

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

НЕВІНСЬКИЙ ДЕНИС ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 537.86/.87: 621.372.22

**ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБЛЕННЯ НАНОРОЗМІРНИХ СТРУКТУР НА
ПОВЕРХНЕВИХ ПЛАЗМОНАХ ДЛЯ ПРИСТРОЇВ
ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, професор
Павлиш Володимир Андрійович,
Національний університет "Львівська політехніка",
професор кафедри електронних засобів інформаційно-
комп'ютерних технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Козловський Валерій Валерійович, Національний
авіаційний університет, завідувач кафедри засобів захисту
інформації;

доктор технічних наук, професор
Власов Олександр Миколайович,
Державний університет телекомунікацій,
професор кафедри телекомунікаційних систем та мереж.

Захист дисертації відбудеться "31" березня 2017 р. о 12:00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті "Львівська політехніка" (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 218 XI навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий "27" лютого 2017 р.

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, к.т.н., доцент*



І.В.Демидов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми роботи. Збільшення числа користувачів інфокомунікаційних систем внаслідок розширення можливостей доступу до Інтернету з мобільних пристроїв, підвищення популярності надання онлайн-інформаційних послуг, зростання мультимедійного трафіка вимагає збільшення мережної швидкодії та пропускної здатності.

Пропускна здатність та швидкодія сучасних інфокомунікаційних систем визначаються швидкістю елементної бази мікроелектроніки та оптоелектроніки, а також можливостями комутаторів, мультиплексорів, демультиплексорів. Відомо, що фізичні межі швидкодії елементної бази мікроелектроніки обумовлені часом прольоту електронів, а зменшення розмірів елементів обмежується технологічними можливостями їх виготовлення. Існують також фізичні межі зменшення розмірів мікроелементів, суттєві обмеження на які накладають їх енергоспоживання та тепловиділення.

Проведений аналіз розвитку інфокомунікаційних систем показав, що для підвищення їх швидкодії та пропускної здатності необхідно удосконалювати елементну базу пристроїв, застосовуючи нанорозмірні структури, переходити на використання повністю оптичних мереж (All-Optical Networks), у яких світловий сигнал передається від одного пристрою мережі до іншого без проміжних перетворень в електричну форму.

Одними із найбільш важливих елементів повністю оптичної мережі є оптичний комутатор, який забезпечує комутацію пакетів чи каналів, оптичні хвилеводи і з'єднувачі з малими втратами та великим ресурсом на підключення-відключення, а також оптичні розгалужувачі і атенюатори.

Не менш важливим завданням для досягнення високої швидкості оброблення інформації є вирішення проблеми зв'язку електронних пристроїв з оптичними компонентами, яка виникає через неузгодженість їх розмірів.

Розв'язання вищезазначених проблем можливе шляхом створення та використання в інфокомунікаційних системах пристроїв на плазмонних нанорозмірних структурах, у яких світловий потік обмежений у всіх вимірах невеликим об'ємом.

Проблематика створення і дослідження нанорозмірних структур та пристроїв на поверхневих плазмонах активно досліджувалася такими провідними українськими та зарубіжними вченими, як Болеста І.М., Божевольний С.І., Чічков Б.Н., Вольпян О., Волков В., Євлюхін А.Б., Zayats A., Reinhardt C., Zywietz U., Birr T., Novotny L., Checht B., Maier S., Maradudin A. та багатьма іншими.

Актуальність роботи полягає у дослідженні, розробленні та створенні плазмонних хвилеводів різної конфігурації, а також розгалужувачів, комутаторів та мультиплексорів на поверхневих плазмонах для інфокомунікаційних систем.

Однією з найважливіших переваг поверхневих плазмонів є те, що довжина хвилі у них є набагато меншою, ніж у видимого світла, що дозволяє створювати

пристрої менших розмірів, ніж ті, що працюють із видимим світлом. Використання плазмонних елементів дозволяє також суттєво зменшити розміри фотонних інтегральних схем, підвищити швидкість їх роботи внаслідок швидкодії оптичних процесів, що в них протікають, скоротити енергозатрати, а також вирішити проблему зв'язку наноелектронних елементів із нанофотонними.

Особливістю плазмон-поляритонної хвилі, що поширюється уздовж границі між металом та діелектриком є висока локалізація поля поблизу поверхні, що дозволяє ефективно керувати світлом у наномасштабах. Крім цього, поверхневі плаزمони можуть використовуватися для передавання світла по каналах набагато вужчих, ніж задана довжина світлової хвилі.

Таким чином, розроблення та дослідження нанорозмірних структур на поверхневих плазмон-поляритонах (ППП) для підвищення швидкодії та пропускну здатності оптичних інфокомунікаційних систем є актуальним науковим завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано відповідно до наукового напрямку кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій Національного університету «Львівська політехніка» «Розробка теорії, методів моделювання і дослідження складних систем та управління інноваційними проектами в галузі радіоелектроніки, наноелектроніки, інфокомунікацій та медичної техніки» та в рамках держбюджетної науково-дослідницької теми «Моделювання процесів електромагнітного відклику в модульованих нанорозмірних метал-діелектричних та напівпровідникових структурах» (ДБ/Теза), (2013-2015 рр.), № держреєстрації 0113U001354. Результати роботи також впроваджені в навчальний процес на кафедрі електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій Національного університету «Львівська політехніка» в рамках курсів «Наноелектроніка» та «Мікроелектронні засоби передачі інформації».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення нанорозмірних структур на поверхневих плазмонах для підвищення швидкодії та пропускну здатності інфокомунікаційних систем.

Завданнями дослідження є:

1. Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку пристроїв інфокомунікаційних систем з точки зору підвищення їх швидкодії та пропускну здатності.

2. Розроблення математичної моделі поширення поверхневих плазмон-поляритонних хвиль на границі «діелектрик-метал-діелектрик» та дослідження з її допомогою процесу розповсюдження плазмону у хвилеводах різної конфігурації.

3. Дослідження процесу поширення поверхневої плазмон-поляритонної хвилі у нанорозмірних хвилеводах «діелектрик-метал-діелектрик» довільної конфігурації на основі математичної моделі.

4. Розроблення технології виготовлення нанорозмірних структур на поверхневих плазмонах, придатної для їх промислового виробництва.

5. Створення фізичних моделей плазмонних хвилеводів, розгалужувачів і мультиплексорів та дослідження процесу поширення в них поверхневих електромагнітних хвиль.

Об'єктом дослідження є процес виникнення та розповсюдження поверхневих плазмон-поляритонів у структурах нанорозмірного типу.

Предметом дослідження є технологія створення нанорозмірних структур на поверхневих плазмон-поляритонах – плазмонних хвилеводів, розгалужувачів, комутаторів та мультиплексорів для пристроїв інфокомунікаційних систем.

Методи дослідження: для реалізації поставлених завдань використано методи математичного та комп'ютерного моделювання процесів поширення поверхневих електромагнітних хвиль, поетапної оптичної літографії для виготовлення плазмонних нанорозмірних структур, скануючої електронної мікроскопії для їх експериментального дослідження, а також методи теорії передавання інформації, комутації та розділення сигналів (каналів).

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Набула подальшого розвитку математична модель процесу поширення поверхневих плазмон-поляритонних хвиль уздовж границі між металом та діелектриком у плазмонних хвилеводах різної конфігурації, що враховує товщину металевої плівки у випадку, коли вона має 2D структуру, яка дала змогу експериментально дослідити вплив геометричних розмірів, кутів згину хвилеводів на інтенсивність та шляхи проходження плазмонної хвилі.

2. Вперше запропоновано метод створення плазмонних наноструктур, що базується на технології поетапної оптичної літографії і дозволяє підвищити ефективність технології їх виготовлення за рахунок використання оптичних світловипромінюючих діодів з довжинами хвиль 365 нм та 410 нм замість лазерів, а також є придатним для промислового виробництва плазмонних елементів та інтегральних оптичних схем інфокомунікаційних систем.

3. Набув подальшого розвитку метод керування процесом поширення поверхневих плазмон-поляритонів в нанорозмірній структурі чотирьохканального розгалужувача для його використання в терагерцовому діапазоні шляхом зміни позиції та поляризації лазерного променя. Експериментально підтверджено та досліджено режими його функціонування, як мультиплексора або демультіплексора з часовим розділенням інформації.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

1. Розроблено та виготовлено нанорозмірні структури на поверхневих плазмон-поляритонах – плазмонні хвилеводи різної конфігурації, розгалужувачі та мультиплексори для підвищення швидкодії і пропускної здатності пристроїв інфокомунікаційних систем у 100-300 разів за частотними показниками елементної

бази, порівняно з відомою напівпровідниковою технологією, що використовується у WDM – системах (до 160 ГГц на канал);

2. Результати роботи використано для створення нових типів пристроїв оброблення, передавання та комутації сигналів, придатних для роботи в терагерцовому діапазоні, а також в рамках розв'язання завдань з'єднання пристроїв електроніки та фотоніки в інтегральних мікросхемах;

3. Запропоновану методику використано для створення плазмонних нанорозмірних структур та розроблення технології їх промислового виготовлення.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, авторів належать: у роботах [1,6,8,14] – розроблення методики формування та технології виготовлення нанорозмірних структур з використанням світло-випромінюючих діодів; [5,7,9,13] – дослідження можливості використання двофотонної полімеризації для маніпуляції оптичним сигналом у оптичних та фотонних волокнах; [10,15] – дослідження хрестоподібних хвилеводів при зміні поляризації лазерного променя; [2–4] – виготовлення та дослідження чотирьохканального мультиплектора на поверхневих плазмон-поляритонах; [11,17] – виготовлення та дослідження сплітера на поверхневих плазмон-поляритонах; [12,16] – виготовлення та дослідження суматора на поверхневих плазмон-поляритонах; [18,19] – вдосконалення математичної моделі поширення поверхневого плазмон-поляритону у структурах типу «діелектрик-метал-діелектрик».

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень доповідалися та обговорювалися на всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях: «Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 2013 23rd International Crimean Conference» (Севастополь, Крим, Україна, 8-14 вересня 2013 року.), «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science» (Славсько, 25 лютого – 1 березня 2014 року), «Nanomaterials: Applications and Properties» (Львів, 21-27 вересня 2014 року), «6 Українсько-польська науково-практична конференція "Електроніка та інформаційні технології"» (Чинадієво, 27-31 серпня 2014 року), «Міжнародна наукова конференція "Функціональна база наноелектроніки"» (Одеса 28 вересня – 2 жовтня 2015 року), «7 Українсько-польська науково-практична конференція "Електроніка та інформаційні технології"» (Чинадієво, 27-30 серпня 2015 року), «Nanomaterials: Applications and Properties» (Львів, 16-23 вересня 2015 року), «Young scientists towards the challenges of modern technology» (Варшава, Польща, 21 – 23 вересня 2015 року), «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science» (Славсько, 23 – 26 лютого 2016 року), «Computer Science and Information Technologies» (Львів, 6 – 10 вересня 2016 року), «Сучасні проблеми термомеханіки» (Львів, 22 – 24 вересня 2016 року). Також результати роботи у повній мірі обговорювалися на засіданні кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 19 наукових праць, серед них статей у періодичних фахових виданнях – 7 [1-7], з них у журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз та періодичних видань інших держав – 4, праць у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій – 12 [8-19].

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і двох додатків. Загальний обсяг роботи становить 173 сторінки, із них 9 сторінок вступу, 112 сторінок основного тексту, в тому числі: 59 рисунків, 5 таблиць, 110 найменувань використаних джерел на 12 сторінках, трьох додатків на 31 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено базові концепції дисертаційної роботи. Розкрито суть і стан проблеми, обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, наукову новизну, практичну цінність. Наведено дані про результати роботи, їх практичне значення, апробацію цих результатів на наукових конференціях.

В першому розділі – «Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку пристроїв інфокомунікаційних систем» – проведено огляд літературних джерел за темою дисертації, показано, що підвищення швидкодії та пропускну здатності інформаційно-комунікаційних систем можливе за рахунок розроблення нанорозмірних комутаційних структур, удосконалення елементної бази пристроїв та забезпечення узгодження електронних пристроїв із оптичними компонентами, складність якого обумовлена неузгодженістю їх розмірів.

Більшість сучасних інфокомунікаційних систем будуються на волоконно-оптичних лініях зв'язку, які володіють широкими можливостями щодо пропускну здатності та швидкості передавання інформації. Однак, швидкість передавання сигналів по них обмежується швидкодією комутаційних пристроїв, в яких оптичні сигнали перетворюються в електричні, здійснюється їх комутація за допомогою звичайних електронних схем, після чого електричні сигнали знову перетворюються в оптичні. Подвійне перетворення сигналів суттєво зменшує швидкодію та пропускну здатність усієї інфокомунікаційної системи.

Детально проаналізовані промислові системи WDM, проведено їх порівняльний аналіз. Незважаючи на велику кількість вхідних каналів та високу ємність волокна, такі системи характеризуються малою швидкодією, перетвореннями оптичного сигналу в електричний, великими масо-габаритними розмірами.

Проведений аналіз розвитку інфокомунікаційних систем показав, що для підвищення їх швидкодії та пропускну здатності необхідно удосконалити елементну базу активних пристроїв, використовуючи нанорозмірні структури, переходити на використання повністю оптичних мереж (All-Optical Networks), у

яких світловий сигнал передається від одного активного пристрою мережі до іншого без проміжних перетворень в електричну форму.

Вирішення вищезазначених проблем можливе шляхом створення та використання в інфокомунікаційних системах пристроїв на плазмонних нанорозмірних структурах, у яких світловий потік обмежений у всіх вимірах невеликим об'ємом. Особливістю плазмон-поляритонної хвилі є висока локалізація поля поблизу поверхні, що дозволяє ефективно керувати світлом у наномасштабах. Крім цього, поверхневі плаزمони можуть використовуватися для передавання світла по каналах, набагато вузких, ніж задана довжина світлової хвилі.

Сучасні технології створення плазмонних нанорозмірних структур є дуже вартісними і трудомісткими. Це обумовлено використанням дорогих лазерів для засвітки полімера, складністю одночасного виготовлення декількох структур, а також довготривалістю процесу їх створення.

Другий розділ – «Розроблення математичної моделі поширення поверхневих плазмон-поляритонних хвиль в 2D металевій структурі» – присвячений побудові моделі процесу поширення поверхневих електромагнітних хвиль уздовж границі між металом та діелектриком в 2D металевій структурі.

Збудження поверхневих плазмон-поляритонних хвиль на поверхні нанорозмірної металевої плівки в системі «діелектрик – метал – діелектрик», зображеній на рис. 1, здійснюється лазерним світловим імпульсом із довжиною хвилі 800 нм та тривалістю імпульсу 27 фс, який опромінює верхній шар діелектрика з діелектричною проникливістю ϵ_1 . Вважаємо, що діелектрична проникливість нижньої підкладки ϵ_2 .

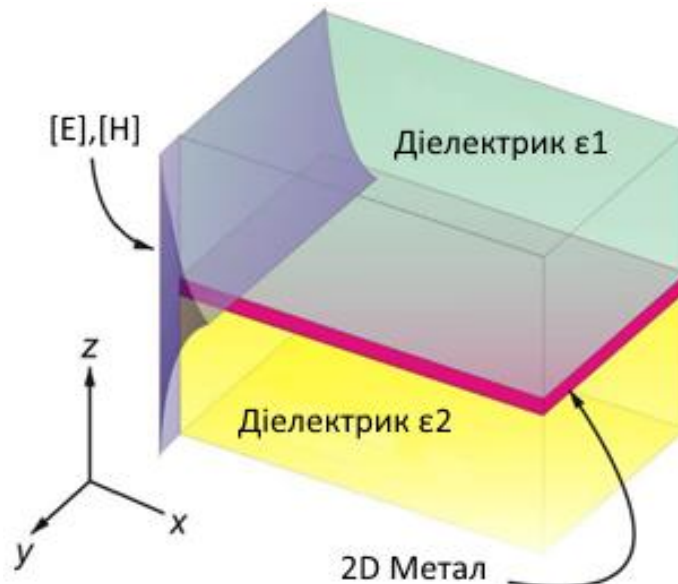


Рис. 1. Схематичне зображення структури «діелектрик-метал-діелектрик».

Для опису процесу поширення поверхневих плазмон-поляритонних хвиль використаємо систему рівнянь Максвелла:

$$\begin{aligned}
\operatorname{rot} \vec{H}(\vec{r}, t) &= \frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t} + \vec{j}(\vec{r}, t) \\
\operatorname{rot} \vec{E}(\vec{r}, t) &= -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \\
\operatorname{div} \vec{D}(\vec{r}, t) &= \rho(\vec{r}, t) \\
\operatorname{div} \vec{B}(\vec{r}, t) &= 0
\end{aligned} \tag{1}$$

Встановимо зв'язок між векторами індукції D і B та напруженості E і H (2), де $\varepsilon(\vec{r}, \vec{r}', t - t')$ – функція відгуку (діелектрична функція) та зв'язок між струмами $\vec{j}_2(\vec{r}, t)$ та напруженістю електричного поля $\vec{E}(\vec{r}', t')$, ($\vec{r} = (x, y, z)$):

$$\begin{aligned}
\vec{D}(\vec{r}, t) &= \int_{\Omega} \int \varepsilon(\vec{r}, \vec{r}', t - t') E(\vec{r}', t') d\vec{r}' dt' \\
\vec{j}(\vec{r}, t) &= \int_{\Omega} d\vec{r}' \int_t dt' \sigma(\vec{r}, \vec{r}', t - t') E(\vec{r}', t')
\end{aligned} \tag{2}$$

Подання (2) дозволяє враховувати просторову та часову дисперсії діелектричної функції та провідності.

Згідно літературних джерел, поява плазмонних збуджень можлива тільки для ТМ-поляризованих хвиль. Відповідно, шукаємо розв'язки рівнянь Максвелла для ТМ поляризації, вважаючи, що електричне та магнітне поля є однорідними вздовж осі OY .

Проведені дослідження показують, що для вибраної математичної моделі мультиплектора має місце поширення хвилі вздовж осі OX і електричне поле $H = (E_x, 0, E_z)$, та магнітне поле $H = (0, H_y, 0)$ є однорідними вздовж осі OY , а їх залежність від координати X має наступну форму:

$$\begin{aligned}
E_x(x, z, \omega) &= E_x(z, \omega) e^{iQx} \\
E_z(x, z, \omega) &= E_z(z, \omega) e^{iQx} \\
H_y(x, z, \omega) &= H_y(z, \omega) e^{iQx}
\end{aligned} \tag{3}$$

де Q – хвильовий вектор поширення хвилі.

Отримано наступну систему рівнянь Гельмгольца для вибраної моделі мультиплектора:

$$\text{Вакуум} \quad \frac{\partial^2}{\partial z^2} H_y(z, \omega) - \left(Q^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \right) H_y(z, \omega) = 0$$

$$\begin{array}{l} \text{Діелектрик} \\ \text{(I)} \end{array} \quad \frac{\partial^2}{\partial z^2} H_y(z, \omega) - \left(Q^2 - \varepsilon_1(\omega) \frac{\omega^2}{c^2} \right) H_y(z, \omega) = 0 \quad (4)$$

$$\begin{array}{l} \text{Діелектрик} \\ \text{(III)} \end{array} \quad \frac{\partial^2}{\partial z^2} H_y(z, \omega) - \left(Q^2 - \varepsilon_2(\omega) \frac{\omega^2}{c^2} \right) H_y(z, \omega) = 0$$

$$\begin{array}{l} \text{Метал (II)} \end{array} \quad \frac{d^2}{dz^2} H_y(z, \omega) - \left(Q^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \chi(Q, 0, \omega) \right) H_y(z, \omega) = 0$$

$$\chi(Q, 0, \omega) = \varepsilon_2(Q, 0, \omega) - \frac{\sigma_0 \tilde{\sigma}(Q, 0, \omega)}{\varepsilon_0 i \omega}$$

Для безмежно товстих діелектричних шарів і ультратонкого металевого прошарку отримано дисперсійне рівняння для плазмонних збуджень (5).

$$\frac{\varepsilon_1(\omega)}{\sqrt{Q^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_1(\omega)}} + \frac{\varepsilon_2(\omega)}{\sqrt{Q^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_2(\omega)}} = - \frac{i\sigma(Q, \omega)}{\varepsilon_0 \omega} \quad (5)$$

де $\varepsilon_1 = \varepsilon_1(\omega)$ – діелектрична проникність прошарку верхнього діелектрика.

$\varepsilon_2 = \varepsilon_2(\omega)$ – діелектрична проникність прошарку нижнього діелектрика.

$\sigma(Q, \omega)$ – динамічна провідність металевого прошарку.

Проведено числовий аналіз дисперсійного співвідношення для наступних моделей $i\sigma(Q, \omega)$:

– модель Друде;

– модель двовимірного електронного газу.

У третьому розділі – «Технологія створення та дослідження плазмонних нанорозмірних структур для пристроїв інфокомунікацій» – описано технологію створення нанорозмірних структур на поверхневих плазмонах, яка базується на поетапній оптичній літографії (ПОЛ) рис. 2 (а, б) і дозволяє спростити та здешевити технологію їх виготовлення за рахунок заміни дорогого лазерного обладнання на світловипромінюючі діоди (СВД) з довжиною хвилі 365 нм або 410 нм, а також є придатною для промислового виробництва плазмонних елементів та оптичних інтегральних схем.

Процес формування структур проходить у два етапи. Перший етап – перенесення розмірів із шаблону на маску у масштабі 10:1. Спочатку за допомогою пакету прикладних програм САД був створений шаблон, потім сформована потрібна структура у колі радіусом 20 см. Друк шаблону проводився струменевим принтером на плівці. Для створення маски на скельце із напиленим сріблом товщиною 1 мкм, був нанесений позитивний фоторезист марки S1813 (Dow Chemical). Фоторезист наносився методом спіно-покриття товщиною 1,55 мкм. Засвічення полімера здійснювалося за допомогою СВД фірми Enfis із довжиною хвилі 410 нм та лінзи (рис.2 (а, б)).

Другий етап – зменшення розмірів у масштабі 100:1 та створення дослідного зразка. Процес отримання дослідного зразка подібний до процесу отримання маски, однак, в якості джерела засвітки використовувався СВД фірми Roithner із довжиною хвилі 365 нм, система лінз та 100 кратний об'єктив Zeiss. Для виготовлення дослідного зразка на скельце з напиленими 50 нм золота був нанесений негативний фоторезист марки Ormosil. Полімер наносився методом спіноукриття товщиною в 300 нм та засвічувався СВД.

Зразки, отримані методом оптичної літографії, відзначаються чіткістю ліній, крутими стінками полімеризованого чи засвіченого фоторезиста, що дозволяє сформувати провідні канали різної конфігурації. Отримані структури зображено на рис. 2 (в, г), зображення зроблені за допомогою скануючого електронного мікроскопу (СЕМ) фірми Quanta 400 FEG, FEI. Головною перевагою запропонованої методики створення нанорозмірних структур є використання замість лазерів СВД із довжинами хвиль 410 нм та 365 нм.

За цією технологією були створені хвилеводи різної конфігурації, як показано на рис. 2 (в, г), та різних геометричних розмірів, зокрема товщиною від 100 до 500 нм і довжиною від 1 до 50 мкм.

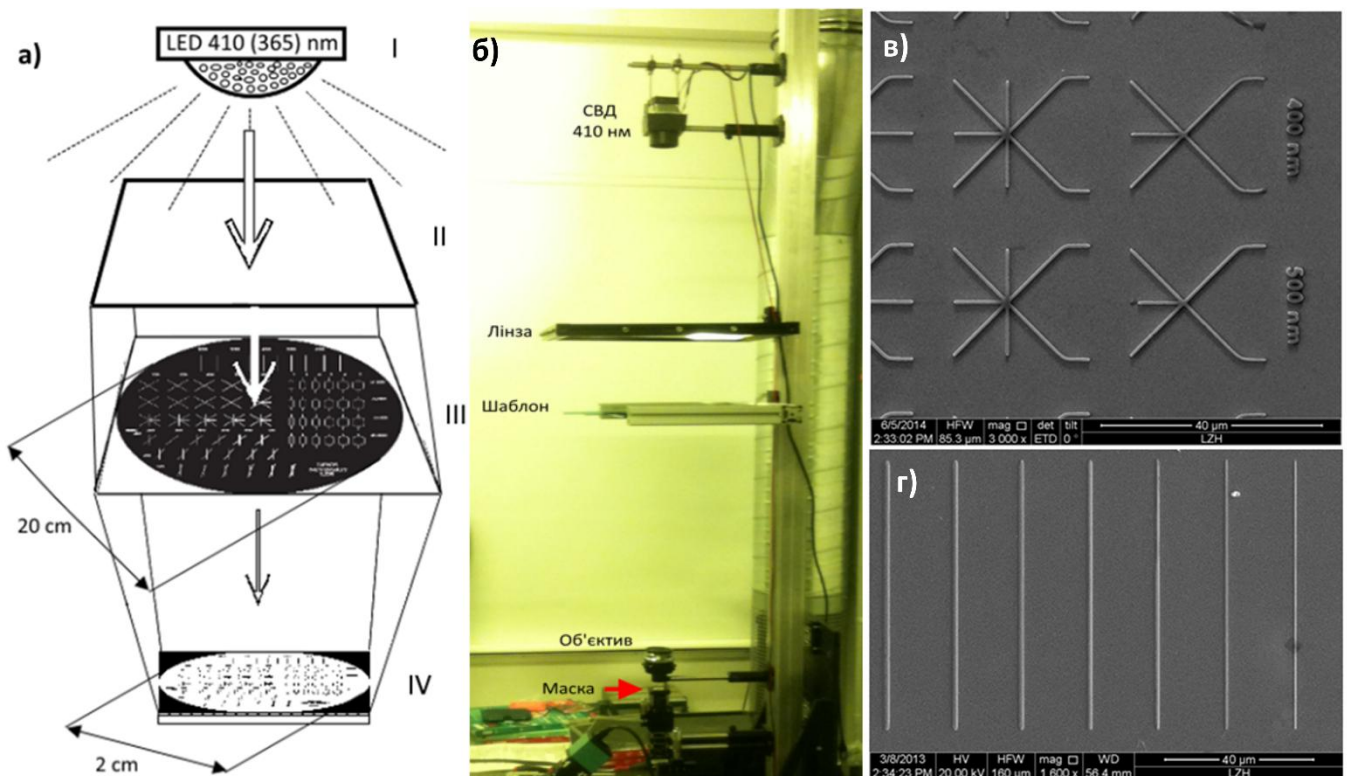


Рис. 2. Технологічна схема виготовлення нанорозмірних структур та зображення отримані за допомогою СЕМ: (а) – схема процесу експонування зображення хвилеводу: I) - СВД з довжиною хвилі 410 нм (365 нм), II) – лінза, III) – шаблон з діаметром 20 см, IV) – отримана маска діаметром 2 см; (б) – експериментальний макет; (в) – зіркоподібні хвилеводи; (г) – лінійні хвилеводи з товщиною від 100 нм до 400 нм.

Експериментально підтверджено, що у хвилеводі шириною 150 нм ППП має найбільшу інтенсивність на відстані до 10 мкм від початку збудження, а із зростанням цієї відстані – інтенсивність ППП зменшується. Найкращий варіант умов розповсюдження ППП спостерігався у хвилеводі шириною 300 нм. Інтенсивність ППП була найбільшою на відстані до 20 мкм.

Математичне моделювання та експериментальні дослідження процесу поширення поверхневих електромагнітних хвиль у лінійних хвилеводах при різних кутах їх згину показали, що ППП поводить себе по різному. Так, при малих кутах згину (радіусом порядку 1-5 мкм), ППП зазнає великих втрат, а при кутах згину порядку 7-10 мкм ППП до кінця хвилеводу доходить із дуже малою інтенсивністю. Найкращим, з точки зору співвідношення вихідної інтенсивності сигналу до вхідної, є кут згину 6 мкм. При цьому куті інтенсивність ППП після згину хвилеводу становить до 60 % інтенсивності вхідного сигналу.

Дослідження процесу поширення ППП у хрестоподібних хвилеводах дали можливість встановити, що ППП рухаються незалежно один від другого і їх поширення можна керувати, змінюючи поляризацію променя лазера.

Дослідження двоканального розгалужувача показали, що ППП може роздвоюватися із незначними загасаннями, обумовленими відбиванням ППП у середині структури та розсіюванням енергії на дефектах кристалічної ґратки. Результати експериментального дослідження розповсюдження ППП показали, що він може розгалужуватися і після цього рухатися ще на віддаль до 20 мкм (рис. 3).

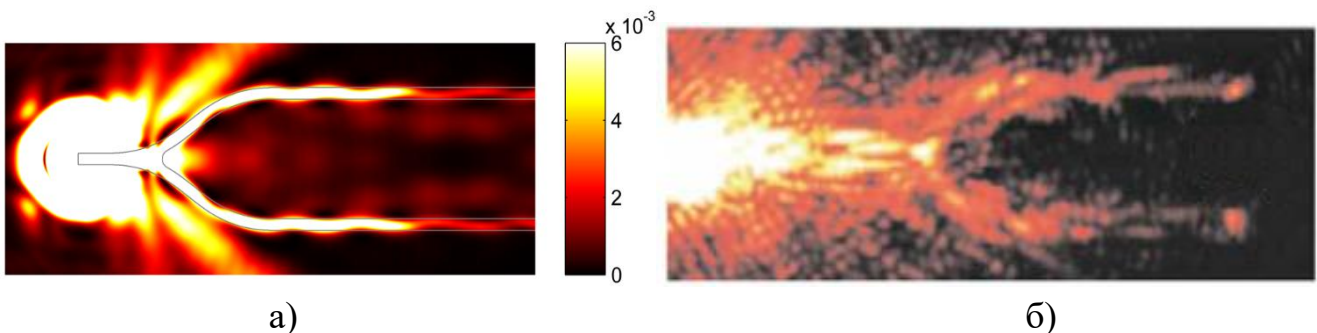


Рис. 3. Поширення поверхневого плазмон-поляритону у двоканальному розгалужувачі (розміром 20 x 50 мкм): а) моделювання; б) експеримент.

Продовженням досліджень стало вивчення процесу поширення ППП, а також можливостей керування цим процесом у чотирьохканальному розгалужувачі, який, в залежності від включення, можна розглядати як мультиплексор або демультиплексор.

В четвертому розділі – «Практичне використання результатів дослідження процесу розповсюдження поверхневого плазмон-поляритона у нанорозмірному мультиплексорі в системах інфокомунікацій» – досліджено чотирьохканальний мультиплексор на ППП розмірами 10 x 5 мкм з шириною і висотою структури в 300 нм (рис. 4 а). Збудження ППП здійснювалося імпульсом тривалістю 27 фс за допомогою 800 нм титан-сапфірового лазера (Karteyn Murnane

Labs-KMLabs). Спочатку дослідження проводилося при включенні мультиплексора за схемою розгалужувача (рис. 5). Показано, що ППП поширюється на усю ділянку мультиплексора, а його інтенсивність, отримана на виходах розгалужувача, є достатньою для ідентифікації сигналу (табл. 1).

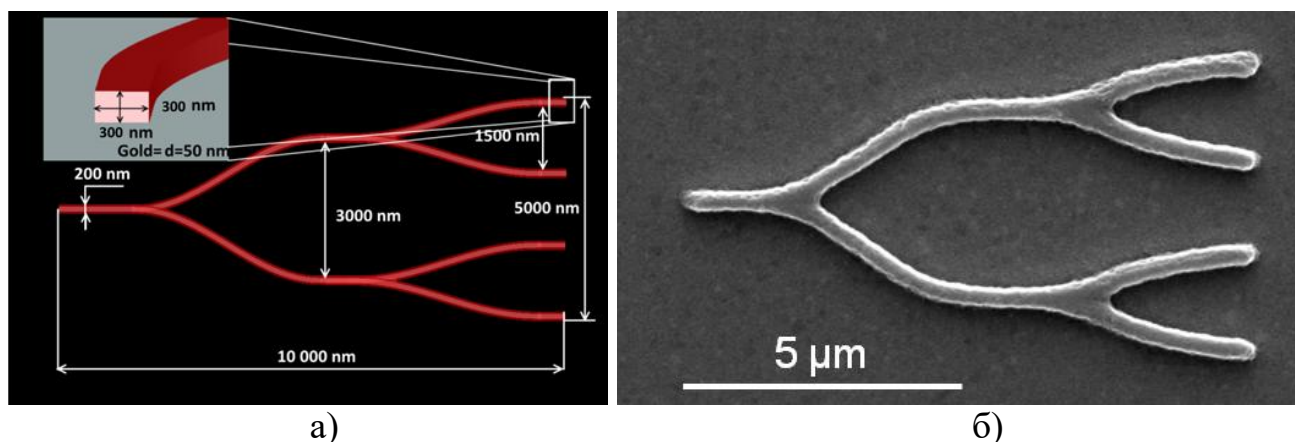


Рис. 4. (а) – дизайн та розміри чотирьохканальної структури; (б) – зображення отриманої структури отримане за допомогою СЕМ.

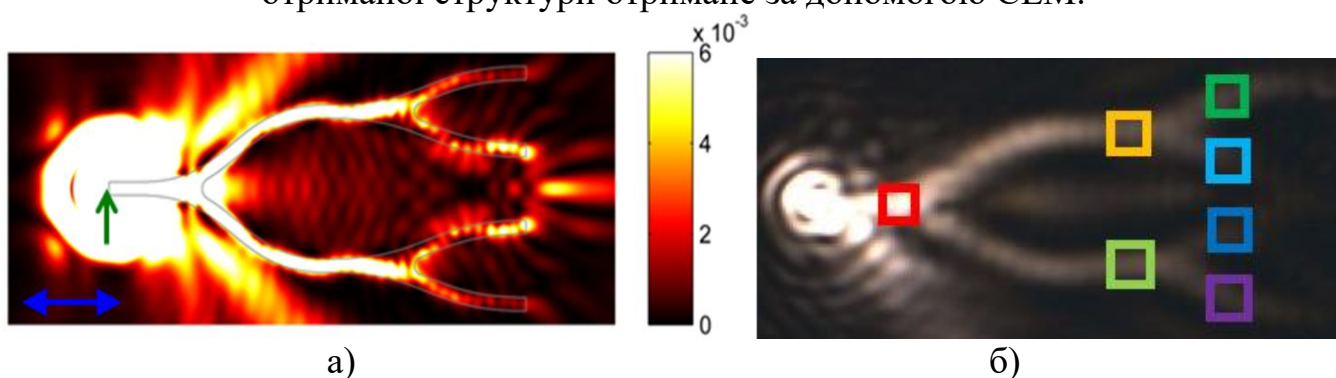


Рис. 5. Розповсюдження ППП у мультиплексорі, включеному як розгалужувач: а) – результат моделювання (зеленою стрілкою показано місце фокусування лазерного променя, синьою – поляризацію); б) – результат експерименту (кольорові квадрати вказують на місце замірів інтенсивності ППП).

Таблиця 1. Інтенсивність поширення ППП у мультиплексорі, включеному як розгалужувач

№	Площа [μm]	Інтенсивність [у.о.]	Відсоток передачі енергії ППП*	Колір
1	0.693	255	100 %	Red
2	0.693	88	34,51 %	Yellow
3	0.693	81	31,77 %	Light Green
4	0.693	63	24,71 %	Green
5	0.693	62	24,31 %	Cyan
6	0.693	50	19,60 %	Blue
7	0.693	59	23,14 %	Purple

*- відсоток передачі енергії ППП обрахований відношенням його вихідної інтенсивності до вхідної.

Зниження інтенсивності ППП у мультиплексорі, включеному як розгалужувач, зображено на рис. 6.

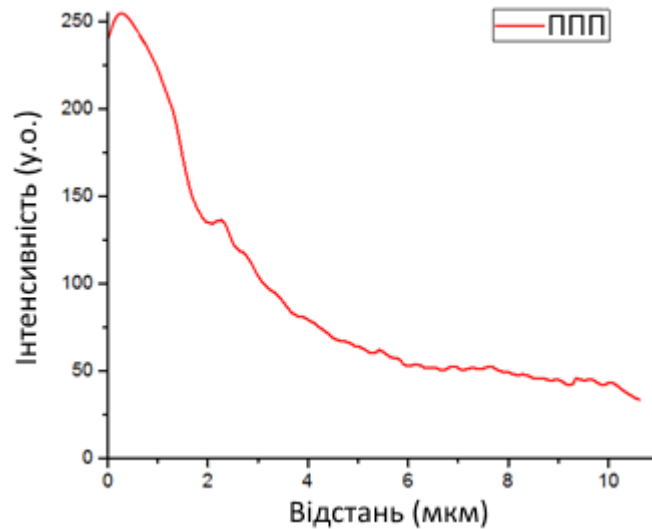


Рис. 6. Зниження інтенсивності ППП на усій ділянці розгалужувача.

Встановлена можливість керування процесом поширення ППП при зміні місця його збудження (рис. 7) та поляризації лазерного променя (рис. 8). ППП може поширюватися як в окремі канали (1-й, 2-й, 3-й і 4-й канали), так і одночасно в декілька каналів (1, 2-й канали; 3, 4-й канали; 1, 4-й канали; 2, 3-й канали) (табл. 2).

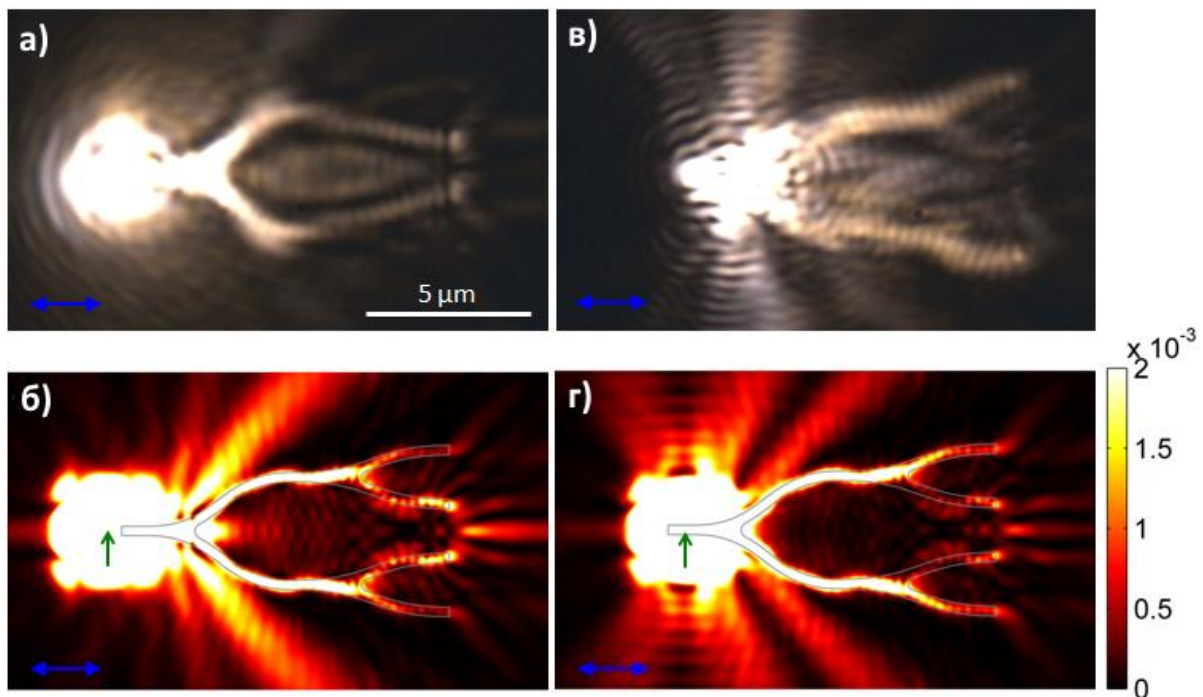


Рис. 7. Поширення ППП в залежності від місця його збудження лазером.

В залежності від місця збудження змінюється адресація різних каналів: (а) поширення ППП уздовж 2-го і 3-го каналів розгалужувача (місце збудження – 500 нм зліва від початку структури) – експериментальний результат; (б) – результат моделювання; (в) поширення ППП уздовж 1-го і 4-го каналів розгалужувача (місце збудження – 500 нм праворуч від початку структури) – експериментальний результат; (г) – результат моделювання.

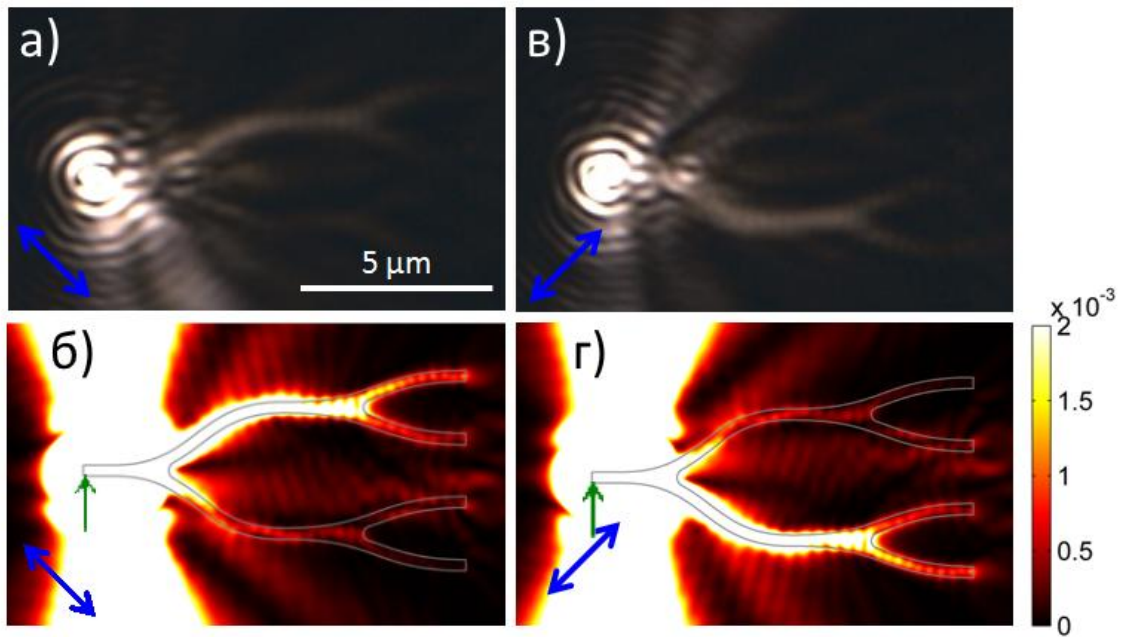


Рис.8. Поширення ППП в залежності від поляризації лазерного променя.

В залежності від поляризації лазерного променя змінюється адресація різних каналів: (а) поширення ППП уздовж 1-го і 2-го каналів розгалужувача (-45° поляризація) – експериментальний результат; (б) – результат моделювання; (в) поширення ППП уздовж 3-го і 4-го каналів розгалужувача ($+45^{\circ}$ поляризація) – експериментальний результат (г) – результат моделювання.

Таблиця 2. Позиційно-поляризаційне керування процесом поширення ППП у чотирьохканальному розгалужувачі.

Канали		Позиція		
		- 500 нм	0 нм	+ 500 нм
Поляризація лазера	$+45^{\circ}$	3	3, 4	4
	0°	2, 3	1, 2, 3, 4	1, 4
	-45°	2	1, 2	1
	90°	0	0	0

Також проведено дослідження мультиплексора при включенні його в якості суматора. Показано поширення ППП по кожному задіяному каналу окремо (рис. 9) і графік загасання ППП на всій ділянці проходження імпульсу, кожного каналу окремо (рис. 10). Також проведено дослідження за умови використання у суматорі двох лазерних променів на вході.

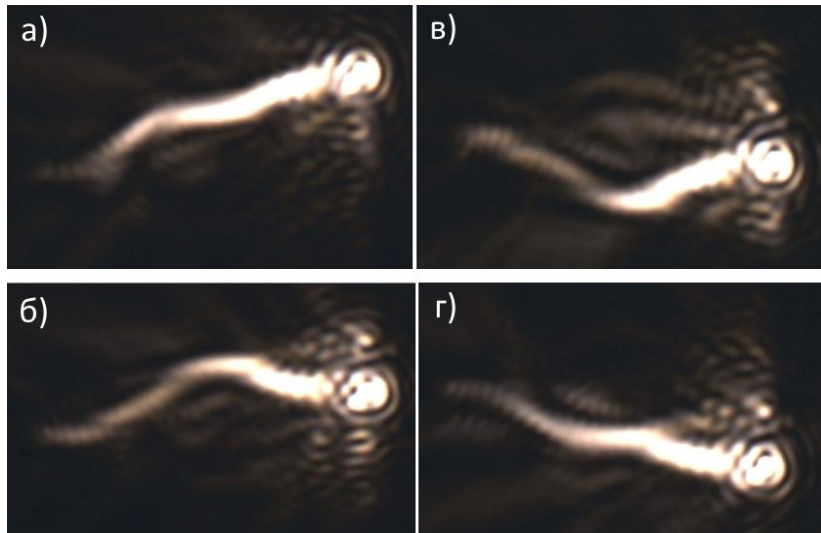


Рис. 9. Поширення ППП у мультиплексорі, включеному як суматор: а) включення 1-го каналу; б) включення 2-го каналу; в) включення 3-го каналу; г) включення 4-го каналу.

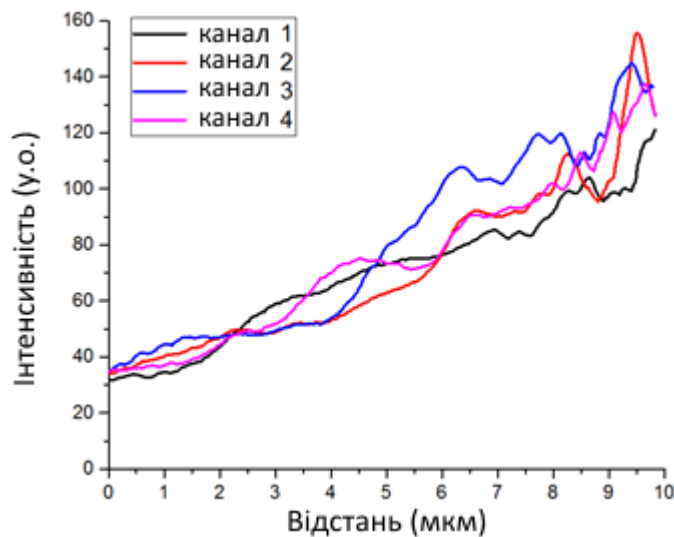


Рис. 10. Загасання ППП по кожному каналу окремо (результати моделювання).

Таким чином, отримано чотирьохканальний мультиплексор нового типу на ППП з часовим мультиплексуванням імпульсів для передавання інформації у нанооптичних схемах, надшвидкісних оптичних системах оброблення інформації, а також для створення нового класу пристроїв для інфокомунікаційних систем.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання розроблення та дослідження нанорозмірних структур на поверхневих плазмон-поляритонах для підвищення швидкодії та пропускної здатності оптичних інфокомунікаційних систем.

1. Проаналізовано поточний стан та тенденції розвитку сучасних інфокомунікаційних систем, показано, що для збільшення їх швидкодії та пропускної здатності необхідно удосконалювати елементну базу пристроїв, використовуючи нанорозмірні структури, переходити на повністю оптичні мережі (All-Optical Networks), застосовуючи для передавання та комутації сигналів плазмонні хвилеводи, розгалужувачі та мультиплексори, вирішити проблему узгодження наноелектронних елементів із нанофотонними.

2. Розроблено та досліджено математичну модель поширення поверхневих плазмон-поляритонних хвиль на границі «діелектрик-метал-діелектрик» у 2D металевій структурі. На її основі проведено теоретичне та експериментальне дослідження процесу поширення поверхневих плазмон-поляритонних хвиль у плазмонних хвилеводах різної конфігурації. Досліджено вплив геометричних розмірів, кутів згину хвилеводів на інтенсивність та довжину проходження плазмонної хвилі. Проаналізовано поширення поверхневого плазмон-поляритону у лінійних хвилеводах довжиною до 50 мкм, зокрема при кутах згину радіусом від 1 до 10 мкм, у хрестоподібному хвилеводі, при використанні одного та двох лазерних променів, а також у двоканальному розгалужувачі.

3. Розроблено метод виготовлення нанорозмірних структур на поверхневих плазмонах, що базується на технології поетапної оптичної літографії і дозволяє підвищити ефективність технології їх виготовлення за рахунок використання оптичних світловипромінюючих діодів із довжинами хвиль 365 нм та 410 нм у порівнянні з лазерним обладнанням, а також є придатним для впровадження у промислове виробництво плазмонних елементів та інтегральних оптичних схем.

4. Розроблено та виготовлено нанорозмірні структури на поверхневих плазмон-поляритонах – плазмонні хвилеводи різної конфігурації та двоканальний розгалужувач. Експериментально підтверджено, що для хвилеводу шириною 150 нм найбільша інтенсивність поверхневого плазмон-поляритона спостерігається на відстані до 10 мкм від місця збудження, а при ширині хвилевода 300 нм – на відстані до 20 мкм. Це дозволяє створити елементну базу інфокомунікаційних систем, що має у 100-300 разів вищу швидкість за частотними показниками, порівняно із відомою напівпровідниковою технологією, що використовується у WDM – системах (до 160 ГГц на канал).

5. Створено нанорозмірну структуру чотирьохканального розгалужувача на плазмон-поляритонах, придатного для роботи в терагерцовому діапазоні; експериментально досліджено його функціонування в режимах мультиплексора та демультиплексора з часовим розділенням інформації (каналів), а також процес керування поширенням поверхневої плазмон-поляритонної хвилі шляхом зміни позиції і поляризації лазерного променя. Експериментально досліджено чотирьохканальний мультиплексор та демультиплексор розмірами 10 x 5 мкм та висотою 300 нм. Показано, що поверхневий плазмон-поляритон розгалужується в усі чотири канали і проходить із незначним загасанням до кінця хвилеводів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Невінський Д.В. Нанорозмірні хвилеводи поверхневих плазмон-поляритонів, отримані методом оптичної літографії / Д.В. Невінський; В.А. Павлиш; Л.І. Закалик; С.Ю. Лебідь // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіoeлектроніка та телекомунікації, Львів, 2015. – № 818. - С. 242-249. (Index Copernicus, Google Scholar).

Режим доступу: <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/31074>

2. Невінський Д.В. Дослідження мультиплексора на поверхневих плазмон-поляритонах для пристроїв телекомунікацій / Д.В. Невінський // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2016. – № 1/9 (79). - С. 30-37. (CrossRef, Index Copernicus).

Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2016_1\(9\)_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2016_1(9)_6).

3. Nevinskyi D.V. Four-channel multiplexer on surface plasmon polaritons development and research. / D.V. Nevinskyi, L.I. Zakalyk, S.Y. Lebid, H.I. Korzh, V.A. Pavlysh // Challenges of Modern Technology. – 2016. – Vol. 7, № 1. - P. 7-11.

4. Pavlysh V., Surface Plasmons Polaritons based Four- Channel Multiplexer for Communication Systems / V. Pavlysh, M. Klymash, D. Nevinsky, L. Zakalyk, S. Lebid // Smart Computing Review. – 2016. - vol. 5, № 4. – P. 34-43.

Статті у журналах, що входять до переліку наукових фахових видань України:

5. Павлиш В.А. Сучасні інформаційні системи: оптичні модулятори на наноструктурах / В.А. Павлиш, Л.І. Закалик, Д.В. Невінський, С.Ю. Лебідь // Науковий вісник НЛТУ України. - 2013. - Вип. 23 (2). - С. 340-346.

Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnltu_2013_23

6. Невінський Д.В. Нанорозмірні діелектрично-неоднорідні структури, отримані методом оптичної фотолітографії / Д.В. Невінський, В.А. Павлиш, Л.І. Закалик, С.Ю. Лебідь // Науковий вісник НЛТУ України. - 2014. - Вип. 24 (7). - С. 206-211.

Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnltu_2014_24

7. Павлиш В.А. Маніпуляція оптичним сигналом у фотонно-кристалічних волокнах / В.А. Павлиш, Д.В. Невінський, Л.І. Закалик, С.Ю. Лебідь // Науковий вісник НЛТУ України. - 2014. - Вип. 24 (10). - С. 107-110.

Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnltu_2014_24

Публікації у матеріалах конференцій, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:

8. Surface plasmon waves on the nanoscale films. [V.A. Pavlysh, L.I. Zakalyk, D.V. Nevinskyi, S.Y. Lebid]: матеріали міжнародної конференції [Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 2013 23rd International Crimean Conference], (Севастополь, Крим, Україна, 8-14 вересня 2013) – Севастополь, 2013. – С. 885-886. (Scopus)

9. Two-photon Polymerization: Formation of Nanoscale Elements [D. Nevinskyi, L. Zakalyk, V. Pavlysh, S. Lebid] : матеріали міжнародної конференції [IEEE “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science – 2014”], (Львів-Славське, 25 лютого – 1 березня, 2014) – Львів, 2014. – С. 283-285. (Scopus)

10. Surface Plasmon-Polariton in X-Shaped Waveguides [D.V. Nevinskiy, V.A. Pavlysh, L.I. Zakalyk, S.Y. Lebid, H.I. Korzh]: матеріали міжнародної конференції [Nanomaterials: Applications and Properties. – 2014], (Львів, 21-27 вересня, 2014). – Суми 2014. - Vol. 3, №. 2. - С. 02NAESF08. (DOAJ, Google Scholar)

Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/princon_2014_3_2_56

11. Four Channel Splitter on Surface Plasmons-Polaritons [D.V. Nevinskiy, V.A. Pavlysh, L.I. Zakalyk, S.Y. Lebid, H.I. Korzh]: матеріали міжнародної конференції [Nanomaterials: Applications and Properties. – 2015], (Львів, 16-23 вересня, 2015) – Суми 2015 - Vol. 4, №. 2. - С. 02NAESP04. (DOAJ, Google Scholar)

Режим доступу: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/42551>

12. Development and investigation of the surface plasmon polariton four-channel splitter [D. Nevinskyi, L. Zakalyk, V. Pavlysh, S. Lebid] : матеріали міжнародної конференції [IEEE “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science – 2016”], (Львів-Славське, 23 – 26 лютого, 2016). – Львів, 2016 – Р. 339-341. (Scopus)

Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій:

13. Хвилевід, сформований методом двофотонної полімеризації [Павлиш В.А., Закалик Л.І., Невінський Д.В.]: матеріали щорічної відкритої науково-технічної конференції Інститут телекомунікацій радіоелектроніки та електронної техніки з проблем електроніки та інфокомунікаційних систем, (Львів, 2-4 квітня, 2013 року). – Львів 2013. - С. 58.

Режим доступу: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/23059/1/42-58-58.pdf>

14. Нанорозмірні хвилеводи плазмонних хвиль, отримані методом оптичної фотолітографії [Д. Невінський]: матеріали міжнародної конференції [6 Українсько-польська науково-практична конференція "Електроніка та інформаційні технології" (ЕЛІТ-2014)], (Львів, Чинадієво, 27-31 серпня, 2014 року). Львів, Чинадієво, 2014 – С. 210-213.

15. Поляризаційне керування поверхневим плазмон-поляритоном [Д. Невінський]: матеріали міжнародної конференції [7 Українсько-польська науково-практична конференція "Електроніка та інформаційні технології" (ЕЛІТ-2015)], (Львів, Чинадієво, 27-30 серпня, 2015 року). Львів, Чинадієво, 2015 – С. 206-207.

16. Дослідження чотиріканального суматора на поверхневих плазмон-поляритонах [Павлиш В.А., Невінський Д.В., Закалик Л.І., Лебідь С.Ю.]: матеріали міжнародної конференції [VIII Міжнародна наукова конференція «Функціональна база наноелектроніки»] (Одеса, 28 вересня – 2 жовтня, 2015 року), Одеса 2015 – С. 230-233.

17. Surface plasmon polariton four-channel splitter and adder [D. Nevinskyi, V. Pavlysh, L. Zakalyk, S. Lebid]: матеріали міжнародної конференції [Young scientists towards the challenges of modern technology – 2015], (Варшава, Польща, 21-23 вересня 2015 року) - Варшава, 2015. – Р. 2-6.

18. Plasmon-polariton waves in the structures “dielectric-metal-dielectric”: experiment and modeling [P. Kostrobiiy, V. Pavlysh, D. Nevinskyi, V. Poliovyi]: матеріали міжнародної конференції [Computer Science and Information Technologies – 2016], (Львів, 6-10 вересня, 2016 року). - Львів 2016. – С. 208-211.

19. Моделювання процесів поширення плазмон-поляритонних хвиль в структурах діелектрик-метал-діелектрик [П. Костробій, В. Павлиш, Д. Невінський, С. Польовий]: матеріали міжнародної конференції [Сучасні проблеми термомеханіки] (Львів, 22 – 24 вересня 2016 року). - Львів 2016. – С. 96.

АНОТАЦІЯ

Невінський Д.В. Дослідження і розроблення нанорозмірних структур на поверхневих плазмонах для пристроїв інфокомунікаційних систем. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.– Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2017.

Дисертаційна робота присвячена розв’язанню актуальних наукових завдань виготовлення та дослідження нанорозмірних структур на поверхневих плазмон-поляритонах для їх використання у системах інфокомунікацій. В роботі проведено аналіз сучасного стану та перспектив розвитку пристроїв інфокомунікаційних систем. Розроблено математичну модель процесу поширення поверхневих плазмон-поляритонів уздовж границі між металом та діелектриком, при умові, що метал має 2D структуру. Проведено числовий аналіз дисперсійного співвідношення для моделі Друде та моделі двовимірного електронного газу. Запропоновано метод поетапної оптичної літографії для створення плазмонних наноструктур, котрий використовує світловипромінюючі діоди з довжинами хвиль 365 нм та 410 нм та систему лінз. Розроблено та виготовлено нанорозмірні структури на поверхневих плазмон-поляритонах – плазмонні хвилеводи різної конфігурації, розгалужувачі та мультиплексори за допомогою котрих вдалося підвищити швидкодню і пропускну здатність пристроїв інфокомунікаційних систем у 100-300 разів за частотними показниками елементної бази. Показано можливість керування поверхневим плазмон-поляритоном шляхом зміни позиції та поляризації лазерного променя.

Ключові слова: поверхневий плазмон-поляритон, інфокомунікаційна система, поетапна оптична літографія, наноструктура, мультиплексор, елементна база, лазер, канал.

АННОТАЦИЯ

Невінський Д.В. Исследования и разработка наноразмерных структур на поверхностных плазмонах для устройств инфокоммуникационных систем. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – радиотехнические устройства и средства

телекоммуникаций. – Национальный университет «Львівська політехніка», Міністерства освіти і науки України, Львів, 2017.

Дисертація посвячена решению актуальных научных задач изготовления и исследования наноразмерных структур на поверхностных плазмон-поляритонах для использования в системах инфокоммуникаций. В работе проведен анализ современного состояния и перспектив развития устройств инфокоммуникационных систем. Разработана математическая модель процесса распространения поверхностных плазмон-поляритонов вдоль границы между металлом и диэлектриком, при условии, что металл имеет 2 D структуру. Проведен численный анализ дисперсионного соотношения для модели Друде и модели двумерного электронного газа. Предложен метод поэтапной оптической литографии для создания плазмонных наноструктур, использующий светоизлучающие диоды с длинами волн 365 нм и 410 нм и систему линз. Разработаны и изготовлены наноразмерные структуры на поверхностных плазмон-поляритонах - плазмонные волноводы различной конфигурации, разветвители и мультиплексоры, с помощью которых удалось повысить быстродействие и пропускную способность устройств инфокоммуникационных систем в 100-300 раз по частотным показателям элементной базы. Показана возможность управления поверхностным плазмон-поляритоном путем изменения позиции и поляризации лазерного луча.

Ключевые слова: поверхностный плазмон-поляритон, инфокоммуникационная система, поэтапная оптическая литография, наноструктура, мультиплексор, элементная база, лазер, канал.

ABSTRACT

Nevinskyi D.V. Research and development of nano-scale structures on Surface plasmons for Infocommunication System devices. – On the rights of manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the Ph.D. degree in technical sciences on specialty 05.12.13 – Radio Engineering Devices and Telecommunication means. – Lviv Polytechnic National University of the Ministry for education and science of Ukraine, Lviv, 2017.

The thesis deals with solving a topical scientific problem concerning creation of and research into nanoscale structures on surface plasmon polaritons for their being used in the information and communication systems. This research work analyzes the current state of infocommunication devices and the prospects of their development. The first- and second-generation optical multiplexers/demultiplexers are investigated, and the industrial WDM multiplexers are described. A mathematical model of surface plasmon polariton propagation at the interface between a metal and dielectric is developed, provided that the metal has a 2D structure. A numerical analysis of dispersion relation for the Drude model and for the one of two-dimensional electron gas is carried out. It is proved that the Drude model can be used for low frequencies, but for higher frequencies, the use of this model will lead to significant errors, and so there is a need to use more accurate models, as for example the random phase ones. A method of sequential optical lithography, which uses light-emitting diodes with wavelengths of 365 nm and 410 nm, and a system of lenses, is

proposed to generate plasmon nanostructures. There have been developed and produced nanoscale structures on surface plasmon polaritons, namely plasmon waveguides of different configurations, splitters or multiplexers, which contributed to the 100-300 times increase in the speed and carrying capacity of infocommunication equipment by the frequency of electronic components. The samples obtained by the method of sequential optical lithography feature line sharpness, steep sides of a polymerized or light-struck photosensitive resist that make it possible to form conducting channels of different configuration. The research results obtained can be used to create new types of devices for processing, transmission and switching of signals suitable for use in a terahertz range, as well as in solving the problems of connection of electronics and photonics devices within integrated circuits. It has been experimentally investigated and confirmed that for the 150 nm-width waveguide, the greatest intensity of a surface plasmon polariton is observed for up to 10 nm from the place of excitement, and for 300 nm-width waveguide - up to 20 nm. The linear waveguides at different rotation angles are investigated. At small rotation angles of a 1-5-nm radius, a surface plasmon polariton incurs huge losses just at an acute angle of rotation. With 7-10-nm angle of rotation, a surface plasmon polariton gets to the end of the waveguide with a very low intensity. The best, in terms of the ratio of output-to-input signal intensity, angle of rotation is 6 nm. With this angle, the maximum transmission of SPP is close to 60% of the input signal intensity. There have been manufactured and investigated a four-channel multiplexer on 10 nm x 5 nm surface plasmon polaritons, with the width and height of the structure being 300 nm. The multiplexer is studied both as a splitter and as a combiner. At the outputs of the multiplexer the intensity obtained is sufficient for identification. The possibility of surface plasmon polariton controlling is shown in the way of changing position and polarization of a laser beam. The propagation of a surface plasmon polariton is achieved both across separate channels and across several channels of a multiplexer simultaneously.

Key words: Surface Plasmon-polariton, Information and Communication System, Sequential Optical Lithography, nanostructure, multiplexer, electronic components, laser, channel.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ППП	Поверхневий плазмон-поляритон
ВОСП	Волоконно-оптичні системи передавання
ПОЛ	Поетапна оптична літографія
СВД	Світловипромінюючий діод
СЕМ	Скануючий електронний мікроскоп
ПКМ	Рідкокристалічна матриця
CAD	Computer-aided design — технологія автоматизованого проектування
KMLabs	Karpteyn-Murnane Laboratories
WDM	Wavelength Division Multiplexing – ущільнення за довжинами хвиль

