

## Четырехволновое взаимодействие на тепловой нелинейности при наличии обратной связи на сигнальную или объектную волны

А.А. Акимов, С.А. Гузаиров, В.В. Ивахник

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

*Аннотация* – При равных интенсивностях волн накачки показано совпадение амплитудных коэффициентов отражения, полуширин полос пространственных частот четырехволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности при наличии обратной связи либо на объектную, либо на сигнальную волны. Проанализирована зависимость амплитудного коэффициента отражения, пространственной селективности четырехволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности от интенсивности волн накачки. При компенсации фазового набега, возникающего из-за распространения в среде волн накачки, наблюдается с ростом интенсивности волн накачки увеличение полуширины полосы пространственных частот. Существует пороговое значение интенсивности волн накачки, при превышении которого значение амплитудного коэффициента отражения четырехволнового преобразователя с учетом обратной связи на объектную или сигнальную волны оказывается меньше, чем в отсутствие обратной связи.

*Ключевые слова* – четырехволновой преобразователь; обратная связь; тепловая нелинейность.

### Введение

Повышение эффективности четырехволновых преобразователей излучения является актуальной задачей нелинейной оптики многоволновых взаимодействий. Одним из способов решения этой задачи стало использование положительной обратной связи, накладываемой на взаимодействующие волны [1–6].

В работах [1; 5; 6] показано, что наложение положительной обратной связи на объектную и сигнальную волны позволяет более чем на порядок повысить коэффициент отражения четырехволновых преобразователей излучения в средах с керровской, тепловой нелинейностями.

Однако существует целый ряд схем четырехволнового взаимодействия, например квазивырожденное взаимодействие, вырожденное взаимодействие в схеме с попутными волнами накачки, четырехволновое взаимодействие в схеме со встречными волнами накачки и ортогонально поляризованными сигнальной и объектной волнами [7; 8], реализовать внешнюю обратную связь в которых одновременно как на объектную, так и на сигнальную волны не всегда возможно.

Поэтому представляет интерес исследование влияния обратной связи, реализуемой при помощи кольцевого резонатора, на амплитудные и пространственные характеристики четырехволнового преобразователя излучения на тепловой

нелинейности при наличии обратной связи только на сигнальную или объектную волны.

### 1. Модель четырехволнового преобразователя

Рассмотрим вырожденное четырехволновое взаимодействие ( $\omega + \omega - \omega = \omega$ ) в среде с тепловой нелинейностью, расположенной между плоскостями  $z = 0$  и  $z = \ell$ . В среде навстречу друг другу распространяются две волны накачки с комплексными амплитудами  $A_1$  и  $A_2$ , сигнальная и объектная волны с комплексными амплитудами  $A_3$  и  $A_4$  [7; 8].

Уравнение Гельмгольца, описывающее четырехволновое взаимодействие, имеет вид

$$\left\{ \nabla^2 + k^2 \left( 1 + \frac{2}{n_0} \frac{dn}{dT} \delta T \right) - 2i k \alpha \right\} \times \left( \sum_{j=1}^4 A_j + \text{к.с.} \right) = 0. \quad (1)$$

Здесь  $n_0$  – среднее значение показателя преломления;  $k = \omega n_0 / c$  – волновое число;  $\alpha$  – коэффициент поглощения;  $\delta T$  – изменение температуры, обусловленное выделением тепла при поглощении излучения.

Уравнение (1) необходимо дополнить уравнением Пуассона

$$\nabla^2 \delta T + \frac{2\alpha I}{\Lambda c_p v} = 0, \quad (2)$$

где

$$I = \left| \sum_{j=1}^4 A_j + \text{к.с.} \right|^2$$

– интенсивность излучения;  $\Lambda$  – коэффициент температуропроводности;  $c_p$  – удельная теплоемкость;  $v$  – объемная плотность вещества.

При условии, что волны накачки плоские и распространяются строго вдоль оси  $Z$ :

$$A_{1,2}(\bar{r}) = \tilde{A}_{1,20}(z) \exp(\mp ikz), \quad (3)$$

в работе [9] получена система связанных дифференциальных уравнений для пространственных спектров объектной ( $\tilde{A}_4(\bar{k}_4, z)$ ) и сигнальной ( $\tilde{A}_3(\bar{k}_3, z)$ ) волн вида

$$\frac{d^3 \tilde{A}'_3}{dz^3} + i \frac{\kappa^2}{k} \frac{d^2 \tilde{A}'_3}{dz^2} - \left[ \kappa^2 + \left( \frac{\kappa^2}{2k} \right)^2 \right] \frac{d \tilde{A}'_3}{dz} - \quad (4)$$

$$- iG_1 \tilde{A}'_3 \exp(-2\alpha z) = iG \tilde{A}'_4 \exp[2\alpha(z-\ell)],$$

$$\frac{d^3 \tilde{A}'_4}{dz^3} + i \frac{\kappa^2}{k} \frac{d^2 \tilde{A}'_4}{dz^2} - \left[ \kappa^2 + \left( \frac{\kappa^2}{2k} \right)^2 \right] \frac{d \tilde{A}'_4}{dz} -$$

$$- iG_2 \tilde{A}'_4 \exp[2\alpha(z-\ell)] = iG \tilde{A}'_3 \exp(-2\alpha z).$$

Здесь

$$\tilde{A}'_4(\bar{k}_4, z) = \tilde{A}_4(\bar{k}_4, z) \exp\{-\alpha(z-\ell) - iC(z) + iC(\ell)\},$$

$$\tilde{A}'_3(\bar{k}_3, z) = \tilde{A}_3(\bar{k}_3, z) \exp\{\alpha z + iC(z)\},$$

$\bar{k}_3$  и  $\bar{k}_4$  – поперечные составляющие волновых векторов сигнальной и объектной волн,

$$\kappa = |\bar{k}_3| = |\bar{k}_4|, \quad G^2 = G_1 G_2,$$

$$G_{1,2} = \frac{2k}{n_0} \frac{dn}{dT} \frac{\alpha}{\Lambda c_p v} I_{1,20},$$

$$I_{10} = |\tilde{A}_{10}(z=0)|^2, \quad I_{20} = |\tilde{A}_{20}(z=\ell)|^2,$$

$$C(z) = -\frac{k}{n_0} \frac{dn}{dT} \frac{1}{2\alpha \Lambda c_p v} \left\{ \frac{I_{10}}{2\alpha} \{1 - \exp(-2\alpha z)\} - \right. \\ \left. - z I_{10} + \frac{I_{20}}{2\alpha} \{ \exp\{2\alpha(z-\ell)\} - \exp(-2\alpha\ell) \} - \right. \\ \left. - z I_{20} \exp(-2\alpha\ell) + \frac{z^2}{2\ell} \{1 - \exp(-2\alpha\ell)\} \{I_{10} - I_{20}\} \right\}.$$

При расположении нелинейной среды внутри кольцевого резонатора [1; 5] граничные условия на пространственные спектры сигнальной и объектной волн есть:

– при наличии обратной связи на объектную волну

$$\tilde{A}_3(\bar{k}, z=0) = \tilde{A}_{30}(\bar{k}), \\ \tilde{A}_4(\bar{k}, z=\ell) = \tilde{A}_4(\bar{k}, z=0) \sqrt{r_1 r_2} \times \\ \times \exp\left(-i\Delta_0 + i \frac{\kappa^2}{2k} L\right); \quad (5)$$

– при наличии обратной связи на сигнальную волну

$$\tilde{A}_3(\bar{k}, z=0) = \sqrt{1-r_1} \tilde{A}_{30}(\bar{k}) + \\ + \sqrt{r_1 r_2} \tilde{A}_3(\bar{k}, z=\ell) \exp\left(-i\Delta_0 + i \frac{\kappa^2}{2k} L\right), \quad (6)$$

$$\tilde{A}_4(\bar{k}, z=\ell) = 0.$$

Здесь  $r_1$  – коэффициент отражения полупрозрачного зеркала связи;  $r_2$  – коэффициент отражения сферических зеркал резонатора, осуществляющих перенос пространственного распределения поля из плоскости  $z=0$  на плоскость, расположенную на расстоянии  $L$  – от плоскости  $z=\ell$ ;  $\Delta_0$  – постоянный фазовый набег, наличие которого может быть реализовано, например, путем введения в кольцевой резонатор фазового модулятора света.

Из условия неизменности температуры на границах нелинейной среды наряду с граничными условиями (5), (6) система уравнений (4) должна быть дополнена граничными условиями

$$\frac{d \tilde{A}'_3}{dz} \Big|_{z=0} = \frac{d \tilde{A}'_3}{dz} \Big|_{z=\ell} = 0, \quad \frac{d \tilde{A}'_4}{dz} \Big|_{z=0} = \frac{d \tilde{A}'_4}{dz} \Big|_{z=\ell} = 0. \quad (7)$$

При наличии обратной связи по сигнальной волне модули пространственных спектров объектной волны на передней грани нелинейной среды и вне резонатора совпадают, а при наличии обратной связи по объектной волне отличаются в  $\sqrt{1-r_1}$  раз.

## 2. Малый коэффициент отражения

Будем рассматривать четырехволновое взаимодействие при малом амплитудном коэффициенте отражения ( $|A_4| \ll |A_3|$ ) без учета самодифракции волн накачки. Решая систему уравнений (4) с учетом граничных условий (5), (7) или (6), (7), получим выражения для пространственных спектров объектной волны на передней грани нелинейного слоя:

$$\tilde{A}'_4(\kappa, z=0) = \frac{iG \tilde{A}'_{30} F}{(\beta^2 - \kappa^2)} \left[ \frac{\exp(-\beta\ell) - \exp(-\kappa\ell)}{2 \left( \kappa + i \frac{\kappa^2}{2k} \right) \text{sh}\kappa\ell} \right] \times \quad (8)$$

$$\times \left[ 1 - \exp \left( \kappa + i \frac{\kappa^2}{2k} \right) \ell \right] + \frac{[\exp(\kappa \ell) - \exp(-\beta \ell)]}{2 \left( -\kappa + i \frac{\kappa^2}{2k} \right) \text{sh} \kappa \ell} \times$$

$$\times \left[ 1 - \exp \left( -\kappa + i \frac{\kappa^2}{2k} \right) \ell \right] + \frac{(1 - \exp(-2\alpha \ell))}{2\alpha} \Bigg].$$

Здесь  $F = 1/(1-p)$  – при наличии обратной связи только на объектную волну;  $F = \sqrt{1-r_1} / (1-p^*)$  – при наличии обратной связи только на сигнальную волну,

$$p = \sqrt{r_1 r_2} \exp \left[ -\alpha \ell - iC(\ell) - i\Delta_0 + i \frac{\kappa^2}{2k} L \right],$$

$$\beta = 2\alpha + i \frac{\kappa^2}{2k}.$$

В качестве сигнальной волны возьмем волну от точечного источника, расположенного на передней грани нелинейного слоя ( $\tilde{A}_{30}(\kappa) = 1$ ). Из линейности системы уравнений (4) относительно пространственных спектров сигнальной и объектной волн следует, что пространственный спектр объектной волны при условии, что сигнальной волной является волна от точечного источника, полностью определяет качество обращения волнового фронта (ОВФ).

Введем амплитудный коэффициент отражения:

– при наличии обратной связи на сигнальную волну

$$R_s = \left| \frac{\tilde{A}_{4s}(\kappa \rightarrow 0, z=0)}{\tilde{A}_{30}^*} \right|,$$

– при наличии обратной связи на объектную волну

$$R_{ob} = \left| \frac{\tilde{A}_{4ob}(\kappa \rightarrow 0, z=0)}{\tilde{A}_{30}^*} \right| \sqrt{1-r_1}.$$

Здесь  $\tilde{A}_{4ob}$  и  $\tilde{A}_{4s}$  – значения пространственных спектров объектной волны на нулевой пространственной частоте при выполнении граничных условий (5) и (6) соответственно.

С учетом (8) выражение для коэффициентов отражения четырехволнового преобразователя излучения запишется следующим образом:

$$R = R_{ob} = R_s = \frac{\exp(-\alpha \ell) G \sqrt{1-r_1}}{8\alpha^2 |1-p_0|} \times$$

$$\times \left( \left( -\ell \left[ 1 + \exp(-2\alpha \ell) \right] + \frac{1 - \exp(-2\alpha \ell)}{\alpha} \right) \right). \quad (9)$$

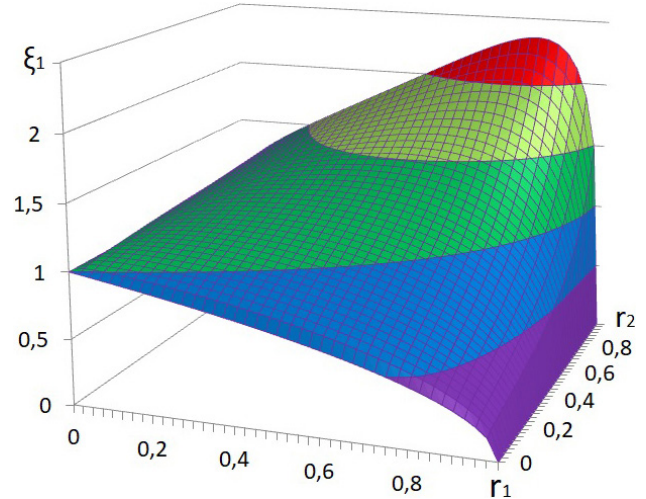


Рис. 1. Зависимость отличия в коэффициентах отражения четырехволнового преобразователя излучения от коэффициентов отражения зеркала связи и сферических зеркал при  $\alpha \ell = 0,1$

Fig. 1. Dependence of the difference in the reflection coefficients of a four-wave radiation converter on the reflection coefficients of the coupling mirror and spherical mirrors at  $\alpha \ell = 0,1$

Здесь  $p_0 = p(\kappa \rightarrow 0) = \sqrt{r_1 r_2} \exp[-\alpha \ell - iC(\ell) - i\Delta_0]$ .

Значения амплитудных коэффициентов отражения как при наличии обратной связи по объектной, так и по сигнальной волнам совпадают.

Отличие в коэффициентах отражения при наличии и отсутствии обратной связи есть

$$\xi = \frac{R(r_1 \neq 0)}{R(r_1 = 0)} = \left[ \frac{\{1-r_1\}}{\{1-2\sqrt{r_1 r_2} \exp(-\alpha \ell) \times \cos[C(\ell) + \Delta_0] + r_1 r_2 \exp(-2\alpha \ell)\}} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

При условии компенсации фазового набега  $C(\ell)$ , возникающего из-за распространения волн накачки ( $\Delta_0 + C(\ell) = 2\pi m$ ,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ), отличие в коэффициентах отражения принимает вид

$$\xi_1 = \frac{\sqrt{1-r_1}}{1 - \sqrt{r_1 r_2} \exp(-\alpha \ell)}. \quad (11)$$

Оптимальное значение коэффициента отражения зеркала связи ( $r_{1opt}$ ), соответствующее максимальному отличию в коэффициентах отражения четырехволнового преобразователя излучения, будет при условии

$$r_{1opt} = r_2 \exp(-2\alpha \ell). \quad (12)$$

При оптимальном значении коэффициента отражения зеркала связи зависимость отличия в коэффициентах отражения четырехволнового преобразователя от коэффициента отражения сферических зеркал (рис. 1) есть

$$\xi_1^0 = \frac{1}{\sqrt{1-r_2 \exp(-2\alpha \ell)}}. \quad (13)$$

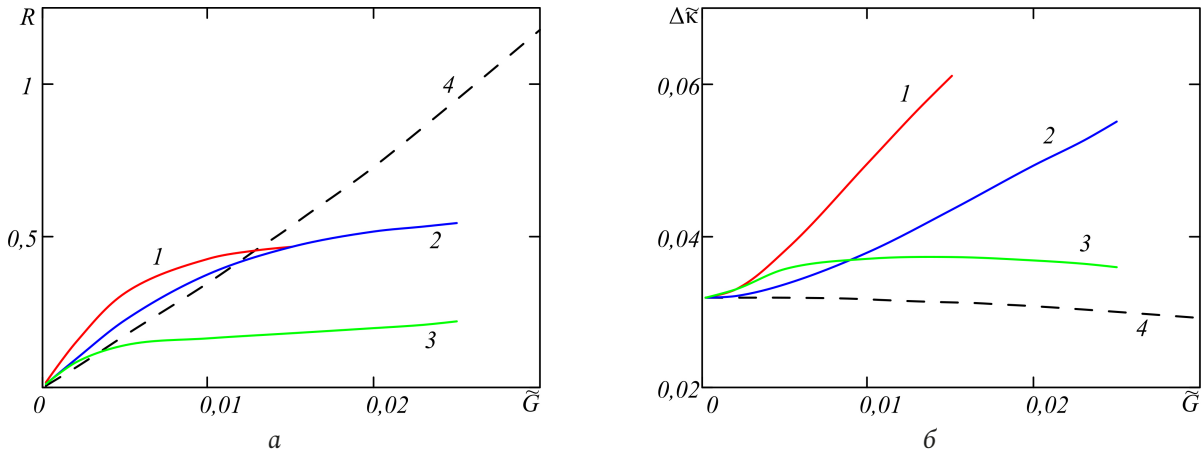


Рис. 2. Графики зависимостей коэффициента отражения (а), полуширины полосы пространственных частот (б) от интенсивности волн накачки при  $kl=5 \cdot 10^3$ ,  $\alpha l=0,1$ ,  $r_1=0,8$ ,  $r_2=1$  (1),  $r_2=0,7$  (2, 3),  $r_1=r_2=0$  (4)  
 Fig. 2. Graphs of the dependences of the reflection coefficient (a), half-width of the spatial frequency band (b) on the pumping waves intensity at  $kl=5 \cdot 10^3$ ,  $\alpha l=0,1$ ,  $r_1=0,8$ ,  $r_2=1$  (1),  $r_2=0,7$  (2, 3),  $r_1=r_2=0$  (4)

На рис. 1 приведен график зависимости параметра  $\xi_1$  от коэффициентов отражения зеркала связи и сферических зеркал.

Существует область параметров  $r_1, r_2$ , в пределах которой наличие обратной связи приводит к выигрышу в коэффициенте отражения.

При значении параметра  $\alpha l=0,1$  наибольшее отличие в коэффициентах отражения четырехволнового преобразователя при наличии и отсутствии кольцевого резонатора наблюдается при  $r_1=0,8$  и  $r_2=1$  и составляет 2,35.

Из анализа выражения (8) следует, что при  $\frac{\kappa^2}{2k}L \ll 1$  наличие обратной связи не влияет на пространственную селективность четырехволнового преобразователя излучения. Для сигнальной волны от точечного источника с увеличением пространственной частоты ( $\kappa$ ) наблюдается монотонное уменьшение модуля пространственного спектра объектной волны. Для характеристики качества преобразования излучения при четырехволновом взаимодействии введем полуширину полосы пространственных частот ( $\Delta\kappa$ ), в пределах которой сосредоточена основная доля энергии объектной волны,  $\Delta\kappa$  определяется из решения уравнения

$$\tilde{A}_4(\kappa = \Delta\kappa, z = 0) = \frac{1}{2} \tilde{A}_4(\kappa = 0, z = 0). \quad (12)$$

При малом коэффициенте отражения качество преобразования излучения полностью определяется толщиной нелинейной среды, длиной волны, коэффициентом поглощения [10].

Заметим, что граничные условия (5), (6) записаны без учета астигматизма, то есть для волн, распространяющихся в плоскости, перпендикуляр-

ной плоскости контура резонатора [11]. Именно в этой плоскости полуширина полосы пространственных частот и определяет качество ОВФ.

### 3. Большой коэффициент отражения

При большом амплитудном коэффициенте отражения, когда необходимо учитывать перекачку энергии из сигнальной волны в объектную и, наоборот, самодифракцию волн накачки, система уравнений (4) с учетом граничных условий (5), (7) или (6), (7) анализировалась численным методом путем рассмотрения многократного прохождения сигнальной и объектной волн через нелинейный слой в кольцевом резонаторе.

При равных интенсивностях волн накачки  $I_{10}=I_{20}$  на рис. 2, а приведены зависимости амплитудного коэффициента отражения, а на рис. 2, б – нормированной полуширины полосы пространственных частот

$$\Delta\tilde{\kappa} = \Delta\kappa \sqrt{\frac{\ell}{2k}}$$

от нормированной интенсивности волн накачки

$$\tilde{G} = \frac{2}{n_0} \frac{dn}{dT} \frac{\ell}{\Lambda c_p v} I_{10}$$

при условии компенсации фазового набега, возникающего вследствие распространения в нелинейной среде волн накачки (кривые 1, 2) и при сопряжении граней нелинейного слоя ( $\Delta_0=0$ ,  $L=0$ , кривые 3). Значения амплитудных коэффициентов отражения, полуширин полос пространственных частот четырехволнового преобразователя излучения получены с точностью 0,2%. Для сравнения на этих графиках (кривые 4) приведены зависи-

мости  $R$ ,  $\Delta\tilde{\kappa}$  от нормированной интенсивности волн накачки при отсутствии обратной связи на сигнальную и объектную волны.

Наибольшие значения нормированной интенсивности волн накачки ( $\tilde{G}^m$ ), при которых анализировались амплитудные и пространственные характеристики четырехволнового преобразователя излучения для  $k\ell = 5 \cdot 10^3$ ,  $\alpha\ell = 0,1$ ,  $r_1 = 0,8$ , равнялись  $\tilde{G}^m = 0,025$  при  $r_2 = 0,7$ ,  $\tilde{G}^m = 0,015$  при  $r_2 = 1$ . При больших интенсивностях волн накачки  $\tilde{G} > \tilde{G}^m$  не удается найти решение системы уравнений (4) вблизи нулевой пространственной частоты. В этой области по мере увеличения числа проходов объектной (сигнальной) волны по кольцевому резонатору наблюдается осциллирующее увеличение модуля пространственного спектра объектной волны [12].

Численный анализ системы уравнений (4) показывает, что, как и в случае ( $|A_4| \ll |A_3|$ ), амплитудные коэффициенты отражения, полуширины полосы пространственных частот при условии наличия обратной связи либо на объектную, либо на сигнальную волны совпадают.

При компенсации фазового набега рост интенсивности волн накачки приводит к увеличению как амплитудного коэффициента отражения (рис. 2, а), так и полуширины полосы пространственных частот четырехволнового преобразователя излучения (рис. 2, б). При  $\tilde{G} \ll 1$  скорости изменения амплитудного коэффициента отражения, полуширины полосы пространственных частот с ростом интенсивности волн накачки увеличиваются по мере приближения параметров кольцевого резонатора к параметрам, соответствующим оптимальным значениям. При увеличении интенсивности волн накачки выигрыш амплитудного коэффициента отражения за счет использования обратной связи на объектную волну падает. Существует пороговое значение интенсивности волн накачки  $I_{10}^n$ , при котором коэффициенты отражения как при наличии, так и при отсутствии обратной связи на объектную волну равны. Так, при параметрах кольцевого резонатора  $r_1 = 0,8$ ,  $r_2 = 1$  нормированное пороговое значение интенсивности волн накачки наблюдается при  $\tilde{G}^n \approx 0,013$  и соответствует коэффициенту отражения 0,45. При дальнейшем увеличении интенсивности волн накачки амплитудный коэффициент отражения при наличии обратной связи на объектную волну оказывается меньше, чем коэффициент отражения при ее отсутствии. При  $I_{10} > I_{10}^n$  применение положительной обратной связи на сигнальную или

объектную волны для повышения эффективности четырехволнового преобразователя излучения оказывается нецелесообразным.

Полуширина полосы пространственных частот четырехволнового преобразователя излучения с ростом интенсивности волн накачки увеличивается, что свидетельствует об улучшении качества ОВФ сигнальной волны. Так, при  $k\ell = 5 \cdot 10^3$ ,  $\alpha\ell = 0,1$ ,  $r_1 = 0,8$ ,  $r_2 = 1$  увеличение нормированной интенсивности волн накачки от  $\tilde{G} = 2 \cdot 10^{-4}$  до  $\tilde{G} = 0,015$  приводит к росту нормированной полуширины полосы пространственных частот от  $\Delta\tilde{\kappa} = 0,032$  до  $\Delta\tilde{\kappa} = 0,061$ .

С ростом интенсивности волн накачки значение амплитудного коэффициента отражения в случае компенсации фазового набега при наличии обратной связи лишь на объектную волну оказывается в несколько раз меньше амплитудного коэффициента отражения при наличии обратной связи как на объектную, так и на сигнальную волны [5]. Причем если для четырехволнового преобразователя излучения с учетом обратной связи как на объектную, так и на сигнальную волны скорость изменения коэффициента отражения с увеличением интенсивности волн накачки возрастает, то для четырехволнового преобразователя излучения с учетом обратной связи только на объектную волну скорость изменения коэффициента отражения с увеличением интенсивности волн накачки падает.

При сопряжении граней нелинейного слоя даже при малых значениях коэффициента отражения  $R < 0,2$  возрастающий при увеличении интенсивности волн накачки фазовый набег, связанный с распространением волн накачки, приводит к уменьшению коэффициента отражения. Вместо выигрыша в коэффициенте отражения за счет использования обратной связи на объектную волну наблюдается его уменьшение. Как и при условии компенсации фазового набега, существует пороговое значение интенсивности волн накачки, при котором коэффициенты отражения как при наличии, так и при отсутствии обратной связи на объектную или сигнальную волны равны. Однако при сопряжении граней нелинейного слоя это пороговое значение оказывается значительно меньше, чем пороговое значение интенсивности волн накачки при компенсации фазового набега. Наблюдаемый при сопряжении граней нелинейного слоя с увеличением интенсивности волн накачки характер увеличения полуширины полосы пространственных частот в рассматриваемом диапазоне интенсивностей как при наличии обратной



связи только на объектную, так и при наличии обратной связи как на объектную, так и на сигнальную волны совпадает [6].

### Заключение

При равной интенсивности волн накачки показано совпадение амплитудных коэффициентов отражения, полуширин полос пространственных частот при условии наличия обратной связи либо на объектную, либо на сигнальную волны. Установлено, что отличие в амплитудных коэффициентах отражения при наличии и отсутствии положительной обратной связи на объектную волну с ростом интенсивности волн накачки уменьшается.

Причем пороговое значение интенсивности волн накачки, при котором коэффициенты отражения как при наличии, так и при отсутствии обратной связи на объектную волну совпадают, при компенсации фазового набега оказывается больше, чем при сопряжении граней нелинейного слоя. Показано улучшение при наличии обратной связи на сигнальную или объектную волны с ростом интенсивности волн накачки качества ОВФ. При компенсации фазового набега скорость роста полуширины полосы пространственных частот с увеличением интенсивности волн накачки возрастает по мере приближения параметров кольцевого резонатора к параметрам, соответствующим оптимальным значениям.

### Список литературы

1. Ивахник В.В., Петникова В.М., Шувалов В.В. Повышение эффективности систем обращения волнового фронта при использовании кольцевых резонаторов // Квантовая электроника. 1981. Т.8, № 2. С. 445–448. DOI: <https://doi.org/10.1070/QE1981v011n02ABEH005924>
2. Formation of holographic gratings and dynamics of four-wave mixing in nonlinear microresonators / O.G. Romanov [et al.] // Proceedings of SPIE. 2006. Vol. 6255. P. 625507. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.676523>
3. Романов О.Г., Ормачеа О., Толстик А.Л. Частотно невырожденное четырехволновое взаимодействие в нелинейном интерферометре Фабри – Перо // Вестник БГУ. Сер. 1. 2008. № 1. С. 8–12.
4. Singh R., Yadav R.A., Singh D.P. Study of oscillation performance characteristics of unidirectional photorefractive ring resonators: Cavity detuning dependence // AIP Advances. 2015. Vol. 5, no. 7. P. 077135. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4927065>
5. Акимов А.А., Гузаиров С.А., Ивахник В.В. Четырехволновое взаимодействие на тепловой нелинейности в схеме с положительной обратной связью // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42, № 4. С. 534–541. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-4-534-541>
6. Акимов А.А., Гузаиров С.А., Ивахник В.В. Качество преобразования излучения при четырехволновом взаимодействии на тепловой нелинейности с учетом обратной связи // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45, № 5. С. 667–672. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-888>
7. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта. М.: Наука, 1985. 240 с.
8. Дмитриев В.Г. Нелинейная оптика и обращение волнового фронта. М.: Физматлит, 2003. 256 с.
9. Акимов А.А., Ивахник В.В., Никонов В.И. Четырехволновое взаимодействие на тепловой нелинейности при больших коэффициентах отражения с учетом самодифракции волн накачки // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35, № 2. С. 250–255.
10. Ивахник В.В., Харская Т.Г. Использование метода функции размытия точки для анализа качества преобразования излучения при четырехволновом взаимодействии на тепловой нелинейности (обзор) // Компьютерная оптика. 2009. Т. 33, № 1. С. 17–26.
11. Пахомов И.И., Рожков О.В., Рождествин В.Н. Оптико-электронные квантовые приборы. М.: Радио и связь, 1982. 456 с.
12. Ковалев В.И., Трофимов В.А. Роль нелинейного поглощения в ОВФ ИК излучения при четырехволновом взаимодействии в полупроводниках // Квантовая электроника. 1991. Т. 18, № 11. С. 1336–1339.

### References

1. Ivakhnik V.V., Petnikova V.M., Shuvalov V.V. Increasing the efficiency of wavefront conjugation systems using ring resonators. *Kvantovaya elektronika*, 1981, vol. 8, no. 2, pp. 445–448. DOI: <https://doi.org/10.1070/QE1981v011n02ABEH005924> (In Russ.)
2. Romanov O.G. et al. Formation of holographic gratings and dynamics of four-wave mixing in nonlinear microresonators. *Proceedings of SPIE*. 2006. Vol. 6255, p. 625507. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.676523>
3. Romanov O.G., Ormachea O., Tolstik A.L. Frequency nondegenerate four-wave interaction in a nonlinear Fabry – Perot interferometer. *Vestnik BGU. Ser. 1*, 2008, no. 1, pp. 8–12. (In Russ.)
4. Singh R., Yadav R.A., Singh D.P. Study of oscillation performance characteristics of unidirectional photorefractive ring resonators: Cavity detuning dependence. *AIP Advances*, 2015, vol. 5, no. 7, p. 077135. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4927065>
5. Akimov A.A., Guzairov S.A., Ivakhnik V.V. Four-wave interaction on thermal nonlinearity in a scheme with positive feedback. *Komp'yuternaya optika*, 2018, vol. 42, no. 4, pp. 534–541. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-4-534-541> (In Russ.)
6. Akimov A.A., Guzairov S.A., Ivakhnik V.V. The quality of radiation conversion during four-wave interaction on thermal nonlinearity, taking into account feedback. *Komp'yuternaya optika*, 2021, vol. 45, no. 5, pp. 667–672. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-888> (In Russ.)
7. Zel'dovich B.Ya., Pilipetskiy N.F., Shkunov V.V. *Wavefront Reversal*. Moscow: Nauka, 1985, 240 p. (In Russ.)
8. Dmitriev V.G. *Nonlinear Optics and Wavefront Conjugation*. Moscow: Fizmatlit, 2003, 256 p. (In Russ.)

9. Akimov A.A., Ivakhnik V.V., Nikonov V.I. Four-wave interaction on thermal nonlinearity at high reflection coefficients with self-diffraction of pump waves taken into account. *Komp'yuternaya optika*, 2011, vol. 35, no. 2, pp. 250–255. (In Russ.)
10. Ivakhnik V.V., Kharskaya T.G. Using the point blur function method to analyze the quality of radiation conversion in four-wave interaction on thermal nonlinearity (review). *Komp'yuternaya optika*, 2009, vol. 33, no. 1, pp. 17–26. (In Russ.)
11. Pakhomov I.I., Rozhkov O.V., Rozhdestvin V.N. *Optoelectronic Quantum Devices*. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 456 p. (In Russ.)
12. Kovalev V.I., Trofimov V.A. The role of nonlinear absorption in the phase conjugation of IR radiation during four-wave interaction in semiconductors. *Kvantovaya elektronika*, 1991, vol. 18, no. 11, pp. 1336–1339. (In Russ.)

---

## Physics of Wave Processes and Radio Systems

2022, vol. 25, no. 3, pp. 9–15

DOI 10.18469/1810-3189.2022.25.3.9-15

Received 12 April 2022  
Accepted 13 May 2022

### Four-wave mixing on thermal nonlinearity with feedback for signal or object waves

*Aleksandr A. Akimov, Salavat A. Guzairov, Valery V. Ivakhnik*

Samara National Research University  
34, Moskovskoye shosse,  
Samara, 443086, Russia

*Abstract* – The coincidence of the amplitude reflection coefficients, half-widths of the spatial frequencies bands of a four-wave radiation converter on thermal nonlinearity with feedback for signal or object waves has been shown at equal pump waves intensity. The dependence of the amplitude reflection coefficient, spatial selectivity of the four-wave radiation converter on thermal nonlinearity on the pump waves intensity has been analyzed. An increase in the half-width of the spatial frequency band is observed with an increase in the pump waves intensity at the compensation for the phase shift arising as a result of the propagation of the pump waves in the medium. There is a threshold value of the pump waves intensity, above which the value of the amplitude reflection coefficient of the four-wave converter with feedback for signal or object waves, is less than in the absence of feedback.

*Keywords* – four-wave converter; feedback; thermal nonlinearity.

---

### Информация об авторах

**Акимов Александр Александрович**, 1988 г. р., кандидат физико-математических наук, доцент 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:* alexakimov50@mail.ru

**Гузаиров Салават Абдрахимович**, 1994 г. р., аспирант 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:* zenit210694@mail.ru

**Ивахник Валерий Владимирович**, 1951 г. р., 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

### Information about the Authors

**Aleksandr A. Akimov** was born in 1988, 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:* alexakimov50@mail.ru

**Salavat A. Guzairov** was born in 1994, a postgraduated student of the Department of Optics and Spectroscopy, Samara National Research University, Samara, Russia.

*Research interests:* nonlinear optics, dynamic holography.

*E-mail:* zenit210694@mail.ru

**Valery V. Ivakhnik** was born in 1951, 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