

双曲正弦平方高斯光束通过左手平板材料的传输特性

龚霞¹ 张廷蓉¹ 杨玉婷¹ 霍雅洁²

¹四川师范大学物理与电子工程学院, 四川 成都 610101

²重庆邮电大学移通学院, 重庆 401520

摘要 在傍轴近似条件下, 基于广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式, 推导了双曲正弦平方高斯光束在自由空间、左手平板材料中及通过左手平板材料后的三维光强传输公式, 并进行数值计算和分析, 探究了双曲正弦平方高斯光束通过左手平板材料的传输特性。研究表明, 左手材料对双曲正弦平方高斯光束轴上光强和横向光强分布规律的影响是使光强呈对称分布; 材料的负折射率会影响光束轴上光强极大值的位置; 轴上光强和横向光强均随传输距离和偏心参数的改变而变化, 即双曲正弦平方高斯光束不能保持其传输不变性。实际应用中, 可用改变偏心参数的方法在不同位置对光束进行整形。

关键词 光束传输; 惠更斯-菲涅耳衍射; 左手平板材料; 双曲正弦平方高斯光束; ABCD 光学系统

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0605001

Propagation Properties of Sinh-Squared-Gaussian Beams Through a Left-Handed Material Slab

Gong Xia¹ Zhang Tingrong¹ Yang Yuting¹ Huo Yajie²

¹College of Physics and Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu, Sichuan 610101, China

²College of Mobile Telecommunications, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 401520, China

Abstract Under the paraxial approximation and based on the generalized Huygens-Fresnel diffraction integral formula, the propagation expressions of three-dimensional intensity of sinh-squared-Gaussian beams in free space, in a left-handed material slab and after propagation through the left-handed material slab are derived, and the numerical calculation and analysis are performed with the expressions to explore propagation properties of the sinh-squared-Gaussian beams through the left-handed material slab. The results show that the influence of the left-handed materials on the axial and the transversal intensity distribution of sinh-squared-Gaussian beams makes the intensity exhibit symmetrical distribution. The negative refractive index of the left-handed material slab changes the position of the maximum intensity. The axial and the transversal intensity changes with different propagation distances and decentered parameters, which shows that the sinh-squared-Gaussian beams cannot remain the same during propagation. In practical applications, it is feasible to shape beams in the manner of adjusting the decentered parameter at different locations.

Key words beam propagation; Huygens-Fresnel diffraction; left-handed material slab; sinh-squared-Gaussian beams; ABCD optical system

OCIS codes 160.1245; 050.1960; 080.2730; 140.3300

收稿日期: 2016-01-21; 收到修改稿日期: 2016-02-25

基金项目: 四川省教育厅重点项目(12ZA144)

作者简介: 龚霞(1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光传输与变换方面的研究。E-mail: 438315753@qq.com

导师简介: 张廷蓉(1962-), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事激光传输与变换方面的研究。

E-mail: trz_sc@163.com(通信联系人)

1 引 言

1968年, Veselago^[1]首次提出介电常数与磁导率同时为负的材料, 电磁波在其中传播时, 电磁波的电场矢量 \mathbf{E} 、磁场矢量 \mathbf{H} 和波矢量 \mathbf{k} 三者之间服从左手螺旋定则, 故称为左手材料(LHM)。LHM 因其负折射率而表现出很多特殊性质, 如负折射效应、逆多普勒效应和反切伦科夫辐射效应等。但自然界并不存在这类天然材料, 直到 2000 年, Smith 等^[2-4]用实验证明, 由微波波段二维铜金属线阵列和有缺口的环谐振器阵列组成的复合体系具有左手材料特性。同年, Pendry^[5]提出 LHM 薄板对倏逝波具有二次聚焦作用, 可用 LHM 制作完美透镜, 实现对倏逝波的成像。近年来, 国内外许多学者研究了 LHM 的各种特性^[6-14]以及部分光束通过左手平板材料构成的光学系统的传输特性^[15-24]。

厄米-正弦类高斯光束是波动方程在傍轴近似下的解^[25-27], 如正(余)弦类高斯光束^[22, 28]、双曲正(余)弦类高斯光束^[29-31]、双曲正(余)弦平方类高斯光束^[32-39]等。已有学者研究了正(余)弦类高斯光束^[20, 22]和双曲正(余)弦类高斯光束^[23-24]在 LHM 中的传输特性, 尚未出现关于双曲正弦平方高斯光束(ShSGB)在 LHM 中传输特性的研究报道。ShSGB 可由双曲余弦高斯光束和高斯光束叠加得到, 此类光束对光束合成等技术有一定的应用价值。本文采用广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式推导出 ShSGB 在自由空间、左手平板材料中和通过左手平板材料后的传输公式, 并进行数值计算, 给出典型的计算结果以分析 ShSGB 的传输特性。对比了 ShSGB 在自由空间和 LHM 中的传输, 进一步研究 LHM 对 ShSGB 的影响, 并利用三维光强图更清晰地展现其影响效果。

2 传输公式

2.1 ShSGB 通过一阶 ABCD 光学系统的传输公式

ShSGB 在 $z=0$ 平面上的场分布为^[27]

$$E_0(x_0, y_0, 0) = \exp\left(-\frac{x_0^2}{\omega_0^2}\right) \sinh^2(\Omega x_0) \exp\left(-\frac{y_0^2}{\omega_0^2}\right) \sinh^2(\Omega y_0), \quad (1)$$

式中 ω_0 为相关高斯光束的束腰宽度, Ω 为与双曲正弦平方因子相关的参数, x_0, y_0 为输入面上的坐标。显然, (1)式可以写为

$$E_0(x_0, y_0, 0) = \left[\frac{1}{2} \exp\left(-\frac{x_0^2}{\omega_0^2}\right) \cosh(2\Omega x_0) - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{x_0^2}{\omega_0^2}\right) \right] \times \left[\frac{1}{2} \exp\left(-\frac{y_0^2}{\omega_0^2}\right) \cosh(2\Omega y_0) - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{y_0^2}{\omega_0^2}\right) \right], \quad (2)$$

或

$$E_0(x_0, y_0, 0) = \frac{1}{16} \left\{ \exp(\Omega^2 \omega_0^2) \left\{ \exp\left[-\frac{(x_0 - \Omega \omega_0^2)^2}{\omega_0^2}\right] + \exp\left[-\frac{(x_0 + \Omega \omega_0^2)^2}{\omega_0^2}\right] \right\} - 2 \exp\left(-\frac{x_0^2}{\omega_0^2}\right) \right\} \times \left\{ \exp(\Omega^2 \omega_0^2) \left\{ \exp\left[-\frac{(y_0 - \Omega \omega_0^2)^2}{\omega_0^2}\right] + \exp\left[-\frac{(y_0 + \Omega \omega_0^2)^2}{\omega_0^2}\right] \right\} - 2 \exp\left(-\frac{y_0^2}{\omega_0^2}\right) \right\}, \quad (3)$$

(3)式利用了欧拉公式 $\sin x = \frac{1}{2i} [\exp(ix) - \exp(-ix)]$ 和变换式 $\sinh x = -i \sin(ix)$ 。

由(2)、(3)式可以看出, ShSGB 可由高斯光束和双曲余弦高斯光束以等权重同相位相干叠加得到, 或者通过高斯光束和中心分别位于 $(\pm \Omega \omega_0^2, 0)$ 点的偏心高斯光束以不等权重同相位相干叠加得到^[33]。傍轴传播波动方程是线性的, 故 ShSGB 是波动方程在傍轴近似下的解。

ShSGB 通过一阶 ABCD 光学系统时, 出射面上的场分布可以由广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式^[40]给出:

$$E(x, y, z) = \frac{i}{\lambda B} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0(x_0, y_0, 0) \times \exp\left\{-\frac{ik}{2B} [A(x_0^2 + y_0^2) - 2(xx_0 + yy_0) + D(x^2 + y^2)]\right\} dx_0 dy_0, \quad (4)$$

式中 $E_0(x_0, y_0, 0)$ 为入射面上的场分布, $k=2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长, A, B, D 为 ABCD 光学系统的变换矩阵元。利用特殊积分公式

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-ax^2 + bx) dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}} \exp\left(\frac{b^2}{4a}\right) \quad (5)$$

与

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-ax^2 + bx) \cosh(\beta x) dx = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \left\{ \exp\left[\frac{(b-\beta)^2}{4a}\right] + \exp\left[\frac{(b+\beta)^2}{4a}\right] \right\}, \quad (6)$$

将(1)式代入(4)式, 可得 ShSGB 通过一阶 ABCD 光学系统的传输公式为

$$E(x', y', z) = \frac{1}{4} \frac{iZ_0}{B + iAZ_0} \exp\left\{ \frac{[(AD-1)Z_0^2 - BDiZ_0](x'^2 + y'^2)}{B(B + iAZ_0)} \right\} \times \left[\exp\left(\frac{B\alpha^2}{B + iAZ_0}\right) \cos\left(\frac{2\alpha Z_0 x'}{B + iAZ_0}\right) - 1 \right] \times \left[\exp\left(\frac{B\alpha^2}{B + iAZ_0}\right) \cos\left(\frac{2\alpha Z_0 y'}{B + iAZ_0}\right) - 1 \right], \quad (7)$$

式中 $x' = x/\omega_0, y' = y/\omega_0$ 为归一化坐标, $Z_0 = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$ 为共焦参数(或瑞利尺寸), $\alpha = \omega_0\Omega$ 为偏心参数, 由(3)式可知 α 是光束偏心程度的几何学表征。

2.2 ShSGB 在自由空间中的传输公式

光束在自由空间中传输时, 传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 z_1 为 ShSGB 在自由空间的传输距离, 将(8)式代入(7)式可得

$$E_1(x', y', z_1) = \frac{1}{4} \frac{i}{z' + i} \exp\left[-\frac{i(x'^2 + y'^2)}{z' + i}\right] \times \left[\exp\left(\frac{\alpha^2 z'}{z' + i}\right) \cos\left(\frac{2\alpha x'}{z' + i}\right) - 1 \right] \times \left[\exp\left(\frac{\alpha^2 z'}{z' + i}\right) \cos\left(\frac{2\alpha y'}{z' + i}\right) - 1 \right], \quad (9)$$

式中 $z' = z_1/Z_0$ 为归一化坐标, (9)式为 ShSGB 在自由空间传输时的场分布表达式。当 $x' = y' = 0$ 时, 由(9)式可得轴上场分布表达式为

$$E_1(0, 0, z_1) = \frac{1}{4} \frac{i}{z' + i} \times \left[\exp\left(\frac{\alpha^2 z'}{z' + i}\right) - 1 \right]^2. \quad (10)$$

利用 $I_1(0, 0, z_1) = E_1(0, 0, z_1) \times E_1^*(0, 0, z_1)$ 可求得轴上光强分布公式为

$$I_1(0, 0, z_1) = \frac{1}{16} \frac{1}{z'^2 + 1} \times \left[\exp\left(\frac{2\alpha^2 z'^2}{z'^2 + 1}\right) - 2\exp\left(\frac{\alpha^2 z'^2}{z'^2 + 1}\right) \times \cos\left(\frac{1}{z'^2 + 1}\right) + 1 \right]^2. \quad (11)$$

2.3 ShSGB 通过左手平板材料的传输公式

ShSGB 在折射率为 $n_R (n_R > 0)$ 的介质中传输, 通过折射率为 $n_L (n_L < 0)$ 的左手平板材料, 再到达折射率为 n_R 的介质, 如图 1 所示。

光束通过左手平板材料(II区)时, 根据文献[16]可推导得到传输矩阵为

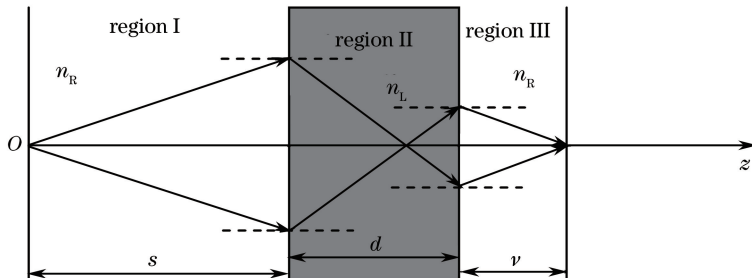


图 1 光束通过左手平板材料示意图

Fig. 1 Schematic of paraxial beam through a left-handed material slab

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s + \frac{n_R z_2}{n_L} \\ 0 & \frac{n_R}{n_L} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中 z_2 为 ShSGB 在左手平板材料中的传输距离, s 为光源到左手平板材料的距离。将(12)式代入(7)式可得 ShSGB 在左手平板材料中的光场分布表达式为

$$\begin{aligned} E_2(x', y', z_2) = & \frac{1}{4} \frac{in_L Z_0}{(sn_L + n_R z_2) + in_L Z_0} \exp\left\{ \frac{[n_R n_L Z_0^2 - n_L^2 Z_0^2 - iZ_0 n_R (sn_L + n_R z_2)] (x'^2 + y'^2)}{(sn_L + n_R z_2) (sn_L + n_R z_2 + in_L Z_0)} \right\} \times \\ & \left\{ \exp\left[\frac{(sn_L + n_R z_2) \alpha^2}{(sn_L + n_R z_2) + in_L Z_0} \right] \cos\left[\frac{2an_L Z_0 x'}{(sn_L + n_R z_2) + in_L Z_0} \right] - 1 \right\} \times \\ & \left\{ \exp\left[\frac{(sn_L + n_R z_2) \alpha^2}{(sn_L + n_R z_2) + in_L Z_0} \right] \cos\left[\frac{2an_L Z_0 y'}{(sn_L + n_R z_2) + in_L Z_0} \right] - 1 \right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

当 $x' = y' = 0$ 时, 由(13)式可得 ShSGB 在左手平板材料中的轴上场分布表达式为

$$E_2(0, 0, z_2) = \frac{1}{4} \frac{in_L Z_0}{(sn_L + n_R z_2) + in_L Z_0} \times \left\{ \exp\left[\frac{(sn_L + n_R z_2) \alpha^2}{(sn_L + n_R z_2) + in_L Z_0} \right] - 1 \right\}^2. \quad (14)$$

利用 $I_2(0, 0, z_2) = E_2(0, 0, z_2) \times E_2^*(0, 0, z_2)$ 可得其轴上光强分布公式为

$$\begin{aligned} I_2(0, 0, z_2) = & \frac{1}{16} \frac{n_L^2 Z_0^2}{(sn_L + n_R z_2)^2 + n_L^2 Z_0^2} \times \left\{ \exp\left[\frac{2\alpha^2 (sn_L + n_R z_2)^2}{(sn_L + n_R z_2)^2 + n_L^2 Z_0^2} \right] - \right. \\ & \left. 2 \exp\left[\frac{\alpha^2 (sn_L + n_R z_2)^2}{(sn_L + n_R z_2)^2 + n_L^2 Z_0^2} \right] \times \cos\left[\frac{n_L Z_0}{(sn_L + n_R z_2)^2 + n_L^2 Z_0^2} \right] + 1 \right\}^2. \end{aligned} \quad (15)$$

同理, 光束通过左手平板材料后到达自由空间(Ⅲ区)时, 传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z_3 + s + \frac{n_R d}{n_L} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中 z_3 为 ShSGB 通过左手平板材料后的传输距离, d 为左手平板材料的厚度。将(16)式代入(7)式, 可得 ShSGB 通过左手平板材料后的光场分布表达式为

$$\begin{aligned} E_3(x', y', z_3) = & \frac{1}{4} \frac{in_L Z_0}{(n_L z_3 + sn_L + n_R d) + in_L Z_0} \exp\left\{ \frac{[-iZ_0 n_L (n_L z_3 + sn_L + n_R d)] (x'^2 + y'^2)}{(n_L z_3 + sn_L + n_R d) (n_L z_3 + sn_L + n_R d + in_L Z_0)} \right\} \times \\ & \left\{ \exp\left[\frac{(n_L z_3 + sn_L + n_R d) \alpha^2}{(n_L z_3 + sn_L + n_R d) + in_L Z_0} \right] \cos\left[\frac{2an_L Z_0 x'}{(n_L z_3 + sn_L + n_R d) + in_L Z_0} \right] - 1 \right\} \times \\ & \left\{ \exp\left[\frac{(n_L z_3 + sn_L + n_R d) \alpha^2}{(n_L z_3 + sn_L + n_R d) + in_L Z_0} \right] \cos\left[\frac{2an_L Z_0 y'}{(n_L z_3 + sn_L + n_R d) + in_L Z_0} \right] - 1 \right\}. \end{aligned} \quad (17)$$

当 $x' = y' = 0$ 时, 由(17)式可得 ShSGB 通过左手平板材料后的轴上场分布表达式为

$$E_3(0, 0, z_3) = \frac{1}{4} \frac{in_L Z_0}{(sn_L + n_R d + n_L z_3) + in_L Z_0} \times \left\{ \exp\left[\frac{(sn_L + n_R d + n_L z_3) \alpha^2}{(sn_L + n_R d + n_L z_3) + in_L Z_0} \right] - 1 \right\}^2. \quad (18)$$

利用 $I_3(0, 0, z_3) = E_3(0, 0, z_3) \times E_3^*(0, 0, z_3)$ 可得其轴上光强分布公式为

$$\begin{aligned} I_3(0, 0, z_3) = & \frac{1}{16} \frac{n_L^2 Z_0^2}{(sn_L + n_R d + n_L z_3)^2 + n_L^2 Z_0^2} \times \left\{ \exp\left[\frac{2\alpha^2 (sn_L + n_R d + n_L z_3)^2}{(sn_L + n_R d + n_L z_3)^2 + n_L^2 Z_0^2} \right] - \right. \\ & \left. 2 \exp\left[\frac{\alpha^2 (sn_L + n_R d + n_L z_3)^2}{(sn_L + n_R d + n_L z_3)^2 + n_L^2 Z_0^2} \right] \times \cos\left[\frac{n_L z_0}{(sn_L + n_R d + n_L z_3)^2 + n_L^2 Z_0^2} \right] + 1 \right\}^2. \end{aligned} \quad (19)$$

对(11)、(15)和(19)式求 $dI/dz = 0$, 可得轴上最大光强对应位置满足的方程。因该方程形式复杂, 且得不到解析解, 故在此没有列出其表达式, 对其讨论和分析主要利用数值方法。

3 数值计算及分析

3.1 ShSGB 在自由空间 (I 区) 的传输

对(11)式进行数值计算,可得 ShSGB 在自由空间传输时轴上归一化光强 $I_1/I_{1\max}$ 随偏心参数 α 的变化曲线,如图 2 所示,计算时取 $n_R=1, \lambda=1.06 \times 10^{-3} \text{ mm}, Z_0=2.67 \text{ mm}$ 。分析图 2 可知,ShSGB 在自由空间传输时,由于光束自身的特性出现了一个光强极大值,且其位置受偏心参数的影响,偏心参数越大,光强最大处离光源越远。

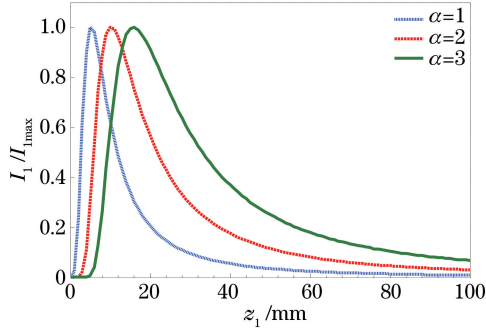


图 2 不同偏心参数条件下轴上归一化光强分布 (I 区)

Fig. 2 Axial normalized intensity distribution for different decentered parameters (region I)

对(9)式进行数值计算,可得 ShSGB 在自由空间传输时的横向光强分布。横向光强 I_1 随传输距离的变化情况如图 3 所示,计算时取偏心参数 $\alpha=1$ 。结果表明,横向光强的中心光强随传输距离的变化规律与轴上归一化光强的分布规律相符;随着传输距离 z 值的增大,横向光强的峰值先减小后增大再减小,且由原来对称的 4 个主峰结构演化为中心逐渐突出的多峰结构,直至成为单峰,且光强逐渐减弱。

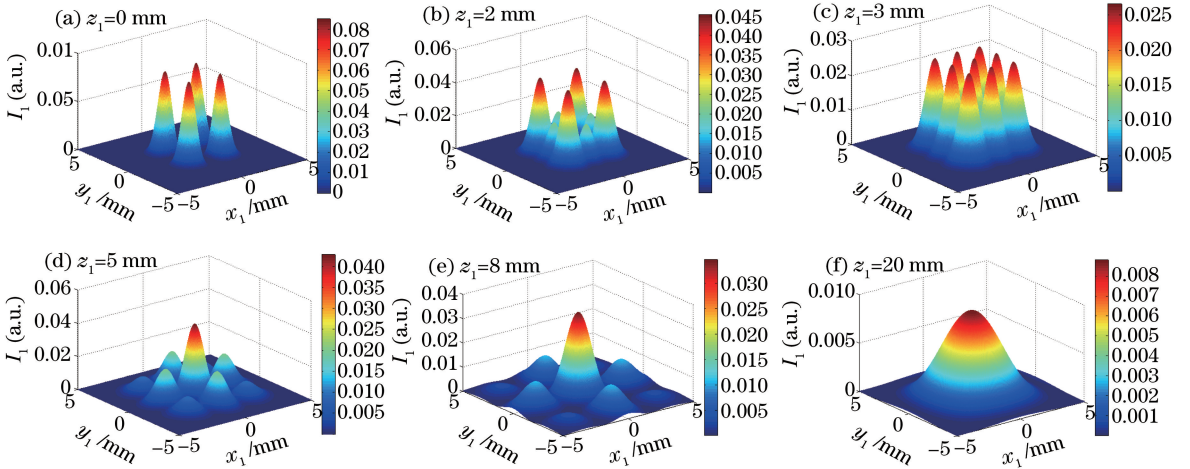


图 3 不同距离的横向光强分布 (I 区)

Fig. 3 Transversal intensity distribution for different distances (region I)

$z=8 \text{ mm}$ 时横向光强 I_1 随偏心参数 α 的变化情况如图 4 所示,图 4(d)~(f) 分别为图 4(a)~(c) 的俯视图。结果表明,光强峰值随偏心参数的增大而迅速增大,中心光强逐渐减弱,衍射旁瓣增大变多,光束逐渐扩散,光束质量下降。观察图 4(d)~(f) 可知,光斑形状随参数的改变而发生变化,从而为光束整形提供了更多的可能性。

3.2 ShSGB 在左手平板材料中 (II 区) 的传输

对(15)式进行数值计算,取 $n_R=1, \lambda=1.06 \times 10^{-3} \text{ mm}, Z_0=2.67 \text{ mm}, s=50 \text{ mm}$,可得 ShSGB 在左手平板材料中传输时的轴上归一化光强分布曲线。

轴上归一化光强 $I_2/I_{2\max}$ 随负折射率 n_L 的变化曲线如图 5 所示,计算时取偏心参数 $\alpha=2.5$ 。结果表明,ShSGB 在左手平板材料中传输时出现了两个光强极大值,且光强极大值随着负折射率绝对值的增大逐

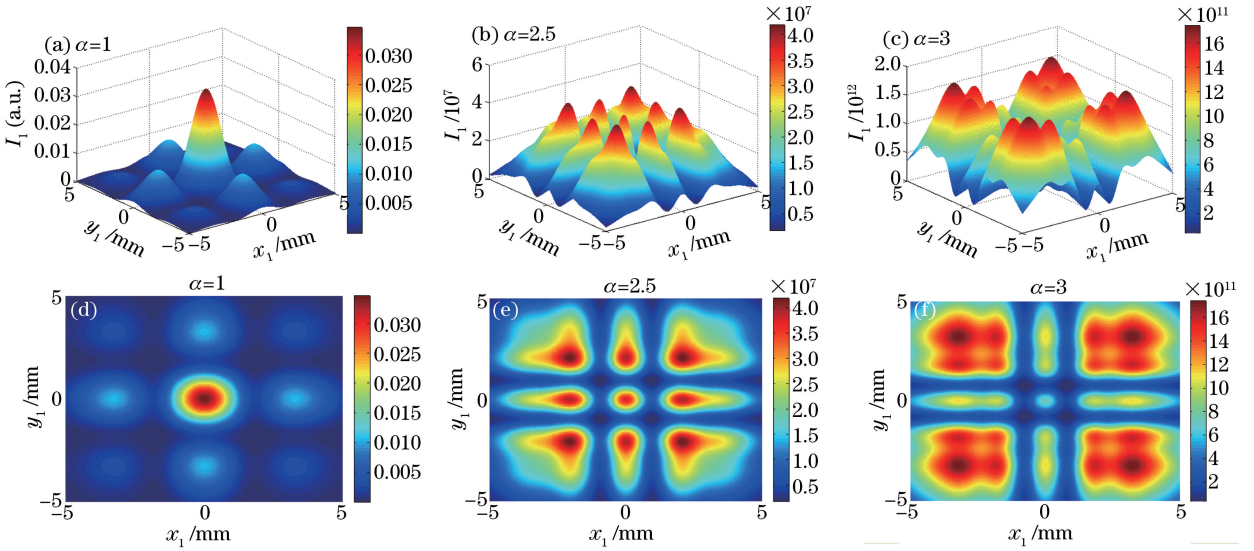


图4 $z=8$ mm时不同偏心参数条件下的横向光强分布(I区)

Fig. 4 Transversal intensity distribution for different decentered parameters at $z=8$ mm (region I)

渐远离左手平板材料的前表面。

轴上归一化光强 $I_2/I_{2\max}$ 随偏心参数 α 的变化曲线如图6所示,保持其他参数不变,取 $n_L=-1$ 。结果表明,轴上光强的极小值不受偏心参数的影响,但随着偏心参数的增大,极大值间的距离增大。与自由空间中传输的轴上光强分布相比,ShSGB在左手材料中的轴上光强呈对称分布,这是此类材料对ShSGB传输产生影响的结果。

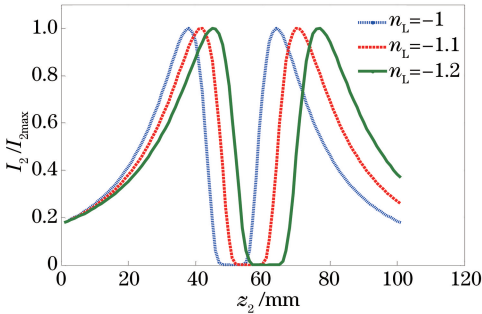


图5 不同负折射率条件下轴上归一化光强分布(II区)

Fig. 5 Axial normalized intensity distribution for different negative refractive indices (region II)

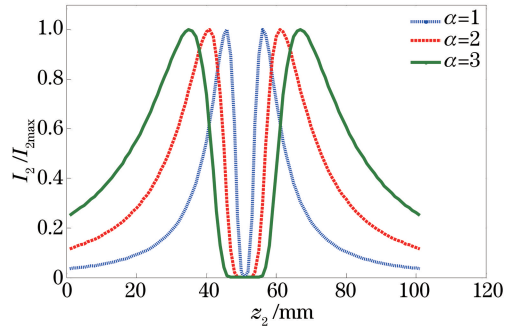


图6 不同偏心参数条件下轴上归一化光强分布(II区)

Fig. 6 Axial normalized intensity distribution for different decentered parameters (region II)

对(13)式进行数值计算,取 $n_L=-1, n_R=1, \lambda=1.06 \times 10^{-3}$ mm, $Z_0=2.67$ mm, $s=50$ mm。计算得到ShSGB在左手平板材料中传输的横向光强分布情况。研究发现, $z=50$ mm时,横向光强值等于0, $z=0 \sim 50$ mm区段与 $z=50 \sim 100$ mm区段的横向光强分布关于 $z=50$ mm对称。故只给出 $z=50 \sim 100$ mm区段内几个代表性位置处的横向光强分布。

横向光强随传输距离的变化情况如图7所示,计算时取偏心参数 $\alpha=1$ 。ShSGB在 $z=58$ mm时横向光强随偏心参数的变化情况如图8所示,图8(d)~(f)分别为图8(a)~(c)的俯视图。分别对比图3与图7、图4与图8发现,ShSGB在左手平板材料中传输时的横向光强分布规律与ShSGB在自由空间传输时基本相同。此外,横向光强分布随传输距离的增加逐渐扩展,与文献[24]研究结果一致。

3.3 ShSGB通过左手平板材料后(III区)的传输

对(19)式进行数值计算,取 $n_R=1, \lambda=1.06 \times 10^{-3}$ mm, $Z_0=2.67$ mm, $s=50$ mm, $d=100$ mm,得到ShSGB通过左手平板材料后的轴上归一化光强分布曲线。

轴上归一化光强 $I_3/I_{3\max}$ 随负折射率 n_L 的变化曲线如图9所示,取偏心参数 $\alpha=2.5$ 。结果表明,

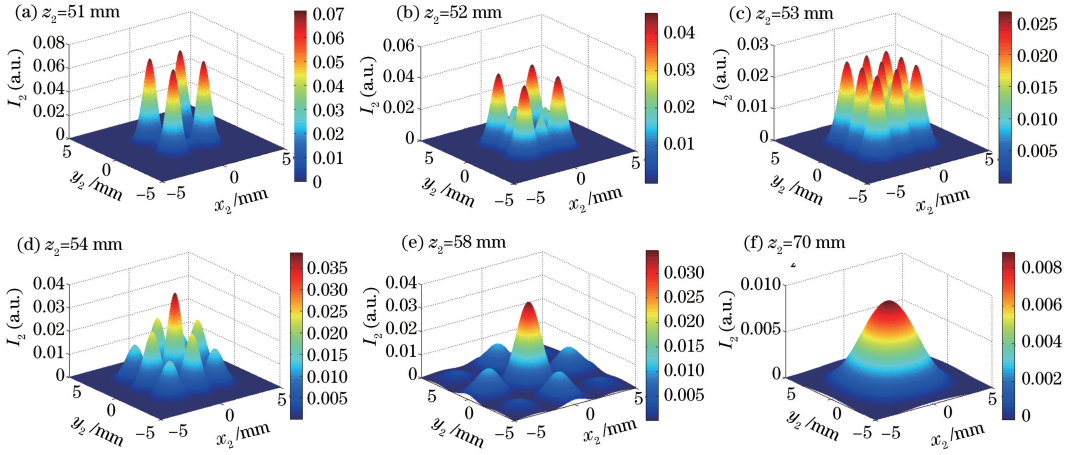


图7 不同距离的横向光强分布(II区)

Fig. 7 Transversal intensity distribution for different distances (region II)

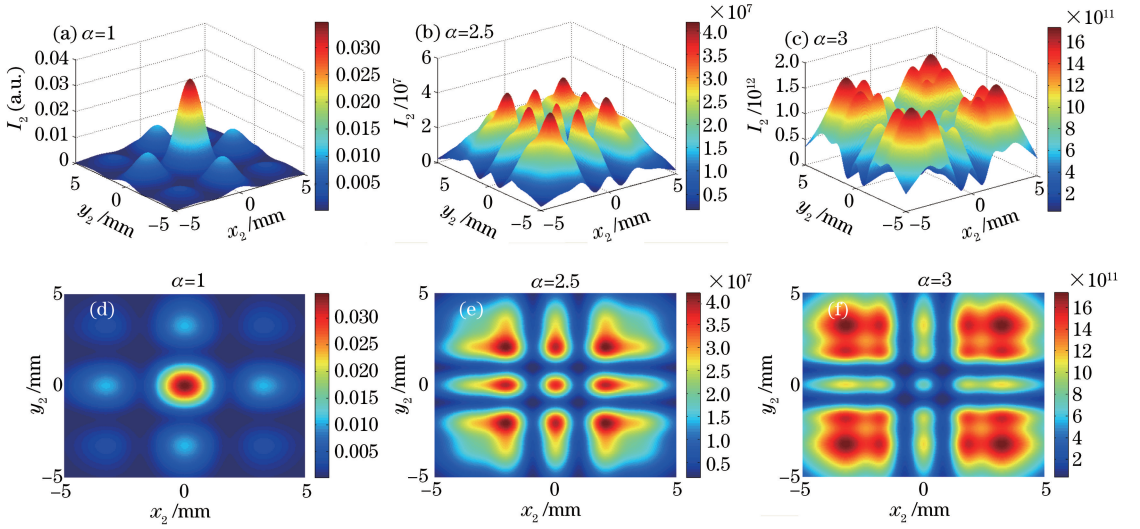


图8 $z=58$ mm 时不同偏心参数条件下的横向光强分布(II区)

Fig. 8 Transversal intensity distribution for different decentered parameters at $z=58$ mm (region II)

ShSGB 通过左手平板材料后的传输过程中也出现了两个光强极大值,且光强极大值随负折射率绝对值的增大逐渐靠近材料。

轴上归一化光强 I_3/I_{3max} 随偏心参数 α 的变化曲线如图 10 所示,取 $n_L=-1$ 。对比图 6 发现,在 II 区和 III 区,偏心参数对 ShSGB 轴上归一化光强的影响基本相同。

对(17)式进行数值计算,得到 ShSGB 通过左手平板材料后的横向光强分布情况。结果表明,ShSGB 在

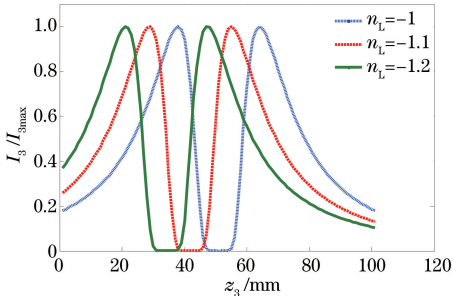


图9 不同负折射率条件下轴上归一化光强分布(III区)

Fig. 9 Axial normalized intensity distribution for different negative refractive indices (region III)

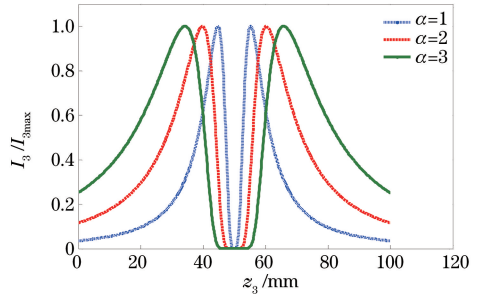


图10 不同偏心参数条件下轴上归一化光强分布(III区)

Fig. 10 Axial normalized intensity distribution for different decentered parameters (region III)

Ⅲ区中的横向光强分布与其在Ⅱ区中的横向光强分布基本相同,不再另作讨论。

4 结 论

研究了 ShSGB 在自由空间(Ⅰ区)、左手平板材料内部(Ⅱ区)以及通过左手平板材料后(Ⅲ区)的传输特性。推导的解析公式(7)式可用于研究 ShSGB 在其他一阶 ABCD 光学系统中的传输特性。研究发现, ShSGB 在自由空间传输时轴上归一化光强分布只有一个极大值,而在左手平板材料中有两个,且轴上光强和横向光强均呈对称分布。由此可见,左手材料对 ShSGB 轴上光强和横向光强分布规律的影响是使光强的分布呈现对称性。左手平板材料的折射率变化对 ShSGB 轴上归一化光强的影响与文献[20]研究结果一致,在Ⅱ区,光强极大值随负折射率绝对值的增大逐渐远离左手平板材料的前表面,在Ⅲ区,光强极大值随负折射率绝对值的增大逐渐靠近左手平板材料。

研究还发现, ShSGB 在Ⅰ区、Ⅱ区和Ⅲ区传输时,横向光强随传输距离的增大均由对称的 4 个主峰结构演化为中心逐渐突出的多峰结构,而随着偏心参数的增大,中心光强逐渐减弱,衍射旁瓣增大变多,光束逐渐扩展,光束质量下降。轴上光强分布规律为:在Ⅰ区,偏心参数越大,光强最大处离光源越远;在Ⅱ区和Ⅲ区,偏心参数越大,两个光强极大值距离越远。上述结果表明, ShSGB 不能保持其传输不变性,轴上光强和横向光强均随传输距离和偏心参数的改变而发生变化。故实际应用中,可用改变偏心参数的方法在不同位置对光束进行整形。

参 考 文 献

- 1 Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509-514.
- 2 Smith D R, Padilla W J, Vier D C, *et al.*. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. Physical Review Letters, 2000, 84(18): 4184-4187.
- 3 Smith D R, Kroll N. Negative refractive index in left-handed materials [J]. Physical Review Letters, 2000, 85(14): 2933-2936.
- 4 Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. Science, 2001, 292(5514): 77-79.
- 5 Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. Physical Review Letters, 2000, 85(18): 3966-3969.
- 6 Shadrivov I V, Sukhorukov A A, Kivshar Y S. Guided modes in negative-refractive-index waveguides [J]. Physical Review E, 2003, 67(5): 057602.
- 7 Shadrivov I V, Sukhorukov A A, Kivshar Y S, *et al.*. Nonlinear surface waves in left-handed materials [J]. Physical Review E, 2004, 69(1): 016617.
- 8 Brock J B, Houck A A, Chuang I L. Focusing inside negative index materials [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(13): 2472-2474.
- 9 Zheng Qing, Zhao Xiaopeng, Fu Quanhong, *et al.*. Reflection and negative refraction of left-handed metamaterials at microwave frequencies [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(12): 5683-5687.
郑 晴, 赵晓鹏, 付全红, 等. 左手材料的反射特性与负折射率行为 [J]. 物理学报, 2005, 54(12): 5683-5687.
- 10 彭景翠, 翦知渐, 欧阳玉, 等. 左手材料的光学特性及其应用 [J]. 功能材料信息, 2006, 3(6): 10-14.
- 11 Shi Gang, Cen Jieping, Fan Li, *et al.*. Characteristics of total reflection at interface between left-handed and right-handed materials [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(8): 4653-4656.
石 刚, 岑洁萍, 樊 莉, 等. 左右手系材料界面处全反射行为的特性 [J]. 物理学报, 2007, 56(8): 4653-4656.
- 12 Jiang Meiping, Chen Xianfeng, Ni Chongwen. Propagation properties of a left-handed material slab waveguide [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(1): 193-197.
蒋美萍, 陈宪锋, 倪重文. 左手材料平板波导的传输特性 [J]. 中国激光, 2009, 36(1): 193-197.
- 13 Shen Lufa, Jiang Liping, Wang Zihua. Propagation properties of guided modes in an optical fiber with anisotropy metamaterials [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0905007.
沈陆发, 江丽萍, 王子华. 各向异性左手材料光纤的传输特性 [J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0905007.
- 14 Xu Hanle, Zhu Xiaoping, Zhou Zhou, *et al.*. Investigation of LHM numerical simulation and scattering property [J]. Aeronautical Computing Technique, 2015, 45(3): 52-55.

- 徐含乐, 祝小平, 周 洲, 等. 左手材料数值模拟与散射特性研究[J]. 航空计算技术, 2015, 45(3): 52-55.
- 15 Luo H L, Hu W, Ren Z Z, *et al.*. Focusing and phase compensation of paraxial beams by a left-handed material slab[J]. Optics Communications, 2006, 266(1): 327-331.
- 16 Pinchuk A O, Schatz G C. Focusing a beam of light with left-handed metamaterials[J]. Solid-State Electronics, 2007, 51(10): 1381-1386.
- 17 Cao Jingxiao, Hu Wei, Luo Hailu, *et al.*. The vectorial properties of paraxial beams propagating in uniaxial left-handed materials[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(4): 2131-2138.
曹京晓, 胡 巍, 罗海陆, 等. 傍轴光束在单轴左手介质中传输的矢量性质[J]. 物理学报, 2007, 56(4): 2131-2138.
- 18 Zhou J H, Luo H L, Wen S C, *et al.*. ABCD matrix formalism for propagation of Gaussian beam through left-handed material slab system[J]. Optics Communications, 2009, 282(14): 2670-2675.
- 19 Yi Xunong, Liu Jinsong, Chen Huan, *et al.*. Analysis of focusing properties for paraxial Gaussian beam focused by a left-handed material slab[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(6): 883-887.
易煦农, 刘劲松, 陈 欢, 等. 左手材料平板对傍轴高斯光束聚焦特性分析[J]. 应用光学, 2010, 31(6): 883-887.
- 20 Bao Jianqin, Zhang Tingrong, Huo Yajie. Propagation properties of cosine-Gaussian beam through a left-handed material slab[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(6): 1231-1237.
包建勤, 张廷蓉, 霍雅洁. 余弦高斯光束通过左手平板材料的传输特性[J]. 光电子·激光, 2013, 24(6): 1231-1237.
- 21 Huo Yajie, Zhang Tingrong, Bao Jianqin. Propagation properties of Hermite-cosine-Gaussian beam through a negative refractive index materials slab[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 041401.
霍雅洁, 张廷蓉, 包建勤. 厄米-余弦-高斯光束通过负折射率平板材料的传输特性[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 041401.
- 22 Huang Yongchao, Cai Dafeng, Zhang Tingrong. Influence of a left-handed material slab on the spot of sin-Gaussian beams [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 072601.
黄永超, 蔡达锋, 张廷蓉. 左手平板材料对正弦高斯光束的光斑影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 072601.
- 23 Huang Yongchao, Zhang Tingrong. Propagation of complex variables sinh-Gaussian beams through a left-handed material [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2015, 13(4): 75-78.
黄永超, 张廷蓉. 复变量双曲正弦高斯光束在左手材料中的传输[J]. 光学与光电技术, 2015, 13(4): 75-78.
- 24 Huang Yongchao, Cai Dafeng, Zhang Tingrong. Propagation properties of cosh-Gaussian beams through a left-handed material slab[J]. Optical Technique, 2015, 41(5): 430-432.
黄永超, 蔡达锋, 张廷蓉. 双曲余弦高斯光束在左手平板材料中的传输特性[J]. 光学技术, 2015, 41(5): 430-432.
- 25 Casperson L W, Hall D G, Tovar A A. Sinusoidal-Gaussian beams in complex optical systems[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1997, 14(12): 3341-3348.
- 26 Casperson L W, Hall D G, Tovar A A. Hermite-sinusoidal-Gaussian beams in complex optical systems[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1998, 15(4): 954-961.
- 27 Tovar A A, Casperson L W. Production and propagation of Hermite-sinusoidal-Gaussian laser beams[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1998, 15(9): 2425-2432.
- 28 Wang Xiqing, Ke Zunping, Lü Baida. Propagation properties of cosine-Gaussian beams[J]. Laser Technology, 2001, 25(2): 121-125.
王喜庆, 柯尊平, 吕百达. 余弦高斯光束的传输特性[J]. 激光技术, 2001, 25(2): 121-125.
- 29 Ma Hong, Lü Baida, Zhang Bin. Sinh-Gaussian beams and their transformation properties[J]. Chinese J Lasers, 2000, 27(8): 697-702.
马 虹, 吕百达, 张 彬. 双曲正弦高斯光束及其变换特性的研究[J]. 中国激光, 2000, 27(8): 697-702.
- 30 Lü B D, Ma H, Zhang B. Propagation properties of cosh-Gaussian beams[J]. Optics Communications, 1999, 164(4-6): 165-170.
- 31 Chen Tianlu, Wu Ping. Fractional Fourier transforms for cosh-Gaussian beams[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(7): 908-912.
陈天禄, 吴 平. 双曲余弦-高斯光束的分数傅里叶变换特性研究[J]. 中国激光, 2005, 32(7): 908-912.
- 32 Zhu K C, Tang H Q, Zhu Z H. Beam propagation factor and generation of cosh-squared-Gaussian beams[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, B10(6): 446-449.
- 33 Zhu Kaicheng, Zhu Zhenghe, Tang Huiqin. Propagation behavior of cosh-squared-Gaussian beams[J]. Laser Technology, 2002, 26(3): 192-193.
朱开成, 朱正和, 唐慧琴. 双曲余弦平方-高斯光束的传输特性研究[J]. 激光技术, 2002, 26(3): 192-193.

- 34 Kong Ruixia. A study on propagation properties of elegant beams[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
孔瑞霞. 复宗量光束的传输特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- 35 王喜庆. 双曲正弦平方-高斯光束的聚焦特性[J]. 学术动态, 2006(1): 27-29.
- 36 Chen S H, Zhang T R, Feng X F. Propagation properties of cosh-squared-Gaussian beam through fractional Fourier transform systems[J]. Optics Communications, 2009, 282(6): 1083-1087.
- 37 Hashemi S S, Sabouri S G, Soltanolkotabi M. A study of propagation of cosh-squared-Gaussian beam through fractional Fourier transform systems[J]. Optica Applicata, 2011, 41(4): 897-909.
- 38 Jiang M P, Yu N N, Jin Y, *et al.*. Far-field properties of vectorial cosh-squared-Gaussian beams beyond the paraxial approximation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 143-144: 204-210.
- 39 Li Yantao, Zhang Tingrong, Zhang Weilin, *et al.*. Propagation of sinh-squared-Gaussian beams in uniaxial crystals orthogonal to the optical axis[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 062601.
李艳桃, 张廷蓉, 张伟林, 等. 双曲正弦平方-高斯光束在单轴晶体中垂直于光轴的传输[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6): 062601.
- 40 Lü Baida. Laser optics: Beam characterization, propagation and transformation, resonator technology and physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 11-12.
吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 11-12.