

УДК 533.535.3.015

## ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ХВИЛЕВОДІВ

Т. Половинко<sup>1</sup>, Г. Гринчук<sup>2</sup>, І. Половинко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут НАН України ім. Карпенка,  
вул. Наукова, 5, 79060 Львів, Україна  
[polovynko1@gmail.com](mailto:polovynko1@gmail.com)

<sup>2</sup>Львівський національний університет імені Івана Франка,  
вул. Ген. Тарнавського, 107, 79005 Львів, Україна  
[polovynkoi@gmail.com](mailto:polovynkoi@gmail.com)

У рамках оптико-геометричного опису діелектричних хвильоводів розглянуто аналіз поперечного резонансу для різноманітних прозорих середовищ. Запрограмовано вираз для розрахунку кутів поширення хвилевідних мод. Розрахунки виконано для симетричних хвильоводів з арсеніду галію – єдиного матеріалу, на якому можливі такі функції оптичних планарних елементів, як генерація випромінювання, поширення його по хвильоводу, модуляція, детектування та ін. Розрахунки підтвердили, що для нульової моди немає умови відсікання, тобто вона поширюватиметься у хвильоводі як завгодно малої товщини. Крім різних показників заломлення, програма дає змогу враховувати товщини хвильоводів, порядок мод та довжину хвилі випромінювання. Програма написана в середовищі програмування Embarcadero. На підставі отриманих результатів обчислено такі важливі параметри хвильоводу, як ефективний хвилевідний показник заломлення, нормована частота і товщина плівки та нормований хвилевідний показник заломлення. Отримані дані є важливими для розв'язування задачі перетворення лазерного пучка у поверхневу хвилю й оберненої задачі, тобто перетворення хвилі у вихідний пучок. Написана програма також дає змогу обчислювати кут повного внутрішнього відбивання для ТЕ-мод довільних порядків.

*Ключові слова:* оптика, діелектричні хвильоводи, моди хвильоводу, поверхнева хвиля.

Сьогодні одним з важливих завдань сучасної оптоелектроніки є заміна електронних інтегральних схем еквівалентними, а можливо, й ефективнішими інтегрально оптичними схемами. Тому інтегрально-оптичні компоненти повинні бути компактними і мініатюрними, надійними, з високою механічною і термічною стабільністю, низькою споживаною потужністю і піддаватись інтеграції на одній підкладці, або “чипі” [1–5]. У низці праць на базі інтегрально-оптичних елементів розглянуто можливість створення оптичних комп'ютерів [6, 7], які за параметрами значно перевищують радіотехнічні обчислювальні машини. Аналіз літературних даних засвідчив, що оптичні комп'ютери передусім потребують створення пасивних елементів з наперед заданими властивостями. Ці вимоги стимулюють, з одного боку, розробку вдосконалених методів виготовлення тонких плівок, а з іншого, – моделювання та розрахунки їхніх властивостей. У більшості випадків під час розгляду пристроїв інтегральної оптики використовують теоретичну модель,

яка ґрунтується на електромагнітній теорії [1–5, 8, 9]. Однак для практичного використання часто вигідно користуватись описом поширення світла у плоскому хвилеводі з погляду геометричної оптики [4, 5].

Методи геометричної оптики стосовно плоских хвилеводів вивчали досить детально в працях [1–6]. Однак у багатьох випадках вони мали загальний характер і не були придатними для використання в практичних цілях. Нові можливості для моделювання хвилеводів створили досягнення комп'ютерної техніки. Нижче наведено програму для аналізу планарних діелектричних хвилеводів, створену в середовищі розробки Embarcadero® RAD Studio XE3.

**Оптичний хвилевід у геометричній оптиці.** З погляду геометричної оптики поширення світла в плоскому діелектричному хвилеводі можна описати як поширення світлового променя, який унаслідок повного внутрішнього відбивання від меж середовищ хвилевід–підкладка і хвилевід–покривний шар рухається по зигзагоподібному шляху. Основну роль у цьому разі відіграє явище відбивання і заломлення на межі двох діелектриків. Братимемо до уваги ТЕ-моду, тобто коли вектори напруженості електричних полів перпендикулярні до площини падіння, у якій лежать нормалі до хвильової поверхні і межі середовищ. У цьому випадку вираз для коефіцієнта відбивання можна записати

$$R_{TE} = (n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2) / (n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2) = \\ = (n_1 \cos \theta_1 - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}) / (n_1 \cos \theta_1 + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}) \quad (1)$$

де  $n_1$  і  $n_2$  – показники заломлення середовищ, у яких відбувається падіння та заломлення світлового променя, відповідно;  $\theta_1$  і  $\theta_2$  – кут падіння і заломлення, відповідно.

Критичний кут  $\theta_c$  визначають виразом

$$\sin \theta_c = n_2 / n_1. \quad (2)$$

Доки виконується нерівність  $\theta_1 < \theta_c$ , маємо лише часткове відбивання світла і величина  $R$  набуває дійсного значення.

Як тільки кут падіння  $\theta_m$  буде більшим від значення  $\theta_c$ , то модуль коефіцієнта відбивання  $|R| = 1$  і можна говорити про повне відбивання світла. У цьому випадку величина  $R$  є комплексною і відбитий промінь зсувається по фазі відносно падаючого на кут  $\varphi_{TE}$ . Тоді можна записати

$$R = \exp(2 / \varphi_{TE}) \quad (3)$$

й отримати за допомогою формули Френеля вираз для фазових зсувів  $\varphi_{TE}$

$$\operatorname{tg} \varphi_{TE} = \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2} / (n_1 \cos \theta_1) \quad (4)$$

На рис. 1 зображений вигляд з боку на плоский хвилевод. Система координат вибрана таким чином, що світло поширюється в напрямку осі  $z$ . Хвилевід накладає обмеження на поширення світла вздовж осі  $\delta$ . Крім того, як сама структура, так і світло однорідні в напрямі осі  $o$ . Як бачимо з рис. 1, світло йде півкою по зигзагоподібному шляху.

Поширення світлового променя у хвилеводі, зображеному на рис. 1, описує умова самоузгодженості, яку ще називають умовою поперечного резонансу:

$$2kn_f h \cos \theta - 2\varphi_s - 2\varphi_c = 2\pi, \quad (5)$$

де  $\nu$  – ціле число (0,1,2...), яке визначає порядок моди; фазові зсуви  $\varphi_s$  і  $\varphi_2$  є функціями кута падіння  $\theta$ . Рівність (6), по суті, є дисперсійним рівнянням хвильоводу, яке визначає сталу поширення  $\beta$  як функцію частоти  $\omega$  і товщини плівки  $h$ :

$$\beta = \omega / v_p = kn_f \sin \theta. \quad (6)$$



Рис. 1. Вигляд збоку на планарний хвильовід і напрям нормалей до хвильових поверхонь зигзагоподібних хвиль;  $n_f$ ,  $n_c$ ,  $n_s$  – показники заломлення хвильовідного і покривного шарів та підкладки, відповідно,  $h$  – товщина хвильовідного шару.

**Розв'язок хвильовідного рівняння.** Запишемо залежність (5) для випадку симетричного хвильоводу, коли  $\varphi_s = \varphi_c$ :

$$kn_f h \cos \theta = 2\varphi_s + \nu\pi. \quad (7)$$

Оскільки рівняння (7) є трансцендентним, то для його розв'язування найліпше скористатись графічним способом. Перетин правої і лівої частини рівняння (8) дасть значення кута  $\theta$  для зигзагоподібної хвилі порядку  $\nu$ .

Розв'язок рівняння (7) у цій праці реалізовано за допомогою програми, створеної в середовищі Embarcadero® RAD Studio XE3 Version 17.0.4625.53395. Використано мову програмування C++ [10]. З клавіатури задають значення довжини хвилі  $\lambda$ , показника заломлення хвильовідного шару  $n_f$ , порядку моди  $\nu$  та товщина хвильоводу  $h$ .

Як приклад, розраховано властивості модельних симетричних хвильоводів з арсеніду галію. Зазначимо, що арсенід галію – це єдиний сьогодні об'єкт, на якому можливі всі функції оптичних елементів, а саме: генерація світла, поширення його по хвильоводу, введення та виведення випромінювання з хвильоводу, модуляція і детектування.

З рівняння (7) випливає, що для нульової моди немає умови відсікання, тобто вона поширюватиметься у хвильоводі як завгодно малої товщини. Зі збільшенням порядку моди не всі хвилі можуть поширюватись по хвильоводу. На рис. 2 показано залежність розв'язку трансцендентного рівняння для нульової моди напівпровідникового симетричного хвильоводу, виготовленого з арсеніду галію.

Як бачимо з рис. 2, кут під яким поширюється хвильовідна мода, відповідає точці перетину двох кривих  $kn_f \cos \theta$  і  $2(\varphi_s + \pi)$  та дорівнює  $30,266^\circ$ , а також що зі збільшенням відношення  $h/\lambda$  період зигзагоподібної хвилі зменшиться (кут  $\theta$  менший), однак розв'язок існує завжди, навіть якщо товщина плівки стає дуже малою. Це означає, що у такому хвильоводі немає умови відсікання для основної моди.

На підставі отриманого результату можна обчислити низку параметрів, які мають практичне використання. Наприклад, згідно з уявленнями про зигзагоподібні хвилі, ста-

ла поширення  $\beta$  для хвилевідної моди у плоскому хвилеводі (і зв'язана з нею фазова швидкість  $v_p$ ) визначена виразом (6) і є  $z$ -складовою хвильового вектора  $kn_f$ .

У деяких випадках вигідно користуватись поняттям “ефективний хвилевідний показник заломлення”, який визначають так:

$$N = \beta / k = n_f \sin \theta. \quad (8)$$

Величина  $N$  змінюється в межах  $n_s < N < n_f$ .

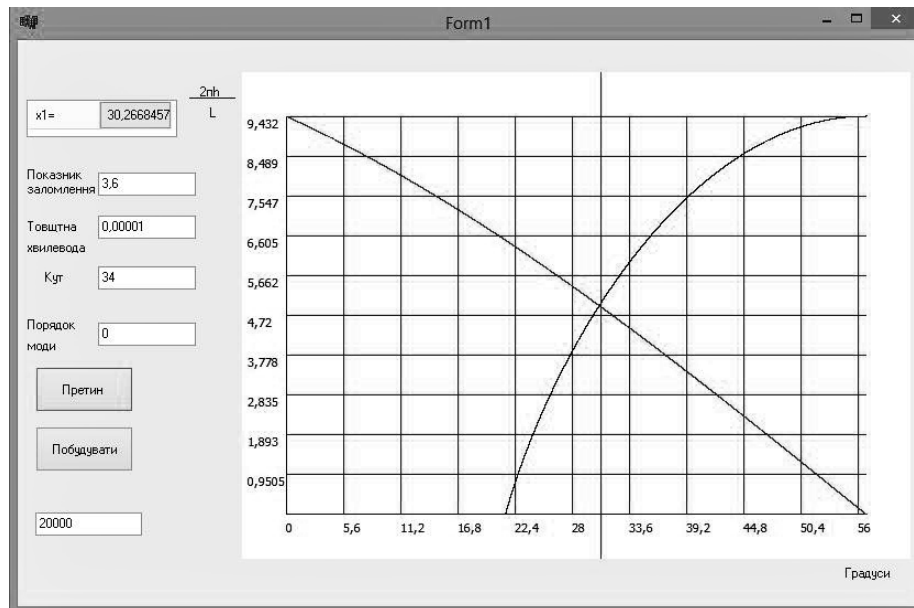


Рис. 2. Графічний розв'язок дисперсійного рівняння для нульової ТЕ-моди симетричного хвилеводу з арсеніду галію.

Крім того, для оцінки параметрів хвилеводів використовують нормування, уводячи такі величини, як нормована частота і товщина плівки

$$V = kh\sqrt{(n_f^2 - n_s^2)} \quad (9)$$

та нормований хвилевідний показник заломлення  $b$ , який зв'язаний з ефективним показником заломлення  $N$  так:

$$b = (N^2 - n_s^2)/(n_f^2 - n_s^2). \quad (10)$$

Як бачимо з останньої формули, показник заломлення  $b$  дорівнює нулю на частоті відсікання і прямує до одиниці з віддаленням від цієї частоти.

Параметри поширення нульової ТЕ-моди у симетричному хвилеводі з арсеніду галію

$n$	$\theta_c$ , град.	$\theta$ , град.	$\lambda$ , мкм	$\beta$ , см <sup>-1</sup>	$N$	$V$	$b$
3,6	16	30,27	1,0	$23 \cdot 10^4$	1,82	22,0	0,19

Наведені в таблиці результати є важливими, зокрема, для вирішення завдання перетворення лазерного пучка у поверхневу хвилю й оберненої задачі, тобто перетворення поверхневої хвилі у вихідний пучок.

З рис. 2 також бачимо, що написана програма та графічна реалізація результатів дають змогу обчислювати кут відбивання для ТЕ-мод довільних порядків, а також товщин хвилеводів та їхніх власних показників заломлення.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андрушко Л. М. Диелектрические неоднородные волноводы оптического диапазона / Л. М. Андрушко. – Киев : Техника, 1983. – 142 с.
2. Барноски М. Введение в интегральную оптику / М. Барноски. – М. : Мир, 1977. – 367 с.
3. Комоцкий В. А. Плоский оптический волновод : Учеб.-метод. пособие / В. А. Комоцкий. – М. : РУДН, 2001. – 486 с.
4. Тамир Т. Интегральная оптика / Т. Тамир. – М. : Мир, 1978. – 343 с.
5. Хансперджер Р. Интегральная оптика : теория и технология / Р. Хансперджер. – М. : Мир, 1985. – 379 с.
6. 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.
7. <http://ysa.ifmo.ru/data/publications/BOOK008/paper1-001.doc>;
8. Половинко І. Фізика оптичних комп'ютерів / І. Половинко, Т. Кріль // Електроніка та інформ. технології. – 2014. – Вип. 4. – С. 3–23.
9. Polovynko I. To the possibility of the building integrating – optical computer / I. Polovynko, T. Kril // 6-th Ukrainian-Polish Scientific Conference “Electronics and information technology” Lviv-Chynadiyevo, Ukraine 28-31 august 2014– Book of abstracts – С. 190–192.
10. Половинко І. Матеріали для елементів оптичних комп'ютерів / І. Половинко, Т. Кріль // “Relaxed, nonlinear and acoustic optical processes and materials” RNAOPM 14 Ukraine, Lutsk – Lake “Svitiaz”, Int. Conf. June 8–12, 2014. – P.120.
11. Язык программирования С# 2010 и платформа .NET 4.0, 5-е изд. / Пер. с англ. – М. : ООО “И.Д. Вильяме”, 2011. – 1392 с.

Стаття: надійшла до редакції 16.04.2015

доопрацьована 25.04.2015

прийнята до друку 31.04.2015

**OPTICAL-GEOMETRIC ANALYSIS DIELECTRIC WAVEGUIDES**

**T. Polovynko<sup>1</sup>, G. Grynychuk<sup>2</sup>, I. Polovynko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine  
5, Naukova str., 79060 Lviv, Ukraine  
[polovynkot@gmail.com](mailto:polovynkot@gmail.com)*

<sup>2</sup>*Ivan Franko National University of Lviv,  
Tarnavskogo Str. 107, UA – 79017 Lviv, Ukraine  
[polovynkoi@gmail.com](mailto:polovynkoi@gmail.com)*

In this paper, under a frame of geometrical optic description of dielectric waveguides, analysis of cross resonance for different transparent media is considered. The expression for calculating angles spread waveguide modes was programmed. Calculations performed for symmetric waveguide with a single GaAs material, in which were realized such properties of optical planar elements as generation of the laser radiation, spread it through the waveguide, modulation, detection, and others. The calculations confirmed that for zero optical mode cut-off conditions is not exist, that will apply to the arbitrarily small thickness. Besides the refractive indices, the program takes into account the thickness of the waveguide, the order of modes and the wavelength of the optical radiation. The program was written in the programming environment Embarcadero. By using the obtained results such important parameters as the waveguide effective refractive index waveguide normalized frequency, normalized film thickness and rationed refractive index where calculated. The data are important for solving the problem of converting the laser beam into the surface wave and vice versa, i. e. the conversion optical wave in the output beam. Written program also allows you to calculate the angle of total reflection for TE-wave of various ranks of optical modes.

*Key words:* optics, dielectric waveguide, guided modes, surface modes.

**ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ**

**Т. Половинко<sup>1</sup>, Г. Гринчук<sup>2</sup>, І. Половинко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины  
ул. Научная, 5, 79060 Львов, Украина  
[polovynkot@gmail.com](mailto:polovynkot@gmail.com)*

<sup>2</sup>*Львовский национальный университет имени Ивана Франко  
ул. Ген. Тарнавского, 107, 79017, Львов, Украина  
[polovynkoi@gmail.com](mailto:polovynkoi@gmail.com)*

В рамках оптико-геометрического описания диэлектрических волноводов рассмотрено анализ поперечного резонанса для различных прозрачных сред. Запрограммировано выражение для расчета углов распространения волноводных мод. Расчеты проведено для симметричных волноводов из арсенида галлия, единственного на данное время материала в котором реализовано такие функции оптических планарных элементов, как генерация излучения, распространение его по волноводу, модуляция, детектирование и др. Результаты подтвердили, что для нулевой моды отсутствует условие отсекания, то есть она будет распространяться в волноводе любой малой толщины. Кроме различных показателей преломления, программа разрешает учитывать толщины волноводов и длину волны оптического излучения. Программа написана в среде программирования Embarcadero. Исходя из полученных результатов, вычислены такие важные параметры волновода, как эффективный волноводный показатель преломления, нормированная частота и толщина пленки и нормированный волноводный показатель преломления. Полученные результаты являются важными для решения задачи преобразования лазерного пучка в поверхностную волну и обратной задачи, то есть преобразования волны в исходный пучок.

*Ключевые слова:* оптика, диэлектрические волноводы, моды волновода, поверхностная волна.