

ВИСОКОНАДІЙНИЙ КРЕМНІЄВИЙ $P-I-N$ ФОТОДІОД

Запропонована технологія виготовлення високонадійних кремнієвих $p-i-n$ фотодіодів. Підвищена надійність досягалась формуванням гетеруючого шару на зворотній стороні кристалу фотодіода товщиною 6-8 мкм. Гетерування та встановлена послідовність термічних операцій сприяли зменшенню питомих значень темнових струмів у діапазоні температур $20\div 85^\circ\text{C}$. Розроблені фотодіоди при напрацюванні протягом 1000 годин при температурі 85°C та освітленості до 1000 лк практично не змінювали значень темнових струмів.

The technology of manufacturing highly reliable silicon $p-i-n$ of photo diodes is offered. Increased reliability is achieved by formation hetereted of a layer on the back party of a crystal of the photodiode by thickness 6-8 microns. The presence of the specified layer and changed sequence of thermal operations promoted reduction of specific meanings dark current in a range of temperatures $20\div 85^\circ\text{C}$. At the developed photo diodes at an operating time 1000 hours, temperature 85°C and light exposure up to 1000 lks darks currents practically do not change.

Фотодіоди на основі кремнію, чутливі у ближній інфрачервоній області спектру (в основному це $p-i-n$ фотодіоди), знаходять широке застосування у вимірвальній техніці і метрології, автоматичній і телемеханіці, системах стеження і наведення, а також у побутовій апаратурі. Кремнієві фотодіоди взагалі і $p-i-n$ фотодіоди зокрема, досить технологічні вироби. Технологія їх виготовлення має високий рівень відтворюваності параметрів і дає можливість використовувати типові технологічні процеси і обладнання.

Важливою характеристикою фотодіоду є його надійність. Як відомо [1], надійність кремнієвих $p-i-n$ фотодіодів пов'язана зі станом поверхні та якістю захисту структури, а також наявністю дефектів у вихідному матеріалі і їх поведінкою під час технологічних операцій.

Запропонована робота присвячена удосконаленню конструкції і технології виготовлення високонадійних кремнієвих $p-i-n$ фотодіодів.

Темновий струм є одним з основних параметрів фотодіода [1]. При виготовленні $p-i-n$ фотодіодів [3] спостерігався ефект зменшення темнового струму при збільшенні товщини шару, який розташований з тильного боку кристалу фотодіода і є ізотипним до нього. Основне призначення цього шару – зменшити опір на контакті напівпровідник-метал. Для досягнення цієї мети достатньою є товщина шару 1-2 мкм. Для збільшення гетеруючого ефекту з тильного боку кремнієвої пластини формувався шар p^+ -типу провід-

ності товщиною від 6 до 9 мкм. У деяких випадках від розмірів та положення шару p^+ -типу з тильної сторони кристалу залежить чутливість приладу в довгохвильовій області [4].

Технологія кремнієвих $p-i-n$ фотодіодів передбачає певні хімічні операції, зокрема травлення кремнію, хіміко-механічне полірування пластин і ін. При цьому, навіть у разі використання бездислокаційного кремнію, утворюються дислокації, що порушують кристалічну структуру кремнію і утворюють генераційні центри [5]. Фотодіоди у нашому випадку працюють при напругах 100-200 В, при цьому збільшується ймовірність генерації поверхневих струмів втрат на межі розділу кремній-окисел кремнію та на периферії кристалу, які здатні суттєво збільшити темнові струми фоточутливого елементу. Тому його оточують охоронним кільцем [6], яке також виконує роль додаткового фоточутливого елементу. Для захисту охоронного кільця від впливу згаданих струмів втрат формується область обмеження каналів втрат одного з підкладкою типу провідності. При цьому віддаленість вказаної області від охоронного кільця має бути не меншою від відношення робочої напруги до напруженості роботою [7].

Результати роботи [3] вказують на те, що форма і розміри контакту на зворотній стороні кристала фотодіоду впливають на величину темнового струму. У зв'язку з цим, контакт до тильної сторони кристалу фотодіода був виконаний не

суцільним, а таким, що лише перекривав область фоточутливого елементу, обмежену проекцією охоронного кільця на зворотну сторону кристала фотодіода [10].

Кристал $p-i-n$ фотодіода (рис.1) формувалася на кремнієвій підкладці p -типу провідності з питомим опором від 10 кОм до 40 кОм марки БДМ И1 (ТУ48-4-363-88) методами планарної технології [8]. Товщина кремнієвої пластини складала 350 мкм. $P-n$ перехід фоточутливого елементу (3) та охоронного кільця (2) формувались дифузією фосфору на глибину до 3 мкм через маску оксиду кремнію (4), вирощену в ході термічного окислення.

Глибина залягання p^+ -шару в кристалі фотодіода залежить від часу проведення операції "розгонка бору". Наприклад, за даними роботи [9] розгонка бору продовжувалась неперервно 240 хвилин при температурі 1503-1513 К. Цим досягалась глибина залягання шару до 12 мкм. Проте такі умови втілення суттєво погіршують час життя неосновних носіїв заряду в порівнянні зі звичайними технологічними методами. По-іншому вирішена ця проблема в [10]. Після окислення пластини кремнію відбувається дифузія не фосфору, а бору. При цьому шар бору збільшується при кожній наступній термічній операції.

У нашому випадку була дещо змінена послідовність термічних операцій (рис.2). Перша операція виготовлення кристалу фотодіода – формування його габаритних розмірів за допомогою скрайбування кремнієвої пластини (1). Потім пластина піддавалась дифузії бору (2) протягом однієї години при температурі 1223 К. При цьому отримався шар p^+ -типу з усіх боків кремнієвої пластини товщиною $h=1$ мкм. Джерелом бору

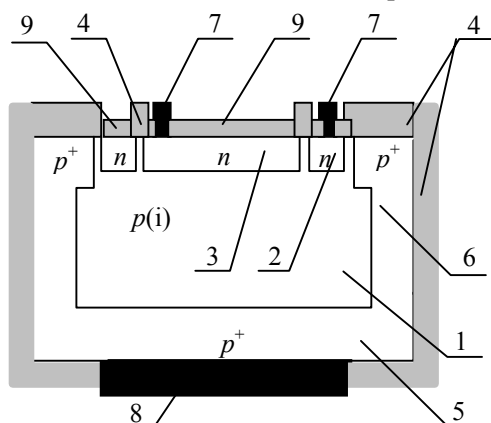


Рис.1. Схематичне зображення розрізу кристалу розробленого кремнієвого $p-i-n$ фотодіода: пластина (1), охоронне кільце (2), ФЧЕ (3), захисний окисел (4), p^+ -шар (5,6), металізація Au (7,8), просвітлюючий окисел (9).

служили диски з нанесеним борним ангідридом. Далі проводилось термічне окислення пластини (3) і шар p^+ -типу, за даними [10], збільшився на $h'=4-6$ мкм. Це окислення триває 3 години з метою вирощування товстого шару окислу і збільшення шару p^+ -типу [10]. У нашому випадку, завдяки зміненому порядку дій достатньо 2 годин. За цей час шар p^+ -типу зростає на $h'=2-4$ мкм.

Наступна операція – відкриття вікон в окислі та витравлення шару p^+ -типу з тієї частини поверхні кремнієвої пластини, де передбачається формування $p-n$ переходів фоточутливого елементу і охоронного кільця (4). Далі слідує окислення пластини (5), при якому шар p^+ -типу зростає на $h''=1$ мкм, та витравлення у вирощеному окислі отворів для дифузії фосфору (6) при температурі 1323К, завдяки якій формується $p-n$ перехід фоточутливого елементу та охоронного кільця. При цьому шар p^+ -типу збільшується ще на $h'''=1$ мкм. Для формування просвітлюючого покриття над фоточутливим елементом та охоронним кільцем здійснюється розгонка фосфору, під час якої шар p^+ -типу зростає на $h''''=1$ мкм (7). В результаті проведених термічних операцій отримується шар p^+ -типу, глибина залягання якого H сягає 6-8 мкм ($H=h'+h''+h'''+h''''$). Концентрація домішок внаслідок дифузії бору і фосфору складає $\sim 10^{19}$ см $^{-3}$. Усі інші операції по виготовленню $p-i-n$ фотодіодів аналогічні до описаних у [10].

При випробуваннях на "надійність" перевіряється дієздатність фотодіодів в умовах впливу більш жорстких факторів, ніж при практичному використанні. Основними серед них є висока температура оточуючого середовища і робота в умовах великого рівня освітленості фоточутливого елементу [2].

Дослідження розроблених та серійних фотодіодів здійснювались шляхом вивчення поведінки темного струму фоточутливого елементу і охоронного кільця при підвищеній і кімнатній температурах та високому рівні освітленості. Величина темного струму у таких умовах вимірювалась за допомогою установки, блок-схема якої наведена на рис.3. Похибка вимірювань не перевищувала 5% з довірчою ймовірністю 95%.

Фоточутливі елементи виготовлені по запропонованій технології фотодіодів при 293 К мали питомі значення темного струму від 70 нА/см 2 до 30 нА/см 2 . Середнє значення струмів, згідно рис.4, складало 40 нА/см 2 . Питомі значення темного струму охоронного кільця знаходились на рівні 0,5-1 мкА/см 2 . Виміри проводились на 70

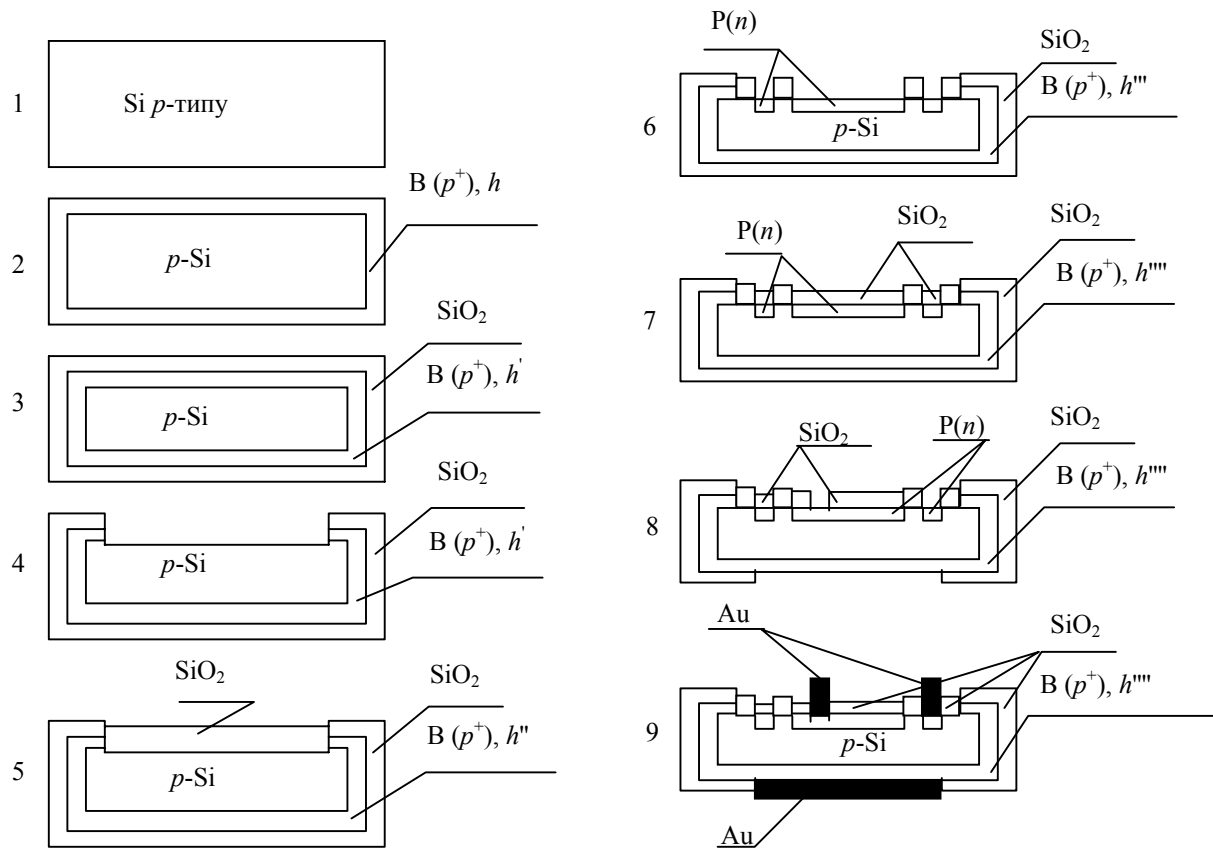


Рис. 2. Схематичне зображення технологічного маршруту виготовлення кремнієвого $p-i-n$ фотодіоду підвищеної надійності.

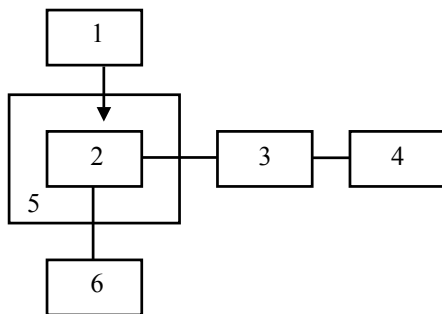


Рис.3. Блок-схема установки для виміру темного струму: 1 - освітлювач АДБ136.000; 2 - фотодіод у вимірювальній оснастці; 3 - перетворювач струм-напряга АДБ7.0249.000.00; 4 - вольтметр цифровий В7-40; 5 - камера тепла та холоду АДБ7.0002.00.00; 6 - джерело живлення Б5-44А.

фотодіодах дослідної партії. Для порівняння, серійні $p-i-n$ фотодіоди, виготовлені за стандартною технологією, мали середній рівень питомих значень темнових струмів $0,9 \text{ мкА/см}^2$, а охоронне кільце показало середні значення темного струму на рівні $10-15 \text{ мкА/см}^2$.

Для вивчення поведінки темного струму фотодіодів при підвищенні температури вони уміщувались в установку (рис.3), температура в якій підвищувалась до 358 К . Темновий струм

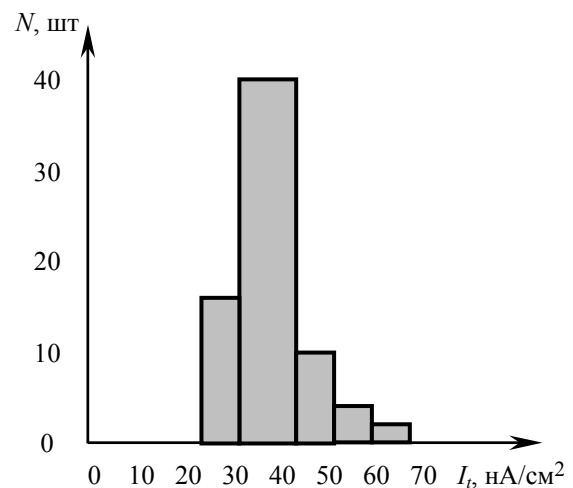


Рис.4. Гістограма розподілення дослідних зразків розроблених кремнієвих $p-i-n$ фотодіодів за питомими значеннями темного струму.

охоронного кільця та фоточутливого елементу вимірювався через кожні 10 К . для серійного фотодіоду ФДК-142-01 проводились аналогічні виміри. Як видно з результатів (рис.5) темнові струми нових фотодіодів менше деградує зі зростанням температури, не кажучи про суттєву відмінність власне самих струмів.

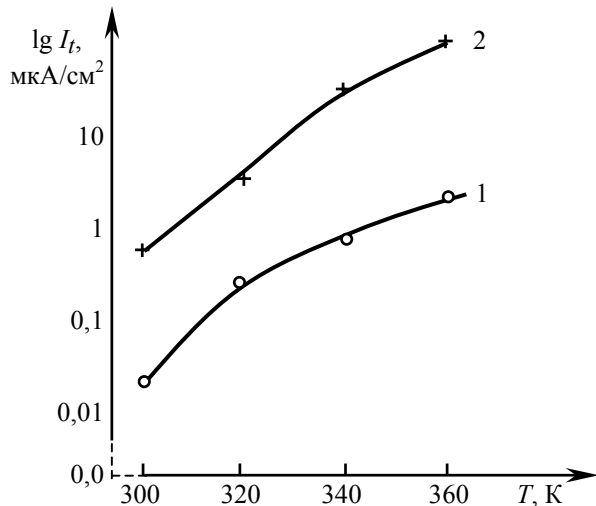


Рис.5. Порівняльні залежності середніх питомих значень темнового струму фотоочутливих елементів розроблених $p-i-n$ фотодіодів (1), та серійних ФДК-142-01 (2).

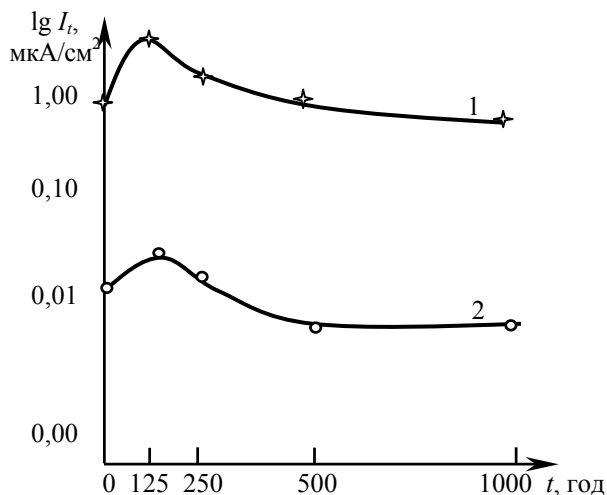


Рис.6. Зміна темнового струму фотоочутливих елементів від тривалості випробувань на надійність серійних $p-i-n$ фотодіодів (1) і розроблених (2).

Випробування на надійність розроблених фотодіодів проводились у згаданій установці при температурі 358 К та освітленості 1000 лк. Фотодіоди постійно знаходились під напругою –120 В. Перед вимірюваннями фотодіоди витримувались у нормальних кліматичних умовах не менше години. На рис.6 наведені результати вимірювань. Криві 1, 2 – це середні значення. Розбіжність темнових струмів для серійних фотодіодів (1) не перевищує 50%, розроблених (2) – 30%. Як видно з рисунку, нові фотодіоди більш стійкі до випробувань. В обох типах фотодіодів спостерігається збільшення обернених (темнових) струмів після перших 125 годин напрацювання, що є характерним для охоронного кільця $p-i-n$ фотодіодів [2],

і властивим для фотоочутливих елементів. Через 250 годин напрацювання темнові струми нових фотодіодів практично відновлюються, а серійні фотодіоди показують відновлення струмів лише через 500 годин напрацювання.

Наступні 500 годин напрацювання (до закінчення загального 1000-годинного циклу) показують незмінність темнового струму як розроблених так і серійних фотодіодів. Зауважимо, що ні серійні, ні тим більше розроблені нові фотодіоди не перевищили вимог технічних умов на ФДК-142-01.

Для вилучення потенційно ненадійних фотодіодів були встановлені більш жорсткі умови випробувань, а саме – температура оточуючого середовища становила 373 К, зміщення на $p-n$ переході – 120 В, освітленість – 2000 лк. Досліджувались обидва типи фотодіодів – серійні ФДК-142-01 і нові, по 20 фотодіодів у кожній партії. Випробування тривали 500 годин, по закінченні яких вимірювався темновий струм охоронного кільця та фотоочутливого елементу в нормальних кліматичних умовах.

Результати досліджень показали, що з 20 виробів серійного виготовлення три перевищили норми технічних умов, темновий струм фотоочутливого елементу сягав 10-50 мкА. У решті виробів цієї партії значення струмів збільшились у 3-5 разів. Струми охоронного кільця окремих фотодіодів перевищували норму, вказану в технічних умовах. В той же час вироби нової конструкції, виготовлені за новою технологією, показали збільшення струмів не більше як на 20-40%.

З наведених даних видно, що зміни, запропоновані у конструкції і технології $p-i-n$ фотодіодів на основі високоомного кремнію, дали змогу отримати високонадійні прилади, які є досить стабільними навіть під впливом високої температури, освітлення та робочої напруги. З аналізу результатів роботи [3] слідує, що існує декілька механізмів, здатних вплинути на властивості $p-n$ переходу, зокрема дислокаційний.

За своїми властивостями дислокації є каналами для більш рухливої міграції атомів у кристалічній ґратці, порівняно, наприклад, з дифузійним механізмом. Саме для напівпровідників це дуже важливо, оскільки існує взаємодія між іонізованими дефектами та дислокаціями. Крім того, дислокації можуть проявляти як донороподібні, так і акцептороподібні властивості [5]. Головним результатом взаємодії дислокацій з дефектами є збільшення концентрації останніх

навколо дислокаційного ядра завдяки існуванню між ними зв'язку, енергія якого оцінюється у декілька десятків електронвольт. Швидкість руху дифундуючої речовини по дислокаціям значно вища, ніж по іншим шляхам. Дислокаційні шляхи називають прискореними шляхами або дислокаційними трубками, вони можуть грати суттєву роль у якості як джерел, так і стоків точкових дефектів (включаючи атоми розчиненої речовини). Дислокаційні трубки ототожнюються з ядром дислокації, а при високій концентрації домішок вони можуть переповзати, тобто рухатись в об'ємі кристалічної ґратки. Отже, дислокації здатні розмножуватись у напівпровідниковому кристалі (кремнії), утворювати канали провідності у вигляді дислокаційних трубок в його об'ємі і рухатися у ньому.

Згідно з роботою [5], наявність легуючої домішки зменшує швидкість розмноження дислокацій в досконалих кристалах при наявності деформуючих напружень, а у випадку бездислокаційних кристалів поява дислокацій спостерігалась при перевищенні деякого критичного напруження, яке визначалося товщиною окислу, концентрацією легуючої домішки та температурою. Процес утворення дислокацій був загальмований після введення бору. Напевно гетерування зворотного боку кристалу фотодіода приводить до деякого зменшення густини дислокацій на його лицевому боці.

Введення бору в зворотній бік кристалу фотодіода призводить до зменшення рухливості неосновних носіїв струму і в той же час – до закріплення кінців дислокацій на цій межі. Отже, домішки фіксують дислокації у дугоподібні стани, а оскільки, у нашому випадку домішки бору вводилися з усіх сторін кристалу, то кінці дислокацій зв'язуються на всіх поверхнях кристалу. При цьому сила, яка утримує закріплений кінець дислокації, пропорційна напруженню, яке визначається концентрацією домішок.

Висновки

1. Розроблена конструкція кристалу *p-i-n* фотодіода на основі високоомного кремнію з рівнем питомих значень темного струму 30-70 нА/см².

2. Розроблена оригінальна технологія виготовлення *p-i-n* фотодіода великою площею на основі високоомного кремнію, яка забезпечує низький рівень темнових струмів.

3. Досліджено надійність роботи розроблених *p-i-n* фотодіодів на основі високоомного кремнію і їх стійкість до впливу температури оточуючого середовища 373 К при зміщенні на *p-n* переході 120 В і освітленості 2000 лк. За зазначеними параметрами нові ФД перевищують аналог – серійний *p-i-n* фотодіод на основі Si ФДК-142-01.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Анисимова И.Д., Викулин И.М., Заитов Ф.А., Курмашев Ш.Д. Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра. - М.: Радио и связь, 1984.
2. Годованюк В.М., Добровольський Ю.Г., Омелянчук В.П. Дослідження кремнієвого *p-i-n* фотодіоду підвищеної надійності // Науковий вісник Чернівецького університету. Вип. 29: Фізика. - Чернівці: ЧДУ, 1998. - С.170-172.
3. Ascheulov A.A., Godovanjuk V.M., Dobrovolsky Yu.G., and oth. Silicon *p-i-n* Photodiode with Little Value of Dark Proceed // SPIE. - 1999. - **3890**. - P.119-124.
4. Носов Ю.Р. Фотоприемники в оптоэлектронике // Электронная техника. Сер.2. - 1986. - **183**, вып.4. - С.33.
5. Рюхтин В.В., Товстюк К.Д., Данилевич О.И. Генезис дислокаций в кремниевых фотодиодах // Оптоэлектроника и ее применение. - 1985. - № 7. - С.21-24.
6. Астахов В.П., Гиндин Д.А., Карпов В.В., Сорокин К.В. О влиянии сопротивления поверхностного канала на темновой ток квадрантных *p-i-n* фотодиодов на кремнии // Прикладная физика. - 1999. - №2. - С.79-85.
7. Добровольський Ю.Г. *P-i-n* фотодіод на основі кремнію з низьким рівнем темного тока // НТС "Електроніка і зв'язь", 1998. - КПІ, Київ, 1998. - вып.4, ч.3. - С.443.
8. Парфенов О.Д. Технология микросхем. - М.: Высшая школа, 1986.
9. Акцептованая заявка Японии №57-41081.-1982.
10. Ащеулов А.А., Годованюк В.М., Добровольський Ю.Г., Омелянчук В.П., Рюхтин В.В. Технологічний метод зменшення темного струму кремнієвих *p-i-n* фотодіодів // Науковий вісник Чернівецького університету. Вип. 32: Фізика. - Чернівці: ЧДУ, 1998. - С.135-142.