

# ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

УДК 535.2+535.317.1

## ЗАПИСЬ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ЕЕ РАЗЛИЧНОЙ КОДИРОВКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТИМУЛИРОВАННОГО ФОТОННОГО ЭХА В ТРЕХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЕ

© 2014 г. Г. И. Гарнаева, канд. физ.-мат. наук; Л. А. Нефедьев, доктор физ.-мат. наук;  
Э. И. Хакимзянова, аспирантка; Т. Р. Яхин, студент

Казанский федеральный университет, Казань

E-mail: guzka-1@yandex.ru, nefediev@yandex.ru, elzahakim@yandex.ru, timuryaxin@mail.ru

Рассмотрено воздействие внешних пространственно неоднородных электрических полей на воспроизведение информации в отклике стимулированного фотонного эха в трехуровневой системе при ее кодировании во временной форме объектного импульса и во временных интервалах эшелона лазерных импульсов, взятых в качестве объектного.

Эффект “запирания” информации при ее различной кодировке исследован при различной неэквидистантности спектра трехуровневой системы.

*Ключевые слова:* эффект “запирания”, неэквидистантность системы, стимулированное фотонное эхо, трехуровневая система, внешние пространственно неоднородные электрические поля, кодирование информации.

Коды OCIS: 210.0210, 190.0190, 200.4560.

Поступила в редакцию 31.10.2013.

### Введение

Резонансное взаимодействие лазерного излучения с веществом является одной из фундаментальных проблем современной физики. Когерентные поля могут вызвать интерференцию двух и более квантовых состояний. Эта интерференция может проявляться в когерентном отклике системы частиц. Изучение таких процессов представляет интерес не только для фундаментальной науки, но имеет и прикладное значение. Например, когерентные переходные процессы могут быть использованы для хранения и обработки информации [1, 2]. Особый интерес представляет исследование взаимодействия нескольких резонансных полей с многоуровневыми квантовыми системами (атомами, молекулами, примесными ионами в кристаллах и др.). Этот интерес обусловлен возможными применениями различных эффектов, наблюдаемых при многочастотном возбуждении квантовых объектов. Среди них можно отметить цветную эхо-голографию [3],

сжатие информации в трехуровневых средах [4], копирование квантовой информации [5] и многоуровневые квантовые гейты, выполняющие логические операции [2]. Запись и воспроизведение эхо-голограмм в многоуровневых системах приводит к возможности наряду с логическими операциями выполнять изменение шкалы реального времени и последовательности событий, информация о которых была заложена в пространственно-временную структуру объектного импульса [6, 7]. В перечисленных процессах информация из объектного импульса преобразуется в структурную (потенциальную) информацию, носителем которой являются переходные динамические решетки населенностей и поляризаций резонансной среды, т.е. пространственно-частотное распределение  $q$ -битов в пределах неоднородно уширенных линий резонансных переходов. Поэтому формирование оптических переходных процессов в многоуровневых системах существенно зависит от степени корреляции неоднородного уширения на разных частотных переходах [2].

Ограничение на существование фазовой памяти в системе примесных центров также связано с временем поперечной необратимой релаксации. Поэтому длительности участвующих в возбуждении резонансных лазерных импульсов и временного интервала  $\tau_{12}$  между первым и вторым возбуждающими импульсами должны быть меньше этого времени. С другой стороны, ограничение на временной интервал  $\tau_{23}$  между вторым и третьим возбуждающими импульсами определяется временем продольной релаксации.

Информация, записываемая с помощью стимулированного фотонного эха (СФЭ) может быть закодирована во временной форме первого или второго возбуждающего лазерного импульса.

В этом случае временная форма сигнала СФЭ может оказаться идентичной соответствующим характеристикам объектного импульса. Этот эффект получил название эффекта корреляции временной формы фотонного эха (ФЭ) [8].

В работе [9] был рассмотрен эффект записывания информации в откликах СФЭ и его применение в системах оптической памяти, эхо-процессоров и многоканальной записи информации при воздействии внешних пространственно неоднородных электрических полей на резонансную систему атомов.

В данной работе исследовано влияние внешних пространственно неоднородных электрических полей на воспроизводимость информации в откликах СФЭ (эффект корреляции временной формы ФЭ) в трехуровневой системе при ее различной кодировке в объектном лазерном импульсе.

### Основные уравнения

Для отыскания оператора эволюции  $U$  системы при ее возбуждении резонансным лазерным импульсом используем результаты работы [9]. Зная оператор эволюции  $U$ , можно определить матрицу плотности системы  $\rho$  после воздействия  $\eta$ -го лазерного импульса

$$\rho(t_\eta + \Delta t_\eta) = U(\Delta t_\eta)\rho(t_\eta)U^\dagger(\Delta t_\eta), \quad (1)$$

где  $U(\Delta t_\eta)$  – оператор эволюции системы при ее возбуждении резонансным лазерным импульсом,  $\Delta t_\eta$  – длительность  $\eta$ -го резонансного лазерного импульса,  $t_\eta$  – момент времени воздействия  $\eta$ -го резонансного лазерного импульса.

Рассмотрим схему возбуждения стимулированного фотонного эха в трехуровневой системе

по  $V$ -схеме, приведенной на рис. 1, где объектным является первый импульс.

В рассматриваемом случае гамильтониан системы можно представить в виде

$$\tilde{H}_0 = \hbar\Delta_{12} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma \end{pmatrix}, \quad \Gamma = \frac{\Omega_{13}}{\Omega_{12}},$$

где  $\Gamma$  – параметр неэквидистантности спектра системы,  $\Delta_{12} = \Omega_2 - \Omega_1 - \omega_{12}$ ,  $\Omega_{ij} = \Omega_j - \Omega_i$  – частоты резонансных переходов,  $\omega_{12}$  – частота лазерного излучения, резонансного перехода 1–2.

Напряженность электрического поля отклика найдем как

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t') = \frac{1}{\hbar^3 c^2 \mathbf{R}_0} \sum_j \int \langle \ddot{\mathbf{d}}_j(t') \rangle \times \mathbf{n} \times \mathbf{n} g(\Delta_{12}) d\Delta_{12}, \quad (2)$$

$$t' = t - \frac{\mathbf{R}_0 \mathbf{n}}{c} + \frac{\mathbf{r}_j \mathbf{n}}{c},$$

$$\langle \mathbf{d}_j(t') \rangle = \mathbf{d}_{21}\rho_{12}^{(3)} + \mathbf{d}_{31}\rho_{13}^{(3)} + \mathbf{d}_{12}\rho_{21}^{(3)} + \mathbf{d}_{13}\rho_{31}^{(3)},$$

где  $\mathbf{n}$  – единичный вектор в направлении наблюдения,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $g(\Delta_{12})$  – функция распределения частот неоднородно уширенной линии резонансного перехода,  $\mathbf{R}_0$  – радиус-вектор точки наблюдения,  $\mathbf{r}_j$  – радиус-вектор местоположения  $j$ -го оптического центра, а матричные элементы матрицы плотности

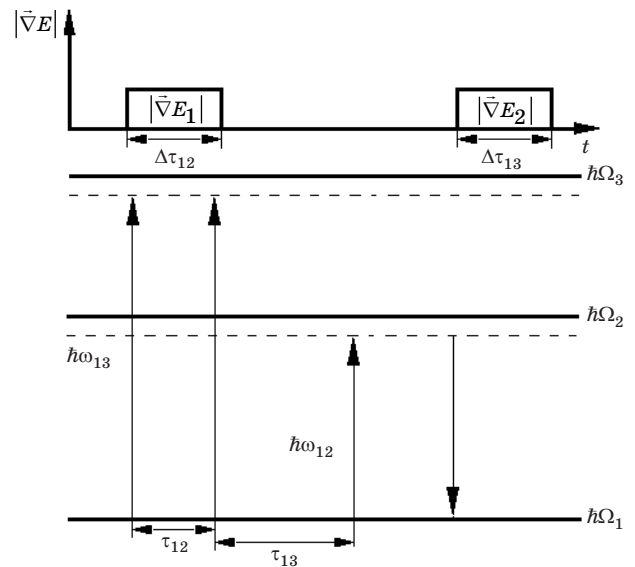


Рис. 1. Спектр возбуждения СФЭ в трехуровневой системе при наличии внешних неоднородных электрических полей с ненулевыми градиентами.

после воздействия трех возбуждающих лазерных импульсов получены в работе [10].

Воздействие внешних пространственно неоднородных электрических полей на резонансную систему атомов может влиять на воспроизводимость информации в откликах СФЭ. Процесс формирования откликов фотонного эха содержит два необходимых этапа: расфазирование осциллирующих дипольных моментов оптических центров и последующее их сфазирование, которое 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, неоднородного электрического поля) приведет к случайному сдвигу или расщеплению исходных монохромат неоднородно уширенной оптической линии. В результате дипольные моменты не будут сфазироваться после считывающего импульса, т.е. генерация оптического когерентного отклика будет подавляться.

Следуя работам [9, 12–15] будем считать, что воздействие неоднородных электрических полей  $\mathbf{E}(\mathbf{r})$  приводит к дополнительным частотным сдвигам  $j$ -го оптического центра за счет эффекта Штарка

$$f(\mathbf{r}_j) = C_s (\nabla \mathbf{E}(\mathbf{r}) \mathbf{r}_j),$$

где  $C_s$  – постоянная. Величина  $C_s$  кристалла  $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$  равна  $100 \text{ КГц}/(\text{В}/\text{см})^2$  [16–18].

В этом случае пространственно-временная структура отклика СФЭ определится аналогичным выражением, полученным в работе [11]

$$I \sim EE^*, \quad (3)$$

где

$$E \sim \int_{V=-\infty}^{+\infty} \int \int g(\Delta_{12}) d\Delta_{12} \sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 \times \\ \times \tilde{S}_{13}^{(1)*}(\Gamma\Delta_{12}) \tilde{S}_{13}^{(2)}(\Gamma\Delta_{12}) \tilde{S}_{12}^{(3)}(\Delta_{12}) \times \\ \times \exp \left\{ i\Gamma(\Delta_{12} + \hbar_{13}) \left[ (t - \tau_{12} - \tau_{23}) - \frac{(\Delta_{12} + \hbar_{12})\tau_{12}}{\Gamma(\Delta_{12} + \hbar_{13})} \right] \right\} dV, \\ \tilde{S}^{(n)}(\Delta) = \int_{t_n - \Delta t_n/2}^{t_n + \Delta t_n/2} \varepsilon^{(n)}(t) \exp(-i\Delta t) dt$$

где  $\theta_\eta$  – площадь  $\eta$ -го импульса,  $\varepsilon^{(n)}(t)$  представляет огибающую временной формы  $\eta$ -го импульса,  $\tau_{12}$  – время воздействия неоднородного электрического поля между первым и вторым возбуждающими импульсами,  $\tau_{23}$  – время воз-

действия неоднородного электрического поля после третьего импульса.

### Воспроизведение информации в откликах СФЭ при ее различной кодировке

Рассмотрим воспроизводимость информации в отклике СФЭ в трехуровневой системе при ее различной кодировке. На рис. 2 представлена временная структура объектного лазерного импульса при кодировке информации в его интенсивности, а на рис. 3 – при кодировке информации во временных интервалах эшелона лазерных импульсов, взятого в качестве объектного.

Нас будет интересовать воспроизводимость информации в отклике СФЭ и эффективность ее записи при наличии внешних пространственно неоднородных электрических полей.

На рис. 4, 5 представлены результаты численного расчета выражения (3) при различной кодировке информации.

Из рис. 4 и 5 следует, что при  $\Gamma \neq 1$  наблюдается изменение шкалы реального времени в отклике СФЭ как при кодировке информации во временной форме объектного импульса, так

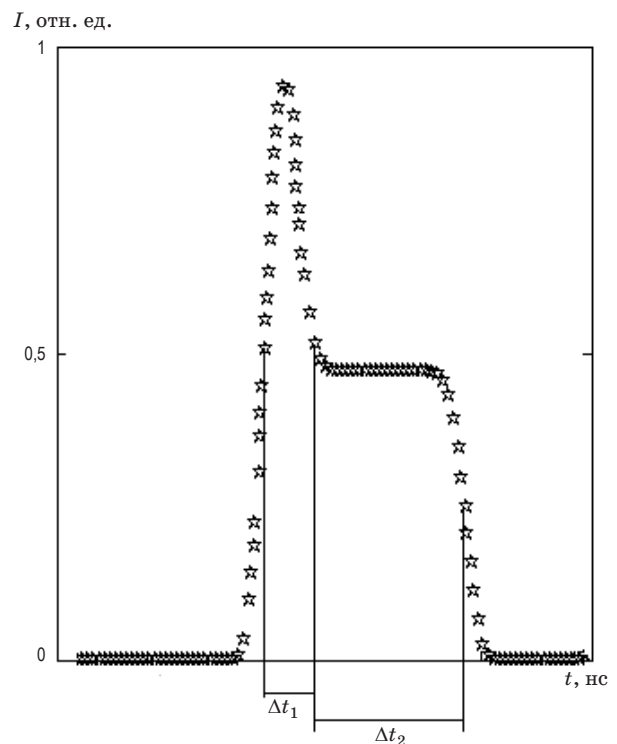
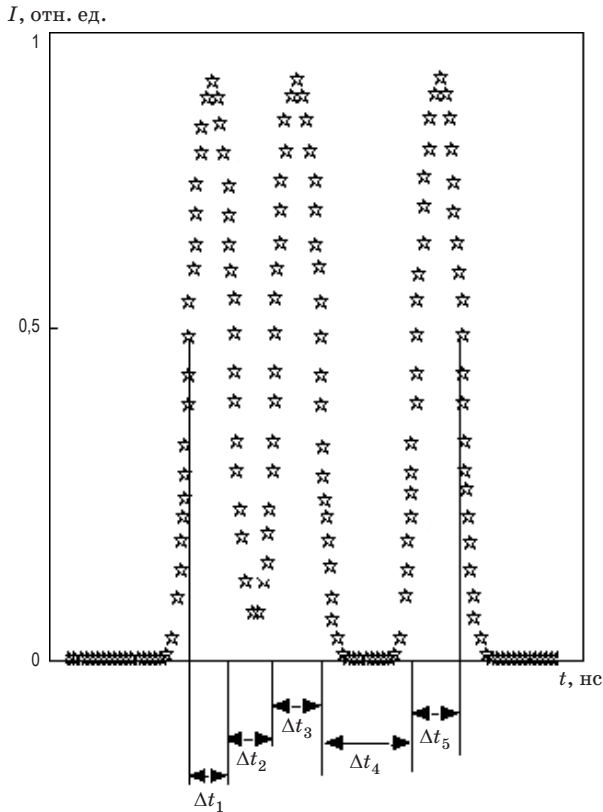
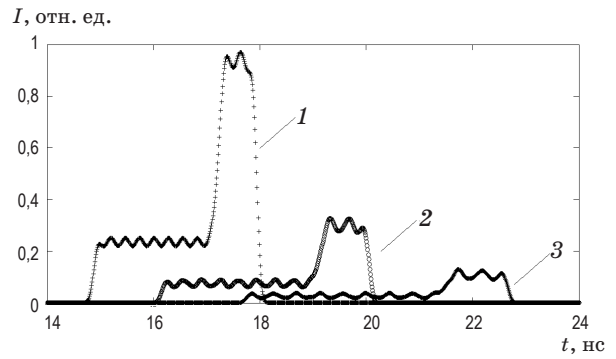


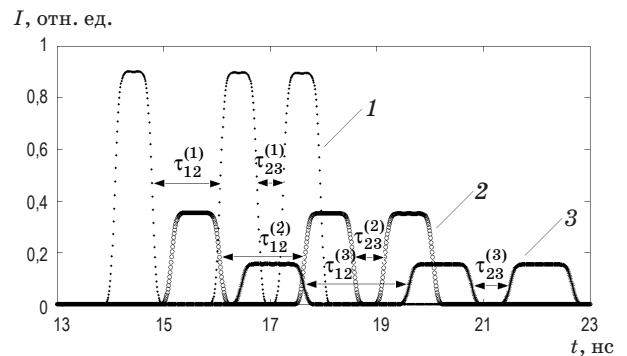
Рис. 2. Временная форма входного импульса ( $\Delta t_1 = 1, \Delta t_2 = 3$  нс).



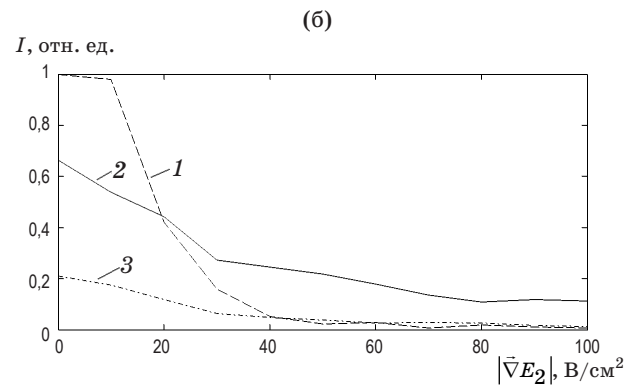
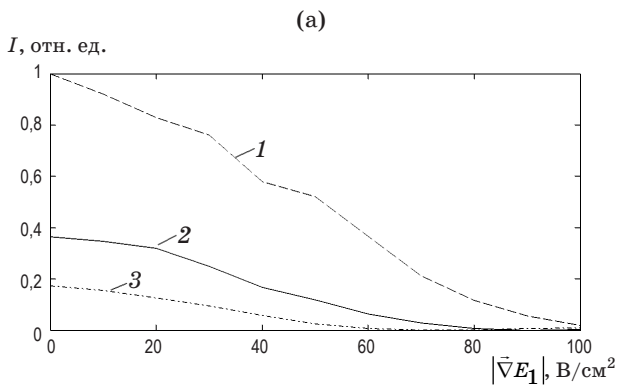
**Рис. 3.** Временная форма входного импульса при кодировании информации во временных интервалах ( $\Delta t_1 = \Delta t_3 = \Delta t_5 = 1$  нс – длительности импульсов,  $\Delta t_2 = 0,5$  нс,  $\Delta t_4 = 1,5$  нс – длительности промежутков между импульсами,  $\Delta t_2 \neq \Delta t_4$  – эквивалентно заданию информации во временных интервалах).



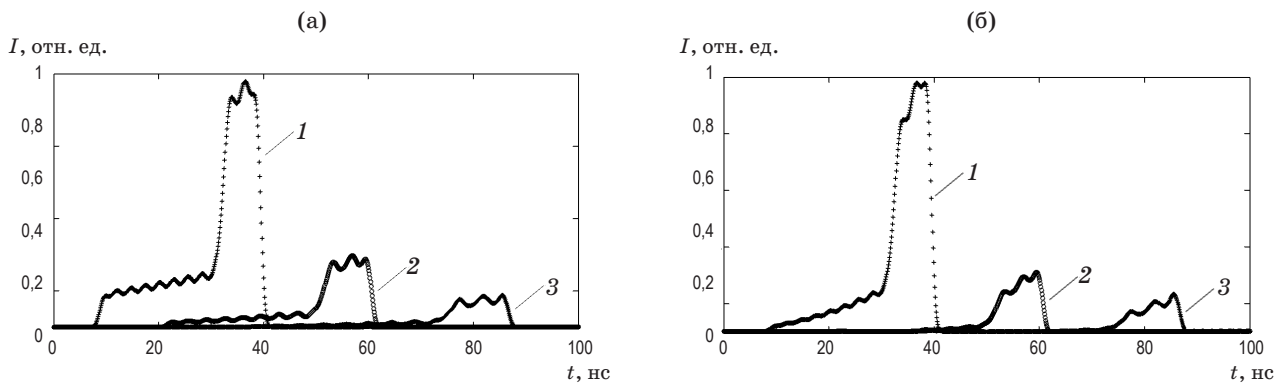
**Рис. 4.** Изменение шкалы реального времени в отклике стимулированного фотонного эха в обращенном режиме при кодировании информации во временной форме объектного импульса для систем с разной неэквидистантностью резонансных уровней:  $\Gamma = 0,79$  (1),  $\Gamma = 1$  (2),  $\Gamma = 1,26$  (3).



**Рис. 5.** Изменение шкалы реального времени в отклике стимулированного фотонного эха при кодировании информации во временных интервалах объектного импульса для систем с разной неэквидистантностью резонансных уровней:  $\Gamma = 0,79$  (1),  $\Gamma = 1$  (2),  $\Gamma = 1,26$  (3),  $\tau_{12}^{(i)}$ ,  $\tau_{23}^{(i)}$  – временные интервалы, в которых закодирована информация.



**Рис. 6.** Эффективность записи информации при формировании стимулированного фотонного эха в трехуровневой системе с разной неэквидистантностью спектра системы в случае наложения пространственно неоднородного электрического поля между первым и вторым импульсами (а) и после третьего импульса (б) в системах с разной неэквидистантностью резонансных уровней:  $\Gamma = 0,79$  (1),  $\Gamma = 1$  (2),  $\Gamma = 1,26$  (3).



**Рис. 7.** Изменение шкалы реального времени в отклике стимулированного фотонного эха в обращенном режиме кодирования информации во временной форме объектного импульса при значениях первого и второго градиентов внешних электрических полей  $50 \text{ В/см}^2$  (а),  $70 \text{ В/см}^2$  (б) в системах с разной неэквидистантностью резонансных уровней:  $\Gamma = 0,79$  (1),  $\Gamma = 1$  (2),  $\Gamma = 1,26$  (3).

и при ее кодировке во временных интервалах эшелона лазерных импульсов, взятых в качестве объектного.

На рис. 6 представлена эффективность запира-ния информации при формировании стимулиро-ванного фотонного эха в трехуровневой системе при разной неэквидистантности спектра системы и при наложении пространственно неоднородного электрического поля после второго или третьего возбуждающих лазерных импульсов.

Из рисунков следует, что наиболее эффек-тивно эффект запираения проявляет себя при схеме записи СФЭ при  $\Gamma = 1,26$ , т.е. первый и второй возбуждающие импульсы воздействуют на переходе  ${}^3\text{H}_4 - {}^3\text{P}_0$ , а третий импульс и отклик СФЭ – на переходе  ${}^3\text{H}_4 - {}^1\text{D}_2$ .

Из рис. 7 следует, что при наложении после первого и третьего возбуждающих лазерных им-пульсов одинаковых пространственно неоднородных электрических полей, в отличие от СФЭ в двухуровневой системе, происходит искаже-ние записанной информации, которое тем боль-ше, чем больше величина градиентов внешних пространственно неоднородных электрических полей. Таким образом, при одинаковых значе-ниях градиентов фазовая память системы вос-станавливается только частично.

\* \* \* \* \*

## Выводы

Показано, что при параметре неэквиди-стантности спектра трехуровневой системы не равном единице, наблюдается изменение шка-лы реального времени в отклике СФЭ как при кодировке информации во временной форме объектного импульса, так и при ее кодировке во временных интервалах эшелона лазерных импульсов.

Запирание информации в отклике СФЭ в кристалле  $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$  при разной схеме воз-буждения происходит при наложении про-странственно неоднородного электрического поля между первым и вторым импульсами в пределах  $60\text{--}100 \text{ В/см}^2$ , а при наложении пространственно неоднородного электрическо-го поля после третьего импульса в пределах  $300\text{--}1000 \text{ В/см}^2$ .

При наложении после первого и третьего возбуждающих лазерных импульсов одинако-вых пространственно неоднородных электриче-ских полей, в отличие от СФЭ в двухуровневой системе, происходит искажение записанной информации.

Работа поддержана грантом 20-64/2013(Г) Академии наук РТ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Калачёв А.А., Самарцев В.В. Фотонное эхо и его применение. Казань.: КГУ, 1998. 150 с.
2. Нефедьев Л.А., Низамова Э.И., Тактаева С.В. Влияние некоррелированности неоднородного уширения на формирование переходных оптических процессов в многоуровневых системах // Опт. и спектр. 2012. Т. 113. № 2. С. 156–161.

3. *Нефедьев Л.А., Самарцев В.В.* Цветная эхо-голография // *Опт. и спектр.* 1987. Т. 62. № 3. С. 701–703.
4. *Nefediev L.A., Samartsev V.V.* The dynamic echohologramm transformation in three-level systems // *Physical Status Solidi (a)*. 1985. V. 88. P. 631–635.
5. *Nefed'ev L.A., Rusanova I.A.* Copying quantum information in a three-level medium with a phase memory // *Laser physics*. 2002. V. 12. № 3. P. 1–5.
6. *Нефедьев Л.А.* Пространственно-временные преобразования эхо-голограмм в двух и трехуровневых системах // *Опт. и спектр.* 1986. Т. 61. № 2. С. 387–394.
7. *Нефедьев Л.А.* Динамическая эхо-голография в вырожденных и многоуровневых системах // *Известия АН СССР, сер. физическая.* 1986. Т. 50. № 8. С. 1551–1558.
8. *Зуйков В.А., Самарцев В.В., Усманов Р.Г.* Корреляция формы сигналов светового эха с формой возбуждающих импульсов // *Письма в ЖЭТФ.* 1980. Т. 32. № 4. С. 293–297.
9. *Нефедьев Л.А., Гарнаева Г.И., Усманов Р.Г.* Многоканальная запись информации на основе эффекта “запираания” сигналов фотонного эха // *Оптический журнал.* 2010. Т. 77. № 2. С. 27–29.
10. *Биленький С.М.* Введение в диаграммную технику Фейнмана. Москва.: Атомиздат, 1971. 215 с.
11. *Nefediev L.A., Sakhbieva A.R., Nizamova E.I.* Determination of optimum conditions for reproducing information in optical echo processors // *Journal of Russian Laser Research.* 2013. V. 34. № 4. P. 355–359.
12. *Нефедьев Л.А., Гарнаева (Хакимзянова) Г.И.* Эффект “запираания” сигналов фотонного эха при многоканальной записи информации // *Опт. и спектр.* 2008. Т. 105. № 6. С. 1007–1012.
13. *Гарнаева Г.И., Нефедьев Л.А.* Эффект “запираания” сигналов фотонного эха нерезонансными стоячими волнами с разными частотами // *Сб. статей XII Междунар. молодежной научной школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” / Казань: КГУ, 2008. С. 181–184.*
14. *Нефедьев Л.А., Гарнаева (Хакимзянова) Г.И.* Корреляция неоднородного уширения и эффективность запираания информации в оптических эхо-процессорах // *Опт. и спектр.* 2005. Т. 98. № 1. С. 41–45.
15. *Нефедьев Л.А., Гарнаева (Хакимзянова) Г.И.* Эффект “запираания” информации в оптических запоминающих устройствах на основе фотонного эха // *Вестник ЧелГУ.* 2009. В. 6 (физика). № 25 (163). С. 13–22.
16. *Mitsunaga M., Yano R., Uesugi N.* Time- and frequency-domain hybrid optical memory: 1,6-kbit data storage in  $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  // *Opt. Lett.* 1991. V. 16. P. 1890–1892.
17. *Mossberg T.W.* Swept-carrier time-domain optical memory // *Opt. Lett.* 1992. V. 17. P. 535–537.
18. *Wiersma D.A., Duppen K.* Picosecond holographic-grating spectroscopy // *Science.* 1987. V. 237. P. 1147–1154.