

ДЕФЕКТОУТВОРЕННЯ, ЯК ОСНОВА DEFECT ENGINEERING В МЕМС ТА МОЕМС

О. О. Чала, Харківський національний університет радіоелектроніки

В роботі поставлено мету виділення основних дефектів, що утворюються при використанні кремнію, як матеріалу, для виготовлення підкладок мікроелектромеханічних систем (МЕМС) та мікрооптоелектромеханічних систем (МОЕМС). Показано, що моделювання і відображення процесів розвитку виробничих дефектів для передбачення параметричних відмов, зміни і коректування технологічних процесів виробництва МЕМС та МОЕМС є актуальним науково-практичним завданням, яке можна спробувати вирішити на основі defect engineering.

В работе поставлена цель выделения основных дефектов, образующихся при использовании кремния, в качестве материала для изготовления подложек микроэлектромеханических систем (МЭМС) и микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС). Показано, что моделирование и отображение процессов развития производственных дефектов для предсказания параметрических отказов, изменения и корректировки технологических процессов производства МЭМС и МОЭМС является актуальным научно-практическим заданием, которое можно попробовать решить на основе defect engineering.

The aim of the work is to isolate the main defects formed when using silicon as a material for the manufacture of substrates of microelectromechanical systems (MEMS) and microoptoelectromechanical systems (MOEMS). It is shown that modeling and mapping of processes of development of production defects for prediction of parametric failures, changes and adjustment of technological processes of production of MEMS and MOEMS is an actual scientific and practical task which it is possible to try to solve on the basis of defect engineering.

Ключові слова: *дефект, технологічний процес, МЕМС, МОЕМС, кремній, підкладка, дифузія, defect engineering.*

Вступ

В даний час відомо більше двадцяти технологічних методів та напрямків виготовлення МЕМС та МОЕМС виробів на основі кремнієвих структур [1-3].

Кремній – основний напівпровідниковий матеріал, що знайшов найбільше розповсюдження завдяки високим електрофізичним характеристикам приладів на його основі. [4].

Кремній є основою для підкладок виробів електронної техніки, функціональних компонентів МЕМС та МОЕМС.

Операції контролю та випробувань, що входять в структуру сучасних технологічних процесів, не можуть дати повної гарантії відсутності дефектів у виробництві

такого типу компонентів і їх поведінці в часі, з урахуванням умов експлуатації [4-7].

Велика частина дефектів виникає саме через дефектність і (або) присутність домішок у вихідних матеріалах підкладок або підшарів підкладок функціональних компонентів МОЕМС та під час самого технологічного процесу їх виготовлення [7-8].

Тому було прийнято рішення розглянути дефекти підкладок шарів та підшарів функціонального компонента МОЕМС, як основне і первинне джерело виникнення дефектності компонента МОЕМС в цілому.

Проблема виникає в тому, що на етапі виробництва вихідних матеріалів малоімовірною представляється можливість відстежити дефектність структур і залежність фізико-технологічних параметрів, які безпосередньо впливають на якість і відповідність вихідних характеристик МОЕМС компонентів, особливе обмеження накладає фактор кінетики деградаційних процесів в матеріалах під час і умови експлуатації виробу.

Але все ж, головною причиною обмеженості ресурсних характеристик функціональних компонентів МОЕМС є виробничі дефекти, які розвиваються у часі протягом експлуатації МЕМС.

У зв'язку з цим, є «відкритим» науково-практичне завдання прогнозування та управління дефектоутворенням шарів та підшарів функціональних компонентів МОЕМС, яке вирішується за допомогою контролю параметрів експлуатації, розвитку закладених при виробництві дефектів, які в свою чергу не завжди погіршують параметри мікросистем [9-12], а навпаки з часом можуть, навіть, при правильних підходах та певних умовах експлуатації, покращуватися [10-14].

Саме прогнозування та управління технологічними дефектами при виготовленні кремнієвих структур є досить перспективним напрямком розвитку у розробці технологічних процесів виготовлення МЕМС та МОЕМС.

Можливість управління стало основою розвитку перспективного наукового напрямку в технологіях виробництва напівпровідників, матеріалів і приладів електронної техніки – defect engineering [15-16], що базується на управлінні і прогнозуванні процесів дефектоутворення.

Мікроелектромеханічні системи формують комбінуванням механічних елементів, датчиків і електроніки на загальній кремнієвій підкладці за допомогою технологій мікро- та нановиробництва [3, 4]. Методи, що використовуються у технологічних процесах виготовлення МЕМС можна віднести до одного з наступних класів:

- об'ємної обробки з отриманням високого аспектного відношення;
- поверхневої обробки;
- змішаної технології, що використовує перші дві;
- гібридної технології зі складанням механічних та електронних частин на рівні атомно-молекулярного зрощування;
- інші (волоконні, мікромеханічної обробки, об'ємні полімерні);
- багат шарові плівкові структури [3].

Можна виділити три види найпоширеніших дефектів, що утворюються на кремнії:

- поверхневі: утворюються за рахунок різного роду механічних обробок, таких як лазерна порізка, шліфівка, поліровка, основним способом усунення є стравлювання поверхневого шару кремнієвої підкладки;
- кутові: за рахунок анізотропного травлення, що викликає зародки тріщин – основним способом усунення є використання ізотропного травлення, за допомогою якого закруглюються краї підкладки, що практично виключає (мінімізує) кутові дефекти;
- об'ємні: виникають за рахунок термообробки та призводять до виникнення внутрішніх напружень, які в поєднанні із крайовими, поверхневими та об'ємними недоскональностями структури можуть призводити до концентрації напружень і наступного розколювання підкладки по площині.

Якщо розглядати дефектоутворення таких компонентів через призму фізико-хімічних перетворень та реакцій, то можна виділити декілька основних механізмів виникнення виробничих дефектів функціональних компонентів МОЕМС, розвиток яких пов'язаний з перетворенням мікро- і макроструктури вихідних матеріалів, що відбуваються при виробництві та експлуатації функціональних компонентів МОЕМС.

1. Дифузію шарів і підшарів функціональних компонентів МОЕМС можна представити, використовуючи другий закон Фіка: для одновимірної дифузії (1) або дифузії через плівку (2):

$$\frac{dV}{dt} = D \frac{d^2V}{dx^2}, \quad (1)$$

$$\frac{dV}{dt} = D \frac{\Delta V}{y}, \quad (2)$$

де D – коефіцієнт дифузії;

V – концентрація дифундаційної компоненти;

y – товщина плівки.

2. Хімічну корозію шарів та підшарів функціональних компонентів МОЕМС можна, представити у вигляді (3), а при наявності захисних плівок (4):

$$\frac{dV}{dt} = V_0 e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (3)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{k_d k_p}{k_d + k_p h_0} V_0, \quad (4)$$

де E – енергія активації молекул, що беруть участь в реакції;

k_p – константа швидкості хімічної реакції;

V_0 – концентрація реагенту на зовнішній поверхні на кордоні з газовою фазою;

h_0 – товщина покриття;

k_d – коефіцієнт дифузії при корозії.

3. Електричну корозію можна виразити, як кількість зношеного матеріалу (5) та глибину зносу (6):

$$V_{\Sigma} = \gamma_{(-)} Q, \quad (5)$$

$$h = \frac{\gamma_{(-)} Q}{\rho s_0} = \frac{\gamma_{(-)} t}{\rho s_0} \int i dt = \frac{\gamma_{(-)}}{\rho s_0} I_{cp} t. \quad (6)$$

де $\gamma_{(-)}$ – коефіцієнт ерозії;

Q – кількість електрики;

ρ – питома вага;

S_0 – площа зношеної частини поверхні;

I_{cp} – середнє значення струму;

t – час дії струму.

4. Випаровування матеріалу (швидкість процесу) можна виразити як (7):

$$V' = \frac{k_p}{\sqrt{2\pi R}} \frac{1}{p \sqrt{\frac{M}{T}}}, \quad (7)$$

де M – молекулярна вага матеріалу, який випаровується;

p – тиск;

R – газова стала;

T – абсолютна температура [17-23].

На основі приведених диференціальних рівнянь фізико-технологічних процесів дефектоутворення, під час виробництва функціональних компонентів МЕМС та МОЕМС, необхідно розробити математичну модель, яка б давала можливість передбачення та виникнення тих чи інших дефектів та пояснювала ступінь їх впливу на параметри та вірогідність відмов компоненту.

Таким чином, при реалізації технологічних процесів дефекти, що виникли, в подальшому розвиваються відповідно до об'єктивних закономірностей зміни мікро- і макроструктури матеріалів з яких складаються елементи й прилади МЕМС та МОЕМС.

Розглядаючи різні матеріали і процеси розвитку виробничих дефектів, аналізуючи і узагальнюючи при цьому механізм процесів, можна зробити висновок про наявність трьох основних видів вищевказаних змін: дифузія компонентів, корозія (хімічна, електрична, електрохімічна) та випаровування.

Аналіз можливостей засобів виявлення дефектів і даних з причин відмов МЕМС та МОЕМС показує, що значна частина дефектів може бути не виявлена. Тому приділяють увагу прогнозуванню параметричних відмов в процесі виробничих випробувань і технічного обслуговування, в результаті приймають рішення про технічний стан і технології виробництва приладів [15-19].

Сучасні методи прогнозування базуються на функціональному аналізі, теорії рядів, теорії екстраполяції і інтерполяції, теорії ймовірностей і математичної статистики, теорії випадкових функцій і випадкових процесів, кореляційному і спектральному аналізі та теорії розпізнавання образів [21-23].

При відображенні часової залежності параметрів використовують лінійні і квадратичні моделі [22]. В роботі [21] показано, що збільшення порядку моделі вище другого не призводить до істотного збільшення точності прогнозу, але значно ускладнює розрахункові процедури.

В рамках прогнозування з використанням теорії розпізнавання [21] прийнято виділяти в *n*-вимірному просторі області, які відповідають певним ступеням працездатності МЕМС та МОЕМС, і визначити межу допустимого рівня працездатності.

Велика увага приділяється якості прогнозу [21-25], тобто сукупності таких характеристик прогнозу, які в комплексі дозволяють зробити його ефективним, корисним в управлінні, забезпечують отримання достовірного опису об'єкта на певну перспективу і можливість достовірного використання прогнозних результатів для процедури управління.

Результати прогнозу завжди пов'язані з певними процедурами управління, і якість прогнозу може бути оцінена з точки зору потреб саме управління, її чутливості до можливих помилок прогнозування.

Основні напрямки для обґрунтованого визначення якості прогнозу слід шукати в оцінці невизначеності, яка несе в собі ту чи іншу опис об'єкта.

Якість прогнозу, перш за все, залежить від повноти і якості опису самого об'єкта, процедура прогнозування несе в собі специфічну компоненту – «час» і тому описові топологічні характеристики доповнюються динамічними.

Оцінку результатів прогнозування необхідно здійснювати, виходячи з обліку внутрішніх процесів і зовнішніх впливів на МЕМС. Отримання прогнозних результатів при дії змінних зовнішніх факторів підвищує ефективність прогнозу, робить його дієвим інструментом управління виробництвом МЕМС та МОЕМС.

Існуючі в даний час методи верифікації в переважній більшості оперують лише статистичними процедурами [19, 21], які зводяться до оцінки довірчих інтервалів для розглянутих результатів.

При цьому передбачається два види помилок: помилки, які визначаються інформацією або описом об'єкта, і помилки безпосередньо методу прогнозування.

Помилки першого виду досить легко формалізуються і можуть бути розраховані статистичними методами.

Аналіз вихідної інформації передбачає виявлення сукупності статистичних показників, в тому числі визначення виду розподілу. Багато статистичні розрахунки і критерії правомірні лише для нормального закону розподілу, інакше оцінки виявляються неефективними.

Методами підвищення ефективності є: виявлення аномальних спостережень, виділення неперіодичних складових, визначення стрибкоподібних змін до тенденції досліджуваного процесу, визначення варіацій досліджуваного процесу, визначення варіацій досліджуваного показника, його періодичності [15].

При проведенні прогнозних розрахунків завжди слід оцінювати і знаходити оптимальне відповідність між інформацією та використовуваним для отримання прогнозу методом.

Виникає необхідність розробки методів підвищення якості прогнозу, заснованих на основі опису об'єктів і оперування деякими новими для прогнозування поняттями: стійкість, інерційність, зв'язність, складність, вигляд і функціональна цілісність об'єкта, точність і повнота опису, ризик прийняття рішень.

Так поняття інерційності характеризує опірність об'єкта в часі зміни власної траєкторії під впливом на нього зовнішнього середовища; стійкість передбачає певну перевагу напрямків розвитку в часі, вибір об'єктом будь-яких певних траєкторій, як в просторі розглянутих показників, так і в часі.

Для адекватної оцінки, прогнозування, передбачення та управління дефектами МЕМС та МОЕМС необхідно досконало вивчати фізико-хімічні процеси, що лежать в основі їх виробництва, можливі різноваріантні умови їх експлуатації і на основі отриманої інформації, після ретельного аналізу, розробляти математичні моделі, які б давали уявлення та пояснення про виникнення та розвиток виробничих дефектів у часі.

Висновки

Таким чином, моделювання і відображення процесів розвитку виробничих дефектів для передбачення параметричних відмов, зміни і коректування технологічних процесів виробництва МЕМС та МОЕМС є актуальним науково-практичним завданням, яке можна спробувати вирішити на основі defect engineering.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Невлюдов И. Ш., Палагин В. А., Чалая Е. А. *Технологии микросистемной техники (часть II)* // *Технология приборостроения*. – 2015. – №. 2. – С. 5-10.
2. Невлюдов И. Ш., Палагин В. А., Чалая Е. А. «*Технологии микросистемной техники (часть II)*», НТЖ «Технология приборостроения». – X., 2015. №2.
3. Семенець, В. *Введення в мікросистемну техніку та нанотехнології [Текст]*/ В. В. Семенець, І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін / Харків «Комп. СМІТ», 2011.-416 с.
4. Петерсен, К. Э. *Кремний как механический материал [Текст]*/ К.Э. Петерсен // *ТИИЭИР.-Т. 70, № 5.1982. С. 5-49.*
5. *Методы и механизмы геттерирования кремниевых структур в производстве интегральных микросхем* / В.А. Пилипенко, В.А. Горушко, А.Н. Петлицкий, В.В. Понарядов, А.С. Турцевич, С.В. Шведов // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. — 2013. — № 2-3. — С. 43-57. — *Бібліогр.: 72 назв. — рос.*

6. Оксанич А. П., Седин Е. А. Разработка модели расчёта внутренних напряжений и деформаций в кремниевых эпитаксиальных структурах //Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотovoltaїка. Тези доповідей на Першій міжнародній науково-практичній конференції НМІТФ-2011: 5-7 травня 2011 р., Кременчук, Україна. Збірник тез доповідей.-Кре-менчук, Кременчуцький національний університет, 2011.-*** с. – 2011. – С. 70.
7. Абдуллин Ф. А., Пауткин В. Е., Печерская Е. А., Печерский А. В. Применение методов селективного травления кремния для оценки качества пластин при изготовлении микромеханических датчиков // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2018. №1 (25).
7. Филипенко О.І. Технологічні дефекти виробництва кремнієвих підкладок для функціональних відбиваючих поверхонь МОЕМС-перемикачів / Филипенко О.І., Чала О.О., Відешин М.І. // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2017. – Т. 2 (42). – С. 61-63.
8. Филипенко О. І. Технологічні фактори виробництва, що впливають на якість покриттів дзеркальних поверхонь МОЕМС-перемикачів / О. І. Филипенко, О. О. Чала, М. І. Відешин // Наукові нотатки. - 2017. - Вип. 57. - С. 178-183
9. H. Abdelnaby, G. P. Potirniche, A. Elshabini, F. Barlow, S. K. Groothuis and R. S. Parker, "Numerical simulation of heat generation during the back grinding process of silicon wafers," 2012 IEEE Workshop on Microelectronics and Electron Devices, Boise, ID, 2012, pp. 1-4, doi: 10.1109/WMED.2012.6202614.
10. Невлюдов И. Ш. Проектные решения повышения надежности кремниевых интегральных преобразователей механических величин / И. Ш. Невлюдов, М. А. Омаров, К. Ю. Харенко // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Х. : ХНУРЕ, 2006. – Вып. 147. – С. 119–122.
11. H. Abdelnaby, G. P. Potirniche, A. Elshabini, F. Barlow, S. K. Groothuis and R. S. Parker, "Numerical simulation of heat generation during the back grinding process of silicon wafers," 2012 IEEE Workshop on Microelectronics and Electron Devices, Boise, ID, 2012, pp. 1-4, doi: 10.1109/WMED.2012.6202614.
12. M. Wilson et al., "Importance of defect photoionization in silicon-rich SiNx dielectrics for high PID resistance," 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Tampa, FL, 2013, pp. 0218-0222, doi: 10.1109/PVSC.2013.6744134.
13. G. Margutti et al., "Silicon defects characterization for low temperature ion implantation and spike anneal processes," 2014 20th International Conference on Ion Implantation Technology (IIT), Portland, OR, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/IIT.2014.6940014.
14. Filipenko O. et al. Impact of Technological Operations Parameters on Moems Components Formation //2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL). – IEEE, 2019. – С. 371-374.
15. Bai S. et al. Defect engineering in photocatalytic materials //Nano Energy. – 2018. – Т. 53. – С. 296-336.
16. Hu Z. et al. Two-dimensional transition metal dichalcogenides: interface and defect engineering //Chemical Society Reviews. – 2018. – Т. 47. – №. 9. – С. 3100-3128.
17. Nevliudov, I , Omarov M , Botsman, I , Demaska, N , Nevliudova, V , Starodubcev, M . (2019). Research Of Factors Influencing The Process Of Formation Of Welded Microconnections In Electronic Modules . Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering , 20 () , 181-187 . DOI: 10.18038/estubtda.651032
18. L. Zhang, Y. Dong and J. Wang, "Wind Speed Forecasting Using a Two-Stage Forecasting System With an Error Correcting and Nonlinear Ensemble Strategy," in IEEE Access, vol. 7, pp. 176000-176023, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2957174.
19. L. Wei, Z. Zhang, Y. Ning and J. Lv, "Improved Markov Residual Error to Long-Medium Power Load Forecast Based on SVM Method," 2009 First International Workshop on Education Technology and Computer Science, Wuhan, Hubei, 2009, pp. 128-132, doi: 10.1109/ETCS.2009.38.
20. C. R. Charan, "Application of Generalized Neuron Model in Short Term Load Forecasting under error functions," 2010 Second International conference on Computing, Communication and Networking Technologies, Karur, 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICCCNT.2010.5591670.
21. Распознавание, классификация, прогноз. Математические методы и их применение. Вып. 2. – М.: Наука, 1989. – 302 с.
22. Терлецкий Я. П. Статистическая физика: Учебное пособие. – Высшая школа, 1966. Технология С. Под ред. С. Зи; Пер. с англ., кн. 1. – 1986.
23. Рудой Ю. Г., Суханов А. Д. Термодинамические флуктуации в подходах Гиббса и Эйнштейна //Успехи физических наук. – 2000. – Т. 170. – №. 12. – С. 1265-1296.
24. O. Filipenko, O. Chala and O. Sychova, "Some Issues of Dependencies of Loss from Technological Features of Optical Switches for Communication Systems," 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 599-603, doi: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632051.
25. O. Filipenko, O. Chala, V. Bortnikova, O. Sychova and I. Botsman, "Impact of Technological Operations Parameters on Moems Components Formation," 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL), Sozopol, Bulgaria, 2019, pp. 371-374, doi: 10.1109/CAOL46282.2019.9019570.