

文章编号: 0253-2239(2009)03-0772-06

# C<sub>60</sub> 掺杂向列相液晶薄膜的激光诱导自衍射现象研究

任常愚<sup>1,3</sup> 孙秀冬<sup>1</sup> 刘正君<sup>2</sup> 裴延波<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 哈尔滨工业大学 物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001; <sup>2</sup> 哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001)  
<sup>3</sup> 黑龙江科技学院 数理系, 黑龙江 哈尔滨 150027)

**摘要** 利用 Kirchhoff-Fraunhofer 衍射积分原理研究了实验中观察到的 C<sub>60</sub> 掺杂垂直排列向列相液晶(5CB)液晶薄膜的远场衍射图样。模拟计算结果表明: 实验中观察到的衍射圆环是不同实验参数的结果, 并给出了确定衍射圆环结构的主要参数 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub>。当 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 的符号相同时, 远场会出现中心强度最大, 向外逐渐减弱, 分布尺度较小的细衍射环; 当 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 的符号相反时, 远场会出现中央较暗, 向外逐渐增强, 分布尺度较大的粗衍射环。衍射圆环的产生可由高斯光束通过非线性样品是引起附加相位的自相位调制现象来解释。将使液晶材料应用于光限幅等光子学领域。

**关键词** 非线性光学; 自衍射; 向列相液晶; 自相位调制; 高斯光束

中图分类号 O753+.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092903.0772

## Investigation of Self-Diffraction Effect in C<sub>60</sub>-Doped Nematic Liquid Crystals Induced by Gaussian Beam

Ren Changyu<sup>1,3</sup> Sun Xiudong<sup>1</sup> Liu Zhengjun<sup>2</sup> Pei Yanbo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

<sup>2</sup> Department of Automation Measurement and Control Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

<sup>3</sup> Department of Mathematics and Mechanics, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150027, China

**Abstract** Based on the Kirchhoff-Fraunhofer diffraction integral, a theoretical study, with reference to experimental results, of transverse self-phase modulation effects in the transmission of a laser beam through a homeotropic C<sub>60</sub>-doped nematic liquid crystal (5CB) cell was presented. Two different type of concentric diffraction rings were observed in the far field. The simulation results show that, the diffraction rings were determined by the two factors of C<sub>1</sub> and C<sub>2</sub>. When the sign of C<sub>1</sub> is identical to that of the C<sub>2</sub>, the pattern in the far field is a series of thin, narrow diffraction rings with a central bright spot. When the sign of C<sub>1</sub> is opposite to that of the C<sub>2</sub>, the thick diffraction ring pattern with central dark spot and the large distribution range will emerge in the far-field plane. The phenomenon is attributed to the spatial self-phase modulation caused by the refractive index change of the medium when the Gaussian beam passes through the sample. The results show that the theoretical analysis is consistent with the observed experimental phenomena, which is significant in the applications of practical nonlinear optical limiters for the eye or sensor protection.

**Key words** nonlinear optics; self-diffraction; nematic liquid crystals; self-phase modulation; Gaussian beam

## 1 引言

高斯光束通过非线性介质时, 在远场可形成同

心圆环光强分布图样。向列相液晶具有很强的光学各向异性, 是很好的非线性光学材料, 因此在光电场

收稿日期: 2008-05-23; 收到修改稿日期: 2008-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(90201003)和黑龙江省教育厅科学技术研究项目(11531330)资助课题。

作者简介: 任常愚(1963—), 男, 教授, 博士研究生, 主要从事液晶材料光学信息处理方面的研究。

E-mail: cyren@hit.edu.cn

导师简介: 孙秀冬(1963—), 女, 博导, 教授, 主要从事光学信息处理方面的研究。E-mail: oip@hit.edu.cn (通信联系人)。

作用下能够产生各种光学非线性现象。1980年, A. S. Zolot'ko<sup>[1]</sup>首先报道了会聚光束通过向列相液晶膜时在观察屏上形成同心圆环图样。1981年, S. D. Durbin<sup>[2]</sup>发现对于垂直排列的向列相液晶(5CB)膜, 当垂直入射光束的光强超过某一特定值时, 在远场观察屏上可看到同心的光强衍射圆环, 并对圆环的形成、数量以及最大衍射角等给出了定性的解释, 认为这是一种空间自相位调制现象(spatial self-phase modulation, SPM)。实验中观察到的 SPM 现象大多是光束自衍射形成的一系列同心圆环, 不同之处在于同心圆环的中心位置处有亮斑和暗斑之分, 且中心亮斑的圆环较细; 中心暗斑的圆环相对较粗。E. Santamato 和 F. Bloisi 等<sup>[3, 4]</sup>用 Kirchhoff-Fraunhofer 衍射积分方法详细解释了这种现象, 认为圆环是由光束叠加产生的自衍射现象, 并讨论了场曲效应以及非线性相移等参数对环结构的影响。在这之后不断有人从不同的实验条件, 提出不同的物理机制对这种现象从实验和理论上进行研究<sup>[5~8]</sup>。对于高斯光束通过圆孔的衍射现象在理论和实验上已有分析和讨论<sup>[9~11]</sup>。但由于 SPM 的自衍射现象与许多参数有关, 高斯光束通过非线性介质时衍射图样的形成主要考虑的是波前曲率和非线性相移的影响<sup>[12~14]</sup>, 从实验上详细研究衍射圆环的结构比较困难。利用 Kirchhoff-Fraunhofer 衍射积分原理, 通过数值模拟对衍射圆环的结构进行分析。模拟计算结果表明: 样品的位置、波前曲率和附加相移对衍射圆环的结构都会产生影响。衍射圆环的结构的变化也是透射光能量分布的改变, 在光开关, 光限幅等光子学领域具有应用价值。

## 2 实 验

实验所用材料为  $C_{60}$  掺杂(质量分数 $\sim 0.05\%$ )的向列相液晶 4-cyano-4'-n-pentylbiphenyl (5CB), 5CB 为光学正型的液晶, 即  $\Delta n = n_e - n_o > 0$ 。二者均为美国 Sigma-Aldrich 公司的产品, 样品薄膜是厚度为  $d = 20 \mu\text{m}$  的液晶盒。实验时所用液晶盒的玻璃窗涂有透明电极 ITO(indium tin oxide), 经过表面取向剂 HTAB(hexadecyl trimethyl ammonium bromide)处理之后使液晶分子垂面排列。

实验装置如图 1 所示, 其中  $w_0$  为束腰半径; S 为衍射图样观察屏; R 为光束波前曲率半径。所用的光源为波长 632.8 nm 线偏振的 He-Ne 激光, 通过半波片(HWP)可以改变光束的偏振方向, 光束束

腰半径  $w_0 \approx 1.0 \text{ mm}$ 。观察屏放置在距离样品大约 2~3 m 远的地方用于观察衍射图样。

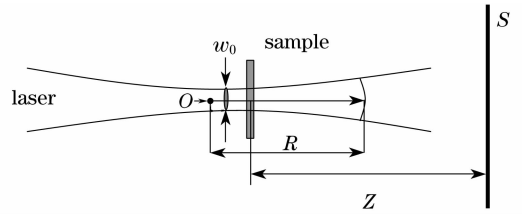


图 1 自相位调制实验示意图

Fig. 1 Experimental setup for self-phase modulation

功率达到一定阈值(5 mW)的线偏振光束光束通过样品之后, 出射光在远场观察屏上表现出自衍射现象, 并出现一组同心衍射圆环。但衍射环的形状随着样品所处位置的不同, 一般显示出两种完全不同的结构。当样品位于原点(O)后某一位置时( $R > 0$ ), 通过样品的光束为发散光束, 这时产生了中心强度最大、向外逐渐减弱、分布尺度较小的细衍射环, 如图 2(a)所示。样品向原点移动时, 细衍射环逐渐变得模糊并消失, 中心光强逐渐增强。当样品非常靠近原点时, 样品在原点两侧时基本观察不到衍射图样, 只有中心亮斑, 光强有不易察觉到的增强。当样品位于原点前面某一位置时( $R < 0$ ), 通过样品的光束为会聚光束, 这时产生了中心强度较弱、向外逐渐增强、分布尺度较大的粗衍射环, 如图 2(b)所示。

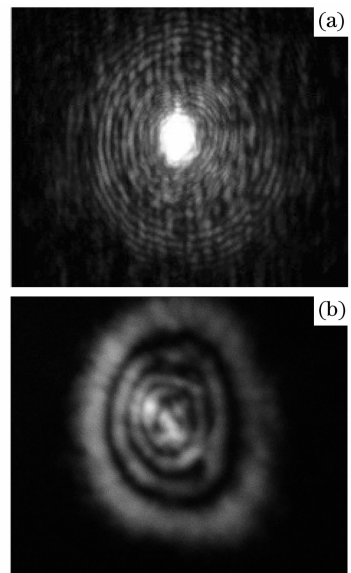


图 2 高斯光束通过样品时的远场衍射图样。(a) 细圆环; (b) 粗圆环

Fig. 2 Patterns in the far field after the Gaussian beam passes through the film. (a) thin diffraction ring; (b) thick diffraction ring

### 3 理论模拟与结果

当高斯光束通过非线性薄膜样品时可认为在光照射区域是一园孔,当光束通过这种园孔时光波位相的改变在横截面上存在空间分布,结果是使光束的波阵面发生了畸变,与波阵面垂直方向传播光线的位相差远大于  $2\pi$  时,光束输出远场的截面强度分布将是围绕中心的明暗相间的圆环,这就是空间自相位调制现象。

设 TEM<sub>00</sub> 模线偏振高斯光束沿  $z$  轴方向传播通过非线性介质,束腰取为坐标原点,样品入射面位于  $z$  处,  $\rho$  表示光束横截面内任一点到轴心的距离,则样品入射面一点  $(\rho, z)$  处的光场振幅可表示为

$$E(\rho, z) = E(o, z) \exp(-\rho^2/\omega_z^2) \exp(-ik\rho^2/2R), \quad (1)$$

式中  $z$  为介质入射面距原点的距离,  $E(o, z)$  为介质入射面处光斑中心的电场强度;  $\rho$  为径向坐标,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $R$  为介质入射面处光束波前曲率半径,  $\omega_z$  为介质入射面处的光斑半径:

$$\omega_z = \omega_0 \sqrt{1 + z^2/z_0^2} \quad (2)$$

其中  $z_0 = \pi\omega_0^2/\lambda$  为高斯光束的共焦参数。

由于非线性介质的强光吸收和三阶非线性光学效应,当高斯光束作用于其上时会在介质中光作用区域产生与光强成正比的附加折射率分布  $\Delta n(z, \rho)$ , 当波长为  $\lambda$  的光束通过厚度为  $d$  的样品时,光在样品出射面处产生的横向附加相移分布可以表示为

$$\Delta\phi_{NL}(\rho) = 2\pi/\lambda \int_z^{z+d} \Delta n(z, \rho) dz \quad (3)$$

当样品为薄样品时,即  $d \ll z_0$  时,(3)式简化为

$$\Delta\phi_{NL}(\rho) \approx \Delta\phi_0 \exp\left(-\frac{2\rho^2}{\omega_z^2}\right) \quad (4)$$

式中  $\Delta\phi_0$  是与光强有关的最大附加相移。考虑薄样品情况,忽略非线性吸收,利用 Kirchhoff-Fraunhofer 衍射积分原理,高斯光束通过液晶薄膜产生自衍射现象时,在距离样品为  $Z$  的观察屏上的衍射光强分布为<sup>[5]</sup>

$$I(r_1, Z) = (2\pi/\lambda Z)^2 I_0 \left| \int_0^\infty J_0(2\pi\rho r_1/\lambda Z) \rho d\rho \times \exp(-\rho^2/\omega_z^2) \exp[-i(\phi_D + \phi_{NL})] \right|^2, \quad (6)$$

$\phi_D(r)$  和  $\phi_{NL}(r)$  分别为衍射相位和非线性相位

$$\phi_D = k\rho^2(1/Z + 1/R)/2, \quad (7)$$

$$\phi_{NL}(\rho) = (2\pi/\lambda)\bar{n}_2 dI(r) = \Delta\phi_0 \exp(-2\rho^2/\omega_z^2), \quad (8)$$

这里,  $\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$  表示入射面上径向极坐标;  $r_1 = (x_1^2 + y_1^2)^{1/2}$  为衍射图样上点源几何像径向极坐标,  $J_0$  是第一类零阶 Bessel 函数。  $\bar{n}_2$  是三阶非线

性折射率系数。由(6)式可知衍射图样应为一组同心圆环,这就是进行数值计算的公式。

虽然实验中的样品(5CB)为光学正型材料即  $\Delta\phi_0 > 0$  (自聚焦介质),但对于  $\Delta\phi_0 < 0$  (自散焦介质)的情形也可通过(6)式加以讨论。有些文献研究了  $\Delta\phi_0$  和  $R$  的符号对圆环结构的影响<sup>[9~11]</sup>, 并认为:两者异号时,即发散高斯光束通过自散焦介质或会聚高斯光束通过自聚焦介质时,远场出现中心为暗斑的尺度大的粗衍射圆环;两者同号时,即发散高斯光束通过自聚焦介质或会聚高斯光束通过自散焦介质情况时,远场出现中间为亮斑的尺度小的细衍射圆环。实验发现,既使  $\Delta\phi_0$  和  $z$ (或者  $R$ )的符号确定,观察屏的位置发生改变,衍射环的结构也会发生变化。因此分析时观察屏的位置的参数  $Z$  也应当考虑。从(6)式可知决定衍射圆环的形成主要是衍射相位  $\phi_D(r)$  和非线性相位  $\phi_{NL}(r)$ , 因此从  $\phi_D(r)$  和  $\phi_{NL}(r)$  的关系来分析衍射圆环的结构将会更全面。

设  $C_1 = (1/Z + 1/R)$ ;  $C_2 = \Delta\phi_0 = (2\pi/\lambda)\bar{n}_2 dI(r)$ , 模拟计算时,  $Z = 3.0$  m,  $\omega_0 = 1.0$  mm,  $\lambda = 632.8$  nm。分以下几种情况进行分析:

(1)  $C_1 > 0, C_2 > 0$

图 3,图 4 是  $C_1 > 0$  时,不同  $C_2$  情况下远场光强分布的模拟计算结果。以下各图中(a), (b), (c)的说明均相同。图(a)是观察屏上截面光强分布,图(b)是计算模拟的接收屏处光强的径向分布,横坐标  $r_1$  表示远场观察屏截面径向坐标,纵坐标表示归一化光强,图(c)为接收屏处光强三维分布图。在图 3,图 4 中,峰值非线性相位  $\Delta\phi_0$  的取值分别为  $4\pi$  和  $6\pi$ ,  $C_1$  取值为 0.3667。

模拟结果显示:衍射图样是中心亮斑的同心圆环,且圆环较细。中心的强度最大,越往外围强度越小,但不是依次递减;随着  $C_2$  绝对值的增大,衍射圆环的数量在增加,其规律是,环数等于  $C_2/\pi$ ,由内向外环间间隙增大,衍射图样的分布范围也随着  $C_2$  的增大而扩大,中心亮斑的强度略有降低,但范围没有明显变化。

由  $C_1$  的关系式可知  $C_1 > 0$  并非必须  $R > 0$ ,在  $R < 0$  的情况下也可能得出  $C_1 > 0$ 。即会聚高斯光束通过自聚焦介质时,远场也可出现中间为亮斑的尺度较小的细衍射圆环。

(2)  $C_1 < 0, C_2 > 0$

图 5,图 6 是  $C_1 < 0$  ( $-0.1667$ )时,峰值非线性相位  $\Delta\phi_0$  的取值分别为  $4\pi$  和  $6\pi$  情况下远场光强分

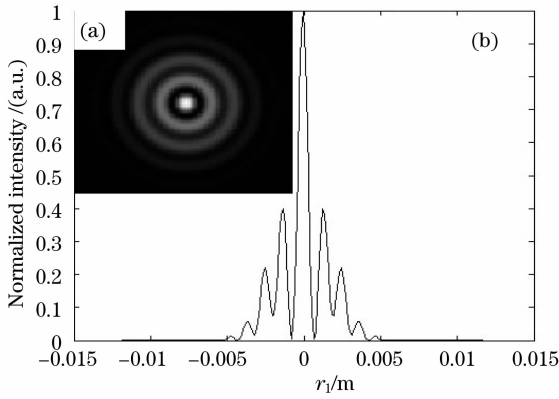


图 3 高斯光束通过样品时的远场衍射图样和光强分布。  $C_1 = 0.3667, \Delta\phi_0 = 4\pi$

Fig. 3 Pattern and intensity distribution in the far field after the Gaussian beam passes through the film.

$$C_1 = 0.3667, \Delta\phi_0 = 4\pi$$

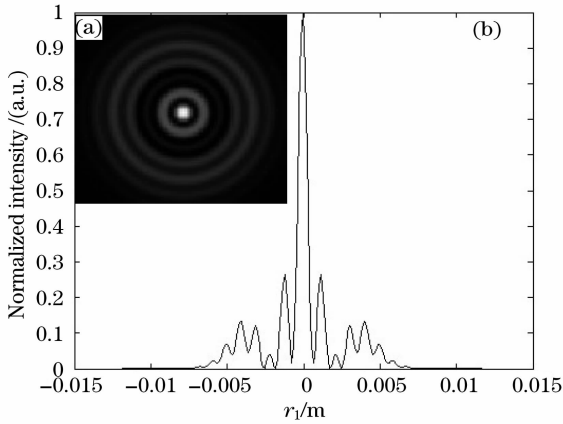
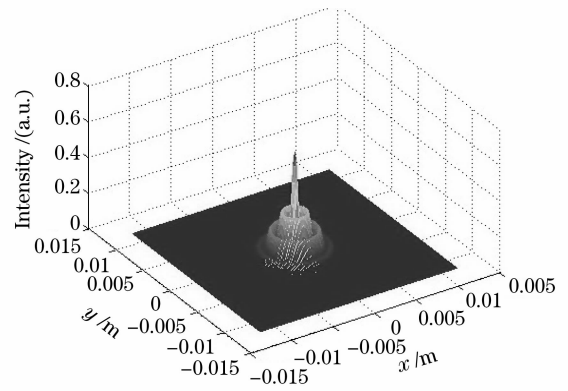
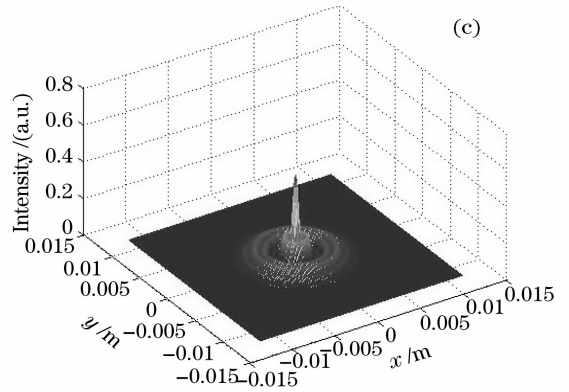


图 4 高斯光束通过样品时的远场衍射图样和光强分布。  $C_1 = 0.3667, \Delta\phi_0 = 6\pi$ 。

Fig. 4 Pattern and intensity distribution in the far field after the Gaussian beam passes through the film.

$$C_1 = 0.3667, \Delta\phi_0 = 6\pi.$$



布的模拟计算结果。从图中可以看到:横坐标中心附近为“暗斑”,其强度约为光场峰值强度的 20%,“暗斑”的外围有亮环且相对较粗,越往外围强度越大;随着  $C_2$  绝对值的增大,衍射圆环的数量也随之

增加,圆环的数量等于  $C_2 / 2\pi$ ,与文献[2]的结果相同。由内向外环间间隙增大,衍射图样的分布范围也随着  $C_2$  的增大而扩大,中心“暗斑”的强度略有降低,但范围没有明显变化。

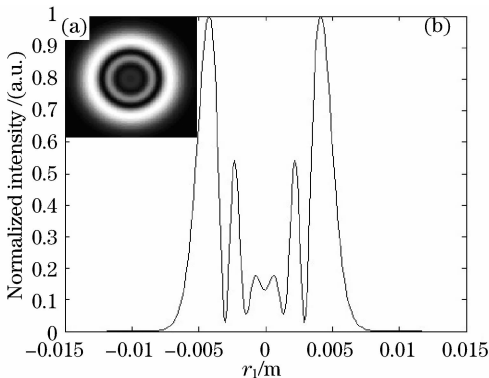
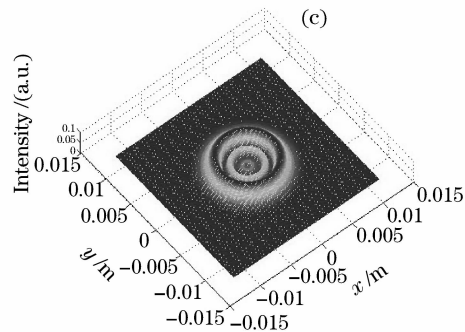


图 5 高斯光束通过样品时的远场衍射图样和光强分布。  $C_1 = -0.1667, \Delta\phi_0 = 4\pi$ 。

Fig. 5 The pattern and intensity distribution in the far field after the Gaussian beam passes through the film.

$$C_1 = -0.1667, \Delta\phi_0 = 4\pi.$$



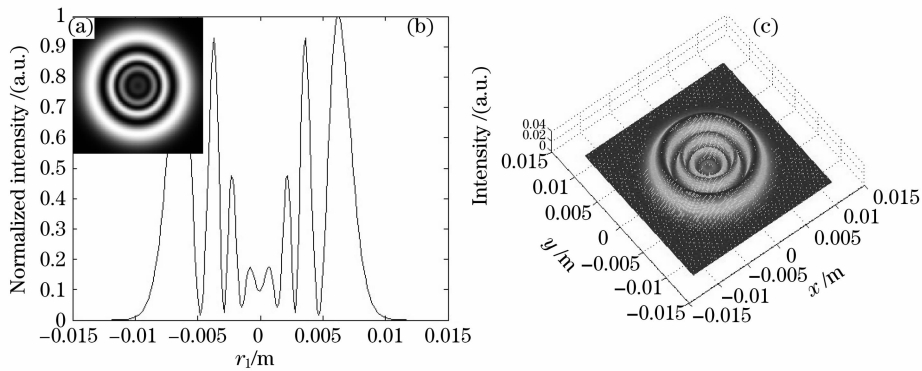


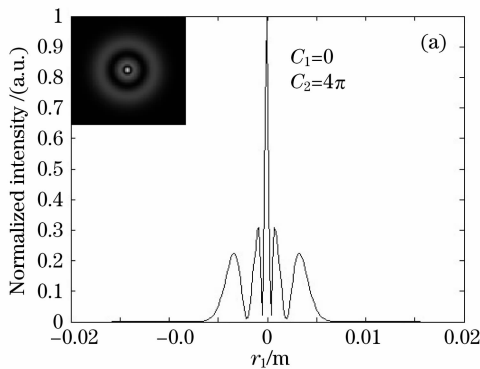
图 6 高斯光束通过样品时的远场衍射图样和光强分布。 $C_1 = -0.1667$ ,  $\Delta\phi_0 = 6\pi$ 。

Fig. 6 The pattern and intensity distribution in the far field after the Gaussian beam passes through the film.

$$C_1 = -0.1667, \Delta\phi_0 = 6\pi.$$

(3)  $C_1 \approx 0$ , 或  $C_2 = 0$

$C_1 \approx 0$  时, 相当于忽略波前曲率和二次相位因子的影响, 光强为高斯分布平面波通过样品, 远场衍射光强的分布由  $\Delta\phi_0$  确定, 图 7 (a) 所示。



$C_2 = 0$  时, 相当于无样品时高斯光束的传输, 无论样品在原点的哪一侧在观察屏上的相对光强径向分布应为高斯分布, 分布细节由高斯光束的参数确定, 图 7 (b) 所示。

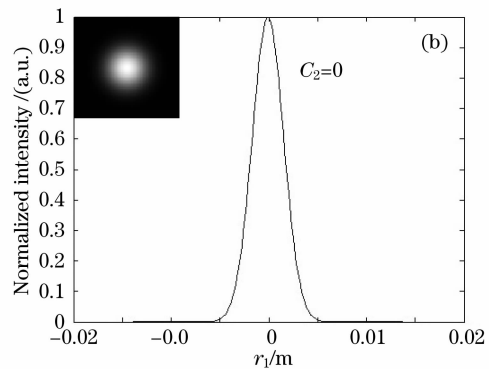


图 7  $C_1 = 0$  或  $C_2 = 0$  时高斯光束的远场衍射图样和光强分布。(a)  $C_1 = 0, C_2 = 4\pi$ ; (b)  $C_2 = 0$

Fig. 7 Pattern and intensity distribution in the far field of the Gaussian beam. (a)  $C_1 = 0, C_2 = 4\pi$ ; (b)  $C_2 = 0$

对于  $C_2 = \Delta\phi_0 < 0$  (自散焦介质) 的情形也可仿照以上情况进行讨论。 $C_1$  的符号确定之后,  $Z$  的变化不对衍射图样形状产生影响, 只改变衍射图样的强度。

## 4 结 论

当高斯光束通过非线性机制导致的折射率变化的光学材料时, 在远场处可以产生两种不同结构的衍射环。一种是中间为亮斑的尺度小的细衍射圆环, 另一种是中心为暗斑的尺度大的粗衍射圆环。利用 Kirchhoff-Fraunhofer 衍射积分原理, 通过数值模拟方法讨论了衍射圆环的结构与实验参数的关系。数值模拟发现衍射圆环的结构应根据  $C_1$  和  $C_2$  的符号确定。两者同号时, 产生细衍射环, 细衍射环的个数等于  $|C_2/\pi|$ 。产生粗衍射环的条件是  $C_1$  和  $C_2$  的符号相反, 粗衍射环的个数等于  $|C_2/2\pi|$ 。

通过观察衍射环的数量可以估计材料非线性系数的大小。要得到对比度明显的衍射圆环, 样品存在一个最佳位置, 在此位置之外, 细衍射环的对比度逐渐下降, 实验时需要仔细调整样品的位置。当样品靠近原点时, 细衍射环与粗衍射环两种情况的计算结果将趋于一致。远场衍射光强图样的变化也是透射光能量分布的改变, 将使液晶材料应用于光开关, 光限幅等光子学领域。当远场光强分布图样中心为暗斑的时候, 光限幅器的限幅效果会更好。

## 参 考 文 献

- 1 Zolot'ko A S, Kitaeva V F, Kroo N *et al.*. The effect of an optical field on the nematic phase of the liquid crystal [J]. *OCBP. JETP Lett.*, 1980, **32**(2): 158~162
- 2 Durbin S D, Arakelian S M, Shen Y R. Laser-induced diffraction rings from a nematic liquid-crystal film[J]. *Opt. Lett.*, 1981, **6**(9): 411~413
- 3 Santamato E, Shen Y R. Field-curvature effect on the diffraction

- ring pattern of a laser beam dressed by spatial self-phase modulation in a nematic film[J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(12): 564~566
- 4 Bloisi F, Vicari L, Simoni F *et al.*. Self-phase modulation in nematic liquid crystal films detailed measurements and theoretical calculations [J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1988, **5**(12): 2462~2466
- 5 Khoo I C, Finn G M, Michael R R *et al.*. Passive optical self-limiter using laser-induced axially asymmetric and symmetric transverse self-phase modulations in nematic liquid crystals [J]. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(4): 227~229
- 6 Ono H, Kawatsuki N. Self-Phase modulation induced by a He-Ne laser in host-guest liquid crystals with different nematic-isotropic transition temperatures [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, **36**(3B): 353~356
- 7 Brugioni S, Meucci R. Self-phase modulation in a nematic liquid crystal film induced by a low-power CO<sub>2</sub> laser [J]. *Optics Communications*, 2002, **206**: 445~451
- 8 Song L, Lee W K. Laser induced self-phase modulation in nematic liquid crystals and effects of applied dc electric field[J]. *Optics Communications*, 2006, **259**: 293~297
- 9 Zhou Guoquan, Ni Yongzhou, Wang Shaomin. Axial Light Intensity Characteristics of Gaussian beam diffracted by a wavelength-order circular aperture[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(4): 437~440  
周国泉, 倪涌舟, 王绍民. 高斯光束经波长级圆孔衍射的轴上光强特性[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 437~440
- 10 Teng Shuyun, Liu Liren, Wan Lingyu *et al.*. Propagation of gaussian beam limited by an aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 157~160  
滕树云, 刘立人, 万玲玉等. 孔径光阑限制下高斯光束的传[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 157~160
- 11 Liu Hongzhan, Xu Rongwei, Liu Liren *et al.*. Far-field approximation and divergence of gaussian beam with phase aberrations diffracted by a circular aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 132~135  
刘宏展, 徐荣伟, 刘立人等. 圆孔受限波差高斯光束的远场近似及发散度分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 132~135
- 12 Deng L, He K, Zhou T *et al.*. Formation and evolution of far-field diffraction patterns of divergent and convergent Gaussian beams passing through self-focusing and self-defocusing media [J]. *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.*, 2005, **7**: 409~415
- 13 Yao Baoli, Ren Liyong, Hou Xun *et al.*. Diffraction behavior of polypyrrylarylenemethine/polyvinyl film to gaussian beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1139~1143  
姚保利, 任立勇, 候洵等. 聚吡咯甲烯/聚乙烯醇薄膜对高斯光束的衍射行为[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1139~1143
- 14 He Kunna, Deng Luogen. Far-field diffraction patterns formation of gaussian beam transmitted through thin nonlinear medium[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2003, **15**(10): 940~944  
何坤娜, 邓罗根. 高斯光束通过非线性介质后的远场衍射图样的研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(10): 940~944