

部分相干光经色差光学透镜聚焦的光谱变化

蔡 超 蒲继雄

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 基于部分相干光的传输理论, 研究部分相干光通过一光阑限制的色差光学透镜聚焦后, 聚焦光场的光谱特性. 数值计算表明, 适量的透镜色差就能使聚焦光场的光谱产生显著的变化, 并且这种光谱变化还与入射光的空间相干度及光谱宽度有关. 入射光的空间相干度越小, 色差所引起的光谱位移越小; 入射光的光谱宽度越窄, 色差所引起的光谱位移也越小.

关键词 部分相干光, 透镜, 色差, 光谱位移

中图分类号 O 436.1

文献标识码 A

1986 年 Wolf 教授首次证明, 当准均匀光源的光谱相干度是变量 $k(\rho_2 - \rho_1)$ 的函数时, 从该光源发出的光在传输中, 其光谱保持不变^[1]. 这里 $(\rho_2 - \rho_1)$ 为光源平面任意两点的位置矢量差. $k = \omega/c$, ω 为圆频率, c 为真空中的光速. 在这种情况下, 光源被称为是满足定标定律 (Scaling law) 的光源. 从满足定标定律的光源发出的光在传输时保持光谱不变; 而从违反定标定律的光源发出的光在传输时, 其光谱也将发生变化. 即使光在自由空间中传输^[2], 其光谱也将发生变化. 这种由于光源的光谱相干度违反定标定律, 产生的光谱变化称为相关诱导的光谱变化 (Correlation Induced Spectral Changes). 近 10 多年来, 许多研究者对相关诱导的光谱变化进行了许多理论和实验研究. 此后的理论与实验发现, 满足定标定律的光源发出的光照射到一光阑时, 在衍射光场观测到的光谱也会发生变化. 这种光谱变化有时称为衍射诱导的光谱变化 (Diffraction Induced Spectral Changes)^[3-6]. 相关诱导的光谱变化或衍射诱导的光谱变化, 这种新现象对高精度光谱测量的影响引起研究者的关注^[7,8]. 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相关诱导的光谱变化^[7]. 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^[8]. 结果发现, 由相关诱导的光谱变化或衍射诱导的光谱变化所引起的光谱变化, 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^[6]. 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. 我们将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. 着重讨论光阑的大小、光学透镜的色差和部分相干光的空间相干度等参数对聚焦光场的光谱变化的影响.

1 理论分析

如图 1 所示, 部分相干光被一色差透镜聚焦. 在光阑处, 部分相干光的交叉谱密度函数为^[6]

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

收稿日期 2003-11-27

作者简介 蔡 超 (1979-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光和光电子的研究. E-mail: stevecc@hqu.edu.cn

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

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在式 1 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 $dn/d\lambda|_0$ 所引起的. 因此, 透镜的色差可表示为^[9]

$$f(\lambda) = f_0 + df/d\lambda \Big|_0 (\lambda - \lambda_0) = f_0 - \frac{f_0}{n-1} \frac{dn}{d\lambda} \Big|_0 (\lambda - \lambda_0), \tag{2a}$$

或者

$$f(\omega) = f_0 + \frac{df}{d\omega} \Big|_0 (\omega - \omega_0) = f_0 [1 + \zeta(\frac{\omega}{\omega_0} - 1)], \tag{2b}$$

其中

$$\zeta = \frac{\omega_0}{f_0} \frac{df}{d\omega} \Big|_0. \tag{3}$$

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^[10]

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{z_2}{f(\omega)} & z_1 + z_2 - \frac{z_1 z_2}{f(\omega)} \\ -\frac{1}{f(\omega)} & 1 - \frac{z_1}{f(\omega)} \end{bmatrix}. \tag{4}$$

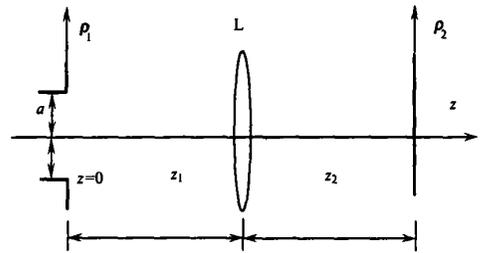


图 1 色差透镜聚焦部分相干光束示意图

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, 我们得到了观察点平面 (ρ' 平面) 部分相干光的交叉谱密度为

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

式(5)的积分遍及整个圆孔, 为了简单起见, 取空间相干长度为

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

因此, 入射到光阑上的部分相干光满足定标定律(Scaling Law)^[5]. 令

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

其中 $\Delta_0 = \sigma_0/a$ 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, 我们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

$$S(z_2, \omega) = S^{(0)}(\omega) (\frac{\omega}{\omega_0})^2 (\frac{z_0 \cdot f(\omega)}{(z_1 + z_2)f(\omega) - z_1 z_2})^2 \times \int_0^1 \int_0^1 \exp[-\frac{r_1^2 + r_2^2}{2\Delta(\omega)^2}] \times \exp[-\frac{i\pi z_0 [f(\omega) - z_2]}{(z_1 + z_2)f(\omega) - z_1 z_2} \cdot \frac{\omega}{\omega_0} \cdot (r_1^2 - r_2^2)] \times I_0(\frac{r_1 r_2}{\Delta(\omega)^2}) \cdot r_1 r_2 dr_1 dr_2 \tag{8}$$

在式(8)中

$$r_1 = \rho_1/a, \quad r_2 = \rho_2/a, \tag{9}$$

$$I_0(\frac{r_1 + r_2}{\Delta(\omega)^2}) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[\frac{r_1 r_2}{\Delta(\omega)^2}] \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_2) d\varphi_1 \tag{10}$$

为第一类零阶修正贝塞尔函数. 假设光阑平面 ($z = 0$ 平面) 处, 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 洛伦兹型, 即

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

根据式(8), (11), 我们可以计算衍射光场中轴上点的光谱. 为了应用参考文献[9]给出的透镜色差的参数, 我们假定

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

2 数值计算

当光阑处部分相干光的光谱中心频率(ω_0)和最大半宽度(Γ)取 $0.6 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ 时, 透镜色差的其它相关数据为 $f_0 = 150 \text{ mm}$. 且透镜材料二氧化硅的色散系数 $\lambda_0 \frac{dn}{d\lambda} \Big|_0 = -0.1375$, 并有 $dn/d\lambda \Big|_0 = 163.089 \text{ nm} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, 即 $df/d\omega \Big|_0 = -5.3646 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$. 利用式(8), (11), 可以计算衍射光场中轴上点的光谱. 我们把光谱归一化成其最大值等于 1. 图 2 是在透镜色差分别取 $0, -2.5 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$ 和 $-5.0 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$ 时, 轴上的光谱与衍射光阑处的光谱. 图中, 光学系统及光谱参数为 $z_2/f_0 = 1.2, \omega_0 = 7.57 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}, \Gamma = 0.6 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}, z_1 = 2f_0, a = 0.5 \text{ mm}$. 图 2(a) 部分相干光的相对相干长度为 $\Delta_0 = 1.0$. 由图

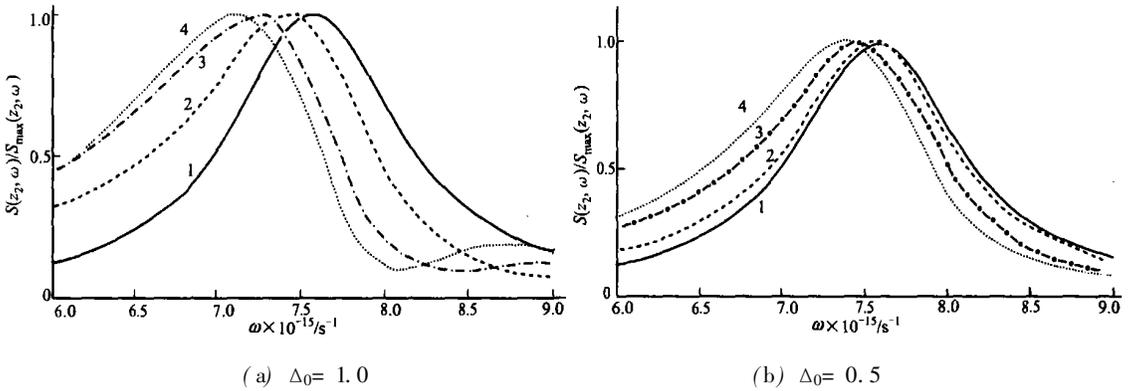


图 2 色差取不同值所得到的轴上的光谱

1. $z = 0$ 处的源光谱; 2 $df/d\omega \Big|_0 = 0$; 3 $df/d\omega \Big|_0 = -2.5 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$; 4 $df/d\omega \Big|_0 = -5.0 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$

可见, 与光阑处部分相干光的光谱比较, 聚焦光场轴上点的光谱往较低频率的方向移动了, 即光谱位移为红移. 并且, 色差越大, 红移量越大. 当无色差时, 光谱的相对位移为 -19.815×10^{-3} ; 而当色差分别取 $-2.5 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$ 和 $-5.0 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$ 时, 光谱相对位移分别是 $-44.914 \times 10^{-3}, -59.445 \times 10^{-3}$. 图 2 (b) 为相对相干长度 $\Delta_0 = 0.5$ 的情况, 当色差分别取 $0, -2.5 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$ 和 $-5.0 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$ 时, 光谱相对位移 $\delta\omega/\omega_0$ 分别为 $-3.963 \times 10^{-3}, -14.531 \times 10^{-3}$ 和 -26.420×10^{-3} . 由此可见, 色差越大, 光谱位移的红移量越大. 与图 2(a) 的情况相比(相对相干长度 $\Delta_0 = 1.0$), 相对相干长度较小时, 光谱位移的红移量较小. 为了定量地描述衍射光场的光谱变法, 我们定义相对光谱位移

$$\delta\omega/\omega_0 = (\omega_m - \omega_0)/\omega_0, \tag{14}$$

其中, ω_m 为轴上点光谱 $S(z_2, \omega)$ 取最大值时所对应的频率. 若相对光谱位移 $\delta\omega/\omega_0 > 0$ 时, 我们称光谱为“蓝移”; 反之称之为“红移”^[5].

在图3中, 我们画出了在 $z_2 = 1.2f_0$ 点, 观测到的相对光谱位移与相对相干长度 Δ_0 的变化关系曲

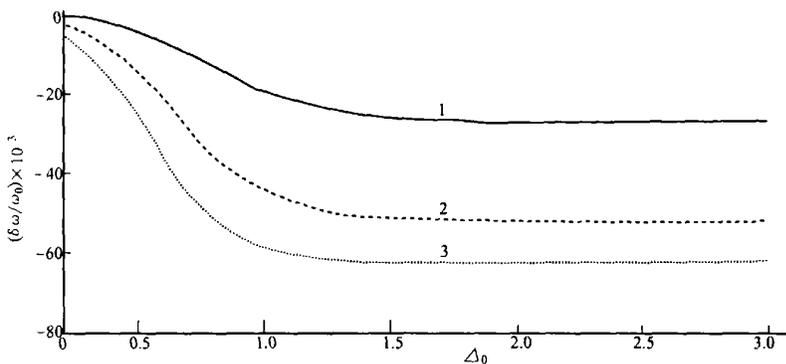


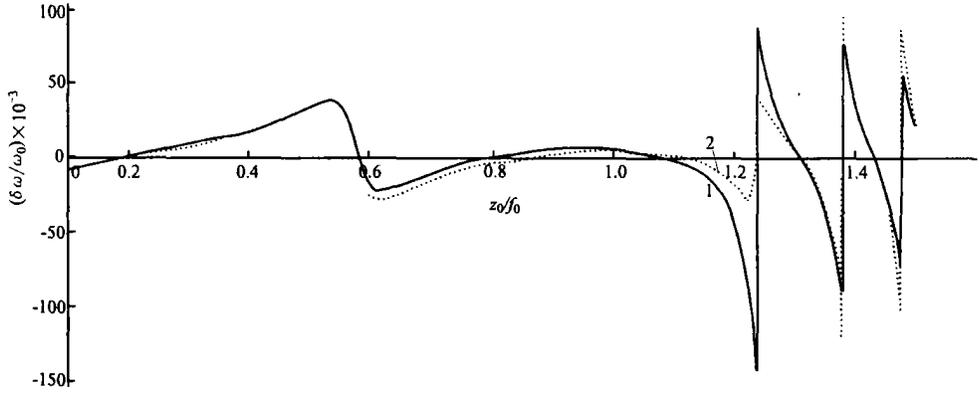
图 3 相对光谱位移 $\delta\omega/\omega_0$ 随相对相干长度 Δ_0 的变化

1. $df/d\omega \Big|_0 = 0$; 2 $df/d\omega \Big|_0 = -2.5 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$; 3. $df/d\omega \Big|_0 = -5.0 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$

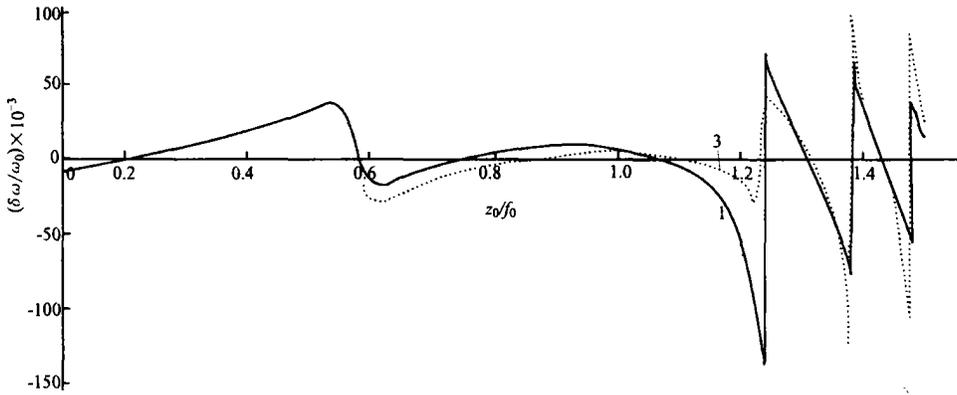
线. 在图中, 透镜的色差分别取 $df/d\omega \Big|_0 = 0, -2.5 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$ 和 $-5.0 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$. 由图3可见, 透镜的色差越大, 观测到的光谱位移越大, 即红移量越大. 当相对相干长度 Δ_0 很小时, 光谱位移的红移量很

小, 随着 Δ_0 的增大, 红移量迅速增大. 当 Δ_0 大于 1.0 时, 红移量随 Δ_0 的增大而呈现缓慢的增大, 当 Δ_0 超过 2.0 时, $\delta\omega/\omega_0$ 基本不发生变化, 趋于一个固定值. 这个固定值就是完全相干情况下的光谱位移.

图 4 为不同色差情况下的轴上点的光谱位移. 我们发现在靠近透镜的区域, 色差几乎不影响相对光谱位移 $\delta\omega/\omega_0$. 当 $z_2/f_0 > 0.6$ 时, 色差对相对光谱位移 $\delta\omega/\omega_0$ 的影响就比较明显了, 尤其是色差为 $-5.0 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 这种影响更为明显, 如图 4(b) 所示. 从图中看到, 在 $z_2/f_0 = 1.235$ 附近, 光谱位移出现快速的变化, 即出现光谱开关现象^[5-7].



(a) 透镜无色差和色差为 $-2.5 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



(b) 透镜无色差和色差为 $-5.0 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

图 4 轴上光谱位移与 z_2/f_0 的函数关系

- 1. $d\ell/d\omega|_{\omega=0}$; 2. $d\ell/d\omega|_{\omega=0} = -2.5 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$; 3. $d\ell/d\omega|_{\omega=0} = -5.0 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$

图 5 为透镜的色差为 $-5.0 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}$ 时, 在观察点 $z_2 = 1.2f_0$ 观测到的光谱位移随相对相干长度

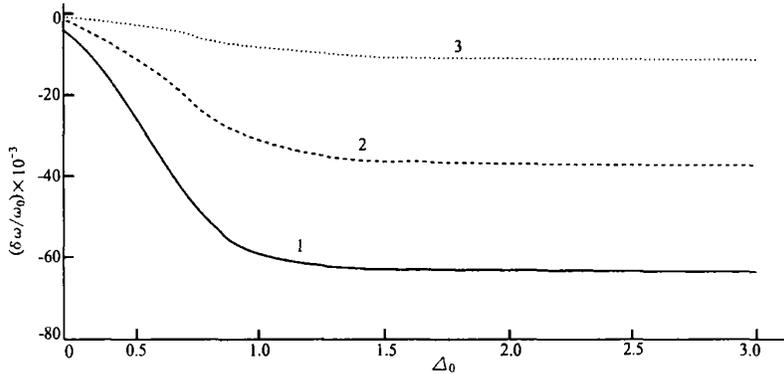


图 5 相对光谱位移 $\delta\omega/\omega_0$ 随相对相干长度的变化

- 1. $\Gamma = 0.6 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$; 2. $\Gamma = 0.4 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$; 3. $\Gamma = 0.2 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$

的变化情况. 如图所示, 光谱位移是红移. 并且光源的光谱的谱宽 Γ 越大, 观测点的光谱的红移量越大. 我们还可以看到红移量随着 Δ_0 的增大而增大. 当 Δ_0 大于 2, Δ_0 的继续增大并不导致相对光谱位移发生明显的变化. 当源光谱半谱宽分别取 $\Gamma = 0.6 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$, $\Gamma = 0.4 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ 和 $\Gamma = 0.2 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ 时, 最大

的相对光谱位移分别为 -63.54×10^{-3} , -36.988×10^{-3} 和 -11.096×10^{-3} .

3 结束语

通过理论分析和数值计算表明,通过色差光学系统的部分相干光会发生光谱位移、出现光谱开关现象.光学透镜适量的色差能引起显著的光谱变化,色差越大变化越明显,并且这种变化与入射光源 GSM 光束的空间相干长度有关. GSM 光束的空间相干度越低,色差对光谱变化的影响越小.入射光源的半谱宽度也能影响通过色差光学系统的 GSM 光束的光谱,入射光源的半谱宽度越宽,色差对光谱位移的影响越大.

参 考 文 献

- 1 Wolf E. Invariance of the spectrum of light on propagation[J]. Phys. Rev. Lett., 1986, 56(13): 1 370~ 1 372
- 2 Dacic Z, Wolf E. Changes in the spectrum of a partially coherent light beam propagating in free space[J]. J. Opt. Soc. Am. (A), 1988, 5(7): 1 118~ 1 126
- 3 Foley J T. The effect on an aperture on the spectrum of partially coherent light[J]. J. Opt. Soc. Am. (A), 1991, 8(7): 1 099~ 1 105
- 4 Pu J, Nemoto S. Spectral shifts and spectral switches in diffraction of partially coherent light by a circular aperture[J]. IEEE J. Quant. Electron., 2000, 36(12): 1 407~ 1 411
- 5 Pu J, Nemoto S. Spectral changes and 1xN spectral switches in the diffraction of partially coherent light by an aperture[J]. J. Opt. Soc. Am. (A), 2002, 19(2): 339~ 344
- 6 Palma C, Cincotti G. Spectral shifts of a partially coherent field after passing through a lens[J]. Opt. Lett., 1997, 22(10): 671~ 672
- 7 Kandpal H C, Vaishya J S, Joshi K C. Wolf shift and its application in spectroradiometry[J]. Opt. Commun., 1989, 73(3): 169~ 172
- 8 Foley J T, Wang M. A theoretical analysis of coherence induced spectral shift experiments of Kandpal, Vaishya, and Joshi[J]. J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., 1994, (99): 267~ 280
- 9 Horvath Z L, Bor Z. Focusing of femtosecond pulses having Gaussian spatial distribution[J]. Opt. Commun., 1993, (100): 6~ 12
- 10 Friberg A T, Tununen J. Imaging of Gaussian Schell model sources[J]. J. Opt. Soc. Am. (A), 1988, 5(5): 713~ 720

Spectral Changes Induced by Partially Coherent Light after Focusing through an Optical Lens with Chromatic Aberration

Cai Chao Pu Jixiong

(College of Info. Sci. & Eng., Huaqiao Univ., 362021, Quanzhou, China)

Abstract Based on the propagation theory of partially coherent light, the authors investigate the spectral characteristics of the focused light field induced by partially coherent light after focusing through an aperture lens. Numerical calculation shows that a moderate chromatic aberration of lens gives rise to remarkable spectral changes in focused light field, and this spectral changes are dependent on the degree of spatial coherence of incident light and on the width of spectrum. The lower degree of spatial coherence of the incident light, the smaller spectral shifts induced by chromatic aberration; the narrower spectral width of incident light, the smaller spectral shifts induced by chromatic aberration.

Keywords partially coherent light, lens, chromatic aberration, spectral shifts