

УПРАВЛЕНИЕ ЛОГИЧЕСКИМИ ОПЕРАЦИЯМИ С ИЗОБРАЖЕНИЯМИ В АККУМУЛИРОВАННОЙ ЭХО-ГОЛОГРАФИИ ВНЕШНИМИ ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ

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

УДК 535.2;621.373.8

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008, Казань, Россия; e-mail: guzka-1@yandex.ru

(Поступила 13 ноября 2020)

Рассмотрена реализация логических операций для изображений с использованием аккумулярованной эхо-голограммы при наличии внешних пространственно-неоднородных электрических полей. Показано, что эффект запираания фотонного эха позволяет осуществлять управление видом логических операций путем варьирования градиентами внешних пространственно-неоднородных электрических полей — от объединения множеств до симметрической разности и их суперпозиции.

Ключевые слова: логическая операция, эхо-голография, эффективность запираания, симметрическая разность, объединение множеств.

The realization of logical operations for images using an accumulated echo hologram in the presence of external spatially inhomogeneous electric fields is considered. It is shown that the photon echo locking effect allows controlling the type of logical operations (from uniting the sets to their symmetric difference and superposition) by varying the values of gradients of external spatially inhomogeneous electric fields.

Keywords: logical operation, echo-holography, locking efficiency, symmetric difference, set combination.

Введение. Оптические методы обработки информации основаны на преобразовании пространственно-модулированных оптических сигналов в оптических устройствах и системах на принципах как геометрической, так и волновой оптики. Обработка информации означает преобразование, анализ и синтез многомерных функций, описывающих свойства и состояние объектов. Оптическая обработка информации осуществляется в оптическом процессоре — аналоговом оптическом или оптоэлектронном устройстве, определенным образом изменяющем амплитуду и фазу пространственно-модулированного оптического сигнала, содержащего информацию об объекте. Основные достоинства систем оптической обработки информации — большая информационная емкость, многоканальность (большое количество параллельно обрабатываемых каналов), высокое быстродействие, многофункциональность (интегральные преобразования Фурье, Френеля, Гильберта и др., вычисление двумерных сверток, корреляции и т. д.).

Современное состояние исследований по оптической обработке информации демонстрирует возможности по созданию быстродействующих оптических процессоров, работающих как с цифровой, так и с аналоговой информацией, которые в ряде случаев по эффективности превышают электронные процессоры. В настоящее время ведутся разработки оптических эхо-процессоров. В 2003 г. Lenslet создала первый в мире оптический процессор EnLight256 (причем не демонстрационную модель, а коммерческий продукт) с производительностью 8 тераоп (триллионов арифметических операций в секунду). Операции выполнялись за счет манипуляции потока света, а не электронов, поэтому достигалась такая производительность [1].

CONTROL OF LOGICAL OPERATIONS WITH IMAGES IN THE ACCUMULATED ECHO-HOLOGRAPHY BY EXTERNAL SPATIALLY INHOMOGENEOUS ELECTRIC FIELDS

G. I. Garnaeva*, L. A. Nefediev, E. I. Nizamova (Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, 420008, Russia; e-mail: guzka-1@yandex.ru, nefediev@yandex.ru, enizamova@yandex.ru)

В ряде работ продемонстрирована обработка аналоговых сигналов, представленных амплитудно-временной формой [2—4] или волновым фронтом [5—9] оптического излучения, поступающего на вход процессора. Известны работы по обработке на оптическом эхо-процессоре цифровой информации. Логические “0” и “1” представлены двумя фиксированными значениями параметров оптических импульсов (амплитуды, направления вектора поляризации, волнового фронта [10—14]). Каждое цифровое значение записывается на соответствующем участке неоднородно уширенной спектральной линии или на определенном временном интервале кодового сигнала.

Наибольшую популярность в последние годы приобрели когерентные оптические методы обработки информации. Особый интерес представляет эхо-голографический процессор (ЭГП), который относится к классу многофункциональных аналоговых устройств. Благодаря наличию управляющих сигналов его импульсную характеристику можно программировать в реальном масштабе времени и получать различные виды обработки — от простого запоминания до интегральных преобразований [15].

Использование оптических эхо-голограмм позволяет записывать, воспроизводить и преобразовывать изображения. Так как изображения представляют собой множество точек, для их преобразования подходят логические операции с множествами. В [16] рассмотрена реализация логических операций над множествами, представленными в виде изображений, посредством стимулированной эхо-голограммы. Стимулированная эхо-голограмма может быть использована для реализации логической операции пересечения множеств. В [17] рассмотрена реализация операции объединения над множествами, представленными в виде изображений, с помощью режима аккумулятивной долгоживущей эхо-голограммы (АДЭГ). В зависимости от разности фаз между возбуждающими парами лазерных импульсов в АДЭГ возможно осуществление логических операций объединения множеств, симметрической разности и их суперпозиции [18].

В настоящей работе рассмотрена реализация ряда логических операций над изображениями с использованием АДЭГ. Для управления этими операциями наиболее перспективен эффект “запирания” эхо-голографической информации — создание таких условий, при которых записанная информация не может (или может частично) проявиться в виде отклика резонансной среды, что осуществляется путем нарушения частотно-временной корреляции неоднородного уширения резонансной линии на разных временных интервалах. Частотно-временная корреляция неоднородно уширенной линии резонансного перехода связана с жестким соответствием отдельных монохромат неоднородно уширенной линии резонансного перехода на разных временных интервалах. Каждая монохромат неоднородно уширенной линии образуется совокупностью атомов (молекул, ионов), находящихся в одинаковых условиях (например, локальные поля в твердом теле), но распределенных в объеме образца случайным образом. Процесс формирования откликов фотонного эха состоит из двух основных этапов: расфазирования осциллирующих дипольных моментов оптических центров и последующего их сфазирования, приводящего к возникновению макроскопической поляризации среды в виде конкретного отклика. Вследствие этого даже незначительное нарушение жесткой частотно-временной корреляции неоднородного уширения должно приводить к значительному ослаблению интенсивности отклика. Другими словами, имеет место обратимое разрушение фазовой памяти резонансной среды с возможностью ее восстановления. Такого эффекта можно достичь воздействием на резонансную среду на разных временных интервалах различными пространственно-неоднородными внешними возмущениями, приводящими к случайным сдвигам или расщеплениям исходных монохромат неоднородно уширенной линии.

В работе [19] теоретически предсказан и экспериментально подтвержден эффект запирания долгоживущего фотонного эха (ДФЭ) в кристалле $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$ (переход $^3H_4 \rightarrow ^3P_0$, $\lambda = 477.7$ нм) при воздействии на временном интервале между первым и вторым лазерными импульсами пространственно-неоднородного электрического поля, а также исследована эффективность подавления отклика стимулированного фотонного эха (СФЭ) при различных схемах воздействия на резонансную среду пространственно-неоднородных электрических полей.

Другой эффект, позволяющий управлять логическими операциями с изображениями, — метод стирания информации Элмана [20], представляющий собой развитие предложенного Н. Н. Ахмедиевым [21] способа. Он состоит в облучении образца считанным из него же кодом, фаза и амплитуда которого подобраны так, чтобы результирующий сигнал был нулевым. Метод не зависит от долговременной фазовой и частотной аппаратной нестабильности.

Поскольку отклик АДЭГ является суперпозицией откликов ДФЭ от N пар импульсов (со считывающим импульсом), то вклад в него от каждой пары возбуждающих импульсов становится разным

(зависящим от градиентов внешних пространственно-неоднородных электрических полей и их взаимной ориентации, а также от фазовых соотношений между парами возбуждающих импульсов), что дает возможность управления логическими операциями с использованием АДЭГ.

Основные уравнения. Рассмотрим эффективность “запираия” и воспроизведения изображений в режиме АДЭГ (две пары возбуждающих импульсов) при воздействии внешних пространственно-неоднородных электрических полей на временных интервалах между парами возбуждающих резонансных лазерных импульсов (рис. 1).

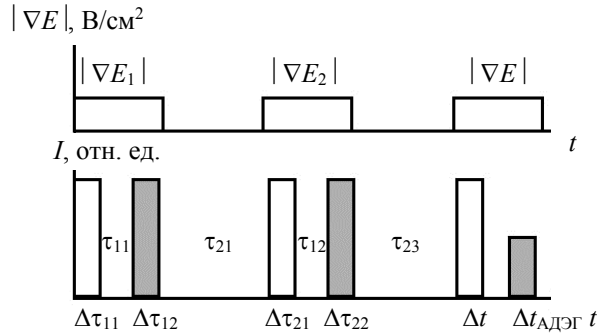


Рис. 1. Последовательность возбуждающих импульсов и импульсов пространственно-неоднородных электрических полей при формировании откликов АДЭГ: $\Delta t_i = \Delta t_{2i} = \Delta t$, $\tau_{11} = \tau_{12} = \tau_{13} = \tau_1$, $\tau_2 \approx \tau_{21} + \tau_{22} + \tau_{23} + 2\tau_1$; $\tau_1 \ll T_2$, $\tau_2 \ll T_1$; T_1 и T_2 — времена продольной и поперечной необратимой релаксации резонансной системы

Напряженность электрического поля η -го возбуждающего лазерного импульса, прошедшего через соответствующий транспарант с изображением:

$$E_\eta(\mathbf{r}, t) = U_\eta(\mathbf{r})e^{i\omega t} + \text{к.с.}, \quad 0 \leq t \leq \Delta t_\eta, \quad (1)$$

где Δt_η — длительность η -го возбуждающего лазерного импульса; $U_\eta(\mathbf{r})$ описывает пространственную структуру η -го возбуждающего лазерного импульса.

Изображение на транспаранте рассматриваем как совокупность точек с радиус-векторами $\mathbf{r}_n$. Каждая точка излучает сферическую волну. Совокупность волн в месте нахождения j -го оптического центра в образце с радиус-вектором $\mathbf{r}_{0j}$ дает величину возмущения резонансного перехода оптического центра. Тогда напряженность электрического поля объектного лазерного импульса в точке $\mathbf{r}_{0j}$ можно записать как разложение по сферическим волнам:

$$E_j = \sum_n A_{nj} \frac{e^{ik^{(j)}_n(\mathbf{r}_{0j} - \mathbf{r}_n) - i\omega t + i\varphi_n}}{|\mathbf{r}_{0j} - \mathbf{r}_n|}, \quad (2)$$

где $\mathbf{k}_n^{(j)} = (\omega/c)\mathbf{n}_n$, $\mathbf{n}_n = (\mathbf{r}_{0j} - \mathbf{r}_n)/|\mathbf{r}_{0j} - \mathbf{r}_n|$, φ_n — начальные фазы сферических волн, причем $e^{i\varphi_n}$ можно включить в комплексные амплитуды A_{nj} . Если $|\mathbf{r}_{0j} - \mathbf{r}_n|$ значительно больше размеров образца, то разложение (2) по сферическим волнам переходит в разложение по плоским волнам:

$$E_j = \sum_n \varepsilon_n e^{i\mathbf{k}_n \mathbf{r}_{0j} - i\omega t}, \quad (3)$$

где ε_n — амплитуды напряженности электрического поля плоских волн от отдельных точек объекта.

Поскольку один из каждой пары возбуждающих лазерных импульсов является носителем изображения, то пространственный фазовый синхронизм при формировании отклика АДЭГ описывается формулой:

$$\mathbf{k}_{en}^{(j)} = -\mathbf{k}_{1n'}^{(j)} + \mathbf{k}_{2n''}^{(j)} + \mathbf{k}_{3n'''}^{(j)}, \quad (4)$$

где $\mathbf{k}_{in}^{(j)}$ — волновые векторы плоских волн пространственного разложения волновых фронтов объектных лазерных импульсов для каждой j -й пары.

Необходимо отметить, что в отклике АДЭГ будут существовать только те компоненты разложения поля отклика, для которых оказываются ненулевыми амплитуды разложения полей возбуждающих импульсов, соответствующие направлениям волновых векторов. Импульсы, не несущие изображений, должны формироваться транспарантами с матовой структурой для создания достаточного набора плоских (сферических) волн, необходимых для выполнения пространственного фазового синхронизма. Аналогично [17, 22] пространственная структура отклика АДЭГ определяется как

$$E_{\text{АФЭ}} \sim \sum_{j=1}^n \mathbf{E}_j(t, \mathbf{R}) e^{i\Delta\phi_j}, \quad (5)$$

$$E_j \approx \frac{1}{V} \sum_{n', n'', n'''} \int dV \int_{-\infty}^{\infty} g(\Delta) d\Delta \sin \theta_1^{(j)} \sin \theta_2^{(j)} \sin \theta_3^{(j)} \times \\ \times \frac{\varepsilon_{1n'}^{*(j)} \varepsilon_{2n''}^{(j)} \varepsilon_{3n'''}^{(j)}}{\left| \sum_{n'} \varepsilon_{1n'}^{*(j)} e^{-i\mathbf{k}_{1n'}^{(j)} \cdot \mathbf{r}} \right| \left| \sum_{n''} \varepsilon_{2n''}^{(j)} e^{i\mathbf{k}_{2n''}^{(j)} \cdot \mathbf{r}} \right| \left| \sum_{n'''} \varepsilon_{3n'''} e^{-i\mathbf{k}_{3n'''}^{(j)} \cdot \mathbf{r}} \right|} e^{-i(\mathbf{k}_{0n}^{(j)} + \mathbf{k}_{1n'}^{(j)} - \mathbf{k}_{2n''}^{(j)} - \mathbf{k}_{3n'''}^{(j)}) \cdot \mathbf{r}} \exp\{i[\tau_1 f_j(\Delta, \mathbf{r}) - (t - \tau_1 - \tau_2) f(\Delta, \mathbf{r})]\},$$

где $\theta_1^{(j)}$ и $\theta_2^{(j)}$ — площадь первого и второго импульсов в j -й паре; θ_3 — площадь считывающего импульса; V — объем возбуждаемой части образца; $g(\Delta)$ — распределение оптических центров по частотам; $\Delta = \omega - \Omega_0$, ω — частота лазерного излучения, Ω_0 — частота резонансного перехода; $\varepsilon_{in}^{(j)}$ — амплитуды напряженности электрических полей плоских волн пространственного разложения волновых фронтов объектных лазерных импульсов в каждой j -й паре; $\Delta\phi_j$ — фаза j -й пары; $f_{\eta}(\Delta, \mathbf{r}) = \Delta + \chi_{\eta}(\mathbf{r})$, $\chi_{\eta}(\mathbf{r})$ — дополнительный частотный сдвиг оптического центра на временном интервале τ_{η} , причем в случае линейного эффекта Штарка $\chi_{\eta}(\mathbf{r}) = C_{\text{sh}}(E_i + \nabla E \cdot \mathbf{r})$, в случае квадратичного эффекта Штарка $\chi(\mathbf{r}) = C_{\text{sh}}(E_i + \nabla E \cdot \mathbf{r})^2$, C_{sh} — штарковский коэффициент; E_i — напряженность электрического поля при $\mathbf{r} = 0$.

Управление логическими операциями с изображениями пространственно-неоднородными электрическими полями. На рис. 1 приведены последовательность возбуждающих импульсов, используемая при реализации логических операций симметрическая разность и объединение множеств и логических операций, являющихся их суперпозицией, при наличии внешних пространственно-неоднородных электрических полей. Такое возбуждение АДЭГ можно осуществить в кристалле $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$, где временной интервал между импульсами в парах может составлять десятки наносекунд, а временные интервалы между парами и между последней записывающей парой и считывающим импульсом могут достигать десятков минут при гелиевых температурах кристалла.

Численный расчет отклика АДЭГ с использованием выражения (5) будет содержать изображение, которое формируется из изображений, заложенных в возбуждающие лазерные импульсы, в зависимости от градиентов пространственно-неоднородных электрических полей, что приводит к реализации соответствующих логических операций.

Объединением множеств A и B называется множество, состоящее из элементов, которые принадлежат хотя бы одному из множеств A, B .

Симметрической разностью множеств A и B называется множество, элементы которого принадлежат либо только множеству A , либо только B .

Для иллюстрации логических операций в режиме АДЭГ в качестве множеств A и B взяты транспаранты с изображениями в виде регионов эллиптической формы.

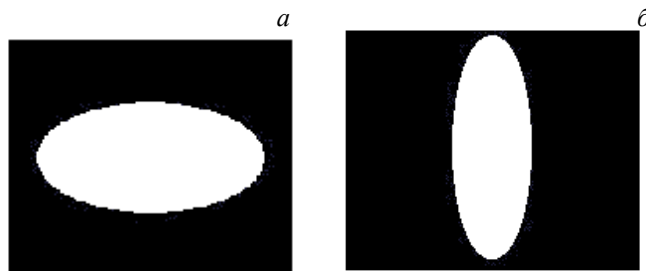


Рис. 2. Транспаранты множеств A (а) и B (б)

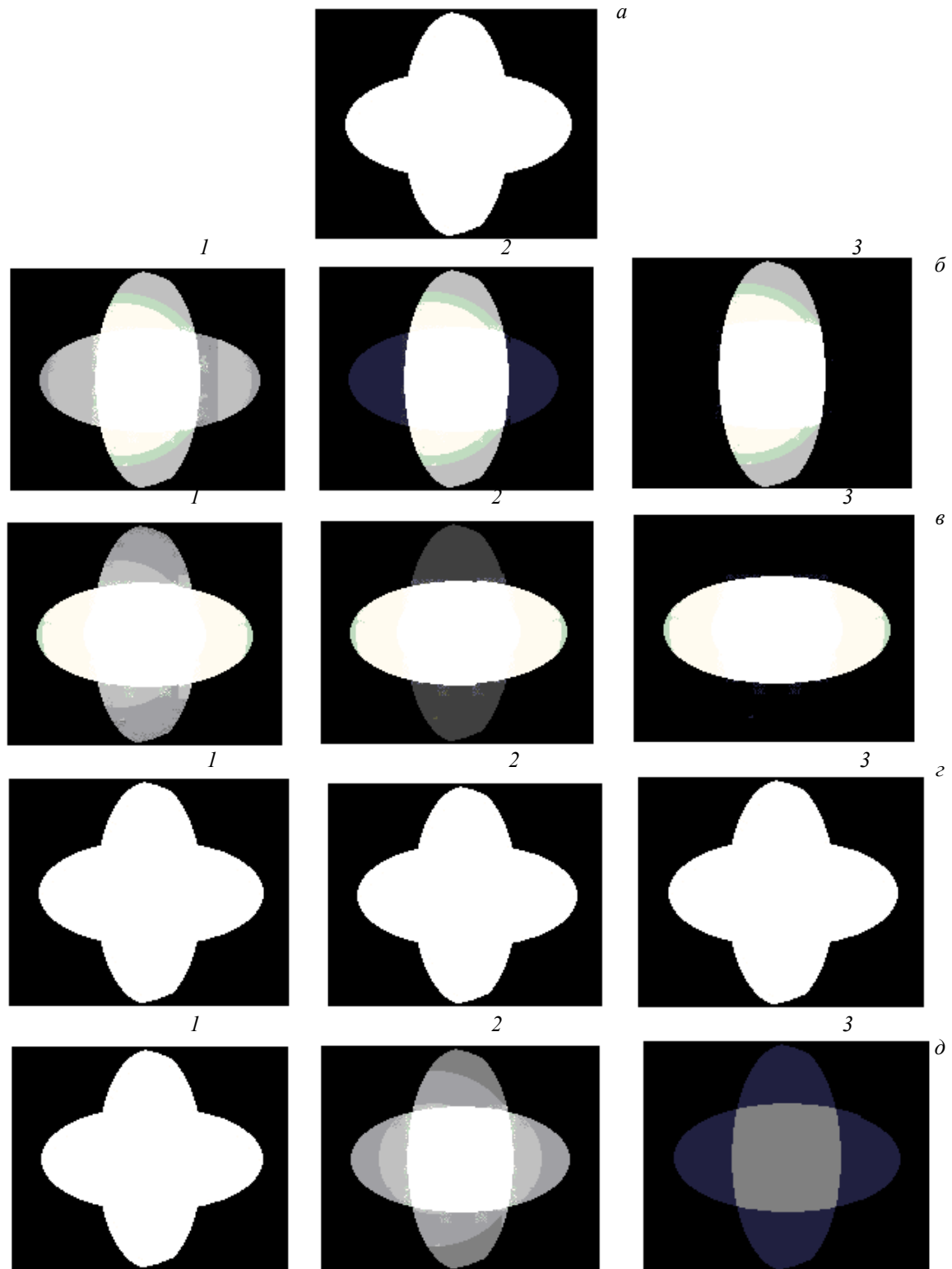


Рис. 3. Изображение в отклике АДЭГ: *а* — при $\nabla E_1 = \nabla E_2 = \nabla E_3 = \nabla E = 0$, *б* — $\nabla E_2 = \nabla E_3 = \nabla E = 0$ при $\nabla E_1 = 50$ (1), 100 (2) и 140 В/см^2 (3), *в* — $\nabla E_1 = \nabla E_3 = \nabla E = 0$ при $\nabla E_2 = 50$ (1), 100 (2) и 140 В/см^2 (3), *г* — $\nabla E_1 = \nabla E_2 = \nabla E = 0$ при $\nabla E_3 = 50$ (1), 100 (2) и 140 В/см^2 (3) и *д* — $\nabla E_1 = \nabla E_2 = \nabla E_3 = 0$ при $\nabla E = 0$ (1), 60 (2) и 120 В/см^2 (3)

На рис. 3 представлены изображения, полученные в отклике АДЭГ в случае, когда в каждую пару импульсов (рис. 1) закладывается соответствующее изображение, а также изменяется разность фаз у возбуждающих пар лазерных импульсов и градиенты внешних пространственно-неоднородных электрических полей.

Полученные отклики в режиме аккумулятивной долгоживущей эхо-голограммы содержат изображения, являющиеся результатом логических операций объединения множеств при нулевых градиентах внешних пространственно-неоднородных электрических полей и симметрической разности при достаточной величине градиента. При других градиентах наблюдается суперпозиция этих логических операций.

Заключение. Рассмотрена реализация и управление логическими операциями с изображениями с использованием аккумулятивной долгоживущей эхо-голограммы при наличии пространственно-неоднородных электрических полей. Показано осуществление ряда логических операций с изображениями. Реализация логических операций над изображениями может быть использована при создании эхо-голографического процессора, обработке изображений, изменении их контрастности, наложении изображений друг на друга.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

- [1] В. Г. Беспалов. Основы оптоинформатики, Санкт-Петербург, СПбГУ ИТМО (2006)
- [2] В. А. Зуйков, В. В. Самарцев, Р. Г. Усманов. Письма в ЖЭТФ, **32**, № 4 (1980) 293—297
- [3] N. W. Carlson, L. T. Rothberg, A. G. Yodh, W. R. Babbitt, T. W. Mossberg. Opt. Lett., **8**, N 9 (1983) 438—485
- [4] Л. С. Василенко, Н. Н. Рубцова. Опт. и спектр., **59**, № 1 (1985) 52—56
- [5] N. W. Carlson, W. R. Babbitt, T. W. Mossberg. Opt. Lett., **8**, N 12 (1983) 623—625
- [6] M. Mitsunaga, R. Yano, N. Uesugi. Opt. Lett., **16** (1991) 1890
- [7] H. Lin, T. Wang, T. W. Mossberg. Opt. Lett., **20** (1995) 91
- [8] I. I. Popov, I. S. Bikbov, I. V. Yevseyev, V. A. Reshetov, V. V. Samartsev. Laser Phys., **1**, N 1 (1991) 126—127
- [9] S. Kroll, U. Elman. Opt. Lett., **18** (1993) 1834
- [10] V. A. Zuikov, V. V. Samartsev. Laser Phys., **1** (1991) 542
- [11] E. Y. Xu, S. Kröll, D. L. Huestis, R. Kachru, M. K. Kim. Opt. Lett., **15** (1990) 562
- [12] Н. Н. Ахмедиев, В. А. Зуйков, В. В. Самарцев, Б. С. Борисов, М. Ф. Стельмах, А. А. Фоми-
чев, М. А. Якшин. Письма в ЖЭТФ, **45**, № 3 (1987) 122—125
- [13] В. А. Зуйков, В. В. Самарцев, Е. А. Турьянский. ЖЭТФ, **81**, № 2 (1981) 653—663
- [14] В. А. Зуйков, Д. Ф. Гайнуллин, В. В. Самарцев, М. Ф. Стельмах, М. А. Юфин, М. А. Якшин. Квант. электрон., **18** (1991) 525
- [15] А. А. Калачев, В. В. Самарцев. Фотонное эхо и его применение, Казань, КГУ (1998) 150
- [16] А. Р. Сахбиева, Л. А. Неведьев, Г. И. Гарнаева. Журн. прикл. спектр., **84** № 3 (2017) 499—503
[A. R. Sakhbieva, L. A. Nefed'ev, G. I. Garnaeva. J. Appl. Spectr., **84**, N 3 (2017) 512—516]
- [17] A. R. Sakhbieva, L. A. Nefediev, Y. A. Nefedyev, E. N. Akhmedshina, A. O. Andreev. J. Phys.: Conf. Ser., **1283**, N 1 (2019) 012011
- [18] Е. Н. Ахмедшина, А. Р. Сахбиева, Л. А. Неведьев. Журн. прикл. спектр., **87**, N 4 (2020) 653—657 [E. N. Ahmedshina, A. R. Sakhbieva, L. A. Nefediev. J. Appl. Spectr., **87** (2020)]
- [19] А. А. Калачев, Л. А. Неведьев, В. А. Зуйков, В. В. Самарцев. Опт. и спектр., **84**, N 5 (1998) 811—815
- [20] U. Elman, Luo Baozhu, S. Kroll. J. Opt. Soc. Am. B, **13**, N 9 (1996) 1905—1913
- [21] N. N. Akhmediev. Opt. Lett., **15** (1990) 1035
- [22] G. I. Garnaeva, E. I. Hakimzyanova, L. A. Nefediev, K. L. Nefedieva. Opt. Spectr., **117**, N 2 (2014) 270—275