

部分相干光被色差透镜聚焦的光谱异常现象*

蔡超 蒲继雄**

(华侨大学电子科学与技术系, 福建泉州 362011)

摘要 研究了色差透镜聚焦宽频带部分相干光, 观察到在聚焦光场轴上点出现的光谱奇异现象. 结果表明: 与入射光的光谱比较, 聚焦光场某些轴上点的光谱发生很大的变化. 这种光谱变化不仅与透镜的色差有关, 而且还与入射的部分相干光的相干度有关. 当色差一定时, 部分相干光空间相干度越大, 色差对轴上点光谱的影响就越大. 而当部分相干光空间相干度一定时, 色差越大, 轴上点光谱的变化也就越大. 研究结果还表明, 在一定的条件下, 光谱位移会发生快速变化, 即发生了光谱开关现象.

关键词 部分相干光; 空间相干; 光谱变化; 光谱开关; 聚焦; 色差

中图分类号 O433 **文献标识码** A

0 引言

自从1986年Wolf教授首次证明了部分相干光传输时会发生光谱变化现象以来^[1], 许多研究者对部分相干光在自由空间和通过光阑传输时的光谱作了比较深入的研究^[2-10]. 研究结果表明: 即使在自由空间, 空间相干度的变化都能引起显著的光谱变化. 而部分相干光在经过光阑-透镜系统时, 在近场和远场光谱都会发生变化. 当衍射场的光谱峰值频率比入射光谱峰值频率小时称为“红移”, 反之, 称为“蓝移”. 这种现象称为“Wolf效应”, 或“Wolf位移”. 理论研究结果还表明, 当空间相干度达到某临界值时, 光谱位移发生快速变化, 这种光谱位移的快速变化被定义为“光谱开关”(spectral switch). 近年来, 国内外学者从理论上和实验上对光谱开关现象进行了深入的研究^[3-5, 11-14].

研究实际光学系统的色差对聚焦部分相干光的光谱的影响不仅具有理论意义, 而且还具有实际意义. 这是因为, 自从Wolf教授首次证明了部分相干光传输时会发生光谱变化现象以来, 这种“Wolf效应”对光源光谱的测量的影响也随之引起人们的关注^[8-10]. 1990年, Kandpal等人在测量光谱时发现, 当改变光学透镜之前的光阑的大小时, 在单色仪观测到的光谱会发生变化. 他们把这种光谱变化归结为“Wolf效应”^[8]. 然而, Foley和Wang对Kandpal等人的实验的参数所能产生的光谱变化进行数据计算^[9]. 结果发现, 由“Wolf效应”所引起的光谱变化远小于Kandpal等人实验中所观察到的光谱变化.

因此, Foley和Wang认为实验中观测到的光谱变化可能是由光学透镜的色差造成的. 但令人遗憾的是, 到目前为止, 绝大多数的理论研究都把透镜视为无色差的光学元件^[10, 11]. 鉴此, 研究透镜的色差对光谱变化的影响是非常重要的研究课题. 本文研究色差光学透镜聚焦部分相干光时, 在聚焦光场的光谱变化, 着重讨论透镜的色差、部分相干光的空间相干度和透镜光阑的大小等参数对聚焦光场的光谱变化的影响. 我们发现当部分相干光被聚焦时, 在聚焦光场的光谱会产生异常现象, 即与入射光的光谱相比, 聚焦光场的光谱发生了显著的变化. 并且, 这种光谱异常现象不仅与透镜色差有关, 还与入射光的空间相干度以及透镜光阑的大小等参数有关.

1 理论分析

如图1, 部分相干光被色差透镜聚焦. 在光阑

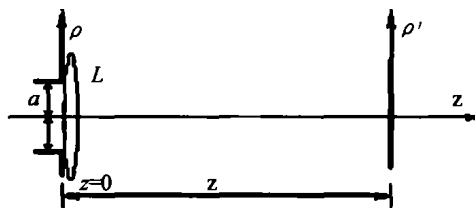


图1 有光阑限制的色差透镜用于聚焦部分相干光
Fig. 1 Focusing of partially coherent light by an aperture lens with chromatic aberration

处, 部分相干光交叉谱密度函数为^[4]

$$W^{(0)}(\rho_1, \rho_2, z=0, \omega) = S^{(0)}(\omega) \exp \left\{ -\frac{(\rho_1 - \rho_2)^2}{2\sigma(\omega)^2} \right\} \quad (1)$$

式中, $S^{(0)}(\omega)$ 和 $\sigma(\omega)$ 分别为光阑平面 ($z=0$ 平面) 处部分相干光的光谱和空间相干长度. 一般来说, $\sigma(\omega)$ 与角频率 ω 有关. ρ_1 和 ρ_2 分别是 $z=0$ 平面上任意两点的位置矢量. 透镜 L 为色差透镜. 假定透镜 L 在中心频率 ω_0 (或中心波长 λ_0) 的焦距为 f_0 ; 透镜的色差是由透镜材料的色散 $dn/d\lambda|_0$ 所引

* 国务院侨务办公室科研基金(03QZR4)和福建省自然科学基金(A0010014)资助项目

** Email: jixiong@hqu.edu.cn

收稿日期: 2004-03-03

起的. 因此, 透镜的色差可表示为

$$f(\lambda) = f_0 + \left. \frac{df}{d\lambda} \right|_0 (\lambda - \lambda_0) = f_0 - \frac{f_0}{n-1} \left. \frac{dn}{d\lambda} \right|_0 (\lambda - \lambda_0) \quad (2a)$$

或者

$$f(\omega) = f_0 + \left. \frac{df}{d\omega} \right|_0 (\omega - \omega_0) = f_0 \left[1 + \zeta \left(\frac{\omega}{\omega_0} - 1 \right) \right] \quad (2b)$$

其中

$$\zeta = \left. \frac{\omega_0}{f_0} \frac{df}{d\omega} \right|_0 \quad (3)$$

光阑的半径为 a ; z_1 和 z_2 分别为光阑到透镜和透镜到观察平面之间的距离.

从光阑平面到观察平面的 $ABCD$ 光线矩阵可表示为^[15]

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{z}{f(\omega)} & z \\ -\frac{1}{f(\omega)} & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

根据部分相干光交叉谱密度经过 $ABCD$ 光学矩阵表示的光学系统的传输公式, 得到了观察点平面 (ρ' 平面) 部分相干光的交叉谱密度为

$$W(\rho'_1, \rho'_2, \omega) = \left(\frac{k}{2\pi B} \right)^2 \int W^{(0)}(\rho_1, \rho_2, \omega) \cdot \exp \left\{ -\frac{ik}{2B} [A(\rho_1^2 - \rho_2^2) - 2(\rho'_1 \rho_1 - \rho'_2 \rho_2) + D(\rho_1^2 - \rho_2^2)] \right\} d\rho_1 d\rho_2 \quad (5)$$

式(5)的积分遍及整个透镜的光阑平面. 为了简单起见, 取空间相干长度为

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 \frac{\omega_0}{\omega} \quad (6)$$

因此, 入射到透镜平面上的部分相干光满足定标定律^[4]. 令

$$\Delta(\omega) = \frac{\sigma(\omega)}{a} = \Delta_0 \frac{\omega_0}{\omega} \quad (7)$$

式中, $\Delta_0 = \sigma_0/a$ 为频率为 ω_0 光分量的相对空间相干长度(简称相对相干长度).

为了简单起见, 只考虑轴上点的光谱变化, 即 $\rho'_1 = \rho'_2 = 0$. 因此, 轴上点的光谱可写为

$$S(z, \omega) = S^{(0)}(\omega) \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \left(\frac{z_0}{z} \right)^2 \times \prod_{0_0}^{1_1} \exp \left[-\frac{r_1^2 + r_2^2}{2\Delta(\omega)^2} \right] \exp \left\{ -\frac{i\pi z_0 [f(\omega) - z]}{z f(\omega)} \right. \\ \left. \frac{\omega}{\omega_0} (r_1^2 - r_2^2) \right\} I_0 \left(\frac{r_1 r_2}{\Delta(\omega)^2} \right) r_1 r_2 dr_1 dr_2 \quad (8)$$

式(8)中

$$r_1 = \rho_1/a, r_2 = \rho_2/a, z_0 = a^2/\lambda_0 \quad (9)$$

$$I_0 \left(\frac{r_1 r_2}{\Delta(\omega)^2} \right) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp \left[\frac{r_1 r_2}{\Delta(\omega)^2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \right] d\phi_1 \quad (10)$$

为第一类零阶修正贝塞尔函数.

假设光阑平面 ($z=0$ 平面) 处的部分相干光的光谱 $S^{(0)}(\omega)$ 是中心频率为 ω_0 、半峰值处的半光谱宽度为 Γ 洛仑兹型, 即

$$S^{(0)}(\omega) = S_0 \frac{\Gamma^2}{(\omega - \omega_0)^2 + \Gamma^2} \quad (11)$$

根据式(8)和式(11), 可以计算衍射光场中轴上点的光谱. 为了应用文献[16]给出的透镜色差的参数, 假定

$$\omega_0 = 7.57 \times 10^{15} \text{ s}^{-1} \quad (\lambda_0 = 249 \text{ nm}) \\ \Gamma = 0.6 \times 10^{15} \text{ s}^{-1} \quad (12)$$

2 数值计算

当光阑处的部分相干光的光谱的中心频率 ω_0 和半最大半宽度 Γ 取式(12)给定的值时, 透镜色差的其它相关数据为: $a = 1 \text{ mm}$, $f_0 = 150 \text{ mm}$. 透镜的材料二氧化硅的色散系数^[16]

$$\lambda_0 \left. \frac{dn}{d\lambda} \right|_0 = -0.1375 \\ dn/d\lambda|_0 = 163.089 \text{ mm}/\mu\text{m} \\ (\text{即: } df/d\omega|_0 = -5.3646 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}) \quad (13)$$

应用式(8)和式(11), 可以计算衍射光场中轴上点的光谱. 本文把光谱归一化为光谱的最大值等于 1.

图 2 为当相对相干常数 Δ_0 分别取不同几个值时, 聚焦光场轴上点 ($z = 0.85f_0$) 的归一化光谱的变化情况. 在数值计算时, 取透镜色差 $df/d\omega|_0 = -5 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$, (即 $\zeta = -0.252$, $\omega_0 = 7.57 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$, $\Gamma = 0.6 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$, $a = 1 \text{ mm}$, $df/d\omega|_0 = -5 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$). 图中的点线为透镜平面部分相干光的归一化光谱, 实线为 $z = 0.85f_0$ 处轴上点的归一化光谱. 从图中可以看到, 具有一定光谱宽度的单一谱线经光阑限制的透镜聚焦, 在聚焦光场的某些轴上点的光谱出现很大的变化, 即光谱由单峰分裂成双峰. 并且, 由图 2(a) 可见, 光谱最大峰的位置大约在 $12 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ 的位置, 这远离透镜平面的光谱峰值位置 $\omega_0 = 7.57 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$. 为了定量地描述衍射光场的光谱变化, 定义相对光谱位移

$$\frac{\delta\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_m - \omega_0}{\omega_0} \quad (14)$$

式中, ω_m 为轴上点光谱 $S(z, \omega)$ 取最大值时所对应的频率. 若相对光谱位移 $\delta\omega/\omega_0 > 0$ 时, 称光谱为“蓝移”; 反之, 当 $\delta\omega/\omega_0 < 0$, 称之为“红移”^[4]. 按此定义, 图 2(a) 所示的光谱就是蓝移. 由图 2(b) 可见, 当相对相干长度减小为 $\Delta_0 = 0.5$ 时, 聚焦光场光谱的次峰的高度增大了. 当 $\Delta_0 = 0.45$ 时(图 2(c)), 两个光谱峰达到相同高度. 在这种情况下,

光谱位移发生快速变化,这种现象就是所谓的光谱开关^[4,5,11-14]. 图2(d)和图2(e)时,相对相干长度

分别减小为 $\Delta_0 = 0.4$ 和 $\Delta_0 = 0.3$,这两种情况下,光谱位移都较小.

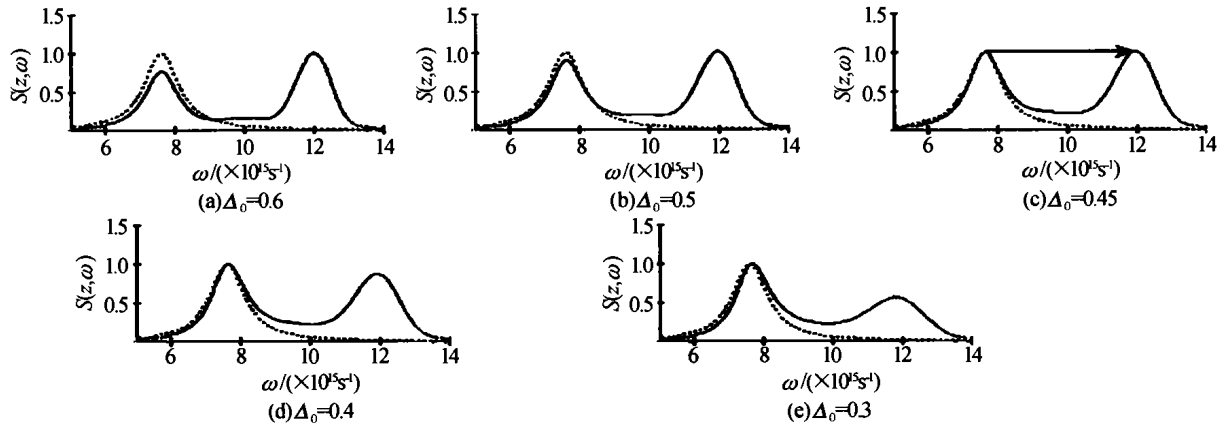


图2 相对相干常数 Δ_0 取不同值时聚焦点轴上点 ($z = 0.85f_0$) 的归一化光谱

Fig. 2 The normalized spectra at axial point ($z = 0.85f_0$) of the focused field for different values of relative coherence parameters Δ_0

图3描述了透镜色差为 $df/d\omega|_0 = -5 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$ 时,在 $z = 0.85f_0$ 处的轴上点光谱位移与相对相干常数之间的关系. 相对相干常数从 0.2 变化到 0.45 时,光谱会发生缓慢的位移,在 $\Delta_0 = 0.45$ 时,光谱位移发生跳变,由相对光谱位移由 3.963×10^{-3} 跳变为 0.575 ,即在这个条件下发生光谱开关现象,当

$\Delta_0 > 0.45$ 时光谱位移的变化又变得相对缓慢,而且在 Δ_0 从 0.2 变化到 2 的全过程中,光谱位移均出现蓝移.

图4表示在相对相干常数 $\Delta_0 = 1$ 时,轴上点 $z = 0.85f_0$ 处的归一化光谱的情况,图中虚线为入射光谱,实线为 $z = 0.85f_0$ 处轴上点的光谱,色差 ($df/d\omega|_0$) 取值分别为: $-1 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$, $-3 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$ 和 $-5 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$. 从图中可以看出,在色差 $df/d\omega|_0 = -1 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$ 时,观察点处的频谱只有单峰;当色差 $df/d\omega|_0 = -3 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$ 时,观察点处的频谱分裂成双峰,且次峰峰值出现在 $\omega = 1.5 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$ 处,大小为 0.7582;当色差 $df/d\omega|_0 = -5 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$ 时,原来的次峰上升为主峰出现在 $\omega = 1.2 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$,而原来的主峰下降为次峰,其峰值为 0.54257.

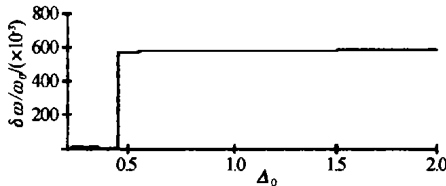


图3 相对光谱位移与相对相干常数 Δ_0 的关系曲线(图中各参数与图2相同)

Fig. 3 The relative spectral shifts $\delta\omega/\omega_0$ as a function of relative coherence parameter Δ_0 (Other parameters are the same as in Fig. 2)

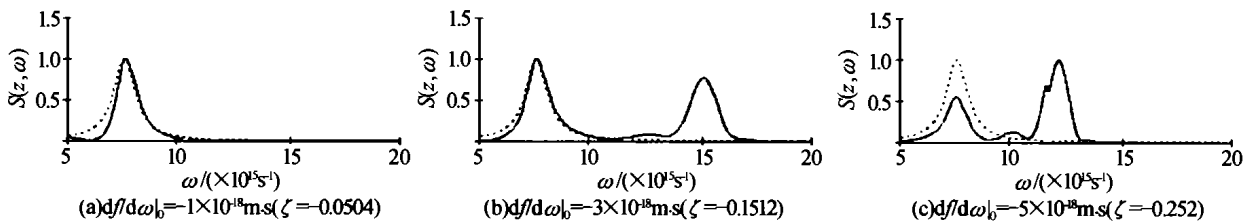


图4 色差分别取不同值时,轴上点的归一化光谱

Fig. 4 Normalized spectra at the axial point of the focused field when the chromatic aberration is equal to several different values, respectively

图5为相对相干度 Δ_0 分别取 0.5(实线)、1(短划线)和 2(点线)时,色差与光谱位移之间的关系曲线,计算时 $z = 0.85f_0$. 由图中可得,在 $\Delta_0 = 0.5$ 时,光谱开关出现在色差 $df/d\omega|_0 = -4.7 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$ 处,相对光谱位移由 0.612 跳变为 2.642×10^{-3} ;在 $\Delta_0 = 1$ 时,光谱开关出现在色差 $df/d\omega|_0 = -3.49 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$ 处,相对光谱位移由 0.836 跳变为 3.963×10^{-3} ;在 $\Delta_0 = 2$ 时,光谱开关出现在色差 $df/d\omega|_0 = -2.6 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$ 处,相对光谱位移由 1.14 跳变为 9.247×10^{-3} . 以上三种情况相对光谱位移均大于

零,即均为蓝移.

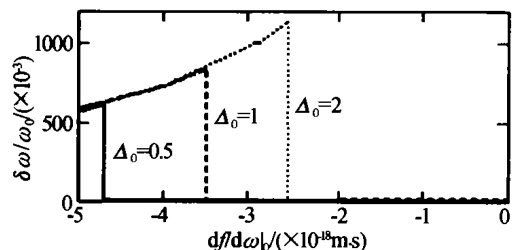


图5 相对光谱位移与透镜的色差 ($df/d\omega|_0$) 的变化关系曲线

Fig. 5 The relative spectral shifts related to the chromatic aberration ($df/d\omega|_0$)

图 6 给出了光谱位移随相对距离改变的变化曲线, 这里相对相干常数取 $\Delta_0 = 1$. 由图可见, 在聚焦光场 $z/f_0 < 1$, 当色差为 $df/d\omega|_0 = -5 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$ 时, 光谱位移是蓝移. 并且, 随着 z/f_0 的增大, 蓝移逐渐减小. 这表明了光谱的主峰逐渐往透镜平面的光谱峰靠近. 值得注意的是, 在这个过程中, 没有发生光谱位移的快速变化, 即没有出现光谱开关. 而当色差为 $df/d\omega|_0 = -3 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$ 时 (点线), 随着 z/f_0 的增大, 会出现光谱开关现象. 这表明了高频处的光谱峰和低频处的光谱峰交替成为主峰. 并且, 随着距离向几何焦点移动, 高频处的光谱峰也不断向低频方向移动, 从 $0.8f_0$ 到 f_0 的这段距离内共出现了 6 次光谱开关现象. 在变化过程中, 光谱位移均为蓝移. 当色差为零 ($df/d\omega|_0 = 0$) 时, 光谱位移的变化范围比较小, 并且, 从 $0.8f_0$ 到 f_0 的这段距离内共发生了两次光谱开关的现象, 光谱位移也出现了红移和蓝移交替的现象.

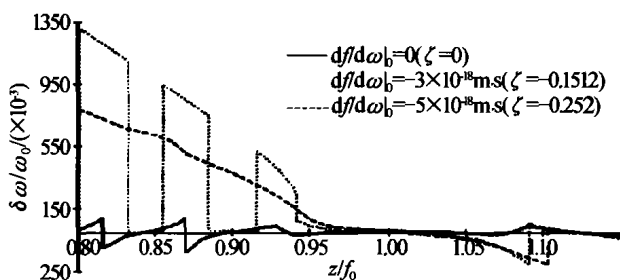


图 6 聚焦光场轴上点的光谱位移与 z/f_0 的变化关系

Fig. 6 The spectral shifts at the axial points of the focused field as a function of z/f_0

3 结论

研究了色差透镜聚焦具有一定光谱宽度的部分相干光时, 在聚焦光场的光谱变化情况. 着重研究透镜色差和部分相干光的空间相干度对聚焦光场的光谱的影响. 通过理论计算和数值分析, 发现在聚焦光场的某些点, 光谱发生了异常现象, 即单一光谱线分裂成两条光谱线. 研究结果表明: 色差对这一现象的影响十分显著. 当透镜的色差取某一值时, 光谱在近场的轴上点只发生蓝移, 没有红移现象, 而且在部分的轴上区间内光谱的蓝移量相当大, 在某些关键点也出现了光谱开关现象. 随着透镜色差的继续增大, 在上述的轴上区间内的光谱蓝移量相对减小, 光谱开关现象也消失了. 另一方面, 入射到透镜平面的部分相干光的相干度以及透镜光阑的大小等参数都对光谱变化现象也产生很大的影响.

参考文献

- 1 Wolf E. Invariance of the spectrum of light on propagation. *Phys Rev Lett*, 1986, **56**(13): 1370 ~ 1372
- 2 Foley J T. The effect on an aperture on the spectrum of partially coherent light. *J Opt Soc Am A*, 1991, **8**(7): 1099 ~ 1105
- 3 冯建武, 赵志国. 部分相干光通过光阑-透镜分离系统的光谱特性. *光子学报*, 2002, **31**(11): 1363 ~ 1367
F J W, Zhao Z G. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(11): 1363 ~ 1367
- 4 Pu J, Zhang H, Nemoto S. Spectral shifts and spectral switches of partially coherent light passing through an aperture. *Optics Communications*, 1999, **162**: 57-63
- 5 Pu J, Nemoto S. Spectral shifts and spectral switches in diffraction of partially coherent light by a circular aperture. *IEEE J Quant Electron*, 2000, **36**: 1407-1411
- 6 Palma C, Cincotti G. Spectral shifts of a partially coherent field after passing through a lens. *Opt Lett*, 1997, **22**(10): 671 ~ 672
- 7 Palma C, Cincotti G, Guattari G. Spectral shift of a Gaussian Schell-model beam beyond a thin lens. *IEEE J Quantum Electron*, 1998, **34**(2): 378 ~ 383
- 8 Kandpal H, Vaishya J, Joshi K C. Wolf shift and its application in spectroradiometry. *Opt Commun*, 1989, **73**: 169 ~ 173
- 9 Foley J T, Wang M. A theoretical analysis of coherence-induced spectral shift experiments of Kandpal, Vaishya, and Joshi. *J Res Natl Inst Stand Technol*, 1994, **99**: 267 ~ 280
- 10 Pu J, Nemoto S. Spectral shifts of partially coherent beams focused by a lens with chromatic aberration. *Opt Commun*, 2002, **207**: 1 ~ 5
- 11 Pu J, Cai C, Nemoto S. Spectral switches of partially coherent light focused by a filter-lens system with chromatic aberration. *J Opt Soc Am A*, 2004, **21**: 994 ~ 999
- 12 Anand S, Yadav B K, Kandpal H C. Experimental study of the phenomenon of spectral switch due to diffraction of partially coherent light. *J Opt Soc Am A*, 2002, **19**: 2223 ~ 2228
- 13 Kandpal H C. Experimental observation of the phenomenon of spectral switch. *J Opt A: Pure and Appl Opt*, 2001, **3**: 296 ~ 299
- 14 Pan L, Lu B. The spectral switch of partially coherent light in Young's experiment. *IEEE J Quant Electron*, 2001, **37**: 1377 ~ 1381
- 15 Friberg A T, Turunen J. Imaging of Gaussian Schell-model sources. *J Opt Soc Am A*, 1988, **5**: 713 ~ 720
- 16 Horvath Z L, Bor Z. Focusing of femtosecond pulses having Gaussian spatial distribution. *Opt Commun*, 1993, **100**: 6 ~ 12

Phenomena of Spectral Anomalies of Partially Coherent Light Focused by a Lens with Chromatic Aberration

Cai Chao, Pu Jixiong

Department of Electric Science and Technology, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362011

Received date: 2004-03-03

Abstract The phenomena of spectral anomalies in the axial points of the focused field, was investigated when partially coherent light is focused by a lens with chromatic aberration. It is shown that the spectrum of the axial points in the focused field is quite different from that of the incident light. This spectral change is not only dependent on the chromatic aberration of the lens, but also on the coherence of the partially coherent light. As the chromatic aberration is fixed, the larger coherence of the partially coherent light is, the more influence of the chromatic aberration on the spectral change of axial focused field. As the chromatic aberration is fixed, the larger the chromatic aberration, the larger change of the spectrum at the axial points of the focused field. The results also indicate that, at some conditions, the rapid change of the spectral shifts, i. e., a spectral switch, takes place in the some points of the focused field.

Keywords Partially coherent light; Spatial coherence; Spectral change; Spectral switch; Focus; Chromatic aberration

Cai Chao was born in November 1979. He is now a graduate student in Huaqiao University. His research interests are coherence, propagation of beams, and nonlinear optics etc.

