

УДК 535.2+535.317.1

## ФАЗОВАЯ ПАМЯТЬ ТРЕХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНИХ ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

*Э.И. Низамова, Л.А. Нефедьев, Г.А. Гильманова*

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

### Аннотация

Интерес к исследованию взаимодействия нескольких резонансных полей с многоуровневыми квантовыми системами обусловлен широким кругом возможных применений различных эффектов, наблюдаемых при многочастотном возбуждении квантовых объектов. Среди них можно отметить цветную эхо-голографию, сжатие информации в трехуровневых средах, копирование квантовой информации, многоуровневые квантовые гейты, выполняющие логические операции. Кроме того, запись и воспроизведение эхо-голограмм в многоуровневых системах приводит к возможности, наряду с логическими операциями, выполнять изменение шкалы реального времени и последовательности событий в их откликах, информация о которых была заложена в пространственно-временную структуру объектного импульса. В работе рассмотрена фазовая память в трехуровневой системе, связанная с соответствием изохромат неоднородно уширенных линий, подвергшихся возбуждению лазерным излучением на разных частотных переходах, имеющих один общий энергетический уровень, в разные моменты времени. Показано, что воздействие внешних пространственно-неоднородных электрических полей позволяет управлять такой фазовой памятью, что может быть использовано для определения оптимальных условий формирования стимулированного фотонного эха в трехуровневой системе.

**Ключевые слова:** стимулированное фотонное эхо, трехуровневая система, неоднородное уширение, фазовая память

### Введение

Формирование оптических переходных процессов в многоуровневых системах происходит при воздействии на вещество коротких лазерных импульсов, разнесенных во времени и резонансных разным частотным переходам, поэтому их взаимодействие друг с другом становится возможным лишь через среду и только в том случае, когда вещество обладает достаточно длинной фазовой памятью. В такой ситуации каждый лазерный импульс передает информацию о своих волновых характеристиках в среду, и эта информация сохраняется здесь до прихода следующих лазерных импульсов [1, 2]. В работах [3–6] было показано, что формирование оптических переходных процессов в многоуровневых системах в твердом теле существенно зависит от степени корреляции неоднородного уширения на разных частотных переходах и различных временных интервалах в связи с возможным разрушением обратимой фазовой памяти системы из-за частичной взаимной фиксации энергий переходов. Воздействие на резонансную среду внешних пространственно-неоднородных электрических полей может приводить к дополнительному искусственно созданному неоднородному уширению. В этом случае

возможно управление фазовой памятью системы путем изменения параметров внешних пространственно-неоднородных электрических полей, причем наиболее эффективным воздействием на фазовую память является случай лазерного возбуждения узких частотных областей неоднородно уширенных линий резонансных переходов. При этом искусственно созданное неоднородное уширение внешними пространственно-неоднородными электрическими полями за счет эффекта Штарка может быть сравнимым с разбросом частот за счет частичной взаимной фиксации энергий переходов, что приводит к частичному восстановлению когерентности многоуровневой системы [7, 8]. Такой эффект может приводить к увеличению интенсивности отклика стимулированного фотонного эха (СФЭ) в трехуровневой системе, что является противоположным эффекту запираания фотонного эха.

### Оптимальные условия увеличения интенсивности отклика СФЭ в трехуровневой системе

Энергии состояний и энергии переходов можно рассматривать как функции многих параметров  $f(x_1, \dots, x_n)$ . Область изменения параметров определяется функцией  $g(\Delta(x_1, \dots, x_n))$  распределения оптических центров по частотам, но даже монохроматическое возбуждение на уровень с энергией  $E(x_1, \dots, x_n)$  может не привести к выделению оптических центров одинакового типа, так как фиксация значения функции многих переменных не фиксирует значений аргументов, а накладывает лишь условие  $\Delta E_{ij}(x_1, \dots, x_n) = E_i(x_1, \dots, x_n) - E_j(x_1, \dots, x_n) = \hbar\omega_{ij}$ . При сравнении двух разных переходов параметры, оставшиеся не фиксированными на одном переходе, влияют на энергию другого перехода, поэтому возникает вопрос, при каких условиях это ограничение, накладываемое на переход  $i-j$ , фиксирует энергию перехода  $i-k$  или  $k-j$ . В свою очередь, от степени такой фиксации зависит степень сохранения когерентности в многоуровневой системе при возбуждении ее на разных переходах. На процесс формирования оптических переходных процессов влияют, в частности, релаксационные процессы. Понижение температуры образца позволяет увеличить время релаксации, что и используется при постановке экспериментов по наблюдению фотонного эха. Некоррелированность неоднородного уширения на различных резонансных переходах слабо зависит от температуры и влияет на интенсивность отклика СФЭ и при низких температурах. Ситуация по наблюдению отклика СФЭ в трехуровневой системе может быть изменена путем воздействия на трехуровневую среду пространственно-неоднородными электрическими полями. Рассмотрим формирование СФЭ: первый и второй возбуждающие лазерные импульсы воздействуют на переходе 1-2, а третий, считывающий, – на переходе 1-3. Будем считать, что спектральная область возбуждения неоднородно уширенной линии  $\varepsilon_{12}^{(1)*}(\Delta)$  определяется первым лазерным импульсом, а спектры второго и третьего импульсов перекрывают всю неоднородно уширенную линию. Для напряженности электрического поля отклика в этом случае получим [7]

$$E(t) \sim \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_V \varepsilon_{12}^{(1)*}(\Delta) \exp \left\{ i\Delta\Gamma \left[ (t - \tau_{12} - \tau_{23}) \left( 1 - \frac{\Delta'}{\Delta} m(\Gamma, x_1, \dots, x_n) + \frac{C'_S}{\Delta} \vec{\nabla} E(t) \vec{r} \right) - \frac{\tau_{12}}{\Gamma} \left( 1 + \frac{C_S}{\Delta} \vec{\nabla} E(\tau_{12}) \vec{r} \right) \right] \right\} g_1(\Delta) g_2(\Delta') d\Delta d\Delta' d\vec{r} \right],$$

где  $V$  – объем возбуждаемой части образца,  $\tau_{12}$  – временной интервал между первым и вторым возбуждающими импульсами,  $\tau_{23}$  – временной интервал между

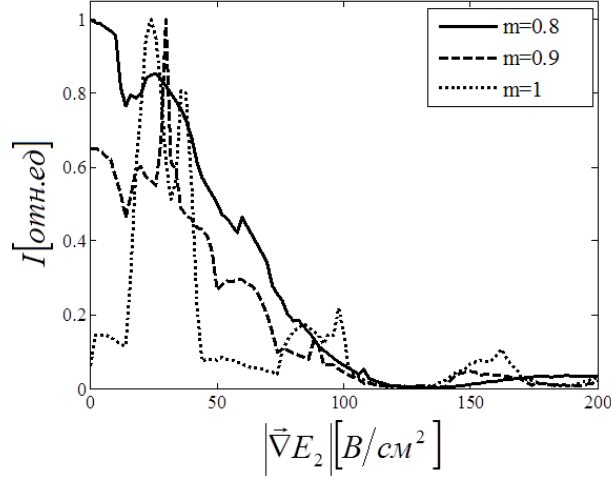


Рис. 1. Зависимость интенсивности отклика СФЭ, формируемого в трехуровневой системе от значения градиента электрического поля, накладываемого на образец на временном интервале между третьим возбуждающим импульсом и предполагаемым временем появления отклика СФЭ.  $\sigma' = 0.1 \text{ нс}^{-1}$ ,  $\Gamma = 1.26$ ,  $k = 0.1$ , размер образца  $L = 0.1 \text{ м}$ , ширина неоднородно уширенной линии на переходе 1-2  $\sigma = 5 \text{ нс}^{-1}$ ,  $C_S = 100 \text{ кГц}/(\text{В}/\text{см})$ ,  $C'_S = 100 \text{ кГц}/(\text{В}/\text{см})$ ,  $|\vec{\nabla}E_1| = 0 \text{ В}/\text{см}^2$ ,  $\tau_{12} = \tau_{23} = 50 \text{ нс}$

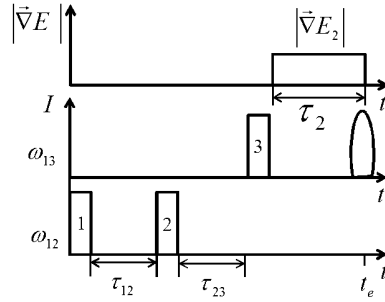


Рис. 2. Схема воздействия внешнего неоднородного электрического поля на систему трехуровневых оптических центров после третьего считывающего импульса

вторым возбуждающим и третьим считывающим импульсами. Распределение оптических центров по частотам  $g_1(\Delta)$  и  $g_2(\Delta')$  будем считать гауссовыми с дисперсиями  $\sigma_{12}^2$  и  $\sigma_{13}^2$  соответственно,  $\Gamma = \Omega_{13}/\Omega_{12}$  – параметр неэквидистантности спектра системы,  $m(\Gamma, x_1, \dots, x_n)$  определяет неодинаковость взаимодействия оптического электрона с локальным кристаллическим полем в разных состояниях,  $\lim_{\Gamma \rightarrow 1} m(\Gamma, x_1, \dots, x_n) = 0$ ,  $\Delta = \hbar^{-1}E_{12}(x_1, \dots, x_n) - \Omega_{12}$  – начальный частотный сдвиг отдельной изохроматы,  $\Omega_{12}$  – центральная частота неоднородно уширенной линии на переходе 1-2,  $\Delta'$  – дополнительный частотный сдвиг из-за частичной фиксации энергии перехода 1-2 относительно энергии перехода 1-3.  $C_S$ ,  $C'_S$  – штарковские постоянные на переходах 1-2 и 1-3 соответственно. В качестве резонансных переходов можно взять систему трехуровневых оптических центров с неэквидистантными уровнями  $|1\rangle$ ,  $|2\rangle$ ,  $|3\rangle$ , соответствующими уровням энергий ионов  $\text{Pr}^{3+}$  в матрице  $\text{LaF}_3$  в примесном кристалле  $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$  [9, 10]. Будем считать, что область возбуждения неоднородно уширенной линии первым лазер-

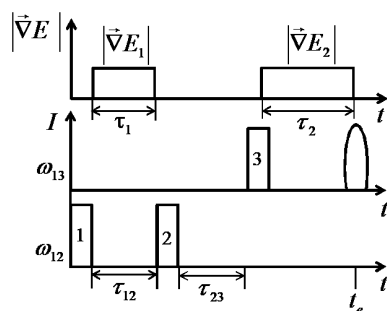


Рис. 3. Схема воздействия двух градиентов внешнего неоднородного электрического поля на систему трехуровневых оптических центров

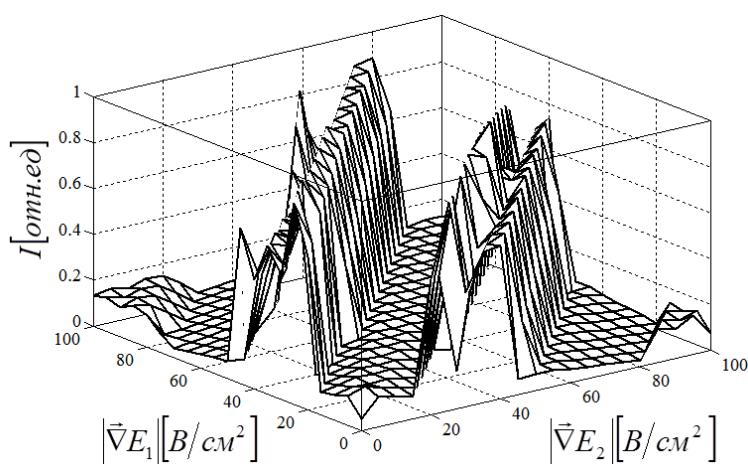


Рис. 4. Зависимость интенсивности отклика СФЭ, формируемого в трехуровневой системе, от значений градиентов электрических полей, накладываемых на образец, на временных интервалах между первым и вторым возбуждающими импульсами и между третьим возбуждающим импульсом и предполагаемым временем появления отклика СФЭ.  $\sigma' = 0.1 \text{ нс}^{-1}$ ,  $\Gamma = 1.26$ ,  $k = 0.1$ , размер образца  $L = 0.1 \text{ м}$ , ширина неоднородно уширенной линии на переходе 1–2  $\sigma = 5 \text{ нс}^{-1}$ ,  $C_S = 100 \text{ кГц/(В/см)}$ ,  $C'_S = 100 \text{ кГц/(В/см)}$ ,  $|\vec{\nabla}E_1| = 0 \text{ В/см}^2$ ,  $\tau_{12} = \tau_{23} = 50 \text{ нс}$

ным импульсом равна  $k'$ , где  $k < 1$ ,  $\sigma$  – ширина неоднородно уширенной линии.

На рис. 1 представлен результат теоретического исследования формирования откликов СФЭ в трехуровневой системе оптических центров при наложении внешнего градиентного электрического поля на временном интервале между третьим резонансным импульсом и предполагаемым временем появления отклика эха (рис. 2). В этом случае в области значений градиента пространственно-неоднородного электрического поля (20–40 В/см<sup>2</sup>) происходит увеличение интенсивности отклика СФЭ более чем в 10 раз по сравнению со случаем  $|\vec{\nabla}E_2| = 0 \text{ В/см}^2$  [8].

Далее рассматривался случай формирования откликов СФЭ в трехуровневой системе оптических центров при наложении внешних градиентных электрических поля на временных интервалах между первыми возбуждающими импульсами и между третьим резонансным импульсом и предполагаемым временем появления отклика эха (рис. 3), результат численного эксперимента приведен на рис. 4.

Анализ графика, представленного на рис. 4, показывает, что воздействие на трехуровневую резонансную среду внешних электрических полей на различных временных промежутках может приводить к увеличению интенсивности отклика СФЭ при небольших численных значениях градиентов полей, а также к эффекту запираания отклика СФЭ, что проявляется в уменьшении интенсивности отклика. Таким образом, при небольших значениях градиента пространственно-неоднородных электрических полей наблюдается эффект частичного восстановления когерентности в трехуровневой системе, разрушенной за счет частичной взаимной фиксации энергий переходов, что проявляется в увеличении интенсивности отклика СФЭ, причем наиболее эффективным воздействием на фазовую память является случай лазерного возбуждения узких частотных областей неоднородно уширенных линий резонансных переходов.

### Литература

1. *Нефедьев Л.А., Самарцев В.В.* Цветная эхо-голография // Оптика и спектроскопия. – 1987. – Т. 62, № 3. – С. 701–703.
2. *Nefediev L.A., Samartsev V.V.* The dynamic echo-hologram transformation in the three-level system // Phys. Status Solidi A. – 1985. – V. 88. – P. 631–635. – doi: 10.1002/pssa.2210880229.
3. *Нефедьев Л.А., Низамова Э.И., Тактаева С.В.* Влияние некоррелированности неоднородного уширения на формирование переходных оптических процессов в многоуровневых системах // Оптика и спектроскопия. – 2012. – Т. 113, № 2. – С. 156–161.
4. *Nefediev L.A., Sakhibieva A.R., Nizamova E.I.* Determination of optimum conditions for reproducing information in optical echo processors // J. Russ. Laser Res. – 2013. – V. 34, No 4. – P. 331–335. – doi: 10.1007/s10946-013-9358-3.
5. *Nefediev L.A., Nizamova E.I.* Formation of stimulated photon echo in three-level systems and recovery of phase memory by external spatially inhomogeneous electric fields // J. Appl. Spectrosc. – 2014. – V. 81, No 4. – P. 607–610. – doi: 10.1007/s10812-014-9977-7.
6. *Nefediev L.A., Nizamova E.I.* Conditions for using stimulated photon echo to record and reproduce information in three-level systems // J. Appl. Spectrosc. – 2016. – V. 82, No 6. – P. 936–940. – doi: 10.1007/s10812-016-0208-2.
7. *Nefediev L.A., Garnaeva G.I., Nizamova E.I.* Coherence restoring effect in the three-level system by spatially inhomogeneous electric field // Int. J. Adv. Res. Phys. Sci. – 2016. – V. 3, No 3. – P. 9–14.
8. *Низамова Э.И., Нефедьев Л.А., Гарнаева Г.И.* Эффект восстановления когерентности в трехуровневой системе пространственно-неоднородным электрическим полем // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия: Сб. статей / Под ред. М.Х. Салахова. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2016. – С. 122–126.
9. *Chen Y.C., Chiang K.P., Hartmann S.R.* Photon echo relaxation in  $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$  // Opt. Commun. – 1978. – V. 29, No 2. – P. 181–185. – doi: 10.1016/0030-4018(79)90012-9.
10. *Chen Y.C., Chiang K.P., Hartmann S.R.* Spectroscopic and relaxation character of the  $^3P_0 - ^3H_4$  transition in  $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$  by photon echoes // Phys. Rev. B. – 1980. – V. 21, No 1. – P. 40–47.

Поступила в редакцию  
05.10.17

**Низамова Эльмира Ильгамовна**, старший преподаватель кафедры образовательных технологий в физике

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: *enizamova@yandex.ru*

**Нефедьев Леонид Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры образовательных технологий в физике

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: *nefediev@yandex.ru*

**Гильманова Гульфина Айратовна**, студент Института физики

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: *gulфина.gilmanova2014@yandex.ru*

ISSN 2541-7746 (Print)

ISSN 2500-2198 (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.  
SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI  
(Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)

2018, vol. 160, no. 1, pp. 100–107

## Phase Memory of the Three-Level System in the Presence of External Spatially Inhomogeneous Electric Fields

*E.I. Nizamova\**, *L.A. Nefediev\*\**, *G.A. Gilmanova\*\*\**

*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

E-mail: *\*enizamova@yandex.ru*, *\*\*nefediev@yandex.ru*, *\*\*\*gulфина.gilmanova2014@yandex.ru*

Received October 5, 2017

### Abstract

The increasing interest in the study of the interaction of several resonant fields with multi-level quantum systems is due to a wide range of possible applications of various effects observed in the multi-frequency excitation of quantum objects. Among them, we can note color echo holography, information compression in three-level environments, copying of quantum information, and multi-level quantum gates that perform logical operations. In addition, the recording and reproduction of echo holograms in multi-level systems leads to the possibility, along with logical operations, to perform a change in the real-time scale and the sequence of events in the echo-hologram response, the data on which were embedded into the temporal structure of the object laser pulse. The formation of optical transient processes in multilevel systems occurs when the short laser pulses separated in time and resonant of different frequency transitions at the substance have an effect on the system, so that their interaction with each other becomes possible only through the medium and only if the medium has a sufficiently long phase memory. In this situation, each laser pulse transmits information about its wave characteristics to the medium, and this information is retained here until the arrival of the next laser pulses. The formation of optical transient processes in a multilevel system in a solid depends essentially on the degree of correlation of the inhomogeneous broadening on different frequency transitions and different time intervals, in connection with the possible destruction

of the reversible phase memory of the system due to a partial mutual fixation energies of transitions. The influence of external spatially inhomogeneous electric fields on the resonant medium can lead to an additional artificially created inhomogeneous broadening. In this case, it is possible to control the phase memory of the system by changing the parameters of external spatially inhomogeneous electric fields, and the most pronounced effect on phase memory is the case of laser excitation of narrow frequency regions of inhomogeneously broadened lines of the resonance transitions. Moreover, the artificially created inhomogeneous broadening by external spatially inhomogeneous electric fields due to the Stark effect can be comparable with the spread of frequencies due to a partial mutual fixation of the transition energies, which leads to a partial restoration of the coherence of the multilevel system. This effect can lead to an increase in the intensity of the response of the stimulated photon echo (SPE) in the three-level system, which is the opposite effect of photon echo locking.

**Keywords:** stimulated photon echo, three-level system, inhomogeneous broadening, phase memory

### Figure Captions

Fig. 1. The dependence of SPE response formed in the three-level system on the electric field gradient applied to the sample in the time interval between the third excitation pulse and the expected time of SPE response occurrence.  $\sigma' = 0.1 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\Gamma = 1.26$ ,  $k = 0.1$ , sample size  $L = 0.1 \text{ m}$ , inhomogeneously broadened line width at the 1–2 transition  $\sigma = 5 \text{ ns}^{-1}$ ,  $C_S = 100 \text{ kHz}/(\text{V}/\text{cm})$ ,  $C'_S = 100 \text{ kHz}/(\text{V}/\text{cm})$ ,  $|\vec{\nabla}E_1| = 0 \text{ V}/\text{cm}^2$ ,  $\tau_{12} = \tau_{23} = 50 \text{ ns}$ .

Fig. 2. The scheme showing the influence of external spatially inhomogeneous electric field on the system of three-level optical centers after the third scanning pulse.

Fig. 3. The scheme showing the interaction of two gradients of external spatially inhomogeneous electric field on the system of three-level optical centers.

Fig. 4. The dependence of the SPE response intensity formed in the three-level system on the gradients of electric fields applied to the sample in the time intervals between the first and second excitation pulse and the expected time of SPE response occurrence.  $\sigma' = 0.1 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\Gamma = 1.26$ ,  $k = 0.1$ , sample size  $L = 0.1 \text{ m}$ , inhomogeneously broadened line width at the 1–2 transition  $\sigma = 5 \text{ ns}^{-1}$ ,  $C_S = 100 \text{ kHz}/(\text{V}/\text{cm})$ ,  $C'_S = 100 \text{ kHz}/(\text{V}/\text{cm})$ ,  $|\vec{\nabla}E_1| = 0 \text{ V}/\text{cm}^2$ ,  $\tau_{12} = \tau_{23} = 50 \text{ ns}$ .

### References

1. Nefediev L.A., Samartsev V.V. Colored echo-holography. *Opt. Spektrosk.*, 1987, vol. 62, no. 3, pp. 701–703. (In Russian)
2. Nefediev L.A., Samartsev V.V. The dynamic echo-hologram transformation in the three-level systems. *Phys. Status Solidi A*, 1985, vol. 88, pp. 631–635. doi: 10.1002/pssa.2210880229.
3. Nefed'ev L.A., Nizamova E.I., Taktaeva S.V. The effect of uncorrelatedness of inhomogeneous broadening on the formation of transient optical processes in multilevel systems. *Opt. Spectrosc.*, 2012, vol. 113, no. 2, pp. 135–140. doi: 10.1134/S0030400X12080115.
4. Nefediev L.A., Sakhbieva A.R., Nizamova E.I. Determination of optimum conditions for reproducing information in optical echo processors. *J. Russ. Laser Res.*, 2013, vol. 34, no. 4, pp. 331–335. doi: 10.1007/s10946-013-9358-3.
5. Nefediev L.A., Nizamova E.I. Formation of stimulated photon echo in three-level systems and recovery of phase memory by external spatially inhomogeneous electric fields. *J. Appl. Spectrosc.*, 2014, vol. 81, no. 4, pp. 607–610. doi: 10.1007/s10812-014-9977-7.
6. Nefediev L.A., Nizamova E.I. Conditions for using stimulated photon echo to record and reproduce information in three-level systems. *J. Appl. Spectrosc.*, 2016, vol. 82, no. 6, pp. 936–940. doi: 10.1007/s10812-016-0208-2.

7. Nefediev L.A., Garnaeva G.I., Nizamova E.I. Coherence restoring effect in the three-level system by spatially inhomogeneous electric field. *Int. J. Adv. Res. Phys. Sci.*, 2016, vol. 3, no. 3, pp. 9–14.
8. Nizamova E.I., Nefediev L.A., Garnaeva G.I. The effect of coherence recovery in the three-level system by spatially inhomogeneous electric field. In: Salakhov M.Kh. (Ed.) *Kogerentnaya optika i opticheskaya spektrosopiya: Sb. statei* [Coherent Optics and Optical Spectroscopy: Collection of Papers]. Kazan, Izd. Kazan. Univ., 2016, pp. 122–126. (In Russian)
9. Chen Y.C., Chiang K.P., Hartmann S.R. Photon echo relaxation in  $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$ . *Opt. Commun.*, 1978, vol. 29, no. 2, pp. 181–185. doi: 10.1016/0030-4018(79)90012-9.
10. Chen Y.C., Chiang K.P., Hartmann S.R. Spectroscopic and relaxation character of the  ${}^3\text{P}_0\text{--}{}^3\text{H}_4$  transition in  $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$  by photon echoes. *Phys. Rev. B*, 1980, vol. 21, no. 1, pp. 40–47.

---

**Для цитирования:** Низамова Э.И., Неведьев Л.А., Гильманова Г.А. Фазовая память трехуровневой системы при наличии внешних пространственно-неоднородных электрических полей // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 1. – С. 100–107.

**For citation:** Nizamova E.I., Nefediev L.A., Gilmanova G.A. Phase memory of the three-level system in the presence of external spatially inhomogeneous electric fields. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2018, vol. 160, no. 1, pp. 100–107. (In Russian)