

СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ДЕТЕКТОРІВ УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Проведено огляд детекторів ультрафіолетового випромінювання, визначено вимоги що висуваються до детекторів такого типу та вибрано оптимальні детектори для задач екологічного моніторингу.

This paper is reviewed the ultraviolet radiation detectors, determined requirements for this type of detectors, selected the optimal detectors for environmental monitoring tasks.

Починаючи з 1974 року, вчені продемонстрували, що створені людиною хімічні сполуки, такі як хлорфторвуглеці, тетрахлористий вуглець, галони і бромистий метил руйнують молекули озону в стратосфері [1]. Озоновий шар захищає земне життя від шкідливої дії сонячного ультрафіолетового (УФ) випромінювання. Підвищення рівня ультрафіолетового випромінювання, яке досягає поверхні землі, викликає потенційно небезпечну дію на здоров'я людини, викликаючи, серед іншого, рак шкіри, катаракту очей і ослаблення імунної системи. Підвищення рівня УФ випромінювання може також порушити харчовий ланцюг в океані і зменшити продуктивність найважливіших сільськогосподарських культур.

Інтенсивність сонячного УФ випромінювання біля поверхні Землі значно коливається, і найбільш важливим параметром в умовах безхмарності є висота Сонця, яка визначає добові, сезонні і географічні коливання [2]. Крім того, важливими параметрами атмосфери є вміст озону і аерозольне навантаження.

Зменшення вмісту озону веде приблизно до пропорційного збільшення еритемально значеного УФ випромінювання, а аерозолі можуть ослаблювати УФ випромінювання на 5–35% залежно від кількості і виду аерозолу. Інтенсивність УФ випромінювання збільшується приблизно на 15% кожні 1000 м, що також сильно залежить від концентрації аерозолів у конкретному місці. Вона також зростає приблизно на 25% при вимірі за допомогою горизонтального датчика, за умови, що поверхня землі вкрита снігом. Нарешті, хмари в цілому розсіюють УФ випромінювання, але приблизно на 40% менше, ніж вони ослаблюють загальне сонячне випромінювання (рис.1).

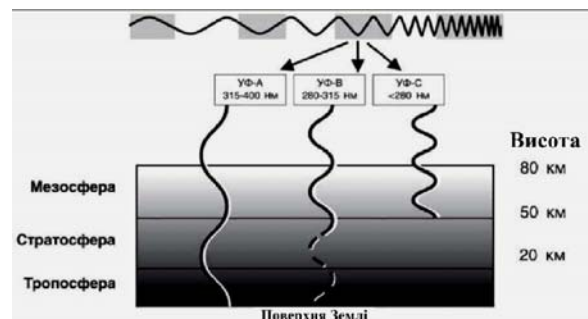


Рис. 1. Схема проникнення УФ випромінювання крізь атмосферу.

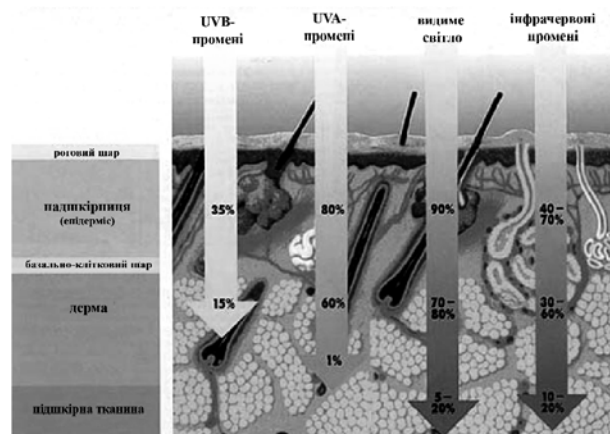


Рис. 2. Проникнення УФ випромінювання крізь шкіру людини.

Шкіра людини дуже чутлива до впливу УФ випромінювання, про що свідчать еритема (сонячний опік) і хронічні захворювання у вигляді декількох різновидів раку шкіри. Проте завдяки УФ випромінюванню у шкірі утворюється дуже корисний для організму вітамін *D* (рис.2).

Доза, необхідна для синтезу вітаміну *D*, в два рази менше дози, що призводить до еритеми, але взимку в середніх і високих широтах неможливо отримати навіть таку невелику кількість УФ випромінювання.

Для здобуття інформації про регіональний розподіл поточних рівнів УФ випромінювання необхідно поєднувати супутникову інформацію (озон і хмарність) з наземними вимірами (для визначення абсолютної шкали). Так, завдяки використанню інформації про розподіл хмарності, отриманої з геостационарних метеорологічних супутників, складаються регіональні карти рівня УФ випромінювання. До прикладу, для Австрії, вони оновлюються кожні 15 хвилин, де існує щільна мережа станцій наземного виміру.

Аналіз досліджень і публікацій

Нижню межу УФ діапазону (30÷80 нм) зазвичай пов'язують з мінімально досяжною довжиною хвилі в спектрі випромінювання УФ джерел на основі гелієвих ламп (лінії He^{+2} , довжина хвилі 30,4 нм) [3]. З розвитком у 90-і роки промислових технологій фотолітографії на довжині хвилі 13,5 нм, було поширено поняття "глибокий" УФ від нижньої межі $\lambda=30$ нм далеко в короткохвильову частину спектру, раніше звану "м'який рентгенівський діапазон", тобто $\lambda=10$ нм.

Діапазон УФ випромінювання зазвичай розділяють три частини: довгохвильовий, або *UV-A*: $\lambda=320\text{--}400$ нм; середньохвильовий, або *UV-B*: $\lambda=280\text{--}320$ нм; короткохвильовий, або *UV-C*: $\lambda=120\text{--}280$ нм.

Межа $\lambda=320$ нм діапазону *UV-A* визначається короткохвильовою межею пропускання звичайного скла. Випромінювання *UV-C* коротше за $\lambda=280$ нм поглинається в озоновому шарі атмосфери на висоті 40–50 км. (рис.1). У результаті природний УФ фон на поверхні Землі складається лише з *UV-A* і частково *UV-B* спектрів, що складає не більше 1,5% від сонячної енергії, що досягає поверхні Землі, при вихідній долі УФ спектру у випромінюванні Сонця близько 5%. Найменша довжина хвилі, що спостерігалася, на Землі 286 нм була виявлена у полярній області Землі (рис.1) [4, 5].

Окрім озону сильне поглинання УФ випромінювання в атмосфері спричинює молекулярний кисень O_2 , смуги поглинання якого починаються з $\lambda=200$ нм і менше, та мають максимум поглинання на довжині $\lambda=186$ нм. Смуги поглинання УФ в атмосфері мають також монооксид вуглецю $\lambda=130$ нм, водяні пари $\lambda=140$ нм, метан $\lambda=147$ нм, аміак: $\lambda=220$ нм. Випромінювання яке коротше за $\lambda=120$ нм ("вакуумний УФ") швидко поглинається у всіх матеріалах і використовується лише у вакуумній спектроскопії і позаатмосферній астрофізиці.

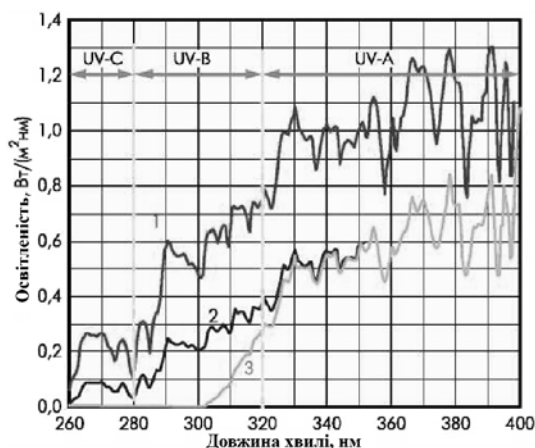


Рис. 3. Спектр сонячного випромінювання в УФ діапазоні.

Жорстке УФ випромінювання (*UV-C* і коротші хвилі) володіє сильною фотохімічною дією, що призводить до руйнування хімічних зв'язків в органічних молекулах і агломератах, утворенню вільних радикалів, активації хімічних реакцій, що викликає радіаційні пошкодження біологічних тканин і структур [6]. Тому моніторинг озонового шару здійснюється, перш за все, з метою контролю випромінювання діапазону *UV-C* на поверхні Землі. Він втілений у ряді проектів і програм вимірів, як на поверхні Землі, так і космічними апаратами (починаючи із супутників "Коперник", *IUE*, "Астрон", *Nimbus* [7,8]).

Оскільки випромінювання Сонця в діапазоні *UV-C* майже повністю поглинається верхніми шарами атмосфери (рис.3), то на поверхні Землі воно може бути присутнім лише у штучних високотемпературних джерелах, наприклад в спектрі випромінювання сильно нагрітих газів ($T>4000$ K), електричних розрядів і дуг.

Цей факт, а також лінійчатий спектр УФ випромінювання більшості джерел, дозволяють вважати, що сонячне випромінювання не впливає на УФ детектори (УФД) *UV-C* діапазону при виявленні та ідентифікації джерел УФ випромінювання, у тому числі і на тлі яскравих джерел видимого і ІЧ-випромінювання. Інше важливе застосування таких детекторів – моніторинг небезпечних для людини доз УФ випромінювання в діапазоні *UV-C*, наприклад, на станціях УФ очищення води.

Найбільш поширені штучні джерела УФ випромінювання – ртутні, дейтерієві, дугові лампи. Максимум випромінюваної енергії в ртутних лампах низького тиску знаходиться на довжині $\lambda=254$ нм. У ртутних лампах високого тиску можна отримати лінії істотно більшої ін-

тенсивності на довжинах хвиль: $\lambda=254, 297, 303, 313$ і 365 нм, при цьому лінія $\lambda=254$ нм діапазону *UV-C* втрачає своє домінуюче значення.

Класифікація ультрафіолетових детекторів

Існує дуже багато детекторів (сенсорів) УФ випромінювання – УФ детекторів (УФД), тому мета даної статі полягає в проведенні огляду УФД і визначенні вимог, які висуваються до детекторів такого типу та вибору оптимальних детекторів для задач екологічного моніторингу.

УФД, як і детектори випромінювання інших спектральних діапазонів, діляться на два великі класи: фотодетектори, або фотонні детектори і термодетектори (рис.4).

У фотодетекторах фотони, що поглинаються матеріалом детектора, при взаємодії з електронами змінюють електричні характеристики детектора, що відображається рівнем виміряного електричного сигналу. У термодетекторах поглинання фотонів призводить до підвищення температури і зміни температурних властивостей детектора. Так, в піроелектричних детекторах вимірюють зміну внутрішньої електронної поляризації, в болометрах – електричний опір тощо.

Фотодетектори володіють, як правило, кращою чутливістю і тому набули більш широкого застосування, тоді як термодетектори використовуються в основному для еталонних вимірів.

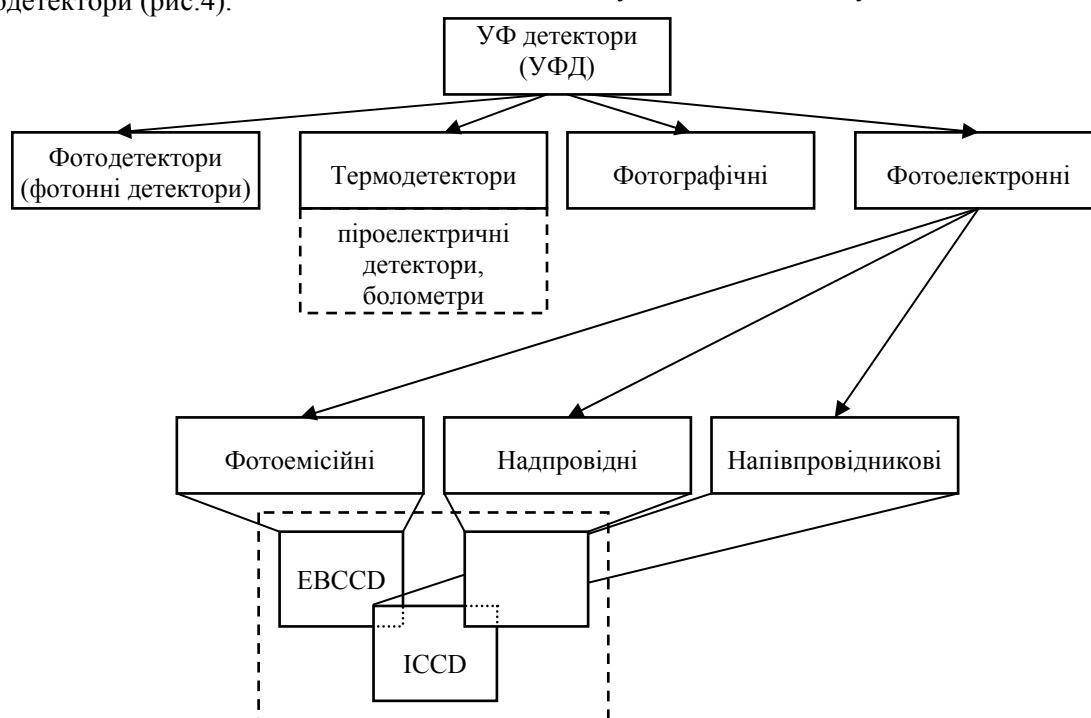


Рис. 4. Структура поділу типів УФД.

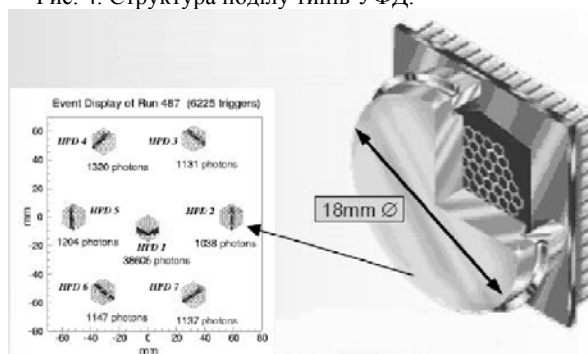


Рис. 5. УФД типу EBCCD.

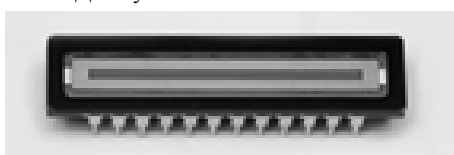


Рис. 6. УФД типу ICCD.

УФД також можна розділити на дві групи [9]: фотографічні та фотоелектронні.

Фотоплівки і інші фотоматеріали дозволяють записати велику кількість інформації при одноразовому експонуванні, але мають серйозні недоліки: низьку і нелінійну чутливість, вузький динамічний діапазон, неможливість фільтрації фону і паразитне засвічення емульсії. Тому, сьогодні вони використовуються зрідка, в основному для наукових досліджень.

Фотоелектронні УФД діляться на три класи: фотоемісійні, напівпровідникові і надпровідні. Ці типи УФД можуть перетинатися в гібридних пристроях, наприклад, фотоемісійні електрони можуть реєструватися при їх дії на напівпровідникову (н/п) матрицю ПЗЗ (прилад з зарядо-

вим зв'язком – детектори типу *EBCCD* (*Electronically Bombarded Intensified Charge Coupled Device*) і *ICCD* (*Intensified Charge Coupled Device*) (рис 5,6) [10].

У фотоемісійних приладах падаючий фотон вибиває з поверхні фотокатода електрон, який прискорюється у вакуумі і рухається до анода при прикладанні електричного потенціалу. Електричний струм детектора пропорційний числу фотоелектронів, тобто інтенсивності падаючого випромінювання. При цьому ефективність зовнішнього фотоэффекту і спектрально-енергетичні характеристики такого детектора визначаються робочою функцією поверхні фотокатода. Переваги такого детектора: висока чутливість і зручності у роботі з ним; недоліки: низька квантова ефективність, спектральна залежність відгуку детектора і залежність ефективності від якості і чистоти поверхні детектора.

У н/п детекторах фотони поглинаються усею об'єму н/п матеріалу, створюючи пари "електрон – дірка" і відповідну провідність. Цей клас детекторів використовує внутрішній фотоэффект, в якому енергія фотона має бути значною, щоб фотоелектрон здолав заборонену зону і перейшов у зону провідності. У фотодіодах (ФД), діодах Шоттки і структурах типу метал – ізолятор – напівпровідник для подолання потенційного бар'єру прикладається зовнішнє електричне поле. Зовнішній фотострум детектора пропорційний числу фотонів що детектуються. Переваги такого детектора: широкий робочий спектр, хороша лінійність, висока квантова ефективність, широкий динамічний діапазон, можливість виготовлення великих зображаючих матриць; недолік – наявність ефекту старіння під дією УФ випромінювання.

Надпровідні УФД – це, по суті, термодетектори, засновані на зміні фізичного стану речовини при збільшенні внутрішньої енергії матеріалу через поглинання УФ фотонів.

Зупинимось більш детально на кожному з типів УФД. Для цього сформулюємо вимоги до УФ – детекторів. До УФД будь-якого типа зазвичай висувають такі вимоги:

– низька чутливість до видимого світла (*solar blind*). Поза земною атмосферою на один сонячний фотон в діапазоні 100–200 нм приходить 10^4 – 10^6 фотонів у видимому і ІЧ-діапазонах. Це співвідношення збільшується на поверхні Землі. Тому простого використання пропускаючих УФ фільтрів з послабленням 10^{-4} – 10^{-3} недостатньо, якщо детектор має добру чутливість

у видимому і ІЧ-діапазонах;

– висока квантова ефективність виявлення (КЕВ). У оптичних системах УФ діапазону зі значною втратою на пропускання, це значення може дуже відрізнятись від квантової ефективності фотокатода або ПЗЗ-матриці. У результаті застосування спеціальних фільтрів і вікон для блокування видимого світла КЕВ фотоемісійних УФД зменшується на порядок: від ~50% до 2–5% (рис.7).

– широкий локальний динамічний діапазон: відношення максимального значення потоку в даній точці детектора до мінімального сигналу, рівень якого складає 3σ від рівня шуму. При інтегруванні за площею детектора отримується інтегральний динамічний діапазон детектора. Цей параметр особливо важливий для чутливих фотоелектронних детекторів і при розробці швидкісних позиційно-чутливих детекторів;

– низький рівень фонових сигналів і шумів, що визначає практичну чутливість приладу і контраст зображення.

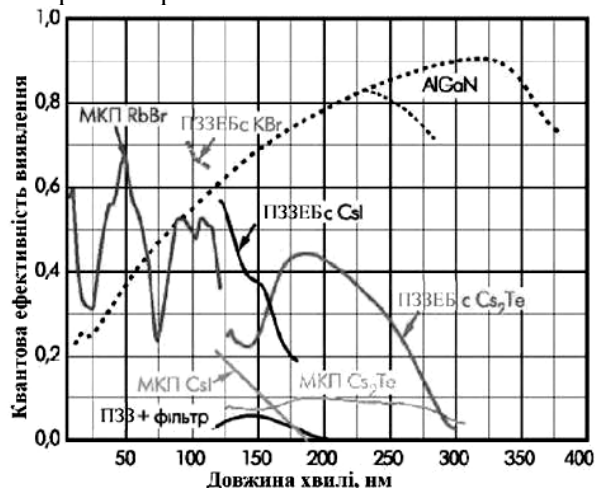


Рис. 7. КЕВ для основних типів УФД.

Фотоемісійні детектори і камери для УФ діапазону

Перші фотоемісійні УФД були розроблені на основі мікроканальної пластини (МКП) для встановлення на супутниках Землі ще в 60-і роки [5, 11, 12]. На відміну від існуючих тоді н/п кремнієвих детекторів, чутливих до видимого світла, фотоемісійні прилади були нечутливі до фотонів видимого і ІЧ-діапазонів.

З цієї ж причини у фотоемісійних УФД практично відсутній темновий (тепловий) шум при кімнатній температурі. Було відмічено, що такі детектори володіють лінійною чутливістю до падаючого випромінювання, що полегшує калібрування.

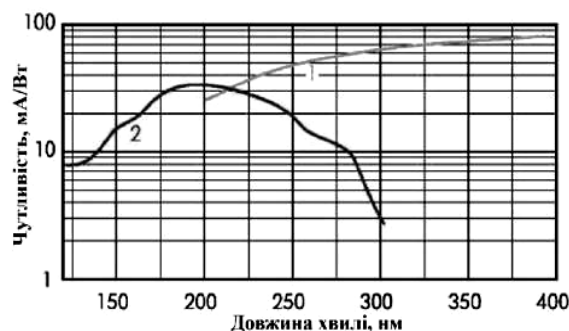


Рис. 8. Спектральна чутливість вакуумних УФД.

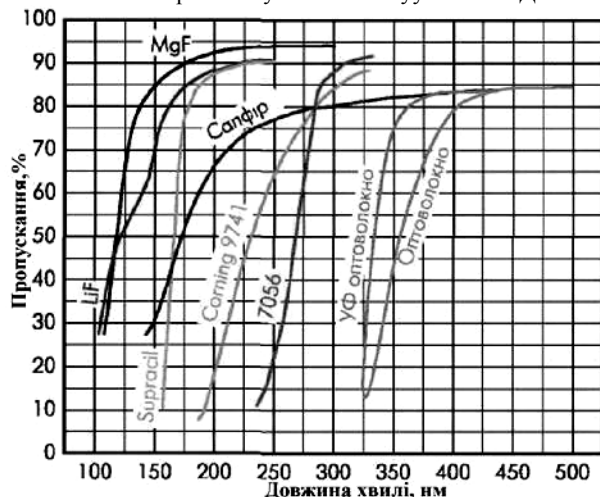


Рис. 9. Смуги пропускання оптичних матеріалів, які використовуються у вікнах УФД.

Ефективність фотоemisійних УФД визначається прозорістю вхідного вікна детектора і квантовою ефективністю фотокатода (рис. 8,9). Для прикладу на рис.8 показані спектральні характеристики ФД з фотокатодами CsTe і NaKCsSb [5].

По своїй конструкції (виключаючи матеріали) прилади цього типу мало відрізняються від ЕОП і ФЕУ (див далі), що працюють у видимому і ІЧ-діапазонах [12, 13].

Вакуумні УФ фотодіоди

Вакуумні ФД-детектори фотоemisійного типу, засновані на вакуумних технологіях. Прикладами таких УФД є вакуумні ФД серії F4xxx, що виробляються компанією *ITT Industries* (США) [5]. Вакуумні ФД мають коаксіальну схему з діаметром фотокатода 9,5–44 мм і робочою напругою 1–2,5 кВ. Час спрацьовування складає 0,1–0,5 нс, лінійний динамічний діапазон досягає 10^8 .

Конструкція вакуумного ФД з масивним катодом прямого утворення наведена на рис.10. Сурма наноситься на товсту підкладку з неіржавіючої сталі, і фотокатод формується всередині скляного корпусу ФД у лужному середовищі,

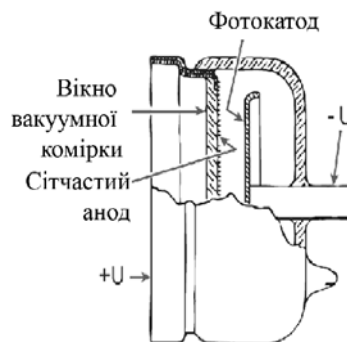


Рис. 10. Вакуумний УФД.

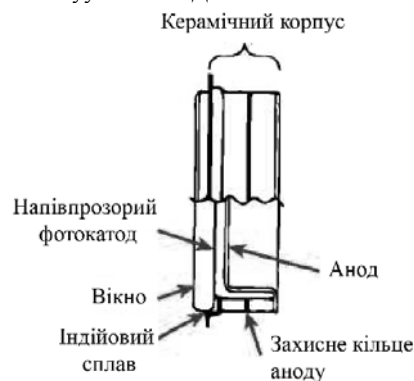


Рис. 11. Фотоemisійний УФД.

наприклад, в парах цезію, в умовах надвисокого вакууму. При роботі детектора випромінювання потрапляє крізь його вікно і анодну сітку на фотокатод і вибиває фотоелектрони, які, рухаючись до анода, створюють електричний сигнал.

На рис.11 показана конструкція вакуумного ФД з напівпрозорим катодом непрямого утворення ("метод перенесення"). У цьому випадку тонкий фотокатод виготовляється окремо у вакуумній камері, після чого він встановлюється поблизу поверхні анода на відстані 100–200 мкм. Потім вся конструкція жорстко фіксується в керамічній оправі з використанням індій-вісмуткового сплаву. У цьому випадку при виготовленні ФД не потрібно використовувати високий робочий вакуум, а мала відстань між катодом і анодом дозволяє проводити швидкісні виміри. Так, ФД цього типу *ITT F4014* (США) має час спрацьовування 68 пс (при напрузі на фотокатоді $U=6$ кВ) [5].

Окрім з'єднань на основі цезію для фотокатодів можна використовувати широкозонні н/п з'єднання: GaN, алмаз і SiC. Наприклад, алмазний фотокатод розміром 3×12 мм², що використовується у УФД *Hamamatsu R7639*, має квантову ефективність виявлення (КЕВ) близько 50% для $\lambda=155$ нм і 20% для $\lambda=120$ нм (напруга $U=1$ кВ) [14].

Малий час спрацьовування вакуумних ФД і

можливість точного калібрування зумовили їх широке використання при дослідженні фізики вибуху і в точних астрофізичних вимірах, не дивлячись на низький рівень КЕВ. Так, УФД, встановлений на супутниковій системі *Solar Backscatter Ultraviolet (SBUV) Instrument*, з кварцовим вікном і напівпрозорим фотокатодом Rb–Cs–Sb генерує сигнал 56 мА/Вт при КЕВ 18% для $\lambda=380$ нм [5].

Комерційні вакуумні ФД можуть використовуватись як детектори відкритого вогню. Так, УФД *Hamamatsu UVtrom* [5] вагою декілька грам і корпусом із спеціального скла має короткохвильову межу прозорості 185 нм, пікову чутливість ~ 10 пВт/см² ($\lambda=200$ нм), робочий діапазон $\lambda=185\div 300$ нм і забезпечує виявлення відкритого полум'я при яскравому сонячному світлі за 10 мкс.

Мікротрубові пластини і фотоелектронні помножувачі

Фотоелектронні помножувачі (ФЕП), електронно-оптичні перетворювачі (ЕОП) і МКП застосовуються у приладах нічного бачення. Їх висока чутливість і великий коефіцієнт підсилення зумовили популярність таких детекторів на основі скляних ФЕП і МКП у космічних і ядерних дослідженнях та в УФ діапазоні. Прогрес у розробці УФД цього типу був пов'язаний з покращенням просторової роздільної здатності МКП завдяки використанню покращених методів фотолітографії при виробництві та застосуванням нових матеріалів для фотокатодів.

Діаметр робочої області УФД типу ФЕП складає 6–460 мм [5], фотокатоли формуються на поверхні пропускних вікон детектора. Фотокатоли прямого утворення застосовуються у ФЕП рідше, ніж у вакуумних ФД через труднощі підтримання надвисокого вакууму у складних схемах ФЕП.

Прикладом фотоemisійного УФ діапазону *UV-B* з МКП, нечутливого до видимого світла, є детектор, описаний у [5]. Він складається з кварцового вікна, фотокатоли Rb–Cs–Te діаметром 25 мм, МКП з посиленням понад 10^6 і одиночного анода, змонтованих у керамічному корпусі. Прилади цього типу можуть ефективно використовуватись для виявлення слабких джерел відкритого полум'я в умовах світлого часу доби.

Сьогодні фотоemisійні ФЕП і ФД випускаються для УФ діапазону з МКП та без них багатьма компаніями: *Burle Industries*, *Hamamatsu*,

ITT Industries, *Litton Industries*, *Ball Aerospace System Group*, *Schlumberger Electro-Optics* і тд.

Використання фотокатодів на основі GaN

Особливий інтерес привертає використання нових н/п матеріалів для фотокатодів на основі нітридів елементів III групи, таких як GaN. Не зважаючи на труднощі вирощування GaN на МКП, нечутливість цього фотокатода до видимого випромінювання його передові параметри привернули велику увагу до розробки УФД на його основі. Широка заборонена зона чистого GaN дозволяє застосовувати цей матеріал практично без фільтрації видимого світла.

Для використання GaN в якості матеріалу фотокатола потрібно, щоб він мав низьку (або негативну) роботу виходу. Як показано у [16, 17], при використанні акцепторних домішок магнію у GaN і нанесенні на поверхню фотокатола надтонкого (порядку 1 нм) шару цезію можна отримати зігнуті форми енергетичних рівнів валентної зони і зони провідності, при цьому ефективна негативна спорідненість до електрона дозволяє досягти КЕВ більше 50% [17]. Основна складність полягає у край нерівномірному розподілі атомів магнію на поверхні зразка, що призводить до зрачної неоднорідності поля фотоemisії.

На рис.12 наведені дані КЕВ для фотокатола GaN:Mg, отримані на плівках, які нанесені на різні підкладки: сапфір і нітрид – алюмінію [18].

Фотокатоли на основі GaN можна використати і при створенні УФ зображуючих систем, з фотокатодами як відбиваючого, так і проникаючого типів, без фільтрів блокування видимого та інфрачервоного спектрів [10].

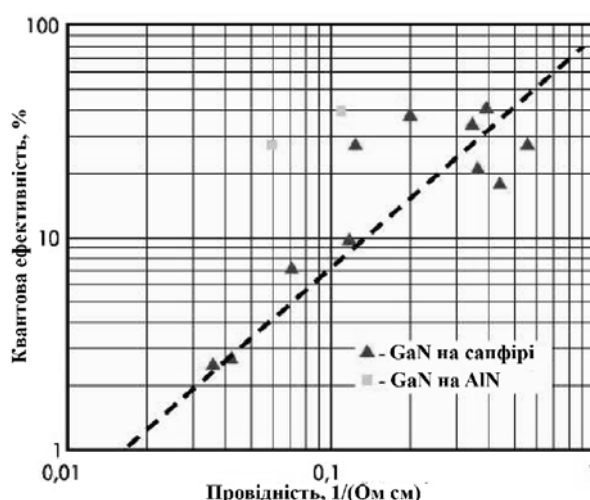


Рис. 12. Змінена КЕВ фотокатодів (на базі GaN).

Позиційно-чутливі фотоемісійні детектори

Такі прилади базуються на перетворенні УФ у видимий діапазон з подальшою реєстрацією зображення на камеру ТБ або ПЗЗ-матрицю. Найбільш розповсюджена контактна схема, в якій фотокатод практично стикається з люмінесцентним екраном, а для оптичного сполучення ПЗЗ-матриці і екрану використовується оптоволоконний шнур. Переваги даної схеми – у швидкості зчитування УФ сигналу на ПЗЗ-матрицю (декілька наносекунд) і можливості виготовлення камер з великим робочим полем, до 75 мм [5, 19].

Використання підсилення за допомогою МКП дозволяє отримати КЕВ детектора близько 10–30% у варіанті *solar blind* з робочим діапазоном 120–250 нм [3, 5].

Іншим прикладом служать ПЗЗ-матриці з прямою дією прискорених фотоелектронних пучків, або "ПЗЗ-матриці електронного бомбардування" (рис.5). У цих приладах електрони фотокатоду прискорюються електростатичним полем в декілька кіловольт і падають на ПЗЗ-матрицю зворотного засвічування. На кожному фотоелектроні з енергією 3,6 еВ у середньому припадає один вторинний електрон.

Переваги зображаючих детекторів цього типу – висока КЕВ (до 70%, а для нечутливих до видимого діапазону до 40%), недоліки – великі розміри і вага, необхідність високовольтного живлення (~10 кВ), а також застосування недостатньо світлосильних ($\leq f/8$) об'єктивів.

На рис.7 наведені значення КЕВ основних типів фотоемісійних зображаючих детекторів УФ діапазону [9]. Можна також використовувати кремнієві ПЗЗ-матриці з УФ фільтрами, але їх КЕВ не перевищує 10%.

Фотоемісійні позиційночутливі детектори з МКП залишаються найбільш популярним типом УФД у космічних апаратах різного призначення.

Напівпровідникові УФ детектори

Детектори на основі широкозонних напівпровідників розробляються протягом останніх 15 років [20, 21]. Як матеріали УФД можуть використовуватись тонкоплівкові діамантові покриття (ширина забороненої зони $E_g=5,4$ еВ), карбід кремнію ($E_g=2,9$ еВ) і нітриди елементів III групи: AlN , GaN , InN ($E_g=3,4-6,2$ еВ). Детектори цього типу можна використати у схемах ФД і фотоопорів. Вони володіють високою швидкістю і явно вираженою залежністю падаючого випромінювання від довжини хвилі.

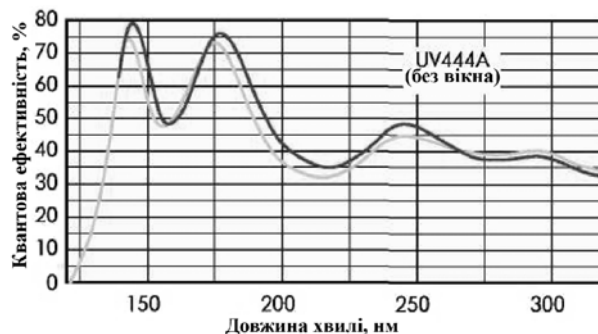


Рис. 13. Зміна КЕВ н/п детектора через місяць після початку експлуатації.

В УФ діапазоні через великі енергії фотонів можна використовувати більшість н/п детекторів видимого діапазону, але з низькою КЕВ через сильне поглинання УФ випромінювання вузьким приповерхневим шаром. Сьогодні, як показано у [22, 23], можливо створити ефективний кремнієвий УФД з КЕВ до 50%. Проблеми виникають при їх тривалій (декілька років) експлуатації через постійну дію УФ випромінювання, вологі й утворення сильно поглинаючих шарів оксиду кремнію товщиною 5–20 нм на границях розділу (рис.13 [22]).

УФД на основі н/п з широкою забороненою зоною (наприклад, в GaN – 3,4 еВ) не вимагають спеціального охолодження, як кремнієві детектори видимого діапазону (заборонена зона кремнію – 1,2 еВ). Вони малочутливі до видимого світла. Усі н/п детектори мають малу вагу і габарити, споживають малу потужність при низькій напрузі (~30 В), що дає низький рівень шуму. Їх недолік – істотно менша, ніж у фотоемісійних УФД, чутливість і робоча площа.

Демонстрація першого УФД на основі GaN в 1992 році [24] стимулювала розробки цих н/п приладів. У порівнянні з кремнієвою електронікою н/п прилади на основі GaN (а також алмазу і SiC) працюють при вищій робочій температурі і підвищеній вологості. Так, за звичай пристрої на основі кремнію мають максимальну робочу температуру 125°C, а транзистори на основі GaN залишаються працездатними і при 425°C [25].

Додавання до широкозонного н/п GaN алюмінію призводить до збільшення ширини забороненої зони, а додавання атомів індію до її звуження. Підбираючи склад потрібної структури типу $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ або $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, можна створювати УФД з різною спектральною чутливістю практично у всьому діапазоні 200–600 нм (рис.14) [25].

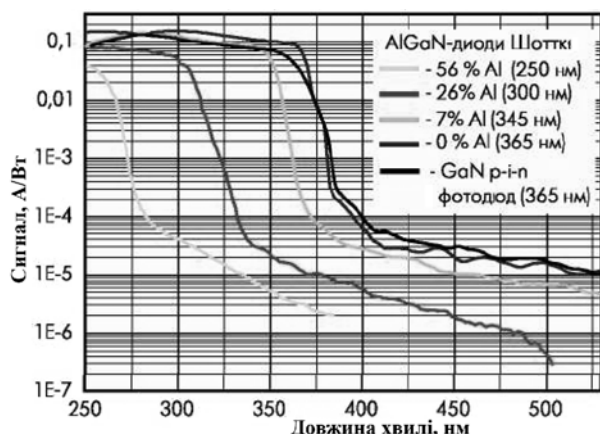


Рис. 14. Вплив алюмінію на довгохвильову границю чутливості ФД.

Н/п з'єднання на основі GaN можна використовувати для створення бар'єрів у *p-i-n*-діодах [25, 26], діодах Шотткі (бар'єр метал – н/п) [26–28], а також у структурах типу "метал – н/п – метал" [29]. Тонкі (0,2–1,0 мкм) н/п шари зазвичай наносять методом молекулярної епітаксії на сапфірові підкладки. Розмір робочої поверхні такого н/п детектору невеликий і зазвичай складає 0,1–2,0 мм.

Створюючи складніші структури, можна істотно збільшити ефективність фотодетекторів. Повідомлялося, що на структурах типу *p-i-n* була досягнута внутрішня квантова ефективність 86% при часі спрацьовування ~300 пс [20], що істотно перевищує параметри кремнієвих УФД.

Н/п УФД можна використовувати для проведення точних вимірів біологічних доз УФ випромінювання. Згідно міжнародним стандартам *Commission International de l'Eclairage (CIE)*, спектральна чутливість детектора при таких вимірах повинна відповідати залежності реакції біологічних тканин від довжини хвилі УФ випромінювання. Необхідний вигляд спектральної функції детектора можна легко отримати при використанні н/п структур на основі GaN навіть без застосування спеціальних фільтрів, які потрібні при вимірі біодоз за допомогою кремнієвого або фотоемісійного УФД.

Фотодетектори на основі GaN ідеально підходять для виявлення джерел палаючого полум'я. Спектральну чутливість можна оптимізувати для ефективного виявлення фотодетектором джерел горіння шляхом підбору вмісту алюмінію у цих н/п з'єднаннях. На рис.14 показана спектральна чутливість ФД AlGaIn типу Шотткі з 56% вмістом алюмінію [25]. Маючи пік на довжині хвилі 250 нм, чутливість детектора падає

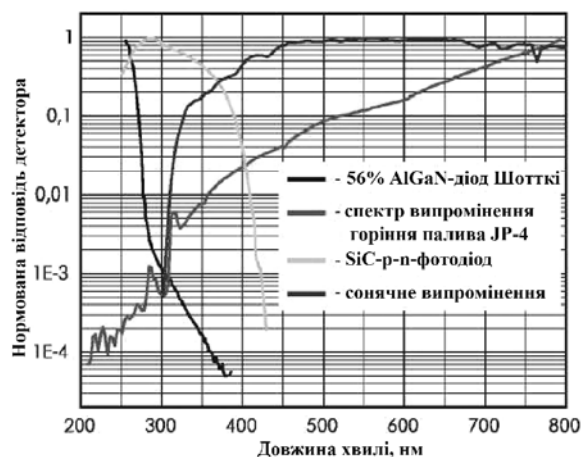


Рис. 15. Порівняльні характеристики чутливості ФД.

в 1000 разів на довжині хвилі 300 нм, що робить його малочутливим до сонячного світла.

З рис.15 видно, що для надійного виявлення по УФ випромінюванню полум'я від горіння палива реактивних літаків JP-4 потрібно, аби чутливість фотодетектора до УФ була в 10^6 – 10^7 разів більше, ніж до видимого світлового діапазону.

У порівнянні з н/п фотодетекторами на основі широкозонного н/п SiC, який при відповідному легуванні може давати провідність *n*- і *p*-типу, фотодетектори на основі нітридів елементів III і IV груп дають можливість створювати гетероструктури, які мають кращі омичні контакти [20]. Основні проблеми фотодетекторів на GaN – зменшення часу життя носіїв і зниження фотоемісійної ефективності, викликані великою (10^7 – 10^{10} см⁻¹) концентрацією дефектів в GaN-структурах. Можливе вирішення проблеми – використання для епітаксialного зростання іншої кристалічної підкладки, наприклад, Si [20].

УФД, виготовлені на основі плівок алмазоподібного покриття (товщина плівки 0,01–0,8 мм), які володіють н/п властивостями, також мають великий інтерес [30, 31], особливо для роботи з потужними джерелами УФ випромінювання, такими як ексимерні лазери. Проблеми тут пов'язані з невисокою якістю діамантових плівок, які наносяться.

Відзначимо, що всі описані структури н/п детекторів можливо використати для створення позиційно чутливих УФ приладів, у тому числі і невеликих зображуючих матриць [31].

Надпровідні УФ детектори

Надпровідні УФД зазвичай працюють при температурі 50–100 мК і вимагають використання криогенної техніки, що істотно ускладнює конструкцію приладів. Враховуючи, що такі детектори володіють чутливістю в широкому

спектральному діапазоні – від ІЧ до рентгенівського випромінювання, то при роботі в УФ діапазоні потрібно застосовувати спеціальні фільтри для виділення робочої спектральної області детектора.

Надпровідні УФД бувають трьох типів:

– перехідний детектор [32], температура якого підтримується поблизу температури переходу між провідним і надпровідним станами. Енергія поглинутого фотона приводить до зміни провідності на величину, достатню для детектування сигналу, для чого використовується надпровідний квантовий інтерферометр (СКВІД, *SQUID*);

– металевий магнітний калориметр [33]. Детектування тут також засноване на реєстрації зростання температури детектора через поглинання фотона, проте вимірюється зміна магнітних властивостей надпровідного матеріалу викликана зростанням температури, також включеного у замкнутий ланцюг інтерферометра СКВІД;

– куперівський детектор [34], дія якого заснована на тому, що випромінювання у надпровідному тунельному переході розбиває куперівські пари на дві квазічастинки, які можуть тунелювати через перехід. "Тіньовий" куперівський тунельний струм пригнічується магнітним полем, прикладеним паралельно площини тунельного переходу.

Перевага надпровідних УФД – можливість вимірювати величину сигналу як функцію енергії фотона у широкому енергетичному спектрі від рентгенівського випромінювання до видимого світла, що дозволяє поєднувати високу просторову і енергетичну роздільну здатність ($E/\Delta E \sim 4$) в одному приладі при використанні різних фільтрів в широкому спектральному діапазоні.

Недолік надпровідних УФД – їх порівняно низька квантова ефективність: 10–20%. У поєднанні із складністю виготовлення криогенних матриць (поки вдалося зробити зображуючу матрицю 32×32 [35]) низька ефективність не дозволяє розглядати сучасні надпровідні УФД як конкурентоздатні прилади цього класу.

Таблиця. 1. Порівняльні характеристики УФД.

Тип детектора	Переваги	Недоліки	Сфери використання	Фірма виробник
Фотодетектори	висока чутливість	висока ціна	широко розповсюджені у лабораторіях	<i>Advanced Photonix Inc</i> (США)
Термодетектори	- швидкий час термостабілізації, - низька чутливість до мікрофонів	висока ціна	використовуються переважно для еталонних вимірів і наукових досліджень	<i>Scitec Instruments Ltd</i> (Англія), <i>InfracTec GmbH</i> , <i>MicroHybrid Electronic GmbH</i> (Німеччина)

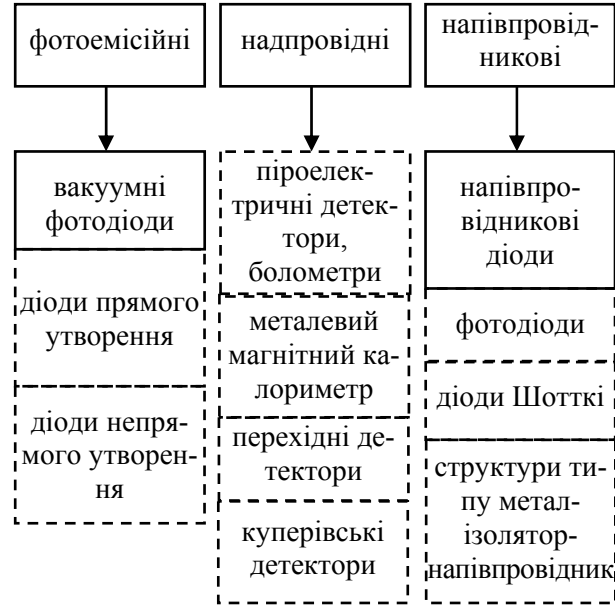


Рис. 16. Структура поділу фотоелектронних УФД.

Проте дослідження, що проводяться з метою підвищення їх квантової ефективності, можуть змінити ситуацію у майбутньому [36]).

Загальна структура поділу фотоелектронних УФД наведена на рис. 16.

Висновки

Розглянувши основні типи УФД можна сформулювати підсумовуючу таблицю 1.

Впродовж останнього десятиліття додатково до фотоемісійних приладів активно розробляються н/п УФД як простіші, дешевші і ефективніші пристрої, що пропонують нові можливості у цьому спектральному діапазоні. Подальший розвиток УФД цього типу визначатиметься успіхами у розвитку технології нанесення якісних тонкоплівкових покриттів.

Як видно з таблиці 1 по колонці переваг найкращими є напівпровідникові УФД.

Проте прогрес у покращенні характеристик і здешевленні технології виробництва УФД дозволить істотно розширити їх сферу застосування для контролю технології високотемпературного виробництва, виміри УФ біодоз, протипожежного моніторингу і систем екологічного моніторингу.

Фотографічні	<ul style="list-style-type: none"> - фіксують велику кількість інформації 	<ul style="list-style-type: none"> - низька чутливість, - нелінійна чутливість, - вузький динамічний діапазон, - неможливість фільтрації фону, - паразитне засвічення емульсії 	використовуються рідко, в основному для наукових досліджень	<i>Andor Technology plc</i> (Англія), <i>Photonic Science Ltd</i> (Англія)
Фотоемісійні	<ul style="list-style-type: none"> - висока лінійна чутливість до падаючого світла, - зручність в роботі, - відсутній темновий (тепловий) шум, - легкість калібрування 	<ul style="list-style-type: none"> - низька квантова ефективність, - потребують застосування світлофільтрів що блокують видимий спектр випромінювання, - спектральна залежність відгуку детектора, - залежність ефективності від якості і чистоти поверхні 	дослідження фізики вибуху, супутники, астрофізичні дослідження	<i>ITT Industries</i> (США), <i>Hamamatsu</i> (Японія), <i>Burle Industries</i> (США), <i>Litton Industries</i> (США), <i>Ball Aerospace System Group</i> (США), <i>Schlumberger Electro-Optics</i> (США)
Надпровідні	<ul style="list-style-type: none"> - можливість вимірювати величину сигналу як функція енергії фотона, - широкий енергетичний спектр від X-хвильового випромінювання до видимого світла 	<ul style="list-style-type: none"> - порівняно низька квантова ефективність (10-20%), - потреба у використанні криогенної техніки, - потреба застосування світлофільтрів 	використовуються переважно для еталонних вимірів і наукових досліджень	<i>InfraTec GmbH</i> (Німеччина), <i>Micro-Hybrid Electronic GmbH</i> (Німеччина)
Напівпровідникові	<ul style="list-style-type: none"> - широкий робочий спектр, - нечутливість до видимого випромінювання - добра лінійність, - висока квантова ефективність, - широкий динамічний діапазон, - можливість виготовлення великих зображаючих матриць, - мала ємність, - мала чутливість до темнових стримів, - низька ціна 	<ul style="list-style-type: none"> - наявність ефекту старіння під дією УФ випромінювання, - складність вирощування кристалів 	радіометри, портативні дозиметри, медичні установки виробничі вимірювання	<i>Genicom Co., Ltd</i> (США), <i>Hamamatsu</i> (Японія), <i>ITT Industries</i> (США), <i>Burle Industries</i> (США), <i>Litton Industries</i> (США), <i>Ball Aerospace System Group</i> (США), <i>Schlumberger Electro-Optics</i> (США)

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.unep.fr/ozonaction/information/mmcfiles/3972-r-policyhandbook.pdf>.
2. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.oosa.unvienna.org/pdf/reports/ac105/AC105_968R.pdf.
3. Мейер А., Зейтц Э. Ультрафиолетовое излучение. – М.: ИИЛ, 1952. –459 с.
4. Krotkov N.A., Bhartia P.K., Herman J.R., Fioletov V., Kerr J. Satellite estimation of spectral surface UV irradiance in the presence of tropospheric aerosols 1.

Cloud-free case. // Journal of geophysical research. – 1998. – **103**, No.D8. – P. 8779-8793.

5. Johnson C.B. Review of ultraviolet detector technology. // Proceedings of the Meeting, Santa Clara. – 1990. – P. 2-15.
6. Москаленко Е.И. Методы внеатмосферной астрономии. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. –280 с.
7. Rao P.K., Holmes S.J., Anderson R.K., Winston J.S., Lehr P.E. Weather Satellites: Systems, Data, and Environmental Applications American Meteorological Society. – Boston, 1990. –503 p.

8. Troshichev O., Gabis I. Effects of solar UV irradiation on dynamics of ozone hole in Antarctica // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics – 2005. – **67**, No.1-2. – P.93-104.
9. Joseph C.L. UV image sensors and associated technologies // Experimental Astronomy. – 1995. – **6**, No.1-2. – P.97-127.
10. Joseph C.L. Advances in Astronomical UV Image Sensors and Associated Technologies // Proceedings of the SPIE. – 1997. – **2999**. – P.244-258.
11. Barstow M.A., Fraser G.W., Milward S.R. X-ray Instrumentation in Astronomy // Proceedings of the SPIE. – 1985. – **697**. – P.352.
12. Дыкин А.В., Овечкин Ю.А. Электронные и полупроводниковые приборы. – М.: Энергия, 1971. – 375с.
13. Берковский А.Г., Гаванин В.А., Зайдель И.Н. Вакуумные фотоэлектронные приборы. – М.: Энергия, 1976. – 272 с.
14. Ulmer M. Future detectors for space applications // Proceedings of the SPIE. – 2006. – **6189**. – P.61890.
15. Photomultiplier Tubes: photomultiplier tubes and related products. - Hamamatsu Photonics, 2006. [Электронный ресурс] – Режим доступа – http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/PMT_TPMZ0001E01.pdf
16. Uchiyama S., Takagi Y., Niigaki M., Kan H., Kondoh H. GaN-based photocathodes with extremely high quantum efficiency // Applied Physics Letters. – 2005. – **86**, No.10. – P.103511.
17. Stock J., Hilton G., Norton T., Woodgate B., Aslam S., Ulmer M. Progress on development of UV photocathodes for photon-counting applications at NASA GSFC // Proceedings of the SPIE. – 2005. – **5898**. – P.95-102.
18. Ulmer M., Wessels B., Siegmund O. Advances in wide-bandgap semiconductor based photocathode devices for low light level applications // Proceedings of the SPIE. – 2003. – **5164**. – P.18.
19. Clampin M. UV-Optical CCDs for Space Instrumentation // Optical Engineering. – 2002. – **41**, No.6. – P.1185-1191.
20. Munoz E., Monroy E., Pau J. L., Calle F., Omnes F., Gibart P. III - nitrides and UV detection // Journal of Physics. – 2001. – **13**. – P.7115-7137.
21. Razeghi M., Rogalski A. Semiconductor ultraviolet detectors // Journal of Applied Physics. – 1996. – **79**. – P.7433-7474.
22. Korde R., Canfield L. Randall, Wallis B. Stable, high quantum efficiency silicon photodiodes for vacuum-UV applications // Proceedings of the SPIE. – 1988. – **932**. – P.153-160.
23. Talmi Y., Simpson R.W. Self-scanned photodiode array: a multichannel spectrometric detector // Applied Optics. – 1980. – **19**, No.9. – P.1401-1414.
24. Khan M., Kuznia J., Olson D., Van Hove J., Blasingame M. Reitz L. High-responsivity photoconductive ultraviolet sensors based on insulating single-crystal GaN epilayers // Applied Physics Letters. – 1992. – **60**, No.23. – P.2917-2919.
25. Chow P., Klaassen J., Van Hove J., Wowchak A., Polley C., King D. Group III nitride materials for ultraviolet detection applications // Proceedings of the SPIE. – 2000. – **3948**. – P.295-303.
26. Li T., Wang S., Beck A.L., Collins C.J., Yang B., Dupuis R.D., Carrano J.C., Schurman M.J., Ferguson I.T., Campbell J.C. High quantum efficiency Al_xGa_{1-x}N/GaN based ultraviolet p-i-n photodetectors with a recessed window structure // Proceedings of the SPIE. – 2000. – **3948**. – P.304-310.
27. Vanhovea N., Johna J., Lorenza A., Chenga K., Borghsa G., Haverkortb J.E.M. ITON Schottky contacts for GaN based UV photodetectors // Applied Surface Science. – 2006. – **253**, No.5. – P.2930-2932.
28. Deelman P., Bicknell-Tassius R.N., Nikishin S., Kuryatkov V., Temkin H. Low-noise GaN Schottky diodes on Si(111) by molecular beam epitaxy // Applied Physics Letters. – 2001. – **78**. – P.2172-2175.
29. Lee Y., Hassan Z., Yam F.K., Abdullah M.J., Ibrahim K. Comparative study of the electrical characteristics of metal-semiconductor-metal (MSM) photodiodes based on GaN grown on silicon // Applied Surface Science. – 2005. – **249**. – No.1-4. – P.91-96.
30. Marchywka M., Hochedez J.F., Geis M.W., Socker D.G., Moses D., Goldberg R.T. Ultraviolet photoreponse characteristics of diamond diodes // Applied Optics. – 1991. – **30**, No.34. – P.5010-5013.
31. Conte G., Mazzeo G., Salvatori S. Diamond Deep-UV position sensitive detectors // Proceedings of the SPIE. – 2006. – **6189**. – P.618910.
32. Burney J., Bay T.J., Barral J., Brink P.L., Cabrera B., Castle J.P., Miller A.J., Nam S.W., Rosenberg D., Romani R.W., Tomada A. Transition-edge sensor arrays for UV optical-IR astrophysics // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – 2006. – **559**. – P.525-527.
33. Fleischmann A., Enss C., Seidel G.M. Optimization of magnetic calorimeters // Nuclear Instruments and Methods in Physical Research A. – 2004. – **520**, No.1-3. – P.48-51.
34. Verhoeve P., Martin D.D.E., Hijmering R.A., Verveer J., van Dordrecht A., Sirbi G., Oosterbroek, T., Peacock A. S-Cam 3: Optical astronomy with a STJ-based imaging spectrophotometer // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – 2006. – **559**, No.2. – P.598-601.
35. Kelley L.R. The X-ray microcalorimeter instruments on the Astro-E2 and Constellation-X X-ray observatories // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – 2004. – **520**, No.1-3. – P.364-367.
36. Артюков. И. Детекторы ультрафиолетового излучения // Фотоника. – 2008. – **5**. – С.26-33.