

第五章 傅里叶变换光学

第四节 信息光学图像处理技术

5.4 信息光学图像处理技术

5.4.1 光学图像处理概述

5.4.2 空间滤波实验

5.4.3 相干光学图像处理系统

5.4.4 图像的加减

5.4.5 图像的色彩处理

5.4.6 光学图像处理实际应用举例

5.4.1 光学图像处理概述

光学图像处理概述

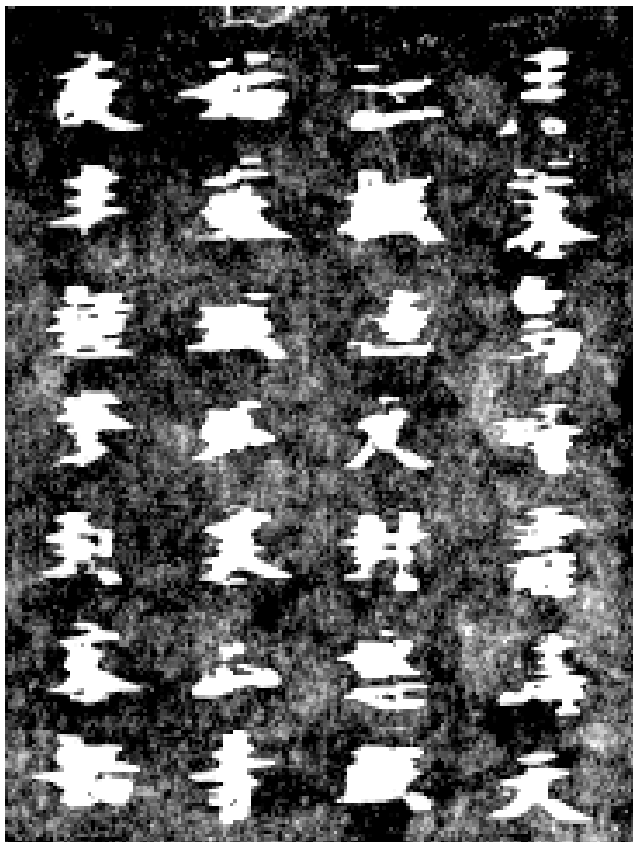
光学图像处理的对象：光学图像，包括照片、底片、图片等。

图像处理的目标：改变图像的反差，使模糊图像清晰化，消除图像中的噪声，图像相加减，特征识别，对黑白图像进行假彩色编码，等等。

其他类型信号的处理：被处理信息是这些信号必须首先转换成光信号或光学图像，然后用光学信息处理系统进行处理。如：电信号(电压、电流)，机械信号(重量、长度、角度、速度、应力应变)，声音信号，温度信号...

5.4.1 光学图像处理概述

光学图像处理概述



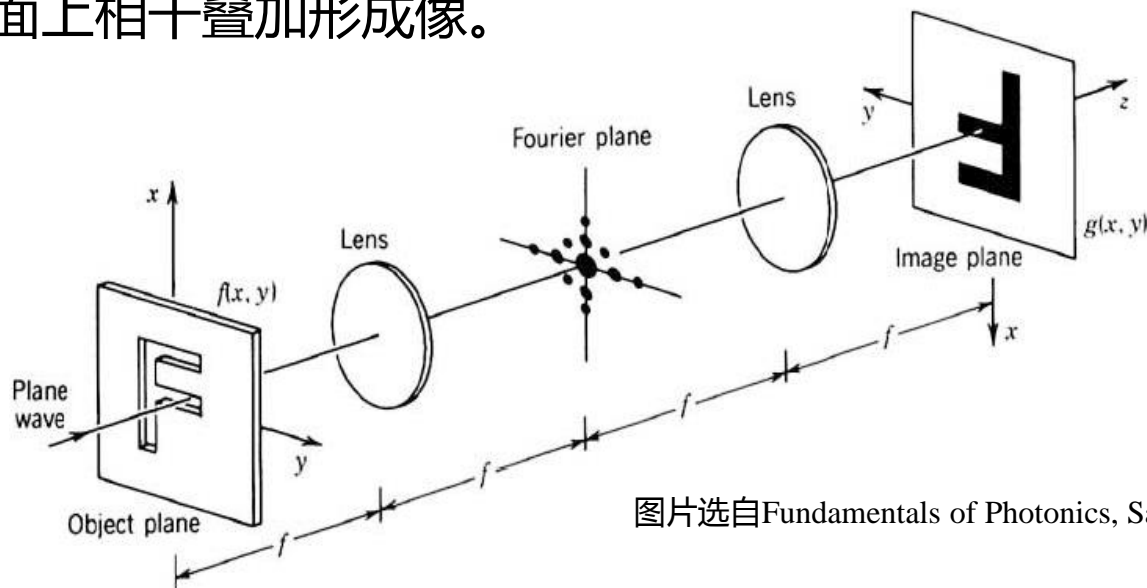
较高空间频率的分量决定了图像的细节

5.4.2 空间滤波实验

空间滤波的概念

相干光学系统的概念

按照阿贝成像原理，物光波首先在傅氏面上形成衍射斑，然后衍射斑发出的光波在像平面上相干叠加形成像。



图片选自Fundamentals of Photonics, Saleh & Teich

原理

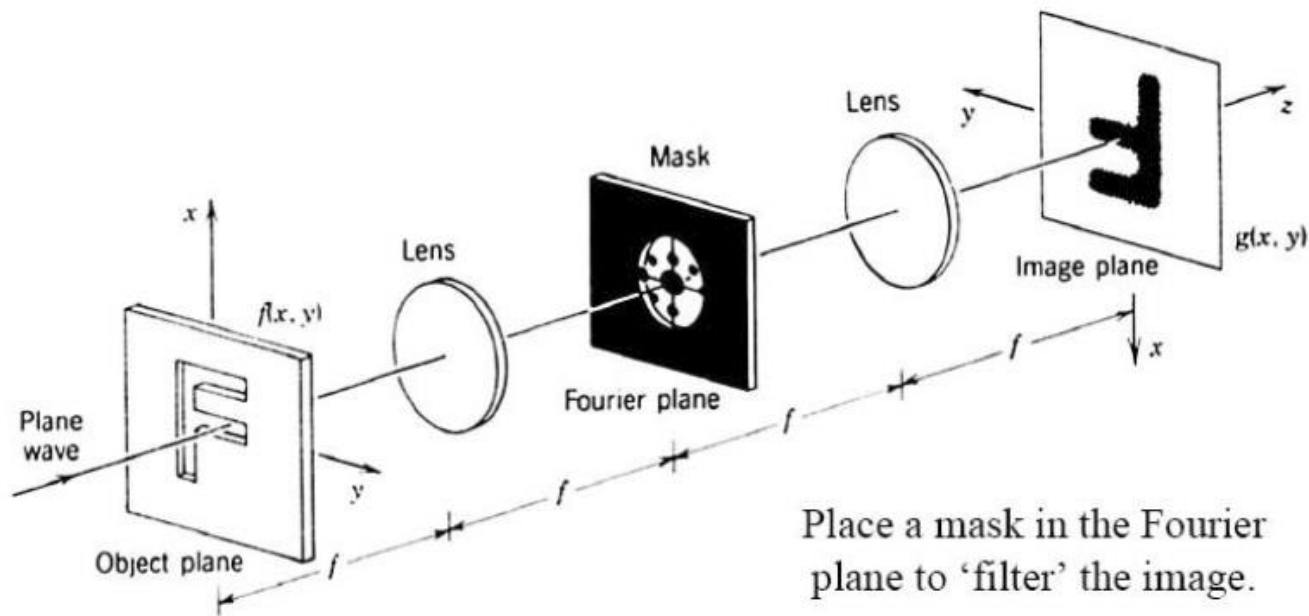
在透镜的像方焦面F'(傅氏面)上，反应了物信息的**全部空间频谱信息**，因此，可以在F'这一频谱面上，安置不同结构的光阑，用于提取或摒弃某些频谱（**选频**），从而改变原物频谱，以完成图像信息的处理（改变像）。

5.4.2 空间滤波实验

空间滤波

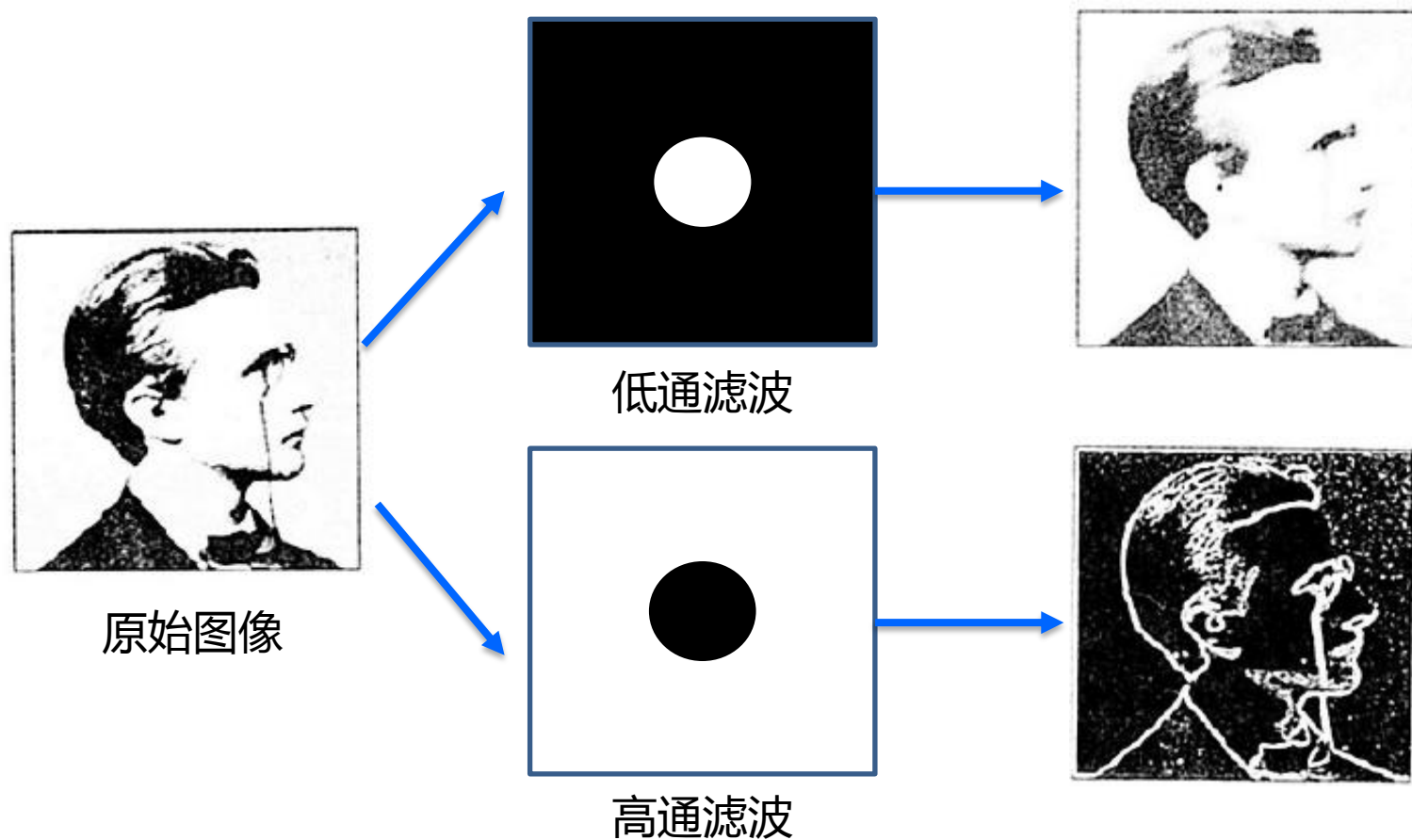
空间滤波器

能够改变光信息空间频谱的器件，都被称为光学滤波器，或常被称为空间滤波器（spatial filter）。空间滤波器也有振幅型、相位型、以及相幅型之分。



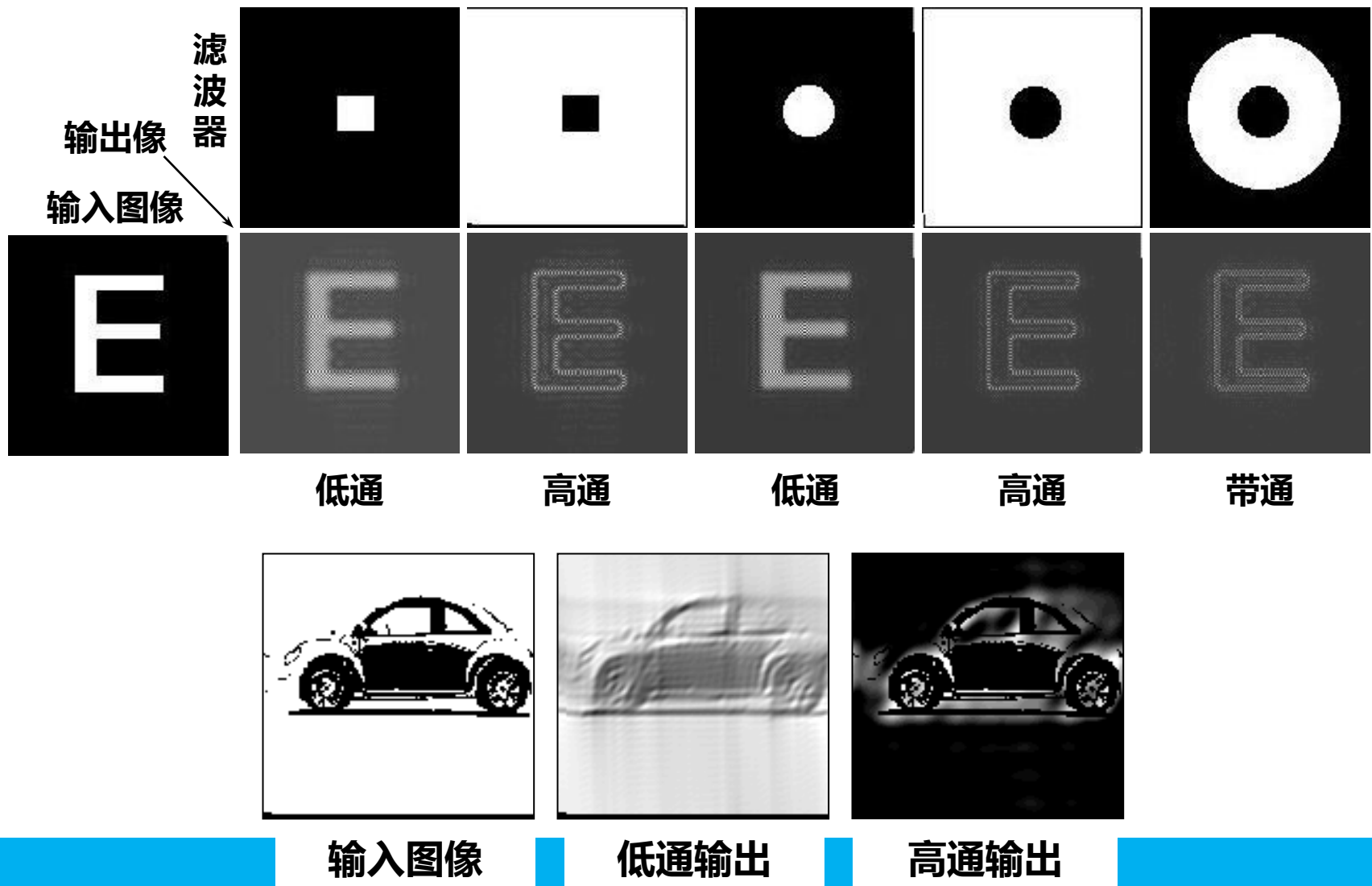
5.4.2 空间滤波实验

空间滤波的实例



5.4.2 空间滤波实验

空间滤波的仿真结果



5.4.2 空间滤波实验

典型的空间滤波

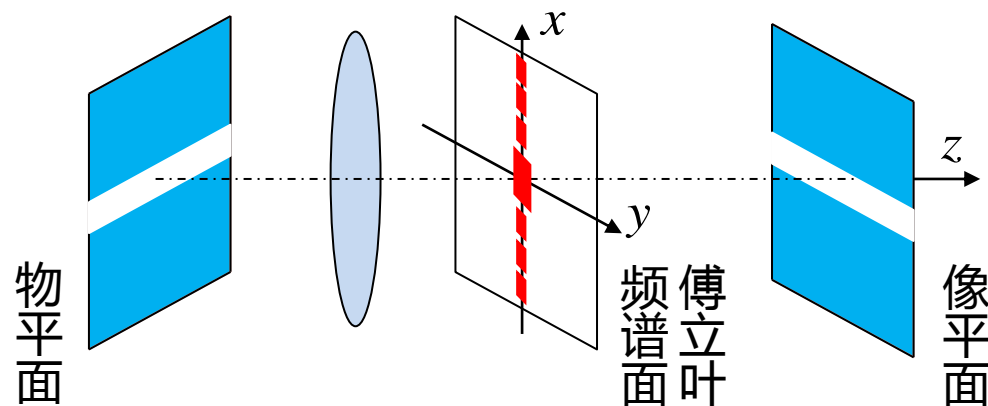
特征

- y 方向单缝的衍射斑是
 x 方向分布的一系列点
- x 方向单缝的衍射斑是
 y 方向分布的一系列点

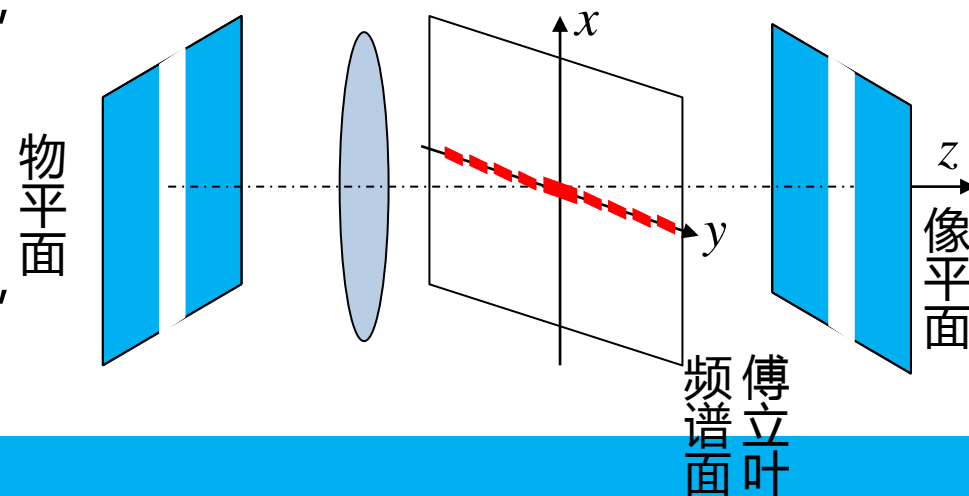
原因分析（以竖直方向为例）

- 相干光源（即傅氏面上的衍射斑）具有沿 y 方向分布的相位差，因而在 y 方向进行相干叠加，形成具有 y 分布的干涉条纹；
- 没有沿 x 方向部分的相位差，因而在 x 方向均匀照明占主导因素，干涉条件难以满足。所以干涉条纹仅具有沿 y 方向的强度差异。

水平狭缝的傅氏面频谱及其像



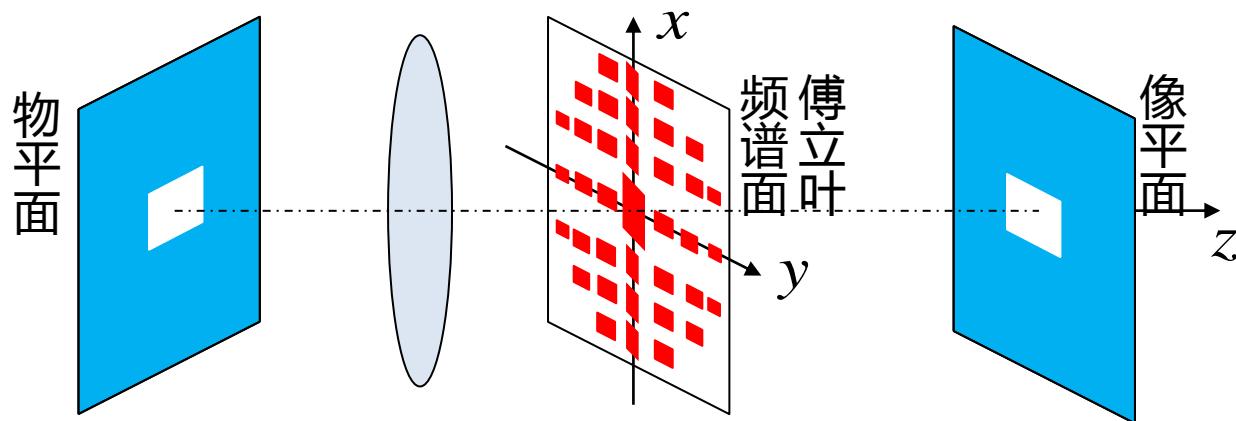
竖直狭缝的傅氏面频谱及其像



5.4.2 空间滤波实验

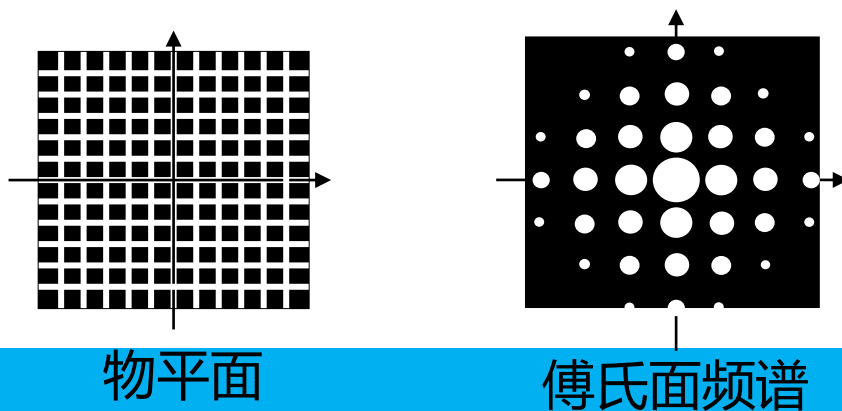
典型的空间滤波

矩形孔的傅氏面频谱及其像



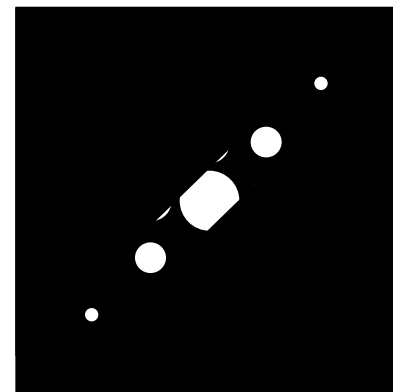
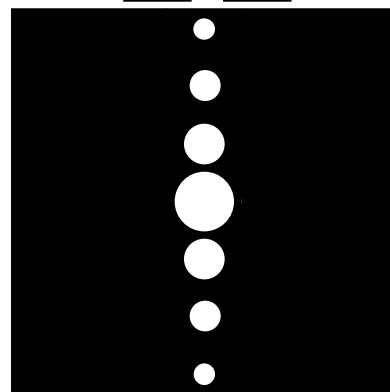
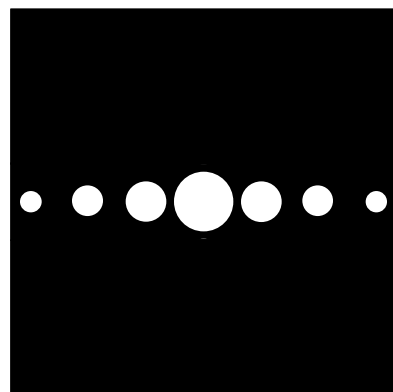
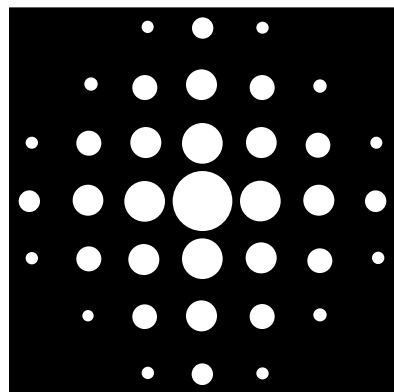
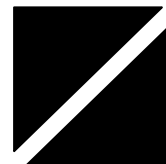
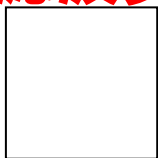
相干光源具有二维分布的相位差，因而干涉形成具有二维强度分布的干涉花样。

网格的傅氏面频谱



5.4.2 空间滤波实验

空间滤波实验（网格滤波）

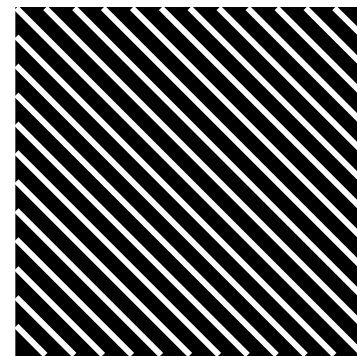
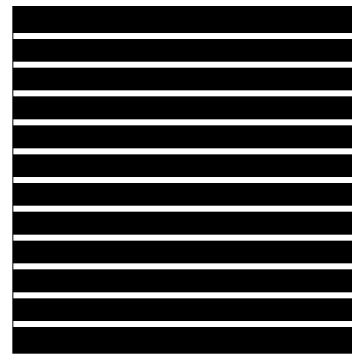
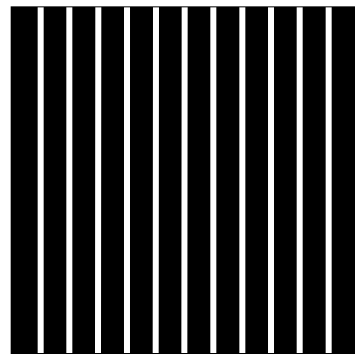
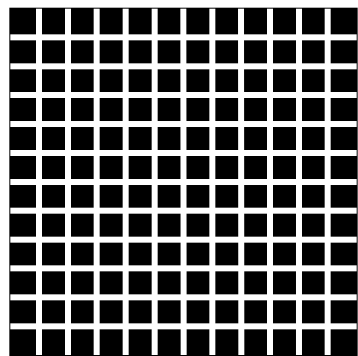


无空间滤波装置

水平带通滤波装置

竖直带通滤波装置

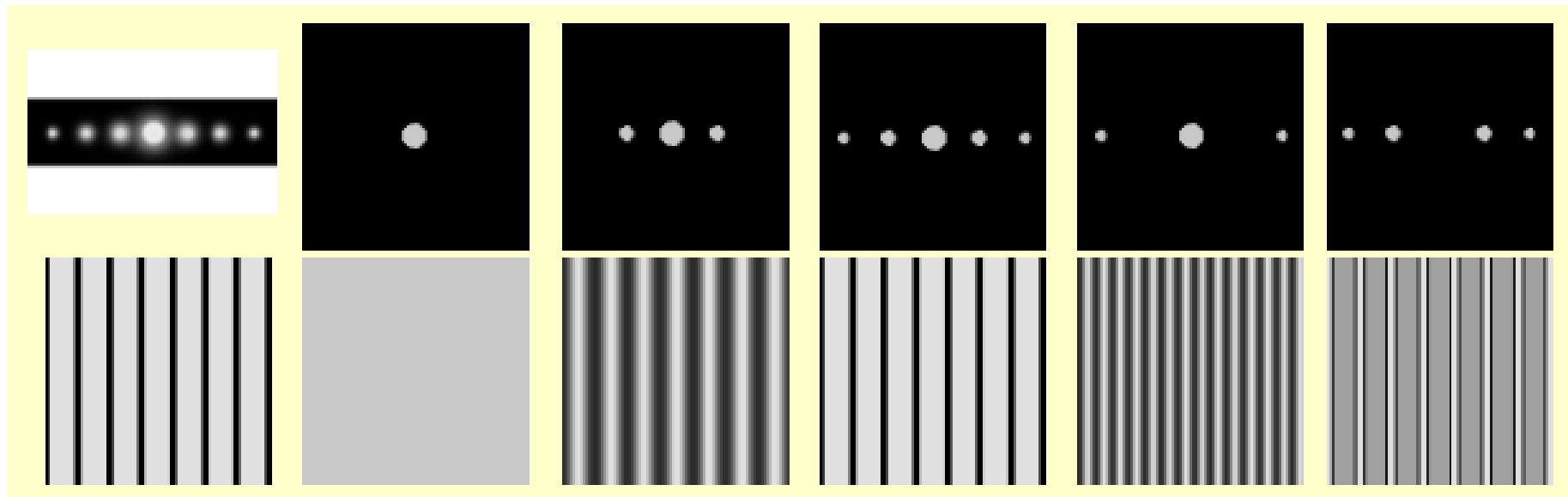
倾斜带通滤波装置



傅氏面空间滤波后像平面光强分布

5.4.2 空间滤波实验

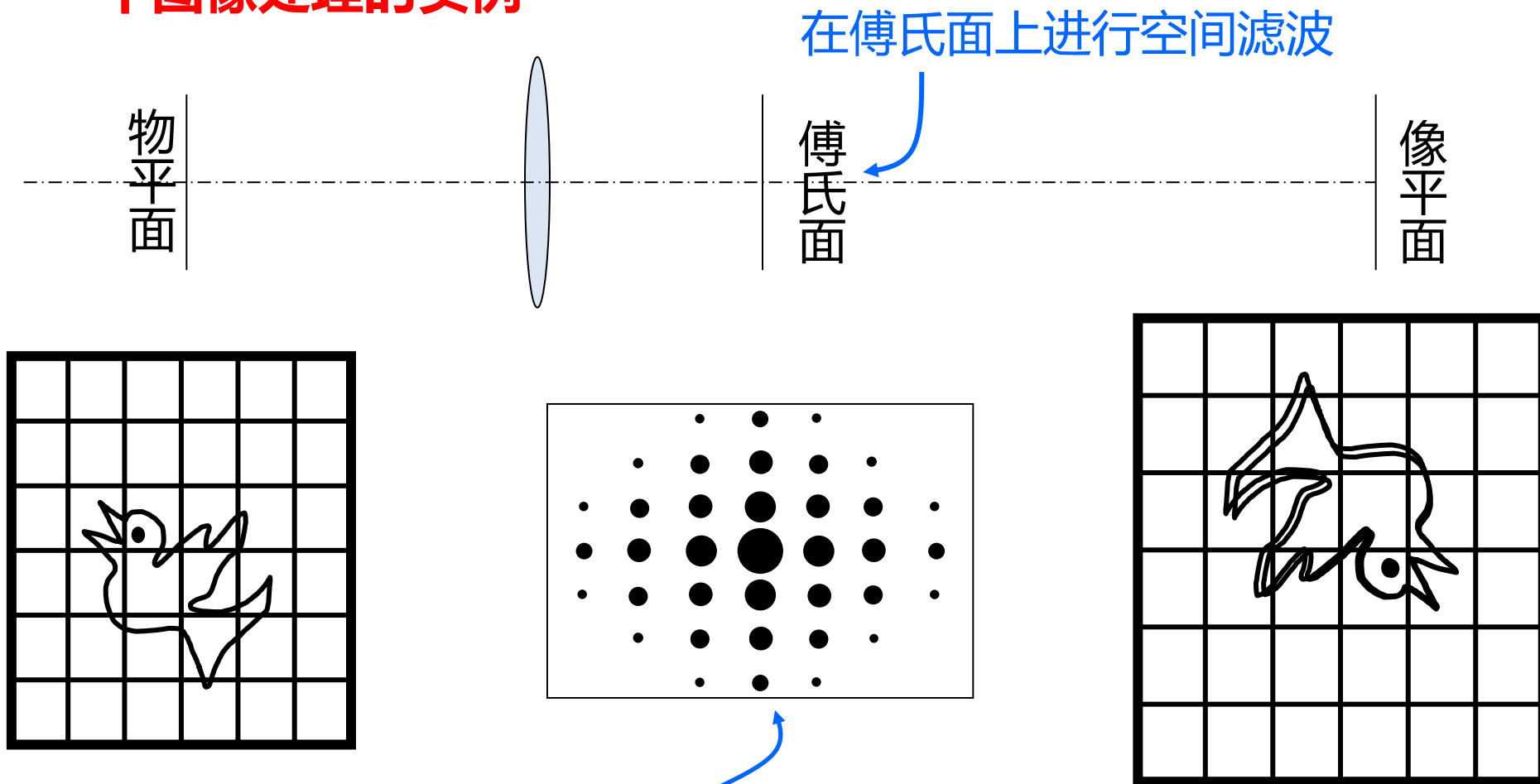
空间滤波实验（频谱选择）



有选择地使频谱面上部分衍射斑通过，可以得到不同的图像。

5.4.3 相干光学图像处理系统

一个图像处理的实例



- 只让焦平面上的亮点透过→像平面上出现清洁的光栅图形--其它图形滤掉。
- 挡住焦平面上的亮点→在像平面上出现消除了光栅线条的图形。

5.4.3 相干光学图像处理系统

严格傅里叶变换的条件

夫琅禾费衍射场的基本形式可以写作

$$U(x', y') = CA_1 e^{i\varphi(x', y')} F \{ \tilde{t}(x, y) \}$$

若一次衍射后直接接受衍射场（一次衍射），则可以忽略 $\varphi(x', y')$ 。

$$I(x', y') = \tilde{U}(x', y') \tilde{U}^*(x', y') = C^2 A_1^2 F \{ \tilde{t}(x, y) \} F^* \{ \tilde{t}(x, y) \}$$

但若存在二次衍射，则傅氏面上的位相分布 $\varphi(x', y')$ 影响相干叠加的结果。

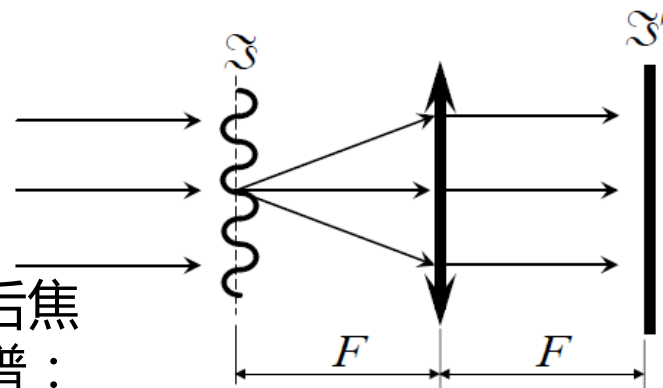
等光程光路设计，使衍射屏中心到达不同场点的衍射线等光程。

$$\varphi(x', y') = kL_0(x', y') = \text{const}$$

解决办法：衍射屏置于透镜的前焦面上。此时后焦面的复振幅分布准确的成为屏函数的傅里叶频谱：

$$U(x', y') = F \{ \tilde{t}(x, y) \}$$

衍射屏的空间频率与场点坐标的对应关系为 $(f_x, f_y) = \frac{k}{2\pi F}(x', y') = \frac{1}{\lambda F}(x', y')$

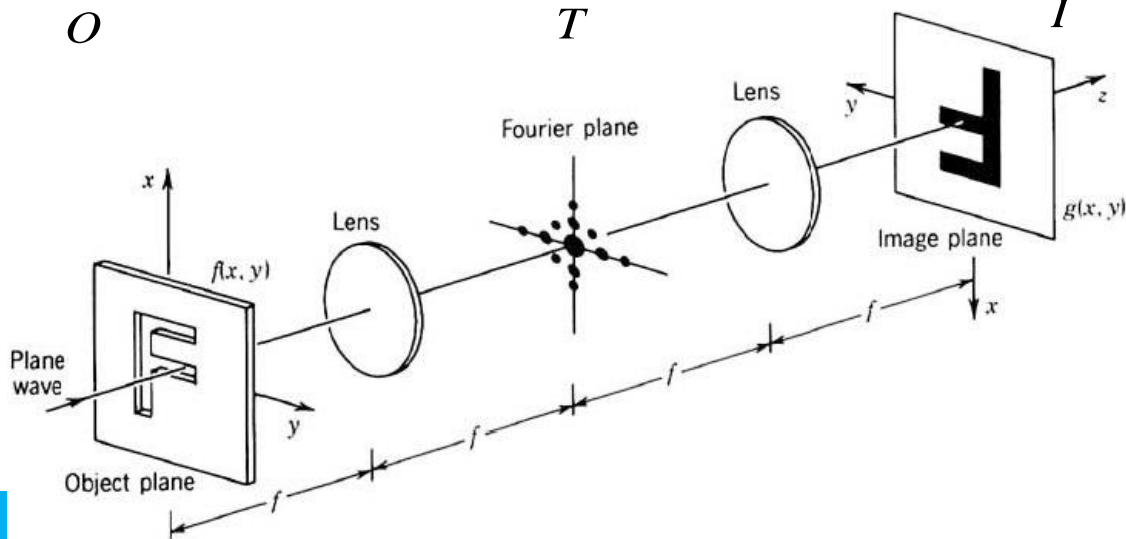
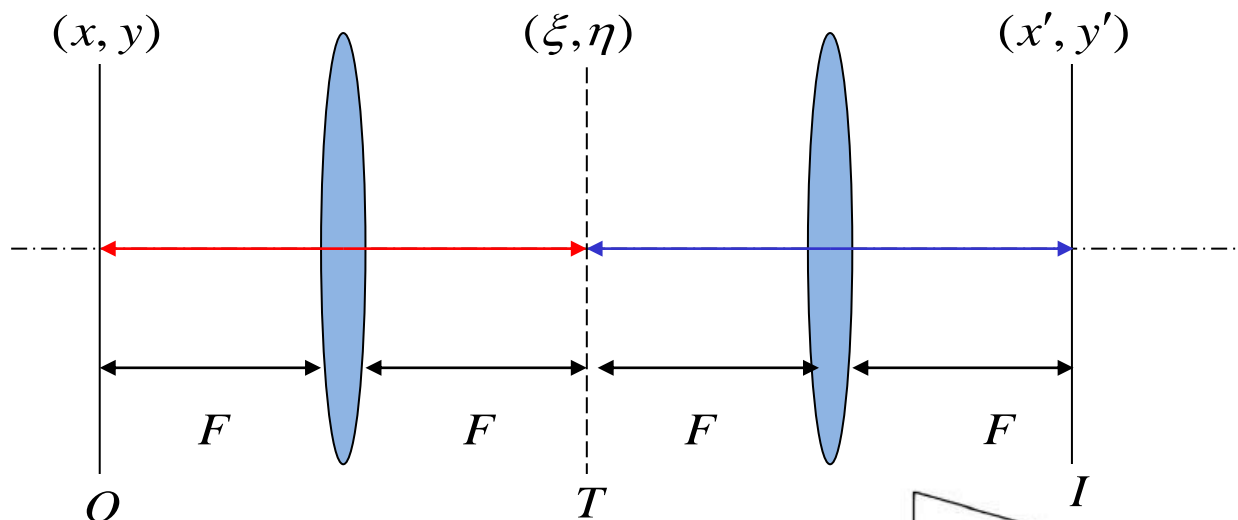


5.4.3 相干光学图像处理系统

4F系统

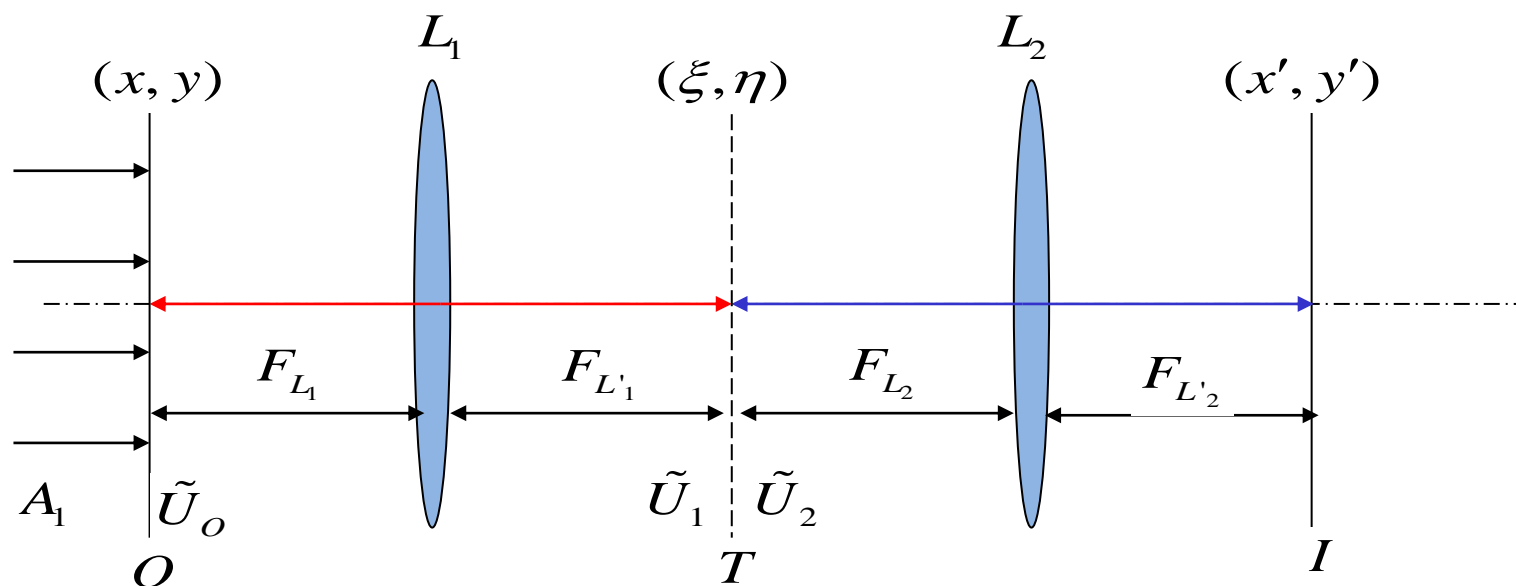
物平面O，变换平面T，像平面I：OTI系统

两个透镜的
共焦组合



5.4.3 相干光学图像处理系统

4F系统波前变换的数学描述



(1) 物场经过透镜的频谱

$$\tilde{U}_1(\xi, \eta) = F \{ \tilde{U}_o(x, y) \}$$

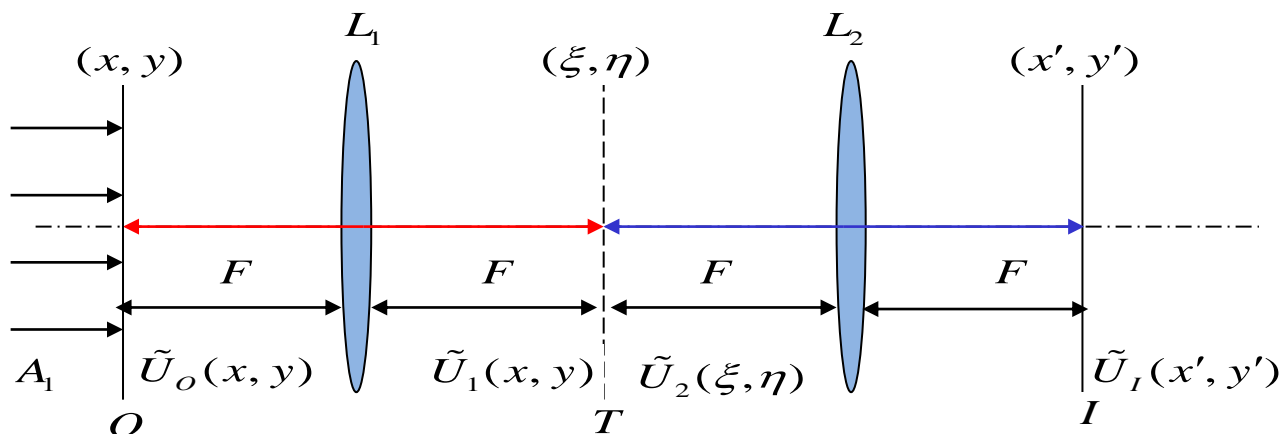
(ξ, η) — 变换平面上的线坐标

$\{q_x, q_y\}$ — 物平面上的空间频率

$$(\xi, \eta) = \{F\lambda f_x, F\lambda f_y\}$$

5.4.3 相干光学图像处理系统

4F系统波前变换的数学描述（续）



(2) 从 T 面出射光场的频谱

$$\tilde{U}_2(\xi, \eta) = T(\xi, \eta) \cdot \tilde{U}_1(\xi, \eta)$$

(3) 透镜 L_2 对频谱的变换

$$\tilde{U}_I(x', y') = F \{ \tilde{U}_2(\xi, \eta) \}$$

(x', y') 与变换平面上的空间频率 (f_ξ, f_η) 的关系

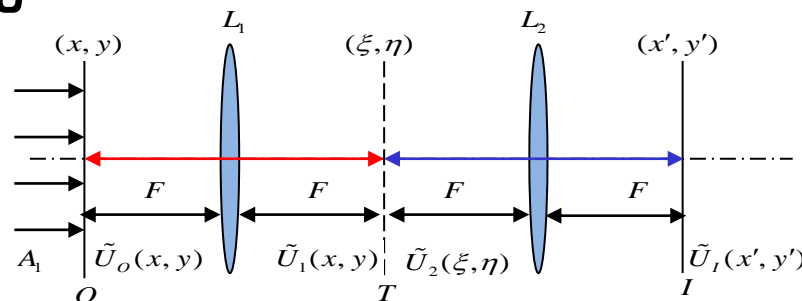
$$(x', y') = \{ F \lambda f_\xi, F \lambda f_\eta \}$$

5.4.3 相干光学图像处理系统

4F系统波前变换的数学描述（续）

（4）总体考虑，输出像场的表示为

$$\tilde{U}_I(x', y') = F \{ T(\xi, \eta) \cdot F \{ \tilde{U}_O(x, y) \} \}$$



特殊情况下，当滤波函数 $T(\xi, \eta) = 1$ 时，输出像场为

$$\begin{aligned} \tilde{U}_I(x', y') &= FF \{ \tilde{U}_O(x, y) \} = \tilde{U}_O(-x, -y) \\ (x', y') &= (-x, -y) \end{aligned}$$

说明：

- ① 对一个函数连续做两次傅里叶变换，其结果形式与原函数相同，但变量坐标反转，即相当于横向放大率 $V = -1$ 。
- ② 4F系统是一个以倒置形式重现物的成像系统，也是对一个函数进行两次傅里叶变换的光学实现。

5.4.4 图像的加减

图像的加减

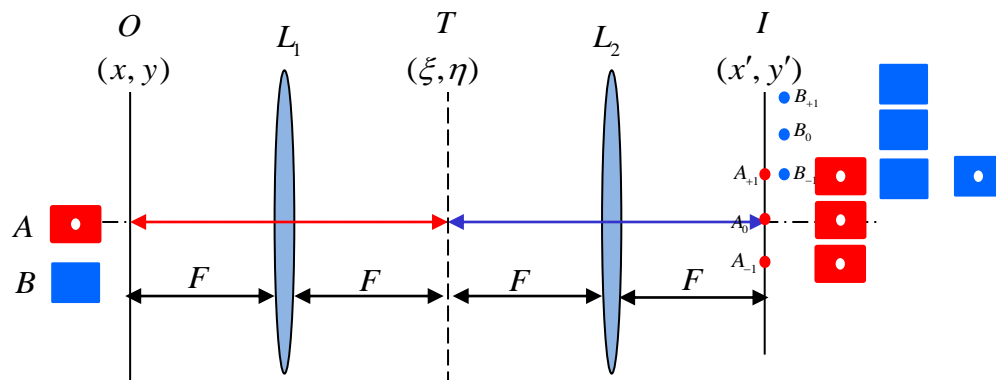
两幅图像的透过率函数分别为 \tilde{t}_A 和 \tilde{t}_B

实现图像相乘的方法—两幅图像相叠

实现图像相加的方法

— $4F$ 系统 + 变换面使用正弦光栅

$$T(\xi, \eta) = t_0 + t_1 \cos(2\pi f_0 \xi + \varphi_0)$$

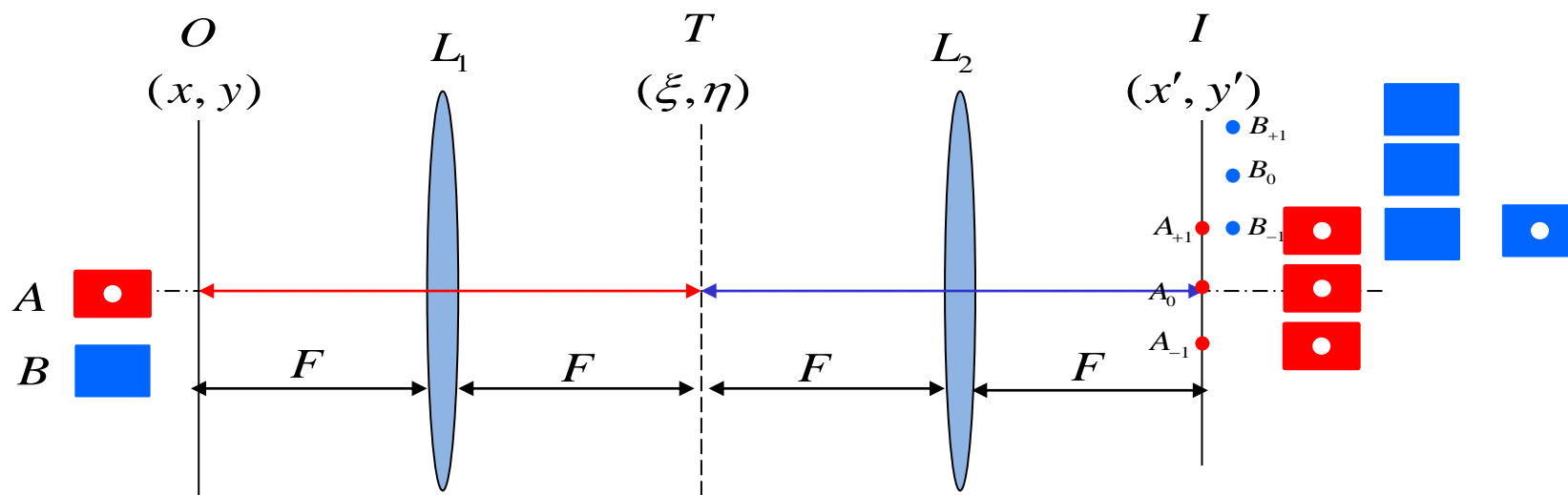


原理

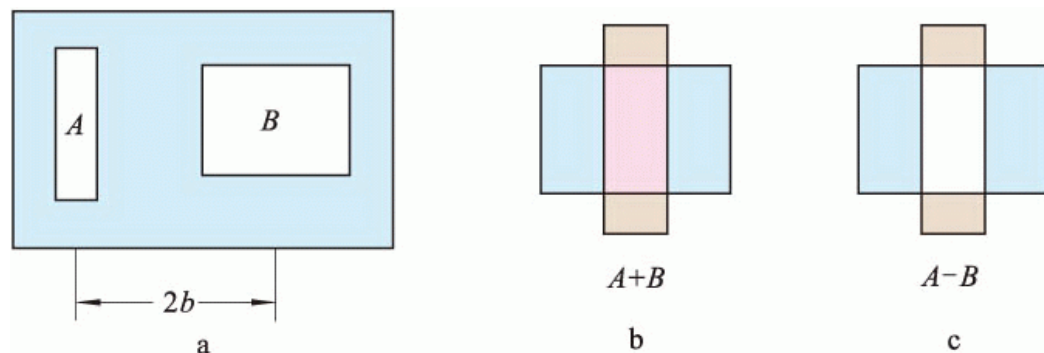
- (1) 正弦光栅使物A和B分别在像面上出现三幅图像，分别为 (A'_{+1}, A'_0, A'_{-1}) 和 (B'_{+1}, B'_0, B'_{-1}) 。
- (2) 调节物面上A和B的距离，使图像 A'_{+1} 和 B'_{-1} 在空间位置上重合。
- (3) 精细位移正弦光栅滤波器，连续改变图像 A'_{+1} 和 B'_{-1} 之间的位相差 δ 。
- (4) 当 $\delta=0, 2\pi\dots$ 时，实现图像相加； $\delta=\pi, 3\pi\dots$ 时，实现图像相减。

5.4.4 图像的加减

图像的加减(续)



图像加减装置原理图



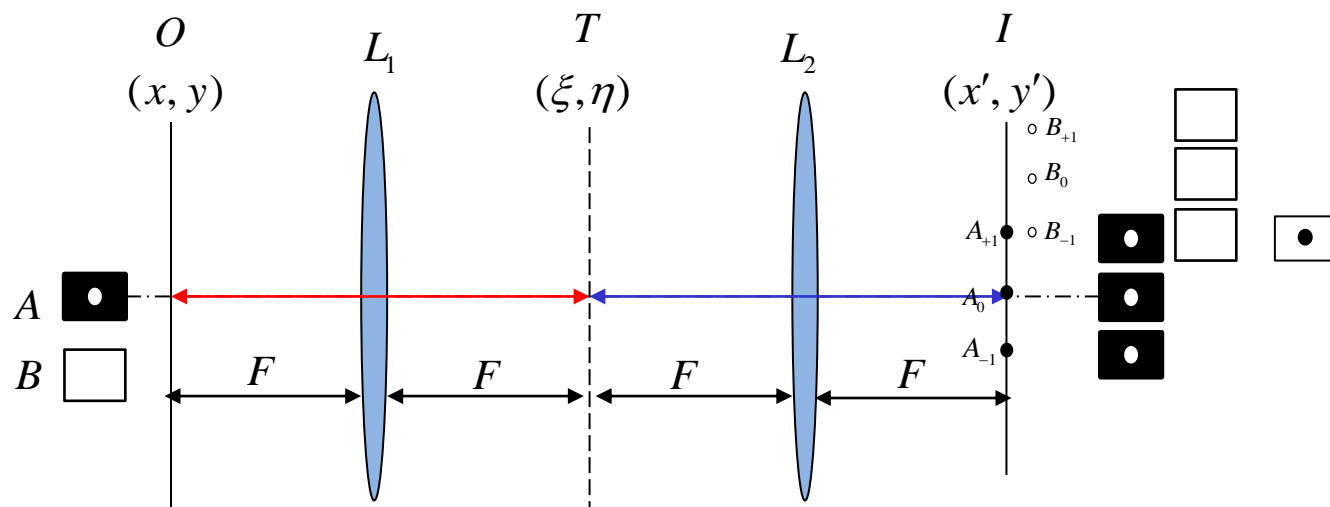
图像加减原理



图像相加的实验结果

5.4.4 图像的加减

图像的加减(续)



滤波器定位实验

- (1) 采用一个黑色矩形中开一透光小孔的物A，以及一个全通光的矩孔B，作为两个物（采用最简单的图像作为试片）。
- (2) 调节A、B的位置，使像 A'_{+1} 和 B'_{-1} 重合。
- (3) 精细调节正弦光栅滤波器，当相面上出现一个最黑的圆斑，且周围是一片亮场时，停止移动（表明滤波器位置使 A'_{+1} 和 B'_{-1} 之间的相位差满足 π 条件，因此反衬度翻转）。
- (4) 在进行两张实际图像加减处理时，要严格保持滤波器的位置不动。

5.4.4 图像的加减

图像的加减(续)

说明

- (1) **应用**：光学加减法可以凸显两张图像之间的细微差别，在遥感、医疗、产品检验等方面有广泛应用。
- (2) **一对三特性**：在正弦光栅滤波器的作用下， $4F$ 系统的输入与输出之间，不再是点一点对应的关系，而是一点物点对应三点像点。由点及面，一副图像对应三幅输出图像，分别为零级和正负一级。
- (3) **图像间隔**：如果以图像中心点来标定图像位置，则物平面两幅图像的位置分别为 $x(A)=0$ ， $x(B)=-a$ 。此时，由于正弦光栅的衍射特性，像平面上两组图像的位置分别为：

$$\begin{cases} x'(A_0)=0 \\ x'(A_{+1})=f_0\lambda F \\ x'(A_{-1})=-f_0\lambda F \end{cases} \quad \begin{cases} x'(B_0)=a \\ x'(B_{+1})=f_0\lambda F + a \\ x'(B_{-1})=-f_0\lambda F + a \end{cases} \Rightarrow$$

A_{+1} 和 B_{-1} 重合，意味着 $x'(A_{+1})=x'(B_{-1})$ 即 $f_0\lambda F = -f_0\lambda F + a$

两图像的合适间隔为 $a_0 = 2f_0\lambda F$

这也是每幅图像能允许的**最大尺寸** (x 方向)

5.4.4 图像的加减

图像的加减(续)

(4) 位移量与相移量：

衍射屏的位移会导致夫琅禾费衍射场的相移，但不改变衍射图像的位置。根据位移量 $\Delta\xi$ 与相移量 $\Delta\varphi$ 之间的关系 $\Delta\varphi = -k\sin\theta\Delta\xi$ 可以得到，当+1级与-1级图像满足相位差为 π 时，有

$$\text{特征位移量} \quad \Delta\xi_0 = \frac{1}{4f_0} = \frac{d_0}{4} \quad d_0 - \text{光栅周期}$$

5.4.4 图像的加减

图像的加减(续)

例题：

有一正弦光栅，其空间频率为 $f_0=50\text{mm}^{-1}$ ， $4F$ 系统中选用的透镜焦距为 $F\approx 200\text{mm}$ ，入射光波长 $\lambda\approx 600\text{nm}$ ，请估算待处理图像的间隔和滤波器的特征位移量。此时，机械传动系统的位移精度是多少？

解：待处理图像的间隔和允许的最大宽度均为

$$a_0 = 2f_0\lambda F = 2 \times 50 \times 200 \times 600\text{nm} = 12\text{mm}$$

滤波器的特征位移量为

$$\Delta\xi_0 = \frac{1}{4f_0} = \frac{1}{4 \times 50\text{mm}^{-1}} = 5\mu\text{m}$$

这一结果的物理意义在于：位移传动系统的精度要求 $\Delta\xi < \Delta\xi_0$

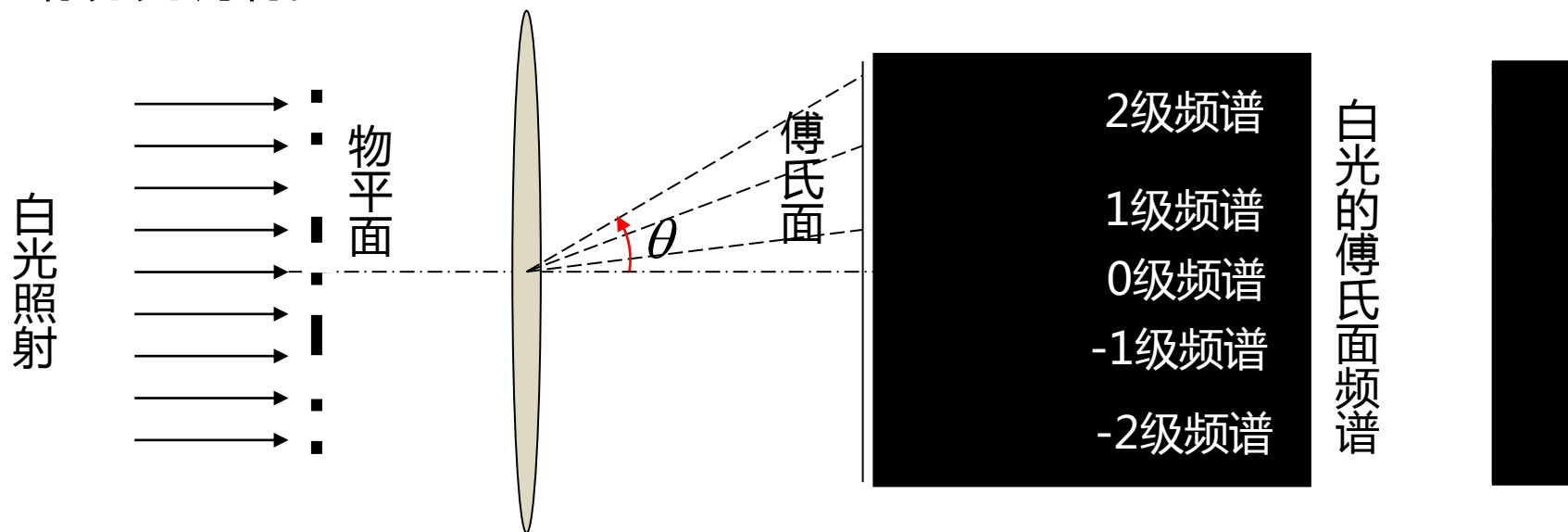
对于本题来说，传动系统的位移精度 $\Delta\xi\approx 1\mu\text{m}$ ，可以看出是一个很高的要求。增大 $\Delta\xi_0$ 需要减小光栅的空间频率 f_0 ，但这会同时减小 a_0 ，使能处理的图片变窄。

5.4.5 图像的色彩处理

显色滤波 (θ 调制)

用白光照射物平面，在傅氏面上，不同波长的同一级频谱的空间位置不同，因此可以通过空间滤波进行色彩选择，从而得到彩色图像，或对图像的色彩进行控制。

这种彩色图像是对不同角度 θ 的光栅产生的光学信息选择的结果，又称分光调制。

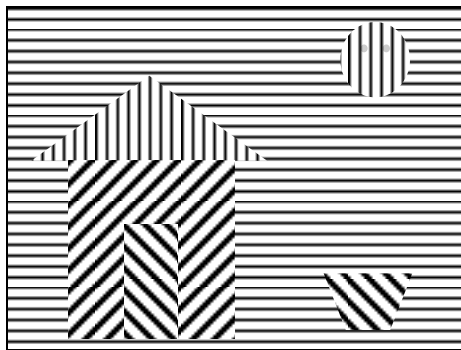
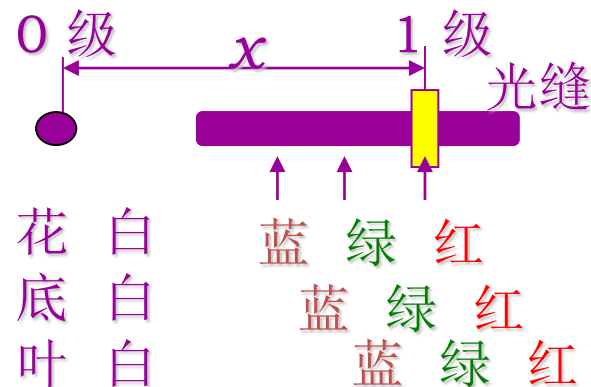


5.4.5 图像的色彩处理

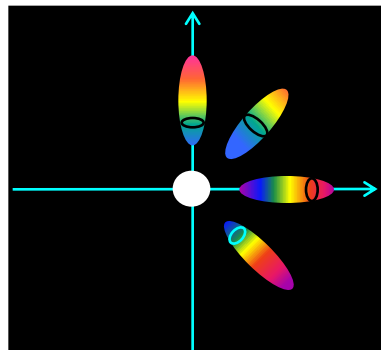
显色滤波 (θ 调制)

原理

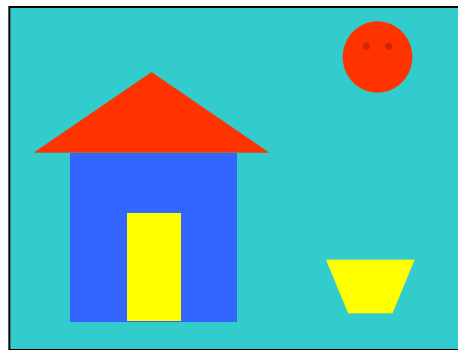
- (1) 拼接光栅在物平面处，白光照射。
- (2) 透光缝开在不同的 θ 角度处，从而使不同波长的频谱通过。
- (3) 在傅氏面上进行 θ 调制，得到彩色光栅图像。



经不同光栅编码后的
图像



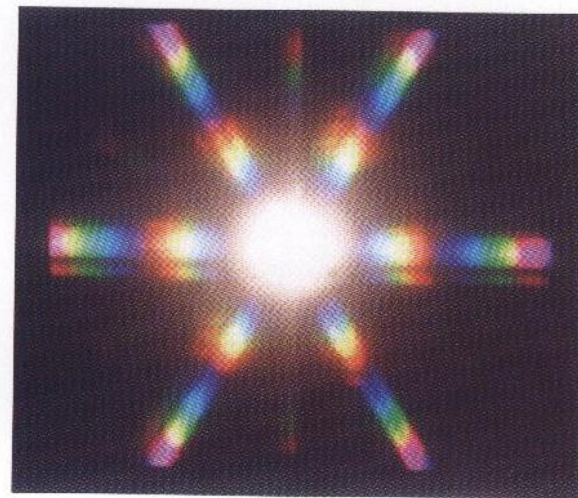
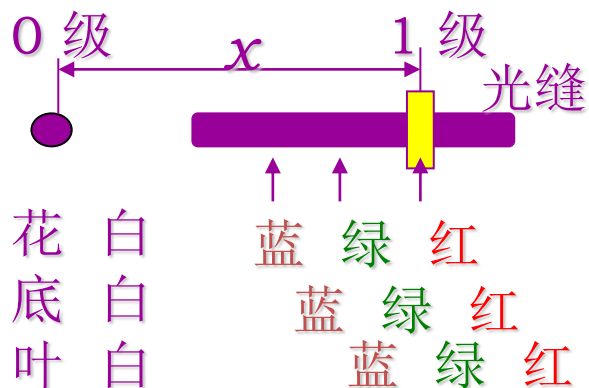
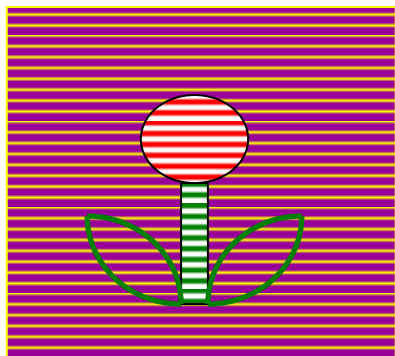
白光照射下编码图
像的频谱



滤波解码编码后的
图像

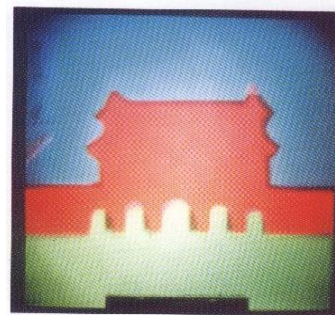
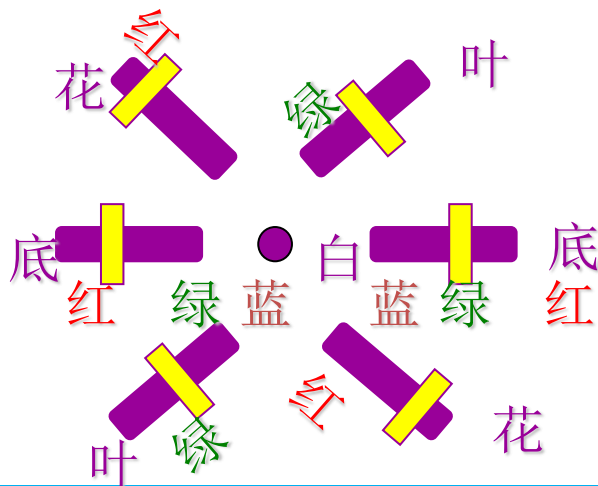
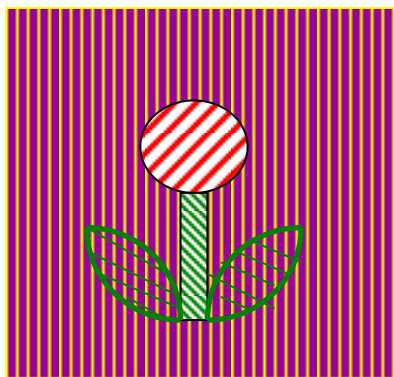
5.4.5 图像的色彩处理

显色滤波 (θ 调制)

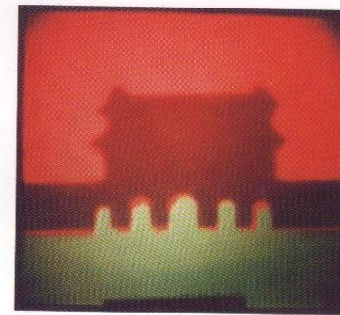


(a) 调制物的频谱照片

θ 调制

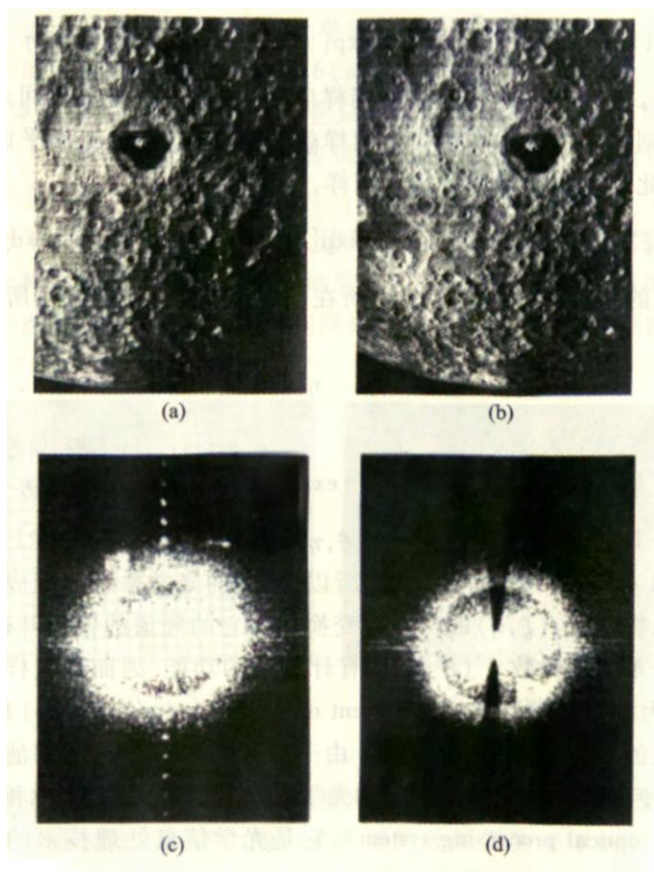


(b) 用滤波器获得的输出照片

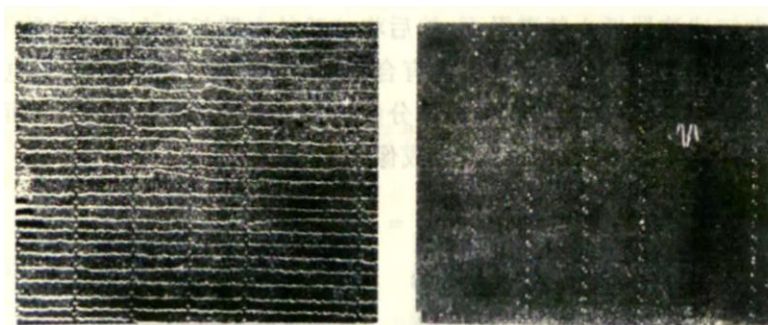


(c) 采用另一种滤波器获得的输出照片

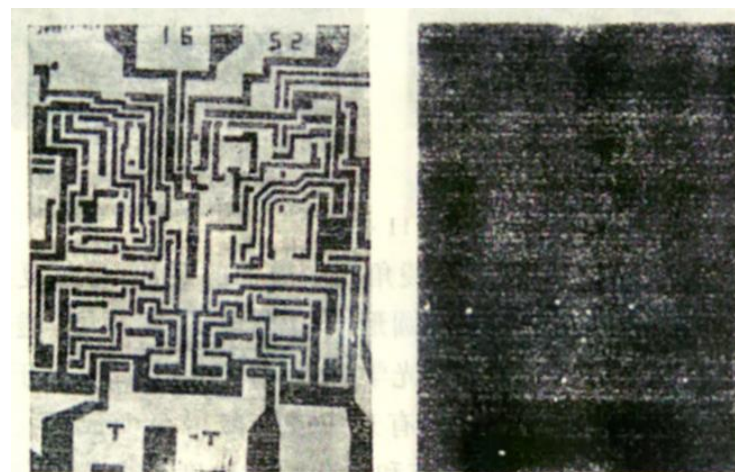
5.4.6 光学图像处理实际应用举例



(a) 信息光学手段处理“月球轨道飞行器1号的照片”



(b) 信息光学手段处理地震波记录仪的数据



(c) 信息光学手段检测大规模集成电路的瑕疵

本节重点

1. 空间滤波的概念（理解）
2. 光学传递函数的作用（理解）
3. 图像的加减、微分（理解）
4. 图像颜色处理的思路和方法（理解）

作业

P127-1,2

重排版：P348:-1,2