， a 和 b 是固定的，分别取主极大两侧干涉加强 $k = 1$ 和干涉减弱 $k = 0$ 或 1 的 6 种情况，那么可以由测量得出的 φ 计算出对应的 6 个 λ 值。

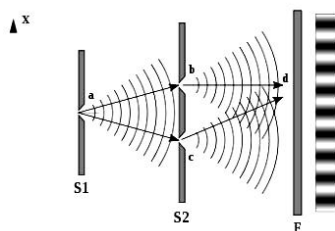


图 3 双缝干涉示意图

4.迈克尔逊干涉实验

迈克尔逊干涉仪是 1881 年美国物理学家迈克尔逊和莫雷合作，为研究“以太”漂移而设计制造出来的精密光学仪器。它是利用分振幅法产生双光束以实现干涉。本实验中，我们使用相似的装置进行微波的迈克尔逊干涉实验，示意图如图 4。

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。把第一个测量的极小值作为起点，接收装置向某一方向移动，经历的第 n 个极小值的位置为终点，此时接收装置移动距离为 L ，则 $\lambda = 2L/n$ 。那么 λ 就可以由测量得出的 L 计算出来。

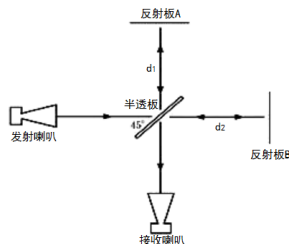


图 4 迈克尔逊干涉原理示意图

5.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，我们的模型是简单立方排列的晶体模型。**晶面**是指通过晶体中原子中心的平面，为了表示晶面，我们取该平面与选定三维坐标系的坐标轴截距，将三个截距值取倒数并化为最小整数比，这三个数称为晶面指数。在本实验中，我们研究(100)面和(110)面，示意图如图 5 所示。根据立体几何的平行平面距离公式，可以得到晶面指数为 (n_1, n_2, n_3) 的晶面族，相邻两个晶面间距 $d = \sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2}$

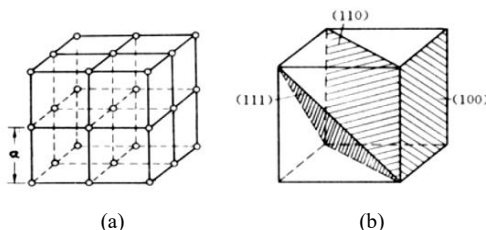


图 5 (a)立方晶体晶格 (b)晶面指数

如同光波入射到二维的平面光栅要受到光栅的衍射，电磁波入射到晶体也要受到晶体的衍射。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相干叠加。它们的相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相干叠加，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相干叠加。

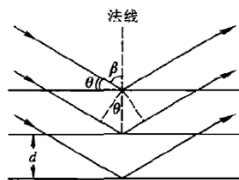


图 6 不同晶面的散射波示意图

同一晶面上的原子形成的散射波相干叠加的效果遵从反射定律，而两个间隔为 d 的相邻晶面的反射波的程差为 $2d \sin \theta$ 。根据相干叠加的性质，只有程差为波长的正数倍时，才会出现干涉极大，即：

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

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

在本实验中，我们测得衍射极大的方向角 β ，且已知晶面间距 d ，即可以求出波长 λ 。

四、实验内容

1.实验准备

打开仪器电源，将发射喇叭口正对中心并固定，按照仪器对应的校准标签将微波频率调整至 9.4GHz，对应波长为 3.1915cm。将接收喇叭正对发射喇叭，通过射频源上的衰减器旋钮进行调节，使接收传感器的读数为 100-150mV。分别将接收臂调整至正负 20 度，微调接收喇叭的方向使两个角度上的接收值近似相等。在实验中，为方便调节，可以计算出两个角度的读数平均值，然后将正 20 度或负 20 度时对应的读数调整至平均值，即可粗略保证调整后两个角度相等。

2. 微波单缝衍射实验

先调整单缝衍射板的缝宽为 8cm，转动载物台，使其上的 180° 刻线与发射臂的指针一致，然后把单缝衍射板放到载物台上，并使狭缝所在平面与入射方向垂直。转动接收臂使其指针指向载物台的 0° 刻线，打开振荡器的电源，并调节衰减器，使传感器的读数在 100-150mV 之间。然后转动接收臂，在 ±40° 范围内，每隔 2° 记下一次接收信号的大小。

为了准确测量波长，调整接收臂转到衍射极小附近，把衰减器转到零的位置，以增大发射信号提高测量的灵敏度。然后转动接收臂，每隔 1° 记下一次接收信号的大小。

3.微波双缝衍射实验

调整双缝干涉板的每个缝宽为 3.5cm，转动载物台，使其上的 180° 刻线与发射臂的指针一致，然后把双缝干涉板放到载物台，并使狭缝所在平面与入射方向垂直。转动接收臂使其指针指向载物台的 0° 刻线，打开振荡器的电源，并调节衰减器，使传感器的读数在 100-150mV 之间。然后转动接收臂，在 ±50° 范围内，每隔 2° 记下一次接收信号的大小。

为了准确测量波长，调整接收臂转到两侧的零级极小、一级极小和一级极大附近，把衰减器转到零的位置，以增大发射信号提高测量的灵敏度。然后转动接收臂，每隔 1° 记下一次接收信号的大小。

4.迈克尔逊干涉实验

在微波前进的方向上放置一玻璃板，使玻璃板面与载物圆台 45° 线在同一面上，固定臂指针指向 90° 刻度线，接收臂指针指向 0° 刻度线。按实验要求安置固定反射板、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。将可移动反射板装在一旋转读数机构上，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 。

5.布拉格衍射实验

将模拟晶体架插在载物平台上的四颗螺柱上，这样便使所研究的晶面(100)法线正对小平台上的 90° 线，固定臂指针对准一侧的 60° 线，接收臂指针对准另一侧 120° 线。实验时每隔 2° 记录一次，因此要先转筒载物圆台 2°，再转动接收臂 4°。为准确测量衍射极大角度，在粗测的基础上在极大值附近增加间隔为 1° 的测量，寻找一级衍射极大。

使用相似的方法，对晶面(110)进行测量。

五、数据处理

1. 微波单缝衍射实验

单缝实验数据记录

$\theta(^{\circ})$	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$U_{\theta+}(mV)$	96.1	82.1	64.4	51.9	41.5	28.3	14.5	9.2	5.8
$U_{\theta-}(mV)$	96.1	82.1	68.5	48.9	39.5	27.6	12.5	7.8	4.4
$\theta(^{\circ})$	18	20	22	24	26	28	30	32	34
$U_{\theta+}(mV)$	2.2	0.4	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5
$U_{\theta-}(mV)$	1.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.9	0.7
$\theta(^{\circ})$	36	38	40						
$U_{\theta+}(mV)$	0.2	0.1	0.0						
$U_{\theta-}(mV)$	0.1	0.1	0.1						

细扫数据记录

$\theta(^{\circ})$	21	22	23	24	25	26	27	28	29
$U_{\theta+}(mV)$	1.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.6	1.1
$\theta(^{\circ})$	19	20	21	22	23	24	25	26	27
$U_{\theta-}(mV)$	1.7	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.6

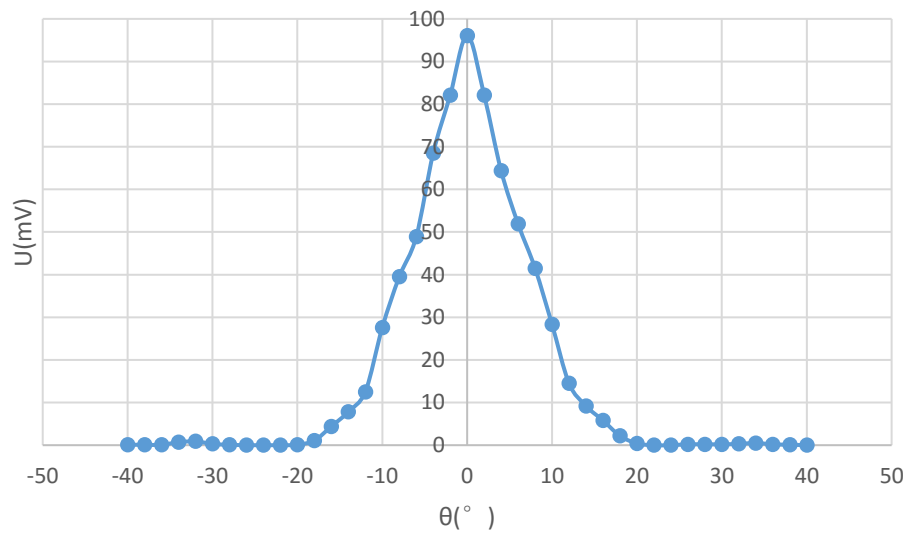


图 7 单缝衍射结果图

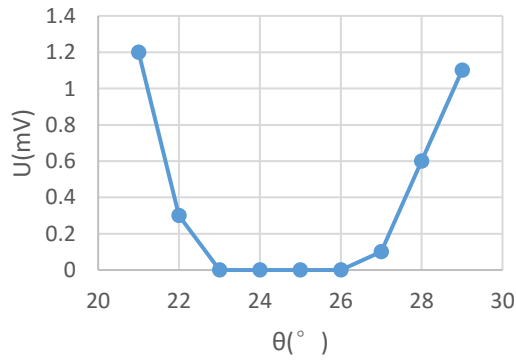


图 8 单缝衍射正侧极小值处细扫图

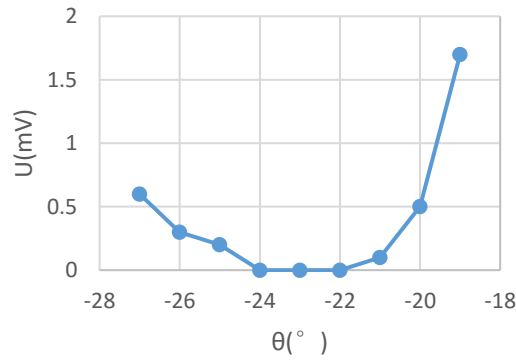


图 9 单缝衍射正侧极小值处细扫图

根据细扫图结果，可以估算得出极小值出现在 23.75° 处，由公式计算 $\lambda = a \sin \theta = 3.2220 \text{cm}$ 。
9.4GHz 对应的微波波长为 3.1915cm。测量值与标准值相差 0.96%

2、微波双缝干涉实验

双缝实验数据记录

$\theta (^{\circ})$	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$U_{\theta+}(\text{mV})$	108.7	107.4	100.9	67.4	14.4	0.2	0.3	2.1	11.6
$U_{\theta-}(\text{mV})$	108.7	103.8	92.4	56.8	8.9	0.2	1.0	4.5	17.5
$\theta (^{\circ})$	18	20	22	24	26	28	30	32	34
$U_{\theta+}(\text{mV})$	42.6	70.1	85.6	66.7	38.4	11.4	3.4	2.0	2.2
$U_{\theta-}(\text{mV})$	52.3	72.5	84.2	58.4	26.8	5.8	1.9	0.7	1.1
$\theta (^{\circ})$	36	38	40	42	44	46	48	50	
$U_{\theta+}(\text{mV})$	4.2	6.9	4.5	0.8	2.2	20.4	31.9	17.2	
$U_{\theta-}(\text{mV})$	4.8	7.3	2.9	0.8	2.5	17.9	24.9	17.3	

细扫数据记录

一级极大	$\theta (^{\circ})$	19	20	21	22	23	24	25	26
	$U_{\theta+}(\text{mV})$	58.1	70.1	79.2	85.6	74.4	66.7	50.2	38.4
	$\theta (^{\circ})$	19	20	21	22	23	24	25	26
	$U_{\theta-}(\text{mV})$	66.8	72.5	79.3	84.2	72.4	58.4	42.1	26.8

零级极小	$\theta (^{\circ})$	8	9	10	11	12	13	14	15
	$U_{\theta+}(\text{mV})$	14.4	1.6	0.2	0.0	0.3	1.0	2.1	6.9
	$\theta (^{\circ})$	8	9	10	11	12	13	14	15
	$U_{\theta-}(\text{mV})$	8.9	0.9	0.2	0.1	1.0	3.1	4.5	10.5

一级极小	$\theta (^{\circ})$	30	31	32	33	34	35	36	37
	$U_{\theta+}(\text{mV})$	3.4	2.2	2.0	1.8	2.2	2.5	4.2	5.1
	$\theta (^{\circ})$	30	31	32	33	34	35	36	37
	$U_{\theta-}(\text{mV})$	1.9	0.9	0.7	0.5	1.1	2.6	4.8	7.3

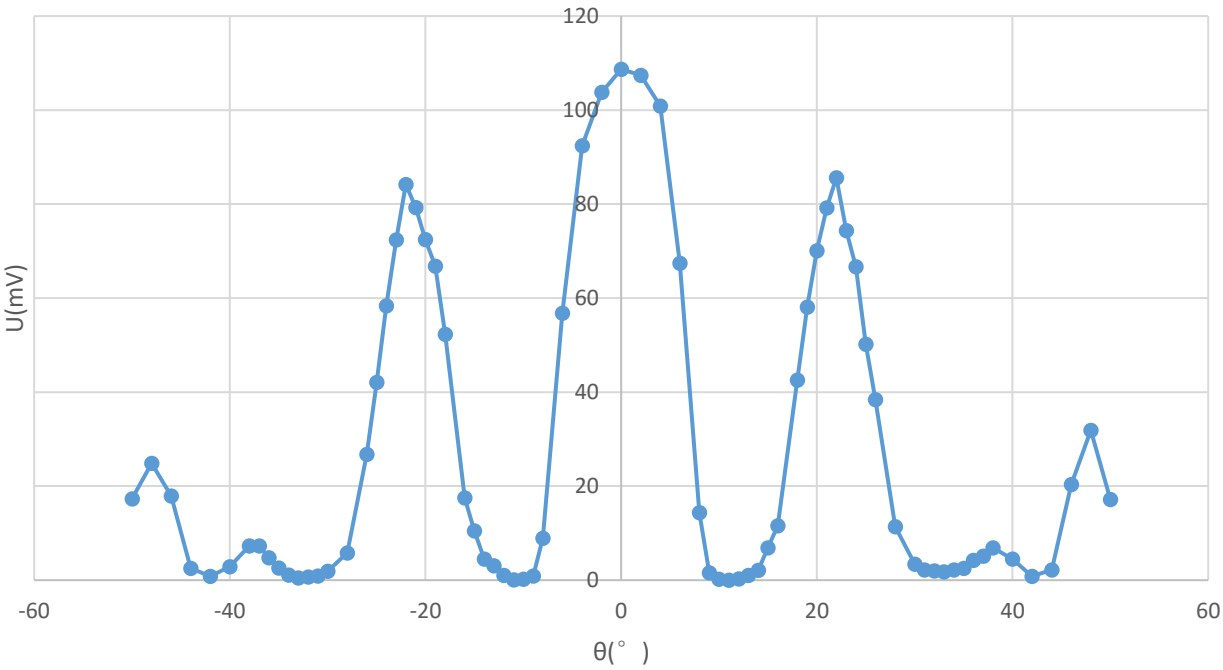


图 10 双缝干涉结果图

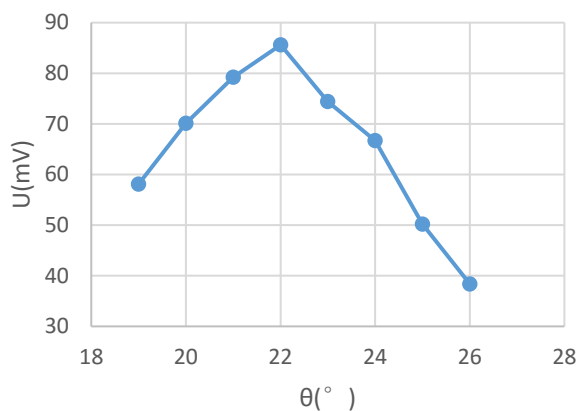


图 11 双缝干涉正侧一级极大细扫图

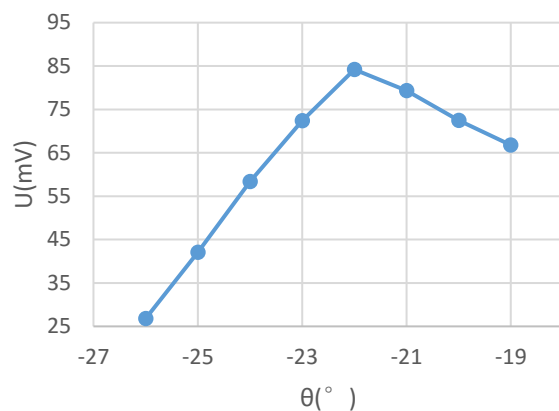


图 12 双缝干涉负侧一级极大细扫图

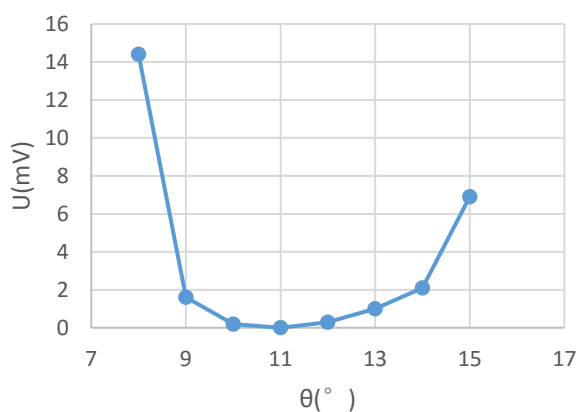


图 13 双缝干涉正侧零级极小细扫图

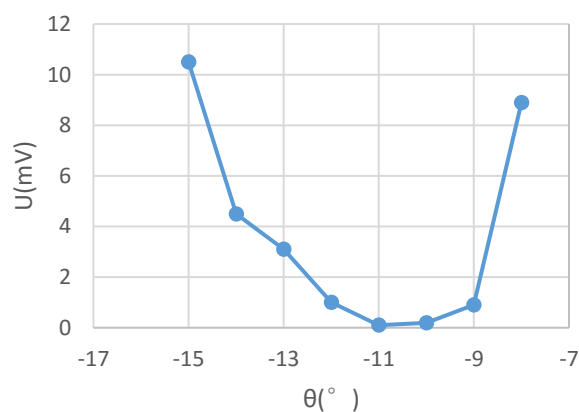


图 14 双缝干涉负侧零级极小细扫图

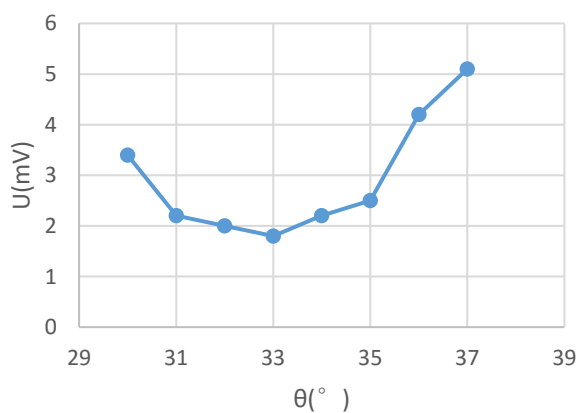


图 13 双缝干涉正侧一级极小细扫图

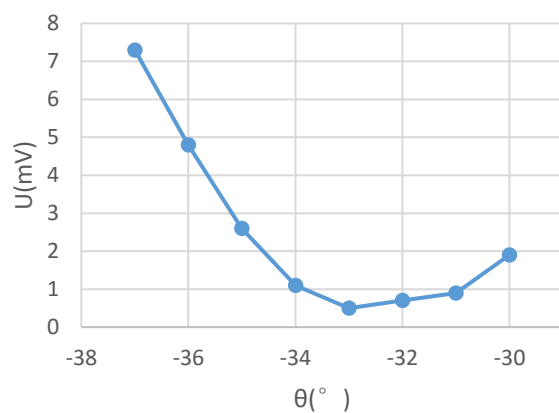


图 14 双缝干涉负侧一级极小细扫图

观察细扫图可以发现，实验中双缝干涉正负侧的一级极大出现在 22° ，零级极小出现在 11° ，一级极小出现在 33° 。将以上三个数据分别带入公式进行计算：

$$\lambda_1 = (a + b)\sin\varphi_1 = 3.1841\text{cm}$$

$$\lambda_2 = 2(a + b)\sin\varphi_2 = 3.2438\text{cm}$$

$$\lambda_3 = 2/3 \cdot (a + b)\sin\varphi_3 = 3.0863\text{cm}$$

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的平均值为 3.1714cm 。9.4GHz 对应的微波波长为 3.1915cm 。测量值与标准值相差 0.63%

3、微波迈克尔逊干涉实验

迈克尔逊实验数据

最小点读数	1.43	3.11	4.72	6.22
-------	------	------	------	------

带入公式 $\lambda = 2L/n = 3.1933\text{cm}$ ，9.4GHz 对应的微波波长为 3.1915cm 。测量值与标准值相差 0.06%

4、微波布拉格衍射实验

晶面：100 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)	1.0	1.5	1.9	2.5	3.0	4.1	2.0	0.2	0.7
φ_I (°)	48	50	52	54	56	58	60	62	64
U (mV)	3.8	4.5	0.5	0.4	0.7	0.6	9.0	18.5	7.8
φ_I (°)	66	68	70	72	74	76	78	80	
U (mV)	50.7	74.1	6.5	0.8	1.5	2.3	0.2	8.0	

细扫数据记录

φ_I (°)	63	64	65	66	67	68	69	70	71
U (mV)	37.2	35.7	91.3	120.9	157.9	165.6	117.3	33.2	3.0

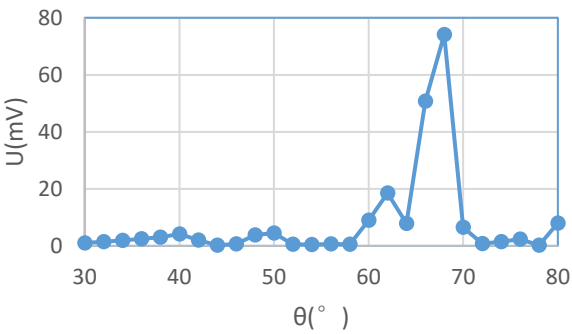


图 15 微波布拉格衍射 100 晶面结果

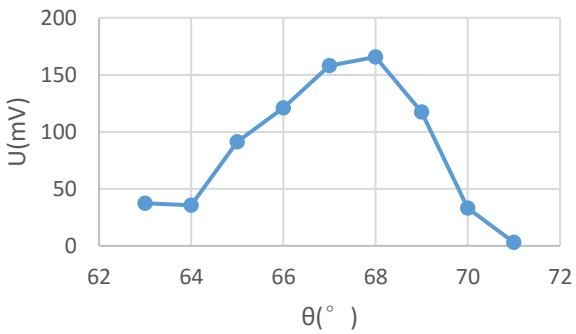


图 16 微波布拉格衍射 100 晶面极大值细扫图

晶面：110 面间距 $d=2.828\text{cm}$ φ_I 为入射角度(反射角度)

φ_I (°)	30	32	34	36	38	40	42	44	46
U (mV)	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.2	0.6
φ_I (°)	48	50	52	54	56	58	60	62	64
U (mV)	0.5	1.5	8.3	26.0	19.2	10.2	6.8	0.6	0.2
φ_I (°)	66	68	70						
U (mV)	0.3	0.1	0.0						

细扫数据记录

φ_I (°)	52	53	54	55	56	57	58	59	60
U (mV)	8.3	15.0	26.0	27.6	19.2	13.0	10.2	8.3	6.8

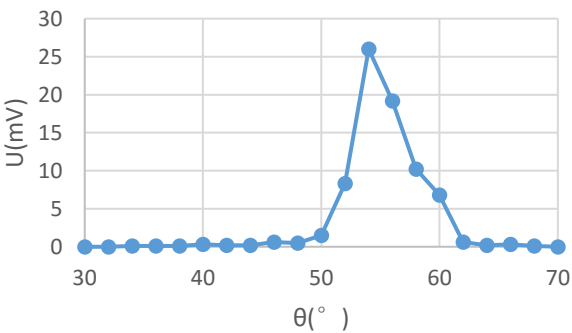


图 17 微波布拉格衍射 110 晶面结果

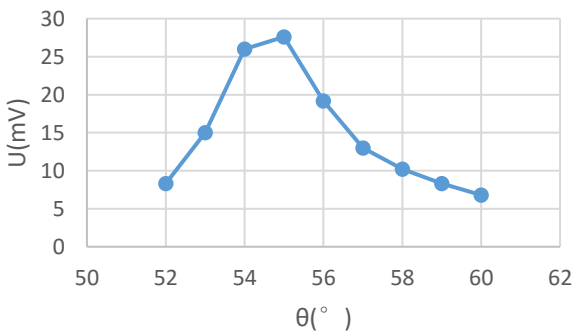


图 18 微波布拉格衍射 110 晶面极大值细扫图

带入公式进行计算,9.4GHz 对应的微波波长为 3.1915cm 。在(100)晶面测得 $\lambda_1 = 2d_1 \cos \beta_1 = 2.9969\text{cm}$, 测量值与标准值相差 6.10%；在(110)晶面测得 $\lambda_2 = 2d_2 \cos \beta_2 = 3.2441\text{cm}$, 测量值与标准值相差 1.65%

六、思考题

1. 各实验内容误差主要影响是什么？

(1)对于总体实验来说，主要误差来自于微波实验仪器未对准，使得在正负相同角度的位置接收喇叭接收到的电压不完全相等，导致在绘图时所得到的干涉或者衍射图像在 y 轴左右两侧不对称，得到的极大/极小值所对应的角度也不对称，使得算出的微波波长有一定误差。另外，接收喇叭的灵敏度不够高，在测量极小值时，有多个角度的显示值均为 0.0，使得测得的极小值角度不够精确，只能进行人工处理。

(2)在单缝衍射和双缝干涉实验中，误差还会来自于单缝衍射板和双缝干涉板的缝宽误差，以及难以保证板与发射喇叭的方向准确垂直。

(3)在迈克尔逊干涉实验中，由于量程的限制，必须从一端开始移动反射板，以保证一次性测得 4 个数据点。如果在测量过程中向两侧都移动了反射板，则会产生一定的滞后，产生回程差，造成微波的测量误差。另外，对两个反射板和玻璃板的角度控制也是一个会产生误差的地方。

(4)在微波布拉格衍射实验中，由于模拟晶体小球排列的不规整，以及模拟晶体的外壳的影响，会对实验结果产生一定的影响。

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。

绝缘体可以透过微波，它几乎不吸收微波的能量。如玻璃、陶瓷、塑料。微波可以穿透它们向前传播。这些物质都不会吸收微波的能量，或吸收微波极少。

极性分子的物质会吸收微波，如：水、酸等。我们吃的食物，其中都含有水分，水是强极性分子，因此能在微波炉中加热。

微波的能量较小，导体的电导率大，所以折射率高，进而反射率高；而非导体反射率不高，所以微波会穿越物质或者被物质吸收从而发热。

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原理是什么？与屏蔽微波波长的关系是什么？

实验使用的海绵吸波材料，这是一种谐振型窄频带微波吸收材料，能够依靠材料本身的特性，吸收高频能量。通常情况下，这些高频能量在通过吸波材料时与材料中的特种物质发生谐振，最后以热量的形式耗散掉。吸波材料有多种厚度，这主要跟吸收能量的能力有关，一般说来，越厚的吸波材料能够吸收的高频范围越宽，表现为较厚的吸波材料吸收频率的起始频点比较薄的低。吸波的尖劈长度应与屏蔽微波波长近似相等。

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？

预先不知道晶体中晶面的方向会增加实验的复杂性，因为要先确定这些晶面的方向才能依此确定入射角和反射角，再进行实验。确定晶面应固定晶体与入射波的夹角，改变接收臂的角度，即反射角，找到 U 的最大值，此时有入射角等于反射角，从而可以确定晶面的方向。

七、实验感想

在进行微波布拉格实验前，在光学课程中我们已经对相关知识进行了学习，因此实验原理较为明晰。在这个实验中，我们使用了放大的思想，将电磁波的波长和被测物体的尺度都进行放大，使得测量的安全性、可视性、可操作性都极大增强，这是未来进行实验设计时我应该学习之处。