

На правах рукописи

Сафонов Валерий Иванович

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ЗАПИСИ ДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММ  
ДЛЯ ОБРАЩЕНИЯ ВОЛНОВОГО  
ФРОНТА**

Специальность 01.04.03 — "Радиофизика"

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Челябинск 1997**

Работа выполнена в вузовско-академической лаборатории нелинейной оптики Института электрофизики Уральского отделения Российской Академии Наук и Челябинского государственного технического университета

Научный руководитель: член-корр. РАН Б.Я.Зельдович

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н. Шандаров С.М.

д.ф.-м.н. Шульгин Б.В.

Ведущая организация: Государственный Университет  
г. Челябинск

Защита состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 199\_ г. в \_\_\_ час. \_\_\_ мин. на заседании диссертационного совета К.063.53.03 при Томском государственном университете по адресу: 634010 г. Томск, пр.Ленина, 36, ТГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 199\_ г.

Ученый секретарь  
Совета, к.ф.-м.н.

*Дейкова*

Г.Н.Дейкова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Обращение волнового фронта<sup>1</sup> широко используется в настоящее время для обработки и передачи информации, в лазерной технике и в других областях. В последние годы было предложено большое количество методов обращения волнового фронта. Среди них наиболее известные и хорошо исследованные – обращение волнового фронта при вынужденном рассеянии и обращение волнового фронта при четырехволновом смешении.

В схемах обращения волнового фронта при четырехволновом смешении использовались только нелинейно-оптические среды, в которых записывались объемные голограммы. Однако в последнее время появились материалы, обладающие большой оптической нелинейностью, из которых можно изготавливать тонкие пленки. Это жидкие кристаллы и полупроводниковые квантоворазмерные структуры. Такие материалы могут быть использованы в схемах обращения волнового фронта при четырехволновом смешении, однако для их применения необходимы дополнительные исследования, поскольку голограммы в них уже не являются объемными.

Фоторефрактивные кристаллы являются одной из наиболее привлекательных сред для обращения волнового фронта при четырехволновом смешении, поскольку такие обрататели характеризуются практически полным отсутствием пороговых явлений по интенсивности света. Среди фоторефрактивных кристаллов имеются кристаллы  $Ba_3SrNb_2O_8$  (SBN),  $Ba_2NaNbO_5$  (BaNaN), обладающие высокими значениями электрооптических коэффициентов и малыми значениями произведения подвижности на время жизни электрона в зоне проводимости. На сегодняшний

<sup>1</sup>Зельдович Б.Я., Пилипецкий И.Ф., Шкунов В.В., *Обращение волнового фронта*. М. Наука, 1985.

день существуют два метода записи голограмм в таких кристаллах во внешнем поле, значительно увеличивающем фоторефрактивный отклик кристалла. В первом из них голограмма формируется неподвижной интерференционной картиной при помощи постоянного внешнего поля<sup>2</sup>. Второй метод, называемый механизмом синхронного детектирования<sup>3</sup>, предполагает, что статическая голограмма записывается быстробегущей интерференционной картиной в переменном электрическом поле той же частоты, что и разность частот волн, создающих интерференционную картину. Использование переменного внешнего поля предпочтительнее по сравнению с постоянным, поскольку переменное поле позволяет избежать экранирования внешнего поля в освещенной части кристалла. Это особенно важно при записи голограмм со сложной пространственной структурой.

Кроме объемных кристаллов в схемах обращения волнового фронта при четырехволновом смешении можно использовать планарные волноводы на основе фоторефрактивных кристаллов. Такие обращатели необходимы для обработки изображения в различных интегрально-оптических приборах.

Цель настоящей работы заключается в

- теоретическом исследовании возможности использования для обращения волнового фронта при четырехволновом смешении тонких слоев материалов с оптической нелинейностью третьего порядка;
- теоретическом исследовании обращения волнового фронта при невырожденном четырехволновом смешении в фоторефрактивном кристалле;

---

<sup>2</sup>Huignard J.-P., Marrakchi A., *Opt. Comm.*, 1981, v.39, p.249

<sup>3</sup>Шлык П.Н., Нестюкин О.Р., Зельдович В.Я., *Opt. Lett.*, 1991, v.16, p.414

- теоретическом исследовании эффективности записи голограмм по методу синхронного детектирования в планарном фоторефрактивном волноводе.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- предложена схема обращения волнового фронта с использованием тонких слоев с оптической нелинейностью третьего порядка и теоретически получены условия, необходимые для обращения волнового фронта в этой схеме;
- создана теоретическая модель невырожденного четырехволнового взаимодействия в фоторефрактивном кристалле;
- на основе численного моделирования исследована запись голограмм по механизму синхронного детектирования в случае, когда внешнее переменное электрическое поле приложено перпендикулярно вектору решетки.

Практическая ценность работы заключается в том, что проведенные исследования позволят расширить применяемый для обращения волнового фронта при четырехволновом смешении набор нелинейно-оптических сред за счет тонких слоев с оптической нелинейностью третьего порядка, фоторефрактивных кристаллов с малой дрейфовой длиной фотозлектронов, а также планарных волноводов на основе таких фоторефрактивных кристаллов.

Основные положения, выносимые на зачет:

- Предложенная схема, состоящая из линзы и двух тонких слоев из материалов с оптической нелинейностью третьего порядка, является двойным обращателем волнового фронта. Для начала генерации обращенных волн необходимо, чтобы интенсивность падающих волн

была выше пороговой и чтобы оптическая система обработателя обеспечивала отображение с уменьшением поперечного размера изображения. Генерация характеризуется подавлением шумовых компонент при малом превышении над порогом.

- Самодифракция существенно влияет на эффективность обращения волнового фронта при невырожденном четырехволновом смешении в фоторефрактивном кристалле.
- Запись решеток по механизму синхронного детектирования может осуществляться в планарном фоторефрактивном волноводе при помощи переменного поля, приложенного перпендикулярно поверхностям волновода. Для эффективной записи решетки необходимо, чтобы период решетки был много больше толщины волноводного слоя.

Апробация работы была проведена лично автором на международной конференции "Photorefractive Materials, Effects and Devices", г. Киев, 1993; на конференции по дифракционной оптике, г. Самара, 1993; международной конференции "International Conference on Coherent and Nonlinear Optics", г. С-Петербург, 1995; на конференции молодых ученых ИЭФ УрО РАН, г. Екатеринбург, 1995; на семинарах Челябинского Государственного Технического Университета и Института Электрофизики (г. Екатеринбург).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Она содержит 24 рисунка и список цитируемой литературы из 95 наименований. Полный объем диссертации 128 страниц.

## Содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследования и приведена краткая аннотация работы по главам.

В первой главе содержится обзор литературы.

Параграф 1 этой главы посвящен двум схемам обращения волнового фронта при четырехволновом смешении: петлевой схеме обратателя и двойному (взаимному) обратателю.

В параграфе 2 кратко изложена двухуровневая модель формирования голограмм в фоторефрактивном кристалле<sup>4</sup>. В этом параграфе также обсуждаются различные способы записи голограмм в фоторефрактивных кристаллах (среди них более подробно механизм синхронного детектирования) и рассматриваются особенности двух- и четырех- волнового взаимодействия в фоторефрактивных кристаллах.

Во второй главе рассмотрена новая схема двойного (взаимного) обратателя волнового фронта и проведено ее теоретическое исследование.

В параграфе 1 этой главы дано описание схемы и основных принципов ее действия. Схема состоит из линзы и двух тонких слоев из материалов с оптической нелинейностью третьего порядка, находящихся приблизительно в плоскостях отображения линзы. В основу действия схемы положен хорошо известный принцип преобразования фазовой модуляции в амплитудную модуляцию<sup>5</sup>. На систему с противоположных сторон падают две некогерентные волны, которые в результате дифракции на тонких голограммах разделяются на несколько порядков дифракции. Минус первые, а также высшие порядки дифракции, перекрываются при помощи

<sup>4</sup>Kukhtarev N.V., Markov M.V., Odulov S.G., Soikin M.S. and Vinetaki V.L., *Ferroelectrics*, 1979, v.22, p.949

<sup>5</sup>Born M., Wolf E., *Principles of optics*, Pergamon Press, 1980.

диафрагмы на линзе. Интерференция оставшихся плюс первого и нулевого порядков дифракции в плоскостях тонких слоев записывает в них решетки диэлектрической проницаемости.

Во втором параграфе проведено исследование условий, необходимых для генерации обращенных волн в предложенной схеме. Анализ проведен на основе аналитического решения уравнений, описывающих взаимодействие в случае, когда падающие волны имели гауссов профиль распределения интенсивности. Пороговое условие генерации требует, чтобы произведение коэффициентов нелинейностей тонких слоев было отрицательным  $s_1 s_2 < 0$ . Этому условию можно удовлетворить, например, если использовать в качестве тонких слоев нематические жидкие кристаллы с тепловой нелинейностью. Процесс установления обращенной волны происходит из-за взаимодействия различных частей поперечных сечений тонких слоев, в результате которого возникающая из шумов волна постепенно преобразуется в обращенную волну. Этот процесс напоминает поперечную когерентизацию при обращении волнового фронта при вынужденном рассеянии<sup>4</sup>. Теоретические исследования, проведенные с применением методов матричной и волновой оптики<sup>7</sup>, показали, что для генерации обращенных волн необходимо выполнение еще одного важного условия – оптическая система обратателя должна обеспечивать отображение с уменьшением поперечного размера изображения. Поэтому тонкие слои должны быть смещены из плоскостей точного отображения к линзе на такое расстояние, чтобы взаимодействие различных частей поперечных сечений было достаточно сильным и чтобы взаимодействующие пучки перекрывались внутри тонких слоев. Расчеты показывают

<sup>4</sup>Баранова Н.Б., Зельдович Б.Я., *Квантовая электроника*, 1978, т.5, с.973

<sup>7</sup>Gerard A., Burch J.M., *Introduction to matrix methods in optics*, A. Wiley-Interscience Publication, 1975.



что этим условиям удовлетворяет смещение на несколько процентов от фокусного расстояния линзы.

В третьем параграфе исследовано качество обращения волнового фронта при малом превышении над порогом. Шумовая волна была представлена в виде разложения по собственным функциям (эрмит-гауссовым функциям) системы уравнений, описывающих взаимодействие в отражателе. Было показано, что пороговая интенсивность для шумовых компонент выше таковой для обращенной волны, если тонкие слои сдвинуты из плоскостей точного отображения линзы. Это обеспечивает генерацию только обращенной волны при малом превышении над порогом.

В четвертом параграфе обсуждаются несколько вариантов предложенной схемы, а именно, схема, состоящая из трех слоев и схема, состоящая из двух слоев и фоторефрактивного кристалла, обеспечивающего перекачку энергии из нулевого порядка дифракции в плюс первый порядок. Для этих схем вычислены пороговые условия и эффективность преобразования в обращенную волну в режиме насыщения.

Третья глава посвящена теоретическому исследованию эффективности обращения волнового фронта при невырожденном четырехволновом смещении в фоторефрактивном кристалле. К кристаллу приложено переменное внешнее поле той же частоты, что и разность частот волн, взаимодействующих в кристалле, причем частота внешнего поля много больше обратного времени записи голограммы. В этих условиях решетки в фоторефрактивном кристалле записываются по механизму, рассмотренному в работе<sup>8</sup> (между волнами с одинаковой частотой) и по механизму синхронного детектирования<sup>3</sup> (между волнами с различной частотой).

В параграфе 1 получено аналитическое решение системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих процесс взаимодействия с

<sup>8</sup>Stepanov S.I., Petrov M.P., *Opt. Comm.*, 1985, v.53, p.292

учетом истощения накачек. Расчет выполнен для случая положительной и отрицательной обратной связи и для различных знаков электрооптического коэффициента, определяющего взаимодействие.

Во втором параграфе обсуждается эффективность обращения в различных типах фоторефрактивных кристаллов. Показано, что если дрейфовая длина электронов мала по сравнению с периодом решетки, то знак обратной связи и знак электрооптического коэффициента почти не влияют на эффективность обращения волнового фронта. В случае большой дрейфовой длины отрицательная обратная связь сказывается на эффективности обращения значительно слабее, чем положительная. Положительная обратная связь может приводить к значительному уменьшению эффективности обращения, когда вторичная решетка противофазна первичной или к увеличению эффективности, когда вторичная решетка в фазе с первичной. Соотношения между интенсивностями падающих волн также существенно влияют на эффективность обращения. В этом параграфе проведено также сравнение теоретических результатов с литературными экспериментальными данными<sup>9</sup>, полученными в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  (ВТО). Хорошее согласование теоретических и экспериментальных данных было получено при параметрах кристалла, совпадающих с приводимыми в литературе параметрами для кристаллов ВТО.

Четвертая глава посвящена теоретическому исследованию записи решеток по механизму синхронного детектирования в планарном фоторефрактивном волноводе в случае, когда направление внешнего поля перпендикулярно плоскостям волновода.

В параграфе 1 приведено качественное описание записи голограмм по механизму синхронного детектирования<sup>3</sup> двумя неколлинеарными мода-

<sup>9</sup>Паных П.Н., Nestorin O.P., Zel'dovich B.Ya., *Opt. Comm.*, 1991, v.86, p.75.

ми планарного фоторефрактивного волновода. Голограмма формировалась бегущей интерференционной картиной, синхронизованной по частоте с внешним полем, приложенным к кристаллу. В рассматриваемом случае внешнее поле было приложено перпендикулярно к плоскостям волновода. Такой способ приложения внешнего поля обладает рядом преимуществ. Во-первых, максимальное значение напряжения, которое можно приложить к кристаллу ограничивается напряженностью объемного, а не поверхностного пробоя. Во-вторых, это дает возможность достигать большей напряженности внешнего поля при том же значении напряжения, из-за меньшего расстояния между электродами.

Во втором параграфе на основе модели планарного волновода со ступенчатым профилем показателя преломления и двухуровневой модели формирования голограмм в фоторефрактивных кристаллах<sup>4</sup> проведен расчет дифракционной эффективности голограммы. Численное интегрирование проводилось в приближении малого контраста интерференционной картины для случая, когда дрейфовая длина электрона и радиус экранирования были много меньше как толщины волноводного слоя, так и периода интерференционной картины. При расчете учитывалась темновая проводимость кристалла. В результате компьютерного эксперимента было показано, что в этих условиях основным параметром, определяющим дифракционную эффективность голограммы, является отношение периода решетки к характерному размеру изменения интенсивности в направлении внешнего поля. Запись голограмм эффективна, если период решетки много больше этого характерного размера. Поскольку характерный размер изменения интенсивности уменьшается с увеличением индекса взаимодействующих неколлинеарных мод, то при одинаковых условиях дифракционная эффективность голограммы выше для мод с более высокими индексами.

В параграфе 3 рассмотрено моделирование записи голограмм по механизму синхронного детектирования в планарном фоторефрактивном волноводе. В модельной ситуации сигнальная волна и волна накачки фокусировались в объеме кристалла цилиндрической линзой. В такой геометрии записи характер зависимости дифракционной эффективности голограммы тот же, что и в планарном фоторефрактивном волноводе. Для модельной ситуации проведено сравнение дифракционной эффективности голограммы в двух случаях: 1) когда направление внешнего поля перпендикулярно вектору решетки, 2) когда направление внешнего поля параллельно вектору решетки. Расчет дифракционной эффективности голограммы проводился для случая, когда дрейфовая длина электронов и радиус экранирования были много меньше как периода решетки, так и размера перетяжки гауссова пучка. В первом случае при уменьшении периода решетки по сравнению с размером перетяжки дифракционная эффективность голограммы резко снижается. В случае поля, параллельного вектору решетки, ситуация противоположная; при уменьшении периода решетки дифракционная эффективность голограммы резко возрастает. Значение дифракционной эффективности голограммы в случае параллельного поля при больших пространственных частотах решетки совпадает с дифракционной эффективностью в случае перпендикулярного поля при малых пространственных частотах и равняется таковой при записи синусоидальной решетки в объемном кристалле.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Предложена схема обращателя волнового фронта, состоящая из линзы и двух тонких слоев из материалов с оптической нелинейностью третьего порядка, расположенных приблизительно в плоскостях точного отображения линзы.

2. Теоретически исследован режим генерации обращенных волн в пред-

ложенной схеме. Показано, что обращение волнового фронта происходит, если интенсивности падающих волн выше пороговой и оптическая система обращателя обеспечивает отображение с уменьшением поперечного размера изображения.

3. Теоретически исследовано качество обращения волнового фронта в предложенной схеме. Показано, что при небольшом превышении над порогом самогенерации происходит подавление шумов, если тонкие слои смешены из плоскостей точного отображения.

4. Проведено теоретическое исследование эффективности обращения волнового фронта при невырожденном четырехволновом смешении в фоторефрактивных кристаллах в зависимости от параметров кристаллов и условий взаимодействия.

5. Методами математического моделирования исследована запись голограммы по механизму синхронного детектирования в планарных волноводах в случае, когда направление внешнего поля перпендикулярно поверхности волновода. В результате численного интегрирования уравнений, описывающих процесс записи, для мод с различными индексами получена зависимость дифракционной эффективности голограммы от пространственной частоты решетки. Показано, что запись голограммы эффективна, только если период решетки много больше характерного размера изменения интенсивности в направлении внешнего поля.

6. Теоретически исследовано моделирование записи голограммы по механизму синхронного детектирования в планарном фоторефрактивном волноводе при помощи фокусировки излучения в объеме кристалла цилиндрической линзой. Для модельной ситуации проведено сравнение дифракционной эффективности голограммы в случае, когда направление внешнего поля перпендикулярно вектору решетки и в случае, когда направление внешнего поля параллельно вектору решетки.

Основные результаты диссертации изложены в следующих журнальных публикациях:

1. Зельдович Б.Я., Сафонов В.И. Обращатель волнового фронта с тонкими нелинейными слоями // Квантовая электроника. - 1994. - Т.21. - С.169-174.
2. Goosev I.V., Krivoschekov V.A., Safonov V.I., Zel'dovich B.Ya., Mutual phase conjugation via thin layers // JOSA B, 1994. - V.11, P.1954-1959.
3. Зельдович Б.Я., Сафонов В.И. Модовая структура и пороги для взаимообращателя на тонких нелинейных слоях // Квантовая электроника. - 1994. - Т.21. - С.952-958.
4. Зельдович Б.Я., Сафонов В.И., Режим насыщения для обращателя волнового фронта с тонкими слоями // Оптика и спектроскопия. - 1993. - Т.75. - С.1279-1288.
5. Nestiorkin O.P., Safonov V.I., Zel'dovich B.Ya., Nonlinear theory of the two- and four-wave interaction via the static grating recorded by different frequency waves // JOSA B, 1994. - V.11, P.53-60.
6. Зельдович Б.Я., Микляев Ю.В., Сафонов В.И. Механизм синхронного детектирования при помощи переменного поля перпендикулярного к поверхности планарного фоторефрактивного волновода // Квантовая электроника. - 1995. - Т.22. - С.179-183.
7. Miklyaev Yu.V., Safonov V.I., Shershakov Ye.P., Influence of the phase modulation of the light beam on the formation of gratings by ac field // Technical Digest of 15th International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, St-Peterburg, June 1995. - V.1, P.411-412.
8. Miklyaev Yu.V., Safonov V.I., Recording of photorefractive holograms by ac field perpendicular to the grating vector // Pure and applied optics, 1996. - V.5, P.445-451.
9. Микляев Ю.В., Сафонов В.И., Запись фоторефрактивных голограмм

при помощи переменного поля, перпендикулярного вектору решетки. Теория и эксперимент // ЖЭТФ. - 1996 - Т.110. - N 1(7). - С.95-104.

*Автомат*

Издательство Челябинского  
государственного технического университета

---

ЛР N 020364 от 20.01.92. Подписано в печать 03.02.97. Формат 60x84 1/16. Печать офсетная. Усл.печ.л. 0,70. Уч.-изд. л. 0,54. Тираж 100 экз. Заказ 74/93.

---

УОП издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.