

7.02.03
1593

На правах рукописи

Микляев Юрий Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПИСИ ДИНАМИЧЕСКИХ
ГОЛОГРАММ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ СРЕДАХ
ВО ВНЕШНЕМ ПЕРЕМЕННОМ ПОЛЕ

Специальность 01.04.03 — "Радиофизика"

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Челябинск 1997

Работа выполнена в Вузовско-академическом отделе нелинейной оптики Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук и Челябинского государственного технического университета.

Научные руководители: член-корр. РАН Зельдович Б.Я.,
д.ф.-м.н. Кундикова Н.Д.

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н. Шандаров С.М.,
к.ф.-м.н. Пойзнер Б.Н.

Ведущая организация — Институт оптики атмосферы,
г. Томск.

Зашита состоится "___" 199___ г., в ___ ч., 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.

Дейков, Дейкова Г.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Фоторефрактивные кристаллы являются весьма перспективной средой для динамической голограммии, обращения и коррекции волнового фронта, усиления оптических изображений, оптической обработки информации, реализации оптических нейронных сетей и др.¹. По этой причине данные кристаллы активно исследуются на протяжении последних двух десятилетий.

Запись динамических голограмм в фоторефрактивных кристаллах может осуществляться как за счет диффузии носителей заряда, так и их дрейфа во внешнем электрическом поле (постоянном или переменном), а также во внутреннем фотовольтаическом поле¹. Существенным недостатком использования постоянного поля для записи голограмм является его экранировка при неоднородном освещении. При использовании переменного поля такая экранировка отсутствует. В настоящее время используются два способа записи голограмм в переменном электрическом поле. Первый из них – запись голограммы статической интерференционной картиной² – применим только в кристаллах, у которых дрейфовая длина при допустимых внешних полях может превосходить период интерференционной картины. Второй – метод синхронного детектирования (МСД)³ – может использоваться в кристаллах с произвольной дрейфовой длиной. В случае МСД запись голограммы осуществляется пучками, разность частот которых равна частоте внешнего переменного поля, и энергообмен между ними носит нестационарный характер. Вследствие этого представляется актуальной задача обеспечения стационарного энергообмена в кристаллах с малыми дрейфовыми длинами при

¹Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В., *Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике*, СПб., Наука, 1992, 317С.

²Степанов С.И., Петров М.П., *Письма в ЖТФ*, 1984, т.10, №22, с. 1356-1362

³Лиaykh P.N., Nestorkin O.P., Zel'dovich B.Ya., *Opt. Lett.*, 1991, v.16, p. 414-416

записи во внешнем переменном электрическом поле.

До настоящего времени при записи голограмм традиционно использовалось внешнее поле, направление которого выбиралось перпендикулярным полосам интерференционной картины. В тоже время, при записи голограмм волнами со сложной пространственной структурой ориентация полос интерференционной картины в кристалле может изменяться в довольно широком угловом спектре. В связи с этим представляет интерес рассмотрение записи голограмм во внешнем поле, направление которого параллельно полосам интерференционной картины.

Как было показано в работе⁴, усиление сигнальных волн в фотопрекращивной среде может осуществляться не только при двухвольновом смешении, но и при попутном четырехвольновом взаимодействии в постоянном электрическом поле. Представляется актуальным вопрос об обеспечении такого усиления в переменном поле.

В связи с интенсивным развитием интегральной оптики в последние десятилетия⁵ все большее внимание уделяется записи голограмм в фотопрекращивных волноводах. Вследствие этого приобретает значимость исследование возможных схем записи голограмм в планарных волноводах в переменном поле.

Все вышеизложенное подтверждает актуальность темы диссертации.

Цель диссертационной работы

- Теоретическое и экспериментальное исследование возможности увеличения фотопрекращивного отклика во внешнем переменном поле за счет фазовой модуляции интерферирующих пучков;
- теоретическое и экспериментальное исследование записи голо-

⁴Au L.V., Solymar L., *Appl. Phys. B*, 1988, v.45, p.125

⁵Хансперджер Р., *Интегральная оптика*, М., Мир, 1985, 379С.

грамм во внешнем переменном поле, параллельном полосам интерференционной картины;

- теоретическое исследование трех- и четырех- волнового попутного взаимодействия в фотопрефрактивном кристалле, а также взаимодействия мод в планарном волноводе в случае, когда запись голограмм осуществляется во внешнем переменном поле с асимметричной зависимостью от времени.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- предложен и реализован вариант механизма синхронного детектирования, позволяющий увеличить стационарный энергообмен и дифракционную эффективность голограммы при двухвольновом взаимодействии в фотопрефрактивном кристалле, находящемся во внешнем переменном электрическом поле.
- предсказана и реализована экспериментально возможность записи голограмм при помощи внешнего переменного поля, направленного параллельно полосам интерференционной картины.
- предложен способ записи голограмм, при котором достигается эффективный энергообмен между коллинеарными модами фотопрефрактивного планарного волновода.

Практическая и научная ценность работы. Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности взаимодействия воли на фотопрефрактивной нелинейности во внешнем переменном поле, для записи голограмм волнами со сложной пространственной структурой, а также для определения параметров кристаллов. Кроме того, применение рассмотренных схем взаимодействия воли расширяет возможности использования переменного поля при записи голограмм в фотопрефрактивных планарных волноводах.

Основные положения, выносимые на защиту:

- При взаимодействии фазомодулированных световых пучков в фоторефрактивном кристалле, находящемся во внешнем переменном электрическом поле, оптимальным, с точки зрения энергообмена и амплитуды записанной решетки, является случай, промежуточный между записью статической интерференционной картиной и записью по механизму синхронного детектирования.
- Эффективная запись голограмм по механизму синхронного детектирования во внешнем переменном электрическом поле, приложенном параллельно полосам интерференционной картины достигается при размере освещенной области в направлении поля, сравнимом с периодом интерференционной картины.
- Стационарный энергообмен между коллинеарными модами фоторефрактивного планарного волновода может осуществляться при приложении перпендикулярно плоскости волновода переменного поля с асимметричной зависимостью от времени. Энергообмен между модами имеет пороговый характер по величине разности постоянных распространения мод.

Апробация работы. Результаты докладывались на международной конференции "Photorefractive Materials, Effects and Devices", Киев 1993г., на международной конференции "International Conference on Coherent and Nonlinear Optics", С-Петербург 1995г., на семинарах Челябинского государственного технического университета, Томской академии систем управления и радиоэлектроники, Института электрофизики УрО РАН (г. Екатеринбург).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в десяти публикациях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав заключения и списка литературы, содержащего — наименований цитируемой литературы. Полный объем диссертации — __ страниц, включая __ рисунков.

Содержание диссертации.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы по теме диссертации.

Особое внимание уделено изложению двухуровневой модели фотопрефрактивных кристаллов⁶ и анализу системы материальных уравнений. Проводится сравнительный анализ различных способов записи голограмм, кратко рассмотрены некоторые типы взаимодействий волн на записываемых ими фотопрефрактивных решетках. Также приводится обзор работ по записи голограмм в фотопрефрактивных волноводах.

Во второй главе содержатся результаты исследования возможности увеличения фотопрефрактивного отклика за счет фазовой модуляции интерферирующих пучков при записи голограмм в переменном поле.

Параграф 2.1 посвящен теоретическому расчету амплитуды поля пространственно неоднородного заряда E_{sc} в условиях, когда запись голограммы осуществляется интерференционной картиной вида: $I = I_0(1 + (0.5m \exp(iqx) + \text{k.c.}))$, комплексный контраст m которой зависит от времени $m(t) = |m| \exp(i\psi \text{sign}(\cos(\Omega t)))$, а к кристаллу приложено переменное поле в форме меандра: $E_0(t) = E_0 \text{sign}(\cos(\Omega t))$.

⁶Kukhtarev N.V., Markov M.V., Odulov S.G., Soskin M.S. and Vinetskii V.L., Ferroelectrics, 1979, v.22, p.949

Значение амплитуды модуляции $\psi = 0$ соответствует записи голограммы статической интерференционной картиной, а $\psi = \pi/2$ — методу синхронного детектирования. Показано, что максимальная амплитуда решетки достигается при амплитуде модуляции ψ , равной $\psi = \text{arctg}(E_{sc}(\psi = 0)/E_{sc}(\psi = \pi/2))$. В случае, когда $E_{sc}(\psi = 0) = E_{sc}(\psi = \pi/2)$, при значении параметра $\psi = \pi/4$ амплитуда решетки превосходит амплитуду, получаемую при $\psi = 0, \pi$ в $\sqrt{2}$ раз. Таким образом, за счет фазовой модуляции с амплитудой $\psi = \pi/4$ достигается двухкратное увеличение дифракционной эффективности голограммы.

В параграфе 2.2 приводятся результаты теоретического исследования дифракции фазомодулированных световых волн на записываемой ими дифракционной решетке. Показано, что энергообмен между пучками максимальен при модуляции, соответствующей промежуточному случаю между записью голограммы статической интерференционной картиной и по механизму синхронного детектирования.

В параграфе 2.3 представлены результаты экспериментального исследования записи голограмм в переменном поле при фазовой модуляции интерферирующих пучков. Измерения проводились для двух периодов интерференционных картин, соответствующих различным соотношениям между амплитудами решеток, записываемых статической картиной и по МСД. Получены зависимости дифракционной эффективности и усиления сигнального пучка от амплитуды фазовой модуляции. Наблюдается хорошее соответствие между экспериментальными и теоретическими результатами.

В параграфе 2.4 приводятся результаты теоретического исследования генерации излучения в лазере на динамических решетках с модулированной длиной резонатора. Рассмотрен случай, когда формирование решеток происходит во внешнем переменном поле, син-

хронизованном с модуляцией длины резонатора. Получены пороговые условия генерации. Показано, что модуляция длины резонатора позволяет значительно понизить порог генерации, если амплитуда решетки, записываемой статической интерференционной картиной, существенно меньше амплитуды решетки, записываемой по МСД.

Третья глава посвящена исследованию записи голограмм во внешнем электрическом поле, параллельном интерференционным полосам.

В параграфе 3.1 качественно рассматривается процесс формирования пространственного заряда во внешнем переменном поле в случае, когда полосы интерференционной картины направлены параллельно полю, а между освещенной областью и электродами имеются темные промежутки. Показано, что при записи голограммы пучками с разностью частот, равной частоте внешнего поля, происходит формирование решетки пространственного заряда. В этом случае на границах освещенной области создается периодическое распределение заряда и для того, чтобы поле этого заряда проникало внутрь освещенной области, необходимо, чтобы размер освещенной области в направлении поля был сопоставим с периодом интерференционной картины.

В параграфе 3.2 приводятся результаты экспериментального исследования записи голограммы во внешнем переменном поле, параллельном интерференционным полосам. Для выполнения условия малости размера освещенной области по сравнению с периодом интерференции излучение обоих волн фокусировалось цилиндрической линзой, а кристалл помещался в область перетяжки. Запись голограммы осуществлялась излучением Не-Не лазера ($\lambda = 0.63\text{мкм}$) в фоторефрактивном кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$. Получены пространственно-частотные характеристики голограммы, соответствующие двум различным размерам перетяжки пучков. Показано, что при периоде

интерференционной картины, равном или большем толщины перетяжки, дифракционная эффективность сопоставима с дифракционной эффективностью, получаемой при записи голограммы в отсутствие фокусировки и обычной ориентации внешнего поля (т.е. перпендикулярного интерференционным полосам). С увеличением пространственной частоты дифракционная эффективность голограммы резко падает.

В параграфе 3.3 теоретически рассмотрен процесс записи голограммы двумя неколлинеарными модами фоторефрактивного планарного волновода в случае, когда перпендикулярно к плоскости волновода приложено внешнее переменное электрическое поле. Рассмотрен случай, когда частоты интерферирующих волн либо отличаются на частоту внешнего поля, либо равны. Показано, что поле пространственного заряда формируется только в первом случае. При пренебрежении темновой проводимостью, в предельном случае, когда дрейфовая длина электрона и длина экранировки много меньше периода интерференционной картины, получены аналитические выражения для распределения поля пространственного заряда в волноводе. Показано, что амплитуда записываемой решетки пространственного заряда близка к амплитуде решетки, получаемой при записи в объемном кристалле во внешнем поле, направленном перпендикулярно интерференционным полосам в случае, когда толщина волноводного слоя равна или меньше периода интерференционной картины.

Четвертая глава посвящена теоретическому исследованию взаимодействия воли в фоторефрактивных средах во внешнем поле с асимметричной зависимостью от времени.

В параграфе 4.1 теоретически исследовано трех- и четырех- волновое попутное взаимодействие во внешнем переменном поле. Рас-

смотрена схема взаимодействия, при которой направления распространения всех волн лежат в одной плоскости, а биссектриссы углов между сигнальными волнами и волнами накачек совпадают. Показано, что использование переменного поля с асимметричной зависимостью от времени приводит к усилению сигнальных волн. В отличие от четырехволнового взаимодействия в постоянном поле⁴, в рассматриваемом случае усиление имеет более широкий угловой спектр, что может служить преимуществом при усилении волн, несущих изображение.

В параграфе 4.2 приведены результаты теоретического исследования взаимодействия коллинеарных мод фоторефрактивного планарного волновода. В приближении неистощающейся накачки показана возможность стационарного энергообмена между модами при приложении перпендикулярно плоскости волновода переменного электрического поля с асимметричной зависимостью от времени.

В параграфе 4.3 теоретически исследуется возможность генерации постоянной составляющей фототока через фоторефрактивный кристалл при записи решетки поля пространственного заряда во внешнем переменном поле с асимметричной зависимостью от времени. При неоднородном освещении экранировка постоянного фототока приводит к изменению оптимальной величины асимметричности для взаимодействий волн, рассмотренных в двух предыдущих параграфах и практически не изменяет максимально возможную эффективность этих взаимодействий.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Предложен способ фазовой модуляции интерференционной картины, соответствующий промежуточному случаю между записью го-

⁴L.V. Au, L. Solymar, *Appl. Phys. B*, 1988, v.45, p.125

лограммы статической интерференционной картиной и по механизму синхронного детектирования. Данный способ модуляции позволяет увеличить (по сравнению с ранее известными способами записи голограмм) амплитуду голограммы, записываемой в фоторефрактивном кристалле, находящемся во внешнем переменном поле.

2. Теоретически и экспериментально показано, что для увеличения энергообмена между волнами и дифракционной эффективности голограммы оптимальное значение амплитуды модуляции фазы имеет различные значения и зависит как от параметров кристалла, так и от периода интерференционной картины.

3. Теоретически показано, что использование исследованного способа фазовой модуляции для генерации волн в лазерах на динамических решетках позволяет понизить порог генерации.

4. Предложен и реализован экспериментально способ записи голограмм на основе механизма синхронного детектирования при помощи внешнего поля, параллельного полосам интерференционной картины.

5. Экспериментально показано, что способ записи во внешнем поле, параллельном полосам интерференционной картины, эффективен, когда размер освещенной области сравним с периодом интерференционной картины. В этих условиях дифракционная эффективность близка к дифракционной эффективности при записи во внешнем поле с обычной ориентацией, т.е. перпендикулярном интерференционным полосам.

6. Предложен способ записи голограмм в планарных фоторефрактивных волноводах во внешнем переменном поле, перпендикулярном как плоскости волновода, так и вектору решетки. Получены аналитические выражения для распределения поля пространственного заряда в волноводе в случае, когда темновой проводимостью можно

пренебречь, а дрейфовая длина фотозелектронов и длина экранировки много меньше периода Λ интерференционной картины. При периоде Λ , большем толщины волновода, амплитуда решетки поля пространственного заряда E_{sc} сопоставима с величиной E_{sc} , получаемой в традиционной схеме записи по МСД.

7. Теоретически исследовано четырехволновое взаимодействие в переменном поле с асимметричной зависимостью от времени. В отличие от четырехволнового взаимодействия в постоянном поле, коэффициент усиления имеет более широкий угловой спектр.

8. Теоретически показана возможность стационарного энергообмена между коллинеарными модами фоторефрактивного планарного волновода, имеющими разные фазовые скорости. Эффективный энергообмен может быть достигнут при взаимодействии во внешнем переменном поле с асимметричной зависимостью от времени. Коэффициент усиления в этом случае сопоставим с коэффициентом усиления, достигаемом в объемном фоторефрактивном кристалле с теми же параметрами.

Основные результаты диссертации изложены в работах:

1. Микляев Ю.В., Шершаков Е.П., Запись фоторефрактивных голограмм фазомодулированными световыми пучками в переменном электрическом поле// Оптика и спектроскопия, 1994. – Т.77. – N 5, С.856-859.

2. 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-Petersburg, June 1995. – V.1, P.411-412.

3. Микляев Ю.В., Запись фоторефрактивной голограммы полем, параллельным полосам интерференционной картины// Письма в ЖЭТФ, 1994. – Т.60. – N 7, С.511-513.

4. Микляев Ю.В., Сафонов В.И., Запись фоторефрактивных голограмм при помощи переменного поля, перпендикулярного волновому вектору решетки. Теория и эксперимент// ЖЭТФ, 1996. – Т.110. – N 1(7), С.95-104.
5. 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.
6. Miklyaev Yu.V., Safonov V.I., Zel'dovich B.Ya., Phase-locked detection mechanism in photorefractive waveguides// Optics Communications, 1995. – V.113, P.476-480.
7. Miklyaev Yu.V., Safonov V.I., Forward four-wave interaction in asymmetric ac field// Physics of Vibrations, 1996. – V.60. – N 1, P.44-47.
8. Микляев Ю.В., Коллинеарное взаимодействие мод фоторефрактивного планарного волновода// Письма в ЖТФ, 1996. – Т.22. – N 10. С.14-17.
9. Doogin A.V., Miklyaev Yu.V., Zel'dovich B.Ya., Generation of direct current through a photoconductive crystal by asymmetric ac field// Technical Digest of Topical Meeting on Photorefractive Materials, Effects and Devices. – Kiev, 1993, P.448-451.
10. Дугин А.В., Зельдович Б.Я., Микляев Ю.В., Возбуждение стационарного тока через фотопроводящий кристалл в переменном асимметричном поле// Квантовая электроника, 1993. – Т.20. – N 12, С.1224-1226.



Издательство Челябинского
государственного технического университета

ЛР № 020364 от 20.01.92. Подписано в печать 03.02.97. Формат
60x84 I/16. Печать офсетная. Усл. печ. л.0,70. Уч.-изд. л. 0,61.
Тираж 100 экз. Заказ 19/36.

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