

# 部分相干光经单缝衍射后的光谱变化\*

饶连周<sup>1,2</sup>, 渠彪<sup>2</sup>, 陈子阳<sup>2</sup>, 蒲继雄<sup>2, \*\*</sup>

(1 三明学院 物理与机电工程系, 福建三明 365004)

(2 华侨大学 电子科学与技术系, 光学与光子学研究所, 福建泉州 362021)

**摘 要:**从几何成像规律和交叉谱密度函数的传输定律出发, 从理论和实验两方面研究多色谢尔模型光束经单缝衍射后光场的光谱变化现象. 理论研究结果表明: 部分相干光谱经单缝衍射后, 在衍射光场的某些点, 光谱相对于光源的光谱往短波方向移动, 即为蓝移; 而在衍射光场的另一些点, 光谱呈现红移. 实验结果与理论结果符合得很好.

**关键词:**光谱变化; 部分相干光; 聚焦透镜

中图分类号: O433

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)03-0467-4

## 0 引言

在光谱分析中, 人们一直以来都认为光源发出的光场在传输过程中, 其归一化光谱是保持不变的. 直到 1986 年, Wolf 教授<sup>[1]</sup>首次从理论上证明: 只有当准均匀光源的光谱相干度满足定标定律(Scaling Law)时, 光源发出的光在传输过程中, 其归一化光谱才会保持不变. 如果光源不满足定标定律, 由该光源所产生的光即使在自由空间中传播时, 其归一化光谱也将产生变化. 这种由光源相关性引起的光谱变化现象被称之为相关诱导光谱变化(Correlation-induced Spectral Changes). 国内外的许多学者对此进行了大量深入的研究<sup>[2-15]</sup>. 近年来的研究表明, 当部分相干光经光阑衍射后, 光场的归一化光谱也会发生变化. 这种由衍射效应引起的光谱变化现象, 称之为衍射诱导光谱变化(Diffraction-induced Spectral Changes).

本文从几何成像规律和交叉谱密度函数的传输定律出发, 研究了几何成像系统中多色谢尔模型光束经单缝衍射后的归一化光谱特性. 理论研究结果表明, 衍射光场的归一化光谱既可以呈现蓝移也可以呈现红移, 这由观测点位置确定. 光谱实验结果进一步证实了衍射光场归一化光谱的光谱变化现象, 并与理论计算结果符合的很好. 此外, 通过改变单缝缝宽, 比较所得实验结果可以得出, 单缝缝宽越小, 光谱变化现象越明显.

## 1 实验装置和理论分析

本实验所采用的实验装置如图 1. 主光源 S 为一 250 W 的卤钨灯. 紧靠主光源 S 依次放置一个

毛玻璃 D 和一个单缝 A<sub>1</sub> (平面 I), 则在单缝 A<sub>1</sub> 处形成的光场为宽光谱均匀光场. 单缝缝宽为 a = 0.15 mm, 在实验过程中为一恒定值. 将一消色差透镜放置在距离单缝 A<sub>1</sub> 后 2f 处, f = 0.15 m 为透镜焦距. 在透镜后 2f 处再放置一个单缝 A<sub>2</sub> (平面 II). 这样, 单缝 A<sub>1</sub> 在单缝 A<sub>2</sub> 处将形成一个大小相等倒立的实像. 本实验用光纤光谱仪 (HR2000, Ocean Optics) 测量光谱, 其光纤探头放置在单缝 A<sub>2</sub> 后距离 z = 0.2 m 处 (平面 III), 并将测量结果保存在计算机上.

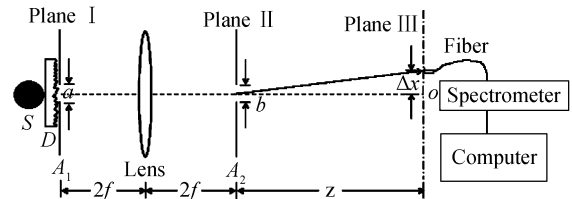


图 1 光谱测量实验装置图

Fig. 1 Schematics of the experimental setup for measuring spectrum

首先, 将平面 I、II 和 III 处的坐标分别设定为 (x'', y''), (x', y') 和 (x, y), 坐标原点 o 设在光轴上. 如图 1, 几何成像系统中入射面 (平面 I) 处和出射面 (平面 II) 处的电场强度可表示为<sup>[16]</sup>

$$E'(x'_1, y'_1) = \frac{\exp(-ikl)}{A} E''\left(\frac{x'_1}{A}, \frac{y'_1}{A}\right) \cdot \exp\left[-i \frac{kC}{2A}(x'^2_1 + y'^2_1)\right] \quad (1)$$

式中, E'(x', y') 和 E''(x'', y'') 分别为平面 II 和平面 I 处的电场强度, l 为沿光轴的传播距离, A 和 C 为光学系统的光线变换矩阵的矩阵元, k 为波数. 根据式(1), 平面 II 处光场的交叉谱密度函数为

$$W'(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2, \omega) = \langle E^*(x'_2, y'_2) E(x'_1, y'_1) \rangle = \frac{1}{A^2} \exp\left\{-i \frac{kC}{2A}[(x'^2_1 + y'^2_1) - (x'^2_2 + y'^2_2)]\right\} \cdot W''\left(\frac{x'_1}{A}, \frac{y'_1}{A}, \frac{x'_2}{A}, \frac{y'_2}{A}, \omega\right) \quad (2)$$

\* 国家自然科学基金(60477041)、福建省自然科学基金(A0510018)和福建省教育厅科技项目(JA06048)资助

\*\* Email: jixiong@hqu.edu.cn

收稿日期: 2006-02-28

式中, \* 表示复共轭,  $\langle \rangle$  表示系综平均,  $W''(x'', y'', x'', y'', \omega)$  为平面 I 处的交叉谱密度函数. 对于几何成像系统, 入射面(平面 I)与出射面(平面 II)间光线变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & -1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中,  $B=0$  为成像条件,  $f$  为透镜的焦距. 将式(3)代入式(2), 可以得到平面 II 处光场的交叉谱密度函数为

$$W'(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2, \omega) = \exp \left\{ -i \frac{k}{2f} [(x_1'^2 + y_1'^2) - (x_2'^2 + y_2'^2)] \right\} W''(-x'_1, -y'_1, -x'_2, -y'_2, \omega) \quad (4)$$

对式(4)的交叉谱密度函数进行归一化, 则平面 II 处光场的光谱相干度可表示为

$$\mu'(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2, \omega) = \frac{W'(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2, \omega)}{\sqrt{S'(x'_1, y'_1)} \sqrt{S'(x'_2, y'_2)}} = \exp \left\{ -i \frac{k}{2f} [(x_1'^2 + y_1'^2) - (x_2'^2 + y_2'^2)] \right\} \cdot \mu''(-x'_1, -y'_1, -x'_2, -y'_2, \omega) \quad (5)$$

式中,  $\mu''(x'', y'', x'', y'', \omega)$  为平面 I 处的光谱相干度. 从式(5)可以看出, 式中的指数项将二次方的改变光谱相干度. 该项不仅与平面 II 处两相关点的相对位置有关, 还与它们的绝对位置有关. 这显然违背了定标定律<sup>[1]</sup>.

根据部分相干光传输理论, 交叉谱密度函数通过近轴 ABCD 光线系统的传输满足<sup>[17]</sup>

$$W(x_1, y_1, x_2, y_2, z, \omega) = \left( \frac{k}{2\pi B'} \right)^2 \iiint W'(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2, 0, \omega) \exp \left\{ -\frac{ik}{2B'} [A'(x_1'^2 + y_1'^2) - 2(x_1 x'_1 + y_1 y'_1) + D'(x_2'^2 + y_2'^2) - (A'(x_2'^2 + y_2'^2) - 2(x_2 x'_2 + y_2 y'_2) + D'(x_2'^2 + y_2'^2))] \right\} dx'_1 dy'_1 dx'_2 dy'_2 \quad (6)$$

式中,  $A'$ 、 $B'$  和  $D'$  为平面 II 到平面 III 之间光线变换矩阵的矩阵元.

鉴于在本实验中光场沿单缝长边方向( $y$ 轴)可视为是均匀的, 可将光场视为只是变量  $x$  的函数, 可将式(6)中的  $y$  轴分量忽略, 即只考虑一维情况. 式(6)变为

$$W(x_1, x_2, z, \omega) = \left( \frac{k}{2\pi B'} \right) \iint W'(x'_1, x'_2, 0, \omega) \cdot \exp \left\{ -\frac{ik}{2B'} [A'(x_1'^2 - x_2'^2) - 2(x_1 x'_1 - x_2 x'_2) + D'(x_1'^2 - x_2'^2)] \right\} dx'_1 dx'_2 \quad (6')$$

式(4)简化为

$$W'(x'_1, x'_2, \omega) = \exp \left[ -i \frac{k}{2f} (x_1'^2 - x_2'^2) \right] \cdot W''(-x'_1, -x'_2, \omega) \quad (4')$$

为进行数值计算, 假定入射光为多谢尔模型光束, 并将交叉谱密度函数视为波长  $\lambda$  的函数. 则平面 I 处的交叉谱密度函数为

$$W''(x''_1, x''_2, \lambda) = S(\lambda) \exp \left[ -\frac{(x''_1 - x''_2)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (7)$$

式中

$$S(\lambda) = S_0 \exp \left[ -\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\Gamma^2} \right] \quad (8)$$

为平面 I 处的光源光谱,  $S_0$  为常量,  $\Gamma$  为光谱半宽度,  $\sigma$  为相关长度(即与波长无关),  $\lambda_0$  为源光谱中心波长.

从平面 II 到平面 III 的光线变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中  $z$  为平面 II 与平面 III 间的距离.

将式(4')、(7)、(8)和(9)代入式(6'), 并令  $x_1 = x_2 = x$ , 可以得到平面 III 处的光谱强度为

$$S(x, z, \lambda) = W(x_1 = x_2 = x, z, \lambda) = S_0 \left( \frac{1}{\lambda z} \right) \cdot \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-b/2}^{b/2} \exp \left[ -\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\Gamma^2} \right] \exp \left[ -\frac{(x'_1 - x'_2)^2}{2\sigma^2} \right] \cdot \exp \left[ -\frac{i\pi}{\lambda f} (x_1'^2 - x_2'^2) \right] \exp \left\{ -\frac{i\pi}{\lambda z} [(x_1'^2 - x_2'^2) - 2x(x'_1 - x'_2)] \right\} dx'_1 dx'_2 \quad (10)$$

式中  $b$  为单缝  $A_2$  的缝宽.

## 2 数值计算结果

利用式(10), 平面 III 处光场的归一化光谱的数值计算结果如图 2. 采用的数值计算软件为 Mathematics 5.1; 计算参量为:  $\lambda_0 = 574.5 \text{ nm}$ ,  $\Gamma = 0.3\lambda_0 = 172.4 \text{ nm}$ ,  $z = 0.2 \text{ m}$ ,  $f = 0.15 \text{ m}$ ,  $\sigma = 0.003 \text{ mm}$ ,  $a = 0.15 \text{ mm}$ ,  $b = 0.1 \text{ mm}$ . 图 2 中点线为归一化光源光谱, 实线为轴上点( $x=0$ )处光场的归一化光谱. 由图 2 可以看出, 轴上点( $x=0$ )处光场的归一化光谱的中心波长为  $0.9\lambda_0$ . 与源光谱相比, 归一化光谱中心波长向短波长方向移动, 光谱位移为蓝移. 划线为  $x=4 \text{ mm}$  处光场的归一化光谱曲线, 其中心波长变为  $0.95\lambda_0$ , 光谱位移仍然为蓝移. 点划线为  $x=8 \text{ mm}$  处光场的归一化光谱曲线, 其中心波长变为  $1.05\lambda_0$ . 与源光谱相比, 归一化光谱中心波长向长波长方向移动, 光谱位移变为红移. 从图 2 可以看出, 几何成像系统中部分相干光经单缝衍射后, 光场的归一化光谱既可以呈现蓝移也可以呈现红移, 随

观测点位置的改变而发生变化. 实验结果表明,部分相干光经单缝衍射后,其归一化光谱既可以呈现蓝移,也可以呈现红移,这随观测点位置的改变而改变. 这与理论计算结果符合的很好.

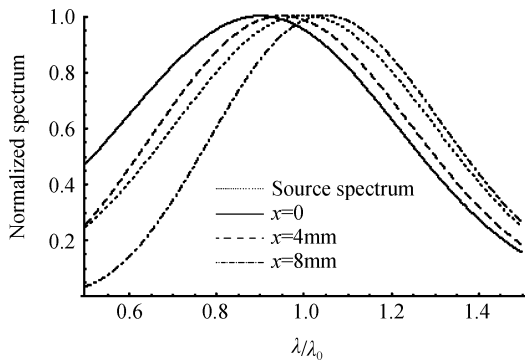


图2 平面Ⅲ处衍射光场的归一化光谱(数值计算结果)  
Fig. 2 The normalized spectra of light on plane Ⅲ for three (the results of numerical calculations)

### 3 实验结果

实验装置的参量与数值计算参量一致. 图3曲线即为平面Ⅰ和平面Ⅲ上光场的归一化光谱. 点线为平面Ⅰ处光源的归一化光谱,其中心波长为 $\lambda_0 = 574.5$  nm,光谱半宽度为 $\Gamma = 172.0$  nm. 实线为平面Ⅲ处轴上点( $\Delta x = 0$ ,  $\Delta x$ 为平面Ⅲ处观测点到光轴的距离)光场的归一化光谱,其中心波长为571.6 nm. 与源光谱中心波长(574.5 nm)相比,归一化光谱中心波长向短波长方向移动,光谱位移为蓝移. 划线为 $\Delta x = 4$  mm处光场的归一化光谱,其中心波长为567.6 nm,光谱位移仍然为蓝移. 点划线为 $\Delta x = 8$  mm处光场的归一化光谱,其中心波长变为627.0 nm,中心波长向长波长方向移动,光谱位移变为了红移. 比较图2和图3,得出实验结果与理论计算结果符合的很好.

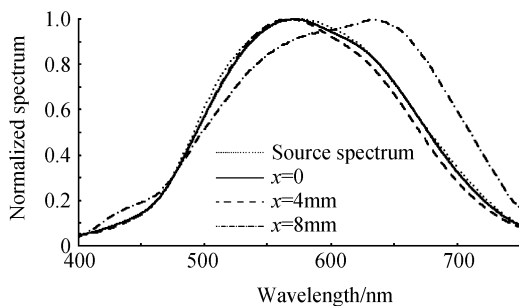


图3 平面Ⅲ处衍射光场的归一化光谱(实验测量结果)  
Fig. 3 The normalized spectra of light at three points on plane Ⅲ (experimental results)

图4为单缝缝宽分别为 $b = 0.1$  mm、 $0.15$  mm和 $0.2$  mm时,归一化光谱中心波长随观测点位置 $\Delta x$ 变化的曲线,分别用实线、划线和点划线表示. 可以看出,对于三种不同的缝宽,轴上点( $\Delta x = 0$ )光

谱均为蓝移,并且在 $\Delta x$ 逐渐增加的过程中,归一化光谱均由蓝移逐渐变为红移. 当 $\Delta x = 6$  mm时,归一化光谱均为红移. 比较三条曲线,可知单缝缝宽越小,光谱变化现象越明显.

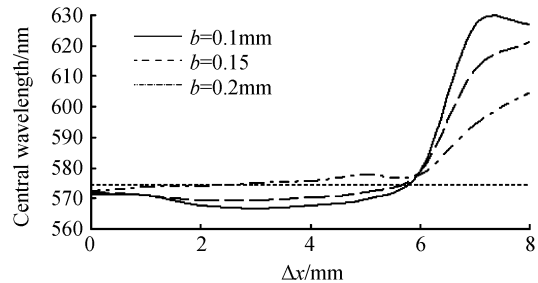


图4 中心波长随观测距离的变化  
Fig. 4 The central wavelength as a function of the observation distance

### 4 结论

本文从几何成像规律和交叉谱密度函数的传输定律出发,研究了几何成像系统中,多色谢尔模型光束经单缝衍射后光场的光谱位移现象. 数值计算结果表明,在轴上点位置处衍射光场的归一化光谱呈现光谱蓝移现象. 在轴外点处光谱既可以呈现蓝移也可以呈现红移,由观测点位置确定. 相同参量下的光谱实验证实了部分相干光经单缝衍射后的光谱蓝移和光谱红移现象,并取得了与理论计算结果相符合的实验结果. 此外,通过改变单缝缝宽,比较所得实验结果可以得出,单缝缝宽越小,光谱变化现象越明显.

#### 参考文献

- [1] WOLF E. Invariance of the spectrum of light on propagation [J]. *Phys Rev Lett*, 1986, **56**(13):1370-1372.
- [2] WOLF E. Non-cosmological redshifts of spectral lines [J]. *Nature*, 1987, **326**(26):363-365.
- [3] WOLF E, JAMES D F V. Correlation-induced spectral changes [J]. *Rep Prog Phys*, 1996, **59**(6):771-818.
- [4] FOLEY J T, WANG M. A Theoretical analysis of the coherence-induced spectral shift experiments of Kandpal, Vaishya, and Joshi [J]. *J Res Natl Inst Stand Technol*, 1994, **99**(3):267-280.
- [5] PU J, ZHANG H, NEMOTO S. Spectral shifts and spectral switches of partially coherent light passing through an aperture [J]. *Opt Commun*, 1999, **162**(1-3):57-63.
- [6] PU J, NEMOTO S. Spectral changes and spectral switches in the diffraction of partially coherent light by an aperture [J]. *J Opt Soc Am A*, 2002, **19**(2):339-344.
- [7] PAN L, LÜ B. The spectral switch of partially coherent light in Young's experiment [J]. *IEEE J Quant Electron*, 2001, **37**(11):1377-1381.
- [8] CAI Y, LIN Q. Spectral shift of partially coherent twisted anisotropic Gaussian Schell-model beams in free space [J]. *Opt Commun*, 2002, **204**(1-6):17-23.

- [9] MORRIS G M, FAKLIS D. Effects of source correlation on the spectrum of light[J]. *Opt Commun*, 1987, **62**(1): 5-11.
- [10] FAKLIS D, MORRIS G M. Spectral shifts produced by source correlation[J]. *Opt Lett*, 1988, **13**(1): 4-6.
- [11] GORI F, GUATTARI G, PALMA C. Observation of optical redshifts and blueshifts produced by source correlation[J]. *Opt Commun*, 1988, **67**(1): 1-4.
- [12] KANDPAL H C, WASAN A, VAISHYA J S. Spectroscopy of partially coherent fields at geometrical-image plane and Fourier transform plane of a lens[J]. *Opt Commun*, 1998, **149**(1-3): 1-7.
- [13] LIN Z, GU Z. Angular spectrum redistribution from a real image of a light as a secondary source. *Opt Lett*, 2001, **26**(10): 663-665.
- [14] 冯建武, 赵志国. 部分相干光通过透镜-光阑分离系统的光谱特性[J]. *光子学报*, 2002, **31**(11): 1363-1367.
- FENG Jian-wu, ZHAO Zhi-guo. Spectral of partially coherent light passing through an aperture-lens separation system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(11): 1363-1367.
- [15] 蔡超, 蒲继雄. 部分相干光被色差透镜聚焦的光谱异常现象[J]. *光子学报*, 2004, **33**(12): 1456-1460.
- CAI Chao, PU Ji-xiong. Phenomena of spectral anomalies of partially coherent light focused by a lens with chromatic aberration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12): 1456-1460.
- [16] YARIV A. Imaging of coherent fields through lenslike systems[J]. *Opt Lett*, 1994, **19**(20): 1607-1608.
- [17] MANDEL L, WOLF E. Optical coherence and quantum optics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

## The Spectral Changes of Partially Coherent Light Diffracted by a Slit

RAO Lian-zhou<sup>1,2</sup>, QU Biao<sup>2</sup>, CHEN Zi-yang<sup>2</sup>, PU Ji-xiong<sup>2</sup>

(1 Department of Physics and Electromechanical Engineering, Sanming University, Sanming Fujian 365004, China)

(2 Department of Electronic Science & Technology, Institute of Optics and Photonics, Huaqiao University, Quanzhou Fujian 362021, China)

Received date: 2006-02-28

**Abstract:** Starting from the geometrical-imaging law and the propagation law of the cross-spectral density function, the phenomena of spectral changes of polychromatic Schell-model beams diffracted by a slit were theoretically and experimentally investigated. The theoretical results show that, compared to the source spectrum, the normalized spectrum in some points of the diffracted field is blueshifted, and in the other points of the diffracted field the normalized spectrum is redshifted. It is shown that the experimental results are consistent with the theoretical ones.

**Key words:** Spectral changes; Partially coherent light; Focusing lens



**RAO Lian-zhou** was born in 1962. He received the diploma in physics from Fujian Normal University in 1983. He is now an associate professor in Sanming University. His research interests include coherent light, propagation of beams and photoelectric technology.