

На правах рукописи

Вахдани Могаддам Мехран

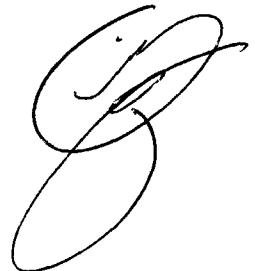
**Динамика формирования нелинейного отклика и
«обучение» самонакачивающихся ОВФ зеркал: петлевое и
двойное ОВФ зеркала на титанате бария**

Специальность 01.04.21 - лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2005

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and curves, located in the bottom right corner of the page.

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Владимир Владимирович Шувалов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Иосиф Геннадьевич Зубарев

доктор физико-математических наук, профессор
Александр Николаевич Пенин

Ведущая организация: Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова
РАН

Защита состоится « 16 » февраля 2006 года в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, Москва, ГСП-2, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, ул. Академика Хохлова, дом 1, КНО, аудитория им. С.А. Ахманова

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ

Автореферат разослан « 13 » января 2006 года

Ученый секретарь Диссертационного совета Д 501.001.31, доцент

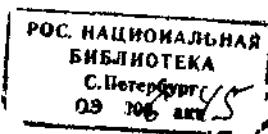

Ильинова М. И.

Актуальность темы работы обусловлена тем, что, несмотря на существование уже давно устоявшегося термина «динамическая голография», точно отражающего как физику явления обращения волнового фронта (ОВФ), так и основное достоинство нелинейно-оптических ОВФ зеркал (ОВФЗ) – их способность работать в нестационарных условиях, именно вопросы динамики формирования нелинейного отклика в ОВФЗ изучены пока явно недостаточно. И, в первую очередь, это относится к т.н. самокачивающимся ОВФЗ (СОВФЗ), реализованным на базе фоторефрактивных кристаллов (ФРК). Хотя система микроскопических материальных уравнений, описывающих эффект фоторефракции, была выписана уже почти 30 лет назад, ее решение до сих пор представляет собой весьма серьезную проблему. Обычно задачи типа рассмотренных в диссертации решаются либо на чисто феноменологическом уровне, либо используется целый ряд достаточно грубых приближений, которые к тому же практически всегда вводятся авторами не сразу, а последовательно, вследствие чего часто оказываются несовместимыми. В то же время в эксперименте нередко наблюдается весьма нетривиальная кинетика нелинейного отклика СОВФЗ, включая сложные автоколебательные (динамические) режимы генерации с характерными временами вплоть до нескольких часов и суток. Фактически, это лишь подтверждает тот факт, что развитие генерации в СОВФЗ является еще одним примером процесса самоорганизации, протекающего в системе «нелинейная среда - световое поле» и требующего адекватного теоретического описания.

Цель работы

Основными целями настоящей диссертационной работы являлось:

1. численное моделирование двумерной динамики формирования нелинейного отклика петлевого и однокристалльного двойного СОВФЗ на ФРК BaTiO_3 , с использованием стандартной системы микроскопических материальных уравнений, описывающих эффект фоторефракции;
2. выяснение возможных сценариев перехода к неустойчивым режимам генерации в двух перечисленных выше типах СОВФЗ, позволяющее оптимизировать как геометрию, так и условия реального эксперимента.



3 отработка и сравнительный анализ нескольких вариантов процедур предварительного «обучения» СОВФЗ вспомогательным оптическим полем, позволяющих существенно сократить время, необходимое для формирования обращенного выходного сигнала

Научная новизна

Научная новизна настоящей диссертационной работы обусловлена тем, что в ней впервые на примере СОВФЗ на ФРК ВаTiO₃, показано, что

1 за счет формирования динамических голограмм двух разных типов (двух каналов ОВФ) в однокристалльном двойном СОВФЗ реализуется новый (по отношению к петлевому СОВФЗ) сценарий перехода к динамическому хаосу, связанный с нарушением фазовых соотношений волн, генерируемых в разных каналах ОВФ;

2. за счет конкуренции (два канала ОВФ, локальная и нелокальная составляющие в нелинейном отклике ФРК) режим генерации однокристалльного двойного СОВФЗ и после окончания переходных процессов является квазистационарным. При этом параметры выходных полей достаточно нетривиальным образом (наличие синфазной и противофазной составляющих в зависимостях коэффициентов нелинейного отражения и интегралов перекрытия) флуктуируют от времени;

3. за счет предварительного «обучения» петлевого СОВФЗ световым полем, пространственная структура которого содержит вспомогательную информацию о некоторых свойствах входного сигнала, волновой фронт которого придется обрабатывать, время, необходимое для формирования обращенного выходного сигнала, впоследствии можно весьма существенно (в 6 - 20 раз) сократить;

4 эффективность динамических процедур обучения, основанных на усреднении по времени за счет инерционности нелинейного отклика ФРК и «перемешивающих» пространственные и временные гармоники спектра обучающего поля (перенос информации об ожидаемом пространственном периоде сигнального излучения на нулевую временную частоту), существенно выше, чем статических.

Практическая значимость

Практическая значимость диссертационной работы обусловлена тем, что

1. адекватный анализ сценариев перехода к динамическому хаосу в СОВФЗ позволяет оптимизировать выбор геометрии эксперимента и его условий для практической реализации

максимально высоких значений коэффициента нелинейного отражения и интеграла перекрытия;

2. предложенные и апробированные процедуры динамического обучения СОВФЗ позволяют весьма существенно (в 6-20 раз) ускорить переходной процесс при формировании обращенной сигнальной волны;

3. использованный в диссертационной работе подход может быть полезен и при решении задач распознавания образов, разработки оптических корреляторов и элементов ассоциативной памяти на базе СОВФЗ.

Защищаемые положения

Защищаемые автором настоящей диссертационной работы положения могут быть сформулированы следующим образом:

1. за счет формирования динамических голограмм двух типов (двух каналов ОВФ) в однокристалльном двойном СОВФЗ реализуется новый (по отношению к петлевому СОВФЗ) сценарий перехода к неустойчивым режимам генерации, связанный с нарушением фазовых соотношений между волнами, генерируемыми в разных каналах ОВФ;

2. благодаря предварительному «обучению» СОВФЗ на ФРК световым полем, пространственный спектр которого содержит априорную информацию о некоторых свойствах входного сигнала, волновой фронт которого впоследствии придется обращать, скорость переходных процессов в СОВФЗ может быть существенно увеличена. При этом эффективность динамических процедур, основанных на усреднении за счет инерционности нелинейного отклика ФРК и перемешивающих пространственные и временные гармоники спектра обучающего поля, существенно выше, чем статических.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. Полный объем работы 121 страница, включая 1 таблицу и 23 рисунка. Библиография содержит 139 наименований, в том числе 7 авторских публикаций.

Личный вклад

Все использованные в диссертации результаты получены автором лично, либо при его определяющем участии в постановке задач, разработке методик и алгоритмов расчета, написании программ, проведении численных расчетов и анализе полученных результатов.

Содержание работы

Во введении сформулированы цель работы, защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость результатов исследований. Кратко изложено содержание диссертационной работы по главам.

Первая глава диссертации носит обзорный характер и посвящена анализу основных результатов, полученных в последние годы при решении задачи компенсации динамических фазовых искажений волновых фронтов с использованием СОВФЗ, реализованных на базе ФРК. Формулируется ряд нерешенных на сегодняшний день проблем и проводится постановка задач диссертационной работы.

Вторая глава работы оригинальна и посвящена описанию результатов, полученных автором в ходе расчета динамики формирования нелинейного отклика петлевого и двойного СОВФЗ на ФРК титанат бария. Моделирование проведено с использованием классической системы микроскопических уравнений, описывающих явление фоторефракции с учетом «просветных» динамических голограмм (вектор решетки направлен вдоль оси x) в пренебрежении фотовольтаическим эффектом:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial N_d^+}{\partial t} - \frac{1}{e} \frac{\partial j}{\partial x}, \quad (1a)$$

$$\frac{\partial N_d^+}{\partial t} = s(I + I_0)(N_d - N_d^+) - \gamma_R n N_d^+, \quad (1б)$$

$$j = e\mu n(E_v + E_x) - \mu\Theta \frac{\partial n}{\partial x}, \quad (1в)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} = \frac{4\pi e}{\epsilon} (n + N_s - N_d^+). \quad (1г)$$

Здесь n , N_s , N_d и N_d^+ - концентрации свободных носителей, акцепторов, нейтральных и ионизированных доноров, s - сечение фотоионизации, $I(x, t)$ - интенсивность света; I_0 - описывает собственную проводимость ФРК, определяя скорость темновой фотоионизации как sI_0 ; γ_R - константа рекомбинации; e и μ - заряд и подвижность свободных носителей; $E_x(x, t)$ - внутрикристаллическое электростатическое поле; ϵ - квазистатическая диэлектрическая проницаемость; Θ - температура в энергетических единицах. Предполагается, что внешнее поле E_0 приложено к ФРК в поперечном направлении (вдоль оси x).

Система уравнений (1) решалась совместно с укороченными волновыми уравнениями для комплексных амплитуд двух световых волн $A_{r,b}(x,z,t)$, распространяющихся в положительном (индекс r) и отрицательном (индекс b) направлениях оси z,

$$\pm i \frac{\partial A_{r,b}}{\partial z} = \frac{1}{2k} \frac{\partial^2 A_{r,b}}{\partial x^2} + k \frac{\delta\eta}{\eta} A_{r,b} \mp i \alpha_s A_{r,b}. \quad (2)$$

Здесь $k=2\pi/\lambda$ - волновое число, η - показатель преломления ФРК; λ - длина волны; $\delta\eta = -r_{\text{eff}} \eta^3 E_{\text{sc}}(x,t)/2$ - нелинейная добавка к η ; r_{eff} - эффективный электрооптический коэффициент; α_s - коэффициент поглощения. Уравнения (1) и (2) формируют исходную самосогласованную задачу, которая и учитывает связь распределений интенсивности $I(x,z,t) = |A_r(x,z,t)|^2 + |A_b(x,z,t)|^2$ и статического поля $E_{\text{sc}}(x,t)$ внутри ФРК.

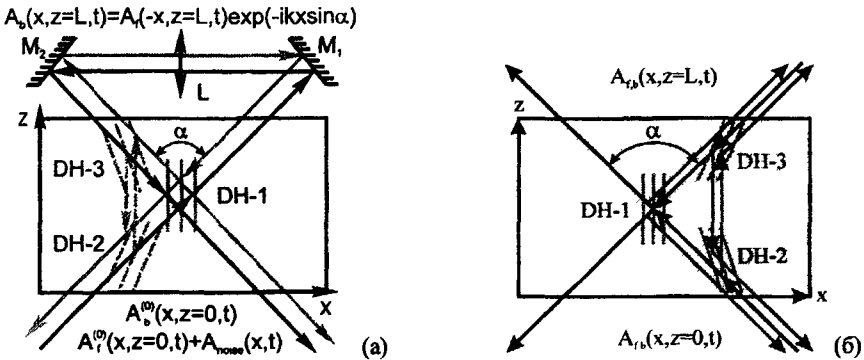


Рис.1. Геометрия взаимодействия прямой и обратной $A_{r,b}(x,z,t)$ волн в петлевом (а) и двойном (б) СОВФЗ: ДН - динамические голограммы первого (ДН-1, область самопересечения) и второго (ДН-2 и ДН-3) «каналов» генерации.

Геометрию двух рассмотренных в диссертации модельных задач иллюстрирует рис.1.

Считалось, что «прямая» волна с амплитудой A_r и волновым вектором $k = \{k_x, k_z\}$ распространяется от входной грани ФРК ($z=0$) под небольшим ($k_z \gg k_x$) углом $\alpha/2$ в положительном направлении оси z. При рассмотрении петлевого СОВФЗ (рис 1а) предполагалось, что за выходной гранью ФРК ($z=L$) установлена система из двух зеркал $M_{1,2}$ и линзы L , формирующая «обратную» (распространение в отрицательном направлении

оси z) волну с амплитудой A_s . В двойном СОВФЗ (рис.16) обратная волна подавалась на ФРК извне, а ее параметры считались такими же, как у прямой волны.

В ходе моделирования проводился численный расчет эволюции пространственных распределений комплексных амплитуд $A_{r,b}(x,z,t)$ и показателя преломления $\delta\eta(x,z,t)$. Все переменные описывались дискретно (число узлов сетки на апертуре ФРК $N=4$ мм – 8192, а по его длине $L=4$ мм - 512). Хотя при взаимодействии встречных световых волн в ФРК должны записываться как «отражательные», так и «просветные» динамические голограммы, учитывались только последние. Начальные условия во всех реализациях соответствовали «включению» СОВФЗ в момент времени $t=0$. После этого (при $t \geq 0$) входное поле $A_r(x,z=0,t)$ считалось заданным суперпозицией стационарного «полезного» сигнала $A_r^{(0)}(x,z=0)$ и комплексного δ -коррелированного (с учетом шага по времени Δt) по t «белого» шума $A_{\text{шум}}(x,z=0,t)$, средняя интенсивность $\langle I_{\text{шум}} \rangle$ которого варьировалась в пределах $\delta_s = 10^{-3} + 10^{-6}$ от максимальной интенсивности I_{max} полезного сигнала.

При расчете $A_{r,b}(x,z,t)$ распределение $\delta\eta(x,z,t)$ считалось заданным. За счет этого каждый шаг расчета формально делился на два этапа. Каждый i -ый шаг по времени (момент t_i) начинался с расчета мгновенных распределений $A_{r,b}(x,z,t_i)$ и $I(x,z,t_i)$ в ФРК с использованием $\delta\eta(x,z,t_{i-1})$, найденного на предыдущем шаге (момент t_{i-1}). Неоднородность распределения $\delta\eta(x,z,t_{i-1})$ учитывалась последовательным пропуском обоих световых волн через бесконечно тонкие фазовые экраны, фазовые набег в которых считались заданными $\delta\eta(x,z=z_j,t_{i-1})$ и шагом сетки по z . Здесь $j=1,2,..,512$ - номер экрана. Дифракционные эффекты принимались в расчет только при распространении световых волн между экранами. На этом этапе использовалась процедура быстрого преобразования Фурье (БПФ). Затем для найденного распределения $I(x,z,t_i)$ решалась система уравнений (1) и определялись распределения $E_{\pm}(x,z,t_i)$ и $\delta\eta(x,z,t_i)$, необходимые для перехода к следующему $(i+1)$ -му шагу (момент времени t_{i+1}). Шаг во времени выбирался значительно меньшим, чем характерное время эволюции состояния ФРК

(медленной подсистемы) $\Delta t = 0,1$ с, поскольку даже небольшие трансформации динамической голограммы резко меняли распределение выходного поля

Качество обращения в СОВФЗ описывалось коэффициентом нелинейного отражения

$$H(t) = \left| \int_0^{H/2} A_r(x, z=0, t) A_b^*(x, z=0, t) dx \right|^2 / \int_0^{H/2} |A_r(x, z=0, t)|^2 dx \int_0^{H/2} |A_b(x, z=0, t)|^2 dx \quad (3)$$

и интегралом перекрытия

$$R(t) = \int_0^{H/2} |A_b(x, z=0, t)|^2 dx / \int_0^{H/2} |A_r(x, z=0, t)|^2 dx. \quad (4)$$

Установлено, что в петлевом СОВФЗ обращение входной сигнальной волны реализуется за счет динамической голограммы, рождающейся в области самопересечения прямого и обратного пучков (рис 2), а переход к неустойчивым режимам (рис 3) связан с процессами самовоздействия. За счет них в ФРК и формируется сложная нерегулярная система тонких солитоноподобных нитей, в которой затем и возникает некое подобие динамического хаоса. Показано, что в оптимальных условиях коэффициент нелинейного отражения такого СОВФЗ достигает максимальных значений $R_{\max} = 0,8 - 0,9$ при величине интеграла перекрытия $H_{\max} = 0,9 - 0,95$.

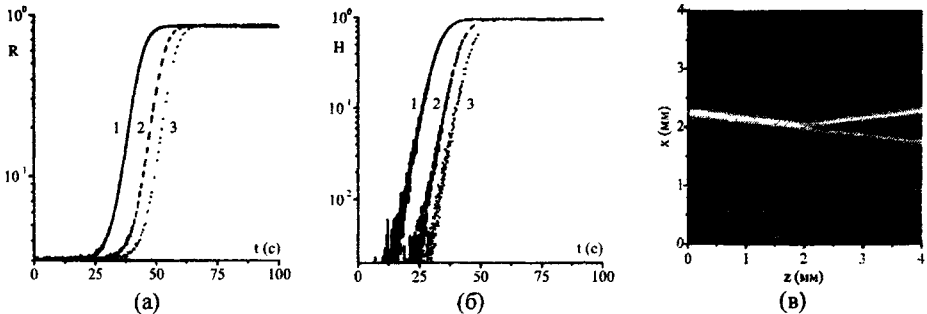


Рис.2 Стационарное ОВФ гауссова пучка в петлевом СОВФЗ: замедление переходных процессов с уменьшением α . Зависимости $R(t)$ (а) и $H(t)$ (б) при $I_{\max} = 35$ мВт/см²; $E_0 = 1$ В/см, $\langle I_N \rangle / I_{\max} = 10^{-3}$; $\alpha = 15^\circ$ (1), 14° (2) и 12° (3). Карта распределения $I_b(x, z)$ при $\alpha = 14^\circ$ в момент $t = 1000$ с.

Расчет для двойного СОВФЗ на том же кристалле показал, что в этой схеме развитие генерации происходит за счет последовательного формирования и фазировки динамических

голограмм двух типов (двух каналов ОВФ), формирующихся в области самопересечения входных пучков и в геометрии, известной для двухкристалльных двойных СОВФЗ (рис.4).

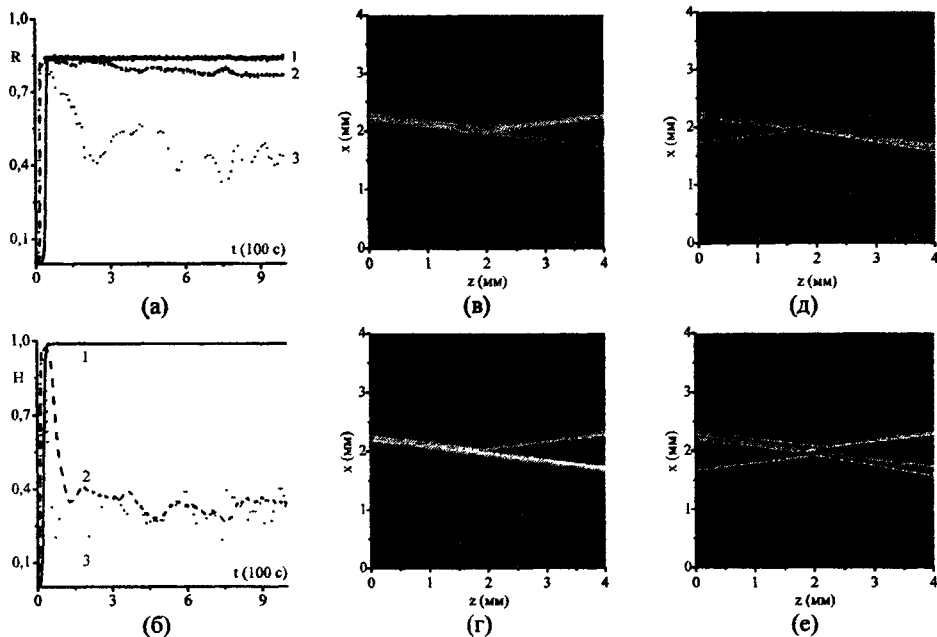


Рис.3. Характер зависимостей $R(t)$ и $H(t)$ (а,б) при $I_{\max} = 35$ (1), 70 (2) и 105 (3) мВт/см². Развитие неустойчивости в $I_b(x, z)$ при $I_{\max} = 150$ мВт/см²; моменты времени $t = 12$ (в), 25 (г), 65 (д) и 100 (е) с; $\alpha = 14^\circ$; $\langle I_N \rangle / I_{\max} = 10^{-4}$; $E_0 = 1$ В/см.

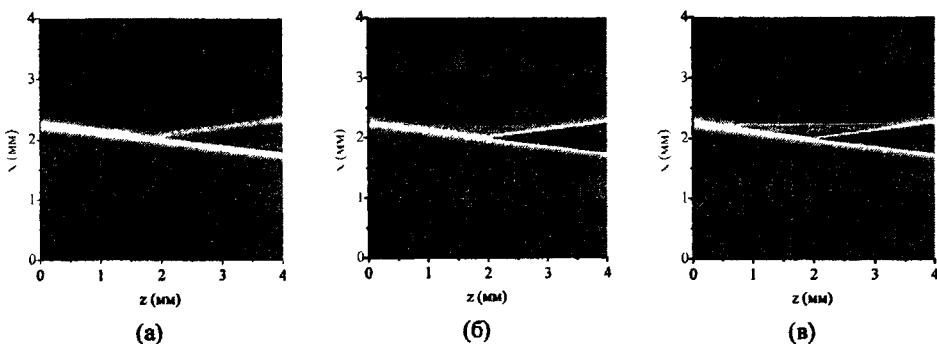


Рис.4. Развитие генерации в двойном СОВФЗ. Карты $I_r(x, z)$ в моменты $t = 41$ (а), 87 (б) и 1000 (в) с: $\alpha = 14^\circ$; $I_{\max} = 90$ мВт/см²; $\langle I_N \rangle / I_{\max} = 10^{-4}$; $E_0 = 1$ В/см.

Установлено, что в оптимальных условиях ($R_{\max} = 0,4-0,5$ при $H_{\max} = 0,5-0,7$) за счет конкуренции процессов нескольких типов (наличие двух каналов ОВФ, локальной и нелокальной составляющих у нелинейного отклика) даже после завершения переходных процессов режим генерации СОВФЗ лишь квазистационарен. При этом параметры выходных полей достаточно нетривиальным образом [наличие синфазной и противофазной составляющих в зависимостях $R(t)$ и $H(t)$] флуктуируют во времени. Показано, что в этом случае переход к хаосу может быть обусловлен процессами самовоздействия (рис 5). Однако за счет наличия динамических голограмм двух типов в двойных СОВФЗ реализуется и новый (по отношению к рассмотренному в начале главы петлевому СОВФЗ) сценарий развития неустойчивостей, связанный с нарушением фазовых соотношений волн, генерируемых в разных каналах ОВФ (рис 6)

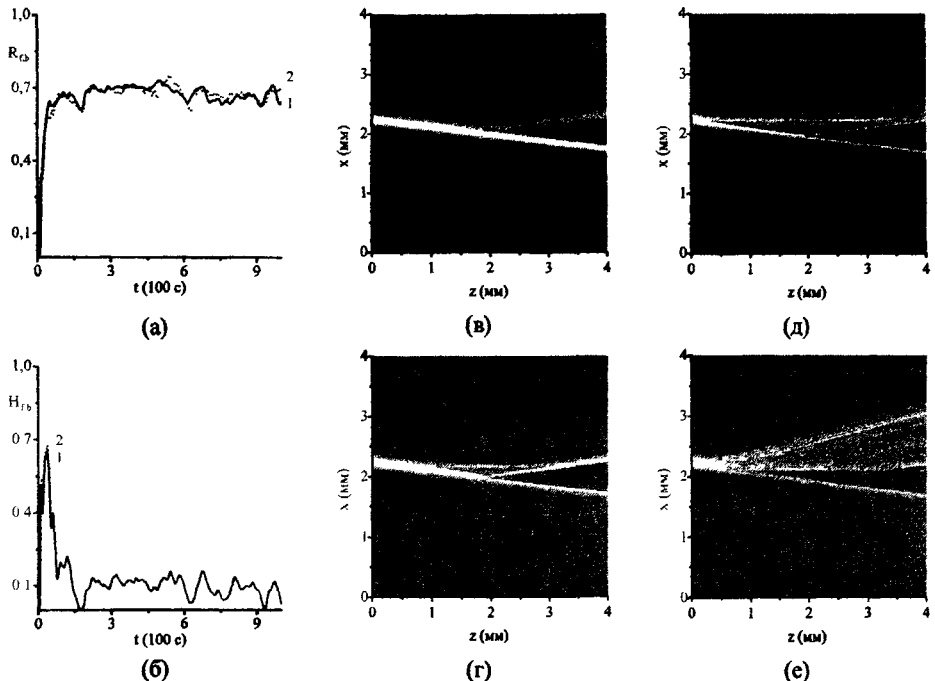


Рис.5. Развитие неустойчивости в двойном СОВФЗ. Зависимости $R_{fb}(t)$ и $H_{fb}(t)$ (кривые 1 и 2; а и б) и карты $I_r(x, z)$ (в-е): $\alpha = 14^\circ$; $I_{\max} = 140$ мВт/см²; $\langle I_N \rangle / I_{\max} = 10^{-4}$; $E_0 = 1$ В/см; моменты времени $t = 13$ (в), 35 (г), 64 (д) и 350 (е) с.

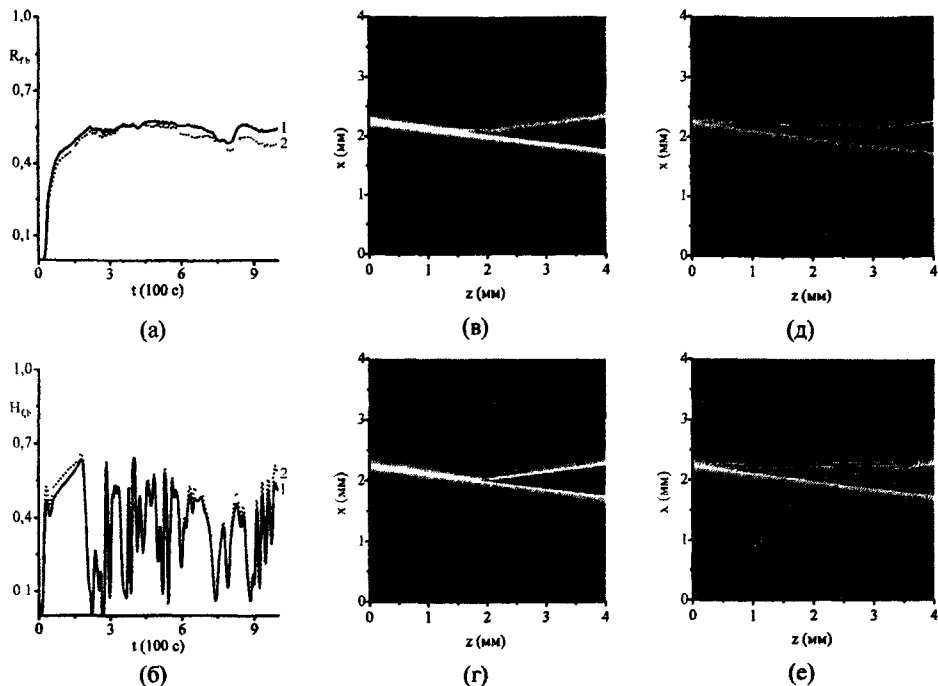


Рис.6. Развитие неустойчивости в двойном СОВФЗ. Зависимости $R_{r,b}(t)$ и $H_{i,b}(t)$ (кривые 1 и 2; а и б) и карты $I_r(x, z)$ (в-е): $\alpha = 14^\circ$; $I_{\max} = 90$ мВт/см²; $\langle I_N \rangle / I_{\max} = 10^{-4}$; $E_0 = 100$ В/см; моменты $t = 44$ (в), 100 (г), 163 (д) и 1000 (е) с.

Третья глава также оригинальна и посвящена описанию результатов моделирования нескольких вариантов статических и динамических процедур предварительного «обучения» петлевого СОВФЗ на ФРК титанат бария. При этом на этапе обучения в СОВФЗ подается вспомогательное («обучающее») поле, пространственная структура которого содержит определенную априорную информацию лишь о некоторых свойствах входного сигнала. волновой фронт которого впоследствии придется обрабатывать

В проведенном моделировании пространственное распределение амплитуды входного поля с длиной волны $\lambda = 0,514$ мкм на входе в ФРК определялось как

$$A_r^{(0)}(x, z = 0, t) = G(x)M(x, t), \quad (5)$$

где функции $G(x)$ и $M(x, t)$ описывали гауссову огибающую светового пучка (диаметр пучка по полю $2\rho_0 = 230$ мкм) и его пространственную (информационную) модуляцию.

Именно мгновенное изменение $M(x,t)$ в моменты времени $t=0$, отвечающие началу $M(x,t < 0) \equiv 0 \Rightarrow M(x,t \geq 0) \neq 0$ и окончанию $M(x,t < 0) \neq 0 \Rightarrow M(x,t \geq 0) \neq 0$ этапа обучения СОВФЗ (в использованной записи учтено, что в эти моменты отсчет времени начинался заново) и моделировало переходной процесс. Вид функции $M(x,t)$ в разных реализациях был разным.

В ходе проведенного моделирования показано, что за счет предварительного обучения петлевого СОВФЗ время, необходимое для формирования обращенного выходного сигнала, можно весьма существенно (в 6 - 20 раз, рисунки 7 и 8) сократить.

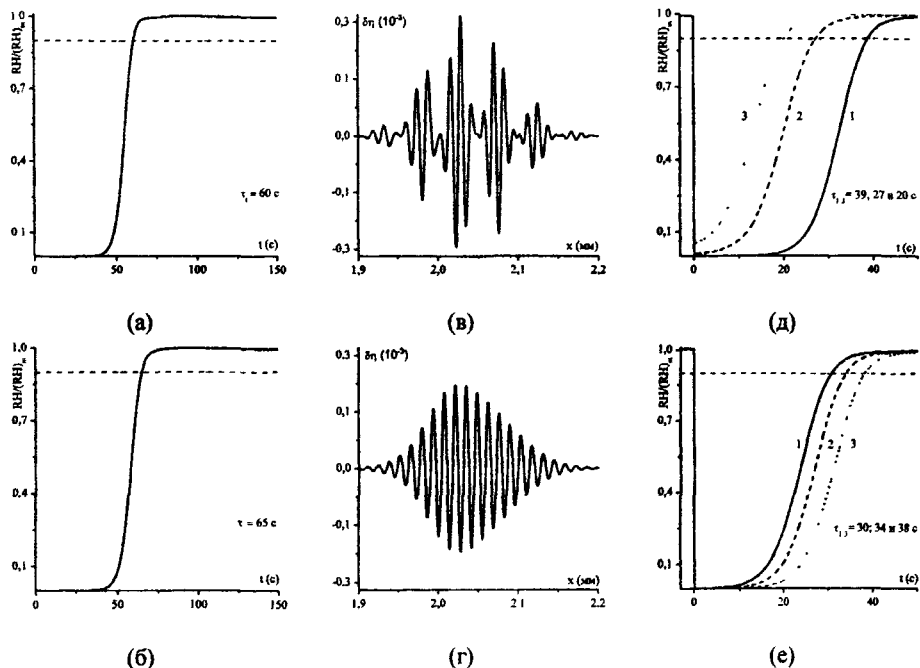


Рис 7. Обучение петлевого СОВФЗ модулированным ($I_{\text{max}} = 55$ мВт/см²; $\Lambda_m = 100$ мкм; а, в и д) пучком и пучком без модуляции ($I_{\text{max}} = 35$ мВт/см²; б, г и е). Эволюция RH на этапе обучения (а,б) и после старта (д,е). При старте (точка $t=0$; д и е) фаза $M(x)$ сдвигается на $\pi/2$ и меняется Λ_m [$\Lambda_m = 100$ (1), 90 (2) и 80 (3) мкм] Распределения $\delta\eta(x)$ (в,г) в сечении $z=L/2$ динамических голограмм, записанных при обучении.

Причем эффективность статических процедур (обучение СОВФЗ гауссовым пучком без и с пространственной модуляцией, рис.7) оказывается сравнительно невелика Показано, что

эффективность динамических процедур, основанных на усреднении по времени с использованием инерционности нелинейного отклика ФРК и «перемешивающих» пространственные и временные гармоники спектра обучающего поля (перенос информации об ожидаемом пространственном периоде сигнального излучения на нулевую временную частоту), оказывается существенно выше, чем статических.

Для построения общей схемы более эффективных процедур динамического обучения в работе использованы следующие соображения. Поскольку при обучении СОВФЗ в ФРК нужно записать информацию об ожидаемом значении Λ_m , на этом этапе в ФРК надо подавать излучение, модулированное именно на этой пространственной частоте. В то же время, поскольку информация о фазе φ модуляции $M(x)$ сигнала, который затем придется обращать, отсутствует, во время обучения запоминать ее значение нельзя. С учетом большой инерционности ФРК одновременно выполнить эти требования можно за счет быстрого изменения фазы функции $M(x)$ во времени, при котором φ за время обучения много раз пробегает все свои возможные значения.

В одном из двух рассмотренных в диссертационной работе вариантов динамического обучения СОВФЗ на его вход подавалось обучающее поле при $M(x, t) = \sin[2\pi(\kappa_m x + f_m t)]$. Частота модуляции f_m , характеризующей скорость линейного нарастания фазы φ во времени, выбиралась при этом настолько большой, что записываемые в ФРК решетки показателя преломления $\delta\eta(x, z)$ не успевали отслеживать изменение фазы. Полученный результат иллюстрирует рис.8. Как следует из рис.8а, этап обучения СОВФЗ ($\Lambda_m = 100$ мкм, фаза φ меняется на 2π за 2 с) оказывается при этом весьма длительным. Переходной процесс для R, H и RH продолжается почти 200 с и, что самое важное, даже после его окончания значения R, H и RH продолжают осциллировать во времени (см. врезку рис.8а). По сути, наблюдаются вынужденные колебания значений всех перечисленных параметров на частоте f_m изменения внешней «силы» $M(x, t)$. Отметим, правда, что амплитуда колебаний R оказывается при этом очень мала.

Поскольку быстро менять фазу φ информационной модуляции сигнала во времени можно разными способами, ясно, что описанная динамическая процедура не является

единственной. В качестве еще одного варианта, удовлетворяющего двум приведенным выше требованиям, в диссертационной работе рассмотрена ситуация с быстрыми осцилляциями ϕ . При этом на этапе обучения СОВФЗ закон модуляции амплитуды входного сигнала задавался в виде $M(x, t) = \sin\{2\pi[k_m x + \sin(f_m t)/2]\}$ при тех же значениях $f_m = 0,5$ Гц и $\Lambda_m = 100$ мкм. Результат моделирования также иллюстрируется на рис.8.

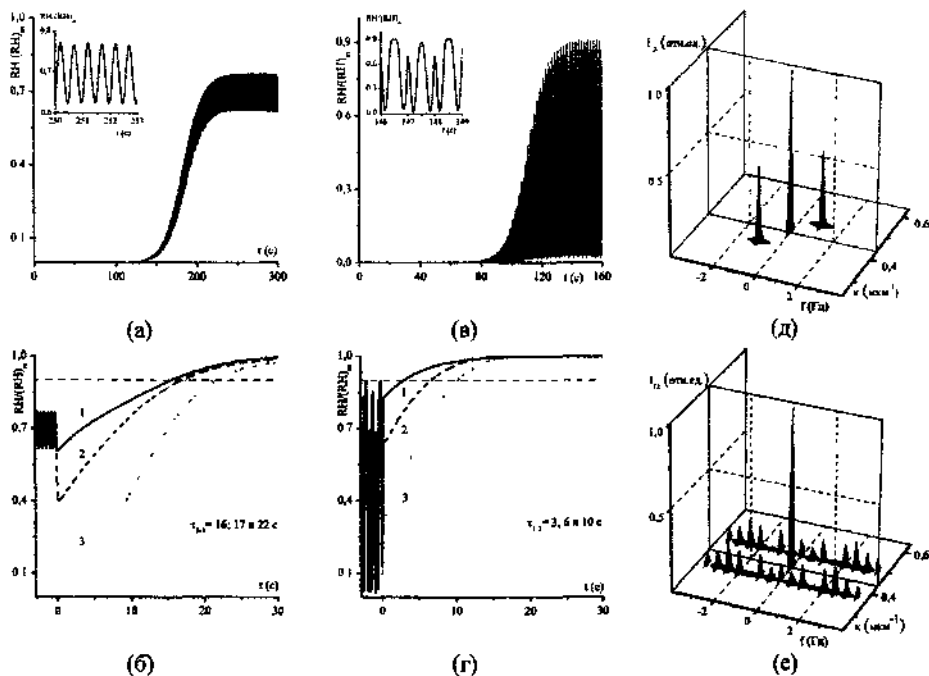


Рис.8. Обучение СОВФЗ пучком с линейно растущей ($\phi = \pi c^{-1}$; а,б и д) и осциллирующей (период колебаний 2 с; в,г и е) модулированной ($\Lambda_m = 100$ мкм) фазой. Эволюция RH при обучении (а,в) и после старта (момент $t = 0$; б и г). Врезки - установившиеся колебания RH. При старте сдвигается ϕ и меняется Λ_m ($\Lambda_m = 100, 90$ и 80 мкм для кривых 1, 2 и 3). Спектры интенсивности $I_{\gamma, k}(f, k)$ обучающего поля (д,е): точка $k = 0$ сдвинута на частоту, соответствующую углу схождения).

Легко убедиться (рис.8а), что в этом случае этап обучения СОВФЗ оказывается гораздо менее длительным. Переходной процесс для R, H и RH (рис 8а) продолжается теперь менее 120 с. Однако и здесь после его окончания значения R, H и RH продолжают быстро осциллировать во времени. Размах этих вынужденных колебаний оказывается еще большим,

а сами они (см. врезку на рис.8а) перестают быть гармоническими. Переходной процесс для RH после такого обучения для пучка, у которого в момент старта ($t = 0$) фаза ϕ модуляции $M(x, t)$ сдвигается на $\pi/4$ и одновременно меняется Λ_m ($\Lambda_m = 100, 90$ и 80 мкм для кривых 1, 2 и 3) показан на рис.8в. Видно, что теперь для достижения параметром RH величины в 90% от $(RH)_m$ нужно еще меньшее, чем раньше, время τ ($\tau_{1-3} = 3, 6$ и 10 с при $\Lambda_m = 100, 90$ и 80 мкм), а полученный за счет обучения СОВФЗ выигрыш в τ оказывается еще больше. Это является следствием эффективного «перемешивания» пространственных и временных гармоник спектра обучающего поля (перенос информации об ожидаемом пространственном периоде сигнального излучения на нулевую временную частоту, рис.8е) в рассмотренной ситуации.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе выполнения настоящей диссертационной работы.

1. С использованием стандартной системы микроскопических материальных уравнений, описывающих фоторефракцию в пренебрежении фотовольтаическим эффектом, проведен численный расчет двумерной динамики формирования нелинейного отклика петлевого самонакачивающегося ОВФ зеркала (СОВФЗ) на фоторефрактивном кристалле (ФРК) $BaTiO_3$. Показано, что:

- а) в петлевом СОВФЗ обращение реализуется за счет динамической голограммы, рождающейся в области самопересечения прямого и обратного пучков, а переход к неустойчивым режимам связан с формированием в ФРК сложной нерегулярной системы тонких солитоноподобных нитей (самовоздействие), в которой затем и возникает некое подобие динамического хаоса;
- б) в оптимальных (по энергетическим характеристикам и стабильности) условиях коэффициент нелинейного отражения петлевого СОВФЗ достигает максимальных значений $R_{\max} = 0,8 \div 0,9$ при величине интеграла перекрытия $H_{\max} = 0,9 \div 0,95$

2. Проведен аналогичный расчет динамики формирования обращенного нелинейного отклика однокристалльного двойного СОВФЗ на ФРК $BaTiO_3$. Установлено, что:

- а) развитие генерации в однокристалльном двойном СОВФЗ происходит за счет последовательного формирования и фазировки системы динамических голограмм двух типов

(двух каналов ОВФ), формирующихся в области самопересечения входных пучков и в геометрии, типичной для двухкристалльных двойных СОВФЗ;

б) в оптимальных условиях ($R_{\max} = 0,4 \div 0,5$ при $N_{\max} = 0,5 \div 0,7$) за счет конкуренции процессов нескольких типов (наличие двух каналов ОВФ, локальной и нелокальной составляющих у нелинейного отклика) после завершения переходных процессов режим генерации такого СОВФЗ является лишь квазистационарным. При этом параметры двух выходных полей достаточно нетривиальным образом [наличие синфазной и противофазной составляющих в зависимостях $R(t)$ и $N(t)$] флуктуируют во времени;

в) в однокристалльном двойном СОВФЗ за счет наличия динамических голограмм двух типов реализуется новый (по отношению к петлевому СОВФЗ) сценарий перехода к динамическому хаосу, связанный с нарушением фазовых соотношений волн, генерируемых в разных каналах ОВФ.

3 Описано и проведено численное моделирование нескольких вариантов статических и динамических процедур «обучения» петлевого СОВФЗ на ФРК BaTiO_3 . При этом на этапе обучения в СОВФЗ подается вспомогательное оптическое поле, пространственная структура которого содержит вспомогательную априорную информацию о некоторых свойствах входного сигнала, волновой фронт которого впоследствии придется обрабатывать. Показано, что:

а) за счет предварительного обучения СОВФЗ время, необходимое для формирования обращенного выходного сигнала, можно значительно (в 6 - 20 раз) сократить;

б) эффективность динамических процедур, основанных на усреднении по времени с использованием инерционности нелинейного отклика ФРК и «перемешивающих» пространственные и временные гармоники спектра обучающего поля (перенос информации об ожидаемом пространственном периоде сигнального излучения на нулевую временную частоту), оказывается существенно выше, чем статических

Апробация работы и публикации по теме диссертации

Основное содержание диссертационной работы доложено на 18 Международной конференции по когерентной и нелинейной оптике (ICONO 2005, Санкт Петербург, Россия,

11-15 мая 2005 г.) и 13 Международной конференции «Advanced Laser Technologies» (ALT 2005, Тянджин, Китай, 3-6 сентября 2005 г.) и опубликовано в 7 научных публикациях:

1. Mehran Vahdani Mogaddam, K V Rudenko, V V Shuvalov. *Phase-conjugation dynamics in self-pumping photorefractive loop mirrors*. ICONO 2005, Technical Digest, St Petersburg, Russia, May 11-15, 2005, IFM27.
2. Mehran Vahdani Mogaddam, K.V. Rudenko, V V Shuvalov *Dynamics of self-pumping photorefractive double phase-conjugate mirrors* 13th International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT 2005), Tianjin, China, September 3-6, 2005 Abstract Collection, p 59.
3. Мехран Вахдани Могаддам, В.В. Шувалов *Особенности динамики самонакачивающихся петлевых ОВФ зеркал на фоторефрактивном кристалле* Квантовая электроника, т.35, №7, сс.658-662, 2005.
4. Мехран Вахдани Могаддам, В.В. Шувалов *Динамика фоторефрактивного отклика и конкуренция нелинейных процессов в самонакачивающихся двойных ОВФ зеркалах* Квантовая электроника, т.35, №9, сс.862-866, 2005.
5. Мехран Вахдани Могаддам, В.В. Шувалов *Предварительное «обучение» самонакачивающихся петлевых ОВФ зеркал на фоторефрактивной нелинейности* Квантовая электроника, т.36, 2006 (принята в печать).
6. Mehran Vahdani Mogaddam, K.V Rudenko, V V Shuvalov. *Phase-conjugation dynamics in self-pumping photorefractive loop mirrors*. ICONO 2005, Proceedings SPIE, 2006 (принята в печать).
7. Mehran Vahdani Mogaddam, K V Rudenko, V.V Shuvalov. *Dynamics of self-pumping photorefractive double phase-conjugate mirrors* ALT 2005, Proceedings SPIE, 2006 (принята в печать).

Отпечатано в отделе оперативной
печати Геологического ф-та МГУ
Тираж 100 экз Заказ № 4

2006A

1110

- 1110