

Качество преобразования излучения при четырёхволновом взаимодействии на тепловой нелинейности с учетом обратной связи

А.А. Акимов¹, С.А. Гузаиров¹, В.В. Ивахник¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

Аннотация

При больших коэффициентах отражения исследовано качество преобразования излучения при четырёхволновом взаимодействии на тепловой нелинейности с учетом обратной связи на сигнальную и объектную волны. Показано, что оптимальным режимом работы четырёхволнового преобразователя на тепловой нелинейности является режим, при котором интенсивности волн накачки равны, и происходит компенсация фазового набега, возникающего вследствие самовоздействия волн накачки. При таком режиме работы четырёхволнового преобразователя излучения по сравнению со случаем отсутствия обратной связи на сигнальную и объектную волны с ростом интенсивности волн накачки наблюдается значительное увеличение амплитудного коэффициента отражения. При этом, несмотря на уменьшение ширины полосы пространственных частот объектной волны с ростом интенсивности волн накачки, качество преобразования излучения при наличии обратной связи на сигнальную и объектную волны оказывается лучше, чем при ее отсутствии.

Ключевые слова: четырёхволновой преобразователь излучения, обратная связь, тепловая нелинейность.

Цитирование: Акимов, А.А. Качество преобразования излучения при четырёхволновом взаимодействии на тепловой нелинейности с учетом обратной связи / А.А. Акимов, С.А. Гузаиров, В.В. Ивахник // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 5. – С. 667-672. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-888.

Citation: Akimov AA, Guzairov SA, Ivakhnik VV. Quality of radiation conversion under four-wave mixing on thermal nonlinearity with feedback. Computer Optics 2021; 45(5): 667-672. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-888.

Введение

Повышение эффективности (коэффициента отражения) четырёхволновых преобразователей излучения, используемых в системах коррекции фазовых искажений, системах передачи и обработки в реальном масштабе времени пространственной и временной информации, является одной из актуальных задач оптики многоволновых взаимодействий [1–5].

Для решения этой задачи предлагается использовать положительную обратную связь, накладываемую либо на волны накачки с помощью интерферометра Фабри–Перо [6], либо на сигнальную и объектную волны с помощью, например, кольцевого резонатора [7–9].

Наряду с эффективностью преобразования, одной из важнейших характеристик четырёхволновых преобразователей излучения является качество преобразования, определяемое по соответствию комплексных амплитуд сигнальной и объектной волн (или их пространственных спектров). Для количественной характеристики качества преобразования наиболее часто используются такие величины, как ширина модуля функции размытия точки (ширина полосы пространственных частот) [10–11], значение интеграла перекрытия [12], знание которых позволяет найти характерный размер неоднородностей, которые могут быть скомпенсированы при обратном распространении

волны с обращённым волновым фронтом (ОВФ) через оптически неоднородную среду, пространственный масштаб изображения, обрабатываемого с использованием четырёхволнового преобразователя излучения [13–18].

Для вырожденных четырёхволновых преобразователей излучения в среде с керровской нелинейностью показано, что в приближении плоских встречных волн накачки наличие обратной связи на сигнальную и объектную волны не влияет на качество ОВФ. Вырожденный четырёхволновой преобразователь излучения с плоскими волнами накачки идеально обращает волновой фронт сигнальной волны [7]. Переход к квазивырожденному четырёхволновому преобразователю излучения в среде с керровской нелинейностью приводит к возникновению зависимости качества ОВФ от параметров, определяющих обратную связь [8].

В среднем ИК-диапазоне длин волн для реализации четырёхволнового взаимодействия широко используются среды с тепловой нелинейностью. Как и для четырёхволновых преобразователей в среде с керровской нелинейностью, для четырёхволновых преобразователей на тепловой нелинейности наличие положительной обратной связи на сигнальную и объектную волны приводит к увеличению коэффициента отражения [9].

Представляет интерес исследование качества преобразования излучения при четырёхволновом взаимодействии на тепловой нелинейности с учетом обратной связи на сигнальную и объектную волны.

1. Модель четырёхволнового преобразователя излучения

Рассмотрим вырожденное четырёхволновое 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 . Нелинейная среда располагается внутри кольцевого резонатора, задающего обратную связь на сигнальную и объектную волны (рис. 1).

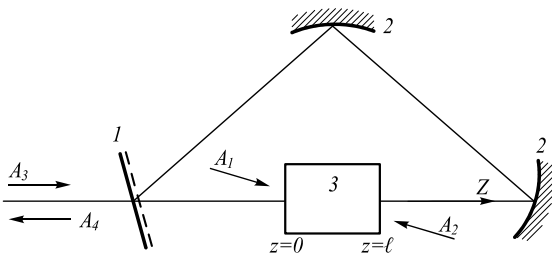


Рис. 1. Схема четырёхволнового взаимодействия в кольцевом резонаторе: 1 – полупрозрачное зеркало, 2 – сферические зеркала, 3 – нелинейная среда

Уравнение Гельмгольца, описывающее четырёхволновое взаимодействие, имеет вид [2]

$$\left\{ \nabla^2 + k^2 \left(1 + \frac{2}{n_0} \frac{dn}{dT} \delta T \right) - 2ik\alpha \right\} (A + A^*) = 0. \quad (1)$$

Здесь $A = \sum_{j=1}^4 A_j$, n_0 – показатель преломления среды, $k = \omega n_0 / c$ – волновое число, α – коэффициент поглощения, δT – изменение температуры, обусловленное выделением тепла при поглощении излучения.

Уравнение (1) необходимо дополнить уравнением Пуассона

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

где $I = AA^*$ – интенсивность излучения, Λ – коэффициент температуропроводности, c_p – удельная теплоёмкость, ν – объемная плотность вещества.

Пусть волны накачки плоские и распространяются строго вдоль оси Z

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

Сигнальную и объектную волны разложим по плоским волнам

$$A_j(\vec{r}) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{A}_j(\vec{k}_j, z) \exp(-i\vec{k}_j \vec{\rho} - ik_{jz} z) d\vec{k}_j, \quad j = 3, 4. \quad (4)$$

Здесь $\tilde{A}_j(\vec{k}_j, z)$ – пространственный спектр j -волны, $\vec{\rho}$ – поперечная составляющая радиус-вектора \vec{r} , \vec{k}_j и k_{jz} – поперечная и продольная составляющие волнового вектора \vec{k}_j , $|\vec{k}_j| = k$.

Используя уравнение Гельмгольца и уравнение Пуассона с учетом (3) и (4) в приближении заданного поля по плоским волнам накачки в работе [16] при учете самодифракции волн накачки, перекачки энергии из сигнальной волны в объектную и наоборот, получена система из двух связанных дифференциальных уравнений третьего порядка для пространственных спектров сигнальной и объектной волн вида

$$\begin{aligned} \frac{d^3 \tilde{A}'_3}{dz^3} + i \frac{\kappa^2}{k} \frac{d^2 \tilde{A}'_3}{dz^2} - \left[\kappa^2 + \left(\frac{\kappa^2}{2k} \right)^2 \right] \frac{d \tilde{A}'_3}{dz} - \\ - i G_1 \tilde{A}'_3 \exp(-2\alpha z) = i G \tilde{A}'_4 \exp[2\alpha(z - \ell)], \\ \frac{d^3 \tilde{A}'_4}{dz^3} + i \frac{\kappa^2}{k} \frac{d^2 \tilde{A}'_4}{dz^2} - \left[\kappa^2 + \left(\frac{\kappa^2}{2k} \right)^2 \right] \frac{d \tilde{A}'_4}{dz} - \\ - i G_2 \tilde{A}'_4 \exp[2\alpha(z - \ell)] = i G \tilde{A}'_3 \exp(-2\alpha z). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \tilde{A}'_4(\vec{k}_4, z) = \tilde{A}_4(\vec{k}_4, z) \exp\{-\alpha(z - \ell) - iC(z) + iC(\ell)\}, \\ \tilde{A}'_3(\vec{k}_3, z) = \tilde{A}_3(\vec{k}_3, z) \exp\{\alpha z + iC(z)\}, \quad \vec{k} = \vec{k}_3 = -\vec{k}_4, \end{aligned}$$

$$\kappa = |\vec{k}|, \quad G^2 = G_1 G_2, \quad G_{1,2} = \frac{2k}{n_0} \frac{dn}{dT} \frac{\alpha}{\Lambda c_p \nu} I_{10,20},$$

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

$$\begin{aligned} C(z) = -\frac{k}{n_0} \frac{dn}{dT} \frac{1}{2\alpha \Lambda c_p \nu} \times \{ I_{10} (2\alpha)^{-1} \{ 1 - \exp(-2\alpha z) \} - \\ - z I_{10} + I_{20} (2\alpha)^{-1} \{ \exp\{2\alpha(z - \ell)\} - \exp(-2\alpha \ell) \} - \\ - z I_{20} \exp(-2\alpha \ell) + z^2 (2\ell)^{-1} \{ 1 - \exp(-2\alpha \ell) \} \} \{ I_{10} - I_{20} \}. \end{aligned}$$

набег фазы, связанный с распространением в нелинейной среде волн накачки (самовоздействием волн накачки).

Система уравнений (5) записана при квазиколлинеарной геометрии взаимодействия, в параксиальном приближении ($k_{3,z} = \pm(k - \kappa^2 / 2k)$).

При расположении четырёхволнового преобразователя внутри кольцевого резонатора граничные условия на пространственные спектры сигнальной и объектной волн есть

$$\begin{aligned} \tilde{A}'_3(\kappa, z=0) = \sqrt{1-r_1} \tilde{A}_{30}(\kappa) + \\ + \sqrt{r_1 r_2} \exp(-i\Delta_0 + i\kappa^2 L / 2k) \times \\ \times \exp\{-\alpha \ell - iC(\ell)\} \tilde{A}'_3(\kappa, z=\ell), \\ \tilde{A}'_4(\kappa, z=0) \sqrt{r_1 r_2} \exp(-i\Delta_0 + i\kappa^2 L / 2k) \times \\ \times \exp\{-\alpha \ell - iC(\ell)\} = \tilde{A}'_4(\kappa, z=\ell). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $\tilde{A}_{30}(\kappa)$ – пространственный спектр сигнальной волны на передней грани нелинейного слоя в отсутствие кольцевого резонатора, r_1 – коэффициент отражения полупрозрачного зеркала связи, r_2 – коэффициент отражения сферических зеркал резонатора, Δ_0 – постоянный фазовый набег, наличие которого может быть реализовано, например, либо путем введения в кольцевой резонатор фазового модулятора света, либо с помощью управляемого изменения длины резонатора с одновременным переносом пространственных спектров сигнальной и объектной волн с передней плоскости нелинейного слоя на плоскость, расположенную на расстоянии L от задней плоскости нелинейного слоя ($\Delta_0 = kL$) [19].

Граничные условия (6) записаны без учета астигматизма, то есть для волн, распространяющихся в плоскости, перпендикулярной плоскости контура резонатора [20].

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

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

При малом амплитудном коэффициенте отражения

$$\left(R = \left| \frac{\tilde{A}_4(\kappa=0, z=0)}{\tilde{A}_{30}^*} \right| \ll 1 \right),$$

без учета самодифракции волн накачки, решая систему уравнений (5) с учетом граничных условий, получим выражение для пространственного спектра объектной волны на передней грани нелинейного слоя

$$\begin{aligned} \tilde{A}_4'(\kappa, z=0) &= \frac{iG\tilde{A}_{30}^*(\kappa)\sqrt{1-r_1}}{2(1-p)(1-p^*)(\beta^2-\kappa^2)} \times \\ &\times \left[\left((i\kappa^2/2k + \kappa)sh(\kappa\ell) \right)^{-1} \times \right. \\ &\times \left\{ \left[\exp(-\beta\ell) - \exp(-\kappa\ell) \right] \left[1 - \exp(i\kappa^2/2k + \kappa)\ell \right] \right\} + \\ &+ \left((i\kappa^2/2k - \kappa)sh(\kappa\ell) \right)^{-1} \times \\ &\times \left\{ \left[\exp(\kappa\ell) - \exp(-\beta\ell) \right] \left[1 - \exp(i\kappa^2/2k - \kappa)\ell \right] \right\} + \\ &+ (\alpha)^{-1} (1 - \exp(-2\alpha\ell)) \left. \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь $p = \sqrt{r_1 r_2} \exp[-\alpha\ell - iC(\ell) - i\Delta_0 + i\kappa^2 L/2k]$, $\beta = 2\alpha + i\kappa^2/2k$.

Из выражения (8) следует, что как при сопряжении граней нелинейного слоя ($L=0, \Delta=0$), так и при компенсации фазовых искажений, возникающих при самовоздействии волн накачки ($\Delta_0 + C(\ell) = 2\pi m, m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) и $kL < 10$, наличие обратной связи не влияет на пространственную се-

лективность четырёхволнового преобразователя излучения, меняется лишь амплитудный коэффициент отражения.

2. Обсуждение результатов

При большом амплитудном коэффициенте отражения ($R > 0,2$), когда необходимо учитывать самодифракцию волн накачки, перекачку энергии из сигнальной волны в объектную и наоборот, система уравнений (5) с учетом граничных условий (6), (7) анализировалась численным методом на основе многократного прохождения сигнальной и объектной волн нелинейного слоя в кольцевом резонаторе. Граничные условия на комплексные амплитуды сигнальной и объектной волн на первом проходе определялись при условии $r_2 = 0$.

Для сигнальной волны в виде точечного источника, расположенного на передней грани нелинейного слоя ($\tilde{A}_{30}(\kappa)=1$), с увеличением пространственной частоты наблюдается монотонное уменьшение модуля пространственного спектра объектной волны.

При квазиколлинеарной геометрии взаимодействия учет распространения плоских волн накачки под углом к оси Z не оказывает существенного влияния на вид пространственного спектра объектной волны.

В качестве параметра, определяющего качество преобразования излучения при четырёхволновом взаимодействии, как при наличии кольцевого резонатора, так и при его отсутствии может выступать полуширина полосы пространственных частот ($\Delta\kappa$), определяемая из решения уравнения

$$\left| \tilde{A}_4(\kappa = \Delta\kappa, z=0) \right| = \frac{1}{2} \left| \tilde{A}_4(\kappa = 0, z=0) \right|. \quad (9)$$

В пределах ширины полосы пространственных частот ($2\Delta\kappa$) сосредоточена основная доля энергии объектной волны.

При малом коэффициенте отражения качество преобразования излучения полностью определяется толщиной нелинейной среды, длиной волны, коэффициентом поглощения [2].

Существует область значений коэффициентов отражения кольцевого резонатора r_1 и r_2 , в пределах которой коэффициент отражения четырёхволнового преобразователя излучения при наличии обратной связи превосходит коэффициент отражения при её отсутствии [9].

На рис. 2а и рис. 3а приведены зависимости амплитудного коэффициента отражения, а на рис. 2б и рис. 3б – нормированной полуширины полосы пространственных частот ($\Delta\tilde{\kappa} = \Delta\kappa\sqrt{\ell/2k}$) от нормированной интенсивности первой волны накачки ($\tilde{G} = G_1\ell(k\alpha)^{-1}$) при условии компенсации фазового набег, возникающего вследствие самовоздействия волн накачки (рис. 2а, б), и при сопряжении граней нелинейного слоя (рис. 3а, б). Значения амплитудных

коэффициентов отражения, полуширины полосы пространственных частот четырёхволнового преобразователя излучения получены с точностью 0,7%.

Значения R и $\Delta\tilde{\kappa}$, полученные как с использованием аналитического выражения (8), так и при решении системы уравнений (5) с помощью численного метода при $\tilde{G} \rightarrow 0$, совпадают.

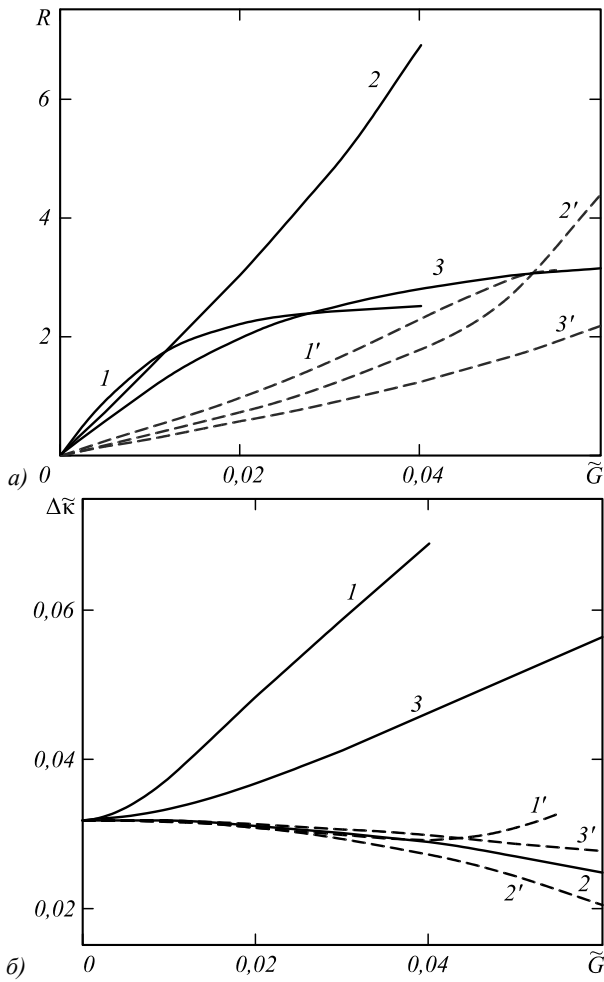


Рис. 2. Графики зависимостей коэффициента отражения (а), полуширины полосы пространственных частот (б) при наличии обратной связи и условии компенсации фазового набега (сплошные линии) и при отсутствии обратной связи (штриховые линии) от нормированной интенсивности первой волны накачки при $k\ell=5 \cdot 10^3$, $\alpha\ell=10^{-1}$, $r_1=0,8$, $r_2=0,7$, $\sqrt{I_{10}/I_{20}} = 0,75$ (1, 1'), 1 (2, 2'), 1,25 (3, 3')

Качественный анализ зависимости амплитудных коэффициентов отражения от интенсивности волн накачки при наличии обратной связи на сигнальную и объектную волны и условия $I_{10}=I_{20}$ приведен в работе [9].

Рост интенсивности волн накачки как при наличии обратной связи на сигнальную и объектную волны и компенсации фазового набега, так и при отсутствии обратной связи на эти волны приводит к увеличению амплитудного коэффициента отражения [11].

При наличии обратной связи на сигнальную и объектную волны, $\Delta_0 + C(\ell) = 2\pi t$ и постоянном отношении интенсивностей волн накачки на гранях нелиней-

ной среды с увеличением интенсивности первой волны накачки скорость изменения амплитудного коэффициента отражения ($\mu = dR/dI_{10}$) при $I_{10}=I_{20}$ возрастает, а при $I_{10} \neq I_{20}$ уменьшается, стремясь к нулю. Таким образом, при неравных интенсивностях волн накачки существует интенсивность первой волны накачки (I_{10}^{sp}), начиная с которой ее увеличение при наличии обратной связи на сигнальную и объектную волны не приводит к росту амплитудного коэффициента отражения. Увеличение отношения интенсивностей волн накачки I_{20}/I_{10} уменьшает значение I_{10}^{sp} .

При компенсации фазового набега и $I_{10}=I_{20}$ увеличение интенсивности волн накачки при наличии обратной связи на сигнальную и объектную волны, как и при ее отсутствии, монотонно уменьшает полуширину полосы пространственных частот. Причем скорость изменения $\Delta\kappa$ в зависимости от I_{10} ($\eta = d\Delta\kappa/dI_{10}$) при наличии обратной связи меньше, чем при ее отсутствии. Значение полуширины полосы пространственных частот при наличии положительной обратной связи на сигнальную и объектную волны оказывается больше полуширины полосы пространственных частот при ее отсутствии. Разность между полуширинами полос пространственных частот при наличии и отсутствии обратной связи с увеличением интенсивности волн накачки возрастает.

По мере увеличения отклонения отношения интенсивностей волн накачки от единицы вначале наблюдается уменьшение скорости изменения полуширины полосы пространственных частот с увеличением интенсивности первой волны накачки. При дальнейшем увеличении отклонения от единицы отношения интенсивностей волн накачки скорость изменения полуширины полосы пространственных частот в зависимости от интенсивности первой волны накачки, изменив знак, вновь возрастает.

Наличие обратной связи на сигнальную и объектную волны при условии компенсации фазового набега по сравнению с отсутствием обратной связи приводит к более резкому изменению полуширины полосы пространственных частот с изменением отношения интенсивностей волн накачки.

При $I_{10} \neq I_{20}$ изменение полуширины полосы пространственных частот, обусловленное самодифракцией волн накачки, перекачкой энергии из сигнальной волны в объектную и наоборот, при наличии обратной связи на сигнальную и объектную волны значительно превышает изменение полуширины полосы пространственных частот при отсутствии обратной связи. Так, например, при $k\ell = 5000$, $\alpha\ell = 0,1$, $r_1 = 0,8$, $r_2 = 0,7$, соотношении интенсивностей волн накачки $\sqrt{I_{10}/I_{20}} = 1,25$, нормированной интенсивности первой волны накачки $\tilde{G} = 0,04$ амплитудные коэффициенты отражения при наличии обратной связи и при ее отсутствии составляют 2,81 и 1,24 соответственно. Значения нормированных полуширин полос пространственных частот, соответствующие этим случаям, есть

0,046 и 0,03. При малом амплитудном коэффициенте отражения нормированная полуширина полосы пространственных частот равна 0,032. Тогда изменение нормированной полуширины полосы пространственных частот, обусловленное самодифракцией волн накачки, перекачкой энергии из сигнальной волны в объектную и наоборот, при наличии обратной связи на сигнальную и объектную волны и при ее отсутствии составляют 0,014 и -0,002 соответственно.

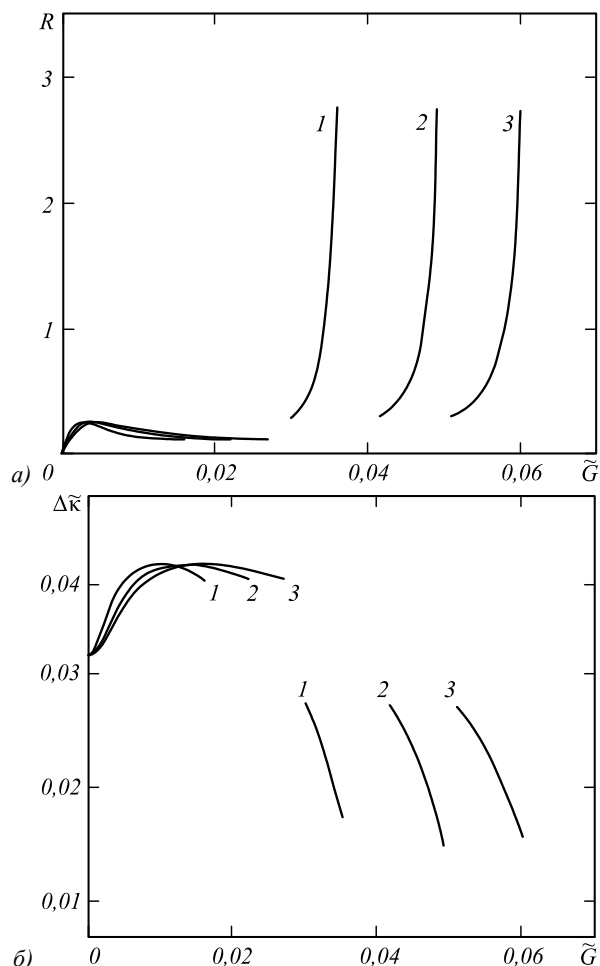


Рис. 3. Графики зависимостей коэффициента отражения (а), полуширины полосы пространственных частот (б) при сопряжении граней нелинейного слоя от нормированной интенсивности первой волны накачки при $kl=5 \cdot 10^3$, $\alpha l=10^{-1}$, $r_1=0,8$, $r_2=0,7$, $\sqrt{I_{10}/I_{20}} = 0,75$ (1), 1 (2), 1,25 (3)

При сопряжении граней нелинейного слоя на приведенных на рис. 3а, б графиках существует область интенсивности первой волны накачки, в пределах которой не удастся найти решение системы уравнений (5) вблизи нулевой пространственной частоты. В этой области по мере увеличения числа проходов объектной и сигнальной волн по кольцевому резонатору наблюдается осциллирующее увеличение модуля пространственного спектра объектной волны [15].

Резкое увеличение амплитудного коэффициента отражения при сопряжении граней нелинейного слоя

наблюдается при условии, что фазовый набег, возникающий вследствие самовоздействия волн накачки, равен $\pm 2\pi$.

Если интенсивности волн накачки не равны и $I_{10}/I_{20} > 1$, то по сравнению со случаем равных интенсивностей волн накачки условие $C(\ell) = \pm 2\pi$ выполняется при большем значении интенсивности первой волны накачки, а если $I_{10}/I_{20} < 1$, оно выполняется при меньших интенсивностях первой волны накачки.

При наличии обратной связи на сигнальную и объектную волны и сопряжении граней нелинейного слоя увеличение интенсивности волн накачки приводит вначале к небольшому росту, а затем к монотонному уменьшению полуширины полосы пространственных частот. Качество обращения волнового фронта ухудшается. Причем в области $R > 1$ скорость изменения Δk от интенсивности первой волны накачки при сопряжении граней нелинейного слоя значительно превосходит скорость изменения полуширины полосы пространственных частот с увеличением интенсивности волн накачки при компенсации фазового набега, возникающего вследствие самовоздействия волн накачки.

Заключение

Для четырёхволнового преобразователя на тепловой нелинейности при наличии обратной связи как на сигнальную, так и на объектную волны при равных интенсивностях волн накачки показано наличие корреляции между амплитудным коэффициентом отражения и полушириной полосы пространственных частот. При $R > 1$ с ростом интенсивности волн накачки происходит увеличение амплитудного коэффициента отражения, уменьшение полуширины полосы пространственных частот объектной волны, а значит, ухудшение качества ОВФ.

При фиксированном, не равном единице отношении интенсивностей волн накачки и компенсации фазового набега, обусловленного самовоздействием волн накачки, увеличение интенсивности первой волны накачки приводит при $R > 1,5$ к уширению полосы пространственных частот объектной волны, при этом значение амплитудного коэффициента отражения по сравнению со случаем $I_{10} = I_{20}$ уменьшается.

Анализ амплитудного коэффициента отражения, полуширины полосы пространственных частот показывает, что наиболее оптимальным режимом работы четырёхволнового преобразователя на тепловой нелинейности, при котором с ростом интенсивности волн накачки наблюдается существенный рост амплитудного коэффициента отражения и незначительное ухудшение качества преобразования излучения, является режим, когда интенсивности волн накачки равны, реализуется обратная связь на сигнальную и объектную волны и происходит компенсация фазового набега, возникающего вследствие самовоздействия волн накачки.

Литература

1. **Дмитриев, В.Г.** Нелинейная оптика и обращение волнового фронта / В.Г. Дмитриев. – М.: Физматлит, 2003. – 256 с. – ISBN: 5-9221-0080-7.
2. **Ивахник, В.В.** Обращение волнового фронта при четырёхволновом взаимодействии / В.В. Ивахник. – Самара: Самарский университет, 2010. – 246 с. – ISBN: 978-5-86465-471-2.
3. **Ma, X.** Generation of photon pairs in dispersion shift fibers through spontaneous four-wave mixing: influence of self-phase modulation / X. Ma, L. Yang, X. Guo, X. Li // *Optics Communications*. – 2011. – Vol. 284, Issue 19. – P. 4558-4562. – DOI: 10.1016/j.optcom.2011.06.011.
4. **Salem, R.** Optical time lens based on four-wave mixing on a silicon chip / R. Salem, M.A. Foster, A.C. Turner, D.F. Geraghty, M. Lipson, A.L. Gaeta // *Optics Letters*. – 2008. – Vol. 33, Issue 10. – P. 1047-1049. – DOI: 10.1364/OL.33.001047.
5. **Щеулин, А.С.** Голографические среды на основе кристаллов со структурой флюорита с центрами окраски / А.С. Щеулин, А.Е. Ангервакс, А.И. Рыскин. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 127 с.
6. **Romanov, O.G.** Formation of holographic gratings and dynamics of four-wave mixing in nonlinear microresonators / O.G. Romanov, O. Ormachea, A.L. Tolstik, J.L. Arce-Diego, D. Pereda-Cubian, F. Fanjul-Velez // *Proceedings of SPIE*. – 2006. – Vol. 6255. – 625507. – DOI: 10.1117/12.676523.
7. **Ивахник, В.В.** Повышение эффективности систем обращения волнового фронта при использовании кольцевых резонаторов / В.В. Ивахник, В.М. Петникова, В.В. Шувалов // *Квантовая электроника*. – 1981. – Т. 8, № 2. – С. 445-448.
8. **Ивахник, В.В.** Фильтрация оптического излучения при невырожденном четырёхфотонном взаимодействии / В.В. Ивахник // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 1982. – Т. 25, № 8. – С. 97-99.
9. **Акимов, А.А.** Четырёхволновое взаимодействие на тепловой нелинейности в схеме с положительной обратной связью / А.А. Акимов, С.А. Гузаиров, В.В. Ивахник // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 4. – С. 534-541. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-4-534-541.
10. **Воронин, Э.С.** Компенсация фазовых искажений при вырожденном четырёхчастотном взаимодействии / Э.С. Воронин, В.В. Ивахник, В.М. Петникова, В.С. Соломатин, В.В. Шувалов // *Квантовая электроника*. – 1979. – Т. 6, № 9. – С. 2009-2015.
11. **Акимов, А.А.** Обращение волнового фронта при четырёхволновом взаимодействии на резонансной и тепловой нелинейностях при больших коэффициентах отражения / А.А. Акимов, В.В. Ивахник, В.И. Никонов // *Оптика и спектроскопия*. – 2013. – Т. 115, № 3. – С. 438-445. – DOI: 10.7868/S0030403413090031.
12. **Зельдович, Б.Я.** Влияние пространственной интерференции на усиление при вырожденном рассеянии света / Б.Я. Зельдович, В.В. Шкунов // *Квантовая электроника*. – 1977. – Т. 4, № 11. – С. 2353-2359.
13. **Воронин, Э.С.** Использование вырожденных параметрических процессов для коррекции волновых фронтов (обзор) / Э.С. Воронин, В.М. Петникова, В.В. Шувалов // *Квантовая электроника*. – 1981. – Т. 8, № 5. – С. 917-935.
14. **Воробьева, Е.В.** Временной отклик тонкой динамической голограммы в растворе красителя, моделируемом четырёхуровневой схемой энергетических уровней / Е.В. Воробьева, В.В. Ивахник // *Компьютерная оптика*. – 2002. – Вып. 24. – С. 91-93.
15. **Ковалев, В.И.** Роль нелинейного поглощения в ОВФ ИК излучения при четырёхволновом взаимодействии в полупроводниках / В.И. Ковалев, В.А. Трофимов // *Квантовая электроника*. – 1991. – Т. 18, № 11. – С. 1336-1339.
16. **Акимов, А.А.** Четырёхволновое взаимодействие на тепловой нелинейности при больших коэффициентах отражения с учетом самодифракции волн накачки / А.А. Акимов, В.В. Ивахник, В.И. Никонов // *Компьютерная оптика*. – 2011. – Т. 35, № 2. – С. 250-255.
17. **Pan, X.** Experimental realization of a feedback optical parametric amplifier with four-wave mixing / X. Pan, H. Chen, T. Wei, J. Zhang, A.M. Marino, N. Treps, R.T. Glasser, J. Jing // *Physical Review B*. – 2018. – Vol. 97, Issue 16 – 161115. – DOI: 10.1103/PhysRevB.97.161115.
18. **Сметанин, С.Н.** Сравнительный анализ использования различных твердотельных лазерных сред для самовозбуждения четырёхволновой ОВФ-генерации в петлевом лазерном резонаторе / С.Н. Сметанин // *Квантовая электроника*. – 2013. – Т. 43, № 1. – С. 37-46.
19. **Сидоров, А.И.** Основы фотоники: физические принципы и методы преобразования оптических сигналов в устройствах фотоники / А.И. Сидоров. – СПб.: ФГБОУ ВПО «СПб НИУ ИТМО», 2014. – 148 с.
20. **Пахомов, И.И.** Оптико-электронные квантовые приборы / И.И. Пахомов, О.В. Рожков, В.Н. Рождествен. – М.: Радио и связь, 1982. – 456 с.

Сведения об авторах

Акимов Александр Александрович, 1988 года рождения, 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: alexakimov50@mail.ru.

Гузаиров Салават Абдрахимович, 1994 года рождения, аспирант кафедры оптики и спектроскопии Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева. Область научных интересов: нелинейная оптика, динамическая голография. E-mail: Zenit210694@mail.ru.

Ивахник Валерий Владимирович, 1951 года рождения, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой оптики и спектроскопии Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева. Область научных интересов: нелинейная оптика, динамическая голография.

E-mail: ivakhnik@ssau.ru.

ГРНТИ: 29.33.27

Поступила в редакцию 4 марта 2021 г. Окончательный вариант – 30 апреля 2021 г.

Quality of radiation conversion under four-wave mixing on thermal nonlinearity with feedback

A.A. Akimov¹, S.A. Guzairov¹, V.V. Ivakhnik¹

¹ Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34

Abstract

Quality of radiation conversion under four-wave mixing on thermal nonlinearity with feedback for both signal and object waves has been investigated at high reflection coefficients. It has been shown that the optimal operating mode of a four-wave converter on thermal nonlinearity is the mode in which the pumping waves have equal intensities and there is a compensation for a phase shift arising from the pumping wave self-action. In this operating mode of the four-wave radiation converter, as compared with the case of the absence of feedback for both signal and object waves, a significant increase in the amplitude reflection coefficient is observed with an increase in the pumping waves intensities. In this case, despite the decrease in the bandwidth of spatial frequencies of the object wave with an increase in the pumping wave intensities, the quality of radiation conversion with feedback for both signal and object waves is better than in the absence of feedback.

Keywords: four-wave radiation converter, feedback, thermal nonlinearity.

Citation: Akimov AA, Guzairov SA, Ivakhnik VV. Quality of radiation conversion under four-wave mixing on thermal nonlinearity with feedback. *Computer Optics* 2021; 45(5): 667-672. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-888.

References

- [1] Dmitriev VG. Nonlinear optics and wavefront reversal [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2003. ISBN: 5-9221-0080-7.
- [2] Ivakhnik VV. Wavefront reversal and four-wave interaction [In Russian]. Samara: Samara State University Publisher; 2010. ISBN: 978-5-86465-471-2.
- [3] Ma X, Yang L, Guo X, Li X. Generation of photon pairs in dispersion shift fibers through spontaneous four-wave mixing: influence of self-phase modulation. *Opt Commun* 2011; 284(19): 4558-4562. DOI: 10.1016/j.optcom.2011.06.011.
- [4] Salem R, Foster MA, Turner AC, Geraghty DF, Lipson M, Gaeta AL. Optical time lens based on four-wave mixing on a silicon chip. *Opt Lett* 2008; 33(10): 1047-1049. DOI: 10.1364/OL.33.001047.
- [5] Shcheulin AS, Angervaks AE, Ryskin AI. Holographic media based on fluorite crystals with colors centers. Saint-Petersburg: ITMO University Publisher; 2009.
- [6] Romanov OG, Ormachea O, Tolstik AL, Arce-Diego JL, Pereda-Cubian D, Fanjul-Velez F. Formation of holographic gratings and dynamics of four-wave mixing in nonlinear microresonators. *Proc SPIE* 2006; 6255: 625507. DOI: 10.1117/12.676523.
- [7] Ivakhnik VV, Petnikova VM, Shuvalov VV. Enhancement of the efficiency of wavefront reversal systems using ring resonators. *Sov J Quantum Electron* 1981; 11(2): 275-276. DOI: 10.1070/QE1981v011n02ABEH005924.
- [8] Ivakhnik VV. Optical radiation filtration with nondegenerate four-photon interaction. *Russ Phys J* 1983; 25(8): 765-767. DOI: 10.1007/BF00895259.
- [9] Akimov AA, Guzairov SA, Ivakhnik VV. Four-wave mixing on thermal nonlinearity in a scheme with positive feedback. *Computer Optics* 2018; 42(4): 534-541. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-4-534-541.
- [10] Voronin ES, Ivakhnik VV, Petnikova VM, Solomatina VS, Shuvalov VV. Compensation of phase distortions in degenerate four-frequency interaction. *Sov J Quantum Electron* 1979; 9(9): 1180-1184. DOI: 10.1070/QE1979v009n09ABEH009483.
- [11] Akimov AA, Ivakhnik VV, Nikonov VI. Phase conjugation under four-wave mixing on resonant and thermal nonlinearities at relatively high reflection coefficients. *Opt Spectrosc* 2013; 115(3): 384-390. DOI: 10.1134/S0030400X13090038.
- [12] Zeldovich BY, Shkunov VV. Influence of spatial interference on amplification in stimulated scattering of light. *Sov J Quantum Electron* 1977; 7(11): 1345-1349. DOI: 10.1070/QE1977v007n11ABEH004122.
- [13] Voronin ES, Petnikova VM, Shuvalov VV. Use of degenerate parametric processes for wavefront correction (review). *Sov J Quantum Electron* 1981; 11(5): 551-561. DOI: 10.1070/QE1981v011n05ABEH006899.
- [14] Vorobeva EV, Ivakhnik VV. Time response of a thin dynamic hologram in a dye solution simulated by a four-energy-level diagram [In Russian]. *Computer Optics* 2002; 24: 91-93.
- [15] Kovalev VI, Trofimov VA. Role of nonlinear absorption in phase conjugation of infrared radiation under conditions of a four-wave interaction in semiconductors. *Sov J Quantum Electron* 1991; 21(11): 1221-1224. DOI: 10.1070/QE1991v021n11ABEH004386.
- [16] Akimov AA, Ivakhnik VV, Nikonov VI. Four wave interaction on thermal nonlinearity at large reflectance with allowance pumping waves self-diffraction [In Russian]. *Computer Optics* 2011; 35(2): 250-255.
- [17] Pan X, Chen H, Wei T, Zhang J, Marino AM, Treps N, Glasser RT, Jing J. Experimental realization of a feedback optical parametric amplifier with four-wave mixing. *Phys Rev B* 2018; 97(16): 161115. DOI: 10.1103/PhysRevB.97.161115.
- [18] Smetanin SN. Comparative analysis of the use of various solid-state laser media for the self-starting of four-wave PCW generation in a loop laser resonator. *Quantum Electronics* 2013; 43(1): 37-46. DOI: 10.1070/QE2013v043n01ABEH014945.
- [19] Sidorov AI. Basic photonics: physical principles and methods of converting optical signals in photonic devices [In Russian]. Saint-Petersburg: ITMO University Publisher; 2014.

[20] Pakhomov II, Rozhkov OV, Rozhdestvin VN. Optoelectronic quantum devices [In Russian]. Moscow: "Radio i

Svyaz" Publisher; 1982.

Authors' information

Aleksandr Aleksandrovich Akimov (b. 1988). Candidate in Physics & Maths, associate professor of Optics and Spectroscopy department of Samara National Research University. Research interests are nonlinear optics and dynamic holography. E-mail: alexakimov50@mail.ru.

Salavat Abdrakhimovich Guzairov (b. 1994). A post-graduated student of Optics and Spectroscopy department of Samara National Research University. Research interests are nonlinear optics and dynamic holography. E-mail: Zenit210694@mail.ru.

Valery Vladimirovich Ivakhnik (b. 1951). Doctor in Physics & Maths, professor, Head of Optics and Spectroscopy department of Samara National Research University. Research interests are nonlinear optics and dynamic holography. E-mail: ivakhnik@ssau.ru.

Received March 4, 2021. The final version – April 30, 2021.
