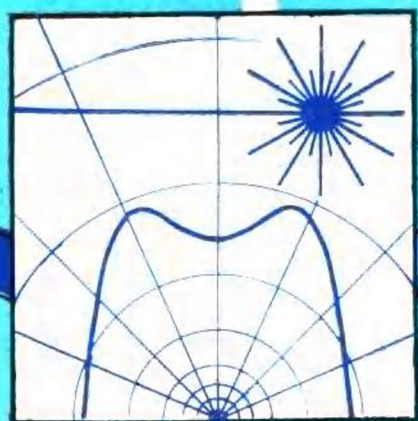


现代光学实验

李允中 董孝义 王清月 主编



南开大学出版社

现代光学实验

李允中 董孝义 王清月 主编

南开大学出版社

内 容 简 介

本书是《基础光学实验》(南开大学出版社 1987年)的续篇。本书包括了光谱学、激光、光效应及其应用、非线性光学、信息光学、X射线、纤维光学等方面的59个实验。可作为高等院校近代物理实验课、专业实验课与研究生实验课的教材和参考书。

现 代 光 学 实 验

李允中 董孝义 王清月 主编

南开大学出版社出版

(天津八里台南开大学校内)

新华书店天津发行所发行

河北省邮电印刷厂印刷

1991年9月第1版 1991年9月第1次印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 12.625 插页 2

字数: 336千 印数: 1—2500

ISBN7-310-00370-5/O·53 定价: 6.65元

1991/10/16

前 言

本书是《基础光学实验》(南开大学出版社1987年11月)的续篇。在《基础光学实验》中,我们选编了几何光学、波动光学、光谱学、激光、光效应、光学仪器六章共64个实验;本书则包括光谱学、激光、光效应及其应用、非线性光学、信息光学、X射线、纤维光学七章共59个实验。前三章是《基础光学实验》书中相应章节内容的发展和深入,四、五、七章则是光学领域现代技术的反映。

《基础光学实验》为开设普物光学实验、中级光学实验提供教材;本书则为开设中级光学实验、专业光学实验及研究生光学实验提供教材和参考。

两书共选编光学实验123个,我们希望从基本实验技能到实验技术的新发展较全面地反映光学领域实验技术的各个方面,为光学实验教学提供较为广阔的选择余地。

作为按专业编写实验教材的初次尝试,两书缺点、错误在所难免,恳请大家批评指正。

两书全部插图均由袁树忠同志精心绘制,深表谢意。

孙寿民、王家骅同志为两书的编辑、出版做了许多有益的工作,提出了许多有益的建议,我们表示深切的谢意。

编 者

目 录

前言

第一章 光谱学..... (1)

实验 1 阿达玛变换光谱..... (1)

实验 2 傅里叶变换光谱..... (10)

实验 3 电场调制反射光谱..... (17)

实验 4 光声光谱..... (26)

实验 5 晶体的喇曼光谱..... (30)

实验 6 光磁共振..... (40)

第二章 激光..... (52)

实验 7 红宝石固体激光器..... (52)

实验 8 红宝石激光选模技术..... (58)

实验 9 红宝石激光电光晶体调 Q 技术..... (63)

实验 10 红宝石激光染料调 Q 技术..... (68)

实验 11 红宝石激光晶体的吸收特性..... (74)

实验 12 调谐二氧化碳激光器..... (78)

实验 13 氮分子激光泵浦调谐染料激光器..... (83)

实验 14 半导体激光器..... (92)

实验 15 激光主动锁模..... (98)

实验 16 激光被动锁模..... (105)

实验 17 氦氖激光器的反馈干涉..... (112)

实验 18 微振动的激光外差测量..... (117)

实验19	光子计数	(122)
第三章	光效应及其应用	(128)
实验20	声光法测量光速	(128)
实验21	声光法测量声速	(138)
实验22	声光偏转	(143)
实验23	光声效应	(149)
实验24	晶体双折射随温度的变化	(155)
实验25	激光多普勒效应	(161)
实验26	法拉第效应	(166)
实验27	太阳电池的光生伏特效应	(171)
实验28	利用液晶的电光效应检测绝缘膜缺陷	(178)
第四章	非线性光学	(183)
实验29	角度匹配激光倍频	(183)
实验30	温度匹配激光倍频	(192)
实验31	光学双稳态	(198)
实验32	光四波混频与相位共轭波	(204)
第五章	信息光学	(211)
实验33	全息透镜	(211)
实验34	一步彩虹全息	(215)
实验35	相干光学检测	(222)
实验36	白光假彩色密度编码	(228)
实验37	全息法弹光效应	(235)
实验38	实时全息干涉计量	(243)
实验39	图象的复振幅相加和相减	(248)
实验40	白光处理系统中用散斑编码作立体投影	(251)
实验41	非线性记录对全息图再现的影响	(255)

实验42	用 π 相位滤波实现图象对比度反转·····	(259)
实验43	利用编码光栅实时获得多重正负象·····	(268)
实验44	用电视系统作黑白图象的密度模拟假彩色编 码·····	(273)

第六章 X射线····· (278)

X射线衍射基础知识·····	(278)
实验45 X射线物相定性分析·····	(289)
实验46 铜的X射线粉末相·····	(293)
实验47 劳厄法确定晶体的取向·····	(298)
实验48 周转晶体的衍射·····	(308)
实验49 X射线形貌术·····	(316)

第七章 纤维光学····· (322)

实验50 光纤芯径、外径及不圆度的测量·····	(322)
实验51 干涉法测量光纤折射率分布·····	(326)
实验52 近场扫描法测量光纤折射率分布·····	(334)
实验53 光纤损耗特性的测量·····	(341)
实验54 光纤色散特性的测量·····	(352)
实验55 单模光纤归一化频率的测量·····	(366)
实验56 单模光纤的偏振特性·····	(375)
实验57 传光束光学特性的测量·····	(382)
实验58 光纤电磁量传感器·····	(388)
实验59 光纤温度传感器·····	(392)

第一章 光 谱 学

光谱学是光学的一个重要分支，在本世纪初原子物理学与量子力学的形成过程中，光谱学作出了自己的巨大贡献，从那时起，光谱方法就作为分析研究原子、分子、晶体及有机物质的结构、组成的有力手段，活跃于人类的科研、生产活动中。光谱仪器还是人类了解天体奥秘的必要工具，在60年代激光器诞生及以后的发展过程中，它也发挥了不可磨灭的作用。

我们将《基础光学实验》一书中“光谱学”一章所使用的光谱实验方法称为常规光谱方法，本章则反映60年代以来随着激光器的诞生及计算机的普及而出现的各种光谱新的方法，包括激光喇曼光谱，由于其巨大的优越性，已经取代了以水银灯为光源的常规喇曼光谱；光声光谱，它已经形成产品，在探测不透明物质的吸收光谱方面发挥着它的独特专长；傅里叶变换光谱，已发展成为新一代的红外光谱仪器，正如50、60年代棱镜光谱仪让位于光栅光谱仪一样，红外光栅光谱仪器正逐渐为傅里叶变换红外光谱仪器所取代。

随着各种学科的迅速发展，光谱学的新技术也日新月异，本章的6个实验正是这种发展变化的一个缩影。

实验 1 阿达玛变换光谱

【学习重点】

- 1 了解阿达玛 (Hadamard) 变换光谱的基本原理。
- 2 了解单编码阿达玛变换光谱的实验技术和数据处理方法。

【仪器用具】

阿达玛变换光谱仪、高压汞灯、硫化铅红外接收器、选频放大器、数字电压表、TP 803 微型计算机。

【原理】

常规光谱仪一般是单通道的，检测器接收的光信号只是光源辐射的极小一部分，信噪比不易提高，特别是在光谱的红外波段，检测器的转换效率低，固有噪声大，当光源是弱的漫射源时，用常规光谱仪就很难进行检测。

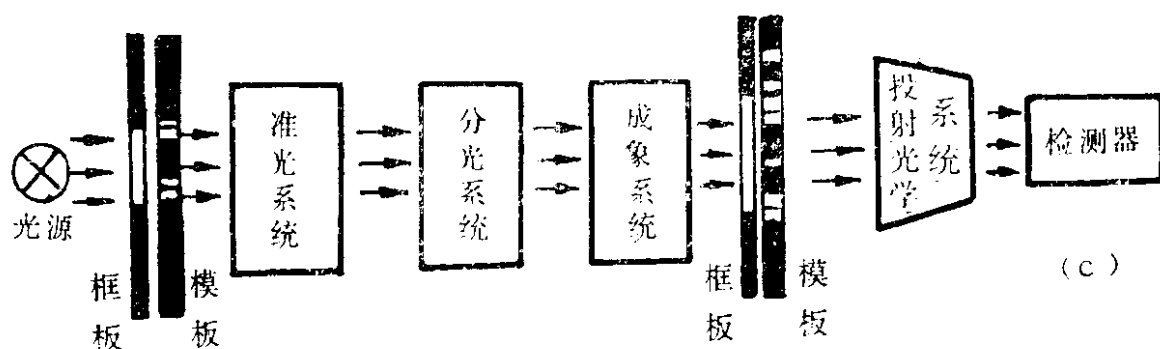
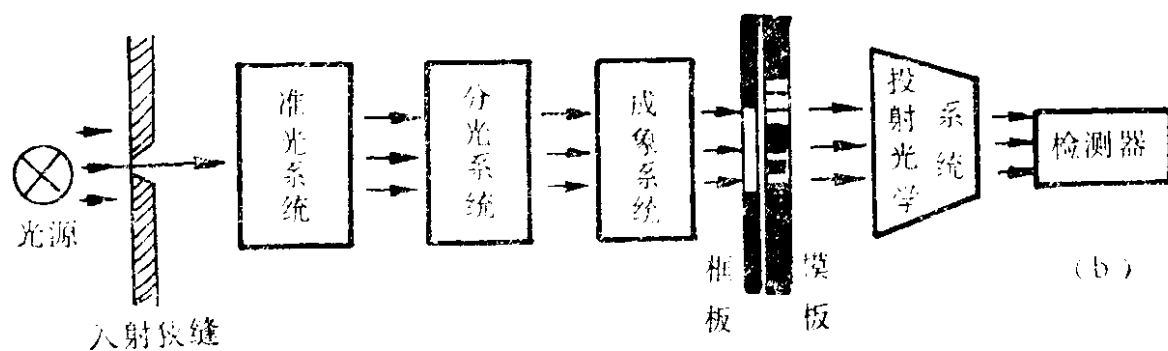
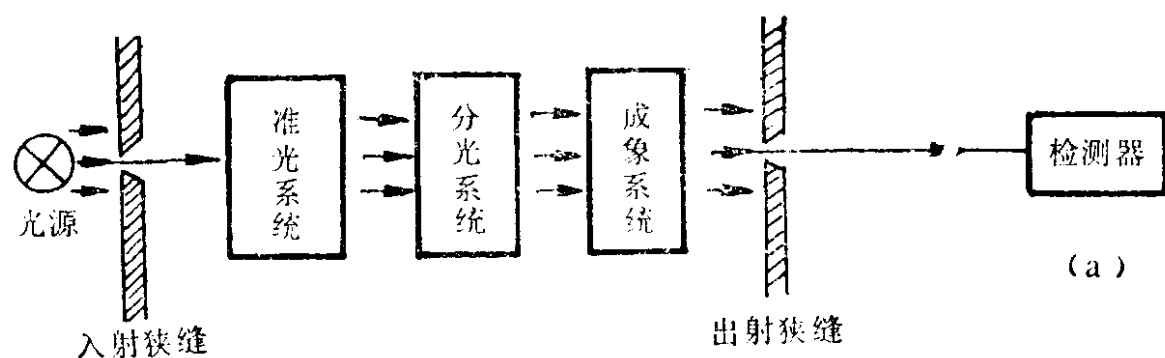
这里介绍一种新型的调制光谱仪——阿达玛变换光谱仪 (HTS)，它具有多通道和高输入量两方面的优点，从而大大提高光谱测量的信噪比，使弱光信号的光谱测量成为可能。

阿达玛变换光谱仪的特点是用编码模板代替入射狭缝和出射狭缝中的一个或两个。图1-1是其原理示意图，图1-1a表示常规光谱仪；图1-1b用编码模板代替一个狭缝（此处代换出射狭缝），称单编码调制光谱仪；图1-1c用两个编码模板代换常规光谱仪的两个狭缝，称双编码调制光谱仪。编码模板由一些对检测光不透或全透的缝条组成，模板前有一透射框板，操作时，编码模板相对于框板依次步进，每次步进一个缝条的距离，对于一个模板位置，检测器接收多个光谱成分，并输出一个信号。分析 N 个未知光谱成分时，需要 N 个不同的调制模板，检测器输出 N 个信号，由电子计算机将这 N 个信号进行数字处理，得到每个光谱成分的强度值。

以下具体说明阿达玛变换光谱的基本原理。

(1) 称量设计 假定我们用一个天平来称4个物体的质量，这4个物体的实际质量（真值）是 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 ，用天平一个一个地称量，测得数值为 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 ，相应的测量误差是 e_1 、 e_2 、 e_3 、 e_4 ，可写出4个方程

$$\begin{aligned} y_1 &= x_1 + e_1 \\ y_2 &= x_2 + e_2 \\ y_3 &= x_3 + e_3 \end{aligned} \quad (1.1)$$



(a) 常规光谱仪 (b) 单编码调制光谱仪 (c) 双编码调制光谱仪

图1-1 阿达玛变换光谱仪原理图

$$y_4 = x_4 + e_4$$

式中的测量值 y_i 就是估算值 $\hat{x}_i$ ，即 $y_1 = \hat{x}_1$ 、 $y_2 = \hat{x}_2$ ， $y_3 = \hat{x}_3$ 、 $y_4 = \hat{x}_4$ 。若称量满足等方差性，即各次测量的均方差相等，均为 σ^2 ，这种一一分别称量的均方差为

$$\langle (\hat{x}_1 - x_1)^2 \rangle = \langle e_1^2 \rangle = \sigma^2$$

$$\langle (\hat{x}_2 - x_2)^2 \rangle = \langle e_2^2 \rangle = \sigma^2 \quad (1.2)$$

$$\langle (\hat{x}_3 - x_3)^2 \rangle = \langle e_3^2 \rangle = \sigma^2$$

$$\langle (\hat{x}_4 - x_4)^2 \rangle = \langle e_4^2 \rangle = \sigma^2$$

现在改用组合称量，例如在左盘中放物体 1 和 3，在右盘中放物体 2 和 4 及砝码 y_2 而达到平衡，得 $y_2 = x_1 - x_2 + x_3 - x_4 + e_2$ 。作类似的 4 次称量得

$$\begin{aligned} y_1 &= x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + e_1 \\ y_2 &= x_1 - x_2 + x_3 - x_4 + e_2 \\ y_3 &= x_1 + x_2 - x_3 - x_4 + e_3 \\ y_4 &= x_1 - x_2 - x_3 + x_4 + e_4 \end{aligned} \quad (1.3)$$

解式(1.3)的联立方程可求得未知质量的估算值

$$\begin{aligned} \hat{x} &= \frac{1}{4}(y_1 + y_2 + y_3 + y_4) = x_1 + \frac{1}{4}(e_1 + e_2 + e_3 + e_4) \\ \hat{x}_2 &= \frac{1}{4}(y_1 - y_2 + y_3 - y_4) = x_2 + \frac{1}{4}(e_1 - e_2 + e_3 - e_4) \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\hat{x}_3 = \frac{1}{4}(y_1 + y_2 - y_3 - y_4) = x_3 + \frac{1}{4}(e_1 + e_2 - e_3 - e_4)$$

$$\hat{x}_4 = \frac{1}{4}(y_1 - y_2 - y_3 + y_4) = x_4 + \frac{1}{4}(e_1 - e_2 - e_3 + e_4)$$

若误差满足无偏差性，即 $\langle e_i e_j \rangle = 0$ (当 $i \neq j$)，可得

$$\begin{aligned} \langle (\hat{x}_1 - x_1)^2 \rangle &= \frac{1}{4} \sigma^2 \\ \langle (\hat{x}_2 - x_2)^2 \rangle &= \frac{1}{4} \sigma^2 \\ \langle (\hat{x}_3 - x_3)^2 \rangle &= \frac{1}{4} \sigma^2 \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$\langle (\hat{x}_4 - x_4)^2 \rangle = \frac{1}{4} \sigma^2$$

比较式(1.2)与式(1.5)可知, 在仪器精度相同的条件下, 组合称量比单个称量具有较小误差, 误差减小的程度则与称量的具体组合方式有关。

(2) 编码矩阵 可以把“称量设计”的原理应用到光谱测量技术中。例如在光谱仪谱面上用编码模板代替出射狭缝, 一次测定几个光谱成分的总辐射强度。若要求测量 7 种光谱成分, 使用 7 条缝的模板, 7 条缝中有的透光的开缝, 以 1 表示; 有的是不透光的闭缝, 以 0 表示。第一块模板的编码是

$$1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0$$

则对于第一次测量可列出方程

$y_1 = x_1 + x_2 + x_3 + 0 \cdot x_4 + x_5 + 0 \cdot x_6 + 0 \cdot x_7 + e_1$ 式中 y_1 是第一次测量的测量值, x_i 是第 i 个光谱成分辐射强度的真值, e_1 是第一次测量的噪声。

使用 7 块模板进行 7 次测量, 得到 7 个独立的方程, 即可求解出 7 个未知数 x_i 的估算值 $\hat{x}_i$ 。7 个方程构成的方程组右边的系数矩阵为

$$W_7 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

W_7 的每 1 行代表 1 个模板的编码, 7 行对应 7 个模板的编码。称 W 为模板的编码矩阵。

测量 N 个光谱成分时, 需制作 N 个模板, 为了简化模板的制作, 实际工作中要求模板矩阵具有循环性, 即它的第 $(i+1)$

行可由其第 i 行向右循环 1 位而得。这样, N 个模板可用有 $(2N - 1)$ 条缝的 1 块模板来代替, 上例中测量七种光谱成分可用如下的 1 块模板来完成。

$$1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0$$

第一次测量用位于右端的 7 条缝, 向右移动 1 条缝就得到第二次测量所用的模板, 移动 6 次, 即可完成 7 次测量。

(3) 单编码调制光谱 现在考虑用编码模板代替光谱仪出射狭缝的单编码调制光谱。设有 N 个光谱成分, 使用 N 个模板进行 N 次测量, 每个模板有 N 条缝, 缝的透光 (+1)、不透光 (0) 或反射光 (-1) 性质由模板编码矩阵决定。设通过第 i 块模板第 j 条缝的辐射能量为 x_j , 每次测量的噪声为 e_j , 并假定这个噪声与所测信号强弱无关, 且各噪声是相互独立的随机变量, 它们的数学期望值为零, 均方差皆为 σ^2 。写成数学式为

$$\langle e_i e_j \rangle = \sigma^2 \delta_{ij}$$

则第 i 次测量的测量值 y_i 为

$$\begin{aligned} y_i &= w_{i1}x_1 + w_{i2}x_2 + \cdots + w_{iN}x_N + e_i \\ &= \sum_{j=1}^N w_{ij}x_j + e_i \quad i=1, 2, \cdots, N \end{aligned} \quad (1.6)$$

N 次测量得 N 个测量值表达式, 构成一个方程组, 写成矩阵形式

$$Y = XW + E \quad (1.7)$$

其中

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix} \quad E = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{pmatrix}$$

$$W = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1N} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ w_{N1} & w_{N2} & \cdots & w_{NN} \end{pmatrix}$$

求解式(1.7), 可得 x_i 的估算值矩阵

$$\hat{X} = YW^{-1} = X + EW^{-1}$$

通常以均方差 ε 为测量精确度的衡量标准, 测量 N 个光谱成分的均方差 ε 为

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \langle (\hat{X} - X)(\hat{X} - X)^+ \rangle = \langle EW^{-1}(W^{-1})^+E^+ \rangle \\ &= \sigma^2 \text{Tr}[W^{-1}(W^{-1})^+] \end{aligned} \quad (1.8)$$

式中矩阵符号右上角“+”号者表示该矩阵的转置共轭矩阵, 矩阵符号前有“Tr”者表示矩阵的迹, 即取矩阵主对角线上的各元素的和

于是最佳测量方案就归结为寻找一个矩阵 W , 它的矩阵元是 +1、0 或 -1, 其 $\text{Tr}[W^{-1}(W^{-1})^+]$ 为最小, 且具有循环性。

(4) 最佳编码矩阵 法国数学家阿达玛建立了一个 $N \times N$ 阶矩阵 H_N , 其第 1 行和第 1 列的矩阵元都是 +1, 其他矩阵元也都是 +1 或 -1, 例如 $N=8$ 的阿达玛矩阵为

$$H_8 = \begin{pmatrix} + & + & + & + & + & + & + & + \\ + & - & + & + & - & + & - & - \\ + & - & - & + & + & - & + & - \\ + & - & - & - & + & + & - & + \\ + & + & - & - & - & + & + & - \\ + & - & + & - & - & - & + & + \\ + & + & - & + & - & - & - & + \\ + & + & + & - & + & - & - & - \end{pmatrix}$$

其中 + 号表 +1, - 号表 -1。

可以证明, 用阿达玛矩阵作为模板的编码矩阵可得到最小的均

方差，阿达玛矩阵是最佳编码矩阵。

H 矩阵不具备循环性，去掉其第一行和第一列后得到的 $(N-1) \times (N-1)$ 矩阵称为 G 矩阵， G 矩阵具有循环性，但 G 矩阵的矩阵元为 $+1$ 和 -1 ，实际制作模板较困难，故将其 $+1$ 以 0 代换，其 -1 以 $+1$ 代换，得到的矩阵称 S 矩阵， S 矩阵的矩阵元都是 0 或 1 ，又具有循环性，便于制作。可以证明，在矩阵元素均为 0 和 1 的矩阵中， S 矩阵的 $\text{Tr}[S^{-1}(S^{-1})^+]$ 最小，本实验使用的模板即以 S 矩阵为编码矩阵。

【仪器描述】

本实验使用的单编码阿达玛光谱仪由 Ebert-Fastie 型 光栅摄谱仪改装而成。其光路见图 1-2。入射光束由入射狭缝下半部射入，

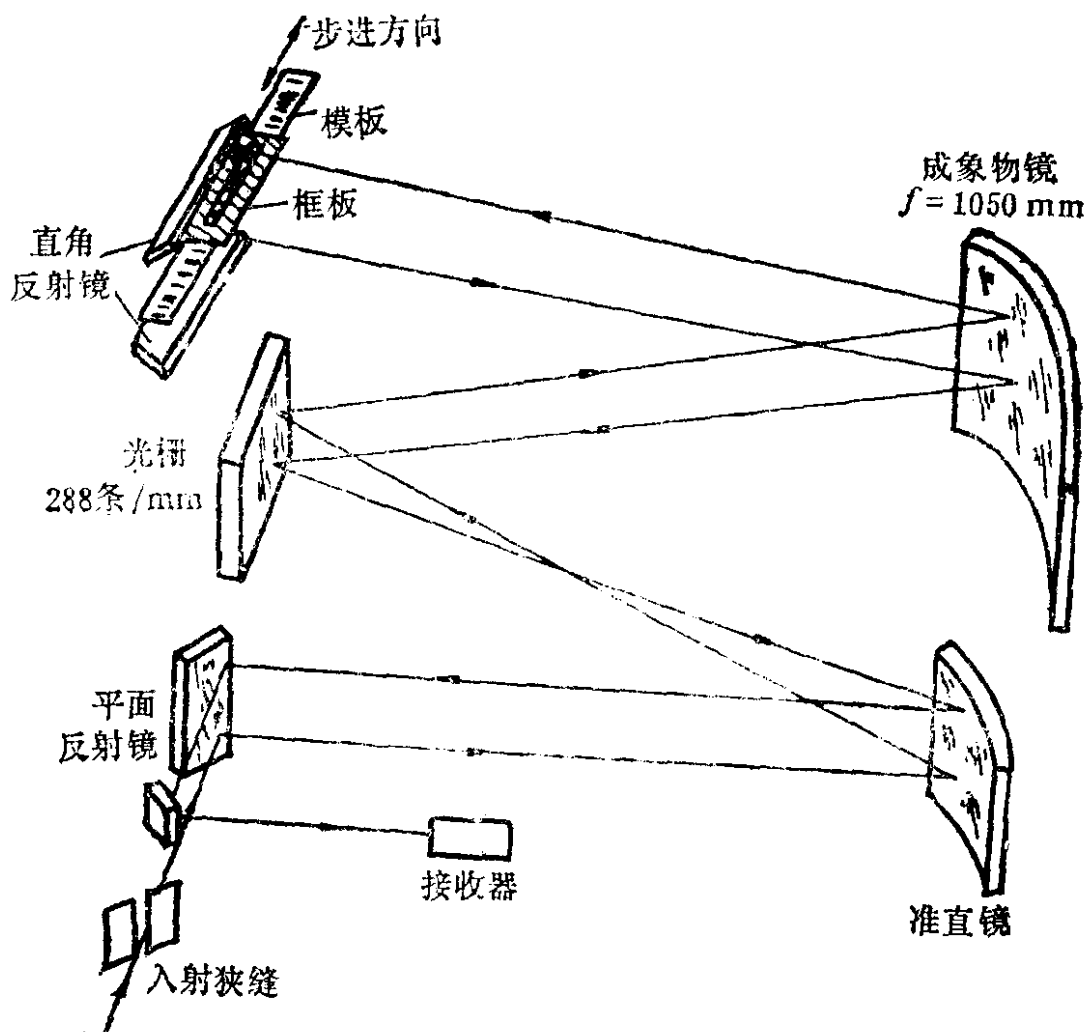


图1-2 阿达玛变换光谱仪光路图

经平面反射镜和焦距 $f = 1050\text{mm}$ 的准直镜照射到平面光栅上。光栅每毫米为288条刻线，面积 $50 \times 50\text{mm}^2$ ，闪耀波长为 $2.0\ \mu\text{m}$ ，色散后的光束再经 $f = 1050\text{mm}$ 的照相物镜，在谱面上得到光谱。现在在原谱面位置上安装直角反射器，并在直角反射器的平分面上设置固定框板，编码模板紧贴在固定框板下，可相对于框板作步进运动。模板按 $N = 255$ 的左循环 S 矩阵编码，每条缝宽 0.2mm ，长 2mm ，255条缝总宽度为 51mm ，由 0.2mm 厚的不锈钢板制作。光束通过模板与直角反射器后沿原路返回，由入射狭缝的上半部经反射镜投射至接收器。

【实验内容】

本实验用单编码阿达玛变换光谱仪在近红外波段测量汞灯的发射光谱。以硫化铅红外接收器接收光信号，输出信号经测量放大器放大后，由数字电压表读得数值，或由数字打印机打印出测量数据。

模板的编码矩阵 $N = 255$ ，因此需作255次测量，模板每移动一条缝测得一个数据，共有255个测量数据，将数据输入计算机进行解码^{〔3〕}，得出光谱成分的相对光强值，最后画出汞的光谱图。

【思考题】

- 1 试述阿达玛变换光谱仪与常规光谱仪的异同，前者最基本的特点是什么？
- 2 设想阿达玛变换的原理还可以应用到哪些物理测量上？

【参考文献】

- 〔1〕 张炳泉：阿达玛变换光谱的基本原理，《光学与光谱技术》，1982年，第3卷，第2期，第54~63页
- 〔2〕 张炳泉：阿达玛变换光谱仪，《南开大学学报（自然科学版）》，1983年，第1期，第61~65页
- 〔3〕 张炳泉：阿达玛变换光谱的快速解码方法，《光学学报》，1984年，第4卷，第3期，第229~234页 本文给出应用于TP803微型计算机的解码程序

（实验学时教 6）

（南开大学张炳泉编写 南开大学张存洲校）

实验2 傅里叶变换光谱

【学习重点】

- 1 了解傅里叶 (Fourier) 变换光谱的基本原理与技术特点。
- 2 学习使用微型计算机处理实验数据。

【仪器用具】

迈克耳逊干涉仪、慢速马达、热释电探测器及 15V 直流稳压电源、DSF-1 型单频锁相放大器、光电倍增管及高压稳压电源、记录仪、FO-3 微型计算机。

【原理】

光谱学使用三种主要的分光手段：

- 1 利用介质折射率随波长变化的性质，制成棱镜来分光；
- 2 利用光的衍射现象，作成光栅来分光；
- 3 利用光的干涉现象，得到光的干涉图，经过傅里叶变换，在频域中得到光谱。由此得到的光谱称傅里叶变换光谱，所用仪器称傅里叶光谱仪。与前两种分光手段相比，后者有其独特的优点。

1 它以圆形大入射孔径代替常规光谱仪的窄的入射狭缝，在获得同样分辨本领条件下，它能从较大立体角接收光源辐射；

2 在常规分光光度计中，每一瞬间只能测量一个光谱元，而傅里叶光谱仪能在整个工作时间内，同时记录所有待测光谱元。

以上两个特点决定了它能接收更多的辐射能量，有较高的信号噪声比。因此它特别适合于光源较弱的红外光谱区，70年代以来，作为新一代红外光谱仪已有取代用棱镜或光栅分光的常规红外光谱仪之势，且正向近红外与可见光波段发展。

傅里叶变换光谱的基本原理：