

ФОТОННІ ОБЧИСЛЕННЯ: ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ ТА АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ОПТИЧНИХ ПРОЦЕСОРІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація:

Фотонні обчислення є перспективним напрямом розвитку високопродуктивних обчислювальних систем, у яких носіями інформації виступають фотони. У роботі розглянуто фізичні принципи функціонування фотонних процесорів, зокрема хвильове мультиплексування, інтерференцію в інтерферометрах Маха–Цендера та реалізацію матричних перетворень у фотонних інтегральних схемах. Проаналізовано проблему реалізації нелінійності в оптичних нейронних мережах та сучасні підходи до створення енергонезалежної фотонної пам'яті на основі матеріалів із фазовим переходом. Наведено приклади сучасних фотонних нейромережових архітектур і перспективи застосування фотонних обчислень у задачах машинного зору та високошвидкісної обробки сигналів.

Ключові слова: фотонні обчислення, кремнієва фотоніка, інтерферометр Маха–Цендера, фотонні нейронні мережі, оптичний процесор, хвильове мультиплексування.

Abstract:

Photonic computing is a promising direction in the development of high-performance computing systems in which photons are used as information carriers. The paper considers the physical principles of photonic processors, including wavelength division multiplexing, interference in Mach–Zehnder interferometers, and implementation of matrix transformations in photonic integrated circuits. The problem of nonlinearity realization in optical neural networks and modern approaches to non-volatile photonic memory based on phase-change materials are analyzed. Examples of modern photonic neural architectures and prospects for applying photonic computing in machine vision and high-speed signal processing are presented.

Keywords: photonic computing, silicon photonics, Mach–Zehnder interferometer, photonic neural networks, optical processor, wavelength division multiplexing.

Вступ

Подальше зменшення розмірів електронних елементів обмежується RC-затримками та тепловими втратами. Під час проходження електричного струму металевими провідниками виділяється теплова потужність $P = I^2 R$, що вимагає складних систем охолодження і встановлює жорстку межу на тактову частоту процесорів (декілька ГГц). У фотонних обчислювальних системах носіями інформації є фотони — кванти електромагнітного випромінювання. Оскільки фотони не мають електричного заряду, їх розповсюдження у хвилеводах не супроводжується омічними втратами, а швидкість передачі даних обмежується лише швидкістю світла у середовищі ($v = c/n$).

Фізичні засади та хвильове мультиплексування

Енергія окремого фотона визначається співвідношенням:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

де h — стала Планка, ν — частота, c — швидкість світла, λ — довжина хвилі.

Завдяки бозонній природі, фотони не взаємодіють між собою у лінійних середовищах. Завдяки цьому в одному хвилеводі можна передавати декілька сигналів із різними довжинами хвиль

(Wavelength Division Multiplexing, WDM): в одному оптичному каналі можуть одночасно поширюватися десятки незалежних інформаційних потоків на різних довжинах хвиль λ . Це забезпечує масовий паралелізм без фізичного збільшення кількості з'єднань [1]. Таким чином, фотонний процесор фактично використовує властивості самого середовища як обчислювальний ресурс.

Обчислення матриць за допомогою інтерференції

Основою сучасних нейронних мереж є операції множення матриць та векторів. В електронних системах такі операції потребують значної кількості послідовних операцій множення та додавання. В оптиці ці операції виконуються пасивно та з дуже малою затримкою, визначеною часом проходження сигналу через хвилеводи завдяки законам поширення електромагнітних хвиль.

Базовим фізичним елементом оптичного процесора є інтерферометр Маха-Цендера (ІМЦ). Вхідний світловий пучок розділяється на два плеча, в одному з яких фаза хвилі змінюється (наприклад, за рахунок термоелектричного ефекту, який змінює показник заломлення n).

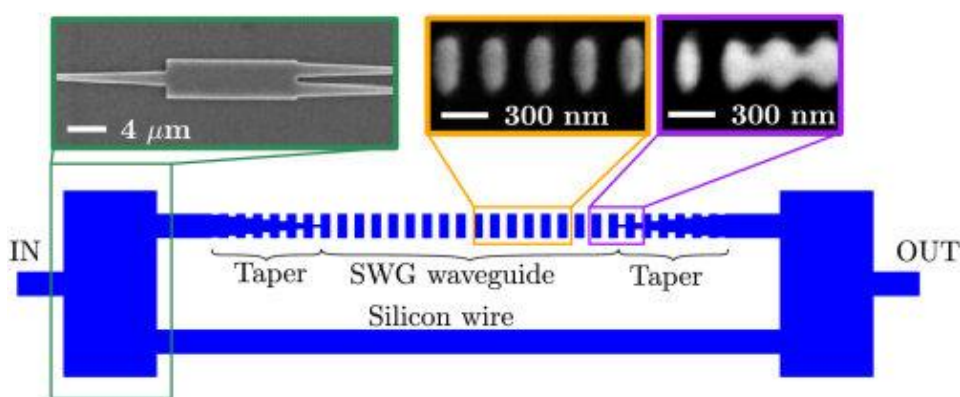


Рисунок 1 – Принципова схема інтегрального інтерферометра Маха-Цендера та зсув фаз оптичного сигналу.

Інтенсивність світла на виході ІМЦ описується формулою багатопроменевої інтерференції для симетричного інтерферометра:

$$I_{out} = I_{in} \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (2)$$

Різниця фаз $\Delta\phi$ прямо залежить від зміненого показника заломлення Δn та довжини активної області L :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L \quad (3)$$

Комбінуючи масиви ІМЦ (каскадні сітки), можна апаратно реалізувати довільні унітарні матричні перетворення. Оптичний сигнал, проходячи крізь таку матрицю хвилеводів, виконує аналогове множення вектора вхідних інтенсивностей на матрицю ваг налаштованих фазообертачів за час порядку пікосекунд [2].

Проблема нелінійності та оптичні нейромережі

Для повноцінної роботи штучних нейронних мереж, окрім лінійних матричних операцій, критично необхідною є математична функція активації (нелінійність). Оскільки у лінійних середовищах взаємодія між фотонами є надзвичайно слабкою, реалізація нелінійності вимагає застосування спеціальних матеріалів.

Фізично оптична нелінійність реалізується через ефект Керра, де показник заломлення середовища стає функцією інтенсивності світла I :

$$n(I) = n_0 + n_2 I \quad (4)$$

де n_0 — лінійний показник заломлення, а n_2 — нелінійний коефіцієнт.

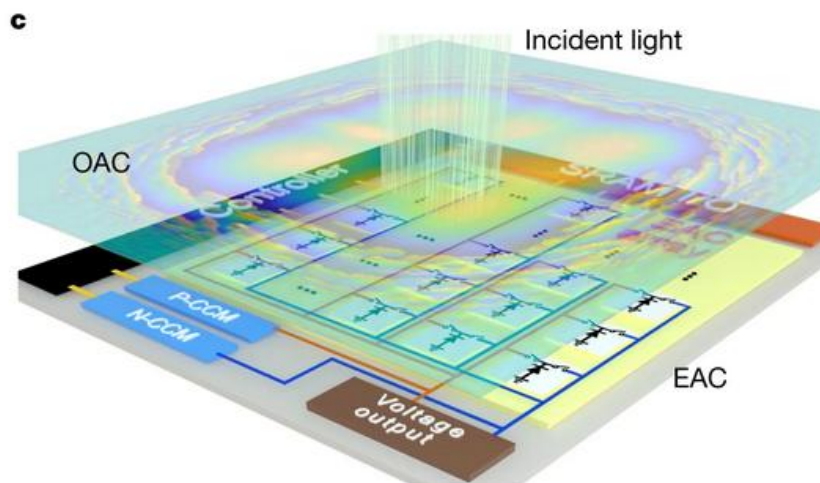


Рисунок 2 – Архітектура фотонної нейронної мережі ACCEL.

Проте суто оптичні нелінійні матеріали вимагають високих інтенсивностей світла (лазерного накачування), що знижує загальну енергоефективність. Тому сучасні прототипи, такі як чип ACCEL [2], часто використовують гібридний оптоелектронний підхід: матричні обчислення виконуються в оптичному домені, а нелінійні функції активації — за допомогою мікροструмів у надшвидких аналогових електронних ланцюгах.

Останні технологічні прориви

Одним із вузьких місць оптичних обчислень залишалася пам'ять (енергозалежність налаштувань ІМЦ). Останні дослідження пропонують використання матеріалів із фазовим переходом (Phase-Change Materials, PCM), таких як $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) або інтегрованих магнітооптичних резонаторів. Зміна кристалічної структури матеріалу локальним нагріванням імпульсом лазера дозволяє зберігати вагові коефіцієнти матриці без споживання енергії у стані спокою [3, 4]. Крім того, кремнієва фотоніка дозволила створити резервуарні комп'ютери (reservoir computing), які при високій енергоефективності продемонстрували продуктивність понад 200 TOPS (тераоперацій за секунду), при високій енергоефективності [4].

Висновки

Фотонні обчислення є перспективним напрямом розвитку спеціалізованих високопродуктивних систем обробки даних. Використання інтерферометрів Маха–Цендера та хвильового мультиплексування дозволяє зменшити вплив RC-затримок і підвищити швидкість виконання матричних операцій. Сучасні фотонні інтегральні схеми можуть застосовуватися у системах машинного зору, нейромережових прискорювачах та високошвидкісній обробці сигналів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. McMahon P. L. The physics of optical computing // Nature Reviews Physics. – 2023. – Vol. 5. – P. 717–734. – DOI: 10.1038/s42254-023-00645-5.
2. Chen Y. et al. All-analog photoelectronic chip for high-speed vision tasks // Nature. – 2023. – Vol. 623. – P. 48–57. – DOI: 10.1038/s41586-023-06558-8.
3. Pintus P. et al. Integrated non-reciprocal magneto-optics with ultra-high endurance for photonic in-memory computing // Nature Photonics. – 2024. – DOI: 10.1038/s41566-024-01549-1.

4. Dong B. et al. Ultrafast silicon photonic reservoir computing engine delivering over 200 TOPS // Nature Communications. – 2024. – DOI: 10.1038/s41467-024-55172-3.

5. Shekhar S. et al. Integrated photonic neuromorphic computing: opportunities and challenges // Nature Reviews Electrical Engineering. – 2024. – DOI: 10.1038/s44287-024-00050-9.

Ярован Денис Олександрович — студент групи ЗПІ-25б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: yarovan.dwnis@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** — кандидат технічних наук, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Yarovan Denys Oleksandrovych — student of group ЗPI-25b, Faculty of Information Technology and Computer Engineering, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, e-mail: yarovan.dwnis@gmail.com

Supervisor: **Martyniuk Volodymyr Valeriyovych** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia