

Оксана Небеснюк¹, Аліна Ніконова², Дмитро Алексієвський³, Зоя Ніконова⁴

¹ кандидат технічних наук, доцент кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету (Запоріжжя, Україна)

E-mail: 0811oksana@gmail.com, **SCOPUS Author ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57212030902>

² кандидат технічних наук, професор кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету (Запоріжжя, Україна)

E-mail: nk_alina@ukr.net, **SCOPUS Author ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=57212035624>

³ доктор технічних наук, доцент кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету (Запоріжжя, Україна)

E-mail: lasian2017@ukr.net, **SCOPUS Author ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=57208393870>

⁴ кандидат технічних наук, доцент кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету (Запоріжжя, Україна)

E-mail: nz.a@ukr.net, **SCOPUS Author ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=57212037253>

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ЯКІСТЬ ПРИЛАДОВИХ СТРУКТУР

Застосування методу інтерферометрії дало можливість суттєво доповнити та уточнити інформацію про морфологію, характер дефектів нарощених шарів епітаксійних композицій (ЕК), виявлених методами вибіркового травлення за допомогою металографічного мікроскопа. Порівняльним дослідженням ступеня дефектності пластин після кожного з етапів їх виготовлення встановлено, при яких операціях технологічного процесу утворюються конкретні види дефектів. Запропоновано методику отримання якісних напівпровідникових приладів та інтегральних схем на основі різних видів ЕК з високим питомим опором робочого шару.

Ключові слова: епітаксійні композиції; напівпровідникові прилади; бездислокаційний кремній; дефекти; відпал; пластина.

Табл.: 2. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. У сучасному виробництві напівпровідникових приладів та інтегральних схем широко застосовуються епітаксійні композиції (ЕК): кремнієві одношарові епітаксійні структури (КОЕС), кремнієві звернені епітаксійні структури (КЗЕС) та кремнієві структури з діелектричною ізоляцією (КСДІ). Актуальним завданням є ретельне вивчення дефектів таких структур та технологічних чинників, що значно впливають на їхню якість на різних етапах процесу виготовлення.

На сьогодні чітко проявляються тенденції створення найскладніших електронних пристроїв на основі багатшарових епітаксійних структур. При цьому формуються дуже високі вимоги до електрофізичних властивостей і якості структури кожного шару, ставляться завдання створення досконалих та різких р-п переходів і гетерограниць на великих площах епітаксійних композицій. Особливо великі перспективи обіцяє застосування епітаксійних композицій при виготовленні напівпровідникових приладових структур.

Постановка проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень показує [1-5], що найбільш істотним джерелом дефектів в епітаксійних композиціях є напруженості, що виникають у них у процесі кристалізації або подальшого охолодження температури нарощування. До основних причин виникнення напруженостей слід віднести:

1) відмінність періодів решітки матеріалів, які створюють сполуки, що і викликає появу напруженість невідповідності;

2) відмінність коефіцієнтів термічного розширення цих матеріалів або нерівномірний розподіл температури по товщині і поверхні нарощуваного шару, що є джерелом термічних напруженостей епітаксійної композиції;

3) наявність градієнта складу за товщиною епітаксійного шару;

4) підвищена концентрація дефектів структури на межах розділу.

Встановлено, що в умовах досить тривалої (0,2...3,0 години) дії напруженості й високих температур (1400...1500 К) протікають процеси дефектоутворення як у нарощеній плівці, так і в підкладці композиції, на розвиток яких впливають структурні недосконалості вихідної підкладки [4-7].

Метою роботи є дослідження залежності густини дефектів у підкладці і нарощеному шарі кремнієвих епітаксійних композицій від технологічних чинників та розробка системи, що має підвищену стійкість до електроміграції та одночасно запобігає ерозії кремнію в контактних вікнах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для досліджень при виготовленні епітаксійних кремнієвих композицій широко використовуються пластини бездислокаційного кремнію, як основної підкладки. Встановлено [8], що в процесі епітаксії на монокристалічну підкладку діють, крім термічних напруг, ще й напруги з боку шару, що осаджується на неї. Подібна дія виявляється особливо сильною при вирощуванні епітаксійних шарів товщиною 300...500 мкм.

Великий вплив на утворення дефектів при епітаксійному нарощуванні має якість підготовки підкладок перед цією операцією. Численними дослідженнями порівняно тонких (до 20-30 мкм) епітаксійних шарів [9] показано, що забруднення або пошкодження поверхні підкладки викликають утворення в ній дефектів упаковки, двійників та макроскопічних виступів. При зверненій епітаксії до структурної досконалості епітаксійного шару не пред'являються високі вимоги, оскільки у напівпровідникових приладових структурах, що виготовляються на основі КЗЕС, робочим шаром служить об'єм монокристалічної підкладки. Отже, при зверненій епітаксії головною стає проблема утворень у процесі нарощування дефектів у підкладці, а не в епітаксійному шарі. Процеси дефектоутворення в підкладці при нарощуванні товстого (близько 300 мкм) епітаксійного шару на сьогодні мало вивчені.

Авторами встановлено, що при використанні нарощування бездислокаційних підкладок у робочому шарі ЕК містяться дислокації, щільність яких досягає значень порядку 10^3 см^{-2} і вище. Вивчення факторів, що визначають утворення дислокацій у підкладці у процесі епітаксії, має велике практичне значення.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження були взяті підкладки товщиною 260 мкм з кристалографічною орієнтацією поверхні, виготовлених з монокристалів бездислокаційного кремнію з питомим опором 10-50 Ом·м. Дефекти структури виявлялися виборчим травленням і досліджувалися за допомогою металографічного та растрового електронного мікроскопів.

При проведенні досліджень підкладки піддавалися впливу різних технологічних чинників. Також проводилася обробка робочої сторони поверхні (на якій відбувалося нарощування): хіміко-механічне полірування (ХМП) з видаленням шару товщиною 1-2 мкм і 20 мкм; механічне полірування (МП) алмазною пастою з величиною зерна 1,0 мкм і 5 мкм. Обробка неробочої (зворотної) сторони підкладок також була різною: хіміко-механічне полірування, шліфування, гетерування - шліфування вільним абразивом з подальшим неглибоким механічним поліруванням. Після нарощування ЕК були зашліфовані та відполіровані ХМП з обох боків до товщини 80 мкм з боку робочого шару (підкладки) та 170-180 мкм – з боку опорного (нарощеного) шару.

Результати дослідження щільності дислокацій в обох ЕК наведено у таблиці 1.

У процесі досліджень встановлено, що в усіх ЕК робочий шар містить дислокації, щільність яких лежить в інтервалі $3 \cdot 10^2 - 4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$. Таким чином, відпрацьована технологія нарощування забезпечить досить високу їх структурну досконалість. Однак, є резерви подальшого підвищення якості ЕК. Одним із них, як випливає з даних табл. 1, є

вдосконалення процесу механічної обробки поверхні підкладок. У тих випадках, коли робоча сторона підкладки піддавалася хіміко-механічному поліруванню, щільність дислокацій у підкладці після нарощування в середньому нижча, ніж при механічному поліруванні. Виняток становлять підкладки зі шліфованою неробочою (зворотною) стороною. Найкращі результати авторами отримані при використанні ХМП із підвищеною до 20 мкм товщиною віддаленого шару – $3 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2}$.

Таблиця 1 – Середня густина дислокацій в ЕК, нарощених на бездислокаційні безсвірлові підкладки

Обробка поверхні підкладки		Густина дислокацій $10^3, \text{ см}^{-2}$	
Робоча сторона	Зворотна сторона	У робочому шарі КЗЕС	В опорному шарі КЗЕС
Хіміко-механічне полірування з товщиною віддаленого шару 1-2 мкм	Хіміко-механічне полірування	1	4
	Механічна полірування	1	10
	Гетерування	0,3	8
	Шліфування	4	18
Хіміко-механічне полірування з товщиною віддаленого шару 20 мкм	Механічна поліровка	0,4	5
Механічне полірування з розміром зерна абразиву 1,0 мкм	-	2	6
Механічне полірування з розміром зерна абразиву 0,5 мкм	-	1	22

Джерело: розроблено авторами.

Обробка неробочої поверхні підкладки також впливає на якість шару ЕК приладових напівпровідникових структур. При однаковій обробці робочої сторони підкладки шліфування її зворотної сторони призводить до зростання щільності дислокацій у робочому шарі ЕК у середньому в 4,5 раза, а гетерування – навпаки, до зниження у 2,5 раза порівняно з механічним поліруванням зворотного боку. Водночас застосування ХМП неробочої сторони в порівнянні з механічним поліруванням не дає помітного покращення якості ЕК.

Ступінь структурної досконалості опорного (нарощеного) шару ЕК також залежить від способу обробки як робочої, так і зворотної сторін підкладок. З табл. 1 видно, що механічне полірування робочої сторони підкладки, порівняно з ХМП, зумовлює помітне підвищення щільності дислокацій в опорному шарі, тоді як у робочому шарі ЕК вона практично однакова. До зростання щільності дислокацій в опорному шарі призводить також застосування шліфування зворотної сторони підкладки в порівнянні з іншими способами її обробки. Значно сильніше, ніж щільність дислокацій, залежить від способу обробки робочої сторони підкладки щільність дефектів упаковки в нарощеному шарі. Збільшуючись від значення $5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$ (у середньому за дослідженими зразками) при ХМП $2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ при механічному поліруванні.

Великий вплив на утворення структурних дефектів при зверненій епітаксії має присутність у бездислокаційних підкладках свірл-дефектів. Незалежно від способу обробки поверхні підкладок в усіх КЗЕС були присутні свірлові смуги мікрodefектів А-типу, також спостерігалися аналогічні за формою та розподілом смуги з високою щільністю дислокацій, дефектів упаковки в опорному шарі та з підвищеною щільністю дислокацій у робочому шарі. Вплив свірлових смуг на утворення дислокацій у робочому та опорному шарах КЗЕС ілюструють експериментальні дані наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Відношення густини дислокацій у смугі свірл-дефекта та в останньому об'ємі ЕК (обробка робочої сторони підкладки - ХМП)

Обробка робочої сторони підкладки	Робочий шар КЗЕС	Опорний шар КЗЕС
Хіміко-механічне полірування	4	2
Механічне полірування	180	8
Гетерування	16	2

Джерело: розроблено авторами.

Авторами встановлено (табл. 2), що свірл-дефекти значно впливають на утворення дислокацій у робочому шарі КЗЕС. Наявність у ньому смуг із високою щільністю дислокацій збільшує на порядок середню величину щільності дислокацій цього шару, тобто різко знижують якість ЕК.

Висновки. Дослідження процесів дефектоутворення в ЕК на основі КСДІ показало, що при використанні бездислокаційних підкладок, де можуть мати місце А-мікрорефекти, саме вони генерують дислокації, вже починаючи з технологічної операції виготовлення ізолюючого шару діоксиду кремнію. Дислокації утворюються на ділянках перетину смуги мікрорефектів із роздільними канавками. У такому випадку мікрорефекти є джерелами, а концентратори напруженості на канавках - рушійною силою процесу генерації дислокацій у монокристалічній кишені. При подальшій операції осадження полікристалічного шару кремнію виникають термопружні напруги, які посилюють процес генерації і щільність дислокацій зростає на порядок до 10^4 см^{-2} .

Підвищення температури відпалу також істотно впливає на дефектоутворення в епітаксійних композиціях, що призводить до погіршення електричних характеристик та параметрів приладових структур, а отже, їхньої якості і надійності в експлуатації.

Для дослідження впливу високих температур було взято пластини бездислокаційного високоомного кремнію діаметром 60 мм, товщиною 300, 500 і 1000 мкм після механічної обробки, які піддавалися відпалу в атмосфері водню при температурі $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 10 хвилин. За допомогою вибіркового травлення було виявлено дислокації в периферійній ділянці відпалених пластин.

Авторами встановлено, що активними джерелами генерації дислокацій служать мікросколи та мікроподряпини на краях пластин. Сукупність процесів генерації дислокацій макро- та мікросколами, мікроподряпинами та ділянками з деформаційними ґратками сприяє утворенню (при різних високотемпературних технологічних операціях) периферійного кільця на кремнієвих пластинах шириною 1...4 мм з високою щільністю дислокацій ($\sim 10^3 \text{ см}^{-2}$).

Мікротріщини на краях пластин викликали при відпалі утворення ліній ковзання, що поширюються кристалографічними напрямками на відстані до 1 мм. При епітаксії довжина ліній ковзання, що виходять із мікротріщин, досягає 5...10 мм. У ряді випадків мікротріщини ініціюють утворення ступенів зсуву, що пронизують всю товщину підкладки та епітаксійного шару і мають довжину до 0,6 діаметра пластини.

Слід зазначити, що на робочій площі пластини, де дефекти механічної обробки були відсутні, утворення дислокацій при відпалі спостерігалось лише на пластинах, які містять мікрорефекти А-типу. За наявності мікрорефектів інших типів робоча площа відпалених пластин вільна від дислокацій.

Оскільки в ході експериментальних досліджень було встановлено, що на ступінь структурної досконалості робочої площі готових кремнієвих композицій впливають тільки мікротріщини, то для усунення таких дефектів потрібно було коригувати саме цю операцію. Використання мікроінтерферометрії дозволило якісно провести візуальну оцінку мікрорельєфу такого зразка, достовірно визначити їх глибину і висоту.

Отримані експериментальні результати дозволяють зробити висновок, що для виробництва напівпровідникових приладових структур на основі ЕК з низькою щільністю дислокацій необхідно використовувати бездислокаційні підкладки, що не містять смуг мікродофектів А-типу. За інших рівних умов найкраща якість ЕК досягається при застосуванні ретельного хіміко-механічного полірування підкладки з її робочого боку та гетерування зі зворотної.

Список використаних джерел

1. Lin, J.-T. A novel planar-type body connected FinFET device fabricated by self-align isolation-last process [Electronic resource] / J.-T. Lin // *Solid-State and Integrated Circuit Technology. New technologies.* – 2019. – Access mode: https://www.researchgate.net/publication/224205328_A_novel_planar-type_body-connected_FinFET_device_fabricated_by_self-align_isolation-last_process.
2. Odinkov, V. V. New processing equipment for innovative technologies micro, nano - and radio electronics / V. V. Odinkov, G. Ya. Pavlov // *Technology and designing in the electronic equipment.* – 2011. – Vol. 3. – Pp. 41-43.
3. Levinson, D. I. Modeling the distribution of impurities in the preparation of heavily instrumental silicon layers using high-energy treatment / D. I. Levinson, A. Y. Nikonov, O. Y. Nebesnyuk // *Scientific researches and their practical application. Modern state and ways of development.* – 2013. – Pp. 10-13.
4. Green, M. A. Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond / M. A. Green // *Physica E Low-dimensional Systems and Nanostructures.* – 2002. – April, № 14(1). – Pp. 65-70.
5. Brown, A. S. Limiting efficiency of multiple band solar cells / A. S. Brown, M. A. Green // *Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference.* – Kyiv, 2011. – Pp. 246-249.
6. Norman, A. G. InGaAs/GaAs QD superlattices: MOVPE growth, structural and optical characterization, and application in intermediate-band solar cells / A. G. Norman, M. C. Hanna, P. Dippo, D. Levi // *Prepared for the 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition Lake Buena Vista (Florida January 3–7, 2005).* – Golden, Colorado : National Renewable Energy Laboratory, 2005. – Pp. 3-7.
7. Solar cells heterostructures with InAs quantum dots obtained by liquid phase epitaxy / I. E. Maronchuk, S. Yu. Erochin, T. F. Kulutkina et al. // *Third World Conference on Photovoltaic Energy Conversion.* – Osaka, Japan, 2013. – Pp. 11-18.
8. Pathways to 40% Efficient Concentrator Photovoltaics / R. R. King, D. C. Law, C. M. Fetzez, R. A. Sherif, K. M. Edmondson, S. Kurtz // *Proceedings 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference.* – Barcelona, 2015. – Pp. 30-37.
9. Nebesniuk, O. Y. Technological Features of Real Contact Systems' Production for Nanosystem Equipment / O. Y. Nebesniuk, Z. A. Nikonova, A. A. Nikonova // *Journal of Nano- and Electronic Physics.* – 2022. – № 14(5). – Pp. 5-14.

References

1. Jyi-Tsong, L. (2019). A novel planar-type body connected FinFET device fabricated by self-align isolation-last process. *Solid-State and Integrated Circuit Technology. New technologies.* https://www.researchgate.net/publication/224205328_A_novel_planar-type_body-connected_FinFET_device_fabricated_by_self-align_isolation-last_process.
2. Odinkov, V.V., Pavlov, G.Ya. (2011). New processing equipment for innovative technologies micro, nano - and radio electronics. *Technology and designing in the electronic equipment*, 3, 41-43.
3. Levinson, D.I., Nikonov, A.Y., Nebesnyuk, O.Y. (2013). Modeling the distribution of impurities in the preparation of heavily instrumental silicon layers using high-energy treatment. *Scientific researches and their practical application. Modern state and ways of development*, 10-13.
4. Green, M.A. (2012). Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond. *Physica E Low-dimensional Systems and Nanostructures*, (14(1)), 65-70.
5. Brown, A. S., Green, M. A. (2011). Limiting efficiency of multiple band solar cells. *Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (pp. 246–249). Kyiv.
6. Norman, A.G., Hanna, M.C., Dippo, P. et al. (2015). InGaAs/GaAs QD superlattices: MOVPE growth, structural and optical characterization, and application in intermediate-band solar cells. *Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition* (pp. 3-7). Florida, USA.

7. Maronchuk, I.E., Erochin, S.Yu., Kulutkina, T.F. et al. (2013). Solar cells heterostructures with InAs quantum dots obtained by liquid phase epitaxy. *Third World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* (pp. 11–18). Osaka, Japan.

8. King, R.R., Law, D.C., Fetez, C.M., Sherif, R.A., Edmondson, K.M., Kurtz, S. (2015). Pathways to 40% Efficient Concentrator Photovoltaics. *Proceedings 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (pp. 30-37). Barcelona, Spain.

9. Nebesniuk, O.Y., Nikonova, Z.A., Nikonova, A.A. (2022). Technological Features of Real Contact Systems Production for Nanosystem Equipment. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, (14(5)), 5-14.

Отримано 04.01.2024

UDC 621.315.592

Oksana Nebesniuk¹, Alina Nikonova², Dmitriy Alekseevskiy³, Zoya Nikonova⁴

¹PhD, Associate Professor of the Department of Electronics, Information Systems and Software Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu. M. Potebny of the Zaporizhia National University (Zaporizhia, Ukraine)

E-mail: 0811okšana@gmail.com. **SCOPUS Author ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57212030902>

²D.Sc, Associate Professor of the Department of Electronics, Information Systems and Software Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu. M. Potebny of the Zaporizhia National University (Zaporizhia, Ukraine)

E-mail: nk_alina@ukr.net. **SCOPUS Author ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=57212035624>

³D.Sc, Associate Professor of the Department of Electronics, Information Systems and Software Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu. M. Potebny of the Zaporizhia National University (Zaporizhia, Ukraine)

E-mail: lasian2017@ukr.net. **SCOPUS Author ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=57208393870>

⁴Ph.D., Associate Professor of the Department of Electronics, Information Systems and Software Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu. M. Potebny of the Zaporizhia National University (Zaporizhia, Ukraine)

E-mail: nz.a@ukr.net. **SCOPUS Author ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=57212037253>

THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON QUALITY OF INSTRUMENT STRUCTURES

In the modern production of semiconductor devices and integrated circuits, epitaxial compositions are widely used: silicon single-layer epitaxial structures, silicon inverted epitaxial structures and silicon structures with dielectric insulation. An urgent task is a thorough study of the defects of such structures and technological factors that significantly affect their quality at various stages of the manufacturing process.

The purpose of the work is to study the dependence of the density of defects in the substrate and the built-up layer of silicon epitaxial compositions on technological factors and to develop a system that has increased resistance to electromigration and at the same time prevents erosion of silicon in the contact windows.

Substrates with a thickness of 260 μm with a crystallographic surface orientation made of single crystals of dislocation-free silicon with a resistivity of 10-50 Ohm·m were taken for the study. Defects in the structure were detected by selective etching and investigated using metallographic and scanning electron microscopes. Processing of the working side of the surface was also carried out: chemical-mechanical polishing with removal of a layer 1-2 microns and 20 microns thick; mechanical polishing with diamond paste with a grain size of 1.0 μm and 5 μm. The processing of the non-working side of the substrates was also different: chemical-mechanical polishing, grinding, hetering - grinding with a free abrasive followed by shallow mechanical polishing. After growth, the epitaxial compositions were polished and grinded by chemical-mechanical polishing on both sides to a thickness of 80 μm on the substrate side and 170-180 μm on the side of the built-up layer.

During research, the substrates were exposed to various technological factors. The obtained experimental results allow us to conclude that to produce semiconductor device structures based on epitaxial compositions with a low density of dislocations, it is necessary to use dislocation-free substrates that do not contain bands of A-type microdefects. All other things being equal, the best quality of epitaxial compositions is achieved by applying thorough chemical-mechanical polishing of the substrate on its working side and heterogenization on the reverse side.

Keywords: epitaxial compositions; semiconductor devices; dislocation-free silicon; defects; annealing; plate.

Table: 2. **References:** 9.