

文章编号: 0253-2239(2008)01-0184-05

衍射扭曲高斯-谢尔模型光束在远场的 光谱移动和光谱开关*

王海霞 潘留占

(洛阳师范学院物理与电子科学系, 河南 洛阳 471022)

摘要 从部分相干光的传输理论出发,研究了被光阑衍射扭曲高斯-谢尔模型光束远场的光谱变化规律。结果表明,扭曲高斯-谢尔模型光束在远场也会出现光谱移动和光谱开关效应。与衍射高斯-谢尔模型光束情况相比,光谱移动和光谱开关效应不仅与光束空间相关性、截断参量和源光谱谱宽有关,光束的扭曲因子也会对衍射扭曲高斯-谢尔模型光束远场的光谱移动和光谱开关效应产生影响。通过数值计算结果详细讨论了光束扭曲因子影响衍射扭曲高斯-谢尔模型远场光谱的规律。

关键词 物理光学; 扭曲高斯-谢尔模型光束; 光谱移动和光谱开关; 扭曲因子; 衍射

中图分类号 O436 **文献标识码** A

Spectral Shifts and Spectral Switches of Diffracted Twisted Gaussian Schell-Model Beams in the Far Field

Wang Haixia Pan Liuzhan

(Department of Physics and Electric Science, Luoyang Normal College, Luoyang, Henan 471022, China)

Abstract Starting from the propagation theory of partially coherent light, the spectrum of twisted Gaussian Schell-model beams in the far field are studied. It is shown that, spectral shifts and spectral switches of twisted Gaussian Schell-model beams may also take place in the far field. Comparing with the aberration-free Gaussian Schell-model beams case, spectral shifts and spectral switches depend on spatial coherence, truncation parameter and bandwidth of the source, but the twist factor also affects them. Numerical calculation results are given to illustrate how the twist factor affects the spectral shifts and switches.

Key words physical optics; twisted Gaussian Schell-model beams; spectral shift and spectral switch; twist factor; diffraction

1 引 言

多色完全空间相干和部分空间相干光在一定条件下,伴随着光谱移动在临界点会出现一种被称为光谱开关的新效应^[1,2],并得到实验证实^[3,4]。2002年,Foley和Wolf对产生光谱开关效应的物理机理作了诠释^[5],认为光谱开关效应是现代物理光学领域出现的新分支“奇点光学”^[6]的一种新效应。光谱开关效应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,并得到了人们的极大关注,相关研究异常活跃^[7~12]。引起光谱移动和光谱开关的物理原因被归结为光阑衍射和光场的相关性。但是,大多数研究工作是对理想光束和理想光学系统的。然而,光束和光学系统的像差会引起光谱的实际测量和理论结果之间的差异^[4,13,14]。不管是从理论上还是从实际应用的角度,研究光束和光学系统的像差对光谱移动和光谱

收稿日期: 2007-04-17; 收到修改稿日期: 2007-07-11

基金项目: 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)河南省自然科学基金(200510482005)和河南省高校骨干教师资助课题。

作者简介: 王海霞(1978—),女,洛阳人,讲师,硕士,主要从事光信息和光束传输方面的研究。

E-mail: seamaid_hxxl@163.com

导师简介: 潘留占(1964—),男,洛阳人,教授,博士,主要从事部分相干光、激光传输与变换方面的研究。

E-mail: panliuzhan@263.net

开关效应的影响都是必要的。扭曲高斯-谢尔模型(TGSM)光束是更为一般的部分相干光束模型,同时描述了光束的部分相干和像散性质,并且这种光束实际存在,在实验室可用声光相干控制方法产生。本文对被光阑衍射的部分空间相干扭曲高斯-谢尔模型光束在远场的光谱移动和光谱开关效应作了深入研究,详细分析了扭曲因子对光谱移动和光谱开关效应的影响,所得结果对光谱分析和光谱开关效应的实际应用有一定的参考价值。

2 扭曲高斯-谢尔模型光束的远场光谱

在空间-频率域中,设交叉谱密度函数为^[15,16]

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

的扭曲高斯-谢尔模型光束入射到图1所示 $z=0$ 处全宽 $2a$ 的方孔光阑上,式中 ω 是频率, ω_0 和 σ_a 表示扭曲高斯-谢尔模型光束的束腰宽度和空间相关长度, $(x'_1, y'_1), (x'_2, y'_2)$ 分别是光阑表面上 P_1 和 P_2 两点的坐标, $S^{(0)}(\omega)$ 为源光谱, $k=2\pi/\lambda$ 是波数, μ 是扭曲高斯-谢尔模型光束的扭曲因子。

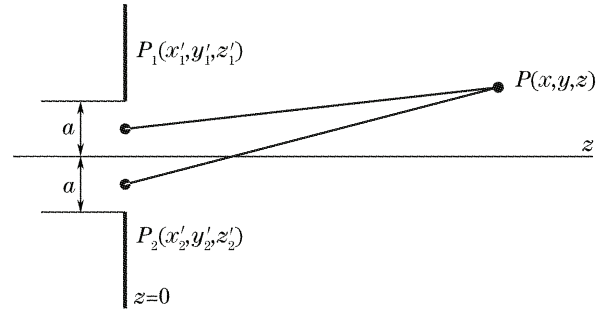


图1 光阑系统

Fig.1 Aperture system

由部分相干光的传输理论^[17],得到观察面 z 上任意点 P 的光谱为

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

(x, y) 是 z 平面上场点 P 点的直角坐标。光学系统的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

对于远场,(2)式简化为

$$S(x, y, z, \omega) = \left(\frac{k}{2\pi B}\right)^2 \int_{-a}^a \int_{-a}^a \int_{-a}^a \int_{-a}^a W(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2, z=0, \omega) \times \exp\left\{-\frac{ik}{B}[x(x'_2 - x'_1) + y(y'_2 - y'_1)]\right\} dx'_1 dy'_1 dx'_2 dy'_2, \quad (4)$$

将(1)式和(3)式代入(4)式,衍射扭曲高斯-谢尔模型光束远场的光谱为

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

其中

$$M(\theta_x, \theta_y, z, \omega) = \frac{\beta^2 \omega_0^4}{8\pi(1+\beta^2)} \left(\frac{\omega}{cz}\right)^2 \int_{-\delta}^{\delta} \int_{-\delta}^{\delta} \exp\left\{-\frac{1}{2c^2(1+\beta^2)\omega_0^2}[-i8c^2\beta^2\omega_0(u'\theta_x + v'\theta_y) + 4c\omega_0^2\beta^2\mu\omega_0\omega^2(u'\theta_y - v'\theta_x) + \omega_0^4\beta^2\mu^2\omega_0^2\omega^2(u'^2 + v'^2) + 4c^2\omega_0^2(u'^2 + v'^2) + 4c^2\beta^2\omega^2(\theta_x^2 + \theta_y^2)]\right\} \times \left\{ \operatorname{erf}\left\{\frac{i u' \omega_0^2 \beta^2 \mu \omega \omega_0 + c[v' \omega_0(\beta^2 - 1) + \delta \omega_0(\beta^2 + 1) + i 2 \theta_y \beta^2 \omega]}{\sqrt{2(\beta^2 + 1)} c \beta \omega_0}\right\} - \operatorname{erf}\left\{\frac{i u' \omega_0^2 \beta^2 \mu \omega \omega_0 + c[v' \omega_0(\beta^2 - 1) - \delta \omega_0(\beta^2 + 1) + i 2 \theta_y \beta^2 \omega]}{\sqrt{2(\beta^2 + 1)} c \beta \omega_0}\right\} \right\} \times \left\{ \operatorname{erf}\left\{\frac{-i v' \omega_0^2 \beta^2 \mu \omega \omega_0 + c[u' \omega_0(\beta^2 - 1) + \delta \omega_0(\beta^2 + 1) + i 2 \theta_x \beta^2 \omega]}{\sqrt{2(\beta^2 + 1)} c \beta \omega_0}\right\} - \operatorname{erf}\left\{\frac{-i v' \omega_0^2 \beta^2 \mu \omega \omega_0 + c[u' \omega_0(\beta^2 - 1) - \delta \omega_0(\beta^2 + 1) + i 2 \theta_x \beta^2 \omega]}{\sqrt{2(\beta^2 + 1)} c \beta \omega_0}\right\} \right\} du' dv', \quad (6)$$

截断参量

$$\delta = a/\omega_0, \quad (7)$$

空间相关度

$$\beta = [1 + (\sigma_a/\tau\omega_0)^{-2}]^{-1/2}, \quad (8)$$

入射面 x 方向和 y 方向上的相对位置坐标

$$u' = x'/\omega_0, \quad v' = y'/\omega_0, \quad (9)$$

观察面 x 方向上的归一化衍射角

$$\theta_x = \frac{x/z}{\alpha_0}, \quad (10)$$

观察面 y 方向上的归一化衍射角

$$\theta_y = \frac{y/z}{\alpha_0}, \quad (11)$$

远场发散角

$$\alpha_0 = \lambda_0/(\pi\tau\omega_0), \quad (12)$$

其中 λ_0 和 ω_0 是源光谱 $S^{(0)}(\omega)$ 的中心波长和频率, c 是真空中光速, erf 是误差函数。 $M(\theta_x, \theta_y, z, \omega)$ 是光谱调制函数, 光阑衍射对光谱的影响表现为调制函数 $M(\theta_x, \theta_y, z, \omega)$ 对源光谱的调制。

假设源光谱 $S^{(0)}(\omega)$ 是高斯型, 归一化形式为

$$S^{(0)}(\omega) = \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma_0^2}\right], \quad (13)$$

式中 σ_0 为谱宽, 将(13)式代入(5)式得到远场的光谱为

$$S(\theta_x, \theta_y, z, \omega) = \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma_0^2}\right] M(\theta_x, \theta_y, z, \omega), \quad (14)$$

从(6)式和(14)式可以看出, 光束的远场光谱

$S(\theta_x, \theta_y, z, \omega)$ 为源光谱 $S^{(0)}(\omega)$ 和光谱调制函数 $M(\theta_x, \theta_y, z, \omega)$ 的乘积, 与扭曲因子 μ , 空间相关度 β , 截断参量 δ , 源光谱的谱宽 σ_0 和场点位置 θ_x, θ_y 有关。

3 数值计算结果和分析

利用(6)式和(14)式对远场的光谱进行了数值计算, 详细研究了扭曲因子 μ 、空间相关度 β 对光谱移动和光谱开关的影响。归一化光谱移动定义为

$$\frac{\delta\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_{\max} - \omega_0}{\omega_0}, \quad (15)$$

ω_{\max} 为 $S(\theta_x, \theta_y, z, \omega)$ 在 θ 处的最大值 $S_{\max}(\theta_x, \theta_y, z, \omega)$ 所对应的频率。 $\delta=0.5, \omega_0=3 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}, \sigma_0=0.6 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$, μ 的选择符合物理限制^[16]。考虑到对称性, 本文下面的计算只对 x 方向上的光谱进行了数值计算。

图 2 给出扭曲高斯-谢尔模型光束通过光阑后的归一化光谱 $S(\omega) = S(\theta_x, z, \omega)/S_{\max}(\theta_x, z, \omega)$, 扭曲因子 $\mu=0.1$, 图中四条线分别对应归一化衍射角 $\theta_x=0, 1.4, 2.6$ 和源光谱 $S^{(0)}(\omega)$ 。从图 2 可以看出, 对 $\beta=0.5$ [图 2(a)], 相对于源光谱 $S^{(0)}(\omega)$, 两个场点 $\theta_x=0, 1.4$ 的光谱发生了兰移, 归一化光谱移动分别为 0.0741 和 0.0381, 场点 $\theta_x=2.6$ 的光谱发生了红移, 归一化光谱移动为 -0.0460。而对 $\beta=0.2$ [图 2(b)], $\theta_x=0, 1.4$ 和 2.6 的光谱均发生了兰移, 归一化光谱移动分别为 0.0743、0.0639 和 0.0397。

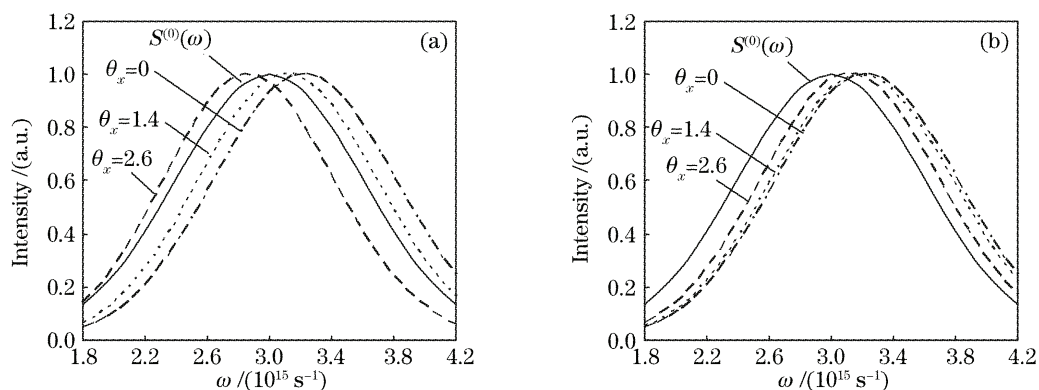


图 2 归一化光谱 $S(\omega)$ 。(a) $\beta=0.5$, (b) $\beta=0.2$

Fig. 2 Normalized spectrum $S(\omega)$. (a) $\beta=0.5$, (b) $\beta=0.2$

归一化光谱移动 $\delta\omega/\omega_0$ 随扭曲因子 μ 的变化情况如图 3 所示, $\beta=0.2$ 。图中三条线分别对应 $\theta_x=0, 1.4$ 和 2.6。从图 3 可以看出, 随着扭曲因子 μ 的增大光谱移动逐渐减小, x 轴上 ($\theta_x=0$) 的光谱移动大于轴外 ($\theta_x=1.4$ 和 2.6) 的光谱移动, 并且离 x 轴越远, 光谱移动的变化越缓慢。

不同空间相关度下远场归一化光谱移动 $\delta\omega/\omega_0$ 在 $0 \leq \theta_x \leq 14$ 范围内的变化如图 4。图 4(a) 中 $\beta=0.5$, 三条线分别对应 $\mu=0, 0.1$ 和 0.2。图 4(b) 中 $\beta=0.2$, 三条线分别对应 $\mu=0, 1$ 和 2。从图 4(a) 可以看出, 随着 θ_x 的增大在一些位置光谱移动有一个迅速的突变发生, 从红移跃迁到蓝移, 这种现象称为

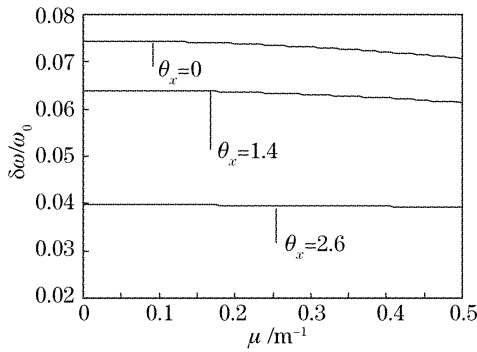


图 3 对于不同的衍射角,归一化光谱移动 $\delta\omega/\omega_0$ 随扭曲因子 μ 的变化

Fig. 3 Normalized spectral shift $\delta\omega/\omega_0$ versus twist factor μ for different diffraction angle θ_x

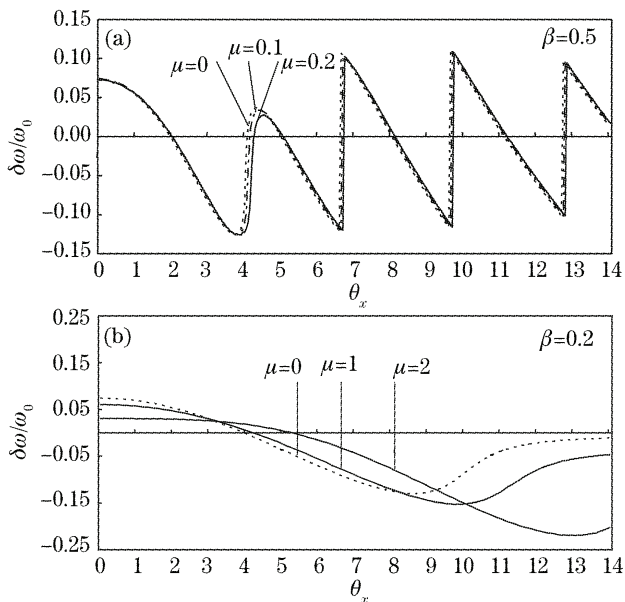


图 4 不同扭曲因子 μ 下归一化光谱移动 $\delta\omega/\omega_0$ 随衍射角 θ_x 的变化

Fig. 4 Normalized spectral shift $\delta\omega/\omega_0$ versus diffraction angle θ_x for different twist factor μ

光谱开关^[1]。无扭曲高斯-谢尔模型光束($\mu=0$),在临界位置 $\theta_x=6.650$ 、 9.664 和 12.743 处出现了光谱开关现象;扭曲高斯-谢尔模型光束 $\mu=0.1$ 和 0.2 ,分别在 $\theta_x=6.661$ 、 9.677 、 12.760 和 $\theta_x=6.694$ 、 9.719 、 12.813 处出现了光谱开关现象,随着扭曲因子增大,同阶次光谱开关的位置远离 z 轴。从图 4(b)可以看出,对相干性较低的 $\beta=0.2$ 的情况,随着 θ_x 的增大,没有出现光谱开关现象,只有红移和兰移现象,与无扭曲高斯-谢尔模型光束($\mu=0$)相比, μ 对光谱移动的影响比较明显。

扭曲因子 μ 对 $\theta_x=6.650$ 附近光谱开关的影响示于图 5。空间相干度 $\beta=0.5$,图中三条线分别对应 $\mu=0$ 、 0.1 和 0.2 的情况,虚线为源光谱 $S^{(0)}(\omega)$ 。

与图 5 对应的光谱参量列于表 1。从表 1 和图 5 可以看出随着扭曲因子 μ 的增大,光谱开关图中光谱强度最小值 S_{\min} 稍微增大,光谱跃迁量 Δ (定义为两峰 $|\delta\omega/\omega_0|$ 之和)逐渐减小,光谱开关的位置向远离 z 轴的方向移动。数值计算结果表明,在物理限制的范围内,扭曲因子 μ 取所有值^[16]时在 $\theta_x=6.650$ 附近均会出现光谱开关现象。

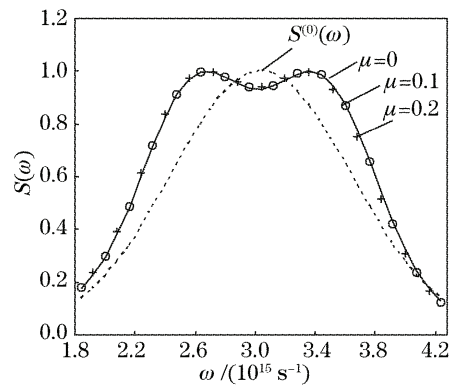


图 5 光谱开关归一化光谱 $S(\omega)$

Fig. 5 Normalized spectrum $S(\omega)$ of spectral switch

表 1 与图 5 相对应的光谱参量

Table 1 Spectral parameters corresponding to Fig. 5

μ	$\mu=0$	$\mu=0.1$	$\mu=0.2$
θ_x	6.650	6.661	6.694
$\omega_{\max}/(10^{15} \text{ s}^{-1})$	2.640, 3.326	2.638, 3.318	2.636, 3.300
Δ	0.2287	0.2267	0.2213
S_{\min}	0.9316	0.9337	0.9398

在 $\theta_x=6.650$ 附近光谱开关的临界位置 θ_x 随扭曲因子 μ 的变化被描绘在图 6 中,其它的参量和图 5 一样,从图中看出,随着 μ 的增大, θ_x 逐渐增大,出现光谱开关的位置逐渐远离 z 轴。

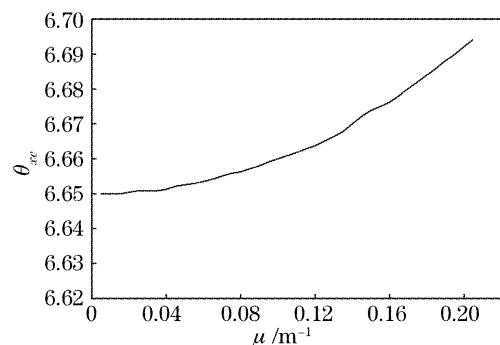


图 6 光谱开关的衍射角随扭曲因子 μ 的变化

Fig. 6 Diffraction angle of spectral switch versus twist factor μ

4 结 论

本文从部分空间相干光的传输理论出发,对被光阑衍射的扭曲高斯-谢尔模型光束的远场光谱移动和光谱开关现象做了详细研究。一般情况下,光

谱移动和光谱开关与扭曲因子 μ , 空间相关度 β , 截断参量 δ , 源光谱的谱宽 σ_0 和归一化的衍射角 θ 有关。本文与已有工作相比, 重点研究了光束扭曲因子 μ 对衍射扭曲高斯-谢尔模型光束远场光谱移动和光谱开关的影响。对被光阑衍射无扭曲高斯-谢尔模型光束可作为 $\mu=0$ 的特例统一处理。同无扭曲高斯-谢尔模型光束相比, 扭曲因子 μ 改变了光谱开关出现的位置, 随着 μ 的增大, 光谱开关出现的位置远离 z 轴, 光谱开关对应的光谱最小值 S_{\min} 随着 μ 的增大缓慢增大, 光谱跃迁量 Δ 随着 μ 的增大逐渐减小。当光束空间相干性较弱时, 扭曲因子 μ 对光谱移动的影响变得明显起来, 相比无扭曲高斯-谢尔模型光束, 随着 μ 的增大光谱移动数值变化很大。特别指出的是, 光场相关性、光阑截断参量和源光谱的谱宽对光谱移动和光谱开关的影响可以参考有关研究成果^[1,7,9~12]。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, 对精密光谱分析和应用有一定的参考意义。

参 考 文 献

- 1 Pu Jixiong, Zhang Huihua, Nemoto S. Spectral shifts and spectral switches of partially coherent light passing through an aperture[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **162**(4): 57~63
- 2 Gbur G, Visser T D, Wolf E. Anomalous behavior of spectra near phase singularities of focused waves[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(1): 013901
- 3 Kandpal H C. Experimental observation of the phenomenon of spectral switch[J]. *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.*, 2001, **3**(4): 296~299
- 4 Popescu G, Dogariu A. Spectral anomalies at wave-front dislocation[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(18):183902
- 5 Foley J T, Wolf E. 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
- 6 Soskin M S, Vasnetsov M V. "Singular optics" in progress in optics[J]. *Progress in Optics*, 2001, **42**: 219~276
- 7 Pan Liuzhan, Lü Baida. The spectral switch of partially coherent light in Young's experiment[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2001, **37**(11): 1377~1381
- 8 Ponomarenko S A, Wolf E. Spectral anomalies in a Fraunhofer diffraction pattern[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(14): 1211~1213
- 9 Pu Jixiong, Nemoto S. 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
- 10 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
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
- 11 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
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*, 2003, **33**(5): 454~463
- 12 Hu Xiandai, Pu Jixiong. 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
- 13 Pu Jixiong, Cai Chao, 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 Pan Liuzhan, Lü Baida. Spectral switches of polychromatic Gaussian beams passing through an astigmatic aperture lens[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **234**(1~6): 13~22
- 15 Friberg A T, Tervonen E, Turunen J. Interpretation and experimental demonstration of twisted Gaussian Schell-model beams[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(6): 1818~1826
- 16 Simon R, Mukunda N. Twisted Gaussian Schell-model beams [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1993, **10**(1): 95~109
- 17 Mandel L, Wolf E. *Optical Coherence and Quantum Optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995