

Фотодиоди

Анотація.

Проведені дослідження p-n-фотодіодів на основі високоомного кремнію та α -, рентгенівських детекторів сцинтилятор-фотодіод. Представлені результати розробки конструкції та технології виготовлення кремнієвих p-n-фотодіодів для сцинтиелектронних детекторів, розглянуті їх електрофізичні і оптичні параметри. Наведені спектрометричні характеристики α -, рентгенівських детекторів сцинтилятор-фотодіод. Розроблені методи контролю технології виготовлення кремнієвих p-n-фотодіодів та оцінки їх якості з допомогою електрофізичних і оптичних характеристик та спектрів прямої реєстрації низькоенергетичного α -, рентгенівського випромінювання.

Аннотация.

Проведены исследования p-n-фотодиодов на основе высокоомного кремния и α -, рентгеновских детекторов сцинтиллятор-фотодиод. Представлены результаты разработки конструкции и технологии изготовления кремниевых p-n-фотодиодов для сцинтиэлектронных детекторов, рассмотрены их электрофизические и оптические параметры. Приведены спектрометрические характеристики α -, рентгеновских детекторов сцинтиллятор-фотодиод. Разработаны методы контроля технологии изготовления кремниевых p-n-фотодиодов и оценки их качества с помощью электрофизических и оптических характеристик и спектров прямой регистрации низкоэнергетического α -, рентгеновского излучения.

Annotation.

The researches of p-n- photo diodes on the basis of high-resistance silicon and α -, X-ray detectors with scintillator-photo diode are carried out. The results of development of a design and technology of manufacturing silicon p-n- photo diodes for scintielelectronic detectors are submitted, their electrophysical and optical parameters are considered. The spectrometric characteristics of the α -, X-ray detectors scintillator-photo diode are given. The methods of the control of technology manufacturing of silicon p-n- photo diodes and estimation of their quality with the help of the electrophysical and optical characteristics and spectra of direct registration low energy α -, X-ray radiation are developed.

Вступ

Кремнієві p-n фотодіоди є дуже перспективними для використання в детекторах сцинтилятор-фотодіод, які призначені для реєстрації α - і рентгенівських випромінювань. До цих пір для реєстрації α -, рентгенівських випромінювань переважно використовуються детектори типу сцинтилятор-фотопомножувач. В останній час проводяться дослідження і розробки з метою заміни фотопомножувачів кремнієвими p-n фотодіодами, тому одним із актуальних завдань є створення спеціалізованих кремнієвих p-n фотоприймачів для сцинтиляторних блоків детектування. Цьому питанню присвячена велика кількість публікацій [1-7]. Перевагами детекторів сцинтилятор-фотоприймач є можливість мініатюризації приймально-детектуючих каналів приладів, низька напруга живлення, мала споживана потужність і інші. Однак створенню подібних фотоприймачів заважають серйозні проблеми, пов'язані з надзвичайно високими вимогами до їх параметрів [1], [7], що зумовлено необхідністю реєструвати дуже слабкі і короткі спалахи люмінесцентного випромінювання, що виникає при поглинанні енергії α - і рентгенівських квантів в матеріалі сцинтилятора. Тому розробка технології і конструкції фотоприймачів для сцинтиелектронних детекторів потребує проведення детальних досліджень кремнієвих p-n структур [1], [7]. Фотоприймач для сцинтиляційного детектора повинен мати велику площу (від 0,1-0,2 см² до 1-5 см²), малу ємність (до 50 пФ/см²) [1] і малі зворотні струми (1-5 нА/см²) при зворотній напрузі 50-70 В для забезпечення низьких шумів і високу чутливість на довжині хвилі власного випромінювання сцинтилятора.

Тому для виготовленні цих фотоприймачів необхідно використовувати надчистий кремній, чисті технологічні процеси, відповідні конструктивно-технологічні рішення. Особливістю розроблюваної технології є використання технології виготовлення серійних кремнієвих інтегральних схем (IC) [7], що дозволяє одержувати відтворювані результати. Детектори для реєстрації α - і рентгенівських випромінювань на основі оптоелектронної пари сцинтилятор-фотодіод застосовуються в дозиметрії і спектрометрії гамма- і рентгенівських випромінювань [1],[2],[4],[7] в медицині (томографія, флюорографія, цифрова рентгенографія) [1], [3], [5], [7], у обладнанні митного контролю транспортних засобів та крупногабаритних

вантажів, приладах для виявлення радіоактивних речовин) [1], [7], в дефектоскопії [1],[9], у фізиці високих енергій (калориметрія та аналіз випромінювань, детектори часток - продуктів ядерних реакцій розпаду, синтезу та нуклон-нуклонних взаємодій в зустрічних високоенергетичних пучках) [7], в екології (прилади контролю рівня радіаційних забруднень речовин та навколишнього середовища) [1], у дослідженні космічного простору (телескопи високоенергетичних заряджених часток, аналізатори спектру космічних випромінювань, гамма-і рентгенівські аналізатори спектрів) [7], в охоронних системах, в атомній енергетиці (прилади контролю стану ядерних реакторів, контролю виробництва ядерного палива) [1], в оборонній галузі (прилади радіаційного контролю, інфрачервоні системи наведення та формування зображення) [1], [7], [9], у машинобудуванні та приладобудуванні (лазерні координатні та опорні системи, вимірювачі рівня і інше).

1. Фізико-технологічні проблеми розробки рп фотодіода та детектора -, рентгенівського випромінювання на основі оптоелектронної пари сцинтилятор - рп фотодіод (СЦ - ФД). Описані вище проблеми при створенні фотодіодів для сцинтиелектронних детекторів були вирішені нами в процесі розробки технології планарного рп фотодіоду з іонно-імплантованим рп переходом. Формування рп переходу таким методом дає можливість прецизійного регулювання глибини р+-області, що залягає в поверхневому шарі кремнієвої підкладки n-типу, а також регулювання профілю концентрації домішок акцепторного типу в р+-області. Це в свою чергу дозволяє мінімізувати рекомбінаційні втрати фотогенованого заряду електронно-діркових пар в нейтральному об'ємі р+-області, завдяки можливості формування надтонкого р+-n переходу методами імплантації іонів легуючих домішок [8] на відміну від випадку формування р+-області методом високотемпературної дифузії легуючих домішок [8]. Схематичне зображення кристалу кремнієвого планарного рп фотоприймача з тонким вхідним вікном на основі іонно-імплантованого рп переходу, сформованого на пластині високоомного надчистого кремнію зонної плавки показано на рис.1. Використання високоомного кремнію дозволяє сформувати рп структуру і одержати фотодіод з малою ємністю, що забезпечує високу чутливість та низький рівень шумів при роботі рп фотодіода з зарядочутливим попереднім підсилювачем. Основні елементи фотоприймача та їх призначення зрозумілі з позначок на рис.1. Пасивація периферії рп переходу за допомогою термічного окислу кремнію ($dSiO_2 = xxx-xxx$ мкм) забезпечує високу стабільність темного струму фотодіода і стабільність його електричних характеристик. Додаткова пасивація плівкою фосфоросилікатного скла (ФСС) товщиною xxx мкм забезпечує захист поверхні від вологи, хімічних речовин та забруднень. Описаний рп фотоприймач використовується в -детекторі сцинтилятор-фотодіод (СЦ-ФД) (рис. 2) для реєстрації люмінесцентного випромінювання сцинтилятора. Розміри фотоактивної площі фотоприймача вибираються рівними розмірам грані сцинтилятора у площині їх оптичного з'єднання. Фотоприймач зібраний на діелектричній основі і має електричні виводи, які з'єднуються з входом попереднього підсилювача. Конструкція детектора - випромінювання схематично показана на рис.2. При проходженні - випромінювання через матеріал сцинтилятора в ньому поглинається енергія -кванта і при цьому виникає спалах люмінесцентного світла (сцинтиляція). Фотоприймач реєструє імпульсну складову спалахів (спектрометрія, томографія) або інтегральну інтенсивність спалахів (дозиметрія, інтроскопія). Сцинтилятор та фотоприймач з'єднані між собою так, щоб між ними забезпечувався якісний оптичний зв'язок для проходження люмінесцентного світла із сцинтилятора в фотоприймач та ефективної реєстрації цього світла фотоприймачем. В -детекторі можуть використовуватись такі сцинтиляційні матеріали як CsJ(Tl), ZnSe(Te), CdWO₄, NaJ(Tl) та інші [1]. Вибір матеріалу сцинтилятора та його розмірів зумовлюється конкретними необхідними параметрами -детектора. Цей вибір залежить від енергії - випромінювання, яке потрібно реєструвати, інтенсивності -випромінювання та чутливості фотоприймача і електронного підсилювача. Сцинтилятор вибирається з малим коефіцієнтом поглинання власного випромінювання.

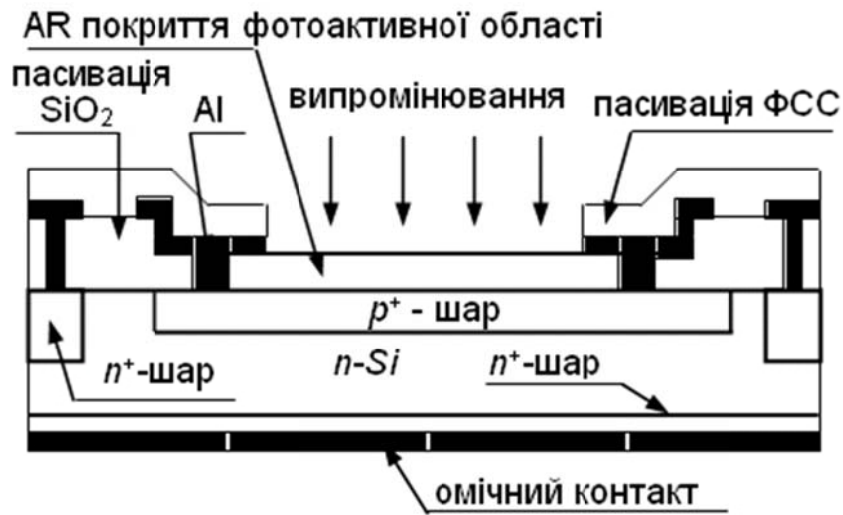


Рис. 1. Схематичне зображення кристалу кремнієвого планарного рп фотоприймача з тонким вхідним вікном на основі іонно-імплантованого рп переходу, пасивуючою плівкою SiO₂ по периферії рп переходу, захисною плівкою ФСС на поверхні кристала та антивідбиваючим покриттям (AR)

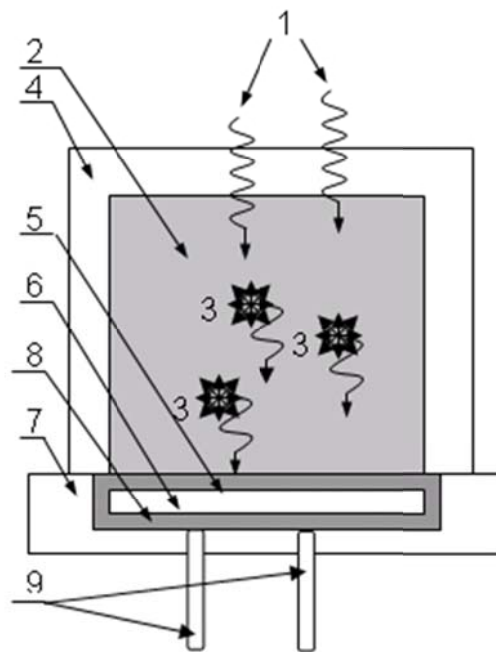


Рис. 2. Схематичне зображення детектора сцинтилятор - фотодіод (СЦ - ФД).

- 1 - високоенергетичні g-кванти;
- 2 - сцинтилятор;
- 3 - спалахи світла (низькоенергетичні фотони);
- 4 - світловідбиваюче покриття;
- 5 - оптичний контакт сцинтилятор - фотодіод;
- 6 - рп фотодіод;
- 7 - діелектрична основа;
- 8 - механічне з'єднання фотодіод - основа;
- 9 - електричні виводи фотодіода.

З'єднання сцинтилятора з фотоприймачем є складною прецизійною технологічною операцією і здійснюється за допомогою спеціального оптично прозорого компаунду, що забезпечує також механічне з'єднання з необхідними властивостями. Після з'єднання -детектор покривається світловідбиваючим і світлозахисним покриттям для захисту від зовнішнього (фонового) світла. Для забезпечення максимальної спектральної чутливості фотоприймача на довжині хвилі

люмінесцентного випромінювання сцинтилятора та з метою збирання максимального світлового потоку від сцинтилятора, було сконструйоване просвітлююче покриття над фотоактивною областю фотоприймача. Для цього була розроблена спеціальна програма розрахунку прозорості багат шарового оптичного переходу "сцинтилятор - перехідний (з'єднувальний) матеріал - діелектричні захисні плівки над активною областю фотоприймача - кремнієва основа" в залежності від товщини та показника заломлення світла кожного із шарів. Проведені розрахунки і вибір параметрів плівок SiO₂ і Si₃N₄ в антивідбиваючих покриттях фотоприймачів в детекторах з сцинтиляторами - CsJ(Tl), NaJ(Tl), ZnSe, LSO і іншими [10]. Результати розрахунків дозволили оптимізувати просвітлююче покриття для пари СЦ-ФД. Було встановлено, що максимальну прозорість покриття над фотоприймачем забезпечує комбінація двох плівок - окислу кремнію та нітриду кремнію (SiO₂ + Si₃N₄) [10], які широко використовуються в технології ІС. Товщини цих плівок розраховуються за вказаною вище програмою і залежать від довжини хвилі люмінесцентного випромінювання сцинтилятора.

Висновки

1. Проведено аналіз фізико-технологічних проблем створення ріп - фотодіодів для γ -, рентгенівських детекторів типу сцинтилятор-фотодіод (СЦ-ФД).
2. Розроблено технологію виготовлення планарних ріп - фотодіодів на високоомному кремнії з надтонкими іонноімплантованими рп переходами, з пасивацією рп переходу термічним окислом кремнію (SiO₂) та додатковою пасивацією плівкою фосфоросилікатного скла (ФСС).
3. Розроблено комплекс технологічних операцій, що дозволив одержувати зразки ріп-фотодіодів з низькими зворотними темновими струмами менше 2-3 нА/см², що дозволяє забезпечити високу роздільну здатність (6-8%) детекторів СЦ-ФД.
4. Виготовлені зразки ріп - фотодіодів з пробивними напругами переходів, які перевищують 100 В, що дозволяє використовувати режим високих напруг, якщо необхідно досягти мінімальної ємності фотодіоду.
5. Розроблено методи контролю параметрів ріп - фотодіодів, які дозволяють визначати електрофізичні параметри приладів після циклу виготовлення та проводити оцінку якості технології та виробів.
6. Проведені дослідження електрофізичних та фотоелектричних параметрів ріп-фотодіодів свідчать, що їх параметри відповідають вимогам використання у γ -, рентгенівських детекторах типу СЦ-ФД. Показана залежність характеристик фотодіодів від концентрації легуючих домішок та величини питомого опору кремнію.
7. Розроблена конструкція та виготовлені ріп - фотодіоди для γ -, рентгенівських детекторів СЦ-ФД, представлені спектрометричні характеристики детекторів, які свідчать про високу якість ріп-фотодіодів та γ -, рентгенівських детекторів СЦ-ФД.
8. Контроль якості ріп фотодіодів та їх відбір для детекторів типу СЦ-ФД може бути проведений з допомогою спектрів джерел низькоенергетичних γ -, рентгенівських квантів при прямій реєстрації ріп фотодіодом як детектором.
9. Розроблена технологія виготовлення кремнієвих ріп фотодіодів забезпечує можливість серійного виробництва фотодіодів на лінійках виробництва ІС завдяки використанню стандартних технологічних процесів технології інтегральних схем.
10. Сформульовані вимоги до параметрів сцинтиляторів і фотодіодів та технології виготовлення пари СЦ-ФД для забезпечення високої ефективності γ -, рентгенівських детекторів. Одержано γ -, рентгенівські детектори СЦ-ФД з спектральними характеристиками на рівні кращих світових зразків.

Література

- 1 Атрощенко Л.В., Бурачас С.Ф., Гальчинецький Л.П., Гринев Б.В., Рыжиков В.Д., Старжинский Н.Г. Кристаллы сцинтиляторов и детекторы ионизирующих излучений на их основе. Под общей редакцией В.Д.Рыжикова, К.: Наукова Думка, 1998. - 311с.
- 2 Gunji S., Hanada N., Hashino T. Use of a large area photodiode in CsI (Tl) scintillation counters // Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. 1990, A 295, P. 400-404.
- 3 Moszynsk M., Wolski D., Ludziejewski T. Particle identification by digital charge comparison method applied to CsI (Tl) crystal coupled to photodiode // Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. 1993, A 336, P. 587-590.
- 4 Даншин Е. А., Пивень Л. А., Рыжиков В. Д., Селегенов Е. М. Использование в дозиметрии детектора типа сцинтилятор - фотодиод в счетном режиме // ПТЭ. 1991, №4, с. 65-69.

- 5 Rosenfeld A., Perevertaylo V.L., Lerch M, et al. Spectral characterisation of a blue-enhanced silicon photodetector // IEEE Trans. of Nuclear Science. v.48(2001), N 4, P.1220-1224.
- 6 Rosenfeld A., Lerch M., Takacs G., Gektin A., Perevertailo V. Single detector-dual scintillator anti-Compton probes // Functional Materials, 11(2004), N1, p.1-5.
7. Перевертайло В.Л. Создание элементной базы для ядерно-физического и радиа-ционного приборостроения на основе кремниевой интегральной технологии // Труды Пятой международной научно-практической конференции "Современные информационные и электронные технологии", Одесса, 2004, с.200.
8. Зи С.М. Технология СБИС. - М.: Мир, 1986, Ч.1. - 404с.
9. Перевертайло В.Л., Епифанов А.А, Каренгин В.Г., Тарасенко Л.И. Интегральные схемы самосканируемых линейных фотоприемников в интроскопии и томографии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2005, № 6, с.33-38.
10. Перевертайло В.Л., Каренгин В.Г., Тарасенко Л.И., Перевертайло А.В. Многослойные антиотражающие покрытия фотоприемников на пленках окисла кремния и нитрида кремния // Труды Пятой международной научно-практической конференции "Современные информационные и электронные технологии", Одесса, 2005, с.282.
11. <http://w.w.w.hamamatsu.com/> Si PIN Photodiode // "Hamamatsu Photonics".
12. Перевертайло В.Л., Попов В.М., Поканевич А.П., Каренгин В.Г., Тарасенко Л.И.. Исследование электрофизических параметров кремниевых pin фотодиодов // Тези доповідей 2-ї Міжнародної науково-технічної конференції "Сенсорна електроніка та мікросистемні технології", Одеса, 2006, с.104.
13. <http://w.w.w.deetee.com/> Scintillation Detector Applications using Si Diodes // "Detection Technology Inc."