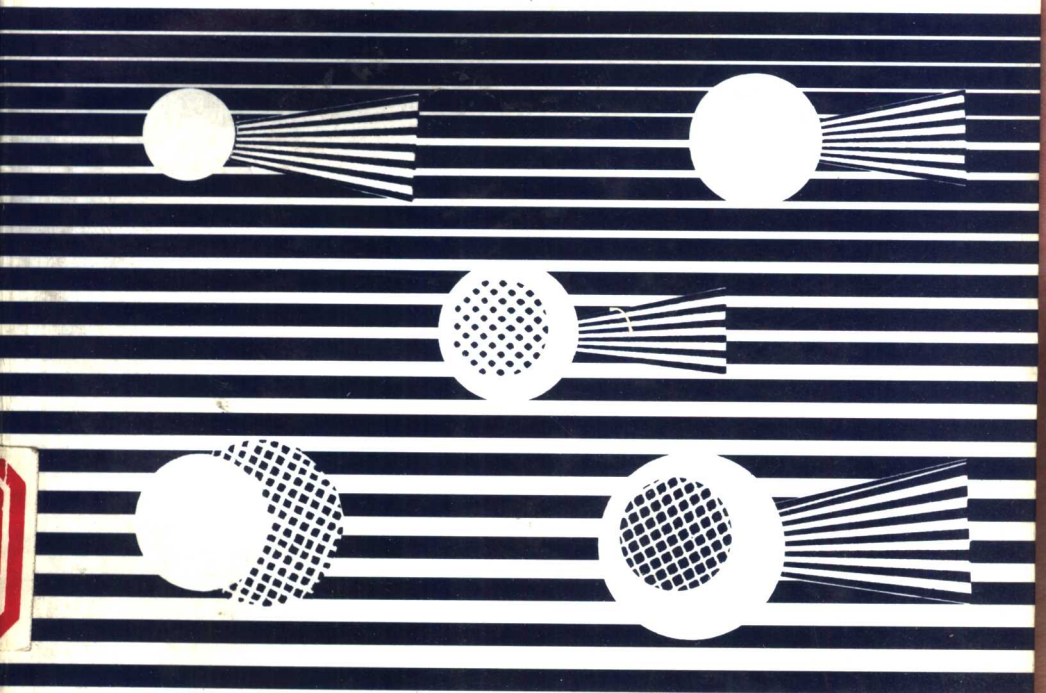


# 光全息学及其应用

于美文 著

OPTICAL HOLOGRAPHY AND ITS APPLICATIONS



北京理工大学出版社

# 光全息学及其应用

于美文 著

北京理工大学出版社

## 内 容 简 介

本书以光的干涉、衍射理论和傅里叶变换为数理基础，系统地阐述了光全息学的基础理论和基本知识，并对其应用做了广泛的介绍。

本书共十五章，一至三章是数理基础，四至八章是全息光学的基本理论，阐述了平面全息图和体积全息图的理论和类型，偏振全息的特性，全息记录介质，记录系统和计算全息。九至十五章为主要应用部分，包括：全息元件、全息信息存储、全息干涉计量、彩虹全息、合成全息、彩色全息及全息显微术。其中引入了若干全息术的新进展。

本书可作为光学专业和光学仪器专业的研究生教材，大专院校有关专业师生的参考书。亦可供从事现代光学研究、光学仪器设计制造和光学测试的技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

光全息学及其应用于美文著. —北京: 北京理工大学出版社, 1996.

ISBN 7-81114-116-2

I. 光... 光全息照相 IV. TB877.1

中国版本图书馆CIP数据核字 (96) 第 03749 号

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路7号)

(邮政编码 100081)

各地新华书店经售

北京地质印刷厂印刷

\*

850×1168 毫米 32 开本 17.875 印张 456 千字

1996 年 8 月第一版 1996 年 8 月第一次印刷

印数: 1--2500 册 定价: 21.00 元

※ 图书印装有误, 可随时与我社退换 ※

# 前 言

光全息学是现代光学的一个重要分支。自60年代激光出现以后发展很快，在科学技术的许多方面有着重要的应用，特别是在军事、宇航、生物工程、现代测试技术、艺术、商业、保安等方面已显示其特殊的优势。

本书以傅里叶变换、物理光学为数理基础，阐明光全息的物理过程，全息学的基础理论及全息图基本类型；各类全息图的特点、理论、记录与再现系统；对各种全息记录介质的成像机制、特性、类型及使用也作了简要介绍；对全息图的主要制作方法：光学记录和计算机制作进行了较详细的介绍。从实用的角度加强了白光全息如彩虹全息、合成全息、彩色全息的内容；系统地介绍了全息高密度信息存储、全息元件、全息干涉计量和全息显微术等重要的应用；并对有应用前景的发展方向，如偏振全息、二元光学元件、光学互联元件、X射线激光全息和新型记录材料也作了简要的介绍。引入了国内外学者在这一学科领域中的重要成就。

本书是作者二十多年来在光学仪器专业从事全息方面的教学和科学研究工作的基础上撰写的，根据作者的经验和体会，对近期刊光全息学在理论和应用方面的发展，进行总结提高，使本书具有物理图像清晰，理论联系实际，实用性强以及内容丰富，新颖的特色。

对本书的错误和不妥之处，恳切希望读者批评指正。

作 者

1994. 12. 20

02980/64



### 作者简介

于美文 1922年5月出生，山东安丘人。1948年毕业于西北大学物理系。任北京理工大学光电工程系教授、博士生导师。曾兼任国家科委发明评选委员会评选委员、国家自然科学基金委员会光学学科评审委员。主讲过物理光学、波动光学和光学全息及信息处理等课程。主攻研究方向为信息光学。长期实践、探索对光全息领域具有较高的造诣，特别是在全息显示方面有丰富的经验和独到的见解。已培养博士、硕士研究生共十五名。退休前为光学仪器专业信息光学学科学术带头人。科研成果五项获部市级奖励，出版专著四部（含合著）：《光学全息及信息处理》（获国家级奖励）、《全息显示技术》、《光全息术》、《全息记录材料及其应用》。发表学术论文七十余篇。1983年获机械委教书育人优秀教师称号。享受（92）政府特殊津贴。

# 目 录

概 述 .....	( 1 )
<b>第一章 衍射和傅里叶光学基础 .....</b>	<b>( 5 )</b>
§ 1.1 光波的空间频率及其在空频域中的传播 .....	( 3 )
§ 1.2 衍射公式 .....	( 12 )
§ 1.3 薄透镜的透射系数 .....	( 17 )
§ 1.4 透镜的傅里叶变换性质 .....	( 20 )
§ 1.5 傅里叶变换定理的光学模拟 .....	( 31 )
参考文献 .....	( 41 )
<b>第二章 干涉及光源的相干性 .....</b>	<b>( 42 )</b>
§ 2.1 任意两光波的干涉 .....	( 42 )
§ 2.2 相干性 .....	( 44 )
§ 2.3 普通光源的相干性 .....	( 49 )
§ 2.4 激光光源的相干性 .....	( 60 )
参考文献 .....	( 68 )
<b>第三章 全息原理及几何分析 .....</b>	<b>( 70 )</b>
§ 3.1 全息原理 .....	( 70 )
§ 3.2 物像关系 .....	( 74 )
§ 3.3 用作图法求全息图的再现像 .....	( 84 )
§ 3.4 像的放大率 .....	( 87 )
§ 3.5 三级像差公式 .....	( 88 )
§ 3.6 体积全息图的几何结构 .....	( 90 )
§ 3.7 体积全息图的物像关系 .....	( 94 )
参考文献 .....	( 98 )
<b>第四章 平面全息图的理论及类型 .....</b>	<b>( 99 )</b>
§ 4.1 傅里叶变换全息图 .....	( 99 )
§ 4.2 夫琅和斐全息图 .....	( 117 )
§ 4.3 傅里叶变换全息图用空间调制的照明光波再现 .....	( 121 )

§ 4.4	用空间调制的参考光波记录傅里叶变换全息图	(123)
§ 4.5	菲涅耳全息图	(125)
§ 4.6	像全息图	(134)
§ 4.7	位相全息图	(138)
§ 4.8	平面全息图的衍射效率	(140)
§ 4.9	空间带宽积	(144)
	参考文献	(147)
<b>第五章</b>	<b>体积全息图的理论及类型</b>	<b>(149)</b>
§ 5.1	耦合波理论	(149)
§ 5.2	体积全息图的边界条件	(160)
§ 5.3	透射体积全息图的衍射效率	(162)
§ 5.4	反射全息图的衍射效率	(176)
§ 5.5	分层介质理论衍射效率公式	(185)
§ 5.6	反射全息图的类型	(187)
§ 5.7	反射全息图的复制	(197)
	参考文献	(198)
<b>第六章</b>	<b>偏振全息</b>	<b>(200)</b>
§ 6.1	记录光路与曝光特性	(200)
§ 6.2	普通偏振全息	(206)
§ 6.3	光致各向异性记录介质的偏振全息	(209)
§ 6.4	光致各向异性材料及其应用	(215)
	参考文献	(228)
<b>第七章</b>	<b>全息记录介质与记录系统</b>	<b>(231)</b>
§ 7.1	基本物理量的概念和单位	(231)
§ 7.2	卤化银乳胶	(237)
§ 7.3	重铬酸盐明胶(DCG)	(249)
§ 7.4	光致聚合物	(255)
§ 7.5	光致抗蚀剂	(260)
§ 7.6	光导热塑料	(261)
§ 7.7	光折变晶体	(263)
§ 7.8	光学记录全息设备	(265)
	参考文献	(273)

<b>第八章 计算全息</b> .....	(276)
§ 8.1 抽样定理 .....	(276)
§ 8.2 计算全息图的制作程序 .....	(282)
§ 8.3 计算像面全息 .....	(289)
§ 8.4 双向计算全息图 .....	(290)
§ 8.5 编码技术 .....	(293)
§ 8.6 二元计算全息图 .....	(297)
§ 8.7 相息图和二元光学元件 .....	(301)
§ 8.8 二元光学元件 .....	(305)
参考文献 .....	(309)
<b>第九章 全息光学元件</b> .....	(312)
§ 9.1 全息透镜 .....	(312)
§ 9.2 反射全息元件 .....	(324)
§ 9.3 全息光栅 .....	(327)
§ 9.4 全息扫描器 .....	(330)
§ 9.5 平视显示器 .....	(333)
§ 9.6 全息空间频率滤波器 .....	(335)
§ 9.7 全息光学互联 .....	(337)
§ 9.8 偏振全息元件 .....	(341)
参考文献 .....	(344)
<b>第十章 全息高密度信息存储</b> .....	(347)
§ 10.1 傅里叶变换全息存储系统 .....	(348)
§ 10.2 全息信息存储的像质 .....	(355)
§ 10.3 全息信息存储容量 .....	(361)
§ 10.4 光折变晶体的多重像存储 .....	(365)
§ 10.5 彩色胶片的存储 .....	(368)
参考文献 .....	(377)
<b>第十一章 全息干涉计量</b> .....	(380)
§ 11.1 二次曝光法 .....	(381)
§ 11.2 单次曝光法 .....	(391)
§ 11.3 时间平均法 .....	(393)
§ 11.4 三束光单次曝光全息干涉 .....	(396)



§ 11.5	非线性记录的全息干涉 .....	(397)
§ 11.6	全息莫阿技术 .....	(402)
§ 11.7	全息波前错位干涉计量 .....	(417)
§ 11.8	全息干涉应用举例 .....	(419)
§ 11.9	光电检测技术 .....	(425)
§ 11.10	激光散斑的特点 .....	(427)
参考文献 .....		(431)
<b>第十二章</b>	<b>彩虹全息</b> .....	(434)
§ 12.1	二步彩虹全息 .....	(435)
§ 12.2	一步彩虹全息 .....	(442)
§ 12.3	像散彩虹全息 .....	(445)
§ 12.4	合成狭缝彩虹全息 .....	(449)
§ 12.5	条形散斑屏法 .....	(455)
§ 12.6	多狭缝彩虹全息 .....	(458)
§ 12.7	周视彩虹全息图 .....	(467)
§ 12.8	彩虹全息的复制 .....	(470)
参考文献 .....		(472)
<b>第十三章</b>	<b>体视及合成全息</b> .....	(476)
§ 13.1	体视全息 .....	(476)
§ 13.2	体视全息高密度存储 .....	(484)
§ 13.3	合成全息 .....	(487)
§ 13.4	实像合成全息图 .....	(501)
参考文献 .....		(507)
<b>第十四章</b>	<b>彩色全息</b> .....	(509)
§ 14.1	彩色全息所用激光器和记录材料 .....	(511)
§ 14.2	消色像全息 .....	(514)
§ 14.3	透射式真彩色全息 .....	(528)
§ 14.4	反射式真彩色全息 .....	(540)
§ 14.5	真彩色合成全息 .....	(546)
参考文献 .....		(547)
<b>第十五章</b>	<b>全息显微术</b> .....	(550)
§ 15.1	全息显微的原理 .....	(550)

§ 15.2 预放大全息显微镜 .....	(553)
§ 15.3 后放大全息显微术 .....	(554)
§ 15.4 X 射线激光全息 .....	(555)
参考文献 .....	(557)
<b>附 录</b> .....	(558)

## 概 述

人眼借光的作用看到物体。物体分自身发光和自身不发光两种。不发光物体被光照射后能衍射光，成为一种间接的发光体而被人眼观察到。物体发射的光被人眼接受时，由于光的强弱不同，射向和距离不同，颜色不同，从而能够识别物体的各自特征。从光波的观点看，是由于各物体发射的特定光波不同。光波的特征主要取决于光波的振幅(强弱)、位相(同相面形状)和波长(颜色)。如果物体不存在，但能得到物体的特定光波，则就能看到该物体的逼真像。

全息术是利用光的干涉和衍射原理，将物体发射的特定光波以干涉条纹的形式记录下来，并在一定条件下使其再现，形成原物体逼真的三维像。由于记录了物体的全部信息(振幅和位相)，因此称为全息术或全息照像。

全息术是英国科学家丹尼斯·加伯(Dennis Gabor)在1947年为提高电子显微镜的分辨率，在布喇格(Bragg)和泽尼克(Zernike)工作的基础上提出的。由于需要高度相干性和大强度的光源，直到1960年激光出现，以及1962年利思(Leith)厄帕特克斯(Upatnieks)提出离轴全息图以后，全息术的研究才进入一个新阶段，相继出现了多种全息方法，开辟了全息应用的新领域，成为光学的一个重要分支。

光全息术的发展到现在可分为三代，第一代是用水银灯记录同轴全息图，这是全息术的萌芽时期。其主要问题是再现原始像和共轭像不能分离，以及没有好的相干光源。第二代是用激光记录，激光再现；以及利思和厄帕特克斯提出离轴全息图，把原始像和共轭像分离。这一阶段全息术在理论上建立了基础，在可能的应用方面作了大量的实验，取得丰硕的成果。相应地在全息

记录材料方面也得到发展。开始主要使用高分辨率卤化银乳胶,以后实时材料光导热塑料和位相记录材料重铬酸盐明胶相继发现,并开展了光聚合材料和光致抗蚀剂的研究。第三代是激光记录白光再现的全息术,主要有反射全息、像全息、彩虹全息及合成全息,使全息术在显示方面展现出其优越性。白光再现全息术的特点是能够在白昼自然环境中或者在一般白光照明下观察到三维图像。反射全息图、特别是真彩色反射全息图已成为一种高贵的艺术品,在科学技术上也有许多有价值的应用。浮雕彩虹全息图的研制成功,发展了全息图模压大批量复制技术,现已形成全息印刷产业。

全息术的发展虽在白光记录全息图方面初步作了一些探索工作,效果还不显著。目前随着实时记录材料如光折变晶体、有机和无机光致各向异性实时记录材料,和性能优良的光聚合物材料的发展以及与光电技术、计算机技术相结合。全息术在科学技术上的应用也扩展到实时全息干涉自动测量、光学图像实时处理、光存储、光计算等方面的新技术应用领域。一些有特殊功能的全息光学元件如光学互连元件、多功能全息成像元件、位相共轭镜、空间光调制器、二元光学元件、空间滤波器等用全息的方法来制作有其优越性。特别是计算机制全息图的实现,补充了照像记录全息图的不足。进一步的发展又出现一种电脑控制,直接对记录材料曝光的数字像元浮雕相息图,能制作 2D、2D/3D 和 3D 图像的浮雕全息母版,无异对全息图的大批量复制技术又推进了一步。

全息术作为光学中一门新兴的前沿学科,它的迅速发展和广泛应用,日益引起科技工作者的重视,必将在高科技应用发展中产生深远的影响。

# 第一章 衍射和傅里叶光学基础

全息学的数理基础是波动光学和傅里叶变换。光的衍射理论将光学和傅里叶变换结合起来形成一门新的学科傅里叶光学。全息术的二步成像中第一步是借助于参考光记录了物体衍射光波的干涉图形，称为全息图；第二步是用照明光波经全息图的衍射形成物体的三维图像。本章首先从频域(空间频率域)和空间域介绍衍射公式，然后介绍透镜的傅里叶变换性质和傅里叶变换的基本定理。

## § 1.1 光波的空间频率及其在空 频域中的传播

### 1.1.1 波动公式

关于光波的波动公式我们采用余弦函数或复数形式。在各向同性的均匀介质中，沿  $r$  方向传播的理想单色平面波用下述公式表示

$$E = E_0 \cos 2\pi \left( \frac{r}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \quad (1-1)$$

或

$$E = E_0 \cos(kr - \omega t) \quad (1-2)$$

式中  $E$  是振动状态，此处称为光振动； $E_0$  是振幅； $t$  是时间； $r$  是沿传播方向的位置坐标。

光波的时间周期为  $T$ ，时间频率为  $f=1/T$ 。空间周期为波长，用  $\lambda$  表示。波长的倒数称为空间频率或波数，用  $\sigma$  表示，即  $\sigma=1/\lambda$ 。平常将  $2\pi f=2\pi/T=\omega$  称为时间角频率；与此相对应将

$2\pi\sigma = 2\pi/\lambda = k$  称为空间角频率。式(1-1)中的  $2\pi(r/\lambda - t/T)$  或式(1-2)中的  $(kr - \omega t)$  称为位相, 在波动过程中, 这个物理量很重要, 它关系到振动状态和同相面位置及形状。在光的干涉现象中, 干涉图形直接与两光波的位相差分布有关。

为计算简单, 采用复数写法, 即

$$E = \text{Re}[E_0 e^{i(kr - \omega t)}] \quad (1-3)$$

式中  $\text{Re} [ \ ]$  表示在括号中取实数部分。在实际应用中, 为简单起可以省去  $\text{Re} [ \ ]$ , 写成

$$E^{\text{①}} = E_0 e^{i(kr - \omega t)} \quad (1-4)$$

或

$$E = E_0 \exp[j(kr - \omega t)] \quad (1-5)$$

也可将时间位相因子  $\omega t$  和空间位相因子  $kr$  分开, 写成

$$E = E_0 e^{-j\omega t} e^{-jkr} = A e^{-j\omega t} \quad (1-6)$$

式中

$$A = E_0 e^{-jkr} \quad (1-7)$$

称为复振幅, 它包含振幅和空间位相因子。因为光的时间频率很高, 对可见光来说在  $10^{14}$  Hz 左右。人眼和其它光接受器都是接受光的平均强度, 而光的平均强度与振幅的平方成正比。所以在很多情况下可以只用复振幅表示光波, 以使计算公式简化。例如计算光的平均强度

$$\Phi \propto AA^* = |A|^2 = E_0^2 \quad (1-8)$$

$A^*$  是  $A$  的共轭复数。比例系数与选取的单位有关, 因为很多情况, 关心的是平均强度的相对大小, 而不是其绝对值, 因而令比例系数等于 1。将式(1-8)写成

$$\Phi = AA^* = |A|^2 = E_0^2 \quad (1-9)$$

① 本书对复数量均用黑正体表示。

### 1.1.2 波的空间频率

为了解波的空间频率概念,取直角坐标系  $xyz$ 。设有一平面光波,它的波面为  $\Sigma$ ,其传播方向(波面法线方向)的单位矢量为  $\mathbf{n}$ ,若  $\mathbf{n}$  与坐标轴的夹角为  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ,则可写成

$$\mathbf{n} = \{\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma\} \quad (1-10)$$

设在波面  $\Sigma$  上任一点  $P(x, y, z)$  距离原点为  $p$ 。即  $\mathbf{p} = (x, y, z)$ 。 $\mathbf{p}$  在  $\mathbf{n}$  上的投影为

$$\mathbf{p} \cdot \mathbf{n} = x\cos\alpha + y\cos\beta + z\cos\gamma = r \quad (1-11)$$

如图 1-1 所示,  $r = ON$  是一个常数,它等于沿传播方向的距离。所以平面波的复振幅公式可以写成更一般的形式

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= E_0 \exp(j\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}) \\ &= E_0 \exp(j\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}) \end{aligned} \quad (1-12)$$

式中  $\mathbf{k} = k\mathbf{n}$  称为波矢量。上式或写成

$$\mathbf{A} = E_0 \exp[jk(x\cos\alpha + y\cos\beta + z\cos\gamma)] \quad (1-13)$$

因为  $k = 2\pi/\lambda$ , 又可写成

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= E_0 \exp\left[j2\pi\left(x \frac{\cos\alpha}{\lambda} + y \frac{\cos\beta}{\lambda} + z \frac{\cos\gamma}{\lambda}\right)\right] \\ &= E_0 \exp(j\varphi) \end{aligned} \quad (1-14)$$

式中  $\varphi$  表示位相,这样,在  $x, y, z$  方向的空间频率分量分别为

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\cos\alpha}{\lambda} & \eta &= \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \frac{\cos\beta}{\lambda} \\ \zeta &= \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\cos\gamma}{\lambda} \end{aligned} \quad (1-15)$$

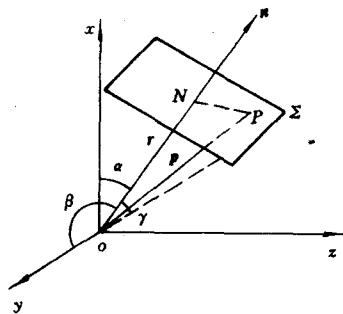


图 1-1

从这个意义上看, 空间频率分量可以称为角谱。将式(1-15)代入(1-14)中, 可以写成

$$\mathbf{A} = E_0 \exp[j2\pi(\xi x + \eta y + \zeta z)] \quad (1-16)$$

空间频率的单位是  $\text{cy}/\text{mm}$ 。空间频率分量可以为正或为负, 传播方向( $n$ )与( $x, y, z$ )轴的正向夹角为( $\alpha, \beta, \gamma$ )小于  $90^\circ$  时是正值, 大于  $90^\circ$  时是负值。这里负空间频率只是表示传播方向不同, 无其它物理含义。

空间频率分量有时也用  $\alpha, \beta, \gamma$  的余角表示, 即令

$$\theta_x = 90^\circ - \alpha, \quad \theta_y = 90^\circ - \beta, \quad \theta_z = 90^\circ - \gamma \quad (1-17)$$

则空间频率分量可写成

$$\xi = \frac{\sin\theta_x}{\lambda}, \quad \eta = \frac{\sin\theta_y}{\lambda}, \quad \zeta = \frac{\sin\theta_z}{\lambda} \quad (1-18)$$

图 1-2 说明  $n$  位在  $xz$  面内时, 光波的空间频率分量  $\xi$  和  $\zeta$ 。

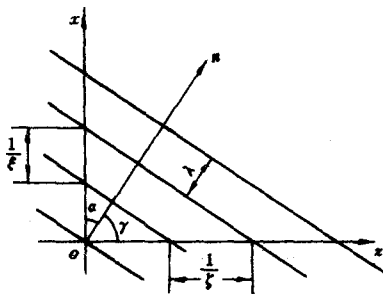


图 1-2

### 1.1.3 用空间频率表示的光波传播公式

光波的传播公式也可用空间频率分量表示, 因为  $\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1$ , 所以有

$$\lambda^2 \xi^2 + \lambda^2 \eta^2 + \lambda^2 \zeta^2 = 1 \quad (1-19)$$

或写成



$$\xi = \pm \frac{1}{\lambda} (1 - \lambda^2 \xi^2 - \lambda^2 \eta^2)^{1/2} \quad (1-20)$$

式中 正、负号由传播方向决定，传播方向与  $z$  轴夹角小于  $90^\circ$  (即  $\gamma < 90^\circ$ ) 时取正号，大于  $90^\circ$  时取负号。这样沿  $z$  轴正向传播的平面波公式为

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(x, y, z) &= E_0 \exp[j2\pi(\xi x + \eta y)] \exp[jkz(1 - \lambda^2 \xi^2 - \lambda^2 \eta^2)^{1/2}] \\ &= \mathbf{A}(x, y, 0) \exp[jkz(1 - \lambda^2 \xi^2 - \lambda^2 \eta^2)^{1/2}] \end{aligned} \quad (1-21)$$

式中

$$\mathbf{A}(x, y, 0) = E_0 \exp[j2\pi(\xi x + \eta y)] \quad (1-22)$$

表示在  $z=0$  处光波的复振幅，式中的位相因子表明空间频率分量为  $\xi$ 、 $\eta$  的光波的传播方向。如果光波垂直于  $xy$  面，则  $\xi=\eta=0$ ， $\mathbf{A}(x, y, 0)=E_0$ 。式 (1-21) 也可以用来研究衍射问题，但需要知道衍射物的频谱成分，这是空频域的处理方法。下面用一个例子加以说明。

#### 1.1.4 周期光栅的衍射<sup>[1-12]</sup>

图 1-3 表示一个周期光栅的衍射。设光栅的透射系数是一个矩形波函数，它的傅里叶级数展开式为

$$\tau(x) = \tau_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \tau_m \cos 2\pi \xi_m x \quad (1-23)$$

式中  $\xi_1=1/d$  是光栅的基频； $\xi_m=m\xi_1$ ，是谐频； $d$  是光栅间距。

设有振幅为  $A_0$  的单色平面光波垂直地照射光栅，则透过光栅的复振幅用它的频谱（傅里叶级数展开）表示时为

$$\begin{aligned} \mathbf{A} = (x, y, 0_+) &= A_0 \tau(x) = A_0 \tau_0 + A_0 \sum_{m=1}^{\infty} \tau_m \cos 2\pi \xi_m x \\ &= A_0 \tau_0 + \frac{1}{2} A_0 \sum_{m=1}^{\infty} \tau_m [\exp(j2\pi \xi_m x) \\ &\quad + \exp(-j2\pi \xi_m x)] \end{aligned} \quad (1-24)$$

式中  $0_+$  表示刚刚通过光栅以后的情况； $A_0 \tau_0$  是直射光或零级衍