

文章编号: 1000-5013(2008)04-0510-04

部分相干光经两个级联单缝衍射后的 光谱变化及光谱开关现象

舒建华, 刘永欣, 陈子阳, 蒲继雄

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 研究多色高斯-谢尔模型光束经两个单缝衍射后, 其光谱变化及光谱开关现象. 利用复高斯函数展开法, 得到经两个单缝衍射后的衍射场中的交叉谱密度及光强表达式. 通过数值计算, 研究衍射场中轴上点和横截面处的光谱变化和光谱开关现象, 以及相干长度对观察点光谱的影响. 结果表明, 对于随着传输距离的增加, 轴上观察点将出现一些由“红移”到“蓝移”再到“红移”的变化过程. 对于某一个横截面, 轴上点的光谱变化及光谱开关现象最明显; 随着观察点离轴距离的增加, 光谱变化将减小.

关键词: 多色部分相干光; 光谱开关; 级联单缝衍射; 高斯-谢尔模型光束

中图分类号: O 436

文献标识码: A

1986 年, Wolf^[1] 指出, 由准均匀光源发出的光在传输中, 只有当其光谱相干度满足所谓的定标定律, 在传输过程中归一化光谱才保持不变. 进一步的研究表明, 即使当光源的光谱相干度满足定标定律, 光阑的衍射也将使得归一化光谱出现变化^[2-3]. 文[4-5] 分别从实验上和理论上研究了当光谱相干度满足定标定律的部分相干光, 经双缝干涉后的光谱变化以及光谱开关现象. 此外, 相关的研究还表明, 光学系统的像差(如色差, 球差等)也会对传输中的光谱产生影响^[6-7]. 季小玲等^[8] 研究了高斯-谢尔模型光束在大气湍流中的传输特性, 研究结果发现大气湍流的影响将使得传输的光谱发生变化. 赵光普等^[9] 研究了矢量高斯-谢尔模型光束经过透镜聚焦后, 在焦平面的光谱位移以及光谱开关现象. 对于一个复杂的光学系统, 通常包含多个光学元件和光阑, 它们对激光光束起横向限制作用. 因而对激光通过复杂光学系统的研究中, 通常会遇到光束经过多个单缝的问题. 文中重点研究衍射场中不同观察点的光谱变化, 以及相干长度对观察点光谱变化的影响.

1 理论分析

图 1 为两个单缝衍射光学系统. 光束沿 z 方向传输, 两个单缝分别位于 $z = 0, z = z_1$ 的平面上, 半宽分别为 b_1, b_2 . 采用高斯-谢尔模型(GSM)光束描述的部分相干光入射, 假设 GSM 光束的束腰位于 $z = 0$ 平面处, 相应的多色 GSM 光束的交叉谱密度函数为^[10]

$$W_0(x'_1, x'_2, z = 0, \omega) = S^{(0)}(\omega) \exp\left(-\frac{x'^2_1 + x'^2_2}{w_0^2}\right) \exp\left[-\frac{(x'_1 - x'_2)^2}{2\sigma^2(\omega)}\right]. \quad (1)$$

式(1)中, $S^{(0)}(\omega) = S_0 \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\Gamma^2}\right]$ 为光源光谱, S_0 为常数, ω_0 为中心频率, Γ 为源光谱宽度, w_0 和 $\sigma(\omega)$ 分别为多色 GSM 光束的束腰宽度和相关长度, 满足定标定律定义 $\sigma(\omega) = \sigma_0 \omega_0 / \omega$.

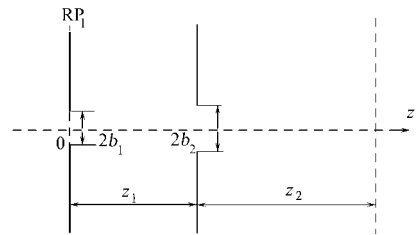


图 1 两个单缝衍射光学系统

Fig. 1 Diffracting optical system in two cascaded slits

收稿日期: 2008-01-13

作者简介: 舒建华(1955-), 男, 副教授, 主要从事光的传输的研究. E-mail: sjh@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60477041); 福建省自然科学基金资助项目(2006J0237).

用复高斯函数展开法, 可得到多色 GSM 光束经过两个单缝衍射后, 在 $z = z_1 + z_2$ 平面上的交叉谱密度函数^[11] 为

$$W_2(x_1, x_2, z, \omega) = S^{(0)}(\omega) \left(\frac{\omega}{2c}\right)^2 \frac{1}{z_1 z_2} \exp\left[-\frac{i\omega}{2cz_2}(x_1^2 - x_2^2)\right] \\ \sum_{j_1=1}^M \sum_{j_1'=1}^M \frac{F_{j_1} F_{j_1}^*}{P_1 P_2} \times \sum_{j_2=1}^M \sum_{j_2'=1}^M \frac{F_{j_2} F_{j_2}^*}{P_3 P_4} \exp\left[\left(\frac{i\omega}{2cz_2 P_3}\right)^2 x_1^2\right] \exp\left[\frac{Q_2^2}{4P_4^2}\right]. \quad (2)$$

在式(2)中, $P_1^2 = \frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{2\sigma^2} + \frac{i\omega}{2cz_1} + \frac{G_{j_1}}{b_1^2} - R_2$, $P_2^2 = \frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{2\sigma^2} - \frac{i\omega}{2cz_2} + \frac{G_{j_1}^*}{b_1^2} - R_2$, $R_1 = 0$, $R_2 = \frac{1}{4P_1^2 \sigma^4}$, $Q_1 = -\frac{i\omega}{cz_1} x_2 + S_1 x_1$, $S_1 = \frac{i\omega}{2cz_1 P_1^2 \sigma^2}$, $P_3^2 = \frac{i\omega}{2cz_2} + \frac{G_{j_2}}{b_2^2} + \frac{i\omega}{2cz_1} - \left(\frac{i\omega}{2cz_1 P_1}\right)^2 - R_3$, $P_4^2 = -\frac{i\omega}{2cz_2} + \frac{G_{j_2}^*}{b_2^2} - \frac{i\omega}{2cz_1} - \left(\frac{i\omega}{2cz_1 P_2}\right)^2 - R_4$, $R_3 = \frac{1}{P_1^2 P_2^2} \left(\frac{i\omega}{2cz_1}\right)^2 R_2$, $R_4 = \frac{1}{P_2^2 P_3^2} \left(\frac{i\omega}{2cz_1}\right)^2 R_3$, $Q_2 = -\frac{i\omega}{cz_2} x_2 + S_2 x_1$, $S_2 = -\frac{1}{P_2^2 P_3^2} \left(\frac{i\omega}{2cz_1}\right) \left(\frac{i\omega}{2cz_2}\right) S_1$, c 为真空中的光速, F_j 和 G_j 分别为展开系数和复高斯函数系数, 取值可参见文[12]. 令 $x_1 = x_2 = x$, 可得平面 z 处的光谱强度为

$$S(x, z, \omega) = W_2(x_1 = x_2 = x, \omega) = \\ S^{(0)}(\omega) \left(\frac{\omega}{2c}\right)^2 \frac{1}{z_1 z_2} \sum_{j_1=1}^M \sum_{j_1'=1}^M \frac{F_{j_1} F_{j_1}^*}{P_1 P_2} \times \sum_{j_2=1}^M \sum_{j_2'=1}^M \frac{F_{j_2} F_{j_2}^*}{P_3 P_4} \exp\left[\left(\frac{i\omega}{2cz_2 P_3}\right)^2 x^2\right] \exp\left[\frac{Q_2^2}{4P_4^2}\right]. \quad (3)$$

定义光谱位移 $\delta\omega = \omega_{\max} - \omega_0$, 则相对光谱位移定义为

$$\delta\omega/\omega_0 = [\omega_{\max} - \omega_0]/\omega_0. \quad (4)$$

式(4)中, ω_{\max} 为 $S(x, z, \omega)$ 取最大值时所对应的频率. 如果 $\delta\omega/\omega_0 > 0$ (即 $\delta\omega > 0$), 光谱称为蓝移; 相反, 如果 $\delta\omega/\omega_0 < 0$ (即 $\delta\omega < 0$), 光谱称为红移.

2 数值计算

利用 Mathematica 软件对式(3), (4) 进行数值计算, 结果如图 2~ 5 所示. 其中, 参数 $w_0 = 0.1$ mm,

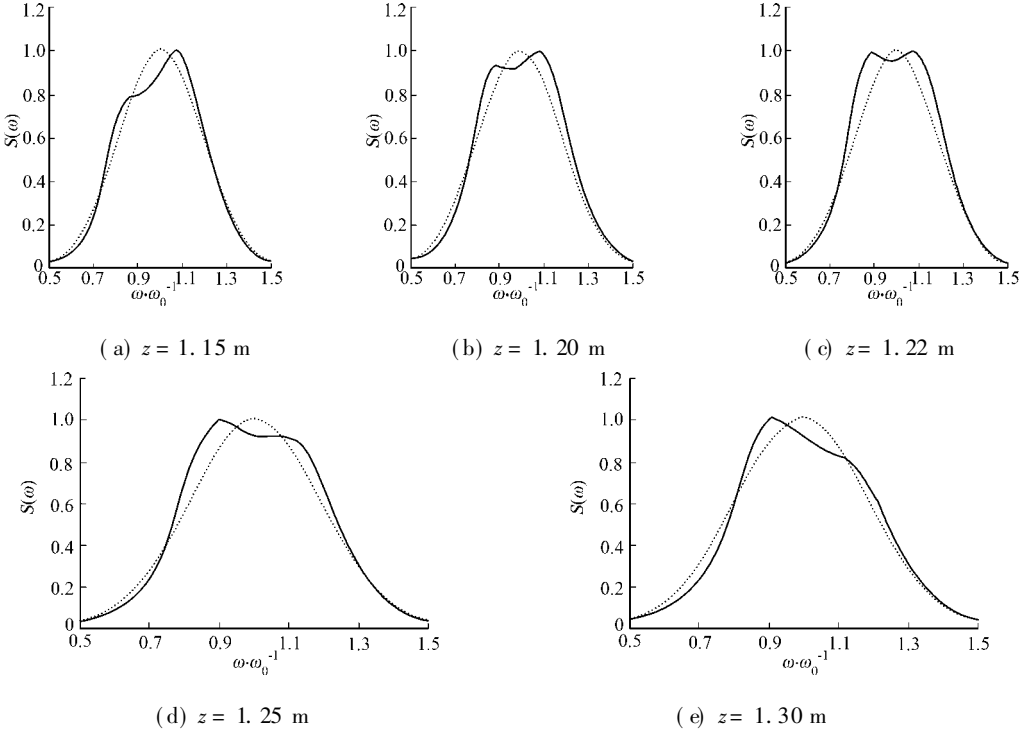


图 2 轴上点归一化光谱 $S(\omega)$

Fig. 2 Normalized spectrum $S(\omega)$ for on-axis point

$\omega_0 = 0.01$ mm, $\omega_0 = 3.2$ Prad \cdot s⁻¹, $\Gamma = 0.6$ Prad \cdot s⁻¹, $c = 0.3$ Gm \cdot s⁻¹, $b_1 = b_2 = 1$ mm, $z_1 = 0.5$ m.

图 2 中, 实线为观察点光谱表示不同 z 平面上的轴上点归一化光谱 $S(\omega) = S(0, z, \omega) / S_{\max}(0, z, \omega)$, 虚线为源光源 $z = 0$ 平面轴上点光源光谱(即源光谱). 从图 2 中可以看到, 缓慢的光谱移动到快速的光谱开关的过程. 首先是随着 z 的增大, 光谱发生蓝移. 当 $z = 1.22 \text{ m}$ 时, 两峰达到相同高度, 即随着 z 的增大将发生光谱开关, z 再继续增大, 则光谱发生红移. 这与经过一个光阑衍射后的情况大致相同, 但由于光阑数目的增加, 光谱移动与光谱开关变得不是非常明显.

图 3 是同一 z 平面上不同 x 位置处的归一化光谱 $S(\omega)$. 从图 3(a) 中可看出, 轴上点的蓝移最为显著, 随着 x 位置远离中心轴, 光谱的蓝移量将逐渐减小, 蓝移现象逐渐消失. 从图 3(b) 中可以看出, 轴上点的光谱分裂最明显, 双峰之间的凹陷最深. 而且, 随着观察离轴距离的增加, 凹陷将变浅, 并且当离轴距离达到一定大小时, 将不再出现凹陷. 可见, 轴上点的光谱开关也比轴外点明显.

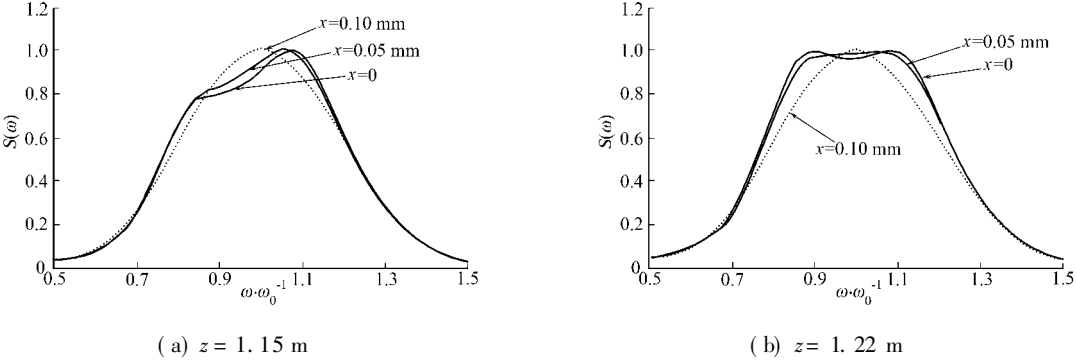


图 3 同一平面的归一化光谱 $S(\omega)$

Fig. 3 Normalized spectrum $S(\omega)$ for the different observation points in the same z plane

图 4 是不同相干长度参量 $\alpha(\alpha = \alpha_0/w_0)$ 时, 轴上点的相对光谱位移随 z_2 的变化. 从图 4 中可看出, 随着传输距离的增大, 光谱将出现一系列由“红移”变化到“蓝移”, 再由“蓝移”变化到“红移”的过程. 当相干长度参量 α 取值为 0.1 时, 在 $z = 0.73 \text{ m}$ 处, 有一个快速的由“蓝移”变化到“红移”的现象, 即光谱开关. 此外, 从图 4 中还可看出, 对于某一个固定观察点, 对于不同的相干长度光谱移动不同. 如在 $z = 1.2 \text{ m}$ 处, 当相干长度参量 α 为 2.0 时, 光谱出现“蓝移”, 蓝移量为 0.008; 而当相干长度参量 α 为 1.0 时, 光谱也出现了“蓝移”, 但蓝移量变小, 取值为 0.002; 当相干长度参量 α 为 0.1 时, 光谱则出现了“红移”现象, 红移量大小为 0.008.

两个单缝之间的距离对相对光谱移动的影响, 如图 5 所示, 其中, 横坐标为场点与第 1 个单缝之间的距离 $z(z = z_1 + z_2)$. 从图 5 中可以看出, 两个缝之间的距离 z_1 的取值越大, 则出现光谱开关所对应的

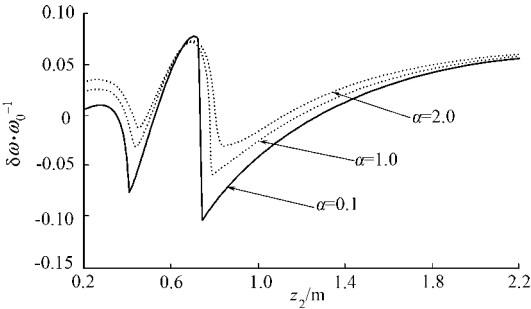


图 4 轴上点的相对光谱位移随 z_2 的变化

Fig. 4 The on-axis relative spectral shift versus z_2

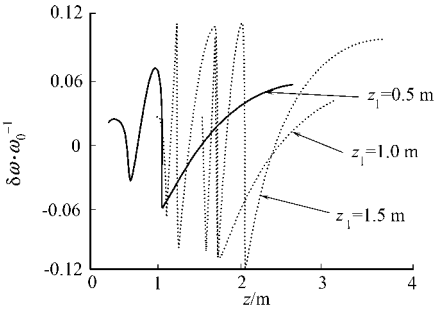


图 5 单缝间距对相对光谱移动的影响

Fig. 5 The influence of the distance between slits on the relative spectral shift

位置离第 1 个单缝所在位置的距離也越大.

3 结束语

以高斯-谢尔模型光束为例, 详细研究了在衍射场中的光谱变化现象, 并重点研究了轴上点和横截面上的观察点的光谱变化, 以及相干长度对观察点光谱的影响. 研究结果表明, 对于随着传输距离的增

加,轴上观察点将出现一些由“红移”到“蓝移”再到“红移”的变化过程.研究的结果对高精度的光谱测量有一定的指导意义.

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] LÜ B D, PAN L Z. Spectral switching of Gaussian-Schell model beams passing through an aperture lens[J]. IEEE J of Quant Electron, 2002, 38(4): 340-344.
- [3] 饶连周, 陈子阳, 蒲继雄. 部分相干光束经刀边衍射产生的光谱变化[J]. 量子电子学报, 2007, 24(1): 22-26.
- [4] PAN L Z, LÜ B D. The spectral switch of partially coherent light in Young's experiment[J]. IEEE J of Quant Electron, 2001, 37(11): 1377-1381.
- [5] 张国文, 蒲继雄, 渠 彪. 杨氏双缝实验中的光谱位移和光谱开关[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2008, 29(2): 194-197.
- [6] XIAO X, LÜ B D. Spectral changes in polychromatic Gauss-Schell-model beams passing through a spherically aberrated lens[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(4): 542-546.
- [7] 赵光普, 肖 希, 吕百达. Effect of astigmatism on the spectral switches of partially coherent beams[J]. 中国物理: 英文版, 2004, 13(12): 2064-2070.
- [8] JI X L, ZHANG E T, LÜ B D. Changes in the spectrum of Gaussian Schell-model beams propagating through turbulent atmosphere [J]. Opt Commun, 2006, 259(1): 1-6.
- [9] ZHAO G P, PENG Y J, LÜ B D. Spectral changes of vector Gaussian Schell-model beams passing through an aperture lens[J]. Opt Las Tec, 2006, 38: 101-106.
- [10] CARTER W H, WOLF E. Coherence and radiometry with quasi-homogeneous planar sources [J]. Journal of the Optical Society of America, 1977, 67: 785-796.
- [11] 季小玲, 吕百达. 部分相干光通过多个硬边光阑 ABCD 光学系统传输的快速算法[J]. 中国激光, 2004, 31(6): 681-686.
- [12] WEN J J, BREAZEALE M A. A diffraction beam field expressed as the superposition of Gaussian beams[J]. J Acoust Soc Am, 1988, 83(5): 1752-1756.

Spectral Changes and Spectral Switches of Partially Coherent Light Diffracted by Two Cascaded Slits

SHU Jian-hua, LIU Yong-xin, CHEN Zi-yang, PU Ji-xiong

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: The spectral changes and spectral switches of polychromatic Gaussian Schell-model beams diffracted by two cascaded slits were studied. Based on the expended method of complex Gaussian functions, the expression for the cross-spectral density and intensity in the diffracted field was derived. The spectral changes and spectral switches for the on-axis observation point and in the cross section in the field was investigated by numerical simulations. It is found that with the increment of propagation distance, the spectrum may redshifted first, then blueshifted, and return to redshifted again for on-axis observation point. And for particular a cross section, the spectral changes and spectral switches is more clear for on-axis observation point, while as the distance between the point and the axis increase, the spectral changes are less clear.

Keywords: partially coherent light; spectral switch; cascaded slit diffraction; Gaussian-Schell model beam

(责任编辑: 鲁 斌 英文审校: 吴逢铁)