

На правах рукописи

Гарнаева Гузель Ильдаровна

ОПТИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПРИМЕСНЫХ  
КРИСТАЛЛАХ ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНИХ  
НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Специальность 01.04.05 - оптика

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Казань – 2009

Работа выполнена на кафедре общей и экспериментальной физики физического факультета Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Татарский государственный гуманитарно-педагогический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Нефедьев Леонид Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Сазонов Сергей Владимирович  
кандидат физико-математических наук  
Калачев Алексей Алексеевич

Ведущая организация: Ульяновский государственный университет

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании Диссертационного Совета Д 212.081.07 в Казанском государственном университете им. В.И. Ульянова-Ленина по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук

Д.И. Камалова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Изучение когерентных взаимодействий коротких лазерных импульсов с резонансными средами и разработка систем оптической обработки информации относятся к перспективным разделом физики. Оптические переходные процессы могут быть использованы при создании эхо-процессоров и оптической памяти большой ёмкости. Это связано с тем, что фотонное эхо может служить способом запоминания, преобразования и воспроизведения пространственно-временной структуры возбуждающих импульсов, что представляет интерес для разработки систем оптической памяти и оптической обработки информации. С этой точки зрения наиболее перспективным является долгоживущее фотонное эхо, наблюдаемое в кристаллах ван-флековских парамагнетиков, активированных редкоземельными ионами. Поскольку сама возможность долговременного хранения информации в таких кристаллах связана с процессами релаксации между сверхтонкими подуровнями основного электронного состояния редкоземельных ионов, весьма актуальным является исследование долгоживущего фотонного эха с учетом релаксационных процессов данного типа. Особый интерес представляет исследование многоимпульсных режимов долгоживущего фотонного эха, а именно, процессов аккумулялированной записи и многократного считывания информации.

Создание оптических запоминающих устройств и процессоров на основе фотонного эха требует разработки физических принципов функционирования, включающих методы стирания записанной информации. Существуют различные методы стирания информации, основанные на устранении пространственно-частотной модуляции населенности резонансных уровней путем воздействия на

систему определенной последовательностью оптических импульсов. Однако все предложенные схемы стирания информации довольно сложны для их осуществления. Кроме того, процесс стирания информации оказывается энергетически невыгодным, так как для его осуществления необходима энергия такого же порядка, что и для записи. С этой точки зрения более выгодным может оказаться не стирание, а «запирание» эхолографической информации, т.е. создание таких условий, при которых информация не может проявиться в виде оптического отклика резонансной среды.

Диссертационная работа посвящена теоретическому исследованию особенностей формирования откликов фотонного эха в примесных кристаллах в условиях приложения внешних неоднородных электромагнитных полей и разработке схем многоканальной записи информации на принципе «запирания» сигналов фотонного эха.

Ранее экспериментально исследовалось влияние градиентов электрических полей на поведение фотонного эха, однако теоретического обоснования полученных результатов не было дано. Поэтому тема диссертационной работы является **актуальной**, поскольку восполняет данный пробел.

### **Цель работы**

Цель работы состоит в теоретическом исследовании закономерностей формирования откликов фотонного эха в примесных кристаллах при воздействии внешних неоднородных электромагнитных полей и разработке схем многоканальной записи информации на основе «запирания» сигналов фотонного эха.

### **Научная новизна**

1. Показано, что при воздействии на резонансную среду пространственно-неоднородного электрического поля возникает обратимое разрушение фазовой памяти резонансной среды,

проявляющемся в изменении частотно-временной корреляции неоднородного уширения.

2. Обнаружена возможность управления эффективностью запираия информации в режиме стимулированного фотонного эха (СФЭ) путём варьирования величины градиента внешнего неоднородного электрического поля.

3. Рассмотрены формирование откликов долгоживущего фотонного эха (ДФЭ) и эффективность запираия информации при различных схемах воздействия на резонансную среду пространственно неоднородных электрических полей.

4. Исследованы формирование откликов ДФЭ и эффективность запираия информации при воздействии нерезонансного лазерного излучения.

5. Показано, что частотно-временная корреляция неоднородного уширения на различных временных интервалах зависит от изменений взаимной ориентации градиентов электрических полей, т.е. возможно обратимое разрушение фазовой памяти резонансной среды с дальнейшим её восстановлением.

6. Использование взаимной пространственной ориентации градиентов электрических полей в качестве ассоциативного ключа доступа к записанной информации позволяет создавать большое количество независимых каналов записи информации.

### **Практическая ценность**

Практическая значимость работы заключается в получении результатов, которые могут быть использованы для разработки эхо-процессоров, оптической памяти, ассоциативной и многоканальной записи информации.

Проведенные исследования помимо чисто научного интереса направлены на поиск новых способов увеличения плотности записи информации оптических запоминающих устройств на базе фотонного эха.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Уменьшение частотно-временной корреляции неоднородного уширения при воздействии внешних неоднородных электромагнитных полей приводит к эффекту запираия сигналов фотонного эха.
2. Запирание информации в отклике фотонного эха происходит при небольших углах взаимной ориентации внешних неоднородных электромагнитных полей.
3. Использование взаимной пространственной ориентации неоднородных электромагнитных полей в качестве ассоциативного ключа доступа к записанной информации приводит к большому количеству независимых каналов записи.
4. Воздействие двух электрических полей с противоположно направленными градиентами на разных временных интервалах после возбуждающего лазерного импульса приводит к возникновению одноимпульсного градиентного (штарковского) эха.

### **Достоверность**

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается применением хорошо зарекомендовавших себя современных точных и приближенных теоретических методов в сочетании с численным моделированием, основанным на использовании специализированного программного обеспечения. Ряд теоретических результатов хорошо согласуется с соответствующими экспериментальными данными.

### **Апробация основных результатов**

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих 8 международных конференциях: восьмой Международной молодежной научной школе «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» (г. Казань, 2004г.), III Международном оптическом конгрессе «Оптика – XXI век»,

конференции «Фундаментальные проблемы оптики - 2004» (г. Санкт-Петербург, 2004г.), III Международной конференции «Фундаментальные проблемы физики» (г. Казань, 2005г.), III Международном симпозиуме по фотонному эху и когерентной спектроскопии (ФЭКС – 2005) (г. Калининград (Светлогорск), 2005г.), IV Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика - 2005» (г. Санкт-Петербург, 2005г.), десятой Международной молодежной научной школе «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» (г. Казань, 2006г.), двенадцатой Международной молодежной научной школе «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» (г. Казань, 2008г.), V Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики» «ФПО - 2008» (г. Санкт-Петербург, 2008г.)

### **Публикации**

Основные результаты диссертации изложены в 16 печатных работах, в том числе 6 печатных работ опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Список публикаций приведен в разделе «список литературы».

### **Личный вклад автора**

Диссертант вместе с научным руководителем участвовал в постановке задач и обсуждении полученных результатов. Основные результаты расчетов получены лично диссертантом.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа изложена на 159 страницах текста, включая 44 рисунка и список литературы из 118 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, сформулированы ее цель, задачи и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит краткий обзор, в котором рассмотрены некоторые разновидности фотонного эха, представляющие наибольший практический интерес. Особое внимание уделено долгоживущему фотонному эху, а также формированию долгоживущего фотонного эха в кристалле  $LaF_3:Pr^{3+}$ .

Кроме того, в ней рассмотрены основы создания эхо-процессоров и оптической памяти. Рассматриваются процессы записи, хранения, кодирования, считывания информации в режиме долгоживущего фотонного эха, а также проблема стирания информации. Показано, что более выгодным оказывается не стирание, а «запирание» эхо-голографической информации.

Во второй главе развит математический формализм, пригодный для описания формирования переходных явлений при наличии внешних неоднородных электромагнитных полей. Получены выражения для матрицы плотности в двухуровневом приближении.

Исследована эффективность «запирания» информации и частотно-временной корреляции неоднородно уширенной линии при формировании стимулированного фотонного эха в двухуровневой среде при воздействии на нее неоднородного электрического поля и рассмотрена эффективность запирания стимулированного фотонного эха.

В работах [A1, A2, A3] был впервые рассмотрен процесс формирования откликов фотонного эха в зависимости от величины частотно-временной корреляции неоднородного



уширения на разных временных интервалах при воздействии внешних пространственно неоднородных электрических полей (рис. 1).

Частотно-временная корреляция неоднородно уширенной линии резонансного перехода связана с жёстким соответствием отдельных “монохромат” линии на различных временных интервалах. Каждая “монохромата” неоднородно уширенной линии образуется совокупностью атомов (молекул, ионов), находящихся в одинаковых условиях (например, локальные поля в твёрдом теле), но распределённых в объёме образца случайным образом.

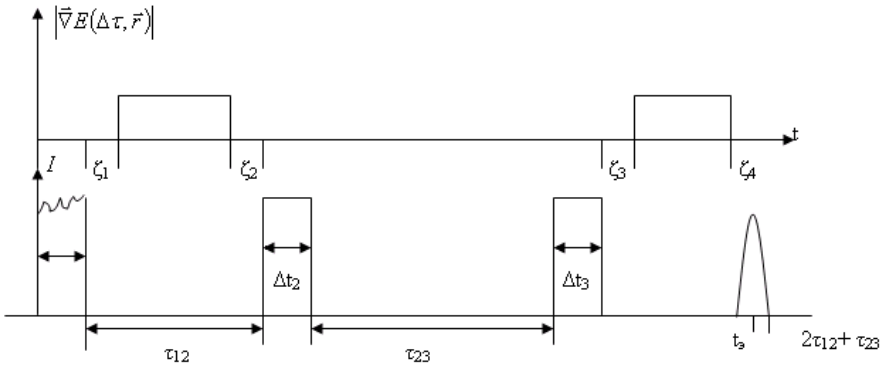


Рис. 1. Схема возбуждения СФЭ при наличии внешних неоднородных электрических полей

При воздействии неоднородного электрического поля каждый  $j$ -ый оптический центр, принадлежащий данной монохромате, получает дополнительный частотный сдвиг  $\varepsilon$  (штарк-эффект), зависящий от его пространственного местоположения в образце:

$$f_j(\tau_\eta, \Delta, \vec{r}_j) = \Delta + \varepsilon(\tau_\eta, \vec{r}_j),$$

$$\varepsilon(\Delta\tau_i, \vec{r}_j) = C_{III} (E_i + \vec{\nabla}E(\Delta\tau_i, \vec{r})\vec{r}_j),$$

где  $C_{III}$  - штарковский коэффициент,  $E_i$  - напряженность электрического поля при  $\vec{r}_j = 0$ .

В этом случае частотно-временной коэффициент корреляции неоднородного уширения имеет вид [A3]:

$$R(\Delta\tau_1, \Delta\tau_2) = \frac{1}{V} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_V \frac{(f(\Delta\tau_1, \Delta, \vec{r}) - \bar{z}(\Delta\tau_1))(f(\Delta\tau_2, \Delta, \vec{r}) - \bar{z}(\Delta\tau_2))}{\sigma(\Delta\tau_1)\sigma(\Delta\tau_2)} g_1(\vec{r})g(\Delta) d\vec{r}d\Delta,$$

где

$g_1(\vec{r})$ ,  $g(\Delta)$  - распределения оптических центров по координатам и частотам,

$$\bar{z}(\Delta\tau_i) = \frac{1}{V} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_V f(\Delta\tau_i, \Delta, \vec{r})g(\vec{r})g(\Delta) d\vec{r}d\Delta,$$

$$\sigma^2(\Delta\tau_i) = \frac{1}{V} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_V (f(\Delta\tau_i, \Delta, \vec{r}) - \bar{z}(\Delta\tau_i))^2 g_1(\vec{r})g(\Delta) d\vec{r}d\Delta.$$

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента частотно-временной корреляции неоднородного уширения от величины градиента внешнего электрического поля.

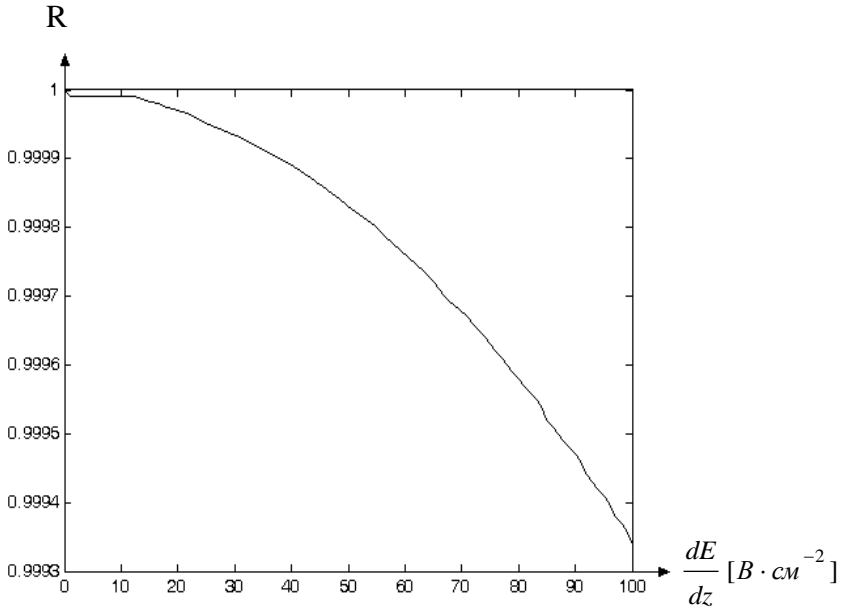


Рис. 2. Частотно-временная корреляция неоднородного уширения: зависимость коэффициента частотно-временной корреляции от величины градиента внешнего электрического поля на временном интервале  $\tau_{12}$  между первым и вторым возбуждающими лазерными импульсами ( $C_{III} = 100 \frac{\kappa \Gamma_{II}}{B \cdot cm^{-1}}$ )

Уравнение для одночастичной матрицы плотности во вращающейся системе координат имеет вид

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} [B_{\eta}, \tilde{\rho}],$$

где  $B_{\eta} = \tilde{H}_0 + \tilde{V}_{\eta} - \hbar A$ ,  $\tilde{H}_0 = e^{iAt} H_0 e^{-iAt}$ ,  $\tilde{V}_{\eta} = e^{iAt} V_{\eta} e^{-iAt}$ .

Здесь  $A$  - матрица перехода во вращающуюся систему координат,  $V_{\eta}$  - оператор взаимодействия с  $\eta$ -ым лазерным импульсом,  $H_0$  - гамильтониан оптического центра во внешнем неоднородном электрическом поле.

Эффективность "запираания" (воспроизведения) информации в отклике ДФЭ можно оценить из выражения:

$$I = E \cdot E^*,$$

где напряженность электрического поля отклика в волновой зоне определяется как

$$\vec{E}(\vec{R}, t) = \sum_j \frac{1}{c^2 |\vec{R} - \vec{r}_j|} \left[ \langle \vec{d}_j(t') \rangle \times \vec{n} \right] \times \vec{n},$$

где  $t' = t - \frac{|\vec{R} - \vec{r}_j|}{c}$ ,  $\langle \vec{d}(t) \rangle = Sp \{ \vec{d} \rho(t) \}$ ,  $\vec{r}_j$  - радиус-вектор

местоположения j-го оптического центра,  $\vec{n} = \frac{\vec{R}}{R}$ .

Напряжённость электрического поля отклика будет иметь вид [A7]:

$$E_{C\Phi\Delta} \sim \frac{1}{V} \int_{-\infty}^{+\infty} \int \left( \cos \frac{\theta_1}{2} + i \frac{f(\Delta\tau_1, \Delta, \vec{r})}{\theta'_1} \sin \frac{\theta_1}{2} \right) \frac{\hbar^{-1} d\varepsilon_0}{\theta'_1} \sin \frac{\theta_1}{2} \times \\ \exp \{ i [ (\bar{k} + \bar{k}_1 - \bar{k}_2 - \bar{k}_3) \vec{r} + (\tau_{12} - \zeta_1 - \zeta_2) f(\Delta\tau_1, \Delta, \vec{r}) + \Delta(\zeta_1 + \zeta_2) - \\ - (\tau_{12} + \zeta - \zeta_3 - \zeta_4) f(\Delta\tau_2, \Delta, \vec{r}) - \Delta(\zeta_3 + \zeta_4) ] \} g(\Delta) d\Delta d\vec{r},$$

где  $\theta_\eta = \theta'_\eta \Delta t_\eta$  - площадь  $\eta$ -го лазерного импульса,  $\zeta_i$  - временные интервалы между началом (концом) воздействия неоднородного внешнего возмущения и возбуждающего лазерного импульса.

На рис. 3 представлена эффективность запираания сигнала СФЭ при воздействии линейного градиента внешнего электрического поля на временном интервале между первым и вторым возбуждающими лазерными импульсами.

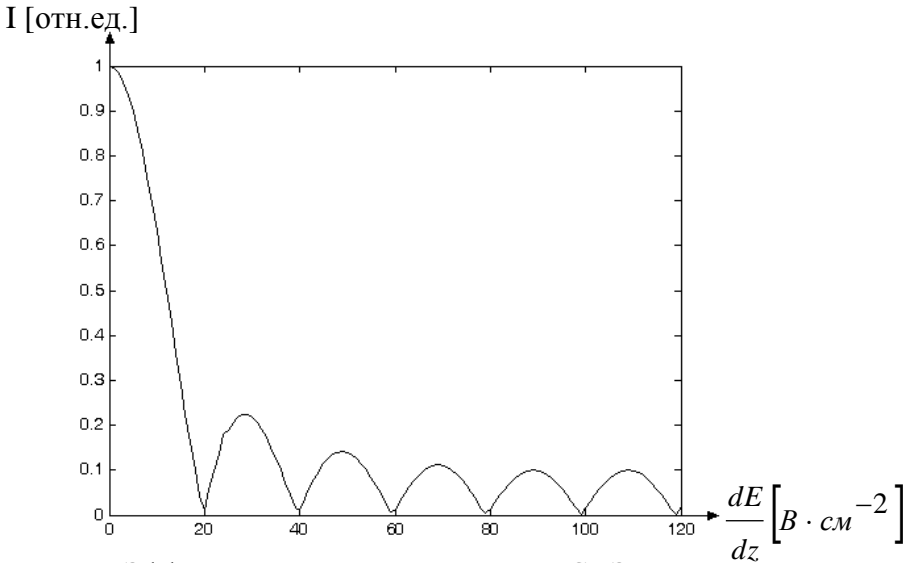


Рис. 3. Эффективность запираения сигнала СФЭ

Из сравнения рис. 2 и 3 следует, что эффективность запираения информации чрезвычайно чувствительна даже к незначительному изменению величины частотно-временной корреляции неоднородного уширения. Однако фазовая память системы может частично восстанавливаться при определённых значениях  $|\vec{\nabla}E|$ , что следует из характера зависимости интенсивности СФЭ от  $|\vec{\nabla}E|$  (рис. 3). Таким образом, наибольшая эффективность запираения информации может быть достигнута лишь при определённых значениях величины градиента  $|\vec{\nabla}E|$ .

Интерес представляет также эффект запираения информации при воздействии внешних нерезонансных электромагнитных полей [А7].

В третьей главе развита теория формирования стимулированного фотонного эха при наличии внешних неоднородных электромагнитных полей. Исследована зависимость частотно-временной корреляции неоднородного уширения и эффективность запираания информации от величины внешнего неоднородного электромагнитного поля при различных схемах возбуждения сигналов эха. Проведено сравнение эффективности запираания информации при воздействии на среду нерезонансных стоячих волн или бегущих волн с искусственно созданной пространственной неоднородностью.

Нерезонансные явления связаны с виртуальными переходами атомного электрона. Различие между виртуальными и реальными переходами определяется временем жизни  $\tau$  атома в промежуточном состоянии.

Чтобы не учитывать изменение волновой функции атома после воздействия нерезонансного возмущения, необходимо, чтобы время жизни промежуточных виртуальных состояний  $\tau$  было гораздо меньше рассматриваемых временных интервалов при формировании СФЭ, что и выполняется в оптической области частот.

Зависимость  $\varepsilon$  от местоположения оптического центра в образце связана с пространственной неоднородностью нерезонансного лазерного излучения. Такая неоднородность возникает, например, при воздействии стоячей волны. В этом случае [2, 3] изменение энергии уровня оптического центра

$$\delta E_n = \frac{1}{2\hbar} \sum_s \frac{\omega_{ns} |d_{ns}|^2}{\omega_{ns}^2 - \omega^2} E_{0\eta}^2 \cos(\vec{k}_\eta \vec{r}_j),$$

где

$\omega_{ns}$  - частоты переходов с уровня  $n$  на возмущающие уровни  $s$ ,  
 $|d_{ns}|$  - матричные элементы дипольного момента,

$\vec{k}_\eta$  - волновой вектор,

$E_{0\eta}$  - амплитуда напряженности электрического поля стоячей волны.

Полагая, что наибольшему сдвигу подвержен один из резонансных уровней, соответствующих неоднородно уширенной линии и  $\omega \ll \omega_{ns}$ , дополнительный частотный сдвиг будет иметь вид:

$$f_j(\tau_\eta, \Delta, \vec{r}_j) = \Delta + \varepsilon(\tau_\eta, \vec{r}_j), \quad (1)$$

где  $\varepsilon(\tau_\eta, \vec{r}_j) \approx C_{sh} E_{0\eta}^2 \cos^2(\vec{k}_\eta \vec{r}_j)$ .

Для этого случая эффективность запираения сигнала СФЭ представлена на рис. 4.

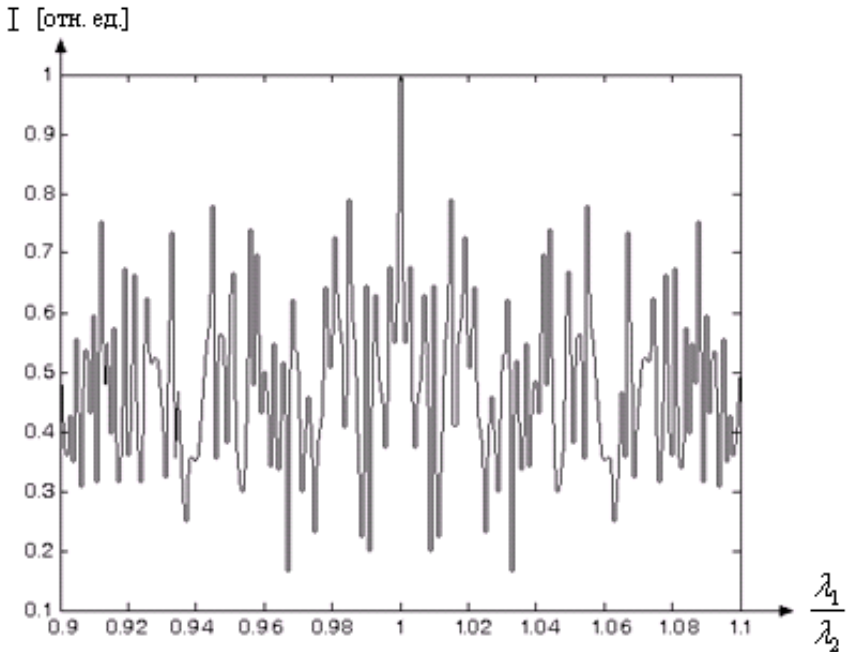


Рис. 4. Зависимость интенсивности СФЭ от соотношения частот резонансных стоячих волн

Из рис. 4 следует, что в случае воздействия на разных временных интервалах нерезонансных стоячих волн с разными частотами, эффективность записи информации оказывается зависящей от соотношения их частот, что может быть использовано при создании независимых каналов записи и воспроизведения информации.

Четвертая глава посвящена изучению угловых закономерностей записи информации при наличии линейных градиентов внешнего неоднородного электрического поля, а также управлению эффективностью записи сигналов при наличии ассоциативной оптической памяти и многоканальной записи информации (в зависимости от взаимной ориентации пространственно неоднородных электромагнитных полей). Аккумулированное эхо формируется путем подачи пар импульсов, в один из которых можно вводить информацию. Для извлечения определенной информации предложено между парами импульсов воздействовать неоднородным полем с определенным направлением градиента с последующим извлечением нужной информации путем наложения градиента поля между считывающим импульсом и самим откликом.

Показано существование угловой зависимости коэффициента частотно-временной корреляции и интенсивности отклика СФЭ при воздействии на резонансную среду на временных интервалах  $\Delta\tau_i$  и  $\Delta\tau_k$  двух неоднородных электрических полей с линейными градиентами  $(\vec{\nabla}E)_{\Delta\tau_i}$  и  $(\vec{\nabla}E)_{\Delta\tau_k}$ . Если связать систему координат  $(x, y, z)$  с первым градиентом, а  $(x', y', z')$  - со вторым градиентом

$$(\vec{\nabla}E)_{\Delta\tau_i} = b_{x_1}\vec{i} + b_{y_1}\vec{j} + b_{z_1}\vec{k}, \quad (\vec{\nabla}E)_{\Delta\tau_k} = b_{x'_2}\vec{i}' + b_{y'_2}\vec{j}' + b_{z'_2}\vec{k}',$$

где  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  - орты систем координат, то в системе  $(x, y, z)$  второй градиент будет иметь компоненты



$$\begin{pmatrix} b_{x_2} \\ b_{y_2} \\ b_{z_2} \end{pmatrix} = A(\alpha, \beta, \gamma) \begin{pmatrix} b_{x'_2} \\ b_{y'_2} \\ b_{z'_2} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $A(\alpha, \beta, \gamma)$  - матрица вращений,

$\alpha, \beta, \gamma$  - углы Эйлера взаимной ориентации градиентов ( $\beta = z \wedge z'$ ).

Для простоты выбираются направления градиентов вдоль осей  $z$  и  $z'$  соответственно.

Тогда в выражении (1)  $\varepsilon_{\Delta\tau}(z) = C_{ш} b_{z_m}$ ,

где  $C_{ш}$  – штарковский коэффициент.

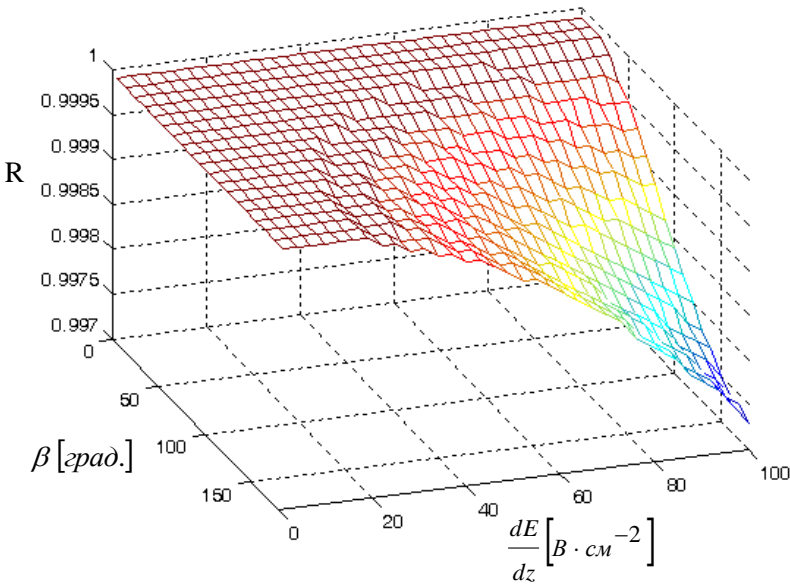


Рис. 5. Угловая зависимость коэффициента частотно-временной корреляции неоднородного уширения от величины линейного градиента внешнего неоднородного электрического поля [A4, A5]

На рис. 5 приведены результаты численного расчета коэффициента частотно-временной корреляции неоднородного

уширения при  $b_{z_1} = b_{z_2} = b_z$  (два одинаковых по величине градиента, но разные по направлению) и однородном распределении оптических центров по образцу  $g_1(\vec{r}) = const$ . Первоначальное распределение оптических центров по частотам  $g(\Delta)$  выбрано гауссовым с дисперсией  $\sigma^2$ .

Из рисунка следует, что под обратимым разрушением фазовой памяти резонансной среды следует понимать то, что при  $\vec{\nabla}E_{\Delta\tau_i} = \vec{\nabla}E_{\Delta\tau_k}$  ( $\beta \rightarrow 0$ ) коэффициент корреляции  $R_{\Delta\tau_i, \Delta\tau_k} \rightarrow 1$ . Т.е. несмотря на то, что каждое из возмущений на интервалах  $\Delta\tau_i$  и  $\Delta\tau_k$  создаёт случайные частотные сдвиги изохромат неоднородно уширенной линии, последовательное воздействие двух одинаковых пространственно-неоднородных возмущений приводит к восстановлению фазовой памяти резонансной среды на рассматриваемых временных интервалах.

Для записи информации в режиме аккумулярованного долгоживущего фотонного эха (АДФЭ) эффективность записи информации приведена на рисунке 6.

В этом случае анализ формирования АДФЭ показывает, что при  $b_z \geq 400B \cdot cm^{-2}$  происходит «записывание» информации от  $n$ -ого канала уже при углах между направлениями градиентов  $\vec{G}_n$  и  $\vec{G}$  менее  $30^\circ$ , причём с увеличением  $b_z$  это значение уменьшается. Таким образом, возможно создание более 30 независимых каналов записи и воспроизведения информации, ассоциативным ключом доступа к которым является значение угла между векторами  $\vec{G}_n$  и  $\vec{G}$ .

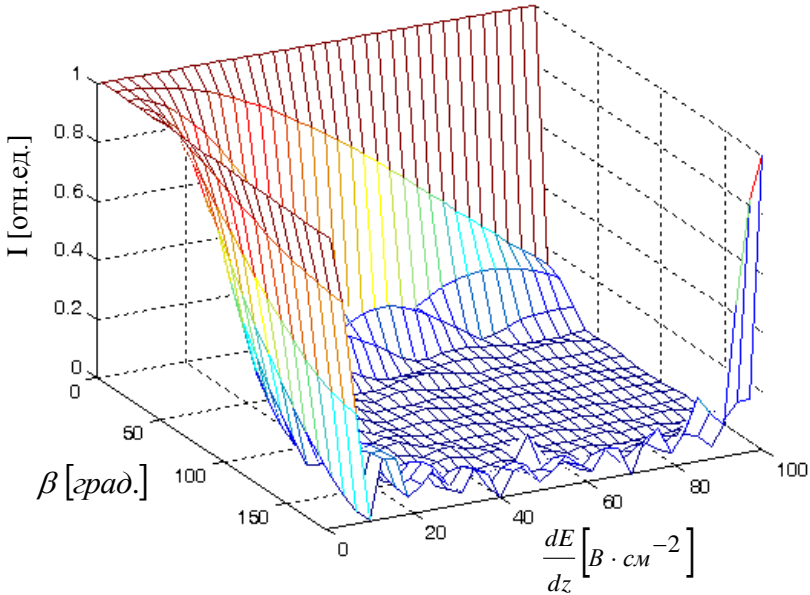


Рис. 6. Угловая зависимость интенсивности СФЭ от величины линейного градиента внешнего неоднородного электрического поля [А4, А5]

Отметим также, что число независимых каналов записи информации можно увеличить, используя поляризацию импульсов [4]. В этом случае ассоциативным ключом выбора информации будет поляризационно-угловой ключ и число независимых каналов превысит 60.

Возможно управление эффективностью запираения сигнала АДФЭ при наличии нерезонансных стоячих волн и бегущих волн с искусственно созданной пространственной неоднородностью.

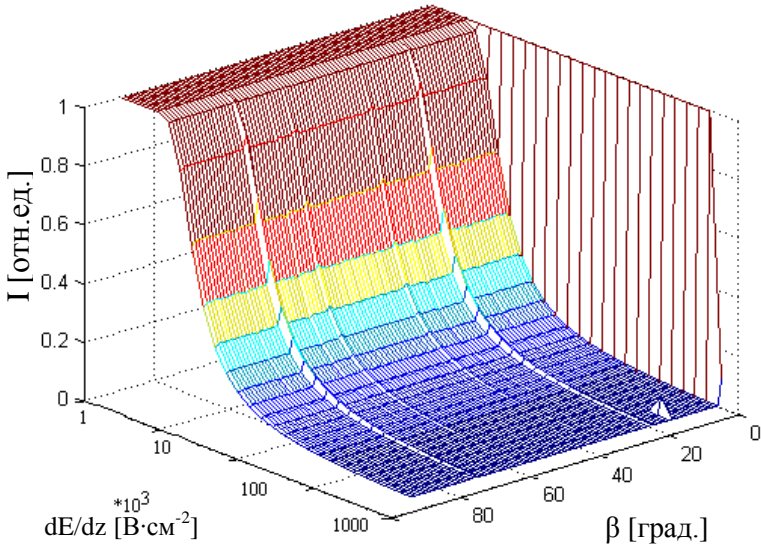


Рис. 7. Угловая зависимость интенсивности СФЭ от различных значений напряженности электрического поля стоячей волны [А8]

На рис. 7 приведены результаты численного расчета угловой зависимости эффективности «запирания» (воспроизведения) информации  $I_{\eta}(\beta)$  СФЭ от различных значений напряженности электрического поля стоячих волн.

Численный расчет дает угловую зависимость эффективности «запирания» (воспроизведения) информации  $I_{\eta}(\beta)$  из  $\eta$ -го информационного канала в отклике АДФЭ, приведённую на рис.8.

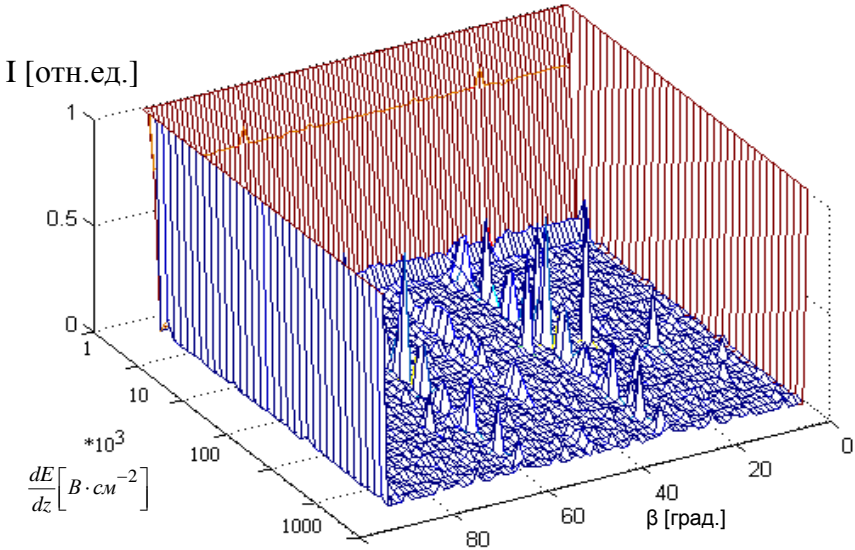


Рис. 8. Угловая зависимость интенсивности СФЭ от различных значений напряженности электрического поля бегущей волны с искусственно созданной пространственной неоднородностью [А9]

Анализ полученной угловой зависимости показывает, что происходит "запирание" информации от  $\eta$ -го канала в отклике АДФЭ уже при углах между пространственными ориентациями стоячих волн меньше  $1^0$ . Таким образом, можно создать большое число независимых каналов записи и воспроизведения информации, ассоциативным ключом доступа к которым является значение угла или между волновыми векторами (или между направлениями градиентов для бегущих волн).

Из развитой в [А11] теории следует, что возможно формирование отклика эха при одноимпульсном лазерном возбуждении и одновременном наложении соответствующих неоднородных электрических полей.

В случае когда после лазерного импульса на среду накладывается линейный градиент электрического поля и через

время  $\tau$  направление градиента меняется на  $180^\circ$  ( $\beta \rightarrow 180^\circ$  в выражении (2)), возможно формирование отклика типа эхо, который экспериментально наблюдался в работе [6] на переходе  ${}^7F_0 - {}^5D_0$  в кристалле  $\text{Eu:Y}_2\text{SiO}_5$ .

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

## Основные результаты и выводы

1. При воздействии на резонансную среду пространственно-неоднородного электрического поля возникает обратимое разрушение фазовой памяти резонансной среды, проявляющееся в изменении частотно-временной корреляции неоднородного уширения.
2. Доказано, что возможно управление эффективностью запирающей информации в режиме стимулированного фотонного эха путем варьирования градиента внешнего неоднородного электрического поля.
3. Показано, что преимуществом предложенной схемы записи информации и ее ассоциативной выборки является то, что в каждом канале информация записывается сразу на всех оптических центрах, что не уменьшает интенсивности отклика от каждого канала. Кроме того, в каждом канале может быть записана и эхо-голографическая информация, закодированная в волновых фронтах возбуждающих импульсов, что не влияет на независимость отдельных каналов записи информации.
4. Использование в качестве ассоциативного ключа доступа к записанной информации взаимной пространственной ориентации градиентов электрических полей, позволяет создавать большое количество независимых каналов записи информации.
5. Показано, что подбор временных интервалов между парами возбуждающих импульсов приводит к высокому соотношению сигнал / шум при ассоциативной выборке информации.
6. Исследована эффективность запирающей информации при изменении взаимной ориентации градиентов внешних электрических полей, а также бегущих и стоячих нерезонансных волн. Все это дает возможность разработки ассоциативной оптической памяти, где ассоциативным

ключом выборки информации является пространственная геометрия эксперимента.

7. Теоретически доказано, что в случае воздействия на разных временных интервалах нерезонансных стоячих волн с разными частотами эффективность записи информации оказывается зависящей от соотношения частот, что может быть использовано при создании независимых каналов записи и воспроизведения информации.
8. Обосновано формирование градиентного (штарковского) эха, которое возникает при одноимпульсном лазерном возбуждении наложением неоднородных полей с противоположно направленными градиентами.



## Список публикаций по теме диссертации

- A1. **Хакимзянова (Гарнаева) Г.И.** Эффект запираания фотонного эха при различной геометрии эксперимента / Г.И. Хакимзянова (Гарнаева), Л.А. Нефедьев // Сборник статей Восьмой Международной молодежной научной школы «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» / Казань: КГУ. -2004. -С.353-358.
- A2. **Хакимзянова (Гарнаева) Г.И.** Управление фазовой памятью в эхо-голографии / Г.И. Хакимзянова (Гарнаева), Л.А. Нефедьев // Сборник тезисов III Международного оптического конгресса «Оптика – XXI век», конференции «Фундаментальные проблемы оптики - 2004» / Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО. -2004. -С.20-21.
- A3. **Нефедьев Л.А.** Корреляция неоднородного уширения и эффективность запираания информации в оптических эхо-процессорах / Л.А. Нефедьев, Г.И. Хакимзянова (Гарнаева) // Оптика и спектроскопия. -2005. -Т.98. № 1. - С.41-45.
- A4. **Хакимзянова (Гарнаева) Г.И.** Угловые закономерности эффекта запираания фотонного эха / Г.И. Хакимзянова (Гарнаева), Л.А. Нефедьев // Сборник тезисов III Международной конференции «Фундаментальные проблемы физики» / Казань: КГУ. -2005. -С.172-173.
- A5. **Хакимзянова (Гарнаева) Г.И.** Пространственные закономерности в эффекте «запираания» сигналов фотонного эха / Г.И. Хакимзянова (Гарнаева), Л.А. Нефедьев // Сборник тезисов III Международного симпозиума по фотонному эху и когерентной спектроскопии (ФЭКС – 2005) / Калининград (Светлогорск): -2005. -С.2.
- A6. **Хакимзянова (Гарнаева) Г.И.** Ассоциативная оптическая память на основе эффекта «запираания» сигналов фотонного эха / Г.И. Хакимзянова (Гарнаева), Л.А.

Нефедьев // Сборник тезисов IV Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика - 2005» / Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО. -2005. -С.18-19.

- A7. **Нефедьев Л.А.** Пространственные закономерности в эффекте «запирания» сигналов фотонного эха и ассоциативная оптическая память / Л.А. Нефедьев, Г.И. Хакимзянова (Гарнаева) // Оптика и спектроскопия. - 2006. -Т.101. № 4. -С.637-641.
- A8. **Хакимзянова (Гарнаева) Г.И.** Многоканальная запись информации при использовании эффекта «запирания» сигналов фотонного эха / Г.И. Хакимзянова (Гарнаева), Л.А. Нефедьев // Сборник статей десятой Международной молодежной научной школы «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» / Казань: КГУ. -2006. -С.103-106.
- A9. **Гарнаева (Хакимзянова) Г.И.** Эффект «запирания» сигналов фотонного эха нерезонансными стоячими волнами с разными частотами / Г.И. Гарнаева (Хакимзянова), Л.А. Нефедьев // Сборник статей двенадцатой Международной молодежной научной школы «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» / Казань: КГУ. -2008.
- A10. **Гарнаева (Хакимзянова) Г.И.** Эффект «запирания» информации лазерными нерезонансными импульсами в оптической эхо-голографии / Г.И. Гарнаева (Хакимзянова), Л.А. Нефедьев // Сборник тезисов V Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» «ФПО - 2008» / Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО. -2008.
- A11. **Нефедьев Л.А.** Эффект «запирания» сигналов фотонного эха при многоканальной записи информации / Л.А. Нефедьев, Г.И. Гарнаева (Хакимзянова) // Оптика и спектроскопия. -2008. -Т.105. № 6. -С.1007-1012.

- A12. **Гарнаева (Хакимзянова) Г.И.** Структурные исследования успеваемости студентов физического факультета ТГГПУ / Г.И. Гарнаева (Хакимзянова), Л.А. Нефедьев, Е.А. Кузнецов // Вестник ТГГПУ / Казань: ТГГПУ. -2008. №4 (15). –С.45-48.
- A13. **Гарнаева (Хакимзянова) Г.И.** Многоканальная запись информации при эффекте «запираия» сигнал фотонного эха / Г.И. Гарнаева (Хакимзянова), Л.А. Нефедьев, Л.И. Хасанова // Вестник ТГГПУ / Казань: ТГГПУ. -2008. №4 (15). –С.21-24.
- A14. **Гарнаева Г.И.** Эффект «запираия» информации в оптических запоминающих устройствах на основе фотонного эха / Г.И. Гарнаева, Л.А. Нефедьев // Вестник ЧелГУ. -2009. Выпуск 6 (физика). № 25 (163). -С.13-22.
- A15. **Гарнаева Г.И.** Эффективность «запираия» информации в зависимости от взаимной ориентации пространственно неоднородных электромагнитных полей / Г.И. Гарнаева, Л.А. Нефедьев // Вестник ЧелГУ. -2009. Выпуск 5 (физика). № 24 (162). -С.40-49.
- A16. **Гарнаева (Хакимзянова) Г.И.** Многоканальная запись информации на основе эффекта «запираия» сигналов фотонного эха / Г.И. Гарнаева (Хакимзянова), Л.А. Нефедьев, Р.Г. Усманов // Оптический журнал. -2009.

### Список цитируемой литературы

1. **Нефедьев Л.А.** Цветная эхо-голография в многоуровневых системах / Л.А. Нефедьев, В.В. Самарцев // ЖПС. -1987. - Т.47. №4. -С.701-703.
2. **Делоне Н.Б.** Атом в сильном поле / Н.Б. Делоне, В.П. Крайнов. Москва. -1978. -С.286.
3. **Schenzle A.** Cumulative two-pulse photon echo. / A. Schenzle, N.C. Wong, R.G. Brewer // Phys. Rev. A. -1984. -V.30. №4. - P.1866-1872.
4. **Zuikov V.A.** Polarization properties of multichannel and accumulated long-lived photon echo / V.A. Zuikov, I.S. Bikbov, L.A. Nefediev, V.V. Samartsev // Laser Physics. -1992. -V.2. - P.747-751
5. **Babbitt W.R.** Time-domain frequency-selective optical data storage in a solid-state material / W.R. Babbitt, T.W. Mossberg // Optics Communications. -1988. -V.65. -P.185-188.
6. **Alexander A.L.** Photon echoes produced by switching electric fields / A.L. Alexander, J.J. Longdell, M.J. Sellars and N.B. Manson // arXiv: quant-ph/0506232. 25 Nov 2005. -V.5. -P.1-5.