

文章编号: 1000-5013(2007) 03-0239-04

宽频带部分相干光经光栅衍射的光谱变化现象

郭悦韶, 渠 彪, 蒲继雄

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 研究宽频带部分相干光经过光栅衍射后的光谱变化, 探讨光谱变化与入射部分相干光的空间相干度、入射狭缝的宽度, 以及观测点的位置等关系. 结果表明, 高斯-谢尔模型(GSM) 光束经光栅衍射后, 其 ± 1 级衍射光束不同位置处的光谱将发生变化, 即有的点处光谱将发生红移, 有的点处光谱将发生蓝移, 并且衍射光束的衍射角与角频率成反比. 此外, 单缝缝宽越大, GSM 光束传播距离越长, 光谱宽度 Γ 值越大, 即光谱越宽. 最后, 从理论上给予论证.

关键词: 高斯-谢尔模型; 宽频带; 光栅; 衍射; 部分相干光

中图分类号: O 436.1

文献标识码: A

如果光源不满足定标定律, 由该光源所发出的光即使在自由空间中传播时, 其归一化光谱也将产生变化^[1], 国内外的许多学者对这种相关诱导光谱变化进行了大量的研究^[2-14]. 近年来的研究表明, 当部分相干光经光栅衍射后, 光场的归一化光谱也会发生变化. 这种由衍射效应引起的光谱变化现象, 我们称之为衍射诱导光谱变化. 光栅是一种重要的衍射光学元件, 但至今没有对部分相干光束经过光栅衍射的光谱变化的实验研究报道. 本文从实验方面研究了多色部分相干光经光栅衍射后的光谱特性, 并从理论予以论证.

1 实验装置与实验结果

图 1 为所采用的实验装置示意图, 其中实验参数: $a=0.6\text{ mm}$, $b=1.0\text{ mm}$, $L''=32.6\text{ cm}$, $L'=1.0\text{ m}$, $L=22.0\text{ cm}$, $l=2.1\text{ cm}$. 主光源 S 是一个 250 W 的宽光谱光源(卤钨灯), 其出射光光谱的中心波长为 580.0 nm , 光谱宽度为 188.0 nm . 紧靠光源 S 依次放置一个毛玻璃 D 和一个狭缝 A, 从狭缝 A 发出的光为均匀的多色部分相干光. 我们将观察面取在光栅后 $L=22.0\text{ cm}$ 位置处, 用 HR 2000 型光纤光谱仪测量衍射光场的光谱分布, 并将实验结果记录在计算机上. 设狭缝 B、光栅和观测面处的坐标分别为 x'' , x' 和 x , 坐标零点在光轴 z 上.

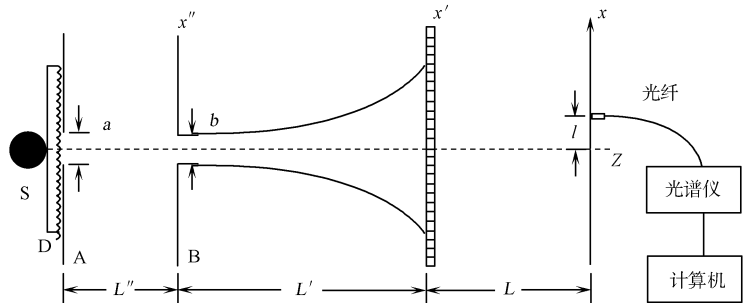


图 1 部分相干光束经过光栅衍射的实验装置示意图

Fig. 1 The experimental setup of partially coherent light diffracted by a grating

由理论分析可知^[15], 光栅对宽频带 GSM 光束光谱的影响表现在 ± 1 级衍射光束, 而 ± 1 级衍射光束是关于光轴对称的, 且光谱变化特性一样. 所以, 只说明 ± 1 级衍射光束的光谱特性即可. ± 1 级衍射光束的中心位于距离光轴 $l=2.1\text{ cm}$ 处, 取观察点相对该中心的坐标为 $\Delta x = x - l$. 图 2 中, 实线为 ± 1 级衍射光束不同 Δx 值处的归一化

收稿日期: 2006-11-25

作者简介: 郭悦韶(1967-), 男, 实验师, 主要从事光束传输方面的研究. E-mail: guoyes@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(6047704); 福建省自然科学基金资助项目(A0510018)

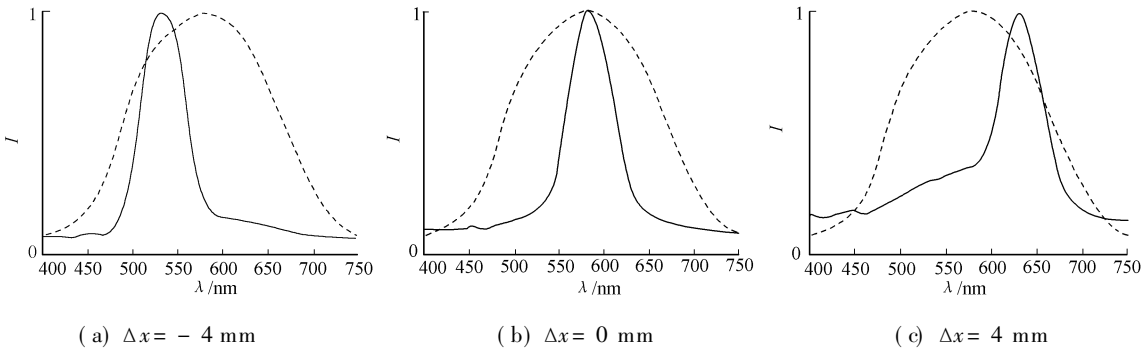


图 2 归一化光谱随观察点位置的变化

Fig. 2 The change of normalized spectrum as observation point changed

光谱(I), 虚线为光源的归一化光谱. 从图 2(a) 可知, $\Delta x = -4\text{ mm}$ 的归一化光谱, 其中心波长(λ_0)为 532.5 nm, 与源光谱相比变小了, 即光谱发生了蓝移; 从图 2(b) 可知, $\Delta x = 0$ 位置处的光谱中心波长与源光谱一致; 从图 2(c) 可知, $\Delta x = 4\text{ mm}$ 位置处的归一化光谱, 中心波长增大为 633.5 nm, 与源光谱相比, 光谱中心波长变大了, 即光谱发生了红移. 从图 2 中还可以看出, 与源光谱相比, 光谱明显变窄了. 光谱中心波长随观测位置 Δx 的变化关系, 如图 3 所示. 图 3 中, 虚线为光源光谱的中心波长(580.0 nm), 实验参数与图 2 相同. 当 $\Delta x < 0$ 时, 光谱中心波长相对源光谱变小了, 即光谱发生了蓝移; 当 $\Delta x > 0$ 时, 光谱中心波长相对源光谱变大了, 即光谱发生了红移. 从图 1 可以看出, 对于 ± 1 级衍射光束, Δx 值越小, 衍射角越小, 光谱蓝移越明显; Δx 值越大, 衍射角越大, 光谱红移越明显.

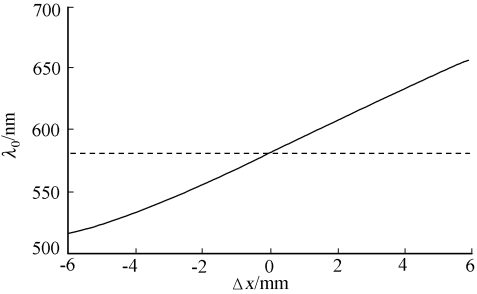


图 3 中心波长随观测位置变化的曲线图

Fig. 3 The central wavelength as a function of observation point

在其他参数不变, ± 1 级衍射光束中心位置处($\Delta x = 0$), 不同缝宽衍射光场的归一化光谱, 如图 4 所

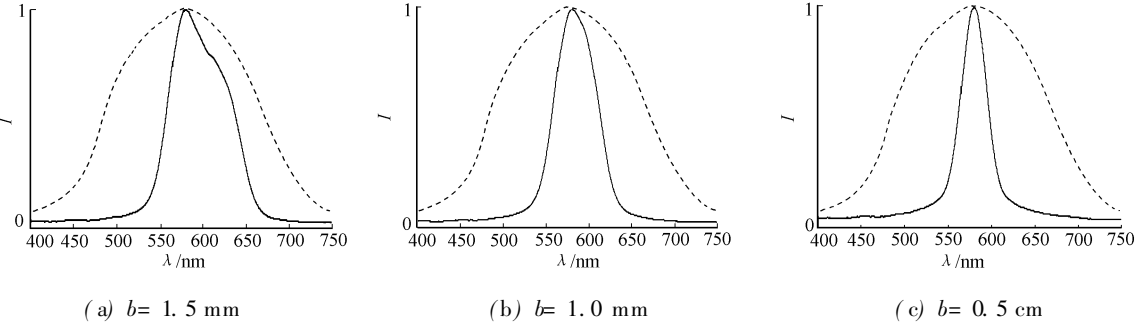


图 4 归一化光谱随缝宽的变化

Fig. 4 The change of normalized spectrum as width of the slit changed

示. 图 4 中实验参数: $L'' = 32.6\text{ cm}$, $L' = 1.0\text{ m}$, $L = 22.0\text{ cm}$, 实线为归一化光谱, 虚线为源光谱. 从图 4 可以看出, 当 $b = 1.5\text{ mm}$ 时, 光谱宽度为 84.0 nm, 与源光谱宽度相比(188.0 nm), 光谱宽度明显变小了; 当 $b = 1.0\text{ mm}$ 时, 光谱宽度减小为 64.0 nm; 当 $b = 0.5\text{ mm}$ 时, 光谱宽度进一步减小为 40.0 nm. 比较图 4(a), (b), (c) 可以看出, 光谱宽度 Γ 随着缝宽 b 的减小而减小. 改变光栅与狭缝 B 之间的距离 L' , 光谱宽度 Γ 随缝宽 b 的变化, 如图 5 所示. 从图 5 可以得出, 光栅与狭缝 B 之间的距离 L' 的距离越大, 光谱宽度值越大, 即光谱越宽. 从图 5 可看出, 当 $L' = 1.0\text{ m}$ 时, 随着缝宽 b 的减小, 光谱宽度 Γ 也随之减小.

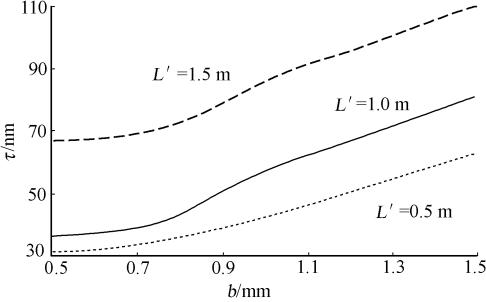


图 5 光谱宽度随缝宽变化的曲线图

Fig. 5 The width of the spectrum as a function of the slit width

2 理论分析

假设狭缝 B 处为 GSM 光束束腰位置, Z 轴原点取在狭缝 B 处, 采用多 GSM 光束分析 ± 1 级衍射光束的光谱变化. 由于本实验采用的装置为细长狭缝, 衍射光场的光谱沿长边 (Y 轴) 方向可视为不变, 因此, 只考虑光谱沿短边 (X 轴) 的变化情况. 在狭缝 B 处, 多色 GSM 光束的交叉谱密度函数可表示为

$$W_i(x''_1, x''_2, z=0, \omega) = S(\omega) \exp[-\frac{x''_1{}^2 + x''_2{}^2}{w_0^2}] \exp[-\frac{(x''_1 - x''_2)^2}{2\alpha_0^2}]. \quad (1)$$

上式中, $S(\omega)$ 为光源光谱, $\omega = kc$ 为圆频率, w_0 为束腰半径, α_0 为相关长度. GSM 光束经自由空间传输到光栅面处, 其交叉谱密度函数变为

$$W_i(x'_1, x'_2, z=L', \omega) = S(\omega) \exp[-\frac{x'_1{}^2 + x'_2{}^2}{w^2}] \exp[-\frac{(x'_1 - x'_2)^2}{2\sigma^2(L')}] \exp[-\frac{jk(x'_1{}^2 - x'_2{}^2)}{2R^2(L')}] \quad (2)$$

式(2)中, GSM 光束在 $z=L'$ 面处的束腰宽度 $w(L') = w_0[1 + (L'/Z_R)^2]^{1/2}$, 而相关长度 $\sigma(L') = \alpha_0[1 + (L'/Z_R)^2]^{1/2}$, 等相面的曲率半径 $R(L') = L'[1 + (Z_R/L')^2]$, GSM 光束的瑞利范围 $Z_R = \frac{\pi w_0^2 \beta}{\lambda}$, 空间相

关参数 $\beta = (1 + 1/\alpha^2)^{-1/2}$, GSM 光束的综合相干度 $\alpha = \frac{\alpha_0}{w_0}$. 振幅分布为正弦分布的全息光栅振幅, 表示为 $T(x') = a_0 + 2a \cos(2\pi f x') = t_0 + t_1 + t_2$. 其中, $t_0 = a_0$, $t_1 = a \exp(j2\pi f x')$, $t_2 = a \exp(-j2\pi f x')$, ($a_0 > 2a$). 根据惠更斯-菲涅尔衍射积分公式, 观察面 ($z=L'+L$) 处光场的交叉谱密度函数为

$$W_0(x_1, x_2, z=L'+L, \omega) = \iint W_i(x'_1, x'_2, z=L', \omega) T^*(x'_1) T(x'_2) \times \exp\{-j(\frac{k}{2L'+L})[(x'_1{}^2 - x'_2{}^2) - 2(x_1 \cdot x'_1 - x_2 \cdot x'_2) + (x_1^2 - x_2^2)]\} dx'_1 dx'_2. \quad (3)$$

在式(3)中, “*” 表示复共轭. $T^*(x'_1) T(x'_2) = \sum_{m=0}^2 \sum_{n=0}^2 t_m^*(x'_1) t_n(x'_2)$, 代入式(3), 并假定 $y z > \omega(L'+L)$, 忽略交叉项. 经计算, 可以得到 ± 1 级衍射光束的交叉谱密度函数为

$$W^{(\pm 1)} = \frac{a^2 S(\omega)}{1 + [(L'+L)/Z_R]^2} \cdot \exp\{-\frac{[x_1 \mu 2\pi f (L'+L)/k] + [x_2 \mu 2\pi f (L'+L)/k]}{2w^2(L'+L)}\} \times \exp\{-\frac{(w_0^2 + \alpha_0^2)[x_1 \mu 2\pi f (L'+L)/k] - [x_2 \mu 2\pi f (L'+L)/k]}{2w_0^2 \sigma^2(L'+L)}\} \times \exp\{-jk \frac{[x_1 \mu 2\pi f (L'+L)/k]^2 - [x_2 \mu 2\pi f (L'+L)/k]^2}{2R(L'+L)}\}. \quad (4)$$

在式(4)中, $w(L'+L) = w_0[1 + ((L'+L)/Z_R)^2]^{1/2}$, $\sigma(L'+L) = \alpha_0[1 + ((L'+L)/Z_R)^2]^{1/2}$, $R(L'+L) = (L'+L)[1 + Z_R/(L'+L)^2]$.

从式(4)可以看出, ± 1 级衍射光束改变了传输方向, 它们对称于零级光束分布, 其偏转角度为

$$\theta_{\pm 1} = \theta_{-1} = \arctg(2\pi f/k) = \arctg(f/c/\omega). \quad (5)$$

从式(5)可看出, ± 1 级衍射角与入射光束的圆频率 ω 有关. ω 越大, 衍射角越小. 本文的实验结果也得到证实. 在式(4)中, 令 $x_1 = x_2 = x$, 并考虑远场情况 ($L'+L \gg Z_0$) 可以得到 ± 1 级衍射光束的光谱为

$$I^{(\pm 1)}(\omega) \approx \frac{a^2 w_0^4 \beta^2 S(\omega) \omega^2}{4(L'+L)^2 c^2} \cdot \exp[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{\Gamma^2}]. \quad (6)$$

上式中, $\omega_0 = \frac{2\pi f c}{\theta_1}$, $\Gamma = \frac{\sqrt{2}c}{w_0 \beta \theta_1}$, $\theta_1 = \frac{x}{L'+L}$. 从式(6)可以看出, 多色 GSM 光束经光栅衍射, 在不同的衍射角 θ_1 , 得到不同的光谱宽度 Γ 和不同的光谱中心频率 ω_0 , 这就是光栅的衍射效应.

3 结束语

本文从实验方面研究了部分相干光束经光栅衍射后的光谱变化. 结果表明, 一束 GSM 光束经光栅衍射后, 其 ± 1 级衍射光束不同位置处的光谱将发生变化, 即有的点处光谱将发生红移, 有的点处光谱将发生蓝移, 并且衍射光束的衍射角与角频率成反比. 此外, 实验结果还表明, 单缝缝宽越大, GSM 光束传播距离越长, 光谱宽度 Γ 值越大, 即光谱越宽.

参考文献:

- [1] WOLF E. Invariance of the spectrum of light on propagation [J]. Phys Rev Lett, 1986, 56: 1370-1372.
- [2] WOLF E. Non cosmological redshifts [J]. Nature, 1987, 326: 363-365.
- [3] WOLF E, JAMES D F V. Correlation induced spectral changes [J]. Rep Prog Phys, 1996, 59: 771-818.
- [4] FOLEY J T, WANG M. A theoretical analysis of the coherence induced spectral shift experiments of Kandpal, Vaishya, and Joshi [J]. J Res Natl Inst Stand Technol, 1994, 99: 267-280.
- [5] PU Jixiong, ZHANG Huifeng, NEMOTO S. Spectral shifts and spectral switches of partially coherent light passing through an aperture [J]. Opt Commun, 1999, 162: 57-63.
- [6] PU Jixiong, NEMOTO S. Spectral changes and spectral switches in the diffraction of partially coherent light by an aperture [J]. J Opt Soc Am A, 2002, 19: 339-344.
- [7] PAN Lirong, LÜ Baoda. The spectral switch of partially coherent light in Young's experiment [J]. IEEE J Quant Electron, 2001, 37: 1377-1381.
- [8] CAI Yangjian, LIN Qiang. Spectral shift of partially coherent twisted anisotropic Gaussian-Schell model beams in free space [J]. Opt Commun, 2002, 204: 17-23.
- [9] MORRIS G M, FAKLIS D. Effects of source correlation on the spectrum of light [J]. Opt Commun, 1987, 62: 5-11.
- [10] FAKLIS D, MORRIS G M. Spectral shifts produced by source correlation [J]. Opt Lett, 1988, 13: 4-6.
- [11] GORI F, GUATTARI G, PALMA C. Observation of optical redshifts and blueshifts produced by source correlation [J]. Opt Commun, 1988, 67: 1-4.
- [13] KANDPAL H C, WASAN A, VAISHYA J S. Spectroscopy of partially coherent fields at geometrical image plane and Fourier transform plane of a lens [J]. Opt Commun, 1998, 149: 1-7.
- [14] LIN Zongqi, GU Zhenhan. Angular spectrum redistribution from a real image of a light as a secondary source [J]. Opt Lett, 2001, 26: 663-665.
- [15] 蒲继雄. 宽频带 GSM 光束经过全息光栅的传输 [J]. 量子电子学报, 1997, 14(5): 442-446.

The Experimental Research on Spectral Change of Partially Coherent Light with Wide-Spectrum Band Diffracted by a Grating

GUO Yue-shao, QU Biao, PU Jixiong

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

Abstract: The spectral change of partially coherent light with wide spectrum band diffracted by a grating is investigated experimentally, and the influence of the degree of coherence of the incident partially coherent light, the width of the incident slit, and the location of the observation point on the spectral change is studied in detail. It is shown that, spectrum experiences change in different positions of the first order diffractive beam, which is formed as a Gaussian-Schell model (GSM) beam diffracted by a grating, i. e. spectrum is red-shifted in some observation points, and is blue shifted in other observation points, and the diffraction angle of the diffractive beam is inverse proportional to the angular frequency. Moreover, the wider the slit is, the wider spectrum is. Furthermore, spectral change of the first order diffractive beam of GSM beam is theoretically analyzed.

Keywords: Gaussian-Schell model; wide spectrum band; grating; diffraction; partially coherent beam

(责任编辑: 黄仲一)