

Ю.Г. Добровольський
Вибухові шуми кремнієвих фотодіодів

*НВФ “Тензор” вул. Червоноармійська, 226, м. Чернівці, 58013,
т/ф (0372) 57-50-52 E-mail yuriydr@gmail.com*

Розглянуто природу вибухових шумів у зворотно зміщених кремнієвих фотодіодах. Показано, що наявність вибухових шумів у кремнієвих фотодіодів пов'язано з підвищеною густиною дислокацій та точкових дефектів в області р-п переходу та концентрацією легуючої домішки. Одним з основних джерел генерації вибухового шуму є поверхні кристалу фотодіода.

Ключові слова: фотодіод, кремній, вибуховий шум, дислокації, темновий струм.

Стаття постуила до редакції 19.12.2004; прийнята до друку 30.05.2005.

I. Вступ

У роботі різноманітних напівпровідникових приборів, в тому числі фотодіодів, спостерігається досить специфічні шуми, які виглядають як спонтанні, аперіодичні флуктуації струму [1]. Характерною особливістю шуму такого виду є наявність двох стабільних рівнів струму, що протікає через р-п перехід фотодіода. Форма вихідного шуму має вид серії імпульсів із сталою амплітудою, випадковою тривалістю та частотою з'явлення.

Розрізняють два різноманітних типи бістабільного шуму – вибуховий шум та мікроплазмовий шум. Для вибухового шуму характерно те, що амплітуда шумових імпульсів є на декілька порядків нижчою, ніж у мікроплазмового шуму, а ширина імпульсів на декілька порядків більша, ніж у мікроплазмового шуму.

В деяких випадках вибуховий шум може перевищувати корисний сигнал, який має реєструвати фотодіод. Таке явище сприймається апаратурою, в якій використовується фотодіод, як очікуваний сигнал, внаслідок чого відбувається помилкове спрацювання всієї електронної системи. Тому вивчення природи цього явища, є актуальною проблемою.

II. Вибухові шуми напівпровідникових приладів

Дослідження, виконані раніше, вказують на те, що існують різноманітні моделі, що пояснюють природу вибухового шуму, який спостерігається на

зворотно зміщених р-п переходах. В [2] вказано, що причиною його виникнення в таких умовах є ефект, пов'язаний з поверхневим пробоем у напівпровіднику. Поверхневий пробій може виникати та збільшуватись при напруженнях значно нижчих, ніж у випадку об'ємного пробію, т.т. вибуховий шум не є мікроплазмовим лавинним пробоем. Ці особливості вибухового шуму разом з припущенням про один канал поверхневого пробію з переважаною провідністю – що випадково вмикається та вимикається – можуть пояснити той факт, що обернений струм переходу флуктує між двома дискретними рівнями, цілком достатніми для спостереження. Один з дослідних результатів, що підтверджує це припущення, полягає в тому, що поява каналу в р-п переході транзистора призводить до зменшення коефіцієнту підсилення струму β . Транзистор, що має вибуховий шум більшої амплітуди, як правило, виявляються з найменшою величиною β у порівнянні з іншими приладами. Було виявлено, що густина ймовірності позитивних та від'ємних імпульсів струму не залежить від рівня зміщення, в той час як висота імпульсу збільшується зі зростанням температури, і досягає певної граничної величини. Дослідження шумів у широкосмугових інтегральних підсилювачах [3] показали, що мікроплазмовий шум і вибуховий шум еквівалентні. Дослідження поведінки вибухового шуму у дискретних кремнієвих планарних транзисторах [4] показало, що в цьому випадку вибуховий шум виникає в області на поверхні або поряд з нею у прямо зміщеного переходу емітер-база. В [5] стверджується, що вибуховий шум – явище складне, яке виникає за декількома причинами, які в ряді випадків конкурують між собою. У [1] стверджується, що вибуховий шум у прямо зміщених

p-n переходах має інші характеристики, ніж у обернено зміщених p-n переходів, що дає можливість вважати, що в цих двох випадках діють різноманітні механізми генерації шуму.

В загальному випадку вважається, що механізм, який зумовлює вибуховий шум у обернено зміщених діодах, полягає в нерегулярному включенні-виключенні поверхневого каналу [1]. Оскільки фотодіоди, які нами розглядаються, також працюють в режимі оберненого зміщення p-n переходу, доцільно вважати можливим притримуватися поверхневої теорії виникнення вибухового шуму у застосуванні до фотодіодів.

III. Дослідження вибухових шумів кремнієвих фотодіодів

Дослідження вибухового шуму проводилось в нашому випадку на обернено зміщених фотодіодах (p-i-n фотодіодах), виготовлених на основі високоомного кремнію p-типу марки БДМ И1, виробництва ВАТ „ЦКБ Ритм” (м. Чернівці). P-n перехід створювався дифузією фосфору за стандартною планарною технологією [6]. Дослідження проводились на двох групах кристалів фотодіодів не змонтованих у корпус. Перша група кристалів мала чотириелементний секторний фоточутливий елемент з площею p-n переходу кожного з них 36,0 мм². Друга група кристалів мала одноелементні круглі фоточутливі елементи з площею p-n переходу 3,14 мм².

У цих фотодіодів вибуховий шум проявляв себе в аперіодичному збільшенні темного струму і в деяких випадках може перевищувати корисний сигнал. Таке явище сприймається апаратурою, в якій використовується фотодіод, як очікуваний сигнал, внаслідок чого відбувається помилкове спрацювання приладу.

Дослідження проводилось на базі ВАТ „ЦКБ Ритм” на трьох партіях пластин по 20 в кожній. Після формування структури фотодіодів та виготовлення контактів проводилось їх поетапне дослідження, яке показало наступне:

1. Імпульси вибухового шуму мали прямокутну форму, тривалість від мікросекунд до мілісекунд і частоту від одиниць до тисячі Герц. Амплітуда вибухового шуму мала 2-3 постійних значення і перевищувала рівень темного струму у 2-4 рази.

2. До скрайбування (розрізання кремнієвої пластини на окремі кристали з фотодіодами) вибуховий шум спостерігається лише у фотодіодах, що розташовані на краях пластини (порядку 15% всіх фотодіодів).

3. Після скрайбування та розділення пластин на кристали більш як 50% фотодіодів мають вибуховий шум.

4. Травлення відколотої поверхні торцевої частини фотодіодів на глибину до 100 ангстрем призвело до збільшення (в смузі частот 20 Гц-100 кГц) амплітуди вибухового шуму на два порядки.

5. Нанесення тонкого шару окислу кремнію на торцеву поверхню кристалів шляхом кип'ятіння в азотній кислоті, значно збільшує вибуховий шум.

6. Час зростання імпульсів вибухового шуму (на рівні 5 мкс) добре співпадає з часом зростання імпульсів фотоструму при інжекції носіїв в область торцевої поверхні кристалу фотодіоду імпульсним джерелом світла.

7. Зміна густини шумового струму ($\Delta I_{ш}$) і частоти слідування шумових викидів у досліджених фотодіодів показало кореляцію цих параметрів.

8. Дослідження вольт-амперних та вольт-шумових характеристик фотодіодів, що мали вибухові шуми, показали кореляцію між темновими струмами фотодіодів (I_t) і напругою шуму ($U_{ш}$). Типові усереднені характеристики наведені на рисунку. Густина напруги шуму і темного струму починає збільшуватись в діапазоні напруг 80-120 В.

Отримані дані дозволили вважати, що джерело вибухового шуму знаходиться в області торцевої поверхні кристалу фотодіоду і модулює темновий струм втрат, що проходить через нього.

Для вивчення впливу дефектів структури кристалу фотодіоду на генерацію вибухового шуму, було досліджено дефектоутворення в них. Для цього фотодіодні структури (кристали) оброблялись в травнику Сіртля і досліджувались за допомогою мікроскопу.

Виявилось, що фотодіоди з підвищеною густиною дислокацій і точкових дефектів в області p-n переходу, за правило, володіють інтенсивними вибуховими шумами. Густина дефектів структури фотодіодів, виготовлених з бездислокаційного кремнію, в першу чергу визначається дозою продифундованого фосфору (для кремнію p-типу).

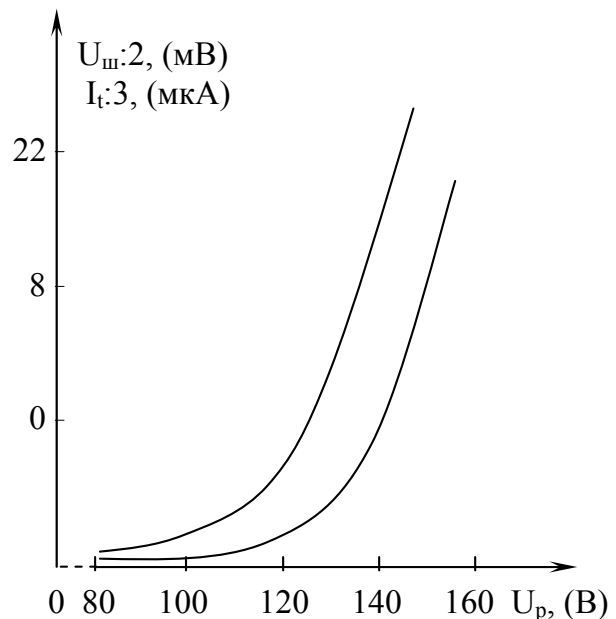


Рис. 1. Типові усереднені залежності напругення струму шуму ($U_{ш:2}$) і темного струму ($I_{t:3}$) фотодіодів, які мають вибуховий шум.

Залежність концентрації дислокацій від

концентрації фосфору (N_p) носить експоненціальний характер і залежить від товщини поверхневого шару окислу кремнію (SiO_2) [7], яка в нашому випадку складала 0,5-0,8 мкм. Розподілення густини дислокацій по глибині кремнієвої пластини також близько до експоненціального закону (для зменшення густини дислокацій в при поверхневому шарі товщина окисної плівки виготовлялась не більше 0,3 мкм).

Експоненціальне збільшення густини дислокацій починається з концентрації продифундованого фосфору $N_p \approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$, що відповідає величині поверхневого опору (R_s) менше ніж $7 \text{ Ом/}\square$ [7]. Подальше збільшення концентрації фосфору призводить до створення сітки дислокацій невідповідності (такі фотодіоди з великою ймовірністю володіють вибуховим шумом).

Пошарове травлення пластин показує, що подібна картина спостерігається на глибину до 100 мкм. Відсутність товстого шару SiO_2 (більше за 0,3 мкм), в області р-п переходу на лицевій поверхні зберігається вихідна кількість дислокацій, а на відстані 100-150 мкм від зворотного боку кристалу фотодіоду спостерігається експоненціальне збільшення густини дислокацій.

Таким чином, ймовірність появи вибухового шуму зростає, окрім вище перерахованих випадків, також при підвищеній густині дислокацій і точкових дефектів в області р-п переходу та при збільшенні концентрації фосфору при формуванні р-п переходу (навіть у випадку бездислокаційного кремнію) починаючи з поверхневого опору $R_s \leq 7 \text{ Ом/}\square$ ($N_p \approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$).

Про можливі механізми появи вибухового шуму у кремнієвих фотодіодів.

Як зазначено вище, джерелом генерації вибухового шуму у кремнієвих фотодіодів можуть бути поверхні кристалів та наявність дислокацій в їх об'ємі. Навіть у випадку бездислокаційного кремнію, дислокації з'являються внаслідок дифузійних процесів, необхідних для формування р-п переходу [8].

Розглянемо можливі механізми, які пояснюють отримані результати. Дислокації впливають на електрофізичні параметри в кремнії двома шляхами – внаслідок пружних навантажень, які вони утворюють навколо себе, та внаслідок наявності "обірваних" на дислокаціях зв'язків, утворення яких зумовлено порушенням періодичності атомної ґратки навколо дислокації [9]. Це призводить до появи незпарованих електронів, які можуть захопити електрони з зони провідності і утворювати "пари на обірваних зв'язках". В цьому випадку дислокації заряджаються від'ємною. При цьому, навколо ядра дислокації викривлюються енергетичні зони, що призводить до утворення в забороненій зоні додаткового рівня.

Оскільки дислокації є лінійними дефектами, то в матеріалі вони здатні формувати "ланцюжки" донорних центрів, у випадку кремнію р-типу, які притягують до себе "акцептори" іонізованих атомів. При цьому, згідно [9], утворюється "заряджена

трубка" – хмарка від'ємного просторового заряду циліндричної форми. Виникає потенціальний бар'єр, який розповсюджується аж до межі цієї області просторового заряду.

З вище сказаного можна зробити висновок, що генерацію вибухового шуму викликають наявність домішкових рівнів, зумовлених дислокаційним механізмом. Домішкові рівні заповнюються носіями заряду і, після формування "зарядженої трубки", починають інжектувати носії струму в область просторового заряду (ОПЗ) зворотного р-п переходу і досягає певної критичної межі. Такий процес значно активізується при розігріві кристалу фотодіоду, внаслідок збільшення його внутрішньої енергії. При цьому, як здається, можливі два варіанти здійснення процесу генерації вибухового шуму.

1. Носії струму з домішкового рівня в змозі перейти в зону провідності маючи запас енергії менше, ніж ширина забороненої зони (з точки зору енергетики процесу). В той же час, використовуючи сформовані "заряджені трубки", збуджені носії струму досягають ОПЗ р-п переходу.

2. Коли джерелом вибухового шуму є периферійна частина кристалу фотодіоду, механічні напруження, що виникають навколо дислокацій в цій області, також в змозі збільшити внутрішню енергію кристалу у розглянутій області. При цьому, можливо як формування домішкових рівнів в забороненій зоні, так і формування потенціального бар'єру. Внаслідок чого можливе виникнення локальної ОПЗ навколо дислокації. З домішкового рівня носії струму в змозі переходити у збуджений стан і прискорюватись у локальній ОПЗ. При об'єднанні локальних ОПЗ (як і в першому випадку) в "ланцюжку" (або, як у [9] "заряджені трубки"), носії струму що розглядаються, в змозі досягти ОПЗ р-п переходу.

Таким чином, за допомогою запропонованих механізмів можливо пояснення природи вибухового шуму в кремнієвих фотодіодах, по крайній мірі, виготовлених на основі кремнію р-типу.

IV. Висновки.

Проведені дослідження і їх аналіз дозволяють говорити про те, що причиною генерації вибухових шумів у кремнієвих фотодіодів служать наступні причини:

- наявність механічних дефектів на торцевій поверхні кристалу фотодіоду;
- наявність дислокацій в об'ємі кристалу фотодіода, які формуються навіть в бездислокаційному кремнії в наслідок термічних операцій виготовлення р-п переходу;
- наявність домішкових рівнів в забороненій зоні кремнію, які зумовлені не тільки дислокаційним механізмом, але і іншими, наприклад за рахунок домішок.

Крім того можна вважати, що фотодіоди, що працюють в режимі оберненого зміщення р-п переходу, можуть володіти вибуховими шумами, які генеруються не тільки на поверхні кристалу

фотодіоду. Отримані результати показують, що джерелом генерації вибухового шуму може виступати як торцева поверхня кристалу фотодіоду та його периферійна частина (за межами fotocутливого елемента) так і безпосередньо об'єм кристалу фотодіоду.

Автор висловлює подяку керівництву ВАТ „ЦКБ Ритм” за сприяння у дослідженнях.

- [1] М. Букенгем. *Шумы в электронных приборах и системах*. Мир, М. 382 с. (1986).
- [2] D. Wolf, E. Holler. Bistable current Fluctuations in reverse-biased p-n junctions of germanium // *J. Appl. Phys.*, **38**, pp. 189-192 (1967).
- [3] P.L. Leonard, S.V. Jaskolski. An investigation into the origin and nature of 'popcorn noise' // *Proc. IEEE (letters)*, **57**, pp. 1786-1788 (1969).
- [4] K.F. Knott. Burst noise and microplasma noise in silicon planar transistors // *Proc. IEEE (letters)*, **58**, pp. 1368-1369 (1970).
- [5] С. Орен. Discussion of various views on popcorn noise // *IEEE Trans. Elect. Dev.*, **ED-18**, pp. 1194-1195 (1971).
- [6] И.Д. Анисимова, И.М. Викулин, Ф.А. Зайтов, Ш.Д. Курмашев. *Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра*. Радио и связь, М. 216 с. (1984).
- [7] А.А. Ascheulov, V.M. Godovanjuk, Yu.G. Dobrovolsky and oth. Silicon P-i-N Photodiode with Little Value of Dark Current // *Proceed SPIE*, **3890**, pp. 119-124 (Yu.G.).
- [8] В.В. Рюхтин, К.Д. Товстюк, О.И. Данилевичю. Генезис дислокаций в кремниевых фотодиодах // *Оптоэлектроника и ее применение*, **7**, сс. 21-24 (1985).
- [9] Г.З. Немцев, А.И. Пекарев, Ю.Д. Чистяков // *Микроэлектроника*, **12**, сс. 432 (1983).

Yu.G. Dobrovolsky

Explosive noise of the silicon photodiodes

SPF "Tensor" 226, Chervonoarmiyaska Str., Chernivtsi, 58013,
tel./fax (0372) 57-50-52 E-mail yuriydrg@ukr.net

The nature of explosive noise at the devices, back displaced the semiconductor, including silicon photodiodes is considered. It is shown, that the presence at silicon photo diodes is connected to increased density dislocation and dot defects in area p-n of transition, concentration of an impurity. One of the basic sources of generation explosive noise is the surface of a crystal of the photo diode.