

# НАНОИЗМЕРЕНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ ИЗДЕЛИЙ В СОВРЕМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Чижик С.А., доктор технических наук  
Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

Важным условием создания конкурентоспособной промышленности является оперативное внедрение новейших технологий. Безусловно, к таким относятся нанотехнологии. По экспертным оценкам, именно нанотехнологии должны к середине текущего столетия привести промышленный мир к новому состоянию — изменить принципы построения технических устройств в различных областях техники, включая машиностроение, электронику, оптику, медицину и другие. В то время как массовый индустриальный переход к нанотехнологиям является делом далекого, а, возможно, и не очень далекого будущего, тенденция миниатюризации во многих областях техники наблюдается уже сегодня.

В первую очередь, это касается электроники, для которой переход от характерного микронового к субмикронному размеру функциональных элементов уже в течение последнего десятилетия реализуется на практике. Тем самым обеспечивается фантастический рост возможностей компьютерной техники, мобильной связи и др. Плотность записи на магнитных и оптических носителях информации за последние 20 лет возросла на три порядка. При финишной обработке поверхностей в точной механике и оптике достигается гладкость, при которой средние параметры высоты шероховатости не превышают одного нанометра.

Одним из решающих условий продвижения микро- и нанотехнологий в промышленное производство является обеспечение контроля размеров базовых элементов и гладкости поверхностей в нанометровом масштабе [1–3]. Существенной необходимостью является получение пространственного (3-D) изображения поверхности. Так широко распространенное во второй половине 20-го столетия щуповое профилометрирование не отображает строения отдельных элементов поверхности и их взаимного расположения (топологические свойства). В оптической и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), которые широко распространены в радиоэлектронике, наоборот, хорошо отображается топологический рисунок микросхем. Электронная микроскопия при этом обеспечивает необходимое сегодня субмик-

ронное и нанометровое латеральное разрешение. Однако, получение высотной координаты, как в оптической, так и в электронной микроскопии затруднено, и возможно лишь при реализации достаточно редкого способа оптической профилометрии или при формировании поперечных срезов элементов для СЭМ.

Одновременно условиям обеспечения нанометрового разрешения и 3-D отображения элементов поверхности соответствует метод сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). В линейку СЗМ методов входит сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) и атомно-силовая микроскопия (АСМ). На рис. 1 показаны разрешающие возможности указанных методов в сравнении с методами профилометрии при измерении высоты и латеральной длины (шага). На диаграмме приведены также соответствия высотных и шаговых размеров иерархическим уровням шероховатости поверхностей и уровням формируемого ими контакта [4]. СЗМ является методом перспективным для решения задач наноконтроля геометрических размеров, структуры и локальных физико-механических свойств материалов [5, 6].

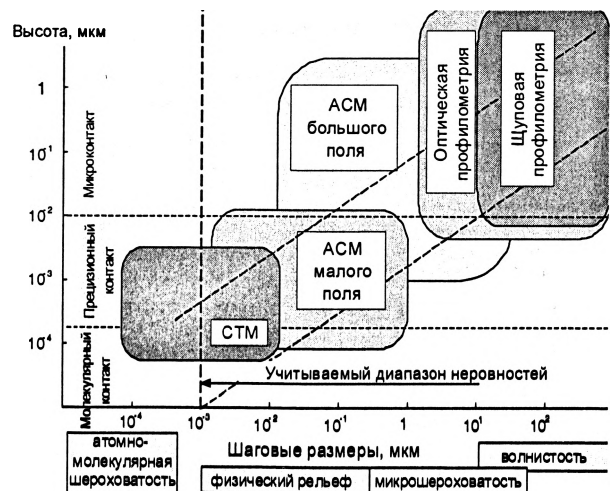


Рис. 1. Масштабные уровни шероховатости и методы 3-D измерения

Дополняя современные методы физического анализа, сканирующая зондовая микроскопия открыла возможности, благодаря которым удалось по-

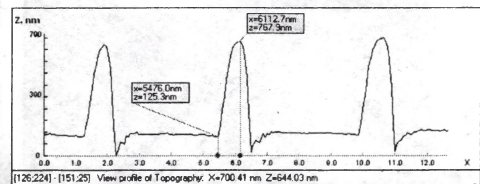
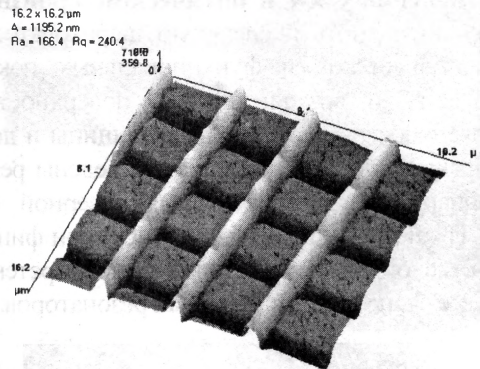
новому «взглянуть» на традиционные технологии в материаловедении, в особенности тонкопленочном, а также положить начало наноматериаловедению и другим нанотехнологиям. Традиционно приложения сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) относят к сфере научных исследований. Эффективность метода обусловлена высоким, вплоть до атомарного, пространственным разрешением поверхности; адекватной интерпретацией получаемой информации; возможностями использования микрозонда СЗМ в качестве инструмента создания нанобъектов и манипуляции ими; удобством компьютерной визуализации и широкими возможностями компьютерного анализа результатов.

В связи с тенденциями миниатюризации, применение СЗМ становится привлекательным и в современном высокотехнологичном производстве. Определяющим фактором при выборе метода является сочетание высокой точности измерений с возможностью высокого уровня автоматизации управления, простотой подготовки объектов анализа, сравнительной дешевизной технического обеспечения. Подтверждена его эффективность при контроле шероховатости поверхностей в точной механике, обнаружении дефектов поверхностей и оценке качества функциональных покрытий в оптике, обеспечении точности элементов микросхем в субмикронной электронике.

На протяжении последнего времени нами изучаются возможности применения метода СЗМ при контроле изделий промышленности. Здесь представлены некоторые результаты характеристики изделий электроники, оптики, голографической и кордовой продукции. Ниже приведены результаты визуализации указанных объектов с нанометровым разрешением с применением отечественного прибора АСМ НТ-206 (ОДО «Микротестмашины», Беларусь [7]). Комплект прилагаемого программного обеспечения позволяет визуализировать 3-D микро-, наногеомерию поверхности и объектов, элементов топологии микро-, наноразмеров на поверхности, также структуру материалов поверхностного слоя. Возможно построение профильных сечений в выбранных направлениях и расчет статистических параметров шероховатости.

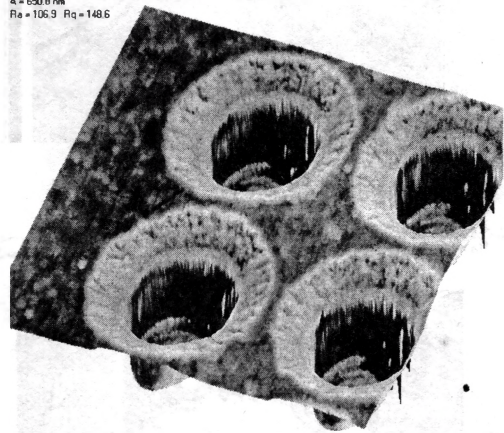
**Применение СЗМ в субмикронной электронике** обусловлено недостаточностью предельного разрешения в традиционно применяемой оптической микроскопии, а также необходимостью упрощения способов контроля ИМС для НПО «Интеграл» (Минск). Метод позволил получить пространственное изображение элементов электрони-

ки в сочетании с представлением наноструктуры материала поверхностных слоев (рис. 2). На данную методику измерения получено государственное метрологическое заключение БелГИМ.



a)

3.8 x 3.8 um  
A = 550.8 nm  
Ra = 106.9 Rq = 148.6



b)

Рис. 2. Результаты анализа элементов микросхем: а) — элементы двухуровневой топологии; б) — контактные окна

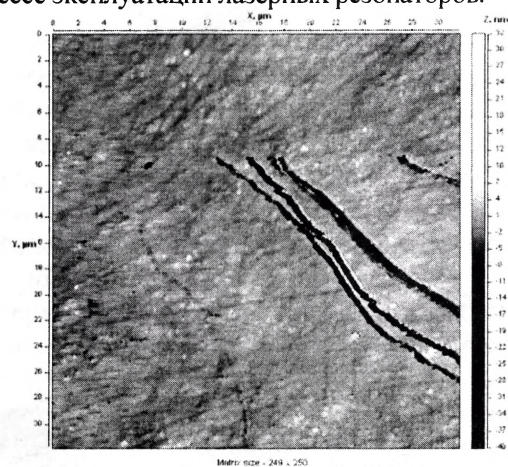
Решена задача устранения влияния формы сканирующего микроострия и погрешностей локального деформирования при сканировании разнородных материалов. Показана возможность построения панорамных изображений топологии микросхем.

В настоящее время совместно с ГНПО ТМ «Планар» (Минск) проектируется специализированный измерительный комплекс, сочетающий СЗМ с многофункциональным оптическим микроскопом, адаптированным для применения в электронике. Реализуется возможность подачи и мик-



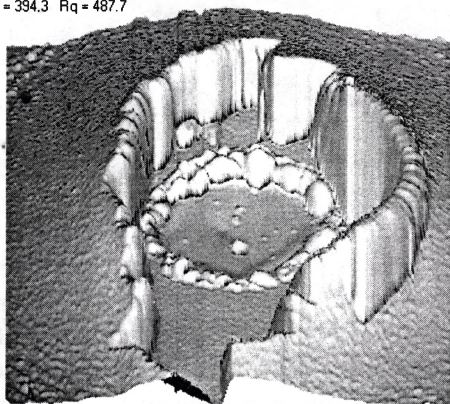
ропозиционирования кремниевых пластин. Перспективным является сочетание анализа геометрии топологических элементов микросхем с локальным анализом их электрических характеристик.

**Применение СЗМ в оптическом производстве** позволило оценить предельную шероховатость поверхностей стекол и функциональных покрытий, обнаружить и визуализировать поверхностные и подповерхностные микро-, нанотрещины и дефекты оптических изделий. На рис. 3 приведены результаты обнаружения дефектов для лазерной оптики НПРУП «ЛЭМТ», БелОМО (Минск) при финишной обработке оптических деталей и приобретенных в процессе эксплуатации лазерных резонаторов.



а)

15.5 x 11.8 μm  
A = 2287.9 nm  
Ra = 394.3 Rq = 487.7

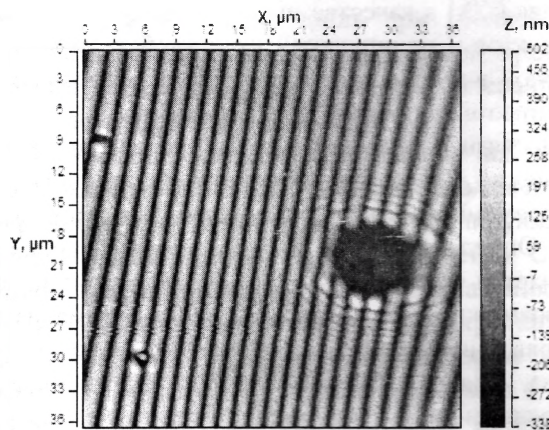


б)

Рис. 3. Пример СЗМ характеристики оптических поверхностей: а) трещины при обработке призм; б) разрушение многослойного покрытия в лазерной оптике

При выполнении данных измерений на конкретных изделиях производилось усовершенствование аналитического узла АСМ, которое заключалось в адаптации конструкции для размещения оптических деталей с нестандартными размерами.

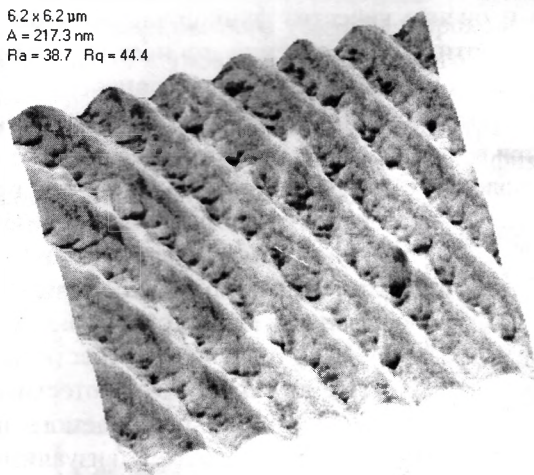
**Производство голографической продукции**, как и производство CD дисков, сопряжено с созданием топологических элементов субмикронного размера. Использование СЗМ при оптимизации технологии изготовления и контроле голографических изделий не влечет дополнительных методологических трудностей в измерениях и обычно приводит к хорошим результатам визуализации и количественной характеристики изделий, а также структуры функциональных покрытий (рис.4).



Matrix size - 256 x 254

а)

6.2 x 6.2 μm  
A = 217.3 nm  
Ra = 38.7 Rq = 44.4



б)

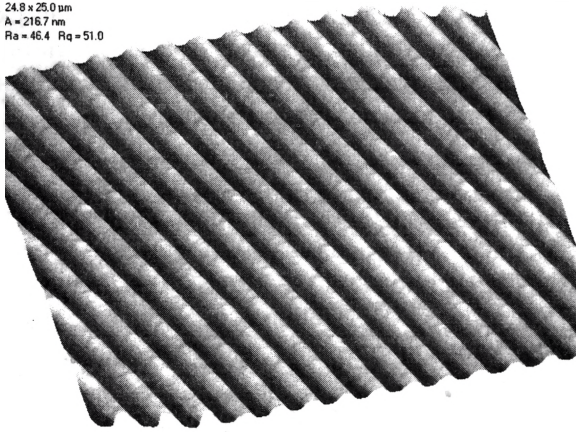
Рис. 4. Примеры визуализации поверхности голограммы: а) характерные дефекты голограммы; б) структура упрочняющего покрытия

Проведены широкомасштабные исследования продукции ЗАО «Голографическая индустрия» (Минск). Метод СЗМ может быть эффективно встроено в технологическую линейку производства голограмм.

На рис. 5 представлены результаты визуализации информационных дорожек CD-RW дисков с детализацией структуры элементов (питов) записи.

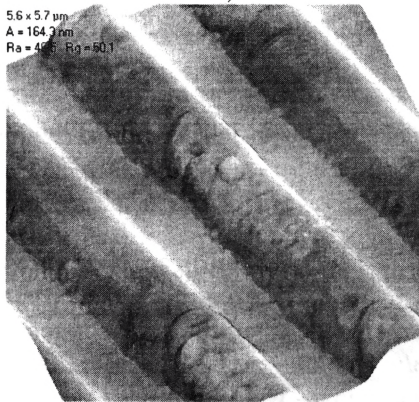


24.8 x 25.0 μm  
A = 216.7 nm  
Ra = 46.4 Rq = 51.0



а)

5.6 x 5.7 μm  
A = 164.3 nm  
Ra = 46.6 Rq = 50.1



б)

Рис. 5. Поверхности CD-RW дисков: а) информационные дорожки; б) единичные питы информации

СЗМ представляется чрезвычайно информационным методом в производстве CD и DVD дисков.

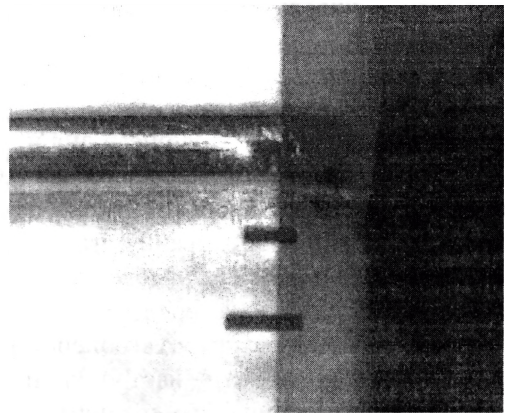
Производство кордового волокна на БМЗ (Жлобин) требует формирования бездефектной поверхности стальной нити, включая обеспечение неоднородности латунного покрытия. С помощью СЗМ был проведен анализ поверхности кордового волокна в режиме измерения топографии и одновременного формирования фазового контраста (рис. 6). В последнем случае предоставляется возможность визуализация пятен неоднородности упругих свойств материала в поверхностном слое, что позволяет отобразить неравномерность в нанесении латунного покрытия.

В случае контроля миниатюрных изделий (диаметр волокна около 200 мкм) является эффективным использование системы микропозиционирования в сочетании с оптической системой наблюдения (рис. 6 а).

#### Заключение

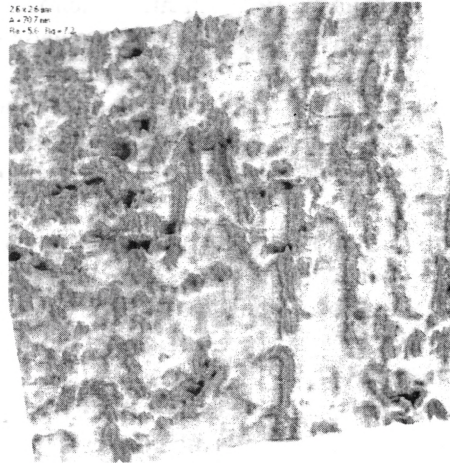
Приведенные примеры использования СЗМ для контроля и диагностики промышленных изделий были реализованы на универсальном оборудовании, изготавливаемом в Республике Беларусь.

Реальное внедрение метода потребует создания специализированных измерительных комплексов.

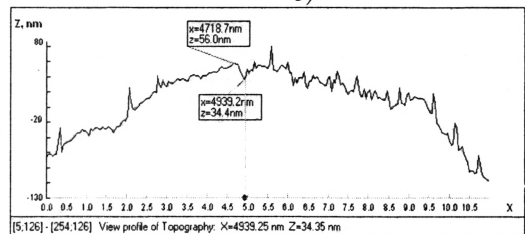


а)

2.6 x 2.6 μm  
A = 70.7 nm  
Ra = 5.1 Rq = 7.2



б)



в)

Рис. 6. Визуализация поверхности кордового волокна: а) система оптического микропозиционирования волокна и зонда СЗМ; б) микро- и нанодфекты на поверхности волокна корда; в) профильное сечение геометрии поверхности волокна

Концепция применения СЗМ в условиях высокотехнологичного производства основывается на следующих положениях.

1. При разработке СЗМ оборудования для наноконтроля в условиях производства должна учитываться специфика области приложений, что предполагает адаптацию аналитического узла к конфигурации и размерам анализируемых изделий. Привлекательным является сочетание СЗМ с полнофункциональным контрольно-измеритель-

ным оборудованием, традиционно используемым в рассматриваемой отрасли производства. Например, оптический микроскоп – атомно-силовой микроскоп.

2. Разрешающие возможности метода со значительным запасом перекрывают потребности микро- и нанотехнологий сегодняшнего дня и вполне могут быть ограничены диапазоном до 10 нм. Этот факт позволяет снижать уровень технических характеристик оборудования, что позволяет повышать устойчивость и надежность его использования в рутинных измерениях.

3. Разрабатывается режим «Автооператор», позволяющий оптимизировать настройки прибора. Методология управления измерениями должна быть направлена на минимизацию человеческого фактора. Протокол измерений будет сводиться к визуализации объектов и количественной оценке лишь необходимых параметров для контролируемых изделий. Простота в обращении достижима, возможно, в ущерб многофункциональности прибора.

4. Вопрос нанометрологии является важнейшим при обеспечении измерений. Разрабатываются методики сертификации СЗМ, включая выбор тестовых структур и оптимизацию калибровочных процедур.

Работа по внедрению техники наноконтроля в современное производство выполняется в рамках ря-

да заданий Государственных научно-технических программ Республики Беларусь и может быть более эффективной при подготовке совместных межгосударственных проектов Россия-Беларусь.

### *Литература*

1. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике / Отв. редактор А.Л. Асеев. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. – 368 с.
2. Whitehouse D. J. Handbook of Surface Metrology. IOP Publishing, Bristol and Philadelphia. 1994. 988 p.
3. Третьяков Ю.Д. Проблема развития нанотехнологий в России и за рубежом// Вестник Российской Академии наук, 2007, т. 77, №1. с 3 – 10.
4. Свириденко А.И., Чижик С.А., Петроковец М.И. Механика дискретного фрикционного контакта. - Минск: Навука і тэхніка, 1990.- 272 с.
5. Bhushan B., Fuchs H., Hosaka S. Applied Scanning Probe Methods. Springer. 2002. 475 p.
6. Чижик С.А. Комплексная характеристика материалов методом сканирующей зондовой микроскопии// Тепло- и массообмен-2003. Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2003. С.226-232.
7. www.microtm.com

## **ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДИСКОВ ПЛЮЩИЛОК МАРКИ «КОРМ-10»**

*Ивашко В.В., Везера И.И., Синцов С.И.  
Физико-технический институт НАН Беларуси*

В последние годы в Республике Беларусь, России, Швеции, Англии и Финляндии получила распространение уборка зерновых и зернобобовых культур, а также кукурузы повышенной влажности с целью их переработки методом плющения и дальнейшего хранения с применением консервантов для последующего скармливания в животноводческих комплексах. Применение такой технологии позволяет уменьшить зависимость уборочной страды от погодных условий, исключить операции сушки зерна. Согласно предварительных расчетов экономия средств на одной тонне плющенного консервированного зерна составляет около 10–20 млн. Рублей. Для реализации процесса

плющения зерна в Республике Беларусь разработана установка для плющения зерна «корм-10», в которой необходимо упрочнить рабочие поверхности 21–23 дисков, испытывающих износ и контактные нагрузки в процессе эксплуатации.

В настоящее время для этих целей применяют методы термической, лазерной, плазменной или химико-термической обработки. Каждый из перечисленных методов обладает определенными достоинствами и недостатками.

Наибольшее распространение в промышленности получил метод термического упрочнения с использованием нагрева в камерных, шахтных и др. печах. Этот метод надежен, стабилен, универ-