

文章编号: 1001-3806(2005)01-0056-03

## 部分空间相干光在自由空间中传输的光谱分裂

季小玲<sup>1,2</sup>, 吕百达<sup>2,3\*</sup>

(1. 四川师范大学 电子工程学院, 成都 610066; 2 四川大学 激光物理与化学研究所, 成都 610064; 3 华中科技大学 激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 基于部分相干光的传输定律, 研究了多色高斯-谢尔模型光束在自由空间中传输的光谱变化。研究表明, 在近场会有光谱分裂出现, 光谱分裂与光源的空间相干性和源光谱的谱宽以及位置参数有关。对结果作了分析, 并用数值计算作了说明。

**关键词:** 光谱分裂; 多色高斯-谢尔模型 (GSM) 光束; 自由空间传输; 空间相干性

**中图分类号:** O436 **文献标识码:** A

### Spectral splitting of partially coherent light propagating in free space

JIXiao-ling<sup>1,2</sup>, LÜBai-da<sup>2,3</sup>

(1. College of Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China; 2 Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 3 National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Based on the propagation law of partially coherent light, spectral changes of a polychromatic Gaussian-Schell model beam propagating in free space is studied. It is shown that the spectral splitting can take place in the near field, which is dependent on the spatial correlation and bandwidth of the spectral source and position parameters. The results are analyzed and illustrated with numerical examples.

**Key words:** spectral splitting; polychromatic Gaussian-Schell model (GSM) beam; free-space propagation; spatial correlation

## 引 言

若不满足定标律, 部分相干光即使在自由空间中传输时, 其光谱也会发生变化, 这即著名的 Wolf 效应<sup>[1]</sup>, 人们对此已进行了许多理论和实验研究<sup>[2,3]</sup>。然而, 迄今对自由空间中传输的研究都关注在轴上和离轴光谱的蓝移或红移。文中使用多色高斯-谢尔模型 (GSM) 光束作为部分相干光的典型例, 对多色 GSM 光束在自由空间中传输的光谱分裂现象作了研究。

## 1 理论模型

在空间-频率域中, 设多色 Gaussian-Schell 模型光束在入射面  $z=0$  处交叉谱密度函数为<sup>[4]</sup>:

$$W^{(0)}(\mathbf{r}_1', \mathbf{r}_2', z=0, \omega) = S^{(0)}(\omega) \times$$

$$\exp\left[-\frac{\mathbf{r}_1'^2 + \mathbf{r}_2'^2}{w_0^2}\right] \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_1' - \mathbf{r}_2')^2}{2\sigma_0^2(\omega)}\right] \quad (1)$$

式中,  $\omega$  为频率,  $w_0$  为束腰宽度,  $\mathbf{r}_1', \mathbf{r}_2'$  分别为  $z=0$  处空间两点的径向坐标矢量,  $S^{(0)}(\omega)$  和  $\sigma_0(\omega)$  分别为入射光束的源光谱和空间相关长度。

多色 GSM 光束通过自由空间的传输公式为<sup>[4]</sup>:

$$W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z, \omega) = \left[\frac{k}{2\pi z}\right]^2 \mathcal{J}^{(0)}(\mathbf{r}_1', \mathbf{r}_2', z=0, \omega) \times \exp\left\{-\left[\frac{ik}{2z}\right] \left[ (\mathbf{r}_1^2 - \mathbf{r}_2^2) - 2(\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_1' - \mathbf{r}_2 \cdot \mathbf{r}_2') + (\mathbf{r}_1^2 - \mathbf{r}_2^2) \right] \right\} d\mathbf{r}_1' d\mathbf{r}_2' = S^{(0)}(\omega) \frac{w_0^2}{w^2(z)} \times \exp\left[-\frac{\mathbf{r}_1^2 + \mathbf{r}_2^2}{w^2(z)}\right] \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2}{2\sigma^2(z)}\right] \times \exp\left[-\frac{ik(\mathbf{r}_1^2 - \mathbf{r}_2^2)}{2R(z)}\right] \quad (2)$$

式中,

$$w(z) = w_0 \left[ 1 + \left(\frac{z}{\mathcal{R}(\omega)}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

基金项目: 四川省教育厅自然科学基金资助项目 (2002A089)

作者简介: 季小玲 (1963-), 女, 教授, 博士研究生, 主要从事光束的传输与控制研究。

\* 通讯联系人。E-mail: badalu@scu.edu.cn

收稿日期: 2004-01-08; 收到修改稿日期: 2004-04-23

$$R(z) = z \left[ 1 + \left( \frac{\bar{r}_R(\omega)}{z} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$\sigma(z) = \sigma_0(\omega) \left[ 1 + \left( \frac{z}{\bar{r}_R(\omega)} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

$\bar{r}_R(\omega) = \frac{w_0^2 \omega}{2c} [1 + \alpha^{-2}(\omega)]^{-1/2}$  为 GSM 光束的瑞利尺寸,  $\alpha(\omega) = \sigma_0(\omega) / w_0$  为空间相关度,  $k = \omega / c$  为波数,  $c$  为光速,  $r_1, r_2$  分别为  $z$  处空间两点的径向坐标矢量。

当  $r_1 = r_2 = r$ , 由 (2) 式得到光谱强度分布为:

$$S(r, z, \omega) = S^{(0)}(\omega) \frac{w_0^2}{w^2(z)} \exp \left[ -\frac{2r^2}{w^2(z)} \right] \quad (6)$$

设源光谱  $S^{(0)}(\omega)$  为洛伦兹型, 中心频率位于  $\omega_0$  处, 有:

$$S^{(0)}(\omega) = \frac{\Gamma^2}{(\omega - \omega_0)^2 + \Gamma^2} \quad (7)$$

式中,  $\Gamma$  为源光谱的谱宽。将 (7) 式代入 (6) 式即可计算源光谱为洛伦兹型的多色 GSM 光束通过自由空间的光谱强度分布。令  $r = 0$ , 即得到轴上点光谱强度分布。(6) 式表明, 多色 GSM 光束在自由空间中传输时, 光谱强度与由光源空间相关度  $\alpha(\omega)$ 、谱宽  $\Gamma$  和考察点位置参数  $z, r$  有关。

## 2 数值计算

为了讨论方便, 采用归一化光谱  $S(\omega)$  和相对谱位移  $\delta\omega / \omega_0$ :

$$S(\omega) = \frac{S(r, z, \omega)}{S_{\max}(r, z, \omega)}, \quad \frac{\delta\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_{\max} - \omega_0}{\omega_0} \quad (8)$$

式中,  $S_{\max}(r, z, \omega)$  和  $\omega_{\max}$  分别为  $z$  处的最大光谱强度值和所对应的频率。下面分析不满足定标律的多色 GSM 光束在自由空间中传输时近场的光谱变化。为简单起见, 设光源的空间相关度  $\alpha(\omega)$  与频率无关<sup>[31]</sup>, 即  $\alpha(\omega) = \alpha$ 。数值计算中取  $\omega_0 = 3.2 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ ,  $\Gamma = 0.6 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ ,  $z = 0.5\bar{r}_{R_0}$  ( $\bar{r}_{R_0}$  是频率为  $\omega_0$  的完全相干光对应的瑞利尺寸)。

图 1 为多色 GSM 光束归一化光谱  $S(\omega)$ 。由图 1 可知: 轴上点光谱移动均为蓝移。不同相关度  $\alpha$  下, 光谱的位移是不同的,  $\alpha$  越小 (光束相干性越差), 光谱位移量越大。例如,  $\alpha = \infty$  (完全相干光),  $\alpha = 0.6$ ,  $\alpha = 0.2$  时, 相对光谱位移  $\delta\omega / \omega_0$  分别为 0.006, 0.016 和 0.031。图 1b 表明, 轴外点光谱可能蓝移也可能红移。例如, 当  $\alpha = 0.2$  时,  $r = 1\text{mm}$ , 其相对光谱位移为 0.028 (蓝移);  $r = 6\text{mm}$ , 其相对光谱位移为 -0.041 (红移)。

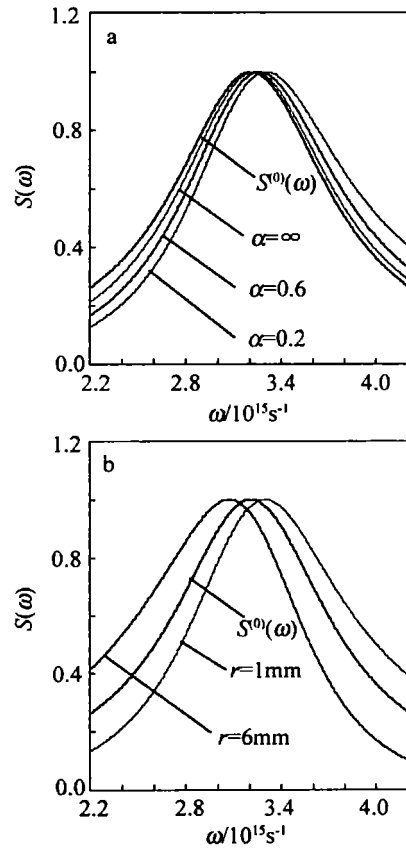


Fig 1 Normalized spectra  $S(\omega)$   
a—on-axis b—off-axis,  $\alpha = 0.2$

多色 GSM 光束不同  $r$  处的离轴点归一化光谱  $S(\omega)$  示于图 2。由图 2a 可以看出,  $r = 3.8\text{mm}$  处, 光谱分裂为两个峰 (主峰和次峰), 光谱位移为红移。当离轴距离  $r$  增大, 次峰的高度也随之增大 (见图 2b)。特别是当  $r = 4.063\text{mm}$  时, 双峰高度相等 (见图 2c, 称为临界状态), 这意味着光谱位移将有一个迅速的跃迁发生。继续增大  $r$ , 原来的次峰变为主峰, 但从图可知, 光谱位移仍为红移, 且红移量随着  $r$  的增大而增大 (见图 2d、图 2e)。

图 3 为多色 GSM 光束的相对光谱移动  $\delta\omega / \omega_0$  随  $r$  的变化曲线。图 3 表明: 轴上点光谱均为蓝移, 随着  $r$  的增大光谱由蓝移变为红移, 且光束相关度  $\alpha$  不太小 (光束相干性较好) 时, 会有光谱跃迁出现。GSM 光束谱宽  $\Gamma$  一定时, 随着  $\alpha$  的减小, 光谱跃迁位置  $r_c$  增大 (发生光谱跃迁点离轴越远), 光谱相对跃迁量  $\Delta$  减小, 当  $\alpha = 0.3$  时, 已无光谱跃迁出现。此外, 从图 3 还可以看出, 光谱跃迁出现在光谱红移区。

图 4 为多色 GSM 光束在临界状态归一化光谱曲线。由图可知, GSM 光束  $\Gamma$  一定时, 随着  $\alpha$  的减小, 光谱相对跃迁量减小, 临界状态对应的光谱曲线凹陷变浅。当  $\alpha = 0.3$  时, 已无光谱分裂出现。

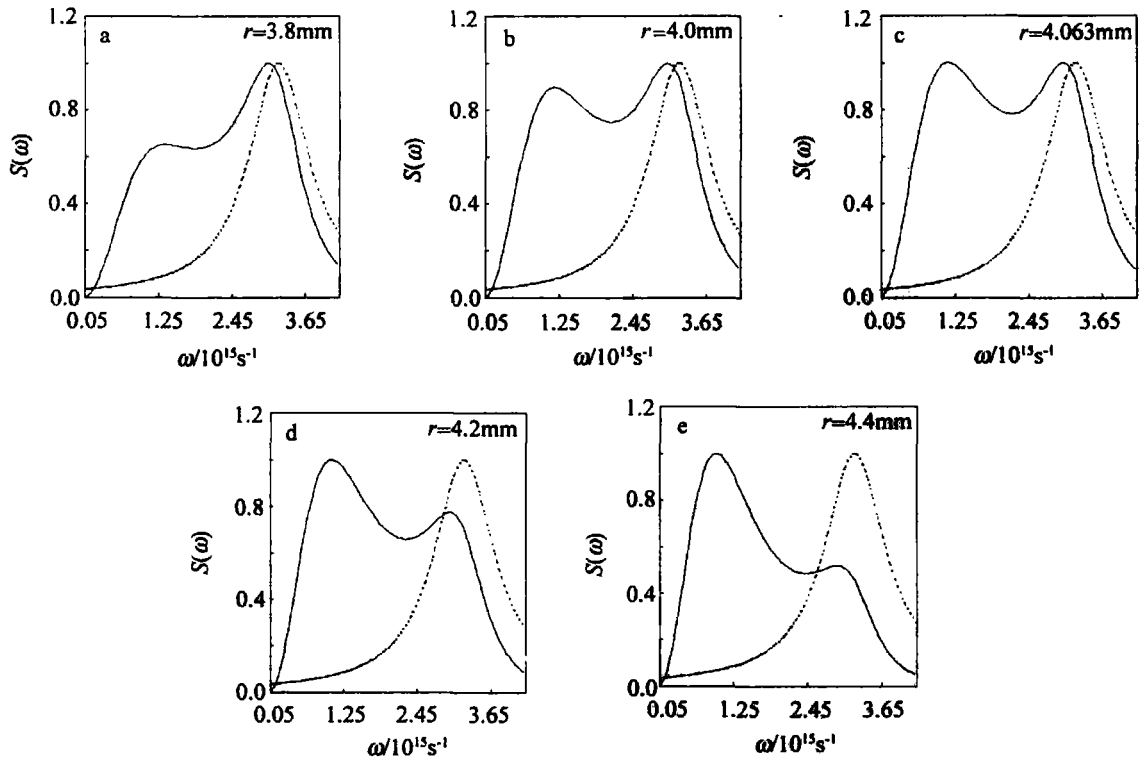


Fig 2 Variation of normalized off-axis spectrum  $S(\omega)$  with  $r, \alpha = 1.0$

--- normalized source spectrum at the  $z=0$  plane      — normalized off-axis spectrum at  $r$

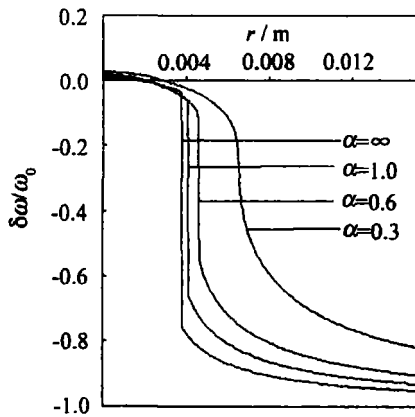


Fig 3 Relative spectral shift  $\delta\omega/\omega_0$  for different values of  $\alpha = \infty, \alpha = 1.0, \alpha = 0.6, \alpha = 0.3$

《激光技术》

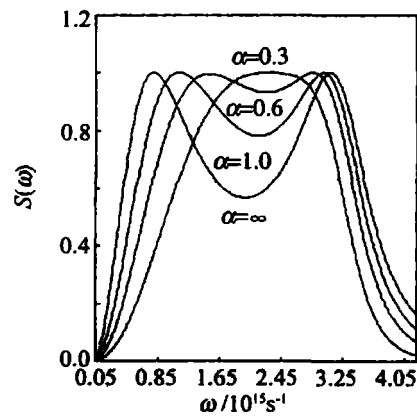


Fig 4 Normalized spectra  $S(\omega)$  at the critical position for different values of  $\alpha = \infty, \alpha = 1.0, \alpha = 0.6, \alpha = 0.3$

参考文献

- [1] WOLF E Invariance of the spectrum of light on propagation [J]. Phys Rev Lett, 1986, 56 (13): 1370 ~ 1372
- [2] PALMA C, CNCOTTIG, GUATTARIG Spectral shift of a Gaussian-Schell model beam beyond a thin lens [J]. IEEE J Q E, 1998, 34 (2): 378 ~ 383.
- [3] DACIC Z, WOLF E Changes in the spectrum of a partially coherent light beam propagating in free space [J]. J O S A, 1988, A5 (7): 1118 ~ 1126
- [4] CARTER W H, WOLF E Coherence and radiometry with quasi-homogeneous planar sources [J]. J O S A, 1977, A67: 785 ~ 796.

3 结论

研究表明,不满足定标律的多色 GSM 光束在自由空间传输时,在近场除光谱移动外,轴外光谱还会有分裂,光谱跃迁出现在光谱红移区。随着光束相干性变差,发生光谱跃迁点离轴更远,光谱相对跃迁量变小,临界状态对应的凹陷变浅。当光束相干性很差时,光谱分裂现象会消失。故多色 GSM 光束通过自由空间传输时出现的光谱分裂也是一种相干诱导的光谱变化。