

## ОГЛЯДОВІ СТАТТІ

УДК 535

### ФІЗИКА ОПТИЧНИХ КОМП'ЮТЕРІВ

І. Половинко, Т. Кріль

*Львівський національний університет імені Івана Франка,  
вул. ген. Тарнавського, 107, 79017 Львів, Україна  
[takirelli@gmail.com](mailto:takirelli@gmail.com)*

Описано основи фізики оптичних обчислювальних машин. З'ясовано, що для подальшого збільшення швидкодії цих машин необхідно замість електронів використати фотони. Це теоретично дасть змогу майже у  $10^3$  разів підвищити швидкість пристроїв за таких самих їхніх розмірів. Проаналізовано наявні сьогодні системи опрацювання інформації та можливості створення інтегрально-оптичних елементів оптичних обчислювальних машин. Зазначено, що першочерговим завданням нині є створення мініатюрних оптичних процесорів, основа яких – оптичні транзистори. Описано деякі наявні (колові резонатори) та перспективні (наночастинкові) оптичні транзистори.

*Ключові слова:* оптичний комп'ютер, оптичний процесор, наночастинки.

На всіх етапах технічного забезпечення інформаційних процесів для інформатики ключовим поняттям є їхня ефективність. Для апаратних засобів під ефективністю розуміють співвідношення продуктивності обладнання до його вартості (з урахуванням вартості експлуатації та обслуговування). На рис. 1 відображено закон Мура [1], який у логарифмічному масштабі дає залежність кількості операцій в одиницю часу на вкладення коштів 1 тис. доларів.

У ХХ ст. ця залежність була практично лінійна. Однак з кінця 2000 р. ця залежність виходить на насичення. Основною причиною є те, що розміри електронних транзисторів можуть зменшуватись до певної межі. Нині мінімальні розміри електронних транзисторів досягли 22 нм. Це дає змогу досягнути швидкодії обчислень декілька гігабітів за секунду. Очікують, що у 2020 р. розміри електронних транзисторів досягнуть 5 нм. Це значення є принциповим, оскільки, зокрема, у кремнії, вона відповідає довжині хвилі електрона де Бройля[2].

$$\lambda = \frac{h}{mu} = \frac{h}{p}, \quad (1)$$

де  $m$  – маса електрона;  $u$  – його швидкість;  $p = mu$  – імпульс.

Швидкість електронів, прискорених потенціалом  $V$  (у вольтах), визначають з виразу

$$u = \sqrt{2 \frac{qV}{m}}, \quad (2)$$

де  $q$  – заряд електрона.

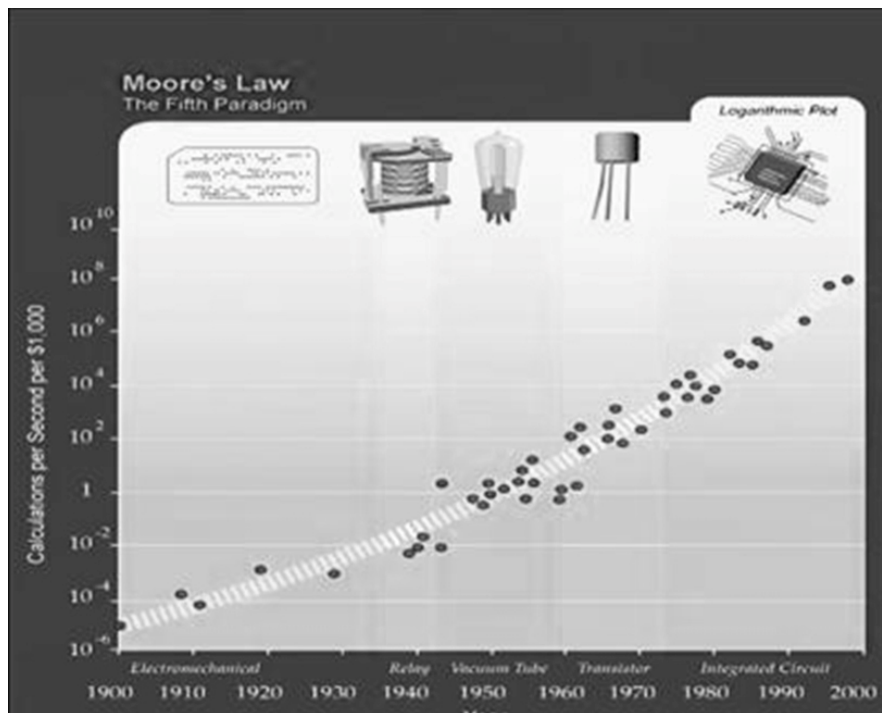


Рис. 1. Закон Мура.

Якщо підставити в цю формулу загальновідомі значення заряду та маси електрона, то отримаємо вираз на довжину хвилі де Бройля:

$$\lambda = \frac{12.25}{\sqrt{V}}. \quad (3)$$

Значення напруги задають у вольтах. З цієї формули бачимо, що за напруги 1 В довжина хвилі дорівнює приблизно  $12 \text{ \AA}$ , що сумірне з розмірами електронного мікротранзистора. Отже, якщо транзистор досягне таких розмірів, то електрон може бути одночасно в декількох місцях і його не можна локалізувати, а тим більше – переключати.

Для подальшого збільшення швидкодії замість електронів необхідно використати інші частинки, які б рухались з більшою, ніж електрон, швидкістю. Такою частинкою є фотон. Справді, наприклад, у кремнії електрон має максимальну швидкість  $10^5 \text{ м/с}$ .

Швидкість фотонів визначають згідно з виразом [3]:

$$u = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}, \quad (4)$$

де  $c = 10^8$  м/с – швидкість світла у вакуумі;  $\epsilon_0$  – діелектрична константа;  $\mu_0$  – магнітна константа.

Отже, заміщення електрона на фотон дасть змогу майже у 1 000 разів підвищити швидкодію пристроїв за тих самих їхніх розмірів. Використання фотонів має низку інших переваг. Наприклад, для них нема омичного опору, що зменшує кількість тепла, яке виділяється під час роботи мікросхем. Частота оптичного випромінювання становить  $10^{12}$ – $10^{16}$  Гц. Це дає змогу одночасно використати до  $10^6$  інформаційних каналів зі спектральною шириною 100 ГГц. Крім того, як зазначено, передавання інформації фотонами відбувається зі швидкістю світла, тоді як швидкість поширення електричного імпульсу всередині мікросхеми визначена часом перезарядження ланцюга й реально становить значення, на два–три порядки менше. Оптична система нечутлива до електромагнітних перешкод. Кілька світлових променів можуть вільно проходити в одній і тій же ділянці простору, перетинатися і через відсутність у фотонів електричного заряду не впливати один на одного. Оптична система практично не випромінює в зовнішнє середовище, забезпечуючи захист інформації від перехоплення. Також використання оптичних сигналів значно розширює можливості обчислювальних систем. Обробка дво- та тривимірного (голограми) зображення дає змогу значно збільшити щільність і швидкість передавання інформації. Застосування двох станів поляризації (горизонтальна і вертикальна або кругова – по лівому або правому колу) дає змогу додатково збільшити вдвічі обсяг переданої інформації. Наша мета – розрахунок поведінки електричного поля у хвилеводах з параболічним профілем показника заломлення.

**Елементи ООМ.** Ідея використання фотонів замість електричного струму в окремих вузлах обчислювальних машин з'явилася одночасно з винаходом лазерів – оптичних квантових генераторів. Уже кілька десятиліть дослідники й конструктори успішно створюють окремі вузли електронно-обчислювальних систем з використанням оптичних технологій. У сучасному комп'ютері можна виділити такі оптичні вузли й елементи: пристрої введення та виведення інформації (сканери, оптичні миші, лазерні принтери, дисплеї), пристрої обміну інформацією (інфрачервоні порти, оптоволокно), пристрої пам'яті (оптичні, магнітооптичні й голографічні диски). Тобто сучасний комп'ютер, по суті, вже давно є електронно-оптичним. “Неоптичні” досі лише головні вузли комп'ютера, які традиційно називають ядром обчислювальної системи, – це процесор і оперативна пам'ять, хоча й тут є не тільки задуми, а й практичні досягнення.

Поняття оптичні обчислювальні машини (ООМ) з'явились у 70-х роках ХХ ст. [4]. Основними елементами ООМ є такі, що виконують перенесення зображення і давно відомі. Це – лінза, дзеркало, оптичний транспарант і шар простору. Сьогодні до них додалися хвильові елементи, а також лазери, напівпровідникові багатоелементні фотоприймачі, нелінійні оптичні середовища, різні дефлектори.

Оптичні обчислювальні машини функціонують в аналоговому та цифровому режимах [5]. Аналогові процесори використовують безперервну модель інформації, адекватну реаліям навколишнього світу. Властивості світла дають змогу будувати оптичні операційні системи, які органічно пристосовані для використання векторних обчислень з великою кількістю аналогових числових даних. Саме можливість паралельного опрацювання великої кількості даних можна вважати основною рисою аналогових ООМ.

Базисна логічна функція елементарних компонентів, за допомогою яких можна побудувати будь-який як завгодно складний цифровий комп'ютер, має безліч оптичних реалізацій.

На рис. 2 показано простий приклад побудови багатовхідних функцій АБО-НЕ/І-НЕ за допомогою лінзи  $L$  і порогового пристрою-інвертора  $N$ . Тут як пороговий елемент можна використовувати оптичний світлоклапанний пристрій та простий фотоелектронний приймач з нелінійною передавальною характеристикою [6].

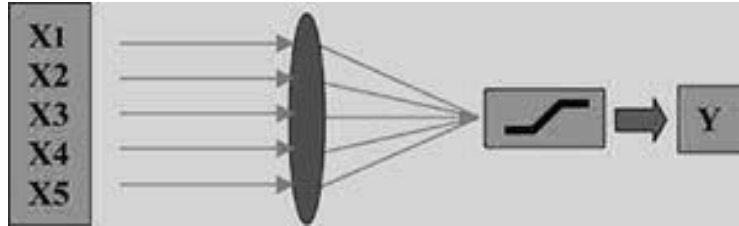


Рис. 2. Блок-схема оптичного пристрою для опрацювання сигналів.

Найбільш поширеним методом опрацювання оптичної інформації є просторова фільтрація, яку детально описано в багатьох наукових працях [7, 8]. Схема оптичної системи, придатної для опрацювання інформації методами просторової фільтрації, показана на рис. 2. Як бачимо, вхідна і вихідна площини оптичної системи збігаються з передньою і задньою фокальною площиною сферичної лінзи. Оптична система опрацювання інформації методами просторової фільтрації складається з таких компонентів: джерела світла  $S$ , двох послідовно розміщених простих систем перетворення Фур'є, пристрою введення інформації, просторового операційного фільтра і детектора вихідних сигналів. Пристрій введення інформації, операційний фільтр і детектор вихідних сигналів розміщені, відповідно, у вхідній  $(x_l, y_l)$ , спектральній Фур'є-площині  $(x_n, y_n)$  і вихідній  $(x_D, y_D)$  площинах системи.

Якщо на вхід такої системи надходить оптичний сигнал  $U_1(x_1, y_1)$ , то на виході з'являється сигнал, пов'язаний з вхідним сигналом таким співвідношенням [5]:

$$U_H(x_H, y_H) = \frac{1}{i\lambda f} \int \int_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1, y_1) \exp \left[ -\frac{2\pi i}{\lambda f} (x_H \cdot x_1 + y_H \cdot y_1) \right] dx_1 dy_1, \quad (5)$$

де  $f$  – фокусна відстань оптичної системи;  $\lambda$  – довжина хвилі оптичного сигналу;  $x_H, y_H$  – координати у вихідній площині системи. Отже, вихідний сигнал розглядуваної найпростішої оптичної системи з точністю до сталого множника збігається з Фур'є-зображенням вхідного сигналу. Зазначимо, що Фур'є-зображення вхідного сигналу існує у вигляді фізично реального просторового розподілу комплексних амплітуд світла. Завдяки цьому когерентні оптичні системи можуть бути ефективно використані для вирішення широкого кола завдань, пов'язаних з отриманням, перетворенням і опрацюванням Фур'є-спектрів, кореляційних функцій і згортки.

Оскільки Фур'є-зображення двовимірних оптичних сигналів реалізують у вигляді реальних фізичних сигналів за допомогою простої оптичної системи, то над ними можна виконувати різноманітні математичні операції методами просторової фільтрації

Реалізація просторової фільтрації у схемі, зображеній на рис. 3 [6], виконана так. Лінза  $L_2$  перетворює Фур'є-сигнал  $U_1(x_1, y_1)$ , створений транспарантом. Тому у спектральній площині системи безпосередньо перед операційним фільтром розподіл комплексних амплітуд світла є пропорційним до Фур'є-зображення вхідного сигналу. Амплітудно-фазовий коефіцієнт пропускання операційного фільтра визначений виразом

$$t_H = C \cdot H(\xi, \eta), \tag{6}$$

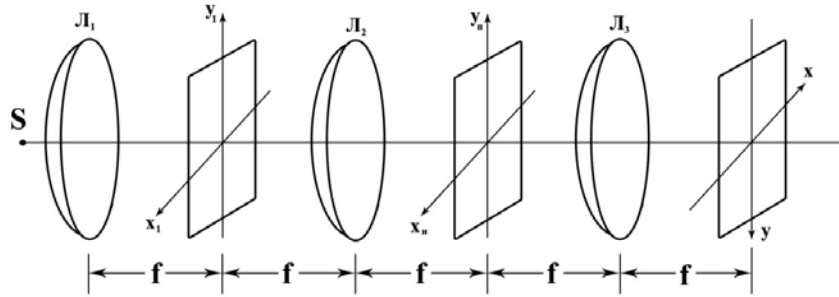


Рис. 3. Схема оптичної системи опрацювання інформації методами просторової фільтрації.

де  $C$  – комплексна константа, а функція  $H(\xi, \eta)$  відповідає математичній операції, яку необхідно виконати над вхідним сигналом. Цю функцію називають передаточною функцією фільтра. Після просторової фільтрації оптичний двовимірний сигнал піддається повторному перетворенню Фур’є за допомогою лінзи  $L_3$ . У підсумку у вихідній площині системи оптичне поле матиме розподіл

$$U_D(x_D, y_D) = -\frac{C_1}{(\lambda f)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_1(\xi, \eta) \cdot H(\xi, \eta) \exp[2\pi(x_D \cdot \xi + y_D \cdot \eta)] d\xi d\eta, \tag{7}$$

де  $C_1$  – комплексна константа. Напрямок координатних осей у вихідній площині системи вибраний так, щоб

$$F\{F[U(x, y)]\} = U(-x, -y) \tag{8}$$

Отже, оптична система, зображена на рис. 3, здатна виконувати лінійні інтегральні перетворення типу згортки, описувані рівнянням (8). В окремому випадку, коли  $H = 1$ , шукана система перетворюється в систему, що створює зображення вхідного сигналу. Оскільки вхідний сигнал оптичної системи є фінітним, то його Фур’є-зображення має нескінченну протяжність. Тому є помилка у вихідному сигналі оптичної системи, зумовлена втратою частини Фур’є-зображення, що відповідає високим просторовим частотам.

На рис. 4 показано приклад оптичного процесора, який реалізує операцію згортки двох зображень [6], що є в основі роботи багатьох пристроїв асоціативної пам’яті і розпізнавання образів. Тут  $S$  – плоске однорідне джерело світла,  $L1$  і  $L2$  – сферичні лінзи,  $D$  – матричний фотоприймач,  $T1$  і  $T2$  – транспаранти, пропускання яких відповідає двом опрацьовуваним зображенням. Розподіл інтенсивності випромінювання на матричному фотоприймачі пропорційний до інтеграла

$$J(x, y) = (T1(x-u, y-v)T2(u, v)dudv). \tag{9}$$

Для збереження оптичної інформації особливо перспективними є голограми [9]. Голограма зберігає інформацію не тільки про інтенсивність, а й про фази світлової хвилі, що в оптиці принципово важливо, а з утилітарного погляду дає змогу підвищити обсяг записуваної інформації. Крім того, різні картини можна записувати в одне і те ж місце, використовуючи весь обсяг носія, а не тонкий шар поверхні (як у випадку звичайної

оптичної або магнітної пам'яті). За оцінками фахівців, об'ємна щільність запису інформації може перевищувати  $10^{11}$  біт/см<sup>3</sup>, а швидкість уведення інформації з голограм – кілька гігабітів за секунду.

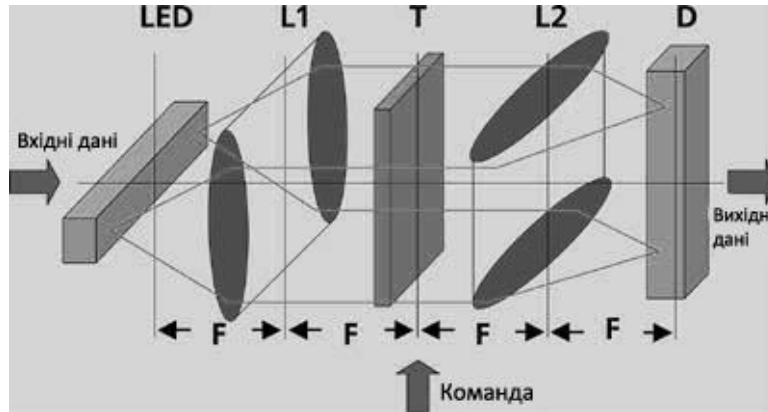


Рис. 4. Оптичний процесор.

Також голограму можна використовувати як принциповий вузол оптичного процесора, оскільки вона одночасно є буферною пам'яттю і обробним елементом. Інформація в таких голограмах записується зміною показника заломлення по всьому об'єму носія. Зазвичай, для цього використовують прозорі матеріали з яскраво вираженими нелінійними оптичними характеристиками, наприклад, кристали ніобату літію.

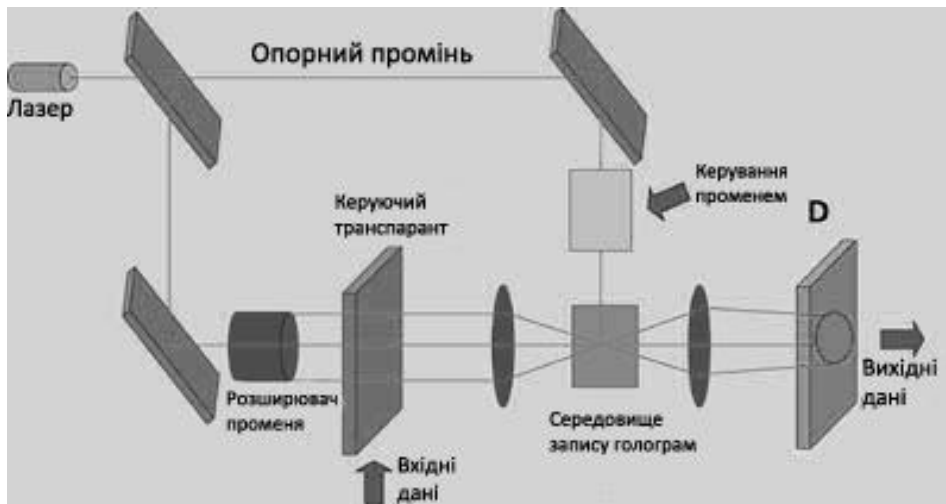


Рис. 5 Пристрій оптичної пам'яті з об'ємним голографічним середовищем.

Оскільки ємність голографічної пам'яті величезна, а час вибірки малий, то кардинально змінюється весь підхід до організації обчислювального процесу. Наприклад, можна повернутися до ідеї широкого використання пошуку по довідниках і таблицях функцій, схем прийняття рішень, таблиць множення. Зрозуміло, алгоритмічний підхід до

опрацювання інформації в оптичному комп'ютері збережеться, проте його основою буде мова вищого рівня організації, орієнтована на паралельне опрацювання складних структур даних.

### Оптичні процесори

**Гібридний процесор Enlight 256.** Принцип оптичного виконання векторних обчислювальних операцій уперше запропонований 1975 р. у Стенфордському університеті (США). Перший комерційний оптичний процесор цифрових сигналів (Optical Digital Signal Processing Engine (ODSPE)) Enlight 256 створений фірмою Lenslet.

Це гібридний оптичний процесор, оскільки він містить перетворювачі оптичного сигналу в електричний. Тобто має оптичне аналогове ядро та традиційний електричний цифровий зовнішній інтерфейс для забезпечення сумісності зі звичайними електронними компонентами. На рис. 6 зображено зовнішній вигляд процесора Enlight 256. Його геометричні розміри –  $6 \times 6$  см, споживана потужність – 40 Вт. У середині “обчислювального ядра” такого процесора є паралельна обчислювальна машина зі спеціалізованою архітектурою, оптимальною для виконання множення матриці на вектор, що є канонічною операцією в обчислювальній математиці, на підставі якої можна організувати обчислення будь-якого рівня складності.



Рис. 6. Зовнішній вигляд процесора Enlight 256.

Оптичне ядро процесора складається з 256 лазерів, просторового модулятора світла, набору лінз і фотоприймачів (детекторів). При цьому лазери забезпечують 256 рівнів інтенсивності променів, що відповідає діапазону однобайтових двійкових чисел. На рис. 7 представлено принцип додавання та множення двійкових чисел оптичним методом.

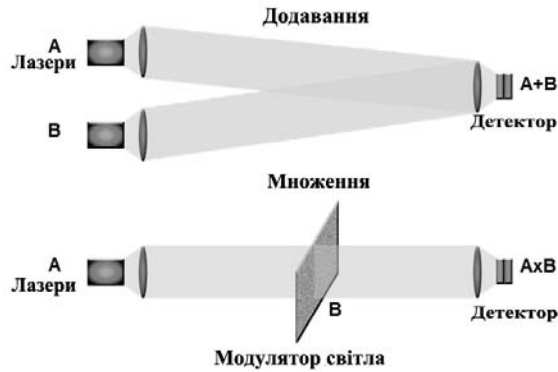


Рис. 7. Принцип додавання та множення двійкових чисел оптичним методом.

Принцип роботи ядра оптичного процесора цифрових сигналів Enlight 256 показаний на рис. 8.

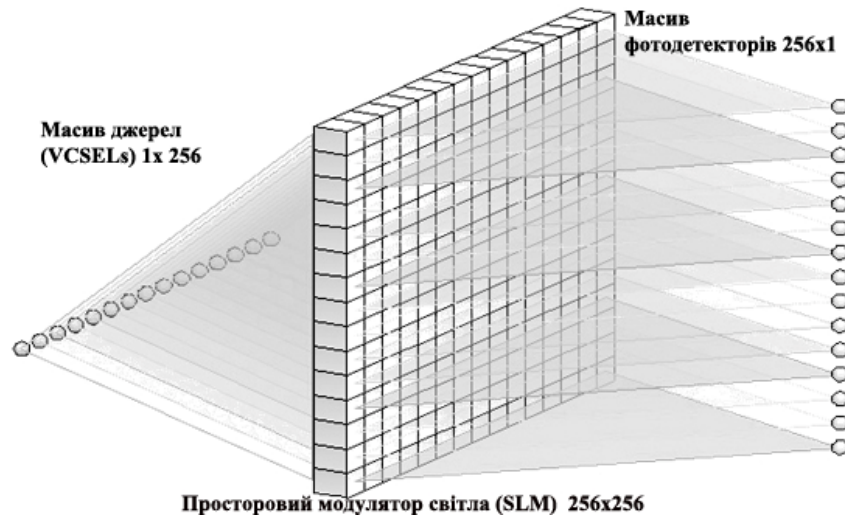


Рис. 8. Принцип роботи ядра VMM процесора Enlight 256.

Як бачимо зі зображеної на рис. 8 схеми, оптична матриця, або VMM (Vector-Matrix Multiplication), конвертує електричну інформацію у світло. Світло, що з'являється на виході, скеровується на масив фотодетекторів і перетворюється знову в електричний сигнал.

Ядро процесора Enlight 256 складається з трьох основних елементів. Це, передусім, 256 некогерентних лазерів, що утворюють вектор, кожен з елементів якого має розрядність 8 біт. Світло від джерел скеровується на просторовий модулятор світла (Spatial Light Modulator, SLM), що складається  $256 \times 256$  – модулаторів. Детектори встановлені так, щоби на них потрапляли промені від матриці модулятора. У цьому разі вихід стовпця – це сумарний вектор отриманий згідно формули 10.



Процесор за один такт цикл виконує множення 256-байтового вектора на матрицю розміром  $256 \times 256$ , тобто 64 операцій множення, згідно з виразом

$$\begin{bmatrix} a_{0,0} & \dots & a_{0,255} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{255,0} & \dots & a_{255,255} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ \cdot \\ x_{255} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_0 \\ \cdot \\ y_{255} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Стільки ж виконується у одному такті операцій додавання? Тобто фактично процесор Enlight 256 спроможний виконувати у одному тактовому циклі 64 К цілочислових операцій типу MAC (множення і додавання). З урахуванням того, що тактова частота процесора дорівнює 125 МГц, швидкістю процесора можна визначити як  $16 \times 10^{12}$  операцій за секунду. Тобто процесор здатний виконувати 16 тераоперацій типу множення чи додавання за секунду. Це еквівалентно 8 тисячам операцій типу MAC за секунду.

### Цифрові оптичні процесори

В основі роботи створених сьогодні компонентів цифрових ООМ (трансфазатори, оптичні транзистори, тригери, комірки пам'яті та носії інформації) є явище оптичної бістабільності [10]. Це явище – один з проявів взаємодії світла з речовиною в нелінійних системах зі зворотним зв'язком. Двом поляризаціям світла, що падає на речовину, відповідають два можливі стаціонарні стани світлової хвилі, що пройшла через неї. Така операція є аналогом 0 і 1 у напівпровідникових системах.

Першу цифрову ООМ продемонстрував 1984 р. Б. Дженкінс з університету Південної Кароліни [5]. У 1990 р. в лабораторії фірми "Bell" створено діючий макет цифрової ООМ [5]. За його допомогою доведено можливість виконання цифрових і логічних операцій з високою швидкістю за низького споживання енергії.

Представником другого покоління цифрових ООМ був комп'ютер DOC-11 (Digital optical computer), розроблений у науково-дослідній фірмі Opticom Corporation (США). Він зображений на рис. 9. У ньому використано принцип векторно-матричного множення, однак вектор і матриця є булевими логічними.

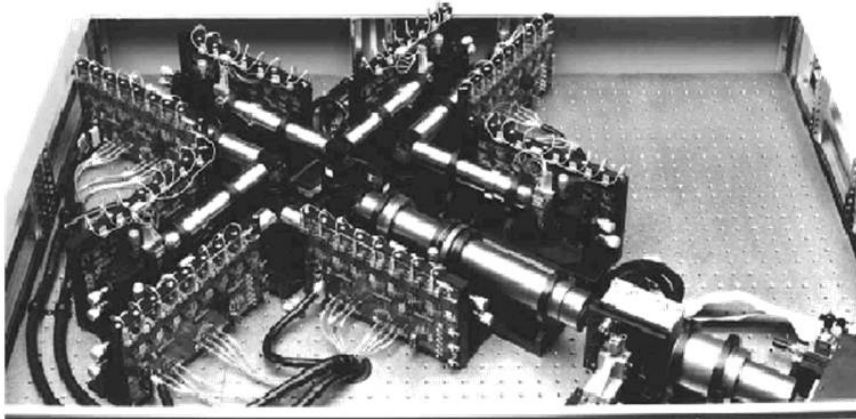


Рис. 9. Оптичний комп'ютер DOC-1

### Інтегрально-оптичні елементи

Важливим є питання інтеграції мініатюризації оптичних елементів [11]. Щодо цього багато зроблено, зокрема, з використанням інтегральної оптики. Проведено досить успішну роботу з дослідження і розробки компонентів інтегральної оптики. Тому можна очікувати, що найближчим часом буде сконструйовано і зможе задовільно працювати (в експериментальному вигляді) перша оптична установка, у якій використають інтегрально оптичні схеми. Оскільки основні зусилля спрямовані на реалізацію оптичних систем зв'язку, то найімовірніше, що таким пристроєм є єдина приймально-передавальна лінія зв'язку з використанням оптичних волокон довжиною декілька сотень метрів. Принципова схема таких систем запропонована в нижці праць. Один з останніх варіантів показаний на рис. 10 [11]. Як бачимо з рис. 10, оптичний передавач складається з "чіпа" на GaAs, на якому нарощені й отримані методом осадження відповідні пасивні та активні елементи. Оскільки кристал GaAs у поєднанні з деякими іншими сполуками здатний виконувати всі необхідні в інтегральній оптиці функції, тобто хвилевода, модулятора, приймача випромінювання і лазера, то можливо, що він відіграє ту ж роль, що й кремній в електронних інтегральних схемах. У підсумку багато хто вважає, що GaAs є основним матеріалом для інтегральної оптики.

Оскільки вже розроблені оптичні волокна, параметри яких перевищують параметри звичайних провідників, що працюють на низьких частотах, і хвилеводів у НВЧ-діапазонах та міліметровому діапазоні, то очікують, що вдасться побудувати світловодні лінії зв'язку між передавачами, ретрансляторами і приймачами, які утворюють комплексну систему зв'язку. Сьогодні такі системи вивчають з погляду їх використання в міському і міжміському телефонному зв'язку, а також у телеметрії для внутрішнього зв'язку й операційного контролю на борту великих літаків і кораблів. З цієї причини передавач, зображений на рис. 10, з'єднаний з кабелем, що складається з волокон. Звичайно, у цьому випадку інтегрально-оптичний приймач і релейна станція повинні мати такий самий вигляд, як і чіп передавача, зображеного на рис. 10 [3].

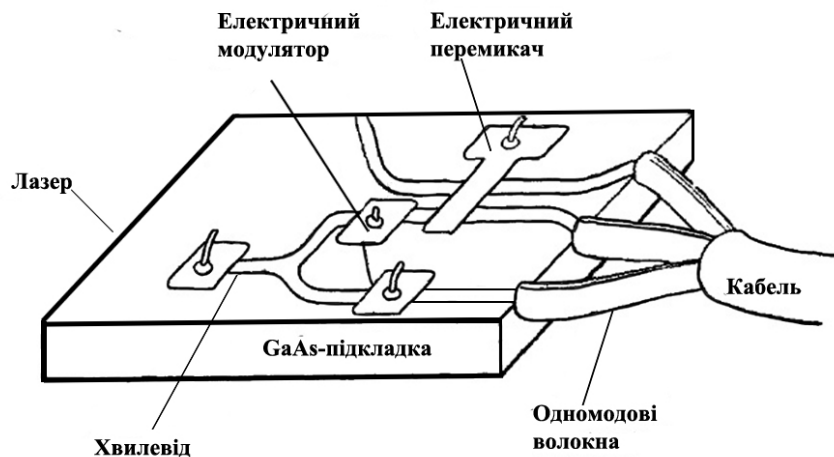


Рис. 10. Інтеграція елементів на одному чіпі.

**Оптичні хвилеводи**

Зазначимо, що, незважаючи на досягнуті успіхи, причина, через яку ще не реалізовано промислову інтегрально-оптичну схему, зумовлена різними чинниками. Передусім це стосується виготовлення планарних хвилеводів [11]. На рис. 11 показаний вигляд збоку на плоский хвилевід і типову систему координат.

Нехай хвилевід накладає обмеження на поширення світла вздовж осі  $x$  і світло поширюється в напрямі осі  $z$ . Крім того, як саму структуру, так і світловий промінь уявляють однорідними у напрямі осі  $y$ . За цих умов фізичний опис хвильового поширення світла полягає в тому, що світло йде по плівці зигзагоподібним шляхом.

Основною вимогою для отримання хвилевода є наявність тонкого шару доброї оптичної якості на підкладці з іншим складом матеріалу. Такі тонкі шари легко зробити з аморфних матеріалів і в цьому разі можливі різноманітні зміни як за складом, так і за показником заломлення. Як приклад, на рис. 12 показано хвилевідні структури на основі GaAs–GaAlAs[11]. У потрійній системі  $Ga_{1-x}Al_xAs$  можна змінювати концентрацію AlAs, отримуючи зміну показника заломлення. Як засвідчують експериментальні вимірювання, на довжині хвилі 1,5 мкм залежність зміни показника заломлення від концентрації алюмінію має вигляд [11]

$$n = -0,4x. \tag{11}$$



Рис. 11. Вигляд збоку на плоский хвилевід і напрямі нормалей до хвилевідних поверхонь зигзагоподібних хвиль, що відповідають хвилевідній моді.

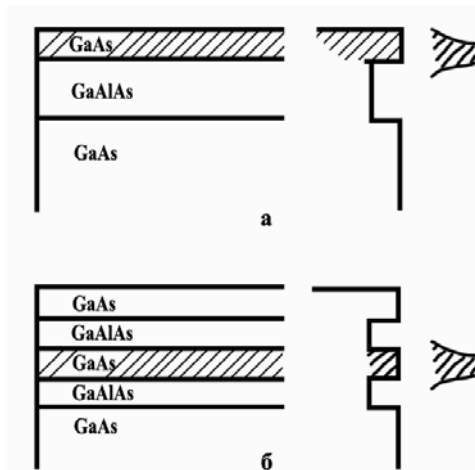


Рис. 12. Хвилевідні структури на основі GaAs-GaAlAs.

Заштрихований шар GaAs – це хвилевід у структурі, що межує з повітрям (а) і у подвійній структурі (б) [11].

З урахуванням формули (12) на підкладках GaAs зміню параметра  $x$  можна створити хвилеводи з бажаними властивостями. Для діелектричного хвилевода необхідний шар зі збільшеним показником заломлення, а включення AlAs зменшує його.

### Джерела світла

Важливим кроком у формуванні інтегрально-оптичних схем є створення джерела світла, мініатюрного, вигідного, дешевого, надійного і сумісного з планарними оптичними схемами [11]. Як приклад, на рис. 13 зображено гетероструктурний лазер з розподіленим зворотним зв'язком.

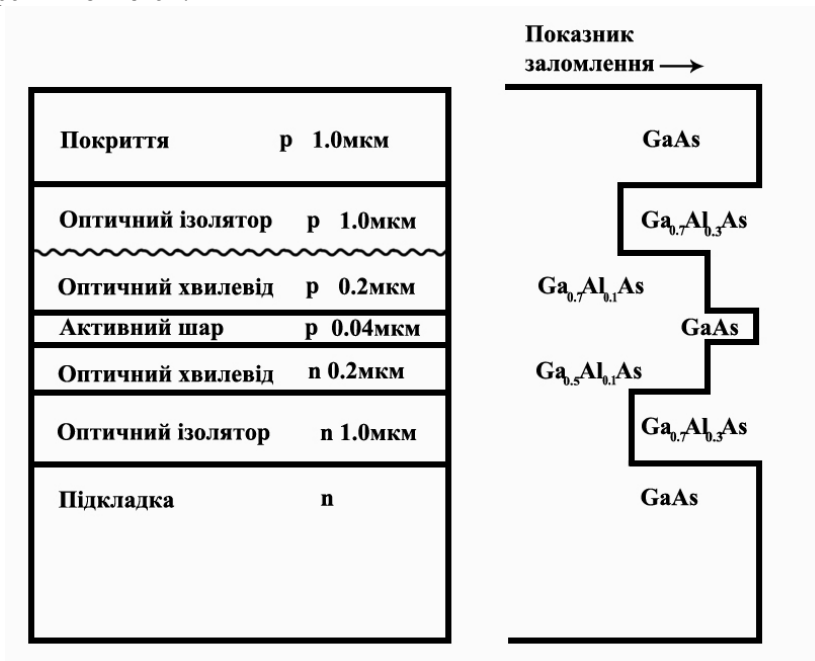


Рис. 13. Гетероструктурний лазер з розподіленим зворотним зв'язком і локалізованою активною ділянкою. Праворуч показано відповідний профіль показника заломлення. Гофрування розміщене на хвилевідному оптичному шарі й відділене від електричного активного шару. Цей пристрій – це п'ятишаровий лазер з локалізованою зоною підсилення, у якого носії зосереджені у меншій області, ніж світло.

### Приймачі випромінювання.

У детекторах для монолітних інтегрально-оптичних схем використовують властивості фотопровідності напівпровідникових переходів [11]. Для фотодетектора потрібно, щоби падаюче світло поглиналось і вивільнялись вільні носії струму. Прикладене поле забиратиме заряди, породжуючи фотострум у зовнішньому колі. Напівпровідники чутливі до світла з енергією кванта, більшою, ніж енергетична ширина забороненої зони, якщо вони не леговані, або до світла з енергією кванта, більшою, ніж енергія рівнів домішко-

вих атомів, дефектів або пасток. Заборонену зону можна змістити дифузією легувальних речовин або домішок, іонним бомбардуванням або прикладанням електричного поля (ефект Франца–Келдиша). Детектори для інтегральної оптики можна виготовити, якщо одним із зазначених способів створити локальну область напівпровідникового чіпа, яка була б fotocутливою. Як приклад, на рис. 14 показані етапи виготовлення методом епітаксійного росту  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  інтегрально-оптичного детектора після витравлювання отвору через маску і його зарощування матеріалом  $\text{InGaAs}$ .

Такий інтегрально-оптичний фотодетектор, зображений на рис. 14, виготовляли так. Високорезистивний шар  $\text{GaAs}$  товщиною 5 мкм вирощений епітаксією з газової фази на низькорезистивній підкладці. Він працював як оптичний хвилевід.

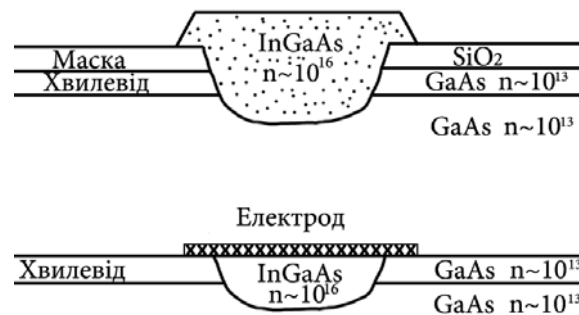


Рис. 14. Виготовлення методом епітаксійного росту  $\text{InGaAs}$  інтегрально-оптичного детектора після витравлювання отвору через маску і його зарощування матеріалом  $\text{InGaAs}$ .

Окис кремнію, нанесений піролітичним методом, використовували як маску, у якій фотолітографічно зроблено отвори діаметром 125 мкм. В області отвору для детектора  $\text{GaAs}$  видалено хімічним травленням з метою подальшого нарощування  $\text{InGaAs}$ . Окис кремнію слугував маскою, що перешкоджала росту, так що епітаксійний ріст  $\text{InGaAs}$  відбувався тільки в тих ділянках, де у хвилеводі зроблені отвори. На рис. 14 власне схематично показаний наслідок такого вирощування. Кінцеве полірування вирівнює зону росту з поверхнею хвилевода після зняття маски. Для створення бар'єра Шотткі напаяли платинові електроди діаметром 0,125 мм, які формували завершений детектор.

#### Управління оптичними променями

Важливим для створення оптичних комп'ютерів є оптичні модулятори та перемикачі, які часто називають оптичними транзисторами [11]. У загальних рисах ці пристрої можна уявити як такі, що слугують для введення інформації у світлову хвилю часовою модуляцією одного з вимірюваних параметрів хвилі (модулятори). Обсяг інформації в цьому разі пропорційний до ширини смуги модуляції. Перемикачі – це пристрої, які змінюють просторове положення світлової хвилі відповідно до сигналу перемикачання. У разі створення інтегрально-оптичних модуляторів використовують низку фізичних ефектів. Це фазова та поляризаційна модуляція, частотна модуляція, електрооптичні, акустооптичні та магнітооптичні ефекти. З погляду створення оптичних транзисторів перспективним є формування паралельних каналних хвилеводів та зміна зв'язку між ними з використанням електрооптичного ефекту. Зокрема, розглянуто подібний пристрій і наведено розширений аналіз, який дає змогу обчислювати для багатьох випадків коефіцієнт

зв'язку смушкових хвильоводів. Зокрема, такий пристрій перспективний у разі створення зв'язаних хвильоводів на GaAlAs [11].

Два одномодові смушкові хвильоводи з електрооптичних матеріалів нанесені на спільну підкладку. Обидва хвильоводи паралельні один до одного і розділені невеликим проміжком (порядку мікрметрів). Нехай довжина ділянки, де вони розділені, дорівнює  $l$ . Поза областю взаємодії відстань між хвильоводами значно більша. Електроди розміщені так, як показано на рис. 15. Якщо напруга, прикладена до зовнішніх електродів щодо внутрішніх так, що на внутрішньому електроді  $-V$ , а на зовнішніх  $+V$ , то крайове електричне поле у хвильоводі 1 має знак, протилежний до знака поля у хвильоводі 2. Якщо хвильоводи 1 і 2 однакові й виконується умова фазового узгодження, то потік світла з хвильовода 1 перекачуватиметься у хвильовід 2 за умови, що проміжок між ними достатньо малий і загасальні поля обох хвильоводів перекриваються. Якщо довжина  $l$  дуже велика і все світло спочатку перебуває у хвильоводі 1, то через певну відстань весь світловий потік перейде у хвильовід 2, а потім після проходження такої ж відстані світло перейде назад у перший хвильовід і так далі, то відстань, на якій світло з хвильовода 1 повністю перейде у хвильовід 2 за умови фазового узгодження, називають критичною довжиною зв'язку і визначають виразом [11]

$$L = \pi/2x, \quad (12)$$

де  $x$  – константа зв'язку, яка передусім, залежить від відстані між хвильоводами.

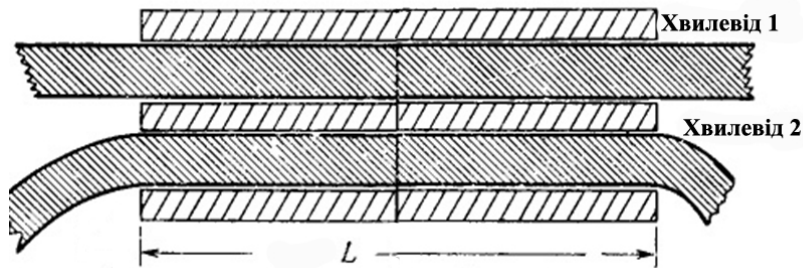


Рис. 15. Схема електрооптичного модулятора зі зв'язаними смушковими хвильоводами. Штрихами позначено електроди.

Іншим пристроєм, який використовують для модуляції світла, є мікроколовий резонатор, зображений на рис. 16.

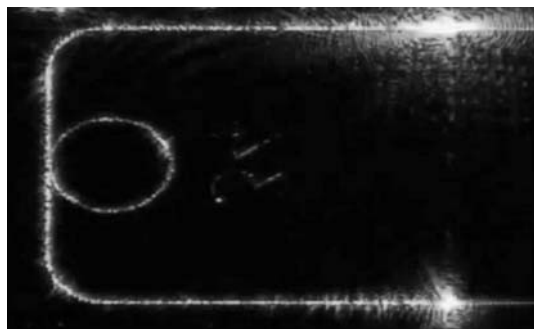


Рис. 16. Мікроколовий резонатор.

Це кремнієвий мікроколовий резонатор. Коли світло проходить через такий круг, круг поглинає світло. Якщо прикласти невелику напругу то поглинання унеможливлене. Це працює як модулятор, що вмикає і вимикає світло. Проблема полягає в тому, що розмір круга – близько 3 мкм. Тому вираш у швидкості компенсований програшем у розмірах.

### Інтеграція елементів

Важливим методом є об'єднання (інтеграція) зазначених елементів на одній підкладці. Сьогодні методи монокристалічної інтеграції в активних матеріалах, які проводять світло, інтенсивно вивчають [11]. У випадку GaAs, щоб мати лазер і непоглинальний хвилевід на одному чіпі, необхідно мати або послідовні хвилевідні шари з різною концентрацією алюмінію (і тоді необхідно переводити світло з одного шару в інший), або різні області у хвилевідному шарі з різними концентраціями алюмінію. Один з таких варіантів показаний на рис. 17.

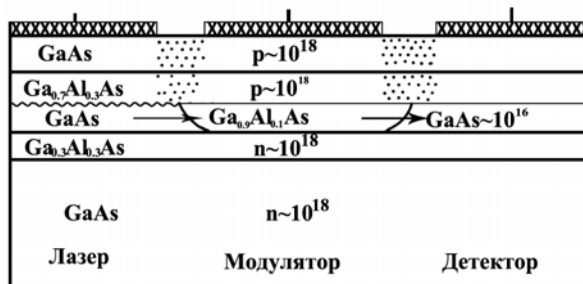


Рис. 17. Можлива монокристалічна інтегрально-оптична схема, яка складається з лазера з розподіленим зворотним зв'язком, модулятора і детектора.

На рис. 17 стрілками показано шлях світла. Заштриховані ділянки означають електроди. У цій схемі світло поширюється в одній і тій же площині, оскільки повторне нарощування кристала дає змогу змінити вміст AlAs до необхідного. Зони, покриті точками, – це опромінені протонами частки, які працюють як електричні ізолятори. Для створення такої схеми спочатку вирощують ізолювальний шар і шар GaAs після цього. Потім зразок виймають з ростової установки і на нього піролітичним методом наносять маску SiO<sub>2</sub> та методом селективного травлення з хвилевідної області видаляють GaAs. Далі зразок знову поміщають у ростову установку. У цьому разі маску SiO<sub>2</sub> зберігають для того, щоб попередити ріст кристалів у ділянці GaAs. У витравленій ділянці на ізолювальному шарі з високою концентрацією алюмінію вирощують хвилевідний шар з невеликою концентрацією алюмінію. Зразок знову виймають з ростової установки, маску SiO<sub>2</sub> знімають і поверхню зразка полірують для зняття наростів GaAlAs. У ділянці лазера наносять гофрований шар. І вкінці зразок знову поміщають у ростову установку й над ним вирощують ще два шари: оптичний ізолювальний і контактний. Після нанесення контактів через маски за допомогою іонної імплантації проводять електричну ізоляцію різних ділянок: лазера, модулятора і детектора.

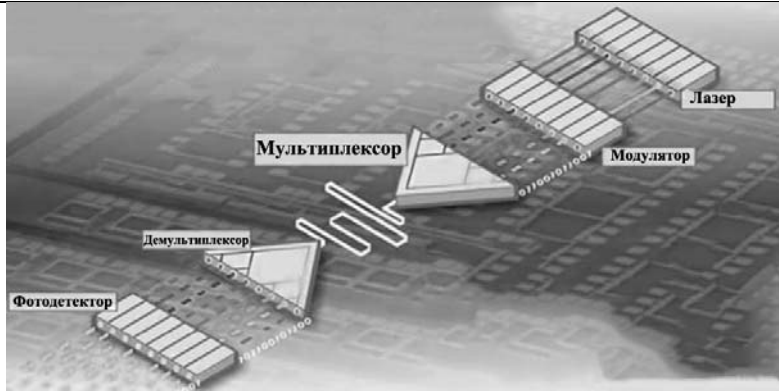


Рис. 18. Схема комбінованого оптичного процесора.

Один з варіантів створення інтегрально-оптичної схеми для обчислень показано на рис. 18. Він складається з трьох основних частин. Це мультиплексор, електронна обчислювальна частина і демультіплексор. У першій частині лазерне випромінювання потрапляє на модулятор, який переводить електричний сигнал в оптичний. Далі промодульоване світло зводиться в один пучок, де відбувається його обробка за допомогою електронної схеми. Після цього цей пучок розкладається на окремі промені і потрапляє на фотодетектори. Запропонована схема має той недолік, що основна обробка сигналу відбувається за допомогою електронних схем, унаслідок чого втрачаються основні переваги оптичної системи.

### Проблема оптичних транзисторів

Однією з найбільш перспективних галузей оптики, яка дасть змогу створити оптичні транзистори з необхідними властивостями, є нанофотоніка, або інтегральна фотоніка [12]. Головне завдання цієї науки – створення світлових фотонних чіпів, пристроїв з розмірами в декілька мікрометрів, які були б аналогами електронних мікрочіпів. Найбільш відомим і важливим об'єктом нанофотоніки вважають квантові крапки (КК), що є напівпровідниковими кристалами нанометрового розміру. Під терміном КК розуміють два типи об'єктів, об'єднаних спільним для них ефектом розмірного квантування електронного енергетичного спектра, тобто квантування, що виникає саме завдяки нанометровим розмірам напівпровідникових кристалів. КК – це більш-менш сферичний кристал напівпровідника (ядро), розмір якого – від 2 до 10 нм, іноді 20–40 нм. Оболонка ядра, зазвичай, складається з двох–трьох моношарів і може бути сформована напівпровідником з достатньо великою шириною забороненої зони, набагато більшою, ніж у ядра наночастинки, або діелектриком.

З фізичного погляду КК є потенціальною ямою для слабкозв'язаної електронно-діркової пари або екситона, замкнених у нанокристалі. Оскільки електронно-діркові пари у КК замкнені в об'ємі, розміри якого менші від відповідного радіуса бору, то КК описують дискретним енергетичним спектром випромінювання і поглинання. Енергетичний спектр КК та відстань між рівнями залежать від розміру квантової точки як [5]

$$\hbar^2/2md^2, \quad (13)$$



де  $\hbar$  – зведена стала Планка;  $d$  – характерний розмір точки;  $m$  – ефективна маса електрона в точці. Унаслідок цього електронні й оптичні властивості квантових точок займають проміжне положення між об'ємним напівпровідником і дискретною молекулою.

У нанорозмірних металевих системах відбувається модифікація колективних електронних збуджень (рис. 19). Тут металева наночастинка відіграє роль антени. Вона резонує з частотою світла. У цьому разі світло обмежене в просторі й на нього не впливає явище дифракції. Колективне електронне збудження металевих наночастинок, розмір яких менший від довжини хвилі електромагнітного випромінювання в навколишньому середовищі, – локалізований поверхневий плазмон – коливається на частоті, меншій від частоти об'ємного плазмона у 3 рази, тоді як частота поверхневого плазмона приблизно у 2 рази менша, ніж частота об'ємного плазмона. У разі збігу частоти зовнішнього поля з частотою локалізованих поверхневих плазмонів виникає резонанс, що приводить до різкого підсилення поля на поверхні наночастинок і збільшення перерізу поглинання (див. рис. 19). Властивості локалізованих плазмонів критично залежать від форми наночастинок, що дає змогу налаштовувати систему. У цьому разі з наночастинок можна створити ланцюг, у якому переміщатиметься фотон. Отже, у ланцюзі наночастинок можна здійснювати комунікацію переміщенням фотона від однієї частинки до іншої. Наголосимо, що тут маємо переміщення не електронів, а фотонів.



Рис. 19. Поверхнєве плазмонне збудження.



Рис. 20. Поширення світла в наночастинках.

Для створення оптичних транзисторів перспективним є використання ефектів наведеного поглинання в наночастинках. Такий ефект, зокрема, виявлений у наночастках сульфїду міді, розміри яких становили 2 нм. Схема спостережуваного ефекту зображена на рис. 21. Якщо прикладанням незначного електричного поля в наночастинку внести три–чотири електрони то вона поводитиметься як метал і різко зросте поглинання (див. рис. 21, *a*). У цьому разі світло через частинку не проходить. Якщо ж прикласти напругу в протилежному напрямі, то електрони зникають з активної зони і поглинання зникає. Отже, маємо основу для створення мініатюрного оптичного транзистора.

Схему такого транзистора зображено на рис. 22.

Як бачимо з рис. 22, він складається з підкладки (чіпа), на який нанесена наноструктурована плівка. Це можуть бути наночастинки з розмірами 2 мкм. Світлове випромінювання, яке падає зліва на таку структуру, поглинатиметься або відбиватиметься залежно від того, у якому стані перебуває наноструктура. Наступний крок – це легування зарядом. І тут виявляється чудова річ у наноауці. Якщо частинки мають розміри 1–2 нм, то досить внести три–чотири електрони всередину і вони поводитимуться як метал. Густина буде така сама, як і в разі великих розмірів. Тобто досить внести три–чотири електрони для того, щоб перетворити напівпровідник у металеву антену.

Отже, заміщення електрона на фотон дасть змогу майже у 1 000 разів підвищити швидкодїю пристроїв за таких самих їхніх розмірів. Використання фотонів має низку інших переваг.

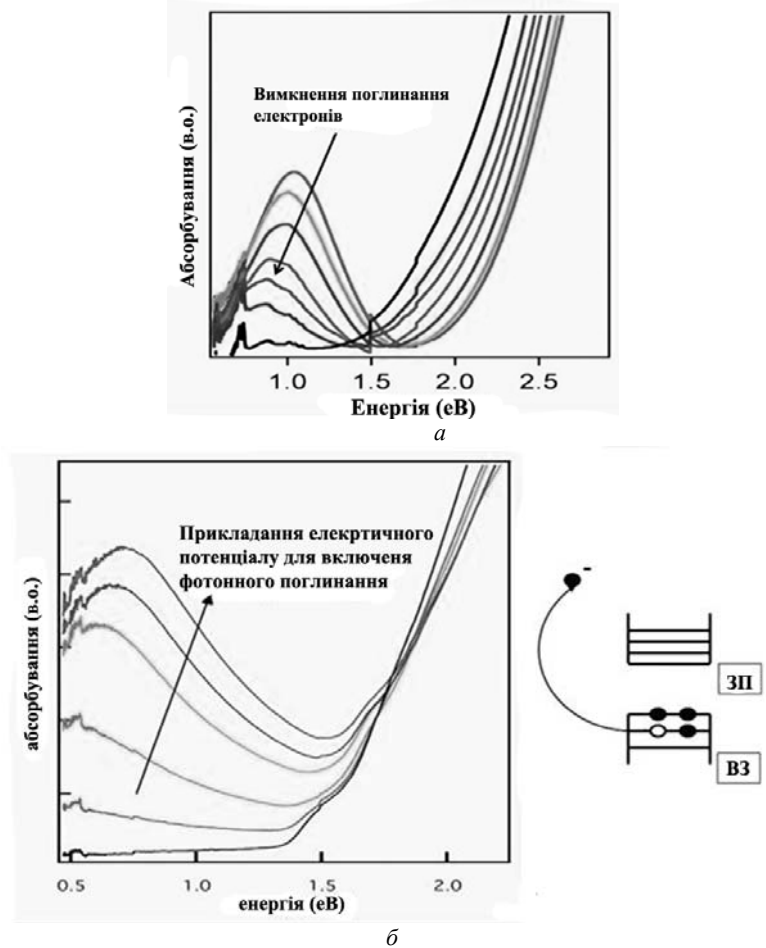


Рис. 21. Схематичне пояснення включення (а) та виключення (б) поглинання в наночастинках.

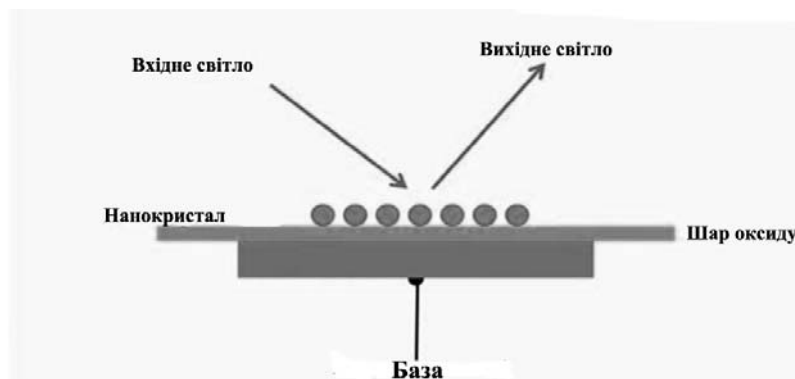


Рис. 22. Оптичний транзистор на наноструктурах.

Оптичні обчислювальні машини функціонують в аналоговому та цифровому режимах. Аналогові процесори використовують безперервну модель інформації, адекватну реаліям навколишнього світу. Властивості світла дають змогу будувати оптичні операційні системи, які органічно пристосовані для використання векторних обчислень з великою кількістю аналогових числових даних. Саме можливість паралельного опрацювання великої кількості даних можна вважати основною рисою аналогових ООМ.

В основі роботи створених сьогодні компонентів цифрових ООМ (трансфазатори, оптичні транзистори, тригери, комірки пам'яті та носії інформації) – оптичні явища, які є аналогом 0 і 1 у напівпровідникових системах.

Важливим залишається питання інтеграції мініатюризації оптичних елементів. Перспективне використання досягнень інтегральної оптики. Сьогодні проведено значну роботу з дослідження і розробки компонентів інтегральної оптики.

Для створення оптичних транзисторів перспективне використання ефектів наведеного поглинання в наночастинках. Такий ефект, зокрема, виявлений у наночастках сульфіді міді, розміри яких становили 2 нм.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон Мура, природа науки [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://elementy.ru/trefil/21172>
2. Половинко І. І. Атомна і ядерна фізика / І. І. Половинко. – Львів : ЛНУ ім. Франка, 2010. – 535 с.
3. Ландсберг Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – К. : Рад. школа, 1964. – 731 с.
4. Акаев А. А. Когерентные оптические вычислительные машины / А. А. Акаев, С. А. Майоров. – Л. : Машиностроение, 1977. – 437 с.
5. Белов П. А. Оптические процессоры: достижения и новые идеи / П. А. Белов, В. Г. Беспалов, В. Н. Васильев и др. // В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики. – СПб, 2006. – С. 6 – 36.
6. Светит ли нам оптический компьютер? [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://old.computerra.ru/offline/2000/332/2877/>
7. Левшин В. Л. Пространственная фильтрация в оптических системах / В. Л. Левшин. – М. : Сов. радио, 1971. – 200 с.
8. Ловенталь С. Пространственная фильтрация и голография / С. Ловенталь. – М. : Энергия, 1970. – 72 с.
9. Милер М. Голография / М. Милер. – Л. : Машиностроение, 1979. – 196 с.
10. Оптична бістабільність [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://www.femto.com.ua/articles/part\\_2/2611.html](http://www.femto.com.ua/articles/part_2/2611.html)
11. Тамир Т. Интегральная оптика / Т. Тамир. – М. : Мир, 1978. – 343 с.
12. Гапоненко С. В. Оптика наноструктур / С. В. Гапоненко, Н. Н. Розанов, Е. Л. Ивченко и др. – СПб. : Недра, 2005. – 326 с.

Стаття: надійшла до редакції 16.04.2014,  
доопрацьована 20.04.2014,  
прийнята до друку 30.04.2014.

## THE PHYSICS OF OPTICAL COMPUTERS

**I. Polovynko, T. Kril**

*Ivan Franko National University of Lviv,  
107, Tarnavsky St., UA-79017 Lviv, Ukraine  
[takirelli@gmail.com](mailto:takirelli@gmail.com)*

This paper describes the foundations of optical computer physics (OC). To further increase the performance of OC we should be using photon instead of electron. This theoretically would allow to increase the speed almost  $10^3$  times and keep the same size of devices. We analyzed the existing information processing systems and the possibility of creating integral-optical elements OC. It is noted that the priority at present time is creating miniature optical processors, which are based on optical transistors (OT). We describe some current (circular resonators) and future (nanoparticles) OT.

*Key words:* optical computer, optical processor, nanoparticles.

## ФИЗИКА ОПТИЧЕСКИХ КОМПЬЮТЕРОВ

**И. Половинко, Т. Криль**

*Львовский национальный университет имени Ивана Франко,  
ул. Ген. Тарнавского 107, 79017, Львов, Украина,  
[takirelli@gmail.com](mailto:takirelli@gmail.com)*

Описано основы физики оптических вычислительных машин. Показано, что для дальнейшего увеличения быстродействия оптических вычислительных машин необходимо использовать вместо электронов фотоны. Это теоретически позволит почти в  $10^3$  раз повысить быстродействие устройств при таких же размерах. Проанализировано существующие в настоящее время системы обработки информации и возможности создания интегрально-оптических элементов оптических вычислительных машин. Отмечено, что первоочередной задачей в настоящее время является создание миниатюрных оптических процессоров, основой которых являются оптические транзисторы (ОТ). Описано некоторые существующие (круговые резонаторы) и перспективные (наночастицы) оптические транзисторы.

*Ключевые слова:* оптический компьютер, оптический процессор, наночастицы.