

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

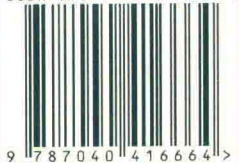
大学物理实验 II

李海洋 主编

高等教育出版社

INTRODUCTORY PHYSICS EXPERIMENTS

ISBN 978-7-04-041666-4



9 787040 416664 >

定价 22.10元

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验 II

DAXUE WULI SHIYAN

李海洋 主编

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是其姐妹篇《大学物理实验 I》的拓展与延伸,在忠实教育部高等学校原物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)的基础上,突出了物理实验与现代科技及信息科学的融合,精选了26个反映当前主流和前沿发展的大学物理实验综合探究性、设计创新性实验选题,其中有不少是近年来出现的一些较新的实验题目和内容。书中详细阐述了每个实验的原理、背景知识和在现代生产生活中的具体应用,并介绍了相关的实验仪器、操作要领和注意事项,旨在倡导学生自主学习,着力于他们分析问题、解决问题及创新能力的培养。

本书可作为理工科大学非物理专业多学时(48学时及以上)大学物理实验教材,也可作为理工科大学物理专业或物理相近专业物理实验课的教学用书。各校可根据教学时数的不同,选用其中的实验项目。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 II / 李海洋主编. — 北京: 高等教育出版社, 2015.2

ISBN 978-7-04-041666-4

I. ①大… II. ①李… III. ①物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 294695 号

策划编辑 高聚平
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 高聚平
责任校对 刘娟娟

封面设计 于文燕
责任印制 韩刚

版式设计 范晓红

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印刷 保定市中国画美凯印刷有限公司
开本 787mm×960mm 1/16
印张 12.25
字数 220千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版次 2015年2月第1版
印次 2015年2月第1次印刷
定价 22.10元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 41666-00

目 录

6 综合实验	(1)
实验 6.1 弗兰克 - 赫兹实验	(1)
实验 6.2 光的衍射	(8)
实验 6.3 电子衍射	(11)
实验 6.4 全息照相	(21)
实验 6.5 色度学	(29)
实验 6.6 真空的获得与测量	(35)
实验 6.7 低温的获得与测量	(43)
实验 6.8 高温超导材料特性测试	(48)
实验 6.9 NaI(Tl)单晶 γ 闪烁谱仪	(54)
实验 6.10 用快速电子验证狭义相对论的动量 - 动能关系	(60)
实验 6.11 交流电桥	(69)
实验 6.12 单光子计数实验系统	(80)
7 提高实验	(85)
实验 7.1 RLC 串联电路暂态过程的研究	(85)
实验 7.2 多普勒效应频谱分析综合设计与应用	(90)
实验 7.3 传感器设计与应用	(97)
实验 7.4 光的偏振应用与研究	(120)
实验 7.5 平面光栅单色仪	(127)
实验 7.6 光谱分析	(133)
实验 7.7 用椭圆偏振仪测量透明薄膜厚度和折射率	(139)
实验 7.8 卫星 GPS 定位模拟设计与应用	(146)
实验 7.9 双光栅测量微弱振动位移量	(156)
实验 7.10 非线性电路研究混沌现象	(163)

实验 7.11	介电常量频率谱的测量	(171)
实验 7.12	红外热像仪的研究和使用	(175)
实验 7.13	PN 结正向压降温度特性的研究与应用	(181)
实验 7.14	数字信号光纤传输技术	(187)
参考资料	(191)

6

综合实验

实验 6.1 弗兰克 - 赫兹实验

【实验简述】

1914 年弗兰克 (Franck J) 和赫兹 (Hertz G) 在研究气体放电现象中低能电子与原子间相互作用时, 在充汞的放电管中发现, 当电子能量达到一临界能量时, 碰撞过程由弹性变为非弹性, 电子把这份特定的能量转移给原子使之受激, 原子退激时以特定频率的光量子形式辐射出来, 电子损失的能量 ΔE 与光量子能量及光子频率的关系为 $\Delta E = eU = h\nu$. 弗兰克 - 赫兹实验将看不见摸不着的微观量子态转化成可测量的宏观量而显示出来, 证实了原子内部的能量是量子化的. 弗兰克和赫兹因此获得了 1925 年度诺贝尔物理学奖.

通过本实验可以了解到原子内部能量量子化的情况, 可以学习和体验弗兰克 - 赫兹实验中研究气体放电现象时低能电子和原子间相互作用的实验思想和方法. 该实验方法至今仍是探索原子内部结构的主要手段之一.

【实验目的】

1. 加深对“量子化”概念的认识.
2. 测量汞原子的第一激发电位.
3. 观察汞的电离电位和高激发电位.

【实验原理】

根据玻尔理论原子只能处在某些状态, 每一状态对应一定的能量, 其数值彼此是分立的, 原子在能级间进行跃迁时吸收或发射确定频率的光子. 当原子与一定能量的电子发生碰撞时, 可以使原子从低能级跃迁到高能级 (激发), 则有

$$eU_1 = \frac{1}{2} m_e v^2 = E_1 - E_0$$

电子在电场中获得的动能在与原子碰撞时交给了原子. 进行 F - H (弗兰克 - 赫兹) 实验使用的碰撞管是充汞的, 汞是单原子分子, 它的前 5 个电子壳层全部闭合. 主量子数 $n = 6$ 的两个价电子按自旋平行与反平行, 给出三重态和单重态两套能级. 能级如图 6 - 1 - 1 所示. 汞原子基态是 6^1S_0 , 当能量为 4. 67 eV、4. 89 eV、5. 46 eV 的电子, 即能量等于 6^3P_0 、 6^3P_1 、 6^3P_2 与基态 6^1S_0 的能级差的电子轰击汞原子时, 能级跃迁将有最大激发概率. 由跃迁选择规则, 量子数 $\Delta m = \pm 1$ 时, 6^3P_1 态电子可在 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ s 内自发辐射出波长为 253. 7 nm 紫外波段的光子, 所以可以用紫外光谱仪测量到这条谱线. 当增加电子加速电压至 9. 88 V 时, 又出现三条单重态和三重态之间交叉跃迁可见光谱线 407. 8 nm、577. 0 nm、579. 0 nm. 原子从基态跃迁到第一激发态 U_1 称为原子第一激发电势(位).

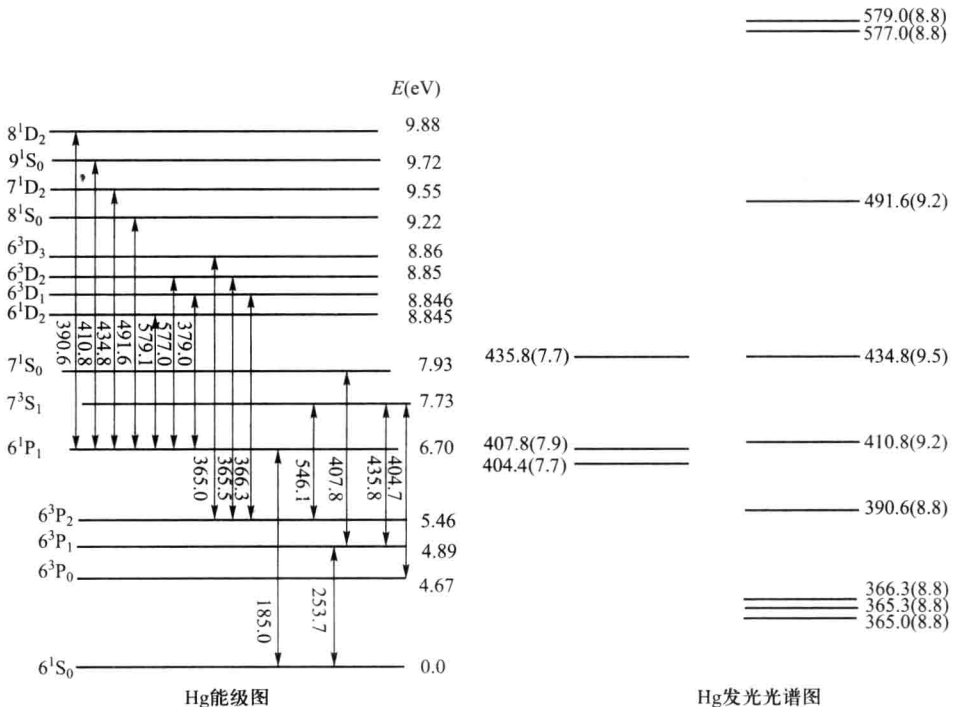


图 6 - 1 - 1 Hg 能级图及发射谱线

汞常温下是液体, 饱和蒸气压很低, 加热就可改变饱和蒸气压. 汞的相对原子质量较大, 在和电子作弹性碰撞时几乎不损失动能, 汞的第一激发能级为 4. 89 eV, 因此只需几十伏电压就能观察到多个峰值.

如图 6 - 1 - 2 所示, 由阴极 F 发出的电子经电场 U_{G_1K} 加速趋向阳极, KG_1 的

间距小于电子在汞蒸气中的平均自由程,使电子在这个区域内只加速不碰撞。 KG_1 之间的电压 U_{G_1K} 可控制管内电子流大小,同时可抵消阴极 K 附近电子云形成负电压的影响。

由图 6-1-1 知,在 $0 \sim 4.67$ V 区间内,汞的相对原子质量较大,在和电子作弹性碰撞时几乎不损失动能。 $U_{G_2K} = 4.67$ V 时,电子在这一区间内获得的能量为 4.67 eV。非弹性碰撞使汞原子发生 $6^1S_0 \rightarrow 6^3P_0$ 的跃迁。由跃迁选择规则知: $6^3P_0 \rightarrow 6^1S_0$ 是禁戒的,即激发到 6^3P_0 的电子不会自发地以辐射出光子的形式跃迁到基态,有较长的寿命,远大于电子在 F-H 管内的渡越时间。所以 $6^1S_0 \rightarrow 6^3P_0$ 的跃迁很快达到饱和,不太容易观察到这个吸收。电子可以继续加速,越过这一能级。当 $U_{G_2K} = 4.89$ V 时,电子获得 4.89 eV 的能量,和汞原子发生非弹性碰撞,电子把全部能量传给汞气体原子,汞原子发生 $6^1S_0 \rightarrow 6^3P_1$ 的跃迁。由于 G_2 、P 间的反向减速电场作用,失去能量的电子不能到达板极 P,使得到达板极 P 的电子流 I_p 第一次大幅度下降,随着 U_{G_1K} 增加,电子与原子发生非弹性碰撞的区域向阴极 G_1 方向移动,在 G_2 附近电子重新获得的能量小于 4.89 eV,不会再发生非弹性碰撞,电子将保持能量克服 U_{G_2P} 减速电压到达板极, I_p 又开始增加了。每当 $U_{G_2K} = n \times 4.89$ V ($n = 1, 2, \dots$) 时, I_p 都会大幅度下降一次。P 极 I_p 随 KG_1 间扫描电压不断上升、下降,不断出现峰和谷,相邻峰(或谷)间距皆相等,大约为 4.89 V,如图 6-1-3 的曲线所示,表明汞原子只吸收 4.89 eV 的电子能量。汞原子内部存在一个能量为 4.89 eV 的量子态。

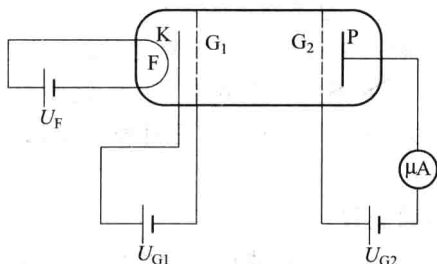


图 6-1-2

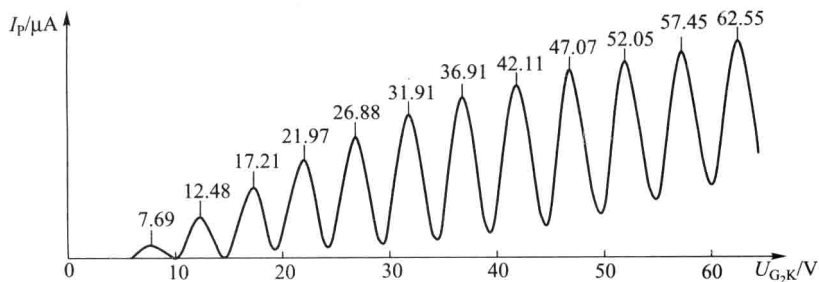


图 6-1-3

要测量汞的高激发电位,首先要获得较高能量的电子,其次要提高电子在碰撞区域内与汞原子发生碰撞的概率.为此,将栅极 G_1, G_2 短接使之同电位,电子在这个区域内只碰撞不加速.加速区很短,电子平均自由程远大于加速区 KG_1 之间距离,电子在这个区域内只加速不碰撞,电子可以加速到比较高的能量,非弹性碰撞时汞原子可被激发到高激发态.

实验采用四极式的 F-H 碰撞管,以 Hg 为材料,通过测量电场电压和电流的关系,确定 Hg 激发时所需要吸收的能量,从而确定汞原子的第一激发电位.

【实验装置】

实验系统总体连接图如图 6-1-4 所示.主要包括如下 4 部分:

1. F-H 管电源组.
2. 扫描电源和微电流放大器.
3. F-H 管、加热炉、控温装置.
4. X-Y 函数记录仪(PEI-1 物理实验接口).

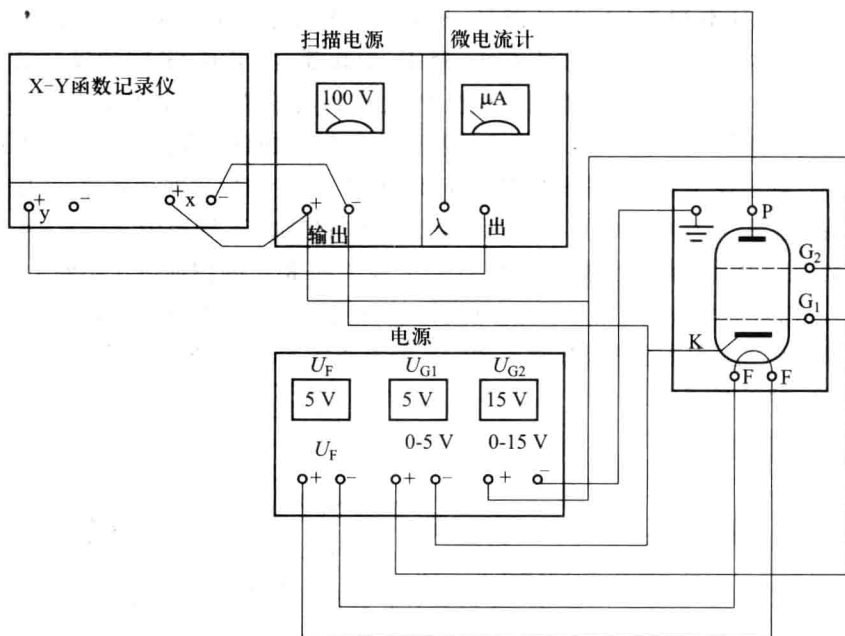


图 6-1-4

【实验内容】

1. 测量 Hg 的第一激发电位

打开 F - H 管加热炉和控温装置的电源开关,让加热炉加温约 20 min,温控指示灯绿变红,炉温达到预设温度(170 ~ 185 °C).电炉处的温度很高,千万不要用手触摸它,以免烫伤.加温等待期间,可先按图 6 - 1 - 4 连接电路.暂不接通其他仪器的电源(F - H管内液态金属汞是导电的,常温下不能给管子通电,否则易损坏管子).

“扫描选择”置“手动”,“手动调节”逆时针旋至最小.微电流放大器“量程”置 10^{-7} .“极性”置“-”.炉温达到后开启其他仪器的电源.

据 F - H 管参考工作电压的范围 $U_F = 1.5 \sim 1.8 \text{ V}$, $U_{C_1} = 2.0 \sim 2.2 \text{ V}$, $U_{C_2} = 0.8 \sim 1.0 \text{ V}$,分别在范围内选一个值,预热 3 min.

(1) 手动方式:缓慢旋“手动调节”,增大加速电压,同时观察微电流计上 I_p 的变化,应可观察到峰谷变化.对汞管,加速电压达到 50 ~ 60 V 时约有 10 个峰.如果加速电压增加到较大时,电流突然大幅度增加,则表明 F - H 管击穿发生,应立即调低加速电压.然后检查灯丝电压是否偏大,适当减少灯丝电压(0.1 V),再进行全程测量.不发生 F - H 管击穿,若电流偏小,可略增灯丝电压.

(2) 自动扫描方式:将“手动调节”旋至最小,调节“自动上限”较小位,“扫描选择”置“快扫”,稍后开始自动增大加速电压,微电流计可观察到峰谷变化,到达上限值,会复零,过一会儿开始一次新的扫描.据电压表指示调至上限值约 60 V.开启 X - Y 函数记录仪电源,用鼠标双击桌面“PEI - 1”图标,并点击 Record按钮,开始采集数据、绘制曲线.

注意:中途要清除屏上曲线,可按 Clear 按钮;点击 Query 按钮,可终止采集数据.若出现 Voltage、Y 数值在变化,但不出现曲线,可按“I”键.

用键盘 $\uparrow \downarrow \leftarrow \rightarrow$ 键移动光标,光标位置数据可从左上角的 Voltage = xx.xx、Y = xxx 读得,若按空格键,屏上光标处出现一个标记,并注明该点电压值.

用键盘 Print Screen 键截屏并粘贴到“附件”的“画图”板上,“另存为”*.jpg.形成图形文件,可粘贴到实验报告上.

画出 $I_p - U_{C_2k}$ 曲线图,测出各峰值(或谷值)电压值,并据公式:

$$U_{C_2k}(n) = a + nU_1$$

式中 $U_{C_2k}(n)$ 表示第 n 个峰(或谷)的电压值, U_1 为第一激发电位, a 为常量.用最小二乘法求出 Hg 的第一激发电位 U_1 .

测量实例:

适当调整各参数,选微电流计能出现峰 - 谷比大的一组工作电压,记录数据. F - H 管工作电压选择为 $U_F = 1.8 \text{ V}$, $U_{C_1} = 3.0 \text{ V}$, $U_{C_2} = 0.6 \text{ V}$.

加速电压从零开始逐渐增加,直到 5.5 V 时电流表读数开始不为零,手动调节加速电压直到 53.8 V,每隔 0.6 V 左右记录一次数据.手动扫描接收电流-加速电压曲线如图 6-1-5 所示.

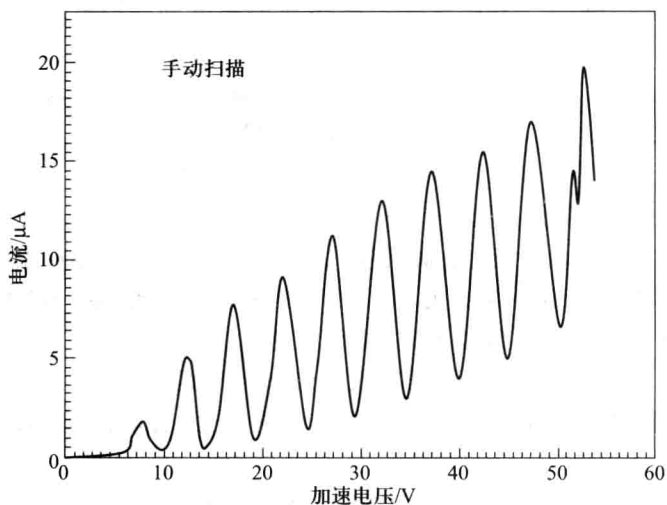


图 6-1-5

以上曲线由 Origin 软件绘图得到,可由软件直接读取各个峰值数据,列表 6-1-1 如下.

表 6-1-1

峰位编号	加速电压/V
1	8.0
2	12.4
3	17.1
4	22.0
5	27.3
6	32.2
7	37.0
8	42.4
9	47.2
10	52.6

由加速电压对峰位编号作图 6-1-6, 图 6-1-6 中直线是通过最小二乘法拟合得到的, 直线方程为

$$y = 2.44 + 4.98x$$

其中斜率(改变单位后)即为汞原子第一激发态与基态的能量差, 实验值为 4.98 eV, 绝对误差为 0.03 eV.

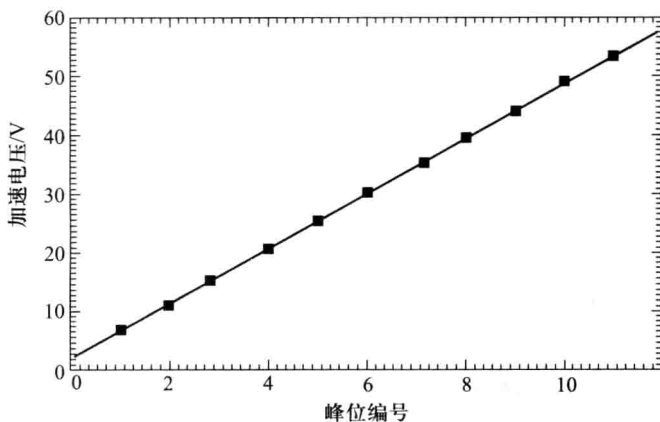


图 6-1-6

2. 测量汞的高激发电位(选做)

要测汞原子高激发态, 电子与汞原子发生碰撞前其动能必须要大于 4.89 eV, 所以需增加电子的平均自由程. 降低炉温至 90 ~ 120 °C, 使汞原子密度相应减少, 以降低电子进入栅极前与汞原子发生碰撞的概率. 栅极 G_1, G_2 短接同电位, 使 G_1, G_2 间形成一等势区, 电子在 G_1, G_2 间与汞原子只碰撞不加速. 测量板级电流 I_p 与加速电压 U_{G_2K} 之间一一对应关系数据, 作 $I_p - U_{G_2K}$ 曲线图, 从而求得汞的高激发电位(如 $6^3P_1, 6^3P_2, 6^3P_3$).

【思考题】

1. 第一激发电位的物理含义是什么?
2. 温度对 F-H 管的 $I_p - U_{G_2K}$ 曲线有什么影响?

实验 6.2 光的衍射

【实验简述】

光的衍射现象一般是指光遇到障碍物时偏离直线传播方向的现象. 光的衍射和光的干涉一样证明了光具有波动性.

一般衍射分为单缝衍射、多缝衍射和光栅衍射等. 而根据狭缝形状又有矩形孔衍射和圆形孔衍射等. 不同的衍射光, 其光强分布特性也不一样. 本实验利用计算机技术分析和研究单缝衍射光的强度分布特性, 并计算光波波长.

【实验目的】

1. 研究夫琅禾费单缝衍射的光强分布, 加深对衍射理论的了解.
2. 学会利用计算机分析单缝衍射的光强分布图.
3. 利用单缝衍射原理计算入射激光波长.

【实验原理】

1. 单缝的夫琅禾费衍射

单缝的夫琅禾费衍射是指衍射物体为一条狭小的可调节的狭缝, 当单色光通过该狭缝时, 因为光的波动性而发生衍射现象. 如下图 6-2-1 所示, 设 a 为单缝 Z 的宽度, Z 、 P 间距为 s , θ 为衍射角, 其在观察屏 P 上的位移为 x , 所以 x 离开屏中心 O 的距离约为 $s\theta$, 光源的波长为 λ .

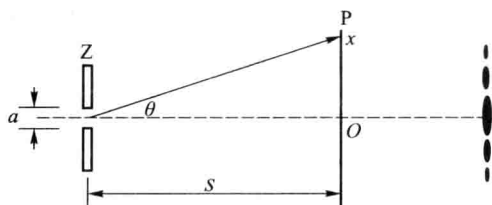


图 6-2-1

实验中 He-Ne 激光的方向性极强, 可视为平行光束; 宽度为 a 的单缝产生的夫琅禾费衍射光路图满足近似条件为 $s \gg a$, 且 $\sin \theta \approx \theta \approx \frac{x}{s}$. 又因为产生暗条纹的条件是

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

所以, 暗条纹的中心位置为

$$x = k \frac{s\lambda}{a} \quad (6-2-2)$$

两相邻暗纹之间的中心是明纹中心. 产生明条纹的条件是

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

也可以获得明条纹的中心位置.

单缝的夫琅禾费衍射的光强公式为

$$I_{\theta} = I_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2 \quad (6-2-3)$$

$$u = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} \quad (6-2-4)$$

(6-2-3) 式中 I_0 是中心处的光强,

图 6-2-2 是单缝衍射的相对光强

$\left(\frac{I_{\theta}}{I_0} \right)$ 曲线, 中心为主极强, 相对极度为 1.

除主极强外, 次极强出现在 $\frac{d}{du} \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2 = 0$

的位置, 它们是超越方程 $u = \tan u$ 的根,

以 $\sin \theta$ 为横坐标, 其数值为 $u =$

$\pm 1.43\pi, \pm 2.46\pi, \pm 3.47\pi, \dots$. 对应的

$\sin \theta$ 值为 $\sin \theta = \pm \frac{1.43\lambda}{a}, \pm \frac{2.46\lambda}{a}, \pm \frac{3.47\lambda}{a}, \dots$. 因为衍射角 θ 很小, $\sin \theta \approx \theta$, 所以在

观察屏上的位置 x 可近似为

$$x = \theta s = \pm \frac{1.43s\lambda}{a}, \pm \frac{2.46s\lambda}{a}, \pm \frac{3.47s\lambda}{a}, \dots \quad (6-2-5)$$

次极强的强度为 $I_1 \approx 4.7\% I_0, I_2 \approx 1.7\% I_0, I_3 \approx 0.8\% I_0, \dots$. 所以次极强的强度比主极强的强度要弱得多.

对于暗条纹, $u = k\pi$ (k 为整数), 对应的衍射角 $\theta = k\lambda/a$.

2. 测量激光波长

对于暗条纹, 由 (6-2-2) 式可得光波长计算公式为

$$\lambda = \frac{ax}{ks} \quad (6-2-6)$$

因此, 如果测得了第 k 级暗条纹的位置 x 以及狭缝大小 a 和狭缝到屏间距离 s , 就可以计算未知的光波长.

【实验装置】

图 6-2-3 为整个实验装置的示意图. 其工作过程如下: 单色激光通过狭缝

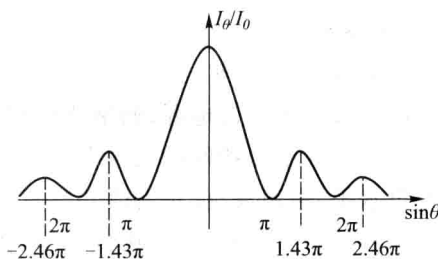


图 6-2-2

器在 x 轴方向产生衍射条纹图形. 光电探测器在计算机的控制下在 x 方向移动. 在工作程序的控制下可以实现定点测量或在某一范围内的测量.

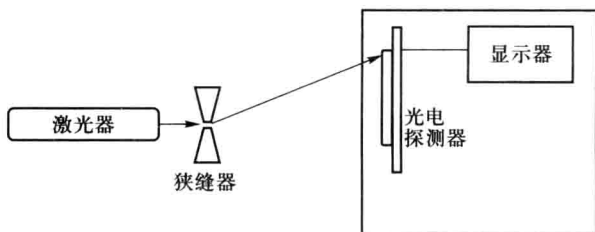


图 6-2-3

【实验内容】

1. 调整衍射光斑

- (1) 打开激光器电源, 调整狭缝器、激光器和探测器等高共轴.
- (2) 确保激光器的激光垂直照射狭缝器, 调节单缝倾斜度及左右位置, 使衍射光斑水平, 两边对称. 然后改变缝宽和间距, 观察衍射光斑的变化规律.

(3) 开启计算机, 扫描衍射光斑, 得到如图 6-2-2 所示的衍射光强分布图. 如果光强分布不对称, 继续调整探测器水平度, 直到满意为止.

2. 测量激光波长

$$s = (\quad), a = (\quad)$$

实验次数	x	λ	$\bar{\lambda}$
1			
2			
3			
4			
5			

【思考题】

1. 请解释影响衍射强度分布曲线不对称的主要因素.
2. 狭缝宽度是否越小越好, 为什么?