

Г. Л. Лисенко, к. т. н., доц.; І. В. М'ялківська

## ОПТИМІЗАЦІЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ВИКОНАННЯ СКЛАДНИХ МАТРИЧНИХ ОПЕРАЦІЙ НА ОСНОВІ ОПТИЧНИХ ТРАНСПАРАНТІВ

*Розглянуто спеціалізовані обчислювальні системи на основі оптичних транспарантів для виконання операцій з великорозмірними матрицями. Оптимізовано схеми комірок оптичних транспарантів з метою покращення таких характеристик, як: швидкодія та габаритні розміри.*

**Ключові слова:** спеціалізовані обчислювальні системи; оптичний транспарант; матричні операції; коефіцієнт поглинання; електроабсорбційний модулятор; подвійний діод.

### Вступ

Оптоелектронні обчислювальні системи демонструють свої переваги протягом останніх 30 років. Вони характеризуються високою швидкістю передачі даних, паралелізмом, низькою споживчою потужністю тощо. Застосування матричної передачі даних (у т. ч. зображень) дозволяє реалізувати принцип паралелізму оптоелектронних систем. Матрична форма даних може бути представлена, зокрема, і за допомогою оптичних транспарантів. Проаналізовано [1, 2], що для оптоелектронних спеціалізованих обчислювальних систем найкраще підходять напівпровідникові транспаранти, оскільки вони мають високий ступінь інтеграції та, що не менш важливо, напівпровідник має здатність змінювати свої оптичні властивості під дією різноманітних факторів (електричної напруги, оптичного випромінювання, температури та ін.). Остання властивість напівпровідникового матеріалу використовується для здійснення модуляції вхідного оптичного випромінювання на транспаранті.

### Оптимізація спеціалізованих обчислювальних систем для виконання операції поелементного множення матриць

Одним із напрямів використання систем з оптичними транспарантами в спеціалізованих обчислювачах є виконання матричних операцій, тобто робота з інформацією картинного типу. На сьогодні досліджено виконання такими системами лише простих матричних операцій, а саме: додавання, множення, обернення та ін. – з матрицями обмежених розмірів (порядку  $10^2$  на  $10^2$  [1]). Проте існує проблема швидкої обробки великорозмірних матриць.

Пропонується використати спеціалізовані системи з оптичними транспарантами для виконання послідовності матричних операцій. При цьому кожна матрична операція буде виконуватися послідовно на окремому оптичному транспаранті. А саме: використовуватиме набір оптичних транспарантів, які будуть працювати як логічні елементи та виконуватимуть дані операції. У результаті послідовності з'єднання таких транспарантів можна буде отримати виконання складних матричних операцій у спеціалізованих обчислювальних системах.

Відома схема комірки оптичного транспаранта на основі електроабсорбційного модулятора (EAM – Electroabsorption modulator) [3], яка працює в якості логічного елемента І-НІ. Електрично-оптична схема такого елемента наведена на рис. 1.

На рис. 1 А і В – інформаційні сигнали, С – постійний оптичний сигнал, EAM1 та EAM2 – електроабсорбційні модулятори, PD1 і PD2 – фотоприймачі.

Перевагами цього логічного елемента порівняно з такими ж елементами на S-SEED-приладах (Symmetric Self-Electro-Optic Effect Device) [4] є відсутність вхідних парафазних сигналів, що дозволяє зменшити габарити як самого елемента та зв'язків між його

складовими, так і транспарантів, які можуть бути на них побудовані. Крім того, в такому елементі І-НІ вирішується проблема різних за рівнями вхідних і вихідних сигналів, яка існує в поколіннях оптичних

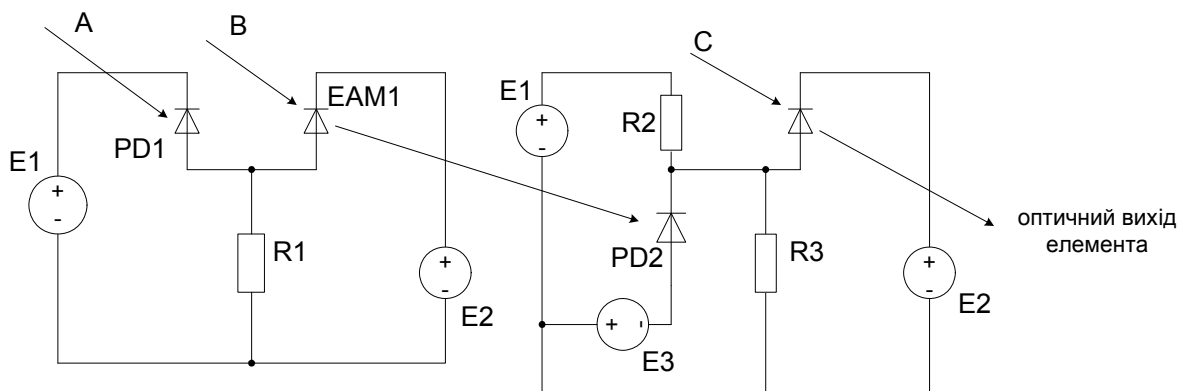


Рис. 1. Електрично-оптична схема елемента І-НІ

модуляторів OCOG1-OCOG-4 (Optically Controlled Optical Gates) [5]. В елементі І-НІ, що зображений на рис. 1 і вхідний, і вихідний сигнали матимуть однакову довжину хвилі, інтенсивність і амплітуду сигналу. Це пов'язано з тим, що вхідні сигнали А, В та С є однаковими за всіма вище перерахованими параметрами. Рівність вхідних і вихідних сигналів цього оптичного логічного елемента дозволить створювати системи з послідовним з'єднанням таких елементів, в яких вихід одного елемента може бути входом наступного і т. д.

Іншими словами, на рис. 1 зображена одна комірка оптичного транспаранта, який буде виконувати операцію поелементного множення з інвертуванням. Весь транспарант матиме вигляд, який зображено на рис. 2.

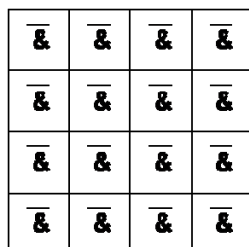


Рис. 2. Оптичний транспарант на основі логічних елементів І-НІ

Проте недоліками цієї схеми (див. рис. 1) є три джерела живлення та значна кількість елементів схеми, що призводить до збільшення її габаритів і собівартості.

Для покращення характеристик спеціалізованих обчислювальних систем, а саме: зменшення їх габаритів (за рахунок зменшення кількості елементів) і вартості, а також підвищення швидкодії – пропонується оптимізувати схему комірки оптичного транспаранта на основі логічного елемента І-НІ, яка наведена на рис. 1.

Оптимізована схема логічного елемента І-НІ зображена на рис. 3.

Вона працює таким чином. Інформаційні сигнали А і В надходять на поверхню подвійного діода DD [5], а сигнал С є постійним оптичним сигналом, що за рівнями збігається з сигналами А і В. Причому подвійний діод DD (Double-diode) відкриється тільки тоді, коли на нього падатиме оптичне випромінювання А і В (іншими словами, А та В дорівнюватимуть одиниці). Тоді через DD починає збільшуватися струм, який призводить до зменшення напруги на модуляторі ЕАМ.

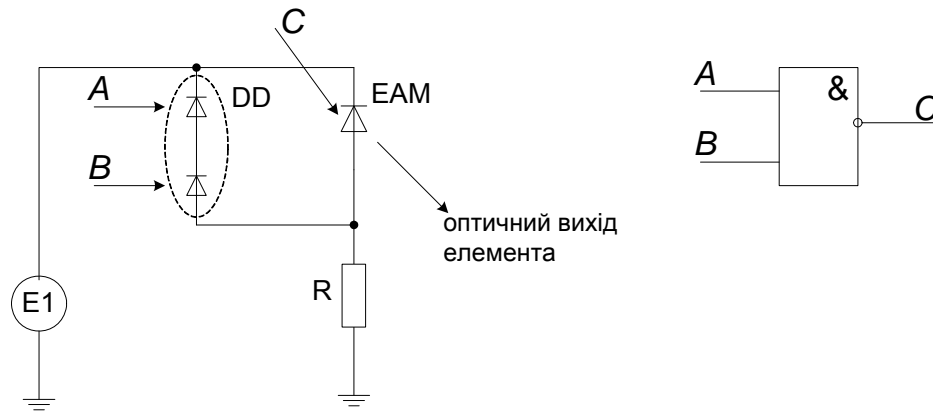


Рис. 3. Оптимізована електрично-оптична схема логічного елемента І-НІ

На рис. 4 наведено графіки залежності коефіцієнта поглинання напівпровідників з квантовими ямами від прикладеної напруги на різних довжинах хвиль [6]. З графіків видно, що зменшення напруги на ЕАМ призводить до збільшення його коефіцієнта поглинання. Тому він стає непрозорим і через нього не проходить постійний оптичний сигнал С, і на виході елемента І-НІ отримуємо нуль.

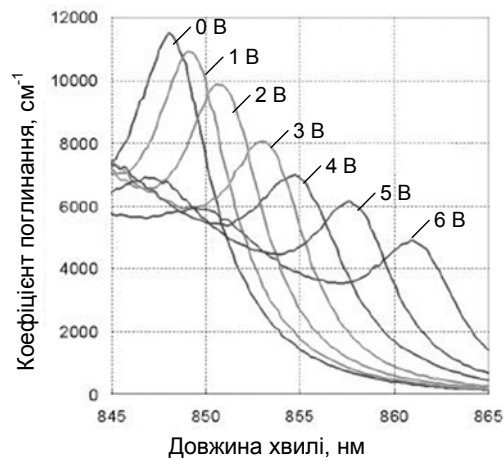


Рис. 4. Графіки залежності коефіцієнта поглинання напівпровідника з квантовими ямами від прикладеної напруги [6]

У всіх інших випадках (коли хоча б один із інформаційних сигналів дорівнює нулю) подвійний діод DD не відкривається, напруга на ЕАМ не змінюється і через нього проходить постійний оптичний сигнал С, і на виході отримуємо одиницю. Отже, ця схема (див. рис. 3) підтверджує таблицю істинності для елемента І-НІ.

Порівняно зі схемою логічного елемента І-НІ, що зображений на рис. 1, оптимізована схема містить менше елементів. За рахунок цього підвищується швидкість виконання цієї логічної операції та зменшуються габарити самого логічного елемента, що є досить важливим під час побудови транспаранта на їх основі.

### Оптимізація спеціалізованих обчислювальних систем для виконання операції додавання матриць

На основі логічного елемента І-НІ (див. рис. 1) можна виконувати й інші матричні операції. Структурна схема операції поелементного додавання, яка здійснюється за допомогою певної схеми з'єднання елементів І-НІ, матиме вигляд, представлений на рис. 5.

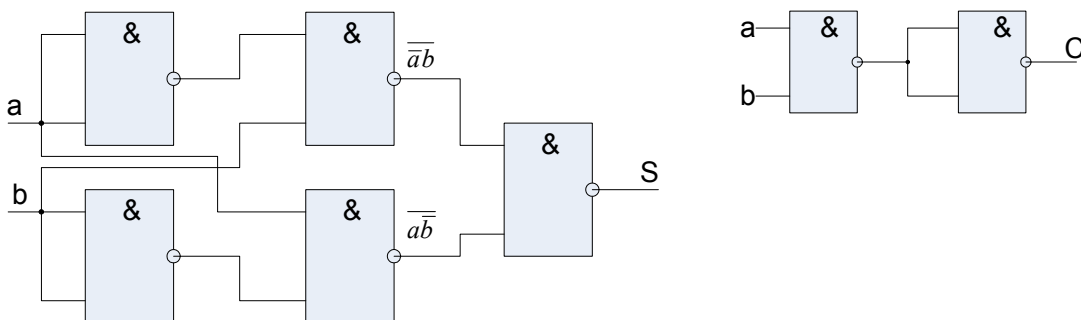


Рис. 5. Структурна схема операції додавання оптичних сигналів на прикладі однієї комірки  
S – сума за модулем 2; C – перенос

Проте ця схема має ті ж недоліки, що й схема, зображена на рис. 1. Крім того вона є досить громіздкою через те що, що містить багато елементів І-НІ. На рис. 6 наведена електрично-оптична схема виконання операції додавання на основі логічних елементів І-НІ, які зображені на рис. 1.

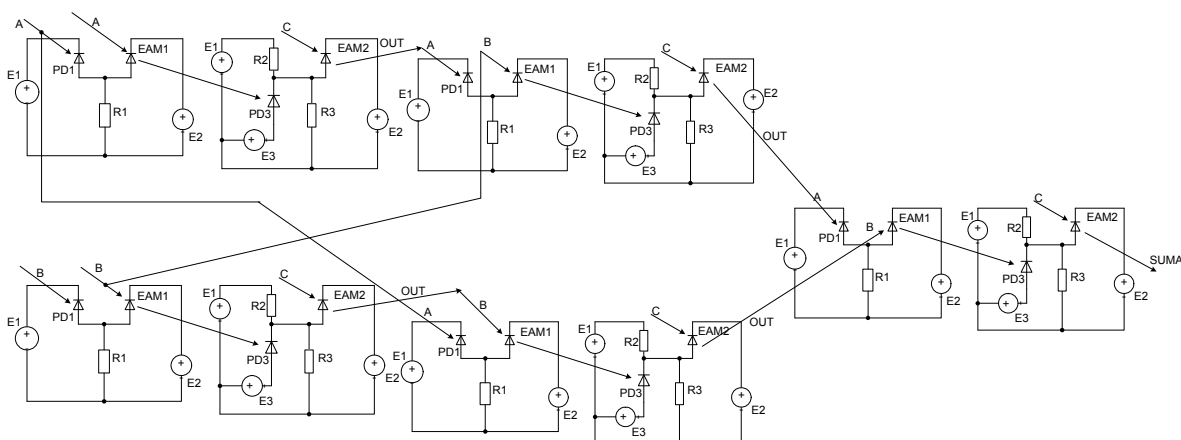


Рис. 6. Електрично-оптична схема виконання операції додавання на основі логічних елементів І-НІ

Пропонується оптимізувати схему операції додавання, зменшивши тим самим її габарити, кількість елементів і збільшивши швидкодію. Оптимізована схема додавання двох оптичних сигналів для спеціалізованих обчислювальних систем на прикладі однієї комірки наведена на рис. 7.

Схема, наведена на рис. 7, працює таким чином. При надходженні одиничних сигналів на входи A і B струми через фотодіоди PD1 і PD2 – однакові, і тому напруга на EAM1 не змінюється і він пропускає постійний оптичний сигнал C. Аналогічна ситуація відбувається на другій паралельній ділянці схеми з EAM2. Відповідно, на подвійний діод DD надходять два одиничні сигнали, а далі ситуація аналогічна ситуації з елементного множення (див. рис. 3), тому на виході отримаємо нуль.

Таким же чином не змінюють напругу на EAM1 та EAM2 нульові вхідні сигнали A і B, призводячи до нульового сигналу на виході схеми.

Коли на вході схеми інформаційні сигнали  $A=0$  та  $B=1$ , то напруга на EAM1 зменшується, призводячи до збільшення його коефіцієнта поглинання випромінювання (див. рис.4), і на виході EAM1 наявний нульовий сигнал. Нульовий сигнал A на другій паралельній ділянці схеми збільшує напругу на EAM2, збільшуючи його пропускання, і на виході EAM2 існує постійний оптичний одиничний сигнал. Нульовий і одиничний вхідні сигнали на подвійний діод призводять до одиничного сигналу на виході всієї схеми.

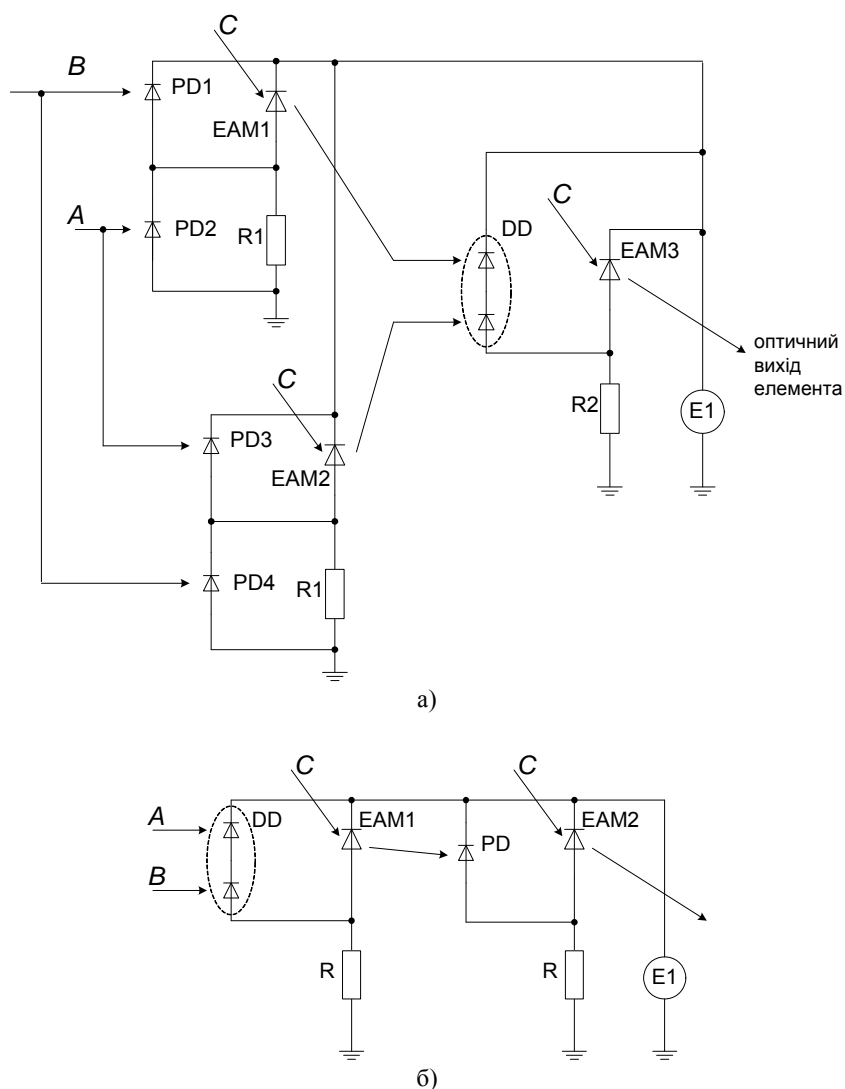


Рис. 7. Оптимізована електрично-оптична схема додавання двох сигналів: електрично-оптична схема операції суми по за модулем 2 (а) та переносу (б)

У випадку, коли на вході схеми інформаційні сигнали  $A=1$  та  $B=0$ , то напруга на EAM2 зменшується, призводячи до збільшення поглинання ним випромінювання, і на виході EAM2 наявний нульовий сигнал. Нульовий сигнал B на першій паралельній ділянці схеми збільшує напругу на EAM1, збільшуючи його пропускання, і на виході EAM1 існує постійний оптичний одиничний сигнал. Одиничний та нульовий входні сигнали на подвійний діод DD призводять до одиничного сигналу на виході всієї схеми.

Отже, робота схеми, що наведена на рис. 7, підтверджує таблицю істинності суми за модулем 2.

Порівняно зі схемою логічного елемента суми за модулем 2, що зображений на рис. 6, оптимізована схема містить набагато менше елементів. Це дозволить підвищити швидкодію цієї логічної операції та значно зменшити габарити самого елемента суми за модулем 2, що є досить важливим під час побудови транспаранта на його основі.

### Порівняння характеристик оптичних транспарантів для виконання складних матричних операцій

Оптимізація електрично-оптичних схем логічних елементів І-НІ та суми за модулем 2 для

виконання операцій з великорозмірними матрицями у спеціалізованих обчислювальних системах призвела до зменшення кількості елементів схеми, що дозволило зменшити її розміри. Ще одним важливим параметром таких схем є швидкість виконання операцій.

Оцінимо окремо частоту виконання операцій для оптимізованого логічного елемента І-НІ (див. рис. 3) та оптимізованого логічного елемента суми за модулем 2 (див. рис. 7).

Частота виконання операцій на логічному елементі І-НІ, що зображений на рис. 3, буде обчислюватись за формулою [3]:

$$f_{I-HE} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi \cdot R(C_{DD} + C_{EAM})}, \quad (1)$$

де  $R$  – опір схеми;  $C_{DD}$  – ємність подвійного діода;  $C_{EAM}$  – ємність електроабсорбційного модулятора.

Відповідно, час виконання цієї логічної операції становитиме:

$$\tau_{I-HE} = \frac{1}{f_{I-HE}}. \quad (2)$$

Аналогічно обчислюється час виконання операцій для логічного елемента суми за модулем 2 з переносом, що зображений на рис. 7:

$$\tau_{\oplus} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_{I-HE}}, \quad (3)$$

де  $f_1$  – частота роботи першої паралельної ділянки з ЕАМ1:

$$f_1 = \frac{\sqrt{3}}{2\pi \cdot R_{\Sigma}(C_{PD1} + C_{PD2} + C_{EAM1})}. \quad (4)$$

У табл. 1 наведено порівняння швидкості виконання згаданих вище логічних операцій на основі існуючих та оптимізованих схем.

Таблиця 1

Порівняння швидкості виконання логічних операцій І-НІ та сума за модулем 2

Вид транспаранта	Швидкість виконання логічної операції для двох матриць розмірністю 10240 x 10240 пікселів	
	логічна операція І-НІ	логічна операція суми за модулем 2
На основі існуючої схеми	422 нс	1,27 мкс
На основі оптимізованої схеми	107 нс	426 нс

З табл. 1 видно, що оптимізовані схеми мають вищу швидкість виконання наведених логічних операцій. Причому швидкість обробки в оптимізованих схемах є вищою (приблизно в 2 рази) для логічної операції І-НІ і – приблизно в 3 рази для логічної операції суми за модулем 2. Крім того, оптимізована схема комірки транспаранта, що виконує логічну операцію І-НІ (див. рис. 3), містить приблизно в два рази менше елементів, а схема для операції суми за модулем 2 – приблизно в три рази менше елементів.

Ці характеристики позитивно вплинуть на спеціалізовані обчислювальні системи на основі оптичних транспарантів, що дозволить швидше обробляти великорозмірні масиви даних та зменшити габаритні розміри таких систем.

### Висновки

Використавши напівпровідникові структури, побудовано схеми спеціалізованих обчислювальних систем з оптичними транспарантами для здійснення складних матричних операцій та оптимізовано ряд параметрів для покращення їх характеристик. А саме: зменшено кількість елементів у схемах логічних елементів І-НІ та суми за модулем 2, що

призвело до зменшення розмірів самих логічних елементів, а також підвищено швидкодію виконання логічних операцій для великорозмірних матриць. Так, операція множення двох матриць розмірністю 10240 x 10240 з інвертуванням виконується за 107 нс, а операція додавання аналогічних матриць – за 426 нс. Отримані результати в 2 – 3 рази перевищують характеристики існуючих спеціалізованих обчислювальних систем на основі логічних елементів по швидкодії та кількості елементів схем.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лисенко Г. Л. Аналіз сучасних типів транспарантів та їх характеристик / Г. Л. Лисенко, І. В. М'ялківська // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2007. – № 2 (14). – С. 145 – 153.
2. М'ялківська І. В. Використання оптичних транспарантів для спеціалізованих обчислювальних систем / І. В. М'ялківська / Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2008. – № 1 (15). – С. 123 – 129.
3. Onur Finader. Photonic integration for optical interconnects: from chip scale to long distance // A dissertation submitted to the committee on graduate studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of philosophy. – 2007. – P. 19 – 23.
4. Miller D.A.B. Quantum-well self-electro-optic effect device/ D.A.B. Miller // Optical and Quantum electronics. – 1990. – №22. – P. 61 – 98.
5. Micah B. Yairi. An optically controlled optoelectronic switch: from theory to 50 gigahertz burst-logic demonstration // A dissertation submitted to the department of applied physics and the committee on graduate studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. – 2001. – 210 p.
6. Bianca Elizabeth Nelson Keller. Wavelength division multiplexed optical interconnects using short pulses // A dissertation submitted to the department of applied physics and the committee on graduate studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. – 2002. – P. 48.

*Лисенко Геннадій Леонідович* – к. т. н., доцент кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, e-mail: [lg1@vstu.vinnica.ua](mailto:lg1@vstu.vinnica.ua), тел. 8-0432-59-82-32.

*М'ялківська Ірина Володимирівна* – здобувач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, e-mail: [koshirina@rambler.ru](mailto:koshirina@rambler.ru), тел. 8-0432-59-80-33.

Вінницький національний технічний університет.