

Удвоенное обращение волнового фронта при шестиволновом взаимодействии на керровской нелинейности в волноводе с бесконечно проводящими поверхностями

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

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

Аннотация – Обоснование. Генерация волны с удвоенным обращенным волновым фронтом в многомодовых волноводах повышает эффективность шестиволновых преобразователей излучения, расширяет возможности их использования в задачах адаптивной оптики, преобразования сложных пространственно неоднородных волн. **Цель.** Проанализировано качество удвоенного обращения волнового фронта при шестиволновом взаимодействии в волноводе с бесконечно проводящими поверхностями с керровской нелинейностью при отношении волновых чисел волн накачки, равном 2 и 0,5, и условии, что одна из волн накачки возбуждает нулевую моду волновода, а распределение амплитуды другой волны накачки на грани волновода описывается гауссовой функцией. **Методы.** Численными методами изучено влияние параметров волн накачки на полуширину и контраст модуля амплитуды объектной волны. В качестве сигнальной использована волна от точечного источника, расположенного на передней грани волновода. **Результаты.** Получены зависимости полуширины и контраста модуля амплитуды объектной волны от соотношения между шириной волновода и шириной гауссовой волны накачки. **Заключение.** Показано, что максимальное изменение характеристик волны с удвоенным обращенным волновым фронтом наблюдается при изменении ширины гауссовых волн накачки в диапазоне от 0,3 до 2 полуширин волновода.

Ключевые слова – шестиволновой преобразователь излучения; удвоенное обращение волнового фронта; керровская нелинейность.

Введение

Наличие в среде нелинейной восприимчивости пятого порядка позволяет при реализации шестиволнового взаимодействия вида $\omega_1 + \omega_1 - \omega_1 - \omega_1 + \omega_2 = \omega_2$ получить волну, комплексная амплитуда которой пропорциональна квадрату комплексно сопряженной амплитуды сигнальной волны (волны с удвоенным обращенным волновым фронтом (УОВФ)) [1–2]. Генерация волны с УОВФ расширяет возможности использования шестиволновых преобразователей излучения в задачах коррекции фазовых искажений, преобразования сложных пространственно неоднородных волн и т. д. [3].

С целью увеличения эффективности многоволновых преобразователей целесообразно от рассмотрения взаимодействия в неограниченных по поперечным размерам средах перейти к исследованию взаимодействия в волноводах [4–6]. При этом, когда речь идет о преобразовании сложных пространственно неоднородных полей, всегда встает вопрос о качестве преобразования, то есть о соответствии комплексных амплитуд сигнальной волны и волны с удвоенным обращенным волновым фронтом [7–8].

В настоящей работе анализируется влияние на качество УОВФ при шестиволновом взаимодействии в волноводе с бесконечно проводящими поверхностями, заполненном средой с керровской нелинейностью, пространственной структуры волн накачки при условии, что отношение волновых чисел волн накачки кратно целому или полуцелому числам.

1. Основная часть

Пусть в волноводе, расположенном между плоскостями, навстречу друг другу распространяются две волны накачки с комплексными амплитудами A_1 и A_2 , частотами ω_1 и ω_2 , сигнальная волна с комплексной амплитудой A_3 на частоте ω_1 . В среде наводится нелинейная поляризация $(A_1 A_3^*)^2 A_2$, являющаяся источником объектной волны с комплексной амплитудой A_6 на частоте ω_2 . Фаза объектной волны пропорциональна взятой со знаком минус удвоенной фазе сигнальной волны (волны с удвоенным обращенным волновым фронтом).

В приближении заданного поля по волнам накачки при малом коэффициенте преобразования без учета изменения показателя преломления из-

за самовоздействия волн накачки амплитуда объектной волны с УОВФ на передней грани волновода есть [9]:

$$A_6(x, z = 0) = \sum_{r=0}^{N_2} a_{6r} \tilde{f}_r(x, \omega_2) = \quad (1)$$

$$= -i \frac{g\ell}{2} \sum_{r=0}^{N_2} \frac{\tilde{f}_r(x, \omega_2)}{\beta_r} \sum_{p=0}^{N_1} \sum_{p'=0}^{N_1} \sum_{m=0}^{N_2} \sum_{s=0}^{N_1} \sum_{s'=0}^{N_1} a_{1p}^{(0)} a_{1p'}^{(0)} \times$$

$$\times a_{2m}^{(0)} a_{3s}^{(0)*} a_{3s'}^{(0)*} \gamma_{pp'mss'r} \sin \left(\frac{\Delta_{pp'mss'r} \ell}{2} \right) \times$$

$$\times \exp \left(-i \frac{\Delta_{pp'mss'r} \ell}{2} \right).$$

Здесь $g = \frac{30\pi\omega_2^2}{c^2} \chi^{(5)}$; $\chi^{(5)}$ – нелинейная восприимчивость пятого порядка; $a_{1p}^{(0)}$, $a_{3s}^{(0)}$ – коэффициенты в разложении амплитуд первой волны накачки, сигнальной волны на передней грани по модам волновода; $a_{2m}^{(0)}$ – коэффициенты в разложении амплитуды второй волны накачки на задней грани по модам волновода; $\tilde{f}_r(x, \omega_{1,2})$ и $\beta_r(\omega_{1,2})$ – поперечная составляющая и постоянная распространения r -й моды волновода; N_1 и N_2 – число мод волновода на частотах ω_1 и ω_2 , учитываемых при расчете амплитуды волны с УОВФ;

$\Delta_{pp'mss'r} = \beta_p + \beta_{p'} - \beta_m - \beta_s^* - \beta_{s'}^* + \beta_r$
– волновая расстройкака;

$$\gamma_{pp'mss'r} = \int \tilde{f}_p(x, \omega_1) \tilde{f}_{p'}(x, \omega_1) \tilde{f}_m(x, \omega_2) \times$$

$$\times \tilde{f}_s(x, \omega_1) \tilde{f}_{s'}(x, \omega_1) \tilde{f}_r(x, \omega_2) dx$$

– интеграл перекрытия.

Для сигнальной волны от точечного источника ($A_3(x, z = 0) = \delta(x - x_0)$, x_0 – координата, определяющая смещение точечного источника относительно оси волновода) в случае длинных волнопроводов, то есть считаем выполняется условие $\text{Re}(\Delta_{pp'mss'r})\ell \gg \gg 1$, если $\text{Re}(\Delta_{pp'mss'r}) \neq 0$, выражение для амплитуды объектной волны примет вид

$$G(x, x_0, z = 0) = -i \frac{g\ell}{2} \sum_{r=0}^{N_2} \frac{\tilde{f}_r(x, \omega_2)}{\beta_r} \times \quad (2)$$

$$\times \sum_{p=0}^{N_1} \sum_{p'=0}^{N_1} \sum_{m=0}^{N_2} \sum_{s=0}^{N_1} a_{1p}^{(0)} a_{1p'}^{(0)} a_{2m}^{(0)} \tilde{f}_s(x_0, \omega_1) \times$$

$$\times \tilde{f}_{s'}(x_0, \omega_1) \gamma_{pp'mss'r}.$$

Как и в случае рассмотрения качества обращения волнового фронта при четырехволновом взаимодействии [10–11], функцию $G(x, x_0, z = 0)$ будем называть функцией размытия точки (ФРТ).

Заметим, что если при четырехволновом взаимодействии знание ФРТ полностью описывает точность ОВФ, то нелинейный характер связи между комплексной амплитудой объектной волны и комплексной амплитудой сигнальной волны позволяет с использованием ФРТ говорить лишь качественно о точности УОВФ.

В качестве волновода рассмотрим двумерный волновод с бесконечно проводящими поверхностями, расположенными на расстоянии $2a$ друг от друга, он заполнен средой с показателем преломления n_1 . Модами такого волновода являются функции [12]:

$$\tilde{f}_r(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sin \left[\frac{\pi(r+1)}{2a} (x+a) \right]. \quad (3)$$

Для приосевых мод волновода постоянная распространения r -й моды есть

$$\beta_r(\omega_{1,2}) \approx k_{1,2} - \frac{1}{2k_{1,2}} \left[\frac{\pi(r+1)}{2a} \right]^2, \quad (4)$$

где $k_{1,2} = \frac{\omega_{1,2}}{c} n_1(\omega_{1,2})$ – волновое число.

Условие шестиволнового взаимодействия с УОВФ в длинном волноводе с бесконечно проводящими поверхностями запишется следующим образом:

$$h \left[(p+1)^2 + (p'+1)^2 - (s+1)^2 - (s'+1)^2 \right] - \quad (5)$$

$$- \left[(m+1)^2 - (r+1)^2 \right] = 0.$$

Здесь $h = k_2 / k_1$.

В случае когда отношение волновых чисел волн накачки не равно целому или отношению целых чисел, условие (5) выполняется, только когда номер моды объектной волны совпадает с номером моды второй волны накачки ($r = m$). Это уменьшает количество комбинаций мод волновода, участвующих в формировании волны с УОВФ.

На рис. 1 приведены характерные нормированные графики зависимости модулей функций размытия точки, расположенной на оси волновода

$$\text{да } (\tilde{G} = \left| \frac{G(x, x_0 = 0, z = 0)}{G_{\max}} \right|, \quad G_{\max} \text{ – максимальное}$$

значение функции), от нормированной поперечной координаты при условии, что первая волна накачки одномодовая с номером моды $p = 0$, а амплитуда второй волны накачки на задней грани волновода описывается гауссовой функцией

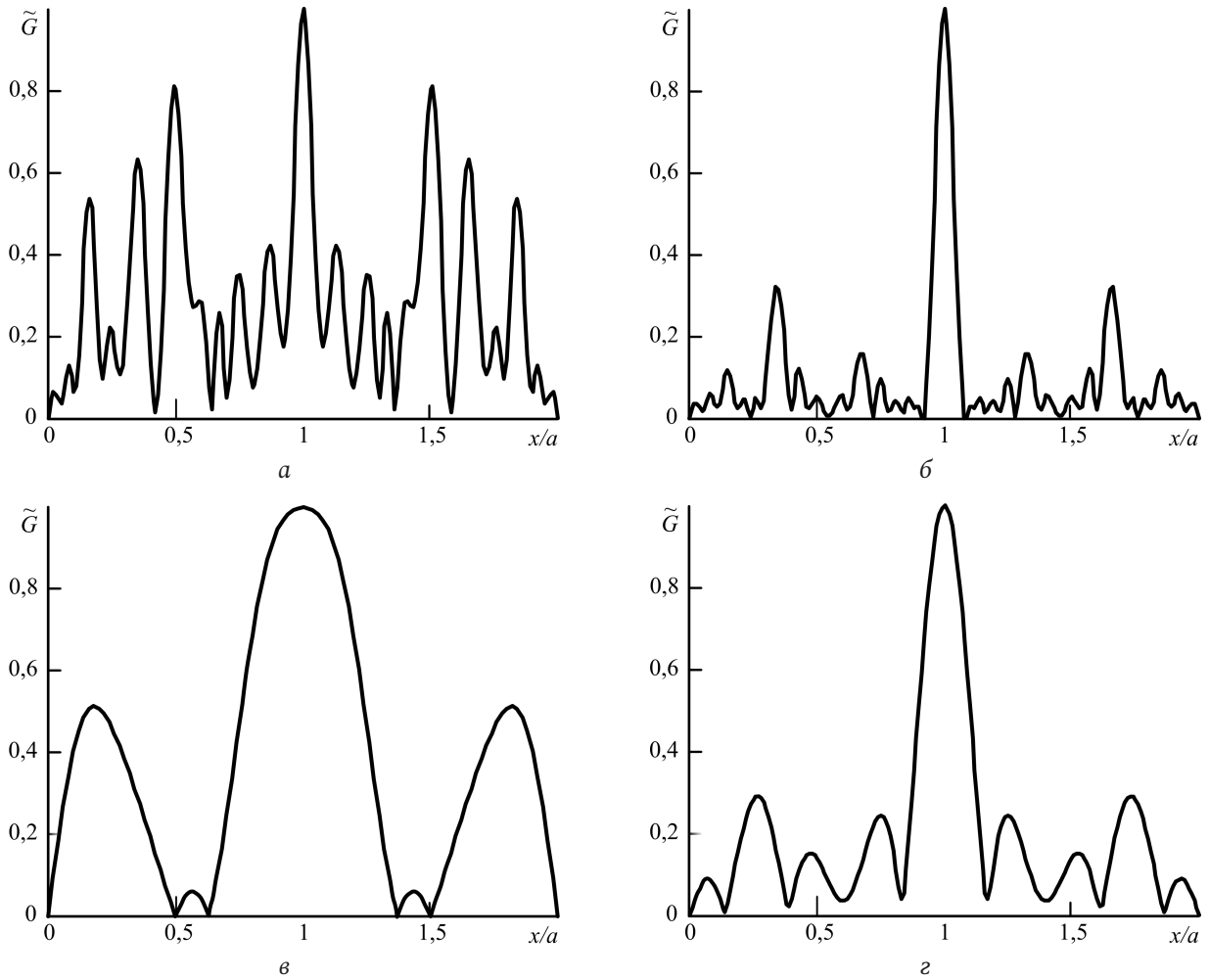


Рис. 1. Зависимость модуля ФРТ от поперечной координаты при $h=2$ (а, б), $0,5$ (в, г): первая волна накачки одномодовая с номером моды $p=0$, амплитуда второй волны накачки меняется по гауссову закону, $a/b=1$ (а, в), 8 (б, г)
Fig. 1. Dependence of the PSF modulus on the transverse coordinate at $h=2$ (a, b), $0,5$ (c, d): the first pump wave is single-mode with the mode number $p=0$, the amplitude of the second pump wave changes according to the Gaussian law, $a/b=1$ (a, c), 8 (b, d)

$A_2(x, z = \ell) = \exp(-x^2/b^2)$. Здесь b – ширина волны накачки.

Аналогичные графики зависимости модулей функций размытия точки наблюдаются, когда одномодовой с номером моды $m=0$ является вторая волна накачки, а амплитуда первой волны накачки на передней грани волновода описывается гауссовой функцией $A_1(x, z=0) = \exp(-x^2/b^2)$.

При расчете модуля ФРТ учитывали 20 мод сигнальной волны, первой волны накачки, и $20h$ мод объектной волны, второй волны накачки.

Как при учете гауссовой структуры первой волны накачки, так и при учете гауссовой структуры второй волны накачки модуль ФРТ состоит из центрального и боковых максимумов. При фиксированной частоте первой волны накачки увеличение частоты второй волны накачки повышает число побочных максимумов, уменьшает ширину центрального максимума. Изменение ширины га-

уссовой волны накачки меняет соотношение между центральным и боковыми максимумами, влияет на ширину центрального максимума.

В качестве количественных параметров, характеризующих качество УОВФ, могут выступать полуширина центрального максимума модуля ФРТ (Δx), определяемая из решения уравнения

$$\begin{aligned} |G(x = \Delta x, x_0 = 0, z = 0)| &= \\ &= \frac{1}{2} |G(x = a, x_0 = 0, z = 0)|, \end{aligned} \quad (6)$$

и контраст модуля ФРТ, определяемый как отношение значения центрального максимума к наибольшему значению одного из побочных максимумов (K).

Очевидно, что использование для анализа качества УОВФ полуширины центрального максимума модуля ФРТ предполагает наличие ярко выраженного центрального максимума. В противном случае, который наблюдается, например,

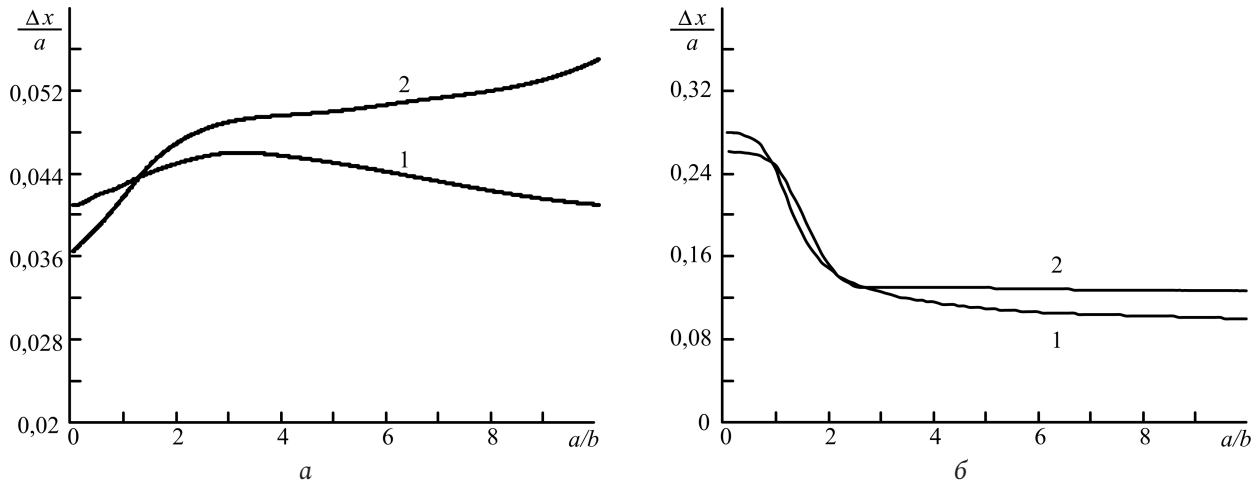


Рис. 2. Зависимость полуширины центрального максимума модуля ФРТ от ширины гауссовой волны накачки: вторая волна накачки гауссова, первая волна накачки одномодовая (1); первая волна накачки гауссова, вторая волна накачки одномодовая (2) при $h = 2$ (а), 0,5 (б)

Fig. 2. Dependence of the half-width of the central maximum of the PSF module on the width of the Gaussian pump wave: the second pump wave is Gaussian, the first pump wave is single-mode (1); the first pump wave is Gaussian, the second pump wave is single-mode (2) at $h = 2$ (a), 0,5 (b)

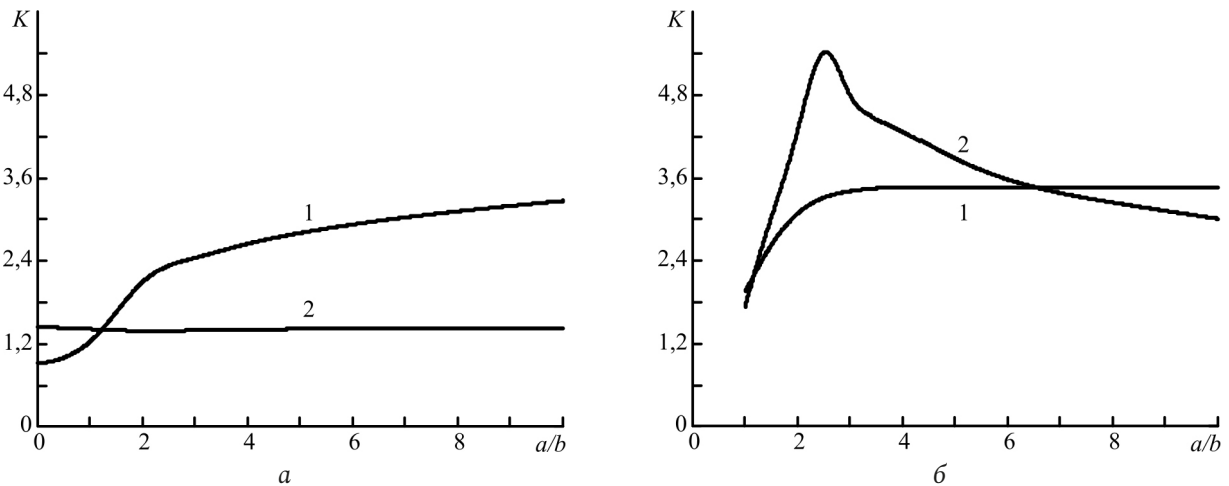


Рис. 3. Зависимость контраста модуля ФРТ от ширины гауссовой волны накачки: вторая волна накачки гауссова, первая волна накачки одномодовая (1); первая волна накачки гауссова, вторая волна накачки одномодовая (2) при $h = 2$ (а), 0,5 (б)

Fig. 3. Dependence of the contrast of the PSF module on the width of the Gaussian pump wave: the second pump wave is Gaussian, the first pump wave is single-mode (1); the first pump wave is Gaussian, the second pump wave is single-mode (2) at $h = 2$ (a), 0,5 (b)

при $h = 0,5$ и $b > a$, использовать этот параметр для анализа качества УОВФ не представляется возможным.

Улучшение качества УОВФ предполагает как сужение центрального максимума, так и увеличение контраста модуля ФРТ.

В случае $h = 2$ при уменьшении ширины второй гауссовой волны накачки при условии одномодовой первой волны накачки с номером моды $p = 0$ полуширина центрального максимума модуля ФРТ меняется слабо и монотонно увеличивается при уменьшении полуширины первой гауссовой волны накачки при условии одномодовой второй волны накачки с номером моды $m = 0$ (рис. 2, а). В диапазоне изменения ширины второй гауссовой

волны накачки от $b = 0,125a$ до $b = 1,25a$ полуширина центрального максимума модуля ФРТ меняется от $0,043a$ до $0,047a$, а при изменении в этом диапазоне ширины первой волны накачки увеличивается от $0,041a$ до $0,052a$.

Контраст модуля ФРТ с уменьшением ширины второй гауссовой волны накачки при условии одномодовой первой волны накачки возрастает и слабо меняется с изменением ширины первой гауссовой волны накачки при условии одномодовой второй волны накачки (рис. 3, а).

В случае $h = 0,5$ при уменьшении ширины либо первой, либо второй гауссовых волн накачки полуширина центрального максимума модуля ФРТ уменьшается (рис. 2, б). В диапазоне изменения

b от $0,125a$ до $1,25a$ полуширина центрального максимума модуля ФРТ уменьшается от $0,26a$ до $0,13a$ при условии, что амплитуда первой волны накачки меняется по гауссову закону, от $0,26a$ до $0,10a$ – при условии, что амплитуда второй волны накачки меняется по гауссову закону

Контраст модуля ФРТ в диапазоне изменения b от $0,125a$ до $1,25a$ при уменьшении ширины второй гауссовой волны накачки, увеличиваясь, выходит на постоянное значение, равное 3,46. При уменьшении ширины первой гауссовой волны накачки контраст модуля ФРТ вначале увеличивается, достигает максимального значения, равного 5,41, а затем медленно уменьшается (рис. 3, б).

Максимальное значение скорости изменения контраста, полуширины центрального максимума модуля ФРТ как для $h = 2$, так и для $h = 0,5$ наблюдается в диапазоне изменения ширины гауссовых волн накачки от $b = 0,3a$ до $b = 2a$. При дальнейшем уменьшении ширины гауссовой волны накачки скорости изменения как полуширины центрального максимума, так и контраста модуля ФРТ значительно снижаются и в ряде случаев стремятся к нулю. Таким образом, основное влияние ширины гауссовой волны накачки на качество УОВФ наблюдается в диапазоне ширин волн накачки от $b = 0,3a$ до $b = 2a$.

Заключение

При отношении волновых чисел второй и первой волн накачки, равном 2 и 0,5, проанализировано качество удвоенного обращения волнового фронта сигнальной волны от точечного источника при шестиволновом взаимодействии на керровской нелинейности в волноводе с бесконечно проводящими стенками.

Показано, что максимальное изменение характеристик волны с УОВФ наблюдается при изменении ширины гауссовых волн накачки от $b = 0,3a$ до $b = 2a$. В этом диапазоне при $h = 0,5$ уменьшение ширины гауссовых волн накачки приводит как к сокращению полуширины центрального максимума, так и к увеличению контраста модуля ФРТ. При $h = 2$ уменьшение ширины первой гауссовой волны накачки при условии одномодовой второй волны накачки увеличивает полуширину центрального максимума и слабо влияет на контраст модуля ФРТ. Качество удвоенного обращения волнового фронта сигнальной волны от точечного источника, расположенного на передней грани волновода, с уменьшением ширины первой гауссовой волны накачки ухудшается.

Список литературы

1. Карпук С.М., Рубанов А.С., Толстик А.Л. Удвоенное фазовое сопряжение при квадратичной записи динамических голограмм в резонансных средах // Оптика и спектроскопия. 1996. Т. 80, № 2. С. 313–318. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29196117>
2. Ивахник В.В., Никонов В.И., Савельев М.В. Удвоенное обращение волнового фронта при шестиволновом взаимодействии на тепловой нелинейности // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18, № 1. С. 13–17. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7205>
3. Романов О.Г., Горбач Д.В., Толстик А.Л. Частотное преобразование оптических вихрей при невырожденном многоволновом взаимодействии в растворах красителей // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 108, № 5. С. 812–817. URL: <https://elibr.bsu.by/bitstream/123456789/211782/1/14-A-%20Opt-Spectr-2010-rus.pdf>
4. Gupta R., Kaler R.S. Nonlinear Kerr and intermodal four-wave mixing effect in mode-division multiplexed multimode fiber link // Optical Engineering. 2019. Vol. 58, no. 3. P. 036108. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.OE.58.3.036108>
5. Spatially multiplexed picosecond pulse-train generation in a 6 LP mode fiber based on multiple four-wave mixings / H. Zhang [et al.] // Applied Optics. 2019. Vol. 58, no. 31. P. 8570–8576. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.58.008570>
6. Six-wave mixing induced by free-carrier plasma in silicon nanowire waveguides / H. Zhou1 [et al.] // Laser Photonics Reviews. 2016. Vol. 10, no. 6. P. 1054–1061. DOI: <https://doi.org/10.1002/lpor.201600124>
7. Ивахник В.В., Никонов В.И. Удвоенное сопряжение волнового фронта при невырожденном шестифотонном взаимодействии // Оптика и спектроскопия. 1993. Т. 75, № 2. С. 385–390. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37622858>
8. Ивахник В.В., Никонов В.И. Шестиволновое взаимодействие с удвоенным обращением волнового фронта на тепловой нелинейности в среде с нелинейным коэффициентом поглощения // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41, № 3. С. 315–321. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-3-315-321>
9. Ивахник В.В., Капизов Д.Р., Никонов В.И. Шестиволновое взаимодействие с удвоенным обращением волнового фронта в многомодовых волноводах с керровской, тепловой нелинейностями // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47, № 5. С. 702–709. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-СО-1313>
10. Воронин Э.С., Петникова В.М., Шувалов В.В. Использование вырожденных параметрических процессов для коррекции волновых фронтов (обзор) // Квантовая электроника. 1981. Т. 8, № 5. С. 917–935. URL: <https://www.mathnet.ru/rus/qe/v8/i5/p917>
11. Функция размытия точки четырехволнового преобразователя излучения в многомодовом волноводе с керровской нелинейностью / Е.В. Воробьева [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24, № 1. С. 15–21. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.1.15-21>
12. Маркузе Д. Оптические волноводы. М.: Мир, 1974. 576 с.

Информация об авторах

Ивахник Валерий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой оптики и спектроскопии Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: нелинейная оптика, динамическая голография.

E-mail: ivakhnik@ssau.ru

SPIN-код (eLibrary): 2791-2471

AuthorID (eLibrary): 20229

ResearcherID (WoS): AАН-3584-2019

Капизов Дархан Рахметулович, аспирант 4-го года обучения кафедры оптики и спектроскопии Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: нелинейная оптика, динамическая голография.

E-mail: darkhankapizov@gmail.com

SPIN-код (eLibrary): 6771-2032

AuthorID (eLibrary): 1109458

Никонов Владимир Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры оптики и спектроскопии Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.

Область научных интересов: нелинейная оптика, динамическая голография.

E-mail: nikon5919@mail.ru

SPIN-код (eLibrary): 1965-3523

AuthorID (eLibrary): 191191

ResearcherID (WoS): S-8516-2016

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2027, vol. 27, no. 2, pp. 38–44

DOI 10.18469/1810-3189.2024.27.2.38-44

UDC 535.1

Original Research

Received 18 December 2023

Accepted 19 January 2024

Published 29 June 2024

Double wavefront reversal during six-wave interaction on Kerr nonlinearity in a waveguide with infinitely conducting surfaces

Valery V. Ivakhnik, Darkhan R. Kapizov, Vladimir I. Nikonov

Samara National Research University

34, Moskovskoye shosse,

Samara, 443086, Russia

Abstract – Background. Generation of a wave with a double reversed wavefront in multimode waveguides increases the efficiency of six-wave radiation converters and expands the possibilities of its use in adaptive optics problems and the conversion of complex spatially inhomogeneous waves. **Aim.** The quality of double wavefront reversal during six-wave interaction in a waveguide with infinitely conducting surfaces with Kerr nonlinearity is analyzed for the ratio of the wave numbers of the pump waves equal to 2 and 0,5, and the condition that one of the pump waves excites the zero mode of the waveguide, and the amplitude distribution of the other pump wave excites the edges of the waveguide are described by a Gaussian function. **Methods.** The influence of pump wave parameters on the half-width and contrast of the amplitude modulus of the object wave was studied using numerical methods. A wave from a point source located on the front face of the waveguide was used as a signal wave. **Results.** The dependences of the half-width and contrast of the amplitude modulus of the object wave on the ratio between the width of the waveguide and the width of the Gaussian pump wave are obtained. **Conclusion.** It is shown that the maximum change in the characteristics of a wave with a double reversed wavefront is observed when the width of the Gaussian pump waves changes in the range from 0,3 to 2 half-widths of the waveguide.

Keywords – six-wave radiation converter; double wavefront reversal; Kerr nonlinearity.

✉ nikon5919@mail.ru (Vladimir I. Nikonov)



© Valery V. Ivakhnik, Darkhan R. Kapizov, Vladimir I. Nikonov, 2024

References

1. S. M. Karpuk, A. S. Rubanov, and A. L. Tolstik, “Double phase conjugation in quadratic recording of dynamic holograms in resonant media,” *Optika i spektroskopiya*, vol. 80, no. 2, pp. 313–318, 1996, url: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29196117>. (In Russ.)
2. V. V. Ivakhnik, V. I. Nikonov, and M. V. Savelyev, “Double wavefront reversal at six-wave interaction on the thermal nonlinearity,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 13–17, 2015, url: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7205>. (In Russ.)

3. O. G. Romanov, D. V. Gorbach, and A. L. Tolstik, "Frequency transformation of optical vortices during nondegenerate multi-wave interaction in dye solutions," *Optika i spektroskopiya*, vol. 108, no. 5, pp. 812–817, 2010, url: <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/211782/1/14-A%20Opt-Spectr-2010-rus.pdf>. (In Russ.)
4. R. Gupta and R. S. Kaler, "Nonlinear Kerr and intermodal four-wave mixing effect in mode-division multiplexed multimode fiber link," *Optical Engineering*, vol. 58, no. 3, p. 036108, 2019, doi: <https://doi.org/10.1117/1.OE.58.3.036108>.
5. H. Zhang et al., "Spatially multiplexed picosecond pulse-train generation in a 6 LP mode fiber based on multiple four-wave mixings," *Applied Optics*, vol. 58, no. 31, pp. 8570–8576, 2019, doi: <https://doi.org/10.1364/AO.58.008570>.
6. H. Zhou1 et al., "Six-wave mixing ind," *Laser Photonics Reviews*, vol. 10, no. 6, pp. 1054–1061, 2016, doi: <https://doi.org/10.1002/lpor.201600124>.
7. V. V. Ivakhnik and V. I. Nikonov, "Doubled wavefront conjugation for non-degenerate six-photon interaction," *Optika i spektroskopiya*, vol. 75, no. 2, pp. 385–390, 1993, url: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37622858>. (In Russ.)
8. V. V. Ivakhnik and V. I. Nikonov, "Six-wave interaction with double wavefront reversal on thermal nonlinearity in a medium with a nonlinear absorption coefficient," *Komp'yuternaya optika*, vol. 41, no. 3, pp. 315–321, 2017, doi: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-3-315-321>. (In Russ.)
9. V. V. Ivakhnik, D. R. Kapizov, and V. I. Nikonov, "Six-wave interaction with double wavefront reversal in multimode waveguides with Kerr and thermal nonlinearities," *Komp'yuternaya optika*, vol. 47, no. 5, pp. 702–709, 2023, doi: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1313>. (In Russ.)
10. E. S. Voronin, V. M. Petnikova, and V. V. Shuvalov, "Using degenerate parametric processes for wavefront correction (review)," *Kvantovaya elektronika*, vol. 8, no. 5, pp. 917–935, 1981, url: <https://www.mathnet.ru/rus/qe/v8/i5/p917>. (In Russ.)
11. E. V. Vorob'eva et al., "Point spread function of a four-wave radiation converter in a multimode waveguide with Kerr nonlinearity," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 15–21, 2021, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.1.15-21>. (In Russ.)
12. D. Markuze, *Optical Waveguides*. Moscow: Mir, 1974. (In Russ.)

Information about the Authors

Valery V. Ivakhnik, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, head of the Department of Optics and Spectroscopy, Samara National Research University, Samara, Russia.

Research interests: nonlinear optics, dynamic holography.

E-mail: ivakhnik@ssau.ru

SPIN code (eLibrary): 2791-2471

AuthorID (eLibrary): 20229

ResearcherID (WoS): AAH-3584-2019

Darkhan R. Kapizov, 4th year postgraduate of the Department of Optics and Spectroscopy, Samara National Research University, Samara, Russia.

Research interests: nonlinear optics, dynamic holography.

E-mail: darkhankapizov@gmail.com

SPIN code (eLibrary): 6771-2032

AuthorID (eLibrary): 1109458

Vladimir I. Nikonov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor of the Department of Optics and Spectroscopy, Samara National Research University, Samara, Russia.

Research interests: nonlinear optics, dynamic holography.

E-mail: nikon5919@mail.ru

SPIN code (eLibrary): 1965-3523

AuthorID (eLibrary): 191191

ResearcherID (WoS): S-8516-2016