

5. Newman, M. E. J. Models of the small world [Text] / M.E.J. Newman // J. Stat. Phys. – 2000. – 101. – P. 819–841.
6. Barrat, A. On the properties of small-world networks models [Text] / A. Barrat, M. Weigt // The European Physical Journal. – 2000. – B 13. – P. 547–560.
7. Watts D.J. Collective dynamics of “small-world” networks [Text] / D.J. Watts, S.H. Strogatz // Nature. – 1998. – Vol. 393. – P. 440–442.
8. Amaral, L. A. N. Classes of small-world networks [Text] / L. A. N. Amaral, A. Scala, M. Barthelemy, and H. E. Stanley // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2000. – Vol. 97. – №21. – P. 11149–11152.
9. Watts, D. J. Small Worlds: The Dynamics of Networks Between Order and Randomness [Text] / D. J. Watts. – Princeton University Press, 1999. – 262 pp. – ISBN: 0-691-11704-7.
10. Broder, A. Graph structure in the web [Text] / A. Broder, R. Kumar, F. Maghoul et al. // Proceedings of the 9th World Wide Web Conference, Computer networks, 2000. – 33 (1). – P. 309-320.
11. Baeza-Yates R., C. Castillo, E.N. Efthimiadis. Characterization of National Web Domains [Text] / R. Baeza-Yates, C. Castillo, E.N. Efthimiadis // Journal ACM Transactions on Internet Technology. – 2007. – Vol. 7. – №2. – Art. 9.– 33 pp.
12. Kleinberg, J. M. Navigation in a small world [Text] / J. M. Kleinberg // Nature. – 2000. – Vol 406. – №6798. – P. 845.
13. Newman, M. E. J. Random graphs with arbitrary degree distribution and their applications [Text] / M. E. J. Newman, D. J. Watts, S. H. Strogatz // Physical Review. – 2001. – E 6402. – №2. – 026118 [17 pages].
14. Ландэ, Д. В. Інтернетика. Навігація в складних сетях: моделі і алгоритми [Текст] / Д. В. Ландэ, А. А. Снарський, І. В. Безсуднов. – Москва, 2009. – 258 с.
15. Фурашев, В. Н. Параметри українського сегмента Інтернет як складної мережі [Текст] / В. Н. Фурашев, В. Ю. Зубок, Д. В. Ландэ // Відкриті інформаційні та комп'ютерні технології. – 2008. – 40. – С. 235-242.
16. Пасічник, В. В. Дослідження та моделювання складних мереж [Текст] / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Восточно-Европейський журнал передових технологій, 2010. – 2/3 (44). – С. 43-48.
17. Кириченко, О. Л. Програмне забезпечення для дослідження статистичних характеристик глобальної мережі WWW [Текст] / О. Л. Кириченко, І. Каповскі, С. Е. Остапов // Системи обробки інформації. – 2013. – Т.2, Вип. 3. – С. 99-104.
18. Кириченко, О. Л. Складні мережі та їх статистичні характеристики: аналіз деяких сегментів web-простору [Текст]: тези доповідей / О. Л. Кириченко, І. Каповскі, С. Е. Остапов // Всеукраїнська науково-практична конференція «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки». – Чернівці: Видавничий дім «Родовід», 2013. – С. 16-21.

*Застосовано прикладне програмне забезпечення пакету MathLab для 3D моделювання морфологічних особливостей поверхні сенсорів УФ випромінювання на основі GaP; показано, що такий підхід можна використати для прогнозування стабільності параметрів і працездатності інформаційно-вимірвальних систем, в яких застосовуються дані сенсори*

*Ключові слова: 3D моделювання, сенсор УФ випромінювання, інформаційно-вимірвальна система*

*Применено прикладное программное обеспечение пакета MathLab для 3D моделирования морфологических особенностей поверхности сенсоров УФ излучения на основе GaP; показано, что такой подход позволяет прогнозировать стабильность параметров и работоспособность информационно-измерительных систем, в которых используются УФ сенсоры*

*Ключевые слова: 3D моделирование, сенсор УФ излучения, информационно-измерительная система*

УДК 004.94

# ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ СТРУКТУР GaP-SnO<sub>2</sub> НА ОСНОВІ 3D МОДЕЛЕЙ ЇХ ПОВЕРХНІ

С. Л. Воропаєва

Кандидат технічних наук, асистент  
Кафедра комп'ютерних систем та мереж  
Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича  
вул. Університетська, 28, м. Чернівці,  
Україна, 58000  
E-mail: spotted@gmail.com

## 1. Вступ

Надійність функціонування комп'ютеризованих інформаційно-вимірвальних систем у значній мірі

залежить від довготривалої стабільності параметрів первинних перетворювачів інформаційних сигналів. Особливо це стосується сенсорів, що працюють в режимах близьких до граничних умов експлуатації [1,

2]. Однак, навіть при відсутності сторонніх впливів за критичних значень температури, вологості, радіаційного випромінювання, тощо, напівпровідникові сенсори деградують.

Це приводить до виникнення похибки реєстрації вимірюваної величини та необхідності корекції параметрів вимірювального каналу. Окрім реструктуризації структурних і домішкових дефектів та впливу термопружних напруг [3, 4], однією з найбільш поширених причин деградації сенсорів як у природних умовах, так і при дії потужних потоків електромагнітного випромінювання є руйнування струмовідвідних контактів та доріжок.

Зміну морфології контактних площадок металізації можна зареєструвати візуально за допомогою оптичних досліджень. Проте, дати кількісну оцінку цих процесів досить важко. Тому метою даної роботи було застосування 3D моделювання для покращення візуалізації оптичних зображень морфології поверхні УФ сенсорів та їх кількісної оцінки.

## 2. Методика досліджень морфології поверхні сенсорів УФ випромінювання з використанням 3D моделювання

Для досліджень використовували оптично прозорі кристали GaP, які є чутливими до випромінювання УФ діапазону хвиль [1], та структури GaP-SnO<sub>2</sub> на їх основі, сформовані за традиційними технологіями [5, 6]. Крім оптоелектронних параметрів та електрофізичних досліджень, аналогічних описаним в [7 – 10], оптичними методами досліджували особливості морфології поверхні даних структур. Оптичні зображення морфології поверхні отримували з допомогою металографічного мікроскопу МИМ-2 і оптичного МБС-9. Для 3D моделювання використовували розроблений для середовища MathLab2007R програмний модуль Graph.exe, а також засоби прикладних пакетів програм (ПП) Adobe Photoshop та Coral Draw. ПП використовувались для попереднього форматування зображень отриманих цифровою камерою та переведення їх з довільного формату у файли типу \*.bmp заданої геометричної розмірності. Засоби програмного модуля Graph.exe дозволяють масштабувати отримані 3D зображення у градаціях сірого, або кольоровому режимі, а також деталізувати мікрорельєф досліджуваних об'єктів з певним кроком, що забезпечує підвищення контрасту рисунків. Масштабна прив'язка 3D зображень здійснювалась за результатами порівняння характеристикних розмірів окремих об'єктів визначених в металографічному мікроскопі.

## 3. Результати дослідження морфологічних особливостей фото чутливої поверхні сенсорів на основі бар'єрних структур GaP-SnO<sub>2</sub>

При дослідженні розглядалися поверхні зразків, які володіли задовільними оптоелектронними та електрофізичними характеристиками, але в процесі експлуатації змінювали свої параметри (рис. 1), а також зразки з явними ознаками неоднорідності поверхні (рис. 2), але задовільними фотоелектричними параметрами одразу після їх формування.

Можна прогнозувати, що такі неоднорідності в подальшому стають причиною деградації параметрів сенсорів.

Поверхня фоточутливого шару зразків виготовлених за традиційною технологією є однорідною (рис. 1, а), хоча можуть мати місце одиничні точкові неоднорідності. Кристали GaP оптично прозорі. Посадка кристалів на підкладку корпуса неоднорідна, спостерігаються дифузні області з підвищеним відбиванням світла – можливо залишки металу. У процесі експлуатації однорідність поверхні металічних струмовідвідних контактів порушується (рис. 1, б). Спостерігаються механічні пошкодження, взаємодифузія металізації і фоточутливого шару.

Морфологічні неоднорідності поверхні УФ сенсорів (рис. 2, а, б), такі як ямки травлення або локальні механічні утворення до чи під час нанесення шару SnO<sub>2</sub> можуть бути зумовлені відхиленням у технології їх виготовлення. Оскільки такі структури формувались на базових переходах n<sup>+</sup>-n-p<sup>+</sup>-GaP шляхом попереднього травлення р\*-GaP шару, то цілком ймовірно, що острівкові форми є залишками неотравленого епітаксійного р<sup>+</sup>-GaP шару.

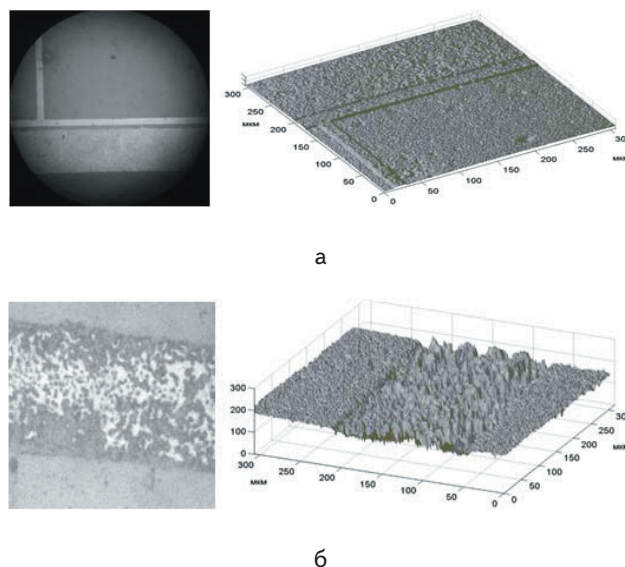


Рис. 1. Оптичні зображення і 3D моделі струмовідвідних контактів УФ сенсорів: а – з чіткою огранкою; б – та після їх деградації в процесі експлуатації

Іншими причинами неоднорідності поверхні можуть бути: 1) локальне розтравлювання n-GaP шару після витравлювання р<sup>+</sup>-GaP, або 2) утворення острівкових окисних форм на поверхні n-GaP перед нанесенням SnO<sub>2</sub>. Останнє можливе у зв'язку з використанням методики пульверизаційного нанесення півки SnO<sub>2</sub> на попередньо нагріті до температури ~200 °C кристали GaP. Враховуючи, що на окремих зразках острівкові форми мають чітко виділену подвійну огранку (рис. 2, б), то можливий одночасний прояв обох технологічних факторів: і неотравлення, і окиснення поверхні GaP. Характеристичні розміри таких неоднорідностей складають від 5-10 мкм до 30-60 мкм за рельєфом поверхні та до 150 мкм по площині зразка. У випадку дотримання технології, поверхня сенсорів є морфологічно однорідною, струмовідвідні контакти – з чіткою огранкою.

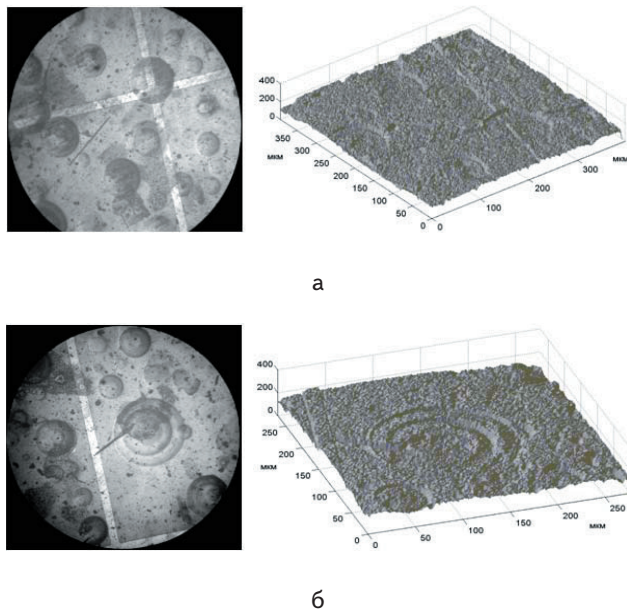


Рис. 2. Оптичні зображення і 3D моделі морфології поверхні УФ сенсорів GaP-SnO<sub>2</sub>: а – отримані методом пульверизаційного нанесення плівки SnO<sub>2</sub>; б – після високоенергетичного опромінення

При можливому локальному окисненні поверхні кристалу перед нанесенням SnO<sub>2</sub>, спостерігається погіршення адгезії нікелевих струмовідвідних контактів. Поверхня нікелю при цьому швидко кородує і стає неоднорідною, аналогічно як і внаслідок довготривалої дифузії (рис. 1, б).

#### 4. Висновки

Таким чином, застосування 3D моделювання є інструментальним забезпеченням, яке дозволяє візуалізувати неоднорідності контактів як у процесі їх виготовлення, так і при проведенні вибіркового поточного контролю у процесі їх експлуатації, провести аналіз конструкторсько-технологічних особливостей їх формування та генерувати рекомендації щодо покращення їх структури, і відповідно прогнозувати надійність подальшого функціонування інформаційно-виміральної системи.

Виявлені морфологічні неоднорідності поверхні досліджуваних УФ сенсорів можуть бути зумовлені локальним розтравлюванням n-GaP шару після витравлювання p<sup>+</sup>-GaP, або утворенням острівкових окисних форм на поверхні n-GaP перед нанесенням SnO<sub>2</sub>.

#### Література

1. Vorobets, G. I. Computer modelling of laser irradiation absorption in multilayer semiconductor structures [Text] / Vorobets G. I., Vorobets O. I., Voropaeva S. L., Tanasyuk Yu. V. // Naukovy Visnyk Chernivetskogo Universitetu: Zbirnyk Naukovykh Prats. Vyp. 426: Fizyka. Elektronika. Thematic issue "Computer systems and components". Part II. – Chernivtsi, 2008. – P.87-92.
2. Vorobets, G. I. Fundamental and applied aspects of laser interaction with materials on the interface SnO<sub>2</sub>-GaP devices: computer modeling and experimental investigations [Text] / G. I. Vorobets, O. I. Vorobets, S. L. Voropaeva, Yu. G. Dobrovolsky, T. A. Melnychuk // E-MRS 2005, Spring Meeting, Scientific Programme. May 31 – June 3, 2005. – SYMPOSIUM J. – PJ-5/19.
3. Vorobets, G. I. Aging and degradation of aluminium-silicon structures with a Schottky barrier after a pulsed laser irradiation [Text] / G. I. Vorobets, O. I. Vorobets, A. P. Fedorenko, A. G. Shkavro // Functional materials. – 2003. – Vol. 10, №3. – P.468-473.3.
4. Vorobets, G. I. Laser manipulation of clusters, structural defects and nanoaggregates in barrier structures on silicon and binary semiconductors [Text] / G. I. Vorobets, O. I. Vorobets, V. N. Strebegev // Applied Surface Science. – 2005. – 247. – P.590-601.
5. Комащенко, В. Н. Селективные и широкополосные ультрафиолетовые сенсоры [Текст] / В.Н. Комащенко, К. В. Колежук, Е. Ф. Венгер, Г. И. Шереметова, О. А. Мищук, А. В. Комащенко // Письма в ЖТФ. – 2002. – Том 28. – Вып. 19. – С. 32–36.
6. Malik, A. A new high ultraviolet sensitivity FTO-GaP Schottky photodiode fabricated by spray pyrolysis [Text] / A. Malik, A. Seco, E. Fortunator, R. Martins, B. Shabashkevich, S. Piroshenko // Semicond. Sci. Technol. – № 13. – 1998. – P.102-107.
7. Mandalapu, L. J. Ultraviolet photoconductive detectors based on Ga-doped ZnO films grown by molecular-beam epitaxy [Text] / L. J. Mandalapu, F. X. Xiu, Z. Yang, J. L. Liu // Science Direct. Solid-State Electronics 51 – 2007. - p.1014-1017.
8. Агемян, В. Ф. Оптоэлектронные явления в слоях, полученных нитрированием GaP и GaAs [Текст] / В. Ф. Агемян, В. И. Иванов-Омский, В. Н. Князевский, В. Ю. Рудь, Ю. В. Рудь // Физика и техника полупроводников. – 1998. - Том 32. – № 10. – С. 1203–1205.
9. Рембеза, С. И. Микроструктура и физические свойства тонких пленок SnO<sub>2</sub> [Текст] / С. И. Рембеза, Т. В. Свистова, Е. С. Рембеза, О. И. Борсякова // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Том 35. – Вып. 7. – С. 796–800.
10. Рембеза, С. И. Физические свойства пленок SnO<sub>2</sub>, обработанных некогерентным импульсным излучением [Текст] / С. И. Рембеза, Е. С. Рембеза, Т. В. Свистова, О. И. Борсякова // Физика и техника полупроводников. – 2006. Том 40. - Вып. 1. – С. 57–60.