

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПЛЕНОК ФОТОПОЛИМЕРА НА КРЕМНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

С. И. РОГОВСКИЙ,

канд. физ.-мат. наук, доц. С. А. ВАБИЩЕВИЧ, Н. В. ВАБИЩЕВИЧ

(Полоцкий государственный университет)

Аннотация. Рассмотрены вопросы использования цифровой обработки изображений поверхности полимера при испытаниях на микротвердость для определения геометрических размеров отпечатков, зоны разрушения и деформации. Построен алгоритм обработки изображения и реализована программа обработки изображений. Результаты моделирования могут быть использованы при испытаниях полимерных пленок на микротвердость для определения прочностных характеристик: микротвердости и трещиностойкости полимерной пленки.

Ключевые слова: обработка изображения, программирование, поверхность, микроиндентирование, микротвердость, трещиностойкость.

Введение. Процесс производства полупроводниковых приборов предусматривает ряд технологических обработок, в результате которых, помимо прочих, изменяются механические свойства материалов, что, в свою очередь, может приводить к появлению микротрещин, царапин, сколов и иных дефектов поверхности. Для определения прочностных характеристик материалов используются различные методики, однако наиболее приближенным к реальному технологическому процессу является микроиндентирование, т. к. данный метод позволяет наиболее точно моделировать контактное взаимодействие абразивных частиц с обрабатываемым материалом [1]. Существует необходимость получения программного продукта для распознавания цифровых изображений, позволяющего проводить на основании анализа фотоснимков полный расчет прочностных характеристик материала.

Однако при организации научно-исследовательской работы далеко не всегда достаточно возможностей стандартных пакетов программных продуктов для анализа графической информации. С другой стороны, актуальность исследований в области цифровой информации постоянно возрастает, что связано с высокой информативностью и доступностью ее получения. Все это свидетельствует о необходимости создания оригинальных программных продуктов, позволяющих обрабатывать специфическую информацию, полученную в виде фотографии или видео снимков.

Цель настоящей работы состояла в разработке программного обеспечения, позволяющего на основании анализа образующихся при микроиндентировании отпечатков индентора определить контур и площадь зоны разрушения вокруг отпечатка, контур и длину диагонали отпечатка и длины образовавшихся в углах отпечатка трещин.

Методика эксперимента и обработки изображений. Пленки диазохинон-новолачного фоторезиста (ФР) марки ФП9120 толщиной 1,0 мкм наносились на поверхность пластин (диаметр 100 мм) кремния р-типа с удельным сопротивлением 10 Ом·см и ориентацией (111) методом центрифугирования [2].

Толщина пленок ФР контролировалась с помощью профилометра «Dectak». Отклонения от среднего значения по пластине для всех образцов не превышали 1%. Исследование прочностных свойств проводилось при комнатной температуре на приборе ПМТ-3 методом микроиндентирования. Нагрузка на индентор в виде четырехгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием в оправе типа НПМ и углом при вершине $\alpha = 136^\circ$ варьировала в пределах 1–100 г. Длительность нагружения составляла 2 с; выдержка под нагрузкой 5 с. Измерения микротвердости H проводились по восстановленному отпечатку согласно ГОСТ 9450-76. При каждом измерении на поверхность образца наносилось не менее 50 отпечатков и проводилась обработка результатов измерений с использованием методов математической статистики [3].

Значения коэффициента вязкости разрушения (трещиностойкости) K_{1C} рассчитывались по средней длине радиальных трещин в углах отпечатков согласно формуле [4]:

$$K_{1C} = 0,016 \left(\frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{P}{L^{\frac{3}{2}}}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга (для полимера – $0,8 \cdot 10^{10}$ Па);

H – микротвердость полимерной пленки (для полимера – $3,6 \cdot 10^8$ Па);

L – длина трещины;

P – нагрузка на индентор.

Погрешность измерений не превышала 8%.

В настоящей работе качестве среды разработки программного продукта был выбран язык программирования Python. Схема обработки и анализа данных цифровых изображений сводилась к следующим этапам: анализ входных данных изображения; обработка входных данных; использование медианного фильтра; сегментация изображения; поиск контуров изображения; отображение контуров на изображении; вычисление геометрических параметров объекта фотографирования.

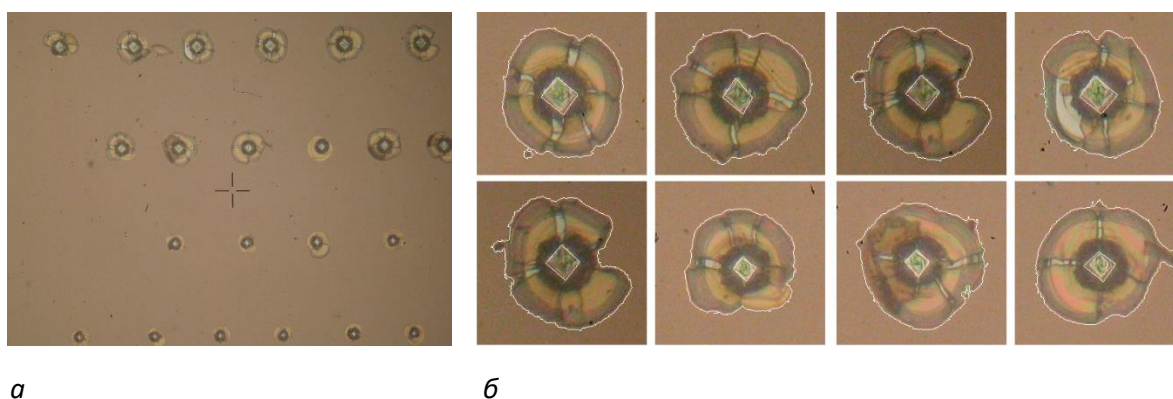
Входными данными являются фотоизображения отпечатков при индентировании полимера (рис., а). В центре наблюдается отпечаток пирамиды индентора в полимерной пленке, окруженный разрушениями полимера. Зона

разрушений представляет сферическую форму. Изображение, состоящее из пикселей, получают методом темного поля. Цветные пиксели представлены в цветовом пространстве RGB (red, green, blue – красный, зелёный, синий), где одно значение для красной компоненты, одно для зелёной и одно для синей. Каждая из трёх компонент представлена целым числом в диапазоне от 0 до 255 включительно.

Для обработки данных изображений выбрана библиотека OpenCV и язык программирования Python [5]. OpenCV (*Open Source Computer Vision Library*) – одна из самых популярных библиотек для приложений по компьютерному зрению. *OpenCV-Python* – это Python-версия интерфейса для OpenCV. Наличие кода на языке C/C++ данной версии библиотеки в бэкенде гарантирует быстроту работы библиотеки, а Python-обертка во фронтенде обеспечивает легкость настройки и развертывания. Благодаря этому OpenCV-Python является отличным решением для высоконагруженных вычислительных программ по компьютерному зрению. Также в библиотеке содержится огромное количество алгоритмов, есть интерфейсы для многих языков программирования – Java, Ruby, Matlab, Lua, C/C++.

В настоящей работе входными данными для цифровой обработки являлись цветные изображения большого количества отпечатков индентора на поверхности материала (рис., а), полученные при испытании с различными нагрузками. Программа обработки изображения распознавала отпечатки на поверхности и формировала массивы данных для каждой нагрузки (рис., б). При известном масштабе изображения рассчитывались необходимые геометрические параметры объекта (таблица). Реализация данного алгоритма поиска контура была использована для определения геометрических параметров отпечатков при индентировании полимеров.

Определение контура и диагоналей отпечатка индентора позволило с помощью разработанного программного обеспечения в автоматическом режиме рассчитать микротвердость материала.



а – исходные изображения; б – результат выделения области разрушения

Рисунок. – Входное изображение до цифровой обработки и результаты отображения контуров

Таблица. – Геометрические параметры объектов, представленных на рисунке б

Номер отпечатка	Площадь области разрушения, мкм ²	Площадь отпечатка индентора, мкм ²	Длина трещины слева, мкм	Длина трещины сверху, мкм	Длина трещины справа, мкм	Длина трещины снизу, мкм	Нагрузка, г	Расчитанное значение K_{1c} , Па М ^{1/2}
1	25057,3	537,20	91,02	98,79	81,03	67,71	50,00	0,323
2	31647,28	661,56	92,13	95,46	113,22	108,78	50,00	0,243
3	32353,46	1028,97	104,34	96,57	94,35	83,25	50,00	0,273
4	32492,34	526,10	112,84	97,68	91,02	91,02	50,00	0,259
5	25040,56	1445,76	85,47	103,23	115,44	85,47	100,00	0,523
6	31565,44	1498,92	101,01	87,69	105,45	103,23	100,00	0,508
7	33520,92	1475,18	88,80	111,00	99,90	102,12	100,00	0,500
8	32941,22	1318,68	93,24	102,12	77,70	109,89	100,00	0,537

Определение контура вокруг зоны разрушения, площади разрушения и длины образовавшихся в углах отпечатка трещин позволили определить коэффициент интенсивности напряжения (трещиностойкость) с материала (таблица) [4–7]. Значения трещиностойкости, найденные с использованием программной обработки отличались от значений K_{1c} при ручной обработке данных эксперимента не более чем на 8%, что соответствовало относительной погрешности эксперимента.

Заключение. В представленной работе был разработан алгоритм обработки изображений и выделения контуров. На основании анализа входных изображений были спроектированы основные этапы обработки изображений. В результате использования модуля компьютерного зрения Python-OpenCV, был разработан алгоритм обработки изображений и выделения контуров, изучены основные функции обработки изображений, разработано необходимое программное обеспечение. Реализация данного алгоритма поиска контура использована для определения геометрических параметров отпечатков при индентировании полимеров: размеры отпечатков и зоны разрушения, длины трещин. Это дает возможность рассчитать некоторые прочностные характеристики материала: микротвердость, трещиностойкость.

Таким образом, использование компьютерного зрения в материаловедении дает возможность ускорить и повысить точность обработки экспериментальных результатов, систематизировать большие массивы экспериментальных данных, корректнее определять геометрические параметры объектов, повысить объективность оценки прочностных характеристик материалов. Также использование компьютерного зрения позволяет автоматизировать процессы измерений геометрических размеров, увеличить скорость проведения измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литвинов, Ю. М. Методология определения механических свойств полупроводниковых материалов с помощью метода непрерывного вдавливания индентора/ Ю. М. Литвинов, М. Ю. Литвинов // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2004. – № 4. – С. 11–16.
2. Вабищевич, С. А. Прочностные свойства структур фоторезист ФП9120-кремний / С. А. Вабищевич [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. Физика. – 2014. – № 12. – С. 69–73.
3. Бринкевич, Д. И. Микротвердость пленок полиимида и полиэтилентерефталата, облученных гамма-квантами ^{60}Co / Д. И. Бринкевич [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. Физика – 2017. – № 12. – С. 30–34.
4. Колесников, Ю. В. Механика контактного разрушения / Ю. В. Колесников, Е. М. Морозов. – М. : Наука, 1989. – 220 с.
5. Bradski, G. Learning OpenCV. Computer vision with the OpenCV library / G.Bradski, A.Kaehler // O'Reilly Media, Inc. – 2008. – 580 p.
6. Вабищевич, С. А. Физико-механические свойства облученных пленок диазохинон-новолачного фоторезиста на кремнии/ С. А.Вабищевич [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. Физика – 2020. – № 12. – С. 60–64.
7. Вабищевич, С. А. Прочностные свойства структур фоторезист-кремний, γ -облученных и имплантированных ионами V^+ и P^+ / С.А.Вабищевич [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. Физика – 2016. – № 12. – С. 30–36.