

## ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОГО И КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Дедкова А.А., Махиборода М.А.

*dedkova@skp-miet.ru*

*Национальный исследовательский университет  
«Московский институт электронной техники»*

Поступила 15.09.2020

Продемонстрированы возможности оптической микроскопии как для предварительного, так и для комплексного анализа структур, используемых преимущественно в микроэлектронике и микромеханике. Даны конкретные примеры применения оптической микроскопии для качественного и количественного анализа, отработки технологических процессов, контроля дефектов, анализа рельефа поверхности, определения параметров структур. Измерения поверхности выполнены в отражённом и проходящем свете, с использованием режимов светлого и темного поля.

*Ключевые слова: микроскоп, оптическая микроскопия, измерения, отражённый свет, светлое поле, темное поле, проходящий свет, рельеф поверхности, перепад высот, микроэлектроника, микромеханика, поверхность, шероховатость, технология, мембрана, дефект*

УДК 53.086

DOI: 10.31145/2224-8412-2020-20--2-41-64

### **Введение**

Методы оптической микроскопии существуют уже более четырех столетий. Благодаря постоянному совершенствованию оптических систем и способов обработки получаемых изображений оптическая микроскопия по-прежнему остаётся в числе эффективных методов анализа поверхности.

В условиях микроэлектронного производства важно сокращать время и стоимость межоперационного контроля. С другой стороны, при анализе

сложных отказов или отклонений технологических параметров от требуемых значений необходим комплексный подход, при котором используется несколько различных методов исследований и способов обработки экспериментальных данных, дополняющих друг друга.

На первый взгляд использование методов оптической микроскопии для контроля структур является тривиальной задачей. В настоящее время в распоряжении исследователей имеется множество методов анализа поверхности, часто непростых с точки зрения интерпретации результатов измерений. Нередко эти методы реализованы на сложном и дорогостоящем оборудовании, требующем пристального внимания опытного оператора (инженера). По этим причинам возможностям оптической микроскопии не всегда уделяется должное внимание.

Наш опыт показывает, что оптическая микроскопия является эффективным подспорьем при работе с любым высокотехнологическим оборудованием, а также действенным средством повышения производительности и снижения стоимости межоперационного контроля. Авторы убеждены, что во многих случаях целесообразно использовать оптическую микроскопию для предварительного контроля структур, даже если не ставится такая задача. Быстрый качественный анализ образцов посредством оптического микроскопа позволяет получить информацию об их особенностях, которую можно использовать впоследствии при анализе образцов каким-либо другим методом.

Целью настоящей статьи является демонстрация возможностей оптической микроскопии для анализа структур, преимущественно в области микроэлектроники и микромеханики.

## **Методы**

В подавляющем большинстве случаев объекты микроскопических исследований нуждаются в освещении извне. Способ освещения во многом определяет то, какую информацию об объекте исследования можно получить. Существует множество способов и систем освещения [1]. Ниже описаны основные способы освещения [2], применяемые в микроэлектронике.

Для изучения непрозрачных образцов используется отражённый свет. Освещение образца производится через объектив. Изображение создается за счет того, что различные участки образца по-разному рассеивают падающий на них свет [3]. Метод имеет два режима – режим светлого поля и режим тёмного поля. Режим светлого поля является стандартным режимом оптического микроскопа.

Режим тёмного поля – это режим, в котором освещение образца осуществляется пучком света, распространяющимся под небольшим углом

к плоскости образца [1]. Как правило, свет от осветителя в этом режиме поступает через выполненное в виде кольца отражающее зеркало, расположенное на внешней части объектива. Изображение создается за счет света, рассеянного объектами, резко выступающими из плоской поверхности образца. Это могут быть частицы, границы структур и т.п. В основном темнопольная микроскопия используется для выявления и анализа дефектов структур. Метод также может быть реализован и в проходящем свете.

В качестве примера использования темнопольной микроскопии на рис. 1 приведены изображения поверхности пленки нитрида кремния, частично подвергнутой облучению электронами [4]. Воздействие на поверхность образца производилось в прямоугольной области (показана красной пунктирной линией), расположенной внутри квадратной рамки, играющей роль метки. На рис. 1, а представлено оптическое изображение поверхности образца, полученное в отраженном свете. На изображении достаточно чётко видна метка (чёрные линии), однако практически не различима область воздействия. На рис. 1, б представлено темнопольное изображение, на котором помимо четкой метки (белые линии) хорошо видны точечные дефекты поверхности (белые точки), а также результат воздействия электронного пучка (разнонаправленные «складки» ).

Другой способ освещения – это освещение проходящим светом [5]. Свет от источника проходит сквозь исследуемый прозрачный или частично прозрачный образец. Данный метод может применяться для анализа непрозрачных включений в прозрачных структурах или для определения контуров элементов структуры.

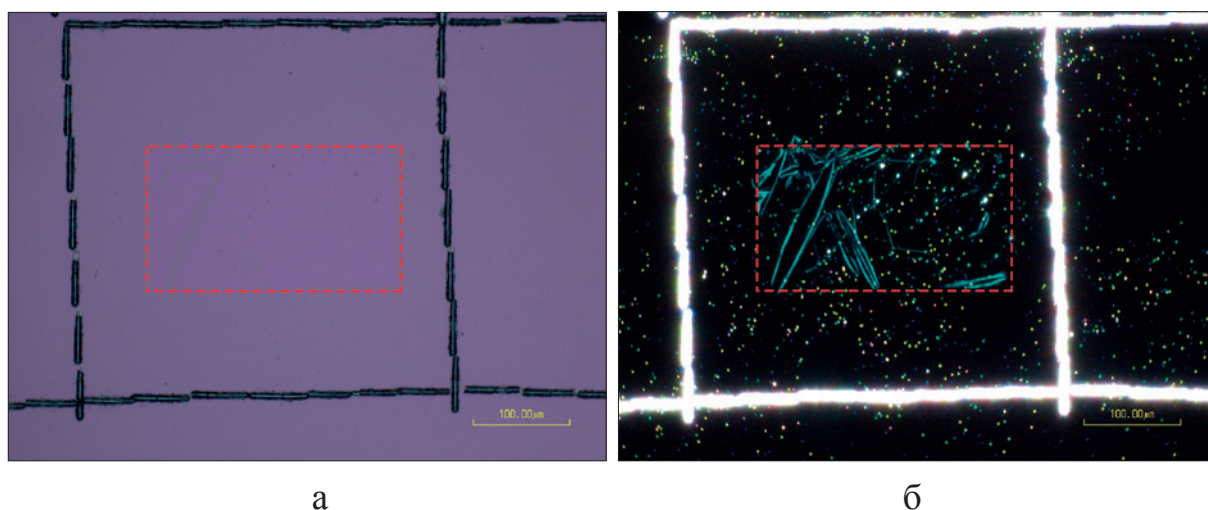


Рис. 1. Изображения пленки нитрида кремния на кремнии, полученные на оптическом микроскопе Nikon Eclipse L200N в отраженном свете в режиме (а) светлого поля; (б) темного поля. Прямоугольная область, подвергнутая облучению электронами, показана пунктирной линией.

## Практическое использование

В основном оптическая микроскопия в микроэлектронном производстве используется для: качественного визуального анализа внешнего вида полученной структуры; оперативного определения линейных размеров элементов структуры; контроля дефектности; получения изображений объектов для последующего анализа. Качественный визуальный анализ внешнего вида проводится с целью сравнения полученных на оптическом микроскопе изображений с ожидаемым видом структуры. При этом осуществляется качественная оценка соответствия и определение изъянов структуры.

Указанные выше области использования оптической микроскопии являются общепринятыми, и подробно освещаться здесь не будут. Более полезным представляется рассмотрение случаев, в которых применение оптической микроскопии для анализа образцов не являлось непосредственной задачей, однако позволило получить важную информацию.

Оптическая микроскопия позволяет быстро выполнить предварительный анализ структур. Исследование занимает менее 5 минут с учетом включения прибора, установки образца, фокусировки, выбора области и записи результатов. Также стоит отметить, что оптическая микроскопия обычно не требует предварительной подготовки образцов.

Таким образом, применение оптической микроскопии увеличивает общее время анализа образца незначительно, но может стать источником полезной дополнительной информации об исследуемом объекте. Поэтому по мнению авторов во многих случаях целесообразно использовать оптическую микроскопию для предварительного анализа структур. Полученная информация может оказаться важной и непосредственно использоваться в ходе последующего анализа другими методами. Данное замечание особенно актуально по отношению к образцам, о процессах изготовления которых отсутствует подробная надежная информация.

Посредством оптической микроскопии можно получать различную дополнительную информацию об исследуемом образце. В частности, оптическая микроскопия позволяет:

1. Обнаруживать единичные загрязнения и дефекты, определять их форму и размеры.
2. Выявлять прозрачные плёнки окислов и прозрачные загрязнения.
3. Анализировать особенности рельефа поверхности и оценивать перепады высот.
4. Выявлять особенности исследуемой структуры, на которые стоит обратить внимание при проведении анализа другими методами.

Приведенный список может быть дополнен в зависимости от предполагаемой области использования оптической микроскопии. Широко распространено применение данного подхода для непосредственного сравнения

микроструктуры образцов. В качестве сравниваемых объектов могут выступать микроструктуры, отличающиеся по составу, полученные при различных технологических режимах формирования, обработки или до и после некоторого воздействия [6-19]. При этом результаты оптической микроскопии сравниваются и комбинируются с данными других методов анализа [19-21].

Данные оптической микроскопии используются для качественной оценки, а именно, для выделения и анализа структур на поверхности, определения различных и сходных (близких по виду) областей, анализа формы объектов [8, 17, 22, 23]. Посредством оптической микроскопии производится анализ дефектов [15] и дефектообразования [16, 24], пористых структур [6, 7, 25].

Усовершенствование методов измерений с использованием цифровых систем записи и обработки изображений приводит к повышению точности и расширению функциональных возможностей оптической микроскопии. Это проявляется как в совершенствовании измерительной техники, так и в развитии математических алгоритмов обработки сигналов [26]. В настоящее время доступно компьютеризированное управление фокусом, оптическими компонентами, фильтрами и др. [1]. Такой подход расширяет спектр возможных экспериментальных манипуляций и повышает точность, в сравнении с использованием механических микроскопов. В связи с необходимостью автоматизированной высокоточной обработки серий измерений, оптимизируются алгоритмы управления измерительной оптической системой [27]. Для изучения объектов большого размера с максимальным разрешением создаются системы с автоматизированным предметным столиком, осуществляющим сдвиг поля зрения, и последующим объединением («сшиванием») кадров изображений [28, 29, 30].

Разработан ряд методик обработки данных оптической микроскопии [25, 28, 31-34], позволяющих осуществлять количественную оценку результатов измерений, в том числе проводить обработку больших объемов данных (большой серии изображений). Оптическая микроскопия применяется для анализа размера кристаллов [35], среднего размера зерна [31], комплекса геометрических параметров зерен шлифовальных порошков (ширины, длины, периметра, площади, диаметра) [32], объемной доли пор и армирующего наполнителя [25], микроструктурной неоднородности поверхности мембран [33] и др. Благодаря современным методам обработки данных (в т.ч. изображений), разработаны алгоритмы автоматического распознавания трещин [36], оценки шероховатости [37]. Отдельное внимание стоит уделить методике анализа топологических слоев интегральных микросхем (ИМС) на основе последовательного фотографирования верхнего слоя и его удаления [28] и методике построения объемной 3D модели поверхности на основе объединения последовательных кадров с различным положением фокуса

[34]. Данные методики требуют применения аналитических компьютеризированных комплексов и специализированного программного обеспечения.

Отдельно стоит отметить, что в связи с развитием нейронных сетей и в целом искусственного интеллекта [38], в ближайшее время стоит ожидать активного внедрения этих технологий как в привычную обработку изображений оптической микроскопии, так и в процесс получения экспериментальных данных.

### 1. Обнаружение и анализ единичных загрязнений и дефектов

При подробном анализе присутствующих на исследуемых образцах дефектов или загрязнений предметом изучения может являться как сам дефект, так и особенности окружающей его области образца. Данная информация является эффективным подспорьем при определении источника возникновения этих дефектов или загрязнений, а также при анализе самого процесса.

Приведен пример исследования образцов, полученных при отработке нанесения GaN [39] на сапфировую подложку путём процесса, совмещающего атомно-слоевую эпитаксию и МОС-гидридную эпитаксию [40]. Анализировался вид получаемой поверхности, в том числе характер загрязнений (рис. 2). Сделан вывод, что загрязнения являются следствием попадания на поверхность подложки частиц материала, образовавшихся на различных поверхностях реактора. По результатам исследований проведена оптимизация технологического процесса: скорректирована направленность газовых потоков. В итоге удалось добиться меньшего зарастания верхнего экрана, а также экрана, находящегося между подложкодержателем и источником парогазовой смеси. Это привело к уменьшению загрязнений на структурах GaN на сапфире.

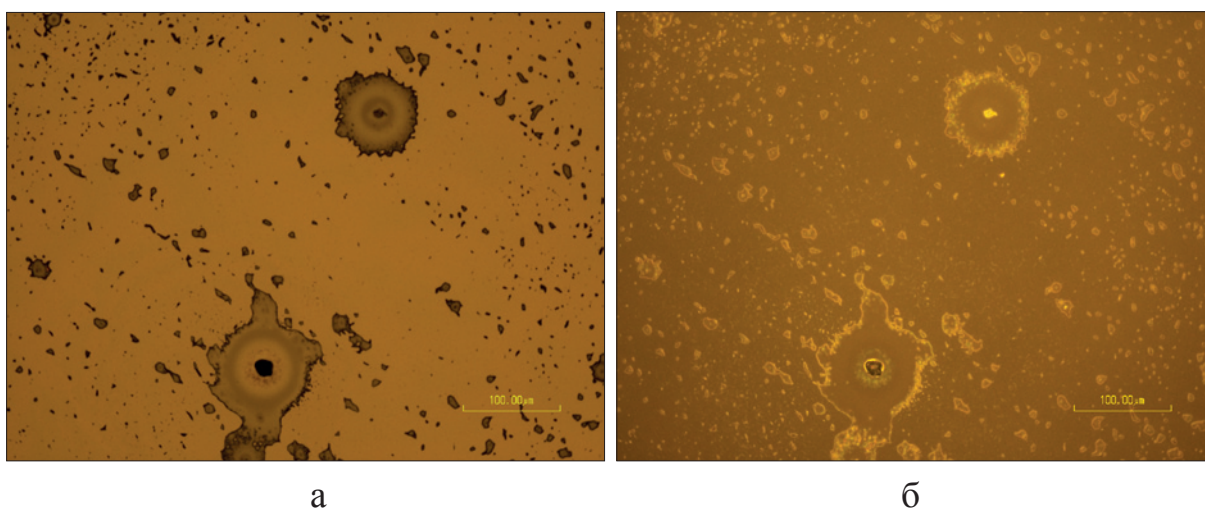


Рис. 2. Изображения загрязнений на структуре GaN на сапфировой подложке, полученные на оптическом микроскопе Nikon Eclipse L200N в отраженном свете в режиме (а) светлого поля; (б) темного поля

## 2. Обнаружение прозрачных плёнок окислов или прозрачных загрязнений

Рассмотрим процесс освещения тонких прозрачных пленок, расположенных на поверхности образцов. В связи с отражением света передней и задней поверхностями пленки наблюдается явление интерференции [41]. Это выражается в наличии радужных цветов, которые также называют цветами побежалости. Анализ их присутствия и расположения позволяет сделать вывод о наличии на образце тонких пленок и характеризовать их. Эти пленки могут образоваться путем окисления приповерхностной области образца либо могут быть привнесены извне, то есть являться прозрачными загрязнениями. Такие тонкие пленки могут быть следствием некачественной транспортировки или проведенного технологического процесса.

На рис. 3 показаны изображения обратной (неполированной) стороны кремниевых пластин для случая чистой пластины (рис. 3, а) и пластины с загрязнениями (рис. 3, б). Зерна кремния на чистой пластине имеют одинаковый равномерный цвет, в то время как часть зерен кремния на загрязненной пластине обладают радужной окраской.

На рис. 4 показаны изображения лицевой (полированной) стороны окисленной кремниевой пластины после некачественного технологического процесса. На поверхности присутствуют локализованные тонкие пленки подобные россыпи пятен. В стандартном режиме (рис. 4, а) видны радужные цвета тонких пленок. Режим темного поля (рис. 4, б) позволяет визуализировать границы объектов (контуры пятен) и выделить отдельные частицы (яркие включения белого цвета на изображении).

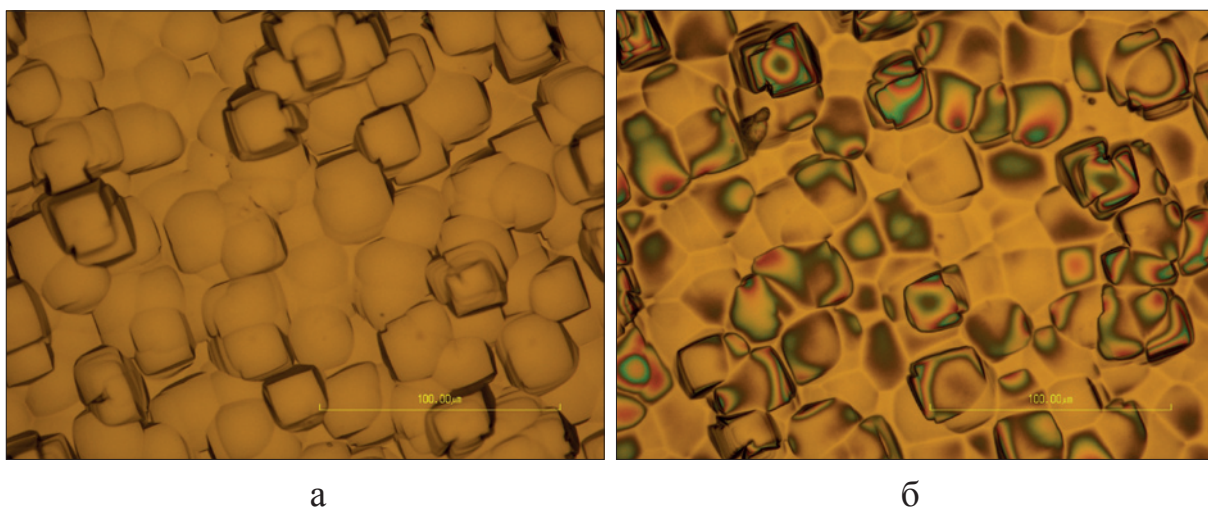


Рис. 3. Изображения обратной стороны кремниевой пластины, полученные на оптическом микроскопе Nikon Eclipse L200N в отраженном свете в режиме светлого поля для случая чистого кремния (а), для случая наличия прозрачных загрязнений (б)

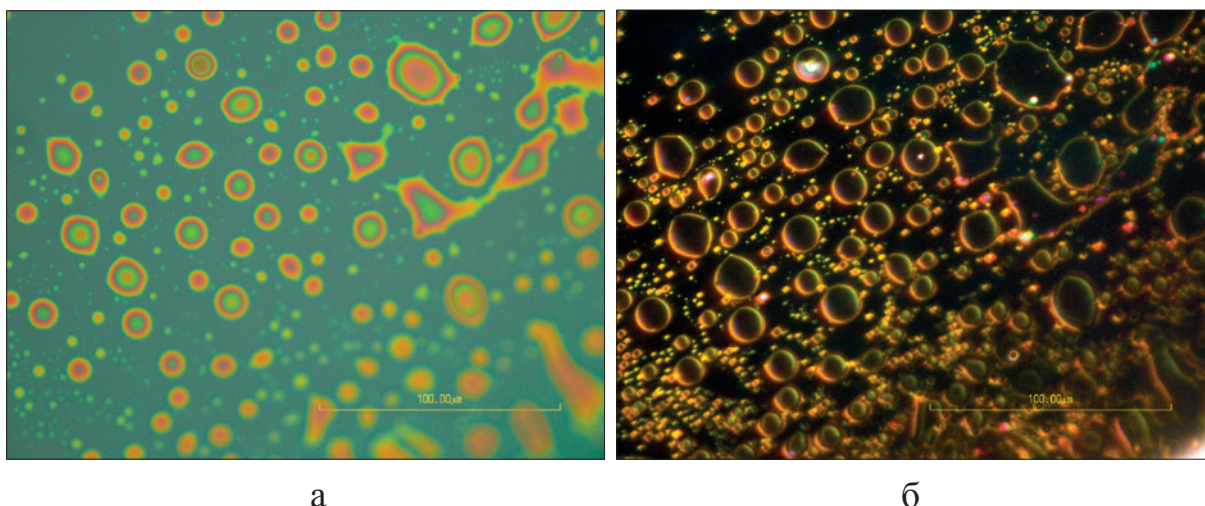


Рис. 4. Изображения лицевой стороны бракованной окисленной кремниевой пластины, полученные на оптическом микроскопе Nikon Eclipse L200N в отраженном свете в режиме (а) светлого поля; (б) темного поля

### 3. Анализ особенности рельефа поверхности и оценка перепады высот

Наиболее часто для определения параметров рельефа поверхности используются такие методы, как контактная профилометрия и атомно-силовая микроскопия.

При использовании контактной профилометрии, в общем случае, анализируется профиль поверхности – линия, фиксирующаяся при перемещении зонда вдоль исследуемой поверхности [42]. Опираясь подобными данными можно определить шероховатость поверхности и перепад высот. Однако поскольку результат расчета зависит от выбора области анализа, весьма полезно привлечение оптической микроскопии для предварительной оценки поверхности.

Метод атомно-силовой микроскопии позволяет получать 3D-карту топографии поверхности и иные полезные для анализа данные, но имеет ряд особенностей, определяющих сферу его применения. В подавляющем большинстве случаев могут анализироваться только образцы сравнительно небольшого размера (единицы сантиметров), при этом размер одной области сканирования составляет сотни микрон. Кроме того, данный тип исследований отличается большой длительностью настройки и непосредственно проведения измерения образца, а также необходимостью постоянного обновления расходных материалов (кантилеверов). Вышеуказанные ограничения и высокая чувствительность метода к небольшим изменениям характеристик поверхности привели к тому, что метод используется в основном для анализа небольших по размеру образцов с достаточно гладкой (ровной) поверхностью и небольшим перепадом высот.



Таким образом, при необходимости анализа поверхности образцов с высокой шероховатостью (неровностями большого размера) стоит привлечь оптическую микроскопию. Предварительное изучение вида поверхности позволяет оценить степень шероховатости и провести первичный анализ характера обработки поверхности.

В качестве примера приведен вид поверхности образцов металлических изделий после механической обработки. Несмотря на то, что внешний вид образцов был схож, первичный анализ изображений поверхности образцов (рис. 5, а, б) показал различие в рельефе поверхности, что является следствием различий в характере обработки поверхности. Также было обнаружено, что на образцах присутствуют неровности различного уровня (рис. 5, в), которые впоследствии были установлены и другими методами (рис. 5, г).

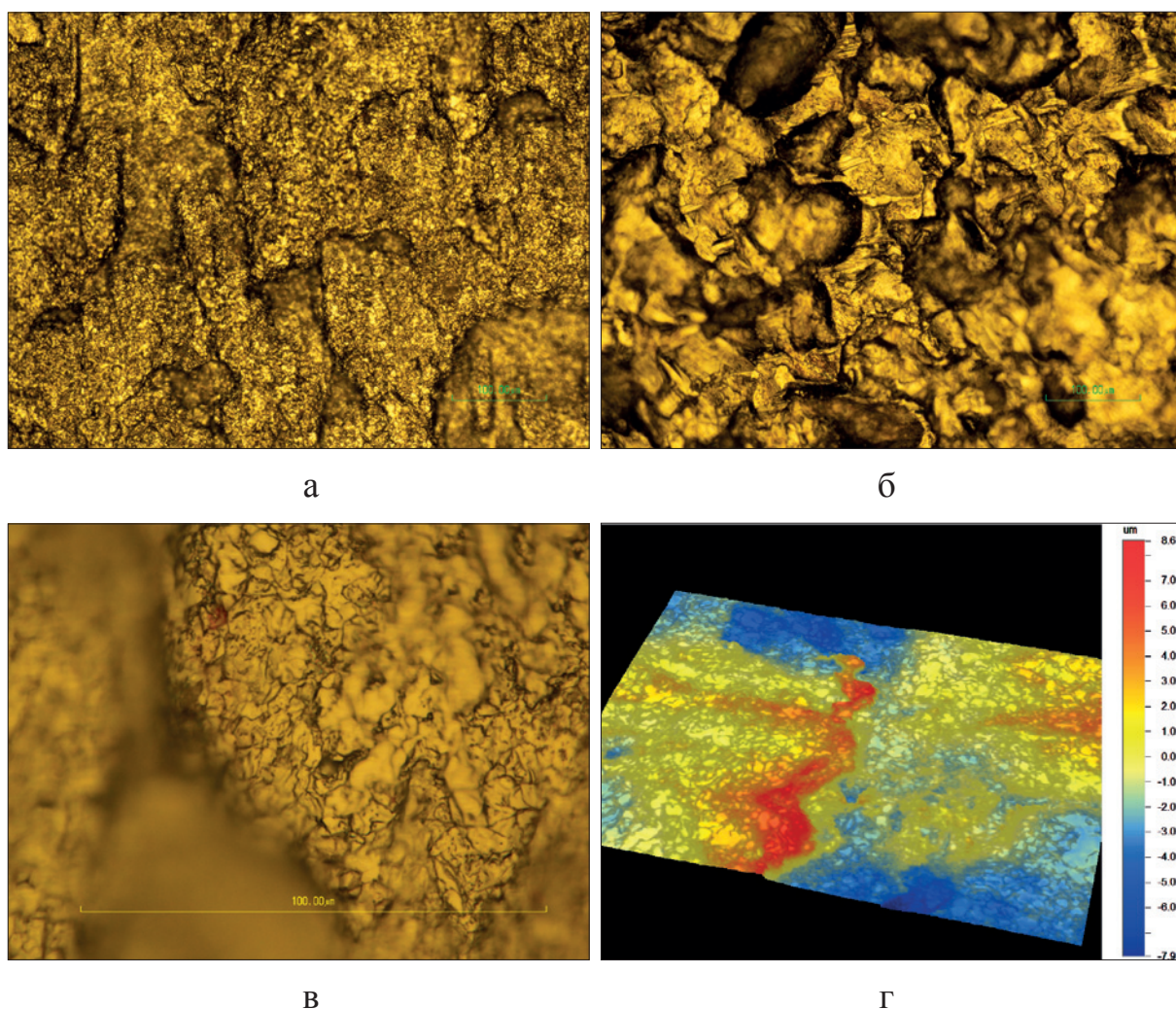


Рис. 5. Изображения поверхности образцов металлических изделий, полученные на оптическом микроскопе Nikon Eclipse L200N в отраженном свете в режиме светлого поля (а, б, в) и полученные на оптическом профилеометре Veeco Wyko NT 9300 (г).

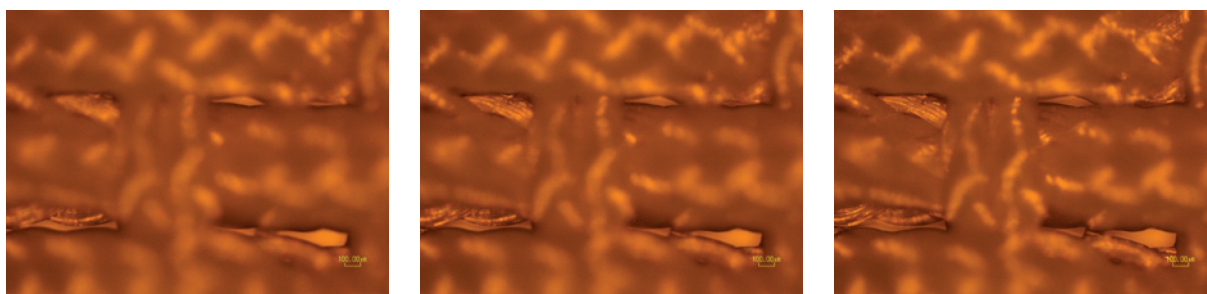
Посредством оптической микроскопии можно также оценить и величину перепада высот неровностей. Для оценки перепада высот используется различное положение фокуса. Данная информация может быть полезна при:

- оценке уровня неровностей на поверхности (оценке шероховатости);
- оценке перепада высот топологических элементов или иных структур;
- определении размера (в т.ч. высоты) загрязнений;
- исследовании образцов, анализ которых другими доступными методами затруднен.

В качестве примера последнего случая можно привести определение перепада высот при анализе текстильных материалов (рис. 6, 7) или иных изделий сложной формы с высокой шероховатостью [34]. Данные исследования выполняются обычно с использованием специализированного программного обеспечения, например Helicon Focus. Анализ поверхности контактными методами затруднен в связи со сложностями размещения и закрепления исследуемого образца на предметном столике прибора. Кроме того, размер неровностей может превышать измерительные возможности используемого оборудования (например, ход иглы).

Стоит отметить, что для анализа поверхности могут быть использованы иные оптические методы, предназначенные для определения перепада высот на структурах. Например, оптическая профилометрия или конфокальная микроскопия. Однако высокая шероховатость поверхности образцов приводит к малой интенсивности отраженного сигнала. Такого отклика часто бывает недостаточно для построения подробной карты топографии поверхности.

С помощью оптической микроскопии можно получить серию изображений с различным положением фокуса (рис. 6, а-з). Анализируя эти изображения совместно, производится оценка перепада высот на структурах. Для получения качественного полностью сфокусированного изображения эту серию частично сфокусированных снимков можно объединить (рис. 6, и). Стоит отметить, что при объединении этих изображений с последующим использованием математической обработки также возможно построение 3D-карты топографии поверхности (рис. 7). Таким образом, доступно определение перепада высот на структурах посредством оптической микроскопии.



а

б

в

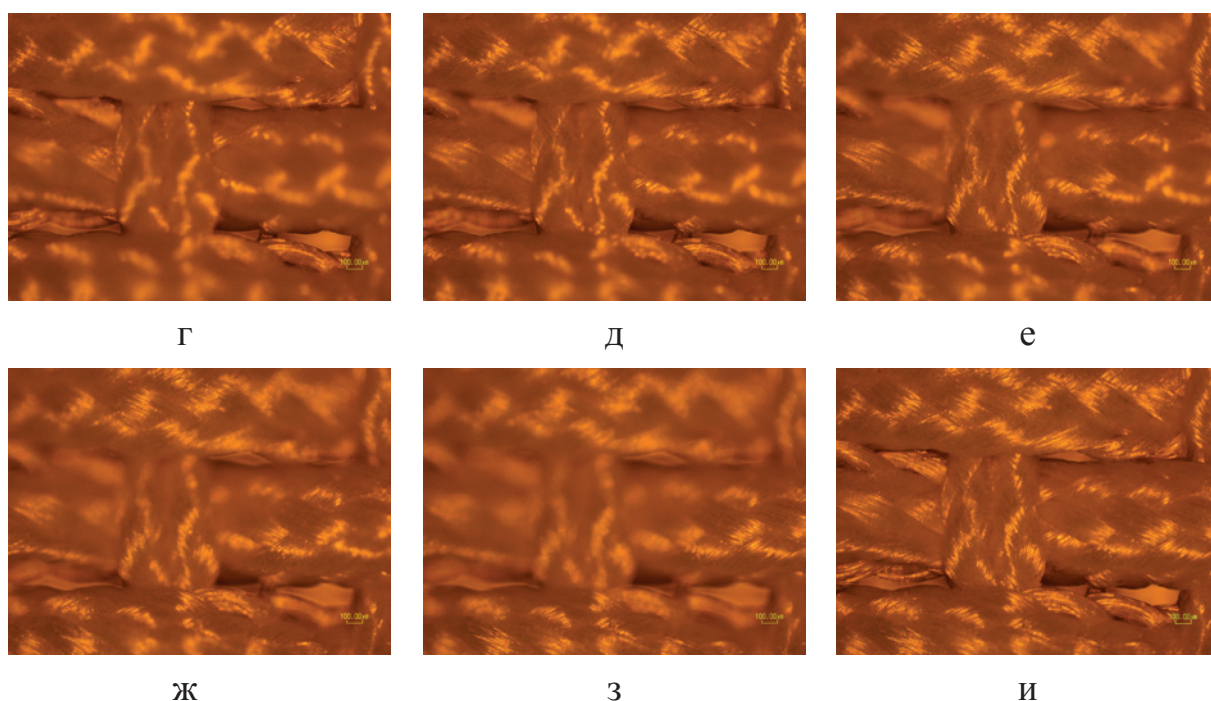


Рис. 6. Изображения волокон текстильного материала, полученные на оптическом микроскопе Nikon Eclipse L200N в отраженном свете в режиме светлого поля (а-з) с шагом фокусировки 100 мкм, и объединенное изображение (и)

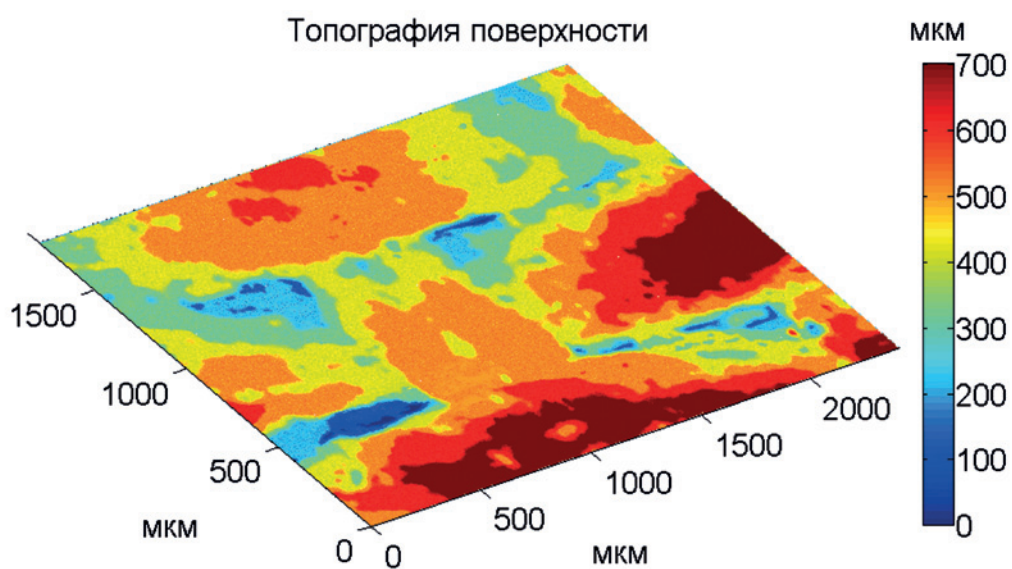


Рис. 7. Топографическая карта волокон текстильного материала (Рис. 6, и)

#### 4. Выявление особенностей исследуемой структуры, на которые стоит обратить внимание при проведении анализа другими методами

Вышеприведенные примеры показывают, что оптическая микроскопия может быть полезна и как отдельный самостоятельный метод исследования

структур, и как вспомогательный метод, использующийся в комбинации с другими методами исследований. Весьма полезно сравнение данных оптической микроскопии с результатами, полученными иными методами. При этом в ряде случаев без данных оптической микроскопии практически невозможно проведение корректного анализа образцов выбранными методами исследования. Ниже приведено несколько примеров.

Поскольку каждый исследуемый образец по-своему специфичен, невозможно выделить отдельные моменты, на которые стоит обращать внимание в первую очередь. Напротив, при исследованиях следует учитывать специфику образца и поставленных задач анализа. Важно реализовывать все возможные способы получения дополнительной информации об образце.

### **5.1 Предварительный анализ поверхности объектов исследования перед определением перепада высот**

В описываемом примере ставилась задача определения глубины областей лазерной маркировки. Предполагалось, что это позволит определить, в чем отличие получаемой маркировки при её различных режимах, определить суммарную глубину лазерного воздействия относительно уровня подложки. Были подготовлены различные образцы. Для проведения измерений был выбран контактный профилометр Alpha-Step 200.

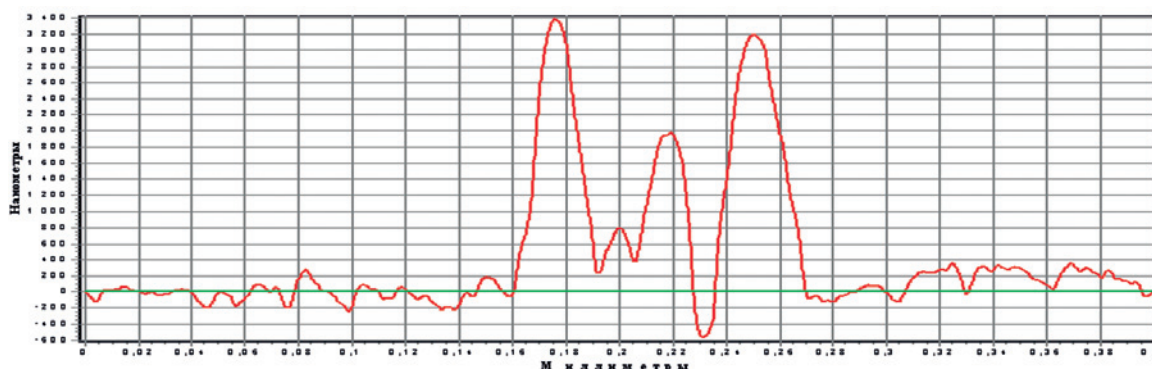
Типичный вид профиля поверхности в области проведенной лазерной маркировки изображен на рис. 8, а. Очевидно, что задача оценки глубины кратера по такому профилю не является тривиальной, как и проведение эффективного сравнения подобных профилей поверхности друг с другом.

Данные структуры были проанализированы на оптическом микроскопе Nikon Eclipse L200N, пример изображений поверхности показан на рис. 8, б-г. Такой анализ позволил определить параметры одной отдельной области воздействия лазерного излучения (рис. 8, б). Также это позволило провести сравнение образцов, полученных при различных режимах лазерного воздействия. Например, были определены случаи отдельно визуализирующихся зон воздействия (рис. 8, в) и случаи со «спекшимися» областями (рис. 8, г), а также промежуточные случаи. При этом на различных образцах было получено различное расстояние между областями воздействия.

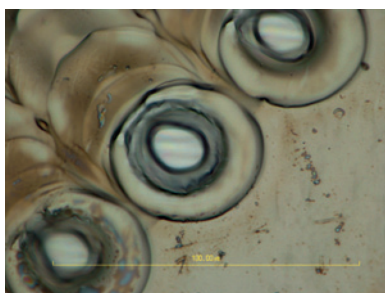
Вышеуказанную информацию трудно получить исходя из данных контактной профилометрии (рис. 8, а). Не обладая информацией о том, как выглядит анализируемая структура, сложно определить к каким её особенностям относится какая часть профиля поверхности. Благодаря оптической микроскопии, стало очевидным, что область с существенным перепадом высот является областью проведенной маркировки. Произошло не удаление, а перераспределение вещества в непосредственной близости от области воздействия лазерного излучения [42]. После лазерного воздействия данная область представлена преимущественно возвышенностями. В итоге опреде-

лить по данным контактной профилометрии глубину лазерного воздействия относительно уровня подложки затруднительно.

Для оценки глубины областей маркировок образцы были проанализированы на оптическом профилометре Veeco Wyko NT 9300. Данный метод позволяет получать 3D карту распределения перепада высот. Это позволило определить положение различных фрагментов структуры относительно друг друга, в том числе перепад высот между уровнем подложки и минимальным уровнем области маркировки (рис. 8, д).



а



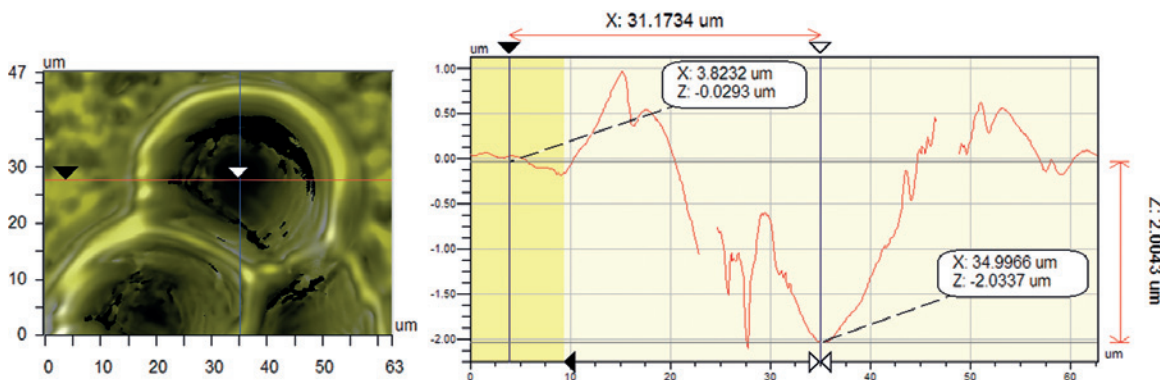
б



в



г



д

Рис. 8. Профили поверхности в областях с лазерной маркировкой (а, д) и изображения поверхности различных образцов (б-г). Профиль поверхности (а) получен на контактном профилометре Alpha Step 200. Изображения поверхности (б-г) получены на оптическом микроскопе Nikon Eclipse L200N в отраженном свете в режиме светлого поля. Изображение поверхности и профиль поверхности (д) получены на оптическом профилометре Veeco Wyko NT 9300

## 5.2 Предварительный анализ поверхности объектов исследования перед измерениями посредством эллипсометрии

Метод спектральной эллипсометрии является очень чувствительным к наличию на исследуемой поверхности и в структуре материала загрязнений, микровключений и чужеродных пленок [43]. Для анализа исследуемого объекта по данным эллипсометрии используется моделирование с использованием библиотеки материалов. Это требует наличия подробной информации об объекте исследования. В случае отсутствия ключевых данных, их нельзя будет учесть при составлении модели, что приведет к некорректности результатов расчета.

Отдельно следует отметить, что для пополнения библиотеки материалов, а также при анализе материалов, сведения о которых в библиотеке отсутствуют, исследователи могут использовать снятые с анализируемых образцов спектры. Однако в случае наличия на образце загрязнений или чужеродных пленок (подобно рис. 2, 4), данный спектр не будет в полной мере соответствовать спектру предполагаемого материала, и не должен использоваться в вышеуказанных целях. Это еще одна причина, показывающая важность предварительного анализа поверхности образцов.

Также применительно к эллипсометрии необходимо учитывать, что эта методика предназначена для анализа гладких плоскопараллельных поверхностей. По этой причине необходимы сведения о наличии на поверхности неровностей. Данная информация может быть получена посредством оптической микроскопии. На основе этих данных могут быть выбраны относительно ровные области для анализа методом спектральной эллипсометрии. Также шероховатость поверхности может и должна быть учтена при составлении модели для расчета по данным спектральной эллипсометрии.

В данном примере предметом исследования являлся анализ толщины естественного окисла  $\text{SiO}_2$  на кремниевой (Si) подложке методом спектральной эллипсометрии. На анализ на эллипсометр Horiba Auto SE были переданы образцы, содержащие области с естественным  $\text{SiO}_2$  на кремнии и области с дополнительно нанесенным на структуру металлом (рис. 9). По результатам предварительного анализа по данным спектральной эллипсометрии, толщина слоя  $\text{SiO}_2$  составила в среднем порядка 5,0-6,0 нм. Данная величина существенно превышает типичные для толщины естественного окисла на кремнии значения в 1,0-2,0 нм. Также в части областей анализа сам характер спектральных данных существенно отличался от типичных данных для  $\text{SiO}_2$  на кремнии. При этом модель « $\text{SiO}_2$  на Si» была неэффективной, в отличие от модели «металл на  $\text{SiO}_2$  на Si».

При сравнении результатов моделирования с видом поверхности образцов, полученном на оптическом микроскопе Nikon Eclipse L200N, вышеуказанные эффекты получили объяснение. Присутствовала достаточно широкая промежуточная область между металлом и  $\text{SiO}_2$  на кремнии (рис. 9), возможно, являющаяся следствием «подпыления» под маску металлического слоя. Снятые спектральные данные с промежуточной области, естественно, не соответствовали стандартным спектрам  $\text{SiO}_2$  на кремнии. Однако, поскольку качество отображения поверхности встроенной камерой спектрального эллипсометра невысокое, данная промежуточная область при измерениях на эллипсометре не была зафиксирована, и промерялась как область « $\text{SiO}_2$  на кремнии».

Анализируя поверхность предполагаемых областей со слоем естественного оксида кремния, можно было видеть, что присутствуют существенные неоднородности (рис. 9), которые внесли дополнительный вклад в значение толщины  $\text{SiO}_2$  при расчете.

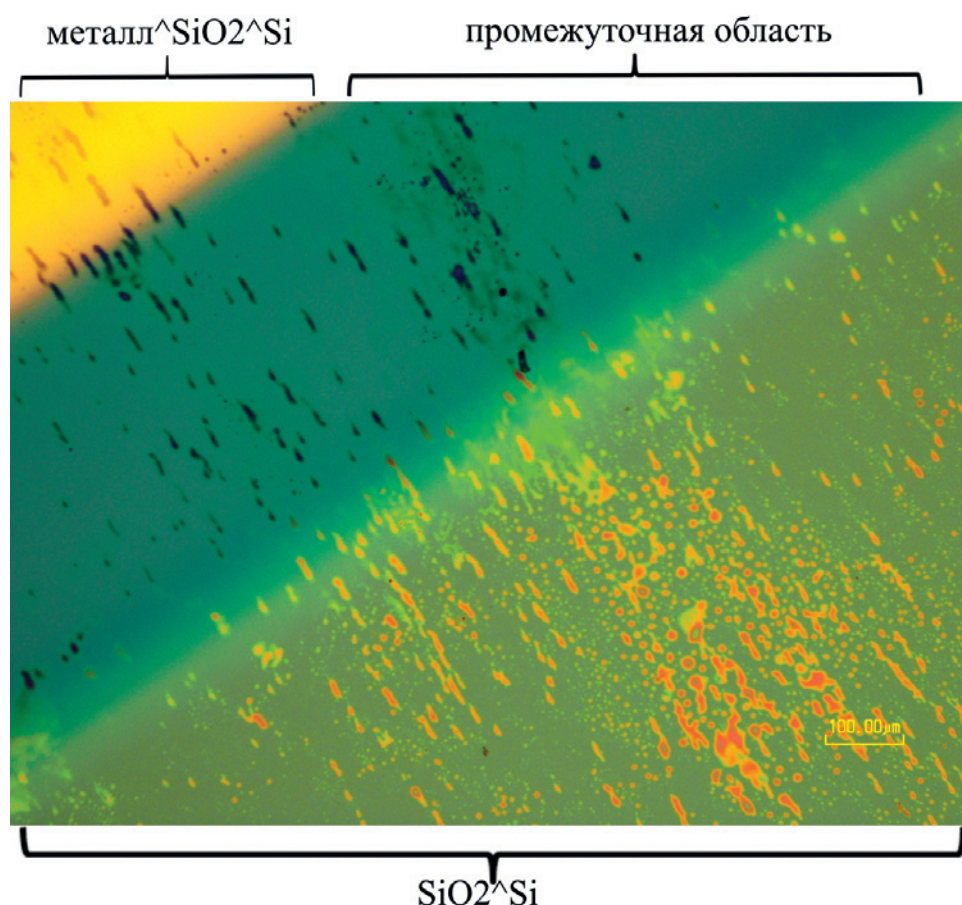


Рис. 9. Изображение поверхности исследуемой тестовой структуры, содержащей естественный окисел на кремнии, полученное на оптическом микроскопе Nikon Eclipse L200N в отраженном свете в режиме светлого поля

### 5.3 Разноплановый контроль мембран перед проведением испытаний на прочность

Данный пример посвящен анализу круглых мембран с жесткой заделкой по контуру (рис. 10). Исследуемые мембраны представляют собой натянутые пленки толщиной порядка единиц микрометров и менее. Пленки могут формироваться из прозрачных материалов, таких как оксид и нитрид кремния; основанием служит кремниевая подложка. При создании мембран используется глубокое травление кремния с обратной стороны пластины на всю глубину пластины.

С точки зрения анализа данных структур, оптический микроскоп может использоваться для определения линейных размеров (диаметра) мембран, оценки поверхности мембран, анализа дефектов и др.

При формировании таких мембран необходимо тщательно контролировать все параметры технологического процесса, в том числе в особенности – момент остановки травления кремния [44]. С этой целью можно использовать оптическую микроскопию (рис. 11, а, б). Она позволяет определить, полностью ли стравился кремний, поскольку его толстые слои являются непрозрачными для видимого излучения. При большем увеличении можно подробнее изучить микроструктуру поверхности в области травления.

С точки зрения контроля дефектов и особенностей мембран, могут быть использованы многие методы оптической микроскопии. Например, в случае их наличия, можно анализировать осевшие на поверхности обратной стороны мембраны побочные продукты травления (рис. 12, а) или характер расположения складок (рис. 12, б).

Для проведения корректного расчета прочностных характеристик мембраны [45-47] необходимо точно знать геометрические параметры мембраны. При анализе таких мембран в стандартном режиме отраженного света (рис. 13, а) оператор может определить диаметр мембраны. Важно отметить, что уровень поверхности мембраны не совпадает с уровнем поверхности подложки (рис. 10, а, б). Также форма мембраны в общем случае может не являться сегментом сферы, как предполагается в большинстве аналитических расчетов. По виду поверхности (рис. 10, а, б) можно сделать вывод, что в ряде случаев форма мембраны близка к усеченному конусу, меньшее основание которого подобно сегменту сферы. Посредством оптической микроскопии могут быть определены такие геометрические параметры мембраны, как диаметры верхнего и нижнего основания конуса. В целом, при анализе поверхности мембраны с лицевой стороны в режиме отраженного света можно наблюдать эти два диаметра (рис. 13, а). Но для определения диаметра прозрачных мембран рекомендуется использовать режим проходящего света, поскольку он позволяет получить более резкие границы объектов (рис. 13, б). Это становится особенно актуально при исследовании мембран меньшего диаметра с менее четкой границей (рис. 14, а, б).



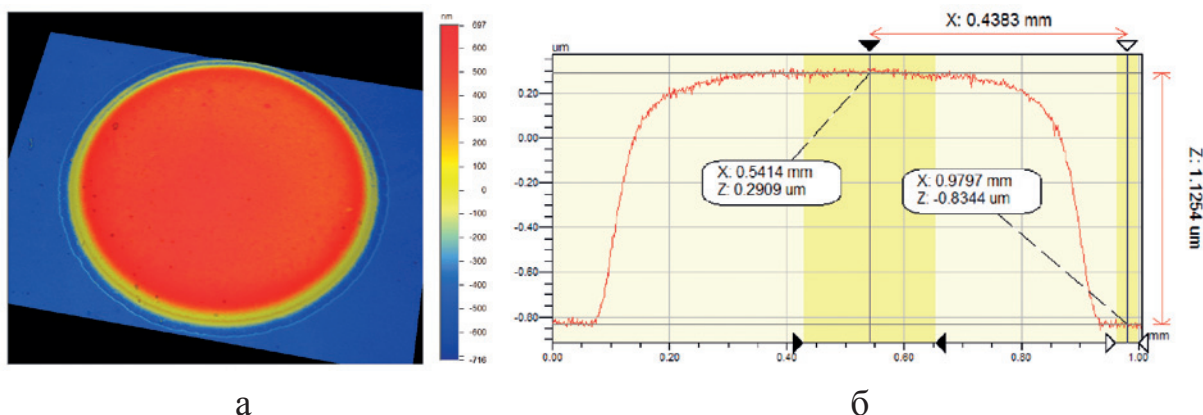


Рис. 10. Типичное изображение 3D-вида топографии поверхности круглой мембраны, полученное на оптическом профилометре Veeco Wyko NT 9300 (а), и соответствующий профиль поверхности вдоль диаметра мембраны (б)

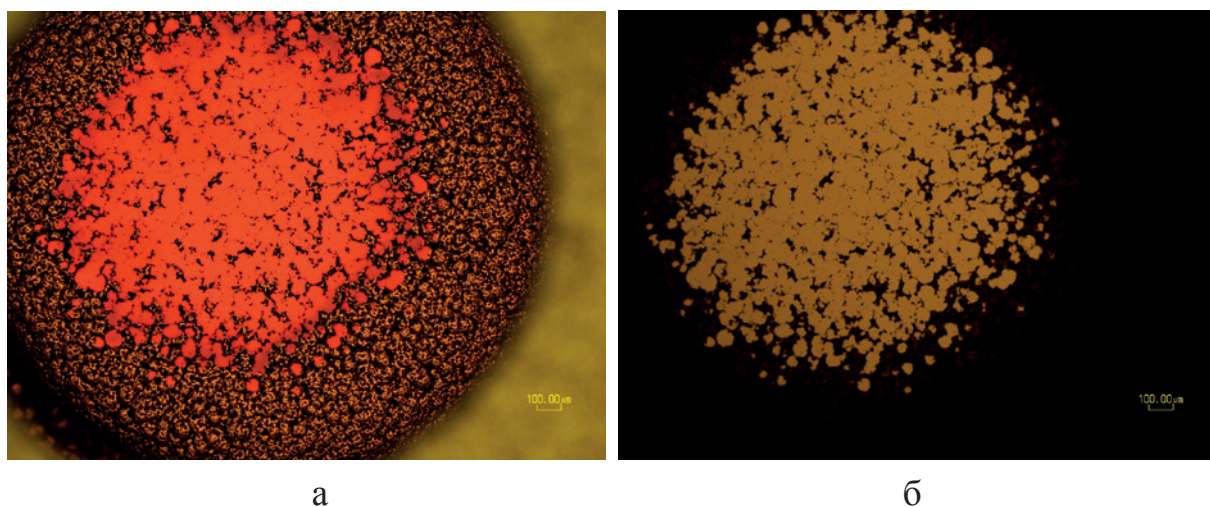


Рис. 11. Изображения прозрачной мембраны на кремниевой подложке в случае недотравленного кремния, полученные на оптическом микроскопе Nikon Eclipse L200N в режиме светлого поля в отраженном свете (а), в проходящем свете (б)

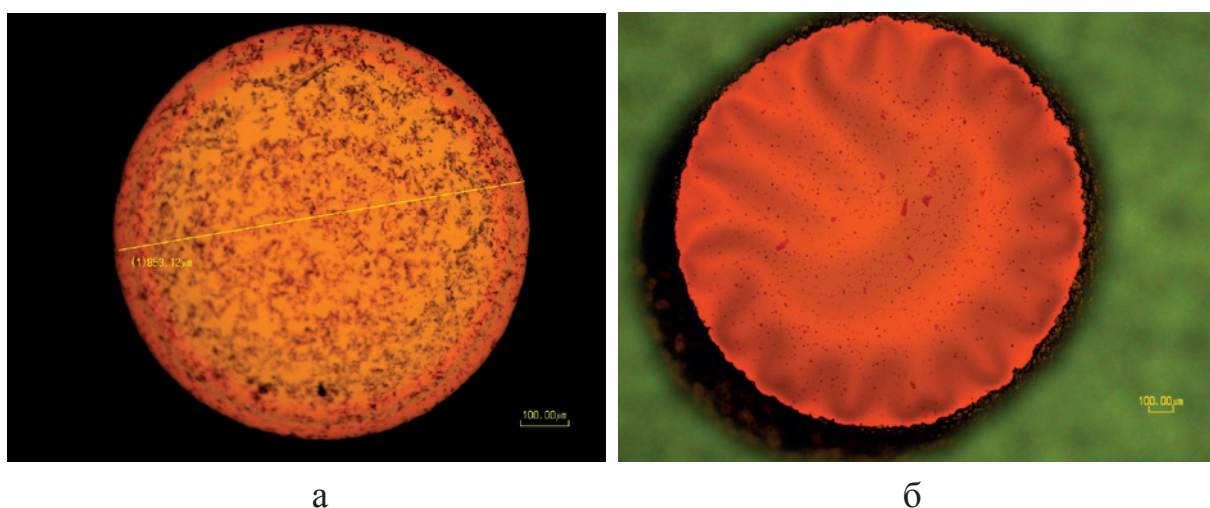


Рис. 12. Изображения различных мембран, полученные на оптическом микроскопе Nikon Eclipse L200N в режиме светлого поля в проходящем свете (а), в отраженном свете (б)

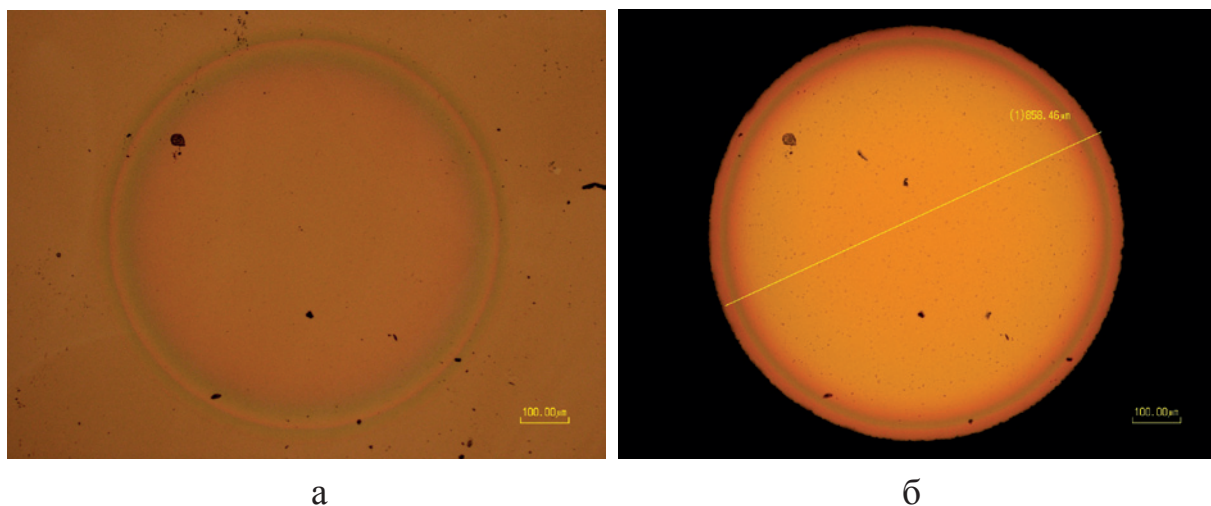


Рис. 13. Изображения прозрачной мембраны на кремниевой подложке, полученные на оптическом микроскопе Nikon Eclipse L200N в режиме светлого поля в отраженном свете (а), в проходящем свете (б)

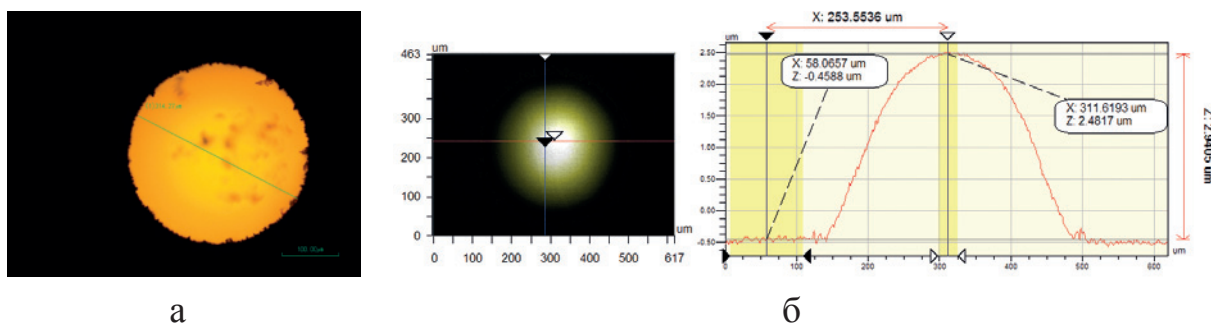


Рис. 14. Изображения и профиль поверхности прозрачной мембраны на кремниевой подложке, полученные на оптическом микроскопе Nikon Eclipse L200N в режиме светлого поля в проходящем свете (а) и на оптическом профилометре Veeco Wyko NT 9300 (б)

## Заключение

Продемонстрированы возможности светлопольной и темнопольной оптической микроскопии в отраженном и проходящем свете. Описаны возможности качественного и количественного анализа.

Применение оптической микроскопии в микроэлектронном производстве позволяет:

- выполнить качественный визуальный анализ внешнего вида полученной структуры;
- анализировать элементы структуры и определять их размеры, различать сходные (близкие по виду) и отличные области друг от друга и проводить их качественный анализ;
- анализировать особенности рельефа поверхности и оценивать перепады высот;
- обнаруживать единичные загрязнения и дефекты, определять их форму и размеры, проводить количественный анализ дефектности;

- обнаруживать прозрачные плёнки окислов или прозрачные загрязнения;
- выявлять особенности исследуемой структуры (например, неоднородности поверхности), на которые стоит обратить внимание при проведении анализа другими методами.

Даны примеры использования оптической микроскопии для анализа: исходных и окисленных кремниевых пластин; полученных лазерной маркировкой углублений; технологических процессов создания GaN на сапфире; механической обработки металлических изделий; технологии создания круглых мембран и определения их параметров; структур сложной формы с высокой шероховатостью.

На конкретных примерах показана полезность применения оптической микроскопии для предварительного анализа структур. Приведены исследования поверхности образцов перед применением методов профилометрии (для определения перепада высот) и спектральной эллипсометрии (для анализа тонких пленок, оптических характеристик материалов и др.). Продемонстрировано, что данные оптической микроскопии позволили провести корректный анализ этих образцов.

### **Благодарности**

Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «МСТ и ЭКБ» НИУ МИЭТ, поддержанного Минобрнауки РФ, в рамках выполнения работ по Соглашению № 075-03-2020-216 от 27.12.2019 (тема FSMR-2020-0017, мнемокод 0719-2020-0017).

Авторы выражают благодарность ведущему инженеру ЦКП «МСТ и ЭКБ» В. Ю. Кирееву и научному сотруднику НИИ Физических проблем Р.В. Лапшину за обсуждение и ценные замечания.

### **Литература**

1. *Бородин В.О., Сабиров Д.Х., Цыбина А.Н., Звада Е.А.* Микроскопические методы и их роль в современных биологических науках // Научное обозрение. Педагогические науки, 2019, **5-2**, С. 36-40.
2. Nikon Микроскоп для инспекции интегральных схем ECLIPSE L200 / ECLIPSE L200D Руководство по эксплуатации (46 с.)
3. [http://aco.ifmo.ru/el\\_books/introduction\\_into\\_specialization/glava-6/glava-6-3.html](http://aco.ifmo.ru/el_books/introduction_into_specialization/glava-6/glava-6-3.html)
4. *Дедкова А.А., Дюжнев Н.А., Киреев В.Ю., Новиков Д.В., Патюков Н.Н.* Влияние электронного облучения на характеристики плёнок нитрида кремния // Современная электроника, 2016, **9**, С. 2-5.
5. [http://galika.ru/wp-content/uploads/2013/07/P\\_2010-OIP.pdf](http://galika.ru/wp-content/uploads/2013/07/P_2010-OIP.pdf)

6. *Севастьянов В.Г., Симоненко Е.П., Гордеев А.Н., Симоненко Н.П., Колесников А.Ф., Папынов Е.К., Шичалин О.О., Авраменко В.А., Кузнецов Н.Т.* Получение керамических материалов состава  $\text{HfB}_2\text{-SiC}$  (10-20 об. %) и исследование их поведения под длительным воздействием потока диссоциированного воздуха // Журнал неорганической химии, 2014, **59** (12), С. 1611.
7. *Зимин С.П., Горлачев Е.С., Герке М.Н.* Свойства поверхности алюминиевого покрытия на макропористом кремнии // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2007, **10**, С. 44-46.
8. *Ашиккалиева К.Х.* Лазерно-стимулируемые периодические структуры на поверхности монокристаллического кремния // Фундаментальные проблемы современного материаловедения, 2013, **10**, С. 21-24.
9. *Красникова О.В., Андрейков Е.И., Диковинкина Ю.А.* Карбонизация каменноугольного и нефтяного пеков, модифицированных термообработкой с полистиролом // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2012, **55** (6), С. 41-44.
10. *Глазачева Е.Н., Евтюхова Д.О., Успенская М. В.* Биополимерные плёночные материалы на основе хитозана для медицинских применений // 2018, С. 388-391
11. *Бузанов О.А., Диденко И.С., Козлова Н.С., Козлова А.П., Скрылева Е.А., Симинел Н.А.* Влияние изотермического отжига на оптические параметры лантан–галлиевого танталата // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники, 2012, **1**, С. 22-25.
12. *Столярова О.О., Муравьёва Т.И., Загорский Д.Л., Губенко М.М.* Исследование поверхности антифрикционных алюминиевых сплавов системы  $\text{Al-Cu-Si-Sn-Pb}$  // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2017, **8**, С. 50-58.
13. *Красиков А.В., Красиков В.Л.* Изменение структуры оксидного покрытия на силумине в процессе анодирования // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), 2012, **17** (43), С. 026-030.
14. *Лебедев А.А., Лебедев С.П., Никитина И.П., Школдин В.А., Шустов Д.Б.* Исследование гетероструктур  $\text{3C-SiC/15R-SiC}$  // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2015, **15** (1), С. 60-64.
15. *Меженный М.В., Мильвидский М.Г., Резник В.Я.* Влияние быстрого термического отжига на особенности дефектообразования в пластинах кремния при создании эффективного внутреннего геттера // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2009, **8**, С. 49-56.
16. *Меженный М.В., Мильвидский М.Г., Резник В.Я.* Особенности формирования внутреннего геттера в бездислокационных пластинах кремния, легированных азотом // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники, 2010, **4**, С. 4-10.

17. *Алексеева О.В., Носков А.В., Гусейнов С.С.* Термическое поведение композиционных материалов на основе полистирола // *Физикохимия поверхности и защита материалов*, 2020, **56** (3), С. 227-230.
18. *Ларионов Н.В.* Покрyтия из карбида кремния, полученные пиролизом монометилсилана, на реакционно-связанном карбиде кремния // *Информационно-технологический вестник*, 2018, **1** (15), С. 137-144.
19. *Кудря А.В., Соколовская Э.А., Ле Х.Н., Траченко В.А., Скородумов С.В., Папина К.Б., Чинь Х.Ч.* Оценка строения изломов и структур в конструкционных сталях с использованием компьютеризированных процедур // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*, 2015, **4** (34), С. 44-52, DOI: 10.18323/2073-5073-2015-4-44-52.
20. *Герасимов В.В.* Сравнительная морфология сфероидизированной перлитной стали оптическим и электронно-микроскопическим методами // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, 2015, **7-8**, С. 55-59.
21. *Гончаров А.С., Ковалев М.С., Соломашенко А.Б., Кузнецов А.С.* Исследование параметров микрооптических и дифракционных элементов с помощью технологии корреляционной микроскопии shuttle and find // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана*, 2012, **9** (9), С. 17.
22. *Golokhvast K.S., Seryodkin I.V., Bulakh E.M., Chaika V.V., Zakharenko A.M., Kholodov A.S., Pamirsky I.E., Chung G.* Mycolith (fungal phytolith) morphotypes and biosilification of proteins in wood-destroying and pileate fungi // *Botanica Pacifica: a Journal of Plant Science and Conservation*, 2018, **7** (1), С. 63-70, DOI: 10.17581/bp.2018.07102.
23. *Васильчикова Е.Н., Константинов М.С., Мащенко В.И., Кучеров Р.Н., Чаусов Д.Н., Дадиванян А.К.* Особенности процесса кристаллизации 4,4'-азоксианизола в виде множественных «кофейных колец» // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*, 2020, **20** (1), С. 47-52.
24. *Васильев Ю.Б., Верезуб Н.А., Меженный М.В., Просолович В.С., Простомолотов А.И., Резник В.Я.* Особенности дефектообразования в процессе термообработки биздислокационных монокристаллических пластин кремния большого диаметра с заданным распределением в объеме кислородсодержащих геттерирующих центров // *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*, 2012, **2**, С. 43-50.
25. *Гуляев А.И., Исходжанова И.В., Журавлева П.Л.* Применение метода оптической микроскопии для количественного анализа структуры ПКМ // *Труды ВИАМ*, 2014, **7**, С. 7.
26. *Дьяченко А.А., Максимова Л.А., Рябухо В.П.* Проявление эффектов углового спектра освещающего поля в полихроматической интерференционной микроскопии слоистых объектов // *Компьютерная оптика*, 2018, **42** (6), С. 959-969, DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-959-969.

27. *Попов Д.А.* Анализ изменения яркости светового гауссова пучка в задаче поиска точки фокуса оптической системы // *Качество. Инновации. Образование*, 2014, **7** (110), С. 62-69.
28. *Боргардт Н.И., Алексеев Н.В., Волков Р.Л.* Анализ структуры СБИС с применением метода фокусированного ионного пучка, электронной и оптической микроскопии // *Известия высших учебных заведений. Электроника*, 2011, **5** (91), С. 91-98.
29. *Гужов В., Ильтимиров Д., Хайдуков Д., Чернов О., Полубинский С.Л.* Модификация оптических микроскопов // *Автоматика и программная инженерия*, 2016, **2** (16), С. 71-76.
30. *Лопарев А.В., Правдивцев А.В., Игнатьев П.С., Индукаев К.В., Осипов П.А., Ромаш Е.В.* Метрологическая платформа с модуляционным интерференционным микроскопом // *Оптический журнал*, 2012, **79** (6), С. 79-85.
31. *Сизова О.В., Заикина А.А., Рубцов В.Е., Шляхова Г.В.* Формирование микроструктуры ядра сварного шва, полученного способом сварки трением с перемешиванием // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2015, **58** (6-2), С. 248-253.
32. *Носенко В.А., Александров А.А.* Распределения геометрических параметров зерен шлифовальных порошков // *Вестник современных технологий*, 2018, **2** (10), С. 15-20.
33. *Ковалева О.А., Лазарев С.И., Головин Ю.М., Рыжкин В.Ю.* Оптико-микроскопические исследования сорбционной поверхности нанопермембран ОПМН-П и ОФМН-К // *Сорбционные и хроматографические процессы*, 2018, **18** (1), С. 83-92.
34. *Зенцова Е.А.* Цифровая оптическая микроскопия как средство фрактального анализа высокопрочного чугуна // В сборнике «Инновации, качество и сервис в технике и технологиях», 2015, С. 150-153.
35. *Рабинович А.А., Панова Т.В., Голованова О.А.* Применение метода оптической микроскопии для изучения кристаллизации одноводного оксалата кальция // *Вестник Омского университета*, 2007, № 1 (43), С. 23-25.
36. *Шагалова П.А.* Разработка и реализация алгоритма распознавания трещин на изображениях, полученных при микроскопии // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, 2018, **3** (122), С. 32-36.
37. *Латонов И.В., Шулепов А.В.* Способ бесконтактной оценки шероховатости поверхности по ее цифровому изображению, формируемому оптической системой измерительного микроскопа // *Вестник МГТУ Станкин*, 2013, **1** (24), С. 141-145.
38. *Хардин В.* (автор), *Рентюк В.* (перевод и дополнения) Искусственный интеллект и его влияние на машинное зрение // *Control Engineering*, 2017, **6** (72), С. 12-14.

39. Дедкова А.А., Никифоров М.О., Митько С.В., Киреев В.Ю. Исследования островковых пленок нитрида галлия на сапфировых подложках методами растровой электронной микроскопии и спектральной эллипсометрии // Российские нанотехнологии, 2019, **14** (3-4), С. 93-100, DOI: 10.21517/1992-7223-2019-3-4-93-100.
40. Никифоров М.О., Дедкова А.А., Рыгалин Б.Н. Влияние технологических параметров процесса атомно-слоевой эпитаксии на однородность толщины зародышевых слоев GaN // Изв. вузов. Электроника, 2020, **25** (3), С. 277–281, DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-277-281.
41. Ландсберг Г.С. Оптика. Учеб. Пособие: Для вузов. – 6-е изд., стереот. // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003, 848 стр.
42. Дедкова А.А., Киреев В.Ю., Махиборода М.А. Возможности и ограничения метода контактной профилометрии при определении перепада высот для контроля топологических элементов и толщины слоев // Наноструктуры. Математическая физика и моделирование, 2020, **20** (2), С. 23-40.
43. Горшков М.М. Эллипсометрия // М.: «Сов. Радио», 1974, 200 с.
44. Дедкова А.А., Дюжнев Н.А., Гусев Е.Э., Штерн М.Ю. Оперативная неразрушающая методика анализа прогиба мембран, расположенных на пластине // Дефектоскопия, 2020, **5**, С. 52-59, DOI: 10.31857/S0130308220050073.
45. Гусев Е.Э., Дедкова А.А., Дюжнев Н.А. Исследование механической прочности многослойных мембран для МЭМС преобразователей физических величин // Наноиндустрия, 2018, S (82), С. 538-541, DOI: 10.22184/1993-8578.2018.82.538.541.
46. Дедкова А.А., Гусев Е.Э., Ларионов В.С., Дюжнев Н.А. Определение механических свойств МЭМС мембран // В сборнике: Третий междисциплинарный молодежный научный форум с международным участием «Новые материалы» Сборник материалов, 2017, С. 251-254.
47. Дюжнев Н.А., Гусев Е.Э., Дедкова А.А., Глаголев П.Ю. Исследование механической прочности двухслойных мембран SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> // Наноиндустрия, 2019, S (89), С. 511-514, DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.511.514.

# **APPLICATION OF OPTICAL MICROSCOPY FOR THE QUALITATIVE AND QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE SOLID SURFACE**

Dedkova A.A., Makhaboroda M.A.

*dedkova@ckp-miet.ru, m.makhaboroda@gmail.com*  
*National Research University of Electronic Technology, Moscow*

Received 15.09.2020

The possibilities of optical microscopy for preliminary and complex analysis of structures, which are used mainly in microelectronics and micromechanics, are demonstrated. Specific examples of the use of optical microscopy for qualitative and quantitative analysis, development of technological processes, control of defects, analysis of surface relief, determination of the parameters of structures are given. Surface measurements are performed in reflected and transmitted light, using bright and dark field modes.

*Keywords: microscope, optical microscopy, measurement, reflected light, bright field, dark field, transmitted light, episcopic illumination, diasopic illumination, surface relief, step height microelectronics, micromechanics, surface, roughness, technology, membrane, defect*