

Ф. СИЗОВ

ІНФРАЧЕРВОНА МІКРОФОТОЕЛЕКТРОНІКА: ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ

Сьогодні в країнах, котрі піклуються про національну безпеку, зростають потреби у системах для обробки інформації, що надходить в інфрачервоному (ІЧ) діапазоні спектра ($\lambda \approx 1-100$ мкм), тобто в області тих довжин хвиль (λ) електромагнітного випромінювання, які людське око не сприймає (видиме людським оком випромінювання перебуває у діапазоні $\lambda \approx 0,40-0,76$ мкм). Які ж перспективи розвитку цього стратегічного напрямку в Україні?

Інформація, що надходить в ІЧ-області спектра, потрібна для розв'язання проблем екології, військової техніки, для керування виробничими процесами у металургії і харчовій промисловості тощо. ІЧ-технології допомагають складати ефективні довгострокові прогнози врожайності сільськогосподарських культур, здійснювати глобальний контроль забруднення навколишнього середовища, простежувати вертикальний розподіл температури у земній атмосфері (що вкрай важливо для довгострокових прогнозів погодних умов). Ці технології застосовуються навіть у справі керування автомобільним транспортом.

Завдяки вдосконаленню ІЧ-технологій стався стрімкий розвиток ІЧ-термографії у медицині. Це розширює можливості для ранньої діагностики раку молочної залози і хвороби коронарних судин, ідентифікації атеросклеротичних бляшок, безконтактного визначення глибини опікових ран тощо.

ІЧ-системи, встановлені на багатьох космічних літальних апаратах, виконують зйомки скупчень зірок, віддалених планет та їхніх супутників. Це дає змогу отримувати інформацію, наприклад, про об'єкти, які зароджуються у космосі. У видимій області спектра одержати таку інформацію неможливо через наявність космічного пилу, що розсіює випромінювання з коротшими довжинами хвиль.

Наприкінці ХХ і на початку ХХІ століття опто- і фотоелектронні технології ІЧ-бачення охоплюють дедалі ширше коло економічних і соціальних проблем як у цивільних, так і в спеціальних сферах застосування. Це нагадує ситуацію 1950—1960 рр., коли кремнієві напівпровідникові технології посіли чільне місце в електронній галузі. Масштаби використання нових технологій визначають рівень розвитку суспільства і можливості його технічного прогресу. Наявність у країні розвиненої мікрофотоелектроніки, поряд з мікроелектронікою, стає сьогодні важливою складовою її економічної та військової незалежності.

Поки що лише кілька найрозвиненіших країн здатні здійснювати аналіз інформації в ІЧ-області спектра. Це зумовлено тим, що для реалізації потенціалу ІЧ-технологій необхідно здійснювати дослідження і розробки в різних галузях науки — матеріалознавстві і фізиці напівпровідників, оптиці і обробці сигналів, мікроелектроніці і фотоелектроніці тощо. Крім того, потрібні наукова і промислова бази, кваліфіковані фахівці, системи підготовки кадрів. Саме наявність такого комплексу умов і дає змогу задовольняти вимоги «високих» ІЧ-технологій. Досягнення у цій галузі, як показує досвід розвинених країн, є базою для розвитку багатьох інших сфер виробництва.

Ще недавно Україна вела дослідження з більшості вказаних вище проблем. Ми випускали опти- та мікрофотоелектронні прилади і близько підійшли до розробки ряду сучасних пристроїв ІЧ-мікрофотоелектроніки із значним ступенем інтеграції, необхідним, наприклад, для забезпечення високої роздільної здатності, дальності спостереження, створення систем, які працюють у реальному масштабі часу.

Наявність у країні бази фотоелектроніки поряд з мікроелектронікою і розвитком нанотехнологій, стає сьогодні важливим фактором економічної та оборонної незалежності. Для науково-технічного потенціалу розвинених країн кінця ХХ — початку ХХІ ст. характерний тісний взаємозв'язок наукових досліджень і розробок спеціального та цивільного призначення. Завдяки цьому з'явилося чимало технологій «подвійного застосування». Що ж до нашого науково-технічного потенціалу, то він ще недавно значною мірою формувався в оборонному секторі. І ті напрями, які тут вдалося зберегти, власне, ще й дають змогу вважати Україну індустріально розвиненою державою.

До напрямів, розвиток яких уже в недалекому майбутньому може забезпечити випуск в Україні сучасної конкурентоспроможної продукції, належить ІЧ-мікрофотоелектроніка. Щоправда, нині у нас практично відсутній ринок для таких виробів, хоча ще недавно ми мали потужну виробничу базу напівпровідникових матеріалів для опти- та мікрофотоелектроніки. Тільки відновивши її, Україна може розраховувати зайняти гідне місце серед країн з високим науково-технічним потенціалом.

Найскладніша система приладів фотоелектроніки — фотоприймачі. Це — «очі» ІЧ-систем. Сьогодні проблема забезпечення надійності таких «очей» стає дедалі актуальнішою. Адже вимоги до якості і обсягів одержуваної інформації в ІЧ-області спектра весь час зростають. Ідеться про температурний контраст, дальність спостереження, ідентифікацію і дискримінацію тощо. Задовольнити ці вимоги можливо тільки із застосуванням фотоелектронних «очей», які за своїми характеристиками наближаються до реальних, але, крім того, ще й «бачать» в ІЧ-області спектра. Інакше кажучи, слід забезпечити великоформатність (багатоелементність) ІЧ-фотоприймачів. Обробка інформації з багатоелементних фотоприймачів зараз і у найближчому майбутньому можлива тільки з використанням спеціальних електронних пристроїв зчитування і попередньої її обробки безпосередньо у фокальній площині багатоелементного приймача випромінювання. Ця проблема досить складна, оскільки її розв'язання залежить від досягнень як фотоелектроніки, так і мікроелектроніки.

Застосування ІЧ-технологій потребує використання фотодетекторів для реєстрації випромінювання у різних спектральних діапазонах. Вивчення властивостей матеріалів для ІЧ-мікрофотоелектроніки та самих фотоприймачів (з урахуванням сучасних уявлень про вади ІЧ-технологій) підказує висновок, що два сімейства фотоприймальних пристроїв (ФПП) в основному можуть задовольнити вимоги і сучасних ІЧ-систем, і систем найближчого майбутнього. Це — скануючі ФПП з багатоелементними лінійками фотоприймачів (першого і другого покоління), у тому числі і багаторядними, здатними працювати у режимах часової затримки і накопичення (режим ЧЗН), а також ФПП, що «дивляться» з допомогою матричних фотоприймачів (рис. 1).

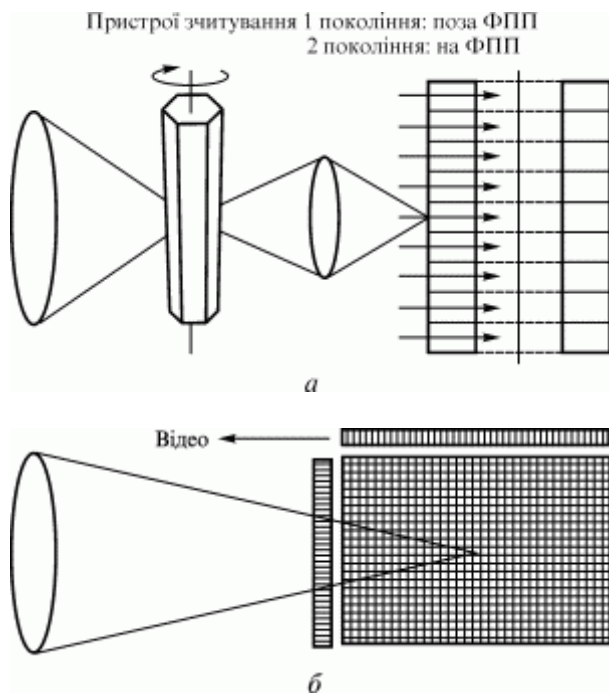


Рис. 1. Схематичне зображення «скануючих» ФПП (а) і тих, що «дивляться» (б).

З погляду прикладних застосувань ІЧ-технологій найважливішими є такі спектральні діапазони: $\lambda \approx 1,0\text{—}2,5$ мкм (активна і пасивна локація, волоконно-оптичні лінії зв'язку); $\lambda \approx 3,0\text{—}5,0$ мкм (активна і пасивна локація, теплобачення); $\lambda \approx 8,0\text{—}14,0$ мкм (активна і пасивна локація, астрономія, теплобачення); $\lambda \approx 15\text{—}200$ мкм (астрономія, пасивна локація).

Для створення ІЧ-фотоприймачів — основного компонента всіх подібних систем — був запропонований широкий асортимент матеріалів. Йдеться про матеріали, завдяки фізичним характеристикам яких фотоприймачі можуть задовольнити вимоги як щодо високої чутливості і багатоелементності, так і щодо узгодження їхніх характеристик з характерними стилями вхідних пристроїв систем зчитування.

Так, у спектральному діапазоні $1,0\text{—}2,5$ мкм найдоцільніше використовувати так звані власні фотоприймачі (тобто такі, у яких фотозбуджені носії заряду виникають за міжзонного (власного) поглинання випромінювання) на основі Si, Ge, PbS, твердих розчинів InGaAs, HgCdTe. Зокрема, швидкодіючі фотодіоди (лавинні і *p-i-n*) на основі кремнію і германію, а також гетероструктури InGaAs/InP, що працюють у діапазоні кімнатних температур, використовуються у волоконно-оптичних лініях зв'язку, застосовуються для реєстрації спонтанного і когерентного випромінювання, для систем дальнометрії. А з фоторезисторів на основі полікристалічних шарів PbS виготовляють лінійки фотоприймачів і гібридні ФПП. Випуск таких дискретних фотоприймачів, фоторезисторів і багатоелементних лінійок освоєний на підприємстві «Кварц» (м. Чернівці). Помітним недоліком фотоприймачів з PbS є відносно вузький частотний діапазон їх ефективного використання, що обмежує їхнє застосування у скануючих ІЧ-системах.

Багатоелементні ФПП для цього діапазону довжин хвиль на основі InGaAs можна ефективно використовувати у системах теплобачення і пасивної локації. Створено гібридні ФПП з пристроями зчитування на основі кремнію, а також матричні гібридні ФПП з параметрами, близькими до обмежених фоном.

ФПП на основі HgCdTe з характеристиками, близькими до обмежених фоновим випромінюванням, також успішно застосовуються у спектральному діапазоні 1,0—2,5 мкм у системах спостереження, наприклад космічних об'єктів. Як правило, вони допускають температуру експлуатації приблизно 200 К. Нещодавно для цього спектрального діапазону було продемонстровано великоформатний (2048 x 2048) ФПП на основі HgCdTe¹. Він містить $4,19 \times 10^6$ фоточутливих елементів і понад $1,3 \times 10^7$ транзисторів у пристрої зчитування, що наближається до кількості транзисторів у потужному мікропроцесорі Pentium III. Сьогодні такий ФПП має найбільший формат з усіх відомих для ІЧ-області спектра.

Прийом і обробка інформації у спектральному діапазоні 3—5 мкм забезпечується в основному як власними фотоприймачами з PbSe, InSb, InAs, Hg_{1-x}Cd_xTe, так і фотоприймачами з внутрішньою фотоемісією на основі силіцидів платини та іридію (Si:Pt, Si:Ir). Можуть бути використані у цій спектральній області і фотоприймачі на основі надграток GaAs/AlGaAs². Щоправда, технології їх виготовлення не опановані в Україні.

Головним недоліком фотоемісійних приймачів випромінювання на основі Si:Pt, які були першими запропоновані для нескануючих систем, є низька квантова ефективність, що обмежує їх використання в ІЧ-системах з граничними характеристиками. Крім того, існують проблеми, пов'язані з температурою їх експлуатації ($T \approx 65$ К). Вона трохи нижча за температуру кипіння рідкого азоту ($T \approx 78$ К), який звичайно використовується для охолодження приймачів ІЧ-випромінювання. Така, здавалося б, невелика різниця температур висуває серйозні вимоги до систем охолодження ФПП і призводить до значного зростання вартості виробів. Підвищення ж температури експлуатації таких приймальних пристроїв до 80 К істотно погіршує їхні параметри. Однак їх перевага — висока однорідність параметрів фоточутливих елементів навіть у матрицях, в яких налічується понад 10^6 елементів. Це значно зменшує геометричний шум, у результаті чого параметри ФПП є досить високими, хоч і не гранично можливими. Втім, такі матеріали не випускаються в Україні, як і чимало інших, використовуваних для створення ІЧ-ФПП.

Діапазон 8—14 мкм — найважливіший для прикладних застосувань. Тут найпоширеніші — власні фотоприймачі, такі як Hg_{1-x}Cd_xTe, де червона границя фотовідповіді залежить від змін хімічного складу «x». Однак використовуються і фотоприймачі з внутрішньою фотоемісією на основі Si/Ge_xSi_{1-x} і Si:Ir, Si:Co, що потребують глибокого охолодження, фотоприймачі на основі надграток, а також малочутливі фотоприймачі на основі високотемпературної надпровідності.

Недоліком фотоприймачів з надграток, які працюють здебільшого як фоторезистори, є відносно низька квантова ефективність і, як правило, необхідність використання знижених порівняно з $T=80$ К температур експлуатації. Водночас їхньою перевагою можна вважати відносну простоту реалізації двоколірних і багатоколірних ФПП³.

В останнє десятиліття стрімко розширюється застосування неохолоджуваних неселективних матричних теплових ФПП з електронною адресацією на основі, наприклад, мікроболометрів і піроелектричних приймачів випромінювання, що зумовлено їхньою значно меншою вартістю порівняно з охолоджуваними ФПП. Однак за основними параметрами (чутливістю, виявною здатністю, швидкодією тощо) ці ФПП помітно поступаються перед охолоджуваними фотоприймачами. І для того, щоб реалізувати граничні характеристики неохолоджуваних матричних фотоприймачів, необхідно навчитися усувати такі недоліки, як, скажімо, високий рівень шумів, забезпечувати стабілізацію температури, сумісність із кремнієвими пристроями зчитування сигналів від

фотоприймачів, наявність підкладок із близькими коефіцієнтами теплового розширення тощо⁴. Технології створення неохолоджуваних багатоелементних мікрофотоприймачів розвинулись лише за останнє десятиріччя і поки що зовсім не освоєні в Україні.

Є всі підстави прогнозувати, що матриці неохолоджуваних фотоприймачів у найближчому майбутньому знайдуть широке застосування у цивільних сферах, наприклад у медицині. Але щодо дальності виявлення інформації, її розпізнавання та ідентифікації вони не зможуть замінити ФПП з граничними характеристиками — такі, наприклад, як фотоприймачі на основі сполук $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$.

Матеріал $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ вже добре освоєний промисловістю України і широко використовується для створення ФПП з граничними характеристиками в АТ «Чисті метали» (м.Світловодськ). Тут виготовляють ІЧ-фотоприймачі для різних областей спектра, застосовуючи майже однакові технології, і це дає змогу не дублювати устаткування. Важливою перевагою фотоприймачів з цього матеріалу є те, що вони можуть функціонувати за підвищених, порівняно з пристроями з інших матеріалів, температур, що знижує вимоги до систем охолодження.

А для таких застосувань, як, наприклад, супутниковий моніторинг, найкраще зарекомендували себе високочутливі ІЧ-системи на основі ФПП з HgCdTe . І навряд чи у найближчому майбутньому їх замінять якісь інші прилади.

Схожість технологічних процесів має вирішальне значення і під час виробництва багатоколірних ФПП на основі HgCdTe . Для них найпридатнішою технологією є молекулярно-променева епітаксія, яка дає змогу змінювати хімічний склад шарів в одному циклі їхнього вирощування.

ІЧ-системи у діапазоні 8—14 мкм доцільно використовувати у північних широтах. Порівняно з діапазоном 3—5 мкм ці пристрої ефективніше функціонують під час поганої погоди і запиленості атмосфери, гнучкіше реагують на природні нестабільності атмосфери, менш чутливі до відбитого сонячного та інших видів випромінювання тощо. У цій спектральній ділянці температурний контраст нижчий, ніж для довжини хвиль 3—5 мкм, але він мало змінюється під час денних і нічних спостережень. Крім того, для спектральної області 8—14 мкм температури об'єктів, що можуть бути зареєстровані, помітно нижчі, ніж для діапазону 3—5 мкм.

Прийом і обробка інформації у спектральному діапазоні 15—200 мкм забезпечується здебільшого домішковими напівпровідниковими фотодетекторами на основі германію та кремнію. Домішкові фотодетектори (переважно фоторезистивні приймачі ІЧ-випромінювання на основі кремнію і германію та фотодетектори з так званою заблокованою домішковою зоною) можуть мати довгохвильову границю фоточутливості до $\lambda \approx 200$ мкм. Ці фотоприймачі, однак, потребують глибокого охолодження аж до температур кипіння рідкого гелію ($T = 4,2$ К) і нижче.

Домішкові ІЧ-фотоприймачі застосовують ся під час астрономічних і космічних спостережень в умовах низькофононих засвіток. Адже довгохвильова границя їхньої фоточутливості простягається залежно від використовуваної домішки до $\lambda \approx 30$ —200 мкм. Вони можуть застосовуватися і для розпізнавання об'єктів, що летять у верхніх шарах атмосфери. В Україні ці фотоприймачі не освоєні.

Великоформатні ФПП не можуть функціонувати без пристроїв зчитування у фокальній площині для забезпечення функцій конверсії заряду в напругу, накопичення, підсилення,

мультиплексування тощо. Схематичну ілюстрацію матричного гібридного ФПП з пристроєм зчитування у фокальній площині, з'єднаного з матрицею фотоприймачів за допомогою технології індієвих стовпчиків, наведено на рис. 2.



Рис. 2. Багатоелементний гібридний ФПП з матрицею фотодіодів з HgCdTe і кремнієвою схемою зчитування.

Одна з основних вимог до пристроїв зчитування ІЧ-ФПП — відсутність обмежень з боку такого пристрою до функціональних можливостей лінійки чи матриці фотоприймачів. Скажімо, сучасні ІЧ-ФПП діапазону 8—12 мкм, які працюють у наземних умовах, через високі рівні фонового потоку фотонів мають інтегрувати великі заряди. Це потребує чималих накопичувальних ємкостей і забезпечення функції пригнічення фонових сигналів. Останнє має здійснюватися за значно менші проміжки часу порівняно з часом інтегрування.

Ряд сучасних пристроїв зчитування для багатоелементних приймачів ІЧ-випромінювання було розроблено і виготовлено в Україні — в академічному Інституті фізики напівпровідників та НДІ мікроприладів ⁵.

Отже, одна з найважливіших характеристик ІЧ-фотоприймачів — виявна здатність. Вона визначається їхньою чутливістю і рівнем шумів. Сьогодні ця величина у багатьох фотоприймачах близька до гранично можливих у земних умовах. Тому тенденції розвитку ІЧ-мікрофотоелектроніки у наступні десятиліття будуть пов'язані насамперед із збільшенням формату матриць фотоприймачів і пошуком матеріалів для них. У найближчому майбутньому площа багатоелементних матриць має досягти кількох квадратних сантиметрів, що відчутно збільшить ефективність ІЧ-систем (дальність виявлення, роздільну здатність щодо температури, тепловий контраст тощо). Очевидно, це один з найперспективніших напрямів підвищення ефективності ІЧ-систем.

Інша важлива тенденція — розширення можливостей пристроїв зчитування у напрямі збільшення обсягу використання корисного сигналу. Сьогодні ця проблема частково розв'язується методами віднімання і ділення сигналів у самому сигнальному процесорі, що принаймні дає змогу збільшити динамічний діапазон ФПП. Пристрої ж зчитування ІЧ-систем працюють в умовах, коли величина корисного сигналу для приймачів випромінювання в області $\lambda \approx 10$ мкм становить близько 1 % порівняно з фоновими сигналами. Накопичувальна комірка у цьому випадку заповнюється за 10—30 мкс, а час зчитування кадру зображення на 2—3 порядки більший.

У найближчі кілька років варто очікувати поширення неохолоджуваних матриць мікроболометрів чи подібних неохолоджуваних великоформатних ФПП в основному у сфері цивільних і, можливо, деяких спеціальних застосувань. Також виникла потреба у багатоколірних ФПП, які перекривають широкі спектральні діапазони, що дає змогу визначати температури об'єктів.

Частина цих проблем сьогодні ще можна розв'язати в Україні, оскільки значною мірою збережено промисловий і кадровий потенціали. Йдеться переважно про створення багатоелементних ІЧ-ФПП з гранично можливими характеристиками на основі фотоприймачів з твердих розчинів HgCdTe і кремнієвих пристроїв зчитування. Це стосується і відносно недорогих, але не з граничними параметрами, ФПП на основі фоторезистивних PbS і PbSe для ділянок спектра 1—3 та 3—4,5 мкм відповідно, які освоєні в Україні. І хоча розвиток ІЧ-фотоелектроніки із застосуванням згаданих матеріалів потребує значних матеріальних витрат і часу, ми маємо рухатися у цьому напрямі, якщо хочемо зберегти шанс бути технологічно розвинутою країною.

© СИЗОВ Федір Федорович. Член-кореспондент НАН України. Завідувач Відділення фізико-технологічних проблем інфрачервоної техніки Інституту фізики напівпровідників НАНУ (Київ). 2001.

¹ [\[до тексту\]](#) Див.: K. Vural, J. Kozlowski, D. E. Cooper, C. A. Chen, G. Bostrap, C. Cabelli, J. M. Arias, J. Bajaj, K. W. Hodapp, D. N. B. Hall, W. E. Kleinhaus, G. G. Price, J. A. Pinter. 2048 x 2048 HgCdTe focal plane arrays for astronomy applications // Proceed. SPIE, **3698**.— P. 24—35 (1999).

² [\[до тексту\]](#) Див.: F. Sizov. Semiconductor superlattice and quantum well detectors // Infrared photon detectors. Ed. A. Rogalski, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham-Washington.— P. 561—624 (1995).

³ [\[до тексту\]](#) Див.: M. Z. Tidrow, K. K. Choi, C. Y. Lee, W. H. Chang, F. J. Towner, J. S. Ahearn. Voltage tunable three-color quantum well infrared photodetector // Appl. Phys. Lett., **64**.— P. 1268—1270 (1994).

⁴ [\[до тексту\]](#) F.F. Sizov. Infrared Detectors. Outlook and Means // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics.— V.3.— №1.— P.52—58 (2000).

⁵ [\[до тексту\]](#) F. F. Sizov, V. V. Vasil'ev, D. G. Esaev, V.N. Ovsyuk, Y. G. Sidorov, V. P. Reva, A. G. Golenkov, Y. P. Derkach. Properties of 2x64 linear HgCdTe molecular beam epitaxy grown long wavelength infra-red arrays with changed coupled devices silicon readouts // Sensors and Materials.— V. 12.— №7 (2000).