

微波的特性研究

自从伦琴 (W.C. Röntgen) 发现 X 射线后, 许多物理学家都在积极地研究和探索。1905 年和 1909 年, 巴克拉 (C.G. Barkla) 曾先后发现 X 射线的偏振现象, 但对 X 射线究竟是一种电磁波还是微粒辐射, 仍不清楚。1912 年, 德国物理学家劳厄 (M. Laue) 发现 X 射线通过晶体时会产生衍射现象, 证明了 X 射线的波动性和晶体内部结构的周期性。同年, 英国物理学家劳伦斯·布拉格 (W.L. Bragg) 导出了一个用晶体的原子平面族反射解释 X 射线衍射效应的关系式, 即布拉格公式。次年, 他与父亲亨利·布拉格 (W.H. Bragg) 发明了晶体反射式 X 射线谱仪, 用于晶体结构分析。他们的工作开辟了一个新的技术领域, 因此获得 1915 年诺贝尔物理学奖。

X 射线是一种波长很短的电磁波, 其波长范围为 $0.01 \sim 10\text{nm}$, 由于其出色的穿透本领, X 射线被广泛应用于医疗诊断、工程检测和安防等领域, 所以, 大学本科生应对 X 射线的特性进行研究和掌握。对于一般的高校物理实验室来说, 很少能满足研究 X 射线所需的条件。通常采用微波来模拟 X 射线的特性。微波是一种电磁波, 其波长为 $0.1\text{m} \sim 1\text{m}$, 频率范围从 $300\text{MHz} \sim 3000\text{GHz}$, 是无线电波中波长最短的电磁波。微波波长介于一般无线电波与光波之间, 因此, 它不仅具有无线电波的性质, 还具有光波的性质, 即具有光的直射传播、反射、折射、衍射、干涉等现象。由于微波的波长比光波的波长在量级上大 10000 倍左右, 因此用微波进行波动实验将比光学方法更简便和直观。本实验用模拟晶体使微波发生布拉格衍射, 从中认识微波的光学性质, 学习 X 射线晶体结构分析的基本知识。

【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、观测微波干涉、衍射、偏振等实验现象。
- 3、观测模拟晶体的微波布拉格衍射现象。
- 4、用迈克耳孙干涉方法测量微波波长。

【实验仪器】

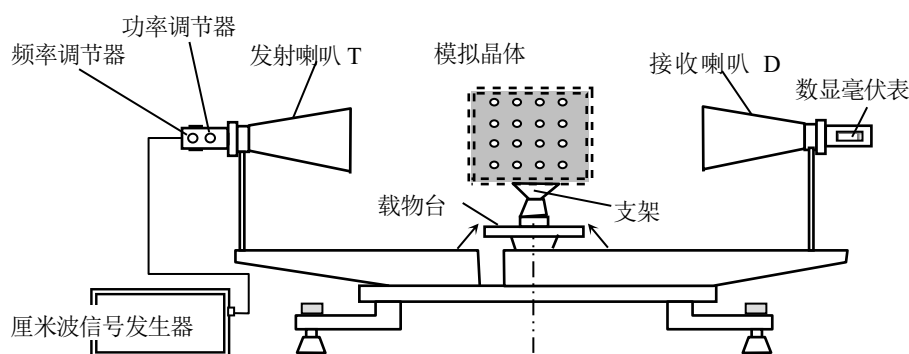


图 1 微波光学综合实验仪

微波光学综合实验仪一套, 如图所示。实验仪包括: 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、检波信号数显毫伏表)、可旋转载物平台和支架。实验用附件有反射板、分束板、单缝板、双缝板、晶体模型、读数机构等以及钢直尺 (或钢卷尺)。

微波光学综合实验仪也称微波分光计, 装有发射喇叭 T 的一臂 (称发射臂) 与底座固定, 装有接收喇叭 D

接收臂可以绕主轴转动。载物台也可以绕主轴转动。发射喇叭上附有“频率调节”电位器及“功率调节”旋钮；接收喇叭上附有检波器，输出引线连接量程为 200mV 的数显毫伏表，以显示探测到的微波强度。发射喇叭上的“频率调节”不是直接标定频率值，而是电阻值，实验中调节频率要参考仪器说明书，查出与频率对应的电阻值。功率调节（即衰减器）旋钮顺时针功率减小，逆时针功率增大。数显毫伏表显示为“1”时表明功率过强超出量程应该调低。

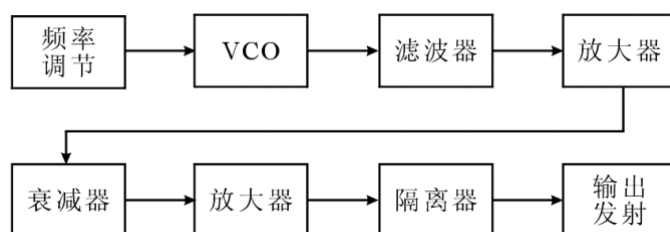


图2 微波产生的原理框图

实验使用的微波发生器是采用电调制方法实现的，优点是应用灵活，参数调配方便，适用于多种微波实验。其工作原理框图见图2。微波发生器内部有一个电压控制振荡器（简称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（波长范围3.0~3.4cm），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（发射喇叭）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，由数显毫伏表显示微波相对强度。

【实验原理】

微波是一种电磁波，它和其他电磁波如光波、X射线一样，在均匀介质中沿直线传播，都具有反射、折射、衍射、干涉和偏振等现象。

1、微波的反射实验

微波的波长较一般电磁波短，相对于电磁波更具方向性，因此在传播过程中遇到障碍物，就会发生反射。如当微波在传播过程中，碰到一金属板，则会发生反射，且同样遵循和光线一样的反射定律：即反射线在入射线与法线所决定的平面内，反射角等于入射角。

2、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：

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \mu}{\mu^2} \quad \mu = \frac{\pi a \sin \varphi}{\lambda} \quad (1)$$

式中 I_0 是中央主极大中心的微波强度， a 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

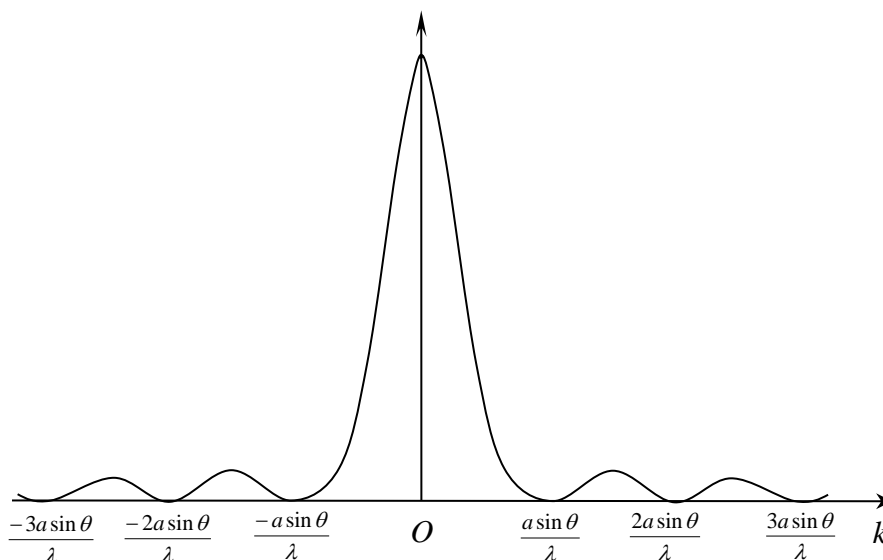


图3 单缝衍射强度分布

过测量衍射屏上从中央向两边微波强度变化来验证公式 (1)。同时与光的单缝衍射一样, 当

$$a \sin \varphi = \pm k\lambda \quad k=1, 2, 3, 4, \dots \quad (2)$$

时, 相应的 φ 角位置衍射度强度为零。如测出衍射强度分布如图 3 则可依据第一级衍射最小值所对应的 φ 角度, 利用公式 (2), 求出微波波长 λ 。

3、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 a 接近 λ , 例如: $\lambda=3.2\text{cm}$ 。 $a=4\text{cm}$ 。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, 干涉强度受单缝衍射影响大。干涉加强的角度为:

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

干涉减弱的角度为:

$$\varphi = \sin^{-1}\left(\frac{2k+1}{2} \frac{\lambda}{a+b}\right) \quad k=1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

4、微波的偏振实验

电磁波是横波, 它的电场强度矢量 \mathbf{E} 和波的传播方向垂直。如果 \mathbf{E} 始终在垂直于传播方向的平面内一确定方向变化, 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 4。发射的微波电场强度矢量 \mathbf{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

$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad (5)$$

式中 α 为 P_1 和 P_2 的夹角。式 (5) 就是光学中的马吕斯 (Malus) 定律, 在微波测量中同样适用。

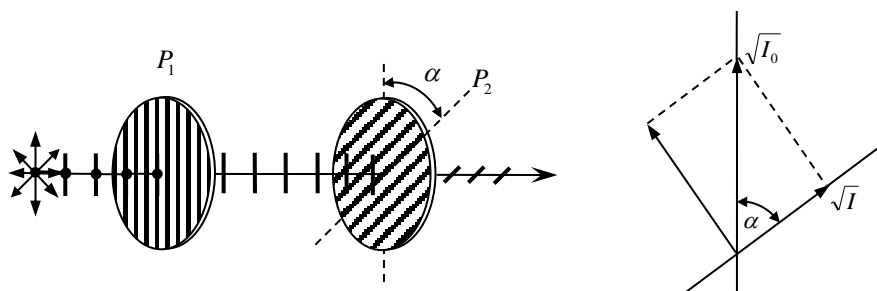


图 4 光学中的马吕斯定律

4、微波的迈克尔逊干涉实验

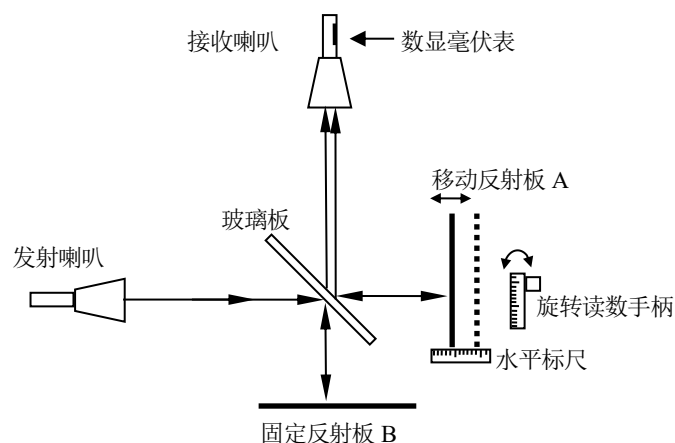


图 5 迈克尔逊干涉原理示意图

在微波前进的方向上放置一个与波传播方向成 45° 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 $2k\pi$, ($k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) 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。

6、模拟晶体的布拉格衍射实验

布拉格衍射是用 X 射线研究微观晶体结构的一种方法。因为 X 射线的波长与晶体的晶格常数同数量级, 所以一般采用 X 射线研究微观晶体的结构。而在此用微波模拟 X 射线, 照射到放大的晶体模型上, 产生的衍射现象与 X 射线对晶体的布拉格衍射现象与计算结果都基本相似。所以通过此实验对加深理解微观晶体的布拉格衍射实验方法是十分直观的。

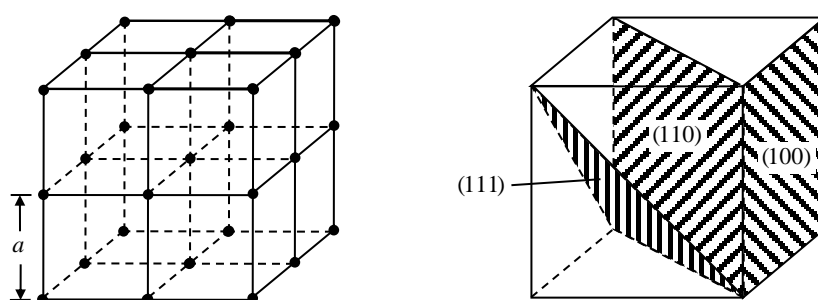


图 6 简单立方晶体结构模型

固体物质一般分晶体与非晶体两大类，晶体又分单晶与多晶。组成晶体的原子或分子按一定规律在空间周期性排列，而多晶体是由许多单晶体的晶粒组成。其中最简单的晶体结构如图 6 所示，在直角坐标中沿 X、Y、Z 三个方向，原子在空间依序重复排列，形成简单的立方点阵。组成晶体的原子可以看作处在晶体的晶面上，而晶体的晶面有许多不同的取向。如图 6 左方为最简立方点阵，右方表示的就是一般最重要也是最常用的三种晶面。这三种晶面分别为 (100) 面、(110) 面、(111) 面，圆括号中的三个数字称为晶面指数。一般而言，晶面指数为 $(n_1 n_2 n_3)$ 的晶面族，其相邻的两个晶面间距 $d = a / \sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2}$ 。显然其中 (100) 面的间距 d 等于晶格常数 a ；相邻的两个 (110) 面的晶面间距 $d = a / \sqrt{2}$ ；而相邻两个 (111) 面的晶面间距 $d = a / \sqrt{3}$ 。实际上还有许许多多更复杂的取法形成其他取向的晶面族。

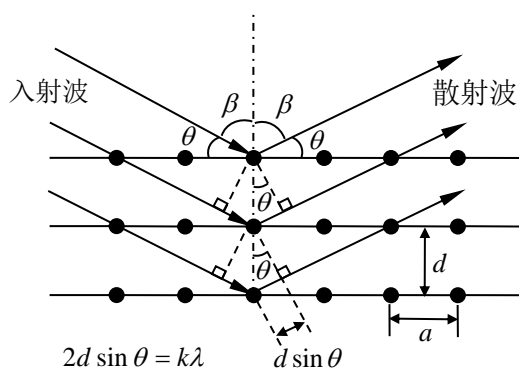


图 7 晶体的布拉格衍射

因微波的波长可在几厘米，所以可用一些铝制的小球模拟微观原子，制作晶体模型。具体方法是将金属小球用细线串联在空间有规律地排列，形成如同晶体的简单立方点阵。各小球间距即晶格常数 a 设置为 4cm 左右（与微波波长同数量级）。当如同光波的微波入射到该模拟晶体结构的三维空间点阵时，因为每一个晶面相当于一个镜面，入射微波遵守反射定律，反射角等于入射角，如图 7 所示。而从间距为 d 的相邻两个晶面反射的两束波的程差为 $2d \sin \theta$ ，其中 θ 为入射波与晶面的夹角。显然，只是当满足：

$$2d \sin \theta = k\lambda \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

时，出现干涉极大。方程 (6) 称为晶体衍射的布拉格公式。

如果改用通常使用的入射角 $\beta = 90^\circ - \theta$ ，表示，则 (6) 式为：

$$2d \cos \beta = k\lambda \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

【实验内容与步骤】

一、仪器的调整

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,载物台上先不放任何物体,将“功率调节”旋钮顺时针转到满偏,此时功率最小。微波频率:工作频率设定 9.2GHz,根据《频率对照表》查出相应电位器阻值,然后将“频率调节”旋钮调至相应值 (K Ω)。根据 $\lambda = c/f$ 可以计算出相应的波长理论值。

打开微波信号发生器电源,预热 10 分钟。转动载物台使发射臂对准 0°线,接收臂对准 180°线。预热后按下接收喇叭后面的毫伏表电源,数字显示屏显示接收到的微波强度,调整发射喇叭的发射功率使接收强度达到 90mV 左右,以保证现象明显并干扰不大。观察两个喇叭是否同轴等高,且通过分光计中心,否则进行必要的调整,调整时各螺钉不要过于用力,以免损坏。除目测之外,在发射与接收臂共线的情况下(分别对准 0°—180°线),可以依次微调发射喇叭和接收喇叭的水平角度使接收信号最强即达到同轴等高。

二、实验内容

1、微波的反射

将金属板平面安装在一支座上,安装时板平面法线应与载物台 0°线一致,并使固定臂指针指向 0°,这意味着小平台零度方向即是金属反射板法线方向。

打开检波信号数字显示器的按钮开关。接收转动小平台,使固定臂指针指在某一角度处,这角度读数就是入射角,然后转动活动臂在数显毫伏表上找到一最大值,此时活动臂上的指针所指的小平台刻度就是反射角。如果此时数显毫伏表显示太大或太小,应适当调整功率调节旋钮。

做此项实验,入射角最好取 30°至 65°之间,因为入射角太大接收喇叭有可能直接接收入射波,同时应注意系统的调整和周围环境的影响。实验结果记入表 1。

2、微波的单缝衍射

按需要调整单缝衍射板的缝宽。将单缝衍射板安置在支座上时,应使衍射板平面与支架圆座上指示线一致,将该支座放置在载物台上时,支座圆座上指示线应指示在载物小平台 90°位置。

转动小平台使固定臂的指针在小平台的 180°处,此时相当于微波从单缝衍射板法线方向入射。这时让活动臂置小平台 0°处,调整微波发生器的功率使数显毫伏表显示较大,然后在单缝的两侧,每改变衍射角 3°读取一次数显毫伏表读数,数据记入表 2。

根据记录数据,画出单缝衍射强度与衍射角度的关系曲线。并根据微波衍射强度一级极小角度和缝宽 a , 计算微波波长 λ 和其百分误差 (表中 $I_{\text{左}}$ 、 $I_{\text{右}}$ 是相对于 0 刻度两边对应角度的强度值)。

3、微波的双缝干涉

按需要调整双缝干涉板的缝宽。将双缝干涉板安置在支座上时,应使双缝板平面与支座圆座上指示线一致,将该支座放置在载物台上时,支座圆座上指示线应指示在载物小平台 90° 位置。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,调整信号使数显毫伏表显示接近最大,然后在双缝的两侧,每改变角度 2° 读取一次数显毫伏表的读数,数据记入表 3,然后就可以画出双缝干涉强度与角度的关系曲线。并根据微波衍射强度一级极小角度和缝宽 a , 计算微波波长 λ 和其百分误差。

4、微波的偏振实验

按实验要求调整喇叭口面相互平行正对共轴。调整信号使显示器接近满度,然后旋转接收喇叭短波导的轴承环(相当于偏转接收器方向),每隔 10° 在表 4 中记录数显毫伏表的读数。直至 90° 。就可得到一组微波强度与偏振角度关系数据,验证马吕斯定律式 (5)。

5、微波的迈克尔逊干涉实验

在微波前进的方向上放置一半透明板,使半透明板与入射方向成角 45° ,固定臂指针指向 0° 刻度线,接收臂指针指向 90° 刻度线(如图 5)。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,然后移动旋转读数机构上的手柄,使可移反射板移动,反复测 6 次,每次测出 3 个微波极小值对应的可移反射板的位置 L (注意:旋转手柄要慢,避免反射板晃动,并注意回程差的影响)。数据记入表 5,并计算出波长及其平均值,求出与理论值的百分误差。

6、微波的布拉格衍射

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。将模拟晶片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。

(1) 用 (100) 面的衍射验证布拉格公式

将仪器按图 8(a) 摆放, (100) 面与 90° 线平行,测量立方晶体 (100) 面衍射强度。 0° - 180° 连线是 (100) 面的法线,测量时转动晶体 C 和接收臂时保证入射波与反射波遵守反射定律,即入射角等于反射角,两臂始终以 0° - 180° 连线为轴对称。掠射角 θ 测量范围分两段: 20° 到 27° , 47° 到 58° , 掠射角每改变 1° 测一个强度值 I , 数据记入表 6 中并找出第 1、2 极衍射极大值对应的 θ_1 和 θ_2 。用钢卷尺(或钢直尺)测出晶格常数 a_0 , 根据公式 (6) 计算理论值 θ_1 和 θ_2 , 算出百分误差。

注意: 此仪器发射臂不能转动, 只能通过转动载物台来转动晶体, 再通过转动接收臂来调整接收角度。实

验中要保证发射与接收线满足反射定律，即入射角等于反射角，所以相对固定的发射臂来说，晶体每转动 1° ，接收臂就要从原位置同向转动 2° ，相当于晶体不动，发射与接收臂相对于晶体各转动了 1° 。

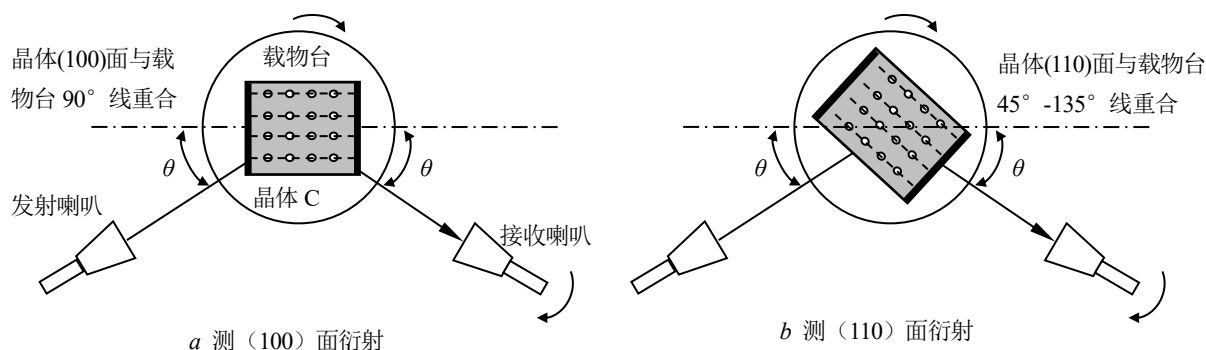


图 8 测(100)面与(110)面的布拉格衍射装置图

(2) 用 (110) 面的衍射测量立方晶体的晶格常数

在图 5 (a) 中，将晶体旋转 45° ，如图 5 (b) 所示，110 面（即正方形点阵的对角线，注意不是晶体外壳的对角线）与一条 45° - 135° 线重合，而另一条 45° - 135° 线即为 (110) 面的法线。测量 (110) 面的衍射强度，范围从 26° 到 40° ，每隔 1° 测一个强度值，记录在表 7 中。

找到 (110) 面的 1 级衍射极大值对应的掠射角 θ 。用布拉格公式计算晶面间距和晶格常数 a 并与实际测量值对比，计算百分误差。

【注意事项】

- 1、电源连接无误后，打开电源使微波源预热 10 分钟左右。
- 2、实验前，先要使两天线喇叭口正对，可从接收显示屏计数判断（显示值最大）。
- 3、微波实验互相干扰较强，实验过程中不要走动，不要挪动仪器方向和位置。
- 4、仪器机械部分尤其是锁紧各柱的螺钉较易损坏，旋转时不可用力过大。
- 5、为减少接收部分电池消耗，在不需要观测数据时，要把数显毫伏表开关关闭。
- 6、本实验可完成内容较多，应视具体学时和条件选做部分内容。一般 3 学时建议选做第 4 和第 6 步内容。

【数据处理】

微波波长理论值： $\lambda = c / f =$ _____ cm

表 1 微波的反射

入射角 $/^\circ$	30	32	34	36	38	40	...	64
反射角 $/^\circ$								

表 2 微波的单缝衍射

$\varphi / ^\circ$	0	3	6	9	12	15
$I_{\text{左}} / \text{mV}$							
$I_{\text{右}} / \text{mV}$							

表 3 微波的双缝干涉

$\varphi / ^\circ$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	...	80
强度 I /mV	左侧										
	右侧										

表 4 微波的偏振

$\alpha / ^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
理论值 /mV										
实验值 /mV										

表 5 微波的迈克尔逊干涉最小值位置 (单位: cm)

	L_1	L_2	L_3	$\lambda_i = L_3 - L_1 $
第 1 次				
第 2 次				
第 3 次				
第 4 次				
第 5 次				
第 6 次				
$\bar{\lambda}$	——	——	——	
相对误差	——	——	——	

表 6 (100) 面的布拉格衍射 晶格常数 $a_0 =$ cm

掠射角 $\theta / ^\circ$	20	21	22	23	24	25	26	27	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58
强度 I /mV																				

在坐标纸上画出 $I-\theta$ 曲线, 并标出第 1、2 级衍射极大值对应的掠射角 θ_1 和 θ_2 , 并与理论值比较:

实验结果: $\theta_1 =$

$\theta_2 =$

$$\text{理论值: } \theta_1' = \arcsin \frac{\bar{\lambda}}{2d_{100}} =$$

$$\theta_2' = \arcsin \frac{\bar{\lambda}}{d_{100}} =$$

式中 $\bar{\lambda}$ 取步骤 5 的实验结果。

百分误差: $E(\theta_1) = \frac{|\theta_1 - \theta'_1|}{\theta'_1} \times 100\% =$ $E(\theta_2) = \frac{|\theta_2 - \theta'_2|}{\theta'_2} \times 100\% =$

表 7 (110) 面的布拉格衍射

掠射角/ $^\circ$	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
强度 I/mV															

(110) 面 1 级衍射极大值对应掠射角 θ :

计算晶格常数: $a = d_{110} \sqrt{1^2 + 1^2 + 0^2} = \frac{\bar{\lambda}}{\sqrt{2} \sin \theta} =$

百分误差: $E(a) = \frac{|a - a_0|}{a_0} \times 100\% =$

【思考题】

- 1、各实验内容误差主要来源是什么？
- 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。
- 3、在实验中使发射器和接收器与角度计中心之间的距离相等有什么好处？
- 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？

【参考资料】

1. 教材, 张守超主编, 大学物理实验, 天津大学出版社 2023
2. 杨广武主编, 新编物理实验, 天津大学出版社 2013
3. 杨广武主编, 大学物理实验, 天津大学出版社 2009.
4. 刘小廷. 大学物理实验. 北京: 科学出版社, 2009.
5. 李朝荣. 基础物理实验. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
6. 李恩普. 大学物理实验. 北京: 国防工业出版社, 2004.
7. 龚志强. 大学物理实验. 北京: 北京邮电大学出版社, 2008.
8. 方利广. 大学物理实验. 上海: 同济大学出版社, 2006.