

Ф. СИЗОВ

**ВОЛОДАРИ СВІТЛА**

*Коли в Стокгольмі виголошують імена лауреатів Нобелівської премії з фізики, більшість людей на планеті довідується про це тієї ж миті. Новина облітає земну кулю майже зі швидкістю світла. Тексти, зображення, мова і відео «течуть» по оптичних волокнах і в безпроводному просторі, їх миттєво реєструють мініатюрні детектори. Саме за цей винахід – «Дві революційні оптичні технології» – Нобелівську премію з фізики 6 жовтня 2009 року отримало трое вчених: Чарльз Куен Као (Charles Kuen Kao), Віллард Стерлінг Бойль (Willard Sterling Boyle) і Джордж Елвуд Сміт (George Elwood Smith).*

Нобелівську премію з фізики цього року розподілено таким чином: половину отримав Чарльз К. Као за видатні досягнення в області передачі світла по скловолоконним лініям оптичного зв'язку, другу половину поділено між Віллардом С. Бойлем і Джорджем Е. Смітом за розроблення світлочутливої напівпровідникової мікросхеми – ПЗЗ-сенсора (прилад із зарядовим зв'язком), «електронного ока». Чарльз К. Као ініціював дослідження та розвиток низьковтратних оптичних волокон, які сьогодні використовують у волоконно-оптичних комунікаційних системах. Віллард С. Бойль та Джордж Е. Сміт запропонували і створили ПЗЗ-сенсор (CCD device), який сьогодні використовують у багатьох цифрових камерах, сучасних медичній і науковій апаратурі.



В. Бойль, Ч. Као і Дж. Сміт

Ці «Дві революційні оптичні технології» [1], що значною мірою визначили сьогоднішні інформаційні технології, стали справжньою революцією нашого буття: швидкісні скловолоконні лінії зв'язку, без яких сучасний Інтернет неможливо уявити, у яких швидкість передачі інформації в десятки і сотні разів більша порівняно з

© СИЗОВ Федір Федорович. Член-кореспондент НАН України. Завідувач відділення Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України (Київ). 2009.

радіозв'язком; цифрові фото- та кінокамери, що дали можливість отримувати і зберігати інформацію в електронному вигляді, а потім передавати, наприклад, із космічних апаратів у цифровому форматі; сканери; сучасне медичне і наукове обладнання тощо.

Чарльз К. Као народився в Шанхаї 1933 р. У 15 років разом із родиною переїхав до Гонконгу, 1957 р. отримав диплом за спеціальністю «електротехніка» (Electrical Engineering) Гринвіцького університету. Трудовий шлях розпочав у науково-дослідному центрі The Standard Telecommunication Laboratories у Харлоу (Великобританія) під керівництвом А.Е. Карбов'яка (A.E. Karbowiak), який уже мав досвід дослідження одномодових світлових хвиль у хвильоводах. Згодом Ч. Као став керівником групи, де працював молодий співробітник-теоретик Г.А. Хокхем (G.A. Hockham). У 1965 р. Ч. Као захистив докторську дисертацію, а рік потому виконав дослідження [2], за яке через 43 роки отримав Нобелівську премію.

Джордж Е. Сміт народився 1930 р. у м. Уайт-Плейнзі (штат Нью-Йорк, США), 1955 р. закінчив Пенсильванський університет у Філадельфії, а 1959 р. захистив докторську дисертацію в Чиказькому університеті. Після захисту дисертації прийшов у Bell Laboratories (Мюррей-Хілл), де й працював до 1986 р., після чого вийшов на пенсію. У цій лабораторії Дж. Сміт розв'язував проблеми, пов'язані з дослідженням напівпровідників та лазерів і очолював відділ мікросхем надвеликого ступеня інтеграції.

Віллард С. Бойль народився 1924 р. у м. Амхерсті (Канада). 1948 р. закінчив університет Макгілла (Монреаль), 1950 р. захистив докторську дисертацію. Працював у Канадській радіаційній лабораторії, потім 2 роки викладав фізику в Королівському військовому коледжі. У 1953 р. прийшов на роботу в Bell Laboratories. 1962 р. В.С. Бойль став завідувачем відділу космічних дослі-

джень компанії Bellcomm — дочірнього підприємства Bell Laboratories. Повернувшись 1964 р. до Bell Laboratories, пропрацював там 15 років. Із 1979 р. В.С. Бойль член наукової ради Канадського інституту перспективних досліджень.

## СВІТЛО В ОПТИЧНИХ ДРОТАХ

Про оптичний зв'язок людство знає з часу своєї появи. Будь-який сигнал, поданий однією людиною (жест, міміка та ін.) і побачений іншою, є прикладом сигналу, який подано оптичним каналом зв'язку. З найдавніших часів людство практикувало оптичний зв'язок, розкладаючи сигнальні вогнища, пізніше встановлюючи різні semaфори, які використовують донині тощо. Г. Белл (G.A. Bell) запатентував 1880 р. оптичний телефон, у якому промінь сонячного світла направляли в повітрі на дзеркало, що коливалося від звуку. Потім світло спрямовували на селеновий фотоприймач, який було під'єднано до телефонної слухавки.

Однак із появою телеграфу і радіо застосування оптичних систем для зв'язку втратило свою актуальність. У період розвитку електричного зв'язку прогрес рухався в напрямку опанування щораз вищих частотних коливань електромагнітних хвиль, що давало змогу збільшити пропускність каналів. Наприклад, пропускність одного каналу в міліметровому ( $f \sim 100$  ГГц) діапазоні довжин хвиль може забезпечити 300 тисяч телефонних переговорів одночасно. Але при зростанні частоти, наприклад, у міліметровому й терагерцовому діапазонах атмосфера стає слабопрозорою для електромагнітних хвиль. У зв'язку з великими втратами в цих частотних діапазонах металеві дроти також неефективні для передавання інформації. А використання металевих хвильоводів затратне і габаритне. Подальше просування систем електричного зв'язку в бік коротких довжин електромагнітних хвиль зупинилося фактично кілька десятиріч тому.



Чарльз Куен Као (фото праворуч), Віллард Стерлінг Бойль і Джордж Елвуд Сміт виконують дослідження, які 4 десятиліття потому увінчалися присудженням Нобелівської премії.

Потрібні були нові ідеї, які б дозволили значно підвищити обсяги передавання інформації відповідно до зростання потреб суспільства. Учені розуміли, що це повинні бути оптичні канали. Чому для систем зв'язку вибрали саме оптику?

1. Завдяки потенційно широкій смузі пропуску оптичного каналу. Наприклад, для зеленого світла з довжиною хвилі  $\lambda=0.55$  мкм частота електромагнітних коливань становить  $f=5.45 \cdot 10^{14}$  Гц. Якщо використовувати лише діапазон частот, що становить 1% від частоти світла, то цього вистачить для передавання в аналоговій формі близько 1 млрд телефонних ліній або понад 100 тис. телеканалів<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Існує низка обмежень реальної швидкості передавання інформації принципового і технічного характеру: обмежена когерентність джерел випромінювання, наявність дисперсії групових швидкостей при поширенні світла в середовищі, наявність надшвидкісних систем кодування та декодування тощо. Нині швидкість передавання інформації зростає більше ніж у десять тисяч разів порівняно з радіозв'язком (причому, майже без спотворень) і по експериментальному оптоволоконному каналі сягає 2560 Гігабіт/с, що еквівалентно передачі інформації з 60 DVD-дисків за одну секунду (спеціалісти німецького інституту

2. Малі втрати при поширенні світла в оптичному волокні.
3. Скловолокно має суттєві переваги порівняно з іншими засобами передавання інформації. Воно нечутливе до блискавок (на відміну від металевих дротів), атмосферних перешкод (порівняно з радіохвилями).

Ідея про передавання світла по дровах виникла ще в ХІХ ст. Було продемонстровано, що промінь світла може поширюватися в струмені води (Д. Колладон (D. Colladon), Дж. Тіндалл (J. Tyndall)) або в зігнутому скляному дроті (Ж. Бабіне (J. Babinet)). Застосування скловолокна (тонкого скляного дроту) для передавання світла бере свій початок із кін. 1920-х рр. у медичній (гастроскопія) і військовій (перископи, шифрувальні пристрої) галузях, навіть у ранньому телебаченні. Скловолокно, зроблене зі звичайного скла, мало погану прозорість: на довжині 10–20 м світло майже повністю затухало. У скляних зразках во-

«Heinrich-Hertz» та японської компанії Fujitsu). За стандартною технологією таке передавання інформації займає десятки годин.

локон послаблення сигналу становило близько 1000 ДЦб/км (децибел). Тобто на відстані 20 м інтенсивність світла мала лише 1% від вхідної. Крім того, коли скловолокна торкались одне одного, на їхній поверхні утворювалися подряпини, через які світло потрапляло в навколишнє середовище, унаслідок чого передавану інформацію частково втрачали.

На поч. 50-х рр. XX ст. для захисту скловолокна було запропоновано використовувати захисні покриття (оболонки) з показником заломлення, меншим за показник за-

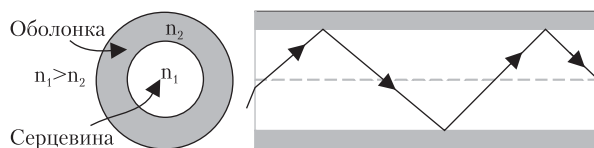


Рис. 1. Оптичне волокно (світловід), де світло поширюється завдяки його повному внутрішньому відбиттю. Типові розміри 10–50 мкм для серцевини та 125 мкм для оптичного волокна. Додатково поверхню оптичного волокна покривають пластиком захисним шаром (*Two revolutionary optical technologies. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2009, The Royal Swedish Academy of Sciences*).

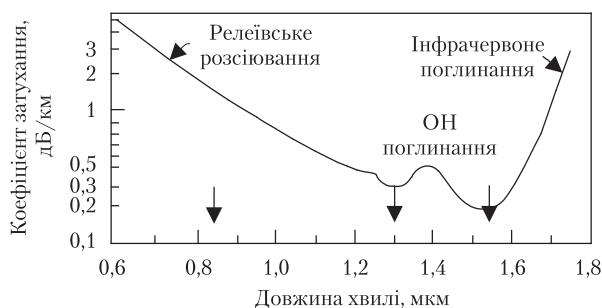


Рис. 2. Коефіцієнт затухання у кварці залежить від довжини хвилі світла. У короткохвильовій області затухання пов'язане з Релеївським розсіюванням світла (на неоднорідностях показника заломлення середовища), яке змінюється з довжиною хвилі  $\lambda$  як  $\lambda^{-4}$ . Найявніші затухання, яке пов'язане з поглинанням світла в гідроксильній групі ОН, важко усунути. Найбільш важливими для оптичного зв'язку є довжини хвиль 1.3 та 1.55 мкм (*Two revolutionary optical technologies. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2009, The Royal Swedish Academy of Sciences*).

ломлення скловолокна ( $n_1 > n_2$ , рис. 1). Приблизно тоді ж було продемонстровано (Н. Норкінс, Н. Карану, 1954) пучок із декількома тисячами скловолокон. Але проблему затухання світла в скловолокні тоді ще не розв'язали. У 50-х рр. XX ст. ідею оптичного зв'язку мало хто вважав перспективною і життєздатною.

Поява лазера на поч. 60-х рр. (Нобелівська премія 1964 р., С.Н. Townes, N.G. Basov, А.М. Прохоров) посилила інтерес до досліджень у галузі оптичного зв'язку. Тоді ж щорічний нобеліант Чарльз К. Као і Г.А. Хокхем почали досліджувати фундаментальні властивості оптичного волокна на предмет його застосування в оптичному зв'язку. Вони не лише розглядали фізичні властивості оптичних хвильоводів, але й довели, що затухання світла в скловолокні пов'язане з фізичними характеристиками середовища, що зумовлені поглинанням світла іонами металів, які завжди наявні в склі. Крім цього, вони запропонували оптимальний матеріал для скловолокна — плавлений кварц, який зараз використовують у виробництві оптичних волокон і кабелів (рис. 2). Це дослідження було опубліковане 1966 р. [2]. Відразу ж після публікації цього матеріалу розроблення оптичного волокна для мінімізації затухання світла починають стрімко розвиватися:

- 1970 р. одержано перші оптичні волокна з чистого кварцового скла;
- 1975 р. вперше у Великобританії запрацювала комерційна оптичневолоконна мережа;
- 1988 р. прокладено оптичневолоконний кабель завдовжки 6 тис. км через Атлантику.

Нині у світі виробляють понад 100 млн км/рік світловідів, а кабелі з оптичного волокна стають основою зв'язку та всесвітньої мережі Інтернет. Під водою прокладено понад 600 тис. км оптичневолоконних кабелів, які поєднують усі континенти. Сумарна протяжність оптичневолоконних кабелів становить понад 1 млрд км, очікується, що вона подвоїться до 2025 р.

А що ж Україна? На наших теренах виробництво оптоволоконної продукції налагоджено на двох підприємствах — «Южкабель» (Харків) та «Одескабель» (Одеса). Їхня частка виробництва, порівняно з випуском аналогічної продукції на теренах СНД, сягає кількох відсотків, частину української продукції спрямовано на експорт. Загальна частка виробництва оптоволоконна в країнах СНД, порівняно зі світовим обсягом його випуску, не перевищує 3%. Суттєвим фактором цього виробництва є те, що в Україні, як і в інших країнах СНД, не виробляють оптичного волокна, необхідного для оптичних кабелів. Усі підприємства використовують оптичне волокно закордонних виробників: «Corning» (США), «Fujikura», «Hitachi Cable» (Японія) та ін.

#### ПРИЛАДИ ІЗ ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ

Витоки запропонованого ПЗЗ беруть свій початок із годинної дискусії, яку провели 17 жовтня 1969 р. виконавчий директор напівпровідникового підрозділу В.С. Бойль і голова відділу цього підрозділу Дж.Е. Сміт. Вони полемізували навколо питання про можливість розроблення електронного аналога приладів на циліндричних магнітних доменах, які на той час вважали перспективними для записування та зберігання інформації. Аби не втратити частину фінансування, яку передавали сусідньому підрозділу, постала необхідність терміново створити електронний аналог пристрою, який би конкурував із пристроями на циліндричних магнітних доменах. Щоб використати електронний пристрій для запам'ятовування інформації потрібно було знайти фізичну величину, яка б відповідала 1 біту інформації. У функції такої одиниці було запропоновано використати зарядовий пакет, який можна створити в метал-окис-напівпровідниковій структурі (МОН). Упродовж лише 1 години було запропоновано і визначено принципи функціонування такої структури (рис. 3). При-

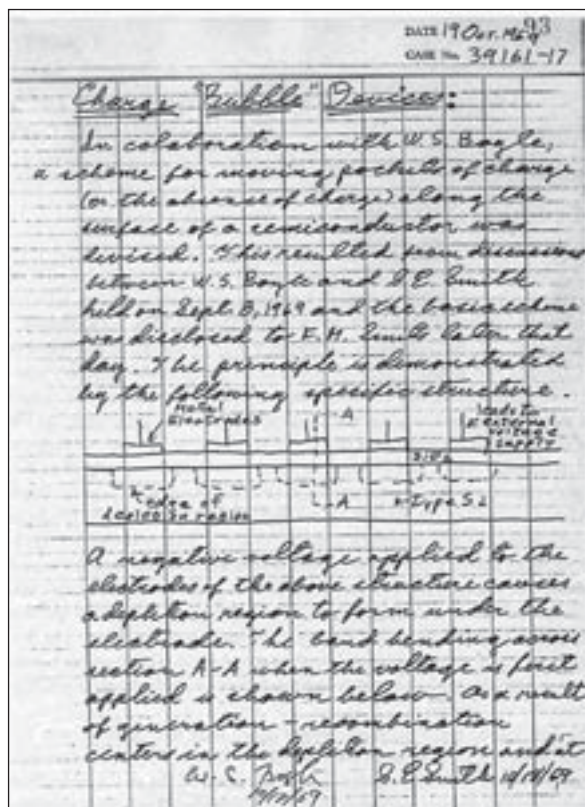


Рис. 3. Запис у робочому журналі В.С. Бойля і Дж.Е. Сміта, який розкриває концепцію ПЗЗ [Janesick J.R. Scientific charge coupled devices. Bellingham, WA, SPIE Press (2001). — 907 p.].

кладаючи напругу до металевого електрода МОН-структури, можна створити під електродом у напівпровіднику збіднену область, де накопичуватиметься заряд протилежного знака (зарядовий пакет) і зберігатиметься певний час. Перенести інформацію (зарядового пакета) можна, використовуючи ланцюжок близькорозташованих МОН-структур, послідовно прикладаючи до електродів (затворів — gates) напругу. Ідею про використання зарядового зв'язку для створення функціональних ПЗЗ було оприлюднено 1970 р. [3].

Перші експериментальні результати щодо реалізації зсувного регістра для передачі зарядового пакета (9 затворів розміром 100 мкм із проміжком 3 мкм, що розташовані в один ряд) на ПЗЗ було опубліковано

в тому ж журналі [4], а детальнішу інформацію про технічну реалізацію було викладено в спеціальних роботах [5–6]. Для інжекції і зчитування заряду було використано інтегровані в схему діоди. Тоді ж продемонстровано можливість використання ПЗЗ для створення зображень — напрям, у якому технології ПЗЗ надалі й розвивалися.

ПЗЗ-структури мають ряд властивостей, які дозволяють будувати на їхній основі різні мікрофотоелектронні аналогові та цифрові пристрої. До цих властивостей належать можливість створення (наприклад, під дією світла), зберігання, сумування та спрямованого передавання сигналів у вигляді зарядових пакетів. Як і пристрої на циліндричних магнітних доменах, вони не знайшли застосування в пристроях зберігання інформації через відносно низьку щільність запису інформації порівняно з іншими принципами, що використовують під час записування інформації, наприклад, на жорстких дисках<sup>2</sup>.

Функціонування ПЗЗ-приладів базується на послідовному взаємозв'язку близькорозташованих МОН-ємностей, у яких відбувається послідовне перенесення заряду між сусідніми ємностями (комірками), де в ланцюжку прикладають напругу до електродів малих розмірів МОН-структури. Принцип роботи такої ПЗЗ-структури схожий до дії в межах «пожежного ланцюжка», який було використано майже одночасно іншими дослідниками для пояснення передавання заряду від однієї ємності (не в МОН-структурі) до другої за допомогою керувальних транзисторів. В останньому випадку ефективність перенесення заряду не була високою (при невеликій кількості перенесень значну частину заряду втрачали).

Щоб не втрачати інформації в сучасних ПЗЗ-матрицях із типовою кількістю еле-

ментів (пікселів)  $2048 \times 2048$  (число рядків і стовпчиків, уздовж яких переноситься заряд), коефіцієнт ефективності перенесення  $K$  повинен бути  $K \geq 0.99999$ . Переданий від першої комірки до останньої заряд визначають як  $K^n$ , де  $n$  — кількість стадій перенесення. Можливість реалізувати в ПЗЗ-матрицях значення  $K \approx 1$ , що дає змогу фактично не втрачати інформацію при її передаванні вздовж комірок ПЗЗ-структури, зумовило їх широке застосування в ПЗЗ-фотоматрицях.

ПЗЗ-фотоматриця — матриця з великою кількістю світлочутливих (маленького розміру) комірок (у сучасних матрицях видимого діапазону спектра — декілька квадратних мікронів). Комірки, розташовані в горизонтальних рядках і вертикальних стовпчиках, часто називають пікселями, що вміщують МОН-ємності (відповідають зернам у фотоплівках). Коли світло падає на піксель, під дією фотоефекту в ньому утворюються один/кілька електронів (у ПЗС-фотоматрицях видимого діапазону — до  $10^5$ ), що зберігаються в МОН-ємності. Число електронів, які утворюються в пікселях, пропорційне інтенсивності світла, що потрапляє на них. Розподіл у пікселях утворених зарядів дає зображення, зафіксоване за допомогою зарядових пакетів. Зчитування зарядів у рядках і стовпчиках пікселів за допомогою паралельних і послідовних регістрів (рис. 4) забезпечує відтворення зображення.

Роздільну здатність ПЗЗ-фотоматриць визначають розміри пікселів. Типові розміри сучасних пікселів —  $10 \times 10$  мікронів і навіть  $\sim 2 \times 2$  мкм [8]. Їх уже застосовано в сучасних фотоматрицях із кількістю елементів  $\sim 10^8$ , що за розміром і кількістю чутливих до світла елементів наближається до кількості та розміру чутливих елементів (колбочки і палички) людського ока чи великих фотографічних пластин. Це забезпечує роздільну здатність, яка є близькою до дифракційної межі у видимому діапазоні спектра, а за квантовою ефективністю

<sup>2</sup> Ефект гігантського магнітоопору, Нобелівська премія 2007 р.

( $\eta \sim 50\text{--}80\%$ ) ПЗЗ-фотоматриці перевищують цей показник для людського ока ( $\eta \sim 3\text{--}10\%$ ). Типова кількість пікселів у матриці —  $2048 \times 2048$ . Для космічних апаратів вони можуть мати  $10^4 \times 10^4$  пікселів із геометричними розмірами матриці  $\sim 9 \times 9$  см<sup>2</sup>.

Розробка Бойля та Сміта кардинально змінила фотографію та зумовила перехід від аналогової фотографії до цифрової, дозволивши реєструвати зображення не на плівці чи за допомогою детектування випромінювання у вакуумних трубках (наприклад, відіконах), а електронними твердотільними, більш фоточутливими матричними приймачами випромінювання. Тепер цифрові камери з ПЗЗ-фотоматрицями в космічних апаратах «Хабл», «Касіні», «Мессенджер» і багатьох інших виконують тисячі знімків планет, галактик, туманностей тощо, записуючи їх у бортову пам'ять і передаючи на Землю за допомогою електромагнітних хвиль, що було б неможливим при використанні фотоплівки, яка потребує проявлення. Більшу частину трафіку в комунікаційних мережах займають цифрові зображення. Без ПЗЗ-технологій сьогодні важко уявити сучасні прилади для отримання зображень у діагностичній медичній та науковій апаратурі.

В останні роки ефективно розвивається інший важливий напрям твердотільних сенсорів видимого та ближнього ІЧ-діапазону — на базі так званих КМОН-структур (компліментарний метал-окис-напівпровідник), який дозволяє отримати близькі до ПЗЗ-фотоматриць параметри, але на основі простіших технологій виробництва кремнієвих МОН-структур і ширших можливостей оброблення інформації. Щоправда, у зв'язку з необхідністю мати в кожному пікселі два або більше керувальних транзисторів, а не тільки світлочутливу область, КМОН-пікселі з однаковою за площею світлочутливою поверхнею більші за розмірами від ПЗЗ-пікселів. Також унаслідок підвищеного рівня шумів у КМОН-фотоматрицях, по-

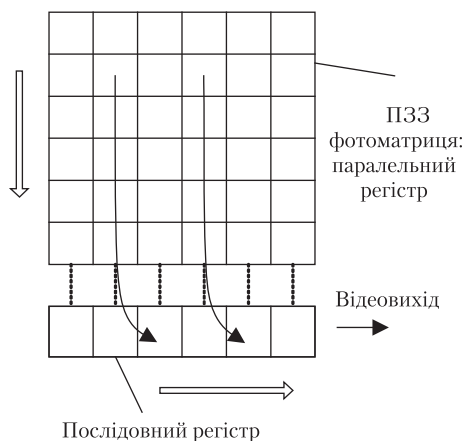


Рис. 4. Схематичне пересування зарядів у фото-ПЗС матриці паралельним та послідовним регістрами

рівняно з ПЗЗ-фотоматрицями, останні більше застосовують у пристроях, де необхідно забезпечити високоякісні зображення. Певним недоліком ПЗЗ-фотоматриць є необхідність використання більш високих напруг живлення та більшої кількості керувальних електродів, що призводить до ускладнення технології виробництва з одночасним збільшенням значень розсіюваної потужності. У КМОН-фотоматрицях також можливе застосування функції довільної вибірки даних зображення, що дає змогу виділити вікно меншого формату, змінити масштаб зображення, що неможливе для ПЗЗ-фотоматриць. Крім цього, в КМОН-фотоматрицях можлива реалізація багатьох функцій, необхідних для функціонування фото- чи кінокамер на одному чипі, — це одна з основних їхніх переваг порівняно з ПЗЗ-фотоматрицями.

Ідея Бойля та Сміта виявилася революційною не тільки при створенні твердотільних фотоматриць видимого та ближнього ІЧ-діапазонів спектра, що реалізовано в структурах на основі кремнію, який фоточутливий лише у цих областях спектра, а також матриць, чутливих в інших «невидимих» діапазонах спектра, де кремній не можна використати як фоточутливий елемент.

У цих фотоматрицях використовують так звані пристрої зчитування на основі ПЗЗ- або КМОН-кремнієвих структур, які виконують ті ж самі функції, що й фотоматриці видимого діапазону з погляду перенесення заряду та отримання зображень. У них вводять заряд від матриці ІЧ-приймачів випромінювання, що дає змогу отримувати зображення в ІЧ-частині спектра. Використання таких ІЧ-гібридних пристроїв уможливорює створення малогабаритних камер інфрачервоного (ІЧ) діапазону спектра, які сьогодні використовують для отримання зображень космічних об'єктів, що невидимі у видимому діапазоні спектра, тепловтрат будівель і промислових об'єктів, під час розвідування покладів корисних копалин, прогнозування врожайності сільгоспкультур тощо, де отримання цієї інформації в сучасних обсягах узагалі було неможливе.

Перші українські ПЗЗ (зсувові реєстри) було створено в 1972 р. в Інституті мікроприладів Міністерства електронної промисловості СРСР. Розроблено послідовну ПЗЗ-пам'ять та аналогові лінії затримки, освоєно їх промисловий випуск, розроблено кілька цифрових пристроїв. На ці розробки було отримано понад 40 авторських свідоцтв про винаходи.

У наукових закладах НАН України — Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова та Інституті мікроприладів — розроблено низку кремнієвих пристроїв зчитування для багатошкельових лінійок і матриць ІЧ-діапазону спектра, а також сучасні багатошкельові ІЧ-приймачі випромінювання, що дає змогу створити на їхній основі сучасні тепловізійні пристрої. Низку розроблень виконано в межах міжнародних контрактів.

Виробництво сучасних великоформатних ПЗЗ- або КМОН-фотоматриць в Україні сьогодні не може бути економічно обґрунто-

ваним, адже умовою рентабельного функціонування сучасного електронного виробництва (вартістю декілька млрд доларів США) є масштабний випуск фотоматриць.

**P.S.** Як бачимо, внесок Ч. Као, В. Бойля і Дж. Сміта, що в 2009 р. отримали Нобелівську премію з фізики і яких в інформаційних повідомленнях небезпідставно називають «володарями світла», справді великий. Запропоновані ними рішення дали змогу сучасній людині суттєво змінити багато галузей своєї діяльності, стати свідком подій, що відбуваються за сотні й тисячі кілометрів.

Як суто прикладні винаходи, оптико-волоконні і ПЗЗ-технології настільки потужно вплинули на пізнавальні, комунікаційні та виробничі можливості сучасної людини, що це дає підстави поставити їх на один щабель із видатними фундаментальними відкриттями, які розширюють і збагачують фізичну картину світу.

1. *Two revolutionary optical technologies*. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2009, The Royal Swedish Academy of Sciences. — 14 p.
2. *Kao K.C. and Hockham G.A.* Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies // *Proc. IEEE*. — 1966. — Vol. 113. — P. 1151–1158.
3. *Boyle W.S. and Smith G.E.* Charge-coupled semiconductor devices // *Bell Systems Technical Journal*. — 1970. — Vol. 49. — P. 587–593.
4. *Amelio G., Tompsett M. and Smith G.* Experimental verification of the charge coupled concept // *Bell Systems Technical Journal*. — 1970. — Vol. 49. — P. 593–600.
5. *Amelio G., Tompsett M. and Smith G.* Charge coupled 8-bit shift register // *Appl. Phys. Lett.* — 1970. — Vol. 17. — P. 111–113.
6. *Amelio G., Tompsett M. and Smith G.* Experimental verification of the charge coupled device concept // *IEEE Trans. Electr. Devices*. — 1970. — ED-18. — P. 986–992.
7. *Janesick J.R.* Scientific charge coupled devices. — Bellingham WA, SPIE Press, 2001. — 907 p.
8. *Сизов Ф.Ф.* Фотоелектроника для систем видення в невидимих участках спектра. — К.: Академперіодика, 2008. — 460 с.