

УДК 530.1

Академик А. М. ГОНЧАРЕНКО

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ СЕЛФОКАХ

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск

Поступило 01.09.2014

Сейчас активно исследуются среды с отрицательным значением показателя преломления [1–5]. Предполагается, что с помощью таких сред можно создавать плоские фокусирующие линзы, а также другие устройства с необычными свойствами. В данном сообщении исследованы особенности распространения гауссовых пучков света в отрицательных селфоках.

Распространение узких световых пучков достаточно хорошо определяется решением соответствующего параболического уравнения [6]. В случае отрицательной волноводной среды предполагаем, что постоянная распространения $k = k_0 - \frac{1}{2} \frac{\alpha}{k_0} \frac{x^2}{x_0^2}$. При этом $k_0 = -\sigma$, а σ , α – положительные величины*.

Параболическое уравнение представляем в виде

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + 2i\sigma \frac{\partial \psi}{\partial z} - \alpha \frac{x^2}{x_0^2} \psi = 0.$$

Перейдем для удобства к системе $x' = x\sqrt{\sigma}$ и получаем (штрихи опускаем)

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x'^2} + i \frac{\partial \psi}{\partial z} - \alpha_0 \frac{x'^2}{x_0'^2} \psi = 0 \quad (\alpha_0 = \alpha / 2\sigma). \tag{1}$$

Будем искать решение этого уравнения в виде следующего гауссова пучка:

$$\psi = \exp\left(i\gamma_1 - \gamma_2 - \frac{x'^2}{fx_0'^2} + i \frac{x'^2}{gx_0'^2}\right). \tag{2}$$

Здесь γ_1, γ_2, f, g – неизвестные функции от z . Подставляя (2) в уравнение (1), получаем следующую систему уравнений:

$$\gamma_1' + \frac{2}{fx_0'^2} = 0, \quad \gamma_2' - \frac{2}{gx_0'^2} = 0; \tag{3}$$

$$\frac{f'}{f} - \frac{8}{gx_0'^2} = 0, \quad \frac{4}{f^2 x_0'^2} - \frac{4}{g^2 x_0'^2} + \frac{g'}{g^2} - \alpha_0 = 0, \tag{4}$$

где штрих означает производную по z .

Уравнения (4) приводятся к следующему дифференциальному уравнению второго порядка:

$$2ff'' - f'^2 + \delta_1^2 f^2 - \delta_2^2 = 0. \tag{5}$$

При этом $\delta_1 = 4\sqrt{\alpha_0} / x_0$, $\delta_2 = 8 / x_0^2$. Решение уравнения (5) есть функция [7]

$$f = a + b \sin(\delta_1 z + \gamma).$$

* При $\alpha < 0$ получаем расходящееся решение.

Из граничных условий при $z = 0$ находим $\gamma = \frac{\pi}{2}$, $f(0) = f_0$. В итоге

$$f = a + b \cos \delta_1 z. \quad (6)$$

Здесь $a = \frac{1}{2} f_0 + \frac{1}{2} \frac{\delta_2^2}{\delta_1^2 f_0}$, $b = \frac{1}{2} f_0 - \frac{1}{2} \frac{\delta_2^2}{\delta_1^2 f_0}$.

Подставляя (6) в уравнения (3), (4), получаем

$$\gamma_1 = x_0 \sqrt{\alpha_0} \operatorname{arctg} \frac{2}{x_0 f \sqrt{\alpha_0}} \operatorname{tg} \frac{1}{2} \delta_1 z,$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{4} \ln(a + b \cos \delta_1 z),$$

$$g = -\frac{2}{x_0} \frac{a + b \cos \delta_1 z}{b \sqrt{\alpha_0} \sin \delta_1 z}.$$

Итак, получаем, что поле светового пучка в отрицательной среде может быть представлено в виде

$$u = (a + b \cos \delta_1 z)^{-1/4} \exp \left(i\omega t + i\sigma z + ix_0 \sqrt{\alpha_0} \operatorname{arctg} \frac{2}{x_0 f_0 \sqrt{\alpha_0}} \operatorname{tg} \frac{1}{2} \delta_1 z \right) \left(-i \frac{x^2}{2x_0} \frac{b \sqrt{\alpha_0} \sin \delta_1 z}{a + b \cos \delta_1 z} - \frac{x^2}{fx_0^2} \right).$$

Следовательно, световой пучок, как и в обычных средах, периодически изменяется с глубиной проникновения в отрицательную среду, а фазовый фронт его распространяется в обратном направлении: $v_\phi \sim \frac{dz}{dt} = -\frac{\omega}{\sigma_0} < 0$. Последнее и является характерной особенностью распространения света в отрицательных средах.

Литература

1. Веселаго В. Г. // УФН. 1967. Т. 92, вып. 7. С. 517–526.
2. Шевченко В. В. // УФН. 2011. Т. 181, вып. 11. С. 1171–1182.
3. Силин Р. А. // Оптика и спектроскопия. 1978. Т. 44, вып. 1. С. 189–191.
4. Pendry J. B. // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 85. P. 3966–3969.
5. Shadrivov I. V. et al. // Phys. Rev. 2003. Vol. E67. P. 057602–4.
6. Гончаренко А. М. Гауссовы пучки света. М., 2005.
7. Гончаренко А. М. // Весті НАН Беларусі, сер. фіз-мат. навук. 2008. № 4. С. 120.

A. M. GONCHARENKO

a.goncharenko@ifanbel.bas-net.by

PROPAGATION OF THE LIGHT BEAMS IN NEGATIVE MEDIA

Summary

It is considered same property of the propagation of the light beams in negative media.