

А. Г. РЕШОТКА¹, В. Г. ГАЙДУЧОК², д. т. н. Н. М. ВАКИВ²

Украина, г. Львов, ¹Национальный университет «Львовская политехника»,

²Научно-производственное предприятие «Карат»

E-mail: amadey101@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН СВЧ-ДИАПАЗОНА, ВОЗБУЖДЕННЫХ ВСТРЕЧО-ШТЫРЕВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Исследована структура и направление распространения объемных акустических волн, возбужденных встречно-штыревым преобразователем (ВШП) в кристалле ниобата лития, с помощью их визуализации. Показано, что для расчета периода ВШП при конструировании акустооптических дефлекторов СВЧ-диапазона недостаточно использовать лишь подстройку под угол Брэгга. Для определения области распространения таких пучков волн нужно также учитывать параметр Френеля.

Ключевые слова: акустооптические устройства, объемные акустические волны, встречно-штыревой преобразователь, пьезоэлектрический преобразователь, дифракция световой волны.

В настоящее время акустооптические методы управления оптическим излучением находят широкое применение в науке и технике [1–3]. Характеристики акустооптических устройств зависят, главным образом, от двух факторов: от закономерностей акустооптического взаимодействия и от структуры акустического пучка, возбуждаемого пьезоэлектрическим преобразователем. Структура акустического пучка определяется, в первую очередь, пьезопреобразователем. Идеальным считается однородной пучок, во всех точках которого амплитуда распространяющейся волны одинакова, а волновые фронты являются плоскими. На практике всегда имеют место акустические пучки конечной ширины, которые можно представить в виде суперпозиции плоских волн, имеющих в общем случае разную амплитуду, фазу и направление распространения.

Одним из способов возбуждения акустических волн, как объемных, так и поверхностных, является возбуждение этих волн с поверхности пьезоэлектрических кристаллов с помощью встречно-штыревого преобразователя (ВШП) [4, 5], который широко используется в акустоэлектронике [5, 6]. Вместе с возбуждением поверхностных акустических волн с помощью ВШП в акустоэлектронных устройствах возбуждаются и объемные акустические волны, что приводит к возникновению паразитных сигналов в этих устройствах. С другой стороны, возбуждение объемных акустических волн с помощью ВШП с поверхности пьезокристалла, например LiNbO_3 , может использоваться для разработки акустооптических дефлекторов СВЧ-диапазона [7], что значительно удешевит технологический процесс изготовления СВЧ-дефлекторов.

Поэтому изучению генерации и распространения таких объемных акустических волн уделяется значительное внимание, в том числе и разработке методов моделирования их возбуждения и распространения [10, 11].

В [1, 3, 9] диаграмма направленности многоэлементного периодического преобразователя описывается как произведение диаграммы направленности входящего в его состав единичного элементарного излучателя на диаграмму направленности массива излучателей этого преобразователя. Этот результат используется при расчете параметров акустооптических дефлекторов СВЧ-диапазона.

В [12] нами было теоретически исследовано распространение объемных акустических волн, возбужденных ВШП с поверхности пьезоэлектрического кристалла, и показано, что приведенные в [1, 3, 9] результаты действительны только для зоны Фраунгофера (дальняя зона) многоэлементного преобразователя в целом.

Используя параметр Френеля $S = \Lambda z / L_{\max}^2$ (Λ — длина акустической волны; z — расстояние от преобразователя до дальней зоны; L_{\max} — максимальный размер излучающего многоэлементного преобразователя), нетрудно убедиться, что зона Фраунгофера многоэлементного преобразователя акустооптических дефлекторов СВЧ-диапазона лежит на расстояниях, значительно превышающих реальные размеры кристаллических акустооптических ячеек. Используемое для расчета периода такого преобразователя условие коррекции угла Брэгга [1, 3] учитывает распространение излучаемого акустического пучка в дальней зоне. Однако с помощью параметра Френеля можно показать, что для реальных образцов акустооптических дефлекторов это усло-

вие является необходимым, но не достаточным. Углы излучения объемных акустических волн, а также количество пучков [11], рассчитанные при моделировании излучения ВШП, противоречат результатам, приведенным в [1, 3, 9, 12].

Для экспериментальной проверки изложенных выше фактов в данной работе исследовалась структура и направление распространения объемных акустических волн, возбужденных ВШП в СВЧ-диапазоне с XU -поверхности кристалла ниобата лития прямого среза. Размеры кристаллической ячейки в направлениях OX , OY , OZ составляли, соответственно, $12 \times 8 \times 10$ мм.

Теоретический анализ

Расчет акустооптического дефлектора СВЧ-диапазона с многоэлементным преобразователем начинается с определения периода d многоэлементной структуры. Этот период рассчитывается из условия коррекции угла Брэгга для заданной частоты f_0 , которая является центральной частотой полосы рабочих частот СВЧ акустооптического дефлектора [1]:

$$f_0 = V \sqrt{\frac{n}{\lambda d}}, \quad (1)$$

где V — скорость объемной акустической волны;
 n — показатель преломления материала световодопровода;
 λ — используемая длина волны оптического излучения.

Многоэлементный преобразователь, ВШП, период которого при заданной центральной частоте f_0 рассчитывается подобным образом, может работать в трех областях: $z \leq 4d^2/\Lambda$ — область Френеля; $z \geq 8d^2/\Lambda$ — область Фраунгофера для ближайших (соседних) элементарных излучателей; $z \geq 2(Nd)^2/\Lambda$ — область Фраунгофера для всего преобразователя в целом ($\Lambda = V/f_0$; N — количество элементарных излучателей) [12].

В таблице приведены результаты расчета частоты f_0 и нижней границы области Фраунгофера для элементарных излучателей ($z_{1 \min}$) и ВШП в целом ($z_{2 \min}$) для трех значений периода d . При расчетах учитывалось, что для кристалла LiNbO_3 $V = 3,57$ км/с, $n = 2,2$. Количество излучателей N принималось равным 50, а диапазон рабочих частот выбирался равным 30% от центральной рабочей частоты ВШП.

Как следует из полученных результатов, в реальных световодопроводах, длина которых со-

Результаты расчета частоты и нижней границы области Фраунгофера

d , мкм	120	75	40
f_0 , МГц	609	770	1055
$z_{1 \min}$, м	27,6	11,25	4,27
$z_{2 \min}$, м	14	7,2	2,4

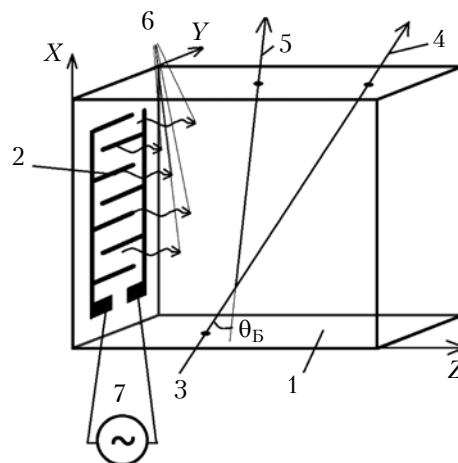
ставляет примерно 10 мм, для ВШП с $d = 120$ мкм и $d = 75$ мкм на частотах 700 МГц и выше никакого перекрытия (интерференции) акустических пучков даже соседних элементарных излучателей не происходит.

Экспериментальные результаты

Для определения направления распространения объемных акустических волн и структуры акустических пучков, возбужденных ВШП с XU -поверхности кристалла ниобата лития прямого среза, применялся теневой метод [13].

Акустооптическое взаимодействие светового луча, падающего на акустооптическую ячейку Брэгга, с объемной акустической волной, возбужденной в ней ВШП, можно представить в двух конфигурациях (рис. 1). В первом случае световой пучок падает на грань $Y0Z$, параллельную электродам ВШП (рис. 1, а), и если угол Брэгга $\theta_B \rightarrow 0^\circ$, то световой пучок распространяется в перпендикулярном электродам направ-

а)



б)

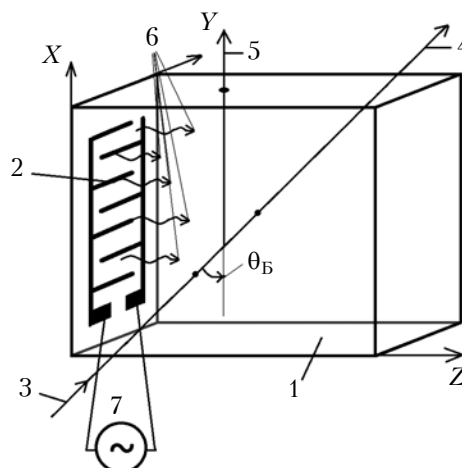


Рис. 1. Различные конфигурации акустооптического взаимодействия светового луча и акустических пучков, возбужденных ВШП:

1 — световодопровод из LiNbO_3 ; 2 — ВШП; 3 — падающий световой пучок; 4 — световой пучок нулевого порядка; 5 — дифракционный световой пучок; 6 — акустическая волна; 7 — генератор Г4-76А

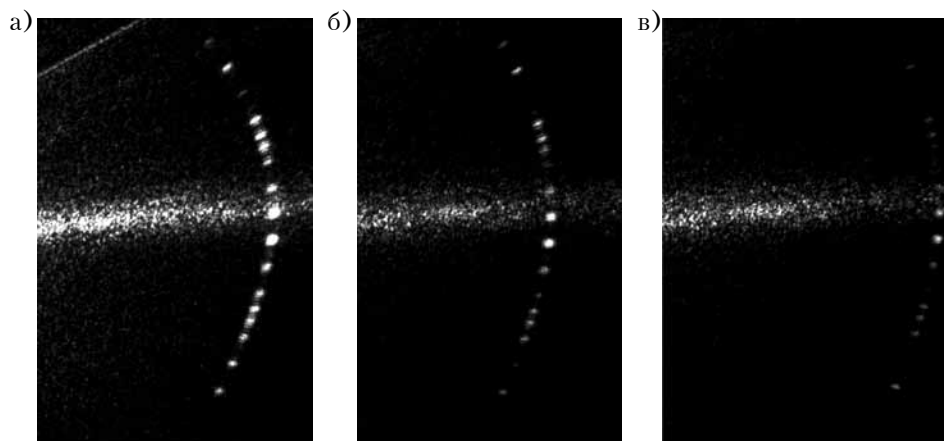


Рис. 2. Картина дифракции светового пучка на объемной акустической волне, возбужденной ВШП (находился слева), соответствующая конфигурации рис. 1, б, на частотах 900 (а), 950 (б) и 1000 МГц (в)

лении. Этот случай соответствует практической схеме использования акустооптического взаимодействия. Во втором случае световой поток падает на грань XOZ , перпендикулярную электродам ВШП (рис. 1, б), и если $\theta_B \rightarrow 0^\circ$, то оптический пучок распространяется параллельно им.

Для визуализации объемной акустической волны, возбужденной ВШП, была выбрана конфигурация акустооптического взаимодействия, представленная на рис. 1, б. Для конфигурации, изображенной на рис. 1, а, визуализировался только пучок шириной (высотой), которая соответствовала длине h перекрытия электродов ВШП.

На рис. 2 и 3 представлены картины дифракции лазерного пучка диаметром 2 мм для этих двух случаев, полученные при следующих параметрах ВШП: $N=50$, $h=0,2$ мм, $d=0,75$ мкм. При визуализации акустического пучка видеокамерой фиксировался центральный дифракционный порядок, изображенный на рис. 2.

Как видно из рис. 2, картина дифракции, соответствующей конфигурации рис. 1, б, в значительной степени зависит от рабочей частоты и от угла падения оптического луча.



Рис. 3. Картина дифракции светового пучка на объемной акустической волне, возбужденной ВШП, соответствующая конфигурации рис. 1, а (в центре — световой пучок нулевого порядка, справа — дифракционный луч)

Следует заметить, что картины дифракции в этих двух случаях взаимодействия световой и акустической волн подобны картине дифракции света на плоской дифракционной решетке, когда свет падает перпендикулярно к штрихам решетки, или скользит вдоль штрихов.

На рис. 4 представлены картины визуализации акустических волн, возбужденных ВШП с $h=0,2$ мм, $N=50$.

Из рис. 4, а видно, что акустическая волна, излучаемая ВШП с $d=120$ мкм на частоте $f=674$ МГц, состоит из отдельных пучков, т. е. она распространяется в зоне Френеля.

В случае, представленном на рис. 4, б, акустическая волна, возбужденная ВШП с $d=75$ мкм на частоте $f=850$ МГц, выглядит более однород-

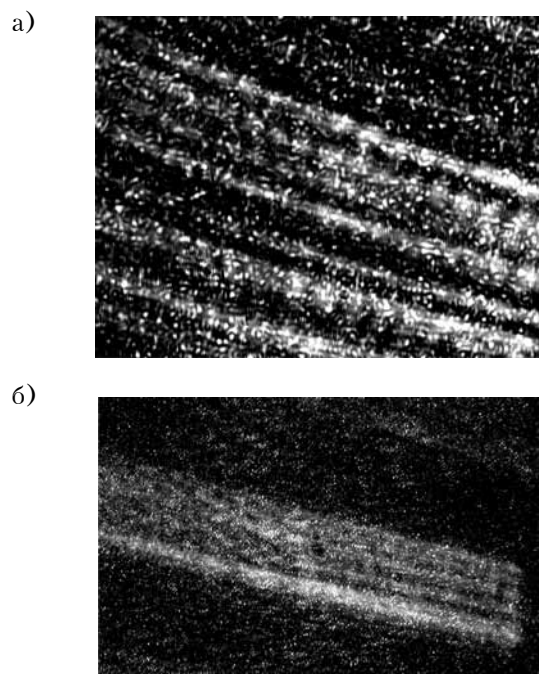


Рис. 4. Теневая картина акустической волны, возбужденной ВШП с периодом $d=120$ мкм на частоте $f=674$ МГц (а) и с периодом $d=75$ мкм на частоте $f=850$ МГц (б) (ВШП располагался вертикально справа)

ной, однако и в этом случае она распространяется в зоне Френеля. Таким образом, экспериментальные результаты подтверждают приведенные ранее оценки для ВШП с периодом $d=120$ мкм и $d=75$ мкм.

Очевидно, что возбуждаемые ВШП с периодом $d \geq 75$ мкм на частотах $f_0 \geq 650$ МГц объемные акустические волны распространяются в реальных акустооптических устройствах в области Френеля в виде отдельных пучков элементарных излучателей, поэтому никакой подстройки под угол Брэгга в таких устройствах не существует. Следовательно, следует признать ошибочными рассуждения, приведенные в [14, 15], где рассмотрены многоэлементные преобразователи с периодом $d \geq 80$ мкм и $d \geq 98$ мкм на частотах $f \geq 1,5$ ГГц. Так, при исследовании многоэлементного преобразователя с периодом $d=80$ мкм, который возбуждает волны в частотном диапазоне $\Delta f=1,6-2,6$ ГГц, проведенном в [14], было использовано представление об антенной звуковой решетке, а в [15] для многоэлементного преобразователя с $d \geq 98$ мкм, работающего в диапазоне частот $1-2,5$ ГГц, были использованы формулы для расчета количества электродов, которые следуют из теории антенной звуковой решетки.

На рис. 5 представлена теневая картина акустического поля ВШП с $d=40$ мкм. Здесь видны две области распространения акустической волны: L_1 — от ВШП до конца зоны Френеля, L_2 — область распространения в зоне Фраунгофера соседних акустических пучков.

Если предположить, что дифракция Фраунгофера наблюдается на расстояниях $z \geq 8d^2/\lambda$, то, поскольку источниками акустической волны являются отдельные излучатели, могут реализовываться случаи интерференции двух волн соседних излучателей, при которых [5, 12]

$$2d \sin \theta = \lambda. \quad (2)$$

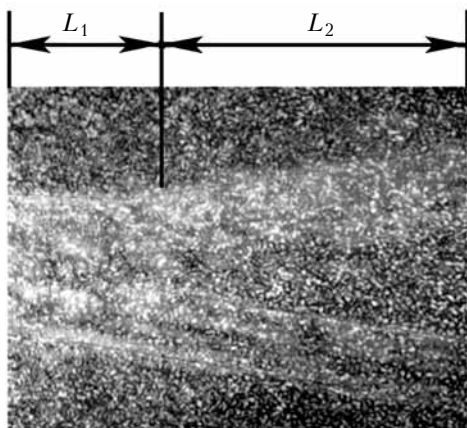


Рис. 5. Теневая картина акустической волны, возбужденной ВШП с периодом $d=40$ мкм на частоте $f=900$ МГц (ВШП располагался вертикально слева, колебания акустической волны распространялись слева направо)

Отсюда следует, что угол распространения перекрывающихся акустических лучей θ зависит от частоты, а следовательно, в этом случае можно осуществлять подстройку под угол Брэгга.

На теневой картине в области Фраунгофера наблюдается два акустических пучка, распространяющихся под углами, симметричными относительно нормали к плоскости, в которой находится многоэлементный преобразователь, что соответствует данным [3, 9, 12]. Результат, приведенный в [11], где количество углов излучения принималось равным трем, следует считать ошибочным.

Выводы

Приведенные в работе результаты показывают, что описание акустического поля в виде произведения диаграмм направленности в дальней зоне не имеет никакого смысла для акустооптических дефлекторов СВЧ-диапазона, в которых акустические волны возбуждаются многоэлементным преобразователем. Условие подстройки под угол Брэгга для расчета периода многоэлементных преобразователей при возбуждении объемных акустических волн в акустооптических дефлекторах СВЧ-диапазона следует дополнить учетом параметра Френеля. Определение области дальней зоны для перекрывающихся соседних акустических пучков, излучаемых элементарными излучателями, после расчета периода многоэлементного преобразователя позволит избежать ошибок при проектировании акустооптических дефлекторов СВЧ-диапазона.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. — Москва: Радио и связь, 1985.
2. Магдич Л. Н., Молчанов В. Я. Акустооптические устройства и их применение. — Москва: Сов. радио, 1978.
3. Goutzolis A. P., Pape D. R. Design and fabrication of acousto-optic devices. — New York: Dekker, 1994.
4. Milsom R. F., Reilly N. H. C., Redwood M. Analysis of generation and detection of surface and bulk acoustic waves by interdigital transducers // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. — 1977. — Vol. 24, N 3. — P. 147–164. — <http://dx.doi.org/10.1109/T-SU.1977.30925>
5. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. — Москва: Радио и связь, 1990.
6. Поверхностные акустические волны / Под ред. А. Олинера. — Москва: Мир, 1981.
7. Волик Д. П., Роздобудько В. В. Анализ амплитудно-частотной характеристики акустооптического дефлектора с поверхностным аподизированным пьезопреобразователем // ЖТФ. — 2009. — Т. 70, № 6. — С. 124–128.
8. Honkanen K., Koskela J., Plessky V. P., Salomaa M. M. Parasitic BAW excitation in LSAW transducers // IEEE Ultrasonics Symposium. — 1998. — Vol. 1. — P. 949–952. — <http://dx.doi.org/10.1109/ULTSYM.1998.762299>.

9. Shcherbakov A. S., Hanessian de la Graza A. V., Chavushyan V., Nemov S. A. A multi-phonon light scattering and resolution of acousto-optic devices // Proc. SPIE 8240. — 2012. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.910057>

10. Deng M. Simulation of generation of bulk acoustic waves by interdigital transducers // IEEE Ultrasonics Symposium. — 2001. — Vol. 1. — P. 855–858. — <http://dx.doi.org/10.1109/ULTSYM.2001.991854>

11. Namdeo A. K., Nemade H. B., Ramakrishnan N. FEM simulation of generation of bulk acoustic waves and their effects in SAW devices // Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference, 2010, India.

12. Винник Д. М., Решотка А. Г., Сугак Д. Ю., Вакив Н.М. Возбуждение объемных акустических волн встречно-штыревым преобразователем в кристаллах // Вестник НУ «Львовская политехника». Электроника. — 2013. — № 764. — С. 23–29.

13. Винник Д. М., Вороняк Т. И. Распространение СВЧ ультразвуковых объемных волн в устройствах на кристаллах ниобата лития // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2007. — № 2. — С. 17–20.

14. Белый В. Н., Войтенко И. Г., Горельский Н. Н., Кулак Г. В., Широкополосный акустооптический дефлектор на объемных акустических волнах // ЖТФ. — 1989. — Т. 59, № 5. — С. 82–85.

15. Григорьев М. А., Толстикова А. В., Навроцкая Ю. Н. Взаимодействие света с акустическими волнами, возбуждаемыми синфазным многоэлементным преобразователем в диапазоне 1,0–2,5 GHz // ЖТФ. — 2006. — Т. 76, № 5. — С. 88–93.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 27.08 2015 г.*

О. Г. РЕШОТКА¹, В. Г. ГАЙДУЧОК², М. М. ВАКИВ²

Україна, м. Львів, ¹Національний університет «Львівська політехніка»,
²Науково-виробниче підприємство «Карат»

E-mail: amadey101@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄМНИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ НВЧ-ДІАПАЗОНУ, ЗБУДЖЕНИХ ЗУСТРІЧНО-ШТИРЬОВИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

Досліджено структуру і напрямки розповсюдження об'ємних акустичних хвиль, збуджених зустрічно-штыревим перетворювачем (ЗШП) в кристалі ніобата літію, за допомогою їх візуалізації. Показано, що для розрахунку періоду ЗШП при конструюванні акустооптичних дефлекторів НВЧ-діапазону недостатньо використовувати лише підстройку під кут Бреґґа. Для визначення області розповсюдження таких акустичних хвиль потрібно також враховувати параметр Френеля.

Ключові слова: акустооптичні пристрої, об'ємні акустичні хвилі, зустрічно-штыревий перетворювач, п'єзоелектричний перетворювач, дифракція світлової хвилі.

DOI: 10.15222/TKEA2015.5-6.22
UDC 535.42

О. Г. RESHOTKA¹, V. G. HAYDUCHOK², N. M. VAKIV²

Ukraine, Lviv, ¹National University «Lviv Polytechnic»,
²Scientific Research Company «Carat»

E-mail: amadey101@gmail.com

INVESTIGATION OF BULK ACOUSTIC MICROWAVES EXCITED BY AN INTERDIGITAL TRANSDUCER

Excitation of bulk and surface acoustic waves with the interdigital transducer (IDT), which is deposited on the surface of piezoelectric crystal, is widely used in the development of devices in acoustoelectronics and in the design of the microwave acousto-optic deflectors. Excitation of bulk acoustic waves by IDT in the devices on surface acoustic waves leads to the appearance of spurious signals. At the same time excitation of bulk acoustic waves with IDT from the surface of lithium niobate crystals allows creating high frequency acousto-optic deflectors, which makes possible to significantly simplify the technology of their production. Therefore, significant attention is paid to the task of excitation and distribution of bulk acoustic waves with IDT including recent times by the method of simulation of their excitation and distribution. The obtained theoretical results require experimental verification. This paper documents the visualization of acoustic beams excited with IDT from the XY-surface of lithium niobate crystals. The Bragg cells with LiNbO₃ crystals coated with IDT with a different period of electrodes were manufactured for the experimental research of excitation and distribution of bulk acoustic waves. Visualization results have shown that the acoustic waves excited with IDT distribute in both the Fresnel zone and the Fraunhofer zone. The length of these zones is caused by individual elementary emitters of which consists the IDT (by their size). At the same time the far

zone for IDT is located at distances much greater than the actual size of the LiNbO_3 crystals. This peculiarity is not always taken into account when calculating diffraction. The achieved results can be used to design high-frequency acousto-optic devices, as well as in the development of devices based on surface acoustic waves.

Keywords: acousto-optic devices, bulk acoustic wave, transducer array, piezoelectric transducer, diffraction of light waves.

REFERENCES

1. Balakshii V. I., Parygin V. N., Chirkov L. E. *Fizicheskie osnovy akustooptiki* [Physical principles of acousto-optics]. Moscow, Radio i svyaz', 1985, 278 p.
2. Magdich L.N., Molchanov V.Ya. *Akustoopticheskie ustroystva i ikh primeneniye* [Acoustooptic devices and their applications]. Moscow, Sov. radio, 1978, 112 p.
3. Goutzolis A.P., Pape D.R. *Design and Fabrication of Acousto-optic Devices*. New York, Dekker, 1994, 318 p.
4. Robert F. Milsom, N. H. C. Reilly, Martin Redwood. Analysis of generation and detection of surface and bulk acoustic waves by interdigital transducers. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1977, vol. 24, no 3, pp. 147-164. <http://dx.doi.org/10.1109/T-SU.1977.30925>
5. Morgan D. *Ustroystva obrabotki signalov na poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh* [The devices of the signal processing on surface acoustic waves]. Moscow, Radio i svyaz', 1990, 416 p.
6. *Poverkhnostnye akusticheskie volny* [Surface acoustic wave]. Ed. By A. Oliner, Moscow, Mir, 1981, 390 p.
7. Volik D.P., Rozdobud'ko V.V. [Analysis of amplitude-frequency characteristics of acousto-optic deflector with the surface apodized transducer]. *Journal of Applied Physics*, 2009, vol. 70, no 6, pp. 124-128.
8. Honkanen K., Koskela J., Plessky V. P., Salomaa M. M. Parasitic BAW excitation in LSAW transducers. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 1998, vol. 1, pp. 949-952. <http://dx.doi.org/10.1109/ULTSYM.1998.762299>.
9. Alexandre S. Shcherbakov, Ana V. Hanessian de la Graza, Vahram Chavushyan, Sergey A. Nemov. A multi-phonon light scattering and resolution of acousto-optic devices. *Proc. SPIE 8240*, 2012. <http://dx.doi.org/10.1117/12.910057>
10. Mingxi Deng. Simulation of generation of bulk acoustic waves by interdigital transducers. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 2001, vol. 1, pp. 855-858. <http://dx.doi.org/10.1109/ULTSYM.2001.991854>
11. Ashish Kumar Namdeo, Harshal B. Nemade and Ramakrishnan N. FEM Simulation of Generation of Bulk Acoustic Waves and Their Effects in SAW Devices. *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference*, 2010, India.
12. Vynnyk D.M., Reshotka A.G., Sugak D.Yu., Vakyy M.M. [The excitation of the bulk acoustic wave by interdigital transducer in crystals]. *Proceedings of the National University "Lviv Polytechnic". Electronics*, 2013, no. 764, pp. 23-29.
13. Vynnyk D.M., Voronjak T.I. [Propagation of the microwave ultrasonic bulk waves in the devices on lithium niobate crystals]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2007, no 2, pp. 17-20.
14. Belyiy V.N., Voytenko I.G., Gorelyiy N.N., Kulak G.V., [Wideband acoustooptic deflector on the bulk acoustic waves]. *Journal of Applied Physics*, 1989, vol. 59, no. 5, pp. 82-85.
15. Grigorev M.A., Tolstikov A.V., Navrotskaya Yu.N. [The interaction of light with acoustic waves excited by the multi-element in-phase transducer in the range of 1.0-2.5 GHz]. *Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 76, no. 5, pp. 88-93.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

В. М. Теслюк, А. І. Пукач, Р. В. Загарю Методи, моделі та засоби автоматизації визначення ємнісних і резистивних параметрів елементів МЕМС.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.

Проаналізовано методи, моделі та засоби визначення електричного опору резистивних параметрів електричних кіл, а також розглянуто резистивні та ємнісні параметри МЕМС та особливості автоматизації визначення їх значення. Наведено розроблені методи для автоматичного визначення електричного опору та ємності резистивних та ємнісних параметрів МЕМС, що враховують особливості та специфіку МЕМС-технологій. Здійснено моделювання роботи розроблених методів та аналіз отриманих результатів.

Для радіоінженерів, науковців і студентів, які спеціалізуються у сфері автоматизації вимірювання та контролю ємнісних і резистивних параметрів мікроелектронних пристроїв та систем.

