

文章编号: 1000-5013(2009) 03-0261-06

部分相干电磁光束在线性增益(损耗) 介质中的传输特性

张国文, 蒲继雄

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 根据 Wolf 提出的电磁光束模型和部分相干光理论, 以电磁高斯-谢尔模型光束为例, 推导出光束在线性增益(损耗) 介质中传输的交叉谱密度矩阵, 研究介质传输场中强度和偏振度的变化特点. 研究结果表明, 任意电磁光束在线性增益(损耗) 介质中传输时, 当其为增益(损耗) 介质时, 会增强(衰减) 光束的强度; 但对偏振度却没有太大的影响. 波数实部 K_r 越小, 轴上偏振度越大; 相干长度 δ_{yy} 越小, 轴上偏振度越大. 当光源处的相干长度 δ_{xx} 与 δ_{yy} 取值相同时, 尽管传输距离不断增大, 光束在传输过程中的偏振度不发生变化. 光源处的偏振度 $P^{(0)}$ 越大, 轴上偏振度也越大.

关键词: 部分相干光; 电磁光束; 线性增益介质; 线性损耗介质; 谱密度; 偏振度

中图分类号: O 433

文献标识码: A

近年来, 对于电磁光束传输特性的研究是一个热点^[1-17]. Wolf 对电磁光束的强度、相干度和偏振度作了理论定义^[1], 并指出在传输过程中, 电磁光束的强度、相干和偏振等特性会发生变化^[2]. 1994 年, James^[18] 首次提出部分相干光在自由空间传播时偏振度会发生变化. 增益介质常应用于激光器件的设计中, 并且光束在增益或者损耗介质中传输时的很多特性不同于它在自由空间中传输, 引起了人们的广泛关注^[19-22]. Palma 等^[19-20] 的研究表明, 部分相干光束在增益或损耗介质中传输时相干性变化较为明显. 张彬等^[21-22] 研究了光束在增益或损耗介质中的 M^2 因子和光谱特性. 偏振特性是光束的一个重要性质, 研究光束在增益或损耗介质中传输时强度和偏振度的变化具有重要意义. 本文研究部分相干电磁光束在增益或损耗介质中传输时, 其强度和偏振度的变化情况.

1 理论推导

设入射光束为电磁高斯-谢尔模型光束, 则源平面 $z = 0$ 处的交叉谱密度矩阵为^[1]

$$W^{(0)}(\rho_1, \rho_2, \omega) = \begin{bmatrix} W_{xx}^{(0)}(\rho_1, \rho_2, \omega) & W_{xy}^{(0)}(\rho_1, \rho_2, \omega) \\ W_{yx}^{(0)}(\rho_1, \rho_2, \omega) & W_{yy}^{(0)}(\rho_1, \rho_2, \omega) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式(1)中, 各矩阵元可分别表示为

$$W_{xx}^{(0)}(\rho_1, \rho_2, \omega) = S(\omega) \exp\left(-\frac{\rho_1^2 + \rho_2^2}{4\sigma^2}\right) \exp\left[-\frac{(\rho_1 - \rho_2)^2}{2\delta_{xx}^2}\right], \quad (2a)$$

$$W_{yy}^{(0)}(\rho_1, \rho_2, \omega) = S(\omega) B_{yy} \exp\left(-\frac{\rho_1^2 + \rho_2^2}{4\sigma^2}\right) \exp\left[-\frac{(\rho_1 - \rho_2)^2}{2\delta_{yy}^2}\right], \quad (2b)$$

$$W_{xy}^{(0)}(\rho_1, \rho_2, \omega) = W_{yx}^{(0)}(\rho_1, \rho_2, \omega) = 0. \quad (2c)$$

其中, ρ_1 和 ρ_2 是垂直于轴的横向位置矢量, $S(\omega)$ 为 $\rho = 0$ 处的强度, 参数 σ 表示光斑大小, $\delta_{x,j}$ 表示相干长度, B_{yy} 为常系数.

光束在线性增益(或吸收)介质中传输时, 其传输仍然遵循 Collins 公式^[23]. 对于直角坐标情况下,

收稿日期: 2008-03-08

通信作者: 蒲继雄(1962-), 男, 教授, 主要从事激光和光电子的研究. E-mail: jixiong@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60477041); 福建省科技计划重点项目(2007H0027)

相应的场分布公式可表示为

$$E(x,y,z,\omega)=\left(-\frac{iK}{2\pi B}\right)\exp(-iKz)\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}E(x',y',0,\omega)\times \\ \exp\left\{\frac{iK}{2B}[A(x'^2+y'^2)-2(xx'+yy')+D(x^2+y^2)]\right\}dx'dy'. \tag{3}$$

在式(3)中, $E(x',y',0,\omega)$, $E(x,y,z,\omega)$ 分别是入射光和出射光的场分布, 复数波数 $K=K_r+iK_i$, K_r 与介质的折射率有关, K_i 表征光束在介质增益(或损耗)特性. $K_i>0$ 对应增益介质, $K_i<0$ 对应损耗介质, A, B, D 是传输矩阵 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 的各矩阵元. 根据交叉谱密度函数的定义, 有

$$W(x_1,y_1,x_2,y_2,z,\omega)=\langle E(x_1,y_1,z,\omega)E^*(x_2,y_2,z,\omega)\rangle. \tag{4}$$

把式(3)代入式(4), 可得到部分相干光在介质中通过傍轴 $ABCD$ 光学系统后的交叉谱密度函数的传输公式. 即

$$W(x_1,y_1,x_2,y_2,z,\omega)=\left[\frac{|K|}{2\pi B}\right]^2\exp(2Kiz)\iiint W(x'_1,y'_1,x'_2,y'_2,0,\omega) \\ \exp\left\{-\frac{i}{2B}[AK(x'^2_1+y'^2_1)-2K(x_1x'_1+y_1y'_1)+DK(x^2_1+y^2_1)-\right. \\ \left.(AK^*(x'^2_2+y'^2_2)-2K^*(x_2x'_2+y_2y'_2)+DK^*(x^2_2+y^2_2))]\right\}dx'_1dy'_1dx'_2dy'_2. \tag{5}$$

为了简便起见, 把式(2)变为直角坐标形式, 则各矩阵元可表示为

$$W^{(0)}_{xx}(x'_1,y'_1,x'_2,y'_2,0,\omega)=S(\omega)\exp\left\{-\frac{x'^2_1+y'^2_1+x'^2_2+y'^2_2}{4\sigma^2}\right\}\times \\ \exp\{-[x'^2_1+y'^2_1+x'^2_2+y'^2_2-2(x'_1x'_2+y'_1y'_2)]/2\mathfrak{G}_x\}, \tag{6a}$$

$$W^{(0)}_{yy}(x'_1,y'_1,x'_2,y'_2,0,\omega)=S(\omega)B_{yy}\exp\left\{-\frac{x'^2_1+y'^2_1+x'^2_2+y'^2_2}{4\sigma^2}\right\}\times \\ \exp\{-[x'^2_1+y'^2_1+x'^2_2+y'^2_2-2(x'_1x'_2+y'_1y'_2)]/2\mathfrak{G}_y\}, \tag{6b}$$

$$W^{(0)}_{xy}(x'_1,y'_1,x'_2,y'_2,0,\omega)=W^{(0)}_{yx}(x'_1,y'_1,x'_2,y'_2,0,\omega)=0. \tag{6c}$$

把式(6)代入式(5), 取变换矩阵 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 经过一系列复杂积分, 可得到电磁高斯-谢尔模型光束在介质中传输的交叉谱密度矩阵各矩阵元为

$$W_{xx}(x_1,x_2,y_1,y_2,z,\omega)=S(\omega)\frac{|K|^2\mathfrak{G}_x^4}{z^2(4a_{xx}a_{xx}^*-1)}\cdot\exp(2Kiz)\cdot \\ \exp\{-\frac{i}{2z}[K(x^2_1+y^2_1)-K^*(x^2_2+y^2_2)]\}. \tag{7a}$$

$$\exp\left\{-\frac{\mathfrak{G}_x^2[K^2a_{xx}^*(x^2_1+y^2_1)-|K|^2(x_1x_2+y_1y_2)+K^*a_{xx}(x^2_2+y^2_2)]}{z^2(4a_{xx}a_{xx}^*-1)}\right\}, \\ W_{yy}(x_1,x_2,y_1,y_2,z,\omega)=S(\omega)B_{yy}\frac{|K|^2\mathfrak{G}_x^4}{z^2(4a_{yy}a_{yy}^*-1)}\cdot\exp(2Kiz)\cdot \\ \exp\{-\frac{i}{2z}[K(x^2_1+y^2_1)-K^*(x^2_2+y^2_2)]\}\cdot \\ \exp\left\{-\frac{\mathfrak{G}_y^2[K^2a_{yy}^*(x^2_1+y^2_1)-|K|^2(x_1x_2+y_1y_2)+K^*a_{yy}(x^2_2+y^2_2)]}{z^2(4a_{yy}a_{yy}^*-1)}\right\}, \tag{7b}$$

$$W_{xy}(x_1,x_2,y_1,y_2,z,\omega)=W_{yx}(x_1,x_2,y_1,y_2,z,\omega)=0. \tag{7c}$$

式(7)中, $a_{xx}=\frac{1}{2}+\frac{\mathfrak{G}_x^2}{4\sigma^2}+\frac{i\mathfrak{G}_xK}{2z}$, $a_{xx}^*=\frac{1}{2}+\frac{\mathfrak{G}_x^2}{4\sigma^2}-\frac{i\mathfrak{G}_xK^*}{2z}$, $a_{yy}=\frac{1}{2}+\frac{\mathfrak{G}_y^2}{4\sigma^2}+\frac{i\mathfrak{G}_yK}{2z}$, $a_{yy}^*=\frac{1}{2}+\frac{\mathfrak{G}_y^2}{4\sigma^2}-\frac{i\mathfrak{G}_yK^*}{2z}$.

2 数值计算结果与讨论

2.1 强度的数值计算

根据式(7), 可以研究电磁高斯-谢尔光束在介质中的传输特性. 将文[1]的强度定义式改写为

$$S(x,y,z,\omega)=\text{tr}\mathbf{W}(x,y,x,y,z,\omega).$$
 (8)

利用式(7),(8),可对电磁高斯-谢尔模型光束在线性增益或损耗介质中传输的强度作数值计算. 计算时,光斑大小固定取 $\sigma=0.3\text{ mm}$. 当 K_i 不同时,强度空间分布如图 1 所示. 其中,参数选取为 $K_{r,xx}=K_{r,yy}=7\text{ }\mu\text{m}^{-1}$, $\delta_{xx}=1$, $\delta_{yy}=0.5$, $B_{yy}=1/3$. 从图 1 中看出,在 10 mm 的传输范围内,当 $K_i=-0.2\text{ mm}^{-1}$ 时,强度随着传输距离的增加而迅速衰减(图 1(a));当 $K_i=0.2\text{ mm}^{-1}$ 时,强度时随着传输距离的增加而迅速增强(图 1(c));而当 $K_i=0$ 时,强度没有发生变化(图 1(b)).

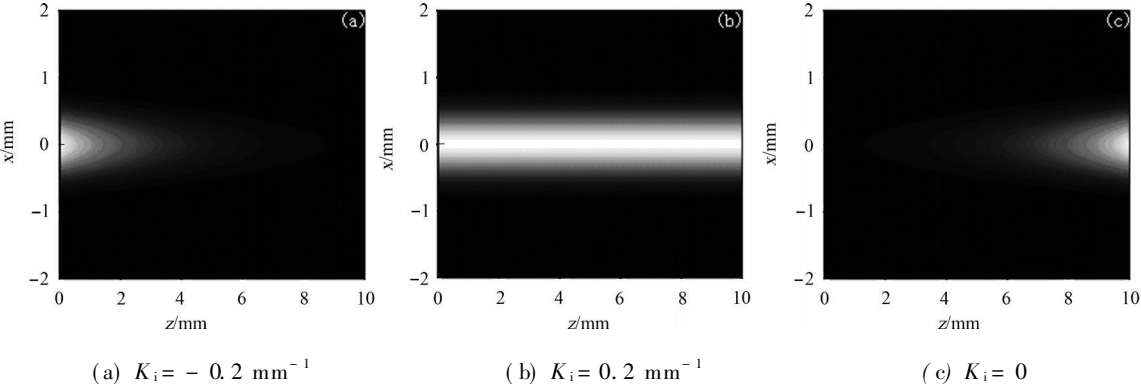


图 1 不同 K_i 的轴上强度空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of density for different K_i

图 2 是 K_r 对轴上强度影响曲线图. 从图 2(a)中可看出,当 $K_{r,xx}=K_{r,yy}$ 取值越小,则轴上强度随传输距离的增加衰减越快;在传输一段距离以后,3 条曲线逐渐趋向靠近. 从图 2(b)中可以发现, $K_{r,yy}$ 取值越小,轴上强度衰减越快;但 3 条曲线的差别较小.

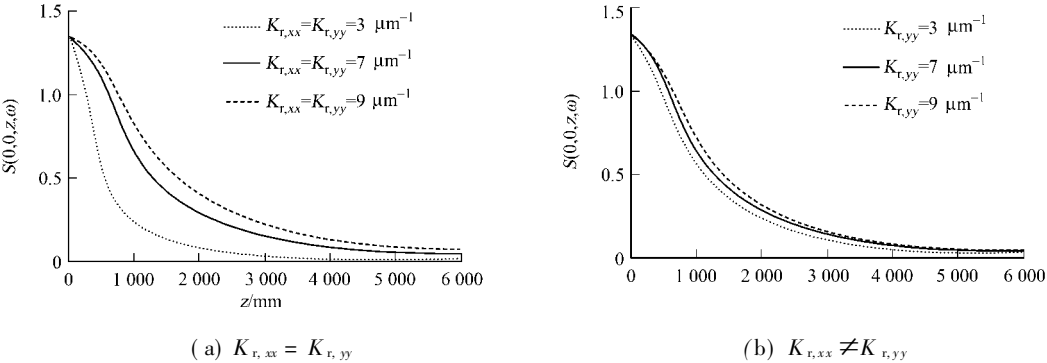


图 2 K_r 对轴上强度的影响

Fig. 2 The influence of K_r on axis spectral density

图 3, 4 分别为相干长度 (δ), B_{yy} 对轴上强度的影响曲线图, 其参数为 $K_i=0$, $K_{r,xx}=K_{r,yy}=7\text{ }\mu\text{m}^{-1}$, $\delta_{xx}=1$, $\delta_y=1/3$ (图 4 的 $\delta_y=0.5$). 从图 3 可以看出, δ_y 越小,强度随传输距离的增加衰减越快. 从图 4 可以看出, B_{yy} 越大,则轴上强度在光源处的强度越大;随着传输距离的增加,3 条曲线逐渐重合.

2.2 偏振度的数值计算

根据偏振度公式^[1]

$$P(x,y,z,\omega)=\sqrt{1-\frac{4\det\mathbf{W}(x,y,x,y,z,\omega)}{[\text{tr}\mathbf{W}(x,y,x,y,z,\omega)]^2}},$$
 (9)

把式(7)带入式(9)进行数值计算,结果如图 5~ 10 所示. 图 5, 6 分别为 $x-z$ 截面和 $x-y$ 截面的偏振度空间分布图. 其中,参数选取为 $K_i=0$, $\delta_{xx}=1$, $\delta_y=0.5$, $B_{yy}=1/3$; 图 6 的 $z=2\text{ cm}$. 从图 5, 6 可知,在 0~ 5 m 范围内, $x-z$ 截面的偏振度成束形分布,中央的偏振度略大,而边缘的稍小;而 $x-y$ 截面则是圆形分布,从中央到边缘,偏振度逐渐变小. 同时,随着 K_r 的增大,偏振度束形变小.

参数 K_i 是表征光束在介质中增益(或损耗)的特性,研究发现 K_i 对强度的影响很大,但 K_i 对偏振度几乎没有影响. 图 7 为 K_i 取不同值时,轴上偏振度的变化曲线图. 参数选取同图 3. 从图 7 中可以看出,3 条曲线重合在一起,说明 K_i 对轴上偏振度没有影响.

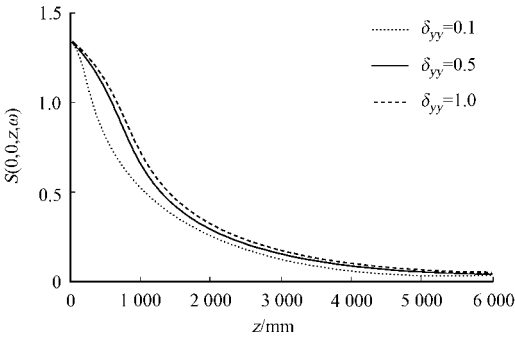


图 3 相干度对轴上强度的影响
Fig.3 The influence of coherence

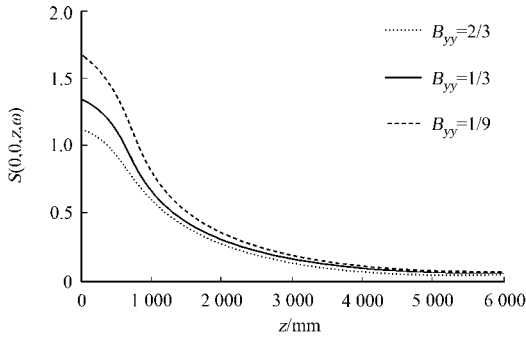


图 4 B_yy 对轴上强度的影响
Fig.4 The influence of B_yy

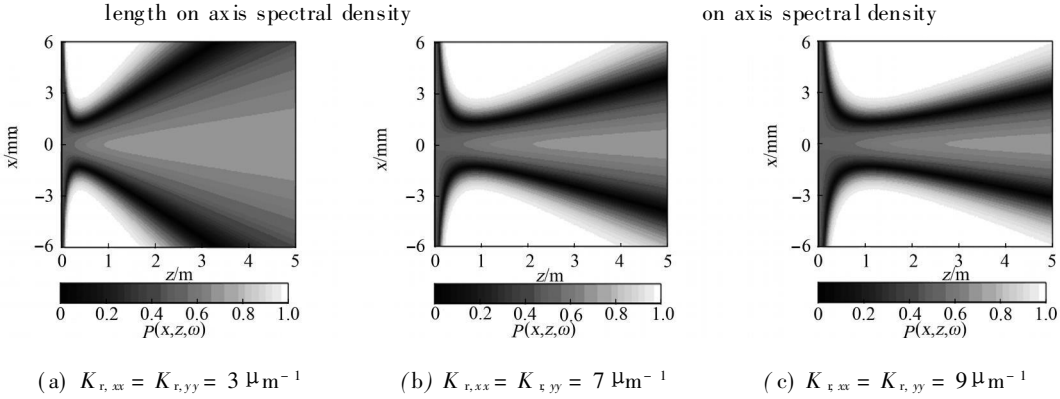


图 5 x-z 截面的偏振度空间分布图

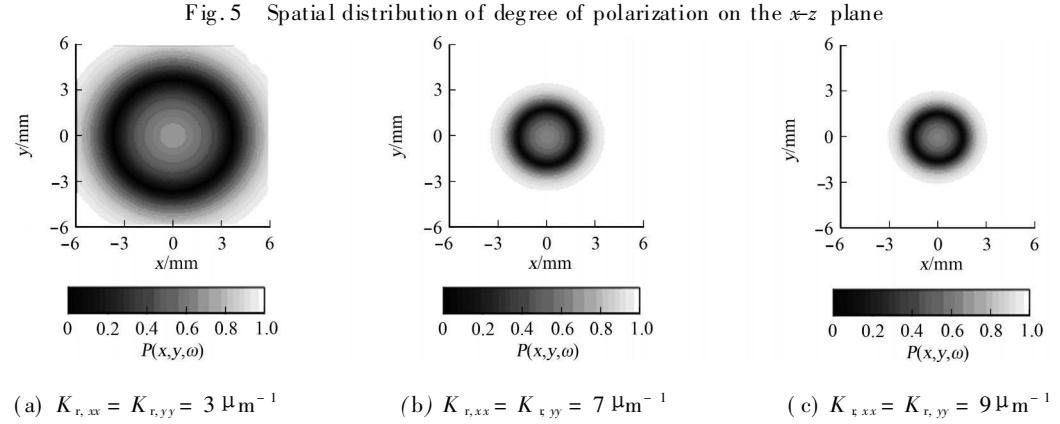


图 6 x-y 截面的偏振度空间分布图

Fig.6 Spatial distribution of degree of polarization on the x-y plane

图 8 是 K_r 取值不同时轴上偏振度的变化曲线图, 参数选取为 $K_i = 0$, $\delta_{xx} = 1$, $\delta_{yy} = 0.5$, $B_{yy} = 1/3$. 从图 8(a) 中可以看出, K_r 值越小, 轴上偏振度变化就越大; 但经过一段距离的传输之后, 3 条曲线又重合在一起. 图 8(b) 中, $K_{r,yy}$ 越小, 轴上偏振度变化就越大, 在传输到一定距离后, 轴上偏振度变化细微, 3 条曲线随着传输距离的增加, 没有重合的趋势.

图 9 是相干度取不同值时, 轴上偏振度的变化曲线图, 参数选择与图 3 一致. 从图 9 中可以看出, $\delta_{xx} = \delta_{yy} = 1$ 时, 轴上偏振度是一条直线, 不随着传输距离的变化而变化; 而当 $\delta_{xx} \neq \delta_{yy}$ 时, 轴上偏振度随着传输距离的增大而迅速增

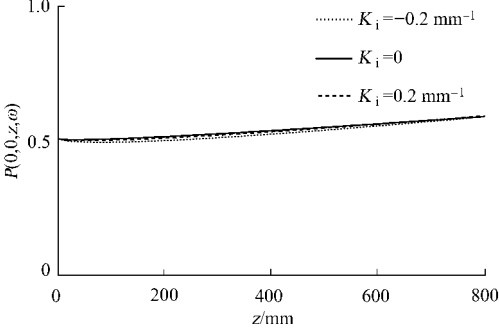


图 7 K_i 对轴上偏振度的影响
Fig.7 The influence of K_i
on axis degree of polarization

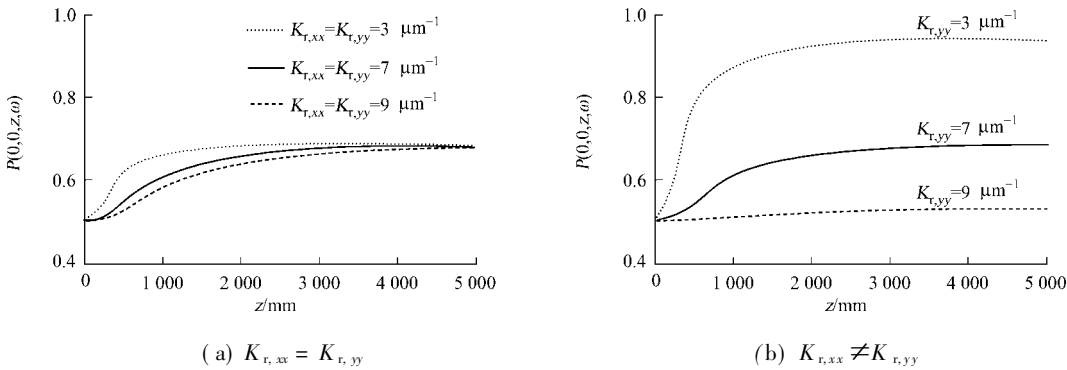


图 8 K_r 对轴上偏振度的影响

Fig. 8 The influence of K_r on axis degree of polarization

大, δ_y 越小, 轴上偏振度变化就越剧烈, 经过一段传输距离以后, 轴上偏振度趋向缓和, 其值趋向与一个固定值. 图 10 是光源处偏振度取不同值时, 轴上偏振度的变化情况. 图 10 参数与图 3 参数同. 从图 10 可以看出, $P^{(0)}$ 越大, 轴上偏振度越大, 3 条曲线的变化趋势相似.

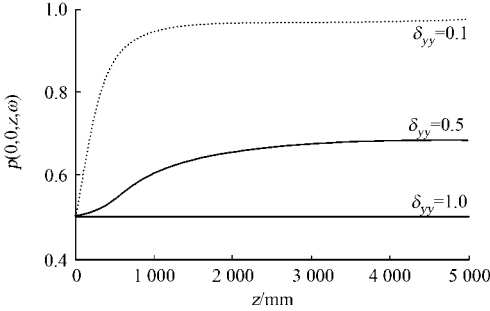


图 9 相干长度对轴上偏振度的影响

Fig. 9 The influence of coherence length on axis degree of polarization

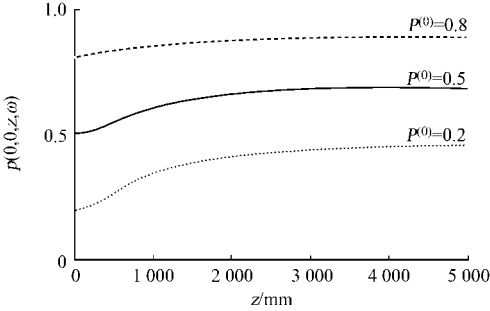


图 10 不同 $P^{(0)}$ 的轴上偏振度

Fig. 10 The axis degree of polarization for different $P^{(0)}$

3 结束语

研究介质的增益(损耗)特性、波数实部、光源的相干长度, 以及光源处偏振度等因素对强度和偏振度变化的影响. 结果表明, 波数实部 K_r 、光源的相干长度, 以及光源处偏振度等因素对传输场中强度和偏振度都有影响; 介质的增益(损耗)特性对强度影响明显, 但对偏振度却没有影响. 当光源的相干长度 $\delta_x = \delta_y$ 时, 随着传输距离的增加, 偏振度不会发生变化, 其值等于光源处的偏振度.

参考文献:

[1] WOLF E. Unified theory of coherence and polarization of random electromagnetic beams[J]. Phys Lett (A), 2003, 312: 263-267.

[2] WOLF E. Correlation-induced changes in the degree of polarization, the degree of coherence, and the spectrum of random electromagnetic beams on propagation[J]. Opt Lett, 2003, 28: 1078-1180.

[3] KOROTKOVA O, SALEM M, WOLF E. Beam conditions for radiation generated by an electromagnetic Gaussian Schell-model source[J]. Opt Lett, 2004, 29: 1173-1175.

[4] ROYCHOWDHURY H, KOROTKOVA O. Realizability conditions for electromagnetic Gaussian Schell-model sources[J]. Opt Commun, 2005(249): 379-385.

[5] ROYCHOWDHURY H, WOLF E. Determination of the electric cross-intensity matrix of a random electromagnetic beam[J]. Opt Commun, 2003(226): 57-60.

[6] LI Y, LEE H, WOLF E. Spectra, coherence and polarization in Young's interference pattern formed by stochastic electromagnetic beams[J]. Opt Commun, 2006(265): 63-72.

[7] PU Ji-xiong, KOROTKOVA O, WOLF E. Invariance and non-invariance of the spectrum and of the degree of po-

- larization of stochastic electromagnetic beams on propagation[J]. Opt Lett, 2006, 31: 2097-2099.
- [8] SCHOUTEN H F, VISSER T D, WOLF E. New effect in Young's interference experiment with partially coherent light[J]. Opt Lett, 2003, 28: 1182-1184.
- [9] SALEM M, KPRPTLPVA O, DOGARIU A, et al. Polarization changes in partially coherent electromagnetic beams propagating through turbulent atmosphere[J]. Waves in Random Media, 2004, 14: 513-523.
- [10] KPRPTLPVA O, SALEM M, WOLF E. The far-zone behavior of the degree of polarization of electromagnetic beams propagating through atmospheric turbulence[J]. Opt Commun, 2004(233): 225-230.
- [11] ROYCHOWDHURY H, WOLF E. Young's interference experiment with light of any state of coherence and polarization[J]. Opt Commun, 2005(252): 268-274.
- [12] ELLIS J, DOGARIU A, PONOMARENKO S, et al. Degree of polarization of statistically electromagnetic fields[J]. Opt Commun, 2005(248): 333-337.
- [13] KOROTKOVA O, WOLF E. Changes in the state of polarization of a random electromagnetic beam on propagation[J]. Opt Commun, 2005(246): 35-43.
- [14] KOROTKOVA O, WOLF E. Spectral degree of coherence of a random three-dimensional electromagnetic field[J]. J Opt Soc Am (A), 2004, 21: 2382-2385.
- [15] PU Jixiong, KOROTKOVA O, WOLF E. Polarization-induced spectral changes on propagation of stochastic electromagnetic beams[J]. Phys Rev (E), 2007, 75: 1-6.
- [17] SESHADRI S R. Polarization properties of partially coherent Gaussian Schell-model electromagnetic beams[J]. Appl Phys, 2000, 87: 4084-4093.
- [18] JAMES D F V. Change of polarization of light beams on propagation in free space[J]. J Opt Soc Am (A), 1994, 11: 1641-1643.
- [19] PALM A C, DE SANTIS P, Cincotti G, et al. Propagation and coherence evolution of optical beams in absorbing media[J]. J Mod Opt, 1995, 42(5): 1123-1135.
- [20] PALM A C, DE SANTIS P, Cincotti G, et al. Propagation of partially coherent beams in absorbing media[J]. J Mod Opt, 1995, 43(1): 139-153.
- [21] 张 艳, 文 侨, 张 彬. 部分相干平顶光束在线性增益(损耗)介质中的光谱特性[J]. 物理学报, 2006, 55(9): 4962-4966.
- [22] 文 侨, 张 彬. 部分相干高斯-谢尔模型光束在介质中传输的因子[J]. 光学学报, 2006, 26(2): 212-216.
- [23] 吕百达. 激光光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 11.

The Properties of Partially Coherent Electromagnetic Beams Propagating in Linear Gain or Loss Media

ZHANG Guo-wen, PU Jixiong

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

Abstract: Based on the electromagnetic beams model proposed by Wolf and the propagation theory of partially coherent light, by taking electromagnetic Gaussian Schell-model (EGSM) beams as an example, the expression for the cross-intensity matrix of the beam propagating in linear gain or loss media was derived. The variation characteristics of spectral density and degree of polarization in linear gain or loss media have been studied. It can be shown that, the stochastic electromagnetic beams propagating in linear gain or loss media, when the media property is gain (loss), it will heighten (lower) the spectral density; but it has little or no effect on the degree of polarization. The effects of the wave number K_r or the source coherence length is smaller, the axis degree of polarization is greater. When the values of the coherence length δ_x and δ_y are the same, even though the transmission distance increasing, the degree of polarization does not change. The greater the source degree of polarization $P^{(0)}$, the axis degree of polarization is greater.

Keywords: partially coherent beams; electromagnetic beams; linear gain media; linear loss media; spectral density; degree of polarization

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 吴逢铁)