

УДК 535.2

МНОГОКАНАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В ОПТИЧЕСКИХ ЭХО-ПРОЦЕССОРАХ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ ВАН-ФЛЕКОВСКИХ ПАРАМАГНЕТИКОВ

© 2012 г. В. А. Зуйков¹, А. А. Калачёв^{1,2}, К. Р. Каримуллин^{1,3}, Т. Г. Митрофанова¹, В. В. Самарцев^{1,2}, А. Д. Тиранов^{1,2}, А. М. Шегеда¹

E-mail: samartsev@kfti.knc.ru

Выполнен анализ различных режимов многоканальной записи и считывания информации в режиме стимулированного (аккумулированного и долгоживущего) фотонного эха в кристаллах, допированных редкоземельными ионами, — ван-флековских парамагнетиках, с целью их использования в работе низкотемпературных оптических эхо-процессоров.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективное развитие информационных технологий связано с переходом от электронных к полностью оптическим методам обработки информации. В настоящее время ведутся интенсивные разработки высокоскоростных сетей оптической связи с большой временной и частотной плотностью передаваемых данных. В связи с этим возникает потребность в разработке новых типов многоканальных систем, способных осуществлять параллельную обработку больших объемов данных. Фотонное эхо (ФЭ) широко используют в оптической спектроскопии, а также в работе оптических запоминающих устройств и процессоров [1]. Интерес к разработке подобных приборов на основе когерентных переходных и кооперативных оптических явлений связан прежде всего с широкими возможностями для обработки информации. Оптические эхо-процессоры обладают быстродействием свыше 10 Гбит/с [2]. Кроме того, их функционирование носит когерентный характер, что позволяет запоминать, восстанавливать и преобразовывать не только амплитудные, но и фазовые характеристики сигналов. И наконец, в режиме ФЭ и сверхизлучения можно управлять квантовыми состояниями света, что необходимо для создания повторителей, используемых в протяженных квантовых системах связи и криптографических сетях [3]. В настоящей работе рассмотрены различные способы разделения каналов при многоимпульсной обработке информации, включая методы управления генерацией когерентных откликов при помощи внешних

электромагнитных полей, предназначенные для использования в работе оптических эхо-процессоров. В качестве носителей информации в подобных устройствах используются ван-флековские парамагнетики [4].

СПОСОБЫ РАЗДЕЛЕНИЯ КАНАЛОВ ПРИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Пространственное разделение каналов

В общем случае под многоканальным возбуждением ФЭ подразумевается ситуация, когда на одну и ту же область резонансной среды в произвольные моменты времени под произвольными углами действует несколько пар записывающих импульсов. Считывание (в режиме обращенного ФЭ) проводится импульсами, приложенными в направлении, противоположном направлению второго записывающего импульса в каждой паре одновременно, либо в произвольный момент времени. При этом возможно множество вариантов, различающихся условиями возбуждения и считывания.

Нами был исследован режим многоканальной записи, когда первые импульсы записывающих пар подаются на одну и ту же ячейку памяти одновременно, но в разных направлениях [5]. Ситуация пояснена на рис. 1а, где роль первого импульса выполняет совокупность сигналов в направлении волновых векторов \vec{k}_1 . Затем в момент времени τ_{12} в направлении \vec{k}_2 действует второй импульс, который объединяет вторые импульсы записывающих пар. Считывание может проводиться в любой момент времени (в пределах времени существования ФЭ) третьим импульсом в направлении $\vec{k}_3 = -\vec{k}_2$. При этом одна и та же ячейка памяти одновременно высвечивает сово-

¹ Учреждение Российской академии наук Казанский физико-технический институт имени Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

² ФГАОУ ВПО Казанский федеральный университет.

³ Учреждение Российской академии наук Институт спектроскопии РАН, Троицк.

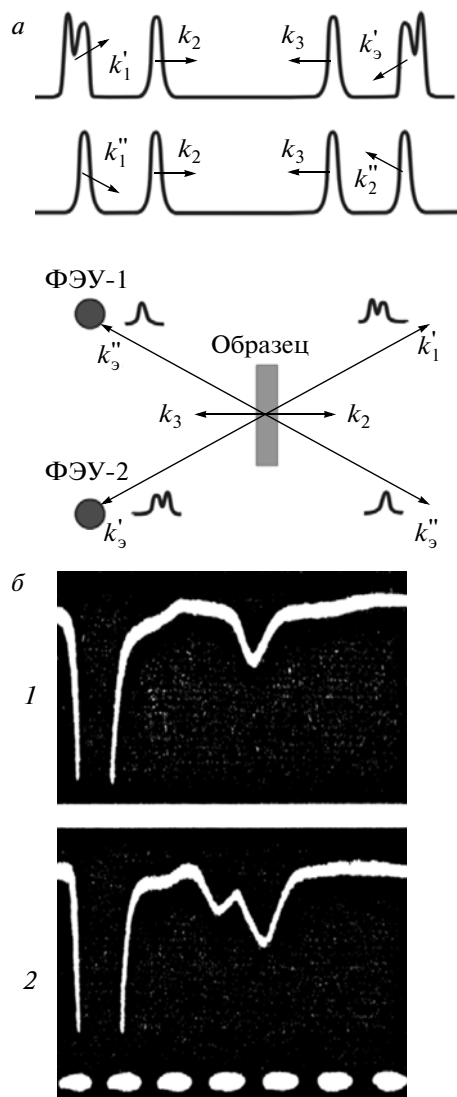


Рис. 1. Схема генерации сигналов многоканального обращенного ДСФЭ, когда импульсом-кодом является первый импульс. ФЭУ-1 и ФЭУ-2 – фотоумножители, регистрирующие эхо-сигналы в отдельных каналах (а). Осциллограммы, иллюстрирующие обнаружение этих эхо-сигналов в кристалле $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$. 1 – эхо-сигнал, соответствующий каналу с одногорбым информационным импульсом; 2 – то же для канала с двугорбым информационным импульсом; сигнал слева – фоновая засветка от третьего импульса; период меток – 20 нс (б).

купность обращенных эхо-сигналов в направлении волновых векторов $-\vec{k}_1$. Каждый из этих сигналов распространяется в своем пространственном канале и может быть зафиксирован отдельным или общим фотодетектором в зависимости от решаемой задачи. На рис. 1б приведены осциллограммы, иллюстрирующие обнаружение этих эхо-сигналов в кристалле $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$. В первом случае ФЭ соответствует одногорбому информационному импульсу, во втором – двугорбо-

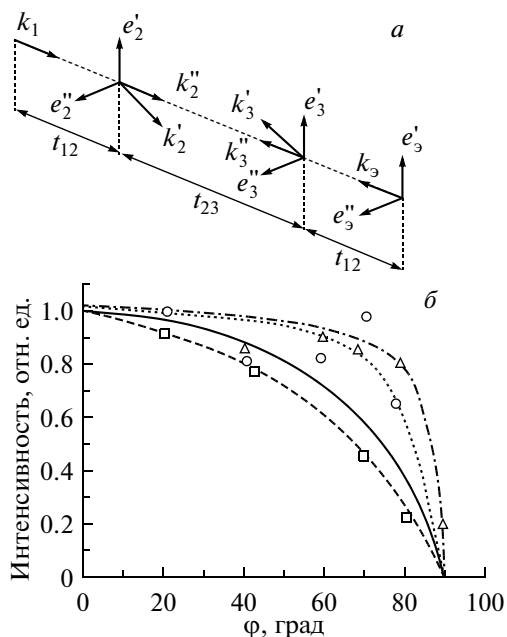


Рис. 2. Схема генерации сигналов многоканального обращенного ДСФЭ, когда составным импульсом-кодом является второй импульс. \vec{k}_1 – волновой вектор первого неполяризованного импульса; $\vec{k}_{2,3}'$ и $\vec{k}_{2,3}''$ – волновые векторы сигналов импульса-кода (2) и составного считывающего импульса (3); $\vec{e}_{2,3}'$ и $\vec{e}_{2,3}''$ – соответствующие векторы поляризации импульсов; \vec{k}_3 – волновой вектор эхо-сигнала; \vec{e}_3' и \vec{e}_3'' – векторы поляризации сигналов ДСФЭ в соответствующих каналах, τ_{12} – интервал между первым и вторыми, τ_{23} – между вторыми и третьими возбуждающими импульсами (а). Зависимость интенсивности сигналов ДСФЭ в кристалле $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$ от угла ϕ между направлениями линейной поляризации возбуждающих импульсов. Экспериментальные точки относятся к случаю, когда изменяется поляризация первого импульса (треугольники), второго импульса (кружки) и третьего импульса (квадраты) при неизменной поляризации двух других импульсов. Сплошной линией показана расчетная зависимость (б).

му. Таким способом удается увеличить плотность записи информации во столько раз, сколько пространственных каналов задействовано.

С позиций создания устройств обработки информации на основе долгоживущего стимулированного ФЭ (ДСФЭ) целесообразно кодировать ее не в первом, а во втором возбуждающем импульсе, поскольку в этом случае временная форма ФЭ не будет обращенной по отношению к форме информационных сигналов (см. рис. 2а). Здесь первые записывающие импульсы каждого канала действуют одновременно в направлении волнового вектора \vec{k}_1 . Вторые импульсы записывающих пар подаются одновременно в разных направлениях (для примера показаны два направления, определяемые волновыми векторами \vec{k}_2' и \vec{k}_2''). Каждому

Поляризационная выборка информации в режиме ДСФЭ

Номер варианта	Поляризация 2-го импульса		Поляризация 3-го импульса		Наличие сигнала ДСФЭ	
	1 канал	2 канал	1 канал	2 канал	1 канал	2 канал
1	↑	↑	↑	↑	+	+
2	↑	→	↑	↑	+	–
3	→	→	↑	↑	–	–
4	→	↑	↑	↑	–	+

каналу при этом соответствует свой считывающий импульс, приложенный в противоположном направлении ($-\vec{k}_2'$ и $-\vec{k}_2''$ соответственно). Все эхо-сигналы в этом случае испускаются в единственном направлении $-\vec{k}_1$. При таком возбуждении возникает проблема идентификации сигналов, которая может быть решена за счет поляризационных свойств ДСФЭ.

Поляризационное разделение каналов

В наших работах [6–8] мы показали, что для многоканальной выборки информации можно использовать метод, основанный на поляризационных свойствах сигналов ФЭ, интенсивность которых уменьшается более чем на порядок, если поляризация одного из возбуждающих импульсов ортогональна поляризации остальных импульсов. На рис. 2б приведена зависимость интенсивности сигналов ДСФЭ в кристалле $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$ от угла φ между направлениями линейной поляризации возбуждающих импульсов. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с данными теоретического расчета, выполненного в [6].

Рассмотрим поляризационные свойства ДСФЭ, возбужденного по конкретной многоканальной схеме (рис. 2а), в которой импульсом являлся второй импульс, состоящий из двух информационных сигналов с разными волновыми векторами \vec{k}_2' и \vec{k}_2'' и поляризациями \vec{e}_2' и \vec{e}_2'' . Первый импульс с волновым вектором \vec{k}_1 не поляризован. Импульсы были составными, причем для реализации режима обращения совокупности волновых векторов считывающего импульса и импульса-кода имели противоположную (обращенную) пространственную конфигурацию. Интенсивность импульса-кода удовлетворяла приближению слабого возбуждения. В итоге в направлении $-\vec{k}_1$ высвечивались два сигнала многоканального эха, идентификация которых оказалась возможной лишь с помощью поляризационного ключа. Результаты исследования корреляции эхо-сигналов в соответствующих каналах в зависимости от направления векторов поляризации воз-

буждающих импульсов приведены в таблице, где стрелками указано направление векторов поляризации возбуждающих импульсов, а знаки “+” и “–” указывают на наличие или отсутствие сигналов ДСФЭ в соответствующем пространственном канале. Число вариантов такой выборки достаточно велико [6]. Следует отметить, что имеются дополнительные возможности увеличения числа вариантов выборки каналов, связанные, например, с тем, что поляризации сигналов первого и составного считывающего импульсов также могут варьироваться.

Разделение каналов при помощи фазового кодирования импульсов

В последние годы наблюдается заметный рост интереса к системам связи, использующим кодовое разделение каналов (см., например, [9, 10]). Это обусловлено рядом преимуществ, которыми обладают такие системы: эффективным использованием частотного диапазона, высокой помехоустойчивостью, скрытностью передачи информации. Возможности использования шумоподобных сигналов для многоканальной записи и считывания информации в режиме ДСФЭ были проанализированы в работах [11, 12].

Известно [13], что огибающая сигнала ДСФЭ представляет собой свертку второго (объектного) импульса с корреляционной функцией первого (референтного) и третьего (считывающего) импульсов, поэтому временная форма эхо-сигнала будет воспроизводить временную форму объектного импульса при условии, что функция корреляции является дельта-образной. Установлено, что в качестве референтного и считывающего импульсов удобнее всего использовать продолжительные импульсы, модулированные по фазе или амплитуде таким образом, что их автокорреляционная функция является дельта-образной. Наиболее простой вариант – импульсы со случайной бифазовой модуляцией. Предположим, что референтный и считывающий импульсы имеют прямоугольную временную форму и характеризуются амплитудой E и длительностью T , а в течение каждого импульса фаза поля переключается случайным образом между значениями 0 и π через

промежутки времени $T_b = T/N$. Тогда, если псевдослучайные последовательности референтного и считывающего импульсов совпадают, их корреляционная функция является дельта-образной, следовательно, сигнал ДСФЭ будет воспроизводить форму объектного импульса, а если же не совпадают, то дельта-образность функции корреляции пропадает, и эхо-сигнал полностью теряет информацию об объектном импульсе. Корреляционный пик шириной T_b имеет высоту в $N^{1/2}$ раз больше, чем среднеквадратичное отклонение случайного фона шириной $2T$.

Другой вариант – многофазовая последовательность Фрэнка [14]. Она состоит из $N = M^2$ элементарных импульсов длительностью T_b , начальные фазы которых задаются в виде $\varphi_{jn} = 2\pi(p/M)jn$, где p – число, взаимно простое с M (положим $p = 1$), $j, n = 0, 1, \dots, M - 1$, а номер элементарного импульса $m = 1, \dots, N$ связан с индексами j и n соотношением $m = jM + n + 1$. Другими словами, если представить начальные фазы φ_{jn} в виде матрицы, то последовательность элементарных импульсов в сигнале Фрэнка будет соответствовать построчному перечислению элементов этой матрицы. Численные расчеты показывают, что пик автокорреляционной функции сигнала Фрэнка в $2N^{3/4}$ раз больше, чем среднеквадратичное отклонение случайного фона. Для организации многоканальной обработки информации в режиме ДСФЭ можно использовать сегменты многофазовой последовательности Фрэнка в качестве простейшей системы шумоподобных сигналов, позволяющей осуществлять запись и считывание информации с кодовым разделением каналов. Если M кратен некоторому целому числу q , то последовательность Фрэнка можно разбить на q подпоследовательностей (сегментов), каждая из которых содержит N/q элементарных импульсов и описывается M/q строками матрицы φ_{jn} и может рассматриваться как базовый фазоманипулированный сигнал для отдельного канала. В этом случае среднеквадратичное отклонение случайного фона возрастает, но остается меньше среднеквадратичного отклонения фона случайной бифазовой последовательности той же длительности, а в силу ортогональности различных сегментов многофазовой последовательности Фрэнка взаимное влияние каналов получается намного меньше, чем в случае использования бифазовых случайных последовательностей. Использование системы многофазовых сигналов вместо бифазовых случайных сигналов обеспечивает значительно меньший уровень шума при считывании информации, а корректное восстановление сигнала в отклике ДСФЭ происходит даже при внесении 15% ошибки в считывающий импульс.

УПРАВЛЕНИЕ ГЕНЕРАЦИЕЙ ЭХО-СИГНАЛОВ

Запирание сигналов ФЭ в присутствии неоднородного статического электрического поля

При использовании в качестве ассоциативного ключа для разделения каналов поляризации импульсов установлено, что независимыми будут только два канала для записи и считывания информации. Другой подход состоит в том, что каждая записывающая пара действует на своем участке неоднородно уширенной линии [15, 16]. Сложность заключается в том, что спектр лазерного возбуждения должен быть значительно уже неоднородной ширины оптической линии, что ограничивает скорость обмена информацией в каждом канале. Существует возможность осуществления многоканальной записи информации в режиме ДСФЭ в присутствии внешнего неоднородного электрического поля, которая позволяет избежать указанных выше ограничений.

Процесс формирования ФЭ проходит в два этапа: расфазирование осциллирующих дипольных моментов оптических центров в неоднородном поле окружения после приложения первого возбуждающего импульса, и последующее их сфазирование в том же неоднородном поле после приложения второго импульса. Сфазирование осциллирующих дипольных моментов приводит к возникновению макроскопической поляризации среды и регистрируется в виде оптического когерентного отклика. Воздействие на резонансную среду на одном из этих этапов пространственно-неоднородного внешнего возмущения (например, электрического поля) приведет к случайному сдвигу или расщеплению исходных составляющих неоднородно уширенной оптической линии. В результате дипольные моменты не будут сфазироваться после считывающего импульса и сигнал ФЭ не высветится.

Данное предположение было проверено нами при возбуждении ДСФЭ в кристалле $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$ (переход ${}^3H_4 - {}^3P_0$, $\lambda = 477.7$ нм). Схема эксперимента была следующая [17]: образец с поперечными размерами $6 \times 6 \times 4$ мм помещали между двумя непараллельными пластинами длиной $D = 0.8$ см, с расстоянием между ними $L = 1$ см. На пластины подавали постоянное напряжение $U = 200$ В. Поскольку угол между пластинами около 2–3 град, а размеры их того же порядка, что и расстояние между ними, электрическое поле было неоднородным. При такой геометрии поля его градиент составлял не менее $50 \text{ В} \cdot \text{см}^{-2}$. Было опробовано несколько вариантов включения внешнего поля в режиме ДСФЭ (длительность возбуждающих лазерных импульсов 10 нс, интервал между импульсами в парах $\tau = 25$ нс, интервал между записью и считыванием 80 мс). Основной экспериментальный результат состоит в том, что

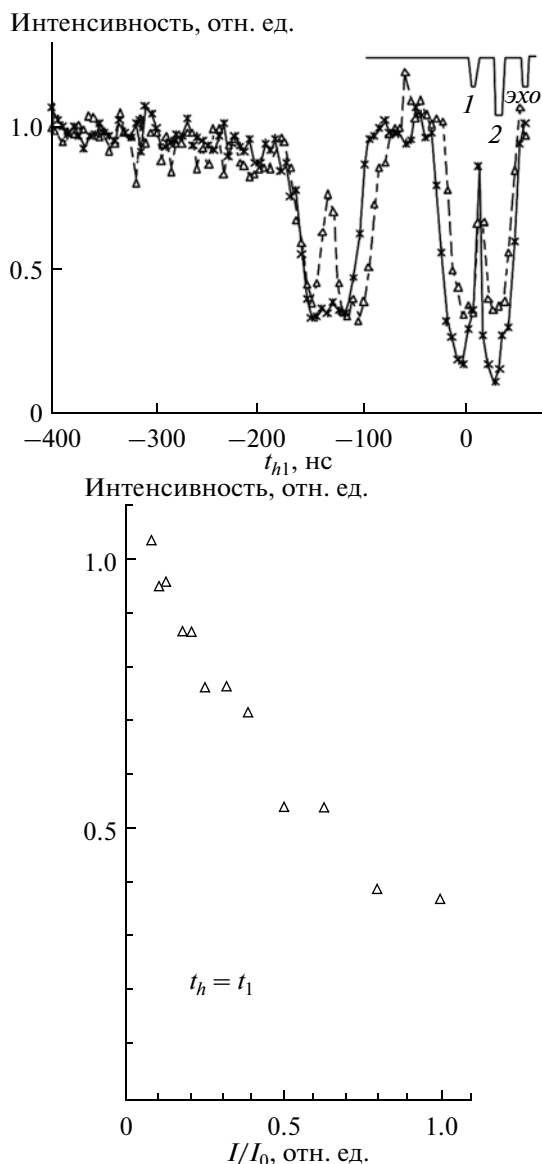


Рис. 3. Зависимость интенсивности сигналов ПФЭ от времени включения импульсов электрического тока при различных длительностях импульсов: $t_h = 12$ нс (треугольники); $t_h = 18$ нс (звездочки) (а). Зависимость интенсивности сигналов ПФЭ от относительной амплитуды импульсов тока (I/I_0 , где I_0 – максимальная амплитуда), приложенных в момент прохождения первого возбуждающего импульса ($t_{h1} = 0$). Длительность импульса тока $t_h = 12$ нс (б).

если внешнее поле присутствует (или отсутствует) как при записи, так и при считывании, то это не сказывается на интенсивности ДСФЭ. Если запись информации осуществляется при включенном поле, а считывание – без поля, или наоборот, то интенсивность ДСФЭ уменьшается более чем на порядок. Таким образом, используя достаточно слабое неоднородное электрическое поле, можно управлять генерацией сигналов ФЭ.

Можно осуществить и многократный вариант записи информации в режиме ДСФЭ. Пусть во время действия каждой пары возбуждающих импульсов действует свое внешнее электрическое поле, причем одно из них включается при считывании. Таким образом, можно “запереть” информацию от n -й возбуждающей пары импульсов, включая разное внешнее поле во время действия этой пары и во время считывания. Используя для каждой записываемой пары импульсов свой градиент поля, можно организовать многоканальный обмен информацией в режиме ДСФЭ. В этом случае для выборки данных, записанных конкретной парой импульсов, достаточно включить перед считывающим импульсом соответствующее этой паре поле [18].

Запирание эхо-сигналов в условиях неоднородного импульсного электрического поля

Наряду с влиянием внешнего статического неоднородного электрического поля мы исследовали влияние импульсов электрического поля наносекундной длительности на формирование сигналов ФЭ в кристалле $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$ [19, 20]. Были исследованы зависимости интенсивности сигналов первичного (ПФЭ), стимулированного (СФЭ) и ДСФЭ в кристалле $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$ (концентрация ионов Pr^{3+} 1 вес. %, переход $^3H_4 \rightarrow ^3P_0$, $\lambda = 477.7$ нм, $T = 2$ К) от амплитуды, длительности и времени включения импульсов электрического поля. Импульсы формировали следующим образом. На один из торцов образца параллельно оси C_3 напыляли в вакууме две одинаковые медные полоски: одна с сопротивлением $R = 50$ Ом (при температуре жидкого гелия), другая с сопротивлением, близким к нулю. Импульсы тока силой до 2 А и длительностью $\tau_h = 12\text{--}18$ нс формировали генератором на лавинных транзисторах и подавали на эти полоски. Линейно поляризованные импульсы лазера на красителе (длительность 10 нс, частота повторения 12.5 Гц) распространялись в образце параллельно оси C_3 на расстоянии $L \sim 0.4$ мм от металлической пленки. В эксперименте интервал $t_{h1} = t_h - t_1$ между временем включения тока t_h и временем t_1 подачи на образец первого лазерного импульса изменяли от -400 до $+400$ нс с шагом 5 нс. При возбуждении сигналов ФЭ времена задержек задавали следующим образом: $\tau_{12} = 25$ нс, $\tau_{23} = 140$ нс для СФЭ и $\tau_{23} = 80$ мс в случае ДСФЭ.

Зависимость интенсивности ПФЭ от времени включения импульса тока, представленная на рис. 3а, имеет модулированный характер. Первый минимум наблюдали в случае приложения импульса тока примерно за 150 нс до прохождения через образец первого лазерного импульса. Наиболее значительное уменьшение интенсивности эха (почти на порядок) имело место, когда импульс

тока включали одновременно с первым или со вторым лазерными импульсами. Степень подавления сигналов эха растет с увеличением длительности и амплитуды импульсов тока (см. рис. 3б).

Зависимость интенсивности СФЭ от времени включения импульса тока представлена на рис. 4а. Как и в случае ПФЭ, наблюдается значительное уменьшение интенсивности отклика, когда токовый импульс включается одновременно с первым или вторым лазерными импульсами, и менее значительное, когда токовые импульсы прикладываются за 130 нс до действия первого лазерного импульса.

Относительная интенсивность обращенного ДСФЭ как функция времени включения электромагнитного импульса относительно первого и третьего лазерных импульсов приведена на рис. 4б. В долгоживущем режиме наиболее сильное изменение интенсивности сигнала наблюдается, когда импульс тока включался одновременно с первым или третьим ($t_{h1} = 0$ или $t_{h3} = 0$) лазерными импульсами.

Следует отметить, что приложение последовательности из двух одинаковых импульсов тока в моменты $t_h(1) = t_1$ и $t_h(2) = t_3$ не вызывало изменения интенсивностей как сигналов СФЭ, так и сигналов ДСФЭ. Кроме того, изменений в интенсивностях сигналов эха не наблюдали, когда сопротивление металлической пленки было равно нулю, хотя амплитуда тока при этом была той же самой. Этот факт подтверждает наше предположение, что на генерацию сигналов ФЭ влияет именно неоднородное электрическое поле, создаваемое напряжением, падающим на металлической пленке с сопротивлением R .

Для $t_h \geq t_1$ (вторые минимумы на рис. 3а и 4а) изменения интенсивности эхо-сигналов могут быть объяснены в рамках модели, в которой разность потенциалов на концах металлической пленки (при $R = 50$ Ом) создает неоднородное электрическое поле в месте прохождения лазерного луча. При этом, как и в рассмотренном выше случае присутствия статического неоднородного электрического поля, происходит уменьшение интенсивности сигналов эха при включении тока до и в момент действия лазерных импульсов [20]. Импульсное поле создает соответствующие локальные неоднородности, приводящие к изменению скоростей прецессии электродипольных моментов. При формировании сигналов ФЭ эволюция процессов расфазирования и сфазирования псевдоэлектрических диполей различна, что и приводит к уменьшению сигнала. Приложение последовательности двух одинаковых видеоимпульсов в моменты времени $t_h(1) = t_1$, и $t_h(2) = t_3$ (симметричные относительно времени приложения второго импульса) создает одинаковые условия для процессов расфазирования и сфазирова-

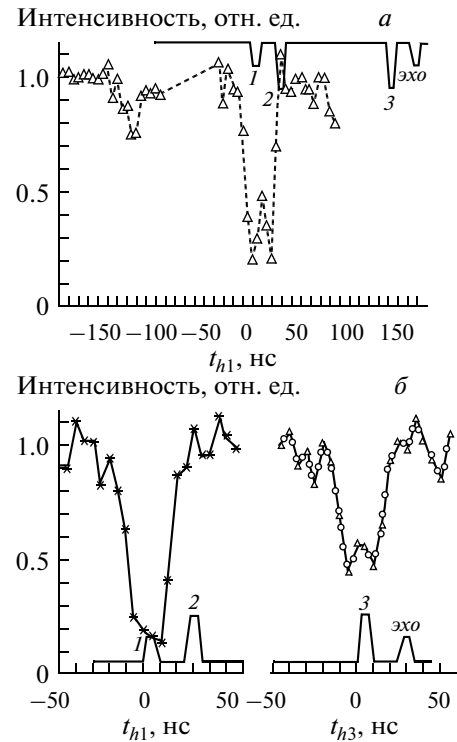


Рис. 4. Зависимость интенсивности сигналов СФЭ от времени включения электрического тока. Интервалы между возбуждающими импульсами $\tau_{12} = 25$ нс, $\tau_{23} = 140$ нс (а). Зависимость интенсивности сигналов ДСФЭ от времени включения импульсов тока, относительно времени прохождения первого (слева) и считывающего (справа) возбуждающих импульсов ($\tau_{12} = 25$ нс, $\tau_{23} = 80$ мс) (б).

ния электродиполей, что не нарушает процесса формирования эха и не приводит к уменьшению его интенсивности. Приведенные рассуждения полностью подтверждают аналитические расчеты, выполненные в [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны и экспериментально исследованы различные режимы многоканальной оптической обработки информации с использованием пространственного, поляриационного и кодового методов разделения каналов, а также методика записи сигналов ФЭ под действием неоднородных электромагнитных полей. Разработанные методы могут быть использованы для построения быстродействующих высокопроизводительных оптических эхо-процессоров.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 10-02-00004а, при финансовой поддержке ОФН РАН (программа “Фундаментальная оптическая спектроскопия и ее приложения”, РФФИ (грант № 11-02-90718-моб_ст 12-02-90000-бел_а и

09-02-00206а), и ГК 16.740.11.0590, грант Президента РФ НШ № 5289.2010.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Евсеев И.В., Рубцова Н.Н., Самарцев В.В.* Когерентные переходные процессы в оптике. М.: Физматлит, 2009.
2. *Rebane A., Drobizhev M., Sigel C. et al.* // *J. Lumin.* 1999. V. 83–84. P. 325.
3. *Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H.* // *Rev. Mod. Phys.* 2002. V. 74. P. 145.
4. *Liu G., Jacquier B.* Spectroscopic properties of rare earths in optical materials. Tokyo, Belin: Tsinghua University Press and Springer-Verlag, 2005. P. 399.
5. *Zuikov V.A., Samartsev V.V.* // *Phys. Status. Solidi. A.* 1982. V. 73. P. 625.
6. *Zuikov V.A., Bikbov I.S., Nefediev L.A., Samartsev V.V.* // *Laser Phys.* 1992. V. 2. P. 747.
7. *Zuikov V.A., Bikbov I.S., Karamyshev S.B., Samartsev V.V.* // *Laser Phys.* 1994. V. 4. P. 95.
8. *Бикбов И.С., Зуйков В.А., Попов И.И. и др.* // *Квант. электроника.* 1995. Т. 22. С. 1057.
9. *Kim M.K., Kachru R.* // *Opt. Lett.* 1989. V. 14. P. 423.
10. *Zhang J.M., Gauthier D.J. et al.* // *Opt. Lett.* 1991. V. 16. P. 103.
11. *Власова Д.Д., Калачев А.А., Самарцев В.В.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2006. Т. 70. № 4. С. 518.
12. *Власова Д.Д., Калачев А.А.* // *Когерентная оптика и оптическая спектроскопия / Под ред. Салахова М.Х., Самарцева В.В.* Казань: Изд-во КГУ, 2005. С. 65.
13. *Калачев А.А., Самарцев В.В.* Когерентные явления в оптике. Казань: Изд-во КГУ, 2003.
14. *Лезин Ю.С.* Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов. М.: Сов. радио, 1969.
15. *Mitsunaga M., Yano R., Uesugi N.* // *Opt. Lett.* 1991. V. 16. P. 1890.
16. *Ребане А.К.* // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1989. Т. 53. № 12. С. 2299.
17. *Kalachev A.A., Samartsev V.V., Nefediev L.A., Zuikov V.A.* // *Optical Memory and Neural Networks.* 1997. V. 6. P. 129.
18. *Калачев А.А., Неведьев Л.А., Зуйков В.А., Самарцев В.В.* // *Оптика и спектроскопия.* 1998. Т. 84. С. 811.
19. *Shegeda A.M., Khabibullin B.M., Lisin V.N. et al.* // *Proc. SPIE.* 1995. V. 2798. P. 142.
20. *Shegeda A.M., Zuikov V.A., Khabibullin B.M. et al.* // *Laser Phys.* 1995. V. 5. P. 639.
21. *Lisin V.N., Shegeda A.M., Khabibullin B.M. et al.* // *Proc. SPIE.* 1997. V. 3239. P. 63.