

11. National Institute of Standards and Technology, "FIPS-197: Advanced Encryption Standard" [Electronic resource]. – Available at: <http://csrc.nist.gov/publications/fips/fips197/fips-197.pdf>
12. L'Ecuyer, P. TestU01: A C Library for empirical testing of random number generators [Text] / P. L'Ecuyer, R. Simard // ACM Transactions on Mathematical Software. – 2007. – Vol. 33, Issue 4. – P. 22. doi: 10.1145/1268776.1268777
13. Митянкина, Т. В. Оценка качества генераторов случайных чисел [Текст] / Т. В. Митянкина, В. В. Швыдкий, А. И. Щерба, М. А. Митянкин // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2009. – № 1. – С. 41–46.
14. Соколовська, Г. В. Статистичний аналіз генераторів псевдовипадкової послідовності у програмних середовищах Matlab та Mathcad [Текст] / Г. В. Соколовська // Моделювання та інформаційні технології: зб. наукових праць. – 2013. – Вип. 66. – С. 26–30.
15. Кузнецов, А. А. Исследование статистической безопасности генераторов псевдослучайных чисел [Текст] / А. А. Кузнецов, Р. В. Королев, Ю. Н. Рябуха // Системи обробки інформації. – 2008. – Вип. 3 (70). – С. 79–82.
16. Казакова, Н. Ф. Поэтапное тестирование и подбор составных элементов генераторов псевдослучайных последовательностей [Текст] / Н. Ф. Казакова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Т. 2, № 8 (44). – С. 44–48. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/2734/2540>
17. Ажмухамедов, М. Методика оценки качества последовательности случайных чисел [Текст] / М. Ажмухамедов, Н. А. Колесова. // Вестник АГТУ. Сер: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2010. – № 2. – С. 141–148.
18. Уилкс, С. Математическая статистика [Текст] / С. Уилкс; пер. с англ. – М.: Наука, 1967. – 632 с.
19. Вентцель, Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология; 2-е изд., стер. [Текст] / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1988. – 208 с.

*Продемонстровано зразки чотирьох-канального мультиплектора на поверхневих плазмонах – поляритонах (ППП), який працює з ультра швидкісними імпульсами. Зразки створено досить простим, але надзвичайно точним методом поетапної оптичної літографії (ПОЛ). Для збудження ППП використано 800 нм лазер з частотою імпульсу 27 фс. Показано розповсюдження ППП по мультиплектору, розмірами 10×5 мкм*

*Ключові слова: поверхневий плазмон-поляритон, мультиплектор, модель, проекційна оптична літографія, канал, лазер, імпульс*

*Продемонстрированы образцы четырехканального мультиплектора на поверхностных плазмонах – поляритонах (ППП), который работает с ультра скоростными импульсами. Образцы созданы достаточно простым, но очень точным методом поэтапной оптической литографии (ПОЛ). Для возбуждения ППП использовано 800 нм лазер с частотой импульса 27 фс. Показано распространения ППП по мультиплектору, размерами 10×5 мкм*

*Ключевые слова: поверхностный плазмон-поляритон, мультиплектор, модель, проекционная оптическая литография, канал, лазер, импульс*

УДК 681.325.2

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.60634

## ДОСЛІДЖЕННЯ МУЛЬТИПЛЕКСОРА НА ПОВЕРХНЕВИХ ПЛАЗМОН- ПОЛЯРИТОНАХ ДЛЯ ПРИСТРОЇВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Д. В. Невінський

Асистент

Кафедра електронних засобів  
інформаційно-комп'ютерних технологій

Національний університет

«Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

E-mail: nevinskiy90@gmail.com

### 1. Вступ

21 століття названо століттям фотоніки, у тому числі відзначається розробкою оптичних систем зв'язку, фотонних інтегральних схем і оптичних обчислень, що дозволяє надшвидкісний і широкосмуговий оптичний транспорт та обробку інформації [1]. Це вимагає розробки повністю оптичних комутаційних елементів і пристроїв. Використання фотонів, як носіїв інформації, замість електронів не тільки різко збільшить

наявну інформаційну пропускну здатність, але також допоможе подолати затримки при перетворенні оптичних сигналів в електричні, а також вирішить теплові проблеми, пов'язані зі звичайними інтегральними електричними схемами [2].

Актуальність роботи полягає в створенні та дослідженні пристроїв, швидкодія котрих і частотний діапазон будуть значно вищими ніж аналогічних пристроїв, котрі на сьогоднішній день використовуються в системах телекомунікаційного зв'язку.

## 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Для досягнення ефективного поширення ППП, застосовано два основні методи: використання нелінійних процесів і застосування лінійних оптичних інтерференційних ефектів [3]. У даній статті використовується лінійна оптична інтерференція, котра потребує низької інтенсивності світла [4], що значно спрощує процес дослідження.

Перспективним підходом для вирішення цієї задачі є досягнення високого ступеня інтеграції фотонних компонентів на основі ППП [5]. У наукових статтях розглянуто та досліджено різні типи хвилеводів, що дозволяють обмежувати напрямки розповсюдження ППП при передачі інформації. Це каналні плазмон-поляритони [6] – в котрих поширення ППП здійснюється у V-подібному каналі. Основний принцип, який лежить в основі каналних плазмонних хвилеводів, полягає в тому, що необхідно використовувати профіль металевої поверхні. Не дивлячись на досить таки заманливі характеристики розмірів хвилеводу, даний тип хвилевода не може бути використаний в реальних оптичних інтегральних схемах, так як процес виготовлення каналів дуже складний, дорогий і не розрахований на масове виробництво. Окрім цього, довжина пробігу ППП в таких хвилеводах є дуже малою, чого не достатньо для створення різного роду елементів обробки даних для нанооптичних схем.

Хвилеводи типу метал-діелектрик-метал [7] – мають металеві обкладинки, що дає можливість використовувати їх в якості електродів, а значить, ця структура має цікаві електрооптичні властивості. Однак, якщо врахувати омичні втрати в металі, картина виходить не дуже хорошою, можна сказати мало обіцяючою. Довжина пробігу ППП досить таки мала і залишається проблема локалізації поля в поперечному напрямку, оскільки реальні хвилеводи повинні бути обмежені в поперечному напрямі, в той час як при зменшенні ширини хвилевода ми стикаємось з проблемою, аналогічною проблемі локалізації поля в плоскому конденсаторі: вплив крайових ефектів буде настільки великим, що локалізація поля в поперечному напрямку буде меншою, ніж у фотонних хвилеводах, тоді як довжина пробігу ППП буде на 3–4 порядки меншою.

Наночастинки золота [8] – через малий розмір наночастинки та при фіксованих частотах, поле достатньо добре локалізоване – на цьому переваги даного підходу закінчуються. Так як хвилеводна структура періодична, то має місце висока дисперсія, як у фотонному кристалі, що є великим мінусом при поширенні оптичних імпульсів, а також небажані відбиття при зв'язку такого роду хвилеводів з іншими фотонними чи плазмонними хвилеводами. Таким чином, ланцюжки металевих наночастинок неможливо розглядати навіть як вставки в різного роду плазмонні пристрої.

На вище приведених структурах сформувати двох чи чотирьох каналний мультиплексор не можливо. Постає питання – як можна отримати хвилевідні структури, котрі відзначалися б малим затуханням ППП і можливістю керування ППП.

Для цього потрібно провести чисельне моделювання і експериментальне дослідження поширення ППП у чотирьох-канальному мультиплексорі та демультимплексорі.

Виготовлення такого мультиплексора та демультимплексора можна здійснити з допомогою методу ПОЛ з роздільною здатністю до 150 нм. Для повного дослідження необхідно дослідити поширення ППП у мультиплексорі включеного як розгалужувач, так і як суматор, а також проаналізувати і порівняти отримані експериментальні результати з чисельним моделюванням.

## 3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є створення багатоканального мультиплексора (демультимплексора) на ППП. Дослідження поширення ППП по його структурі та порівняння експериментальної моделі з теоретичним моделюванням.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- розробити технологію формування багатоканального хвилевода;
- провести процес моделювання руху ППП у хвилевідній структурі мультиплексора;
- виготовити експериментальний зразок багатоканального мультиплексора;
- дослідити поширення ППП в багатоканальному мультиплексорі, включеного як суматор так і розгалужувач.

## 4. Моделювання та створення експериментальної моделі

### 4.1. Моделювання поширення ППП

Математична модель руху ППП раніше уже була описана в статті [9]. В роботі [10] проведено чисельне моделювання процесу поширення ППП у чотирьох-канальному мультиплексорі розміром  $10 \times 5$  мкм (рис. 1) з використанням, як джерела оптичного сигналу, лазера з довжиною хвилі 632,8 нм і тривалістю імпульсу 50 фс.

В результаті моделювання процесу розповсюдження ППП в чотирьох-канальному мультиплексорі із включенням як розгалужувача [10], отримано зміну інтенсивності ППП від віддалі (рис. 2). Вхід розгалужувача збуджується імпульсним лазером 632,8 нм і тривалістю імпульсу 50 фс. ППП поширюється у всіх чотирьох каналах мультиплексора, хоча на віддалі 6 мкм інтенсивність його дещо зменшується (рис. 2).

Проведено також моделювання процесу поширення ППП у мультиплексорі при включенні його як суматора [11]. Кожен канал (а їх чотири канали) збуджується лазером 632,8 нм, тривалістю 50 фс та у певний момент часу. На кожен канал виділяється 50 фс часу, а також 50 фс часу на інтервал між каналами. Між імпульсний час 50 фс обрано експериментальним шляхом. Таким чином використовується часове розділення каналів. Розподіл інтенсивності ППП у такому включенні (як суматора) зображено на рис. 3.

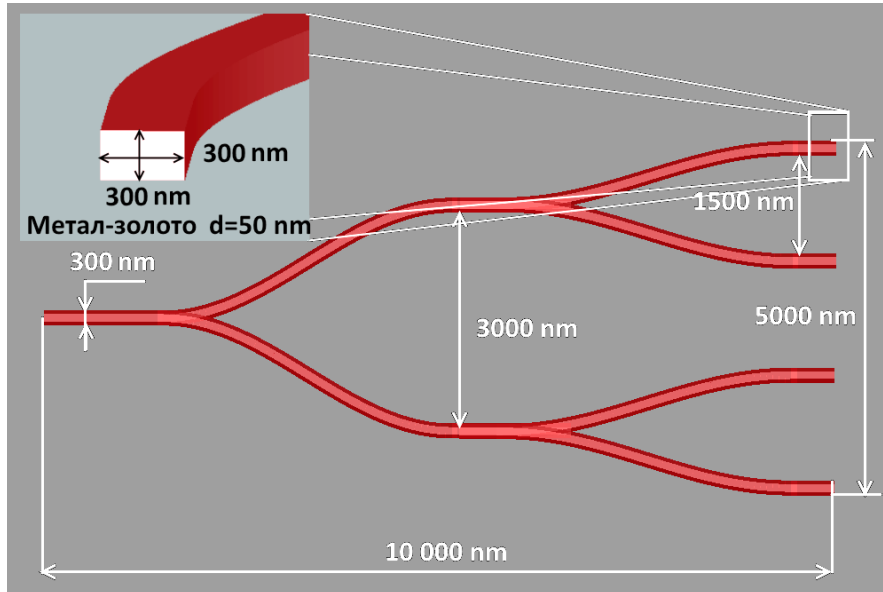


Рис. 1. Структурна схема мультиплексора

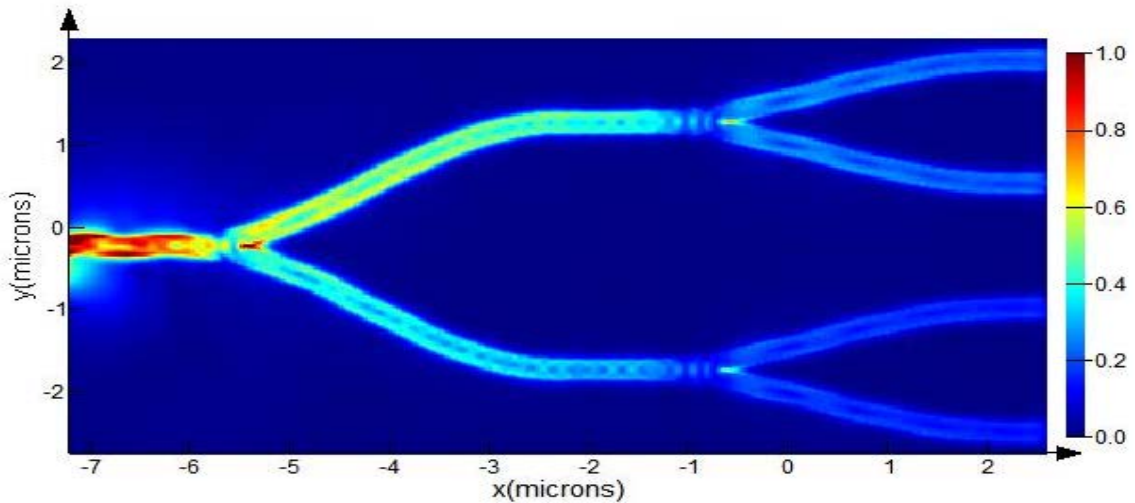


Рис. 2. Зміна інтенсивності поширення ППП по чотирьох-канальному мультиплексорі із включенням його як розгалужувач

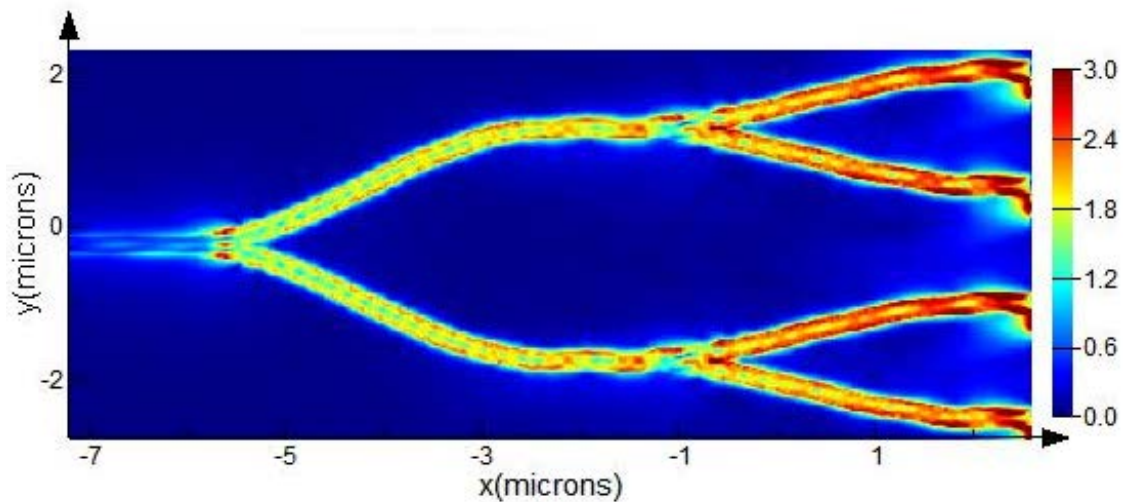


Рис. 3. Розподіл інтенсивності поширення ППП по чотирьох-канальному мультиплексорі з включенням його як суматора

З результату моделювання видно, що на виході інтенсивність буде не великою, у зв'язку із розсіюванням енергії на дефектах кристалічної ґратки золота, збудження електронів і роздвоєннями ППП, але ця отримана інтенсивність сигналу буде достатня для її ідентифікування [11].

#### 4. 2. Експериментальна модель

Зразки хвилеводів для створення мультиплексо-ра та демультиплексо-ра було сформовано методом ПОЛ [12], з роздільною здатністю 150 нм. Отримання зразків мультиплексо-ра проводилося у декілька етапів:

1. Створення шаблону з провідними каналами відповідних конфігурацій за допомогою пакету прикладних програм САД (рис. 4).

2. Друк шаблону на плівці струменевим принтером.

3. Створення маски в масштабі 1:10 з використанням позитивного фоторезиста марки S1813 і засвітка його за допомогою світло випромінюючого діода (СВД) з довжиною хвилі 410 нм і лінзи.

4. Створення маски в масштабі 1:10 з використанням позитивного фоторезиста марки mg-NIL 6000.1E і засвітка його за допомогою світло випромінюючого діода (СВД) з довжиною хвилі 365 нм і системи лінз.

Зображення мультиплексо-ра (демультиплексо-ра) отриманого скануючим електронним мікроскопом (СЕМ) представлено на рис. 5, а, б.

Отримані зразки хвилеводів мають висоту 300 нм, довжину 10×5 мкм і варіюються відносно ширини хвилевода від 150 нм до 500 нм.

### 5. Дослідження поширення ППП у чотирьох-канальному мультиплексові

#### 5. 1. Поширення ППП у мультиплексорі включено-го як розгалужувач

На рис. 6 зображено поширення ППП по мультиплексо-ру включеного як розгалужувач. Хвилевід мультиплексо-ра розміром 300×300 нм (шириною і висотою відповідно).

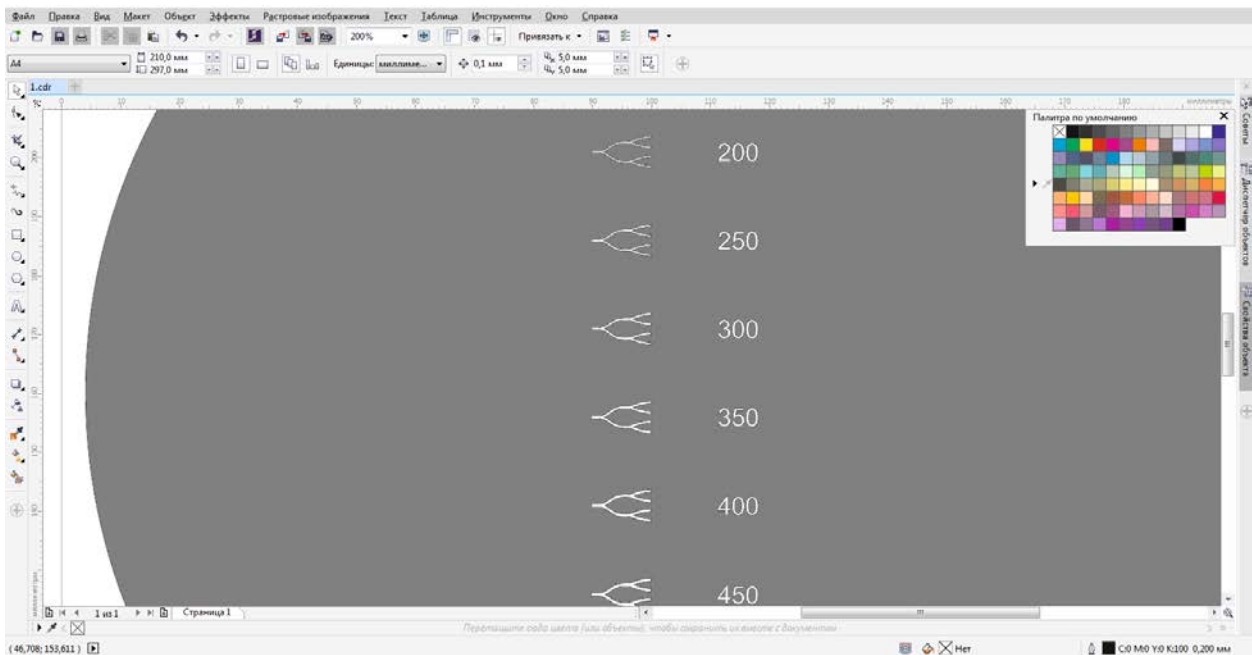


Рис. 4. Робоче вікно САД програми з різною шириною хвилеводів у зразку (від 150 до 500 нм)

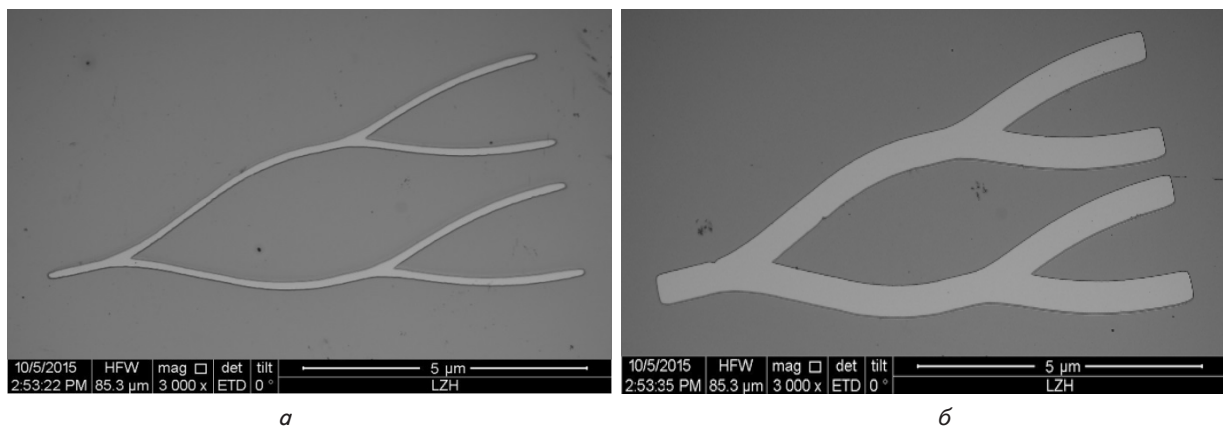


Рис. 5. Зображення хвилеводів, отриманих СЕМ, мультиплексо-ра (демультиплексо-ра) розміром 10×5 мкм, висотою 300 нм: а – шириною 150 нм; б – шириною 500 нм



Збудження ППП відбувалося з допомогою 800 нм титан-сапфірового лазера з частотою імпульсу 27 фс (Karpeyn Murnane Labs). Можна побачити візуально, що ППП проходить по усій довжині структури та досягає чотирьох вихідних каналів з незначним загасаннями у хвилеводі.

У табл. 1 вказано інтенсивність ППП зафіксовану у квадраті, площею 0,693 мкм. Колір у табл. 1 відповідає кольору на рис. 6, таким чином можна побачити де саме замірялася інтенсивність та яке є її максимальне і мінімальне значення.

Таблиця 1

Інтенсивність поширення ППП у мультиплексорі з включенням як розгалужувач

№	Площа [μm]	Інтенсивність [у. о.]	Процент передачі*	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

Примітка: \* – процент передачі обрахований відношенням вихідної інтенсивності ППП до вхідної

Як можна побачити, інтенсивність ППП на виходах мультиплексора є достатньою для чіткого ідентифікування, оскільки перевищує рівень 10 % [11]. На рис. 7 показано спад середнього значення інтенсивності ППП у мультиплексорі, включеного як розгалужувач. Можна побачити, що експериментальні результати добре співпадають з математичним моделюванням [12] і інтенсивність спадає експоненціально.

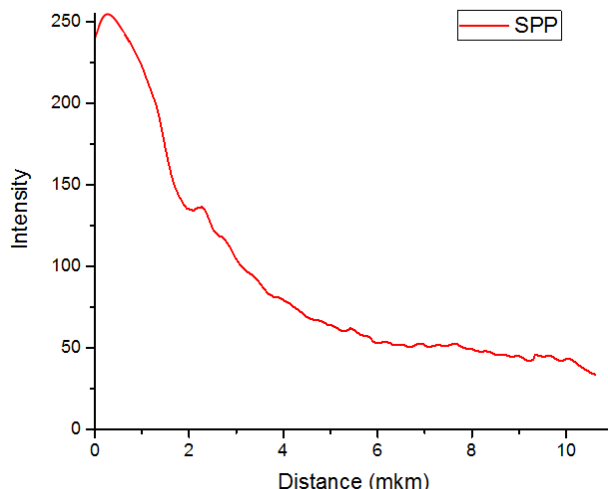


Рис. 7. Інтенсивність спадання ППП на усій ділянці мультиплексора.

Розглядаючи мультиплексор як розгалужувач можна отримати досить чіткий ППП на усіх чотирьох каналах. Але обмежуватися розгалужувачем не можна. Розглянемо включення мультиплексора як суматора.

### 5. 2. Поширення ППП у мультиплексорі включеного як суматор

Засвічуючи лазером відповідний канал, отримуємо розповсюдження ППП в різних каналах. На рис. 8 показано поширення ППП у мультиплексорі, включеного як суматор. Продемонстровано поширення ППП при збудженні усіх чотирьох каналів по чергово.

Як ми бачимо, ППП проходить по усій довжині каналу до виходу мультиплексора, включеного як суматор. Інтенсивність його буде достатньою для ідентифікування (табл. 2).

На рис. 9 показано як спадає ППП у кожному каналі індивідуально. Характер спадання ППП у всіх каналів однаковий і на виході ППП можна добре ідентифікувати у проміжку інтенсивності 30–40.

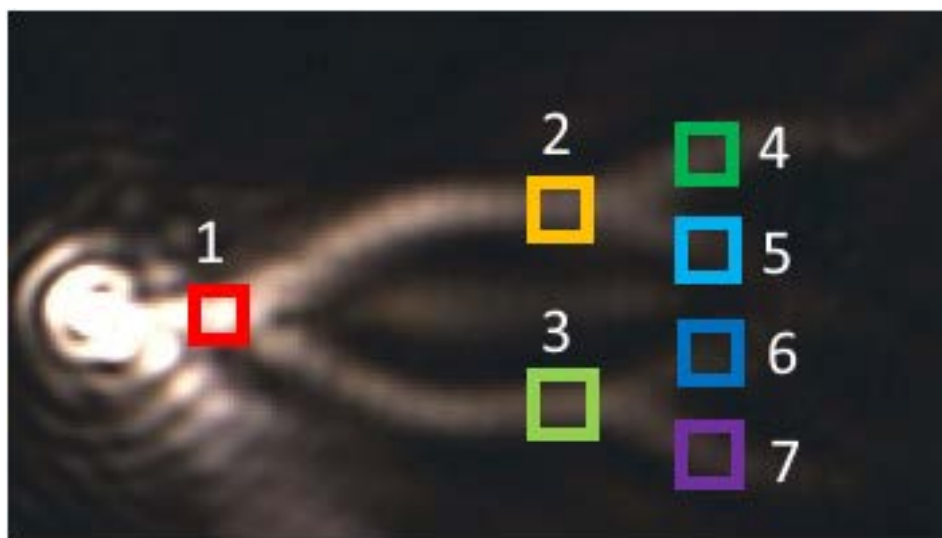


Рис. 6. Поширення ППП у мультиплексорі, включеного як розгалужувач. Кольорові квадрати показують де заміряно інтенсивність ППП

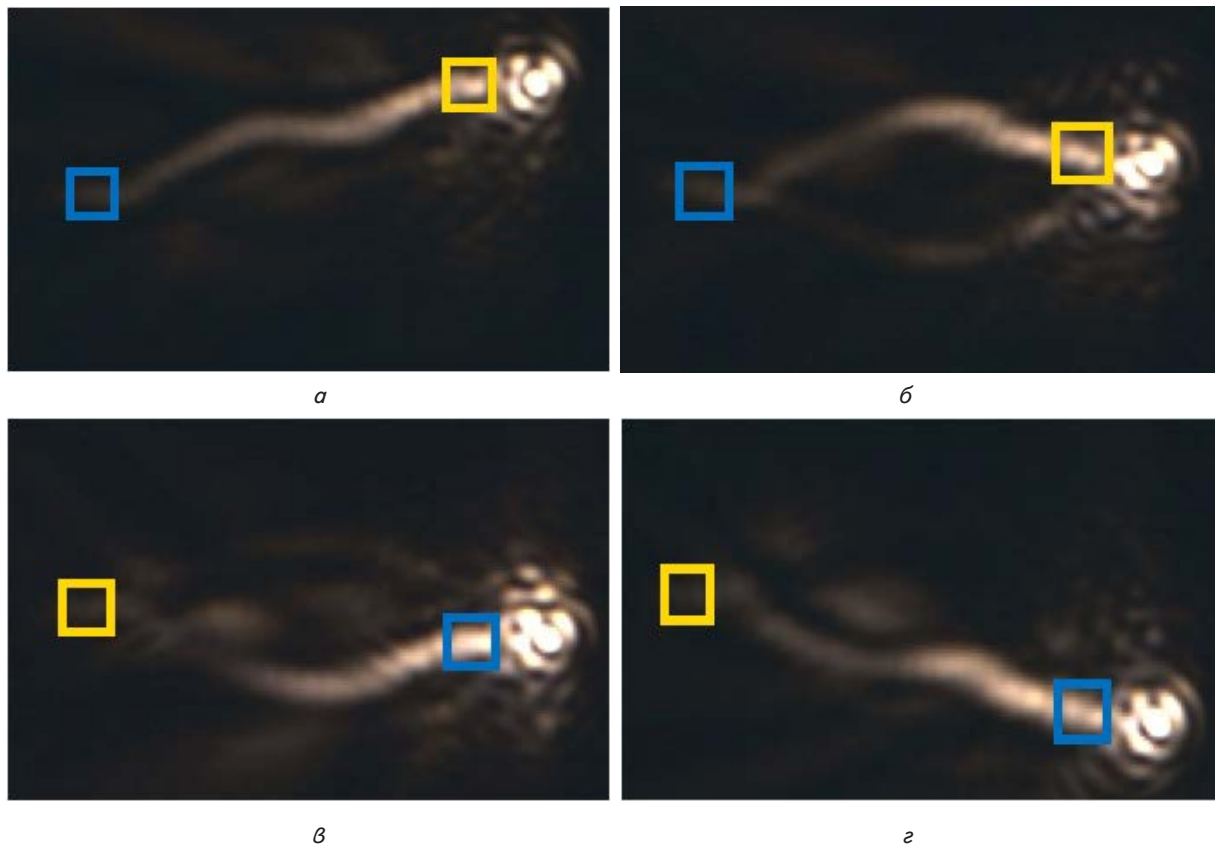


Рис. 8. Поширення ППП по мультиплексору, включеного як суматор: а, б, в, г – поширення ППП по першому, другому, третьому та четвертому каналах відповідно

Таблиця 2

Поширення ППП у мультиплексорі, з включенням як суматор

Інтенсивність поширення ППП по <b>першому</b> каналі				
№	Площа [μm]	Інтенсивність [у. о.]	Процент передачі	Колір
1	1,543	220	100 %	Жовтий
2	1,543	52	23,64 %	Блакитний
Інтенсивність поширення ППП по <b>другому</b> каналі				
№	Площа [μm]	Інтенсивність	Процент передачі	Колір
1	1,096	208	100 %	Жовтий
2	1,096	54	25,96 %	Блакитний
Інтенсивність поширення ППП по <b>третьому</b> каналі				
№	Площа [μm]	Інтенсивність [у. о.]	Процент передачі	Колір
1	0,852	220	100 %	Блакитний
2	0,852	50	22,73 %	Жовтий
Інтенсивність поширення ППП по <b>четвертому</b> каналі				
№	Площа [μm]	Інтенсивність [у. о.]	Процент передачі	Колір
1	0,988	247	100 %	Блакитний
2	0,988	53	21,46 %	Жовтий

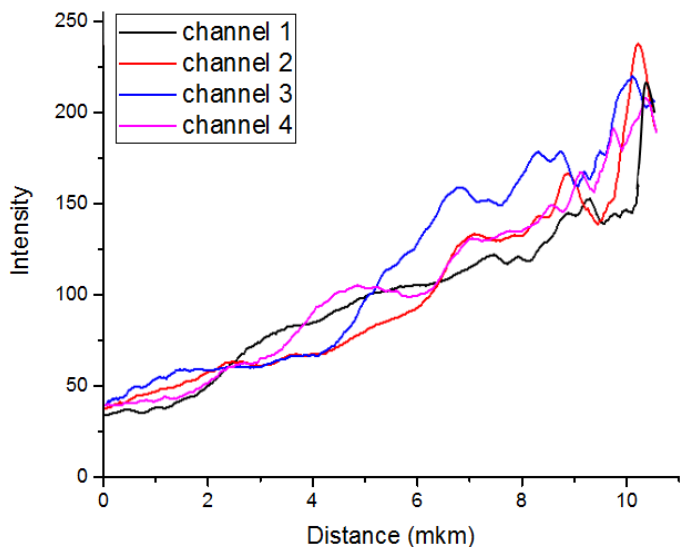


Рис. 9. Спадання ППП по усіх чотирьох каналах мультиплексора включеного як суматор

Також було проведено експеримент при засвіті одночасно двох каналів мультиплексора. Результати зображені на рис. 10.

Таким чином, спираючись на отримані результати поширення ППП у структурі дають можливість розглядати отримані зразки, як мультиплексор, включений як суматор.

### 6. Обговорення результатів дослідження

В наслідок моделювання і експериментального дослідження доведено, що ППП розповсюджується у всі 4 канали мультиплексора. Інтенсивність ППП на виході буде достатньою для її ідентифікування.

Недоліком даного дослідження є недовідомі причини втрат інтенсивності сигналу на виході мультиплексора (демультиплектора). Що являється наступною задачею для вирішення.

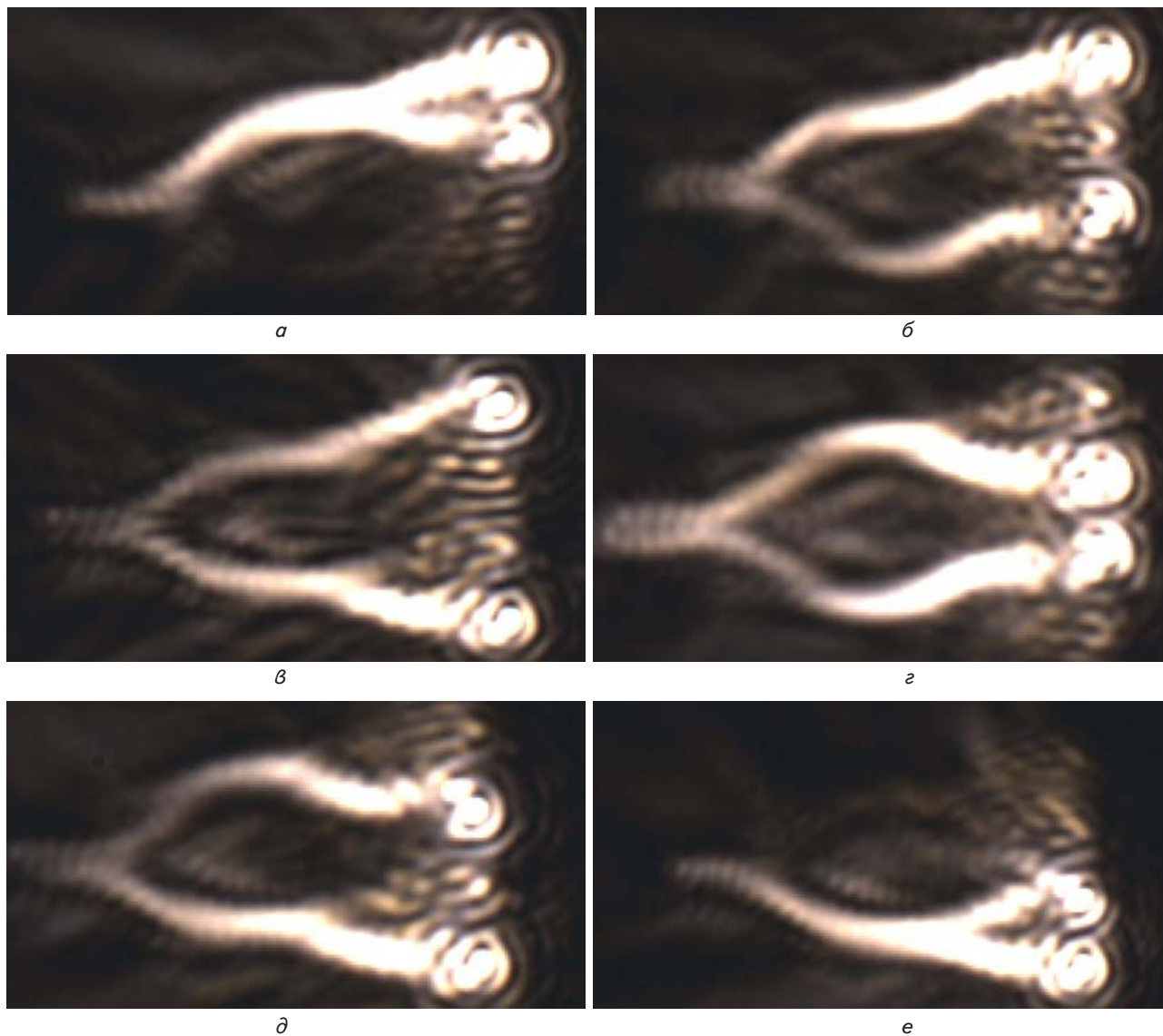


Рис. 10. Поширення ППП по мультиплексору включеного як суматор при використанні для засвітки двох лазерів: а – задіяно 1 і 2 канали; б – 1 і 3 канали; в – 1 і 4 канали; г – 2 і 3 канали; д – 2 і 4 канали; е – 3 і 4 канали

Запропонований мультиплексор (демультиплексор) можна використати для створення над компактних та надшвидкісних оптичних систем обробки інформації, для паралельної обробки інформації між ядрами комп'ютера, а також нового класу пристроїв для інфокомунікаційних систем.

В роботі вперше досліджено можливість створення багатоканального мультиплексора на ППП, тому дана тематика вимагає додаткових досліджень, з можливістю розширення каналів до 8.

---

## 7. Висновки

---

Для перевірки адекватності моделювання процесу розповсюдження ППП у мультиплексорі, з допомогою методу ПОЛ, створено зразки мультиплексора (демультиплексора) розміром 10×5 мкм.

Підтверджено, що ППП виникає та поширюється по усій структурі мультиплексора. Показано рух та інтенсивність ППП у мультиплексорі, включеного як розгалужувач, так і як суматор.

Проаналізовані втрати ППП, що добре збігаються з результатами моделюванням. Для того, щоб ідентифікувати ППП на виходах мультиплексора, необхідно, хоча б, 10 % його сигналу. Експериментальні дослідження показали, що на виходах мультиплексора інтенсивність становить не менше 19,61 %, котрої достатньо для ідентифікації ППП.

В результаті проведених досліджень:

1. Запропоновано технологію формування багатоканальних хвилеводів плазмонних хвиль, суть котрої заключається в поетапному (2 етапи) зменшенні розмірів структур, при використанні СВД.

2. Теоретично доведено, що ППП пройде від початку мультиплексора до кінця із затуханням сигналу за рахунок розсіювання енергії на дефектах кристалічної ґратки металу. І даної інтенсивності буде достатньо для ідентифікування.

3. Виготовлено і досліджено багатоканальний мультиплексор як розгалужувач так і як суматор. Обраховано, що інтенсивність ППП на виході мультиплексора (демультиплексора) буде не нижче 19,60 %.

Запропонований чотирьох-канальний мультиплексор з почасовою вибіркою імпульсів на ППП можна використовувати для обробки і передачі інформації у нанооптичних схемах.

Результати, викладені у статті, будуть використані для створення над компактних та надшвидкісних оптичних систем обробки інформації, а також нового класу пристроїв для інфокомунікаційних систем.

---

## Подяка

---

Особлива подяка колективу співробітників відділу нанотехнологій лазерного центра Ганновера (LZH), Німеччина, за можливість проведення експериментів.

---

## Література

1. Wen, F. Charge Transfer Plasmons: Optical Frequency Conductances and Tunable Infrared Resonances [Text] / F. Wen, Y. Zhang, S. Gottheim, S. King, Yu. Zhang, P. Nordlander, J. Halas // *ACS Nano*. – 2015. – Vol. 9, Issue 6. – P. 6428–6435. doi: 10.1021/acsnano.5b02087
2. Wei, H. Cascaded logic gates in nanophotonic plasmon networks [Text] / H. Wei, Z. Wang, X. Tian, M. Kll, H. Xu // *Nature Communications*. – 2011. – Vol. 2. – P. 387. doi: 10.1038/ncomms1388
3. Fang, X. Controlling light with light using coherent metadevices: all-optical transistor, summator and inverter [Text] / X. Fang, K. F. MacDonald, N. I. Zheludev // *Light: Science & Applications*. – 2015. – Vol. 4. – P. e292. doi: 10.1038/lsa.2015.65
4. Caulfield, H. J. The logic of optics and the optics of logic [Text] / H. J. Caulfield, J. Westphal // *Information Sciences*. – 2004. – Vol. 162, Issue 1. – P. 21–33. doi: 10.1016/j.ins.2003.01.002
5. Ebbesen, T. W. Surface plasmon circuitry [Text] / T. W. Ebbesen, C. Genet, S. I. Bozhevolnyi // *Physics Today*. – 2008. – Vol. 61, Issue 5. – P. 44–50. doi: 10.1063/1.2930735
6. Bozhevolnyi, S. I. Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators [Text] / S. I. Bozhevolnyi, V. S. Volkov, E. Devaux, J.-Y. Laluet, T. W. Ebbesen // *Nature*. – 2006. – Vol. 440, Issue 7083. – P. 508–511. doi: 10.1038/nature04594
7. Verhagen, E. Near-field visualization of strongly confined surface plasmon polaritons in metal-insulator-metal waveguides [Text] / E. Verhagen, J. A. Dionne, L. Kuipers, H. A. Atwater, A. Polman // *Nano letters*. – 2008. – Vol. 8, Issue 9. – P. 2925–2929. doi: 10.1021/nl801781g
8. Evlyukhin, A. B. Surface plasmon polariton guiding by chains of nanoparticles [Text] / A. B. Evlyukhin, S. I. Bozhevolnyi // *Laser Physics Letters*. – 2006. – Vol. 3, Issue 8. – P. 396–400. doi: 10.1002/lapl.200610014
9. Pavlysh, V. A. Surface plasmon waves on the nanoscale films [Text] / V. A. Pavlysh, L. I. Zakalyk, D. V. Nevinskyi, S. Y. Lebid // *Microwave and Telecommunication Technology*. – 2013. – Vol. 2. – P. 885–886.
10. Nevinskyi, D. V. Four Channel Splitter on Surface Plasmons-Polaritons [Text] / D. V. Nevinskyi, V. A. Pavlysh, L. I. Zakalyk, S. Yu. Lebid // *Nanomaterials: Applications & Properties*. – 2015. – Vol. 4, Issue 2.
11. Nevinskyi, D. Surface plasmon polariton four-channel splitter and adder [Text] / D. Nevinskyi, V. Pavlysh, L. Zakalyk, S. Lebid. – *Young scientists towards the challenges of modern technology*, 2015.
12. Nevinskyi, D. V. Surface plasmon-polaritons nanoscale waveguides obtained by optical photolithography [Text] / D. V. Nevinskyi, V. A. Pavlysh, L. I. Zakalyk, S. Yu. Lebid // *Electronics and Telecommunications*. – 2015. – Vol. 818. – P. 242–249.