

11807  
11807  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

УДК 621.373.826

Ученый совет  
1995 г.  
Физико-математический факультет

ШЕРШАКОВ Егор Петрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПИСИ ГОЛОГРАММ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ В  
ПЕРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Специальность 01.04.03 - Радиофизика

**А в т о р е ф с р а т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

ТОМСК 1995

Работа выполнена в вузовско-академической лаборатории  
нелинейной оптики Института электрофизики УрО РАН и  
Челябинского государственного технического университета

Научный руководитель - член-корреспондент РАН

Б. Я. Зельдович

кандидат физико-математических наук

О. П. Нестеркин

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук

С. Г. Одулов

кандидат физико-математических наук

В. М. Шандаров

Ведущая организация - Институт Автоматизации и Электростроения  
г. Новосибирск

Защита состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1995 г. в \_\_\_\_\_ часов  
на заседании Специализированного совета \_\_\_\_\_

---

---

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского  
Государственного Университета.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1995 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета \_\_\_\_\_

Актуальность темы. За последние 25 лет обнаружено большое количество фоторефрактивных материалов, среди которых изоляторы, полупроводники, органические соединения. Фоторефрактивный эффект наблюдается в широком классе электрооптических материалов, включая  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$ ,  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{KNbO}_3$ ,  $\text{K}(\text{TaNb})\text{O}_3$ ,  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ ,  $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$ ,  $\text{Bi}_{12}(\text{Si,Ge,Ti})\text{O}_{20}$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{CdS}$ ,  $\text{GaAs}$ ,  $\text{InP}$  и др., так что его можно считать одним из основных свойств электрооптических кристаллов.

Исследования показали, что механизмы фоторефракции достаточно разнообразны и приводят к возникновению различных динамических решеток, как несмещенных (локальный отклик) относительно записываемой интерференционной картины (ИК), так и смещенных (нелокальный отклик) [1]. Тот факт, что Брэгговская самодифракция на смещенной решетке приводит к усилению того из двух пучков, в сторону которого смещена решетка независимо от исходного соотношения их интенсивностей, позволяет использовать это явление для усиления слабых когерентных световых волн. Рекордное усиление в  $10^4$  раз было получено на кристалле  $\text{BaTiO}_3$  [2]. Эффект перекачки энергии очень важен на практике, на пример, в работе устройств по оптической обработке информации. Открытие обращения волнового фронта (ОВФ) дало толчок к созданию нового типа лазеров, а также возможности в связи с этим иметь мощные и узконаправленные пучки. Принципиальным шагом в этом направлении было использование ОВФ для компенсации искажений светового пучка после двукратного прохождения через неоднородную среду [3].

Недавно был предложен новый механизм записи: статическая голограмма записывается быстробегущей интерференционной картиной в переменном электрическом поле [4]. Экспериментально новый метод.

получивший название "метод синхронного детектирования", был осуществлен в кристалле ВТО. С точки зрения получения высоких дифракционных эффективностей целесообразно использовать кристаллы, имеющие большие электрооптические коэффициенты:  $Ba_{1-x}Sr_xNb_2O_6$ ,  $Ba_2NaNb_5O_{15}$ ,  $BaTiO_3$ . Запись голограмм с помощью нового метода именно в этих кристаллах представляет интерес еще по одной причине - механизм синхронного детектирования является единственным методом, посредством которого можно записать голограмму при приложении внешнего переменного электрического поля в кристаллах с малой дрейфовой длиной электронов в зоне проводимости.

В 1988 г. было обнаружено новое интересное явление - генерация пространственной субгармоники [5]. Последнее время в печати идет интенсивное обсуждение теоретического объяснения этого явления. Исследование генерации субгармоники может послужить толчком для создания нового вида мультиплексоров.

Для прикладных целей очень важно знать особенности поведения записанной решетки при взаимодействии пучков приблизительно равной интенсивности. В настоящее время наиболее употребительна теория, которая описывает поведение голограммы при малых контрастах воздействующей интерференционной картины [6]. На повестке дня стоит вопрос адекватного описания поведения записанной решетки в области больших контрастах интерференционной картины и более детальное экспериментальное описание этих процессов.

Целью настоящей работы является увеличение эффективности отклика ФРК на воздействие бегущей интерференционной картины (ИК), образованной двумя волнами с разностью частот  $\Omega$ , намного превышающей обратное время записи голограммы  $\tau_{sc}^{-1}$  ( $\Omega \gg \tau_{sc}^{-1}$ ) в сегнетоэлектрических кристаллах  $SBN$  и  $Ba_2NaNb_5O_{15}$ , а также исследование поведения записанной решетки поля пространственного заряда в зависимости от величины контраста  $m$  интерференционной

картины для различных механизмов записи голограммы, в том числе параметрическое возбуждение решетки пространственной частоты  $q/2$ , где  $q$  - волновой вектор интерференционной картины.

Научная новизна и практическая ценность работы состоит в том, что экспериментально продемонстрирована возможность записи голограммы при помощи МСД в новом классе ФРК (сегнетоэлектрических). Также предсказывается поведение амплитуды основной гармоники при умеренно больших контрастах ИК для различных механизмов записи, что существенно важно для прикладных целей. Объяснена генерация решетки пространственной субгармоники в постоянном электрическом поле, и предложен МСД для получения субгармоники в переменном электрическом поле.

Основные положения, выносимые на защиту:

- экспериментальное наблюдение усиления и расширения отклика ФРК на воздействие бегущей интерференционной картины с частотой, намного превышающей обратное время записи голограммы при приложении переменного электрического поля в сегнетоэлектрических кристаллах SBN и  $Ba_2NaNb_5O_{15}$ ;
- результаты теоретических расчетов и эксперименты, описывающие поведение фундаментальной гармоники поля пространственного заряда при умеренно больших контрастах записывающей ИК;
- обоснование параметрической генерации решетки пространственной субгармоники в ФРК с большой дрейфовой длиной электронов для различных механизмов записи.

Практическая ценность работы состоит в том, что расширен класс ФРК, в котором осуществлен МСД. Явление генерации субгармоники может быть применено для создания нового вида "оптического переключателя", использующегося в устройствах для оптической обработки информации. Исследование поведения решетки от величины

контраста может быть использовано на практике ( в интерферометрии вибрирующих об'ектов, создании новых видов "нейронных сетей"), где часто встречается взаимодействие волн приблизительно равной интенсивности.

#### Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на III (PRM'91, г. Беверли США) и IV (PRM'93, г. Киев Украина) Международной конференции по фоторефрактивным материалам, а также обсуждались на научных семинарах в Институте Электрофизики УрО РАН, Челябинском Техническом Университете, Томском Институте Автоматизированных Систем Управления и Радиоэлектроники.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Она содержит 33 рисунка, 2 таблицы и список цитируемой литературы из 97 наименований. Полный объем диссертации 157 страниц. Краткие выводы формулируются в конце каждой главы.

#### Содержание диссертации.

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

В первой главе содержится теоретический анализ уже известных механизмов голографической записи в фоторефрактивных кристаллах. Кроме того, в ней предполагается рассмотреть относительно новый механизм записи статической голограммы бегущей интерференционной картиной - механизм синхронного детектирования. Теоретический анализ выполнен на основе материальных уравнений, описывающих процесс пространственного разделения заряда в фоторефрактивном кристалле. Представлена графическая интерпретация

записи голограммы при различных механизмах.

Во второй главе изложены результаты оригинальных экспериментальных исследований 2- и 4-волнового невырожденного по частоте взаимодействия в сегнетоэлектрических кристаллах  $Ba_2NaNb_5O_{15}$  и SBN. Приведен обширный перечень параметров кристаллов, которые необходимы для исследования фоторефрактивных свойств этих кристаллов. Эксперименты выполнены для стандартной модификации метода синхронного детектирования (МСД): к кристаллу приложено синусоидальное напряжение и частота одного из пучков отстроена на частоту равную частоте приложенного поля. Измерения проводились для разных значений отношения входных интенсивностей: для малых величин, где работает линеаризованная теория, и больших. Стоит отметить, что эксперименты для кристалла SBN проводились на длине волны  $\lambda = 0,632$  мкм, а для  $Ba_2NaNb_5O_{15}$  -  $\lambda = 0,44$  мкм. Результаты измерений для кристалла SBN представлены на рис. 1. Величина приложенного поля не должна превышать 5 кВ/см, т.к. в противном случае произойдет размономоденизация кристалла. На рис. 2 представлены аналогичные результаты для кристалла  $Ba_2NaNb_5O_{15}$ . Экспериментальные результаты находятся в разумном согласии с предсказаниями линеаризованной теории [7]. Период записываемой решетки был выбран так, чтоб учесть влияние процесса самодифракции. Для используемых кристаллов диффузия является единственным механизмом, посредством которого могут записываться вторичные решетки. Поворотом оптической оси можно из-за наличия вторичной решетки либо уменьшить амплитуду общей решетки, либо ее увеличить. Влияние диффузии можно исключить увеличением пространственного периода, где этот процесс незначителен. При равном отношении входных интенсивностей вторичные решетки взаимно компенсируются. Также на рис. 3 представлена зависимость коэффициента отражения для четырехволнового взаимодействия и дифракционной эффективности от

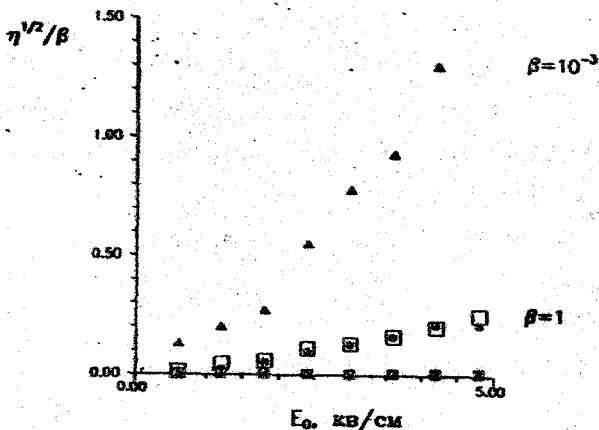


Рис.1. Зависимость дифракционной эффективности  $\eta$ , нормализованной на величину отношения интенсивностей сигнал-накачка  $\beta$  от амплитуды внешнего переменного поля  $E_0$  для кристалла SeB.  
 о - оптическая ось вправо и  
 п - оптическая ось влево для  $\beta=1$ ;  
 ^ - оптическая ось вправо и  
 ■ - оптическая ось влево для  $\beta=10^{-3}$ .  
 пространственный период  $\Lambda \sim 2 \mu\text{м}$ .

волнового вектора записанной решетки для кристалла  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ . В конце главы приведено более детальное качественное объяснение учета процесса самодифракции.

Третья глава посвящена теоретическому исследованию генерации пространственной субгармоники как в постоянном, так и в переменном внешне приложенном поле. Объяснение этого явления основывается на параметрической неустойчивости системы [8] и обусловлена возбуждением волны перезарядки ловушек (ВПЛ). Аналитическое описание абсолютной неустойчивости основывается на решении



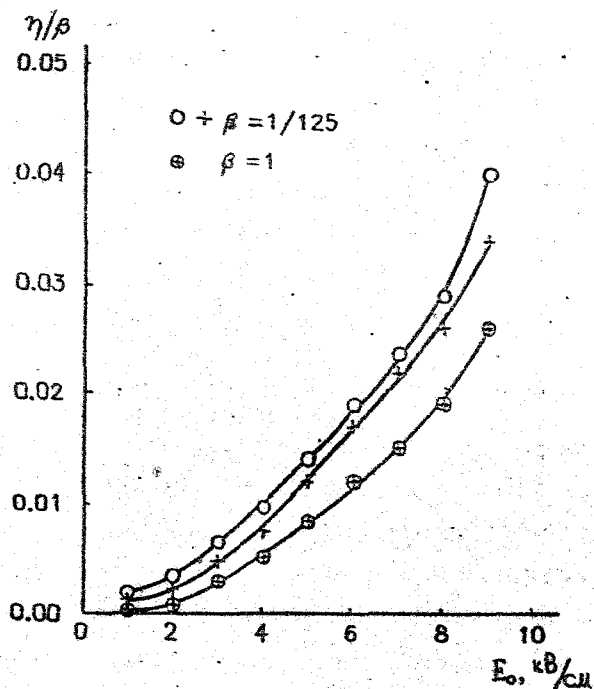


Рис. 2. Зависимость дифракционной эффективности  $\eta$ , нормализованной на величину отношения интенсивностей сигнал-накачка  $\beta$  от амплитуды внешнего переменного поля  $E_0$  для кристалла  $Ba_2NaNb_5O_{15}$ .  $\circ$  - оптическая ось вправо;  $+$  - оптическая ось влево; пространственный период  $\Lambda \sim 2$  мк.

материальных уравнений. В диссертации приведен обзор представлений, которые имеются на сегодняшний день. В трактовке этого явления еще нет полной ясности. Поэтому даже немногочисленные экспериментальные факты требуют дальнейшего теоретического объяснения.

На основе материальных уравнений в простейшем приближении находится область существования неустойчивости и, следовательно, и возможности генерации пространственной субгармоники  $q/2$  для двух

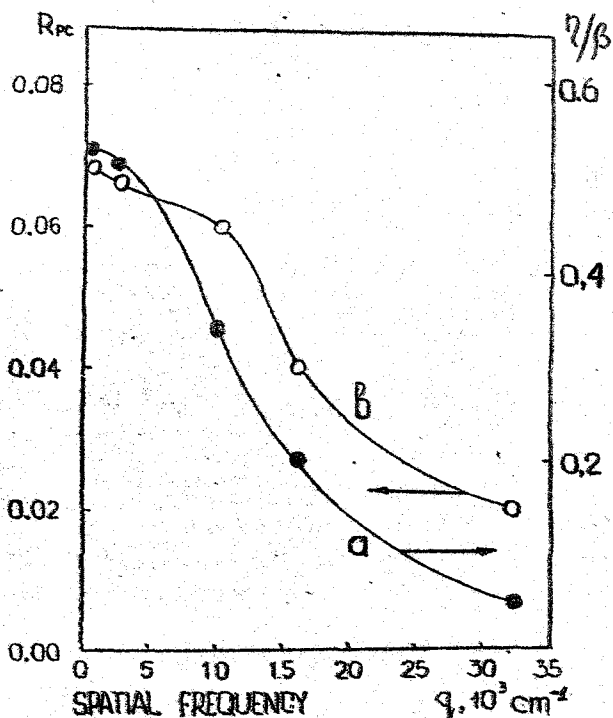


Рис.3. а - нормализованная дифракционная эффективность  $\eta/\beta$  в зависимости от пространственной частоты  $q$  для кристалла  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ ,  $E_0 = 9 \text{ кВ/см}$ ,  $\beta = 1/125$ ; в - коэффициент отражения ЧВС в зависимости от пространственной частоты  $q$  для кристалла  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ .  $E_0 = 8 \text{ кВ/см}$ ,  $I_1/I_2 = 1$ ,  $I_2/I_1 + I_3 = 1/250$ .

случаев записи: а) постоянное поле и движущаяся интерференционная картина; б) переменное поле и "прыгающая" дважды за период в момент изменения знака поля интерференционная картина.

После подробного анализа были найдены пороговые значения внешних параметров: амплитуды внешнего поля, концентрации электронов первой гармоники (или контраста записывавшей интерференционной картины).

Представлена область существования неустойчивости субгармоники  $q/2$  на плоскости  $(q; E_0)$  для обоих случаев. Таким образом, найдена область внешних параметров, в которой субгармоника существует. Оказывается, что жесткие ограничения должны быть наложены на кристаллические параметры. Это значит, что параметр  $\rho = eN_A \mu_R / \epsilon \epsilon_0$ , характеризующий кристалл, должен быть достаточно велик ( $\sim 25+35$ ), где  $N_A$  - концентрация акцепторов,  $\mu_R$  - произведения подвижности на время нахождения электрона в зоне проводимости,  $e$  - заряд электрона,  $\epsilon$  и  $\epsilon_0$  - восприимчивости кристалла и вакуума, соответственно.

Дальнейшей теоретической разработки требуют некоторые нюансы генерации субгармоники в переменном поле, в том числе и для записи по Степановскому механизму: зависимость появления субгармоники от частоты; расчет параметра  $\rho$ , для которого уже возможна генерация. Это напрямую связано с развитием теории фоторефрактивного эффекта в области больших контрастов записывающей интерференционной картины.

Четвертая глава посвящена описанию поведения решетки, записанной посредством различных механизмов, на основе теории возмущений по контрасту  $m$  интерференционной картины. В начале главы представлен общий обзор подходов к описанию процессов записи фоторефрактивной решетки. На сей день до сих пор, нет универсального подхода к этой проблеме при различных внешних параметрах. Поэтому в каждом конкретном случае целесообразней использовать численный счет для количественного соответствия с экспериментом.

В следующем параграфе на основе материальных уравнений выводится поправка по контрасту  $\propto m|m|^2$  к первой гармонике поля пространственного заряда для записи в постоянном поле. Получены также выражения для второй гармонике записанной решетки.

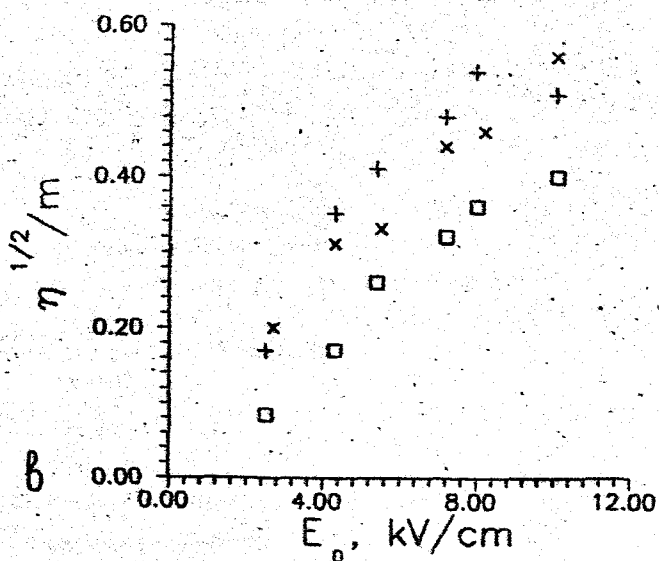
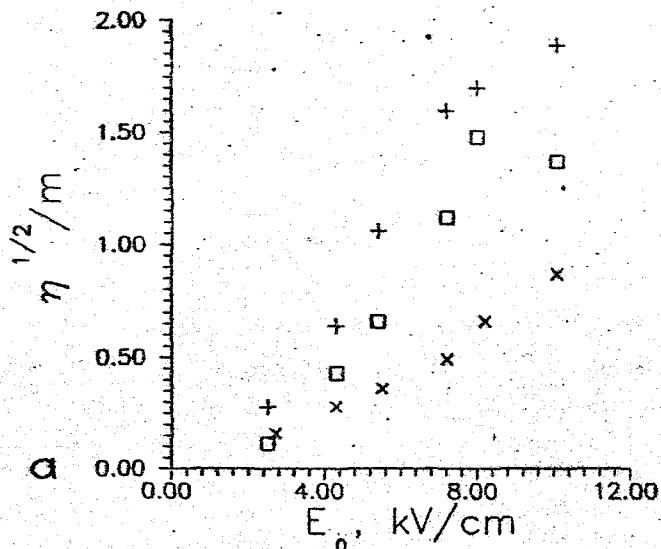


Рис. 4. Зависимость величины  $\sqrt{\eta/m} \sim E_{ac}/m$  от величины амплитуды внешнего поля  $E_0$  для для кристалла ВТО.

$\Lambda = 4.9$  мкм + - Степановский механизм; п - MSD; x - дрейфовый механизм; а)  $m = 0.26$ ; б)  $m = 1$ .

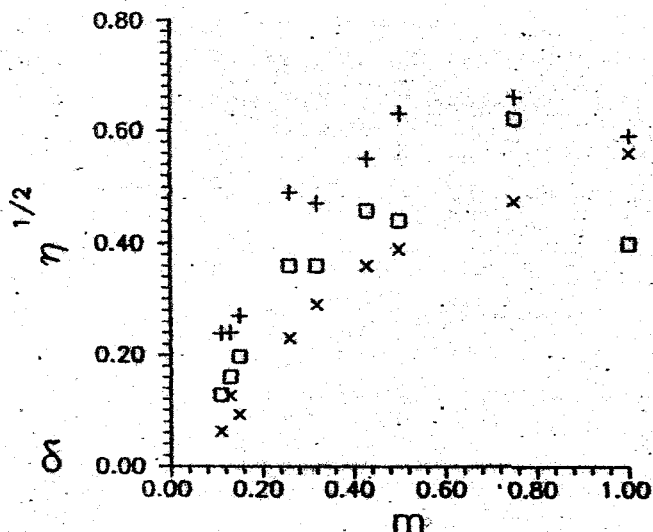


Рис. 5. Зависимость величины  $\sqrt{\eta} \sim E_{sc}$  от величины контраста  $m$  для кристалла ВТО.  
 $\Lambda = 4.9$  мкм;  $E_0 = 10.1$  кВ/см; + - Степановский механизм;  
 □ - MSD; x - дрейфовый механизм.

Существует не только качественное, но и количественное соответствие с полученными ранее результатами, правда, в узком диапазоне. Фундаментальная гармоника записанной решетки сильно насыщается в резонансных механизмах записи. Это значит - имея выигрыш при малых контрастах ИК по амплитуде основной гармоники, мы теряем его с увеличением  $m$ . Обратная картина имеет место при стационарных механизмах записи.

Далее с помощью известной процедуры [9] усреднения ищется поправка к основной гармонике при записи в переменном поле. Оказывается, что теория возмущений лишь качественно описывает это поведение. Но такая процедура дает возможность более ясно представить физическую картину процесса насыщения основной гармонике при увеличении контраста. Результаты показывают, что при записи методом синхронного детектирования в кристаллах с малой дрейфовой длиной образуется решетка почти идеальной синусоидальной формы.

На рис. 4 - 5 представлены экспериментальные результаты для записи в переменном поле для кристалла ВТО. В кристаллах с большой дрейфовой длиной электронов насыщение амплитуды основной гармонике может иметь место не только с ростом контраста  $m$  при фиксированном значении  $E_0$ , но и в обратной ситуации - при росте  $E_0$  (рис. 4. а., кривая МСД для фиксированного значения  $m$ , причем это насыщение обусловлено недостатком ловушек. Стоит заметить, что для кристаллов с большой дрейфовой длиной для  $|m| = 1$  максимальная величина основной гармонике записывается для дрейфового механизма.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1) Выполнена впервые запись голограммы в ФРК в переменном синусоидальном поле для сегнетоэлектрического кристалла SBN и  $Ba_2NaNb_5O_{15}$ , причем получены очень высокие значения дифракционной эффективности. Благодаря особенностям записи при помощи МСД удается свести к минимуму вредное влияние самодифракции;

2) Количественно описан процесс генерации пространственной субгармоники на основе ее параметрической неустойчивости, для записи голограммы в постоянном поле бегущей ИК;

3) Предложен МСД для обнаружения генерации субгармоники. Найдены пороговые значения для амплитуды внешнего поля  $E_0$  и контраста ИК  $m$ . Даны рекомендации по выбору кристаллов для наблюдения этого явления;

4) Теоретически обоснована и освоена на практике наиболее эффективная модификация МСД, где записывающая ИК не бежит с постоянной скоростью, а дважды за период изменяет свою фазу на  $\pi$  в момент изменения знака приложенного переменного поля типа "меандр".

5) На основе теории возмущений по контрасту  $m$  ИК исследовано поведение основной гармоники решетки поля пространственного заряда при приблизительно равных интенсивностях записывающих пучков для различных методик записи в постоянном поле и на диффузионном механизме. Результаты находятся в разумном согласии с выводами других теорий;

6) На основе теории возмущений качественно описано поведение основной гармоники поля решетки пространственного заряда, записанной в переменном поле. Результаты теории предполагают насыщение основной гармоники, что и подтверждает эксперимент для кристалла ВТО, имеющего большую дрейфовую длину электронов в зоне проводимости;

7) Показано, что МСД наиболее эффективен при записи голограмм для контраста  $m \sim 1$  в кристаллах с малой дрейфовой длиной (например, сегнетоэлектрики): нет практически насыщения основной гармоники поля пространственного заряда; профиль поля пространственного заряда мало отличается от синусоидального распределения.

Основные результаты диссертации изложены в следующих журнальных публикациях:

1А. Nestiorkin O.P., Shershakov Ye.P., Zel'dovich B.Ya.,

N. V. Bogodaev, Ivleva L. I., N. M. Polozkov,

"Phase-locked detection in running interference pattern in photorefractive SBN." -

in Technical Digest on Photorefractive Materials. Effects and

Devices (Optical Society of America, Washington DC 1991),  
v.14, p.392

- 2A. Нестеркин О.П., Зельдович Б.Я., Шершаков Е.П., Новиков А.В.  
"Усиление фоторефрактивного отклика во внешнем переменном  
поле в кристалле  $Ba_2NaNb_5O_{15}$ ." -  
Письма в ЖЭТФ, т.56, в.6, с.701, (1992)
- 3A. Nestiorkin O.P., Shershakov Ye.P., Zel'dovich B.Ya.,  
Novikov A.D.  
"Intensification of a Photorefractive Response by External  
AC Field in Ferroelectric crystal  $Ba_2NaNb_5O_{15}$ ."  
Optics Letters **18**, N 9, p. 684 (1993)
- 4A. Nestiorkin O.P., Shershakov Ye.P.  
"Parametric generation of a spatial subharmonic grating in  
PRC. Theory." -  
JOSA B **10**, N 10, p. 1907 (1993)
- 5A. Nestiorkin O.P., Shershakov Ye.P.  
"Nondegenerate spatial subharmonic grating generation in  
photorefractive crystals." -  
Opt. Comm. **96**, N 4-6, p.271 (1993)
- 6A. Зельдович Б.Я., Шершаков Е.П.  
"Фоторефрактивный отклик при большом контрасте  
интерференционной картины" -  
Квантовая электроника, т. 21, N 1, с.72 (1994)

#### Список цитируемой литературы

1. P.Gunter, J.-P.Huignard - "Eds. *Photorefractive materials and Their Applications I, II.*" - Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg (1988, 1989)
2. J.Feinberg, R.Hellwarth - Opt. Lett. **5**, p.519 (1980)



3. Б. Я. Зельдович, Н. Ф. Пилипецкий, В. В. Шкунов - "Обращение волнового фронта" - Наука, Москва (1985)
4. Б. Я. Зельдович, П. Н. Ильиных, О. П. Нестеркин \ \ Невырожденное двухволновое взаимодействие в фоторефрактивном кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  \ \ - Письма в ЖТФ **15**, с. 78 (1989)
5. S. Mallick, B. Imbert, H. Duccolet, J. P. Herrich and J.-P. Huighard \ \ Generation of spatial subharmonics by two-wave mixing in nonlinear photorefractive medium \ \ - J. Appl. Phys. **63**, 5660 (1988)
6. V. V. Kuchtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov, M. S. Soskin, V. L. Vinetski \ \ Holographic storage in electrooptic crystals. I steady state \ \ - Ferroelectrics **22**, p. 949 (1979)
7. Б. Я. Зельдович, П. Н. Ильиных, О. П. Нестеркин - ЖТФ **98**, с. 861 (1990)
8. B. Sturman, M. Mann, J. Otten and K. H. Ringhofer \ \ Space-charge waves in photorefractive crystals and their parametric excitation \ \ - JOSA B **10**, p. 1919 (1993)
9. S. I. Stepanov, M. P. Petrov \ \ Efficient unstationary holographic recording in photorefractive crystals under an external alternating electric field \ \ - Opt. Comm. **53**, p. 292 (1985)