

# Технологічні причини пробою $p$ - $n$ -переходу кремнієвих $p$ - $i$ - $n$ фотодіодів

Кукурудзяк М. С., ORCID [0000-0002-0059-1387](https://orcid.org/0000-0002-0059-1387)

Інженерно-виробничий комплекс 1

АТ «Центральне конструкторське бюро Ритм», <https://ckb-rhythm.com>

м. Чернівці, Україна.

**Анотація**—Під час виготовлення координатних квадрантних  $p$ - $i$ - $n$  фотодіодів з високою напругою зворотного зміщення  $U_{zm} \geq 200$  В було спостережено наявність систематичного браку виробів по рівню темного струму одного (рідше кількох) фоточутливого елемента. Після вимірювання вольт-амперних характеристик побачено, що причиною вказаного є пробій  $p$ - $n$ -переходу. Встановлено, що сильний вплив на напругу пробою мають кристалографічні дефекти, зокрема дислокації, механічні порушення, нерівні краї окисної плівки вікон для дифузії, нерівномірний дифузійний профіль, локальний тепловий вплив та ін.

Збільшення напруги пробою можливе при збільшенні товщини підкладок, зменшенні концентрації легуючих домішок, чіткому контролю операцій фотолітографії, напилення та приварювання виводів.

**Ключові слова** — кремній; фотодіод; дислокація; темновий струм; клин травлення; пробій  $p$ - $n$ -переходу.

## I. ВСТУП

Україна є одним із провідних виробників кремнієвих  $p$ - $i$ - $n$  фотодіодів (ФД) загального та спеціального призначення. Науково-виробниче «Акціонерне товариство ЦКБ Ритм» гідно конкурує на світовому ринку із Namamatsu photonic (Японія), Excelitas Technologies Corp. (Тайвань), First Sensor AG (Німеччина), ОАО НВО «Оріон» (РФ) та іншими [1]. Для подальшої спроможності конкурування необхідно постійно покращувати параметри продукції, займатися оптимізацією технології виробництва та використовувати найсучасніші методи і технічні засоби. Ключовим аспектом вказаного є забезпечення високого відсотку виходу продукції, а також пошуки систематичних видів браку та методів їх усунення.

Під час виготовлення координатних квадрантних  $p$ - $i$ - $n$  ФД з високою напругою зворотного зміщення  $U_{zm} \geq 200$  В було спостережено наявність систематичного браку виробів по рівню темного струму ( $I_m$ ) одного (рідше кількох) фоточутливого елемента (ФЧЕ). Цей вид браку полягав у значному збільшенні  $I_m$  бракованого ФЧЕ відносно придатних, іноді розкид сягав в 20-30 разів. При вимірюванні вольт-амперних характеристик (ВАХ) бракованих виробів було побачено різке зростання  $I_m$  при незначному збільшенні напруги зміщення в діапазоні  $U_{zm} = 180$ -250 В. Це свідчило про пробій  $p$ - $n$ -переходу.

При огляді наукової літератури побачено, що проблема пробою  $p$ - $n$  переходу присутня і в інших напрямках електроніки. Відповідно пошук причин та методів уникнення описаного виду систематичного браку являється актуальним науково-технічним завданням. Так, в [2, 3] розглянуто проблему дефектоутворення в структурах на основі GaN для силової електроніки, та впливу порушень структури кристалічної ґратки

на продуктивність і безвідмовність при високих напругах живлення. У [4, 5] представлено вплив дефектів кристалічної структури кремнію на механізм генерації напруги пробою в низьковольтних силових MOSFET, що працюють у лавинному режимі. В [6] описано метод уникнення крайового пробою у лавинних фотодіодах на основі 4H-SiC за допомогою використання клиноподібної меза-структури. В [7] запропоновано метод виготовлення лавинних фотодіодів на основі InGaAs-InP, який дозволяє зменшити імовірність появи крайового пробою. Даний метод полягає в зміні профілю дифузії Zn за допомогою додаткового епітаксійного шару заданої форми на дифузійній масці. Аналіз наукових джерел показав, щоб головними причинами пробою  $p$ - $n$  переходу можуть бути дефекти або крайові ефекти. Але публікацій, які б досліджували причини пробою  $p$ - $n$ -переходу кремнієвих  $p$ - $i$ - $n$  ФД відсутні. Тому вирішено виявити та проаналізувати головні причини появи описаного виду браку в технології  $p$ - $i$ - $n$  ФД, а також описати методи уникнення встановлених факторів, що і є метою даної статті.

## II. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Дослідження проводилось при виготовленні кремнієвих квадрантних  $p$ - $i$ - $n$  фотодіодів для роботи при зворотньому зміщенні  $U_{zm} = 250$  В на основі кремнію  $p$ -типу провідності з питомим опором  $\rho \approx 16$ -20 кОм·см. Товщина підкладки сягала 460-480 мкм. Технологічний маршрут виготовлення ФД складався з комбінації термічних операцій та фотолітографії. Спочатку кремнієві підкладки окислялись за принципом сухе-вологе-сухе [8] окислення для утворення маскуючого покриття товщиною  $h_{SiO_2} \approx 0,7$ -0,8 мкм. Далі після фотолітографії проводилась двостадійна дифузія фосфору з планарних джерел в атмосфері



азоту, для утворення фоточутливих елементів та охоронного кільця (ОК)  $n^+$ -типу. Поверхнева концентрація домішки після першого етапу дифузії (утворення тонкого поверхневого високолегованого шару) складала  $N_0=1,1\cdot 10^{21}$  см<sup>-3</sup>. Наступний етап дифузії фосфору в атмосфері сухого кисню при вищій температурі для збільшення глибини  $n^+$ - $p$ -переходу ( $x_{n+p}$ ), перерозподілу домішки та утворення просвітлювального покриття, поверхнева концентрація домішки після даної операції складала  $N_0=4,4\cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>. Далі після хімікодинамічного полірування (ХДП) зворотної сторони підкладки дифузія бору для створення омичного контакту  $p^+$ -типу та гетерування генераційно-рекомбінаційних центрів. Наступна операція - наплення Cr-Au з підшаром Cr для утворення контактів, далі приварювання виводів до контактних площадок, збірні роботи, розміщення кристалу в корпусі та герметизація.

Досліджувались вольт-амперні характеристики в діапазоні зворотного зміщення  $U_{зм}=2-300$  В. Для виявлення дефектності поверхні проводилось травлення підкладок в селективному травнику Сіртля [9].

### III. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

В процесі серійного виготовлення ФД спостерігались пробої  $p$ - $n$ -переходів при напругах нижче 250 В на різних етапах виробничого маршруту. Найбільш важливим параметром, який визначає напругу пробою  $p$ - $n$ -переходу ( $U_{проб.}$ ) є опір підкладки  $\rho$ . Чим вище  $\rho$  матриці, тим нижча  $U_{проб.}$ , що видно з формули (1) [10, с. 86]:

$$U_{проб.} = \left(\frac{E_g}{1.1}\right)^{1.5} \cdot \left(\frac{N_A}{10^{16}}\right)^{-0.75} \quad (1)$$

де  $E_g$  – ширина забороненої зони;  $N_A$  – концентрація домішок в підкладці.

Відмітимо, що нами використовується кремній з  $\rho=16-20$  кОм·см для забезпечення мінімальної ємності ФЧЕ та максимальної фоточутливості виробів [1], тому можливості знижувати  $\rho$  для збільшення  $U_{проб.}$  немає.

Враховуючи, що робоча напруга зміщення ФД сягає 250 В, то потрібно забезпечити  $U_{проб.}>250$  В. Нехай вважатимемо, що  $U_{проб.}=260$  В. Відповідно, за формулою (2) можна визначити ширину області просторового заряду  $W_{i\text{проб.}}$  при напрузі пробою [11]:

$$W_{i\text{проб.}} = \left(\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_k - U_{проб.})}{eN_A}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

де  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_0$  діелектричні сталі для кремнію і вакууму відповідно;  $\varphi_k$  – контактна різниця потенціалів;  $e$  – заряд електрона.

Товщина ОПЗ пробою при  $U_{проб.}=260$  В, та  $\rho=18$  кОм·см сягає 720 мкм, що набагато більше товщини бази ( $x_\delta$ ). Згідно [10, с. 87] в  $n^+$ - $p$ - $p^+$ -структурах можливе зниження  $U_{проб.}$  до деякого значення  $U_{BW}$ , якщо товщина бази менше товщини ОПЗ при  $U_{проб.}$   $U_{BW}$  в такому випадку можна визначити з формули (3):

$$U_{BW} = U_{проб.} \left(1 - \left(1 - \frac{x_\delta}{W_{i\text{проб.}}}\right)^2\right) \quad (3)$$

де  $U_{проб.}$  – напруга пробою, визначена за формулою (1).

Враховуючи сказане, для забезпечення умови  $U_{проб.}>250$  В, потрібно забезпечувати умову  $x_\delta > W_{i\text{проб.}}$ . Але при високих напругах зміщення це не зовсім доцільно з економічної точки зору та з точки зору поглинання випромінювання. З технічної точки зору збільшувати товщину бази ФД більше 500 мкм для роботи на  $\lambda=1,064$  мкм не варто. Оскільки випромінювання з такою довжиною хвилі поглинається на глибині кремнію 1 мм ( $\alpha_{1,06}\sim 10$  см<sup>-1</sup>) [12, с. 347], а зі зворотної сторони підкладки формується Au-дзеркало, яке сприяє подвійному проходженню випромінювання крізь  $i$ -область [13], збільшуючи кількість генерованих носіїв заряду.

Зауважимо, що в планарній технології, під час дифузії домішок крізь вікно оксиду, утворюються  $p$ - $n$ -переходи із дифузійним фронтом, який має як циліндричні області (вздовж границь вікна), так і області у вигляді півсфери радіусу  $r_0$ , який рівний глибині  $p$ - $n$ -переходу ( $x_j$ ). Відповідно області викривлення дифузійного профілю можуть бути місцями локалізації підвищеного рівня напруженості електричного поля. При досягненні деякого максимального значення напруженості  $E_{max}$ , в даних областях можливий пробій при низьких напругах зміщення (4) [10, с. 86]:

$$E_{max} = \sqrt{\frac{2qN_A U_{проб.}}{\varepsilon\varepsilon_0}} \quad (4)$$

В такому випадку  $U_{проб.}$  Знижується до значення  $U_{проб.}^*$  [10, с. 89]:

$$U_{проб.}^* = U_{проб.} \left( \left[ (m+1+\gamma)\gamma^m \right]^{\frac{1}{1+m}} - \gamma \right) \quad (5)$$

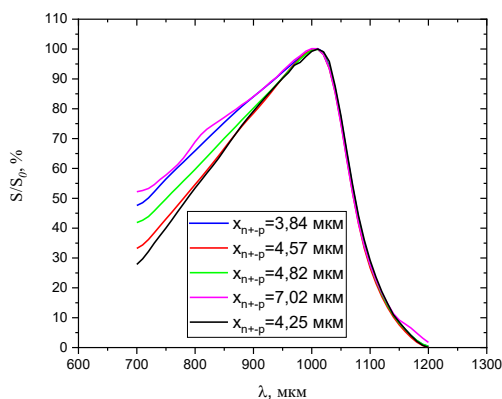
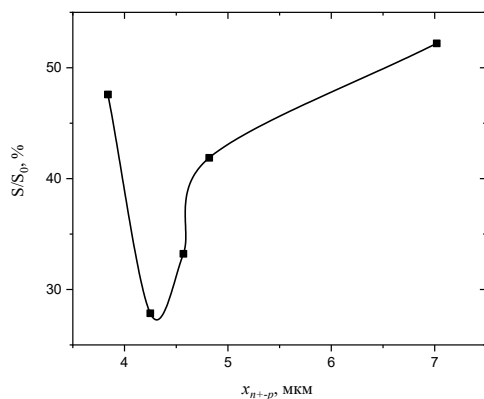
де  $\gamma = \frac{r_0}{W_{i\text{проб.}}}$ ;  $m$  – коефіцієнт,  $m=1$  для циліндричної області  $p$ - $n$ -переходу,  $m=2$  для сферичної.

З (5) випливає, що при збільшенні  $r_0$  та, відповідно,  $x_j$  можливе збільшення  $U_{проб.}^*$ . В такому разі потрібно провести дослідження параметрів ФД залежно від глибини залягання дифузійного шару. Щодо  $p^+$ - $p$ -переходу, то в [14] нами встановлено, що при  $x_{p+p} \geq 2$  мкм та поверхневій концентрації дифундованого бору  $N_B \geq 4 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> ( $R_B \leq 16$  Ом/□) зростає коефіцієнт поглинання випромінювання в даному шарі, що сприяє зниженню фоточутливості за рахунок зменшення кількості випромінювання відбитого від Au-дзеркала зі зворотної сторони підкладки.

Щодо  $n^+$ - $p$ -переходу, то нами було досліджено відносну спектральну характеристику чутливості  $S(\lambda)$  зразків із різними  $x_{n+p}$  (Рис. 1) та встановлено що при  $x_{n+p} \geq 4,25$  мкм зростає вплив фонового випромінювання на рівень корисного сигналу фотоприймача (Рис. 2). Тож зміна глибини залягання дифузійних шарів ФД може негативно впливати на рівень шумів.

Тому варто забезпечувати рівень технології, який мінімізує появу факторів, що сприяють зниженню  $U_{проб.}$ . Відповідно встановлено та досліджено низку технологічних факторів, які можуть бути причинами зниження напруги пробою  $p$ - $n$ -переходу.

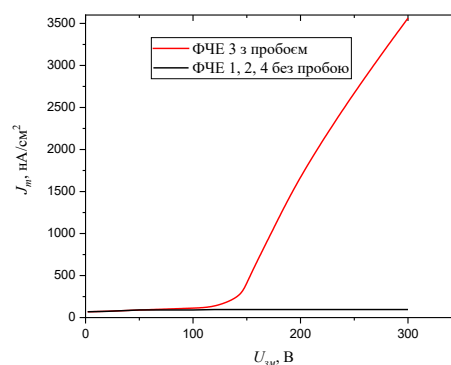


Рис. 1 Графік  $S(\lambda)$  ФД при різному  $x_{n+p}$  ( $U_{зм}=120$  В)Рис. 2 Графік залежності відносної чутливості від при  $x_{n+p}$  при  $\lambda=700$  нм

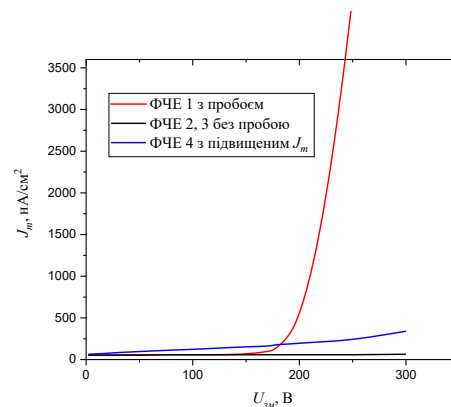
#### А. Дислокації на поверхні фоточутливих елементів

Сильний вплив на  $U_{проб.}$  мають кристалографічні дефекти, зокрема дислокації, що потрапляють в область  $p-n$ -переходу, в такому випадку вони значно знижують напругу пробією порівняно з об'ємом [15, с. 292]. Результатом наявності дефектів може бути неоднорідний пробій  $p-n$ -переходу, що призводить до різних ефектів: 1) зростання темнових струмів (струмів витоку); 2) великі флуктуації амплітуди струму в передпробивний період; 3) локальне світіння в окремих точках  $p-n$ -переходу, поява т. зв. мікроплазмової емісії [16]. Причинами появи дислокацій в процесі виготовлення кристалів ФД є порушення поверхні підкладок під час механічних обробок або ХДП, чи наявність ростових дефектів, які під час окислення та дифузії стають місцями локалізації дислокацій [11].

Нами було досліджено ряд кристалів ФД бракованих по пробією  $p-n$  переходу при  $U_{проб.} < 250$  В. Відмітимо, що дані зразки володіли рівномірним опором між ФЧЕ та ОК, а також в них були відсутні візуальні дефекти поверхні. Наведено ВАХ фоточутливих елементів кількох досліджуваних зразків (Рис. 2).



а)



б)

Рис. 3 ВАХ ФЧЕ фотодіодів: а) зразок 1; б) зразок 2

На рис. 3а можна побачити криві трьох ФЧЕ із низьким темновим струмом (лінії співпадають), та криву для ФЧЕ 3, яка характеризує пробій  $p-n$ -переходу, при чому зростання  $I_m$  відносно інших ФЧЕ спостерігалось вже при  $U_{зм}=100$  В. При  $U_{зм}=300$  В  $J_m=3560$  нА/см<sup>2</sup>. На рис. 3б можна побачити дві криві для ФЧЕ 2, 3 із низьким  $I_m$  (лінії співпадають), криву для ФЧЕ 4, яка характеризує незначне зростання темнового струму відносно інших ФЧЕ, та криву для ФЧЕ 1, яка характеризує пробій  $p-n$ -переходу. В даному випадку пробій почався при  $U_{проб.}=160$  В, а при  $U_{зм}=300$  В  $J_m=10,64$  мкА/см<sup>2</sup>.

Щодо кривої для ФЧЕ 4 зразка 2, то зростання  $I_m$  відносно інших площадок в даному випадку спостерігалось вже при  $U_{зм}=2$  В. Імовірно це спричинене наявністю дислокацій, переріз захоплення яких збільшується при збільшенні напруги зміщення. Відповідно дані дефекти завдяки слоїм пружним полям — атмосферам Коттрелла можуть декоруватися домішками та, пересікаючи  $p-n$  перехід, утворювати генераційно-рекомбінаційні центри в області просторового заряду. Це в свою чергу зменшуватиме час життя неосновних носіїв заряду та збільшуватиме генераційну складову темового струму [11, 15].

Для дослідження поверхні описаних ФЧЕ, проводилось селективне травлення зразків (Рис. 4). Відмітимо, що поверхневий опір зразка 1 після дифузії фосфору сягав  $R_s \approx 2,3$  Ом/□, а зразка 2 -  $R_s \approx 2,7$  Ом/□. Також кристали володіли різною поверхневою густиною дислокацій, яка відрізнялась і в межах одного



зразка. Так, густина дислокацій ФЧЕ з зразка 1 значно нижча, ніж густина дислокацій на поверхні інших площадок, але власне в ФЧЕ 3 спостерігався пробій. Щодо зразка 2 то густина структурних дефектів на його поверхні була набагато нижча, ніж в попереднього та спостерігався рівномірний їх розподіл по поверхні, але в ФЧЕ 1 також був пробій.

З Рис. 3 можна зробити хибний висновок, що густина дислокацій не впливає на  $U_{проб}$ . Але варто зазначити, що при виготовленні нами ФД із  $R_s \approx 2,7-3 \text{ Ом}/\square$  відсоток виробів бракованих по розкиду  $I_m$  чи пробією  $p-n$ -переходу знижувався на 15-20% відносно ФД з  $R_s \approx 2,1-2,4 \text{ Ом}/\square$  при незначному збільшенні рівнів темнових струмів (Рис. 5). Оскільки дане зниження концентрації домішки дозволило знизити густину дислокацій на 1-3 порядки.

Також важливим є розміщення даних дефектів, а саме те чи вони перетинають  $p-n$ -перехід. Адже, згідно [15], більшість дислокацій знаходяться в дифузійній області (глибина  $n^+-p$ -переходу в розглядуваному випадку сягає 4-5 мкм), але при пошарому травлюванні поверхні підкладок, нами були виявлені дислокації і на глибині 20-30 мкм [11]. Тому можна припустити, що при високих концентраціях легуючої домішки, внесені напруження сприяють утворенню дислокацій не лише в межах  $p-n$ -переходу, але і в  $i$ -області. Додавимо, що структурні дефекти саме в  $i$ -області кристалу впливають на генераційний струм ФД.

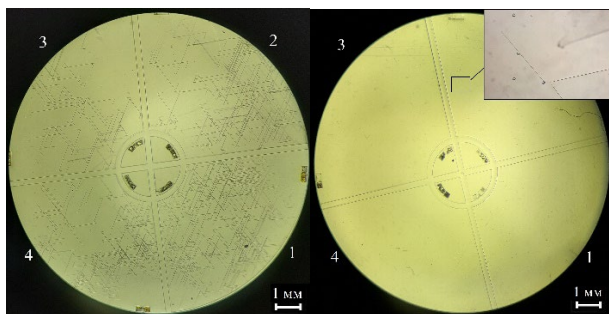


Рис. 4 Зображення поверхні ФД після селективного травлення (ФЧЕ пронумеровано): а) зразок 1; б) зразок 2

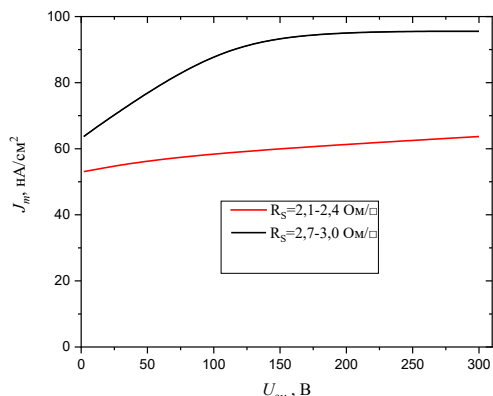


Рис. 5 ВАХ ФД при різному  $R_s$   $n^+$ -шару

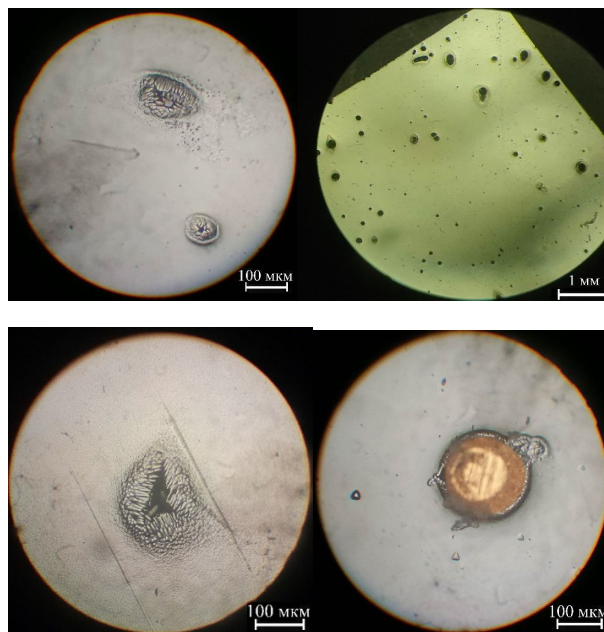


Рис. 6 Зображення порушеної поверхні підкладок після термічного наплення Cr-Au

Варто відмітити, що наявність поверхневих дефектів, зокрема дислокацій, до дифузії домішки теж сприяє зниженню напруги пробією  $p-n$ -переходу. Адже при високій глибині залягання даних дефектів можливе локальне викривлення дифузійного профілю внаслідок пришвидшеної дифузії по дислокаціях, а області викривлення є місцями із підвищеним рівнем напруженості електричного поля, відповідно – місцями імовірного пробією. Уникнути впливу описаних факторів на зниження напруги пробією можливо при чіткому контролі поверхні підкладок перед початком технологічного процесу, та використання не високих концентрацій легуючих домішок, які можуть забезпечити потрібний рівень темнових струмів.

### В. Термічне наплення Cr-Au

При виготовленні ФД, після етапу формування контактних площадок методом термічного наплення Cr-Au помічено появу бракованих кристалів по рівню темнових струмів, які контролювалися до і після наплення. У випадку багатоелементних ФД це проявлялось у розкиді рівнів  $I_m$  по фоточувливих елементах. При вимірюванні ВАХ бракованих зразків після наплення спостерігалась картина як і в зразка 2 (Рис. 16). Тобто спостерігаються криві, які характеризують і пробій  $p-n$ -переходу і поступове зростання темного струму при збільшенні напруги зміщення. Для визначення причин зростання темного струму підкладки після операції наплення також оброблялись у селективному травнику Сіртля. При огляді поверхні бракованих кристалів при різних збільшеннях було виявлено комплекси структурних дефектів у формі кратерів, що є скупченнями хаотично розміщених дислокацій та точкових дефектів (Рис. 6).

Відмітимо, що наведені дефекти були більшою мірою притаманні зворотній стороні підкладки (зі сторони  $p^+-p$ -переходу). При дослідженні причин

появи даних дефектів встановлено, що вони утворюються внаслідок локального плавлення кремнію при потраплянні на нього «крапель» Au із  $T > T_{m-Si}$ , внаслідок кипіння у випаровувачі. У місцях їх локалізації утворюється потовщений, часто гострокінечний шар золота, який потребує тривалішого травлення під час фотолітографії. Однак, це може призводити до розтравлення, і, як наслідок, зміни заданої форми та розміру контактних площадок. Також описані утворення можуть пошкоджувати фотошаблони, утворюючи подряпини. Пробій в даному випадку був викликаний локальним руйнуванням структури  $p-n$ -переходу.

Встановлено, що напилення із дроту супроводжується інтенсивнішим «засміченням» підкладок «краплями» золота, ніж при використанні корольків. Механізм цього явища потребує додаткових досліджень.

Уникнути чи мінімізувати утворення описаних дефектів можна використовуючи напилення із закритих випаровувачів чи збільшення часу напилення на заслінку при плавленні золота. Однак ці методи збільшують розхід дорогоцінного металу. Також можна використовувати інші види напилення, які забезпечують належну якість та адгезію отриманих плівок.

#### C. Механічні пошкодження $p^+-p$ переходу

Варто відмітити, що  $p^+-p$ -перехід з тильної сторони кристалу ФД є мілким ( $x_{p^+-p} \approx 1-2$  мкм) [14], відповідно будь-які механічні пошкодження можуть порушити структуру  $p-n$ -переходу. Нами проведено експеримент: на кристал із зворотної сторони був здійснений механічний вплив шляхом глибокого дряпання, яке порушувало структуру  $p^+-p$ -переходу, то зміна темнового струму спостерігалась лише в ФЧЕ, який знаходився навпроти області подряпини. Це пояснюється розділенням ОПЗ кожного ФЧЕ. Відповідно порушення  $p^+-p$ -переходу сприятиме зростанню  $I_m$  того фоточутливого елемента, ОПЗ якого досягає до місця розміщення даного дефекту.

#### D. Клин травлення та нерівності границі оксиду, утворені під час фотолітографії

Під час фотолітографії для отримання вікон під дифузію фосфору проводять травлення оксиду кремнію. Але цей процес супроводжується утворенням клину  $SiO_2$  на межі вікна, який впливає на розміри дифузійної області. При наявності клину травлення відбувається додаткове збільшення розміру дифузійної області, оскільки товщина оксиду у нижнього краю клину недостатня для маскуванню від дифундуючої домішки. Збільшення дифузійної області можна визначити за формулою (6) [17]:

$$l_{diff} = l_{SiO_2} + 2x_j \left( 1 + \frac{k}{10h_{SiO_2}} \right) \quad (6)$$

де  $l_{SiO_2}$  та  $l_{diff}$  – розміри оксидного вікна і відповідної дифузійної області;  $k$  – ширина клину травлення.

В такому випадку наявність клину травлення не лише вносить зміни в розміри дифузійної області, але і призводить до того що  $p-n$ -перехід виходить на поверхню під гострим кутом (Рис. 7).

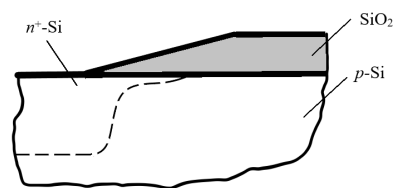


Рис. 7 Схематичне зображення впливу клину травлення на дифузійний профіль

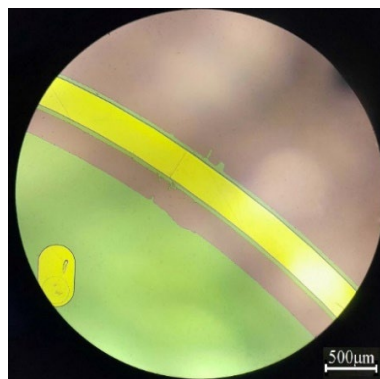


Рис. 8 Зображення нерівностей границі оксидного вікна

Тонкі клиноподібні краї дифузійного шару можуть бути причиною зменшення  $U_{проб}$ . Так, в [16] показано, що пробій в такому випадку пов'язаний з появою областей мікроплазми, утворених, як правило, там, де збільшений клин  $SiO_2$  і межі  $p-n$ -переходу виражені не різко.

Негативні фоторезисти мають клин травлення порядку 1-2 мкм. Позитивні резисти типу ФП-383, ФП-25 (Фраст-М) [18] володіють клином травлення 0,3-0,4 мкм, але при використанні нами позитивного фоторезисту AZ-1518 (MicroChemicals) [19] вдається досягнути зменшення клину травлення до 0,1 мкм, що дозволяє мінімізувати явище виходу  $p-n$ -переходу на поверхню під гострим кутом, а відповідно знизити його вплив на  $U_{проб}$ .

Зазначимо, що мікроплазми можуть утворюватися і на нерівностях границі оксиду. Цей вид граничних дефектів виникає при погано підібраних режимах експонування та проявлення, або при використанні неякісних фотошаблонів (Рис. 8.)

Відповідно для зменшення впливу описаних явищ на напругу пробою потрібно також чітко контролювати процес фотолітографії.

#### E. Припаювання/приварювання контактних виводів

На етапі приварювання/припаювання виводів до контактних площадок іноді може спостерігатися поява бракованих ФД по пробою  $p-n$ -переходу. В даному випадку це тепловий пробій, тобто внаслідок локального розігріву  $p-n$ -переходу порушилась його структура. В розглядуваному технологічному процесі Au-виводи приварювались на установці контактного імпульсного зварювання Контакт 3А. Існує кілька

технологічних та конструкційних методів знизити імовірність теплового пробію під час вказаної операції. Перший, це збільшення площі контактних площадок із їх розміщенням не лише на кремнію, але і на поверхні  $\text{SiO}_2$ , як це показано на Рис. 9а. Відповідно окисел, який розділяє Cr-Au та Si зменшує імовірність теплового пробію під час приварювання виводів.

Другий метод більшою мірою варто застосовувати при неефективності першого, оскільки він потребує виконання додаткових операцій дифузії та фотолітографії, зокрема при виготовленні структур із мілкими  $p$ - $n$ -переходами. Метод полягає в локальному збільшенні глибини  $p$ - $n$ -переходу в місцях розташування контактних площадок (Рис. 9б). Відповідно за рахунок збільшення  $x_j$  зменшується імовірність теплового пробію, але зростає імовірність появи лавинного пробію внаслідок викривлення дифузійного профілю.

### ВИСНОВКИ

Ефективними методами підвищення напруги пробію є зменшення питомого опору використовуваного кремнію, збільшення товщини підкладки та глибини залягання  $p$ - $n$ -переходів, зниження концентрацій легуючих домішок, але ці методи варто використовувати в випадках, які дозволяють нехтувати деградацією відповідних параметрів. Відмітимо, що ключовими факторами зниження напруги пробію є наявність порушень кристалічної ґратки (дислокації, комплекси точкових дефектів, механічні порушення), дефекти фотолітографії, чи теплові пробію під час приварювання контактних виводів. Відповідно забезпечення технологічних умов, що дозволяють виготовляти фотодіоди з мінімумом поверхневих дефектів,

дозволяє знизити імовірність появи пробію  $p$ - $n$ -переходу при низьких напругах.

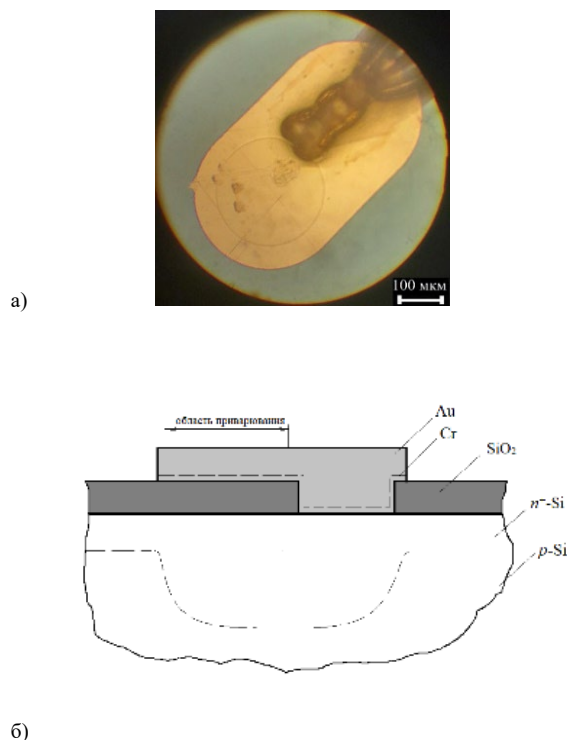


Рис. 9 Зображення контактних площадок та областей приварювання виводів: а) фото  $\times 200$  (вивід укріплений епоксидною смолою); б) схематичний переріз

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Kukurudziak M. S., Dobrovolsky Yu. G. "Silicon p-i-n photodiode with increased pulse sensitivity". *Tekhnologiya i Konstruivanie v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 1–2, pp. 61–67. DOI: [10.15222/TKEA2021.1-2.61](https://doi.org/10.15222/TKEA2021.1-2.61)
- [2] Setera B., Christou A. Challenges of Overcoming Defects in Wide Bandgap Semiconductor Power Electronics. *Electronics* 2022, 11, 10. DOI: [10.3390/electronics11010010](https://doi.org/10.3390/electronics11010010)
- [3] Setera B., & Christou A. Threading dislocations in GaN high-voltage switches. *Microelectronics Reliability*, 2021, 124, 114336. DOI: [10.1016/j.microrel.2021.114336](https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114336)
- [4] Weber Y. Mechanism of breakdown voltage wavering in power MOSFET induced by silicon crystalline defect. *Microelectronics Reliability*, 2011, 51(9-11), 1908-1912. DOI: [10.1016/j.microrel.2021.114336](https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114336)
- [5] Fiorenza, P., Adamo, S., Alessandrino, M. S., Bottari, C., Carbone, B., Di Martino, & etc. "Correlation between MOSFETs breakdown and 4H-SiC epitaxial defects" in *2021 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)* pp. 1-6, March, 2021. DOI: [10.1109/IRPS46558.2021.9405148](https://doi.org/10.1109/IRPS46558.2021.9405148)
- [6] Beck, A. L., Yang, B., Guo, X., & Campbell, J. C. "Edge breakdown in 4H-SiC avalanche photodiodes," *IEEE journal of Quantum Electronics*, 40(3), 321-324, 2004. DOI: [10.1109/JQE.2003.823033](https://doi.org/10.1109/JQE.2003.823033)
- [7] Pitts, O. J., Hisko, M., Benyon, W., Bonneville, G., Storey, C., & SpringThorpe, A. J. Planar avalanche photodiodes with edge breakdown suppression using a novel selective area growth based process. *Journal of Crystal Growth*, 470, 149-1536 2017. DOI: [10.1016/j.jcrysgro.2017.04.029](https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2017.04.029)
- [8] Glunz, Stefan W., and Frank Feldmann. "SiO2 surface passivation layers—a key technology for silicon solar cells." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 185, pp. 260-269, 2018. DOI: [10.1016/j.solmat.2018.04.029](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.04.029)
- [9] Sirtl E., Adler. A. "Flusssäure als spezifisches System zur Atzgrubenentwicklung auf Silizium", *Z. Metallk.* Vol.119, no. 6. pp. 529-531, 1961.
- [10] N. M. Tugov, B. A. Glebov, N. A. Charykov, *Poluprovodnikovyye pribory: Uchebnik dlya vuzov [Semiconductor devices: Textbook for universities]*, Ed. V. A. Labuntsov, Energoatomizdat, Moscow, 1990. 576 p.
- [11] Kukurudziak M.S. "Formation of Dislocations During Phosphorus Doping in the Technology of Silicon p-i-n Photodiodes and their Influence on Dark Currents," *Journal of nano- and electronic physics*. vol. 14 no 4, 04015(6cc), 2022. DOI: [10.21272/jnep.14\(4\).04015](https://doi.org/10.21272/jnep.14(4).04015)
- [12] S. Zie. Physics of semiconductor devices. Moscow: Mir, 1984, vol. 2, p. 347
- [13] M. S. Kukurudziak, E. V. Maistruk, "Influence of chromium sublayer on silicon P-I-N photodiodes responsivity," Proc. SPIE 12126, Fifteenth International Conference on Correlation Optics, 121261V, 20 December 2021. DOI: [10.1117/12.2616170](https://doi.org/10.1117/12.2616170)
- [14] Kukurudziak, M. S., & Maistruk, E. V. "Features of Diffusion Doping and Boron Gettering of Silicon pin Photodiodes" in *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)* pp. 1-6. 2022. DOI: [10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916420](https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916420)
- [15] Reyvi K. *Defekty i primesi v poluprovodnikovom kremnii [Defects and impurities in semiconductor silicon]*. Mir, Moscow, 1984. 472 p.
- [16] Tagaev, M. B., & Abdreyimov, A. A. "MODELING MICROPLASMAS PN JUNCTION," *EPRA International Journal of Multidisciplinary Research (IJMR)*, 8(6), 139-145, 2022. DOI: [10.36713/epra2013](https://doi.org/10.36713/epra2013)





[17] Scinner S. M. and oth., "Improve device reliability with physics-of-failure techniques," *Electronsc Design*, 1965 September, 13, 75-75.

[18] Datasheet FP-383. URL: [https://frast.ru/frast\\_new/pr\\_pozitiv\\_f.html](https://frast.ru/frast_new/pr_pozitiv_f.html)

[19] Datasheet AZ-1518. URL: [https://www.microchemicals.com/products/photoresists/az\\_1518.html](https://www.microchemicals.com/products/photoresists/az_1518.html)

Надійшла до редакції 04 листопада 2022 року  
Прийнята до друку 20 грудня 2022 року

UDC 621.383.52

# Technological Causes of p-n-Junction Breakdown of Silicon p-i-n Photodiodes

M.S. Kukurudziak, ORCID [0000-0002-0059-1387](https://orcid.org/0000-0002-0059-1387)

Engineering production complex 1

Rhythm Optoelectronics Shareholding Company <https://ckb-rhythm.com>

Chernivtsi, Ukraine

**Abstract**—During the manufacture of coordinate quadrant p-i-n photodiodes with a high reverse bias voltage  $U_{\text{bias}} \geq 200$  V, it was observed the presence of a systematic lack of products at the level of the dark current of one (rarely several) photosensitive element. After measuring the volt-ampere characteristics, it was seen that the cause of this is a breakdown of the p-n junction.

Effective methods of increasing the breakdown voltage are reducing the specific resistance of the silicon used, increasing the thickness of the substrate and the depth of the p-n junctions, reducing the concentration of alloying impurities, but these methods should be used in cases that allow the degradation of the relevant parameters to be neglected. In particular, it is necessary to provide a level of technology that reduces the probability of a breakdown.

A number of technological factors that can be the reasons for reducing the breakdown voltage of the p-n junction have been established and investigated. Strong influence on the breakdown voltage. have crystallographic defects, in particular dislocations falling into the region of the p-n junction. By reducing the concentration of alloying impurities, it is possible to significantly reduce the density of dislocations with a small increase in the levels of dark currents. This helps to eliminate the probability of a breakdown.

After operations of sprinkling chrome-gold on the reverse side of such a substrate, the appearance of breakdowns was detected. The cause of which are defects formed as a result of local melting of silicon when gold "droplets" with a temperature higher than the melting temperature of silicon fall on it, as a result of boiling in the evaporator. It is possible to reduce the probability of the appearance of these defects by spraying from closed evaporators or by increasing the etchability of spraying on the damper.

During photolithography, in particular, when etching windows in the oxide, etching wedges are formed, which direct the output of the p-n junction to the surface at an acute angle. These areas are places with an increased level of electric field intensity, respectively, places of probable localization of the breakdown. This can be avoided by using photoresists that provide minimal etching wedges. Irregularities between the oxide windows can also lead to a decrease in the probe voltage, the probability of this can be reduced by careful control of the development and exposure operations and the use of defect-free templates.

Another reason for a breakdown can be a violation of the p-n junction due to welding of the contact terminals. In this case, it is a thermal breakdown. This can be avoided by increasing the size of the contact pads with their expansion on silicon oxide, accordingly, welding on the surface of the oxide reduces the probability of a hole. Another method is a local increase in the depth of the p-n junction, but in this case additional technological operations must be carried out.

**Keywords** — silicon; photodiode; dislocation; dark current; etching wedge; p-n junction breakdown.

