

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Ф. В. БУЛЫГИН*, **С. Ю. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ***, **С. А. КОНОНОВ****,
Я. А. ИЛЮШИН***, **Г. Г. ЛЕВИН*****, **В. Л. ЛЯСКОВСКИЙ*****

* Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии
(РОССТАНДАРТ), Москва, Россия

**Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы,
Москва, Россия, e-mail: s.zolotarevskiy@vniims.ru

*** Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических
измерений, Москва, Россия

Рассмотрены методы сверхразрешения в оптической интерференционной микроскопии при измерениях параметров рельефа и текстуры поверхности в нанометровом диапазоне. Показано, что разрешающая способность микроскопа определяется не аппаратными свойствами самого прибора, а точностью измерения выходного сигнала.

Ключевые слова: интерферометр, разрешающая способность микроскопа, сверхразрешение, характеристика текстуры поверхности.

The article is devoted to the methods of superresolution in the optical interference microscopy applied to the measurement parameters of topography and surface texture in the nanometer range. It is shown that the resolution of the microscope is determined not by the properties of the hardware unit, but accuracy of measurement of the output signal.

Key words: interferometer, resolution of the microscope, superresolution, characterization of surface texture.

При реализации многих современных технологий создания тех или иных наноматериалов необходимо оперативно осуществлять диагностику изделий непосредственно в процессе производства с высокой обнаружительной способностью дефектов. К таким технологиям относятся, в частности, плазменные нанотехнологии получения наноструктур и покрытий; электронно-лучевая эпитаксия, новые технологии нанесения пленок и покрытий, объемного и поверхностного наноструктурирования металлических материалов; получения многослойных кремниевых бездислокационных наноструктур для электрон-

ных приборов; изготовления оптических зеркал на основе наноструктурированных порошков кремния и его химических соединений; рулонные технологии изготовления дифракционных элементов и матриц солнечных элементов, наноструктурированных подложек для нано- и микроэлектроники.

Текстура является одним из критических параметров поверхности, влияющим на эффективность солнечных элементов. Полированные подложки из монокристаллического кремния (как в бескорпусной кремниевой подложке полупроводникового класса) отражают около 40% света в зависимости от длины волны падающего излучения. Для уменьшения отражения широко используется метод текстурирования поверхности так, чтобы отраженные фотоны имели шанс попасть на другую грань ячейки солнечного элемента и создать дополнительную возможность для фотоэффекта в излучательном слое. Если шероховатость поверхности слишком высока, то среднее значение свободного пути электронно-дырочной пары может увеличиться до точки, где вероятность рекомбинации уменьшает общую эффективность.

Отличительной особенностью указанных технологий является высокая производительность, различные размеры изделий, высокие требования к топологическим характеристикам формы и текстуры поверхности, толщинам и оптико-физическим параметрам пленок и покрытий. При реализации большинства технологий основное внимание уделяется поиску и анализу дефектов, размеры которых много меньше длины волны оптического излучения. Причем в указанных измерениях нуждаются не только конечная продукция, как, например, поверхностная структура солнечных элементов или толщина и однородность нанопокровов, но и технологические заготовки: наноструктурированные подложки, на которых формируются изделия, мастер-матрицы, используемые в рулонных технологиях, и т.д.

Анализ подобных технологий позволяет сформулировать следующие основные требования к измерительному и диагностическому оборудованию: бесконтактность измерений; высокая производительность; проведение измерений на месте; высокая способность обнаруживать наноразмерные дефекты.

Для измерений такого рода в технологических линиях применяют, как правило, оптические методы: интерферометрию, в том числе голографическую и спекл-интерферометрию, эллипсометрию, конфокальную и сканирующую микроскопии и другие, неинвазивные и обладающие высокой оперативностью измерений.

Совершенствование этих методов в последние годы привело к удивительным результатам. Современные оптические системы позволяют измерять отклонения формы и структуры поверхности с погрешностью – 1–2 Å, определять латеральное изменение объекта 3–5 нм и толщину многослойных покрытий с погрешностью 1–2 нм. Современные оптические измерительные системы должны иметь высокую производительность 5–10 пластин в час при диагностике изделия 1–2 Гпикс. Все это подтверждает актуальность задачи оснащения производственных процессов на предприятиях наноиндустрии современными средствами измерений для бесконтактного оперативного контроля качества нанорельефа и текстуры поверхности выпускаемой продукции.

Оптические методы широко распространены при исследованиях различных свойств материалов и объектов. Их преимущества состоят в возможности получения информации об объекте без физического контакта с ним. Кроме того, как правило, оптические методы позволяют наблюдать за протеканием технологических процессов в режиме реального времени.

Использование оптического метода измерений подразумевает, во-первых, установление связи между параметрами регистрируемого излучения и свойствами материала; во-вторых, применение оптических устройств для измерения параметров излучения; в-третьих, восстановление свойств материала по измеренным параметрам.

Различают прямые и обратные оптические задачи оптических измерений. Прямая задача заключается в исследовании процесса возбуждения или распространения света в материале, когда на основании известных физических законов и предположений о строении материала делается вывод об изменении параметров излучения при взаимодействии с данным материалом. Решение прямых задач наиболее развито, хотя более естественным является использование решений обратных оптических задач, т.е. нахождения характеристик объектов и материалов по параметрам регистрируемого излучения. Так, интуитивно, по характеру отраженного или поглощенного света можно сделать выводы о размерах, поверхностной структуре, форме и цвете объекта, а по этой совокупности параметров определить материал, из которого изготовлен объект. Тем не менее, решению обратных задач стали уделять заметное внимание только в последнее время. По-видимому, это связано со сложностью их решения, необходимостью разработки для этого специализированного математического аппарата.

В оптической микроскопии решение обратных задач тесно связано с развитием двух основных направлений развития современной микроскопии:

сверхразрешения, т.е. получение изображений с разрешением деталей меньше дифракционного предела;

реконструктивной томографии – получение 3D-изображений внутренней структуры микрообъектов.

Остановимся подробнее на проблеме сверхразрешения. Разрешающая способность любого оптического прибора определяется его аппаратной функцией. Инструментальная разрешающая способность микроскопа определяется числовой апертурой микрообъектива и длиной волны зондирующего излучения и для высококачественных приборов приблизительно равна длине волны. Однако исследования в области радиофизических и оптических измерений показали, что при высокоточной регистрации фазовых изображений теоретический (рэлеевский) предел разрешения может быть превзойден. Было показано, что разрешающая способность определяется не аппаратными свойствами самого прибора, а точностью измерения выходного сигнала. По предварительным оценкам при измерениях изображения с погрешностью 0,1 – 0,2 % и 8 – 10 отсчетов регистратора на элемент разрешения возможно достижение сверхразрешения в микроскопии. Такая высокая точность регистрации реальна в микроскопии только при интерференционном измерении фазовых изображений. В настоящее время достигнута погрешность измерения фазы поля на уровне 0,001 длины волны.

Восстановление изображения со сверхразрешением представляет собой двухэтапный процесс. На первом этапе осуществляется регистрация изображения с максимально высокой точностью, на втором этапе решается обратная задача редукции к идеальному прибору. Однако при исследовании наноструктур, в которых дифракционные эффекты очень малы и распространение света идет по законам геометрической оптики, числовая апертура микрообъектива применяется не полностью. Это существенно усложняет использование алгоритмов сверхразрешения. Для увеличения полосы спектра пространственных частот, регистрируемых прибором, необходимо применять многоракурсное зондирование микрообъекта. При этом в каждом ракурсе регистрируется своя часть спектра частот, определяющих структуру объекта на уровне сверхразрешения. В таком случае для достижения сверхразрешения, как и для

томографической реконструкции, требуется набор многоракурсных фазовых изображений. Совмещение этих методов обработки позволяет реконструировать внутреннюю структуру клетки со сверхразрешением. Оценки показывают, что для реализации такой процедуры необходима регистрация не менее 40 – 60 фазовых изображений при угле обзора $\pm 50^\circ$.

Построение сверхразрешающего оптического микроскопа наноструктурированных микрообъектов на основе совместной обработки многоракурсных фазовых изображений требует решения целого комплекса проблем, связанных с высокоточными оптическими измерениями, автоматизацией процесса сканирования и регистрации набора фазовых изображений, а также созданием алгоритмов сверхразрешающей реконструкции.

В последнее время наметился другой подход к решению проблемы сверхразрешения. Он основан на учете априорной информации об исследуемом объекте. Используя различные методы «кодировки» объекта, формируют априорную информацию. В дальнейшем при формировании и обработке изображений микрообъектов с учетом предварительной препаратоподготовки получают изображения с разрешением, превышающим дифракционный предел. Эти методы в основном применяются в люминесцентной (флуоресцентной) микроскопии.

Еще одной важной задачей, тесно связанной с разработкой сверхразрешающих оптических систем, является создание приборов, позволяющих осуществлять поиск изменений или дефектов исследуемых объектов, размер которых много меньше длины волны. В этом случае ставится задача не построения изображения со сверхвысоким разрешением, а поиска различий, геометрический размер которых много меньше длины волны. Эта задача идеологически связана с проблемой распознавания образов со всеми необходимыми атрибутами: выбором измеряемых признаков, построением их пространства, выбором решающего правила, определением критериев неопределенности распознавания. Разрабатываются алгоритмы обнаружения дефектов по оптическому фазовому изображению, получаемому в интерферометрах с латеральным разрешением 2 – 3 нм. При этом рассматриваются два варианта решения обратной задачи реконструкции элементов изображений много меньше длины волны: первый основан на редукции аппаратной функции прибора по большому числу изображений, второй – на распознавании малых дефектов при априорной информации о классе объектов, т. е. фактически речь идет о создании библиотеки

дефектов для каждого класса изделий. Решение данной проблемы особенно актуально при создании диагностических комплексов, встроенных в технологические линии и предназначенных для оперативной диагностики изделий нанотехнологий.

При разработке методов сверхразрешения ключевую роль играет моделирование процессов взаимодействия наноструктур с электромагнитным излучением оптического диапазона. При этом в рассеянии светового излучения на этих структурах существенную роль играют дифракционные эффекты. Это затрудняет применение для интерпретации наблюдаемых данных традиционных процедур обработки микроскопических изображений, развитых в оптической микроскопии, и требует использования методов на основе строгого решения задач рассеяния излучения на объекте, в том числе с учетом эффектов, связанных с поляризацией излучения. Однако задача интерпретации данных измерений, полученных при помощи оптического прибора, с точки зрения свойств наблюдаемого объекта, является одним из вариантов постановки обратной задачи рассеяния излучения на объекте. Практика показывает, что для успешного решения подобных задач необходимо рассматривать систему объект–излучение–прибор в комплексе как единое целое. В связи с этим, наряду с использованием техники строгого решения задач электродинамики, также необходимы разработка и применение алгоритмов обработки информации, получаемой от измерительного прибора, а также процедур и критериев оценки параметров объекта.

Важным достоинством оптических методов измерений является возможность построения систем, работающих в реальном времени. Это основано на параллельной обработке информации без поэлементного сканирования исследуемого объекта. Методы динамической интерферометрии позволяют осуществлять измерения формы и текстуры поверхности с погрешностью $1\text{--}2 \text{ \AA}$ и производительностью 30 Мпикс./с . Современная элементная база и новые принципы измерения фазы по набору интерферограмм дают возможность выполнять измерения с высокой скоростью при различных форматах кадра. Фактическим ограничением на скорость измерений выступают энергетические характеристики излучения, поскольку определяются необходимым временем экспозиции одного кадра с заданным числом пикселей.

В микроскопии общепринято использовать для оценки качества изображения понятие разрешающей способности. Различают два вида разрешения: латеральное (поперечное) – в плоскости изображения, и аксиальное (продольное) – вдоль оптической оси. Повышение линейной

разрешающей способности микроскопов является наиболее важной проблемой оптической микроскопии, с ней приходится сталкиваться в различных областях науки и техники, например, при решении задач контроля параметров изделий микроэлектроники в процессе их производства, регистрации движений в живых клетках, в материаловедении и фотонике, и т. д.

После долгих лет напряженной работы стало возможным регистрировать нанообъекты и изменения нанометрового масштаба с помощью оптического микроскопа. Конечно, дифракционный предел никто не отменял, но его удастся обойти, используя хитроумные оптические схемы и приемы вычислительной коррекции. Исследования в области радиофизических и оптических измерений показали, что при достаточно точной регистрации рэлеевский предел разрешения может быть существенно превзойден. Было доказано, что разрешающая способность микроскопа определяется не аппаратными свойствами самого прибора, а точностью измерения выходного сигнала. Следовательно, при высокоточных измерениях изображения принципиально можно достичь сверхразрешения в оптической микроскопии. Теоретические оценки и экспериментальные исследования показали возможность получения разрешающей способности оптического микроскопа порядка $0,100 - 0,001$ мкм. Фактически появляется возможность изучения микрообъектов с детализацией, аналогичной электронной микроскопии, на базе оптического микроскопа. Однако достижение сверхразрешения выдвигает высокие требования к прибору: необходимы, во-первых, высокая точность регистрации изображений и, во-вторых, полная автоматизация процесса измерения.

В настоящее время существуют различные типы оптических микроскопов, позволяющих строить изображения объектов, размеры которых намного меньше длины волны излучения подсветки. Их конструкция и применяемый математический аппарат зависят от типа решаемых задач (типа исследуемых объектов). Первый тип – это регистрация и определение положения нанообъектов в массиве подобных объектов. Второй тип связан с определением размеров (или разницы размеров) одиночных объектов нано- и субмикрометрового размеров. Для достижения эффекта сверхразрешения в задачах первого типа, как правило, недостаточно только применения сложных схем, требуется использование методов вычислительной коррекции. То же самое можно сказать и о решении задач второго типа.

Все методы достижения оптического сверхразрешения можно поделить на две основные группы. Первую группу составляют люминесцентные (флуоресцентные) методы, предназначенные для

исследований биологических объектов субмикро- и нанометрового масштабов. В другую группу входят методы, в которых для регистрации объектов используют собственное излучение подсветки. Такие методы потенциально имеют более широкое применение, так как изучаемый объект не должен обладать особыми свойствами, кроме тех, которые свойственны оптическим методам.

В связи с тенденцией непрерывного уменьшения размеров структур, применяемых в современных технологических изделиях, высокую актуальность приобретает разработка эффективных методов их исследования и контроля. Среди них важное место занимают традиционные оптические методы как одни из наиболее развитых к настоящему времени и допускающих реализацию на базе различных оптических микроскопов, обширный парк которых имеется в различных отраслях промышленности. В то же время, применение оптических методов с использованием излучения видимого диапазона и близких к нему участков спектра в экспериментальных исследованиях структур нанометрового масштаба связан с рядом трудностей, обусловленных природой электромагнитного излучения и особенностями его взаимодействия с веществом [4, 5].

Целью проведенного исследования является изучение возможностей дальнейшего развития техники прецизионной интерференционной микроскопии применительно к измерениям параметров рельефа поверхности в нанометровом диапазоне.

Выводы. Исследования в области оптических измерений параметров нанорельефа показали, что при высокоточной регистрации фазовых изображений теоретический (рэлеевский) предел разрешения может быть превзойден. Разрешающая способность определяется не аппаратными свойствами самого прибора, а точностью измерения выходного сигнала. Согласно предварительным оценкам при измерениях изображения с погрешностью 0,1 – 0,2 % и 8 – 10 отсчетов регистратора на элемент разрешения возможно достижение сверхразрешения в микроскопии. Такая высокая точность регистрации возможна в микроскопии только при интерференционном измерении фазовых изображений.

Методы сверхразрешения в интерферометрии нанорельефа требуют строгого учета процессов взаимодействия наноструктурной поверхности с электромагнитным излучением оптического диапазона, поскольку при этом происходит рассеяние зондирующего светового излучения из-за дифракции и эффектов, связанных с поляризацией излучения. Задача интерпретации результатов измерений, полученных при помощи оптического прибора, является одним из вариантов постановки обратной

задачи рассеяния излучения на объекте. В связи с этим наряду с использованием техники строгого решения задач электродинамики также необходима разработка и применение специальных алгоритмов обработки информации, получаемой от измерительного прибора, а также процедур и критериев оценки параметров объекта.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 16.552.11.7056) с применением оборудования Центра коллективного пользования ВНИИОФИ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1970.
2. **Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П.** Теория волн. М.: Наука, 1990.
3. **Вишняков Г. Н., Левин Г. Г., Минаев В. Л.** Томографическая микроскопия трехмерных фазовых объектов в пространственно-некогерентном свете // Оптика и спектроскопия. 2003. Т. 95. № 1. С. 142–146.
4. **Илюшин Я. А. и др.** Численное моделирование процедуры восстановления рельефа оптической поверхности с учетом рассеяния излучения на наноструктурах // Метрология. 2010. № 2. С. 3–12.
5. **Илюшин Я. А. и др.** Моделирование процессов рассеяния оптического излучения нанообъектами с конечными диэлектрической проницаемостью и проводимостью // Метрология. 2010. № 1. С. 10–22.
6. **Левин Г. Г. и др.** Определение наноперемещений объекта по оптическому фазовому изображению // Измерительная техника. 2010. № 7. С. 38–42; **Levin G. G. et al.** Measurement of nanomovements of an object from the optical phase image // Measurement Techniques. 2010. V. 53. N. 7. P. 782–788.
7. **Левин Г. Г. и др.** Моделирование процессов рассеяния оптического излучения наноразмерными структурами // Метрология. 2009. № 12. С. 7–13.
8. **Метрологическое** обеспечение нанотехнологий и продукции наноиндустрии: Учеб. пособие / Под ред. В. Н. Крутикова. М.: Логос, 2011.
9. **Gustafsson, M. G. L, Agard D. A., Sedat J. W.** I³M: 3D-widefield light microscopy with better than 100 nm axial resolution // Journal of Microscopy. 1999. V. 195. Part 1. P. 10–16.
10. **Hell S. W. et al.** Diffraction-unlimited three-dimensional optical nanoscopy with opposing lenses // Nature Photonics. 2009. V. 3. P. 381–387.
11. **Morgan S. P. et al.** Interferometric optical microscopy of subwavelength grooves // Optics Communications. 2001. V. 187. P. 29–38.

Дата принятия 11.06.2013 г.