

文章编号: 1001-3806(2006)02-0142-03

硬边光阑对多色矢量光束光谱开关的影响

赵光普^{1,2}, 吕百达^{2*}

(1. 宜宾学院 光电信息研究所, 宜宾 644007; 2 四川大学 激光物理与化学研究所, 成都 610041)

摘要: 从偏振矩阵和交叉谱密度传输公式出发, 分析了硬边光阑对多色矢量高斯-谢尔模型光束轴上光谱开关的影响。结果表明, 插入偏振片前, 光谱开关的光谱跃迁量 Δ 随截断参数 δ 的增加而减少, 光谱极小值 S_{\min} 和位置 z_c/z_0 随 δ 的增加而增大。插入偏振片后, 光谱开关随 δ 的变化规律与插入偏振片前的变化规律相同。但偏振片的旋转角度 θ 会对出现光谱开关的 δ 的范围产生影响。

关键词: 现代光学; 硬边光阑; 多色矢量光束; 光谱开关

中图分类号: TN012 文献标识码: A

Influence of hard-edge aperture on the spectral switch of polychromatic vector beams

ZHAO Guang-pu^{1,2}, LÜ Bai-da²

(1. Institute of Optoelectronic Information, Yibin University, Yibin 644007, China; 2. Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract Starting from the polarization matrix and propagation equation of the cross-spectral density matrix, a detailed study of the influence of hard-edge aperture on the spectral switch of polychromatic vector Gaussian-Schell model beams is performed. It is shown that before inserting a polarizer the transition height Δ of the spectral switch decreases, the minimum S_{\min} and the critical position z_c/z_0 increase as the truncation parameter δ increases. After inserting the polarizer, the spectral switch varies with the truncation parameter δ in a similar way as the case without the polarizer. However, the polarization angle θ affects the range of the truncation parameter δ at which the spectral switch appears.

Key words modern optics; hard-edge aperture; polychromatic vector beam; spectral switch

引 言

1986年, WOLF 教授首次从理论上证明: 当光源的光谱相干度满足所谓的定标定律时, 由光源辐射的光在传输中才保持光谱不变^[1]。之后, 人们在研究中发现, 即使满足定标定律的光入射到一光阑上, 光场中的光谱也不同于源光谱, 某些特定的条件下还会产生光谱开关^[2], 光阑衍射是诱导光谱变化的物理原因之一。目前, 对多种光束的传输特性以及被光阑衍射引起的光谱变化和光谱开关已进行了深入的理论研究^[2-6]和实验证实^[7], 并探索了其潜在的应用前景^[8]。然而, 研究工作还仅限于在标量场中进行。一个有意义的问题是: 矢量光束被硬边光阑衍射后是否会出现光谱开关? 硬边光阑如何影响矢量光束光谱开

关的特性? 作者以多色矢量高斯-谢尔模型 (GSM) 光束通过硬边光阑自由空间轴上的光谱开关为例, 对上述问题作了详细的研究。

1 理论模型

设入射到半宽为 b 的矩孔光阑 ($z=0$) 上的多色矢量 GSM 光束的交叉谱密度函数矩阵为^[9]:

$$W(\mathbf{r}_1', \mathbf{r}_2', \omega) = \begin{bmatrix} W_{x'x'}(\mathbf{r}_1', \mathbf{r}_2', \omega) & W_{x'y'}(\mathbf{r}_1', \mathbf{r}_2', \omega) \\ W_{y'x'}(\mathbf{r}_1', \mathbf{r}_2', \omega) & W_{y'y'}(\mathbf{r}_1', \mathbf{r}_2', \omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 F_a & \sqrt{I_1 I_2} \gamma_0 F_c \\ \sqrt{I_1 I_2} \gamma_0 F_c^* & I_2 F_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,

$$F_\xi = S^{(0)}(\omega) \exp[-(|\mathbf{r}_1'|^2 + |\mathbf{r}_2'|^2) / 4\sigma_\xi^2] \exp[-|\mathbf{r}_1' - \mathbf{r}_2'|^2 / 2\sigma_\xi^2], (\xi = a, c) \quad (2)$$

$\mathbf{r}_1', \mathbf{r}_2'$ 表示光阑所在面上两点的位置矢量, I_1, I_2 为二常数, σ_ω 为入射光束的束腰宽度, ω 为圆频率, 上标*表示复共轭, $S^{(0)}(\omega)$ 为源光谱, σ_a, σ_c 分别为自相关和

基金项目: 四川省教育厅重点项目基金资助项目 (2003A166)

作者简介: 赵光普 (1963-), 男, 研究员, 博士研究生, 现从事激光光学的教学与科研工作。

* 通讯联系人。E-mail: badah@scu.edu.cn

收稿日期: 2004-11-29; 收到修改稿日期: 2005-05-19

互相关长度, γ_0 为归一化互相关系数, $0 \leq |\gamma_0| \leq 1$ 。描述矢量 GSM 光束的 6 个参数 $I_1, I_2, \gamma_0, \sigma_{in}, \sigma_a$ 和 σ_c 满足文献 [10] 中的物理限制。

在傍轴近似下, 交叉谱密度矩阵在有光阑限制的自由空间中的传输公式为^[11]:

$$W_{ij}(r_1', r_2', z, \omega) = (k/2\pi z)^2 \int_{-b}^b \int_{-b}^b W_{ij}'(r_1', r_2', \omega) \times \exp\{-k[(r_1'^2 - r_2'^2) - 2(r_1 r_1' - r_2 r_2') + (r_1^2 - r_2^2)]/2z\} dr_1' dr_2', (i, j = x, y) \quad (3)$$

式中, $k = \omega/c$ 为波数, c 为真空中光速。

将 (1) 式和 (2) 式代入 (3) 式, 令 $r_1 = r_2 = 0$ 并利用交叉谱密度矩阵 $W(r_1, r_2, z, \omega)$ 与相关函数矩阵 $\Gamma(r_1, r_2, z, \omega)$ 之间的关系^[9], 得到多色矢量 GSM 光束通过硬边光阑自由空间光学系统轴上偏振矩阵:

$$J(Q, z) = \begin{bmatrix} J_{xx}(Q, z) & J_{xy}(Q, z) \\ J_{yx}(Q, z) & J_{yy}(Q, z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 S^{(0)}(\omega) F_a^2 & \gamma_0 \sqrt{I_1 I_2} S^{(0)}(\omega) F_c^2 \\ \gamma_0 \sqrt{I_1 I_2} S^{(0)}(\omega) F_c^{*2} & I_2 S^{(0)}(\omega) F_a^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,

$$F_\xi = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{z_0}{\sqrt{Q_\xi}} \frac{z_0}{z} \frac{\omega}{\omega_0} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[Q^* - \frac{1}{4Q\alpha_\xi^2} u^2\right] \times \left\{ \operatorname{erfi}\left[\frac{u + 2Q\alpha_\xi^2 \delta}{2\sqrt{Q}\alpha_\xi^2}\right] - \operatorname{erfi}\left[\frac{u - 2Q\alpha_\xi^2 \delta}{2\sqrt{Q}\alpha_\xi^2}\right] \right\} du$$

($\xi = a, c$)

$$Q_\xi = -\frac{1}{4} - \frac{1}{2\alpha_\xi^2} + \pi \frac{z_0}{z} \frac{\omega}{\omega_0}$$

$z_0 = \sigma_{in}^2 / \lambda_0$

$\alpha_\xi = \sigma_\xi / \sigma_{in}$

$\delta = b / \sigma_{in}$ (截断参数)

$u = x_1' / \sigma_{in}$ (入射面相对坐标)

λ_0 和 ω_0 为源光谱 $S^{(0)}(\omega)$ 的中心波长和频率, erfi 表示虚宗量误差函数。

设源光谱 $S^{(0)}(\omega)$ 为高斯型:

$$S^{(0)}(\omega) = \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma_0^2}\right] \quad (6)$$

σ_0 是源光谱谱宽, 将 (5) 式、(6) 式代入 (4) 式, 得到矢量多色 GSM 光束通过有硬边光阑限制光学系统轴上点的光强^[10]和光谱分别为:

$$I(Q, z) = \operatorname{Tr} J(Q, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma_0^2}\right] M(Q, z, \omega) d\omega \quad (7)$$

$$S(Q, z, \omega) = \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma_0^2}\right] M(Q, z, \omega) \quad (8)$$

Tr 为偏振矩阵的迹, $M(Q, z, \omega)$ 为光谱的调制函数:

$$M(Q, z, \omega) = \frac{\pi(I_1 + I_2)}{4Q_a} F_a^2 \quad (9)$$

从 (8) 式和 (9) 式可以看出, 矢量多色 GSM 光束通过硬边光阑自由空间光学系统轴上点光谱为源光谱 $S^{(0)}(\omega)$ 和光谱调制函数 $M(Q, z, \omega)$ 的乘积。光阑衍射对光谱的影响表现为 $M(Q, z, \omega)$ 对源光谱 $S^{(0)}(\omega)$ 的调制。由于 $M(Q, z, \omega)$ 的作用, 轴上点的光谱一般不同于源光谱, 这即衍射引起的光谱变化。

为了与标量 GSM 光束区分, 在紧靠光阑的后表面上插入一个线偏振片, 令其偏振方向与 x 轴的夹角为 θ 此偏振片的 Jones 矩阵为^[10]:

$$T(r) = \begin{bmatrix} c^2 & cs \\ cs & s^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$c = \cos\theta, s = \sin\theta$

类似前面的推导过程, 可得到加入偏振片后轴上点的光强与光谱分布, 其中光谱调制函数可写为:

$$M(Q, z, \omega) = \frac{\pi(I_1 c^2 + I_2 s^2)}{4Q_a} F_a^2 + \frac{2\pi cs \gamma_0 \sqrt{I_1 I_2} F_c^2}{4Q_c} \quad (11)$$

2 数值计算和理论分析

为了说明硬边光阑对光谱开关的影响, 利用所得 (4) 式、(5) 式、(8) 式和 (11) 式作了数值计算。计算过程中公用参数为 $\sigma_{in} = 10^{-3} \text{ m}$, $\omega_0 = 10^{15} \text{ s}^{-1}$, $\sigma_0 = 0.6 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$, $\sigma_a = 0.5\sigma_c$, $I_1 = I_2 = 0.5$, $\gamma_0 = 0.2$ 其它具体使用参数见图中文字说明。图 1 为插入偏振片前, $\delta = 0.35, z/z_0 = 0.0665, 0.069$ 和 0.0715 多色矢量 GSM 光束被硬边光阑衍射后轴上点的归一化光谱 $S(\omega) = S(Q, z, \omega) / S_{\max}(Q, z, \omega)$ 。由图 1 知, 多色矢量

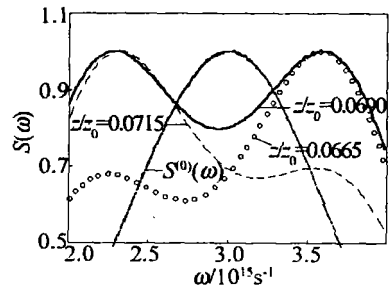


Fig 1 Axial normalized spectra $S(\omega)$ before inserting a polarizer ($\alpha_a = 2, \delta = 0.35$) for different z/z_0 .

GSM 光束被硬边光阑衍射后, 轴上点的光谱会发生变化。在 $z/z_0 = 0.0665$ 时, 有蓝移; 在 $z/z_0 = 0.0715$ 时, 有红移; 在 $z/z_0 = 0.069$ 时, 光谱会一分为二, 出现两个等高的峰, 这即光谱开关^[2]。定义出现光谱开关的诸位置 z_c/z_0 中, 离光阑最远的 z_c/z_0 处出现的光谱开关为一阶光谱开关, 随 z_c/z_0 的减小, 顺次称为 2, 3, ..., n

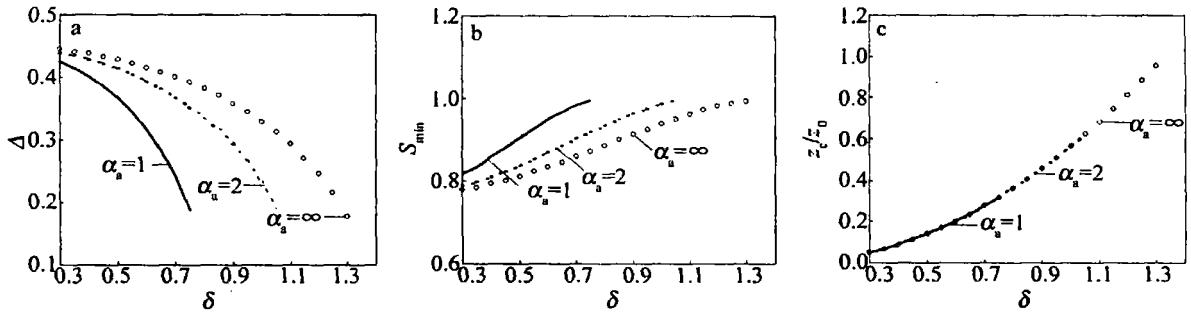


Fig 2 Before inserting a polarizer $\alpha_a = 1, 2$ and ∞ a— the spectral transition height Δ versus truncation parameter δ b— spectral minimum S_{min} versus truncation parameter δ c— critical position z_c/z_0 versus truncation parameter δ

阶光谱开关。图 2 为插入偏振片前, 不同的空间自相关参数 α_a 对应的一阶光谱开关的光谱跃迁量 Δ (定义光谱跃迁量 Δ 为光谱中两个极大值对应的相对频率的差值)、光谱极小值 S_{min} (光谱开关两极大值之间的最小值) 和光谱开关产生的位置 z_c/z_0 随截断参数 δ 的变化曲线。图 2 表明, 光谱跃迁量 Δ 随截断参数 δ 的增加而减少, 光谱极小值 S_{min} 随截断参数 δ 的增加而增加, 产生光谱开关的位置 z_c/z_0 随截断参数 δ 的增加向远离光阑的方向移动。改变空间自相关参数 α_a 对出现光谱开关的截断参数 δ 的范围产生影响, α_a 越大, 出现光谱开关的截断参数 δ 的范围越大。例如: $\alpha_a = 1$ 时, 一阶光谱开关在 $\delta \leq 0.75$ 范围内出现; $\alpha_a = 2$ 时, 在 $\delta \leq 1.05$ 范围内出现; $\alpha_a = \infty$ 时, 在 $\delta \leq 1.3$ 范围内出现。空间自相关参数 α_a 对光谱开关的位置 z_c/z_0

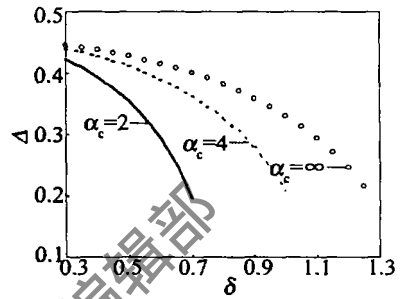


Fig 3 After inserting a polarizer the spectral transition height Δ versus truncation parameter δ for different spatial cross-correlation parameter α_c

影响较小。图 3 为插入偏振片后, 不同的空间互相关参数 α_c 对应的一阶光谱开关的光谱跃迁量 Δ 随截断参数 δ 的变化曲线。可以发现, 出现光谱开关的截断参数 δ 的范围随 α_c 的增加而增大, 与插入偏振片前随 α_a 的变化规律相同。图 4 为不同的截断参数 δ 对应

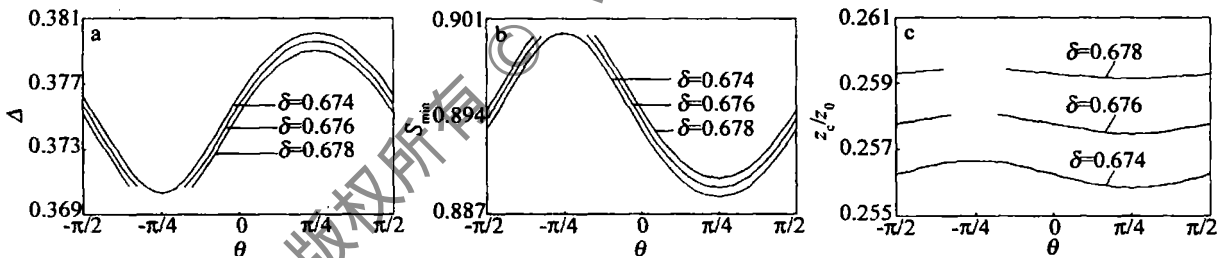


Fig 4 $\alpha_c = 4, \delta = 0.674, 0.676, 0.678$ a— the spectral transition height Δ b— the spectral minimum S_{min} c— critical position z_c/z_0 versus rotating angle θ of the polarizer

的光谱跃迁量 Δ 极小值 S_{min} 和位置 z_c/z_0 随偏振片旋转角度 θ 的变化曲线。可以发现, 偏振片旋转角度 θ 影响光谱开关的行为, 并对出现光谱开关的截断参数 δ 的范围产生影响。

3 结论

利用偏振矩阵和交叉谱密度传输公式, 推导出了多色矢量 GSM 光束通过硬边光阑自由空间光学系统轴上光谱的一般表达式。着重分析了截断参数 δ 对光谱开关的影响。在插入偏振片之前, 光谱开关的光谱跃迁量 Δ 随截断参数 δ 的增加而减少, 光谱极小值 S_{min} 和位置 z_c/z_0 随 δ 的增加而增大, 产生光谱开关 δ 的范围随空间自相关参数 α_a 的增加而增加, 但 α_a 对 z_c/z_0 影响较小。插入偏振片之后, 光谱开关随 δ 和空

间互相关参数 α_c 的变化规律与插入偏振片之前随 δ 和 α_a 的变化规律相同。偏振片的旋转角度 θ 对出现光谱开关的截断参数 δ 的范围产生影响。

参考文献

- [1] WOLF E. Invariance of spectrum of light on propagation [J]. Phys Rev Lett 1986 56(13): 1370~1372
- [2] FU JX, ZHANG H, NEMOTO S. Spectral shifts and spectral switches of partially coherent light passing through an aperture [J]. Opt Commun, 1999, 162: 57~63
- [3] ZHAO G P, LÜ B D. Propagation of Gaussian beams through a multi-Gaussian apertured ABCD system [J]. Laser Technology 2003, 27(3): 259~261 (in Chinese).
- [4] ZHAO G P, LÜ B D. Propagation of Gaussian beams passing through complicated ABCD optical system with internal hard-edge aperture [J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 299~301 (in Chinese).

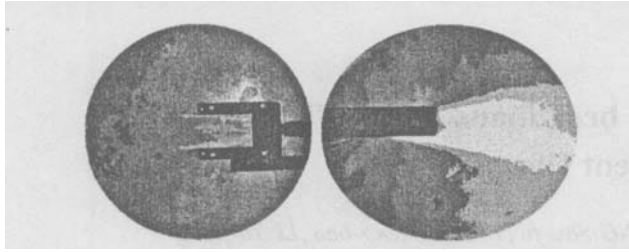


Fig 4 The schlieren trial photos of Laval-cavity nozzle(experimental gas CO_2 gas experimental pressure $4 \times 10^5 \text{ Pa}$)

的气帘气流在作用区范围内保持了一个稳定的层流状态,沿气流传播方向的扩散角较小,同时气流挺度良好,气帘下方负压区的气流扰动非常小。随后在 Trumpf 6000W 快速轴流 CO_2 激光器上进行了实际焊接检验。为了观察气帘对聚焦镜的保护效果,使用了 $f = 200\text{mm}$ 的抛物铜镜,对 2024 2219 7075 1420 铝合金及不锈钢等材料进行了大量的焊接试验。焊接时激光功率为 $3000\text{W} \sim 5400\text{W}$, 焊接速度 $2\text{m/m in} \sim 5\text{m/m in}$, 焊接保护气为 $\text{He}(20\text{L/m in})$, 气帘保护气为 $\text{N}_2(4 \times 10^5 \text{ Pa})$, 离焦量为 $+1\text{mm}$ 。累积焊接试验后,取下聚焦镜后观察到镜子表面没有飞溅物。焊接试验后观察到的聚焦镜状态说明这种结构的喷嘴吹出的气帘可以有效的吹除焊接飞溅物以保护透镜。目前,在实验室的 Rofin-Sinar 3 5kW CO_2 激光器 (slab)、Trumpf 6000W 快速轴流 CO_2 激光器及 Rofin-Sinar 2 5kW Nd:YAG 激光器的焊接头上安装了这种结构的喷嘴,使用效果良好,没有发现聚焦透镜的污染问题。

4 结束语

借鉴拉法尔管的气动力学原理,进行气帘腔体设

计,较好地解决了激光焊接过程中的透镜保护和负压区的气流扰动问题。通过气流纹影试验和实际的激光焊接检验,说明采用非轴对称拉法尔曲线腔体的喷嘴,可以得到一个层流气帘,使用这种结构的气帘喷嘴可以有效吹除激光焊接过程中产生的飞溅,实现对聚焦镜的保护;同时由于负压区的气流扰动非常小,保证了焊接质量。这些问题的解决,对激光焊接的工业化应用具有积极的推动作用。

参 考 文 献

- [1] SUTLIFF D R, MCCAY T D, MCCAY M H *et al*. A laser welding nozzle for beam delivery optics protection [J]. *Welding Journal* 1992, 71 (6): 219~224
- [2] WANG H L, HUANG W L, ZHOU Zh Y *et al*. Laser welding of 8mm thick stainless steel plates [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2003, 30 (5): 463~466(in Chinese).
- [3] HUO T Q. *Hydrodynamics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 191~204(in Chinese).
- [4] WEN H X, LIU Y Q, LIANG X A. The erection of the curve equation of the Laval nozzle and its numerical-controlled processing [J]. *Journal of Northwest Institute of Light Industry* 1997, 15(4): 7~11(in Chinese).
- [5] XIAO X H. Laval nozzle used in the positive pneumatic conveying system [J]. *Journal of Wuhan Polytechnic University*, 2002(4): 31~32(in Chinese).
- [6] PENG Y Ch, LIAO X, MO F B. Theoretic study on gas flow in de laval nozzles of different configurations [J]. *Research on Iron & Steel* 1999 (2): 43~45(in Chinese).
- [7] LI Ch M. Study on the fluid field of full length rails quenching cooling to quality assurance [D]. Beijing: Northern Jiaotong University, 2001: 24~33(in Chinese).
- [8] ZHAO G P, LÜ B D. Influence of aperture lens with spherical aberration on the spectral behavior of polychromatic Gaussian Schell-model beams [J]. *Optik* 2004, 115(4): 181~185
- [9] ZHAO G P, LÜ B D. Diffraction-induced spectral switches of spherically aberrated polychromatic Gaussian beams [J]. *Acta Physica Sinica* 2004, 53(9): 2974~2979(in Chinese).
- [10] KANDPAL H C. Experimental observation of the phenomenon of spectral switch [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 2001, 3 (6): 296~299
- [11] PONOMARENKO S A, WOLF E. Spectral anomalies in a Fraunhofer diffraction pattern [J]. *OptLett* 2002, 27(14): 1211~1213.
- [12] AGRAWAL G P, WOLF E. Propagation-induced polarization changes in partially coherent optical beams [J]. *J O S A*, 2000, A17(11): 2019~2023.
- [13] GORIE, SANTARSIERO M, PIQUERO G *et al*. Partially polarized Gaussian Schell-model beams [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 2001, 3(1): 1~9
- [14] MANDEL L, WOLF E. *Optical coherence and quantum optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995: 327.

(上接第 144 页)