

DOI: 10.18372/2310-5461.54.16750

УДК 621.934/.936:621.383.52

М. С. Кукурудзяк, інженер-технолог
Акціонерне товариство
«Центральне конструкторське бюро Ритм»,
orcid.org/0000-0002-0059-1387
e-mail: mykola.kukurudzyak@gmail.com

ПРОБЛЕМАТИКА РІЗАННЯ ПІДКЛАДОК АЛМАЗОВАНИМ ДИСКОМ У ТЕХНОЛОГІЇ КРЕМНІЄВИХ *p-i-n* ФОТОДІОДІВ

Вступ

Із розвитком електронних пристроїв та систем постійно підвищуються вимоги до їх параметрів. Відповідно, виникають потреби в розробці нових та вдосконаленню існуючих методів та операцій при виготовленні напівпровідникових приладів. У мікро- та нанотехнології використовуються матеріали, які є крихкими та складно оброблюваними, що, разом із нанесеними на них структурами, ускладнює технологічні операції виготовлення, зокрема, розділення їх на елементи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасні методи розділення пластин на кристали засновані на механічному та лазерному різанні: алмазне скрайбування з подальшим розламуванням; різання алмазованим диском із зовнішньою ріжучою кромкою; лазерне скрайбування з подальшим розламуванням; різання лазером тощо [1; 2].

Метод скрайбування знайшов широке використання для розділення пластин на кристали квадратної чи прямокутної форми. Його суть у полягає в тому, що на поверхні напівпровідникової пластини алмазним різцем-скрайбером наносять риси в двох взаємно перпендикулярних напрямках. Під рисками утворюється напружена область. Пластину піддають механічному впливу, в результаті якого вона розламується на окремі кристали. Даний метод володіє рядом недоліків, які на заключних операціях розділення пластин приводять до значної кількості браку. До них відносяться: розгалуження мікротріщин, які утворюються при дії різця на матеріал, що викликає відхилення напрямку розколу від прямих ліній; сколи матеріалу підкладки при перетині ліній скрайбування; помітний за час обробки однієї пластини знос різця; високі механічні напруження в області різання.

Для скрайбування використовують також енергію лазерного випромінювання. Лінія різання, що виникає при взаємодії енергії

лазерного випромінювання, знижує міцність матеріалу за рахунок зменшення площі поперечного перерізу підкладки, утворення локальної концентрації напруження і деформування шару поблизу лінії лазерного різання. Недоліком даного методу є випаровування та осадження н/п матеріалу на поверхні кристалів. Це можна мінімізувати продувкою робочої зони повітрям чи вакуумним відкачуванням чи нанесенням плівкового покриття [3, с. 16].

Широкого розповсюдження в останні десятиліття набув метод лазерного управляючого термосколювання [4; 5]. В основу процесу положено нагрівання, що здійснюється лазерним променем вздовж лінії різання на пластині з подальшим охолодженням нагрітої ділянки холодоагентом. Лазерне опромінення поверхні матеріалу призводить до виникнення у зовнішніх його шарах значних напруг стиснення, які безпосередньо до руйнування не приводять. Але саме завдяки холодоагенту відбувається різке локальне охолодження і утворений градієнт температур призводить до появи в приповерхневому шарі напруг розтягування, які створюють умови для утворення та просування тріщини. У праці [1] вказано, що даний метод дозволяє отримати бездефектні краї пластин, без сколів та тріщин, та без негативного впливу на експлуатаційні параметри оброблених структур. Але в праці [6] вказано ряд вимог, для забезпечення високої якості обробки, які ускладнюють даний процес: необхідність кріплення пластини на плівку-супутник, неприпустимість на доріжках різання плівок фоторезисту або інших органічних речовин, необхідність захисту пластини полімерним покриттям під час приклеювання на плівку супутник чи для уникнення конденсації на поверхні випарованого матеріалу та ін.

Цей метод розділення пластин на елементи доцільно використовувати для різання крихких матеріалів, тонких підкладок, чи структур де висуваються жорсткі вимоги до якості лінії

різання. Наприклад, у виробництві захисного скла для мікродисплеїв на органічних світловипромінювальних діодах, різання та зняття фаски екранів мобільних пристроїв, притуплення країв виробів із крихких неметалевих матеріалів та ін.

У випадках, де виникають труднощі із застосуванням лазерного випромінювання, чи відсутні жорсткі вимоги до шорсткості країв виробів, доцільно використовувати менш трудомісткі та вартісні методи розділення, зокрема різання алмазованим диском із зовнішньою ріжучою кромкою. Даний метод дає змогу різати напівпровідникові пластини як наскрізь так і з недорізом та подальшим розламуванням. Недоліком методу є деградація алмазованого полотна, що потребує частого заточення чи заміни ріжучого диска.

Постановка завдання

Методи різання напівпровідникових пластин на елементи (кристали) добре відомі, але для кожного класу виробів існують власні обмеження чи особливості. Так, при серійному виготовленні кремнієвих квадрантних *p-i-n* фотодіодів (ФД) з охоронним кільцем (ОК) автором помічено збільшення значень темнових струмів ОК (I_{OK}) після різання диском із алмазованою ріжучою кромкою. Зафіксована зміна I_{OK} потребує досліджень, зокрема, встановлення причин виникнення та способів усунення. Відповідно, **метою** даної роботи є вивчення механізму зростання темнових струмів ФД та визначення оптимальних режимів різання пластин на кристали даним методом, зокрема, вплив швидкості подачі ріжучого полотна, його товщини та глибини недорізу.

Експериментальна частина

Кремнієві *p-i-n* ФД виготовлялись за дифузійно-планарною технологією [7]. На лицевій стороні кристали ФД містили чотири фоточутливі елементи (ФЧЕ) та ОК n^+ -типу. Його роль при оберненому зміщенні «збирати» зворотній струм із власної площі, з периферії кристалу, включаючи торці та половину зазору між ФЧЕ та ОК, вкритих інверсійним шаром.

Таким чином, наявність ОК дозволяє зменшити темнові струми ФЧЕ I_m .

Розділення кремнієвих пластин на елементи здійснювалось методом різання диском із алмазованою зовнішньою ріжучою кромкою на установках DAD-2H/6 та DAD-2H/6T (Японія), зі швидкістю обертання шпинделя 30000 об/хв та діапазоном швидкості подачі $v = 0,3-30$ мм/с.

Фотодіоди виготовлялись у формі правильного восьмикутника. Спочатку підкладки різали на квадратні елементи. Потім формували восьмигранники шляхом обрізання вершин квадратних кристалів.

Параметри I_{OK} та I_m вимірювались до операції розділення та після. Змінюючи відстань від лінії різання до ОК (d) (рис. 1) також досліджено вплив даного параметру на I_{OK} .

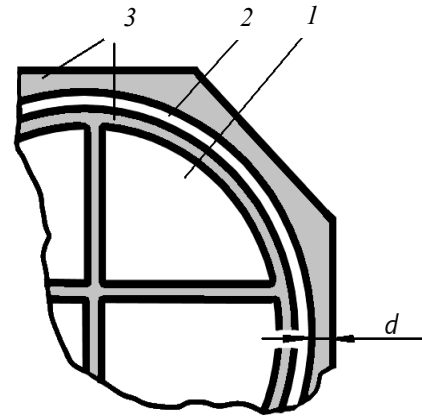


Рис. 1. Схематичне зображення фрагмента ФД:
1 — ФЧЕ; 2 — ОК; 3 — маскуючий окисел

Різання підкладок здійснювалось на металевій полірованій платформі із вакуумним фіксатором (ВФ), що забезпечувало якісну фіксацію пластин (рис. 2).

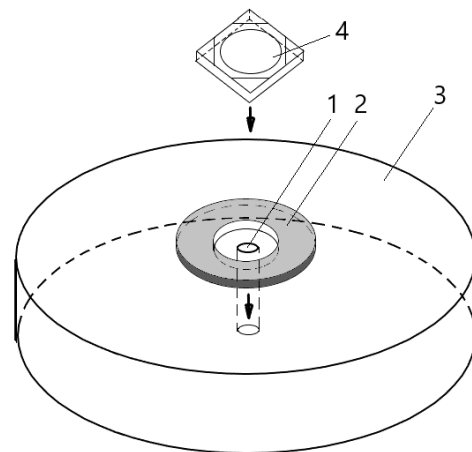


Рис. 2. Схематичне зображення платформи для різання пластин:

1 — ВФ; 2 — кремнієва підкладка для покращення ефективності захоплення кристалу; 3 — платформа для різання; 4 — кристал

При обробці пластин малого діаметру, чи, при обрізанні вершин окремих квадратних елементів часто спостерігався зсув зразків під час процесу, що призводило до виходу з ладу алмазованого полотна диска (рис. 3).

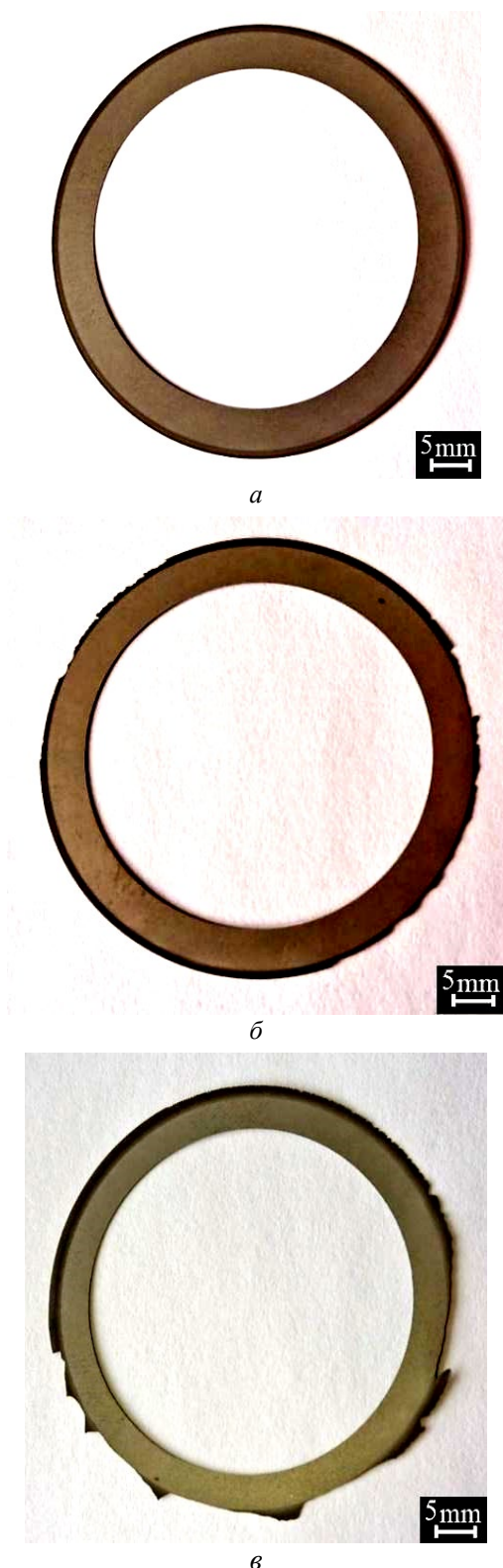


Рис. 3. Зображення дисків з алмазною ріжучою кромкою: *a* — придатний диск; *б, в* — диски, що вийшли з ладу

Причиною такого зсуву є неможливість якісного закріплення вакуумним фіксатором кристалів малих розмірів унаслідок малої площі захоплення.

Для уникнення описаного, використовувалось пристосування, що являло собою поліровану

кремнієву пластину із отвором діаметром 10–12 мм, яка закріплювалась на платформі для різання так, щоб ВФ знаходився в центрі отвору (див. рис. 2). Це дозволяло збільшити силу вакуумного притиску кристалу та мінімізувати його рух у процесі обробки.

Вимірювання $I_{ок}$ та I_m здійснювалося при оберненому зміщенні $U = 120$ В згідно з ГОСТ 17772-88 [8].

Результати досліджень та їх обговорення

Утворення дислокацій внаслідок різання підкладок на сегменти

У ході експериментальних досліджень помічено, що при розташуванні ФД поблизу лінії різання, що була виконана на кремнієвій пластині до термічних операцій, ФЧЕ володіли підвищеними темновими струмами порівняно з такими, що розміщені у центрі пластин. При дослідженні таких зразків у селективному травнику Сіртля [9], помічено присутність сіток дислокацій вздовж ліній різання з високою концентрацією структурних дефектів (рис. 4), які сприяли підвищенню темного струму за рахунок збільшення поверхневої ($I_m^{пов}$) (1) та генераційно-рекомбінаційної ($I_m^{ген}$) складової темного струму (2) [10]:

$$I_T^{пов} = 10^{-3} \sigma_{ss} N_{ss} A_{p-n}, \quad (1)$$

де σ_{ss} — переріз захоплення; N_{ss} — густина поверхневих станів; A_{p-n} — площа $p-n$ переходу.

$$I_T^{ген} = e \frac{n_i}{2\tau_{eff}} W_i A_{ФЧЕ}, \quad (2)$$

де e — заряд електрона; n_i — власна концентрація носіїв заряду в підкладці; τ_{eff} — ефективний час життя носіїв заряду; W_i — ширина області просторового заряду; $A_{ФЧЕ}$ — площа ФЧЕ.

Відповідно під час збільшення генераційно-рекомбінаційних центрів зменшується τ_{eff} (3) [10]:

$$W_i = \left(\frac{2\epsilon\epsilon_0 (j_k U_{3M})}{eN_A} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

де σ_{ss-n} , σ_{ss-p} — переріз захоплення електронів і дірок відповідно; E_D — енергетичний рівень ГРЦ; E_i — енергетичний рівень, що відповідає середині забороненої зони; k — стала Больцмана; T — температура; N_D — концентрація ГРЦ; v_n , v_p — середня відносна (відносно центру рекомбінації) швидкість теплового руху електронів і дірок, відповідно.

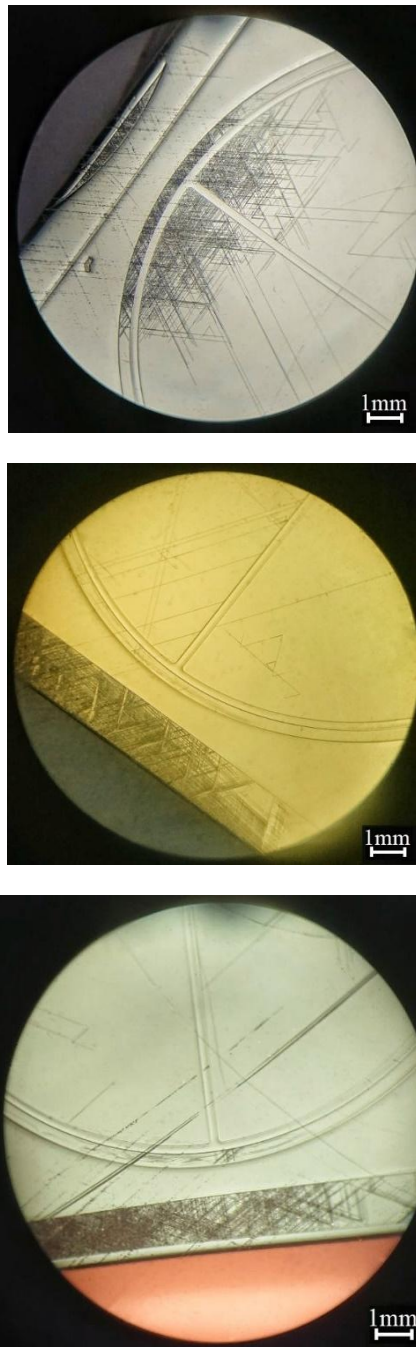


Рис. 4. Фото ФД із сітками дислокацій, утвореними під час термічних операцій після дискового різання

Утворення дислокацій було спровоковане механічними напруженнями, які відбуваються під час дискової різці. При селективному травленні зразків, які були розділені після термічних операцій, скупчень дислокацій не було виявлено. Можна стверджувати, що утворення структурних дефектів у першому випадку спричинене ще високими температурами та дифузією домішок, коли області із підвищеними механічними напруженнями ставали місцями локалізації дислокацій, утвореними в результаті релаксації напружень за значної температури.

Скупчення дислокацій були виявлені також у місцях розташування сколів по лінії різання кремнієвих платівок (навіть після високотемпературного відпалу чи окислення) (рис. 5), що свідчить про наявність локальних механічних напружень в місцях сколів.

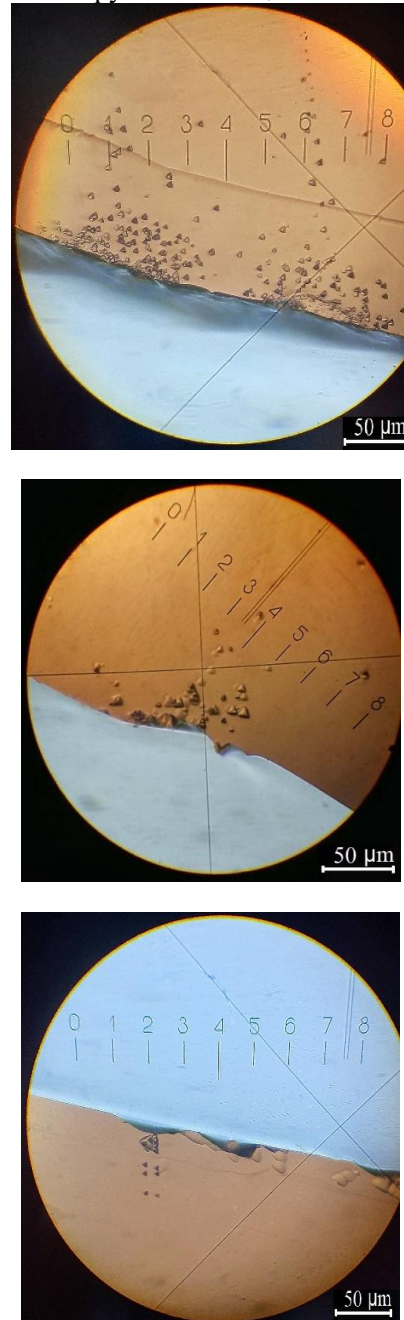
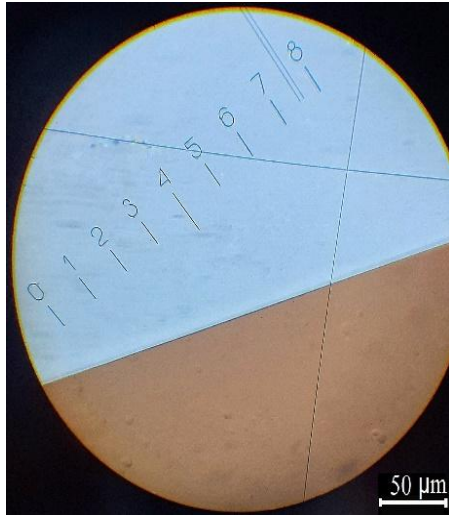


Рис. 5. Зображення дислокаційних скупчень у місцях сколів по лінії різання

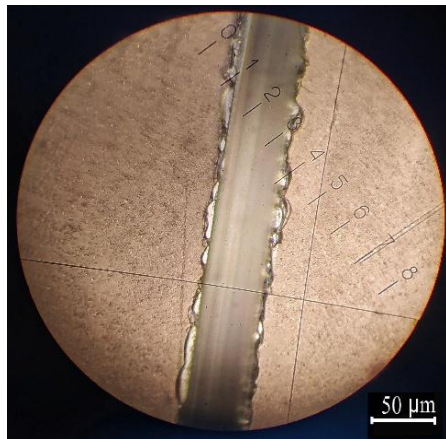
Деградація дисків з алмазованою кромкою під час операції розділення та оптимальна глибина різання

Суттєвим недоліком методу різання диском із зовнішньою алмазованою кромкою є потреба в частому заточуванні полотна внаслідок його деградації.

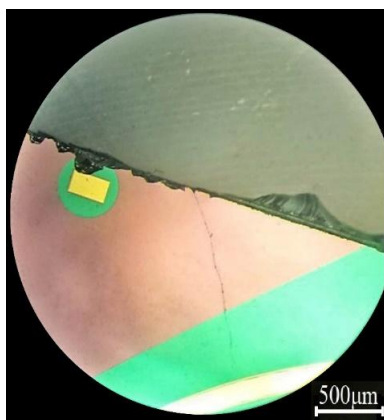
При цьому спостерігається розкид товщини лінії різання, наявність сколів та мікротріщин (рис. 6, б). Відповідно, коли починають проявлятися вказані дефекти, варто проводити заточування диска. При виявленні сколів алмазованого полотна, диск підлягає заміні, оскільки вони викликають значні порушення кристалу приладів вздовж лінії різання (рис. 6, в).



a



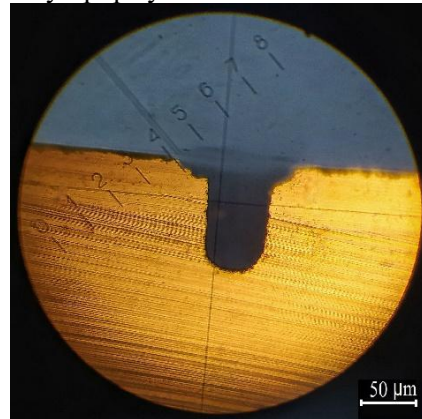
б



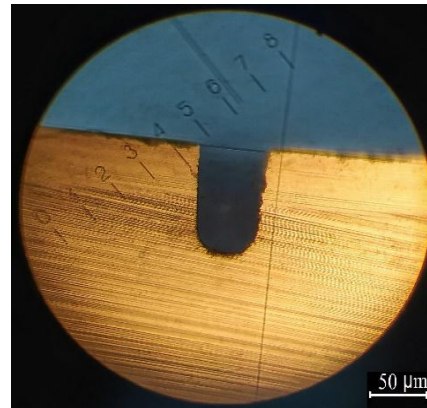
в

Рис. 6. Зображення ліній різання: *a* — різання заточеним диском; *б* — різання незаточеним диском; *в* — різання диском, що містив сколи алмазованого полотна

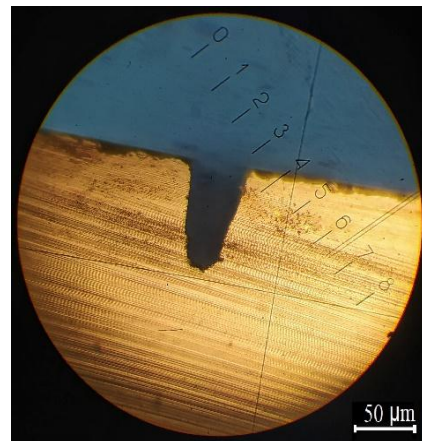
На рис. 7 наведено фото торців лінії різання дисками в різному стані. Часто при різці підкладок на елементи виникають потреби в наскрізному прорізуванні.



a



б



в

Рис. 7. Зображення торців лінії різання дисками в різному стані:

a — диск зі сколами; *б* — незаточений диск; *в* — заточений диск

У цьому випадку потрібно приклеювати пластини на підкладки-супутники, чи адгезійні плівки-супутники, що значно ускладнює та сповільнює процес (доцільно лише при одиничних зразках), а також вимагає використання додаткових матеріалів чи операцій (наприклад, відмивки від клейкої речовини), що

збільшує вартість виробів. В багатосерійному виробництві доцільніше використовувати метод розділення із недорізом та подальшим доламуванням зразків.

При використанні вказаного методу виникає потреба у встановленні оптимальної глибини різання, яка б мінімально сприяла деградації параметрів ФД після доламування.

Для визначення оптимальної глибини різання, вимірювались I_{OK} та I_m після різання та після доламування при різній глибині недорізу. Досліджувались глибини недорізу, які складали:

$x = \frac{1}{3}h$, $x = \frac{1}{4}h$ та $x = \frac{1}{5}h$ (де h — товщина

підкладки). При глибині недорізу $x = \frac{1}{5}h$

спостерігалось самовільне розламування зразків у процесі різання, що викликало утворення

сколів уздовж ліній різання. При $x = \frac{1}{3}h$ спостерігалось зростання I_{OK} та I_m після доламування на 10–20 %.

При $x = \frac{1}{4}h$ самовільне розламування зразків

та зростання темного струму не спостерігалось, відповідно дану товщину недорізу можна вважати оптимальною для даного методу різання.

Вплив відстані від лінії різання до ОК та швидкості різання на значення I_{OK} та I_m

Також було досліджено вплив відстані від лінії різання до ОК та швидкості різання v на значення I_{OK} та I_m . Було виміряно I_{OK} та I_m до і після операції розділення (табл. 1).

Досліджувались зразки із $d = 170$ – 900 мкм.

Таблиця 1

Зміна J_{OK} після операції різання диском з шириною алмазованого полотна 50 мкм при різній d та v

d , мкм	v , мм/с	J_{OK} , мкА/см ² до різання	J_{OK} , мкА/см ² після різання	Зростання від початкового ΔJ_{OK} , %
900	5	7,3	7,3	100
900	10	15,2	15,2	100
900	22	13,4	13,4	100
750	5	18,1	20,2	112
750	10	4,4	6,9	150
750	22	6,9	11,7	170
500	5	11,2	23,8	213
500	10	29,4	63,5	216
500	22	15,8	33,9	215
330	5	16,4	99,6	600
330	10	16,1	108,3	680
330	22	11,6	84,5	730
170	5	21,3	358,1	1680
170	10	13,9	370,4	2670
170	22	13,7	411,6	3000

Як бачимо з табл. 1 під час зменшення d I_{OK} зростає. При $d = 900$ мкм зміна I_{OK} після обробки не спостерігалась (навіть при $v = 22$ мм/с).

Зростання темного струму ОК при $d = 500$ – 750 мкм було несуттєвим та було викликане набутими механічними напруженнями в процесі різання, які спадають в міру віддалення від лінії різання.

Щодо зразків із $d = 170$ – 330 мкм, то зростання I_{OK} було значно вищим. Причиною цього, крім механічних напружень, є наявність

розірваних зв'язків вздовж лінії різання, які роблять внесок в значення I_{OK} . Адже область просторового заряду (ОПЗ) ОК, згідно [7], при зміщенні 120 В та питомому опорі підкладки 18 кОм, сягає ширини 490 мкм, що можна визначити з виразу (4)

$$\tau_{eff} = \frac{\exp\left(\frac{E_D - E_i}{kT}\right)}{\sigma_{ss-n} N_D v_n} + \frac{\exp\left(\frac{E_i - E_D}{kT}\right)}{\sigma_{ss-p} N_D v_p}, \quad (4)$$

де ϵ, ϵ_0 — діелектричні сталі для кремнію і вакууму відповідно; ϕ_k — контактна різниця потенціалів; U_{zm} — напруга зміщення; N_d — концентрація домішки в підкладці.

Відповідно, при досягненні лінії різання, ОПЗ «збирає» носії заряду з торців кристалу, що збільшує I_{OK} . Варто відмітити, що наявність сколів збільшує поверхневу складову темного струму ОК за рахунок збільшення площі захоплення носіїв заряду.

При зменшенні напруги зміщення ФД, вплив відстані від лінії різання до ОК зменшується за рахунок зменшення ширини ОПЗ. Відповідно, при виготовленні ФД з високими напругами зміщення потрібно збільшувати d і навпаки.

Зростання I_m після процесу різання не побачено. Але при випробуванні зразків, які володіли підвищеними I_{OK} внаслідок різання при $T = 85^\circ C$ спостерігалось значне зростання I_m відносно характерних значень. Це відбувалось внаслідок «перетікання» темного струму з ОК у ФЧЕ через поверхневі інверсійні канали, опір яких зменшувався при зростанні температури.

Також досліджено вплив швидкості подачі диска на I_{OK} . Із табл. 1 можна побачити, що при збільшенні v при однаковій відстані лінії різання до ОК I_{OK} зростає. При зменшенні швидкості нижче $v = 5$ мм/хв зменшення темного струму не спостерігалось. Але відмітимо, що при проведенні процесу різання на відстані 750 мкм до ОК при $v = 1$ мм/хв часто спостерігалось зростання I_{OK} до значень 180–270 % від початкового. Імовірно, причиною цього є відносно тривалий час процесу різання, коли кристали знаходились під дією вібрацій диска, що сприяло деградації параметрів.

Додамо, що при багатосерійному виробництві ФД різання пластин із малою швидкістю є не продуктивним, тому оптимальною швидкістю подачі диска вважатимемо $v = 5$ мм/хв.

Вплив товщини алмазованого полотна на деградацію параметрів ФД

Для різання пластин на елементи можливе використання дисків із різною товщиною алмазованого полотна. В даній роботі використовувались диски з товщиною ріжучого полотна 35 та 50 мкм. Ширина лінії різання складала d 50 мкм та d 75 мкм відповідно. В табл. 1 наведено результати вимірювання I_{OK} до і після розділення 50 мкм диском. Для порівняння проведено такий експеримент і для 35 мкм диска при всіх досліджуваних значеннях d та при $v = 5$ мм/с. Результати вимірювань відображено в табл. 2.

Таблиця 2

Зміна J_{OK} після операції різання диском 35 мкм при різній d

d , мкм	v , мм/с	J_{OK} , мкА/см ² до різання	J_{OK} , мкА/см ² після різання	Зростання від початкового ΔJ_{OK} , %
900	5	12,5	12,5	100
750	5	13,4	14,1	105
500	5	17,3	31,1	180
330	5	27,8	124,2	460
170	5	29,6	312,6	1060

Порівнюючи приріст I_{OK} після різання різними дисками, побачено, що приріст темного струму менший після розділення тоншим диском (рис. 8).

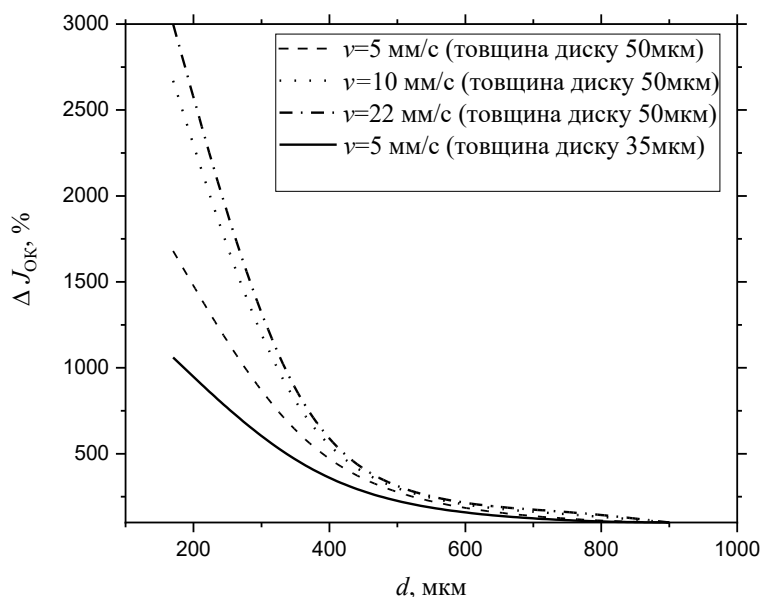


Рис. 8. Графік залежності приросту густини темного струму ОК після різання від відстані до лінії різання

Ще більша різниця між дисками була помітна в значеннях I_{OK} при зменшенні d (табл. 1, 2). При $d = 900$ мкм зміни темного струму не відбувалось. При $d = 500-750$ мкм різниця була мінімальна.

Лише при $d = 170-330$ мкм різниця в значеннях I_{OK} для різних дисків зростала та була суттєвою. Можливими причинами вказаного, є утворення меншої ширини лінії різання, відповідно зменшення відстані від лінії різання до ОК, що при $d = 170-330$ мкм є визначальним. А також диск з товщиною 35 мкм, при порушенні алмазного полотна, утворює значно дрібніші сколи кремнію, що вносить менший вклад в поверхневу складову темного струму.

Напруження та прогини пластин набуті під час операцій різання

Як вказано вище ФД виготовлялись в вигляді правильних восьмикутників. Спочатку пластини поділялись на квадратні елементи, а наступною операцією, шляхом відрізання вершин «квадратів», утворювались восьмигранники.

Помічено, що після різання підкладок на «квадрати» зміни I_{OK} не відбувалось. Зміни темнових струмів, вказані в табл. 1 та 2 спостерігались саме після відрізання вершин квадратних елементів. Описане можна пояснити в рамках класичної теорії пружності, розглядаючи задачі вигину круглих пластин на опорі з різними умовами.

Нехай правильний восьмигранник є квазікругом. Тоді розглянемо круглу пластину без отвору, оперту по контуру і рівномірно навантажену. Ця модель описує кристал розміщений на підкладці з отвором для збільшення площі захоплення зразка (див. рис. 2) із ввімкненим вакуумним фіксатором.

Вакуумний фіксатор діє на пластину, утворюючи тиск, який викликає від'ємну

кривизну з випуклістю вниз. Згідно з працею [11, с. 90] радіус кривизни пластини R можна визначити з рівняння:

$$R = \frac{hE}{\mu q}, \quad (5)$$

де q — тиск; E — модуль пружності матеріалу; μ — коефіцієнт Пуассона; h — товщина пластини.

По контуру пластини буде виникати від'ємний прогин w :

$$w = -\frac{\mu q}{2hE}(a^2 - r^2), \quad (6)$$

де a — радіус пластини; r — радіус області, до якої прикладено тиск.

У центрі пластини прогин набуде значення w_{\max} :

$$w_{\max} = \frac{qa^4}{6^4 D} \left(\frac{5+\mu}{1+\mu} + \frac{4}{3} \frac{3+\mu}{1-\mu^2} \frac{h^2}{a^2} \right), \quad (7)$$

$$\text{де } R = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)},$$

Вагомим фактором в утворенні кривизни в пластинах є розподіл залишкових напружень σ в напівпровідникових структурах, набутих внаслідок нанесення тонких плівок в даному випадку SiO_2 .

Оскільки внаслідок різниці температурних коефіцієнтів розширення Si та SiO_2 на поверхні їх розділу виникають значні механічні напруження, які призводять до вигину пластин [12]. У випадку якщо окиснюються обидві сторони підкладки вигин непомітний, однак, після зняття окислу з однієї із сторін як в досліджуваному випадку) виникає викривлення певного радіусу R (рис. 9).

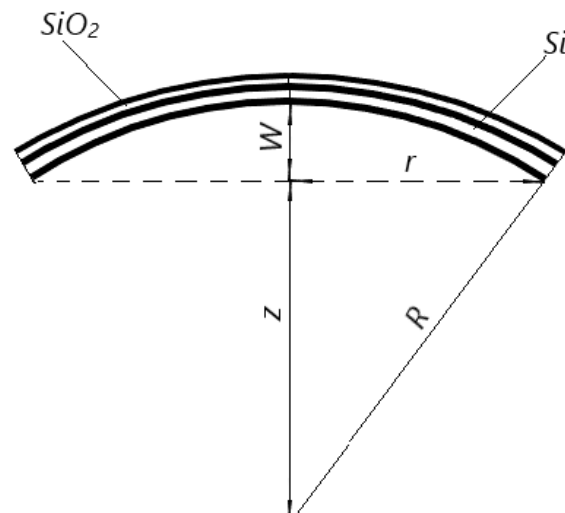


Рис. 9. Деформація кремнієвої пластини, покритої шаром SiO_2

Із рис. 9 можна визначити радіус кривизни та прогин пластини. Використавши теорему Піфагора можна записати систему рівнянь 8):

$$\begin{cases} R^2 = r^2 + z^2; \\ R = W + z. \end{cases} \quad (8)$$

Звідки

$$R = \frac{r^2}{2W} + \frac{W}{2},$$

$$W = R - \sqrt{R^2 - r^2}.$$

Згідно з працею [12] залишкові напруження в пластині із плівкою SiO₂ можна обчислити з рівняння:

$$\sigma = \frac{Eh^2}{6(1-\mu)Rd_{\text{SiO}_2}}.$$

де d_{SiO_2} — товщина оксидної плівки.

Відмітимо, що як у випадку дії вакуумного фіксатора на пластину так і внаслідок дії напружень утворених нанесеною плівкою, виникає кривизна випуклістю вниз. Відповідно накладання цих чинників сприяє погіршенню параметрів. Для врахування прогину кристалів, набутого внаслідок окислення, при розрахунку напруження набутого при різанні, проводять вимірювання радіусів кривизни до R_1 і після R_2) операцій різання. При цьому вираз для напружень в пластині набуде вигляду:

$$\sigma = \frac{Eh^2(R_1 - R_2)}{6(1-\mu)R_1R_2d_{\text{SiO}_2}}.$$

Суттєвим недоліком описаних методів розрахунку є те, що вони базуються на припущенні про рівномірний прогин всієї пластини, не враховуючи неоднакову товщину окислу периферійний окисел сягає 0,7–0,8 мкм, просвітлюючий — 0,18–0,19 мкм) та інших факторів. Тому реальну форму вигину варто вимірювати технічними засобами, а не аналітичними, наприклад методом оптичної топографії [13].

Також бачимо, що при проведенні операції різання на квадратні елементи та відрізання вершин «квадратів» послідовно без часового проміжку), зростання $I_{\text{ок}}$ набуває більших значень, ніж наведено в табл. 1 та 2. Це спричинено накладанням напружень, утворених двома послідовними операціями різання. Для мінімізації вказаного, після різання на «квадрати», елементи варто помістити в термостат із температурою 70–90°C для релаксації напружень. Тривалість релаксації від 12 год. А далі проводити операцію обрізання вершин квадратних елементів. Контроль електричних

параметрів ФД після операції різання варто проводити після релаксації.

Висновки

Досліджено метод різання кремнієвих підкладок диском із алмазною кромкою. Вивчено вплив режимів різання на темнові струми охоронних кілець *p-i-n* ФД. Встановлено оптимальні режими обробки, що мінімізують деградацію параметрів зразків:

- оптимальна глибина недорізу складає $\frac{1}{4}$ товщини підкладки;
- при відстані від лінії різання до охоронного кільця 900 мкм, деградація темного струму не відбувається при напрузі зміщення 120 В). При зменшенні відстані від лінії різання до активних елементів темнові струми погіршуються. Можливе зменшення відстані від лінії різання до охоронного кільця без погіршення темного струму при використанні меншої напруги зміщення;
- зростання темнових струмів фоточутливих площадок після процесу різання не побачено;
- оптимальною швидкістю подачі диска є 5 мм/с;
- при зменшенні товщини алмазного полотна деградація темнових струмів зменшується.

Погіршення параметрів ФД після операції різання відбувається внаслідок набутих механічних напружень та розірваних хімічних зв'язків на торцях кристалів. При термічній обробці підкладок, які були попередньо розділені алмазним диском, спостерігається утворення сіток дислокацій вздовж ліній різання. Встановлені режими обробки дозволяють уникнути деградації параметрів ФД в процесі різання.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Иванов В. И., Кондратенко В. С. Современные методы и оборудование для резки приборных пластин на кристаллы обзор). *Физическая аппаратура и её элементы*. 2018. том 6. № 2. с. 174–183.
- [2] Arif, M., Rahman, M. & San, W.Y. A state-of-the-art review of ductile cutting of silicon wafers for semiconductor and microelectronics industries. *Adv. Manuf. Technol.* 2012. Vol. 63. P. 481–504. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-3937-2>
- [3] Павлов С. М., Войцеховська С. М. Технологія мікроелектронних засобів : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2017. 169 с.
- [4] Кондратенко В.С., Иванов В.И. Технология лазерной резки кремниевых пластин на кристаллы органических светоизлучающих диодов. *Russian Technological Journal*. 2016.

- No. 43). P. 11-17. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2016-4-3-11-17>
- [5] Jiayu Xu, Hong Hu, Changhui Zhuang, Guodong Ma, Junlong Han, Yulin Lei, Controllable laser thermal cleavage of sapphire wafers, *Optics and Lasers in Engineering*. 2018. Vol. 102. P. 26-33, ISSN 01438166, <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.10.012>.
- [6] Трофимов А. А. Защита нитридных СВЧ МИС на пластине для операций шлифования, полирования и резки на кристаллы. *Приборы*. 2017. № 5. С. 37–43.
- [7] Кукурудзяк М. С., Добровольський Ю. Г. Кремнієвий р-і-n-фотодіод із підвищеною імпульсною чутливістю. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2021, № 1–2, С. 61–67. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2021.1-2.61>.
- [8] Приемники излучения. Полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определение характеристик: ГОСТ1772-88. – [чинний від 1988-01-07]. М.: Изд-во Стандартов, 1988. 158 с.
- [9] Sirtl E. Adler. A. Flubsaur als sperifishes system zur atzgrubenentwicklang auf silizium. *Z. Metallk.* 1961. Vol.119, №6. P. 529-531.
- [10] Istratov A. A., Hieslmair H., Weber E. R. *Applied Physics A*. 1999. V. 69. P. 13.
- [11] Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. М.: Наука, 1966. 635 с.
- [12] Сенько С.Ф., Зеленин В.А. Измерение локальных остаточных напряжений в полупроводниковых кремниевых структурах. *Приборы и методы измерений*, 2018. Т. 9, № 3, С. 254–262. <http://dx.doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-3-254-262>
- [13] Riesz, F. Geometrical optical model of the image formation in Makyoh magic-mirror) topography. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2000. vol. 33, pp. 3033–3040.

Кукурудзяк М. С.

ПРОБЛЕМАТИКА РІЗАННЯ ПІДКЛАДОК АЛМАЗОВАНИМ ДИСКОМ В ТЕХНОЛОГІЇ КРЕМНІЄВИХ *p-i-n* ФОТОДІОДІВ

*Стаття присвячена вирішенню проблем деградації параметрів кремнієвих *p-i-n*-фотодіодів під час різання пластин на кристали диском із зовнішньою алмазною кромкою. Наведено порівняльний аналіз методів різання кремнієвих пластин на елементи, зокрема охарактеризовано наступні методи: алмазне скрайбування з подальшим розламуванням; різання алмазним диском із зовнішньою ріжучою кромкою; лазерне скрайбування з подальшим розламуванням; різання лазером. При аналізі джерел побачено, що широкого розповсюдження набуває метод лазерного управляючого термосколювання, який забезпечує мінімальну кількість дефектів вздовж лінії різання. Але в свою чергу, даний метод вимагає вирішення ряду супутніх проблем, що значно ускладнює обробку. Відповідно цей метод розділення пластин на елементи доцільно використовувати для різання крихких матеріалів, тонких підкладок, чи структур де висувуються жорсткі вимоги до якості лінії різання. В випадках де виникають труднощі із застосуванням лазерного випромінювання, чи відсутні жорсткі вимоги до шоруховатості країв виробів, доцільно використовувати менш трудомісткі та вартісні методи розділення, зокрема різання алмазним диском із зовнішньою ріжучою кромкою.*

*Так, при серійному виготовленні кремнієвих квадрантних *p-i-n* фотодіодів з охоронним кільцем помічено збільшення значень темнових струмів після різання. Поділ на елементи здійснювався за допомогою різання диском із алмазною ріжучою кромкою. Побачений ріст темного струму потребував дослідження, зокрема, встановлення його причин та методів уникнення. Відповідно завданням даної роботи є вивчення механізму зростання темнових струмів фотодіодів та визначення оптимальних режимів різання пластин на кристали даним методом.*

В ході експериментів визначено оптимальну глибину недорізу пластин, яка складає $\frac{1}{4}$ товщини підкладки. Досліджено вплив відстані від лінії різання до фоточутливих елементів на темнові струми охоронних кілець та встановлено, що при відстані від лінії різання до охоронного кільця 900 мкм, деградація темного струму не відбувається при напрузі зміщення 120 В). При зменшенні відстані від лінії різання до активних елементів темнові струми охоронних кілець погіршуються. Можливе зменшення відстані від лінії різання до охоронного кільця без погіршення темного струму при використанні меншої напруги зміщення. Зростання темнових струмів фоточутливих площадок після процесу різання не побачено. Також вивчено вплив швидкості проходження ріжучого диска та товщини ріжучого полотна на темнові струми фотодіодів. Оптимальною швидкістю подачі диска є 5мм/с, а також при зменшенні товщини алмазного полотна деградація темнових струмів зменшується.

Погіршення параметрів ФД після операції різання відбувається внаслідок набутих механічних напружень та розірваних хімічних зв'язків на торцях кристалів. В даній роботі визначено оптимальні режими різання підкладок на елементи, які дозволяють уникнути деградації параметрів напівпровідникових приладів.

Ключові слова: дискове різання; скрайбування; лазерне управляюче термосколювання; фотодіод; охоронне кільце; темновий струм.

Kukurudziak M.

RANGE OF PROBLEMS IN CUTTING SUBSTRATES BY A DIAMOND-TIPPED DISK IN *p-i-n* SILICON PHOTODIODES TECHNOLOGY

*The article aims at solving problems of degradation of silicon *p-i-n* photodiodes parameters during cutting wafers into crystals by a disk with an outer cutting tip. A comparative analysis of methods of cutting silicon wafers into elements, the following methods are characterized, in particular: diamond scribing with subsequent breaking, laser cutting. While analyzing scientific publications, it was found out that laser control thermal spalling method becoming widely used, provides minimum defects along the cut. But, in turn, the method calls for solving a range of related problems that considerable complicate the treatment. Accordingly, it is advantageous to use this method of parting wafers into elements for cutting brittle materials, thin substrates or structures where stringent requirements for quality of the cut are placed. In cases, where it is difficult to use laser radiation or there are no strict requirements to roughness of edges of products, it is expedient to employ less labour-intensive and expensive methods of separation, cutting by a diamond disk with an outer cutting-tip, in particular.*

*In this way, in commercial production of silicon quadrant *p-i-n* photodiodes with a guard ring, increase of dark currents values after cutting was observed. The growth of the dark current observed, needed to be investigated, to establish its causes and methods to avoid it. Accordingly, the purpose of this work is to study the mechanism of increase of photodiode dark currents and to establish optimal modes of cutting wafers by the method.*

In the course of the experiment, optimal undercut was determined to be $1/4$ of the substrate thickness. The influence of the distance from the cut to the responsive elements on dark currents of the guard rings was investigated, and it was established that when the distance from the cut to the guard ring is 900 μm , degradation of dark current doesn't take place when bias voltage is 120V). When the distance from the cut to the active elements decreases, dark currents of the guard rings worsen. If a lower bias voltage is used, the distance from the cut to the guard ring may be decreased, and the dark current will be not deteriorated. The increase in dark currents of the responsive areas after the cutting process was not observed. The influence of the cutting disk velocity and the thickness of cutting blade on dark currents of photodiodes was also studied. The optimal velocity of the blade feed is 5 mm/s, and when the thickness of the diamond blade decreases, dark currents deteriorate reduces.

Degradation of PD parameters after cutting occurs in consequence of acquired mechanical stresses and broken chemical bonds at the ends of crystals. This work determines optimal modes of cutting substrates into elements, allowing to avoid degradation of parameters of semiconductor devices.

Keywords: disk cutting; scribing; laser control thermal spelling; photodiode, guard ring, dark current.

Стаття надійшла до редакції 22.04.2022 р.
Прийнято до друку 15.06.2022 р.