

СИНТЕЗ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК В КРИСТАЛЛЕ LiNbO_3

Введение

В ряде публикаций представлены оптоэлектронные акустооптические умножители дискретных (бинарных) чисел [1, 2]. В большинстве одномерных акустооптических модуляторов существует ограничение, в соответствии с которым область акустооптического взаимодействия не может содержать в себе одновременно более 500 двоичных разрядов [3]. С точки зрения современных возможностей электронной техники, точность вычислений, обеспечиваемая даже при такой разрядности, недостижима для коммерческих продуктов.

Дальнейшие перспективы развития вычислительных средств лежат в направлении создания оптических и оптоэлектронных систем обработки информации, реализующих выполнение не отдельных математических операций, а вычисление функций (корреляционная функция, свертка) [4, 5]. Создание оптических компьютерных систем на основе оптоэлектронных акустооптических вычислительных сред (ОАВС) и фоторефрактивных обратимых запоминающих сред (ФОЗС) [6, 7] предполагает решение задачи о синтезе дифракционных решеток в фоторефрактивных материалах.

В работе выполнено математическое моделирование процессов записи амплитудно-фазового транспаранта в кристалле ниобата лития, формируемого при прохождении светового пучка через апертуры акустооптических модуляторов.

Устройство записи амплитудно-фазового транспаранта в кристалле LiNbO_3

На рис. 1 приведена структурная схема устройства: лазерный модуль DHL-G200 на основе DPSS лазера с длиной волны 532 нм с регулируемой мощностью излучения обеспечивает режимы записи (выходная мощность > 200 мВт) и считывания (выходная мощность 5 мВт); расширитель пучка формирует световой луч необходимого поперечного сечения (5 мм), подающийся под углом Брэгга на систему из двух акустооптических модуляторов АОМ 1 и АОМ 2 (Isomet 1205с-1), работающих по схеме параллельной дифракции на встречных акустических пучках [1]; линзы и осевая диафрагма образуют пространственный фильтр, который исключает 0-й порядок дифракции и формирует записывающий оптический пучек в кристалле LiNbO_3 .

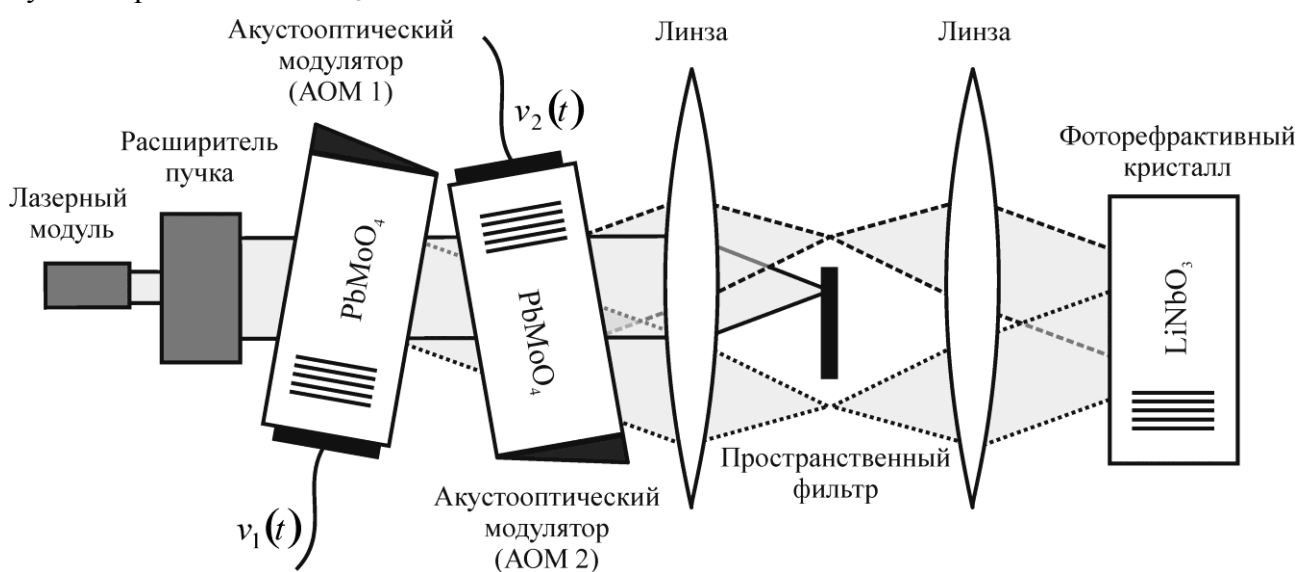


Рис. 1

Электрические сигналы $v_1(t)$ и $v_2(t)$, определяемые выражением:

$$v_1(t) = v_2(t) = A \cos(2\pi f_0 t),$$

где A и f_0 – амплитуда и частота, соответственно, поступают на входы электроакустических преобразователей акустооптических модуляторов (АОМ) 1 и 2 (рис. 1). В предположении малой эффективности дифракции функции пропускания соответствующих акустооптических ячеек, без учета функции окна, можно записать в виде [8]:

$$h_1(x, t) = 1 + jv_1(t - x/V), \quad (1)$$

$$h_2(x, t) = 1 + jv_2(t + x/V - T), \quad (2)$$

где V – скорость звука в среде модулятора, $T = W/V$ – время распространения акустической волны в ячейке длиной W . Используя соответствующие $v_1(t)$ и $v_2(t)$ аналитические сигналы

$$\tilde{v}_1(t) = \tilde{v}_2(t) = A \exp(j2\pi f_0 t), \quad (3)$$

запишем (1), (2) в виде:

$$h_1(x, t) = 1 + j\frac{1}{2}\tilde{v}_1(t - x/V) + j\frac{1}{2}\tilde{v}_1^*(t - x/V), \quad (4)$$

$$h_2(x, t) = 1 + j\frac{1}{2}\tilde{v}_2(t + x/V - T) + j\frac{1}{2}\tilde{v}_2^*(t + x/V - T). \quad (5)$$

Поскольку в схеме на рис. 1 каждый из акустооптических модуляторов повернут по отношению к падающему световому пучку под углом Брэгга, слагаемые $j\frac{1}{2}\tilde{v}_1^*(t - x/V)$ и $j\frac{1}{2}\tilde{v}_2^*(t + x/V - T)$ в выражениях (4), (5) равны нулю и функция пропускания системы из двух акустооптических ячеек имеет вид:

$$h(x, t) = \left[1 + j\frac{1}{2}\tilde{v}_1(t - x/V) \right] \cdot \left[1 + j\frac{1}{2}\tilde{v}_2(t + x/V - T) \right]. \quad (6)$$

При использовании коллимированного светового пучка пространственный фильтр (рис. 1) пропускает только дифракционные компоненты, соответствующие слагаемым $j\frac{1}{2}\tilde{v}_1(t - x/V)$ и $j\frac{1}{2}\tilde{v}_2(t + x/V - T)$ в (6), и распределение интенсивности света, падающего на фоторефрактивный кристалл можно записать как

$$I_{\text{вых}}(x, t) = \left| j\frac{1}{2}\tilde{v}_1(t - x/V) + j\frac{1}{2}\tilde{v}_2(t + x/V - T) \right|^2. \quad (7)$$

Полученная зависимость интенсивности от координаты x и времени t не представляет в явном виде статическое пространственное распределение записывающего светового потока. Для решения этой задачи проведено функциональное моделирование средствами пакета MatLab.

Моделирование процесса формирования записывающего пучка в Simulink

Блок-схема функциональной модели, построенной в пакете Simulink и описывающей пространственную структуру светового пучка, освещающего образец LiNbO₃ в макете экспериментальной установки (рис. 1), приведена на рис. 2.

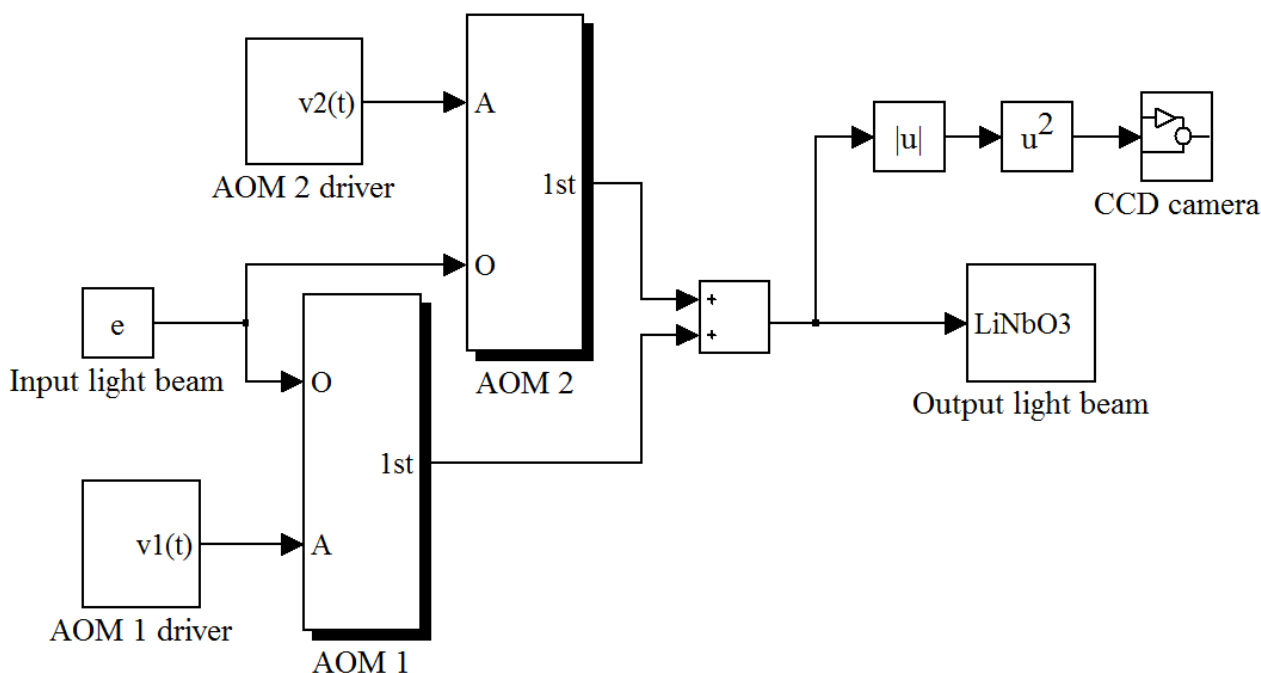


Рис. 2

Блок “Input light beam” задает световой поток с равномерным распределением интенсивности, формируемый расширителем пучка.

Блоки “AOM 1 driver” и “AOM 2 driver” идентичны и задают сигналы $\tilde{v}_1(t)$ и $\tilde{v}_2(t)$, определяемые выражением (3). Схема блока “AOM 1 driver” приведена на рис. 3.

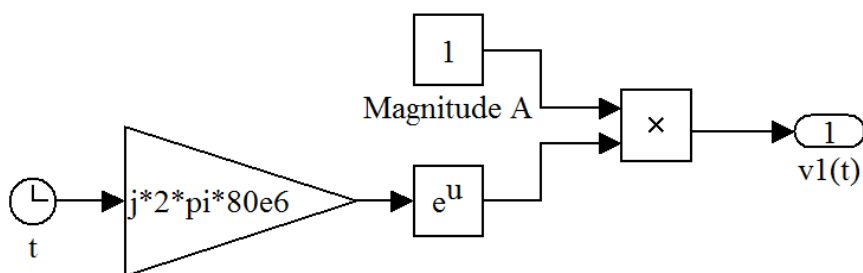


Рис. 3

Блоки “AOM 1” и “AOM 2” являются моделями акустооптических модуляторов, включенных таким образом, что звуковые волны в них распространяются во встречных направлениях. Рассматриваются только дифракционные компоненты первых порядков, соответствующие слагаемым $j\frac{1}{2}\tilde{v}_1(t-x/V)$ и $j\frac{1}{2}\tilde{v}_2(t+x/V-T)$ в (6). Схемы блоков изображены на рис. 4, 5.

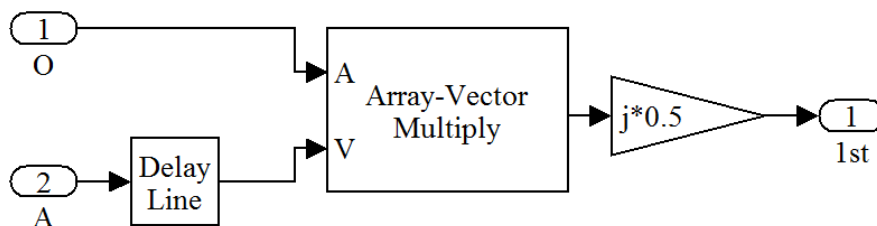


Рис. 4

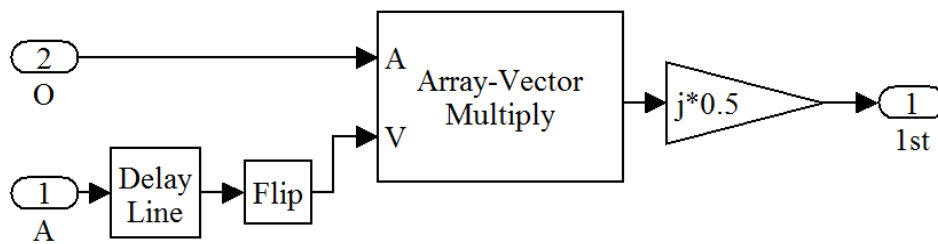


Рис. 5

На рис. 6, 7 представлены результаты моделирования пространственного распределения интенсивности и вещественной части напряженности $\text{Re}\{E\}$ записывающего светового потока на входной грани фоторефрактивного кристалла. Как видно из рис. 6, изменение интенсивности светового потока зависит от пространственной координаты и в соответствии с ним возможно сформировать дифракционную решетку в кристалле ниобата лития.

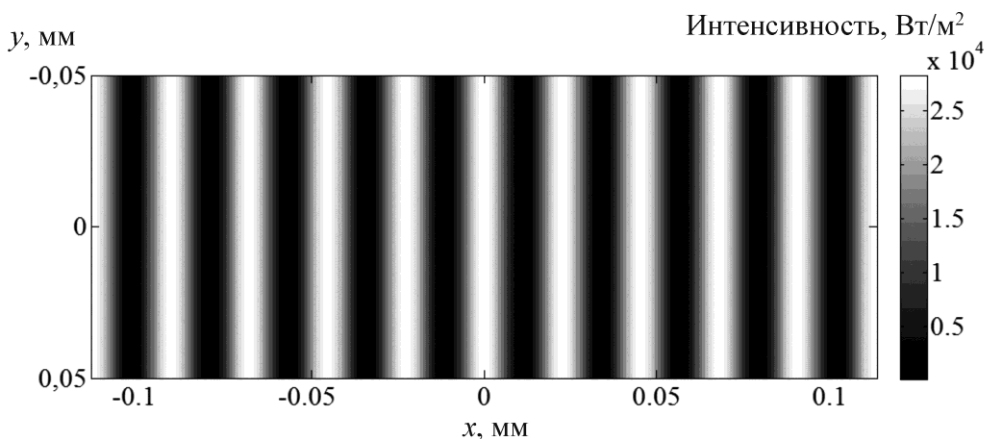


Рис. 6

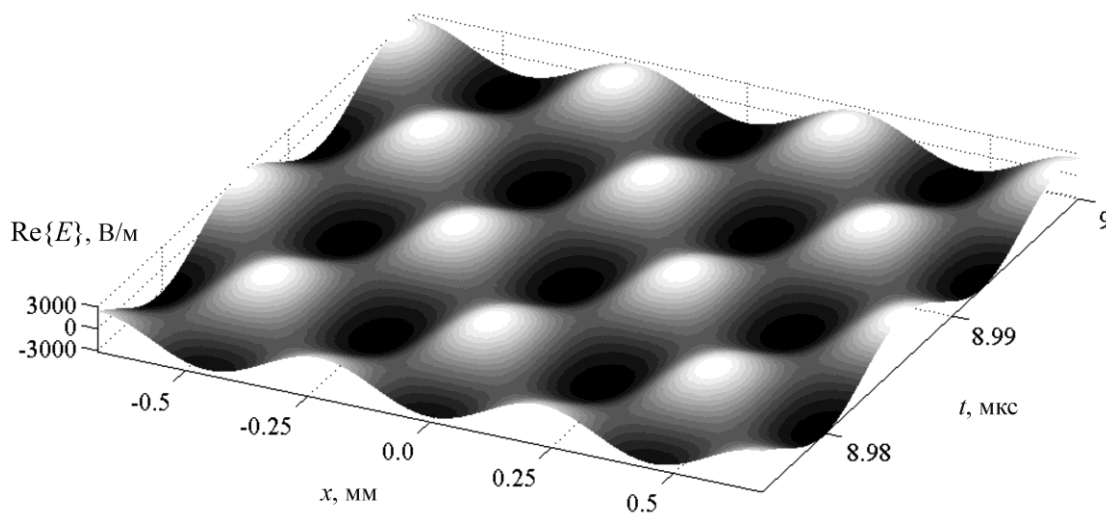


Рис. 7

Моделирование процесса записи фоторефрактивного амплитудно-фазового транспаранта в кристалле LiNbO_3

Световой пучок большой интенсивности (рис. 6), проходящий через LiNbO_3 , изменяет показатель преломления кристалла вследствие фоторефрактивного эффекта [7, 9]. Зависимость n от электрической компоненты E_x необыкновенно поляризованной световой волны (направление оси x совпадает с направлением главной оптической оси кристалла) имеет вид [7, 10]:

$$n = n_e + n_2 \cdot |E_x|^2,$$

где n_e – линейный показатель преломления необыкновенной волны; n_2 – эффективный нелинейный показатель преломления. Как показано в [7, 11], n_2 можно записать как

$$n_2 \cong -\frac{1}{2} n_e^3 r_{33} \frac{k \alpha \gamma_R N_A}{\mu e \beta N_D},$$

где γ_R – скорость рекомбинации носителей; r_{33} – соответствующий электрооптический коэффициент; μ – подвижность носителей; α – коэффициент поглощения; k – фотовольтаическая постоянная; β – скорость тепловой генерации; N_A – концентрация акцепторов; N_D – концентрация доноров; e – заряд электрона.

На рис. 8, 9 приведены результаты моделирования процесса записи амплитудно-фазового транспаранта в кристалле LiNbO_3 методом распространяющегося пучка (Beam Propagation Method, BPM).

Моделирование выполнено с учетом следующих параметров: размер кристалла LiNbO_3 $45 \times 10 \times 9$ мм; $n_e = 2,2$; $n_2 = -1,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{В}^2$; длина волны 532 нм и интенсивность падающего светового потока $3 \text{ Вт}/\text{см}^2$.

На рис. 8 показана эволюция интенсивности I записывающего светового пучка в направлении распространения внутри кристалла LiNbO_3 .

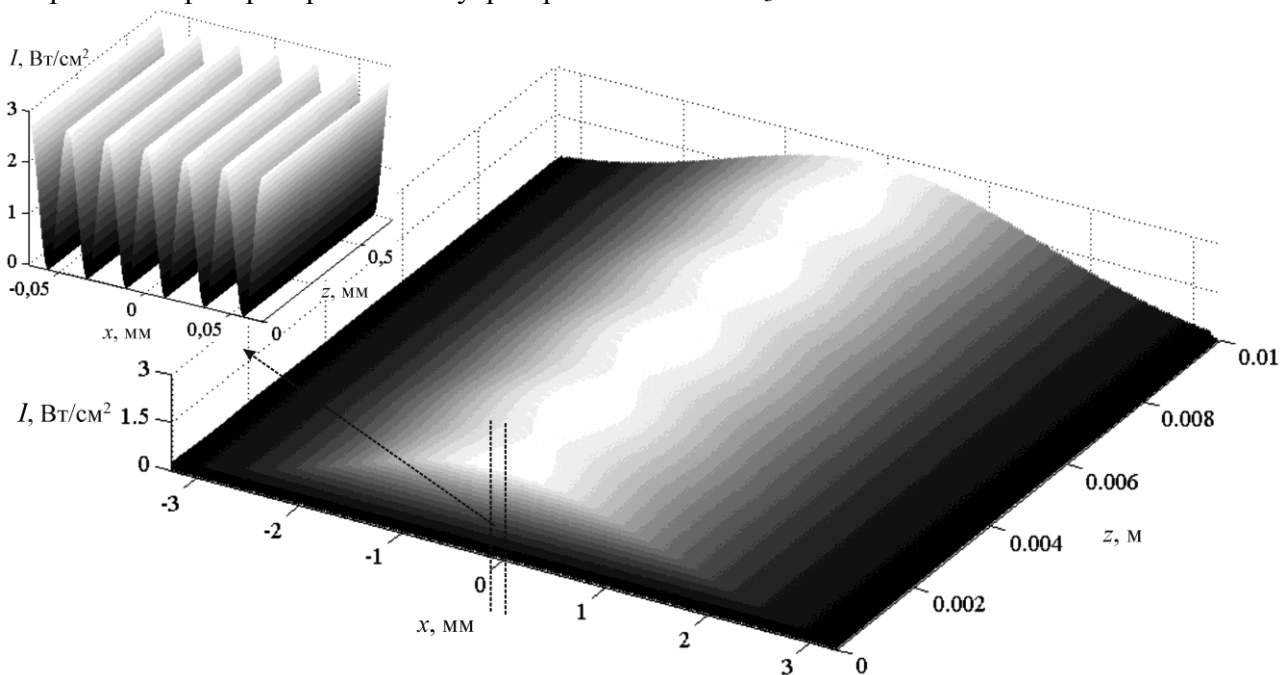


Рис. 8

На рис. 9 показано пространственное распределение изменения коэффициента преломления Δn , из которого видно, что в фоторефрактивном кристалле формируется фазовый транспарант в виде периодической структуры, состоящей из чередующихся областей с различным n , и периодом, соответствующим пространственному распределению интенсивности записывающего пучка. Различия в значениях n в данном случае определяются характеристиками светового потока на входе устройства формирования (для рассмотренного случая – гауссов пучок).

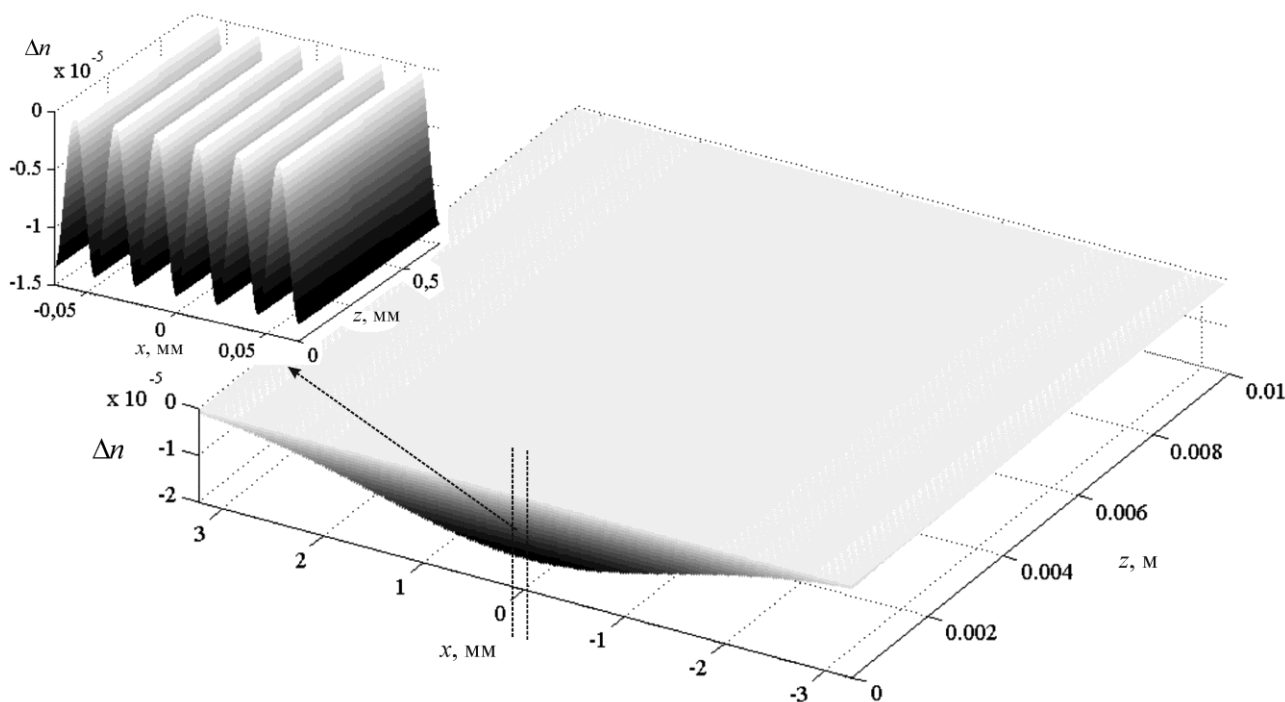


Рис. 9

Выводы

Пространственное разделение каналов обработки информации в акустооптическом модуляторе обеспечивает значительное увеличение разрядности операндов и, как следствие, – увеличение производительности оптических и оптоэлектронных вычислительных устройств.

Выполненное в работе моделирование процесса формирования дифракционных решеток в кристалле LiNbO_3 показало возможность синтеза периодической структуры с размером в половину длины акустической волны, что может быть использовано для формирования в ОАВС каналов обработки информации малых поперечных размеров.

Список литературы. 1. *Оптические устройства в радиотехнике* / Под ред. В. Н. Ушакова. – М. : Радиотехника, 2009. – 264 с. 2. Wang, X., Peng, J., Li, M., Shen, Z., Shan, O. Carry-free vector-matrix multiplication on a dynamically reconfigurable optical platform // *Applied Optics*. – 2010. – Vol. 49, no. 12. – P. 2352-2362. 3. *Оптические вычисления: Сбор. статей под ред. Р. Арратуна.* – М. : Мир, 1993. – 441 с. 4. Васильев, В.Н., Павлов, А.В. Оптические технологии искусственного интеллекта : учеб. пособие. – В 2-х т. Т.1. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2008. – 81с. 5. Липинский, А.Ю., Рудякова, А.Н., Данилов, В.В. Фоторефрактивные кристаллы в запоминающих устройствах оптоэлектронных процессоров корреляционного типа // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2011. – №6. – С. 5-9. 6. Lipinskii, A.Y., Rudiakova, A.N. Acousto-optic computing environment for stream data processing // *Applied Optics*. – 2011. – vol. 50. – P. 4917-4921. 7. Липинский, А.Ю., Рудякова, А.Н., Данилов, В.В. Моделирование процессов записи-чтения фоторефрактивных транспарантов методом распространяющегося пучка // *Регистрация, хранение и обработка данных*. – 2011. – Т. 13, № 2. – С. 16-26. 8. Rhodes, W. T. Acousto-Optic Signal Processing: Convolution and Correlation // *Proc. IEEE*, vol. 69, no. 1, pp. 65-79, 1981. 9. Yu F.T.S., Yin S. *Photorefractive Optics: Materials, Properties, and Applications*. – San Diego, CA: Academic Press, 2000. – 570 p. 10. Banerjee, P.P. *Nonlinear Optics: Theory, Numerical Modeling, and Applications*. – New-York, NY: Marcel Dekker, 2004. – 315 p. 11. Liu, J.J., Banerjee, P.P., Song, Q.W., “Role of diffusive, photovoltaic, and thermal effects in beam fanning in LiNbO_3 ” // *JOSA B*, Vol. 11, Issue 9, pp. 1688-1693, 1994.

Донецкий национальный университет

Поступила в редколлегию 25.04.2012