

К. т. н. А. Ю. ЛИПИНСКИЙ, к. т. н. А. Н. РУДЯКОВА,  
д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ

УДК 004.31:004.22:534:621.382

Украина, Донецкий национальный университет  
E-mail: krf@dongu.donetsk.ua

Дата поступления в редакцию  
01.08 2011 г.

## ФОТОРЕФРАКТИВНЫЕ КРИСТАЛЛЫ В ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРОЦЕССОРОВ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ТИПА

*Рассмотрены голографические корреляторы совместного преобразования, обеспечивающие инвариантность к сдвиговым искажениям, динамический голографический коррелятор, акустооптические корреляционные процессоры с памятью.*

Оптические корреляторы являются эффективными устройствами для распознавания образов благодаря быстрдействию, обусловленному параллельностью обработки больших массивов информации. Они могут быть использованы в системах машинного зрения, устройствах слежения за объектами, системах доступа и безопасности [1].

Для решения большинства задач корреляционного анализа применяются два способа выполнения операции свертки в оптических вычислительных устройствах. Возможно выполнение свертки как в области пространственных частот (Фурье-свертка), так и во временной области (так называемая временная свертка) [2]. Однако независимо от выбранного способа информация об одном из сравниваемых сигналов должна сохраняться в запоминающем устройстве [3], в качестве которого целесообразно выбрать голографическую среду с малыми постоянными времени формирования и распада голограммы. В качестве таких сред наиболее часто используются фоторефрактивные кристаллы [4–6]. В [7, 8] рассмотрены возможности применения кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  для решения задач записи, хранения, преобразования информации.

В настоящей работе представлен обзор оптических и акустооптических процессоров корреляционного типа, использующих фоторефрактивные кристаллы. Рассмотрены голографические корреляторы совместного преобразования, обеспечивающие инвариантность к сдвиговым искажениям, динамический голографический коррелятор, акустооптические корреляционные процессоры с памятью.

### **Инвариантный к сдвигу фоторефрактивный коррелятор совместного преобразования на кристаллических пластинах $\text{Fe:LiNbO}_3$**

Коррелятор совместного преобразования является одним из наиболее широко изученных устройств, выполняющих корреляцию оптических изображений [9, 10]. Для работы в режиме реального времени это

устройство удобнее всего использовать в комбинации с фоторефрактивными кристаллами. В литературе представлено множество таких оптических корреляторов изображений, использующих как пространственные модуляторы света, так и фоторефрактивные кристаллы в Фурье-области [11, 12]. Хотя технологии пространственных модуляторов света существенно продвинулись вперед, разрешение таких устройств до сих пор остается недостаточным по сравнению с фоторефрактивными кристаллами, способными работать в режиме реального времени. При этом некоторые фоторефрактивные материалы, такие как силлениты и сложные полупроводники, обладают значительной чувствительностью к интенсивности падающего света. С другой стороны, из-за Брэгговской природы дифракции в случае объемной голограммы оптические корреляторы на основе фоторефрактивных кристаллов имеют узкое поле зрения, что является причиной низкой инвариантности к сдвигу.

Экспериментальная установка инвариантного к сдвигу фоторефрактивного коррелятора совместного преобразования [1] приведена на рис. 1. Луч лазера (с длиной волны  $\lambda=514,5$  нм) необыкновенной поляризации после коллиматора разделяется на два. Лучи расширяются (до приблизительно 9 мм в диаметре) и каждый пространственно модулируется транспарантом с изображением. Изображение объекта содержит две строки символов — UCSB и OPTICS. Опорное изображение — это буква С. Высота букв составляет 1,5 мм. Эти два транспаранта расположены в фокальных плоскостях линз, выполняющих преобразование Фурье, с фокусным расстоянием 150 мм. Угол между объектным и опорным лучами составляет около  $17^\circ$ . Сильнолегированный тонкий фоторефрактивный кристалл  $\text{Fe:LiNbO}_3$  расположен в задней фокальной плоскости линз, выполняющих преобразование. Образец кристалла толщиной 48 мкм, полированный с двух сторон, присоединяется к стеклянной подложке оптическим клеем.

Через фоторефрактивную решетку кристалла проходит коллимированный пучок лучей, распространяющийся навстречу опорному лучу. Корреляционный сигнал через светоделиватель регистрируется фоточувствительной или фотодетектором, которые могут быть установлены вместо экрана. Автокорреляция изображения буквы С дает сигнал более сильный, чем сигнал

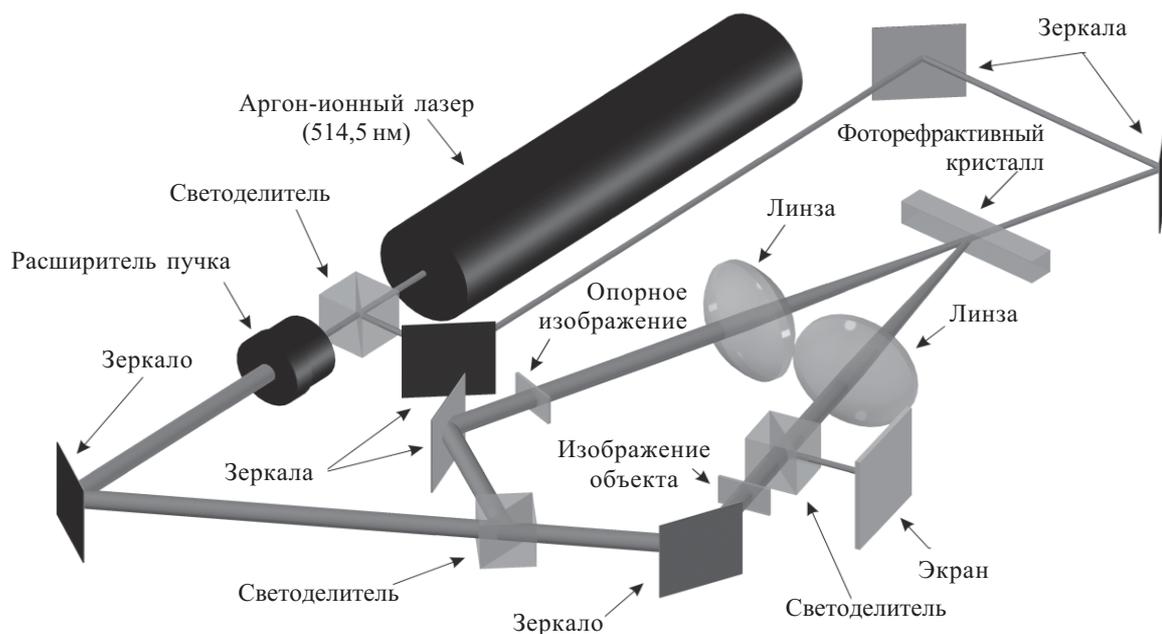


Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной установки инвариантного к сдвигу фоторефрактивного коррелятора совместного преобразования на кристаллических пластинах  $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$  [1]

взаимной корреляции букв O и S, который дает вторичные пики.

В [1] проводилось тестирование свойств инвариантности к сдвигу коррелятора. Опорное изображение перемещали по горизонтали. Корреляция наблюдалась по всей апертуре кристалла шириной 9 мм. Далее тонкий образец (48 мкм) кристалла  $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$  заменяли толстым (1 мм) кристаллом  $\text{Rd}:\text{SBN}$ . При этом размер области, где проявляется инвариантность к сдвигу, снизился примерно с 7 до 0,4 мм. Таким образом, было установлено, что при использовании тонкого кристалла свойства сдвиговой инвариантности коррелятора совместного преобразования примерно в 20 раз лучше, чем при использовании толстого фоторефрактивного кристалла. Дифракционная эффективность 48-мкм кристалла составила около 3% по сравнению с 34% для 1-мм SBN-кристалла. Значительное повышение сдвиговой инвариантности для тонкого кристалла сопровождалось понижением эффективности дифракции, которое может быть частично компенсировано использованием высокочувствительных детектирующих устройств, таких как ПЗС-фотокамера. Также эффективность дифракции может быть повышена выбором соответствующего кристалла и степенью его легирования. Время отклика для кристалла  $\text{LiNbO}_3$  в общем случае является небольшим. Однако из-за повышения квантовой эффективности, которое является результатом сильного легирования, было получено время отклика 400 мс при интенсивности записывающего луча  $2 \text{ Вт}/\text{см}^2$ .

#### Динамический голографический коррелятор совместного преобразования Фурье на основе кристалла $\text{CdF}_2:\text{Ga}$

На рис. 2 приведена оптическая схема предложенного в [13] коррелятора на основе кристалла  $\text{CdF}_2:\text{Ga}$ . В соответствии со схемой, в корреляторе сформиро-

ваны оптические каналы записи и считывания. Канал записи состоит из расширителя светового пучка, транспарантов с изображениями эталонного  $r(x, y)$  и анализируемого объектов. Собирающая линза (фокусное расстояние  $f_{10}=600 \text{ мм}$ ) выполняет преобразование Фурье изображения транспаранта. Отрицательная линза (фокусное расстояние 150 мм) уменьшает угол сведения пучков от объектов  $r(x, y)$  и  $s(x, y)$ , в результате чего интерференционная картина, сформированная в частотной плоскости коррелятора, записывается в виде голограммы, которая представляет собой фильтр пространственных частот для сигнала изображения в кристалле  $\text{CdF}_2:\text{Ga}$ . Плоский волновой фронт, сформированный в канале считывания, поступает на фоторефрактивный кристалл в направлении, противоположном направлению записывающих пучков, и восстанавливает записанную голограмму. Далее оптический клин направляет дифрагированный пучок на линзу с фокусным расстоянием 200 мм, где производится второе преобразование Фурье, а результат корреляции регистрируется при помощи CCD-камеры с форматом  $768 \times 576$  пикселей и 256 градациями серого.

Режимы записи-считывания разделены во времени при помощи управляемых механических затворов таким образом, что частотная плоскость коррелятора освещается пучками записи-считывания в зависимости от времени распада голограмм, что позволяет проводить процедуру корреляции при переключении канала с частотой 0,1—1 Гц.

Коррелятор работает с двоичными и полутоновыми амплитудными транспарантами ( $24 \times 36 \text{ мм}$ , разрешение 25 пиксел/мм) в виде непрозрачного поля с пропускающими изображениями сравниваемых объектов.

Отличие оптической схемы рассматриваемого устройства от стандартной схемы коррелятора состо-

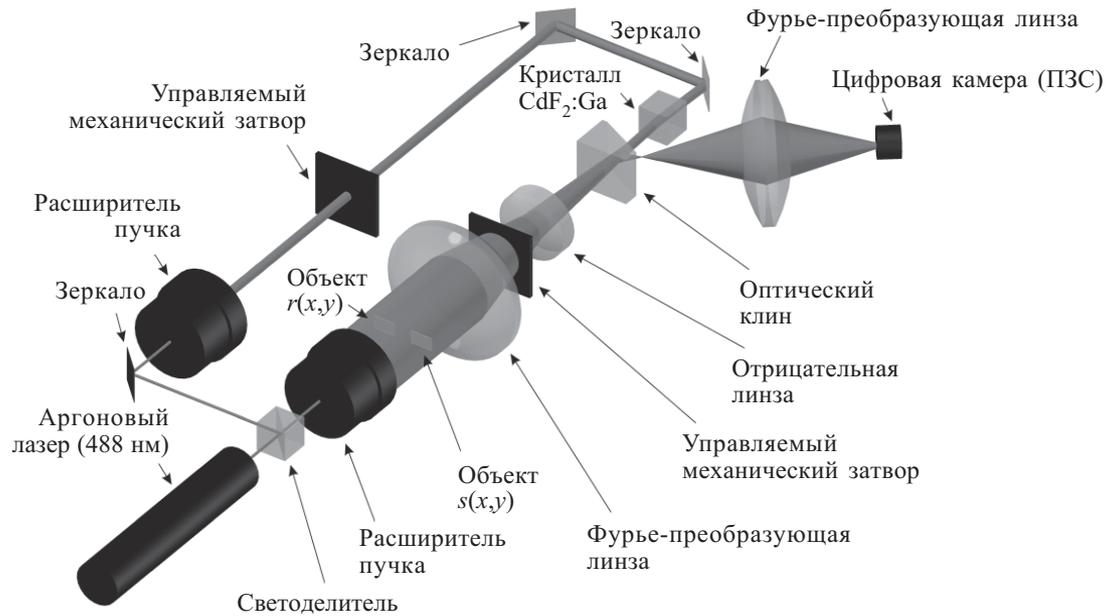


Рис. 2. Оптическая схема коррелятора совместного преобразования Фурье на основе кристалла  $\text{CdF}_2:\text{Ga}$  [13]

ит в наличии дополнительной отрицательной линзы, установленной на расстоянии  $L_1$  от Фурье-линзы и на расстоянии  $L_2$  от кристалла ( $L_1=500$  мм,  $L_2=220$  мм). Это приводит к увеличению в  $M$  раз эффективного фокусного расстояния Фурье-преобразования при записи голограммы:

$$M=L_2/(f_{10}-L_1)\approx 2,2$$

и смещению плоскости формирования Фурье-образов в режиме записи в объеме кристалла. Таким образом удастся скомпенсировать эффект изменения показателя преломления в области светового канала, делающий невозможным последующее восстановление голограммы пучком считывания [14]. Подобное видоизменение оптической схемы приводит к появлению фазового множителя сферической волны в выражении для комплексной амплитуды транспаранта в плоскости, находящейся от линзы на расстоянии, не равном ее фокусному расстоянию. Это, однако, не влияет на процесс записи голограммы в кристалле, так как, во-первых, голографическая среда регистрирует квадрат амплитуды поля (интенсивность света), а во-вторых, масштабному преобразованию подвергаются оба объекта (транспаранта), т. е. не происходит их рассогласования по размерам.

#### Акустооптический коррелятор с памятью на кристалле $\text{LiNbO}_3$

Акустооптические процессоры корреляционного типа, работающие во временной области, реализуют операцию вычисления свертки и корреляционной функции и могут содержать устройства памяти для хранения информации об эталонном сигнале.

В корреляторе с памятью [15] радиочастотный сигнал от генератора (рис. 3) подается на электроакустический преобразователь, генерирующий поверхностную акустическую волну, которая распространяется в приповерхностном слое кристалла ниобата лития. Область акустооптического взаимодействия освещают

короткоимпульсным лазерным излучением ( $\lambda=532$  нм), падающим под углом Брэгга. При этом происходит «запоминание» распространяющейся волны  $s_1$  в освещаемой области в виде пространственно изменяющегося показателя преломления. Лазерный импульс должен быть коротким по сравнению с периодом радиочастотного сигнала (ширина импульса составляет около 10% периода радиочастотного сигнала).

В основе работы рассматриваемого устройства лежит фоторефрактивный эффект, который в электрооптических кристаллах определяется диффузионным, фотовольтаическим и тепловым механизмами [16—18].

Распределение электрического поля пространственного заряда в освещенной области кристалла  $\text{LiNbO}_3$  получено в [18] в результате решения связанной системы упрощенных уравнений Кухтарева, учитывающих вклад диффузионного и фотовольтаического эффектов [19]:

$$E(x, y, z) \approx \frac{D_s}{\mu N_D [sI(x, y, z) + \beta]} \times \left[ SN_D \nabla I(x, y, z) + \frac{k\alpha r_R N_A}{eD_s} I(x, y, z) \right],$$

где  $D_s$  — диффузионная постоянная,  $D_s=(k_B T/e)\mu$ ;

$k_B$  — постоянная Больцмана;

$T$  — температура;

$e$  — заряд электрона;

$\mu$  — подвижность носителей;

$N_D, N_A$  — концентрация доноров и акцепторов;

$S$  — эффективное сечение ионизации на квант света;

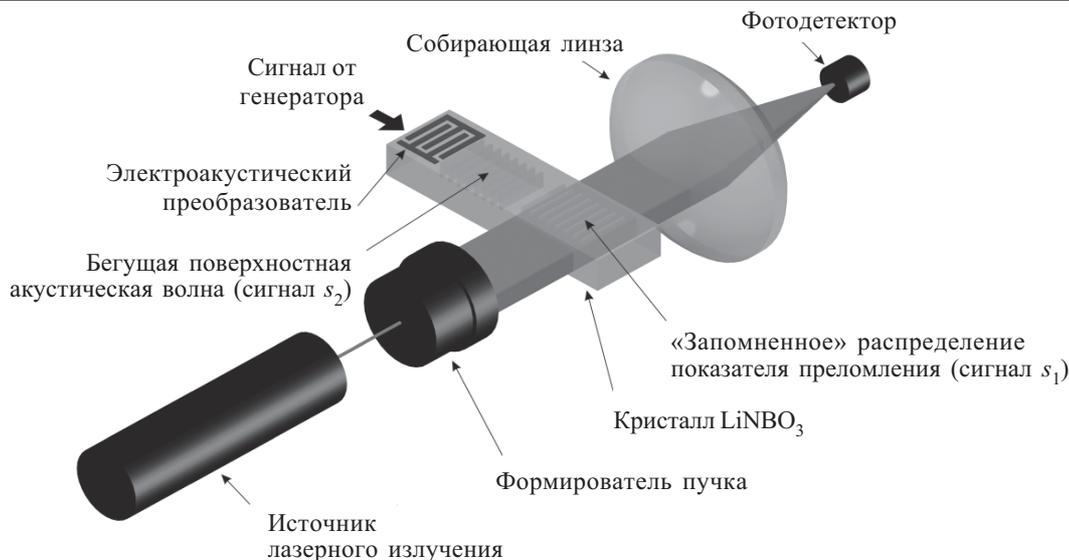
$I(x, y, z)$  — распределение интенсивности в плоскости поперечных координат  $x$  и  $y$  для фиксированного значения  $z$  в фоторефрактивном материале;

$\beta$  — скорость тепловой генерации;

$k$  — фотовольтаическая постоянная (вектор);

$\alpha$  — коэффициент поглощения;

$r_R$  — скорость рекомбинации носителей.

Рис. 3. Схема устройства акустооптического коррелятора с памятью на кристалле  $\text{LiNbO}_3$  [15]

В этом соотношении первый член учитывает вклад диффузионного эффекта, а второй — фотовольтаического [19]. Вклад теплового эффекта в рассматриваемом случае не оказывает существенного влияния на принцип действия устройства.

Общий индуцированный показатель преломления  $\Delta n(x, y, z)$  может быть записан как

$$\Delta n(x, y, z) = -0,5 n_e^3 \gamma_{33} E,$$

где  $n_e$  — показатель преломления необыкновенной волны;  $\gamma_{33}$  — соответствующий электрооптический коэффициент.

То есть интенсивность светового потока на выходе акустооптического модулятора пропорциональна произведению  $s_1(t) \cdot s_2(t+T)$ , где  $t$  — переменная, соответствующая изменению амплитуды сигналов в направлении распространения;  $T$  — время, необходимое для вычисления корреляции.

Световой поток с выхода модулятора фокусируется сферической линзой на фотодетекторе ( $p$ - $i$ - $n$ -

диоде), выходной ток которого  $i_d$  будет пропорционален корреляционной функции сигналов  $s_1$  и  $s_2$ :

$$i_d \sim \int s_1(t) \cdot s_2(t+T) dt.$$

Рассматриваемый акустооптический коррелятор с памятью имеет ограничение по плотности записанной информации, связанное с физическим разрешением 4000 линий/мм и трудностями, возникающими при получении световых импульсов малой длительности. Вычисление корреляционного интеграла таким устройством осуществляется за время, меньшее чем 10 мкс [15].

#### Акустооптический коррелятор с памятью и дискретным представлением информации

В основу коррелятора с акустооптической памятью [20] положено устройство [15] на основе фоторефрактивного эффекта, возникающего при падении мощного пространственно-модулированного светового пучка на кристалл ниобата лития. При переходе к дискретному представлению информации в канале

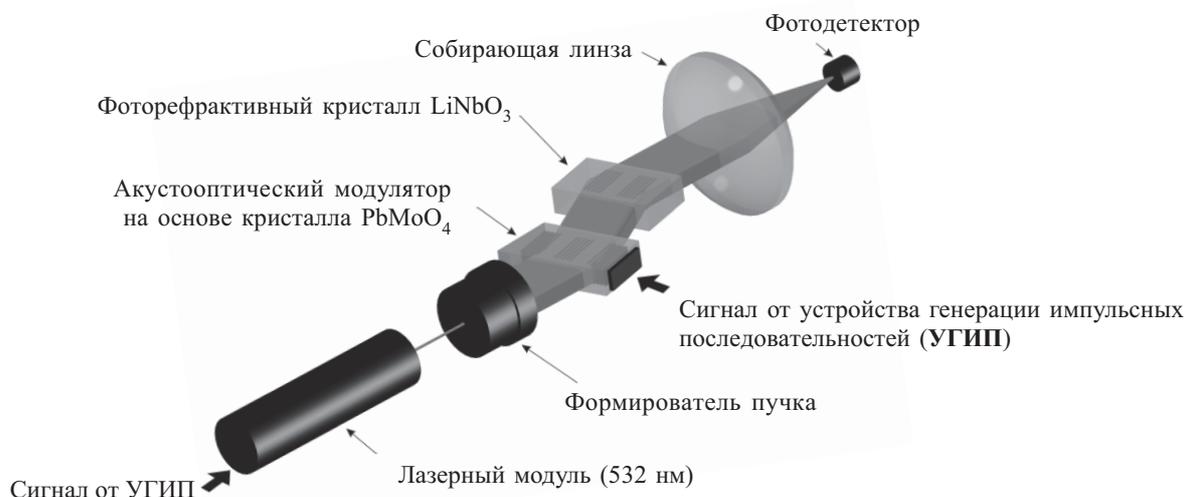


Рис. 4. Схема устройства акустооптического коррелятора с памятью и дискретным представлением информации [20]

преобразования амплитуда сигналов может в десятки раз превосходить уровни шумов, что позволит увеличить точность преобразования и создать устройство с числом разрядов 64 и более [21].

Электрический сигнал с драйвера акустооптического модулятора (АОМ) подается на электроакустический преобразователь, который возбуждает звуковую волну, распространяющуюся вдоль кристалла  $\text{PbMoO}_4$  (рис. 4). Этот же кристалл под углом Брэгга освещается лазерным короткоимпульсным излучением с длиной волны 532 нм. Пространственно-модулированный пучок с выхода первого дифракционного порядка АОМ направляется в фоторефрактивный кристалл ниобата лития, в котором фиксируется изображение пространственно изменяющегося показателя преломления. Таким образом осуществляется запоминание модулированного радиочастотного сигнала во втором кристалле.

Корреляционная функция для сигнала, запомненного в кристалле ниобата лития и который подается в кристалл  $\text{PbMoO}_4$ , формируется на выходе фотоприемного устройства при освещении акустооптического модулятора световыми импульсами малой мощности.

Управляющие импульсные последовательности для драйверов АОМ и лазерного модуля формируются на выходе быстродействующего программируемого сдвигового регистра переменной разрядности на FPGA Altera Cyclone, тактируемого цифровым синтетизатором частот AD9959 [22].

\*\*\*

Анализ принципов построения и функционирования устройств, использующих корреляционный алгоритм распознавания образов методом согласованной фильтрации Фурье-спектра, показал, что реализация динамического режима записи-считывания позволит существенно повысить эффективность оптической обработки входного изображения объекта при его идентификации и сравнении с несколькими эталонными.

Применение фоторефрактивных материалов в качестве динамически перезаписываемого амплитудно-фазового транспаранта с информацией, записанной с помощью увеличения интенсивности оптического луча, делает возможным «оптическое» управление устройством.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. He Q. B., Yeh P., Hu L. J. et al. Shift-invariant photorefractive joint-transform correlator using  $\text{Fe:LiNbO}_3$  crystal plates // *Applied Optics*.— 1993.— Vol. 32, N. 17.— P. 3113—3115.
2. Оптические вычисления: Сбор. статей // Под ред. Р. Аппатуна.— М.: Мир, 1993. [Opticheskie vychisleniya: Sbor. statei // Pod red. R. Appatuna. Moscow. Mir, 1993]
3. Васильев В. Н., Павлов А. В. Оптические технологии искусственного интеллекта / Учебное пособие. Т. 1.— СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. [Vasil'ev V. N., Pavlov A. V. Opticheskie tekhnologii iskusstvennogo intellekta / Uchebnoe posobie. Vol. 1. SPb: SPbGU ITMO. 2008]
4. Yu F. T. S., Wu S., Rajan S., Gregory D. A., Compact joint transform correlator with a thick photorefractive crystal // *Applied Optics*.— 1992.— Vol. 31, N. 14.— P. 2416—2418.
5. Colin J., Landru N., Laude V. et al. High-speed photorefractive joint transform correlator using nonlinear filters // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*.— 1999.— Vol. 1, N. 2.— P. 283—285.

6. Ryf R., Montemezzani G., Gunter P. et al. High-frame-rate joint Fourier-transform correlator based on  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  crystal // *Optics Letters*.— 2001.— Vol. 26, N. 21.— P. 1666—1668.

7. Суй А. В., Строганов В. И., Лихтин В. В. Запись изображения в легированных кристаллах ниобата лития // *Физика твердого тела*.— 2009.— Т. 51, вып. 7.— С. 1382—1384. [Syui A. V., Stroganov V. I., Likhtin V. V. Z // *Fizika tverdogo tela*. 2009. Vol. 51, Iss. 7. P. 1382]

8. Каншу А. В., Круглов В. Г., Ващенко И. В., Шандаров В. М. Фоторефрактивные фазовые транспаранты для коррекции амплитудных профилей световых пучков // Докл. междунар. науч.-практич. конф. «Электронные средства и системы управления».— Россия, Томск, ТУСУР.— 2005.— С. 201—204. [Kanshu A. V., Kruglov V. G., Vashchenko I. V., Shandarov V. M. Fotorefraktivnye fazovye transparenty dlya korrektsii amplitudnykh profilei svetovykh puchkov // *Dokl. mezhdunar. nauch.-praktich. konf. «Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya»*. Russia, Tomsk, TUSUR. 2005. P. 201]

9. VanderLugt A. B. Signal detection by complex spatial filtering // *IEEE Trans. Inf. Theory IT-10*.— 1964.— P. 139—148.

10. Goodman J. Introduction to Fourier Optics.— New York, McGraw-Hill, 1968.— P. 141—147.

11. Hudson T. D., Gregory D. A. Joint transform correlation using an optically addressed ferroelectric LC spatial light modulator // *Applied Optics*.— 1990.— Vol. 29, N. 8.— P. 1064—1066.

12. Gheen G., Cheng L. J. Optical correlators with fast updating speed using photorefractive semiconductor materials // *Applied Optics*.— 1988.— Vol. 27, N. 13.— P. 2756—2761.

13. Федоров И. Ю., Ангервакс А. Е., Соколов В. К., Шеулин А. С. Динамический голографический коррелятор совместного преобразования фурье на основе кристалла  $\text{CdF}_2:\text{Ga}$  // *Оптика и спектроскопия*.— 2008.— Т. 105, № 6.— С. 1045—1055. [Fedorov I. Yu., Angervaks A. E., Sokolov V. K., Sheulin A. S. // *Optika i spektroskopiya*.— 2008. Vol. 105, N 6. P. 1045]

14. Uesu Y., Yasukawa K., Saito N. et al. Dynamic grating recording in semiconductor  $\text{CdF}_2:\text{Ga}$ , Y // *Journal of the Optical Society of America B*.— 2003.— Vol. 20, N. 9.— P. 1905—1911.

15. Acoustooptic Memory Correlator / Pat. 4139237, U.S.A., Berg N. J., Smith B. L.— 1979.

16. Yu F. T. S., Yin S. Photorefractive Optics: Materials, Properties, and Applications.— San Diego, CA: Academic Press, 2000.

17. Петров М. П., Степанов С. И., Хоменко А. В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике.— СПб.: Наука. С.-Петербургское отд. 1992. [Petrov M. P., Stepanov S. I., Khomenko A. V. Fotorefraktivnye kristally v kogerentnoi optike. SPb. Nauka. S.-Peterburgskoe otd. 1992]

18. Липинский А. Ю., Рудякова А. Н. Моделирование фоторефрактивного изменения показателя преломления в кристалле  $\text{LiNbO}_3$  // *Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. «Радиотехника»*.— 2011.— №164.— С. 150—154. [Lipinskii A. Yu., Rudyakova A. N. // *Vseukr. mezhdved. nauch.-tekhn. sb. «Radiotekhnika»*. 2011. N 164. P. 150]

19. Liu J. J., Banerjee P. P., Song Q. W., Role of diffusive, photovoltaic, and thermal effects in beam fanning in  $\text{LiNbO}_3$  // *Journal of the Optical Society of America B*.— 1994.— Vol. 11, Iss. 9, P. 1688—1693.

20. Липинский А. Ю., Рудякова А. Н. Моделирование коррелятора с акустооптической памятью // *Сб. тр. III Междунар. науч. конфер. «Функциональная компонентная база микро-, опто- и наноэлектроники»*.— Украина, г. Харьков, Кацивели, 2010.— С. 45—48. [Lipinskii A. Yu., Rudyakova A. N. Modelirovanie korrelyatora s akustoopticheskoi pamyat'yu // *Sb. tr. III Mezhdunar. nauch. konfer. «Funktsional'naya komponentnaya baza mikro-, opto- i nanelektroniki»*. Ukraine, Kharkov, Katsiveli. 2010. P. 45]

21. Рудякова А. Н., Липинский А. Ю., Данилов В. В. Оптоэлектронные акустооптические устройства обработки дискретной информации // *Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*.— 2007.— Т. 5, № 4.— С. 51—59. [Rudyakova A. N., Lipinskii A. Yu., Danilov V. V. // *Visnik Derzhavnogo universitetu informatsiino-komunikatsiinih tekhnologii*. 2007. Vol. 5, N 4. P. 51]

22. Липинский А. Ю., Рудякова А. Н., Рудяков Ю. И., Данилов В. В. Устройство формирования элементов оптоэлектронной акустооптической вычислительной среды // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2010.— № 3.— С. 9—12. [Lipinskii A. Yu., Rudyakova A. N., Rudyakov Yu. I., Danilov V. V. // *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*. 2010. N 3. P. 9]