

文章编号: 1000-5013(2009)04-0399-04

多色空间相干光经杨氏三孔干涉后的光谱奇异现象

舒建华, 陈子阳, 蒲继雄

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 研究相干光经杨氏三孔实验干涉后, 在干涉场中的相位奇点附近所出现的光谱变化现象. 结果表明, 在相位奇点处附近的某些位置光谱出现“红移”, 而在另外一些位置光谱出现“蓝移”, 并且在一些特殊点光谱将分类为等高的两个峰. 对两类特殊截面(垂直于三孔平面的截面和平行于三孔平面的截面)的相对平均频率变化进行研究, 结果表明, 多色空间相干光经杨氏三孔干涉后, 其干涉场中的观察点的光谱将出现不同于原光谱的变化.

关键词: 杨氏三孔实验; 光谱位移; 光谱开关; 奇点光学

中图分类号: O 436.1

文献标识码: A

在光谱分析中, 人们一直认为从光源发出的光场在传输过程中, 其归一化光谱是不变的. 1986 年, Wolf 指出由准均匀光源发出的光在传输中, 只有当其光谱相干度满足所谓的定标定律, 在传输过程中归一化光谱才保持不变^[1]. 进一步的研究表明, 即使当光源的光谱相干度满足定标定律, 光阑的衍射也将使得归一化光谱出现变化^[2-4]. Pan 等^[5], Yadav 等^[6] 分别从理论上和实验上研究当光谱相干度满足定标定律的部分相干光, 经双缝干涉后的光谱变化及其光谱开关现象. 此外, 相关的研究还表明, 光学系统的像差(如色差、球差等)也会对传输中的光谱产生影响^[7-8]. 近几年来, 振幅等于零的场点附近, 波场的相位是异常的, 呈现出相当复杂的结构, 如相位错位和光学漩涡等^[9-12]. 对于这种现象的研究已经逐渐发展成物理光学一门新的分支, 称之为奇点光学^[12]. Ruben 等^[13] 从理论上分析了单色相干光经杨氏三孔形成由 3 个单色点光源发出的球面波的干涉场, 与 3 个平面波的干涉大不相同, 球面波的干涉波场会呈现相位漩涡. 本文主要讨论多色空间相干光经过杨氏三孔干涉后, 波场中振幅等于零的点附近的光谱变化及其光谱开关现象.

1 理论分析

图 1 为杨氏三孔干涉实验示意图. 光束沿 z 方向传输, 三孔所在处位于 $z = 0$ 的平面上. P_1, P_2 和 P_3 分别为边长为 a 的正三角形的 3 个顶点, 它们的坐标分别为 $(\frac{a}{\sqrt{3}}, 0, 0)$, $(-\frac{a}{2\sqrt{3}}, \frac{a}{2}, 0)$ 和 $(-\frac{a}{2\sqrt{3}}, -\frac{a}{2}, 0)$. 观察屏位于 z 处. 从 P_j 孔出射的光波可视为球面波. 则 P_j 所产生的场在 Q 点处可表示为

$$E_j(x, y, z, \omega) = \frac{A_j(\omega)}{r_j} \exp[i(k_j r_j + \varphi_j)], \quad j = 1, 2, 3. \quad (1)$$

在 Q 点处波场的总场强为

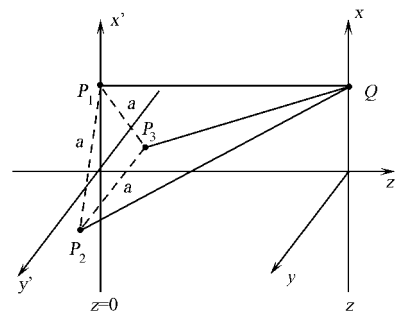


图 1 杨氏三孔干涉实验
Fig. 1 Young's three pinhole interference experiment

收稿日期: 2008-05-22

通信作者: 舒建华(1955-), 男, 副教授, 主要从事光的传输和量子光学研究. E-mail: sjh@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60477041); 福建省自然科学基金资助项目(2006J0237)

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

$$E(x,y,z,\omega)=\sum_{j=1}^3\frac{A_j(\omega)}{r_j}\exp[i(k_jr_j+\varphi_j)].\tag{2}$$

其中, $A_j(\omega)$ 是第 j 个光波的振幅, 它与角频率 ω 有关. k_j 是第 j 个光波的波矢的大小. 为简化分析, 令 $k_j=k$. r_j 是 P_j 孔到 Q 点的距离, 即 $r_j=\sqrt{(x-x_j)^2+(y-y_j)^2+z^2}$. 在傍轴条件近似下 $r_j\approx z+\frac{(x-x_j)^2}{2z}+\frac{(y-y_j)^2}{2z}$. 于是, 式(2)可简化为

$$E(x,y,z,\omega)=\frac{\exp(ikz)}{z}\sum_{j=1}^3A_j(\omega)\exp\left\{ik\left[\frac{(x-x_j)^2}{2z}+\frac{(y-y_j)^2}{2z}\right]+i\varphi_j\right\}.\tag{3}$$

设原光谱呈现以中心频率为 ω_0 , 带宽为 ω 的高斯分布为

$$S^{(0)}(\omega)=|A(\omega)|^2=S_0\exp\left[-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2\omega_0^2}\right].\tag{4}$$

为简单起见而不失一般性, 设 $A_1(\omega)=A_2(\omega)=A_3(\omega)=A(\omega)$, 于是, Q 点的光谱密度函数为

$$S(x_0,y_0,z,l,\omega)=E^*(x,y,z,\omega)E(x,y,z,\omega)=S^{(0)}(\omega)M(x,y,z,\omega).$$

其中, $S^{(0)}(\omega)=A_j^*(\omega)A_l(\omega), j,l=1,2,3, M(x,y,z,\omega)=(\frac{1}{z})^2\sum_{j=1}^3\sum_{l=1}^3R_j^*R_l$. 而

$$R_j=\exp\left\{ik\left[\frac{(x-x_j)^2}{2z}+\frac{(y-y_j)^2}{2z}\right]+i\varphi_j\right\},\tag{5}$$

$$R_j^*R_l=\exp\{i\pi(\frac{\omega}{\omega_0})(\frac{z_0}{z})\times$$

$$[(x_j-x_l)(2x_0-x_j-x_l)+(y_j-y_l)(2y_0-y_j-y_l)]-i(\varphi_j-\varphi_l)\}.\tag{6}$$

其中, $z_0=a^2/\lambda, \lambda$ 是源光谱中心波长; $x_0=x/a, y_0=y/a$, 且作变量代换 $x_j\rightarrow x_j/a, x_l\rightarrow x_l/a$.

2 数值计算

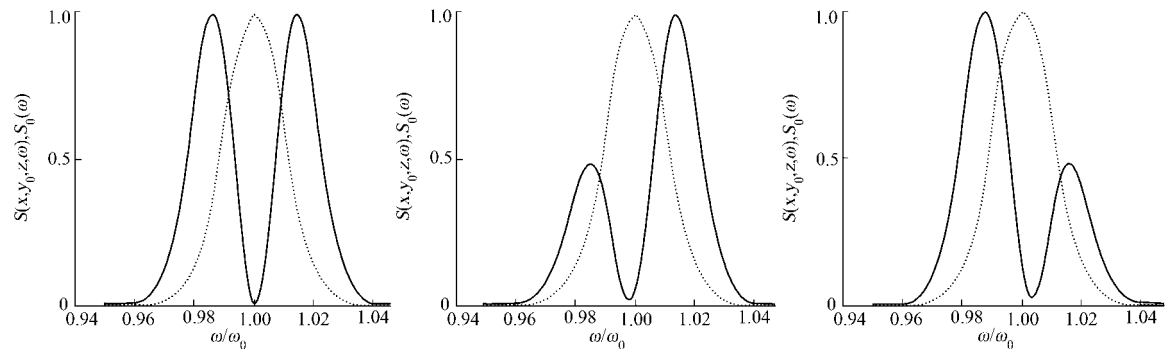
为简单起见, 假设用平面相干光沿 z 方向照射杨氏三孔, 因此, 可令式(3)中的 $\varphi_1=\varphi_2=\varphi_3=0$. 对式(5)进行数值计算, 证实了光谱变化及光谱奇异现象的存在.

高斯型光谱分布的多色空间相干光照射在三孔上, 孔后空间的某个相位奇点及其两侧附近位置两个点的光谱图, 如图 2 所示. 图 2 中, $\omega_0=3\text{ fs}^{-1}, \omega_0=0.01\omega_0, z=2\text{ m}, a=0.001\text{ m}$. 在图 2(a) 中, 可以看到光谱线被分裂为等值的两条, 即该观察点为相位奇点. 图 2(b), (c) 分别表示在该相位奇点沿 x 方向上的临近位置处的归一化光谱; 图 2(d), (e) 分别表示在该相位奇点沿 y 方向上的临近位置处的归一化光谱. 从图 2 可以看出, 光谱分别出现了“红移”和“蓝移”.

为了直观地得到某个观察平面的光谱变化, 引入光谱平均频率和相对平均频率的概念. 光谱的平均频率定义为

$$\bar{\omega}(x_0,y_0,\omega)=\int\omega S(x_0,y_0,\omega)d\omega/\int S(x_0,y_0,\omega)d\omega.\tag{7}$$

相对平均频率定义为 $\delta\omega/\omega_0=(\bar{\omega}-\omega_0)/\omega_0^{[4]}$. 据定义可以知道, 当相对平均频率的取值大于零时, 光谱出现了“蓝移”; 当相对平均频率的取值小于零时, 则光谱出现了“红移”; 而当相对平均频率出现从



(a) $x_0=1.450\ 52, y_0=0.837\ 84$ (b) $x=1.455\ 52, y_0=0.837\ 84$ (c) $x=1.445\ 52, y_0=0.837\ 84$

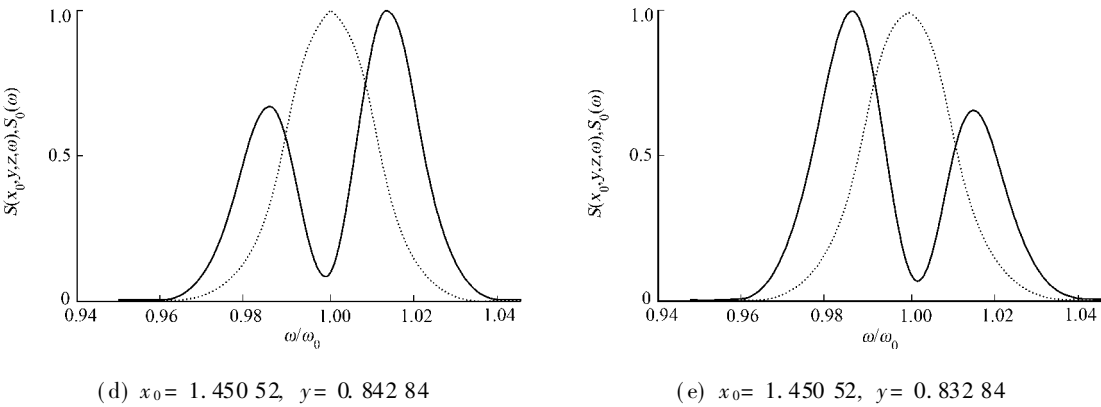


图 2 干涉场中的归一化光谱

Fig. 2 The normalized spectrum in the interference field

大于零突变到小于零(或相反)时,说明光谱在此处发生了快速跃迁,即所谓的光谱开关现象^[4].

做出对应于一定传输距离的相对平均频率变化图,如图 3 所示.图 3 中越亮的地方表示“蓝移”越明显;越暗的地方表示“红移”越明显.从图 3(a)到图 3(c)反映了相干光的光谱带宽(σ_0)取不同值时,相对平均频率在 z 平面上的分布.从图 3 中可以看出,随着带宽的增大,蓝移或红移的现象更加明显.

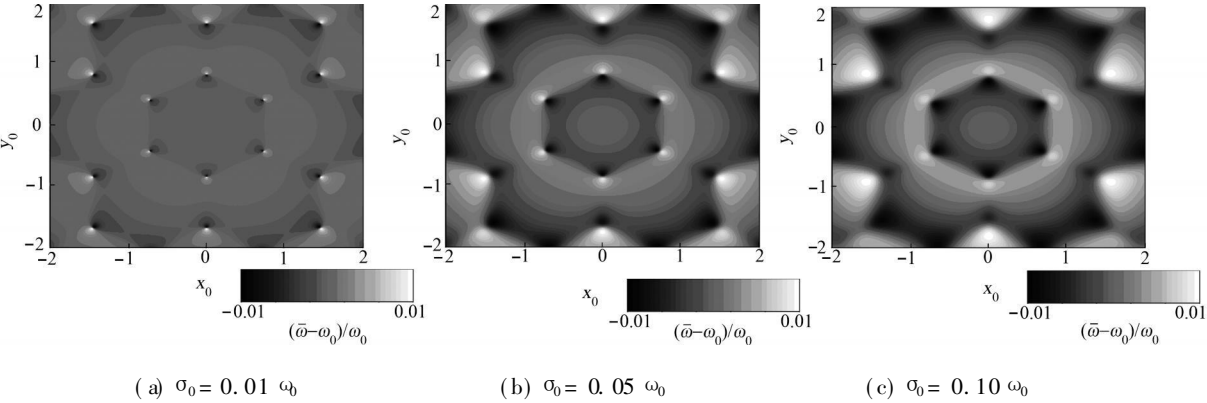


图 3 相对平均频率在平面上的分布随带宽的变化

Fig. 3 The relative mean frequency as a function of spectral width

相对平均频率在 $x = 0$ 平面上沿传播方向上的分布,如图 4 所示.从图 4 可发现,光谱的奇异现象发生在某一固定的传播角上.这意味着给定某一传播方向(临界角 $\theta_c \approx y/z$),当传播角略大于 θ_c 时,光谱发生蓝移;当传播角略小于 θ_c 时,光谱发生红移.这一特点也许可用于信息在自由空间的传播.

相对平均频率在的 $z = 2\text{ m}$ 平面上与 y_0 之间的关系,如图 5 所示.从图 5 中可看出,随着孔距 a 的

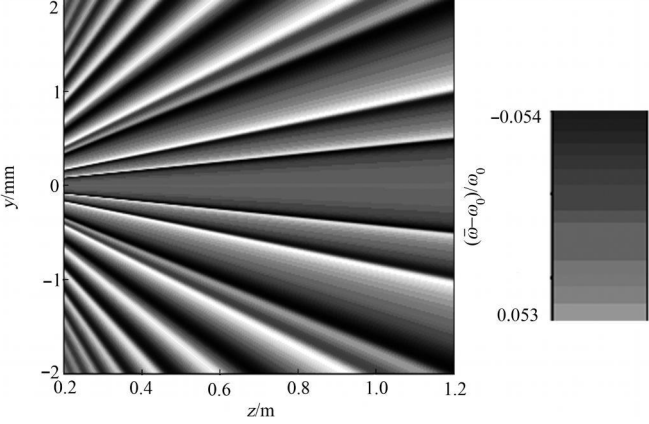


图 4 相对平均频率在 $x = 0$ 平面上的分布

Fig. 4 The distribution of the relative mean frequency in plane $x = 0$

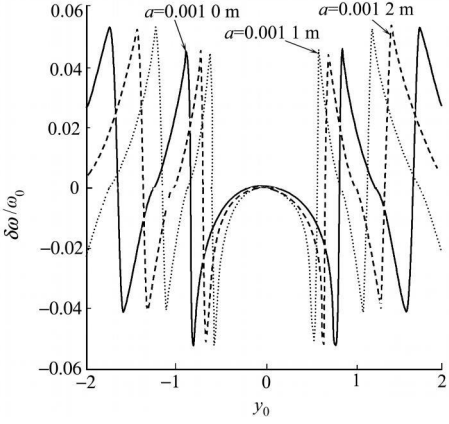


图 5 相对平均频率与 y_0 之间的关系

Fig. 5 The relative mean frequency as a function of y_0

增加, 发生光谱开关的位置不断向中心靠拢. 通过对孔距的调节, 可以改变光谱开关的临界角.

3 结束语

本文研究多色空间相干光照射在杨氏三孔后干涉场中的光谱变化. 结果表明, 在光阑后与光阑平行的截面上, 出现无数多个相位奇点. 多色空间相干光的光谱开关不仅与相位奇点的位置有关, 而且与孔距有关. 通过对孔距的调节, 可改变光谱开关的临界角. 这为信息在自由空间的传递提供一种可能.

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] LÜ Baí da, PAN Lir zhan. Spectral switching of Gaussian Schell model beams passing through an aperture lens [J]. IEEE J of Quant Electron, 2002, 38(4): 340-344.
- [3] JI Xiaí ling, ZHANG Erí tao, LÜ Baí da. Change in the spectrum of Gaussian Schell model beams propagating through trubulent atmosphere[J]. Opt Commun, 2006, 259(1): 1-6
- [4] PU Jií xiong, ZHANG Huií hua, NEMETO S. Spectral shifts and spectral switches of partially coherent light passing through an aperture[J]. Optics Commun, 1999, 162(1/3): 57-63
- [5] PAN Lirí zhan, LÜ Baí da. The spectral switch of partially coherent light in Young's experiment[J]. IEEE J Of Quant Electron, 2001, 37(11): 1377-1381
- [6] YADAV B K, RIZVIS A M, KANDPAL H C. Experimental observation of spectral changes of partially coherent light in Young's experiment[J]. J Opt (A): Pure Appl Opt, 2006, 8(1): 72-76
- [7] XIAO Xi, LU M V. Spectral changes in polychromatic Gauss Schell model beams passing through a spherically aberrated lens[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(4): 542-546
- [8] ZHAO Guangí pu, XIAO Xi, LÜ Baí da. Effect of astigmatism on the spectral switches of partially coherent beams [J]. Chinese Physics, 2004, 13(12): 2064-2070
- [9] NYE J F, BERRY M V. Dislocations in wave trains[J]. Proc R Soc Lond (A), 1974, 336(1605): 165-190
- [10] BERRY M V. Exploring the colors of dark light[J]. New J Phys, 2002, 4(1): 74
- [11] BERRY M V. Colored phase singularities[J]. New J Phys, 2002, 4(1): 66
- [12] SOSKIN M S, VASNETSOV M V. Singular optics[M]. New York: Elsevier, 2001: 219-276
- [13] RUBEN G, PAGANIN D M. Phase vortices from a Young's three pinhole interferometer[J]. Phys Rev (E), 2007, 75(2): 1-11.

The Spectral Anomalies in Young's Three Pinhole Experiment Formed by a Spatial Fully Coherent Polychromatic Wave

SH U Jianí hua, CHEN Zíí yang, PU Jiíí xiong

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: The phase of some observation points in the interference field is singularly as a spatial fully coherent polychromatic wave passing through Young's three pinhole experiment. The spectral change for the observation points in the neighborhood of the phase singularities is studied. It is found the spectrum is redshifted at some points, blueshifted at others, and is split into two lines elsewhere. The change in relative mean frequency for two specified cross plane (the plane parallel to the pinhole and the plane perpendicular to the pinhole) is investigated as well. It is found that the spectrum in the interference field will differ from that of source as a spatial fully coherent polychromatic light interfered by Young's three pinhole.

Keywords: Young's three pinhole experiment; spectral shift; spectral switch; singular optics

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 吴逢铁)