

普通物理学教程丛书

# 光 学

(下册)

潘笃武 贾玉润 陈善华 编著

复旦大学出版社



439456

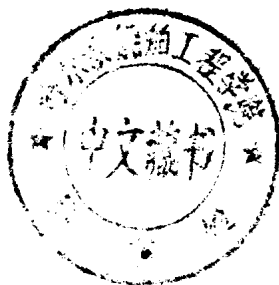
普通物理学教程丛书

# 光 学

(下 册)

潘笃武  
贾玉润

陈善华 编著



复旦大学出版社

光 学  
(下 册)

---

编 著 潘笃武 贾玉润 陈善华  
出 版 复旦大学出版社  
(上海国权路 579 号 邮政编码 200433)  
发 行 新华书店上海发行所  
印 刷 上海第二教育学院印刷厂  
开 本  $850 \times 1168 \frac{1}{32}$   
印 张 11.875  
字 数 320 000  
版 次 1997 年 12 月第 1 版 1997 年 12 月第 1 次印刷  
印 数 1—3 000  
书 号 ISBN 7-309-01902-4/O · 176  
定 价 12.00 元

---

本版图书如有印订质量问题, 请向承印厂调换。

D278/02  
内 容 提 要

本书是《普通物理学教程丛书》中的一种,是作者们在复旦大学物理系讲授光学课程的讲义基础上修改、发展而成。本书以物理光学为重点,在阐明传统的经典光学的基本概念的基础上,将光学学科的新发展和经典光学的内容结合起来,介绍了光学中的新观念、新思想,并注重光学与物理学其他领域以及高新技术的联系。

全书分上、下两册。上册内容有:光的本性、干涉和衍射、几何光学;下册内容有:傅里叶光学、光的吸收和发射、光的色散和散射、光在晶体中的传播、非线性光学、光的统计性质。

本书可作为高等院校物理类各专业光学课程的教科书或教学参考书,也可供其他有关专业作为参考书。

# 目 录

(下 册)

|                             |          |
|-----------------------------|----------|
| <b>第七章 傅里叶光学和全息照相 .....</b> | <b>1</b> |
| § 7.1 光栅衍射和空间频谱 .....       | 1        |
| § 7.2 一些图形的傅里叶变换 .....      | 8        |
| 一、点 光 源 .....               | 9        |
| 二、实函数频谱的对称性 .....           | 10       |
| 三、位 移 .....                 | 11       |
| 四、相 似 性 .....               | 12       |
| 五、转 动 .....                 | 12       |
| 六、线性叠加和干涉 .....             | 13       |
| 七、正弦光栅 .....                | 13       |
| *§ 7.3 空间频率概念的进一步讨论 .....   | 15       |
| 一、空间频率和波矢 .....             | 16       |
| 二、波面分解 .....                | 19       |
| 三、衰 逝 波 .....               | 19       |
| § 7.4 卷积和光栅 .....           | 20       |
| 一、一维光栅 .....                | 21       |
| 二、二维光栅 .....                | 24       |
| 三、X 光在晶体上的衍射 .....          | 27       |
| § 7.5 相干光图像处理 .....         | 28       |
| 一、实验装置 .....                | 29       |
| 二、低通滤波 .....                | 30       |
| 三、倍 频 .....                 | 31       |
| 四、直流成分 .....                | 31       |
| 五、方向滤波 .....                | 33       |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 六、采 样 .....             | 34 |
| 七、位相滤波 .....            | 36 |
| * § 7.6 振幅传递函数 .....    | 38 |
| 一、线性系统 .....            | 38 |
| 二、传递函数 .....            | 40 |
| 三、光学系统的振幅传递函数 .....     | 41 |
| 四、阿贝成像理论 .....          | 42 |
| 五、图像消模糊 .....           | 43 |
| * § 7.7 光学传递函数 .....    | 44 |
| § 7.8 全息照相 .....        | 49 |
| 一、伽伯的共轴全息照相 .....       | 49 |
| 二、利思-乌帕特尼克斯离轴全息照相 ..... | 51 |
| 三、全息图的特点 .....          | 55 |
| 四、李普曼天然彩色照相 .....       | 55 |
| 五、捷尼舒克体全息 .....         | 56 |
| 思考题和习题 .....            | 57 |
| 参考读物 .....              | 60 |

## 第八章 光的发射和吸收 ..... 62

|                        |    |
|------------------------|----|
| § 8.1 光的发射 .....       | 63 |
| 一、发光的经典振子模型 .....      | 63 |
| * 二、加速运动的电荷发射电磁波 ..... | 65 |
| 三、韧致辐射 .....           | 69 |
| * 四、同步辐射 .....         | 70 |
| § 8.2 光的吸收 .....       | 75 |
| 一、朗伯定律 .....           | 75 |
| 二、负 吸 收 .....          | 76 |
| § 8.3 黑体辐射 .....       | 77 |
| 一、热辐射的基尔霍夫定律 .....     | 77 |
| 二、绝对黑体和它的辐射规律 .....    | 79 |
| 三、空腔内的驻波模式和能量密度 .....  | 80 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 四、能量量子化和光子 .....       | 84  |
| 五、黑体辐射公式 .....         | 90  |
| * 六、宇宙中的 3K 辐射背景 ..... | 92  |
| * 七、光测高温学 .....        | 94  |
| § 8.4 受激发射 .....       | 95  |
| 一、爱因斯坦系数 .....         | 95  |
| 二、布居数反转 .....          | 99  |
| 三、激光模式 .....           | 102 |
| § 8.5 几种常见激光器的机理 ..... | 104 |
| 一、氨分子激光器 .....         | 105 |
| 二、氨-氦激光器 .....         | 106 |
| 三、氩离子激光器 .....         | 108 |
| 四、红宝石激光器 .....         | 110 |
| 五、激光使用安全常识 .....       | 112 |
| 思考题和习题 .....           | 113 |
| 参考读物 .....             | 114 |

## 第九章 光的色散和散射 .....

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| § 9.1 色 散 .....                 | 116 |
| 一、色散现象 .....                    | 116 |
| 二、三棱镜的色散 .....                  | 117 |
| 三、三棱镜的色散率和分辨率 .....             | 119 |
| § 9.2 色散的经典理论 .....             | 122 |
| 一、电偶极子的受迫振动 .....               | 122 |
| 二、气体的折射率和色散 .....               | 125 |
| * 三、稠密电介质的折射率 .....             | 128 |
| 四、有多个固有频率的偶极子系统以及经典物理学的困难 ..... | 129 |
| 五、折射率和相干散射 .....                | 129 |
| § 9.3 光学材料 .....                | 132 |
| * § 9.4 光在导体中的传播 .....          | 134 |
| 一、复介电常数 .....                   | 134 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 二、导体中电磁波的传播和吸收 .....    | 136 |
| 三、导体中光波的相速度和位相关系 .....  | 137 |
| 四、金属的传导电子模型 .....       | 139 |
| 五、光在金属表面上的反射 .....      | 143 |
| § 9.5 瑞利散射 .....        | 147 |
| 一、光的散射 .....            | 147 |
| 二、瑞利散射的偶极子受迫振动模型 .....  | 148 |
| 三、瑞利散射光的偏振状态 .....      | 151 |
| 四、米氏散射 .....            | 152 |
| *§ 9.6 光在自由电子上的散射 ..... | 155 |
| 一、日冕和电子对光的散射 .....      | 155 |
| 二、散射截面 .....            | 156 |
| *§ 9.7 喇曼散射 .....       | 157 |
| 一、喇曼光谱 .....            | 157 |
| 二、喇曼散射的经典理论 .....       | 158 |
| 三、喇曼散射的量子理论简介 .....     | 159 |
| 四、受激喇曼散射 .....          | 161 |
| 思考题和习题 .....            | 162 |
| 参考读物 .....              | 163 |

## 第十章 光在各向异性介质中的传播 ..... 165

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| § 10.1 自然光和线偏振光 .....   | 165 |
| 一、自然光和偏振光 .....         | 165 |
| 二、线偏振光的获得和检验 .....      | 166 |
| 三、马吕定律 .....            | 168 |
| 四、消光比 .....             | 169 |
| 五、线偏振光和偏振元件的琼斯表示法 ..... | 169 |
| § 10.2 双折射 .....        | 172 |
| 一、双折射现象 .....           | 172 |
| 二、双折射晶体中的波面 .....       | 173 |
| 三、光波在双折射晶体中的传播 .....    | 175 |
| 四、主截面 .....             | 178 |



|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 五、双折射晶体结构的不对称振子模型、二向色性 .....     | 178 |
| § 10.3 偏振光晶体器件 .....             | 181 |
| 一、尼科耳棱镜 .....                    | 181 |
| 二、格兰-汤普森棱镜和格兰-傅科棱镜 .....         | 182 |
| 三、渥拉斯顿棱镜 .....                   | 183 |
| 四、波片 .....                       | 184 |
| § 10.4 椭圆偏振光 .....               | 187 |
| 一、椭圆偏振光的数学表示 .....               | 187 |
| 二、椭圆偏振光的获得 .....                 | 189 |
| 三、圆偏振光 .....                     | 190 |
| 四、偏振光的完备表示 .....                 | 193 |
| 五、光子角动量 .....                    | 194 |
| § 10.5 两偏振片之间放一片晶体发生的光学现象 .....  | 195 |
| 一、透振方向正交的两偏振片间放晶体 .....          | 195 |
| 二、透振方向平行的偏振片间放晶体 .....           | 197 |
| 三、白光入射 .....                     | 197 |
| 四、应力双折射 .....                    | 198 |
| 五、会聚光通过晶体的情形 .....               | 199 |
| § 10.6 电磁波在各向异性介质中的传播 .....      | 200 |
| 一、介电常数张量和电极化率张量 .....            | 200 |
| 二、光波在各向异性介质中的传播 .....            | 202 |
| * 三、关于各向异性介质中光传播速度的菲涅耳公式 .....   | 207 |
| * 四、确定各向异性介质中光速和光振动方向的几何方法 ..... | 211 |
| * 五、单轴晶体和双轴晶体中的波面 .....          | 214 |
| 思考题和习题 .....                     | 218 |
| 参考读物 .....                       | 222 |

## 第十一章 非线性光学 .....

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| § 11.1 非线性折射率和自聚焦 ..... | 224 |
| 一、非线性折射率 .....          | 224 |
| 二、自聚焦现象 .....           | 225 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| * 三、自聚焦的理论简介 .....    | 227 |
| § 11.2 光波导中的孤子 .....  | 229 |
| § 11.3 光学双稳态 .....    | 233 |
| 一、光学双稳态原理 .....       | 233 |
| 二、光学双稳态器件和光计算机 .....  | 238 |
| § 11.4 非线性电极化强度 ..... | 239 |
| 一、非线性振子模型和电极化强度 ..... | 240 |
| 二、不同频率的光波同时入射 .....   | 243 |
| 三、电极化强度张量 .....       | 244 |
| § 11.5 旋    光 .....   | 246 |
| 一、旋光现象 .....          | 246 |
| 二、旋光的菲涅耳唯象理论 .....    | 247 |
| 三、旋光和石英晶体的结构 .....    | 250 |
| 四、自然界中的对称性 .....      | 251 |
| * 五、旋光的理论解释 .....     | 254 |
| § 11.6 泡克耳斯效应 .....   | 258 |
| 一、泡克耳斯盒 .....         | 258 |
| * 二、泡克耳斯效应的简单理论 ..... | 261 |
| § 11.7 克尔效应 .....     | 263 |
| § 11.8 法拉第磁光效应 .....  | 265 |
| 一、磁致旋光 .....          | 265 |
| 二、磁致旋光的经典解释 .....     | 266 |
| 三、磁致旋光的应用 .....       | 271 |
| § 11.9 光学位相共轭 .....   | 271 |
| 一、位相共轭波 .....         | 271 |
| 二、四波混频和位相共轭 .....     | 273 |
| 三、受激布里渊散射和位相共轭 .....  | 274 |
| 四、光学位相共轭的特点和应用 .....  | 275 |
| 思考题和习题 .....          | 277 |
| 参考读物 .....            | 278 |

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| <b>第十二章 非简谐波和光的统计性质</b> | <b>280</b> |
| § 12.1 不同频率波的叠加         | 280        |
| 一、两列不同频率波的叠加            | 280        |
| 二、群速度                   | 282        |
| 三、非简谐波的频率谱              | 283        |
| 四、关于傅里叶分析的讨论            | 286        |
| § 12.2 波包和测不准关系         | 287        |
| 一、波包                    | 287        |
| 二、群速度                   | 290        |
| * 三、测不准关系               | 291        |
| § 12.3 波的调制             | 292        |
| § 12.4 色散关系             | 296        |
| 一、经典色散关系                | 296        |
| * 二、德布罗意波的色散关系          | 297        |
| § 12.5 光谱线展宽            | 299        |
| 一、光谱线的自然展宽              | 299        |
| 二、碰撞展宽                  | 304        |
| 三、多普勒展宽                 | 305        |
| § 12.6 光场辐照度起伏的分布函数     | 308        |
| 一、线偏振光的辐照度              | 308        |
| 二、非偏振光的辐照度              | 311        |
| § 12.7 光的相干性            | 312        |
| 一、相关函数                  | 312        |
| 二、复相干度                  | 315        |
| § 12.8 时间相干性和光谱线轮廓的测量   | 317        |
| 一、时间相干性                 | 317        |
| 二、光谱线轮廓                 | 318        |
| 三、相干长度和谱线宽度             | 322        |
| 四、傅里叶变换光谱仪              | 323        |
| § 12.9 空间相干性            | 324        |
| 一、光源宽度和空间相干性            | 324        |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 二、迈克耳孙星体干涉仪 .....      | 328 |
| · § 12.10 光的强度相关 ..... | 329 |
| 思考题和习题 .....           | 333 |
| 参考读物 .....             | 334 |
| <b>附    录</b> .....    | 336 |
| A 傅里叶积分和傅里叶变换 .....    | 336 |
| B 几个广义函数 .....         | 349 |
| C 张    量 .....         | 362 |
| <b>习题答案</b> .....      | 367 |

## 第七章 傅里叶光学和全息照相

将傅里叶分析的数学方法用到光学领域中已有长久的历史。只是到了本世纪 50、60 年代才形成了一个高潮。50 年代,通信理论已经成熟,傅里叶分析是其重要的数学工具。在频率域中讨论通信系统的特性确有其独到的优点。通信理论中涉及的是一维的时间函数,而在光学中遇到的是二维空间的图像信号。只要将通信理论中的一维时间信号推广到二维空间的信号,通信理论的数学方法和一些基本概念就可以直接应用到光学成像系统的理论中。60 年代激光问世以后,利用激光器作光源的相干光信息处理系统已经成为简单有效的实验设备,在空间频率域处理图像信息具有实用的意义。将通信理论的傅里叶分析方法移植到光学中,不仅为光学提供了一种简便的数学工具,更重要的是给经典光学注入了新的思想,在形式和内容上已成为近代光学的新起点。由此可见,学科之间的交流和渗透为古老的学科带来新的思路,促进学科的发展。我们要学会在不同的学科之间找出相互关系,看出它们的共同或相似之点。这不仅能帮助我们更深刻地认识自然规律,还可能启发我们提出新的见解,从而有所发现、有所创造。

### § 7.1 光栅衍射和空间频谱

在第四章中我们详细讨论了衍射光栅。图 7.1-1 中我们重新画出透射光栅光谱仪的装置示意图。波长为  $\lambda$  的单色平行光从左边垂直入射到平面透射光栅  $G$ , 会聚透镜  $L$  的后焦面  $F$  上得到各级次的衍射极大。如果光缝宽度  $w$  和光缝中心距离  $d$  之比是简单整数比,就会出现缺级现象。在将光栅用作色散元件时,入射光是复色光。不同波长、同一级次的衍射极大落在会聚透镜的后焦面上不同的位置。我们现在不讨论光栅的色散,而讨论单色光衍射产生的各个级次的极大值。这里考

虑的是夫琅和费衍射,透镜  $L$  的作用是将无穷远处的衍射图样移到透镜的后焦面上。透镜也起着某种特殊的变换作用——傅里叶变换的作用,即频谱分析器的作用。

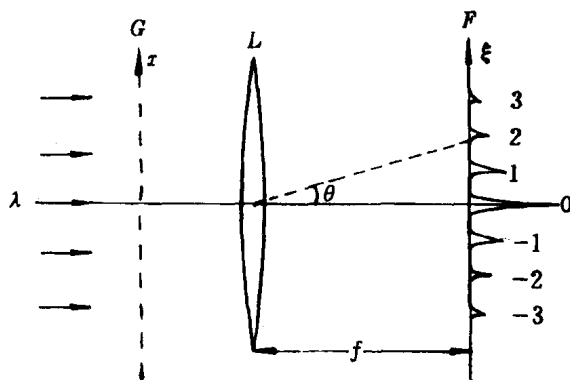


图 7.1-1 平面透射光栅

可以用矩形波函数来描写透射光栅(图 7.1-2)。图中纵坐标  $f(x)$  表示光栅的振幅透射率。光栅狭缝处光全部透射,振幅透射率等于 1;狭缝间不透光部分的透射率为零。横坐标  $x$  是沿垂直于狭缝方向的空间位置。光栅狭缝沿光栅平面的  $y$  方向。可把这类光栅称为一维光栅,透射率只沿  $x$  方向变化。令光栅常数,即相邻光缝中心距离为  $d$ 。图 7.1-2 所画的光栅函数的缝宽  $w$  等于  $d$  的二分之一。这是一个特例,但不影响我们讨论问题的实质。光栅狭缝总数  $N$  很大,假设狭缝数  $N$  为无限大。

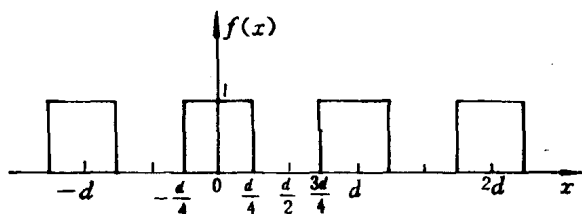


图 7.1-2 光栅的振幅透射率

光栅的振幅透射率函数  $f(x)$  是周期性函数:

$$f(x) = f(x + md), \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots$$

这里  $d$  是空间周期。将图 7.1-2 所示的  $f(x)$  用傅里叶级数展开：

$$\begin{aligned} f(x) = & \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos(2\pi p_0 x) - \frac{2}{3\pi} \cos[2\pi(3p_0)x] \\ & + \frac{2}{5\pi} \cos[2\pi(5p_0)x] - \dots \end{aligned} \quad (7.1-1)$$

$$p_0 = 1/d \quad (7.1-2)$$

也可以用复数傅里叶级数表示：

$$\begin{aligned} f(x) = & \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} [e^{i2\pi p_0 x} + e^{-i2\pi p_0 x}] - \frac{1}{3\pi} [e^{i2\pi(3p_0)x} + e^{-i2\pi(3p_0)x}] \\ & + \frac{1}{5\pi} [e^{i2\pi(5p_0)x} + e^{-i2\pi(5p_0)x}] - \dots \end{aligned} \quad (7.1-3)$$

(7.1-1) 式意味着图 7.1-2 表示的矩形波可以分解为不同频率的简谐波，这些简谐波的频率分别为：

$$p = \frac{1}{d}, \frac{3}{d}, \frac{5}{d}, \dots \quad (7.1-4)$$

这里  $d$  是空间距离， $x$  是空间坐标， $p$  称为空间频率。

现在我们对频率和空间频率下定义。只有简谐波(正弦波和余弦波)的频率才是严格意义的频率。在(7.1-1)式中， $p_0 = 1/d$  是简谐波分量  $\frac{2}{\pi} \cos(2\pi p_0 x)$  的空间频率， $p = 3p_0 = 3/d$  是简谐波  $\frac{2}{3\pi} \cos[2\pi(3p_0)x]$  的空间频率。它们的振幅分别为  $2/\pi$  和  $2/3\pi$ 。其余各简谐波分量的频率可类推。虽然有时也说  $p_0 = 1/d$  是图 7.1-2 所示的矩形波函数  $f(x)$  的频率，但这不是严格意义上的频率， $p_0$  只是  $f(x)$  的基频。(7.1-1) 式等号右边第一项常数  $1/2$  可以看作空间频率为零的分量，也可称作直流分量。事实上，这是整个光栅振幅透射率的平均值。复数表示式(7.1-3)中复指数上的负号可以解释为负频率。 $\cos(2\pi p_0 x)$  可以分解为正空间频率  $e^{i2\pi p_0 x}$  和负空间频率  $e^{-i2\pi p_0 x}$  两部分。以后我们可以看到，

在光学中负空间频率可以被赋予物理意义。在光学中用复数表示更方便、更合理。频率域表示往往有很多便利。图 7.1-3 是图 7.1-2 所画的空间矩形波在频率域中表示。图中横坐标是空间频率  $p$ ，纵坐标分别表示振幅  $A$  [图(a)] 和功率  $A^2$  [图(b)]。周期性函数和频谱都是分立谱，各谱线的频率为基频  $p_0$  的整数倍。按照复数式(7.1-3)，图中出现负频率的分量，在  $p=0$  处有直流分量。(7.1-3)式中，频率  $p=\pm 3p_0$  的第三项前有负号，图 7.1-3a 中相应的谱线画在横坐标以下表示负数。在功率谱(图 7.1-3b)中谱线都在横坐标之上，因为功率恒为正。

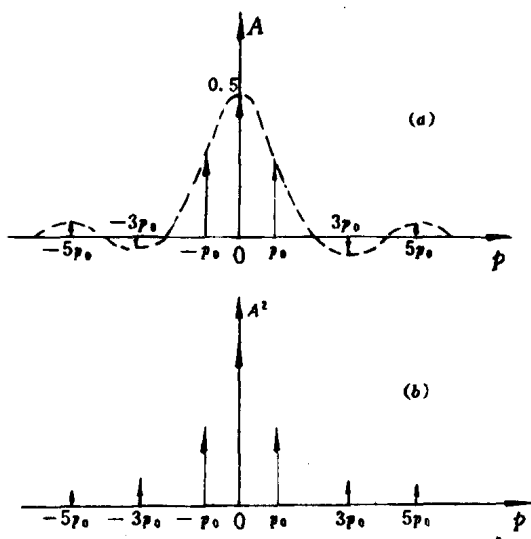


图 7.1-3 透射光栅的空间频谱和功率谱

图 7.1-2 表示的光栅光缝宽度  $w$  为光缝中心距离的一半， $f(x)$  的频谱中只包含基频  $p_0$  的奇数倍的频率[见(7.1-4)式]。在一般情况下  $f(x)$  可以展开成傅里叶级数：

$$f(x) = c_0 + \sum_{m=1}^{\infty} c_m \cos(2\pi m p_0 x + \varphi_m)$$

其中  $c_0$  是直流分量， $c_m$  是各次谐波的振幅， $\varphi_m$  是谐波的初位相，在(7.1-1)式的情况中带负号的项相当于  $\varphi_m = \pi$ 。各次谐波的频率  $p =$



$m p_0$ 。这些系数都可以根据数学公式求出。 $f(x)$ 也可以用复数表示：

$$f(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_m e^{i2\pi m p_0 x} \quad (7.1-5)$$

其中系数：

$$a_m = \frac{1}{d} \int_{-d/2}^{d/2} f(x) e^{-i2\pi m p_0 x} dx \quad (7.1-6)$$

(7.1-5)式中  $m$  包含正数和负数,这意味着正和负的频率。在(7.1-5)式中,通常  $a_m$  是一个复数,其中包含了位相的因子  $e^{i\varphi_m}$ 。图 7.1-4 画出(7.1-5)式表示的傅里叶展开式的功率频谱,它是分立谱。

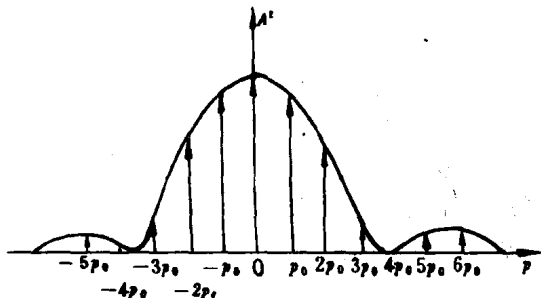


图 7.1-4 透射光栅的功率频谱

总之,透射光栅的振幅透射率可以用类似于图 7.1-2 的矩形波函数  $f(x)$  表示。而矩形波函数可以用复数傅里叶级数(7.1-5)式展开成不同空间频率的简谐波。简谐波的频率为  $p_0$  的整数倍：

$$p = m p_0, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (7.1-7)$$

其中  $p_0$  为基频,由(7.1-2)式表示; $m=0$  为直流分量。图 7.1-4 表示它的功率谱。

我们再回到图 7.1-1 的光栅装置。在 § 4.7 节中已经指出,光栅衍射极大的位置由光栅方程(4.7-4)式确定：

$$d \sin \theta = m \lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

在近轴条件下,得到