

Четырехволновое взаимодействие в многомодовом волноводе с керровской нелинейностью в схеме с попутными волнами накачки

В.В. Ивахник, Д.Р. Капизов, В.И. Никонов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
443086, Российская Федерация, г. Самара
Московское шоссе, 34

С использованием метода функции размытия точки проанализировано качество преобразования изображения при четырехволновом взаимодействии на керровской нелинейности в многомодовом волноводе в схеме с попутными волнами накачки. Показано, что приосевые моды волновода полностью определяют вид функции размытия точки. Увеличение угла между волнами накачки приводит к возникновению «тонкой» структуры функции размытия точки. Период этой структуры с ростом угла между волнами накачки уменьшается.

Ключевые слова: четырехволновое взаимодействие, функция размытия точки, керровская нелинейность, волновод.

Введение

Для получения волны с обращенным волновым фронтом (ОВФ) при четырехволновом взаимодействии в волноводах в качестве основной рассматривается схема взаимодействия со встречными волнами накачки [1–8]. В этой схеме волна с обращенным волновым фронтом (объектная волна) распространяется навстречу сигнальной волне, наблюдается полное обращение волнового фронта. Еще одной схемой четырехволнового взаимодействия является схема с попутными волнами накачки, в которой объектная и сигнальная волны распространяются в одном направлении [8–12]. В такой схеме наблюдается обращение лишь поперечной составляющей волнового вектора сигнальной волны.

Если качество обращения волнового фронта при четырехволновом взаимодействии в схеме с попутными волнами накачки в пространственно неограниченных в поперечном направлении средах с различным типами нелинейности изучено достаточно подробно [8; 13–14], то аналогичные

работы по изучению четырехволнового взаимодействия в многомодовых волноводах отсутствуют.

В настоящей работе с использованием метода функции размытия точки (ФРТ) исследуется качество обращения волнового фронта четырехволновым преобразователем излучения в многомодовом волноводе с керровской нелинейностью в схеме с попутными волнами накачки.

1. Функция размытия точки четырехволнового преобразователя в волноводе

Рассмотрим вырожденное четырехволновое взаимодействие с попутными волнами накачки в волноводе с керровской нелинейностью, расположенном между плоскостями $z = 0$ и $z = \ell$. На волновод падают две волны накачки с комплексными амплитудами A_1 и A_2 и сигнальная волна с комплексной амплитудой A_3 . В результате вырожденного четырехволнового взаимодействия ($\omega + \omega - \omega = \omega$) генерируется объектная волна A_4 (рис. 1). Исходное уравнение, описывающее такое взаимодействие, есть [8]

$$\left[\nabla^2 + k_0^2 \varepsilon + \frac{12\pi\omega^2}{c^2} \chi^{(3)} A^3 \right] A = 0. \quad (1)$$

Здесь $A = \sum_{j=1}^4 A_j + \text{к.с.}$; $\chi^{(3)}$ – нелинейная восприимчивость третьего порядка; $k_0^2 = \frac{\omega^2}{c^2}$, ε – диэлектрическая проницаемость.

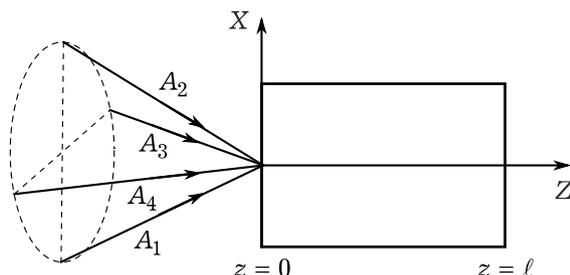


Рис. 1. Схема четырехволнового взаимодействия в волноводе

Разложим взаимодействующие волны по модам волновода

$$A_j = \sum_{n=0}^N a_{jn}(z) f_n(x, z), \quad j = 1, 4. \quad (2)$$

Здесь $f_n(x, z) = \tilde{f}_n(x) \exp\{-i\beta_n z\}$ – n -я мода волновода, при отсутствии в нем керровской нелинейности; β_n – постоянная распространения n -й моды; $a_{jn}(z)$ – коэффициенты в разложении амплитуд волн по модам волновода; N – число отсечки.

При рассмотрении четырехволнового взаимодействия используем следующие приближения:

- 1) интенсивность волн накачки намного больше интенсивностей сигнальной и объектной волн;
- 2) коэффициент преобразования маленький;
- 3) изменением показателя преломления за счет эффектов самовоздействия волн накачки можно пренебречь.

С учетом сделанных приближений из волнового уравнения (1) получим систему уравнений, описывающих изменение вдоль оси Z коэффициентов в разложении взаимодействующих волн по модам волновода

$$\frac{da_{1n}}{dz} = 0, \quad \frac{da_{2m}}{dz} = 0, \quad \frac{da_{3s}}{dz} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{da_{4r}}{dz} = i \frac{g}{\beta_r} \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^N \sum_{s=0}^N a_{1n} a_{2m} a_{3s}^* \gamma_{nmrs} \times \quad (4)$$

$$\times \exp\{-i\Delta_{nmrs} z\}.$$

Здесь $\gamma_{nmrs} = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}_n(x) \tilde{f}_m(x) \tilde{f}_s^*(x) \tilde{f}_r^*(x) dx$ – интеграл перекрытия;

$\Delta_{nmrs} = \beta_n + \beta_m - \beta_s - \beta_r$ – волновая расстройка; $g = \frac{12\pi\omega^2}{c^2} \chi^{(3)}$.

С учетом граничных условий

$$a_{3s}(z=0) = a_{s0}; \quad a_{4r}(z=0) = 0 \quad (5)$$

из (3)–(4) выражение для коэффициентов разложения объектной волны по модам волновода есть

$$a_{4r}(z=\ell) = i \frac{g\ell}{\beta_r} \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^N \sum_{s=0}^N a_{n0} a_{m0} a_{s0}^* \gamma_{nmrs} \times \quad (6)$$

$$\times \exp\left\{-i \frac{\Delta_{nmrs}\ell}{2}\right\} \sin c \frac{\Delta_{nmrs}\ell}{2},$$

где $a_{n0} = a_{1n}(z=0)$; $a_{m0} = a_{2m}(z=0)$.

Если сигнальной волной является волна от точечного источника, расположенного на передней грани волновода ($A_3(x, z=0) = \delta(x-x_0)$), то

$$a_{s0} = \tilde{f}_s(x_0). \quad (7)$$

С учетом (6) и (7) выражение для ФРТ четырехволнового преобразователя излучения в волноводе есть

$$\Gamma(x, x_0) = ig\ell \sum_{r=0}^N \frac{\tilde{f}_r(x)}{\beta_r} \times \quad (8)$$

$$\times \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^N \sum_{s=0}^N a_{n0} a_{m0} \tilde{f}_s(x_0) \gamma_{nmrs} \times$$

$$\times \exp\left\{-i \frac{\Delta_{nmrs}\ell}{2}\right\} \sin c \frac{\Delta_{nmrs}\ell}{2}.$$

Если волны накачки одномодовые ($A_1 = a_{n0} f_n$, $A_2 = a_{m0} f_m$), то выражение для ФРТ упрощается:

$$\Gamma_{nm}(x, x_0) = ig\ell a_{n0} a_{m0} \times \quad (9)$$

$$\times \sum_{r=0}^N \frac{\tilde{f}_r(x)}{\beta_r} \sum_{s=0}^N \tilde{f}_s(x_0) \gamma_{nmrs} \times$$

$$\times \exp\left\{-i \frac{\Delta_{nmrs}\ell}{2}\right\} \sin c \frac{\Delta_{nmrs}\ell}{2}.$$

Формально выражения для ФРТ четырехволновых преобразователей в схемах с попутными и встречными волнами накачки совпадают [8; 15], меняется лишь выражение для волновой расстройки, и, как следствие, меняются моды, участвующие в формировании ФРТ.

2. Четырехволновой преобразователь излучения в параболическом волноводе

Рассмотрим двумерный параболический волновод с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon(x) = \varepsilon_1 \left[1 - 2\varepsilon_2 \left(x/x_q\right)^2\right]$. Модами такого волновода являются функции Гаусса – Эрмита [16]

$$\tilde{f}_n(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\sqrt{2^n n! \omega_0}} H_n\left(\frac{x\sqrt{2}}{\omega_0}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{\omega_0^2}\right). \quad (10)$$

Здесь $H_n\left(\frac{x\sqrt{2}}{\omega_0}\right)$ – функция Эрмита n -го поряд-

ка; $\omega_0^2 = \frac{2x_q}{k\sqrt{2\varepsilon_2}}$.

Для приосевых мод $(2\sqrt{2\varepsilon_2}/x_q (n+1/2) \ll k)$ постоянная распространения есть

$$\beta_n \approx k - \frac{2\sqrt{2\varepsilon_2}}{x_q} \left(n + \frac{1}{2}\right). \quad (11)$$

С учетом (11) выражение для волновой расстройки переписывается следующим образом:

$$\Delta_{nmsr} = -\frac{2\sqrt{2\epsilon_2}}{x_q} [n + m - s - r]. \quad (12)$$

В длинных волноводах ($\Delta_{nmsr}l \gg 1$) условие фазового синхронизма определяет модовый состав объектной волны. Вид ФРТ, расположенной в центре поля зрения ($x_0 = 0$), и одномодовых волн накачки с четными номерами мод определяют моды с номерами $r = 0, m, n, m + n$:

$$\begin{aligned} \Gamma_{nm}^{(1)}(x) &= \frac{igla_{n0}a_{m0}}{k\omega_0} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{\omega_0^2}\right) \times \\ &\times \left\{ \frac{\gamma_{nmm}}{\sqrt{2^{n+m} m! n!}} \left[H_n\left(\frac{x\sqrt{2}}{\omega_0}\right) H_m(0) + \right. \right. \\ &+ \left. \left. H_m\left(\frac{x\sqrt{2}}{\omega_0}\right) H_n(0) \right] + \right. \\ &+ \left. \frac{\gamma_{0nmm+n}}{\sqrt{2^{n+m} m! n!}} \left[H_{n+m}(0) + H_{n+m}\left(\frac{x\sqrt{2}}{\omega_0}\right) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для одномодовых волн накачки с нечетными номерами мод вид ФРТ определяют моды с номерами $r = 0, m + n$:

$$\begin{aligned} \Gamma_{nm}^{(2)}(x) &= \frac{igla_{n0}a_{m0}}{k\omega_0} \frac{\gamma_{0nmm+n}}{\sqrt{2^{n+m} m! n!}} \times \\ &\times \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{\omega_0^2}\right) \left[H_{n+m}(0) + H_{n+m}\left(\frac{x\sqrt{2}}{\omega_0}\right) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Для одномодовых волн накачки с номерами мод различной четности ФРТ отсутствует.

По сравнению с четырехволновым преобразователем излучения в волноводе в схеме со встречными волнами накачки число мод волновода, участвующих в формировании ФРТ четырехволнового преобразователя излучения в схеме с попутными волнами накачки, резко уменьшается.

Наряду с условием фазового синхронизма существенную роль на вид ФРТ оказывает интеграл перекрытия. Подробный анализ интеграла перекрытия для мод параболического волновода приведен в работе [15].

Будем считать, что волны накачки, падающие на волновод, плоские:

$$A_1(x, z = 0) = \exp(-ikx \sin \theta_1),$$

$$A_2(x, z = 0) = \exp(-ikx \sin \theta_2).$$

Здесь $\theta_{1,2}$ – углы между оптической осью волновода и направлением распространения волн накачки.

Для волн накачки, падающих на переднюю грань волновода под одинаковыми малыми угла-

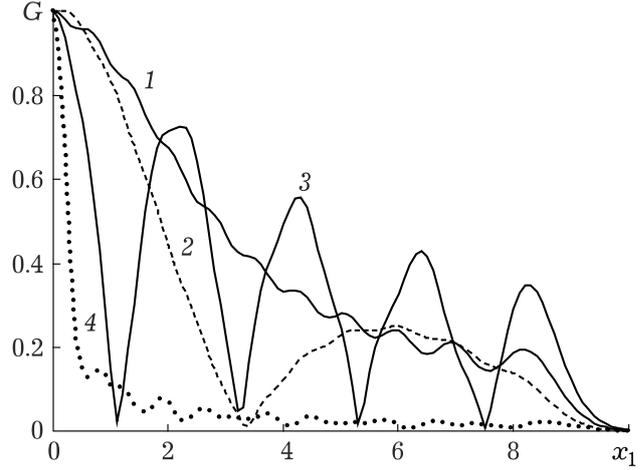


Рис. 2. Зависимость модуля ФРТ от нормированной поперечной координаты при $k\omega_0 = 40$, $\theta = 0, 1^\circ(1)$, $1^\circ(2)$, $3^\circ(3)$ для встречной геометрии взаимодействия (4)

ми ($\theta = \theta_1 = -\theta_2$, $\sin \theta_{1,2} = \theta_{1,2}$), выражения для коэффициентов в разложении волн накачки по модам волновода имеют вид

$$\begin{aligned} a_{1n} &= \frac{\sqrt{4\pi}}{\omega_0} \frac{2^{\frac{1}{4}} i^n}{\pi^{\frac{1}{4}} \sqrt{2^n n! \omega_0}} \times \\ &\times \exp\left(-\frac{k^2 \theta^2 \omega_0^2}{4}\right) H_n\left(\frac{k\theta \omega_0}{\sqrt{2}}\right), \\ a_{2m} &= \frac{\sqrt{4\pi}}{\omega_0} \frac{2^{\frac{1}{4}} (-i)^m}{\pi^{\frac{1}{4}} \sqrt{2^n m! \omega_0}} \times \\ &\times \exp\left(-\frac{k^2 \theta^2 \omega_0^2}{4}\right) H_m\left(\frac{k\theta \omega_0}{\sqrt{2}}\right). \end{aligned} \quad (15)$$

С учетом (15) для длинного волновода выражение для ФРТ примет вид

$$\begin{aligned} \Gamma^{(1)}(x) &= \frac{i8gl}{k\omega_0^4} \exp\left(-\frac{x^2}{\omega_0^2}\right) \times \\ &\times \sum_{r=0}^{N_1} \sum_{n=0}^{N_1} \sum_{m=0}^{N_1} \frac{i^n (-i)^m \gamma_{nmrn+m-r}}{\sqrt{2^{2(n+m-r)} n! m! (n+m)!}} \times \\ &\times \exp\left(-\frac{k^2 \sin^2 \theta \omega_0^2}{2}\right) H_n\left(\frac{k \sin \theta \omega_0}{\sqrt{2}}\right) \times \\ &\times H_m\left(\frac{k \sin \theta \omega_0}{\sqrt{2}}\right) H_{n+m-r}(0) H_r\left(\frac{x\sqrt{2}}{\omega_0}\right). \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь N_1 – число мод волновода, учитываемых при расчете ФРТ.

3. Обсуждение результатов

На рис. 2 приведены нормированные на максимальное значение ($\Gamma_{\max}^{(1)}$) характерные графики

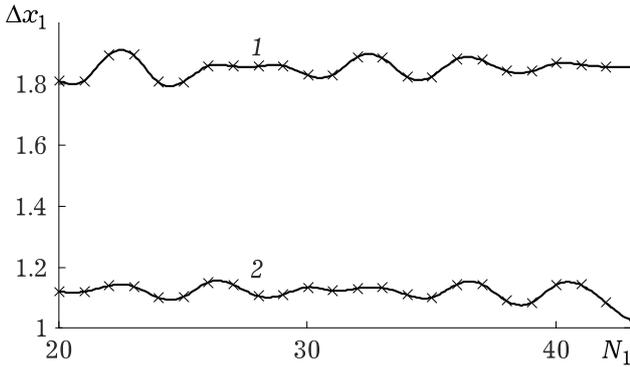


Рис. 3. Зависимости полуширины центрального максимума ФРТ от количества мод волновода, учитываемых при расчете ФРТ, при $k\omega_0 = 40$, $\theta = 1^\circ$ (1), 2° (2)

зависимостей модуля ФРТ ($G = |\Gamma^{(1)}(x)| / \Gamma_{\max}^{(1)}$) от нормированной поперечной координаты ($x_1 = x\sqrt{2}/\omega_0$) при различных углах падения волн накачки на переднюю грань волновода. При расчете графиков считалось, что количество приосевых мод, используемых при нахождении ФРТ, определяется из условия $N_1 = \lfloor 0,1(k\omega_0)^2 / 4 \rfloor$. Для сравнения на рис. 2 (кривая 4) приведен график зависимости модуля ФРТ от поперечной координаты для четырехволнового преобразователя в схеме со встречными волнами накачки. Полуширина модуля ФРТ такого преобразователя (Δx), определяемая из решения уравнения $G(x = \Delta x) = 0,5$, (17)

не меняется при изменении угла падения волн накачки на грани волновода.

При $k\omega_0 = 40$ и угле падения волн накачки $\theta \rightarrow 0$ полуширина модуля ФРТ четырехволнового преобразователя в схеме с попутными волнами накачки полностью определяется параметром волновода ω_0 ($\Delta x \approx 2,07\omega_0$) и более чем на порядок превышает полуширину модуля ФРТ четырехволнового преобразователя в схеме со встречными волнами накачки ($\Delta x \approx 0,19\omega_0$).

Увеличение угла падения волн накачки приводит к возникновению «тонкой» структуры ФРТ, т. е. появляются боковые максимумы, количество и величина которых возрастает. При этом расстояние между побочными максимумами уменьшается, а ширина огибающей модуля ФРТ увеличивается.

При больших углах падения ($1^\circ < \theta < 5^\circ$), как следует из анализа коэффициентов в разложении волн накачки по модам волновода, основная энергия волн накачки распределена на высоких модах волновода. Это приводит к росту коэффициентов, соответствующих высоким модам,

в разложении амплитуды объектной волны по модам волновода и как следствие — увеличению энергии, сосредоточенной в побочных максимумах ФРТ. Количество побочных максимумов возрастает с увеличением параметра $k\omega_0$.

Сходное поведение ФРТ в зависимости от угла между волнами накачки наблюдается и для четырехволнового преобразователя с попутными волнами накачки в пространственно не ограниченной по поперечным размерам среде с керровской нелинейностью [8].

На рис. 3 для двух углов падения волн накачки приведены зависимости нормированной полуширины центрального максимума ($\Delta x_1 = \Delta x\sqrt{2} / \omega_0$) от количества мод волновода, учитываемых при расчете ФРТ. Так, для волновода с параметром $k\omega_0 = 40$ увеличение числа мод от 30 до 40 при угле падения волн накачки $\theta = 1^\circ$ изменяет полуширину центрального максимума на 2,7 %, а при угле падения $\theta = 2^\circ$ — 3,3 %. Количество мод волновода, учитываемое при расчете ФРТ, при котором полуширина центрального максимума этой функции с погрешностью $\pm 3\%$ перестает меняться с увеличением количества мод, меньше, чем число приосевых мод. Таким образом, учет приосевых мод волновода полностью определяет вид и полуширину центрального максимума ФРТ четырехволнового преобразователя в схеме с попутными волнами накачки.

Заметим, что характер поведения ФРТ четырехволнового преобразователя не изменится, если в качестве волн накачки используются не плоские волны, а волны с гауссовым профилем.

Заключение

Получено выражение для ФРТ четырехволнового преобразователя излучения в параболическом волноводе с керровской нелинейностью в схеме с попутными волнами накачки. При одномодовых волнах накачки вид ФРТ полностью определяют четыре (номера мод волн накачки четные) или две (номера мод волн накачки нечетные) моды объектной волны. При падении на переднюю грань волновода под одинаковыми углами плоских волн накачки полуширина центрального максимума полностью определяется приосевыми модами волновода. С увеличением угла падения наблюдается возникновение «тонкой» структуры ФРТ. При этом ширина огибающей модуля ФРТ увеличивается, а расстояние между побочными максимумами уменьшается.

Список литературы

- Hellwarth R.W. Optical beam phase conjugation by four-wave mixing in a waveguide // *Optical Engineering*. 1982. Vol. 21. № 2. P. 263–265. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.7972892>.
- Lor K.P., Chiang K.S. Theory of nondegenerate four-wave mixing in a birefringent optical fibre // *Optics Communications*. 1998. Vol. 152. № 1–3. P. 26–30.
- Wolffer N., Gravey P. Effect of the lateral dimensional on the grating formation and stability in the double-phase-conjugate mirror: Application to interconnects between single-mode fibres // *Applied Physics B*. 1999. Vol. 68. № 5. P. 947–951. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003400050728>.
- Запись динамических голограмм в нелинейно-оптическом покрытии планарного волновода / Н.М. Кожевников [и др.] // *Оптика и спектроскопия*. 2003. Т. 94. № 4. С. 676–682.
- Ивахник В.В., Никонов В.И., Харская Т.Г. Четырехволновое преобразование излучения на тепловой нелинейности в световоде с параболическим профилем // *Известия вузов. Приборостроение*. 2006. Т. 49. № 8. С. 54–60.
- Partial compensation of Kerr nonlinearities by optical phase conjugation in optical fiber transmission systems without power symmetry / Xiao Xiaosheng [et al.] // *Optics Communications*. 2006. Vol. 265. № 1. P. 326–330.
- Воробьева Е.В., Ивахник В.В., Кауров А. Пространственные характеристики четырехволнового преобразователя излучения в многомодовом световоде с резонансной нелинейностью // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2018. Т. 21. № 1. С. 4–11.
- Ивахник В.В. Обращение волнового фронта при четырехволновом взаимодействии. Самара: Самарский университет, 2010. 246 с.
- Сухоруков А.П., Титов В.Н., Трофимов В.А. Попутное четырехволновое взаимодействие в условиях сильного энергообмена волн // *Оптика атмосферы*. 1989. Т. 2. № 10. С. 1099–1106.
- Photorefractive light amplification by forward four-wave mixing / J. Neuman [et al.] // *Optics Communications*. 1998. Vol. 146. № 1. P. 220–224. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(97\)00540-3](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(97)00540-3).
- Shu Jia, Wenjie Wan, Jason W. Fleischer Forward four-wave mixing with defocusing nonlinearity // *Optics Letters*. 2007. Vol. 32. № 12. P. 1668–1670. DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.32.001668>.
- Competition and energy Transfer between forward and backward four-wave mixing via atomic coherence / Lin Cheng [et al.] // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2017. Vol. 53. № 2. P. 9100205. DOI: <https://doi.org/10.1109/JQE.2017.2677378>.
- Акимов А.А., Воробьева Е.В., Ивахник В.В. Временные характеристики четарехволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности в схеме с попутными волнами накачки // *Компьютерная оптика*. 2013. Т. 37. № 1. С. 25–30.
- Ивахник В.В., Савельев М.В. Пространственная селективность четырехволнового преобразователя излучения в прозрачной двухкомпонентной среде в схеме с попутными волнами накачки // *Компьютерная оптика*. 2016. Т. 40. № 3. С. 322–330.
- Доронина Л.В., Ивахник В.В., Некрасова Г.Э. Качество ОВФ при четырехфотонном взаимодействии в параболическом световоде // *Известия вузов. Физика*. 1991. Т. 34. Вып. 4. С. 20–24.
- Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. М.: Мир, 1984. 512 с.

References

- Hellwarth R.W. Optical beam phase conjugation by four-wave mixing in a waveguide. *Optical Engineering*, 1982, vol. 21, no. 2. pp. 263–265. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.7972892> [in English].
- Lor K.P., Chiang K.S. Theory of nondegenerate four-wave mixing in a birefringent optical fibre. *Optics Communications*, 1998, vol. 152, no. 1–3, pp. 26–30 [in English].
- Wolffer N., Gravey P. Effect of the lateral dimensional on the grating formation and stability in the double-phase-conjugate mirror: Application to interconnects between single-mode fibres. *Applied Physics B*, 1999, vol. 68, no. 5, pp. 947–951. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003400050728> [in English].
- Kozhevnikov N.M. [et al.] Zapis' dinamicheskikh gologramm v nelinejno-opticheskom pokrytii planarnogo volnovoda [Recording dynamic holograms in a nonlinear optical coating of a planar waveguide]. *Optika i spektroskopija* [Optics and spectroscopy], 2003, no. 4, pp. 676–682 [in Russian].
- Ivahnik V.V., Nikonov V.I., Harskaja T.G. Chetyrehvolnovoe preobrazovanie izlucheniya na teplovoj nelinejnosti v svetovode s parabolicheskim profilem [Four-wave conversion of radiation to thermal nonlinearity in a fiber with a parabolic profile]. *Izvestija vuzov. Priborostroenie* [News of universities. Instrument making], 2006, no. 8, pp. 54–60 [in Russian].
- Xiaosheng X. [et al.] Partial compensation of Kerr nonlinearities by optical phase conjugation in optical fiber transmission systems without power symmetry. *Optics Communications*, 2006, vol. 265, no. 1, pp. 326–330 [in English].
- Vorob'eva E.V., Ivahnik V.V., Kaurov A. Prostranstvennye harakteristiki chetyrehvolnovogo preobrazovatelja izlucheniya v mnogomodovom svetovode s rezonansnoj nelinejnost'ju [Spatial characteristics of a four-wave radiation converter in a multimode fiber with a resonant nonlinearity]. *Fizika volnovyh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Wave process physics and radio systems], 2018, no. 1, pp. 4–11 [in Russian].
- Ivahnik V.V. Obrascenie volnovogo fronta pri chetyrehvolnovom vzaimodejstvii [Wavefront reversal

- in four-wave interaction]. Samara: Samarskij universitet, 2010, 246 p. [in Russian].
9. Suhorukov A.P., Titov V.N., Trofimov V.A. Poputnoe chetyrehvolnovoe vzaimodejstvie v uslovijah sil'nogo energoobmena voln [Incidental four-wave interaction in conditions of strong energy exchange of waves]. *Optika atmosfery* [Optics of the atmosphere], 1989, vol. 2, no. 10, pp. 1099–1106 [in Russian].
 10. Neuman J. [et al.] Photorefractive light amplification by forward four-wave mixing. *Optics Communications*, 1998, vol. 146, no. 1, pp. 220–224. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(97\)00540-3](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(97)00540-3) [in English].
 11. Shu Jia, Wenjie Wan, Jason W. Fleischer. Forward four-wave mixing with defocusing nonlinearity. *Optics Letters*, 2007, vol. 32, no. 12, pp. 1668–1670. DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.32.001668> [in English].
 12. Cheng L. [et al.] Competition and energy transfer between forward and backward four-wave mixing via atomic coherence. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2017, vol. 53, no. 2, pp. 9100205. DOI: <https://doi.org/10.1109/JQE.2017.2677378> [in English].
 13. Akimov A.A., Ivahnik V.V. Vremennye karakteristiki chetarehvolnovogo preobrazovatelja izluchenija na teplovoj nelinejnosti v sheme s poputnymi volnami nakachki [Temporal characteristics of the four-wave radiation converter on thermal nonlinearity in a circuit with associated pumping waves]. *Komp'juternaja optika* [Computer optics], 2013, no. 1, pp. 25–30 [in Russian].
 14. Ivahnik V.V., Savel'ev M.V. Prostranstvennaja selektivnost' chetyrehvolnovogo preobrazovatelja izluchenija v prozrachnoj dvuhkomponentnoj srede v sheme s poputnymi volnami nakachki [Spatial selectivity of a four-wave radiation converter in a transparent two-component medium in a circuit with tail pump waves]. *Komp'juternaja optika* [Computer optics], 2016, no. 3, pp. 322–330 [in Russian].
 15. Doronina L.V., Ivahnik V.V., Nekrasova G.E. Kachestvo OVF pri chetyrehfotonnom vzaimodejstvii v parabolicheskom svetovode [Phase quality at four-photon interaction in a parabolic fiber]. *Izvestija vuzov. Fizika* [News of universities. Physics], 1991, no. 4, pp. 20–24 [in Russian].
 16. Adams M. Vvedenie v teoriju opticheskikh volnovodov. [Introduction to the theory of optical waveguides.]. M.: Mir, 1984, 512 p. [in Russian].

Four-wave interaction in a multimode waveguide with a Kerr nonlinearity in a circuit with codirectional pumping waves

V.V. Ivahnik, D.R. Kapizov, V.I. Nikonov

Samara National Research University
34, Moskovskoye shosse
Samara, 443086, Russian Federation

The quality of image transformation in a four-wave interaction on the Kerr nonlinearity in a multimode waveguide in a circuit with codirectional pumping waves using the method of the point spread function, is analyzed. It is shown that the paraxial waveguide modes completely determine the shape of the point spread function. Increasing the angle between the pump waves leads to the appearance of a “fine” structure of the point spread function. The period of this structure decreases with increasing angle between the pump waves.

Keywords: four-wave mixing, point-spread function, Kerr nonlinearity, waveguide.
