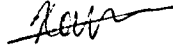


На правах рукописи



Харская Татьяна Геннадьевна

**КАЧЕСТВО ОБРАЩЕНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА  
ЧЕТЫРЁХВОЛНОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ  
НА ТЕПЛОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ**

01.04.21 – лазерная физика

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата  
физико-математических наук



Самара-2008

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Самарский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор **Ивахник Валерий Владимирович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор **Котляр Виктор Викторович**

доктор физико-математических наук,  
доцент **Осипов Олег Владимирович**

Ведущая организация: Самарский филиал Учреждения Российской академии наук Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Защита состоится 19 декабря 2008 г. в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д212.218.01 при ГОУ ВПО «Самарский государственный университет» по адресу: 4431011, г. Самара, ул. Академика Павлова, 1, зал заседаний.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВПО «Самарский государственный университет»

Автореферат разослан «17» ноября 2008 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Жукова В.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Изучение явления обращения волнового фронта (ОВФ) является одним из перспективных направлений развития современной нелинейной оптики и лазерной физики.

С момента обнаружения самообращения волнового фронта в 1971 году это явление вызывает интерес, прежде всего, возможностью его использования в большом количестве практических приложений. Явление ОВФ широко используется при решении целого ряда задач коррекции в реальном масштабе времени фазовых искажений, возникающих при распространении излучения через оптически неоднородную среду. К таким задачам можно отнести коррекцию аберраций в оптических системах, фокусировку излучения на мишень, передачу энергии электромагнитного излучения через неоднородные среды, создание мощных высоконаправленных лазерных систем и т.д.

Явление обращения волнового фронта успешно применяется в нелинейной спектроскопии, лазерной интерферометрии.

В настоящее время в связи с бурным развитием оптических систем широко обсуждается возможность использования оптических систем, обращающих волновой фронт, для создания оптоволоконных устройств обработки сигналов, обладающих широкой полосой пропускания и высокой скоростью обработки данных при передаче информации.

В качестве одного из методов получения волны с обращённым волновым фронтом в реальном масштабе времени было предложено использовать четырёхволновое взаимодействие (запись динамической голограммы). Беспороговость, возможность получения коэффициента преобразования, значительно превышающего единицу, позволяет утверждать, что этот метод имеет предпочтение перед другими методами (например, использование процессов вынужденного рассеяния) для ОВФ слабых сигналов. С помощью этого метода можно управлять параметрами обращённой волны.

Для практических приложений важным является определение качества (или точности), с которой происходит обращение волнового фронта. Анализ соответствия пространственных структур волны с обращённым волновым фронтом и падающей на четырёхволновой преобразователь волны позволяет определить характерные размеры неоднородностей искажающей среды, которые могут быть скомпенсированы с использованием таких преобразователей излучения.

Одним из распространённых методов анализа качества преобразования излучения при многоволновых взаимодействиях является метод, основанный на нахождении и анализе функции размытия точки (ФРТ). К настоящему моменту этим методом достаточно подробно изучена точность преобразования изображения при трехфотонных параметрических взаимодействиях как с понижением, так и с повышением частоты, точность обращения волнового фронта при четырёхволновом взаимодействии в средах с керровской нелинейностью.

При этом практически отсутствуют работы, посвященные изучению качества обращения волнового фронта при четырёхволновом взаимодействии в средах с тепловым механизмом нелинейности. До сих пор среды с тепловой нелинейностью являются наиболее перспективными средами для обращения волнового фронта излучения среднего ИК-диапазона длин волн. Именно в этом диапазоне работает один из наиболее мощных лазеров –  $CO_2$ -лазер. Тепловая нелинейность присутствует при четырехволновом взаимодействии и на других типах нелинейности.

Таким образом, актуальной является задача установления однозначного соответствия между комплексными амплитудами волны, падающей на четырёхволновой преобразователь излучения на тепловой нелинейности (сигнальная волна), и волны с обращённым волновым фронтом (объектная волна), изучение влияния на качество обращения волнового фронта геометрии взаимодействия, параметров нелинейной среды, характеристик взаимодействующих волн т.д.

**Целью** работы является исследование качества обращения волнового фронта четырёхволновым преобразователем излучения на тепловой нелинейности.

**Основные задачи** диссертационной работы заключаются в следующем:

- найти вид функции размытия точки (ФРТ) четырёхволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности;

- исследовать влияние параметров волн накачки, положения плоскостей фокусировки сигнальной и объектной волн, толщины нелинейного слоя, на качество преобразования излучения в вырожденном четырёхволновом преобразователе на тепловой нелинейности в схемах с попутными и встречными волнами накачки;

- изучить влияние геометрии взаимодействия, параметров нелинейной среды и соотношения частот волн накачки на качество обращения волнового фронта в квазивырожденном четырёхволновом преобразователе излучения;

- исследовать зависимость разрешающей способности вырожденного четырёхволнового преобразователя излучения в волноводах с бесконечно проводящими стенками и с параболическим профилем показателя преломления от параметров волновода, модового состава волн накачки.

**Научная новизна работы:**

- исследована зависимость разрешающей способности вырожденного четырёхволнового преобразователя излучения в схемах с попутными и встречными волнами накачки от положения плоскостей фокусировки сигнальной и объектной волн, направления распространения волн накачки, их угловой структуры, толщины нелинейного слоя;

- получены приближённые аналитические выражения для функций размытия точки вырожденных четырёхволновых преобразователей излучения в схемах с попутными и встречными волнами накачки с учетом пространственной структуры волн накачки;

- изучена зависимость качества обращения волнового фронта квазивырожденным четырёхволновым преобразователем излучения от соотношения частот взаимодействующих волн;

- определено влияние модового состава волн накачки, параметров волновода на точность преобразования излучения вырожденным четырёхволновым преобразователем в волноводах с бесконечно проводящими стенками и с параболическим профилем показателя преломления.

**Практическая ценность** проведённых исследований состоит в том, что результаты работы дают возможность определить влияние на качество обращения волнового фронта четырёхволновым преобразователем излучения на тепловой нелинейности геометрии взаимодействия, положения плоскостей фокусировки сигнальной и объектной волн, структуры волн накачки, их частотного сдвига, параметров нелинейной среды. Это позволяет оптимизировать процесс создания волны с обращенным волновым фронтом с использованием четырехволновых преобразователей излучения на тепловой нелинейности.

Знание качества обращения волнового фронта позволяет ответить на вопрос, при каких условиях наличие в оптической системе четырехволнового преобразователя, обращающего волновой фронт, улучшает параметры этой системы.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1) метод исследования качества обращения волнового фронта четырехволновым преобразователем излучения на тепловой нелинейности в волноводе, основанный на построении и последующем анализе функции размытия точки такого преобразователя;

2) результаты исследования качества обращения волнового фронта вырожденным четырёхволновым преобразователем излучения в волноводе при различных параметрах волновода и взаимодействующих волн;

3) результаты анализа зависимостей разрешающей способности вырожденного четырёхволнового преобразователя излучения в схемах с попутными и встречными волнами накачки от толщины нелинейной среды, параметров взаимодействующих волн, положения областей фокусировки сигнальной и объектной волны;

4) для квазивырожденного четырёхволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности результаты исследования зависимостей разрешающей способности четырёхволнового преобразователя от соотношения частот взаимодействующих волн, геометрии взаимодействия, толщины нелинейной среды.

**Публикации.** Основные материалы диссертации опубликованы в 10 научных работах, в том числе 6 статей (4 из них опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК) и 4 тезисов докладов.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Международных конференциях молодых ученых и специалистов «Оптика–2005» и «Оптика–2007» (Санкт-Петербург, 2005, 2007); Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2006» (Санкт-

Петербург, 2006); Международной научно-технической конференции «Физика и технологические приложения волновых процессов» (Самара, 2006); Международной молодежной научной школе «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» (Казань 2006); III и V Самарском региональном конкурсе конференции научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике (Самара 2005, 2007); XXVI школе по когерентной оптике и голографии (Иркутск 2007).

**Структура и объём работы.** Структура работы определена поставленной целью. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Полный объём работы составляет 124 страницы, включая 24 рисунка. Библиография содержит 107 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследований, показана новизна работы, её практическая и научная значимость, поставлены цели, определены задачи исследования и приведены выносимые на защиту положения.

**В первой главе** изложено современное состояние теории четырёхволнового преобразования излучения в средах с тепловым механизмом нелинейности и приведён краткий обзор работ по обращению волнового фронта при четырёхволновом взаимодействии на тепловой нелинейности.

**Вторая глава** посвящена исследованию качества обращения волнового фронта вырожденным четырёхволновым преобразователем излучения на тепловой нелинейности с попутными волнами накачки (рис 1.а.). Под четырёхволновым преобразователем излучения понималась оптическая система, состоящая из участка свободного пространства толщиной  $z_3$ , среды с тепловой нелинейностью толщиной  $\ell$ , в которой распространяются две волны накачки, и участка свободного пространства толщиной  $z_4$  (рис.1.).

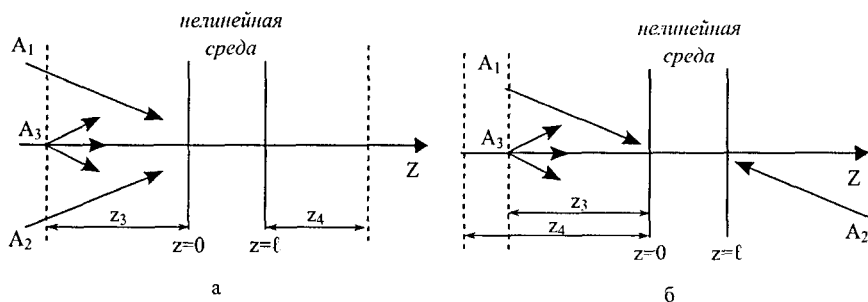


Рис. 1. Схема четырёхволнового взаимодействия с попутными волнами накачки – а; со встречными волнами накачки – б.

В первом параграфе второй главы представлен вывод выражения для функции размытия точки четырёхволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности с попутными волнами накачки.

Рассматриваемое взаимодействие описывалось стационарным волновым уравнением

$$\left\{ \nabla^2 + \left[ k^2 \left( 1 + \frac{2}{n_0} \frac{dn}{dT} \delta T \right) - 2ik\alpha \right] \right\} \left( \sum_{m=1}^4 A_m + \text{к.с.} \right) = 0.$$

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

Изменение температуры  $\delta T$  находилось из уравнения Пуассона

$$\nabla^2 \delta T + \frac{\alpha}{\Lambda c_p \nu} \left| \sum_{m=1}^4 A_m + \text{к.с.} \right|^2 = 0,$$

где  $\Lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $c_p$  - удельная теплоемкость,  $\nu$  – объёмная плотность вещества,  $\alpha$  – коэффициент поглощения.

В выражении для интенсивности взаимодействующих волн учитывались только решетки, образованные при интерференции волн накачки с сигнальной волной

$$\left| \sum_{m=1}^4 A_m + \text{к.с.} \right|^2 = \sum_{j=1}^2 A_j A_j^* + A_1 A_3^* + A_2 A_3^* + \text{к.с.}$$

В таком случае изменение температуры представляется в виде суммы трёх слагаемых:  $\delta T = \delta T_0 + \delta T_{31} + \delta T_{32} + \text{к.с.}$ , одно из которых  $\delta T_0$  связано с распространением в среде волн накачки, а два других –  $\delta T_{31}$  и  $\delta T_{32}$  – с интерференцией этих волн с сигнальной волной.

Четырёхволновое взаимодействие рассматривалось при следующих условиях:

- 1) в приближении заданного поля по волнам накачки ( $|A_{1,2}| \gg |A_{3,4}|$ );
- 2) при малом коэффициенте преобразования ( $|A_3| \gg |A_4|$ );
- 3) при условии отвода тепла от граней нелинейного слоя  $\delta T(z=0) = \delta T(z=l) = 0$ ;

Составляющие изменения температуры раскладывались по гармоническим решёткам, а сигнальная волна, исходящая от точечного источника, и объектная волна по пространственным частотам. Задача решалась при условии плоских волн накачки.

В результате решения уравнений было получено выражение для ФРТ четырёхволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности с попутными волнами накачки, которое с точностью до постоянного множителя имеет вид:

$$\begin{aligned}
G(\vec{\rho}, z_3, z_4) = & \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^2 \frac{f_{j0}}{\beta_j^2 - \kappa_{Tj}^2} \left\{ \frac{[\exp(-\beta_j \ell) - \exp(\kappa_{Tj} \ell)]}{2sh(\kappa_{Tj} \ell) [\kappa_{Tj} + ip]} [\exp(-\kappa_{Tj} \ell - ip_j \ell) - 1] + \right. \\
& + \left. \frac{[\exp(-\beta_j \ell) - \exp(-\kappa_{Tj} \ell)]}{2sh(\kappa_{Tj} \ell) [\kappa_{Tj} - ip]} [\exp(\kappa_{Tj} \ell - ip_j \ell) - 1] + \frac{\exp(-2\alpha \ell) - 1}{2\alpha} \right\} \times \\
& \times \exp \left[ \frac{i\kappa_{4j}^2}{2k} z_4 - \frac{i\kappa_3^2}{2k} z_3 - i\bar{k}_{4j} \vec{\rho} \right] d\bar{k}_{4j}.
\end{aligned}$$

Здесь  $f_{j0} = \alpha A_{j0}^0 / \Lambda c_p v$ ,  $A_{j0}^0$  – амплитуда  $j$ -ой волны накачки на передней грани нелинейного слоя,  $\bar{k}_j$  и  $\bar{k}_{4j}$ , – поперечные составляющие волновых векторов  $\bar{k}_j$  и  $\bar{k}_{4j}$ ,  $j = 1 \div 2$ ,  $|\bar{k}_j| = |\bar{k}_{4j}| = k$ ,  $p_j = \frac{1}{2k} (\kappa_{4j}^2 - \kappa_j^2)$ ,  $\beta_j = 2\alpha + \frac{i(\kappa_{3z}^2 - \kappa_{jz}^2)}{2k}$ ,  $\bar{k}_{T1} = \bar{k}_1 - \bar{k}_3 = \bar{k}_{41} - \bar{k}_2$ ,  $\bar{k}_{T2} = \bar{k}_2 - \bar{k}_3 = \bar{k}_{42} - \bar{k}_1$ .

Направления осей  $X$  и  $Y$  выбирались таким образом, чтобы ось  $X$  лежала в плоскости, образованной волновыми векторами волн накачки (плоскость волн накачки), а ось  $Y$  в плоскости, перпендикулярной плоскости волн накачки.

В качестве количественной характеристики качества ОВФ использовалась ширина модуля ФРТ четырёхволнового преобразователя в плоскости волн накачки ( $\Delta x = |x_1 - x_2|$ ) и в плоскости, перпендикулярной плоскости волн накачки ( $\Delta y = |y_1 - y_2|$ ), где  $x_{1,2}$  и  $y_{1,2}$  определяются из условий

$$|G(x_{1,2}, y = 0, z_3, z_4)| = \frac{1}{2} |G(\rho = 0, z_3, z_4)|,$$

$$|G(y_{1,2}, x = 0, z_3, z_4)| = \frac{1}{2} |G(\rho = 0, z_3, z_4)|.$$

Ширина модуля ФРТ характеризует разрешающую способность четырёхволнового преобразователя излучения.

В главах 2-4 диссертационной работы численный анализ выражения для модуля ФРТ четырёхволнового преобразователя проводился для излучения  $CO_2$ - лазера ( $\lambda = 10.6$  мкм).

На рис.2 приведены зависимости ширины модуля ФРТ от разности положений плоскостей фокусировки сигнальной и преобразованных волн:  $\Delta z = z_3 - z_4$ , нормированной на толщину нелинейного слоя.

При фиксированном положении плоскости фокусировки сигнальной волны существует оптимальное положение плоскости фокусировки объектной волны (плоскость оптимальной фокусировки), в пределах которой ширина модуля ФРТ минимальна. Положения плоскостей оптимальной фокусировки объектной волны при рассмотрении ширины модуля ФРТ в направлениях, задаваемых осями  $X$  ( $z_{\text{опт} \parallel}$ ) и  $Y$  ( $z_{\text{опт} \perp}$ ), различны.



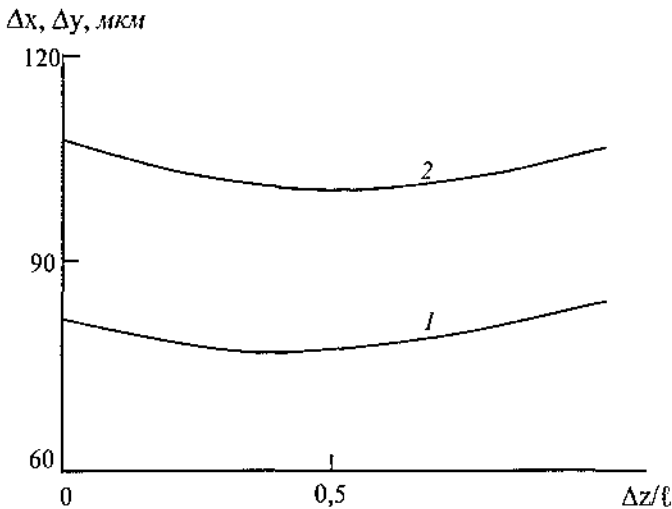


Рис.2. Изменение ширины модуля ФРТ в плоскости волн накачки (1); в плоскости, перпендикулярной плоскости волн накачки (2); угол между волнами накачки  $3^\circ$ ;  $\alpha\ell = 1.44$ ;  $n_0 = 1.36$

При малых углах падения волн накачки на нелинейную среду  $|\vec{k}_{1,2}|/k \ll 1$  и  $\alpha\ell < 1$  положения плоскостей  $z_{4opt\perp}$  и  $z_{4opt\parallel}$  совпадают и определяются выражением вида

$$z_{4opt\perp} = z_{4opt\parallel} = z_3 + \ell/n_0.$$

С увеличением угла между волнами накачки наблюдается резкое уменьшение ширины модуля ФРТ в плоскости волн накачки и незначительное изменение ширины модуля ФРТ в плоскости, перпендикулярной плоскости волн накачки (рис.3). При этом увеличивается и расстояние между плоскостями оптимальной фокусировки  $z_{4opt\parallel}$  и  $z_{4opt\perp}$ . С физической точки зрения сужение модуля ФРТ в плоскости волн накачки аналогично уменьшению ширины пятна при дифракции Фраунгофера на двух отверстиях с ростом расстояния между отверстиями.

Зависимость ширины модуля ФРТ в плоскости волн накачки от направления распространения волн при  $|\vec{k}_{1,2}|/k \ll 1$  хорошо описывается параболической функцией

$$\Delta x = \Delta x_0 \left\{ 1 - \mu [\kappa_1 - \kappa_2]^2 \right\},$$

где  $\Delta x_0$  – ширина модуля ФРТ при совпадении направления распространения волн накачки ( $\vec{k}_1 = \vec{k}_2$ ),  $\kappa_j = |\vec{k}_j|$ ,  $\mu$  – параметр, характеризующий скорость изменения ширины модуля ФРТ в зависимости от угла между волнами накачки, возрастающий с увеличением толщины нелинейного слоя.

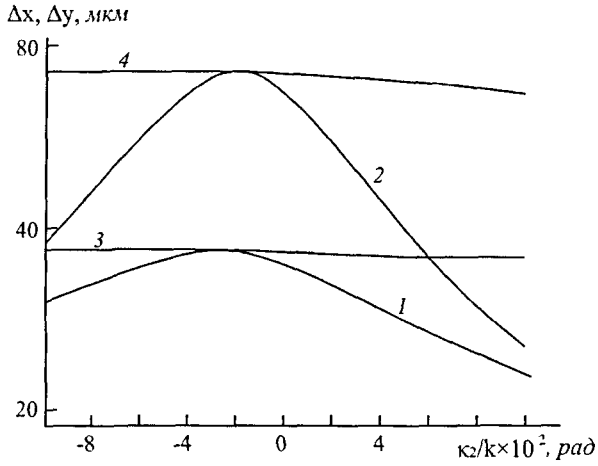


Рис.3. Зависимость ширины модуля ФРТ от направления распространения второй волны накачки в плоскости волн накачки (кривые 1,2), в плоскости, перпендикулярной волнам накачки, (кривые 3,4);  $\kappa_1/\kappa=0.017$  рад;  $l=400$  мкм (2,4), 200 мкм (1,3);  $\alpha = 0.004$  мкм<sup>-1</sup>;  $n_0=1.36$

На рис.4 приведены зависимости ширины модуля ФРТ в плоскостях оптимальной фокусировки  $z_{4opt\parallel}$  и  $z_{4opt\perp}$  (кривые 1,2) и относительного положения этих плоскостей  $\Delta z_{opt\parallel} = (z_{4opt\parallel} - z_3)/l$  и  $\Delta z_{opt\perp} = (z_{4opt\perp} - z_3)/l$  (кривые 3,4) от толщины нелинейного слоя.

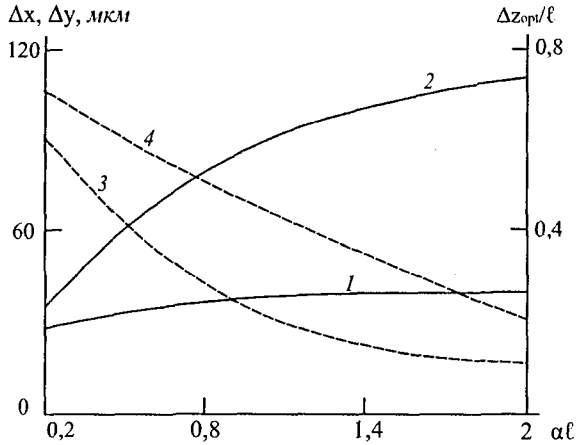


Рис.4. Зависимость ширины модуля ФРТ в плоскости оптимальной фокусировки  $z_{4opt\parallel}$  (1) и  $z_{4opt\perp}$  (2) и относительного положения этих плоскостей (3,4) от толщины нелинейного слоя; угол между волнами накачки 6°;  $\alpha = 0.004$  мкм<sup>-1</sup>;  $n_0=1.36$

Увеличение толщины нелинейного слоя приводит к относительному сдвигу положения плоскостей оптимальной фокусировки к нелинейному слою. При этом ширина модуля ФРТ в плоскостях оптимальной фокусировки  $z_{\text{опт}||}$  и  $z_{\text{опт}\perp}$  изменяется по закону  $\Delta x = \beta_1 \sqrt{\ell}$ ,  $\Delta y = \beta_2 \sqrt{\ell}$ . Здесь  $\beta_j$  – коэффициенты,  $\beta_2 > \beta_1$ . Величина коэффициента  $\beta_1$  уменьшается с увеличением угла между волнами накачки.

Во втором параграфе этой главы анализировалась зависимость разрешающей способности вырожденного четырёхволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности с попутными волнами накачки от расходимости волн накачки.

Рассматривался случай, когда одна из волн накачки, например, первая – является плоской, а пространственный спектр амплитуды второй волны накачки меняется по гауссову закону.

Если волны накачки не плоские, то ФРТ четырехволнового преобразователя излучения есть когерентная сумма ФРТ  $G(\bar{\rho}, z_3, z_4, \bar{\kappa}_1, \bar{\kappa}_2)$ , соответствующих плоским волнам накачки

$$G_1(\bar{\rho}, z_3, z_4) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\bar{\rho}, z_3, z_4, \bar{\kappa}_1, \bar{\kappa}_2) d\bar{\kappa}_1 d\bar{\kappa}_2.$$

Численный анализ этого выражения показал, что увеличение расходимости второй волны накачки ( $w$ ) приводит к монотонному уменьшению ширины модуля ФРТ, при этом сближаются значения ширины модуля ФРТ в плоскости волн накачки и в плоскости, перпендикулярной волнам накачки (рис. 5 кривые 1,2).

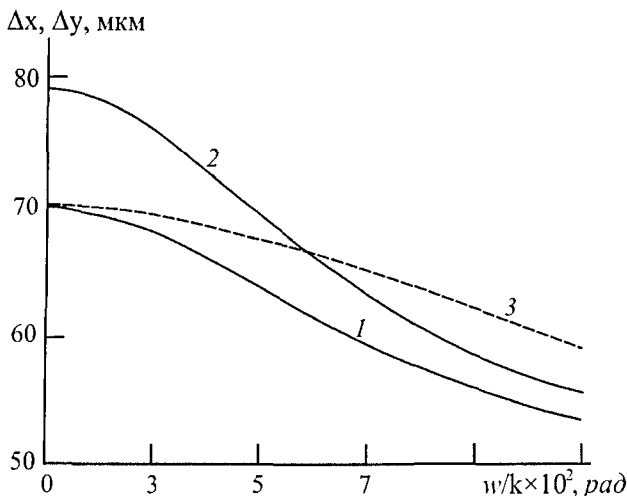


Рис. 5. Зависимость ширины модуля ФРТ в плоскости волн накачки (1,3), в плоскости, перпендикулярной волнам накачки (2) от расходимости второй волны накачки;  $\alpha\ell = 1.44$ ;  $n_0 = 1.36$

Путём замены ФРТ четырехволнового преобразователя с плоскими волнами накачки гауссовой функцией, ширина которой в зависимости от угла между волнами накачки меняется по параболическому закону, было получено приближённое аналитическое выражение для ФРТ четырехволнового преобразователя с расходящейся второй волной накачки. Наблюдается качественное согласие полученных зависимостей как с использованием точного, так и приближенного (рис.5 кривая 3.) выражений для ФРТ.

Приближенное выражение ФРТ использовалось для определения «критического» значения расходимости второй волны накачки, начиная с которого, при выбранном угле между волнами накачки, необходимо учитывать влияние расходимости на ширину модуля ФРТ четырехволнового преобразователя.

В третьей главе приведены результаты исследования качества обращения волнового фронта вырожденным четырехволновым преобразователем излучения при условии, что в среде записывается только одна тепловая решётка, возникающая при интерференции первой волны накачки с сигнальной волной.

В первом параграфе получена зависимость ширины модуля ФРТ такого преобразователя от направления распространения плоской первой волны накачки при фиксированном направлении распространения второй волны накачки (рис.6).

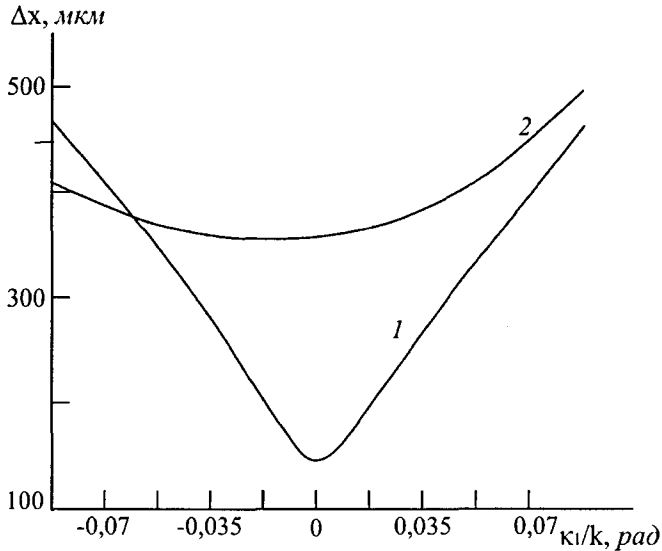


Рис.6. Зависимость ширины модуля ФРТ в направлении оси X в плоскости оптимальной фокусировки от направления распространения первой волны накачки, схема со встречными волнами накачки  $\kappa_2/k = 0 \text{ рад}$  (1), схема с попутными волнами накачки

$\kappa_2/k = -0,017 \text{ рад}$  (2);  $\alpha l = 0,3$ ;  $n_0 = 1,6$

Считалось, что волновой вектор второй волны накачки расположен в плоскости  $XZ$ , образованной волновым вектором первой волны накачки и точечным источником сигнальной волны. Ширина модуля ФРТ в направлении оси  $Y$  отличалась от ширины модуля ФРТ в направлении оси  $X$  менее, чем на 1%.

Минимальное значение ширины модуля ФРТ наблюдается при совпадении направлений распространения волн накачки в схеме с попутными волнами накачки и при распространении второй волны накачки строго навстречу первой волне накачки в схеме со встречными волнами накачки (рис. 1. б). По мере отклонения направления распространения второй волны накачки от направления распространения первой волны накачки наблюдается монотонное увеличение ширины модуля ФРТ. Скорость изменения ширины модуля ФРТ по мере отклонения направления распространения второй волны накачки от направления распространения первой волны накачки в схеме со встречными волнами накачки выше, чем в схеме с попутными волнами накачки.

Пространственная селективность четырёхволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности с ростом толщины нелинейного слоя увеличивается быстрее в схеме с попутными волнами накачки по сравнению со схемой со встречными волнами накачки.

Во втором параграфе для схемы со встречными волнами накачки исследовано влияние расходимости первой волны накачки на качество обращения волнового фронта при условии, что вторая волна накачки является плоской, а амплитуда первой волны накачки меняется по гауссову закону.

Увеличение кривизны волнового фронта первой волны накачки ( $R$ ), уменьшение её ширины ( $a$ ) приводит к увеличению расходимости первой волны накачки и, как следствие, к увеличению ширины модуля ФРТ четырёхволнового преобразователя (рис.7.).

По мере удаления плоскости фокусировки объектной волны от передней грани нелинейного слоя скорость изменения ширины модуля ФРТ четырёхволнового преобразователя с увеличением расходимости первой волны накачки возрастает.

Для качественного анализа влияния расходимости первой волны накачки на качество ОВФ было найдено приближенное выражение для модуля ФРТ четырёхволнового преобразователя. Получено качественное соответствие зависимостей ширины модуля ФРТ от ширины первой волны накачки и кривизны её волнового фронта, полученных как с использованием точного, так и приближенного (рис. 7б кривая 3) выражений для ФРТ.

Авторами работы [1] экспериментально осуществлялась компенсация фазовых искажений с использованием вырожденного четырёхволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности. Значения разрешающей способности четырёхволнового преобразователя излучения, полученные в диссертационной работе, хорошо согласуются с экспериментальными результатами, представленными в статье [1].

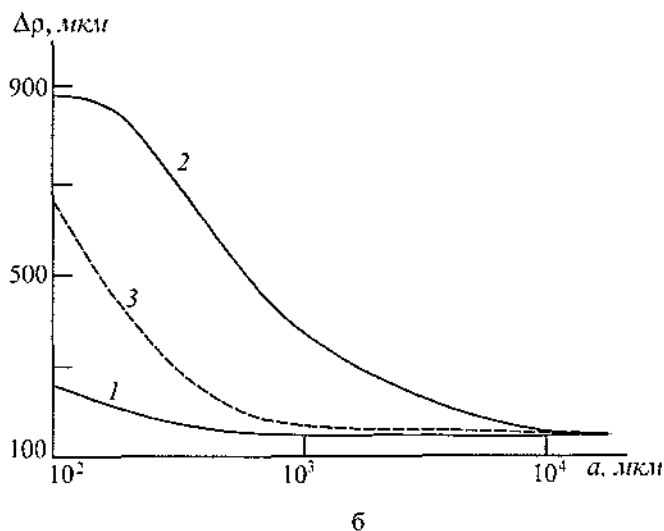
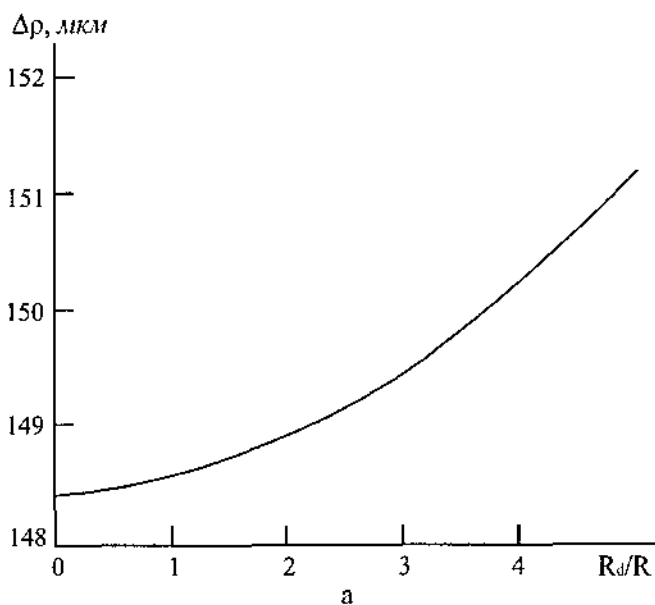


Рис.7. Зависимость ширины модуля ФРТ от кривизны волнового фронта при  $z_3/l=0$ ,  $R_d = ka^2/2$  (а); ширины первой волны накачки (б),  $z_3/l=0$  (1),  $z_3/l=7$  (2,3);  $\alpha l=0.3$ ;  $n_0=1.6$

**Четвёртая глава** посвящена изучению качества обращения волнового фронта квазивырожденным четырёхволновым преобразователем излучения на тепловой пеллинейности.

В первом параграфе приведен вывод выражения для ФРТ квазивырожденного ( $\omega_1 + \omega_2 - \omega_1 = \omega_2$ ) четырёхволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности.

Получено выражение для ФРТ четырёхволнового квазивырожденного преобразователя излучения на тепловой нелинейности:

$$G(\bar{\rho}, z_3, z_4) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{A_{20}^0 f}{\beta^2 - \kappa_T^2} \left\{ \frac{1}{2sh\kappa_T \ell} \frac{[\exp(-\beta \ell) - \exp(\kappa_T \ell)]}{[\kappa_T + ip]} [\exp(-\kappa_T \ell - ip \ell) - 1] + \right. \\ \left. + \frac{1}{2sh\kappa_T \ell} \frac{[\exp(-\beta \ell) - \exp(-\kappa_T \ell)]}{[\kappa_T - ip]} [\exp(\kappa_T \ell - ip \ell) - 1] + \right. \\ \left. + \frac{\exp(-\beta \ell - ip \ell) - 1}{\beta + ip} \right\} \exp \left[ -i\bar{k}_4 \bar{\rho} - \frac{i\kappa_3^2}{2k_1} z_3 + \frac{i\kappa_4^2}{2k_2} z_4 \right] d\bar{k}_4,$$

где  $p = \frac{1}{k_2} (\kappa_4^2 - \kappa_2^2)$ ,  $\beta = 2\alpha_1 + \frac{i}{k_1} (\kappa_3^2 - \kappa_1^2)$ ,  $\bar{k}_T = \bar{k}_1 - \bar{k}_3$ ,  $\kappa_T = |\bar{k}_T|$ .

Во втором и третьем параграфах приведены результаты исследования качества ОВФ квазивырожденным четырёхволновым преобразователем излучения на тепловой нелинейности в схемах со встречными и попутными волнами накачки соответственно. Найдена зависимость ширины модуля ФРТ четырёхволнового преобразователя в области оптимальной фокусировки от соотношения частот волн накачки (рис.8).

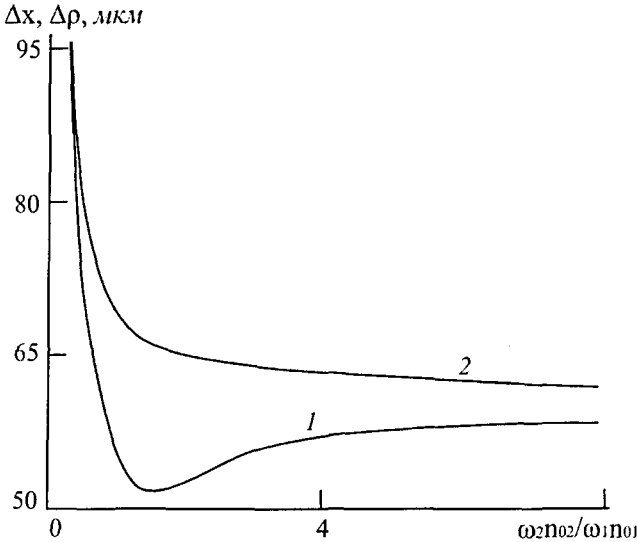


Рис.8. Зависимость ширины модуля ФРТ от отношения частот волн накачки для схемы со встречными волнами накачки (1), схемы с попутными волнами накачки (2);

$$n_{01} \approx n_{02} = 1.36; \alpha_1 \ell = 1.6; k_2 \ell = 160$$

Ширина модуля ФРТ в схеме с попутными волнами накачки с увеличением частоты второй волны накачки монотонно уменьшается. В схеме со встречными волнами накачки ширина модуля ФРТ минимальна при вырожденном четырехволновом взаимодействии. По мере отклонения частоты второй волны накачки от частоты волн, записывающих тепловую решетку, ширина модуля ФРТ в этой схеме монотонно возрастает.

В диссертационной работе приведены оценки ширины модуля ФРТ квазирожденного четырехволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности. Расчеты проводились для случая, когда вторая волна накачки генерируется He-Ne лазером ( $\lambda_1 = 0.63 \text{ мкм}$ ). Численный анализ выражения ФРТ четырехволнового преобразователя показывает, что ширина модуля ФРТ в плоскости оптимальной фокусировки в схеме со встречными волнами накачки равна  $\Delta r = 57 \text{ мкм}$ , в схеме с попутными волнами накачки  $\Delta x \approx \Delta y \approx 63 \text{ мкм}$ . Отстройка плоскости фокусировки сигнальной волны от плоскости оптимальной фокусировки на 3 мм в схеме со встречными волнами накачки приводит к увеличению ширины модуля ФРТ до 91 мкм.

Полученные в диссертационной работе значения ширины модуля ФРТ квазирожденного четырехволнового преобразователя хорошо согласуются с результатами работы [2], в которой экспериментально исследуется компенсация фазовых искажений с использованием квазирожденного четырехволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности.

В пятой главе представлены результаты исследования разрешающей способности вырожденного четырехволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности в двумерном оптическом волноводе.

В первом параграфе для нахождения ФРТ вырожденного четырехволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности в волноводе использовали разложения как взаимодействующих волн, так и быстро осциллирующей в пространстве составляющей температуры по модам волновода  $f_c(x, z) = \tilde{f}_c(x) \exp\{-i\beta_c z\}$ . Получено выражение для ФРТ, которое с точностью до постоянного множителя имеет вид:

$$G(x, x_0, z = 0) = -i \frac{k^2}{n_0} \frac{dn}{dT} \sum_{l=0}^N \frac{\tilde{f}_l(x)}{\beta_l} \sum_{m=0}^N \sum_{p=0}^N a_{2m} \Gamma_{l,p,m} \int_0^L \delta T_p(z) \exp[-i(\beta_m - \beta_l)z] dz,$$

где  $\Gamma_{n,k,p} = \int \tilde{f}_n(x) \tilde{f}_k^*(x) \tilde{f}_p(x) dx$  – интеграл перекрытия, характеризующий эффективность взаимодействия трех мод волновода,  $\delta T_p(z)$  – коэффициенты в разложении быстро осциллирующей в пространстве составляющей температуры по модам волновода,  $a_m$  – коэффициенты в разложении амплитуд волн по модам волновода,  $L$  – длина волновода,  $N$  – число мод в волноводе.

Во втором параграфе исследовалось качество обращения волнового фронта при четырехволновом взаимодействии в волноводе с идеально прово-



дьящими поверхностями, параллельными оси Z и расположенными на расстоянии  $2a$  друг от друга.

Анализ выражения для ФРТ четырехволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности в таком волноводе показал, что в случае одно-модовых волн накачки с равными номерами мод ( $n = m$ ), если номер мод волн накачки четный, то вид ФРТ определяет в основном мода объектной волны, номер которой равен номеру мод волн накачки ( $\ell = n$ ). Если номера мод волн накачки нечетные, то вид ФРТ определяют в основном две моды объектной волны, номера которых равны  $\ell_1 = n - 1$  и  $\ell_2 = n + 1$ .

При нечетных номерах мод накачки модуль ФРТ состоит из центрального максимума и побочных, величина и число которых возрастает с номером моды.

Показано, что ширина центрального максимума модуля ФРТ с увеличением длины волновода, осциллируя, выходит на постоянное значение, величина которого с ростом номера мод накачки уменьшается (рис. 9). Анализ полученных зависимостей показывает, что период осцилляций ширины модуля ФРТ совпадает с периодом осцилляций изменения температуры.

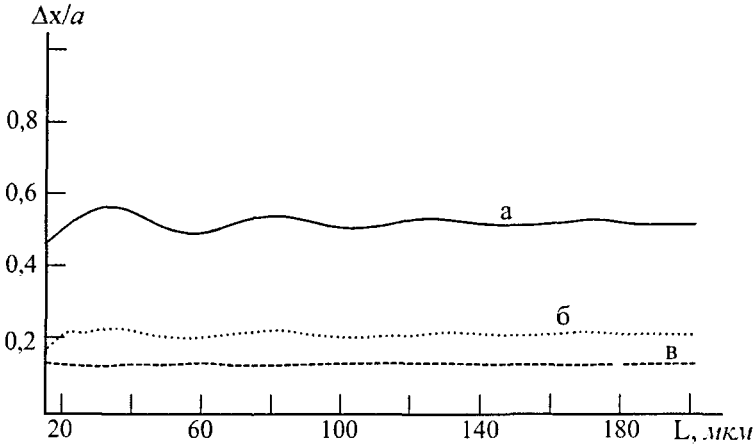


Рис.9. Зависимость ширины модуля функции размытия точки от длины плоского волновода с идеально проводящими стенками, при  $a=4$  мкм;  $\lambda=0.53$  мкм;  $n_0=1.5$ ;  $N=21$ ;  $n=m=0$  (а),  $n=m=1$  (б),  $n=m=3$  (в)

Если вторая волна накачки равномерно освещает грань волновода с идеально проводящими стенками, то ширина модуля ФРТ существенно уширяется – качество преобразования излучения ухудшается.

В третьем параграфе рассмотрена разрешающая способность четырехволнового преобразователя излучения в волноводе с параболическим профилем показателя преломления.

Для волн накачки с номерами  $n=m=0,1,3,\dots$  основная энергия в изображении точечного сигнала сосредоточена в центральном максимуме ФРТ, в этом

случае количественной характеристикой качества ОВФ может служить ширина модуля ФРТ.

Показано, что условие фазового синхронизма устанавливает однозначную связь  $\ell = k - (n - m)$  между номерами мод объектной волны ( $\ell$ ) и номерами мод волн накачки ( $n$ ,  $m$ ), сигнальной волны ( $k$ ). Максимальную амплитуду при чётном номере моды волны накачки имеет мода объектной волны, номер которой равен номеру моды волны накачки.

Как и в случае волновода с плоскими идеально проводящими стенками ширина модуля ФРТ с увеличением длины волновода, осциллируя, выходит на постоянное значение, величина которого с ростом номера мод накачки уменьшается, а равномерное освещение граней волновода волнами накачки приводит к существенному ухудшению качества ОВФ.

**В заключении** приведены основные результаты, полученные в работе.

**Авторский вклад.** Все результаты, изложенные в работе, получены при личном участии автора.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

**1.** При обращении волнового фронта вырожденным четырёхволновым преобразователем излучения на тепловой нелинейности увеличение угла между попутными волнами накачки приводит к резкому уменьшению ширины модуля ФРТ в плоскости волн накачки и незначительному изменению ширины модуля ФРТ в плоскости, перпендикулярной плоскости волн накачки. При этом увеличивается расстояние между плоскостями оптимальной фокусировки. Зависимость ширины модуля ФРТ в плоскости волн накачки от направления их распространения можно описать параболической функцией.

**2.** Минимальное значение ширины модуля ФРТ вырожденного четырёхволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности, при записи в нелинейной среде одной тепловой решётки наблюдается при совпадении направлений распространения волн накачки в схеме с попутными волнами накачки и при распространении волн накачки строго навстречу друг другу в схеме со встречными волнами накачки.

**3.** Ширина модуля функции размытия точки квазивырожденного четырёхволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности в схеме с попутными волнами накачки с увеличением частоты второй волны накачки монотонно уменьшается. В схеме со встречными волнами накачки ширина модуля функции размытия точки минимальна при вырожденном четырёхволновом взаимодействии. По мере отклонения частоты второй волны накачки от частоты волн, записывающих тепловую решетку, ширина модуля ФРТ в этой схеме монотонно возрастает.

**4.** Ширина модуля функции размытия точки четырехволнового преобразователя излучения пропорциональна толщине нелинейной среды в степени  $1/2$ . При записи в нелинейной среде только одной тепловой решетки ширина модуля ФРТ с ростом толщины нелинейной среды увеличивается быстрее в схеме с

попутными волнами накачки по сравнению со схемой с встречными волнами накачки.

5. Учет расходимости волн накачки уменьшает ширину модуля ФРТ вырожденного четырехволнового преобразователя излучения в схеме с попутными волнами накачки, увеличивает ширину модуля ФРТ в схеме с встречными волнами накачки. Путем замены ФРТ четырехволнового преобразователя излучения с плоскими волнами накачки гауссовой функцией получены приближенные выражения для ФРТ четырехволновых преобразователей в схемах с попутными и встречными волнами накачки с учетом расходимости волн накачки.

6. Вид ФРТ четырехволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности в волноводе с идеально проводящими поверхностями, в случае одномодовых волн накачки с равными четными номерами мод, определяет в основном мода объектной волны, номер которой равен номеру мод волн накачки. Если номера мод волн накачки нечетные, то вид ФРТ определяют в основном две моды объектной волны, номера которых на единицу отличаются от номера моды волн накачки. Ширина центрального максимума модуля ФРТ с увеличением длины волновода, осциллируя, выходит на постоянное значение, величина которого с ростом номера мод накачки уменьшается.

7. При вырожденном четырехволновом взаимодействии на тепловой нелинейности в волноводе с параболическим профилем показателя преломления и одномодовыми волнами накачки с нулевым и нечетными равными номерами мод основная энергия в изображении точечного сигнала сосредоточена в центральном максимуме ФРТ. При четных равных номерах мод одномодовых волн накачки вид ФРТ определяет в основном мода объектной волны, номер которой равен номеру мод волн накачки.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Список публикаций в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных ВАК**

1. Ивахник В.В., Никонов В.И., Харская Т.Г. Четырехволновое преобразование излучения на тепловой нелинейности в двумерном многомодовом световоде // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2006. Т.9. №1. – С.5-11.

2. Ивахник В.В., Никонов В.И., Харская Т.Г. Качество обращения волнового фронта квазивырожденным четырехволновым преобразователем излучения на тепловой нелинейности // Известия Самарского научного центра РАН. 2007. Т.9. №3. – С.635-639.

3. Ивахник В.В., Харская Т.Г. Влияние структуры волны накачки на пространственные характеристики четырехволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности в схеме с попутными волнами накачки // Компьютерная оптика. 2007. Т.31. №4. – С. 32-39.

4. Ивахник В.В., Никонов В.И., Харская Т.Г. Пространственная селективность динамических голограмм на тепловой нелинейности // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2008. Т.11. №2. – С.71-76.

#### Список публикаций в других изданиях

5. Ивахник В.В., Никонов В.И., Харская Т.Г. Четырёхволновое преобразование излучения на тепловой нелинейности в световоде с параболическим профилем // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2006. Т.49. №8. – С.54-60.

6. Ивахник В.В., Никонов В.И., Харская Т.Г. Анализ пространственных характеристик четырёхволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности в схеме с попутными волнами накачки // Компьютерная оптика. 2006. Т.30. – С. 4-8.

7. Ивахник В.В., Никонов В.И., Харская Т.Г. Четырёхволновой преобразователь изображения в двумерном многомодовом световоде с тепловой нелинейностью. // Тезисы докладов международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика–2005». Октябрь 2005 г. Санкт-Петербург. – С.27-28.

8. Ивахник В.В., Никонов В.И., Харская Т.Г. Четырёхволновой преобразователь изображения в световоде с тепловой нелинейностью. // Тезисы и доклады международной научно-технической конференции «Физика и технологические приложения волновых процессов». Сентябрь 2006 г. Самара. – С. 11-12.

9. Ивахник В.В., Никонов В.И., Харская Т.Г. Четырёхволновое преобразование излучения на тепловой нелинейности в схеме с попутными волнами накачки // Тезисы докладов международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2006». Октябрь 2006 г. Санкт-Петербург. – С.10-11.

10. Ивахник В.В., Никонов В.И., Харская Т.Г. Качество обращения волнового фронта квазивырожденным четырёхволновым преобразователем излучения на тепловой нелинейности // Тезисы докладов международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика–2007». Октябрь 2007 г. Санкт-Петербург. – С.89-90.

#### СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бетин А.А., Жуков Е.А., Митропольский О.В. Отражение излучения CO<sub>2</sub>-лазера при вырожденном четырёхволновом взаимодействии в жидкостях // Квантовая электроника. 1985. Т. 12. № 9. – С. 1890-1894.

2. Бетин А.А., Жуков Е.А., Митропольский О.В., Тургенев С.Г. Регистрация излучения среднего ИК диапазона при записи фазовых голограмм в поглощающих жидкостях // Журнал технической физики. 1987. Т. 57. №5. – С. 925-931.

Подписано в печать 17 ноября 2008 г.

Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.

Объём 1 л. л. Тираж 100 экз. Заказ № 1579

443011 г. Самара, ул. Академика Павлова, 1

Отпечатано в УОП СамГУ