

文章编号: 0253-2239(2006)06-1116-6

# 被光阑像散透镜聚焦高斯-谢尔模型光束轴上的 光谱开关\*

潘留占<sup>1,2</sup> 丁超亮<sup>2</sup> 彭玉峰<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 洛阳师范学院物理与电子科学系, 洛阳 471022  
<sup>2</sup> 河南师范大学物理与信息工程学院, 新乡 453007)

**摘要:** 从部分相干光的传输理论出发, 研究了高斯-谢尔模型光束通过光阑像散透镜聚焦的光谱异变和光谱开关。研究表明, 在考虑像散的情况下, 聚焦场轴上也会出现光谱异变和光谱开关。光谱异变和光谱开关不仅与空间相关性、截断参量、菲涅耳数和源光谱谱宽有关, 透镜像散对光谱异变和光谱开关也会产生影响。通过数值计算结果, 重点对透镜像散对光谱移动和光谱开关的影响进行了分析。与无像散情况相比, 像散会使出现光谱开关的临界位置发生变化, 当像散较大时出现光谱开关的临界位置明显向几何焦面移动, 特别是当像散增加到一定数值时, 光谱开关会消失。

**关键词:** 物理光学; 高斯-谢尔模型光束; 光束传输理论; 光谱开关; 像散

中图分类号: O436 文献标识码: A

## On-Axis Spectral Switches of Gaussian Schell-Model Beams Focused by an Astigmatic Aperture Lens

Pan Liuzhan<sup>1,2</sup> Ding Chaoliang<sup>2</sup> Peng Yufeng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics and Electric Science, Luoyang Normal College, Luoyang 471022  
<sup>2</sup> College of Physics and Information Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007)

**Abstract:** From the propagation theory of partially coherent light, spectral anomalies and spectral switches of Gaussian Schell-model beams focused by an astigmatic aperture lens are studied. It is shown that, in the case of the astigmatism of the lens, spectral anomalies and spectral switches may also take place on axial points of the focused field. Spectral anomalies and spectral switches depend on spatial coherence, truncation parameter, Fresnel number and bandwidth of the source, but the astigmatism of the lens also affects them. Numerical calculation results are given to illustrate how the astigmatism of the lens affects the spectral shifts and switches. Compared with the astigmatism-free case, the astigmatism can change the critical position where the spectral switch takes place. And the shifts of critical position of the spectral switch take place remarkably to the geometrical focal plane when the astigmatic parameter is large enough. In particular, the spectral switch vanishes as the astigmatic parameter is larger than a certain value.

**Key words:** physical optics; Gaussian Schell-model beams; light propagation law; spectral switch; astigmatism

### 1 引 言

近年来, 在现代物理光学领域出现了一个被称为“奇点光学”的新分支<sup>[1]</sup>。1999年, 蒲继雄等<sup>[2]</sup>在研究被光阑衍射部分相干光的光谱变化时发现, 在

一定条件下, 伴随着光谱移动在临界点会出现光谱一分为二, 光谱移动突然由红移变为蓝移(或相反)的称为光谱开关的新效应, 并得到实验证实<sup>[3]</sup>。研究也发现, 光谱开关还可在部分相干光照明的杨氏

\* 国家自然科学基金(60678055)、河南省高校新世纪优秀人才支持计划(2006HANCET-09)和河南省自然科学基金(200510482005)资助课题。

作者简介: 潘留占(1964—), 男, 洛阳人, 教授, 博士, 主要从事光束传输与控制的研究。E-mail: panliuzhan@263.net

收稿日期: 2006-06-09; 收到修改稿日期: 2006-11-10

实验和光阑透镜聚焦区域出现<sup>[4~6]</sup>。2002年, Foley和 Wolf对产生光谱开关的物理机理作了诠释<sup>[7]</sup>, 认为光谱开关应是现代物理光学领域出现的新分支“奇点光学”的一种新效应。光谱开关因有在选择性光互连和光通信中潜在的应用前景而引起国内外研究者的兴趣, 并得到了人们极大关注, 相关研究异常活跃<sup>[8~15]</sup>。但是, 大多数研究工作是对理想光束和理想光学系统的。实验和理论研究都证明, 像差对光谱变化和光谱开关会产生影响<sup>[11,13,16]</sup>。因此, 研究光学系统像差对部分相干光的光谱异变和光谱开关的影响, 对探索光谱开关潜在的应用是一个十分

有意义的课题。本文以高斯-谢尔模型光束为例, 对被光阑像散透镜聚焦的部分空间相干光在聚焦区域轴上的光谱异变和光谱开关效应作了深入研究, 详细分析了透镜的像散和光场的空间相关性对光谱开关的影响, 所得结果对光谱开关的实际应用有一定的参考价值。

## 2 被光阑像散透镜聚焦高斯-谢尔模型光束的轴上光谱

设交叉谱密度函数为

$$W(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2, z=0, \omega) = S^{(0)}(\omega) \exp\left[-\left(\frac{x'^2_1 + x'^2_2}{\omega_0^2} + \frac{y'^2_1 + y'^2_2}{\omega_0^2}\right)\right] \exp\left\{-\left[\frac{(x'_1 - x'_2)^2}{2\sigma_\mu^2} + \frac{(y'_1 - y'_2)^2}{2\sigma_\mu^2}\right]\right\}, \quad (1)$$

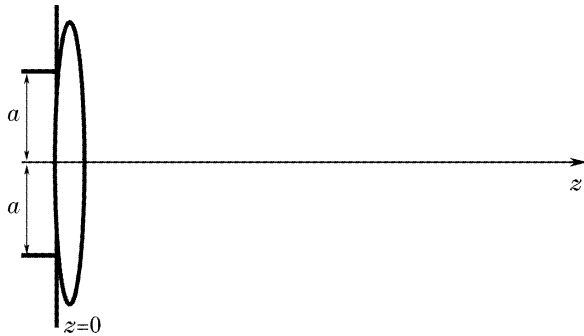


图1 光阑透镜系统

Fig. 1 Aperture lens system

的高斯-谢尔模型光束入射到图1所示 $z=0$ 处方孔光阑透镜系统上。 $S^{(0)}(\omega)$ 、 $\omega_0$ 和 $\sigma_\mu$ 分别为 $z=0$ 平面处光源光谱、源光束的束宽和空间相关长度,  $\omega$ 是圆频率,  $(x'_1, y'_1)$ 和 $(x'_2, y'_2)$ 是 $z=0$ 平面上两点的坐标。

光学元件的简单像散因子可表示为<sup>[17]</sup>

$$\exp[-ikC_6(x'^2 - y'^2)], \quad (2)$$

$C_6$ 称为像散系数。

根据部分相干光的传输规律<sup>[18]</sup>并考虑像散的影响, 高斯-谢尔模型光束被光阑透镜聚焦后在 $z$ 平面上的光谱为

$$S(x, y, z, \omega) = \left(\frac{k}{2\pi B}\right)^2 \int_{-a}^a \int_{-a}^a \int_{-a}^a \int_{-a}^a W(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2, z=0, \omega) \exp\{ikC_6[(x'^2_1 - x'^2_2) - (y'^2_1 - y'^2_2)]\} \times \exp\left\{-\frac{ik}{2B}\{A[(x'^2_1 + y'^2_1) - (x'^2_2 + y'^2_2)] - 2x(x'_1 - x'_2) - 2y(y'_1 - y'_2)\}\right\} dx'_1 dy'_1 dx'_2 dy'_2, \quad (3)$$

式中 $k$ 为波数,  $a$ 为方孔光阑的半宽度,  $(x, y)$ 为 $z$ 平面上场点的横坐标。光学系统的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta z & f(\Delta z + 1) \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $f$ 为透镜焦距, 相对传输距离 $\Delta z = (z - f)/f$ 。

把(1)式和(4)式代入(3)式, 并令 $x = y = 0$ , 可得轴上点光谱

$$S(0, 0, \Delta z, \omega) = S^{(0)}(\omega) M(0, 0, \Delta z, \omega), \quad (5)$$

其中

$$M(0, 0, \Delta z, \omega) = \frac{\pi}{4} \left(\frac{N}{1 + \Delta z}\right)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \sqrt{\frac{1}{Q_2 Q_4}} \times \int_{-\delta}^{\delta} \exp\left\{\left[\frac{4Q_1 Q_2 \beta^4 - (\beta^2 - 1)^2}{4Q_2 \beta^4}\right] u^2\right\} \times \left\{\operatorname{erf}\left[i \frac{u(\beta^2 - 1) - 2\delta Q_2 \beta^2}{2\sqrt{Q_2} \beta^2}\right] - \operatorname{erf}\left[i \frac{u(\beta^2 - 1) + 2\delta Q_2 \beta^2}{2\sqrt{Q_2} \beta^2}\right]\right\} du \times \int_{-\delta}^{\delta} \exp\left\{\left[\frac{4Q_3 Q_4 \beta^4 - (\beta^2 - 1)^2}{4Q_4 \beta^4}\right] v^2\right\} \times \left\{-\operatorname{erf}\left[i \frac{v(\beta^2 - 1) - 2\delta Q_4 \beta^2}{2\sqrt{Q_4} \beta^2}\right] + \operatorname{erf}\left[i \frac{v(\beta^2 - 1) + 2\delta Q_4 \beta^2}{2\sqrt{Q_4} \beta^2}\right]\right\} dv, \quad (6)$$

$$Q_1 = -\frac{1}{2}(1 + \beta^{-2}) + i\left(2\pi NfC_6 + \frac{\pi N\Delta z}{1 + \Delta z}\right)\frac{\omega}{\omega_0}, \quad (7)$$

$$Q_2 = -\frac{1}{2}(1 + \beta^{-2}) + i\left(-2\pi NfC_6 - \frac{\pi N\Delta z}{1 + \Delta z}\right)\frac{\omega}{\omega_0}, \quad (8)$$

$$Q_3 = -\frac{1}{2}(1 + \beta^{-2}) + i\left(-2\pi NfC_6 + \frac{\pi N\Delta z}{1 + \Delta z}\right)\frac{\omega}{\omega_0}, \quad (9)$$

$$Q_4 = -\frac{1}{2}(1 + \beta^{-2}) + i\left(2\pi NfC_6 - \frac{\pi N\Delta z}{1 + \Delta z}\right)\frac{\omega}{\omega_0}, \quad (10)$$

$$N = \frac{\omega_0^2}{\lambda_0 f}, \quad (\text{与光束有关的菲涅耳数}) \quad (11)$$

$$\delta = \frac{a}{\omega_0}, \quad (\text{截断参量}) \quad (12)$$

$$\beta = \left[1 + \left(\frac{\sigma_x}{\omega_0}\right)^{-2}\right]^{-1/2}, \quad (\text{空间相关度}) \quad (13)$$

$$u = \frac{x'}{\omega_0}, \quad (\text{入射面 } x \text{ 方向上的相对位置坐标}) \quad (14)$$

$$v = \frac{y'}{\omega_0}, \quad (\text{入射面 } y \text{ 方向上的相对位置坐标}) \quad (15)$$

$\lambda_0$  和  $\omega_0$  分别为源光谱的中心波长和中心频率, erf 是误差函数。由(5)式可以看出, 高斯-谢尔模型光束被光阑像散透镜聚焦后轴上光谱  $S(0, 0, \Delta z, \omega)$  为入射光谱  $S^{(0)}(\omega)$  和调制函数  $M(0, 0, \Delta z, \omega)$  的乘积, 光阑像散透镜对光谱的影响表现为  $M(0, 0, \Delta z, \omega)$  对源光谱的调制。

假设入射到  $z=0$  平面的源光谱  $S^{(0)}(\omega)$  为谱宽等于  $\sigma_0$  的高斯型

$$S^{(0)}(\omega) = \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma_0^2}\right], \quad (16)$$

把(16)式代入(5)式可得

$$S(0, 0, \Delta z, \omega) = \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma_0^2}\right]M(0, 0, \Delta z, \omega), \quad (17)$$

从(6)式和(17)式可以看出, 一般情况下, 被光阑像散透镜聚焦的高斯-谢尔模型光束轴上光谱与透镜像散系数  $C_6$ 、空间相关度  $\beta$ 、截断参量  $\delta$ 、菲涅耳数  $N$ 、源光谱的谱宽  $\sigma_0$  和相对传输距离  $\Delta z$  有关。

### 3 光谱异变和光谱开关

利用(6)式和(17)式对轴上光谱进行了数值计算, 详细研究了像散系数  $C_6$ 、空间相关度  $\beta$  对光谱异变和光谱开关的影响。归一化光谱移动定义为

$$\frac{\delta\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_{\max} - \omega_0}{\omega_0}, \quad (18)$$

式中  $\omega_{\max}$  为  $S(0, 0, \Delta z, \omega)$  在  $\Delta z$  处的最大值  $S_{\max}(0, 0, \Delta z, \omega)$  所对应的频率。在以下的计算中所取的参量为  $f = 200 \text{ mm}$ ,  $N = 5$ ,  $\delta = 0.5$ ,  $\omega_0 = 3 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$  和  $\sigma_0 = 0.6 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ 。

图2给出了  $\beta = 0.9$  区间  $\Delta z = -0.85 \sim 0.55$  时  $\delta\omega/\omega_0$  的变化规律。图中三条线分别对应像散系数  $C_6 = 0, 0.3 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$  和  $0.5 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$  的情况。从图2可以看出, 当  $\Delta z = 0.55$  时, 光谱移动为蓝移, 随着  $\Delta z$  减小, 蓝移逐渐变化到零。继续减小  $\Delta z$ , 光谱移动出现了红移, 并且随着  $\Delta z$  的减小, 红移量增加。特别是, 当  $\Delta z$  减小到临界值时, 光谱移动突然由红移变为蓝移, 光谱发生异变, 出现了光谱开关<sup>[2]</sup>。随着  $\Delta z$  继续减小, 会出现第二个、第三个光谱开关。对无像散  $C_6 = 0$ , 在临界位置  $\Delta z_c = -0.5862, -0.7518$  和  $-0.8227$  处出现了光谱开关, 分别称为离光阑透镜聚焦几何焦面最近的第一阶、第二阶和第三阶光谱开关; 对像散  $C_6 = 0.3 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ , 分别在  $\Delta z_c = -0.5842, -0.7523$  和  $-0.8230$  处出现了第一阶、第二阶和第三阶光谱开关; 增大像散系数  $C_6$  到  $0.5 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$  时, 仅在  $\Delta z_c = -0.7527$  和  $-0.8235$  处出现了两阶光谱开关, 第一阶光谱开关消失。

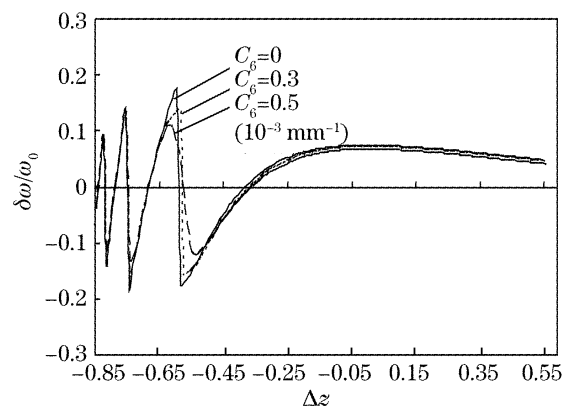


图2 不同像散系数  $C_6$  下归一化光谱移动  $\delta\omega/\omega_0$  随相对传输距离  $\Delta z$  的变化

Fig. 2 Normalized spectral shift  $\delta\omega/\omega_0$  versus relative propagating distance  $\Delta z$  for different astigmatic values of  $C_6$

图3给出了  $C_6 = 0.1 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$  和  $\beta = 0.9$  时第二阶光谱开关及附近场点的光谱变化图。图中虚

线为源光谱,实线对应不同轴上点  $\Delta z$  处的光谱,且所有图都已归一化  $S(\omega) = \frac{S(0,0,\Delta z,\omega)}{S_{\max}(0,0,\Delta z,\omega)}$ 。对应于图 3 的光谱参量见表 1。从图 3 和表 1 可以看出,在  $\Delta z = -0.7450$  [图 3(a)],光谱移动为红移,红移量为 0.167。当  $\Delta z$  减小,红移量增加,次峰高

度也随之增加 [图 3(b)]。特别是在临界位置  $\Delta z_c = -0.7519$  时,双峰高度相等 [图 3(c)],即发生了光谱异变<sup>[10~12]</sup>,而光谱分裂为等高双峰的现象称为光谱开关<sup>[2]</sup>。继续减小  $\Delta z$ ,光谱移动为蓝移,且蓝移量随  $\Delta z$  减小而减小 [图 3(d)~图 3(e)],原来的次峰变为主峰。

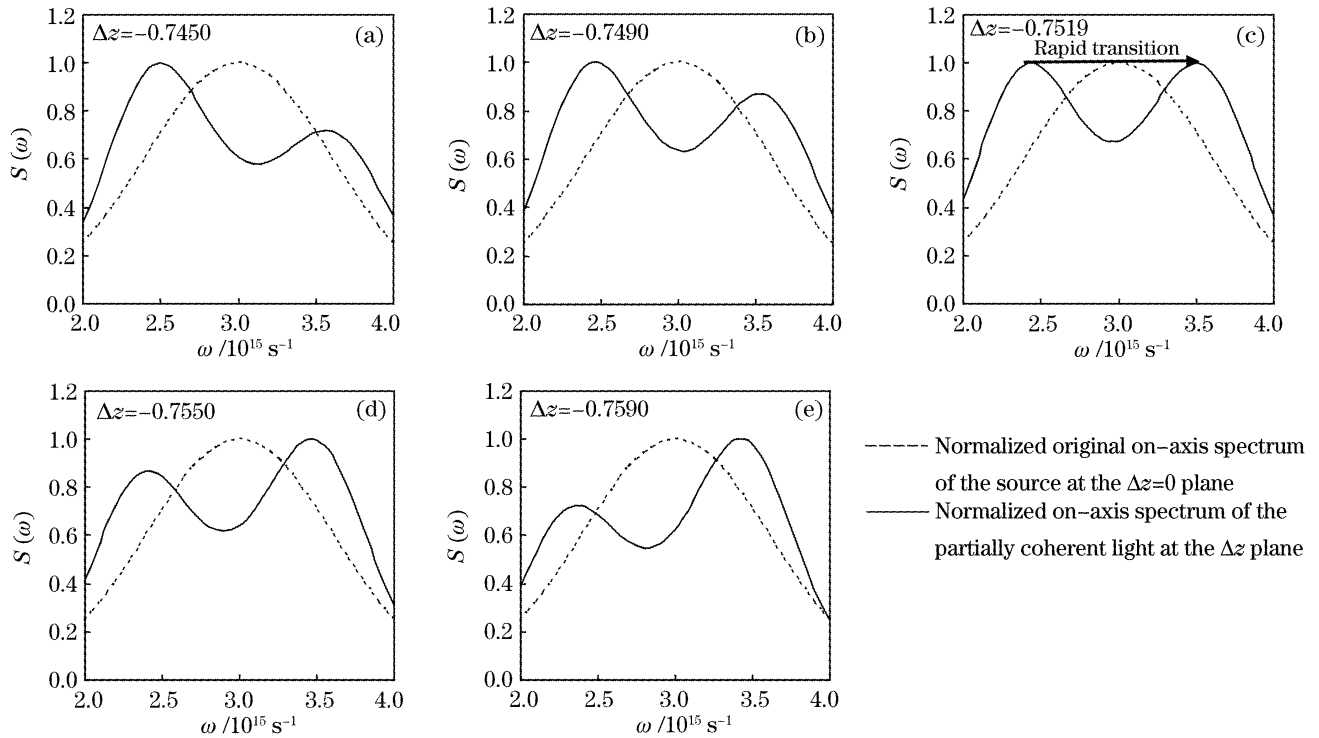


图 3 归一化光谱  $S(\omega)$  随  $\Delta z$  的变化

Fig. 3 Normalized on-axis spectrum  $S(\omega)$  versus relative propagation distance  $\Delta z$

表 1 对应图 3 的光谱参量

Table 1 Spectral parameters corresponding to Fig. 3

$\Delta z$	$\omega_{\max}/10^{15} \text{ s}^{-1}$	$\delta\omega/\omega_0$	Height of the secondary peak
-0.7450	2.499	-0.167	0.720
-0.7490	2.464	-0.179	0.870
-0.7519	2.434, 3.499	-0.189, 0.166	Equal of two peaks
-0.7550	3.466	0.155	0.870
-0.7590	3.421	0.140	0.726

图 4 给出了像散对第二阶光谱开关的影响图。图中所取参量  $\beta = 0.9$ , 图中三条线分别对应不同像散系数  $C_6 = 0, 0.3 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$  和  $0.5 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$  的情况,实线为源光谱  $S^{(0)}(\omega)$ 。对应于图 4 的光谱参量见表 2。从图 4 和表 2 可以看出,像散系数不同,光谱双峰对应的频率和光谱凹陷深度也不同,随  $C_6$  增大,谱宽变窄,光谱双峰对应频率间隔减小,光谱凹陷变浅。数值计算表明,当  $C_6 > 0.93 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$  时第二阶光谱开关消失,光谱由双峰变为单峰。

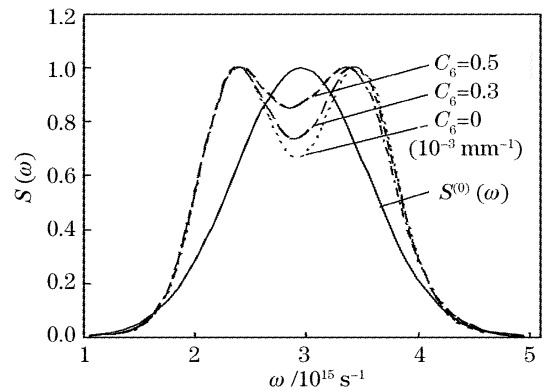


图 4 不同像散系数  $C_6$  下出现第二阶光谱开关时的归一化光谱  $S(\omega)$

Fig. 4 Normalized spectrum  $S(\omega)$  of the second spectral switch for different astigmatic values of  $C_6$

图 5 给出了空间相关度对第二阶光谱开关的影响图。图中所取参量  $C_6 = 0.3 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ , 图中三条线分别对应不同空间相关度  $\beta = 0.9, 0.6$  和  $0.4$  的情况,实线为源光谱  $S^{(0)}(\omega)$ 。对应于图 5 的光谱参量见表 3。从图 5 和表 3 可以看出,空间相关度  $\beta$  不同,光谱双峰对应的频率和光谱凹陷深度也不同。

随着  $\beta$  减小, 谱宽变窄, 光谱双峰对应频率间隔减小, 光谱凹陷变浅, 光谱开关越来越不明显。当  $\beta \leq 0.34$  时, 光谱开关消失, 光谱由双峰变为单峰。

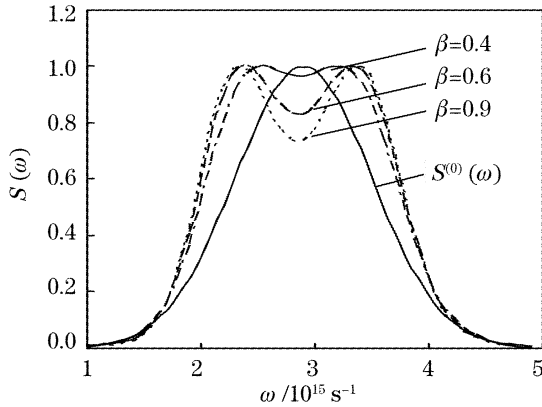


图 5 不同空间相关度  $\beta$  下出现第二阶光谱开关时的归一化光谱  $S(\sigma)$

Fig. 5 Normalized spectrum  $S(\omega)$  of the second spectral switch for different spatial correlation parameter  $\beta$

表 2 对应图 4 的光谱参量

Table 2 Spectral parameters corresponding to Fig. 4

$C_6/10^{-3} \text{ mm}^{-1}$	$\Delta z_c$	$\omega_{\max}/10^{15} \text{ s}^{-1}$	Frequency distance of two peaks / $10^{15} \text{ s}^{-1}$
0	-0.7518	2.434, 3.502	1.068
0.3	-0.7523	2.438, 3.474	1.036
0.5	-0.7527	2.454, 3.412	0.958

表 3 对应图 5 的光谱参量

Table 3 Spectral parameters corresponding to Fig. 5

$\beta$	$\Delta z_c$	$\omega_{\max}/10^{15} \text{ s}^{-1}$	Frequency distance of two peaks / $10^{15} \text{ s}^{-1}$
0.9	-0.7523	2.438, 3.474	1.036
0.6	-0.7520	2.486, 3.436	0.950
0.4	-0.7518	2.630, 3.304	0.674

图 6 给出了  $\beta=0.9$  时第一阶[图 6(a)]和第二阶[图 6(b)]光谱开关出现的临界位置  $\Delta z_c$  随像散系数  $C_6$  的变化规律。图 6 表明, 出现第二阶光谱开关比出现一阶开关  $C_6$  的变化范围要大。从图 6(a)可以看出, 对第一阶光谱开关, 当  $C_6 < 0.10 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$  时, 光谱开关出现的临界位置  $\Delta z_c$  随  $C_6$  缓慢变化。当  $C_6 > 0.10 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$  时, 继续增加像散系数  $C_6$ , 光谱开关出现的临界位置  $\Delta z_c$  明显向几何焦面移动。当像散系数增加到  $C_6 = 0.31 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$  时第一阶光谱开关消失。从图 6(b)可以看出, 对第二阶光谱开关, 当  $C_6 < 0.60 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$  时, 光谱开关出现的临界位置  $\Delta z_c$  随  $C_6$  变化不明显。当  $C_6 > 0.60 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$  时, 继续增加像散系数  $C_6$ , 光谱开关出现的临界位置  $\Delta z_c$  明显向几何焦面移动。当像散系数  $C_6 \geq 0.93 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$  时第二阶光谱开关消失。

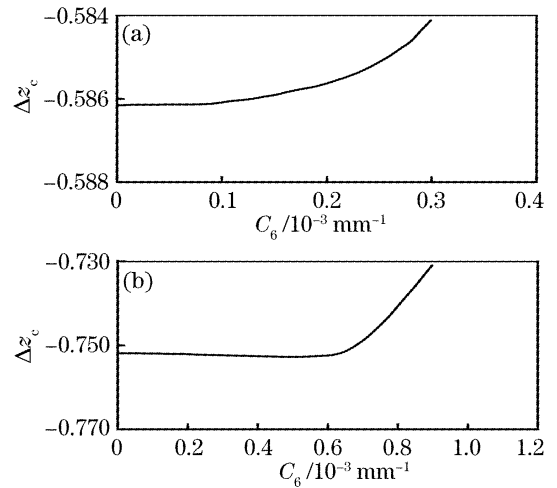


图 6 第一阶(a)和第二阶(b)光谱开关出现的临界位置  $\Delta z_c$  随像散系数  $C_6$  的变化

Fig. 6 Critical position  $\Delta z_c$  of the (a) first and (b) second spectral switches versus astigmatic coefficient  $C_6$

图 7 给出了  $C_6 = 0.3 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$  时第一阶[图 7(a)]和第二阶[图 7(b)]光谱开关出现的临界位置  $\Delta z_c$  随空间相关度  $\beta$  的变化规律。图 7 表明, 空间相关度  $\beta$  影响光谱开关, 出现第二阶光谱开关比出现一阶开关对应空间相关度  $\beta$  的变化范围要大。从图 7(a)可以看出, 对第一阶光谱开关, 当  $\beta$  减小时, 光谱开关出现的临界位置  $\Delta z_c$  向几何焦面移动, 当  $\beta < 0.88$  时第一阶光谱开关消失。从图 7(b)可以看出, 对第二阶光谱开关, 随着  $\beta$  减小, 光谱开关出现的临界位置  $\Delta z_c$  随  $\beta$  的变化不是单调变

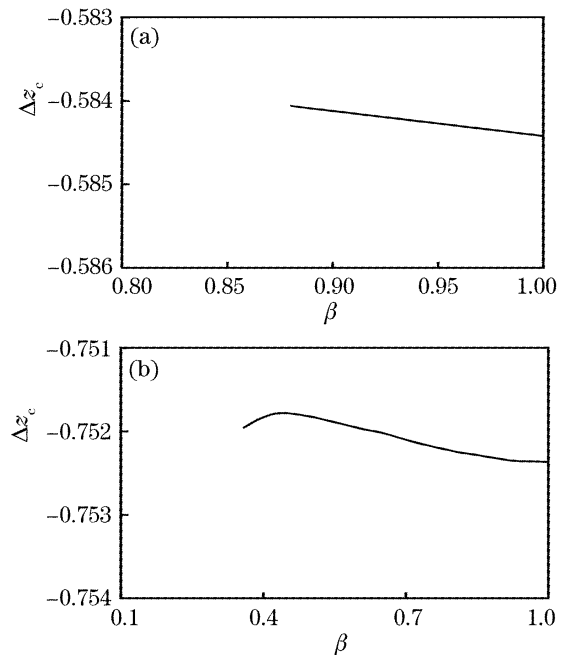


图 7 第一阶(a)和第二阶(b)光谱开关出现的临界位置  $\Delta z_c$  随空间相关度  $\beta$  的变化

Fig. 7 Critical position  $\Delta z_c$  of the (a) first and (b) second spectral switches versus spatial correlation parameter  $\beta$

化。但是当  $\beta$  减小到 0.34 时第二阶光谱开关消失。

## 4 结 论

本文详细的研究了被光阑像散透镜聚焦高斯-谢尔模型光束轴上的光谱异变和光谱开关。一般情况下,被光阑像散透镜聚焦的高斯-谢尔模型光束轴上光谱与透镜像散系数  $C_6$ 、空间相关度  $\beta$ 、截断参量  $\delta$ 、菲涅耳数  $N$ 、源光谱的谱宽  $\sigma_0$  和相对传输距离  $\Delta z$  有关。本文与已有工作相比,重点研究了透镜像散对光谱异变和光谱开关的影响。通过理论分析和数值计算表明,通过光阑像散透镜聚焦的部分相干光在轴上也会出现光谱异变和光谱开关效应。与无像散情况<sup>[5]</sup>相比,光谱开关对应的光谱宽度会变窄,中心凹陷程度会减弱。像散会使光谱开关出现的位置发生变化,随着像散增大到一定程度,光谱开关出现的位置会明显向聚焦几何焦面方向移动。特别是当像散系数  $C_6$  大到一定程度,光谱开关会消失。本文在考虑像散的同时,研究了光场相关性对光谱异变和光谱开关的影响。特别指出的是,截断参量、菲涅耳数和源光谱的谱宽都会对光谱开关产生作用,它们对光谱异变和光谱开关的影响可以参考我们的前期研究成果<sup>[5,6,16]</sup>。本文所得结果为光谱开关的实验结果和理论研究之间出现的差异提供了依据,对把光谱开关效应应用到光互联、光通信等方面有一定的参考意义。

## 参 考 文 献

- 1 Soskin M S, Vasnetsov M V. Singular optics[J]. *Progress in Optics*, 2001, **42**(4): 219~276
- 2 Jixiong Pu, Huihua Zhang, Shojiro Nemoto. Spectral shifts and spectral switches of partially coherent light passing through an aperture[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **162**(4): 57~63
- 3 H. C. Kandpal. Experimental observation of the phenomenon of spectral switch[J]. *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.*, 2001, **3**(4): 296~299
- 4 Liuzhan Pan, Baida Lü. The spectral switch of partially coherent

- light in Young's experiment[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2001, **37**(11): 1377~1381
- 5 Pan Liuzhan, Lü Baida. Spectral shifts and spectral switches in young's experiment at far zone[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 707~711 (in Chinese)
- 潘留占,吕百达. 杨氏实验远场的光谱位移和光谱开关[J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 707~711
- 6 Liuzhan Pan, Baida Lü. Spectral changes and spectral switches of partially coherent beams focused by an aperture lens[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**(1): 140~148
- 7 John T. Foley, Emil Wolf. Phenomenon of spectral switches as a new effect in singular optics with polychromatic light[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(12): 2510~2516
- 8 Jixiong Pu, Shojiro Nemoto. Spectral changes and  $1 \times N$  spectral switches in diffraction of partially coherent light by an aperture[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(2): 339~344
- 9 G. Gbur, T. D. Visser, E. Wolf. Anomalous behavior of spectra near phase singularities of focused waves[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(1): 013901
- 10 Sergey A. Ponomarenko, Emil Wolf. Spectral anomalies in a Fraunhofer diffraction pattern[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(14): 1211~1213
- 11 G. Popescu, A. Dogariu. Spectral anomalies at wave-front dislocation[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(18): 183902
- 12 Lü Baida, Pan Liuzhan. Spectral anomalies and spectral switches of partially coherent and polychromatic light diffracted at an aperture[J]. *Science in China Ser. G*, 2003, **33**(5): 454~463 (in Chinese)
- 吕百达,潘留占. 被光阑衍射多色部分空间相干光的光谱异变和光谱开关[J]. *中国科学(G辑)*, 2003, **33**(5): 454~463
- 13 Jixiong Pu, Chao Cai, Shojiro Nemoto. The spectral changes of partially coherent light focused by an apertured lens with chromatic aberration[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(4): 239~242
- 14 Xiandai Hu, Jixiong Pu. Spectral anomalies of polychromatic, spatially coherent light diffracted by an annular aperture in the far field[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(7): 418~421
- 15 Ji Xiaoling, Lü Baida. Effect of turbulence on the spectral shift of partially coherent light[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(4): 506~510 (in Chinese)
- 季小玲,吕百达. 湍流对部分相干光光谱移动的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 506~510
- 16 Liuzhan Pan, Baida Lü. Spectral switches of polychromatic Gaussian beams passing through an astigmatic aperture lens[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **234**(1~6): 13~22
- 17 Javier Alda, José Alonso, Eusebio Bernabeu. Characterization of aberrated laser beams[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(10): 2737~2747
- 8 Leonard Mandel, Emil Wolf. *Optical Coherence and Quantum Optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995