

**ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ  
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 519.718.2

**ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕРМІНУ НАДІЙНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІНТЕГРАЛЬНИХ  
МІКРОСХЕМ РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ***<sup>1)</sup> Андрієнко В. О., <sup>1)</sup> Іванченко В. В., <sup>1)</sup> Гончаров А. В., <sup>1)</sup> Скорина Є. В., <sup>2)</sup> Антонюк В. С.**<sup>1)</sup> Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна**<sup>2)</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
м. Київ, Україна*

*Запропонована методика верифікації інтегральних мікросхем на прикладі елементів пам'яті з використанням тестів, що добре корелює з побудованою математичною залежністю безвідмовності роботи від часу експлуатації таких елементів. Встановлено, що виникнення помилок в роботі пам'яті пов'язано з виникненням дефектів, сколів і погіршення стану поверхні елементів пам'яті. Визначена залежність часу надійної експлуатації інтегральних мікросхем радіотехнічних пристроїв від умов їх експлуатації, стану поверхні кремнієвого чипу та впливів зовнішнього середовища.*

*Показана необхідність високоточного та довготривалого прогнозування часу надійної експлуатації інтегральних мікросхем, які знайшли застосування у пристроях, що експлуатуються в позаштатному режимі в екстремальних умовах (системах керування атомних електростанцій, літаків, космічних станцій тощо). Наведена перевага використання методу атомно-силової мікроскопії у прогнозуванні часу експлуатації в порівнянні з традиційними методами програмного тестування.*

***Ключові слова:** верифікація елементів пам'яті, строк служби, інтегральні мікросхеми, прогнозування, атомно-силова мікроскопія.*

**Вступ**

На сьогодні галуззю науки, що має найбільш стрімкий темп розвитку вважається мікроелектроніка (передбачено Гордоном Муром ще у 1965 році). Так, виходячи із закону Г. Мура, витікає, що кількість транзисторів, які розташовані на кристалі інтегральної схеми подвоюватиметься кожні 24 місяці. Отже, з року в рік не тільки знижується собівартість елементів мікроелектроніки, але й підвищується швидкодія, надійність та довговічність приладів.

Нині елементи мікроелектроніки зменшилися у розмірах з мікрометричних до нанометричних діапазонів (так, розміри сучасного мікроелементу інтегральної мікросхеми складають порядку кількох десятків нанометрів), що ускладнює виготовлення та прогнозування терміну надійної роботи таких елементів. Це пов'язано з дією квантових ефектів та щільністю розміщення структурних блоків таких елементів, наприклад, комірок пам'яті. Крім того, зі зменшенням розмірів в наноеlementі використовуються не електрони як частинки, що переносять заряд, а їх хвильові функції, або спіни. Тому виникла необхідність використання нових методів дослідження техніко-експлуатаційних характеристик на нанометричному рівні [1].

Одним із відомих методів є використання ряду тестів, які перевіряють кож-

ну комірку пам'яті, а при виявленні помилки перерозподіляють ресурси і створюють резервні копії. Такий метод ефективний в ході експлуатації елементів пам'яті. Це пов'язано з тим, що дані тести лише виявляють помилки, але не вказують на їх причину: дефекти пам'яті, низька якість з'єднань та роз'ємів, або випадкові помилки елементу.

Встановлено [2], що основним показником, який має вплив на надійну експлуатацію елементів наноелектроніки є площа електродів, рельєф елементів, відсутність мікродефектів і залишкових напружень. Тому, актуальною задачею залишається питання дослідження техніко-експлуатаційних властивостей в процесі створення інтегральних елементів шляхом вивчення їх нанорельєфу для виявлення дефектів з подальшим аналізом надійності цих пристроїв шляхом використання діагностичних тестів.

**Метою роботи** є визначення та прогнозування часу надійної експлуатації інтегральних мікросхем радіотехнічних пристроїв на прикладі елементів пам'яті шляхом проведення тестів та виявлення причин їх відмови методом атомно-силової мікроскопії.

### Порядок проведення експерименту

Об'єктами дослідження є фрагменти кремнієвих елементів пам'яті у формі тонких пластин, що мають розподілені ділянки Si та Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, які виступають в якості шару, що захоплює заряд.

Ці об'єкти були розділені на дві групи. До першої групи входили об'єкти, які не знаходились в експлуатації, а до другої – об'єкти, які використовувались для запису інформації на протязі 3; 2; 1,5 та 0,5 років.

*Верифікація елементів пам'яті.* В якості тесту використовувався адресний код, при цьому оброблялися пакети даних довжиною 8 біт. Моделювання виконувалось за допомогою пакета Active-HDL версії 6.3. В якості вхідних даних застосовувалося вміст 8 формівників Formers (J).T, а в якості еталонних даних – формівники Formers (J).S [3].

Операції зчитування доповнювалися операціями порівняння зчитаних і еталонних даних для всіх слів даних пакетів, при цьому було сформовано вектор результатів порівняння, який має вигляд:

$$E = \begin{bmatrix} D_0 \oplus S_0 \\ D_1 \oplus S_1 \\ \dots \\ D_j \oplus S_j \end{bmatrix} \cdot n,$$

де  $D_j$  – зчитані дані  $j$ -го слова;  $S_j$  – еталонні дані для  $j$ -го слова;  $n$  – число комірок, які перевірялись.

Якщо зчитані та еталонні дані співпадають, то прапорець помилки, значення якої обраховується за формулою:  $\text{Error\_flag} = \bigvee_{i=0}^{p-1} E_i$  встановлюється в одиничний стан.

*Виявлення дефектів поверхні.* Дослідження мікрогеометрії поверхонь досліджуваних об'єктів з обох груп проводилися на приладі «NT-206V» [4] (ТДВ «Мікротестмашини», Білорусь) із застосуванням кремнієвих зондів «Ultrasharp CSC12» [5] («Mikromasch», Німеччина). При цьому, для підвищення достовірності результатів, дослідження проводилися на 9 ділянках площею 13×13 мкм по поверхні кожного із зразків [6].

Вибір необхідної ділянки на поверхні зразка здійснювався системою мікропозіціонування і вбудованим оптичним довгофокусним мікроскопом Logitech [7] («Logitech Inc», США). Після ультразвукової очистки об'єкта дослідження в етиловому спирті, його базували на магнітному предметному столику. Застосування вбудованого довгофокусного мікроскопа та системи мікропозіціонування дозволяє з точністю до 2,5 мкм визначати ділянку елемента, поверхня якої досліджувалася. Як робочий був обраний статичний режим роботи АСМ, який має меншу точність в порівнянні з динамічним режимом, проте дозволяє досліджувати саму поверхню об'єкта, ігноруючи наявність на ній вологи і залишків органічних речовин (спирту, жирних кислот і т.п). Для підвищення точності і відтворюваності результатів дослідження, вимірювання проводились на 5...6 зразках з кожної групи.

Після завершення процесу вимірювання, за допомогою системи мікропозіціонування здійснюється переїзд вимірювальної головки на наступну ділянку.

Результати вимірювань заносилися в пам'ять персонального комп'ютера, який входить до складу діагностичного комплексу атомно-силової мікроскопії для подальшої візуалізації, дослідження та аналізу.

### **Математична обробка результатів експерименту**

Аналіз даних, отриманих методом атомно-силової мікроскопії, проводився методом планування двофакторного експерименту [8], де в якості вхідних змінних обиралися приріст значень залишкових мікронерівностей (%) і кількість мікрodefektів на поверхні об'єкту. В якості відгуку обирався час безвідмовної експлуатації елемента пам'яті (років). План експерименту наведено в табл. 1.

Таблиця 1. План експерименту по дослідженню елементів пам'яті за час безвідмовної експлуатації

Номер досліджуваного об'єкта	Фактори		Відгук Y, років (час безвідмовної експлуатації елемента пам'яті)
	$X_1$ , % (приріст значень залишкових мікронерівностей)	$X_2$ (кількість мікрodefektів)	
1	-1 (0)	-1 (0)	3
2	-1 (77)	+1 (1)	2
3	+1 (167)	-1 (1)	1,5
4	+1 (200)	+1 (2)	0,5

Результати планування експерименту представлялись у вигляді рівняння регресії:

$$Y = b_0 X_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2,$$

де  $b_0, b_1, b_2$  – коефіцієнти рівняння регресії, відповідно рівні [5]:

$$b_0 = N^{-1} \sum Y_i; \quad b_1 = N^{-1} \sum X_{i1} Y_i;$$

де  $X_0$  – середнє значення параметра, що варіюється [5].

З врахуванням значень коефіцієнтів, рівняння регресії приймає вигляд:

$$Y = 3,05 - 0,05 X_1 - 0,751 X_2,$$

де  $X_1$  – приріст значень залишкових мікро нерівностей;  $X_2$  – кількість мікрodefektів.

### Обговорення результатів експерименту

Результати моделювання процесу зчитування пакетів з восьми слів з послідовним видом зсуву даних приведені на рис. 1.

Name	Value	Sti...	8390	8395	8400	8405	8410	8415	8420	8425	8430	ns
pAddr	000											
pDq	ZZ		00	01	02	03	04	05	06	07	ZZ	
pAddr	001											
pDq	ZZ		01	02	03	04	05	06	07	00	ZZ	
pAddr	002											
pDq	ZZ		02	03	04	05	06	07	00	01	ZZ	
pAddr	003											
pDq	ZZ		03	04	05	06	07	00	01	02	ZZ	
pAddr	004											
pDq	ZZ		04	05	06	07	00	01	02	03	ZZ	
pAddr	005											
pDq	ZZ		05	06	07	00	01	02	03	04	ZZ	
pAddr	006											
pDq	ZZ		06	07	00	01	02	03	04	05	ZZ	
pAddr	007											
pDq	ZZ		07	00	01	02	03	04	05	06	ZZ	

Рис. 1. Зчитування пакетів із восьми слів з послідовним видом зсуву даних

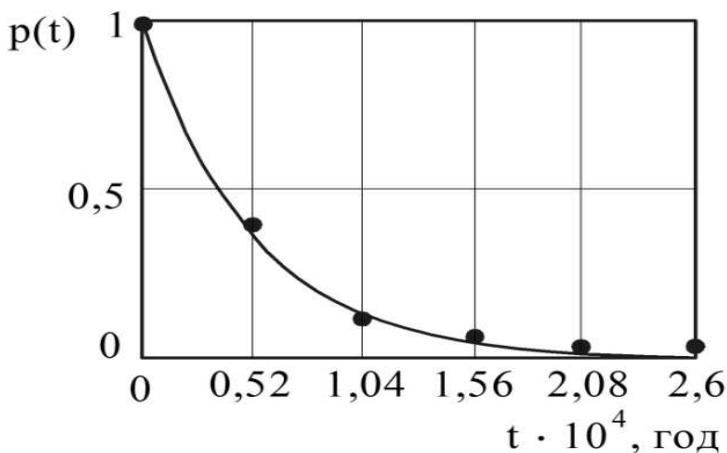


Рис. 2. Залежність безвідмовної роботи пристрою пам'яті від часу його експлуатації:

● – відповідно, отримані експериментально та апроксимовані дані

В результаті планування двофакторного експерименту та моделювання процесу зчитування пакетів з восьми слів, була побудована залежність безвідмовної роботи пам'яті від часу її експлуатації (рис. 2). Порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними показало, що відносна похибка визначення часу безвідмовної експлуатації не перевищує 3...5%.

Провівши математичну обробку результатів експерименту і підставивши в рівняння регресії максимальний приріст значень залишкових мікронерівностей (180%) за умови відсутності мікродефектів поверхні, отримуємо, що прогнозований термін надійної експлуатації інтегральних мікросхем на прикладі елементів пам'яті становить приблизно 3 роки.

Аналіз результатів АСМ досліджень поверхонь елементів пам'яті на різних етапах їх експлуатації дозволив встановити, що в процесі тривалої експлуатації відбувається руйнування їх поверхонь (рис. 3) (збільшуються мікронерівності з 12,5...15,0 нм до 30,0...42,0 нм, виникають мікротріщини, сколи та інші мікродефекти), що призводить до різкого зниження техніко-експлуатаційних характеристик та функціональних можливостей інтегральних мікросхем (що видно з залежності безвідмовної роботи пристрою пам'яті від часу його експлуатації).

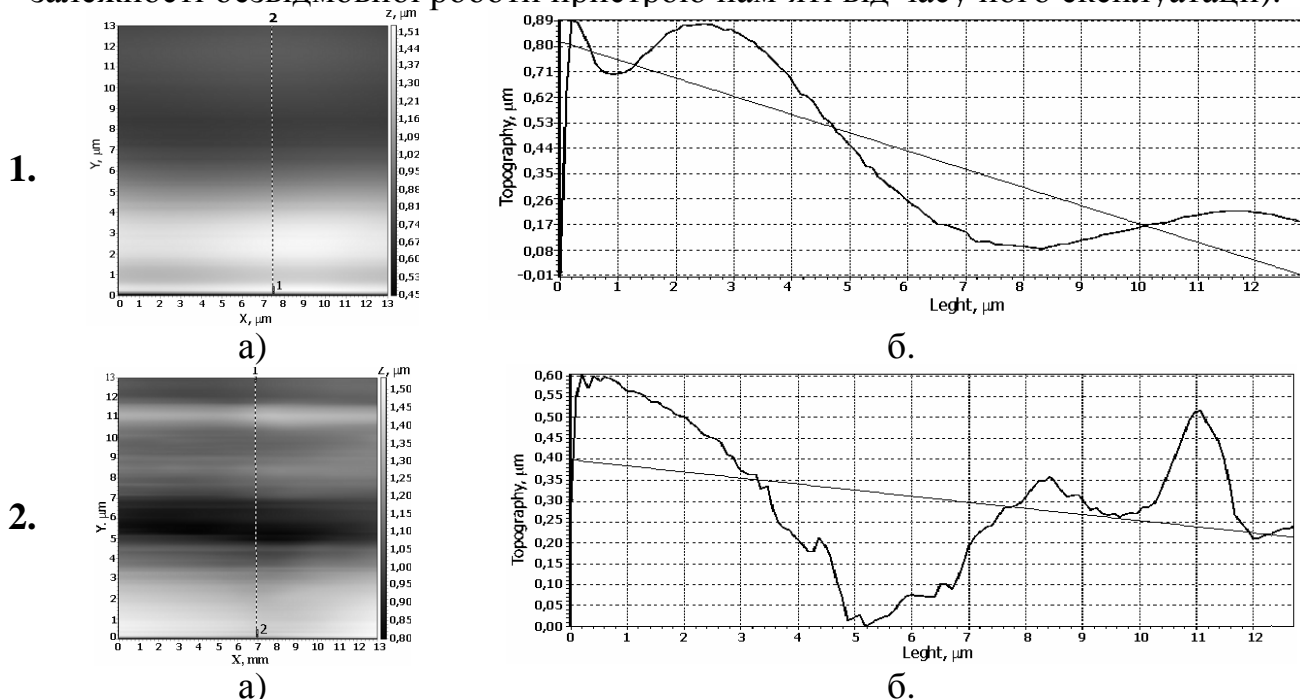


Рис. 3. Топограма (а) та профіль сканованої ділянки поверхні елемента пам'яті (б) до експлуатації (1) та після експлуатації протягом трьох років (2)

### Висновки

За допомогою розробленого комплексу верифікаційних тестів, досліджено час безвідмовної експлуатації елементів пам'яті (що складає 3 роки), а результати цих тестів становлять допустиму похибку з математичною моделлю.

Показано, що при експлуатації інтегральних мікросхем в екстремальних умовах відбувається збільшення середніх значень мікронерівностей, розвиток тріщин, які приводять до передчасного виходу їх з ладу, що, у свою чергу, призводить до погіршення техніко-експлуатаційних властивостей цих елементів.

Уперше для аналізу поверхні інтегральних мікросхем на прикладі елементів пам'яті та прогнозування часу їх надійної експлуатації використано метод атомно-силової мікроскопії, який дозволив на початковій стадії експлуатації визначати приховані мікродефекти (мікротріщини, пори тощо) і зменшення надійності відгуку, які не можуть бути визначені іншими аналітичними методами.

Визначена залежність часу надійної експлуатації інтегральних мікросхем радіотехнічних пристроїв від умов їх експлуатації, стану поверхні кремнієвого чипу та впливів зовнішнього середовища.

### **Література**

1. Мікроскопія в нанотехнологіях / Антонюк В. С., Тимчик Г. С., Верцанова О. В. та ін. – К.: НТУУ «КПІ», 2014 – 260 с.
2. Пьезоэлектрические преобразователи. Справочное пособие / Шарапов В. М. [и др.]. Под ред. Шарапова В. М. – Черкассы: ЧГТУ, 2004. – 435 с.
3. Андриенко В. А. Метод и средства повышения надежности запоминающих устройств путем замещения модулей памяти / В. А. Андриенко, В. Г. Рябцев, Т. Ю. Уткина // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 6 (25). – С. 192 – 195.
4. Атомно-силовой микроскоп NT-206: новые возможности / А. А. Суслов [и др.] // БелСЗМ-6: Сборник докладов 6-го Белорусского семинара по сканирующей зондовой микроскопии, 12-15 октября 2004 г. – г. Минск. – 2004. – С. 123 – 130.
5. Общество с дополнительной ответственностью «Микротестмашины»: [Электронный ресурс]. 2006-2013. URL: <http://microtm.com/> (Дата обращения: 21.11.2014)
6. Бондаренко М. А. Изучение механизма образования переходной зоны в поверхностном слое пьезокерамических изделий нанотехники / М. А. Бондаренко, В. С. Антонюк, В. А. Ващенко, Ю. Ю. Бондаренко, П. В. Петлеваный // Наноинженерия. М. Машиностроение. – 2011. – № 6. – С. 25 – 29.
7. Logitech: »: [Электронный ресурс]. 2014 URL: <http://logitech.com/> (Дата обращения: 21.11.2014)
8. Фролов В. А. Анализ и оптимизация в прикладных задачах конструирования РЭС. – К.: Выща школа, 1991. – 310 с.

*Надійшла до редакції  
25 вересня 2014 року*

© Андрієнко В. О., Іванченко В. В., Гончаров А. В., Скорина Є. В., Антонюк В. С., 2014

УДК 532.2

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К ФОТОПРИЕМНОМУ УСТРОЙСТВУ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ СТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ**

*Молодык А. В., Пономаренко А. А., Балтабаев Н. Н.*

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
г. Киев, Украина*

*Исследуется возможность выращивания методом МОС-гидридной эпитаксии структур с квантовыми ямами с двумя активными областями, каждая из которых обладает чувствительностью в заданной области спектра. Проводится детальный анализ технологических процессов, достоинств и недостатков таких методов как МОС-гидридная эпитаксия и молекулярно-лучевая эпитаксия. Проведен анализ приемников, осуществляющих прием слабых сигналов в двух спектральных областях ИК – спектра. Результаты работы могут быть применены в ходе разработки монолитных двухспектральных фотоприемников, которые представляют особый интерес в сфере радиообнаружения и дальнометрии.*

***Ключевые слова:** фотоприемники длинноволнового диапазона, структуры с квантовыми ямами, МОС-гидридная эпитаксия.*

### **Вступление**

Разработка фотоприемника (ФП) для длинноволнового ИК диапазона на основе структур с квантовыми ямами (СКЯ) ведется за рубежом уже свыше 20 лет. За достаточно короткий промежуток времени проделан путь от физическо-