

# 利用光折变晶体 Cu : KNSBN 实现图像增强

郑光昭

(广东工业大学五山校区基础部, 广州 510643)

**提要** 利用置放于相干系统的傅里叶变换平面的光折变晶体 Cu : KNSBN 在一定条件下完成了图像增强处理, 由于晶体内部的位相共轭效应而在变换平面形成拉普拉斯算子。给出实验结果和扼要的理论分析。

**关键词** 图像增强, 光折变晶体, 傅里叶变换, 拉普拉斯算子

## 1 引言

在图像识别中, 根据需要突出图像中某些需要的信息, 削弱或去除某些不需要的信息, 这就是图像增强处理。这种处理可从时域、频域或空域三方面来进行, 其实质就是对图像进行频谱分析、过滤和综合。频域法处理技术主要是将图像进行变换、滤波处理。它是建筑在修改图像傅里叶变换的基础上的。这种处理可以利用计算机进行, 但它通常要求数字计算机具有较大的内存量和较快的处理速度<sup>[1]</sup>。

本文介绍的实验可以直接增强图像边缘, 实现图像增强。其理论根据是利用拉普拉斯算子运算以增强图像的边缘部分。而拉普拉斯算子在傅里叶平面上变成乘以  $-(2\pi)^2(u^2 + v^2)$  的运算。把具有这种透射率分布的滤波器放在傅里叶平面上就能增强图像<sup>[1]</sup>。本实验利用光折变晶体 Cu : KNSBN 在一定条件下产生自泵浦位相复共轭效应, 从而在傅里叶平面上形成拉普拉斯算子, 其透射波经历拉普拉斯运算后实现图像增强。

## 2 实验及其结果

### 2.1 实验装置与方法

本实验采用文献[2]中第二种光路。小功率单模 He-Ne 激光束经扩束后由透镜  $L_1$  准直后照明平面  $P_1$  上的图像(物体),  $P_1$  位于透镜  $L_2$  之前  $2f$  处, 而像平面  $P_3$  位于透镜  $L_2$  之后  $2f$  处。光折变晶体 Cu : KNSBN 置于  $L_2$  的后焦面附近。适当调整晶体表面处入射点的位置以及入射光方向, 并在

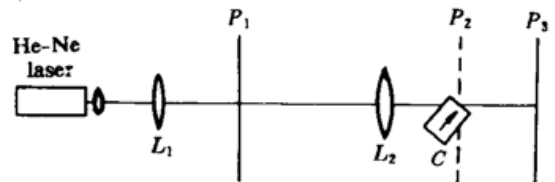


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

适当位置放置遮光板去除杂像,这时可在  $P_2$  处的屏幕上观察到边缘增强的图像。

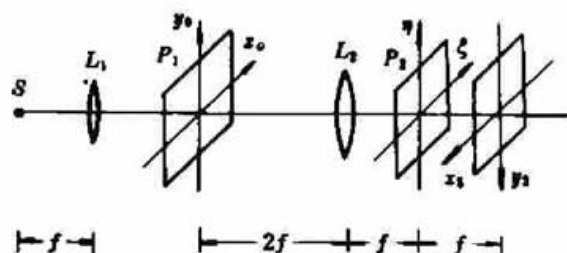


Fig. 2 Two-dimensional rectangular coordinate system on the transform plane of the coherent system

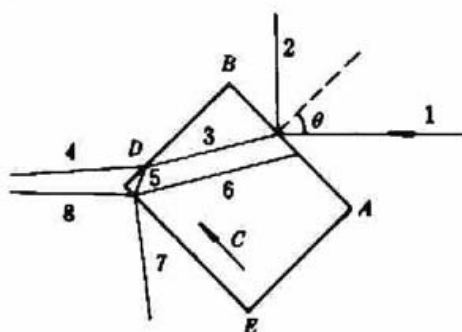


Fig. 3 Path of a beam through the crystal Cu:KNSBN

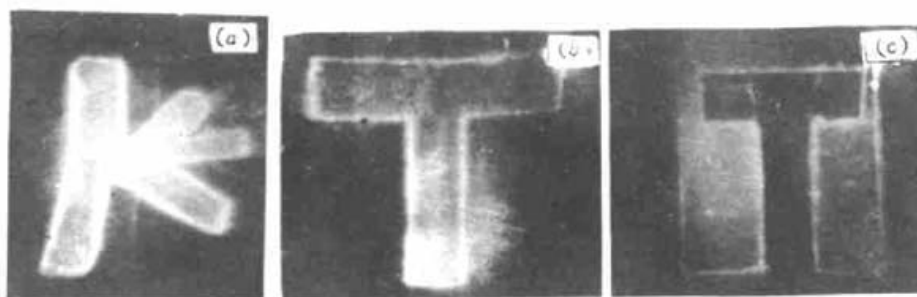


Fig. 4 Result of the experiments

本实验采用的光折变晶体 Cu:KNSBN(规格  $4 \times 4 \times 5 \text{ mm}^3$ )由山东大学晶体材料研究所提供。其光轴方向沿  $5 \text{ mm}$  边方向。实验中晶体置于水平载物台上,光轴  $c$  与水平面平行。当入射角  $\theta$  约为  $43^\circ$  时,晶体内外可观察到的光束如图 3 所示。

## 2.2 实验结果

实验结果用 135 胶卷直接曝光记录。图 4 是实验结果的放大照片。其中与照片 (a) 相应的物是图样内部透光的掩膜;与 (b) 相应的物是透光的 T 字,与 (c) 相应的物是不透光的 T 字(加上边框)。

由图 4 照片可观察到与低频成分相关的均匀透光部分被明显地削弱,而与高频成分相关的图像边缘部分被明显地增强。可见该实验实现了图像增强。

## 3 理论

### 3.1 透镜成像的变换

如图 5,  $E_1$ ,  $E_2$  分别为透镜  $L$  的入射光瞳面和出射光瞳面。 $F$  为透镜  $L$  的后焦面,设位于  $O$  处的物体(距  $E_1$  为  $d$ )的振幅分布为  $g_A(x_0, y_0)$ ,则  $E_1$  面的振幅分布  $g_A(x, y)$  与  $O \rightarrow E_1$  的非涅耳变换相当,则<sup>[3]</sup>

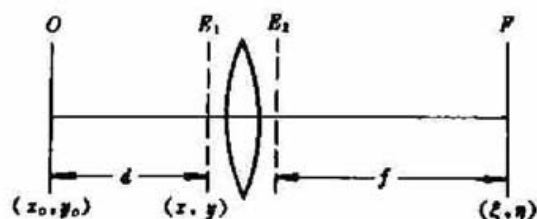


Fig. 5 Optical transform planes of a lens

$$g_{A_1}(x, y) = C \exp(jkd) \iint_{-\infty}^{+\infty} g_{A_0}(x_0, y_0) \exp\left[2\pi j \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2d\lambda}\right] dx_0 dy_0$$

$$= C g_{A_0}(x, y) * \exp\left\{2\pi j \frac{x^2 + y^2}{2d\lambda}\right\}$$

于是  $g_{A_1}(x, y)$  在  $F$  面的振幅分布为<sup>[3]</sup>

$$U_A(l, m) = C \exp\left[jk \frac{\xi^2 + \eta^2}{2f} \left(1 - \frac{d}{f}\right)\right] G_{A_0}\left(\frac{l}{\lambda}, \frac{m}{\lambda}\right) \quad (1)$$

在透镜焦面上以焦点为原点的直角坐标系  $(\xi, \eta)$  中, 有

$$l = \xi/f, \quad m = \eta/f$$

以及空间频率

$$u = \xi/\lambda f, \quad v = \eta/\lambda f$$

于是式(1)可表示为

$$U_A(u, v) = C \exp\left[\frac{jk}{2f} \lambda^2 f^2 (u^2 + v^2) (1 - d/f)\right] G_{A_0}(u, v)$$

$$= C \exp\left[\frac{jf}{2k} (2\pi)^2 (u^2 + v^2) (1 - d/f)\right] G_{A_0}(u, v) \quad (2)$$

式中  $G_{A_0}(u, v)$  为物体振幅分布的傅里叶变换。

令  $d = 2f$ , 则由(2)得

$$U_A(u, v) = C \exp\left[-\frac{jf}{2k} (2\pi)^2 (u^2 + v^2)\right] G_{A_0}(u, v) \quad (3)$$

### 3.2 光折变晶体的相位复共轭效应

如图3, 设晶体顶角  $B$  处于透镜  $L_2$  的焦点附近, 会聚光束1入射到  $AB$  面, 且其中心轴与晶体表面  $AB$  的法线成  $\theta$  角。适当调整入射点位置以及入射角  $\theta$ , 使光束3以较大的入射角射向  $BD$  面, 且会聚在  $BD$  面上。这时光线在晶体内由于相邻表面的反射而产生自泵浦的相位共轭波<sup>[4]</sup>且迭加在泵浦波上。当入射  $BD$  的入射角大于临界角时, 泵浦波遵守反射定律而发生全反射从而形成光束5和6, 7, 而相位共轭波不遵守反射定律, 其中后向共轭波沿原路返回, 而前向共轭波遵守折射定律透过  $BD$  形成光束4而在像平面  $P_3$  上成像。与此同时, 与光束3平行的光束6中也产生相位共轭波受  $AB$  面反射沿原路返回后透过  $DE$  形成光束8也在像平面上成像。光束8的存在证明位相共轭效应的存在。这时在屏幕上可观察到两个有所平移的增强像。利用光阑去掉光束8就可得到所需的实验结果。在光路1中放置半反半透镜可以证实后向共轭波的存在。这时可观察到正立的输入图像的像。但如果用普通反射镜代替晶体反射光束1, 则在  $P_1$  平面可观察到倒立的输入图像的像。可见在这里晶体起着与普通反射镜不同的共轭镜的作用, 从而进一步证实位相共轭效应的存在。

设入射在  $BD$  面的光振幅分布由式(3)表示, 则由于自泵浦复相位共轭效应, 透过  $BD$  面的共轭波振幅分布(频谱)为

$$F(u, v) = U_A^*(u, v) = C \exp\left[\frac{jf}{2k} (2\pi)^2 (u^2 + v^2)\right] G_{A_0}^*(u, v) \quad (4)$$

其中  $*$  表示复共轭。

### 3.3 频域综合

当使用相干光照明时, 可以直接改变变换透镜后焦面上的振幅透过率来综合所需要的滤

波运算。文献[2]给出实现同一运算的两种相干系统的光路图,并且论证了在频率平面上的滤波器振幅透过率相同时,两系统输出强度分布相同。本实验采用文献[2]的相干系统(b),在这里透镜  $L_2$  同时履行傅里叶变换和重新成像这两种操作,而晶体则起着改变频谱和滤波器两种作用。

把式(4)按级数展开,得

$$\begin{aligned} F(u, v) &= C \left[ 1 + \frac{jf}{2k} (2\pi)^2 (u^2 + v^2) + \frac{1}{2} \left( \frac{jf}{2k} \right)^2 (2\pi)^4 (u^2 + v^2)^2 + \dots \right] G_{\lambda_0}^*(u, v) \\ &= C G_{\lambda_0}^*(u, v) + \frac{Cf}{j2k} (-4\pi^2) (u^2 + v^2) G_{\lambda_0}^*(u, v) + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

其中第一项正比于物体频谱的共轭,第二项正比于物频谱的共轭乘以拉普拉斯算子,第三项以后相应为一系列高阶微分算子乘以物频谱的共轭。在不考虑图像的高阶微分时,在高频情况下,第二项绝对值远大于第一项,因此高频成分得到增强。

由相位复共轭光学可知,实现相位复共轭作用在数学上等价于对复空间振幅进行复共轭运算;相位复共轭波等价于时间反演波。从点光源发射的发散光束,经共轭镜反射后,形成一会聚共轭光束,此光束精确地沿入射光的路径返回,因此按时间反演的定义,它返回到原始点光源处。可见,经晶体共轭镜反射的相位共轭波沿原始波反向通过透镜返回原始输入图像处。也就是说,相位共轭波经历了一次傅里叶变换得到物体原像。而对于原始波来说,这必须经历一次逆傅里叶变换,因此相位共轭波的傅里叶变换等效于原始波的逆傅里叶变换。同理,透射的相位共轭波的逆傅里叶变换等效于原始波的傅里叶变换,因此求式(5)前二项的傅里叶逆变换可在像平面  $P_3$  的反射坐标系  $(x_3, y_3)$  中得到

$$\begin{aligned} f(x_3, y_3) &= C_3 g_{\lambda_0}^*(x_0, y_0) + C_4 \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) g_{\lambda_0}^*(x_0, y_0) \\ &= C_3 g_{\lambda_0}(x_0, y_0) + C_4 \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) g_{\lambda_0}(x_0, y_0) \end{aligned} \quad (6)$$

其中已应用了傅里叶变换的共轭关系以及  $g_{\lambda_0}(x_0, y_0)$  为实数的事实。即在不考虑图像高阶微分的情况下,在像平面  $P_3$  输出较弱的物体像以及较强的物体二阶偏微分像。由于式(5)的第二项比第一项大得多(在高频情况下),因此在  $P_3$  平面可观察到边缘明显增强的物体的像(倒像)。

在实验中可观察到,尽管透射的相位共轭波的能量仅占入射能量的小部分<sup>[5]</sup>,但这些能量集中在高频部分仍可得到对比度较大的边缘增强像。

## 4 结束语

在实验中我们还观察到:(1)在多种入射方位都可观察到边缘增强像,但强度有差别。这是由于在不同方位入射情况下晶体中位相共轭程度不同所致。经细致实验可找出最佳方位;(2)当物体绕相干系统的光轴旋转时,增强像整体也随之旋转。

正如文献[2]指出,  $P_1$  平面与透镜距离为  $2f$  并不重要,只要求  $P_1$  平面和  $P_3$  平面满足透镜定律即可。在实验中当  $d \neq 2f$  时也可观察到同样现象,而且可通过调节  $d$  来改变增强像的大小。

综上所述,利用置于相干光学系统光路中的光折变晶体产生相位共轭效应,从而在频谱面上形成拉普拉斯算子,结合相位共轭波的时间反演性质,从而实现图像增强处理。

## 参 考 文 献

- 1 李月景. 图像识别技术及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1985. 273~275
- 2 J. W. 顾德门 著, 詹达三等译. 傅里叶光学导论. 北京: 科学出版社, 1979. 189~190
- 3 辻内顺平, 村田和美 等编, 谈恒英 译. 光学信息处理. 北京: 机械工业出版社, 1985. 4, 34~35
- 4 过巳吉. 无源相位共轭技术. 中国激光, 1994, A21(5): 426
- 5 唐九耀, 华 诚. BaTiO<sub>3</sub> 晶体自泵浦相位共轭中的透射效应. 光学学报, 1993, 13(5): 407
- 6 范琦康, 吴存恺, 毛少卿. 非线性光学. 江苏: 江苏科学出版社, 1989. 172~173

## Image Enhancement by Using a Photorefractive Crystal Cu : KNSBN

Zheng Guangzhao

*(Guangdong University of Technology, Guangzhou 510643)*

**Abstract** The enhancement processing is performed by using a photorefractive crystal Cu : KNSBN placed on the Fourier transform plane of a coherent system under certain conditions. A Laplacian operator is formed on the transform plane because of the phase conjugation effect inside the crystal. Experimental result and a brief theoretical analysis are presented.

**Key words** image enhancement, photorefractive crystal, Fourier transform, Laplacian operator