

## ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ СТРУКТУРИ НА ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ФОТОДІОДІВ НА ОСНОВІ ГЕРМАНІЮ

Досліджено вплив ступеня структурної досконалості германієвих пластин на електрофізичні параметри фотодіодів. Вважається, що найбільше число структурних дефектів утворюється під час операцій окислення і дифузії домішок. Установлена статистична відповідність між електрофізичними параметрами і структурною досконалістю пластини.

Influence of structural perfection degree of Ge plates on electric and physic parameters of photo diodes is investigated. It is considered, that the heaviest number of structural defects occurs during oxidation and impurity diffusion operations. Statistical conformity between electric and physic parameters and structural perfection of plate is established.

Останнім часом напівпровідникова мікроелектроніка зазнала великих кількісних змін, зумовлених в основному розробкою нових принципів конструювання приладів і відповідних технологічних методів їх виробництва. З ускладненням конструкції приладів, підвищенням ступеня інтеграції інтегральних схем, удосконаленням старих і розробкою нових технологічних процесів завдання вивчення механізмів виникнення дефектів у досконалому напівпровідниковому матеріалі при його обробці і впливу цих дефектів на експлуатаційні характеристики виробів стає все більш актуальним. Тому розвиток напівпровідникових технологій пов'язаний з постійною необхідністю надійного контролю як вихідної структурної досконалості використовуваних напівпровідникових матеріалів, так і структурних змін, що відбуваються у процесі проведення технологічних операцій.

Для визначення механізмів впливу структурних недосконалостей кристала на електрофізичні параметри напівпровідникових приладів можуть бути використані різні сучасні методи прямого дослідження дефектів. До таких методів відносяться: селективне травлення, інфрачервона мікроскопія декорованих об'єктів, електронна мікроскопія і рентгенівська топографія [1,2]. Метод рентгенівської топографії єдиний неруйнуючий метод прямого спостереження дефектів. Його суть полягає у зміні інтенсивності променя, що зазнає берегівського відбивання в області структурного дефекту, у порівнянні з інтенсивністю променя, що проходить у неспотворених областях кристала.

Для визначення впливу ступеня структурної досконалості германієвих пластин на електрофізичні параметри фотодіодів проведені рентгено-топографічні дослідження методом Ленга і вимірювання темного струму при напругах 0,1 і 1 В. На рис.1а наведена топограма германієвої пластини з готовими фотодіодами, а в таблиці 1 для кожного з них відповідні значення темнових струмів. Відзначимо, що такого роду дослідження проводились на кожному технологічному етапі виготовлення фотодіодів для великої кількості пластин. При цьому найбільш дефектонебезпечною операцією технології є високотемпературна дифузія Sb і As у германій при 700°C. Вихідні характеристики пластини такі: германій ГДГО.4дж, вихідна густина дислокацій не перевищує  $10^4$  см<sup>-2</sup>, кристалографічна орієнтація вхідної поверхні - (100).

З аналізу рентгено-топографічних досліджень пластини на рис.1 випливає, що для неї характерний нерівномірний розподіл структурних дефектів по площі пластини. Як відомо, найбільше впливають на функціональні характеристики приладів дислокації - електрично активні дефекти, наявність яких у структурі напівпровідника приводить до деградації параметрів, пониження пробивних напруг, генерації шумів, підвищення густини граничних станів [3-6]. Найбільша густина дислокацій в області фотодіода - **1** (рис.1). Цей фотодіод має найбільше значення темного струму (таблиця 1). В областях, де пластина найбільш досконала, значення темного струму мінімальні.

Сучасна тенденція до зменшення розмірів

окремих приладів і елементів інтегральних схем привела до того, що ймовірність попадання дислокацій, які є у вихідному матеріалі, в активну область приладу зменшується. Наприклад, якщо у матеріалі густина дислокацій  $N_D \sim 10^4 \text{ см}^{-2}$ , то на активну площу потужного транзистора, в декілька  $\text{мм}^2$ , припадає  $\sim 10^2$  дислокацій, а якщо активна площа приладу складає  $\sim 100 \times 100 \text{ мкм}^2$ , то на неї припадає у середньому тільки одна дислокація. Іншими словами, зменшення активної площі приладу само по собі поліпшує їх експлуатаційні характеристики. Проте при малих розмірах окремих елементів в інтегральних схемах активну роль починають відігравати дислокаційні зв'язки між окремими елементами, що веде до погіршення характеристик усєї схеми. Тому з точки зору загальної ефективності, використання досконалого матеріалу з густиною дислокацій  $\sim 10^3 \text{ см}^{-2}$  однаково важливе для приладів з великою і малою робочою поверхнею.

Варто сказати, що використання досконалого матеріалу для виготовлення фотодіодів та інтегральних схем не завжди раціонально, оскільки число дислокацій, які вводяться у вихідний матеріал при проведенні різних технологічних операцій (дифузії, окислення, вплавлення контактів і т.д.), може багаторазово перевищувати вихідну густина дислокацій. Наприклад, при дифузії атомів миш'яку густина введених дислокацій досягає  $10^6 \text{ см}^{-2}$  [5].

Проведені нами дослідження структурної досконалості великої кількості пластин до і після технологічних процесів, які використовуються при виготовленні фотодіодів, показали, що дислокації і дислокаційні ряди (лінеаризовані структури) можуть утворюватись у результаті поверх-

невих порушень, які виникають у процесі обробки, нанесення захисного покриття окислу кремнію, дифузії домішок, а також під час вплавлення контактів і нанесення металу. Введення у ґратку германію атомів домішок миш'яку або сурьми, приводить до деформації ґратки і виникнення механічних напруг. Якщо величина цих напруг перевищує напруги пластичного зсуву, то в об'ємі дифузійного шару утворюються дислокації. У планарних структурах досконалість монокристалічних пластин порушується також біля границь локальної дифузії через дислокації, які проникають на глибину до 500 мкм.

Значну роль в утворенні дислокацій відіграють механічні напруги на границі напівпровідник-окисел. При нанесенні захисної просвітлюючої діелектричної плівки у пластинах германію вини-

Таблиця 1. Значення темнових струмів, виміряних в областях знаходження фотодіодів на рис. 1а, при напругах 0,1 (верхній ряд) і 1 В (нижній ряд).

		1,1	1,2	0,6	0,7	0,7	0,9	
		4,1	4,2	4,2	0,9	0,87	1,3	
	5,5	0,5	0,3	0,2	0,09	1,4	0,9	1,1
	61	0,8	11	0,8	1,9	9,4	6,1	5,7
0,9	0,18	0,14	0,35	0,7	0,01	0,2	0,06	0,6
5,1	0,8	14,9	0,75	4,2	0,7	0,7	2,9	0,75
0,02	0,01	0,1	0,3	0,28	0,15	0,9	1,5	0,06
0,4	0,8	4,2	0,5	4,3	1,1	14	10	0,7
0,01	0,04	0,04	0,1	0,01	0,1	0,05	0,02	0,1
0,03	0,6	0,5	0,5	0,5	5,4	0,5	1,1	0,7
0,2	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
1,8	0,3	23,0	10,0	0,5	0,5	0,1	0,5	0,6
0,4	0,3	0,02	2,0	0,08	0,1	0,01	0,01	0,02
17,8	0,5	5,7	17,5	0,8	8,0	4,1	1,9	0,1
0,5	0,1	0,5	0,5	0,02	0,02	0,02	0,03	
7,2	5,2	1,1	0,6	0,6	0,2	0,3	1,9	
	0,4	0,1	0,2	0,03	0,1	0,01		
	1,2	1,1	1,1	1,02	1,5	0,5		

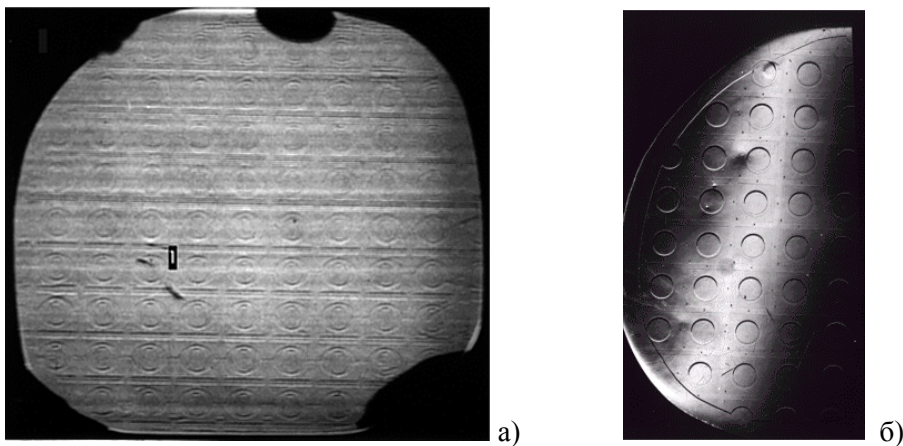


Рис. 1. Рентгенівські топограми германієвої пластини з 73 фотодіодами. Відбивання (220)  $\text{CuK}_\alpha$ -випромінювання: метод Ланга з застосуванням лінійного сканування. Збільшення в 5 разів (а); метод Берга-Барета, асиметричне відбивання (311), вхідна площина (001) (б). В області фотодіода  $\square$  аномально високі значення темнового струму.

кають температурні градієнти, які викликають появу пружних напруг. Крім того, пружні напруги ( $\sim 10^4$  Н/см<sup>2</sup>) виникають внаслідок різниці коефіцієнтів термічного розширення германію і захисної плівки.

Дислокації можуть здійснювати прямий або непрямий вплив на електрофізичні параметри напівпровідникового матеріалу: прямий - через присутність у забороненій зоні електронних станів, зв'язаних з дислокацією; непрямий - внаслідок наявності домішкових атмосфер, випадання домішок і прискорення дифузії вздовж лінії дислокації. Зміна електрофізичних властивостей напівпровідників, яка відбувається внаслідок прямого впливу дислокацій, проявляється як у збільшенні або зменшенні ширини забороненої зони, так і у появі нових енергетичних рівнів або навіть зон [3-5]. Вважається, що ці рівні відповідають електронним станам, які виникають на дислокаціях внаслідок наявності в їх ядрах розірваних, ненасичених зв'язків. Отже, значні електричні властивості проявляються тільки у дислокацій з крайовою компонентою, тоді як чисто гвинтові дислокації, внаслідок відсутності розірваних зв'язків, практично не активні.

У роботі [3] розглядалися деякі можливі розміщення дислокацій відносно бар'єрного шару у біполярних *p-n* переходах і МОН транзисторах. Якщо ряди дислокацій розміщені вздовж напрямку ліній поля у шарі між електронним і дірковим матеріалами, то виникає ефективна область пробою. Якщо вони розміщені паралельно такому шару, то дислокації майже не впливають на властивості *p-n* переходу. Розширення області просторового заряду може і повинно викликати зміни у протіканні прямих струмів через *p-n* перехід. При цьому внаслідок дії напруги зміщення помітно розширюється область просторового заряду дислокацій. У деяких локальних областях висока густина струму приводить до локального нагріву і можливого утворення виділень домішок, утворення другої фази, плавлення і т.ін.

Зауважимо, що реальні фізичні причини погіршення характеристик приладів, зумовлені наявністю кристалографічних дефектів - складні, багаточисленні і ще повністю не вивчені. У деяких роботах відзначається, що наявність дислокацій приводить до пом'якшення обернених вольт-амперних характеристик і зменшення пробивних напруг [3]. Тоді як, автори роботи [4] пояснюють погіршення характеристик *p-n* переходів неоднорідним розподілом домішок і викликаним ними неоднорідним розподілом дислокацій.

Згідно з таблицею 1, на пластині є фотодіоди, для яких також характерні високі значення темнових струмів, хоча у відповідних місцях топограм (рис.1) не спостерігається помітного скупчення дефектів. Пояснюється це тим, що пластична деформація стиску високоомного германію внаслідок дифузії у ґратку атомів, більших за розміром від матричних, викликає зниження електронної провідності і підвищує діркову [5]. Крім того, точкові дефекти, локалізовані поблизу дислокації, виявляють акцепторні властивості і є центрами рекомбінації носіїв заряду.

Можна зробити висновок про те, що сумарний електричний заряд у приповерхневому шарі дислокаційного електронного германію менший, ніж без дислокацій, внаслідок захоплення електронів провідності на розірвані зв'язки дислокаційних акцепторів, тому ємність об'ємного заряду зменшується.

Отже, технологічні операції виготовлення фотодіодів сильно впливають на структурну досконалість германієвих пластин. Проведені дослідження дозволили встановити деяку статистичну відповідність між електрофізичними параметрами і структурною досконалістю пластини, а також виробити деякі рекомендації. Для зменшення впливу макродефектів обробки та мікротріщин необхідно проводити глибоке хімічне травлення. Встановлено, що хіміко-динамічне полірування (ХДП) краще готує пластини для подальших технологічних операцій, ніж хіміко-механічне полірування, так як ступінь структурної досконалості після ХДП значно вищий. При проведенні технологічних операцій необхідно виключити можливість виникнення на пластинах різких температурних градієнтів і термоударів, які зумовлюють появу смуг ковзання.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Амелинкс С. Методы прямого наблюдения дислокаций. - М.: Мир, 1974.
2. Каули Дж. Физика дифракции. - М.: Мир, 1979.
3. Зеленов В.И., Лейкин В.Н., Мингагин Т.А. Анализ возникновения дислокаций и их влияния на свойства полупроводниковых структур // Электронная промышленность. - 1979, №3. - С.28-41.
4. Афанасьев В.Ф., Афанасьева Н.П. О связи неоднородности распределения удельного сопротивления и плотности дислокаций в кремнии // ФТТ. - 1969. - 11, №11. - С.38-45.
5. Пантелеев В.А., Барышев Р.С. Влияние дислокаций на диффузию элементов IV группы в кремнии // ФТТ. - 1974. - 16, №2. - С.187-190.
6. Боонстра А. Поверхностные свойства германия и кремния. - М.: Мир, 1970.