

УДК 004.942; 548.4

Л.І. Д'яченко, Є.В. Мінов, С.Е. Остапов, І.Й. Наконечний, В.І. Буркут, О.В. Копач, П.М.Фочук

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці

СИСТЕМА АНАЛІЗУ ДЕФЕКТІВ ВИРОЩУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КРИСТАЛІВ

Розроблено програмне забезпечення для розпізнавання фотографій дефектної підсистеми, які створюються під час сканування реальних напівпровідникових кристалів в ІЧ-променях. Наведено структурну схему та опис установки, яка використовується для отримання знімків, а також описано алгоритм розпізнавання ІЧ фотографій. Наводяться способи перевірки правильності розпізнавання та запропоновано новий метод тестування коректності роботи існуючих програмних комплексів для моделювання структури та параметрів підсистеми дефектів вирощування напівпровідникових кристалів.

Ключові слова: програмний комплекс, алгоритм розпізнавання, дефекти вирощування, ІЧ знімки, тестування, статистична обробка інформації, напівпровідникові кристали.

Вступ

Досконалі знання структури та кінетики дефектів вирощування напівпровідникових кристалів є основою створення високоякісного базового матеріалу для детекторів рентгенівського випромінювання. При дослідженні таких дефектів широко використовується сканування вирощених кристалів в інфрачервоних променях [1].

В даній статті розглянуто реалізацію програмного забезпечення для розпізнавання серій інфрачервоних знімків та відновлення тривимірної структури дефектів вирощування в напівпровідникових кристалах. Для перевірки правильності розпізнавання інфрачервоних знімків нами була розроблена тестова програма, що генерує послідовність знімків з наперед заданими параметрами підсистеми дефектів.

Постановка задачі. Одним з основних методів дослідження досконалості вирощених напівпровідникових кристалів є сканування їх в променях інфрачервоного (ІЧ) діапазону. На таких знімках дуже добре видно дефекти вирощування: включення другої фази, лінійні та гвинтові дислокації, площини невідповідності тощо. Важливим вважається також статистичний аналіз дефектної підсистеми: приблизна кількість мілких, середніх та великих включень; розподіл, яким описується їх сукупність; відносне розміщення по об'єму і таке інше. Це дозволяє скоректувати технологічні процеси вирощування та обробки кристалів та, що не менш важливо, контролювати їх якість неруйнівними методами. Такі дії найзручніше виконувати за допомогою програмного забезпечення розпізнавання та статистичного аналізу дефектів, розробці якого і присвячено цю статтю.

Структура установки для отримання інфрачервоних знімків

Устаткування складається з трьох модулів, кожен з яких оснащено мікроконтролером і під'єднано

до RS-232 комп'ютера та блоку живлення 12 В. Модулі закріплені на спеціальній збірці, що дозволяє рухати предметний столик мікроскопа у трьох площинах. Для отримання зображень використовується камера PixeLink, що працює в ІЧ діапазоні. Камера з'єднана з комп'ютером через порт IEEE 1394 (firewire). Існує можливість дистанційного керування установкою за допомогою джойстика. Схема установки наведена на рис. 1.

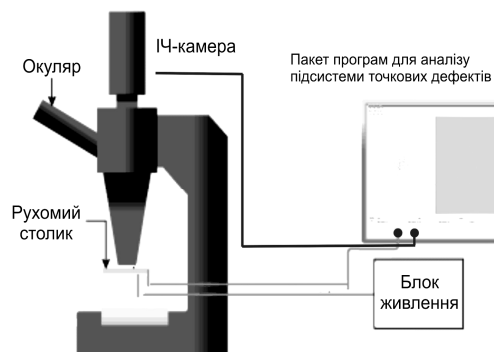


Рис. 1. Схема установки для отримання інфрачервоних фотографій напівпровідникових кристалів

Отримані за допомогою установки знімки передаються в пакет програм для аналізу підсистеми дефектів вирощених кристалів та відновлення її тривимірної структури [2].

Опис програмного забезпечення

Моделювання структури дефектів вирощування напівпровідникового кристалу здійснюється на основі серії інфрачервоних знімків, що зберігаються в форматі *.jpg. Програмний комплекс спочатку проводить розпізнавання дефектів на запропонованих знімках, а потім будує тривимірне зображення підсистеми дефектів [3]. В процесі розпізнавання використовуються п'ять основних алгоритмів: *normalize* (контраст), *blur* (швидке розмиття),

unsharp mask (нечітка маска), *filtering* (фільтрація по площі дефекту), *threshold* (пори́г). Процес розпізнавання складається з наступних кроків:

- нормалізація вхідних даних по межі чорного і білого (одноразово під час завантаження з файлу);
- розмиття точок зображення із заданим радіусом;
- розрахунок нечіткої маски на основі результатів розмиття і оригіналу;
- фільтрування отриманої маски за концентрацією дефектів на заданій площі;

- приведення точок маски до білого за заданим порогом.

Перший етап роботи аналізатора – попередня фільтрація вхідного зображення яка проводиться на основі визначеної кількості рівнів розкладення дискретного ортогонального вейвлет-перетворення. Метою є згладжування високочастотного шуму навколо дефектів. Кількість рівнів розкладення залежить від розміру вхідного зображення.

Кожен елемент вейвлет-перетворення і вейвлет-синтезу знаходиться за формулами:

$$DWT2D(in, Nx, Ny, depth)_{x,y} = \begin{cases} DWTXY(in, Nx, Ny)_{x,y}, & \text{depth} < 1, \\ DWT(DWTXY(in, Nx, Ny), \frac{Nx}{2}, \frac{Ny}{2}, \text{depth} - 1)_{x,y}, & \text{depth} \geq 1. \end{cases}$$

$$IDWT2D(in, Nx, Ny, depth)_{x,y} = \begin{cases} IDWTXY(in, Nx, Ny)_{x,y}, & \text{depth} < 1, \\ IDWT(IDWTXY(in, Nx, Ny), \frac{Nx}{2}, \frac{Ny}{2}, \text{depth} - 1)_{x,y}, & \text{depth} \geq 1. \end{cases}$$

Тут in – вхідна матриця зображення;
 N_x – ширина зображення;

N_y – висота зображення; $depth$ – кількість рівнів розкладання.

$$DWTXY(in, Nx, Ny)_{x,y} = \begin{cases} DWTX\left(in, \frac{Nx}{2}\right)_{x,y}, & x < \frac{Ny}{2}, \\ DWTY\left(DWTX\left(in, \frac{Nx}{2}\right), \frac{Ny}{2}\right)_{x,y}, & x \geq \frac{Ny}{2}. \end{cases}$$

$$DWTY(in, BN)_{x,y} = \begin{cases} \frac{in_{x,y} + in_{x,y+1}}{2}, & y < BN, \\ \frac{in_{x,y} - in_{x,y+1}}{2}, & y \geq BN. \end{cases}$$

$$IDWTXY(in, Nx, Ny)_{x,y} = \begin{cases} IDWTX\left(in, \frac{Nx}{2}\right)_{x,y}, & x < \frac{Ny}{2}, \\ IDWTY\left(IDWTX\left(in, \frac{Nx}{2}\right), \frac{Ny}{2}\right)_{x,y}, & x \geq \frac{Ny}{2}. \end{cases}$$

$$IDWTX(in, BN)_{x,y} = \begin{cases} in_{x,y} + in_{x+BN,y}, & x < BN, \\ in_{x-BN,y} - in_{x,y}, & x \geq BN. \end{cases}$$

$$IDWTY(in, BN)_{x,y} = \begin{cases} in_{x,y} + in_{x,y+BN}, & y < BN, \\ in_{x,y-BN} - in_{x,y}, & y \geq BN. \end{cases}$$

де BN – половина розміру зображення по осі x або y на поточному етапі; in – матриця вхідних даних на поточному рівні.

ження; $stages$ – кількість рівнів розкладання (достатньо 4-7 в залежності від розміру зображення); $DWT2D$ – дискретне вейвлет-перетворення; $IDWT2D$ – обернене вейвлет-перетворення (синтез); $Wfilter$ – функція фільтрування високочастотної складової.

У наступних виразах $image$ – матриця вхідного зображення; $width$, $height$ – ширина та висота зобра-

$$Wfilter(in, scale, depth)_{x,y} =$$

$$\begin{cases} \begin{cases} in_{x,y}, & \text{depth} < 1, \\ Wfilter(in, scale * 0.5, \text{depth} - 1)_{x,y}, & \text{depth} \geq 1. \end{cases} & \left(x < \frac{width * scale}{2}\right) \& \left(y < \frac{height * scale}{2}\right), \\ \begin{cases} in_{x,y}, & in_{x,y} \geq Wtr, \\ Wscale * in_{x,y}, & in_{x,y} < Wtr. \end{cases} & \text{else.} \end{cases}$$

$$wl_{x,y} = IDWT2D\left(Wfilter(DWT2D(image, width, height, stages), 1, stages), width, height, stages\right)_{x,y}$$

Другий етап – розпізнавання дефектів, результатом розпізнавання буде бітове поле, кожен елемент якого знаходиться за формулою:

$$Bfield_{x,y} = \begin{cases} 1, & Rmask_{x,y} \geq Rtr, \\ 0, & Rmask_{x,y} < Rtr. \end{cases}$$

де Rtr – поріг розпізнавання; $Bfield$ – бітове поле, матриця (внутрішнє представлення розпізнаного зображення).

$$Rmask_{x,y} = wl_{x,y} - Rblur_{x,y}$$

$$Rblur_{x,y} = \frac{1}{(2Rrad)^2} \sum_{u=0}^{2Rrad} \sum_{v=0}^{2Rrad} wl_{(x+u)-Rrad,(y+v)-Rrad}$$

$$FBfield_{x,y} = \frac{1}{(2Frad)^2} \begin{cases} \sum_{u=0}^{2Frad} \sum_{v=0}^{2Frad} Bfield_{(x+u)-Frad,(y+v)-Frad}, & Bfield_{(x+u)-Frad,(y+v)-Frad} > 0, \\ 0, & Bfield_{(x+u)-Frad,(y+v)-Frad} \leq 0. \end{cases}$$

Четвертий етап – сортування дефектів за площею у відфільтрованому бітовому полі. Алгоритм сортування в процесі роботи генерує групи дефектів і заповнює матрицю індексів, кожен елемент якої відповідає позиції дефекту в бітовому полі і

де wl – матриця попередньо відфільтрованого зображення; $Rblur$ – матриця розмитого зображення; $Rrad$ – радіус розпізнавання.

На третьому етапі виконується фільтрування бітового поля. Метою є відсіювання великих площ з мілкими дефектами. Алгоритм працює на основі аналізу сусідніх точок. Кожен елемент відфільтрованого бітового поля знаходиться за формулою:

вказує на групу якій цей дефект належить. Діаграму сортування подано на рис. 2, де $Sindex$ – матриця індексів груп дефектів; $Sgroup$ – масив груп дефектів; $SgroupsCount$ – загальна кількість розпізнаних груп.

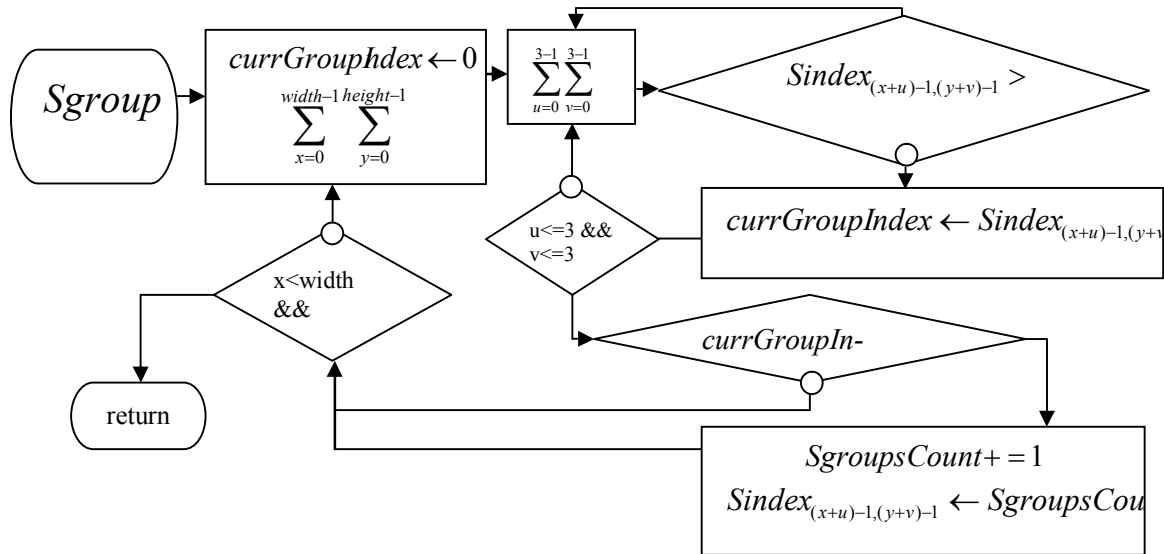


Рис. 2. Діаграма сортування дефектів за площею у відфільтрованому бітовому полі

Розроблене програмне забезпечення надає засоби для редагування розпізнаного зображення: можна витерти дефекти, які спричиняються нерівностями поверхні та дефекти самого знімку [4]. Проведені зміни можна задіяти до поточного шару або до всіх розглядуваних шарів, включаючи побудоване тривимірне зображення. Це дозволяє скоректувати помилки розпізнавання зображень та побудувати тривимірне зображення кристалу з точним відображенням дефектів, що знаходяться на кожному шарі.

На рис. 3 наведено побудоване тривимірне зображення кристалу з можливістю перегляду кожного конкретного шару. Різні групи дефектів для зручності зображуються різним кольором. Також передбачено можливість відображення конкретної групи дефектів. Це дозволяє переглянути тільки ті дефекти які цікавлять користувача на даний момент не показуючи інші групи точкових дефектів. Градація здійснюється за діаметром дефекту. За замовчуванням поділ здійснюється наступним чином: дефекти діаметром до 5 мкм, від 5 до 20 мкм та більше 20 мкм.

Побудоване тривимірне зображення можна обернути довільним чином, користуючись мишкою. Налаштування різних груп дефектів можна змінити натиснувши кнопку «Налаштування» в нижньому лівому кутку вікна на рис. 3.

В параметрах налаштування також можна змінити мінімальний розмір дефектів, що розпізнаються та інші важливі параметри розпізнавання [5].

Наступне питання, яке необхідно вирішити, – достовірність розпізнавання. Ситуація ускладнюється тим, що ми не можемо знати параметрів кристалів, що досліджуються, і повинні повністю довіряти програмам розпізнавання. Однак існує можливість перевірити достовірність розпізнавання таких програм, згенерувавши «віртуальний» кристал з наперед заданими параметрами дефектів та серію його зображень, аналогічних ІЧ фотографіям реального кристалу. Подавши ці зображення на вхід програм розпізнавання, ми можемо оцінити коректність їх роботи, порівнявши статистику на вході з результатами розпізнавання.

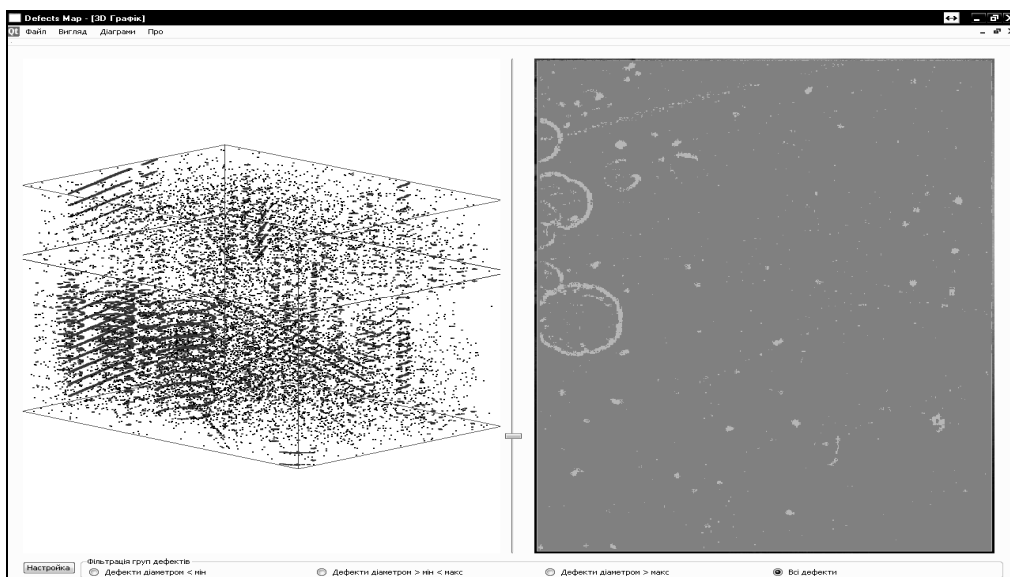


Рис. 3. Тривимірне зображення дефектів вирощування кристалу

Таку програму генерування «віртуальних» кристалів було розроблено нами [5], і вона також працює в складі описаного програмного комплексу.

Висновки

На основі усього вищенаведеного можна зробити висновок, що розроблений програмний комплекс надає широкий спектр можливостей для дослідження структури підсистеми дефектів вирощування напівпровідникових кристалів, а також для обробки результатів технологічних експериментів з реальними кристалами CdTe. Можливість отримання тривимірного зображення та статистичний аналіз розподілу дефектів значно спрощує процес візуалізації та оцінки дефектів у вирощених напівпровідникових кристалах. Наявність засобів редагування розпізнаних зображень дозволяє досягнути високої точності при побудові тривимірного зображення напівпровідникового кристалу. До складу програмного комплексу входить також програмне забезпечення для оцінки коректності роботи програм розпізнавання.

СИСТЕМА АНАЛИЗА ДЕФЕКТОВ ВЫРАЩИВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ

Л.И. Дьяченко, Е.В. Минов, С.Э. Остапов, И.Й. Наконечный, В.И. Буркут, О.В. Копач, П.М. Фочук

Разработано программное обеспечение для распознавания фотографий дефектной подсистемы, которые получают сканированием реальных полупроводниковых кристаллов в ИК лучах. Приведена структурная схема и описание установки, которая используется для получения снимков, а также описан алгоритм распознавания. Приводятся способы проверки корректности распознавания и предложено новый метод тестирования правильности работы существующих программных комплексов для моделирования структуры и параметров дефектной подсистемы полупроводниковых кристаллов.

Ключевые слова: программный комплекс, алгоритм распознавания, дефект выращивания, ИК снимки, тестирование, статистическая обработка информации, полупроводниковые кристаллы.

THE SYSTEM FOR ANALYSIS OF GROWTH DEFECTS OF SEMICONDUCTOR CRYSTALS

L.I. D'yachenko, E.V. Minov, S.E. Ostapov, I.J. Nakonechnyi, V.I. Burkut, O.V. Kopach, P.M. Fochuk

The software for the defect subsystem identification from the images, which are formed during the actual scanning of semiconductor crystals in the infrared rays, was developed. The scheme and a description of the installation, which is used to obtain images, and describes an algorithm for recognizing the IR images is shown. The algorithm of recognition and validation of a new method for testing the correctness of existing software systems for modeling the structure and parameters of the impurity subsystem of semiconductor crystals is described.

Keywords: software package, recognition algorithm, the defect subsystem, infrared images, testing, statistical data processing, semiconductor crystals.

Список літератури

1. L. D'yachenko, Yu. Tanasyuk, P. Fochuk, O. Panchuk, S. Ostapov, E. Minov. Computer Simulation of the Native Point Defects Structure in CdTe // *Proceedings of the Xth International Conference CADSM 2009*. – Polyana-Svalyava, Ukraine. – P. 22 – 25.
2. У.Прэнтт. Цифровая обработка изображений. – В 2-х книгах. Кн. 1.–М.: Мир, 1982. – Т.1.– 310 с.
3. Дуда Р. Распознавание образов и анализ сцен / Р. Дуда, П. Харп.– М., Мир, 1976. – 512 с.
4. Fochuk P. The Nature of Point Defects in CdTe / P. Fochuk, R. Grill, O. Panchuk, // *J. Electron. Mater.*– 2006. – V. 35, No. 6. – P. 1354 – 1359.
5. Д'яченко Л.І. Моделювання структури власних дефектів у телуриді кадмію / Д'яченко Л.І., Танасюк Ю.В., Обедзинська Ю., Остапов С.Е., Мінов Є.В. // *Науковий вісник Чернівецького університету. Серія Фізика. Електроніка*, 2008. – Вип. 426. – С.81 – 86.

Надійшла до редколегії 16.03.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.Г. Шайко-Шайковський, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці.