

部分相干方形平顶电磁脉冲光束经相位调制透镜的聚焦特性

张国文¹ 陶 华² 蒲继雄² 卢兴强^{1*} 马伟新³

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800
²华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021
³中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800

摘要 将稳态场的相干偏振统一理论应用于脉冲光束的研究。构建了部分相干方形平顶电磁脉冲光束,并推导出该光束经相位调制透镜后聚焦的交叉谱密度函数表达式。详细探讨了相位调制尺寸、调制深度、调制中心位置以及光束相关长度等对聚焦场光谱强度的影响。研究表明,局域相位调制会导致在聚焦场中产生另一光谱强度峰值,光束的相关参数和相位调制参数决定该光谱强度峰值大小,并在一定情况下使之发生移动。特别是当光源相关参数和相位调制参数处于某临界值时,会发生光谱强度峰值开关现象。同时发现,空间相关长度导致光束发生空间焦移,而脉冲时间相关长度导致光谱强度峰值在频率上的移动。

关键词 激光光学;相干偏振;电磁光束;相位调制透镜聚焦;光谱强度

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.0102005

Focusing Characteristics of Partially Coherent Square Flat-Topped Electromagnetic Pulsed Beams Focused by a Phase Modulated Lens

Zhang Guowen¹ Tao Hua² Pu Jixiong² Lu Xingqiang¹ Ma Weixin³

¹National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
²Department of Information Science & Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China
³Shanghai Institute of Laser Plasmas, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

Abstract Unified theory of coherence and polarization of stationary beams is applied to pulsed light beams research. Partially coherent square flat-topped electromagnetic pulsed beams have been constructed, and analytical expressions for cross-spectral density matrix of a class of the pulsed light beams focused by a phase modulated lens have been derived. A detailed study on effects of phase distortion radii, phase distortion depth, phase modulated position and correlation length on spectral density in focused field is carried on. It is shown that local phase modulation will produce another spectral density peak in the focused field, and correlation parameter of source and phase modulation parameters determine the value of intensity peak, and make it shift in some cases. Especially when parameters of correlation of the source are chosen to be some values, a focal switch phenomenon will occur. Change of spatial coherent length of the source produces the spatially focal shift and pulse time correlation length also produces spectral density peak shift on frequency.

Key words laser optics; coherence and polarization; electromagnetic beams; phase modulated lens; spectral density
OCIS codes 140.3295; 260.1960; 300.6360; 140.3330

收稿日期: 2011-08-01; 收到修改稿日期: 2011-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(60707019)和高功率激光物理重点实验室开放基金(SG-001102)资助课题。

作者简介: 张国文(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事高功率激光物理方面的研究。

E-mail: guowenzhang@foxmail.com

* 通信联系人。E-mail: xingqianglu@siom.ac.cn

1 引 言

Wolf^[1]建立了相干偏振统一理论,将光束的相干和偏振两个重要特性统一在相同交叉谱密度矩阵中。随后,出现了大量基于相干偏振统一理论的光束传输研究,如随机电磁光束在自由空间、大气以及光学系统的传输特性研究^[2~11]。研究表明,相干偏振统一理论可以很好地描述光束传输性质。但以上研究都是基于光束稳态场的情况,有研究^[12,13]认为光束的各频率成分之间也存在部分相干性,提出了部分相干脉冲光束的概念,指出获得部分相干脉冲光束的方法^[14~17],由此引发了研究者们对非稳场的部分相干光束的兴趣,如林强等^[18~20]采用张量的方法研究部分相干脉冲的传输和时空耦合效应,丁超亮等^[21~25]研究了部分相干脉冲的光谱、相干及偏振特性。研究显示,光束在空间及频率成分之间都存在部分相干性,并采用空间相关长度、时间相干长度及光谱相干宽度等特征参数来表征光束的相干性,当这些特征参数趋近无穷大时,就表示为完全相干脉冲。

在高功率激光系统中,为充分提取能量,光束空间分布一般采用方形平顶分布。而传输放大链中数千件光学元件在加工或使用过程中难免会引入对光束振幅或相位的局域调制。有研究者对完全相干脉冲光束经局域振幅或相位调制后的光强分布做了研究^[26~29],而部分相干脉冲光束受局域调制的研究鲜有报道。本文引入部分相干脉冲光束概念,构建部分相干方形平顶脉冲光束,研究该光束在局域相位调制透镜聚焦场的光谱和光谱强度特性。着重研究了相位调制尺寸、调制深度、调制位置及光束空间相关长度和频率成分相干性对光谱及光谱强度的影响。

2 理论推导

如图 1 所示,有一电磁脉冲光束在 $z=0$ 处入射聚焦。在空间-时间域,该电磁脉冲光束可采用 2×2 相干偏振矩阵表示为^[1]

$$\mathbf{\Gamma}^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, t_1, t_2) = \begin{bmatrix} \Gamma_{xx}^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, t_1, t_2) & \Gamma_{xy}^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, t_1, t_2) \\ \Gamma_{yx}^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, t_1, t_2) & \Gamma_{yy}^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, t_1, t_2) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中相干偏振矩阵元可分别表示为

$$\Gamma_{ij}^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, t_1, t_2) = \langle E_i^*(\boldsymbol{\rho}_1, t_1) E_j(\boldsymbol{\rho}_2, t_2) \rangle = \sqrt{I_i^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_1, t_1)} \sqrt{I_j^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_2, t_2)} \eta_{ij}^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2, t_1 - t_2), \quad (i = x, y; j = x, y) \quad (2)$$

式中电场方向分量下标 i, j 分别选取 $i = x, y, j =$

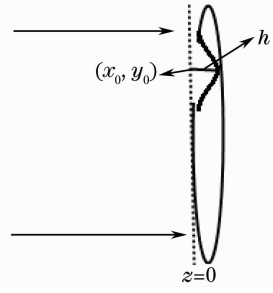


图 1 光束经过相位调制透镜的传输示意图
Fig. 1 Schematic illustration of beams through a phase modulated lens

$x, y; I^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_1, t_1)$ 表示随机电磁脉冲光束的空间和时间振幅分布,而 $\eta^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2, t_1 - t_2)$ 表示随机电磁脉冲光束的空间和时间相关性; $\boldsymbol{\rho}$ 表示垂直于光轴 z 的横向空间柱坐标; t 表示时间。通常情况下, $I^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_1, t_1)$ 分别用高斯空间分布函数和高斯时间分布函数来描述,而 $\eta^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2, t_1 - t_2)$ 则用谢尔模型来表示空间域和时间域相关性。在高功率激光装置中,脉冲光束的空间分布采用的都是平顶模型即超高斯模型来描述,但这给获得传输场中光束解析表达式带来了困难。因此,为更好地了解光场性质,这里将引用 Li^[30,31] 所提出的基模叠加的方式来描述随机电磁脉冲光束的空间分布,而时间分布采用高斯函数描述。具体形式为

$$I_i^{(0)}(\boldsymbol{\rho}, t) = A_i \exp\left(-\frac{t^2}{T_0^2}\right) \sum_{m=1}^N \alpha_m \exp\left(-m\beta_m \frac{\boldsymbol{\rho}^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

式中

$$\alpha_m = (-1)^{m+1} \frac{N!}{m!(N-m)!}, \quad (4a)$$

$$\beta_m = \sum_{m=1}^N \frac{\alpha_m}{m}, \quad (4b)$$

而脉冲光束的空间相关性和时间相关性则采用谢尔模型来描述

$$\eta_{ij}^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2, t_1 - t_2) = B_{ij} \exp\left[-\frac{(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2)^2}{2\delta_{ij}^2}\right] \times \exp\left[-\frac{(t_1 - t_2)^2}{2T_c^2}\right] \exp[i\omega_0(t_1 - t_2)], \quad (5)$$

式中

$$\begin{cases} B_{ij} \equiv 1 & \text{when } i = j \\ |B_{ij}| \leq 1 & \text{when } i \neq j \end{cases}, \quad (6)$$

(3)式和(5)式中, A_i, B_{ij}, σ 和 δ_{ij} 分别表示振幅强度常数、相关性常数、光斑半径及相关长度,这些参数通常与载波频率 ω_0 有关。 T_0 表示脉冲时间长度, T_c 表示脉冲时间相关长度。 N 表示电磁光束空间分布

基模叠加阶数,当 $N = 1$ 时,表示普通的高斯空间分布,当 $N > 2$ 时,则表示平顶空间分布, N 越大,光束空间轮廓越趋于平顶。

为简单起见,假设 $z = 0$ 平面随机电磁脉冲光束的电场在 x 与 y 方向不关联,则有

$$\Gamma_{xy}^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, t_1, t_2) = \Gamma_{yx}^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, t_1, t_2) = 0. \quad (7)$$

对(1)式中各矩阵元作傅里叶变换

$$W_{ii}^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, \omega_1, \omega_2) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \Gamma_{ii}^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, t_1, t_2) \times \exp[-i(\omega_1 t_1 - \omega_2 t_2)] dt_1 dt_2, \quad (8)$$

则可得到空间-频率域随机电磁脉冲光束在 $z = 0$ 平面的交叉谱密度函数

$$W_{ii}^{(0)}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, \omega_1, \omega_2) = \frac{T_0 A_i}{2\pi \Omega_{0i}} \sum_{m_1=1}^N \sum_{m_2=1}^N \alpha_{m_1} \alpha_{m_2} \exp\left(-m_1 \beta_1 \frac{\rho_1^2}{4\sigma^2}\right) \exp\left(-m_2 \beta_2 \frac{\rho_2^2}{4\sigma^2}\right) \times \exp\left[-\frac{(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2)^2}{2\delta_{ii}^2}\right] \exp\left[-\frac{(\omega_1 - \omega_0)^2 + (\omega_2 - \omega_0)^2}{2\Omega_{0i}^2}\right] \exp\left[-\frac{(\omega_1 - \omega_2)^2}{2\Omega_{ci}^2}\right], \quad (9)$$

式中

$$\Omega_{0i} = \sqrt{\frac{1}{T_0^2} + \frac{2}{T_{ci}^2}}, \quad (10a)$$

$$\Omega_{ci} = \frac{T_{ci}}{T_0} \Omega_{0i}. \quad (10b)$$

Ω_{0i} 表示光束电场 i 方向的光谱宽度, Ω_{ci} 表示光束电场 i 方向的光谱相关长度,是衡量不同频率成分之间相关性的量。直接采用(9)式进行模拟,得出光源初始场的空间分布为圆形平顶分布。而高功率激光系统通常采用方形平顶分布。所以特将(9)式分解为 x 和 y 方向截面波的叠加,可得到方形平顶空间分布的电磁脉冲光束

$$W_{ii}^{(0)}(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2, \omega_1, \omega_2) = \frac{T_0 A_i}{2\pi \Omega_{0i}} \exp\left[-\frac{(\omega_1 - \omega_0)^2 + (\omega_2 - \omega_0)^2}{2\Omega_{0i}^2}\right] \exp\left[-\frac{(\omega_1 - \omega_2)^2}{2\Omega_{ci}^2}\right] \times \sum_{m_1=1}^N \sum_{m_2=1}^N \sum_{n_1=1}^N \sum_{n_2=1}^N \alpha_{m_1} \alpha_{m_2} \alpha_{n_1} \alpha_{n_2} \exp\left[-\left(m_1 \beta_{m_1} \frac{x_1'^2}{4\sigma^2} + m_2 \beta_{m_2} \frac{x_2'^2}{4\sigma^2} + n_1 \beta_{n_1} \frac{y_1'^2}{4\sigma^2} + n_2 \beta_{n_2} \frac{y_2'^2}{4\sigma^2}\right)\right] \times \exp\left[-\frac{(x'_1 - x'_2)^2 + (y'_1 - y'_2)^2}{2\delta_{ii}^2}\right]. \quad (11)$$

此外,在数千件光学元件的高功率激光驱动器中,光学元件在加工或使用过程中难免会携带对光束振幅或相位产生局域调制的物理量。局域振幅调制透镜的聚焦情况做初步研究^[32],本文对部分相干方形平顶脉冲光束经局域相位调制透镜的聚焦情况进行研究。如图1所示,当光束经过相位调制的透镜聚焦时,根据光束傍轴传输公式,则有

$$W_{ii}(x_1, y_1, x_2, y_2, z; \omega_1, \omega_2) = \frac{\omega_1 \omega_2}{4\pi^2 c^2 B^2} \exp\left[\frac{i(\omega_2 - \omega_1)z}{c}\right] \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} W_{ii}^{(0)}(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2, \omega_1, \omega_2) \times M(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2) \exp\left\{\frac{i\omega_2}{2cB} [A(x_2'^2 + y_2'^2) - 2(x_2 x_2' + y_2 y_2') + D(x_2^2 + y_2^2)] - \frac{i\omega_1}{2cB} [A(x_1'^2 + y_1'^2) - 2(x_1 x_1' + y_1 y_1') + D(x_1^2 + y_1^2)]\right\} dx'_1 dy'_1 dx'_2 dy'_2, \quad (12)$$

式中假设光束口径小于透镜直径,忽略透镜光阑孔径带来的衍射效应,也忽略透镜厚度对光束的折射影响。

c 表示真空下的光速。 A, B, D 分别为光束传输矩阵 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 的矩阵元,具体取值表示为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - z/f & z \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$M(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2)$ 表示透镜相位调制函数。通常情况下,相位调制函数可表示为

$$M(x', y') = \exp[i\Phi(x', y')], \quad (14)$$

式中畸变波前函数 $\Phi(x', y')$ 表示为

$$\Phi(x', y') = \phi \exp \left\{ - \left[\frac{(x' - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y' - y_0)^2}{b^2} \right] \right\}, \quad (15)$$

将(15)式代入(14)式,并进行级数展开,可得到(12)式中的调制函数

$$M(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2) = \sum_{g_1=0}^G \frac{i^{g_1} \phi^{g_1} \exp \left\{ -g_1 \left[\frac{(x'_1 - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y'_1 - y_0)^2}{b^2} \right] \right\}}{g_1!} \times \sum_{g_2=0}^G \frac{(-i)^{g_2} \phi^{g_2} \exp \left\{ -g_2 \left[\frac{(x'_2 - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y'_2 - y_0)^2}{b^2} \right] \right\}}{g_2!}, \quad (16)$$

式中 $\phi = \frac{2(n-1)\pi h}{\lambda}$ 表示调制中心振幅系数, n 表示透镜材料折射率; λ 表示入射光束波长; h 表示调制深度, 通常为波长数量级. a 表示横坐标 x 方向调制直径, b 表示纵坐标 y 方向直径, (x_0, y_0) 表示相位调制中心位置坐标. 将(11)式和(16)式代入(12)式中作积分运算并整理,可得到部分相干方形平顶脉冲光束经相位调制透镜聚焦后,对应聚焦场的交叉谱密度函数

$$W_{ii}(x_1, y_1, x_2, y_2, z; \omega_1, \omega_2) = A_i \frac{T_0 \omega_1 \omega_2}{8\pi c^2 z^2 \Omega_{0i}} \exp \left[-\frac{(\omega_1 - \omega_0)^2 + (\omega_2 - \omega_0)^2}{2\Omega_{0i}^2} \right] \exp \left[-\frac{(\omega_1 - \omega_2)^2}{2\Omega_{0i}^2} \right] \times \exp \left[\frac{i(\omega_2 - \omega_1)z}{c} \right] \exp \left\{ \frac{i}{2zc} [\omega_2(x_2^2 + y_2^2) - \omega_1(x_1^2 + y_1^2)] \right\} \sum_{m_1=1}^N \sum_{m_2=1}^N \sum_{n_1=1}^N \sum_{n_2=1}^N \sum_{g_1=0}^G \sum_{g_2=0}^G \times \frac{i^{g_1} (-i)^{g_2} \phi^{g_1+g_2} \alpha_{m_1} \alpha_{m_2} \alpha_{n_1} \alpha_{n_2}}{g_1! g_2! \sqrt{p_{m_1} p_{m_2} p_{n_1} p_{n_2}}} \exp \left\{ - \left\{ \left[\frac{1}{4z^2 c^2 p_{m_1}} + \frac{1}{16z^2 c^2 \delta_{ii}^4 (p_{m_1})^2 p_{m_2}} \right] \omega_1^2 x_1^2 - \frac{\omega_1 \omega_2 x_1 x_2}{4z^2 c^2 \delta_{ii}^2 p_{m_1} p_{m_2}} + \frac{\omega_2^2 x_2^2}{4z^2 c^2 p_{m_2}} \right\} \right\} \exp \left\{ \left[\frac{g_1}{p_{m_1} a^2 c} + \frac{g_1 + 2g_2 p_{m_1} \delta_{ii}^2}{4(p_{m_1})^2 p_{m_2} a^2 c \delta_{ii}^4} \right] \omega_1 x_0 x_1 i - \frac{g_1 + 2g_2 p_{m_1} \delta_{ii}^2}{2p_{m_1} p_{m_2} a^2 c \delta_{ii}^2} \omega_2 x_0 x_2 i \right\} \times \exp \left\{ \left[\frac{g_1 + 2g_2 p_{m_1} \delta_{ii}^2}{4(p_{m_1})^2 p_{m_2} a^2 \delta_{ii}^4} - \frac{g_1 + g_2}{a^2} + \frac{(g_1)^2}{p_{m_1} a^4} \right] x_0^2 \right\} \exp \left\{ - \left\{ \left[\frac{1}{4z^2 c^2 p_{n_1}} + \frac{1}{16z^2 c^2 \delta_{ii}^4 (p_{n_1})^2 p_{n_2}} \right] \omega_1^2 y_1^2 - \frac{\omega_1 \omega_2 y_1 y_2}{4z^2 c^2 \delta_{ii}^2 p_{n_1} p_{n_2}} + \frac{\omega_2^2 y_2^2}{4z^2 c^2 p_{n_2}} \right\} \right\} \exp \left\{ \left[\frac{g_1}{p_{n_1} b^2 c} + \frac{g_1 + 2g_2 p_{n_1} \delta_{ii}^2}{4(p_{n_1})^2 p_{n_2} b^2 c \delta_{ii}^4} \right] \omega_1 y_0 y_1 i - \frac{g_1 + 2g_2 p_{n_1} \delta_{ii}^2}{2p_{n_1} p_{n_2} b^2 c \delta_{ii}^2} \omega_2 y_0 y_2 i \right\} \times \exp \left\{ \left[\frac{g_1 + 2g_2 p_{n_1} \delta_{ii}^2}{4(p_{n_1})^2 p_{n_2} b^2 \delta_{ii}^4} - \frac{g_1 + g_2}{a^2} + \frac{(g_1)^2}{p_{n_1} a^4} \right] y_0^2 \right\}, \quad (17)$$

式中

$$p_{m_1} = \frac{g_1}{a^2} + \frac{1}{2\delta_{ii}^2} + \frac{m_1 \beta_{m_1}}{4\sigma^2} + \frac{(f-z)\omega_1 i}{2zcf}, \quad (18a)$$

$$p_{m_2} = \frac{g_2}{a^2} + \frac{1}{2\delta_{ii}^2} + \frac{m_2 \beta_{m_2}}{4\sigma^2} - \frac{(f-z)\omega_2 i}{2zcf} - \frac{1}{4\delta_{ii}^4 p_{m_1}}, \quad (18b)$$

$$p_{n_1} = \frac{g_1}{b^2} + \frac{1}{2\delta_{ii}^2} + \frac{n_1 \beta_{n_1}}{4\sigma^2} + \frac{(f-z)\omega_1 i}{2zcf}, \quad (18c)$$

$$p_{n_2} = \frac{g_2}{b^2} + \frac{1}{2\delta_{ii}^2} + \frac{n_2 \beta_{n_2}}{4\sigma^2} - \frac{(f-z)\omega_2 i}{2zcf} - \frac{1}{4\delta_{ii}^4 p_{n_1}}, \quad (18d)$$

根据光谱强度定义^[1]

$$S(x, y, z; \omega) = W_{xx}(x, y, x, y, z; \omega, \omega) + W_{yy}(x, y, x, y, z; \omega, \omega), \quad (19)$$

将(17)式代入(19)式,即得到部分相干方形平顶脉

冲光束某一频率成分在聚焦场的光谱强度. 还可将(19)式作傅里叶逆变换

$$I(x, y, z; t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(x, y, z; \omega_1, \omega_2) \times \exp[i(\omega_1 t_1 - \omega_2 t_2)] d\omega_1 d\omega_2, \quad (20)$$

即可得到所有频率成分在空间-时间域的强度表达式. 结合(17)、(18)和(19)式对聚焦场的光谱强度特性做数值模拟分析,研究部分相干方形平顶电磁脉冲光束经相位调制透镜的聚焦特性.

3 数值分析

数值计算中,选取脉冲光束载波频率为 $\omega_0 = 1.79$ rad/fs,透镜材料折射率取值为 $n = 1.5146$,透镜焦距为 $f = 1$ m. 图2给出了相位调制尺寸 a, b 和调制深度 h 对轴上光谱强度的影响. 图中参数选

取为 $T_0 = 70$ fs, $T_c = 7$ fs, $x_0 = y_0 = 0$, $\delta = 0.2$ mm, $N = 5$; 图 2(a) 选取调制深度为 $h = 0.5\lambda$, 图 2(b) 选取调制尺寸 $a = b = 0.5$ mm。从图 2(a) 中可看出, 当调制尺寸为 0.1 mm 时, 在很近的传输距离有一小光谱强度峰值, 而随后光谱强度减小, 说明在此尺寸调制下, 对透镜附近聚焦场光谱强度的影响较大, 对焦斑附近的影响较小。随着调制尺寸的增大, 对焦斑的影响就越来越大。图 2(b) 中, 调制深度越深, 在透镜附近的光谱强度越强, 同时可以发现, 不同相位调制深度, 会形成光谱强度峰值的移动。当调制深度 $h = 0.9\lambda$ 时, 透镜附近由于相位调制导致的光谱强度峰值和焦斑的光谱强度峰值接近。调制深度小于临界值 0.9λ 时, 焦斑光谱强度峰值较大, 而当调制深度大于 0.9λ 时, 由相位调制形成的光谱

强度峰值大于焦斑光谱强度峰值。说明在一定相位调制下, 聚焦场出现了光谱强度峰值开关现象。图 3 给出了光源相关长度 δ 与光束平顶阶数 N 对聚焦场光谱强度的影响情况。图中参数选取为 $a = b = 0.5$ mm, $h = 0.9\lambda$, $N = 5$ [见图 3(a)], $\delta = 0.2$ mm [见图 3(b)], 其余参数与图 2 一致。图 3(a) 中, 随着相关长度增大, 光谱强度峰值由透镜附近移向焦斑处, 在此过程中由于有相位调制和透镜聚焦的共同作用, 出现了焦移和光谱强度峰值开关现象。在没有相位调制的情况下, 相关长度导致聚焦场的焦移现象, 而不会发生焦开关现象。从图 3(b) 中也可看出, 光束平顶阶数在一定相位调制情况下也能导致光谱强度峰值开关现象。

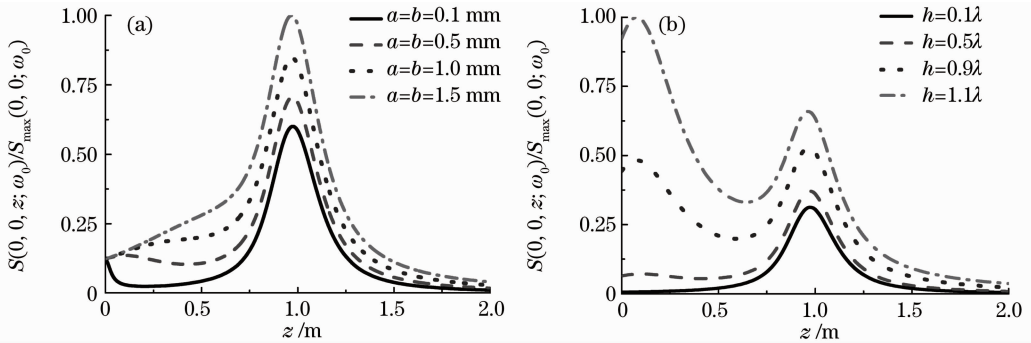


图 2 不同相位调制尺寸和深度情况下的轴上光谱强度

Fig. 2 Longitudinal spectral density for different values of distortion radii and distortion depth

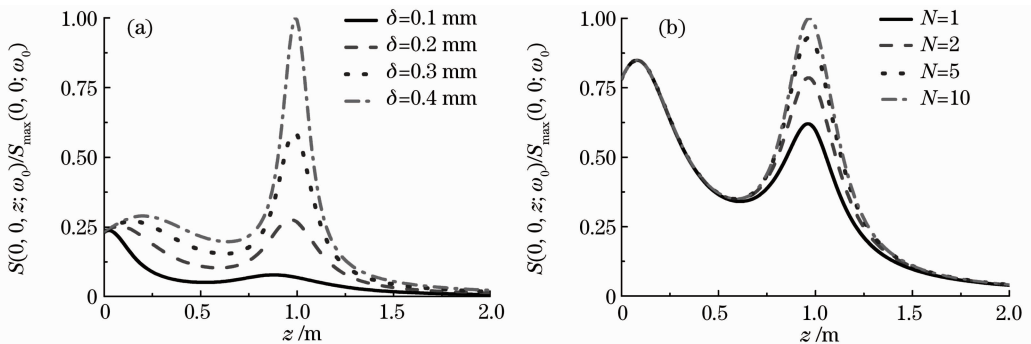


图 3 不同光源参数 δ 和 N 情况下的轴上光谱强度

Fig. 3 Longitudinal spectral density for different values of δ and N

同时可以分析脉冲时间长度 T_0 和脉冲时间相关长度 T_c 对聚焦场轴上光谱强度的影响情况。分析发现, 当脉冲时间长度 T_0 和脉冲时间相关长度 T_c 越大, 轴上光谱强度值越大。从(11)式可知, 光束本身的频率域和空间域是可分离的乘积关系, 所以频率域的参数对空间域只有幅度的影响。光束的脉冲时间长度 T_0 越大, 聚焦场轴上光谱强度越大。而脉冲时间相关长度 T_c 越大, 不仅轴上光谱强度增大, 而且在频率方向也发生了峰值移动现象, 如图 4 所

示, 随着 T_c 的增大, 光谱强度峰值从频率较大处向中心载波频率位置处移动, 峰值强度随之增加, 光谱强度在频率上的分布也发生了变化。图中选取参数为: $a = b = 0.5$ mm, $h = 0.9\lambda$, (a) $T_c = 1$ fs, (b) $T_c = 2$ fs, (c) $T_c = 4$ fs, (d) $T_c = 10$ fs, 其余参数与图 2 一致。

图 5 和 6 为不同相位调制尺寸和调制深度情况下, 聚焦场 $z-x$ 平面内光谱强度的分布。图 5 中参数选取 $h = 0.9\lambda$, (a) $a = b = 0.1$ mm, (b) $a = b =$

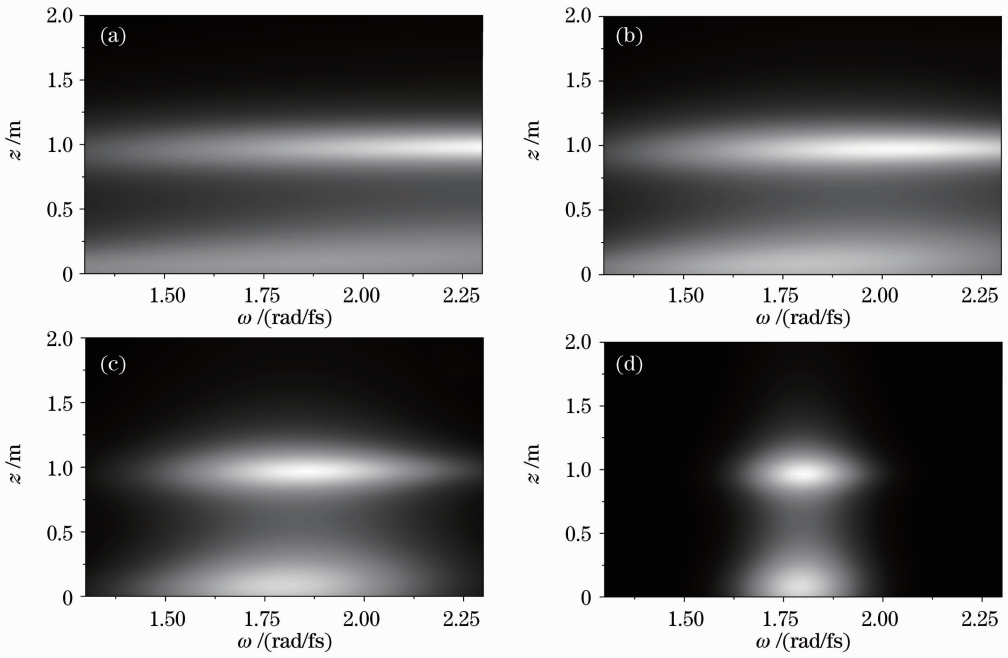


图 4 不同脉冲时间相关长度 T_c 情况下光谱强度的分布
 Fig. 4 Distribution of spectral density for different values of T_c

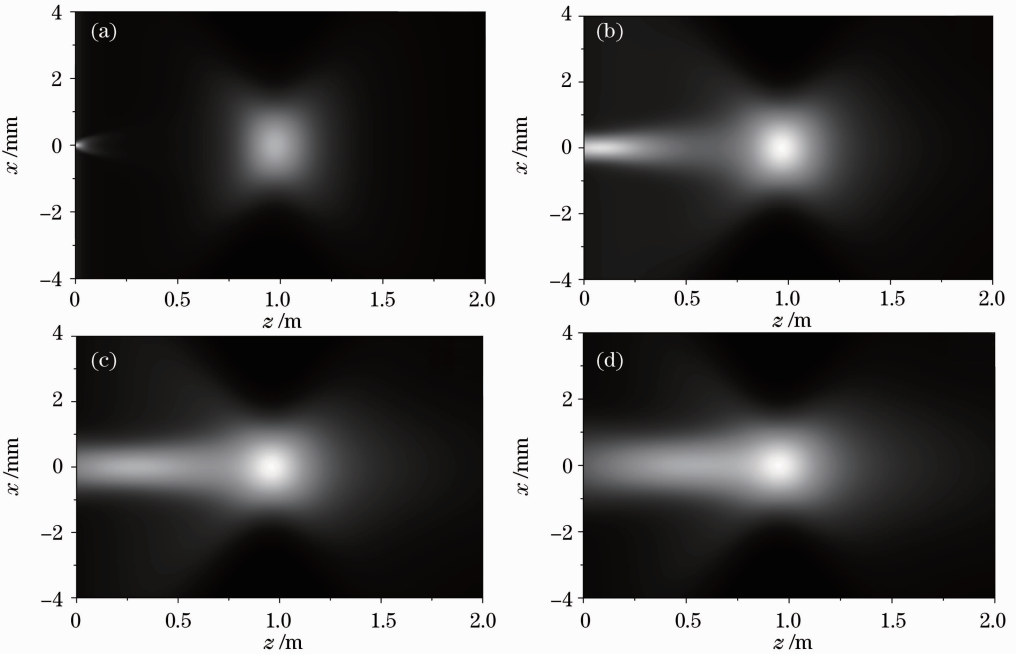


图 5 不同相位调制尺寸情况下聚焦场的光谱强度分布
 Fig. 5 Distribution of spectral density for different values of distortion radii

0.5 mm, (c) $a=b=1$ mm, (d) $a=b=1.5$ mm, 其余参数与图 2 一致。从图 5 中可以看出, 相位调制会导致在聚焦场产生新的光谱强度峰值, 和焦点形成双光谱强度峰值现象。相位调制尺寸越大, 对聚焦场光谱强度的分布影响越广泛, 但所产生的光谱强度峰值却减小。图 6 中参数选取为 $a=b=0.5$ mm, (a) $h=0.5\lambda$, (b) $h=0.8\lambda$, (c) $h=0.95\lambda$,

(d) $h=1.2\lambda$, 其余参数与图 2 一致。图 6 说明, 相位调制深度越大, 调制所产生的光谱强度极值就越大, 出现了双光谱强度峰值现象和光谱强度开关现象。

相位调制位置对聚焦场 $z-x$ 平面内光谱强度分布的影响见图 7。图 7 中分别选取相位调制位置为 $(0.1$ mm, $0)$, $(1$ mm, $0)$, $(2$ mm, $0)$ 和 $(4$ mm, $0)$ 4 种情况。相位调制参数选取为 $a=b=0.5$ mm, $h=$

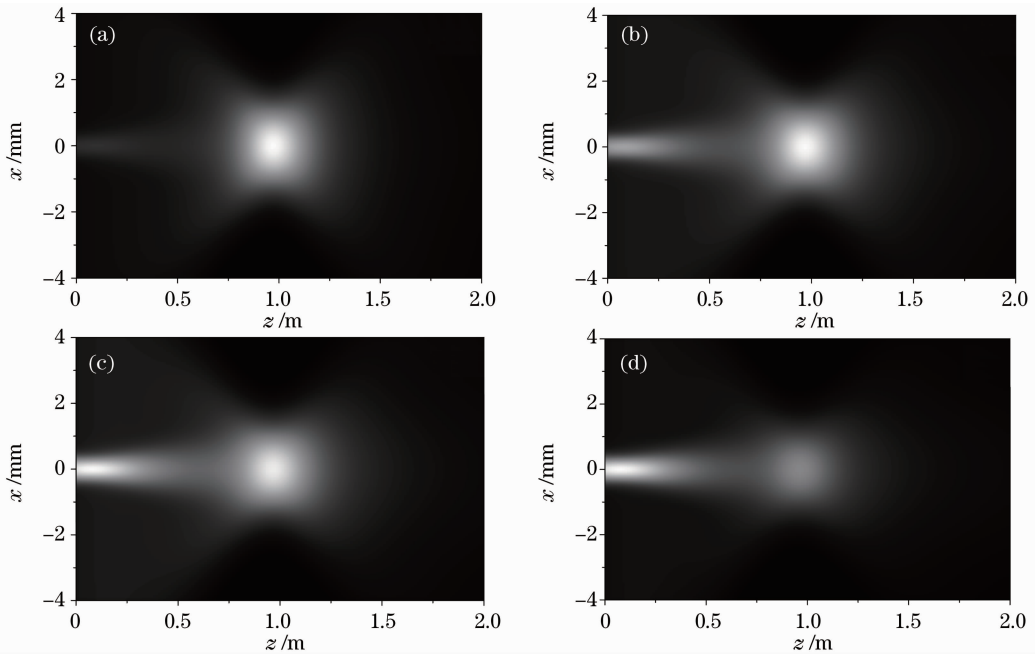


图 6 不同相位调制深度情况下聚焦场的光谱强度分布

Fig. 6 Distribution of the spectral density for different values of distortion depth

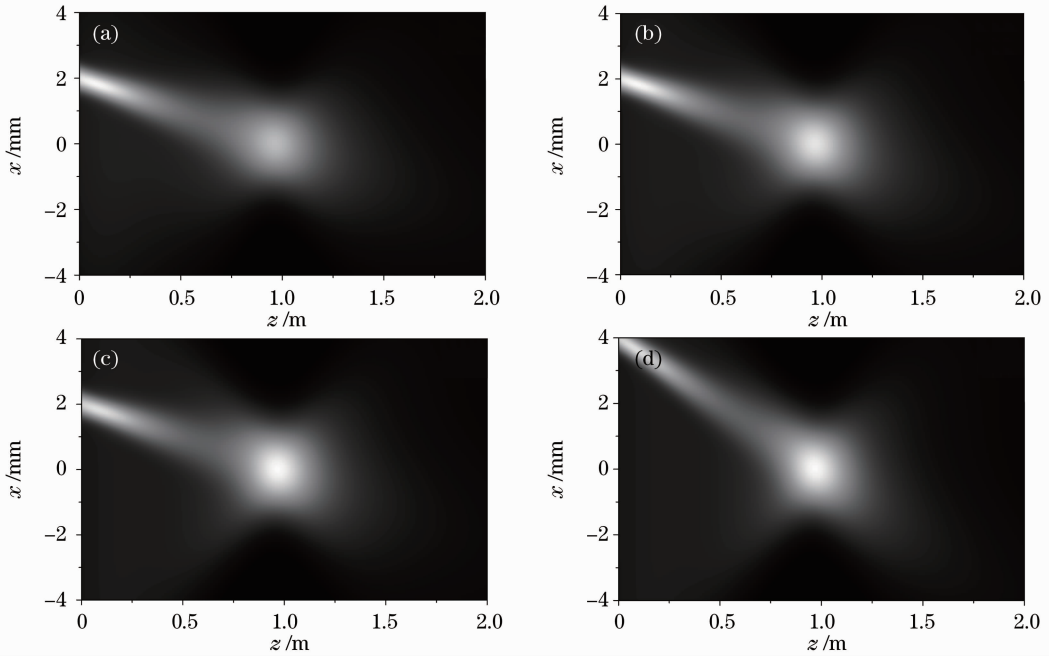


图 7 不同相位调制位置情况下聚焦场的光谱强度分布

Fig. 7 Distribution of spectral density for different values of distortion position

0.9λ ,其余参数与图 2 一致。从图 7 中可以看出,随着相位调制中心坐标向上移动,所产生的光谱强度峰值也随之移动,光谱强度分布形状也随之变化。又由于透镜本身的聚焦特性,导致了光谱强度峰值向着焦点方向传输。但由于光束空间分布为平顶分布,因此不同相位调制位置在聚焦场产生的光谱强度除位置和形状发生变化外,幅度还保持一致。

图 8 为相位调制为类划痕时不同传输截面的光

谱强度分布图。图中相位调制尺寸 $a=0.5\text{ mm}$, $b=8\text{ mm}$; 调制深度 $h=0.2\lambda$; 调制中心坐标为 $(2\text{ mm}, 2\text{ mm})$,其余参数与图 2 一致。传输距离分别为(a) $z=0.1\text{ mm}$; (b) $z=0.5\text{ mm}$; (c) $z=1\text{ mm}$; (d) $z=1.5\text{ mm}$; (e) $z=2\text{ mm}$; (f) $z=3\text{ mm}$ 。从图中可见,相位调制导致的光谱强度峰值随着传输距离的增加逐渐衍射扩散。光谱强度在焦平面保持圆形高斯分布,受相位调制的影响较小。

经过焦平面以后,随着传输距离的增加,光谱强度强区从 x - y 平面的右上方转移到 x - y 平面的左下方。

在此过程中,其物理机理为相位调制强区的衍射扩散以及透镜聚焦的成像共同的作用效果。

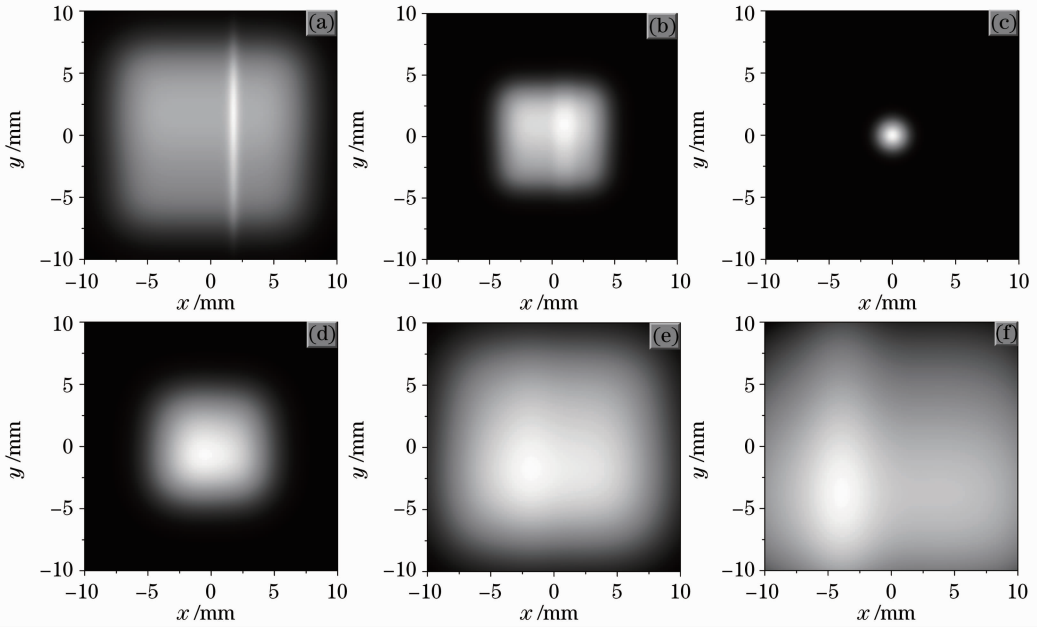


图 8 不同 x - y 的光谱强度分布

Fig. 8 Distribution of spectral density in several x - y planes

4 结 论

构建了非稳场的部分相干方形平顶电磁脉冲光束,并研究了该光束经相位调制透镜的聚焦特性。研究表明,聚焦场的光谱强度与光源空间相关长度、光束平顶阶数、脉冲时间长度,脉冲时间相关长度以及透镜相位调制尺寸、相位调制深度和调制位置密切相关。由于局域相位的调制作用,在聚焦场除焦斑外还出现了另一光谱强度峰值,这种现象和小尺度自聚焦类似。由相位调制所产生的光谱强度峰值由相位调制尺寸、相位调制深度和调制位置控制。在一定取值的情况下,会促使该光谱强度峰值发生移动,并与焦斑形成光谱强度峰值开关现象。这与以往研究的焦移和焦开关有相似的表现,但物理来源于局域相位的调制。另外,部分相干方形平顶电磁脉冲光束的脉冲时间相关长度能导致光谱强度峰值在频率成分上的移动,这与部分相关光束空间相关长度导致焦移的功能是相似的。当光束考虑空间域和时间域或频率域都部分相干的情况时,光束的传输特性与空间域参数和频率域参数都密切相关。当光学元件携带相位调制时,应控制相位调制的尺寸和调制深度,避免后续光束质量的恶化和对下游光学元件的损伤。

参 考 文 献

- 1 E. Wolf. Unified theory of coherence and polarization of random electromagnetic beams [J]. *Phys. Lett. A*, 2003, **312** (56): 263~267
- 2 E. Wolf. Correlation-induced changes in the degree of polarization, the degree of coherence, and the spectrum of random electromagnetic beams on propagation [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(13): 1078~1180
- 3 Jixiong Pu. Invariance of spectrum and polarization of electromagnetic Gaussian Schell-model beams propagating in free space [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(4): 196~198
- 4 Ji Xiaoling, Chen Senhui, Li Xiaoqing. Polarization properties of partially coherent electromagnetic Hermite-Gaussian beams in atmospheric turbulence [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35** (1): 67~72
- 季小玲, 陈森会, 李晓庆. 部分相干电磁厄米-高斯光束通过湍流大气传输的偏振特性 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 67~72
- 5 Guowen Zhang, Jixiong Pu. Spectral changes of polychromatic stochastic electromagnetic vortex beams propagating through turbulent atmosphere [J]. *J. Mod. Opt.*, 2008, **55**(17): 2831~2842
- 6 Pan Liuzhan. Far-field behavior of partially polarized Gaussian Schell-model beams diffracted through an aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1250~1255
- 潘留占. 被光阑衍射部分偏振高斯-谢尔模型光束的远场特性 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1250~1255
- 7 Fu Wenyu, Ma Shuyi. Polarization properties of partially coherent flat-topped light beams diffracted through a regular polygonal aperture [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2008, **57** (2): 1271~1277
- 付文羽, 马书懿. 部分相干平顶光束经光阑衍射的偏振特性 [J]. *物理学报*, 2008, **57**(2): 1271~1277
- 8 Shu Jianhua, Chen Ziyang, Pu Jixiong. Changes in the degree of polarization of partially coherent lights diffracted by multiple

- circular apertures[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 849~854
- 苏建华, 陈子阳, 蒲继雄. 部分相干光经多个圆孔衍射后的偏振度变化[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 849~854
- 9 Liuzhan Pan, Mengle Sun, Chaoliang Ding *et al.*. Effects of astigmatism on spectra, coherence and polarization of stochastic electromagnetic beams passing through an astigmatic optical system[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(9): 7310~7321
- 10 Guowen Zhang, Jixiong Pu. Stochastic electromagnetic beams focused by a bifocal lens[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(7): 1710~1715
- 11 Xing Yan, Ding Chaoliang, Lü Baida. Propagation of the degrees of cross-polarization of random cosh-Gaussian electromagnetic beams through a lens [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1983~1989
- 刑 燕, 丁超亮, 吕百达. 随机双曲余弦-高斯电磁光束互偏振度通过透镜的传输[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1983~1989
- 12 P. Paakkonen, J. Turunena, P. Vahimaa. Partially coherent Gaussian pulses[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **204**(1-6): 53~58
- 13 H. Lajunen, P. Vahimaa, J. Tervo. Theory of spatially partially coherent pulses[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(8): 1536~1545
- 14 Victor Torres, Gladys Minguez, Jesus Lancis *et al.*. Controllable generation of partially coherent light pulses with direct space-to-time pulse shaper[J]. *Opt. Lett.*, **32**(12): 1608~1610
- 15 Hanna Lajunen, Jani Tervo, Jari Turunen *et al.*. Spectral coherence properties of temporally modulated stationary light sources[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(16): 1894~1899
- 16 Arit Friberg, Hanna Lajunen, Victor Torres-Company. Spectral elementary-coherence-function representation for partially coherent light pulses [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(8): 5160~5165
- 17 Greg Gbur. Simulating fields of arbitrary spatial and temporal coherence[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(17): 7567~7578
- 18 Q. Lin, L. G. Wang, S. Y. Zhu. Partially coherent light pulse and its propagation[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **219**(1-6): 65~70
- 19 L. G. Wang, Q. Lin, H. Chen. Propagation of partially coherent beams in the spatiotemporal domain[J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **67**(5): 056613
- 20 Min Yao, Yangjian Cai, Olga Korotkova *et al.*. Spatio-temporal coupling of random electromagnetic pulses interacting with reflecting gratings [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(21): 22503~22514
- 21 Chaoliang Ding, Liuzhan Pan, Baida Lü. Characterization of stochastic spatially and spectrally partially coherent electromagnetic pulsed beams [J]. *New Journal of Physics*, 2009, **11**(8): 083001
- 22 D. Liu, C. Ding, B. Lü. Changes in the spectral degree of coherence and spectral intensity of spatially and spectrally partially coherent cosh-Gaussian pulsed beams in free space[J]. *Appl. Phys. B*, 2010, **98**(2-3): 549~556
- 23 Chaoliang Ding, Liuzhan Pan, Baida Lü. Changes in the spectral degree of polarization of stochastic spatially and spectrally partially coherent electromagnetic pulses in dispersive media[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2009, **26**(9): 1728~1735
- 24 Chaoliang Ding, Zhiguo Zhao, Liuzhan Pan *et al.*. Generalized stokes parameters of stochastic spatially and spectrally partially coherent electromagnetic pulsed beams [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(22): 4470~4477
- 25 Chaoliang Ding, Yangjian Cai, Olga Korotkova *et al.*. Scattering-induced changes in the temporal coherence length and the pulse duration of a partially coherent plane-wave pulse[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(4): 517~519
- 26 S. Mainguy, I. Toven-Pecault, B. Le Garrec. Propagation of LIL/LMJ beams under the interaction with contamination particles[C]. *SPIE*, 2005, **5991**: 59910G
- 27 Xie Liangping, Zhao Jianlin, Su Jingqin *et al.*. Theoretical analysis of hot image effect from phase scatterer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(7): 2175~2179
- 谢良平, 赵建林, 粟敬钦等. 位相调制产生“热像”效应理论研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(7): 2175~2179
- 28 Liu Hongjie, Jing Feng, Zuo Yanlei *et al.*. Nonlinear propagation of localized wavefront deformation in high power laser facility[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2006, **18**(11): 1850~1854
- 刘红婕, 景 峰, 左言磊等. 高功率激光装置中局部波前畸变的非线性传输[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(11): 1850~1854
- 29 Zhou Lidan, Su Jingqin, Li Ping *et al.*. Quantitative relation between "defects" distribution on optics and near-field quality in high power solid-state laser system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(2): 024202
- 周丽丹, 粟敬钦, 李 平等. 高功率固体激光装置光学元件“缺陷”分布与光束近场质量的定量关系研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(2): 024202
- 30 Yajun Li. Light beams with flat-topped profiles[J]. *Opt. Lett.*, **27**(12): 1007~1009
- 31 Yajun Li. New expressions for flat-topped light beams[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **206**(4-6): 225~234
- 32 Tao Hua, Zhang Guowen, Pu Jixiong. Stochastic electromagnetic beams focused by a modulated lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100411
- 陶 华, 张国文, 蒲继雄. 随机电磁光束经振幅调制透镜的聚焦特性[J]. *光学学报*, 2011, **31**(s1): s100411

栏目编辑:宋梅梅