

# ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

---

## OPTICAL, OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

---

UDC 621.372.8, 54-161  
PACS NUMBER: 42.82.-M

### ГРАДІЄНТНІ ХВИЛЕВОДИ ІЗ ЗАДАНИМ ПРОФІЛЕМ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ НА ОСНОВІ ХАЛЬКОГЕНІДНИХ СКЛОПОДІБНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ ДЛЯ СЕРЕДНЬОГО ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ

*І.І. Сакалош, Й.П. Шаркань, Г.Т. Горват, В.М. Різак*

*Ужгородський національний університет  
вул. Підгірна, 46, 88000, Ужгород, Україна  
e-mail: [shark@univ.uzhgorod.ua](mailto:shark@univ.uzhgorod.ua)*

### ГРАДІЄНТНІ ХВИЛЕВОДИ ІЗ ЗАДАНИМ ПРОФІЛЕМ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ НА ОСНОВІ ХАЛЬКОГЕНІДНИХ СКЛОПОДІБНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ ДЛЯ СЕРЕДНЬОГО ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ

*І.І. Сакалош, Й.П. Шаркань, Г.Т. Горват, В.М. Різак*

**Анотація.** Проведено розрахунок основних параметрів одномодових планарних інтегрально-оптичних хвильоводів на основі селенідних і телуридних матеріалів для середнього інфрачервоного діапазону ( $\lambda = 5\text{--}20$  мкм), а також розподілу електричної складової поля та коефіцієнтів локалізації мод в планарних інтегрально-оптичних структурах з однорідним, еспоненційним та параболічним профілем показника заломлення хвильоводного шару. Показано, що використання в якості хвильоводного шару градієнтної плівки ХСН із заданим профілем показника заломлення забезпечує можливість регулювати хвильоводні параметри планарного інтегрально-оптичного хвильовода в досить широкому діапазоні.

**Ключові слова:** хвильоводи, градієнтний шар, халькогенідні склоподібні напівпровідники, профіль показника заломлення

### GRADIENT WAVEGUIDES WITH A GIVEN PROFILE OF REFRACTIVE INDEX ON THE BASIS OF CHALCOGENIDE GLASSY SEMICONDUCTORS FOR MID-INFRARED BAND

*I.I. Sakalosh, Y.P. Sharkan, G.T. Horvat, V.M. Rizak*

**Abstract.** The calculation of basic parameters of single-mode planar integrated-optical waveguides based on selenide and telluride materials for the mid-infrared band ( $\lambda = 5\text{--}20$   $\mu\text{m}$ ) as well as distribution of electric field component and coefficients of mode localization in planar integrated-optical structures with homogeneous, exponential and parabolic profile of refractive index of waveguide layer was carried out. It was shown that using the gradient CGS film as a waveguide layer with the given refractive index profile enables to adjust the waveguide parameters of a planar integral-optical waveguide in a wide range.

**Keywords:** waveguides, gradient layer, chalcogenide glassy semiconductors, profile of refractive index

## ГРАДИЕНТНЫЕ ВОЛНОВОДЫ С ЗАДАННЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКЛООБРАЗНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ДЛЯ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

*И.И. Сакалош, И.П. Шаркань, Г.Т. Горват, В.М. Ризак*

**Аннотация.** Проведен расчет основных параметров одномодовых планарных интегрально-оптических волноводов на основе селенидных и теллуридных материалов для среднего инфракрасного диапазона ( $\lambda = 5\text{--}20$  мкм), а также распределения электрической составляющей поля и коэффициентов локализации мод в планарных интегрально-оптических структурах с однородным, экспоненциальным и параболическим профилем показателя преломления волноводного слоя. Показано, что использование в качестве волноводного слоя градиентной пленки ХСП с заданным профилем показателя преломления обеспечивает возможность регулировать волноводные параметры планарного интегрально-оптического волновода в достаточно широком диапазоне.

**Ключевые слова:** волноводы, градиентный слой, халькогенидные стеклообразные полупроводники, профиль показателя преломления.

### Вступ

Халькогенідні склоподібні напівпровідники (ХСН) знайшли широке практичне застосування в оптоелектроніці та мікрофотоніці завдяки структурній гнучкості, широкому діапазону оптичних і електричних властивостей, світлочутливості, високій оптичній лінійності, а також наявності нелінійних оптичних властивостей. Станом на сьогодні розроблено та створено цілий ряд мікроструктурних пристроїв, які використовують зазначені унікальні властивості халькогенідних стеклок, серед них нам добре відомі такі як: ґратки [1], пристрої оптичної пам'яті [2], голографічного запису інформації [3] та ін.

За останні десять років, дослідження в області мікрофотоніки надали ряд важливих технологічних рішень для підвищення ефективності астрономічного обладнання. Зокрема, оптичні волокна і пристрої інтегральної оптики вже використовуються в астрономічних дослідженнях [4, 5], або будуть використовуватися в найближчому майбутньому [6, 7].

Одним з напрямків оптоелектроніки, що найбільш стрімко розвивається в даний час є інтегральна оптика, яка забезпечує можливість створення надійних та малогабаритних пристроїв керування оптичним випромінюванням та оптичної обробки інформації. Тривалий час оптичні методи обробки інформації застосовуються для вирішення різних прикладних задач, зокрема для розпізнавання образів методом узгодженої просторової фільтрації когерентного випромінювання.

ХСН завдяки великими атомним масам халькогенідів і відносно слабкими зв'язками між

головними атомами [8] мають широке вікно прозорості від ближньої до середньої, або навіть далекої ІЧ області спектру. В зв'язку з цим планарні інтегрально-оптичні хвилеводи на основі селенидних і телуридних матеріалів знайшли застосування в проєкті Європейської космічної агенції (ESA) під назвою *Darwin*. Даним проєктом передбачається виведення в космос системи інфрачервоних телескопів з метою виявлення екзопланет земного типу, що не належать до Сонячної системи, шляхом реєстрації та оптичної обробки сигналів в середньому інфрачервоному діапазоні 5–20 мкм за допомогою планарних інтегрально-оптичних хвилеводів на основі селенидних і телуридних матеріалів, які використовуються в якості одномодових фільтрів в так званій зануляючій інтерферометрії (англ. nulling interferometry) [9–11]. Саме відсутність одномодових хвилеводів для середнього ІЧ-діапазону і підштовхнула до проведення технологічних досліджень та розробки таких пристроїв [12–14].

### Схема та конструкції

З метою покращення хвилеводних параметрів планарних інтегрально-оптичних хвилеводів на основі селенидних і телуридних матеріалів для середнього ІЧ-діапазону ( $\lambda = 5\text{--}20$  мкм) нами розглянуто використання, для наведених вище цілей, планарних інтегрально-оптичних хвилеводів, градієнтний хвилеводний шар яких має експоненційний та параболический профілі показника заломлення (рис. 1.1).

Для забезпечення хвилеводного режиму матеріалом для підкладки ми обрали  $\text{As}_2\text{Se}_3$ , який являється прозорим до 16 мкм і дисперсія показ-

Таблиця 1. Основні параметри одномодових планарних інтегрально-оптичних хвиеводів на основі  $\text{As}_2\text{Se}_3$  та  $\text{Te}_2\text{As}_3\text{Se}_5$ .

Профіль показника заломлення хвиеводного шару	$\lambda$ , мм	$n_a$	$n_s$	$n_w$	$n_{w \max}$	$n_{\text{eff}}$	$d$ , мкм	$d_0$ , мкм	$d_1$ , мкм	$\Delta\lambda$ , мкм	$\Gamma$ , %
Однорідний	5	1	2,821	2,874	-	2,859	6,49	5,23	6,50	5,00-20,00	79,95
	10,6	1	2,787	2,861	-	2,814					57,99
	15	1	2,760	2,850	-	2,782					44,46
	20	1	2,730	2,838	-	2,739					33,21
Експоненційний	5	1	2,821	-	2,874	2,841	6,06	5,64	6,07	4,67-21,58	67,87
	10,6	1	2,787	-	2,861	2,800					52,64
	15	1	2,760	-	2,850	2,769					39,10
	20	1	2,730	-	2,838	2,735					25,12
Параболічний	5	1	2,821	-	2,874	2,862	6,65	5,06	6,66	5,13-19,56	86,52
	10,6	1	2,787	-	2,861	2,831					71,62
	15	1	2,760	-	2,850	2,802					53,51
	20	1	2,730	-	2,838	2,763					40,67

де  $\lambda$  - довжина хвилі,  $n_a$  - показник заломлення покривного шару,  $n_s$  - показник заломлення підкладки,  $n_w$  - показник заломлення однорідного хвиеводу,  $n_{w \max}$  - максимальне значення показника заломлення градієнтного хвиеводу,  $n_{\text{eff}}$  - ефективний показник заломлення хвиеводу,  $d$  - товщина хвиеводу,  $d_0$  - граничне мінімальне значення товщини хвиеводу для існування нульової моди,  $d_1$  - граничне мінімальне значення товщини хвиеводу для існування першої моди,  $\Delta\lambda$  - робочий діапазон довжин хвиль одномодового планарного інтегрально-оптичного хвиеводу,  $\Gamma$  - коефіцієнт локалізації мод в одномодовому планарному інтегрально-оптичному хвиеводі.

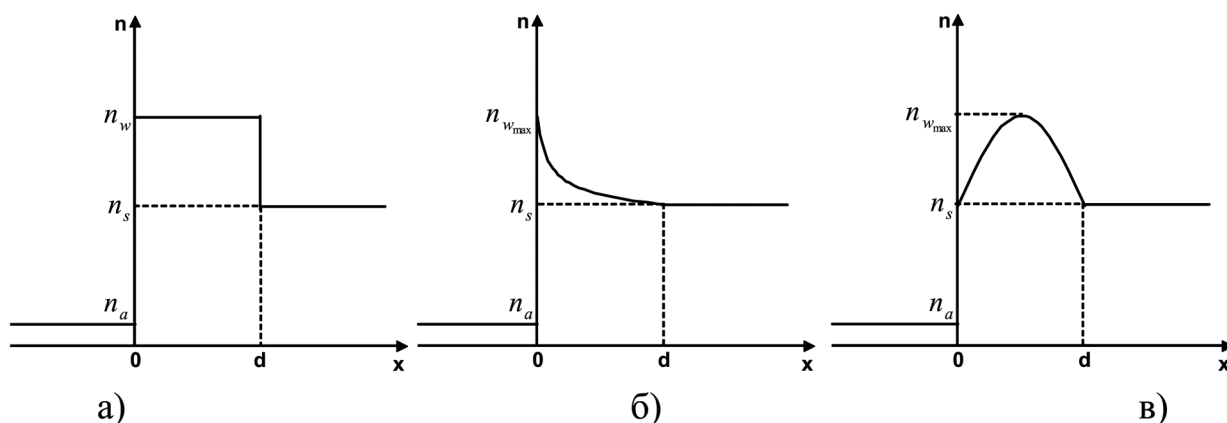


Рис. 1.1. Хвелеводні оптичні структури на основі ХСН із однорідним а), еспоненційним б) та параболічним в) розподілом профілю показника заломлення хвелеводного шару:  $d$  – товщина хвелевода;  $n_s$  – показник заломлення підкладки;  $n_w$  – показник заломлення хвелевода;  $n_{w_{max}}$  – максимальне значення показника заломлення градієнтного хвелеводного шару ХСН.

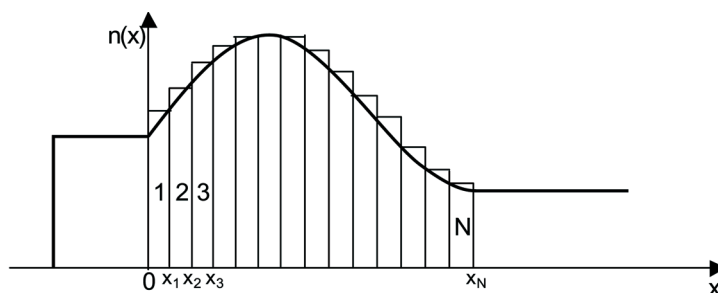


Рис. 1.2. Схематичне зображення методу стратифікації.

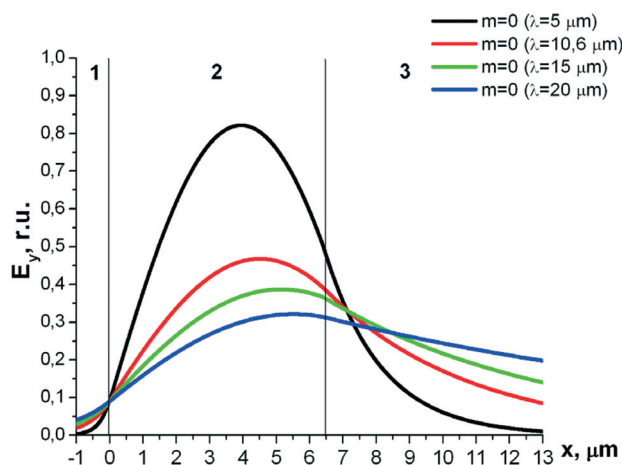


Рис. 1.3. Розподіл електричної складової поля в одномодовому планарному інтегрально-оптичному хвелеводі на основі  $\text{As}_2\text{Se}_3$  та  $\text{Te}_2\text{As}_3\text{Se}_5$  з однорідним профілем показника заломлення хвелеводного шару.

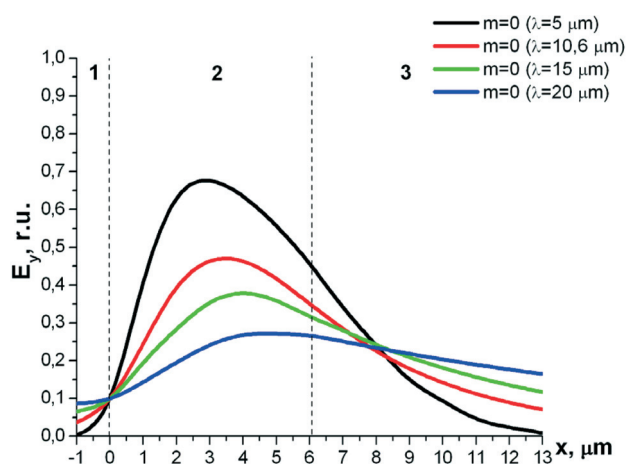


Рис. 1.4. Розподіл електричної складової поля в одномодовому планарному інтегрально-оптичному хвелеводі на основі  $\text{As}_2\text{Se}_3$  та  $\text{Te}_2\text{As}_3\text{Se}_5$  з експоненційним профілем показника заломлення хвелеводного шару.

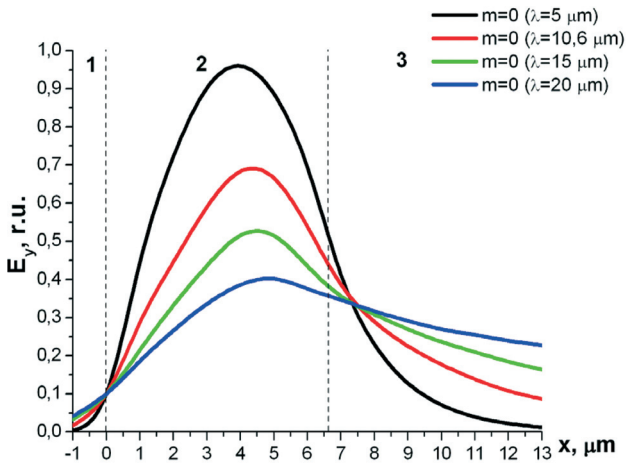


Рис. 1.5. Розподіл електричної складової поля в одномодовому планарному інтегрально-оптичному хвилеводі на основі  $\text{As}_2\text{Se}_3$  та  $\text{Te}_2\text{As}_3\text{Se}_5$  з параболічним профілем показника заломлення хвилеводного шару.

ника заломлення якого в середньому ІЧ-діапазоні практично лінійна та описується наступною залежністю  $n_s(\lambda) = -0,00605 \times \lambda + 2,85091$  [15], а в якості матеріалу для хвилеводного шару —  $\text{Te}_2\text{As}_3\text{Se}_5$ , що являється прозорим до 20 мкм і дисперсія показника заломлення якого в середньому ІЧ-діапазоні описується наступною залежністю  $n_w(\lambda) = -0,0024 \times \lambda + 2,88615$  [15], де  $\lambda$  в мкм.

Гradientний хвилеводний шар, в нашому випадку на основі  $\text{As}_2\text{Se}_3$  та  $\text{Te}_2\text{As}_3\text{Se}_5$ , одержується методом дискретного термічного випаровування шляхом незалежної подачі вихідних компонент з окремих бункерів у загальний випаровувач [16]. Причому швидкість подачі кожної речовини змінюється в процесі росту плівки, а закон зміни швидкостей подачі речовин визначається профілем показника заломлення одержуваних неоднорідних структур.

### Розрахунок

Розрахунок основних параметрів планарних інтегрально-оптичних хвилеводів на основі селенідних і телуридних матеріалів та розподілу поля в двошарових хвилеводних оптичних структурах, нехтуючи можливими втратами на поглинання та розсіювання, здійснюється з використанням розробленого нами програмного забезпечення, алгоритм якого базується на методі стратифікації [17].

Суть методу стратифікації полягає в заміні відомого gradientного розподілу показника заломлення багатошаровою структурою в якій

кількість шарів і показник заломлення кожного шару вибрані таким чином щоб найкраще апроксимувати початковий профіль (рис. 1.2). В даному методі спочатку знаходять розв'язок скалярного хвильового рівняння в середині кожного шару, а потім зшивають ці рішення на границях розділу.

### Результати розрахунків та обговорення

Для того, щоб в кожній із розглянутих нами структурі у всьому спектрі середнього ІЧ-діапазону ( $\lambda = 5\text{--}20$  мкм), при заданих значеннях показника заломлення, виникала тільки нульова мода ми розраховували граничне мінімальне значення товщини хвилеводу для існування нульової  $d_0$  та першої  $d_1$  моди і встановили оптимальне значення товщини хвилеводного шару  $d$  (табл. 1). Всі одержані основні параметри одномодових планарних інтегрально-оптичних хвилеводів на основі  $\text{As}_2\text{Se}_3$  та  $\text{Te}_2\text{As}_3\text{Se}_5$  приведені в таблиці 1. Розподіл електричної складової поля в одномодовому планарному інтегрально-оптичному хвилеводі на основі  $\text{As}_2\text{Se}_3$  та  $\text{Te}_2\text{As}_3\text{Se}_5$  з однорідним, експоненціальним та параболічним профілем показника заломлення хвилеводного шару представлено на рисунках 1.3-1.5 відповідно.

Аналізуючи приведені результати розрахунків (табл. 1, рис. 1.3 — 1.5), можна зробити висновок, що використання в якості хвилеводного шару gradientної плівки ХСН із заданим профілем показника заломлення забезпечує можливість регулювати хвилеводні параметри планарного інтегрально-оптичного хвилевода в досить широкому діапазоні. Так конструкція з експоненціальним профілем показника заломлення хвилеводного шару (рис. 1.1 б) при достатніх значеннях коефіцієнту локалізації мод в одномодовому планарному інтегрально-оптичному хвилеводі дозволяє збільшити робочий діапазон довжин хвиль на 12,73 %. Інша конструкція (рис. 1.1 в) з параболічним профілем показника заломлення хвилеводного шару при незначному звуженні робочого діапазону довжин хвиль забезпечує найвище значення коефіцієнту локалізації на всіх довжинах хвиль і, як результат, найкраще значення співвідношення сигнал/шум для одномодових інтегрально-оптичних фільтрів, які використовуватимуться в методиці зануляючої інтерферометрії.

В подальшому, для перевірки результатів розрахунків, ми плануємо одержати розглянуті в даній роботі структури та експериментально дослідити їх, використовуючи існуючу в нас методику дослідження основних параметрів планарних інтегрально-оптичних хвилеводів [18].



**Література**

- Galstyan T., Viens J., Villeneuve A., Richardson K., and Duguay M. Photoinduced self-developing relief gratings in thin film chalcogenide As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> glasses. // *J. Lightwave Technol.* . – 1997. – V.15. – P. 1343–1347 .
- Sun Z., Zhou J., Ahuja R., Structure of phase change materials for data storage. // *Phy. Rev. Lett.* . – 2006. – V.96. – P. 055507 .
- Ozols A., Saharovs D., Reinfelds M. Holographic recording in amorphous As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> films at 633 nm. // *J. Non-Cryst. Sol.* . – 2006. – V. 352. – P. 2652–2656 .
- Coude du Foresto V., Perrin G., Mariotti J.-M., Lacasse M., Traub W. The FLUOR/IOTA fiber stellar interferometer. // *Proceedings of Integrated Optics for Astronomical Interferometry.* . – 1997. – P. 115–125.
- Berger J.-P., Haguenauer P., Kern P., Perraut K., Malbet F., Schanen I., Severi M., Millan-Gabet R., Traub W. Integrated optics for astronomical interferometry. // *IV. First measurements of stars” Astron. & Astrophys. Supp.* . – 2001. – V376. – L31–L34.
- Malbet F., Berger J.-P., Garcia P., Kern P., Perraut K., Benisty M., Jocu L., Herwats E., Lebouquin J.-B., Labeye P., Coarer E. Le, Preis O.. VITRUV - Imaging close environments of stars and galaxies with the VLTI at milli-arcsec resolution. // *VLTI Workshop on Optical and IR Interferometry, Garching bei Munchen, Germany.* . – 2005. – p. (astro--ph/0507233)
- Perrin G., Woillez J., Lai O., Guerin J., Kotani T., Wizinowich P. L., LeMignant D., Hrynevych M., Gathright J., Lena P., Chaffee F., Vergnole S. Interferometric coupling of the Keck telescopes with single-mode fibers. / *Science.* . – 2001. – V311. P. 194.
- Zhang X., Calvez L., Seznec V., Ma H., Danto S., Houizot P., Boussard-Pledel C., Lucas J. Infrared transmitting glasses and glass-ceramics. // *J. Non-Cryst. Sol.* . – 2006. – V. 352. – P. 2411–2415.
- Bracewell R. N. Detecting non-solar planets by spinning infrared interferometer. // *Nature, London.* . – 1978. – V. 274. – P. 780–781.
- Angel J. R. P., Cheng A. Y. S., Woolf N. J. A space telescope for infrared spectroscopy of earth-like planets. // *Nature, London.* . – 1986. – V. 322. – P. 341–343.
- Mennesson B., Ollivier M., C. Ruilier. Use of single-mode waveguides to correct the optical defects of a nulling interferometer. // *J. Opt. Soc. Am. A.* . – 2002. – V. 19. – P. 596–602.
- Borde P., Perrin G., Amy-Klein A., Daussey C., Maze G., Updated results on prototype chalcogenide fibers for 10 μm wavefront spatial filtering. // *DARWIN/TPF and the Search for Extra-solar Terrestrial Planets.* 2003. – P. 371–374.
- Wehmeier U. J., Swain M. R., Drouet D'Aubigny C. Y., Golish D. R., C. K. Walker. The potential of conductive waveguides for nulling interferometry. // *New Frontiers for Stellar Interferometry.* . – 2004. – P. 1435–1443.
- Wallner O., Artjuschenko V. G., Flatscher R. Development of silver-halide single-mode fibers for modal filtering in the mid-infrared. // *New Frontiers for Stellar Interferometry.* . – 2004. – P. 636–646.
- Palik E. D. Handbook of Optical Constants. (Academic Press New York, 1985).
- Горват Г.Т., Шаркань Й.П., Попович І.І., Житов Н.Б. Технологічні особливості одержання градієнтних плівкових елементів на основі ХСН для хвильоводних сенсорних структур. // Матеріали міжнародної конференції “наноструктурні системи: технології - структура - властивості - застосування (НСС-2008)», Ужгород – 2008. – С.188.
- Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов: Пер. с англ. - Наука М., 1984. - 512 с..
- Horvat G. T., Sakalosh I. I., Sharkan Y. P., Popovich I. I. Integral-optic waveguide structures with nanosized active layer on the base of chalcogenide glassy semiconductors (CGS). // *Sensor Electronics And Microsystem Technologies.* . – 2010. – V.1. – P. 58–63.