

文章编号: 0258-7025(2009)03-0732-04

散射诱导的多色高斯光束远场的光谱移动和光谱开关

赵光普¹ 吕百达²

(¹ 宜宾学院计算物理四川省高校重点实验室, 四川 宜宾 644000; ² 四川大学激光物理与化学研究所, 四川 成都 610064)

摘要 在静态散射的框架内, 以高斯光束透过表面粗糙的绝缘板的远场谱强度为例, 对散射诱导的光谱变化做了研究。前散射光的谱强度相对源光谱可能有红移和蓝移, 某些条件下还会产生光谱开关。在影响散射光谱强度的诸参数中, 板的厚度相对平均厚度的差值 H 参数起主要作用。当 $H=0$ 时, 归一化谱强度保持不变。散射诱导的多色高斯光束远场光谱开关属于“奇点光学”效应。

关键词 光谱学; 奇点光学; 散射诱导; 多色高斯光束; 光谱移动; 光谱开关

中图分类号 TN 241 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093603.0732

Scattering-Induced Spectral Shifts and Spectral Switch of Polychromatic Gaussian Beams in Far Field

Zhao Guangpu¹ Lü Baida²

¹Computational Physics Key Laboratory of Higher Education of Sichuan Province,
Yibin University, Yibin, Sichuan 644000, China

²Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract Within the framework of static scattering, scattering-induced spectral changes in the forward-scattered component of polychromatic Gaussian beams transmitting through an insulating plate with rough surface are discussed. It is shown that the spectrum may be red-shifted and blue-shifted in comparison with the source spectrum, and the spectral switch may also take place. The H -parameter (the maximum deviation of the surface profile from the mean surface line) influences spectral behavior greatly. The spectrum remains unchanged if $H=0$. The phenomenon of scattering-induced spectral switches of polychromatic Gaussian beams in the far zone belongs to the effect in singular optics.

Key words spectroscopy; singular optics; scattering induction; polychromatic Gaussian beams; spectral shift; spectral switch

1 引言

自从 1986 年 Wolf^[1] 首次证明相关诱导光谱变化以来, 人们开展了广泛的理论和实验研究工作^[2~9]。Foley 等^[6] 将“奇点光学”的研究范围扩展到衍射引起多色完全空间相干光的光谱异变问题, 并将完全空间相干光的“光谱开关”归结于“奇点光学”中衍射引起的光谱异变新现象, 使“奇点光学”这一现代光学的前沿研究领域有了更为丰富的内涵。

研究成果已用于星际测量中^[10,11], 并在光通信、光互连、光信息编码和传输等方面展现出了诱人的应用前景^[3,5,8]。然而, 目前为止对上述问题的绝大多数研究还仅限于在相关和衍射诱导光谱变化的框架内。散射诱导的光谱变化研究甚少, 仅有平面波散射诱导光谱变化的报道^[9]。光在传输过程中与物质相互作用时(大气、水面等), 散射是不可避免的, 对散射光的研究在医学检测、地球物理和太空遥感等

收稿日期: 2008-05-04; 收到修改稿日期: 2008-06-20

基金项目: 四川省应用基础研究基金(05J Y029-102), 四川省青年科技基金(03ZQ026-061)和宜宾学院自然科学基金(2006z13, 2008B04)资助项目。

作者简介: 赵光普(1963—), 男, 研究员, 主要从事激光束的传输与控制的研究工作。E-mail: ybzgp@126.com

领域有着重要的民用和军用价值。因此,研究多色场在传输中被媒质散射后的光谱变化规律是十分有意义的。本文以多色高斯光束透过表面粗糙的平板后远场的光谱为例,在静态散射的框架内,详细分析了板的厚度相对平均厚度的差值 H , 折射率 n 和源光谱谱宽 σ_0 对光谱移动和光谱开关的影响,并对散射诱导的光谱开关是否属于文献[6]所指出的“奇点光学”效应作了判断。

2 理 论

若在入射面 ($z = 0$) 处,有一初始场分布 $E_0(r, 0) = A_0 \exp(-r^2/\omega_0^2)$ 的高斯光束,则在自由空间 z 处场分布为^[12]

$$E(r, z, \omega) = \frac{A_0(\omega)\omega_0}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right] \times \exp\left\{-i\left\{k\left[\frac{r^2}{2R(z)} + z\right] - \Psi(z)\right\}\right\}, \quad (1)$$

式中 $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/Z_0)^2}$, (2)

$$R(z) = Z_0 \left(\frac{z}{Z_0} + \frac{Z_0}{z}\right), \quad (3)$$

$$\Psi(z) = \arctan(z/Z_0), \quad (4)$$

ω_0 为高斯光束束腰宽度, $k = \omega/c$ 为波数, ω 为圆频率, c 为真空中光速, $Z_0 = k\omega_0^2/2$ 为瑞利长度。 $\omega(z)$, $R(z)$ 和 $\Psi(z)$ 分别为高斯光束在 z 处的束宽、等相面曲率半径和相位因子。

紧靠入射面 $z = 0$ 垂直于 z 轴放置一个透明的绝缘板,相对折射率为 n ,绝缘板的前表面是平的,后表面是粗糙的。假定表面的凸凹不是太大(波长量级),不对透射光的前向散射成分造成破坏。现只考虑静态光散射的情况^[2],由绝缘板引起的透射光相位延迟为

$$\varphi(r') = \exp[ik(n-1)h(r')], \quad (5)$$

设板的平均厚度为 G , $h(r')$ 为板的厚度相对平均厚度的差值。则透过绝缘板的光场表达式为

$$E[r', G+h(r'), \omega] = \frac{A_0(\omega)\omega_0}{\omega[G+h(r')]} \times \exp\left\{-\frac{r'^2}{\omega^2[G+h(r')]} \right\} \times \exp\left\{-i\left\{k\left[\frac{r'^2}{2R[G+h(r')]} + nh(r')\right] - \Psi\right\}\right\}, \quad (6)$$

在透射场中不同位置 r 处,含有散射成分的透射光波附加(5)式所示的相位延迟。远场的光场可写为^[6]

$$E(r, \infty, \omega) = A_0(\omega) \int F(h) \frac{\omega_0}{\omega(G+h)} \times \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(G+h)}\right] \times \exp\left\{-i\left\{k\left[\frac{r^2}{2R(G+h)} + nh\right] - \Psi\right\}\right\} dh, \quad (7)$$

$F(h)dh$ 为高度 h 处 dh 间隔内所占的概率。

谱强度为

$$S(\omega) = E^*(r, \infty, \omega)E(r, \infty, \omega) = |E(r, \infty, \omega)|^2, \quad (8)$$

假设源光谱为中心频率 ω_0 , 谱宽为 σ_0 的高斯型,则

$$S^{(0)}(\omega) = |A_0(\omega)|^2 = \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma_0^2}\right], \quad (9)$$

将(8)式改写成

$$S(\omega) = S^{(0)}(\omega)M(\omega), \quad (10)$$

式中

$$M(\omega) = \left| \int F(h) \frac{\omega_0}{\omega(G+h)} \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(G+h)}\right] \times \exp\left\{-i\left\{k\left[\frac{r^2}{2R(G+h)} + nh\right] - \Psi\right\}\right\} dh \right|^2, \quad (11)$$

含有(11)式的(10)式即为多色高斯光束透过无色绝缘板后散射光在远场的谱强度表达式。 $M(\omega)$ 为谱强度调制函数,绝缘板对远场谱强度的影响表现为 $M(\omega)$ 对源光谱 $S^{(0)}(\omega)$ 的调制。由于 $M(\omega)$ 的作用,远场的谱强度一般不同于源光谱,这即为散射诱导的光谱变化。 $M(\omega)$ 与束腰宽度 ω_0 , 相对折射率 n , 绝缘板平均厚度 G , 粗糙表面高度分布函数 $F(h)$ 以及场点位置有关。

在(10)式中令 $r = 0$, 可得到远场轴上点的光谱表达式为

$$S(\omega) = S^{(0)}(\omega)M(\omega), \quad (12)$$

式中

$$M(\omega) = \left| \int F(h) \frac{\omega_0}{\omega(G+h)} \exp[i(\Psi - knh)] dh \right|^2. \quad (13)$$

3 数值计算和分析

为了说明各物理参数对高斯光束透过表面粗糙无色绝缘板后远场光谱的影响,用所得公式(12)和(13)作了数值计算。计算参数为 $\omega_0 = 1 \text{ mm}$, $\omega_0 = 10^{15} \text{ s}^{-1}$, $\sigma_0 = 0.1 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ 。为简单起见,用最简单的厚度分布^[13],即 $F(h) = H^{-1}$, H 为板的厚度与平均厚度的最大差值,平均厚度 G 的取值满足 $G+h \ll Z_0$ 。

图 1 为当 $H = 1.200 \times 10^{-6} \mu\text{m}$, $1.266 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ 和 $1.300 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ 时, 远场归一化谱强度以及与之对应的谱强度调制函数。由图 1 知, 在调制函数 $M(\omega)$ 第一零值点附近, 归一化谱强度 $S(\omega)$ 较源光谱 $S^{(0)}(\omega)$ 明显不同。例如, 在 $H = 1.200 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ 时, $S(\omega)$ 红移(图 1(a)); $H = 1.300 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ 时, $S(\omega)$ 蓝移(图 1(c))。当 $H = 1.266 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ 时, $S(\omega)$ 分裂成等高的双峰, 即产生光谱开关, 谱强度最小值 $S_{\min} = 0$, 对应的频率成分为 $\omega_{\min} = 0.975 \times 10^{15} \text{s}^{-1}$ (图 1(b))。由于谱强度 $S(\omega)$ 是源光谱 $S^{(0)}(\omega)$ 和谱强度调制函数 $M(\omega)$ 的乘积, 故 $M(\omega)$ 与 $S(\omega)$ 的零值点是一致的。多色光是许多不同频率 ω 的单色光组成的, 如果任何单色成分发生变化, 都会引起谱强度调制函数 $M(\omega)$ 发生变化, 进而引起谱强度分布的变化。特别地, 当某些频率成分消失时, 谱强度为零, 光场中存在着相位不确定的频率成分, 此时产生的光谱开关属于“奇点光学”效应。

图 2(a) 为源光谱谱宽 $\sigma_0 = 0.1 \times 10^{15} \text{s}^{-1}$, 相对折射率 $n = 1.30, 1.52$ 和 1.70 时, 相对光谱移动

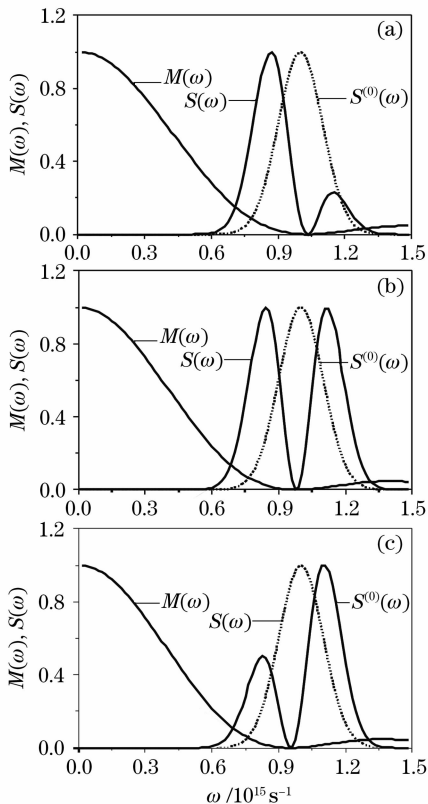


图 1 远场归一化谱强度和与之对应的谱强度调制函数
Fig. 1 Normalized spectra $S(\omega)$ and spectral modifier $M(\omega)$ in the far field. (a) $H = 1.200 \times 10^{-6} \mu\text{m}$; (b) $H = 1.266 \times 10^{-6} \mu\text{m}$; (c) $H = 1.300 \times 10^{-6} \mu\text{m}$

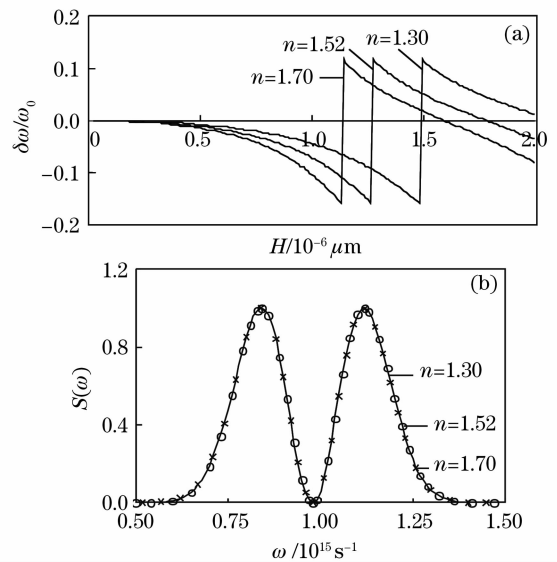


图 2 $\sigma_0 = 0.1 \times 10^{15} \text{s}^{-1}$, 折射率不同时, 相对光谱移动 $\delta\omega/\omega_0$ 随绝缘板的厚度相对平均厚度的差值 H 的变化曲线 (a), 对应的 $H = 1.480 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ (—), $1.266 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ (···) 和 $1.132 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ (×××) 时的归一化谱强度 (b)

Fig. 2 Relative spectral shifts $\delta\omega/\omega_0$ versus H -parameter at $\sigma_0 = 0.1 \times 10^{15} \text{s}^{-1}$ for different refractive indexes (a), normalized spectra $S(\omega)$ corresponding with (a) for $H = 1.480 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ (—), $1.266 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ (···) and $1.132 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ (×××) (b)

$\delta\omega/\omega_0$ ($\delta\omega/\omega_0 = (\omega_{\max} - \omega_0)/\omega_0$, 其中 ω_{\max} 为光谱最大值对应的频率) 随板的厚度相对平均厚度的差值 H 的变化曲线; (b) 为与 (a) 对应的产生光谱开关时的归一化谱强度。由图 2 知, 光谱开关在 $H = 1.480 \times 10^{-6} \mu\text{m}$, $1.266 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ 和 $1.132 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ 时出现, n 取不同值时, 归一化谱强度重合(图 2(b)), 表明改变 n 的值对光谱开关的跃迁量(光谱开关中两个极大值对应的相对频率差值的绝对值) 和最小值影响不大。但随着 n 的减小, 产生光谱开关的 H 值越大, 即需要绝缘板表面越粗糙。

图 3(a) 为相对折射率 $n = 1.52$, 源光谱谱宽 $\sigma_0 = 0.05 \times 10^{15} \text{s}^{-1}$, $0.08 \times 10^{15} \text{s}^{-1}$ 和 $0.1 \times 10^{15} \text{s}^{-1}$ 时, 相对光谱移动 $\delta\omega/\omega_0$ 随板的厚度相对平均厚度的差值 H 的变化曲线; (b) 为与 (a) 对应的产生光谱开关时的归一化谱强度。图 3 显示, 光谱开关在 $H = 1.246 \times 10^{-6} \mu\text{m}$, $1.256 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ 和 $1.266 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ 时产生, 光谱开关跃迁量随源光谱谱宽 σ_0 的减小而减小, 而光谱开关最小值却不随 σ_0 发生变化。 σ_0 越大, 产生光谱开关需要绝缘板表面越粗糙。

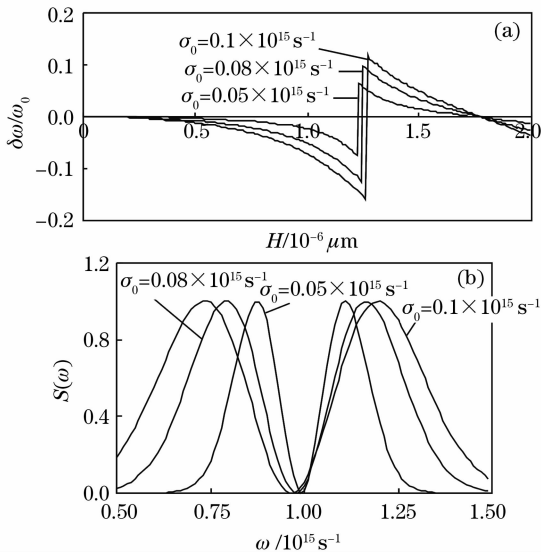


图3 $n = 1.52$, 谱宽不同时, 相对光谱移动 $\Delta\omega/\omega_0$ 随绝缘板的厚度相对平均厚度的差值 H 的变化曲线(a); 对应的 $H = 1.246 \times 10^{-6} \mu\text{m}$, $1.256 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ 和 $1.266 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ 时的归一化谱强度(b)

Fig. 3 Relative spectral shifts $\Delta\omega/\omega_0$ versus H -parameter at $n = 1.52$ for different spectrum width (a), normalized spectra $S(\omega)$ corresponding with (a) for $H = 1.246 \times 10^{-6} \mu\text{m}$, $1.256 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ and $1.266 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ (b)

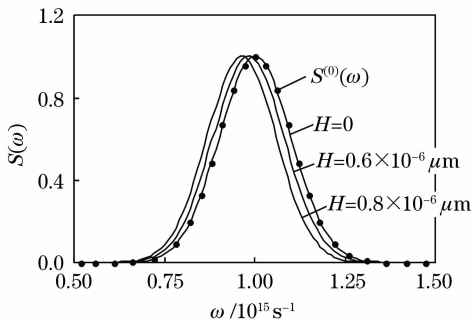


图4 $n = 1.52$, $\sigma_0 = 0.1 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$, H 不同时的归一化谱强度

Fig. 4 Normalized spectra $S(\omega)$ at $n = 1.52$, $\sigma_0 = 0.1 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$, for different H value

H 逐渐减小趋于零时, 光谱相对移动 $\Delta\omega/\omega_0$ 也趋于零(图4), 特别地, 当 $H = 0$ 时, $\Delta\omega/\omega_0 = 0$, 此时归一化谱强度与源光谱重合, 即归一化谱强度在传输过程中保持不变。物理解释为 $H = 0$ 时, 绝缘板两侧均为光滑平面, 透射光中静态散射光成分消失。因此, 在影响散射诱导光谱变化的诸参数中, H 扮演主要角色。此外, 在上述给定条件下, 所产生的光谱开关最小值 S_{\min} 都为零, 其对应频率 ω_{\min} 的相位也都是奇变的, 故完全空间相干的高斯光束透过表面粗糙绝缘板时

散射诱导的远场光谱开关属于奇点光学效应。

4 结论

在静态散射的框架内, 对高斯光束透过表面粗糙的绝缘板的远场光谱变化作了研究, 着重研究了绝缘板的厚度相对平均厚度的差值 H , 相对折射率 n 和源光谱谱宽 σ_0 对光谱移动和光谱开关的影响。结果表明, 前散射光的谱强度相对源光谱可能有红移和蓝移, 某些特定条件下还会产生光谱开关。改变 n 的值对光谱开关的跃迁量和最小值影响不大。而光谱开关跃迁量随 σ_0 的减小而减少, 最小值也不随 σ_0 发生变化。 n 越小或 σ_0 越大, 产生光谱开关所需要的绝缘板表面越粗糙。在影响散射诱导光谱变化的诸参数中, H 参数起主要作用。 $H = 0$ 时, 光谱相对移动 $\Delta\omega/\omega_0 = 0$, 归一化谱强度不变。散射诱导的多色高斯光束远场光谱开关属于“奇点光学”效应。

参考文献

- 1 E. Wolf. Invariance of the spectrum of light on propagation [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **56**(13):1370~1372
- 2 E. Wolf, D. F. V. James. Correlation-induced spectral changes [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 1996, **59**(6):771~818
- 3 T. Yatagai, S. Kawai, H. Huang. Optical computing and interconnects [J]. *Proc. IEEE*, 1996, **84**(6):825~852
- 4 Jixiong Pu, Huihua Zhang, Shojiro Nemoto. Spectral shifts and spectral switches of partially coherent light passing through an aperture [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **162**(1-3):57~63
- 5 G. Popescu, A. Dogariu. Spectral anomalies at wave-front dislocations [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(18):183902
- 6 J. T. Foley, E. Wolf. 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 Zhao Guangpu, Lü Baida. Diffraction-induced spectral switches of spherically aberrated polychromatic Gaussian beams [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(9):2974~2979
- 8 赵光普, 吕百达. 有球差多色高斯光束衍射引起的光谱开关 [J]. *物理学报*, 2004, **53**(9):2974~2979
- 9 B. K. Yadav, S. A. M. Rizvi, S. Raman *et al.*. Information encoding by spectral anomalies of spatially coherent light diffracted by an annular aperture [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **269**(2):253~260
- 10 K. Vyacheslav, Polyanskii, V. Oleg *et al.*. Scattering-induced spectral changes as a singular optical effect [J]. *Optica Applicata*, 2002, XXXII(4):843~848
- 11 E. Wolf, T. Shirai, H. Chen *et al.*. Coherence filters and their uses I. Basic theory and examples [J]. *J. Mod. Opt.*, 1997, **44**(7):1345~1354
- 12 T. Shirai, E. Wolf, H. Chen *et al.*. Coherence filters and their uses II. One-dimensional realizations [J]. *J. Mod. Opt.*, 1998, **45**(4):799~816
- 13 Lü Baida. *Laser Optics* [M]. 3rd ed.. Beijing: Higher Education Press, 2003
- 14 吕百达. *激光光学* [M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 2003
- 15 V. K. Polyanskii. Spectral characteristic of colorless glass with rough surface [J]. *J. Appl. Spectr.*, 1970, **13**(6):1039~1042