

多色空间相干光经环形光阑后近场的谱异常

傅小明¹ 游荣义¹ 黄晓菁¹ 蒲继雄²

(¹集美大学理学院物理系, 福建 厦门 361021; ²华侨大学信息科学与工程学院光子研究所, 福建 泉州 362021)

摘要 在多色空间完全相干光经过环形光阑衍射后远场处光谱变化的基础上进一步研究近场处的光谱行为, 并给出了详细的数值计算结果和具体实例。研究表明, 在一般情况下近场光谱与源光谱有所不同, 近场光谱与源光谱和光谱变换因子成正比, 而光谱变换因子则取决于中心拦截比 ϵ 和观察点到光阑的距离 z 以及观察点到 z 轴的距离 r , 并且随着中心拦截比的增大近场光谱性质逐渐表现出远场光谱的特性。数值计算结果表明, 同远场一样重要的光谱变化发生在衍射光强为零的点附近, 即奇点一侧光谱发生红移, 奇点另一侧光谱发生蓝移, 而在奇点处光谱则发生了红移和蓝移之间快速的转变。

关键词 物理光学; 衍射; 光谱奇异; 光谱开关; 环形光阑; 近场

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200929s1.0277

Spectral Anomalies of the Polychromatic, Spatially Coherent Light Diffracted by an Annular Aperture in the Near Field

Fu Xiaoming¹ You Rongyi¹ Huang Xiaojing¹ Pu Jixiong²

¹Physical Department, College of Science, Jimei University, Xiamen, Fujian 361021, China
²College of Information Science and Engineering, Institute of Optics and Photonics,
Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China

Abstract The spectral behavior of polychromatic spatially fully coherent light diffracted by an annular aperture in near field is studied in this paper basing on the research of it in the far field. Detailed numerical calculation results are presented and illustrated. It is shown that the spectrum in the near field is generally different from that at the aperture. It is proportional to the spectrum at the aperture and a spectral modifier which depends on the central obstruction ratio ϵ , the distance z between the aperture and the observe point and the distance r of the observe point to the z axes. With the increase of the central obstruction ratio ϵ , the spectrum of near field translates into far field gradually. Detailed numerical calculation results indicate that significant spectral changes take place in the vicinity of intensity zeros (These corresponding points are singularities), i. e., the spectrum is red-shifted at the side of the singularities, blue-shifted at the other side of the singularities and exhibits a rapid transition at the positions of the singularities between them.

Key words physical optics; diffraction; spectral anomaly; spectral switch; annular aperture; near field

1 引 言

自从 1986 年 Wolf 教授首次发现光传输时发生的光谱变化现象以来^[1], 许多研究者对光在自由空间和经过光阑传输时的光谱作了比较深入的研究^[2~7]。研究结果表明: 即使在自由空间, 光经过光阑时也能引起显著的光谱变化。当衍射场的光谱峰值频率比入射光谱峰值频率小时称为“红移”, 反之, 称为“蓝移”。这种现象称为“Wolf 效应”, 或“Wolf 位移”。理论研究结果还表明, 在聚焦光场或衍射场

中的某些点, 光谱位移发生快速变化, 这种光谱位移的快速变化被定义为“光谱开关”, 国内外学者从理论上和实验上都对光谱开关现象进行了深入的研究^[2~7]。

近几年, 振幅等于零的点附近的波场结构受到了大量的关注。因为在这些点的附近, 波场的相位是异常的, 呈现出了相当复杂的结构, 如相位位错和光学漩涡等。对于相位奇点现象的研究已经逐渐发展成物理光学一门新的分支, 有时称之为奇点光学。

至今为止,对奇点光学的大多数研究工作都假定入射光是单色波,对于多色波入射情况下光学奇点的研究却很少。Wolf 教授和他的同事们指出了在多色空间相干会聚球面波焦点区域振幅等于零的点附近也会发生剧烈的光谱变化。在经过圆形光阑的近场的夫琅禾费衍射^[8]和杨氏双缝干涉实验中也发生了类似的剧烈的光谱变化。本文进一步研究了多色空间相干波经过环形光阑衍射后近场的光谱变化情况,详细讨论了环形光阑参数改变对光谱变化的影响。

2 理论模型

如图 1 所示,假定有一束多色的空间完全相干

平面光 $E(\mathbf{r}', \omega)$ [设 $E(\mathbf{r}', \omega) = A(\omega)$] 入射到 $z=0$ 平面上—内径为 b 外径为 a 的环形光阑上的 P 点,其光谱密度函数可以表示为

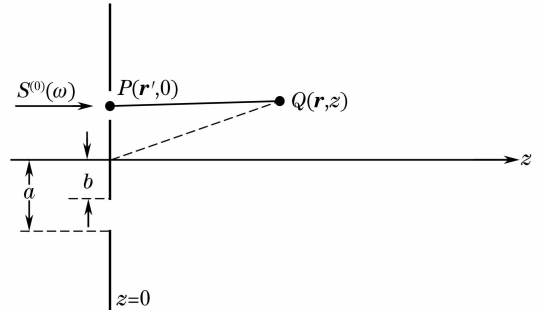


图 1 光束通过光阑的几何图示

Fig. 1 Notation relating to the aperture geometry

$$W^{(0)}(\mathbf{r}', z=0, \omega) = E^*(P)E(P) = E^*(\mathbf{r}', \omega)E(\mathbf{r}', \omega) = A^*(\omega)A(\omega) = S^{(0)}(\omega), \quad (1)$$

式中 \mathbf{r}' 是 $z=0$ 平面上 P 点的位置矢量, $S^{(0)}(\omega)$ 是光阑处的原光谱; ω 是角频率; 星号是复数共轭的标记。

根据柯林公式^[9], 我们可以得到 Q 点的光场分布如下

$$E(\mathbf{r}, \varphi, z, \omega) = -\frac{ik}{2\pi z} \exp(ikz) \iint_0^{a, 2\pi} E(P) \exp\left\{\frac{ik}{2z}[\mathbf{r}^2 + \mathbf{r}'^2 - 2\mathbf{r}' \cdot \mathbf{r} \cos(\varphi' - \varphi)]\right\} \mathbf{r}' d\mathbf{r}' d\varphi', \quad (2)$$

式中波矢 $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$, 与角频率 ω 有关。 P 点和 Q 点分别用柱坐标 $(\mathbf{r}', \varphi', 0)$ 和 (\mathbf{r}, φ, z) 表示。

于是有 Q 点的光谱密度函数

$$S(\mathbf{r}, z, \omega) = E^*(\mathbf{r}, \varphi, z, \omega)E(\mathbf{r}, \varphi, z, \omega). \quad (3)$$

这样把(2)式代入(3)式并经运算, 可以得到光谱为

$$S(\rho, z, \omega) = S^{(0)}(\omega)M(\rho, z, \omega), \quad (4)$$

其中

$$M(\rho, z, \omega) = \frac{4\pi^2 \omega^2}{[z/(a^2/\lambda_0)]^2 \omega_0^2} \left\{ \left\{ \int_0^1 \left[\frac{2\pi\rho\omega}{\omega_0 z/(a^2/\lambda_0)} x \right] \cos\left[\frac{\pi\omega}{\omega_0 z/(a^2/\lambda_0)} x^2 \right] x dx \right\}^2 + \left\{ \int_0^1 \left[\frac{2\pi\rho\omega}{\omega_0 z/(a^2/\lambda_0)} x \right] \sin\left[\frac{\pi\omega}{\omega_0 z/(a^2/\lambda_0)} x^2 \right] x dx \right\}^2 \right\}. \quad (5)$$

(5)式中 $\rho = r/a$ 和 $x = r'/a$ 称为相对轴半径, $\epsilon = b/a$ ($0 \leq \epsilon < 1$) 称为环形光阑的中心拦截比, $J_0(x)$ 是第一类型的一阶贝塞尔函数。称 $M(\rho, z, \omega)$ 为光谱修正因子, 它描述了原光谱 $S^{(0)}(\omega)$ 被光阑衍射之后的变化。由(3)式~(5)式中, 容易发现经过环形光阑后, 多色的空间完全相干平面光在近场的光谱不仅与入射光光谱 $S^{(0)}(\omega)$ 有关, 而且还与光谱修正因子 $M(\theta, z, \omega)$ 有关。由(5)式可以看出光谱修正因子则取决于中心拦截比 ϵ , 轴距离 z 与相对轴半径 ρ 。

假定原光谱呈现以中心频率为 ω_0 , 带宽为 σ_0 的高斯分布, 公式描述如下

$$S^{(0)}(\omega) = S_0 \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma_0^2}\right], \quad (6)$$

式中 S_0 是一个常量。

把(6)式代入(4)式可以得到经过环形光阑后近场 Q 点的光谱表示

$$S(\rho, z, \omega) = S_0 \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma_0^2}\right] M(\rho, z, \omega). \quad (7)$$

如果入射波是单色光, 则 Q 点的光强可以表示为

$$I(Q) = S(\rho, z, \omega_0) = S_0 M(\rho, z, \omega_0). \quad (8)$$

这样就从(7)式和(8)式中得到了近场处的光谱和光强分布。

3 数值计算结果与分析

将通过数值计算来证实光谱变化和光谱奇异现象的发生。图 2(a) 给出了当中心拦截比 $\epsilon=0$ 时关于 z 和 ρ 的近场处奇点分布, 其中参数为 $\omega_0 = 1 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$, $a = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。图中暗斑中心位置点的归

一化强度值为零,因此这些点就是奇点。从图 2 可以发现当中心拦截比 $\epsilon=0$ 时,在 $0.15 \leq z/(a^2/\lambda_0) \leq 0.6, 0 \leq \rho \leq 0.3$ 的区域内,光轴上出现了三个奇点。

为了便于描述光谱变化,定义平均频率如下

$$\bar{\omega}(\rho, z) = \int \omega S(\rho, z, \omega) d\omega / \left[\int S(\rho, z, \omega) d\omega \right].$$

当平均频率 $\bar{\omega}(\rho, z) > \omega_0$ 时,称光谱是蓝移的;相反, $\bar{\omega}(\rho, z) < \omega_0$ 时,称光谱是红移的。图 2(b)画出

了相对于图 2(a)中强度奇点分布的光谱平均频率分布灰度图,其中参数为 $\omega_0 = 1 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}, \sigma_0 = 0.01 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}, a = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$,颜色越黑或者越白表示光谱分别红移或者蓝移越显著。从图 2(b)平均频率分布中可以看到,相对应于图 2(a)的奇点处都发生了光谱奇异现象,奇点一侧光谱发生红移,奇点另一侧光谱发生蓝移,而在奇点处则发生了红移和蓝移之间快速的转变,即出现了光谱开关现象。

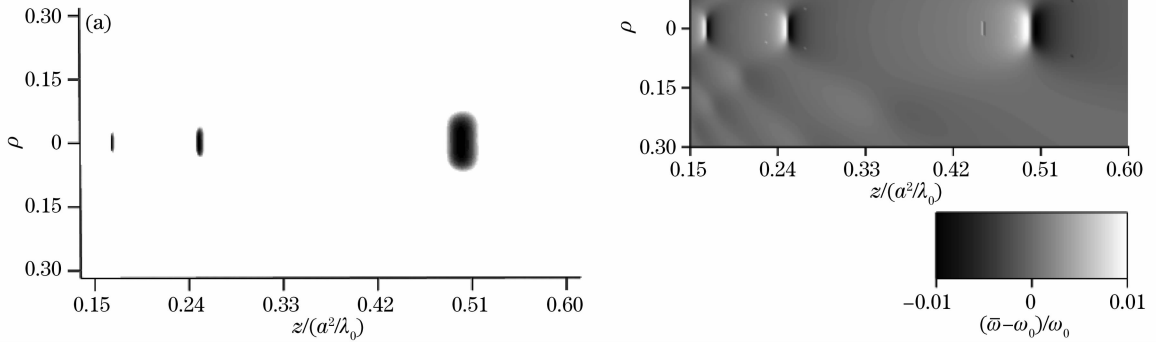


图 2 (a)当中心拦截比 $\epsilon=0$ 时关于 z 和 ρ 的近场处奇点分布,其中参数为 $\omega_0 = 1 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}, a = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$; (b)相对于图 2(a)中强度奇点分布的光谱平均频率分布灰度图,其中 $\sigma_0 = 0.01 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ 。颜色越黑或者越白表示光谱分别红移或者蓝移越显著

Fig. 2 (a) Singularity distribution in the diffraction region of z, ρ with $\epsilon=0$ for $\omega_0 = 1 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ and $a = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$; (b) monochrome plot of the mean frequency $\bar{\omega}$ of the spectrum with $\sigma_0 = 0.01 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ corresponding to the singularity distribution in Fig. 2(a). The color is more black or white as the spectrum is more red shifted or blue shifted, respectively

为了进一步研究中心拦截比对近场处强度分布以及光谱变化的影响,从图 3 到图 10 我们分别画出了当 ϵ 等于 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.6, 0.8, 0.9 时的奇点分布以及相对应的平均频率分布情况,其他参数同图 2。

从图 3 中可以看到轴外点处也出现了奇点,并且奇点处发生了光谱奇异现象。随着中心拦截比的逐渐增大,轴上奇点慢慢向光阑处移动。从图 4 中我们可以看到轴上只剩下两个奇点,已经有一个奇点移出我们的观察范围 $0.15 \leq z/(a^2/\lambda_0) \leq 0.6$ 。

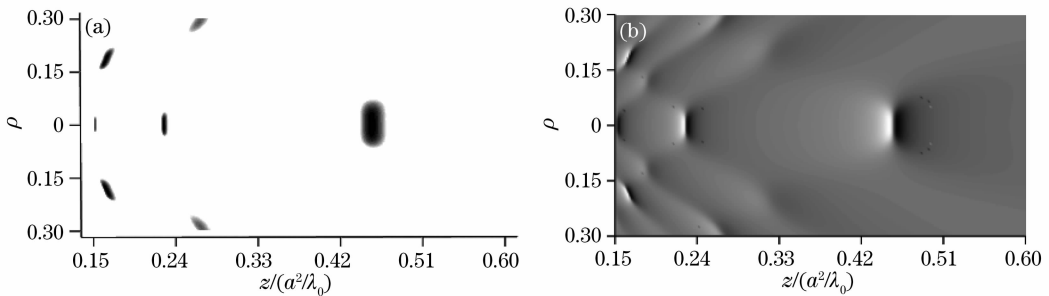


图 3 当中心拦截比 $\epsilon=0.3$ 时的奇点分布以及平均频率分布,其他参数同图 2

Fig. 3 Singularity distributions and monochrome plot of the mean frequency $\bar{\omega}$ in the diffraction region of z, ρ with $\epsilon=0.3$. The other calculation parameters are the same as those in Fig. 2

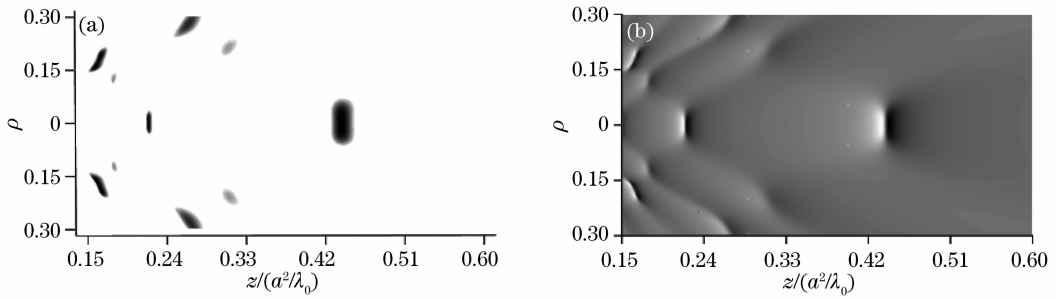


图 4 当中心拦截比 $\epsilon=0.35$ 时的奇点分布以及平均频率分布,其他参数同图 2

Fig. 4 Singularity distributions and monochrome plot of the mean frequency $\bar{\omega}$ in the diffraction region of z, ρ with $\epsilon=0.35$. The other calculation parameters are the same as those in Fig. 2

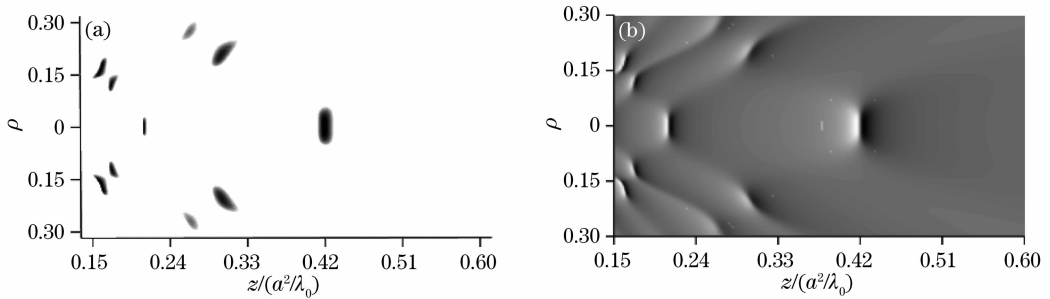


图 5 当中心拦截比 $\epsilon=0.4$ 时的奇点分布以及平均频率分布,其他参数同图 2

Fig. 5 Singularity distributions and monochrome plot of the mean frequency $\bar{\omega}$ in the diffraction region of z, ρ with $\epsilon=0.4$. The other calculation parameters are the same as those in Fig. 2

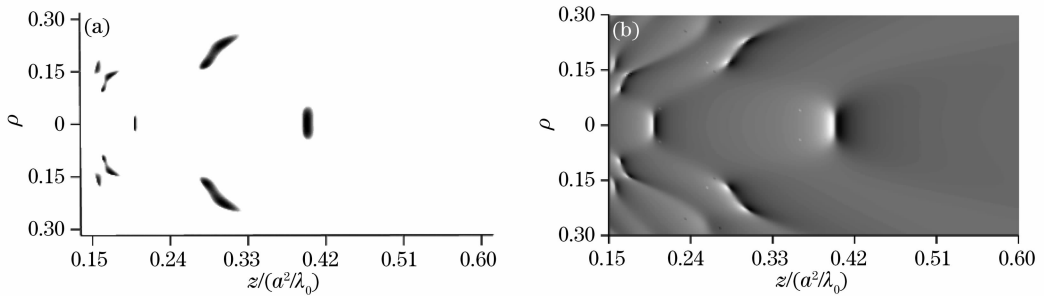


图 6 当中心拦截比 $\epsilon=0.45$ 时的奇点分布以及平均频率分布,其他参数同图 2

Fig. 6 Singularity distributions and monochrome plot of the mean frequency $\bar{\omega}$ in the diffraction region of z, ρ with $\epsilon=0.45$. The other calculation parameters are the same as those in Fig. 2

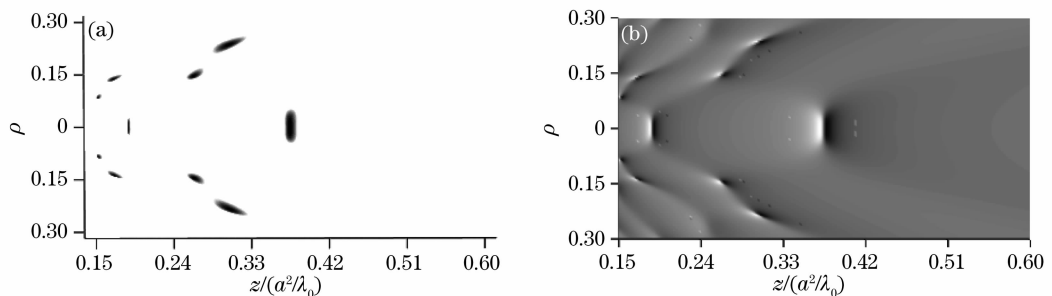


图 7 当中心拦截比 $\epsilon=0.5$ 时的奇点分布以及平均频率分布,其他参数同图 2

Fig. 7 Singularity distributions and monochrome plot of the mean frequency $\bar{\omega}$ in the diffraction region of z, ρ with $\epsilon=0.5$. The other calculation parameters are the same as those in Fig. 2

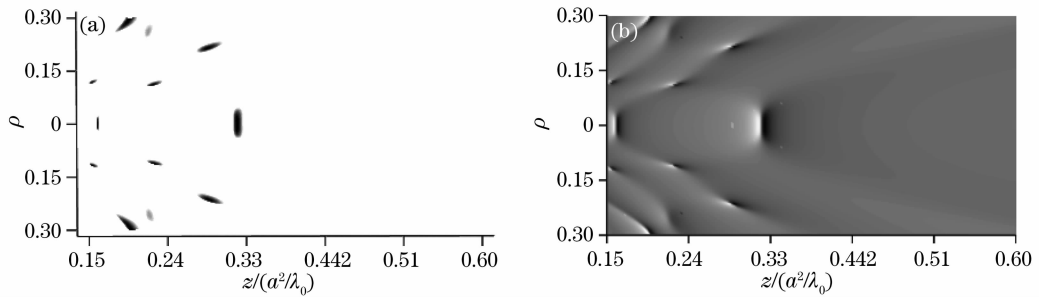


图 8 当中心拦截比 $\epsilon=0.6$ 时的奇点分布以及平均频率分布,其他参数同图 2

Fig. 8 Singularity distributions and monochrome plot of the mean frequency $\bar{\omega}$ in the diffraction region of z, ρ with $\epsilon=0.6$. The other calculation parameters are the same as those in Fig. 2

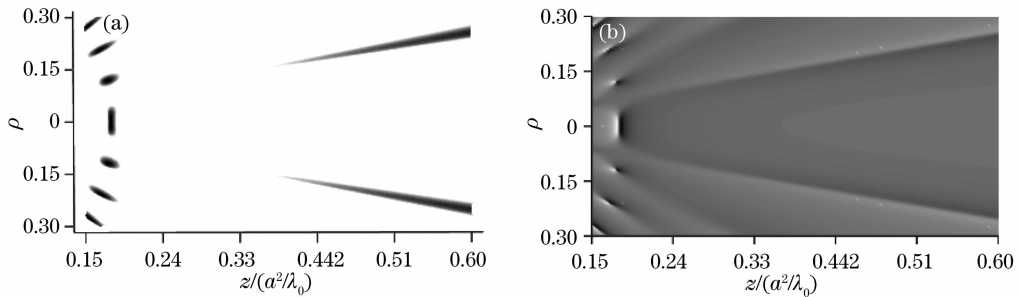


图 9 当中心拦截比 $\epsilon=0.8$ 时的奇点分布以及平均频率分布,其他参数同图 2

Fig. 9 Singularity distributions and monochrome plot of the mean frequency $\bar{\omega}$ in the diffraction region of z, ρ with $\epsilon=0.8$. The other calculation parameters are the same as those in Fig. 2

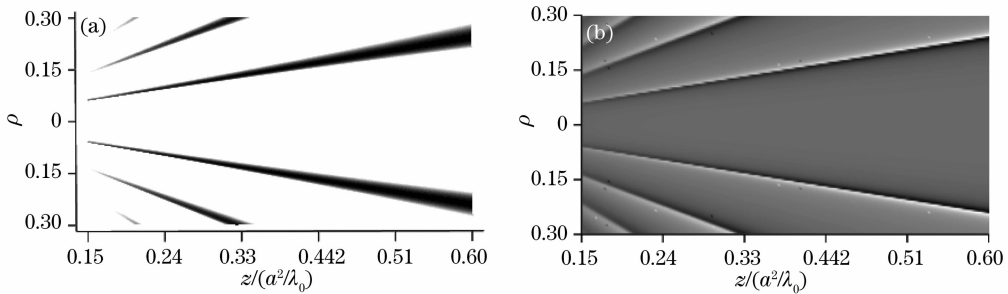


图 10 当中心拦截比 $\epsilon=0.9$ 时的奇点分布以及平均频率分布,其他参数同图 2

Fig. 10 Singularity distributions and monochrome plot of the mean frequency $\bar{\omega}$ in the diffraction region of z, ρ with $\epsilon=0.9$. The other calculation parameters are the same as those in Fig. 2

从图 5 到图 8 可以发现轴外有新奇点产生,并随着中心拦截比的增大而发生分裂。当中心拦截比 ϵ 增大到 0.8 时 $0.15 \leq z/(a^2/\lambda_0) \leq 0.6$ 内轴上只剩下一个奇点,如图 9 所示,随着中心拦截比的增大,近场逐渐表现出远场的特性。而当中心拦截比 $\epsilon=0.9$ 时,如图 10,轴上奇点全部移出观察区域,此时近场区域已经表现为远场的特性,奇点连成一条线,当中心拦截比确定时,发生光谱奇异的地方只与角度有关^[10]。

4 结 论

本文详细讨论了多色空间完全相干平面光束经

过环形光阑衍射之后在近场表现出的光谱奇异现象。结果表明在近场振幅等于零的点附近,光谱发生了变化。在奇点一侧光谱出现了红移,在另一侧光谱出现了蓝移,而在奇点处光谱位移出现了快速的变化,即发生了光谱开关现象。研究显示,中心拦截比 ϵ 对多色空间完全相干光束的近场光谱变化有很大影响。中心拦截比 ϵ 不同,近场处强度的奇点分布以及光谱的平均频率分布均发生改变,并且随着中心拦截比的增大,近场逐渐过渡到远场。研究证明,多色空间完全相干光束不论是经过圆形光阑衍射还是经过环形光阑衍射,不论是近场还是远场都会发生光谱开关现象。最近, H. C. Kandpal

等^[11,12]对光谱开关进行了一些实验研究,证明了光经过光阑的衍射之后会出现光谱开关现象。光谱开关已经显示了一些在光学互连和通信领域的潜在应用价值^[13,14]。但是在真正实现实际应用之前还必需解决几个关键的技术难题^[15]。

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 Soskin M S, Vasnetsov M V. Singular optics[J]. *Prog. Opt.*, 2001, **42**: 220~276
- 3 Gbur G, Visser T D, Wolf E. Anomalous behavior of spectra near phase singularities of focused wave[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(1): 013901
- 4 Gbur G, Visser T D, Wolf E. Singular behavior of the spectrum in the neighborhood of focus[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(8): 1694~1700
- 5 Ponomarenko S A, Wolf E. Spectral anomalies in a Fraunhofer diffraction pattern[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(14): 1211~1213
- 6 Foley J T, Wolf E. Phenomenon of spectral switches as a new effect in singular optics with polychromatic light[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(12): 2510~2516
- 7 Pu J, Zhang H, Nemoto S. Spectral shifts and spectral switches of partially coherent light passing through an aperture[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **162**(1~3): 57~63
- 8 Lü B, Pan I. Spectral changes of diffracted polychromatic Gaussian beams in the far field[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2004, **36**(6): 501~506
- 9 Collins S. A. . Lens-system diffraction integral written in terms of matrix optics[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **60**(9): 1168~1177
- 10 Hu X, Pu J. Spectral anomalies of polychromatic, spatially coherent light diffracted by an annular aperture in the far field[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(7): 418~421
- 11 Kandpal H C. Experimental observation of the phenomenon of spectral switch[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2001, **3**(4): 296~299
- 12 Suman Anand, H C Kandpal. Experimental study of spectral anomalies in a Fraunhofer diffraction pattern[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2004, **6**(2): 177~179
- 13 Wolf E, Shirai T, Chen H *et al.*. Coherence filters and their uses I. Basic theory and examples[J]. *J. Mod. Opt.*, 1997, **44**(7): 1345~1353
- 14 Shirai T, Wolf E, Chen H *et al.*. Coherence filters and their uses II. One-dimensional realizations [J]. *J. Mod. Opt.*, 1998, **45**(4): 799~816
- 15 Pu J, Nemoto S. Spectral changes and $1 \times N$ spectral switches in the diffraction of partially coherent light by an aperture[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(2): 339~344