

ВЛИЯНИЕ ПОВОРОТА И РАСХОДИМОСТИ ВОЛН НАКАЧКИ НА ПРОСТРАНСТВЕННУЮ СЕЛЕКТИВНОСТЬ ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОЗРАЧНОЙ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЕ

В.В. Ивахник, М.В. Савельев

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Аннотация

Проведён анализ пространственной селективности вырожденного четырёхволнового преобразователя излучения в прозрачной двухкомпонентной среде с учётом электрострикции и эффекта Дюфура в зависимости от поворота и расходимости волн накачки. Получены выражения, связывающие ширину полосы наиболее эффективно преобразуемых пространственных частот с углом поворота и расходимостью волн накачки.

Ключевые слова: пространственная селективность, четырёхволновой преобразователь излучения, прозрачная двухкомпонентная среда.

Цитирование: Ивахник, В.В. Влияние поворота и расходимости волн накачки на пространственную селективность четырёхволнового преобразователя излучения в прозрачной двухкомпонентной среде / В.В. Ивахник, М.В. Савельев // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 1. – С. 19-25. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-19-25.

Введение

Приближение плоских монохроматических волн накачки, в рамках которого, как правило, рассматривается четырёхволновое взаимодействие, хорошо описывает энергетические характеристики четырёхволнового преобразователя (коэффициент отражения, дифракционную эффективность), влияние на эти характеристики параметров нелинейной среды, волн накачки [1–2].

Однако при изучении качества преобразования излучения при четырёхволновом взаимодействии, т.е. определении, насколько пространственный спектр (амплитуда) объектной волны соответствует комплексно сопряжённому пространственному спектру (амплитуде) сигнальной волны, учёт пространственной структуры волн накачки является необходимым условием. Так, пространственная структура волн накачки полностью определяет разрешающую способность четырёхволновых преобразователей с керровской, резонансной нелинейностями [3–4]. Для четырёхволновых преобразователей на тепловой нелинейности учёт пространственной структуры волн накачки приводит к дополнительному ухудшению качества преобразования изображения [5].

В последние годы проводятся активные исследования четырёхволновых взаимодействий в многокомпонентных, в частности, прозрачных средах [6–14]. В приближении плоских волн накачки четырёхволновые преобразователи на таких нелинейных средах за счёт явления электрострикции осуществляют фильтрацию высоких пространственных частот [15–16].

Представляет практический интерес исследование пространственной селективности четырёхволнового преобразователя излучения в прозрачной двухкомпонентной среде с учётом поворота и расходимости волн накачки.

1. Пространственный спектр четырёхволнового преобразователя излучения

Рассмотрим вырожденное четырёхволновое взаимодействие $\omega + \omega - \omega = \omega$ в плоском слое прозрачной нелинейной среды (жидкость, в которой находятся наночастицы), 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 и сигнальная волна с комплексной амплитудой A_3 . Будем учитывать интерференцию первой волны накачки и сигнальной волны. Электрострикционная сила, пропорциональная градиенту интенсивности, приводит к возникновению потока наночастиц, который из-за эффекта Дюфура изменяет температуру (δT), а значит, и показатель преломления среды $\delta n = (dn/dT)\delta T$. В среде наводится динамическая фазовая решётка. При дифракции второй волны накачки на решётке показателя преломления генерируется объектная волна с комплексной амплитудой A_4 , распространяющаяся навстречу сигнальной волне.

Как показано в работе [15], в приближении заданного поля по плоским волнам накачки с единичными амплитудами при условии, что коэффициент отражения небольшой ($|A_4| \ll |A_3|$), пространственные спектры объектной (\tilde{A}_4) и сигнальной (\tilde{A}_3) волн на передней грани нелинейного слоя связаны соотношением вида (1). Здесь $\kappa_T = |\vec{k}_1 - \vec{k}_3|$, D_{11} , D_{22} , D_{12} и γ – коэффициенты теплопроводности, диффузии, Дюфура и электрострикции соответственно, $\vec{\kappa}_j$ (κ_{jx} , κ_{jy}) и k_{jz} – поперечная и продольная составляющие волнового вектора \vec{k}_j , $j=1-4$, $k = |\vec{k}_j| = \omega n_0/c$, $\kappa_j = |\vec{\kappa}_j|$, n_0 – по-

казатель преломления, $\Delta = k_{1z} + k_{2z} - k_{3z} - k_{4z}$ – проекция волновой расстройки на ось Z. Выражение (1) записано при условии, что набегом фазы из-за самовоздействия волн накачки можно пренебречь.

$$\begin{aligned} \tilde{A}_4(\bar{\kappa}_4, \bar{\kappa}_1, \bar{\kappa}_2) = & -i \frac{k\gamma D_{12}}{n_0 D_{11} D_{22}} \frac{dn}{dT} \tilde{A}_3^*(\bar{\kappa}_3) \times \\ & \times \left[\frac{1}{2sh\kappa_T \ell} \left(\left\{ \exp[-i(k_{1z} - k_{3z})\ell] - \exp(-\kappa_T \ell) \right\} \times \right. \right. \\ & \times \frac{\exp\left\{[\kappa_T - i(k_{2z} - k_{4z})]\ell\right\} - 1}{\kappa_T - i(k_{2z} - k_{4z})} + \\ & + \left. \left. \left\{ \exp[-i(k_{1z} - k_{3z})\ell] - \exp(\kappa_T \ell) \right\} \times \right. \right. \\ & \times \frac{\exp\left\{-[\kappa_T + i(k_{2z} - k_{4z})]\ell\right\} - 1}{\kappa_T + i(k_{2z} - k_{4z})} \left. \right) - \\ & - i \frac{\exp(-i\Delta\ell) - 1}{\Delta} \left. \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Если волны накачки не плоские, пространственный спектр объектной волны на передней грани нелинейного слоя можно представить в виде когерентной «суммы» пространственных спектров [3]

$$\begin{aligned} \tilde{A}_4(\bar{\kappa}_4) = & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{A}_1(\bar{\kappa}_1) \tilde{A}_2(\bar{\kappa}_2) \times \\ & \times \tilde{A}_4(\bar{\kappa}_1, \bar{\kappa}_2, \bar{\kappa}_4) d\bar{\kappa}_1 d\bar{\kappa}_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\tilde{A}_1(\bar{\kappa}_1)$ и $\tilde{A}_2(\bar{\kappa}_2)$ – пространственные спектры волн накачки на передней и задней гранях нелинейного слоя соответственно.

2. Учёт поворота волн накачки

Рассмотрим сигнальную волну, исходящую от точечного источника, расположенного на передней грани нелинейного слоя ($\tilde{A}_3(\bar{\kappa}_3) = 1$). В параксиальном приближении при распространении первой волны накачки строго вдоль оси Z ($\bar{\kappa}_1 = 0$), а второй волны накачки под углом к оси Z ($\bar{\kappa}_2 \neq 0$) выражение для пространственного спектра объектной волны на передней грани нелинейного слоя примет вид (3).

На рис. 1 приведён характерный график нормированного модуля пространственного спектра объектной волны

$A_4^n(\bar{\kappa}_4, \bar{\kappa}_2) = \frac{|\tilde{A}_4(\bar{\kappa}_4, \bar{\kappa}_2)|}{|\tilde{A}_4(\kappa_4 = 0, 1k, \kappa_2 = 0)|}$, полученный с использованием выражения (3).

Поворот волны накачки, оказывая существенное влияние на пространственную селективность четырёхволнового преобразователя в плоскости волн накачки ($(\bar{\kappa}_4 \bar{\kappa}_2) = \kappa_4 \kappa_2$), не влияет на пространственную селективность в плоскости, перпендикулярной волнам накачки ($(\bar{\kappa}_4 \bar{\kappa}_2) = 0$).

$$\begin{aligned} \tilde{A}_4(\bar{\kappa}_4, \bar{\kappa}_2) = & -i \frac{k\gamma D_{12}}{n_0 D_{11} D_{22}} \frac{dn}{dT} \times \\ & \times \left[\frac{1}{2sh|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2|\ell} \left(\left\{ \exp\left[-i \frac{(\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2)^2}{2k} \ell\right] - \right. \right. \\ & - \exp(-|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2|\ell) \left. \right\} \times \\ & \exp\left\{ \left[|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2| - i \frac{\kappa_2^2 - \kappa_4^2}{2k} \right] \ell \right\} - 1 \\ & \times \frac{\exp\left\{ \left[|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2| - i \frac{\kappa_2^2 - \kappa_4^2}{2k} \right] \ell \right\} - 1}{|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2| - i \frac{\kappa_2^2 - \kappa_4^2}{2k}} + \\ & + \left. \left. \left\{ \exp\left[-i \frac{(\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2)^2}{2k} \ell\right] - \exp(|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2|\ell) \right\} \times \right. \right. \\ & \times \frac{\exp\left\{ - \left[|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2| + i \frac{\kappa_2^2 - \kappa_4^2}{2k} \right] \ell \right\} - 1}{|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2| + i \frac{\kappa_2^2 - \kappa_4^2}{2k}} \left. \right) - \\ & - ik \frac{\exp\left(-i \frac{\bar{\kappa}_2(\bar{\kappa}_2 - \bar{\kappa}_4)}{k} \ell\right) - 1}{\bar{\kappa}_2(\bar{\kappa}_2 - \bar{\kappa}_4)} \left. \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

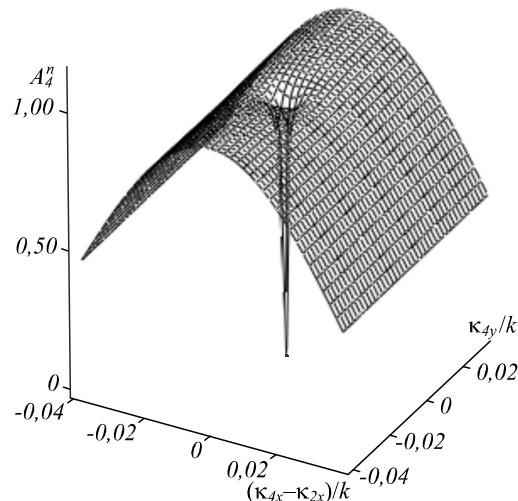


Рис. 1. Модуль пространственного спектра объектной волны при $k\ell = 5 \cdot 10^3$, $\kappa_{2y} = 0$, $\kappa_{2x}/k = 2 \cdot 10^{-2}$

В плоскости волн накачки поворот второй волны накачки смещает полосу пространственных частот ($\bar{\kappa}_4$), вырезаемых четырёхволновым преобразователем, на величину поворота и сужает пространственный спектр объектной волны (рис. 2).

Наличие ненулевой проекции волновой расстройки, входящей в явном виде в последнее слагаемое выражения (1), приводит к тому, что четырёхволновой преобразователь с повернутой второй волной накачки, наряду с фильтрацией высоких пространственных частот, осуществляет фильтрацию и низких пространственных частот.

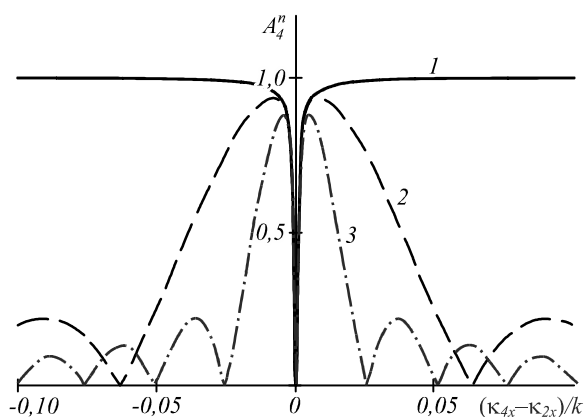


Рис. 2. Модули пространственных спектров объектной волны в плоскости волн накачки при $kl = 5 \cdot 10^3$, $\kappa_{2y} = 0$, $\kappa_{4y} = 0$, $\kappa_{2x}/k = 0$ (1), $2 \cdot 10^{-2}$ (2), $5 \cdot 10^{-2}$ (3)

Аналогичный характер изменения вида модуля пространственного спектра с ростом волновой расстройки наблюдается для квазивырожденного четырёхволнового преобразователя в прозрачной двухкомпонентной среде [17].

Фаза пространственного спектра объектной волны (φ) меняется по линейному закону. Скорость изменения фазы пропорциональна повороту волны накачки.

Для характеристики пространственной селективности четырёхволнового преобразователя в плоскости волн накачки введём ширину полосы наиболее эффективно преобразуемых пространственных частот ($\Delta\kappa$), которая определяется из условия

$$\Delta\kappa = |\kappa_{41x} - \kappa_{42x}|. \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \tilde{A}_4(\bar{\kappa}_4) = & -i \frac{\pi \kappa_0^2 k \gamma D_{12}}{n_0 D_{11} D_{22}} \frac{dn}{dT} \left\{ \frac{1}{2sh|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2| \ell} \left[\exp \left[-i \frac{(\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2)^2}{2k} \ell - \frac{(\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2)^2 \kappa_0^2 \ell^2}{4k^2} \right] - \exp(-|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2| \ell) \right] \times \right. \\ & \times \left[|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2| - i \frac{\kappa_2^2 - \kappa_4^2}{2k} \right]^{-1} \left[\exp \left(|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2| \ell - i \frac{\kappa_2^2 - \kappa_4^2}{2k} \ell \right) - 1 \right] + \left\{ \exp \left[-i \frac{(\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2)^2}{2k} \ell - \frac{(\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2)^2 \kappa_0^2 \ell^2}{4k^2} \right] - \right. \\ & \left. - \exp(|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2| \ell) \right\} \left[|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2| + i \frac{\kappa_2^2 - \kappa_4^2}{2k} \right]^{-1} \left[\exp \left(-|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2| \ell - i \frac{\kappa_2^2 - \kappa_4^2}{2k} \ell \right) - 1 \right] - \\ & \left. - \frac{\sqrt{\pi} k}{|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2| \kappa_0} \exp \left[- \left(\frac{|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2|}{|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2| \kappa_0} \right)^2 \right] \left(\operatorname{erf} \left[\frac{|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2| \kappa_0 \ell}{2k} - i \frac{\bar{\kappa}_2 (\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2)}{|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2| \kappa_0} \right] + \operatorname{erf} \left[i \frac{\bar{\kappa}_2 (\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2)}{|\bar{\kappa}_4 - \bar{\kappa}_2| \kappa_0} \right] \right) \right\}, \end{aligned} \tag{7}$$

где $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$ – функция ошибок.

На рис. 3 приведён характерный график нормированного модуля пространственного спектра объектной волны при условии распространения второй волны накачки строго вдоль оси Z ($\bar{\kappa}_2 = 0$).

Учёт расходимости волны накачки, не меняя вид пространственного спектра на низких пространственных частотах, уменьшает эффективность преобразования высоких пространственных частот.

Для сравнения на этом же рисунке приведён модуль пространственного спектра объектной волны четырёх-

волнового преобразователя на керровской нелинейности, рассчитанный с использованием выражения [3]

$$\left| \tilde{A}_4(\kappa_{4x} = \kappa_{41x,42x}, \kappa_{4y} = 0) \right| = \frac{1}{2} A_{4\max}, \tag{5}$$

где $A_{4\max} = \left| \tilde{A}_4(\kappa_{4x} = \kappa_{\max}, \kappa_{4y} = 0) \right|$ – наибольшее значение модуля пространственного спектра, κ_{\max} – пространственная частота, на которой модуль пространственного спектра достигает наибольшего значения.

Уравнение (5) имеет по два корня для κ_{41x} и κ_{42x} , среди которых будем выбирать большие значения.

Ширина полосы пространственных частот, наиболее эффективно преобразуемых при четырёхволновом взаимодействии, обратно пропорциональна как толщине нелинейной среды, так и повороту волны накачки $\Delta\kappa \sim 1/\ell \kappa_2$.

3. Учёт расходимости волн накачки

Пусть одна из волн накачки, например, вторая, по-прежнему является плоской, а пространственный спектр первой волны накачки меняется по гауссову закону

$$\tilde{A}_1(\bar{\kappa}_1) = \exp \left(- \frac{\kappa_1^2}{\kappa_0^2} \right), \tag{6}$$

где κ_0 – параметр, характеризующий расходимость волны накачки.

Подставив в (2) выражения (1) и (6) для сигнальной волны, распространяющейся от точечного источника, получим выражение для пространственного спектра объектной волны вида

Здесь G – параметр, определяющий эффективность четырёхволнового преобразователя.

$$\tilde{A}_4(\bar{\kappa}_4) = i G \operatorname{erf} \left(\frac{\kappa_4 \kappa_0}{2k} \ell \right). \tag{8}$$

При построении графиков совмещались значения модулей пространственных спектров объектных волн двух четырёхволновых преобразователей на пространственной частоте $\kappa_4 = |\bar{\kappa}_4| = 5\kappa_0$. Видно, что на высоких пространственных частотах пространственная селективность четырёхволновых преобразовате-

лей как в прозрачной двухкомпонентной среде, так и в среде с керровской нелинейностью совпадает.

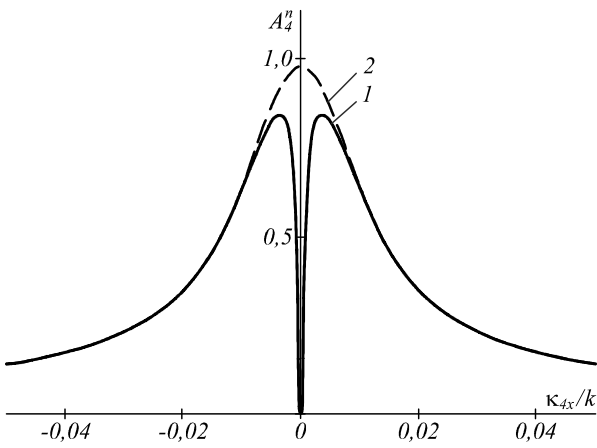


Рис. 3. Пространственные спектры объектной волны в прозрачной двухкомпонентной среде (1), в среде с керровской нелинейностью (2) при $kl = 5 \cdot 10^3$, $\kappa_{4y} = 0$, $\bar{\kappa}_2 = 0$, $\kappa_0/k = 5 \cdot 10^{-2}$

С увеличением расходимости волны накачки наблюдается уменьшение как ширины полосы наиболее эффективно преобразуемых пространственных частот (рис. 4, кривая 1), так и величины пространственной частоты, на которой модуль пространственного спектра достигает наибольшего значения (рис. 4, кривая 2). Зависимость ширины полосы наиболее эффективно преобразуемых пространственных частот от расходимости волны накачки хорошо описывается выражением вида

$$\frac{\Delta\kappa}{k} = \alpha(kl) \left(\frac{\kappa_0}{k} \right)^{-1} + \beta(kl). \tag{9}$$

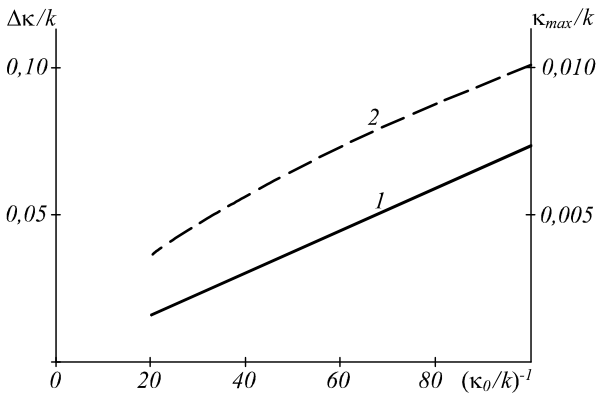


Рис. 4. Зависимость ширины полосы пространственных частот (1) и положения максимума пространственного спектра (2) от расходимости волны накачки при $kl = 5 \cdot 10^3$, $\bar{\kappa}_2 = 0$

Здесь α и β – параметры, зависящие от произведения волнового числа на толщину нелинейного слоя. Так, при значениях $kl = 1,5 \cdot 10^3, 5 \cdot 10^3, 1,5 \cdot 10^4$ параметры, входящие в выражение (9), принимают значения $\alpha = 2,4 \cdot 10^{-3}, 7,2 \cdot 10^{-4}, 2,4 \cdot 10^{-4}$, $\beta = 5 \cdot 10^{-3}, 2 \cdot 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-4}$.

Фаза пространственного спектра в зависимости от величины поперечной составляющей волнового век-

тора объектной волны в пределах ширины полосы $\Delta\kappa$ меняется незначительно.

Поворот второй волны накачки приводит в плоскости волн накачки не только к смещению пространственной частоты, на которой значение модуля пространственного спектра объектной волны минимально, на величину, равную повороту волны накачки (рис. 5а), но и к дополнительному уменьшению эффективности преобразования на высоких пространственных частотах. При фиксированной величине расходимости первой волны накачки с увеличением угла поворота второй волны накачки вид пространственного спектра объектной волны стремится к виду пространственного спектра при плоских волнах накачки. В области пространственных частот, в которой сосредоточена основная доля энергии объектной волны, фаза волны меняется по закону, близкому к линейному (рис. 5б).

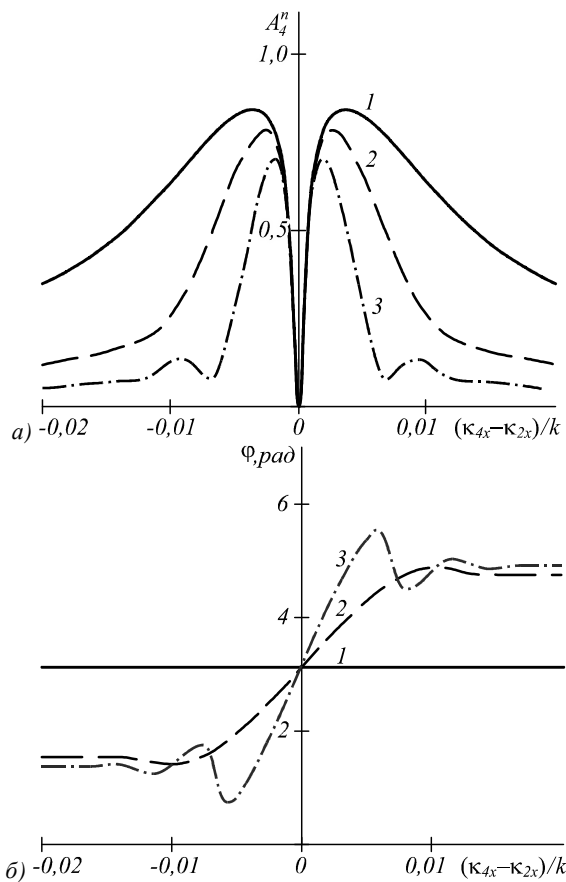


Рис. 5. Модули (а) и фазы (б) пространственных спектров объектной волны в плоскости волн накачки при $kl = 5 \cdot 10^3$, $\kappa_0/k = 5 \cdot 10^{-2}$, $\kappa_{2y} = 0$, $\kappa_{4y} = 0$, $\kappa_{2x}/k = 0$ (1), $1 \cdot 10^{-1}$ (2), $2 \cdot 10^{-1}$ (3)

На рис. 6 представлены зависимости наибольшего значения модуля пространственного спектра $A_{4\max}^n = A_{4\max} / |\bar{A}_4(\kappa_4 = 0, 1k, \kappa_2 = 0)|$ (рис. 6а) и ширины полосы наиболее эффективно преобразуемых пространственных частот в плоскости волн накачки (рис. 6б) от угла поворота второй волны накачки при фиксированном значении расходимости первой волны накачки.

С ростом значения κ_2 наблюдается монотонное уменьшение как наибольшего значения модуля про-

пространственного спектра, так и ширины полосы пространственных частот.

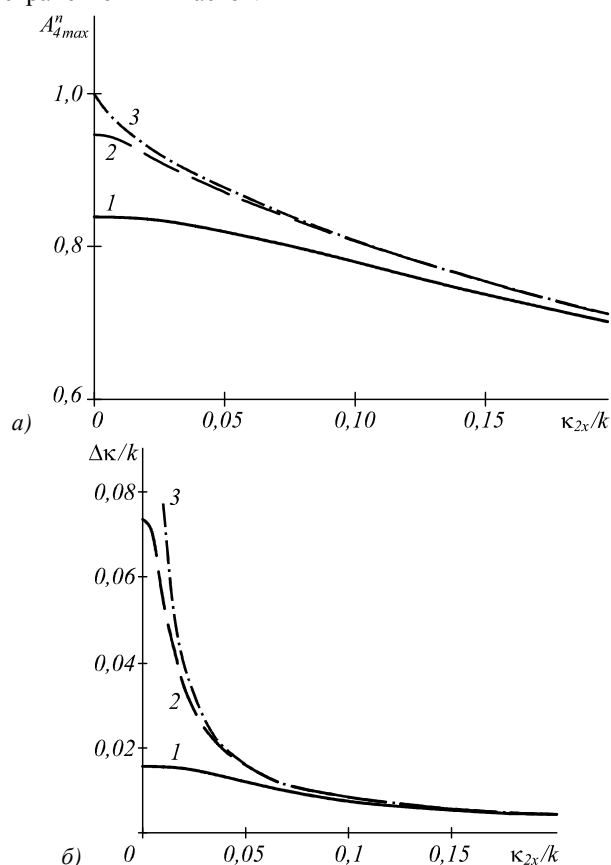


Рис. 6. Зависимости наибольшего значения модуля пространственного спектра (а) и ширины полосы пространственных частот (б) от поворота волны накачки при $\kappa l = 5 \cdot 10^3$, $\kappa_0/k = 5 \cdot 10^{-2}$ (1), $1 \cdot 10^{-2}$ (2), плоские волны (3)

При $\kappa_2 \leq \kappa_0$ зависимости наибольшего значения и ширины полосы пространственных частот от поворота второй волны накачки хорошо аппроксимируются гауссовым законом

$$A_{4max} = A_{40} \exp\left(-a \frac{\kappa_2^2}{k^2}\right), \quad (10)$$

$$\Delta\kappa = \Delta\kappa_0 \exp\left(-b \frac{\kappa_2^2}{k^2}\right).$$

Здесь A_{40} и $\Delta\kappa_0$ – значения A_{4max} и $\Delta\kappa$ в отсутствие поворота второй волны накачки, a и b – коэффициенты, зависящие от величины расходимости первой волны накачки. При расходимости первой волны накачки $\kappa_0/k = 1 \cdot 10^{-2}$ и $5 \cdot 10^{-2}$ коэффициенты соответственно принимают значения $a = 3 \cdot 10^3$ и $1,2 \cdot 10^2$, $b = 50$ и 10 .

При $\kappa_2 > 2\kappa_0$ изменение ширины полосы пространственных частот, наиболее эффективно преобразуемых при четырёхволновом взаимодействии, в зависимости от поворота второй волны накачки совпадает с аналогичной зависимостью для четырёхволнового преобразователя с плоскими волнами накачки.

Заключение

Получены аналитические выражения, описывающие пространственную селективность четырёхволно-

вого преобразователя излучения в прозрачной двухкомпонентной среде с учётом углового поворота и расходимости волн накачки. Показано, что и расходимость, и угловой поворот волн накачки приводят к уменьшению эффективности преобразования волн на высоких пространственных частотах.

Отсутствие поворота с увеличением расходимости волны накачки ширина полосы пространственных частот, наиболее эффективно преобразуемых при четырёхволновом взаимодействии, уменьшается по закону, обратно пропорциональному расходимости.

В случае плоских волн накачки угловой поворот одной из них, не меняя вида пространственного спектра в плоскости перпендикулярной плоскости волн накачки, в плоскости волн накачки смещает полосу «вырезанных» четырёхволновым преобразователем пространственных частот на величину поворота и уменьшает ширину полосы наиболее эффективно преобразуемых частот по закону, обратно пропорциональному повороту.

При условии, что величина поворота меньше расходимости волны накачки, получены приближённые выражения, связывающие наибольшее значение модуля пространственного спектра и ширину полосы наиболее эффективно преобразуемых пространственных частот с угловым поворотом волны накачки.

Литература

1. Нелинейная оптика и обращение волнового фронта / В.Г. Дмитриев. – М.: Физматлит, 2003. – 256 с. – ISBN 5-9221-0080-7.
2. Обращение волнового фронта / Б.Я. Зельдович, Н.Ф. Пилипецкий, В.В. Шкунов. – М.: Наука, 1985. – 240 с.
3. Обращение волнового фронта при четырёхволновом взаимодействии / В.В. Ивахник. – Самара: Самарский университет, 2010. – 246 с. – ISBN 978-5-86465-471-2.
4. **Блинов, В.В.** Влияние на пространственную селективность амплитудной динамической голограммы в растворе красителя пространственной структуры опорной (считывающей) волны / В.В. Блинов, Е.В. Воробьева, В.В. Ивахник, В.И. Никонов // Компьютерная оптика. – 2003. – Т. 25. – С. 74-78. – ISSN 0134-2452.
5. **Ивахник, В.В.** Использование метода функции размытия точки для анализа качества преобразования излучения при четырёхволновом взаимодействии на тепловой нелинейности (обзор) / В.В. Ивахник, Т.Г. Харская // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 1. – С. 17-26. – ISSN 0134-2452.
6. **Ливашвили, А.И.** Динамика температуры прозрачной наножидкости, находящейся под воздействием периодического светового поля / А.И. Ливашвили, Г.В. Костина, М.И. Якунина // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80, № 2. – С. 71-74. – ISSN 0030-4042.
7. **Rusconi, R.** Thermal-lensing measurement of particle thermophoresis in aqueous dispersion / R. Rusconi, L. Isa, R. Piazza // Journal of the Optical Society of America B. – 2004. – Vol. 21(3). – P. 605-616. – ISSN 0740-3224.
8. **Mahilny, U.V.** Holographic volume gratings in a glass-like polymer materials / U.V. Mahilny, D.N. Marmysh, A.I. Stankevich, A.L. Tolstik, V. Matusevich, R. Kowarschik // Applied Physics B. – 2006. – Vol. 82(2). – P. 299-302. – ISSN 0946-2171.
9. **Афанасьев, А.А.** Четырёхволновое смешение в жидкой суспензии диэлектрических прозрачных микросфер / А.А. Афанасьев, А.Н. Рубинов, С.Ю. Михневич, И.Е. Ермолаев // Журнал экспериментальной и теорети-

- ческой физики. – 2005. – Т. 128, В. 3(9). – С. 451-463. – ISSN 0044-4510.
10. **Иванов, В.И.** Термодиффузионный механизм записи амплитудных динамических голограмм в двухкомпонентной среде / В.И. Иванов, К.Н. Окишев // Письма в журнал технической физики. – 2006. – Т. 32, № 22. – С. 22-25. – ISSN 0320-0116.
 11. **Isobe, K.** Three-dimensional profiling of refractive index distribution inside transparent materials by use of nonresonant four-wave mixing microscopy / K. Isobe, T. Kawasumi, T. Tamaki, S. Kataoka, Y. Ozeki, K. Itoh // Applied Physics Express. – 2008. – Vol. 1(2). – 022006. – ISSN 1882-0778.
 12. **Wang, Y.** Four-wave mixing microscopy of nanostructures / Y. Wang, C.Y. Lin, A. Nikolaenko, V. Raghunathan, E.O. Potma // Advances in Optics and Photonics. – 2011. – Vol. 3(1). – P. 1-52. – ISSN 1943-8206.
 13. **Lopez-Mariscal, C.** Direct detection of optical phase conjugation in a colloidal medium / C. Lopez-Mariscal, J.C. Gutierrez-Vega, D. McGloin, K. Dholakia // Optics Express. – 2007. – Vol. 15(10). – P. 6330-6335. – ISSN 1094-4087.
 14. **Li, J.B.** Four-wave parametric amplification in semiconductor quantum dot-metallic nanoparticle hybrid molecules / J.B. Li, M.D. He, L.Q. Chen // Optics Express. – 2014. – Vol. 22(20). – P. 24734-24741. – ISSN 1094-4087.
 15. **Ивахник, В.В.** Влияние коэффициента отражения на пространственную селективность четырёхволнового преобразователя излучения в прозрачной среде с учётом электрострикции и эффекта Дюфура / В.В. Ивахник, М.В. Савельев // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 197-203. – ISSN 0134-2452.
 16. **Ivakhnik, V.V.** Four-wave mixing in a transparent medium based on electrostriction and Dufour effect at large reflectance / V.V. Ivakhnik, M.V. Savelyev // Physics Procedia. – 2015. – Vol. 73. – P. 26-32. – ISSN 1875-3892.
 17. **Ивахник, В.В.** Пространственно-временные характеристики квазивырожденного четырёхволнового преобразователя излучения в прозрачной среде с учётом электрострикции и эффекта Дюфура / В.В. Ивахник, М.В. Савельев // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 486-491. – ISSN 0134-2452.

Сведения об авторах

Ивахник Валерий Владимирович, 1951 года рождения. Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой оптики и спектроскопии, декан физического факультета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: нелинейная оптика, динамическая голография. E-mail: ivakhnik@samsu.ru.

Савельев Максим Валерьевич, 1990 года рождения, в 2012 году окончил физический факультет Самарского государственного университета. Аспирант кафедры оптики и спектроскопии Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: нелинейная оптика, динамическая голография. E-mail: belchonokenot@mail.ru.

Поступила в редакцию 27 января 2016 г.
Окончательный вариант – 16 февраля 2016 г.

INFLUENCE OF THE PUMP WAVE ROTATION AND DIVERGENCE ON THE SPATIAL SELECTIVITY OF A FOUR-WAVE RADIATION CONVERTER IN A TRANSPARENT TWO-COMPONENT MEDIUM

V.V. Ivakhnik, M.V. Savelyev
Samara State Aerospace University

Abstract

The spatial selectivity of the degenerate four-wave radiation converter in a transparent two-component medium based on the electrostriction and Dufour effect has been analyzed as a function of the rotation and divergence of pump waves. Expressions connecting most efficiently the converted spatial frequency bandwidth with the rotation angle and divergence of pump waves has been obtained.

Keywords: spatial selectivity, four-wave radiation converter, transparent two-component medium.

Citation: Ivakhnik VV, Savelyev MV. Influence of the pump wave rotation and divergence on the spatial selectivity of a four-wave radiation converter in a transparent two-component medium. Computer Optics 2016; 40(1): 19-25. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-19-25.

References

- [1] Dmitriev VG. Nonlinear optics and wavefront reversal [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2003.
- [2] Zel'dovich BYa, Pilipetskiy NF, Shkunov VV. Wavefront reversal [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1985.
- [3] Ivakhnik VV. Wavefront reversal and four-wave interaction [In Russian]. Samara: Samara State University Publisher; 2010.
- [4] Blinov VV, Vorob'eva EV, Ivakhnik VV, Nikonov VI. The influence of the reference (reading) wave spatial structure on the spatial selectivity of the amplitude dynamic hologram in a dye solution [In Russian]. Computer Optics 2003; 25: 74-78.
- [5] Ivakhnik VV, Harskaya TG. Use of the method of the point spread function for the analysis of quality of phase conjugation via four-wave radiation converter in thermal nonlinear media (review) [In Russian]. Computer Optics 2009; 33(1): 17-26.
- [6] Livashvili AI, Kostina GV, Yakunina MI. Temperature dynamics of a transparent nanoliquid acted on by a periodic light field. J Opt Tech 2013; 80(2): 124-126. DOI: 10.1364/JOT.80.000124.
- [7] Rusconi R, Isa L, Piazza R. Thermal-lensing mesuarment of particle thermophoresis in aqueous dispersion. J Opt Soc Am B 2004; 21(3): 605-616. DOI: 10.1364/JOSAB.21.000605.

- [8] Mahilny UV, Marmysh DN, Stankevich AI, Tolstik AL, Matusevich V, Kowarschik R. Holographic volume gratings in a glass-like polymer materials. *Appl Phys B* 2006; 82(2): 299-302. DOI: 10.1007/s00340-005-2006-z.
- [9] Afanas'ev AA, Rubinov AN, Mikhnevich SYu, Ermolaev IE. Four-wave mixing in a liquid suspension of transparent dielectric microspheres. *JETP* 2005; 101(3): 389-400.
- [10] Ivanov VI, Okishev KN. Thermodiffusion mechanism of dynamic amplitude hologram recording in a two-component medium. *Tech Phys Lett* 2006; 32(11): 967-968. DOI: 10.1134/51063785006110186.
- [11] Isobe K, Kawasumi T, Tamaki T, Kataoka S, Ozeki Y, Itoh K. Three-dimensional profiling of refractive index distribution inside transparent materials by use of nonresonant four-wave mixing microscopy. *Appl Phys Exp* 2008; 1(2): 022006. DOI: 10.1143/APEX.1.022006.
- [12] Wang Y, Lin CY, Nikolaenko A, Raghunathan V, Potma EO. Four-wave mixing microscopy of nanostructures. *Adv Opt Photonics* 2011; 3(1): 1-52. DOI: 10.1364/AOP.3.000001.
- [13] Lopez-Mariscal C, Gutierrez-Vega JC, McGloin D, Dholakia K. Direct detection of optical phase conjugation in a colloidal medium. *Opt Exp* 2007; 15(10): 6330-6335. DOI: 10.1364/OE.15.006330.
- [14] Li JB, He MD, Chen LQ. Four-wave parametric amplification in semiconductor quantum dot-metallic nanoparticle hybrid molecules. *Opt Exp* 2014; 22(20): 24734-24741. DOI: 10.1364/OE.22.024734.
- [15] Ivakhnik VV, Savelyev MV. The influence of the reflection coefficient on the spatial selectivity of a four-wave radiation converter in a transparent medium based on electrostriction and Dufour effect. *Computer Optics* 2015; 39(2): 197-203.
- [16] Ivakhnik VV, Savelyev MV. Four-wave mixing in a transparent medium based on electrostriction and Dufour effect at large reflectance. *Phys Procedia* 2015; 73: 26-32. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.117.
- [17] Ivakhnik VV, Savelyev MV. Spatial and temporal characteristics of a nondegenerate four-wave mixing converter in a transparent medium based on electrostriction and Dufour effect. *Computer Optics* 2015; 39(4): 486-491. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-486-491.

Authors' information

Valery Vladimirovich Ivakhnik (b. 1951). Doctor in Physics & Maths, professor, Head of Optics and Spectroscopy department, Dean of Physics faculty of S.P. Korolyov Samara State Aerospace University. Research interests are nonlinear optics and dynamic holography. E-mail: ivakhnik@samsu.ru.

Maxim Valeryevich Savelyev (b. 1990) graduated from Samara State University, Physics faculty. Postgraduate student of Optics and Spectroscopy department of S.P. Korolyov Samara State Aerospace University. Research interests are nonlinear optics and dynamic holography. E-mail: belchonokenot@mail.ru.

Received January 27, 2016. The final version – February 16, 2016.
