

УДК 004.31:004.22:534:621.382

**А. Ю. Липинский**

Донецкий национальный университет. Кафедра радиофизики  
ул. Университетская, 24, 83001 Донецк, Украина  
e-mail: o.lipinskii@donnu.edu.ua

## **Математическая модель паттерна межсоединений в оптических вычислительных устройствах с динамически изменяемой архитектурой**

*Построена математическая модель паттерна межсоединений, сформированного в фоторефрактивном кристалле. Проведено моделирование процесса записи паттерна и изменения направления распространения дифрагированных лучей, в зависимости от его структуры, иллюстрирующее возможность реконфигурации объемных межсоединений в акустооптических оптоэлектронных вычислительных устройствах.*

**Ключевые слова:** акустооптические модуляторы, динамически изменяемая архитектура, оптические межсоединения, паттерн межсоединений, фоторефрактивная среда.

### **Введение**

Оптические межсоединения, обеспечивающие большую пропускную способность при низком энергопотреблении [1, 2], широко используются в современных компьютерных системах [3].

Оптоэлектронные быстродействующие и высокопроизводительные арифметико-логические устройства и процессоры потоковой обработки данных обычно содержат матрицу оптических переключателей — дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [4], либо массив пространственных модуляторов света [5], соответственно. С обеими задачами успешно справляются акустооптические модуляторы, из которых может быть составлена матрица, реализующая объемные межсоединения [6], структура которых задается фазовыми соотношениями между управляющими сигналами, поступающими от электронных устройств подготовки [7].

Перспективно выполнить ДОЭ в виде массива дифракционных решеток в фоторефрактивном кристалле [8], что позволит сохранять операнды непосредственно в физической среде, где и производится их обработка.

Происходящие при перезаписи ДОЭ изменения структуры связей оптоэлектронного процессора можно рассматривать как динамическое изменение его архитектуры [9].

Создание методики расчета и проектирования оптических вычислительных устройств с динамически изменяемой архитектурой требует моделирования физических процессов с использованием представлений о распространении и взаимодействии электромагнитных волн в фоторефрактивной обратимой запоминающей среде (ФОЗС) [9], с учетом результатов предварительного математического моделирования процессов записи/считывания, основанного на упрощенных представлениях теории сигналов [10].

В работе построена математическая модель паттерна межсоединений, сформированного в фоторефрактивном кристалле, а также рассмотрена задача моделирования изменения структуры объемных межсоединений в оптических вычислительных устройствах с динамически изменяемой архитектурой.

### **Математическая модель паттерна межсоединений, сформированного в фоторефрактивном кристалле**

Рассмотрим систему из двух акустооптических модуляторов (АОМ) 1 и 2, каждый из которых повернут на угол Брэгга  $\theta_B$  относительно оси  $x$ , как показано на рис. 1. Падающий оптический пучок имеет гауссов профиль распределения интенсивности  $E_{in}(x, z, t)$ :

$$E_{in}(x, z, t) = E_G \exp\{j(\omega t - kz)\},$$

где  $E_G = E_0 \exp\{-x^2/w_0^2\}$ ;  $E_0$  — амплитуда напряженности электрического поля;  $w_0$  — перетяжка лазерного пучка;  $\omega$  — круговая частота оптического излучения,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновой вектор;  $\lambda = 0,532$  мкм — длина волны в свободном пространстве.

На выходе каждого из модуляторов АОМ 1 и АОМ 2 формируется дифракционная компонента  $-1$ -го порядка, соответствующая коэффициенту пропускания акустооптической ячейки в брэгговском режиме [10, 11] и направлению распространения акустической волны в ячейке:

$$\begin{aligned} E_{АОМ1}(x, z, t) &= \eta_1 E_{G1}(x, z) \exp\{j(\omega t - kz)\} \exp\{j(Kx - \Omega t)\}, \\ E_{АОМ2}(x, z, t) &= \eta_2 E_{G2}(x, z) \exp\{j(\omega t - kz)\} \exp\{j(-Kx - \Omega t)\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\eta_1, \eta_2$  — коэффициенты, учитывающие эффективность дифракции в  $-1$  порядков АОМ 1 и АОМ 2 соответственно;  $E_{G1}(x, z) = E_0 \exp\{-(x \cos 2\theta_B + z \sin 2\theta_B)^2/w_0^2\}$ ;  $E_{G2}(x, z) = E_0 \exp\{-(x \cos 2\theta_B - z \sin 2\theta_B)^2/w_0^2\}$ ;  $\theta_B$  — угол Брэгга,  $K = 2\pi/\Lambda$  — акустический волновой вектор;  $\Lambda$  и  $\Omega$  — длина и круговая частота акустической волны.

В области анализа (рис. 1) выражения для дифракционных компонент  $\hat{E}_{AOM1}$  и  $\hat{E}_{AOM2}$ , прошедших систему линз, можно записать аналогично (1), с учетом изменения направлений их распространения. При этом,  $\hat{E}_{G1}(x, z)$  и  $\hat{E}_{G2}(x, z)$  примут следующий вид:

$$\begin{aligned}\hat{E}_{G1}(x, z) &= E_0 \exp\left\{-\left[(x+x_0)\cos 2\theta_B - z \sin 2\theta_B\right]^2/w_0^2\right\}, \\ \hat{E}_{G2}(x, z) &= E_0 \exp\left\{-\left[(x-x_0)\cos 2\theta_B + z \sin 2\theta_B\right]^2/w_0^2\right\}.\end{aligned}$$

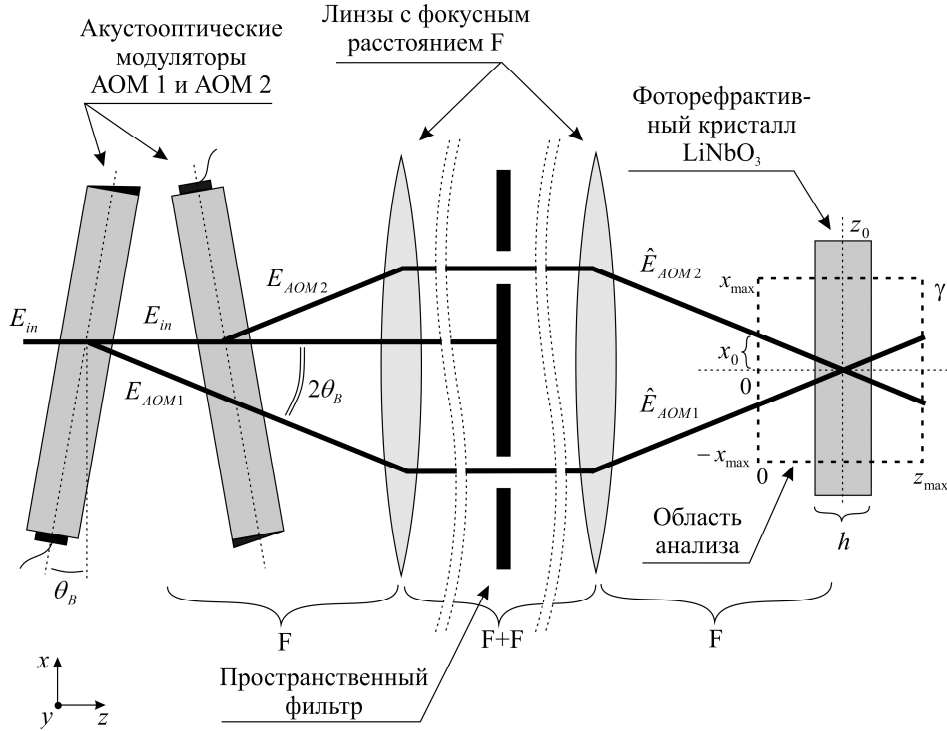


Рис. 1. Структурная схема устройства формирования паттерна межсоединений

В стационарном режиме, в соответствии с выражениями (1), распределение показателя преломления в фоторефрактивном кристалле, обусловленное одновременным воздействием световых потоков  $\hat{E}_{AOM1}$  и  $\hat{E}_{AOM2}$ , запишется как [12, 13]

$$\begin{aligned}n(x, z) &= n_e + n_2 \left| \hat{E}_{AOM1} + \hat{E}_{AOM2} \right|^2 = \\ &= n_e + n_2 \left( \eta_1^2 \hat{E}_{G1}^2 + \eta_2^2 \hat{E}_{G2}^2 + 2\eta_1\eta_2 \hat{E}_{G1} \hat{E}_{G2} \cos 2Kx \right),\end{aligned}\quad (2)$$

где  $n_e$  — линейный показатель преломления необыкновенной волны;  $n_2$  — эффективный нелинейный показатель преломления. Выражение (2) при  $z_0 - h/2 \leq z \leq z_0 + h/2$  (рис. 1) представляет собой математическую модель паттерна межсоединений, сформированного в фоторефрактивном кристалле.

Интенсивность света в области анализа, а также соответствующее изменение показателя преломления  $\Delta n(x, z) = n(x, z) - n_e$  фоторефрактивного кристалла изображены на рис. 2.

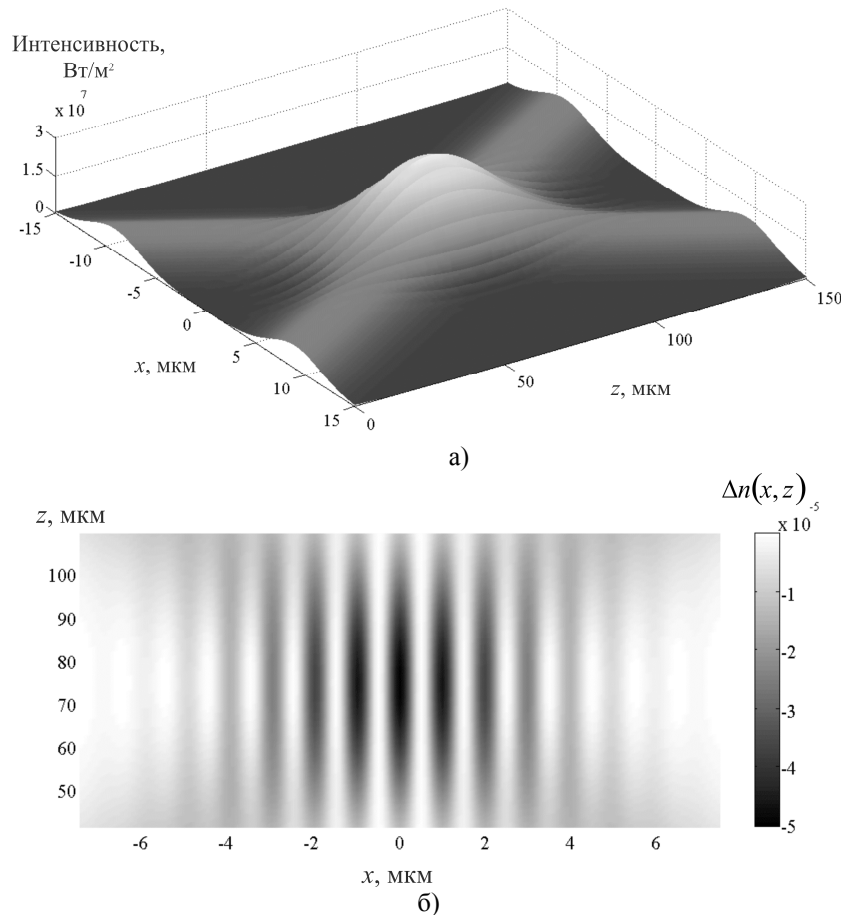


Рис. 2. Распределение интенсивностей световых потоков в области анализа (а), изменение показателя преломления фоторефрактивного кристалла (б)

### Моделирование изменения структуры объемных межсоединений в оптических вычислительных устройствах с динамически изменяемой архитектурой

В соответствии с рис. 1, паттерн межсоединений формируется в результате записи дифракционных решеток в фоторефрактивном кристалле. В зависимости от характеристик решетки, изменяется картина пространственного распределения дифракционных максимумов, что, по существу, и определяет структуру объемных межсоединений [4].

На практике возможно создание матрицы оптических переключателей, работающих в режиме дифракции Рамана-Ната при освещении немодулированным лазерным пучком, или более сложных архитектур оптоэлектронных вычислительных устройств с использованием акустооптических модуляторов, реализующих,

совместно с фоторефрактивной обратимой запоминающей средой [14], акустооптический процессор корреляционного типа.

В связи с достаточно большой протяженностью области анализа, по сравнению с длиной волны света, моделирование процесса формирования паттерна межсоединений с использованием представлений о распространении и взаимодействии электромагнитных волн в фоторефрактивной среде целесообразно провести при помощи метода распространяющегося пучка [15].

В случае монохроматической волны, изменяющейся во времени по гармоническому закону, решение волнового уравнения для напряженности электрического поля можно представить как  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r})\exp(j\omega t)$ , что приводит к следующему уравнению относительно  $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ :

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 n^2 \mathbf{E} = 0, \quad (3)$$

где  $k_0$  — волновое число в свободном пространстве;  $n$  — показатель преломления. Решение (3) можно представить в виде медленно меняющейся огибающей  $\mathbf{E}_{env}(\mathbf{r})$  и быстро осциллирующего фазового множителя

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_{env}(\mathbf{r})\exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}),$$

что, при подстановке в (3) позволяет получить следующее уравнение для  $\mathbf{E}_{env}(\mathbf{r})$ :

$$(\nabla - j\mathbf{k}) \times ((\nabla - j\mathbf{k}) \times \mathbf{E}_{env}) - k_0^2 n^2 \mathbf{E}_{env} = 0. \quad (4)$$

При моделировании процесса записи паттерна и исследования его коммутирующих свойств, уравнение (4) для напряженности электрического поля  $\mathbf{E}_{env}(\mathbf{r})$  необходимо дополнить условиями на границе области анализа  $\gamma$ , заданной плоскостями  $z = 0$ ,  $z = z_{max}$ ,  $x = -x_{max}$ ,  $x = x_{max}$  (рис. 1). В качестве граничного условия выбрано следующее соотношение, обеспечивающее «прозрачность» границы для плоских волн, выражающуюся в отсутствии отражений:

$$\mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{E}_{env}) - (jk)\mathbf{n} \times (\mathbf{E}_{env} \times \mathbf{n}) = -\mathbf{n} \times \{\mathbf{E}_0 \times [(ik)\mathbf{n} - i\mathbf{k}]\} \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}), \quad (5)$$

где  $\mathbf{n}$  — единичный вектор внешней нормали к границе;  $\mathbf{E}_0$  — вектор напряженности электрического поля падающей световой волны. Акустооптическая среда предполагается однородной вдоль координаты  $y$ .

Моделирование процесса записи выполнено с учетом того, что падающие световые пучки имеют составляющие магнитного поля только вдоль оси  $y$ , составляющие электрического поля только в плоскости  $xz$ , гауссово распределение амплитуды, и направлены под углом  $\pm 2\theta_B$  к оси  $z$ . Для показателя преломления ФОЗС  $n = 2,2$ , длины световой волны в свободном пространстве  $\lambda_0 = 0,532$  мкм и размера области анализа  $124\lambda \times 620\lambda$  ( $\lambda$  — длина волны света в материале среды), область моделирования составляет  $30 \times 150$  мкм<sup>2</sup>.

Моделирование коммутирующих свойств паттерна межсоединений осуществлялось в предположении, что падающий световой пучок также имеет составляющие магнитного поля только вдоль оси  $y$ , составляющие электрического поля только в плоскости  $xz$  и гауссово распределение амплитуды, но направлен перпендикулярно записанной в кристалле решетке (режим дифракции Рамана-Ната). Рассматривается дифракция на решетках с периодом 1 мкм, 1,5 мкм, и 2 мкм, размер области моделирования равен  $100 \times 150$  мкм<sup>2</sup>.

Моделирование проводилось с применением пакета Comsol Multiphysics, на основе метода Beam Envelope, для чего были построены соответствующие модели областей взаимодействия.

Результаты моделирования процесса формирования паттерна межсоединений приведены на рис. 3, 4.

Рис. 3 отображает картину пространственного распределения интенсивности света в области анализа. На увеличенном фрагменте области можно наблюдать изменение интенсивности светового потока с периодом синтезируемой дифракционной решетки, равным половине периода акустической волны в среде. Геометрические размеры этой области определяются величиной перетяжки и углом схождения лазерных пучков, т.е. возможно формирование решеток для различных режимов дифракции.

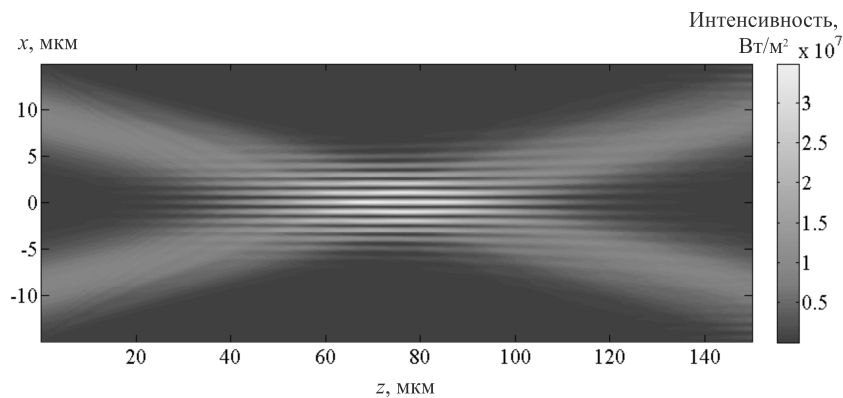


Рис. 3. Пространственное распределение интенсивности света в области анализа

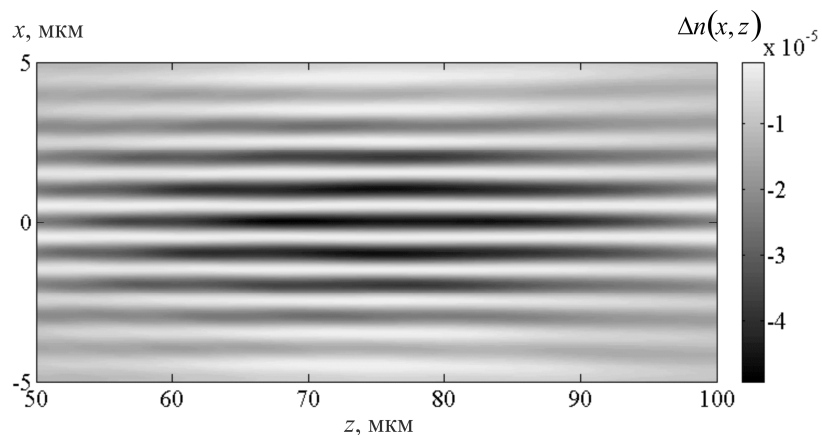


Рис. 4. Изменение показателя преломления фоторефрактивного кристалла

На рис. 4 представлено изменение показателя преломления, возникшее в фоторефрактивном кристалле ниобата лития под воздействием световой волны.

Дифракционные картины, соответствующие различным структурам паттерна и отражающие его коммутирующие свойства, показаны на рис. 5.

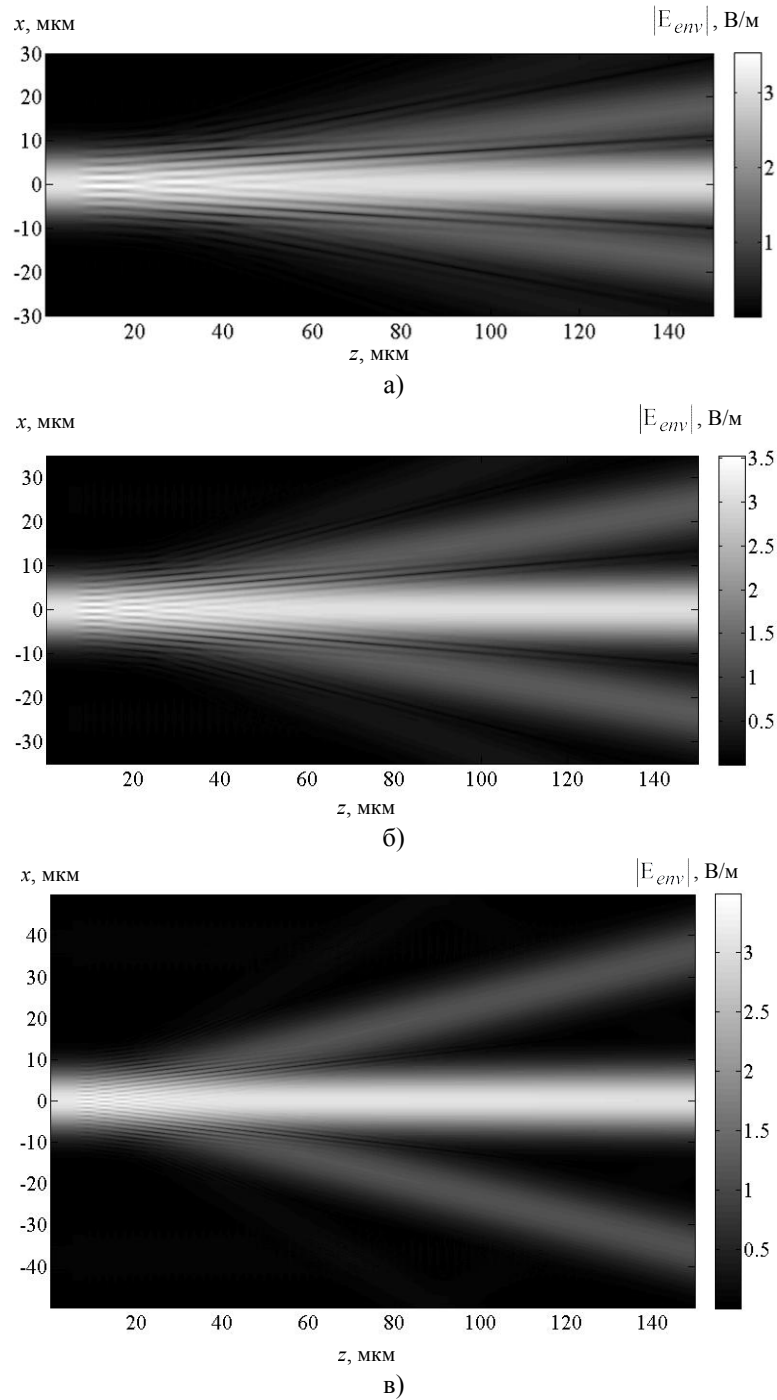


Рис. 5. Иллюстрация изменения направления распространения дифрагированных лучей в зависимости от структуры паттерна

Характерный размер области локализации паттерна межсоединений для длины волны света 0,532 мкм составляет  $100 \times 100$  мкм, что связано с дифракционными ограничениями [16]. Возможности современных акустооптических модуляторов позволяют записать в ФОЗС матрицу из  $512 \times 512$  паттернов, что обеспечит  $6,8 \cdot 10^{10}$  перекрестных межсоединений и производительность  $6,8 \cdot 10^{20}$  оп/с при пропускной способности оптического канала 10 Гб/с [3].

## **Выводы**

Предложенная математическая модель паттерна межсоединений в оптических вычислительных устройствах с динамически изменяемой архитектурой может служить основой для синтеза структурно сложных блоков памяти в оптоэлектронных процессорах, обеспечивая общую производительность системы на уровне  $10^{21}$  операций в секунду для существующей элементной базы.

Проведенное в работе моделирование электродинамической задачи о дифракции световой волны на решетке, синтезированной в ФОЗС, показало возможность перекоммутации объемных межсоединений в акустооптических оптоэлектронных устройствах обработки информации.

1. *Silicon Photonics for Next Generation System Integration Platform* / Y. Arakawa, T. Nakamura, Y. Urino, T. Fujita // *IEEE Communications Magazine*. — 2013. — Vol. 51, N. 3. — P. 72–77.

2. *Белкин М.* Оптические межсоединения в интегральных схемах / М. Белкин, А. Сигов // *Наноиндустрия*. — 2012. — № 1. — С. 8–14.

3. *Doany F.E.* Terabit/Sec VCSEL-Based 48-Channel Optical Module Based on Holey CMOS Transceiver IC / F.E. Doany, B.G. Lee, D.M. Kuchta [et al.] // *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*. — 2013. — Vol. 31, N. 4. — P. 672–680.

4. *Белов П.А.* Оптические процессоры: достижения и новые идеи / П.А. Белов, В.Г. Беспалов, В.Н. Васильев [и др.] // *Проблемы когерентной и нелинейной оптики: сб. статей; под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова*. — СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. — 268 с.

5. *Tamir D.E.* High-speed and low-power electro-optical DSP coprocessor / D.E. Tamir, N.T. Shaked, P.J. Wilson, S. Dolev // *J. Opt. Soc. Am. A*. — 2009. — Vol. 26, N 8. — P. A11–A20.

6. *Guilfoyle P.S.* Free-Space optical interconnects for high performance optoelectronic switching / P.S. Guilfoyle, J.M. Hessenbruch, R.V. Stone // *IEEE Trans. Comput.* — 1998. — Vol. 31. — P. 69–75.

7. *Rudokas, R.S.* A digital optical implementation of RISC / R.S. Rudokas, P.S. Guilfoyle // *IEEE Digest of Compton'91, San Francisco, CA, USA, 1991*. — P. 436–441.

8. *Липинский А.Ю.* Формирование дифракционных решеток в кристалле LiNbO<sub>3</sub> методом фоторефрактивной записи / А.Ю. Липинский, А.Н. Рудякова, В.В. Данилов // *Труды четырнадцатой международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии»*. — Одесса, 2013. — С. 168–169.

9. *Липинский А.Ю.* Оптоэлектронные вычислительные среды с динамически изменяемой архитектурой / А.Ю. Липинский, А.Н. Рудякова // *Труды тринадцатой международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии»*. — Одесса, 2012. — С. 316.

10. *Липинский А.Ю.* Синтез дифракционных решеток в кристалле LiNbO<sub>3</sub> / А.Ю. Липинский // *Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. «Радиотехника»*. — 2012. — № 169. — С. 343–348.



11. *Rhodes W.T.* Acousto-Optic Signal Processing: Convolution and Correlation / W.T. Rhodes // Proc. IEEE. — 1981. — Vol. 69, N 1. — P. 65–79.
12. *Липинский А.Ю.* Моделирование процессов записи-чтения фоторефрактивных транспарантов методом распространяющегося пучка / А.Ю. Липинский, А.Н. Рудякова, В.В. Данилов // Регистрация, хранение и обраб. данных. — 2011. — Т. 13, № 2. — С. 16–26.
13. *Banerjee P.P.* Nonlinear Optics: Theory, Numerical Modeling, and Applications / P.P. Banerjee. — New-York, NY: Marcel Dekker, 2004. — 315 p.
14. *Липинский А.Ю.* Моделирование коррелятора с акустооптической памятью / А.Ю. Липинский, А.Н. Рудякова: сб. науч. трудов 3-й международной научной конференции «Функциональная компонентная база микро-, опто- и наноэлектроники». — Харьков-Кацевели, 2010. — С. 45–48.
15. *Poon T.-C.* Engineering optics with Matlab / T.-C. Poon, T. Kim — Singapore: World Scientific, 2006. — 249 p.
16. *Оптические вычисления*: сб. статей; под ред. Р. Арратуна. — М: Мир, 1993. — 441 с.

Поступила в редакцию 23.07.2013