

《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 刘荣鹏
姓名 徐昕妍 学号 2023K8009970008 分班分组及座号 1-10-05 号(例: 1-04-5 号)
实验日期 2024 年 10 月 28 日 实验地点 717 调课/补课 ☐ 是 成绩评定 _____

1 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。

2 实验器材与用具

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)。

3 实验原理

3.1 微波的产生和接收

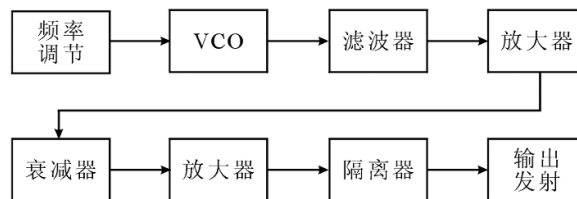


图 1: 微波产生的原理框图

微波发生器内部有一个电压可调控的 VCO,用于产生一个 4.4GHz-5.2GHz 的信号,它的输出频率可以随输入电压的不同作相应改变,经过滤波器后取二次谐波 8.8GHz-9.8GHz,经过衰减器作适当的衰减后,再放大,经过隔离器后,通过探针输出至波导口,再通过 E 面天线发射出去。

接收部分采用检波/数显一体化设计。由 E 面喇叭天线接收微波信号,传给高灵敏度的检波管后转化为电信号,通过穿心电容送出检波电压,再通过 A/D 转换,由液晶显示器显示微波相对强度。

3.2 微波布拉格衍射实验

3.2.1 晶体结构

组成晶体的原子或分子按固定距离 a 在空间依序重复排列, 原子间距 a 称为晶格常数。组成晶体的原子可以看成分别作处在一系列相互平行而且间距一定的平面族上, 这些平面称为晶面。其中最重要的三种晶面分别是 (100) 面、 (110) 面、 (111) 面, 如下图所示。

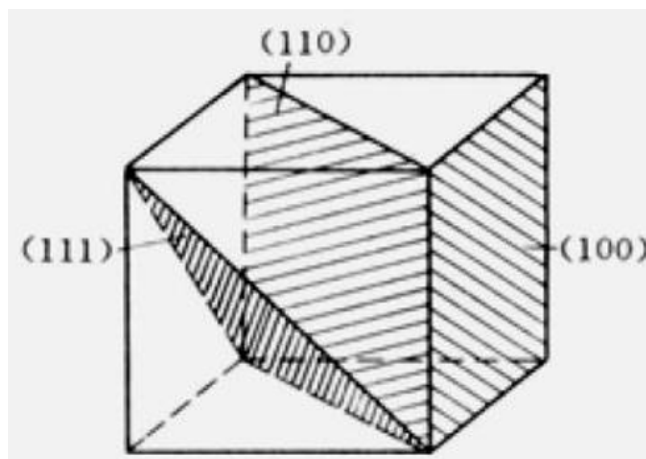


图 2: 晶面指数

3.2.2 布拉格衍射

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同相叠加。它们的同相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同相叠加, 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同相叠加。

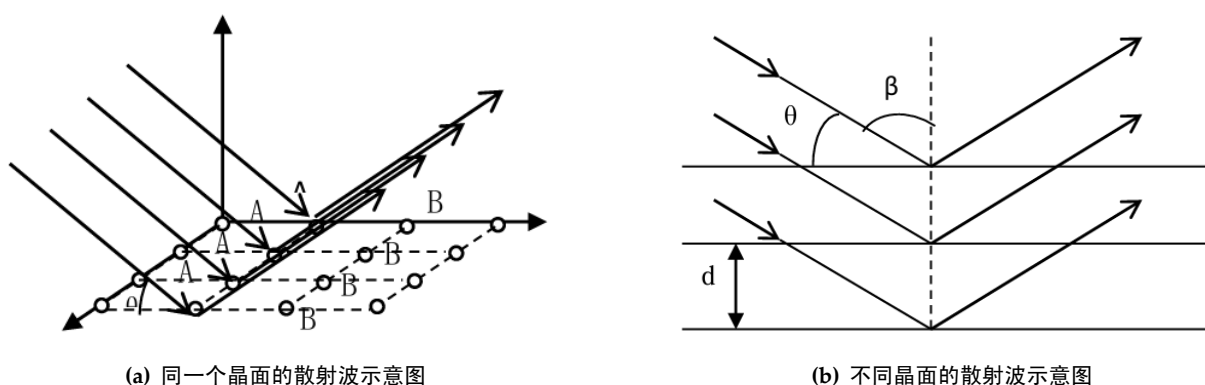


图 3: 布拉格衍射

处在同一平面上的和原子组成一个晶面, 它们的散射波同相叠加的结果遵从反射定律, 反射角等于入射角。而从间隔为 d 的相邻两个晶面反射的两束波的程差为 $2d\sin\theta$, θ 为入射角与晶面的夹角, 只有满足

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

时, 才能形成极大干涉。方程(1)称为晶体衍射的布拉格条件。

3.3 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,如图 4 所示。

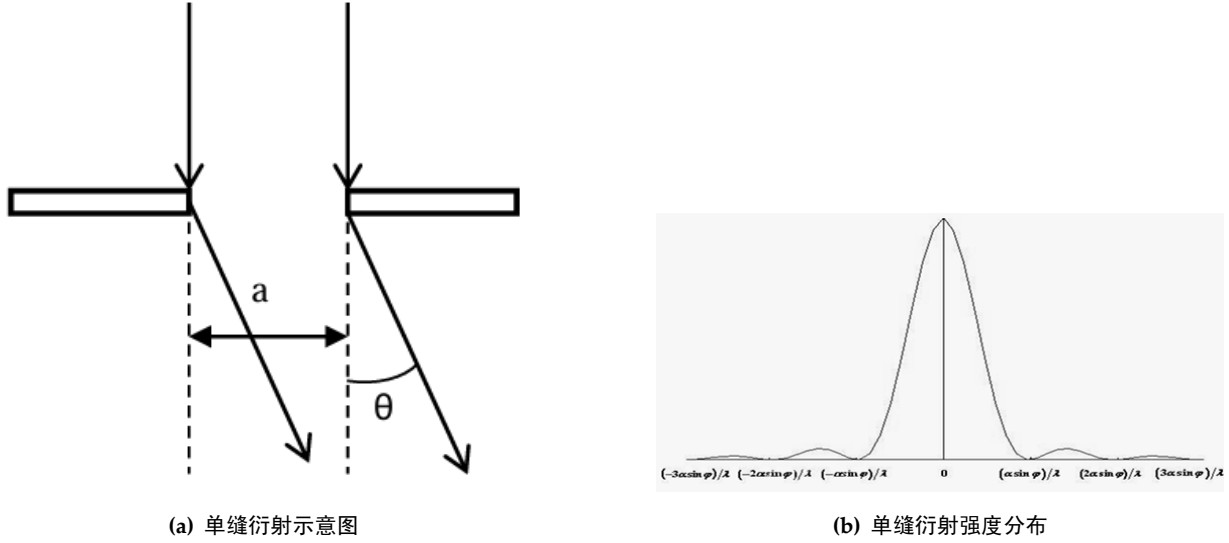


图 4: 微波单缝衍射

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:

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \mu}{\mu^2} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{\pi \alpha \sin \phi}{\lambda} \quad (3)$$

式中 I_0 是中央主极大中心的微波强度, α 为单缝宽度, λ 为微波波长, ϕ 为衍射角, $\frac{\sin^2 \mu}{\mu^2}$ 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。

3.4 微波的双缝干涉实验

当一平面波垂直入射到一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,因此在金属板的背后面空间中,将产生干涉现象。当然,波通过每个缝都有衍射现象。因此实验将是衍射和干涉两者结合的结果。为了只研究主要来自两缝中央衍射波相互干涉的结果,令双缝的缝宽 α 接近 λ 。当两缝之间的间隔 b 较大时,干涉强度受单缝衍射的影响小,当 b 较小时,干涉强度受单缝影响大。干涉加强的角度为:

$$\phi = \arcsin \frac{k\lambda}{\alpha + b} \quad (4)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

干涉减弱的角度为:

$$\phi = \arcsin \frac{(2k+1)\lambda}{2(\alpha + b)} \quad (6)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

3.5 微波迈克尔逊干涉实验

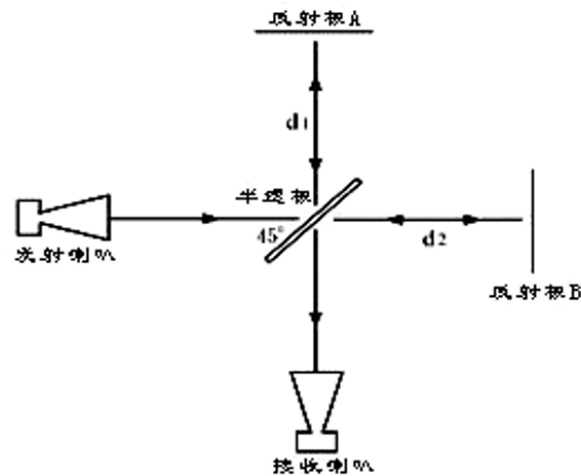


图 5: 迈克尔逊干涉原理示意图

在微波前进的方向上放置一个与波传播方向成 45 度角的半透射半反射的分束板(如图 5)。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,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。

3.6 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。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 $I = I_0 \cos^2 \alpha$ 。

4 实验内容

4.1 实验准备

将实验仪器放置在水平桌面上,调整底座四只脚使底盘保持水平。调节保持发射喇叭、接收喇叭、接收臂、活动臂为直线对直状态,并且调节发射喇叭,接收喇叭的高度相同。连接好 X 波段微波信号源、微波发生器间的专用导线,将微波发生器的功率调节旋钮逆时针调到底,即微波功率调至最小,通电并预热 10 分钟。)在 $\pm 20^\circ$ 的位置比较检波器示数。如果不相等,可通过微调检波器的朝向,使其差异在 2mV 之内。

角度($^\circ$)	0	20	-20
电压(mV)	178.8	27.2	28.0

表 1: 微波实验仪对准确认

4.2 微波的双缝干涉

按需要调整双缝干涉板的缝宽为 3.5cm。将双缝干涉板安置在支座上时,应使双缝板平面与载物圆台上 90° 指示线一致。转动小平台使固定臂的指针在小平台的 180° 处。此时相当于微波从双缝干涉板法线方向入射。这时让活动臂置小平台 0° 处,调整信号使液晶显示器显示较大,然后在 0° 线的两侧,每改变 2 度读取一次液晶显示器的读数,并记录下来,然后就可以画出双缝干涉强度与角度的关系曲线。在曲线对应的一级极大、零级极小、一级极小处开展间隔 1° 的精细扫描,并根据微波衍射强度一级极大、零级极小、一级极小的角度和缝宽 α , 计算微波波长 λ 和其百分误差。

4.3 布拉格衍射

实验时将支架从载物台上取下,模拟铝球要调节,使上下应成为一方形点阵,各金属球点阵间距相同(4 mm)。由已知的晶格常数 a 和微波波长 λ , 并根据公式可以算出(100)面和(110)面衍射极大的入射角 β 。

下面以(100)面时的实验为例,详细说明实验步骤如下: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 0° 线,固定臂指针对准一侧的 0° 线,接收臂指针对准另一侧 180° 线。顺时针转动载物台一定刻度(如 30 度),此时固定臂指针指向负方向 30°,即入射角为负方向 30°,同时把接收臂顺时针转动到正方向 30°,这样便满足入射角和发射角相等且关于晶面法向量对称,都为 30°。实验时每隔 2° 记录一次,在估计发生衍射极大处可适当增加测试点。为了避免两喇叭之间波的直接入射,入射角 β 取值范围最好在 30° 到 80° 之间,寻找一级衍射最大。

4.4 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° 线在统一面上,固定臂指针指向 90° 刻度线,接收臂指针指向 0° 刻度线(如图 3)。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 。波长满足: $\lambda = \frac{2L}{n}$

5 实验结果与数据处理

5.1 双缝干涉实验

$\theta(^{\circ})$	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$U_{\theta+}(mV)$	30.8	29.2	24.4	8.8	0.8	0	0.3	1.7	6.3
$U_{\theta-}(mV)$	30.8	29.4	28.2	7.8	0.6	0	0.2	0.9	4.2
$\theta(^{\circ})$	18	20	22	24	26	28	30	32	34
$U_{\theta+}(mV)$	13.4	19.4	25.8	16.9	6.6	1.6	0.6	0.5	0.8
$U_{\theta-}(mV)$	8.5	16.6	25.0	23.6	10.0	2.0	0.2	0.1	1.5
$\theta(^{\circ})$	36	38	40	42	44	46	48	50	
$U_{\theta+}(mV)$	1.6	2.5	1.8	0.4	0.5	2.8	5.6	2.3	
$U_{\theta-}(mV)$	3.0	4.0	2.2	0.6	0.7	4.0	7.8	3.9	

表 2: 微波双缝干涉实验

用 origin 绘图结果如下:

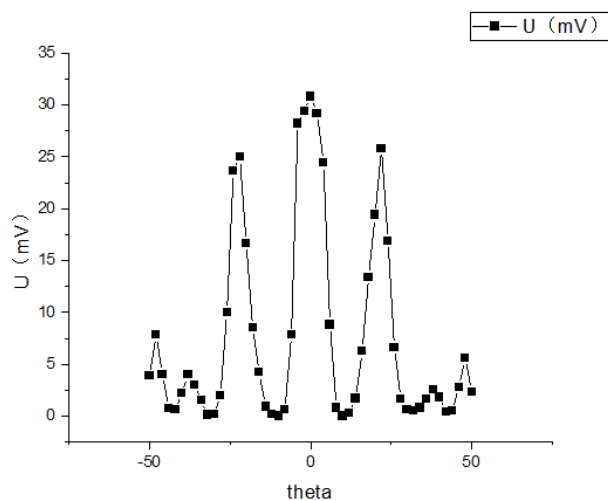


图 6: 双缝干涉强度分布

由图可知, 双缝干涉强度大致呈对称分布, 角度过大时规律变化不是特别明显。零级极大出现在 0° 附近, 零级极小出现在 10° 附近, 一级极大出现在 22° 附近, 一级极小出现在 32° 附近。

以 1° 为间隔在零级极小、一级极大、一级极小附近进行精细扫描。数据及绘图如下:

$U_{\theta+}(mV)$	15.9	19.5	24.8	28.8	29.5	24.7	19.6	12.4	7.4
$\theta(^{\circ})$	18	19	20	21	22	23	24	25	26
$U_{\theta-}(mV)$	12.4	17.0	25.6	33.2	36.4	36.0	32.6	25.2	16.0

表 3: 一级极大精细扫描

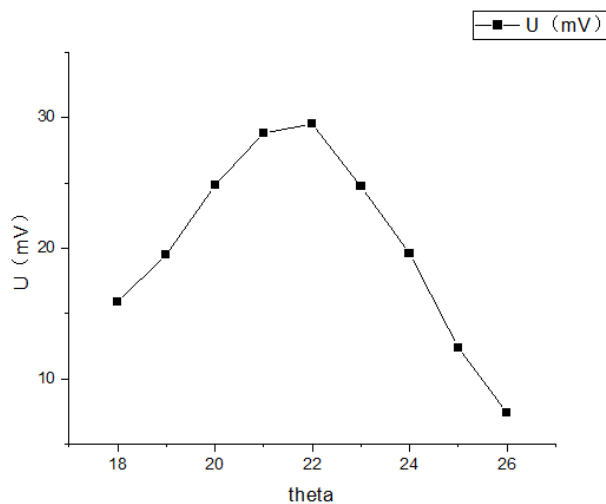


图 7: 正一级极大精细化曲线

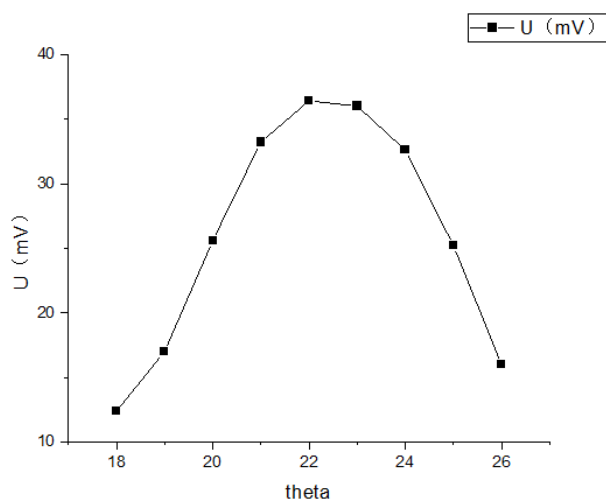


图 8: 负一级极大精细化曲线

由图可知, 正负一级极大对应的角度都是 22° 。利用一级极大时的角度和公式求得波长:

$$\lambda = (a + b) \sin \theta_0 = 3.1841 \text{ cm} \quad (8)$$

其中 **a** 是狭缝的宽度, **b** 是两个狭缝间不透电磁波部分的宽度。波长的理论值在本实验中给出的是

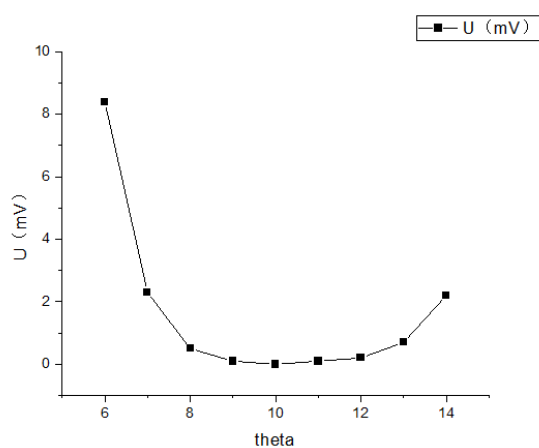
$$\lambda_0 = 3.1915 \text{ cm}$$

由此可以计算出百分误差:

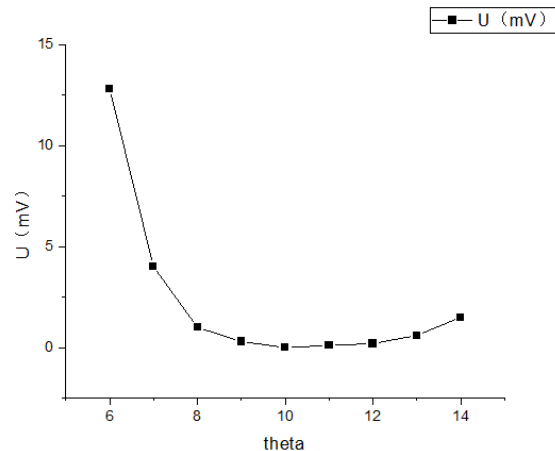
$$\eta = \frac{|\lambda - \lambda_0|}{\lambda_0} = 0.23\%$$

$\theta(^{\circ})$	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$U_{\theta+}(mV)$	8.4	2.3	0.5	0.1	0	0.1	0.2	0.7	2.2
$\theta(^{\circ})$	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$U_{\theta-}(mV)$	12.8	4.0	1.0	0.3	0	0.1	0.2	0.6	1.5

表 4: 零级极小精细扫描



(a) 正零级极小精细化曲线



(b) 负零级极小精细化曲线

图 9: 零级极小精细化曲线

由图可知，正负一级极大对应的角度都是 10° 。利用一级极大时的角度和公式求得波长：

$$\lambda = 2(a + b) \sin \theta_0 = 2.95 \text{ cm} \tag{9}$$

计算得百分误差

$$\eta = \frac{|\lambda - \lambda_0|}{\lambda_0} = 7.50\%$$

$\theta(^{\circ})$	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$U_{\theta+}(mV)$	1.5	0.8	0.5	0.3	0.1	0.2	0.3	0.4	0.7
$\theta(^{\circ})$	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$U_{\theta+}(mV)$	3.5	1.8	1.1	1.0	0.9	1.0	1.3	1.8	2.7

表 5: 一级极小精细扫描

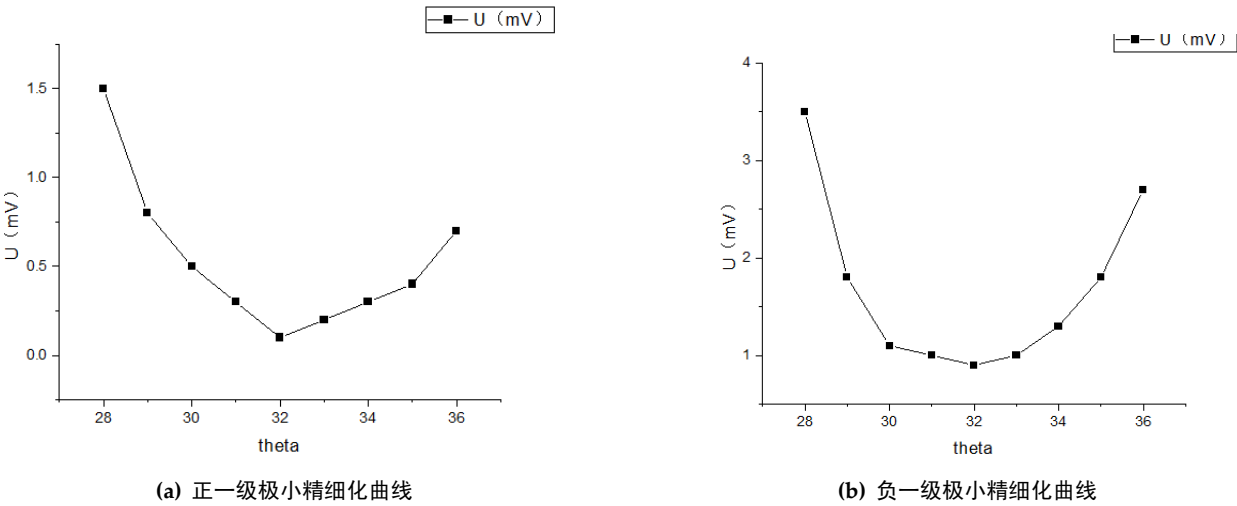


图 10: 一级极小精细化曲线

由图可知，正负一级极大对应的角度都是 32° 。利用一级极大时的角度和公式求得波长：

$$\lambda = 2(a + b) \sin \theta_0 = 3.00 \text{ cm} \tag{10}$$

计算得百分误差

$$\eta = \frac{|\lambda - \lambda_0|}{\lambda_0} = 5.87\%$$

5.2 迈克尔逊干涉实验

最小点读数 (cm))	0.45	2.2	3.71	5.25
-------------	------	-----	------	------

表 6: 迈克尔逊干涉实验实验数据

利用逐差法分别计算距离差得：

$$\lambda_1 = 2(d_2 - d_1) = 3.5 \text{ cm}$$

$$\lambda_2 = 2(d_3 - d_2) = 3.02 \text{ cm}$$

$$\lambda_3 = 2(d_4 - d_3) = 3.08 \text{ cm}$$

求得波长

$$\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{3} = 3.2cm$$

结果虽然与 $\lambda_0 = 3.19$ 相差不大,但可以看出 λ_1 与其他两组数据差值较大,实验仍存在一定误差。

5.3 微波布拉格衍射实验

5.3.1 布拉格衍射实验(100)晶面

面间距 $d = 4cm$, ϕ 为入射角度(反射角度)

$\phi(^{\circ})$	30	32	34	36	38	40	42	44	46
$U(mv)$	2.1	4.2	3.6	7.9	18.6	22.0	7.8	0.5	0.7
$\phi(^{\circ})$	48	50	52	54	56	58	60	62	64
$U(mv)$	9.4	11.1	2.3	0.9	1.6	3.7	27.5	26.0	23.5
$\phi(^{\circ})$	66	68	70	72	74	76	78	80	
$U(mv)$	89.7	109.5	8.8	0.8	17.8	16.8	0.9	27.0	

表 7: 布拉格衍射实验数据 (100) 晶面粗扫

用 origin 软件作图如下:

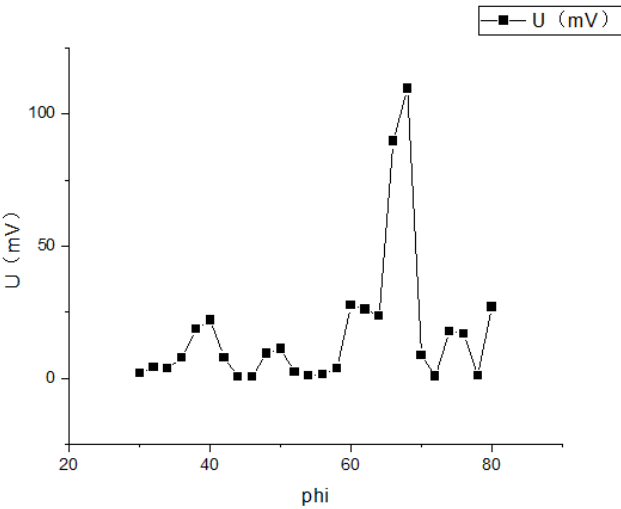


图 11: (100)晶面布拉格衍射粗扫

由图可知, 68° 附近出现了衍射极大值。调节功率,在 64° 到 72° 范围内,以 1° 为间隔进行精细扫描。得到数据如下表所示:

$\phi(^{\circ})$	64	65	66	67	68	69	70	71	72
$U(mV)$	23.5	51.8	89.7	107.0	109.5	53.5	8.8	1.7	0.8

表 8: 布拉格衍射实验数据 (100) 细扫

绘图得:

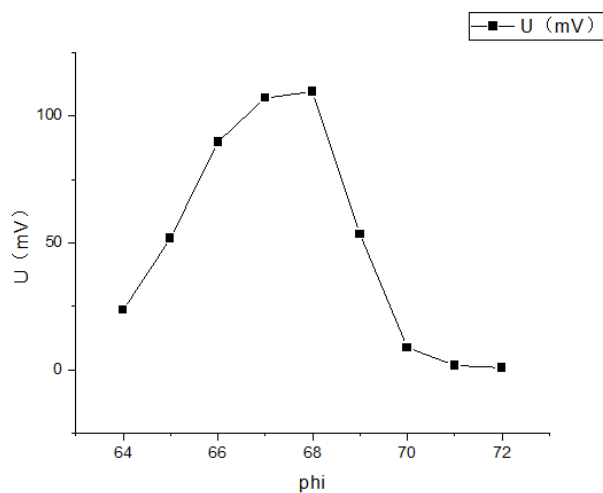


图 12: 布拉格衍射实验数据 (100) 细扫

由图可得, 极大值出现在 68° 。代入公式计算得

$$\lambda = 2d \cos \beta = 2 \times 4cm \times \cos 68^\circ = 3.00cm$$

由此计算出误差

$$\eta = \frac{|\lambda - \lambda_0|}{\lambda_0} = 5.96\%$$

5.4 布拉格衍射实验 (110) 晶面

对 (110) 晶面做同样的数据处理。面间距 $d = 2\sqrt{2}cm$, ϕ 为入射角度 (反射角度)

$\phi(^{\circ})$	30	32	34	36	38	40	42	44	46
$U(mv)$	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2
$\phi(^{\circ})$	48	50	52	54	56	58	60	62	64
$U(mv)$	0.3	0.9	3.3	11.1	6.9	4.6	1.7	0	0.2
$\phi(^{\circ})$	66	68	70						
$U(mv)$	0	0	0						

表 9: 布拉格衍射实验数据 (110) 晶面粗扫

绘图如下:

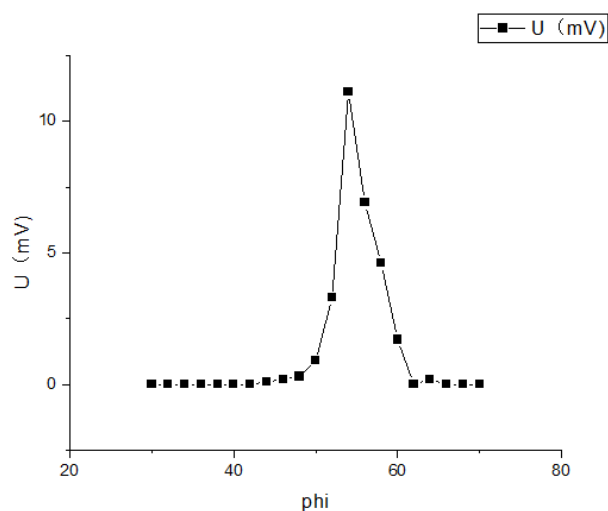


图 13: 布拉格衍射实验数据 (110) 晶面粗扫

由图可知,在 50° 之前,测得数据一直非常小, 50° 后数据剧增,并在 54° 达到极大值。调节功率,在 50° 到 58° 范围内,以 1° 为间隔进行精细扫描。得到数据如下表所示:

$\phi(^{\circ})$	50	51	52	53	54	55	56	57	58
$U(mv)$	0.9	1.6	3.3	7.5	11.1	9.9	6.9	5.1	4.6

表 10: 布拉格衍射实验数据 (110) 细扫

绘图如下:

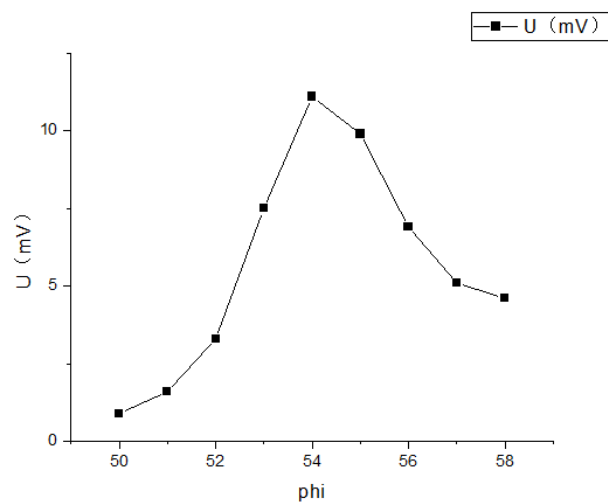


图 14: 布拉格衍射实验数据 (110) 细扫

由图可知,衍射的极大值点对应的角度为 54° 。代入公式计算得

$$\lambda = 2d \cos \beta = 2 \times 2\sqrt{2}cm \times \cos 54^\circ = 3.33cm$$

由此计算出误差

$$\eta = \frac{|\lambda - \lambda_0|}{\lambda_0} = 4.2\%$$

6 思考题

1. 各实验内容误差主要影响是什么？

答: 在进行实验时, 接收器容易发生移动, 从而产生误差; 在校准时, $\pm 20^\circ$ 处的 U 并不完全相等, 而是存在 0.2 到 1.0mV 的误差, 这也会导致后续测量时出现误差; 接收器接受微波极易受外界干扰, 空间内存在其他微波或观测者站位都会影响接收器数据的准确性。以下是各实验的具体误差:

(a) 微波双缝干涉实验

- 干涉板的缝宽存在误差
- 测量环境的变化会引起左右图像不对称等差异。在测量时, 负半轴是在海绵尖劈的包围下, 而正半轴朝向的区域比较空旷, 因此随着角度不断增大, 测量精度会由于海绵尖劈的消除噪音能力不佳等因素而越来越低。

(b) 迈克尔干涉实验

- 两个反射板和玻璃并非完全造成误差垂直。
- 读数时造成误差。该实验需要从接收器背面进行读数, 需要借助手机或镜子等工具才能较为准确的读数, 而手机中显示的读数为镜像, 会对读数带来一定困扰。

(c) 布拉格衍射实验

- 模拟晶体的外壳的影响。
- 金属小球模型间存在棉线连接, 而现实晶体中并不存在这些结构, 因此可能会产生误差。

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。

答:

(a) 导体

- 反射特性: 导体特别是金属, 是很好的微波反射器。这是因为金属内部有大量自由电子, 能够对入射的微波产生强烈的反向电磁场, 从而反射微波。
- 能量透过与吸收: 在理想情况下, 对于高频微波, 金属几乎不透过任何能量, 几乎所有的能量都被反射。但是, 某些特定频率的微波可以穿透金属, 尤其是当金属的厚度远小于微波的皮肤深度时。

(b) 非导体

- 反射特性: 非导体的反射特性通常不如导体。非导体的电导率低, 因此它们不能有效地产生反向电磁场来反射微波。
- 能量透过与吸收: 非导体可以透过部分微波能量, 同时吸收一部分。透过和吸收的比例取决于材料的介电常数和厚度。例如, 玻璃、塑料等材料会透过大部分微波能量。

(c) 导体与非导体的反射特性比较: 导体反射微波的能力远强于非导体; 非导体一般会吸收更多的微波能量, 而导体几乎不吸收; 非导体的反射和吸收特性一般对频率更敏感。

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?

答: 微波吸收材料的基本原理是将微波能转化为其他形式运动的能量, 并通过该运动的耗散作用而转化为热能, 如通过电感应、磁感应、电磁感应以及电磁散射等。由于阻尼振动现象的广泛存在性, 最终这种运动将转化的微波能消耗殆尽。为了使得尽可能多的微波被吸收, 应使得作为周期驱动力的电磁波频率与分子或偶极子振动频率相当, 这也是微波炉工作的基本原理。正因如此, 吸波材料的空间周期应约等于屏蔽微波的波长。

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?

答: 假如预先不知道晶体中晶面的方向,就无法确定入射角与反射角,无法直接进行操作,故要先确定晶面,所以会增加实验的复杂性。

确定晶面的方法: 固定晶体与入射波的夹角,改变反射角,找到电压最大值,通过电压最大时入射角等于反射角来确定晶面的方向。

7 讨论与反思

本次实验非常考验耐心与细致。实验准备环节的校准需要反复调试,而校准的准确性决定了后续实验的误差大小。同时在做实验时务必要注意不要旋转接收器,在调整角度时也要从一个方向缓慢地移动接收器和发射器,避免在移动过程中接收器发生移动。

同时本次实验也让我明白了对细节的处理决定了实验的成败。如读数时务必要站在接受器的斜后方读数,这样才能减少观测者对微波的影响;在测量读数时一定要精益求精,不可敷衍了事;使用仪器时也一定要万分谨慎,不可因为操作不规范而导致前功尽弃。