

ной сертификации «Наносертифика» в качестве испытательной лаборатории. В рамках этих работ проводят измерения для сертификации продукции, содержащей наноструктурированные элементы. Специалисты Центра оказывают помощь заинтересованным организациям ННС в подготовке кадров в области метрологии. По заказу ГК «РОСНАНО» и Фонда инфраструктурных и образовательных программ на базе Центра разработаны две образовательные программы в области метрологического обеспечения изделий фотоники и продукции наноиндустрии. Создана пилотная площадка для сертификации квалификаций в области нанометрологии, где более 20 специалистов-метрологов прошли сертификацию на соответствие профессиональному стандарту, утвержденному Российским союзом промышленников и предпринимателей. Также сотрудники Центра участвуют в переподготовке специалистов-метрологов отечественных предприятий на кафедре «Оптико-физические измерения» Академии стандартизации, метрологии и сертификации. На оборудовании Центра проходят обучение студенты МИЭМ, МИРЭА и практику — студенты МГТУ им. Баумана.

Работы в Центре проводятся при поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.625.21.0004 от 25.08.2014 г., уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI62514X0004).

Л и т е р а т у р а

1. **Федеральная целевая программа** «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в РФ на 2008—2011 годы». Постановление Правительства РФ от 02.08.2007 № 498 (ред. от 30.12.2011 с изменениями, вступившими в силу с 21.02.2012).

2. **Приказ № 2396** руководителя Росстандарта от 4 ноября 2007 года о реализации постановления Правительства Российской Федерации от 2 августа 2007 года № 498 «О федеральной целевой программе «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008—2010 годы»».

3. **НИИ физических проблем им. Ф. В. Лукина.** Головная организация Минпромторга России по направлению наноэлектроника. [Электрон. ресурс]. <http://www.niifp.ru> (дата обращения 3.08.2015 г.).

4. **Московский институт электронной техники.** [Электрон. ресурс]. <http://www.miee.ru> (дата обращения 3.08.2015 г.).

5. **Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов имени акад. А. А. Бочвара.** [Электрон. ресурс]. <http://www.bochvar.ru> (дата обращения 3.08.2015 г.).

6. **Исследовательский центр им. М. В. Келдыша.** [Электрон. ресурс]. <http://www.kerc.msk.ru> (дата обращения 3.08.2015 г.).

7. **НИЦ «Курчатовский институт».** [Электрон. ресурс]. <http://www.nrcki.ru/> (дата обращения 3.08.2015 г.).

8. **ГНЦ «ЦНИИ КМ «Прометей»** [Электрон. ресурс]. <http://www.cism-prometey.ru> (дата обращения 3.08.2015 г.).

9. **Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов.** [Электрон. ресурс]. <http://www.ntcstm.troitsk.ru> (дата обращения 3.08.2015 г.).

10. **Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов.** [Электрон. ресурс]. <http://www.viam.ru> (дата обращения 3.08.2015 г.).

11. **Центральный научно-исследовательский институт химии и механики.** [Электрон. ресурс]. <http://www.cniim.ru> (дата обращения 3.08.2015 г.).

Дата принятия 03.09.2015 г.

53.086

Создание калибровочных образцов меры с элементами рельефа менее 100 нм

Ю. Р. ЕФИМЕНКОВ, Ю. М. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ, В. Л. ЛЯСКОВСКИЙ,
К. Н. МИНЬКОВ, А. А. САМОЙЛЕНКО

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Россия, e-mail: ymz@vniiofi.ru, vlyask@vniiofi.ru

Представлены результаты разработки экспериментального образца меры с элементами рельефа менее 100 нм для калибровки оптических, ближнепольных и электронных микроскопов на основе металлизированного электронного резиста (покрытия).

Ключевые слова: мера рельефа, калибровка, ближнепольная, оптическая и электронная микроскопии.

The results of development of experimental sample measure with relief elements less than 100 nm for calibration of optical, near-field and electron microscopes based on metalized electron resist (coating) are presented.

Key words: relief measure, calibration, near-field microscopy, optical microscopy, electron microscopy.

В современных технологиях все чаще используют наноструктурированные материалы, геометрические параметры которых определяют основные свойства выпускаемой про-

дукции. Автоматизация промежуточного контроля этих параметров при производстве наноструктурированных компонентов инновационной продукции является одной из

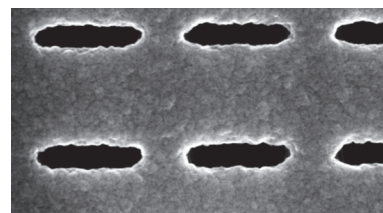
актуальных задач повышения качества выпускаемой продукции и снижения ее себестоимости. Автоматизированные системы должны обеспечивать бесконтактность измерений, высокие производительность и стабильность обнаружения наноразмерных дефектов, возможность интеграции в производственную линию. Для измерений такого рода в технологических линиях используют, как правило, оптические методы: интерферометрию, в том числе голографическую и спекл-интерферометрию, эллипсометрию, конфокальную и сканирующую (Through-focus Scanning Optical Microscopy (TSOM) Imaging) микроскопию и др., которые имеют высокую оперативность измерений и являются бесконтактными.

Допустимость применения методов оптической интерференционной микроскопии связана, в первую очередь, с ограничением разрешающей способности оптических систем. В настоящее время разрешение интерференционных микроскопов в аксиальном направлении (продольное) достигает нескольких нанометров, а в латеральной плоскости (поперечное) ограничено дифракционным пределом, поэтому повышение латерального разрешения микроскопов является наиболее актуальной проблемой оптической микроскопии, встречающейся в различных областях науки и техники: при решении задач контроля параметров изделий микроэлектроники в процессе их производства, в материаловедении, фотонике и т. д. Для калибровки и определения разрешающей способности в аксиальном направлении используют меры с так называемыми ступенями различной высоты, достигающей значений порядка единиц нанометров.

Калибровка в латеральной плоскости представляет большую трудность, чем в аксиальной. Основные меры, применяемые для калибровки микроскопов — периодические структуры (с периодом порядка 3 мкм) из кремния или оксида кремния. Размеры элементов рельефа мер этого типа сравнимы с длиной волны оптического излучения.

Разрешающую способность оптических приборов можно увеличить, разработав методы, основанные на решении обратной задачи. Прямая задача заключается в исследовании процесса возбуждения или распространения света в исследуемом материале, когда на основании известных физических законов и предположений о строении материала делается вывод об изменении параметров излучения при взаимодействии с данным материалом. Решение обратных оптических задач направлено на определение характеристик объектов и материалов по параметрам регистрируемого излучения. Применение методов решения обратной задачи дает возможность перейти к получению изображений с разрешением деталей менее дифракционного предела (сверхразрешению). Сверхразрешение позволяет использовать оптические приборы для контроля геометрических параметров размером менее дифракционного предела. Для калибровки систем в режиме сверхразрешения необходимо создать структуры, имеющие хотя бы один размер менее длины волны оптического излучения. Также нужны четкие грани у элементов рельефа таких структур для упрощения калибровки и фокусировки.

Участок образца со штрихами размером 200 нм



Литографическими методами можно создавать элементы рельефа размерами менее 100 нм из различных полупроводников. При изготовлении таких рельефов используют установки плазмохимического травления, стоимость которых достаточно высока. В то же время применение оптических методов с использованием излучения видимого диапазона и близких к нему участков спектра в экспериментальных исследованиях полупроводниковых структур нанометрового масштаба проблематично в связи с особенностями взаимодействия электромагнитного излучения с веществом наноструктур [1—3], приводящими к возникновению дополнительного набега фаз при измерениях методами интерференционной микроскопии.

Одним из способов преодоления неопределенностей измерений, связанных с возникновением дополнительного набега фаз, является покрытие поверхностей мер металлической пленкой. Так как анизотропное травление кремния и последующее нанесение металлического покрытия требуют специализированного дорогостоящего оборудования, предложено изготавливать образцы для калибровки микроскопов с помощью электронного резиста, защищенного металлической пленкой.

Образец изготавливали следующим образом. На поверхность кремниевой пластины, очищенной с помощью активных ПАВ и органических растворителей, наносили электронно-чувствительный резист ERP-40 с чувствительностью 250 мкК/см², после чего экспонировали рисунок на поверхности резиста. Рисунок представлял набор линий толщиной 70 нм, расположенных с периодом 400 нм. Длину штрихов варьировали от 4 мкм до 200 нм. После экспонирования проявитель удаляли в изопропиловом спирте. Для уменьшения деградации электронного резиста и предотвращения взаимодействия с электромагнитным излучением поверхность покрывали слоем алюминия. На последнем этапе контролировали геометрические размеры образца с помощью электронного микроскопа. На рисунке показан образец со штрихами размером 200 нм.

Таким образом, описанный выше способ позволяет создавать модели различных дефектов и анализировать их оптическими методами в режиме сверхразрешения и исследовать образец в широком диапазоне увеличений. Благодаря большой длине штрихов элементы можно наблюдать с помощью оптического микроскопа без применения методов сверхразрешения. В зависимости от возможностей метода можно определить и откалибровать разрешающую способность в латеральной плоскости.

Работа выполнена при поддержке Росстандарта (договор № 120-127 от 28.05.2015 г.).

Л и т е р а т у р а

1. Булыгин Ф. В., Золотаревский С. Ю., Кононов С. А., Илюшин Я. А., Левин Г. Г., Лясковский В. Л. Анализ методов сверхразрешения в оптической интерференционной микроскопии // Метрология. 2013. № 8. С. 22—30.

2. Илюшин Я. А., Ломакин А. Г., Золотаревский С. Ю., Левин Г. Г., Кононов С. А. Численное моделирование процедуры восстановления рельефа оптической поверхности с учетом рассеяния излучения на наноструктурах // Метрология. 2010. № 2. С. 3—12.

3. Илюшин Я. А., Левин Г. Г., Золотаревский С. Ю., Кононов С. А., Лысенко В. Г. Моделирование процессов рассеяния оптического излучения нанообъектами с конечными диэлектрической проницаемостью и проводимостью // Метрология. 2010. № 1. С. 10—22.

Дата принятия 03.09.2015 г.

543.52:535.214

Спектрорадиометрия ультрафиолетового излучения

С. И. АНЕВСКИЙ, Ю. М. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ, В. С. ИВАНОВ, В. Н. КРУТИКОВ,
О. А. МИНАЕВА, Р. В. МИНАЕВ

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Россия, e-mail: anevsky@vniiofi.ru

Рассмотрены принципы построения первичных эталонных приемников и источников ультрафиолетового излучения. В качестве эталонных приемников излучения использованы двойная ионизационная камера, пропорциональный счетчик и криогенный радиометр с электрическим замещением, а эталонным источником является синхротронное излучение, спектральные характеристики которого описаны на основе теории Швингера. Представлены результаты международных ключевых сличений, подтверждающие высокую точность разработанных во ВНИИОФИ методов и аппаратуры.

Ключевые слова: синхротронное излучение, ионизационная камера, электронное накопительное кольцо, пропорциональный счетчик, криогенный радиометр, первичный эталонный приемник.

The principles of construction of primary standard detectors and sources of UV-radiation are considered. As the primary standard radiation detectors the double ionization chamber, proportional counter and cryogenic radiometer with electrical displacement are used. The spectral characteristics of primary standard synchrotron radiation source are described by J. Schwinger theory. The results of international key comparisons confirm the high precision of methods and equipment, developed in VNIIOFI.

Key words: synchrotron radiation, ionization chamber, electron storage ring, proportional counter, cryogenic radiometer, primary reference detector.

В основе решения задач радиометрии экстремального вакуумного и ближнего ультрафиолетового (УФ) излучений в экологии и медицине, космических исследованиях, фотохимии и диагностике плазмы лежат измерения спектрорадиометрических характеристик источников и приемников излучений. Развитие спектрорадиометрии УФ-излучения связано с мониторингом солнечной активности, исследованием процессов фотоионизации в верхних слоях атмосферы, созданием систем локализации плазменных объектов, работами по нанопhotолитографии, ставшей одним из наиболее перспективных направлений нанoeлектроники.

Спектрорадиометрия ближнего УФ-излучения в диапазоне длин волн 200—400 нм особенно широко использует-

ся для фундаментальных медико-биологических исследований по цитологии, иммунологии и онкологии, для фототерапии, контроля эффективности бактерицидных облучателей и соляриев, создания солнечных имитаторов, контроля безопасности условий труда. Область экстремального вакуумного УФ-излучения 1—40 нм стала доступна для широких исследований в последние десятилетия вследствие преодоления трудностей, характерных для данного диапазона и связанных с низкой эффективностью отражающих покрытий зеркал и дифракционных решеток, необходимостью проведения юстировок оптических систем в условиях вакуума, отсутствием прозрачных материалов для изготовления окон источников и приемников излучения, деградацией элементов спектральных и поляризационных приборов под действием