

АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

И. Ш. Невлюдов

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой*

E-mail: tapr@kture.kharkov.ua

И. В. Жарикова

Ассистент*

E-mail: tapr@kture.kharkov.ua

И. Д. Перепелица

Кандидат технических наук

Кафедра теоретической и прикладной информатики

Харьковский национальный

университет им. В. Н. Каразина

пл. Свободы, 4, г. Харьков, Украина, 61022

А. Г. Резниченко

Ассистент*

E-mail: tapr@kture.kharkov.ua

*Кафедра технологии и автоматизации

производства РЭС и ЭВС

Харьковский национальный

университет радиоэлектроники

пр. Ленина, 16, г. Харьков, Украина, 61166

У статті виконано аналіз основних параметрів підкладок електронної техніки, що впливають на якість готового виробу. Зокрема, розглянута шорсткість поверхні. Виконано дослідження методів контролю шорсткості, виявлені їх переваги та недоліки. Визначені перспективні задачі зі створення автоматизованих систем контролю якості поверхні підкладок, зокрема таких, що розроблятимуться на основі оптичних методів

Ключові слова: підкладка, якість поверхні, шорсткість, методи контролю, профілометр, інтерферометр, технологічний процес

В статье проведен анализ основных параметров подложек электронной техники, влияющих на качество конечного изделия. В частности, рассмотрена шероховатость поверхности. Выполнено исследование методов контроля шероховатости, выявлены их преимущества и недостатки. Определены перспективные задачи по созданию автоматизированных систем контроля качества поверхности подложек, в частности таких, которые будут разрабатываться на основе оптических методов

Ключевые слова: подложка, качество поверхности, шероховатость, методы контроля, профилометр, интерферометр, технологический процесс

1. Введение

Важной задачей электронной техники является изготовление надежных приборов, способных работать в течение длительного времени.

Подложка – один из основных конструктивных элементов электронных изделий. Проходя весь технологический процесс, она подвергается ряду сложных воздействий: механических, термических, физических и химических. Все эти воздействия в разной степени сказываются на свойствах функциональных элементов интегральных схем (ИС), сформированных на подложках.

Одним из важнейших параметров подложек, определяющих качество выпускаемых изделий, является состояние их поверхности [1, 2]. От качества поверхности полупроводниковых пластин во многом зависят электрические параметры электронных приборов и их стабильность.

Отдельные авторы справедливо утверждают, что отечественная электронная промышленность остро

нуждается в проведении работ по улучшению качества поверхности керамических оснований пассивных и активных компонентов электронной техники [3]. При этом шероховатость является одним из основных параметров, влияющих на качество готовых изделий электронной техники.

2. Анализ предметной области и постановка проблемы

Подложкой для приборов электронной техники служит пластина или несущая часть, на которой формируются слои, элементы и компоненты интегральной микросхемы [1]. Она выполняет как конструктивно-технологические, так и электрические функции. Для изготовления подложек применяются полупроводниковые, аморфные, а также моно- и поликристаллические диэлектрические материалы (рис. 1). Основными керамическими материалами для подложек тонко- и толстопленочных схем являются керамика на

основе окиси алюминия, а также бериллиевая керамика и поликор.

Поверхность подложек неидеальна и может иметь большое количество дефектов, которые, в свою очередь, влияют на физико-технологические свойства пленок, формируемых в ходе получения эпитаксиальных, диффузионных и тонких поликристаллических слоев. В то же время, при получении толстых пленок из композиционных паст определенная степень шероховатости поверхностей подложек необходима для стимулирования адгезии к ним этих пленок [4].

Параметрами качества обработки подложек могут быть: микронеровности рельефа поверхности; толщина оксидов на поверхности обработанных подложек; адгезионная способность; микронапряженность в приповерхностном слое; степень физической и химической загрязненности поверхности и др. [5].

Независимо от материала и технологии обработки подложек необходимо достигать однородности поверхности, то есть степень шероховатости, глубина нарушенного слоя, конфигурация поверхностных неровностей и другие дефекты не должны иметь значительных отклонений от средних величин [6, 7].

Качественные характеристики подложки, особенно ее поверхности, являются одними из доминирующих факторов в ходе технологического процесса получения эпитаксиальных слоев кремния, а также во время операции нанесения фоторезиста в процессе фотолитографии – для обеспечения качества фоторезистивного покрытия и его адгезии к подложке [4].



Рис. 1. Классификация подложек интегральных схем [4]

Улучшение характеристик поверхности необходимо для общего повышения качества конечных изделий и перехода к фотолитографическим процессам с меньшими топологическими размерами [3].

Достигнутые в последние десятилетия успехи в области физики полупроводников и микроэлектроники в значительной мере определяются прогрессом в области технологии изготовления сверхгладких поверхностей и нанесения на них многослойных и тонкопленочных покрытий [8].

Оценка влияния шероховатости, волнистости и отклонений формы поверхностей деталей на их функциональные свойства является серьезной проблемой [9]. Шероховатость или микрогеометрия поверхности – это одна из важнейших характеристик материалов: она влияет на износостойкость, контактную жесткость, коррозионную стойкость и другие функциональные характеристики поверхности [10–12]. Однако вопросы

достоверности оценки шероховатости все еще изучены недостаточно, а определение существующих стандартных и нестандартных критериев шероховатости достаточно трудоемко, что не всегда позволяет использовать данные критерии для решения многих задач в производственных условиях [13].

В настоящее время в мировой практике не выработан единый подход к оценке шероховатости. Так, даже в таких странах как США, Англия, ФРГ, Япония количество параметров шероховатости значительно различается [9, 13].

Толщины наносимых на подложки слоев не должны превышать десятков или сотен ангстрем, а шероховатость таких поверхностей – единиц ангстрем. Приведенные требования определяют актуальность создания надежных методов количественного контроля шероховатости подложек и тонких пленок [14–18].

Однако данному вопросу часто уделяется недостаточно внимания. Требования ГОСТ и ДСТУ к состоянию поверхности во многом устаревшие. Следовательно, возникает необходимость дополнять используемые стандартные методики контроля состояния поверхности подложек в процессе изготовления ИС.

Также стоит отметить, что актуальными задачами являются проведение исследований по нахождению наиболее достоверных критериев шероховатости, а также разработка методик и устройств, которые позволят автоматизировать процесс измерения. Решение перечисленных задач направлено на повышение качества продукции и развитие производства [13].

Таким образом, задачами исследования являются анализ методов контроля шероховатости поверхности подложек, а также выявление существующих проблем, требующих решения.

4. Методы контроля шероховатости поверхности

Каждому из методов контроля шероховатости поверхности присущи свои особенности, и выбор того или иного метода должен определяться конкретными задачами, стоящими перед исследователем. Одной из основных характеристик любого метода является чувствительность по высоте шероховатости и область пространственных частот, в которых проводятся измерения. Также немаловажными параметрами являются линейные габариты подложки, площадь контроля и время измерений, отсутствие разрушений поверхности в процессе эксперимента, а также возможность исследования поверхностей сложного профиля [8].

Методы контроля шероховатости поверхности можно отнести к двум группам:

- методы, основанные на дифракции электромагнитного излучения на неоднородной границе раздела сред (оптические и рентгеновские) [18–24];

- прямые методы контроля микрорельефа: механическая профилометрия, атомно-силовая и туннельная микроскопия [10, 21, 24–26].

Качество обработки поверхности подложки, например, изготовленной из материала Al_2O_3 , влияет на френелевские потери, на потери, возникающие из-за рассеяния света на микронеровностях поверхностей подложек и на однородность напыляемой структуры и на теплопроводность подложки. Для достижения высокого качества обработки поверхности подложек необходимо технологически обеспечивать минимально допустимые неровности поверхности и выполнять их контроль. Информация о качестве поверхности может быть получена на основе применения следующих оптических методов неразрушающего контроля:

- метод светового сечения;
- растровый метод;
- рефлектометрический метод;
- метод слепков;
- метод сравнения с образцовой деталью;
- интерференционный метод [27, 28].

Метод светового сечения заключается в том, что одним микроскопом (проекционным) на исследуемую поверхность направляется под определенным углом узкий пучок света, при этом на ней получается граница тени от непрозрачной шторки (щели), введенной в часть светового пучка, падающего на поверхность. Граница света и тени (световое сечение) подобна профилю в сечении поверхности плоскостью, и по ее конфигурации можно судить о расположении, форме и размерах неровностей на испытываемой поверхности.

Второй микроскоп (наблюдательный), расположенный под углом ($2\alpha=90^\circ$) относительно первого, служит для наблюдения полученного светового сечения поверхности.

Метод светового сечения относится к профильным методам измерения неровностей поверхности. Считается, что приборы (двойные микроскопы, приборы светового сечения), в которых реализуется метод светового сечения, позволяют измерять неровности поверхности высотой от 0,8 до 63 мкм с допустимыми погрешностями показаний [10].

Следует заметить, что при этом неровности поверхности кромок шторок, прикрывающих диафрагмированную щель (иначе говоря, щелевую диафрагму), должна быть в несколько раз меньше величины ($0,8/35 \approx 0,02$ мкм), иначе щели будут вносить заметное искажение светового сечения профиля. Достижение этого представляет определенные технологические и метрологические трудности.

Если на испытываемую поверхность наложить стеклянную пластину с нанесенными на ней близко друг от друга штрихами (т. е. с растровой сеткой), то при наклонном падении лучей отраженная картина растровой сетки накладывается на штрихи самой сетки и наблюдаются муаровые полосы. На основе этого явления предложена методика измерения высоты неровностей и степени шероховатости с помощью растрового микроскопа.

При оценке шероховатости поверхностей сложной формы и в случае трудного доступа к исследуемой поверхности применяют так называемый метод слепков, заключающийся в снятии копий (как правило, «негативных») поверхностей для последующего измерения по ним высоты неровностей. Неровности на слепках можно измерять как с помощью оптических, так и щуповых приборов [21]. В частности, для этого исполь-

зуют приборы МИС-11, ПСС-2, электромеханические профилографы-профилометры.

В настоящее время за рубежом, в основном для нужд микроэлектроники, разработан и выпускается ряд профилометров, основанных на различных принципах: автофокусировки, интерферометрии, конфокальной микроскопии, атомно-силовой микроскопии и контактного сканирования пьезодатчиком с иглой (стайлусным) [29]. Однако приборы с нанометровым разрешением имеют высокую стоимость.

К наиболее распространенным зарубежным профилографам-профилометрам принадлежат приборы «Телисурф» (Англия), «Перт-о-метр», «Перт-о-граф» (ФРГ), «Профикордер», профилометр фирмы Бендикс (США) и др. Харьковским НПП «МИКРОТЕХ» разработан профилометр, широко применяемый предприятиями Украины [30].

Однако измерения профиля шероховатости с использованием профилографа не обеспечивают данных по состоянию поверхности. На пластинах диаметром 100 мм, соответствующих ЕТО.035.240 ТУ, изготавливаются ИС с $V_{\min} \sim 2$ мкм. Влияния различных способов стандартных процессов химической обработки на шероховатость поверхности существующими методиками обнаружить не удалось.

Недостатком механических профилометров является то, что измерительный щуп (алмазная игла) контактирует с поверхностью и, следовательно, в той или иной мере повреждает ее. Кроме того, процедура измерений длительная, особенно если необходимо исследовать поверхность образца по всей ее площади [21].

В последнее время развивается направление исследования состояния поверхности полупроводниковых материалов на сканирующих зондовых микроскопах (СЗМ) [25, 26]. При использовании атомно-силового микроскопа (АСМ) изучено влияние способа химической обработки на состояние поверхности подложек.

Туннельные и атомно-силовые методы обладают наивысшей чувствительностью и точностью, позволяя наблюдать атомную структуру поверхности. Однако поле зрения (исследуемая площадь образца) при этом ограничено единицами или десятками микрон, что неприемлемо для целого ряда приложений. Кроме этого, названные методы не позволяют исследовать скрытые границы раздела.

Методы, основанные на анализе рассеяния и отражения рентгеновского излучения, привлекают в настоящее время большое внимание и, вероятно, наиболее предпочтительны для исследования оптических элементов рентгеновского диапазона [20].

Тем не менее, рентгеновские методы обладают рядом неоспоримых достоинств:

- это неразрушающие методы контроля;
- эти методы обладают очень высокой чувствительностью: позволяют исследовать шероховатости со среднеквадратичной высотой 0,1 нм;
- рентгеновские методы более информативны, чем например, оптические методы, поскольку минимальный продольный размер регистрируемых неоднородностей по порядку величины соответствует длине волны зондирующего пучка.

Однако в отличие от прямых измерений (профилометрия, АСМ), методы рентгеновского рассеяния являются косвенными и существенным образом осно-

вываются на использовании теории взаимодействия излучения с шероховатой поверхностью и модели поверхности. В этой связи встает проблема выбора адекватного теоретического приближения, позволяющего извлечь данные о шероховатостях однозначным образом [8].

Для контроля шероховатости функциональной поверхности подложек электронной техники наиболее приемлемым является оптический метод неразрушающего контроля [27, 28].

К приборам бесконтактного действия относят приборы, основанные на методе светового сечения, такие как двойные микроскопы типов МИС-П и ПСС-2 и микроинтерферометры различных типов, и в первую очередь микроинтерферометры типов МИИ-4 и МИИ-9.

Существенным преимуществом этих методов является неразрушающее воздействие на контролируемые образцы. Однако, как известно, разрешающая способность оптических методов ограничена дифракцией световых волн.

На рынке Украины ведущие зарубежные и отечественные фирмы предлагают для измерения шероховатости микроскопы улучшенного качества изображения; многошкальные и портативные профилометры и профилографы и др. [12].

Некоторые реализации оптических методов требуют применения специальных эталонов, т. е. не являются в полной мере количественными. Кроме этого, принципиальный недостаток всех оптических методов состоит в том, что минимальный продольный (вдоль поверхности) размер шероховатостей, которые еще могут быть обнаружены, ограничен по порядку величины длиной волны зондирующего излучения, т. е. не может быть меньше 0,5–1 мкм.

В России в качестве бесконтактного прибора для измерения глубины микрорельефа наиболее широко используются микроинтерферометр Линника МИИ-4 производства ОАО «ЛОМО» (г. Санкт-Петербург, Россия) и его более поздняя версия МИИ-4М [29], предназначенные для измерений параметров шероховатости полированных и доведённых поверхностей, а также для измерений толщин плёнок (высоты уступов, образованных краем плёнки и подложки), в диапазоне 0,1...0,8 мкм. Однако эти приборы не всегда соответствуют современным потребностям производства и науки, т. к. не позволяют проводить автоматизированную компьютерную обработку интерферограмм.

Разработанный ЗАО «Дифракция» (г. Новосибирск, Россия) оптический профилометр на базе микроинтерферометра МИИ-4М предназначен для решения такой задачи и может использоваться для измерения толщины пленок и глубины микрорельефа в диапазоне до ± 100 мкм с нанометровым разрешением для изделий оптоэлектроники, дифракционной оптики, микроэлектроники, лазерной микрообработки, глубокой рентгенолитографии [31].

Для ввода изображения используется цветная USB-камера. В оптический блок МИИ-4М встроен высокоразрешающий оптический датчик перемещения объектива микроскопа, связанного с блоком управления (рис. 2). Световолоконный кабель МИИ-4М подключается также к блоку управления, включающему светодиодный осветитель. Блок управления обеспечивает управляемое от компьютера через порт USB

чтение положения датчика перемещения объектива и переключение между белым и квазимонохроматическим светодиодами с регулировкой яркости.

Профилометр имеет два режима измерения: однофокусный и многофокусный. В однофокусном режиме измерение рельефа с глубиной до ± 2 мкм проводится по интерферограмме в белом свете с калибровкой периода полос по интерферограмме в квазимонохроматическом свете. В многофокусном режиме для определения глубины микрорельефа используются показания датчика перемещения объектива и интерферограммы, снятые при различных положениях объектива. В многофокусном режиме диапазон измерения составляет ± 100 мкм.

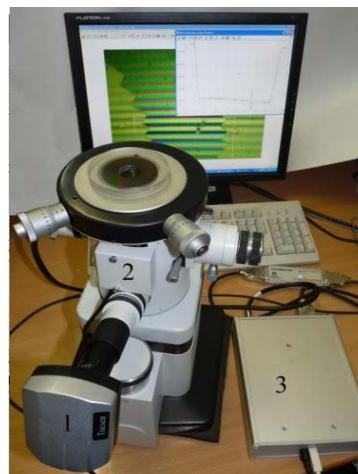


Рис. 2. Профилометр на базе интерферометра МИИ-4М: 1 – USB-видеокамера; 2 – блок датчика перемещений; 3 – USB-контроллер; 4 – светодиодный осветитель без волоконного подвода светового пучка

Результаты измерения представляются в виде двумерной профилограммы. Программное обеспечение предоставляет возможности аппроксимации формы микрорельефа и вычисления высоты базовых форм рельефа.

Перспективность интерференционного метода заключается в том, что он поддается процессу автоматизации и обеспечивает контроль шероховатости поверхности по параметру $R_z = 0,1$ мкм.

Известны работы по созданию системы контроля параметров шероховатости поверхности волоконно-оптических компонентов [32–34]. В частности, система предназначена для контроля параметров формы торцов наконечников разъемных оптических соединителей.

В программе предусмотрен модуль, осуществляющий поиск и индикацию на графиках распределения интенсивности различных областей уровней сигналов.

Алгоритм выделения границ областей изображения строится на основе комплексного анализа распределения интенсивности (яркости) точек изображения вдоль выбранной оси. При этом строится функция распределения интенсивности по выбранной линии изображения и оцениваются интегральные характеристики данной функции.

На основе выполненного анализа авторами разработана установка для автоматизированного контроля шероховатости поверхности подложек, которая содер-

жит в своем составе оптическую систему (микроинтерферометр МИИ-4), фотоприемник, АЦП, устройство согласования фотоприемника с АЦП и управляющий контроллер (рис. 3). В качестве анализатора интенсивности отраженного от поверхности подложки излучения используется многоэлементный фотоприемник на базе светочувствительных схем с зарядовой связью.

Дальнейшими задачами исследования будут: разработка технологии автоматизированного контроля, синтез метода идентификации видеоизображения интерференционной полосы поверхности подложки и экспериментальная проверка эффективности использования выбранных компонентов установки автоматизированного контроля и оценка достоверности результатов контроля.

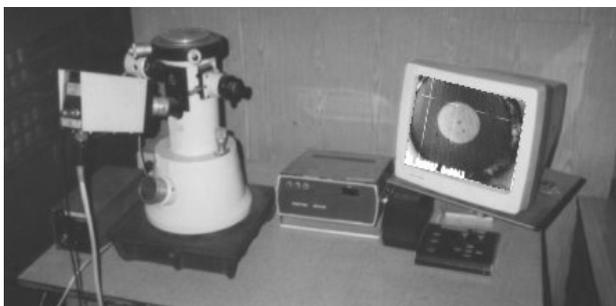


Рис. 3. Система автоматизированного оптического контроля

Также немаловажным вопросом данной предметной области является моделирование шероховатости поверхности. Так, например, распространённый способ учета шероховатости на ранних этапах создания конечного изделия заключается в использовании математических моделей поправочного коэффициента в виде функции, описывающей форму скин-слоя проводника на линии передачи. Однако подобные модели

зачастую разработаны под конкретную технологию изготовления и не всегда адекватно отражают реальную форму поверхности при ее смене, вследствие чего имеют большую погрешность расчета [35].

5. Выводы

В ходе проведенного исследования выполнен обзор существующих методов контроля шероховатости поверхности подложек для изделий электронной техники, выявлены основные особенности, проанализированы преимущества и недостатки данных методов, а также сделан вывод о необходимости совершенствования рассмотренных методов контроля.

В условиях развития информационных и интеллектуальных технологий, внедрения систем управления в производственный процесс особую актуальность приобретает разработка автоматизированных методов и систем контроля и управления качеством продукции. Контролируемые величины лежат в субмикронной области, а операция контроля технологического процесса изготовления подложек на сегодняшний день достаточно трудоемка.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости автоматизации операции контроля шероховатости, которая позволит оперативно и достоверно получать информацию об объекте контроля и эффективно управлять технологическим процессом изготовления подложек для приборов электронной техники.

Разрабатываемая авторами технология автоматизированного контроля шероховатости поверхности подложек основана на применении интерференционного метода. Дальнейшие исследования будут направлены на выбор методов распознавания и фильтрации изображений при проведении контроля с использованием выбранных компонентов, а также создание математических моделей для оценки шероховатости поверхности.

Литература

1. Коледов, Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок [Текст] / Л. А. Коледов. – СПб.: Издательство «Лань», 2007. – 400 с.
2. Ефимов, И. Е. Микроэлектроника. Физические и технологические основы [Текст] / И. Е. Ефимов, И. Я. Козырь, Ю. И. Горбунов. – М.: Высш.шк., 1987. – 461 с.
3. Уткин, В. Н. Исследование морфологии поверхности керамических подложек компонентов электронной техники [Текст] / В. Н. Уткин, М. А. Исаков, О. Е. Хапугин // Современные наукоемкие технологии. – 2007. – № 11. – С. 38–41.
4. Черняев, В. Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров [Текст] / В. Н. Черняев. – М.: Радио и связь, 1987. – 464 с.
5. Коньшин, А. С. Поверхностная обработка твердых минералов и кристаллов для микроэлектроники [Текст] / А. С. Коньшин, В. В. Соловьев, Т. Б. Теплова // Научный вестник Московского Государственного Горного Университета. – 2010. – № 8. – С. 41–50.
6. Богатырев, А. Е. Новые методы контроля чистоты и дефектности поверхности деталей [Текст] / А. Е. Богатырев Л. И. Шушунова, Г. М. Цыганов // Обзоры по электронной технике. – 1980. – № 3 (707). – С. 19–27.
7. Розницин, И. Л. Определение оптимальных значений твердости, шероховатости поверхности материала, толщины наносимого покрытия для деталей объемного гидропривода [Текст] / И. Л. Розницин, Д. Б. Глушкова, В. П. Тарабанова, А. П. Любченко // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2009. – № 46. – С. 64–68.
8. Кривonosов, Ю. С. Определение шероховатости подложек и тонких пленок по рассеянию рентгеновских лучей в условиях внешнего отражения: [Текст]: дисс. ... канд. физ.-мат. наук / Ю. С. Кривonosов. – М., 2003. – 126 с.
9. Табенкин, А. Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт [Текст] / А. Н. Табенкин, С. Б. Тарасов, С. Н. Степанов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 136 с.
10. Дудин-Барковский, И. В. Измерение и анализ шероховатости поверхности и некруглости поверхности [Текст] / И. В. Дудин-Барковский, А. И. Карташева. – М.: Машиностроение, 1978. – 320 с.

11. Feldman, L. C. Fundamentals of Surface and Thin Film Analysis [Text] / L. C. Feldman, J. W. Mayer. – New York: North-Holland, 1986. – 352 p.
12. Назаров, Ю. Ф. Методы исследования и контроля шероховатости поверхности металлов и сплавов [Текст] / Ю. Ф. Назаров, А. М. Шкилько, В. В. Тихоненко, И. В. Компанец // Физическая инженерия поверхности. – 2007. – Том 5, № 3–4. – С. 307–316.
13. Лисовская, В. В. Методы оценки шероховатости тонкопленочных покрытий [Электронный ресурс] / В. В. Лисовская, Г. Я. Беляев, С. Ю. Котов // Материалы конференции «Прикладные разработки науки и техники – 2013», Przemysl, Польша. – Режим доступа : http://www.rusnauka.com/32_PRNT_2013/Tecnic/8_146866.doc.htm.
14. Баранов, А. М. Новый универсальный метод контроля параметров слоев и шероховатости поверхности в процессах вакуумного осаждения и травления [Текст] / А. М. Баранов, С. А. Терешин, И. Ф. Михайлов // Журнал технической физики. – 1997. – Т. 67, № 8. – С. 62–64.
15. Лукин, Е. С. Анализ микроструктуры, качества поверхности и свойств подложек из оксида алюминия [Текст] : тез. докладов 2^{ой} междуна. науч.-прак. конф. / Е. С. Лукин, Е. В. Ануфриева, Н. А. Попова, Б. А. Морозов // Функциональная керамика. – Нижний Новгород, 2009. – С. 35–40.
16. Shivea, L. W. Impact of Thermal Processing on Silicon Wafer Surface Roughness [Text] / L. W. Shivea, B. L. Gilmore // Semiconductor Wafer Bonding 10: Science, Technology, and Applications, Issue 16 (8), edited by T. Suga. – 2008. – P. 401–405.
17. Kranz, C. Impact of The Rear Surface Roughness on Industrial-Type Perc Solar Cell [Text] / C. Kranz, S. Wyczanowski, S. Dorn, K. Weise, C. Klein, K. Bothe, T. Dullweber, R. Brendel // 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Frankfurt, Germany, 24-28 September 2012. – P. 557–560.
18. Пашкевич, М. Ф. Исследования и изобретательство в машиностроении [Текст] / М. Ф. Пашкевич, А. А. Жолобов, Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, В. М. Пашкевич; под общ. ред. М. Ф. Пашкевича. – Мн. : Адукацыя і выхаванне, 2005. – 287 с.
19. Когерентно-оптические методы в измерительной технике и биофотонике [Текст] / Под ред. В. П. Рябухо и В. В. Тучина. – Саратов : Сателлит, 2009. – 127 с.
20. Протопопов, В. В. Прибор для оперативного контроля шероховатости сверхгладких поверхностей больших размеров методом рентгеновского сканирования [Текст] / В. В. Протопопов, К. А. Валиев, Р. М. Имамов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2000. – Т. 66, № 1. – С. 32–37.
21. Егоров, В. А. Оптические и щуповые приборы для измерения шероховатости поверхности [Текст] / В. А. Егоров. – М. : Машиностроение, 1965. – 222 с.
22. Невлюдов, И. Ш. Метод анализа интерференционных изображений при контроле параметров качества поверхности волоконно-оптических компонентов [Текст] / И. Ш. Невлюдов, А. И. Филипенко // Вісті Академії інженерних наук України: Машинобудування і прогресивні технології. Спец. Випуск. – 2004. – № 4(24). – С. 81–87.
23. Полещук, А. Г. Лазерные методы контроля асферической оптики [Текст] / А. Г. Полещук, А. Е. Маточкин // Фотоника. – 2011. – № 2. – С. 38–44.
24. Протопопов, В. В. Сравнительные измерения шероховатости подложек рентгеновских зеркал методами рентгеновской рефлектометрии и сканирующей зондовой микроскопии [Текст] / В. В. Протопопов, К. А. Валиев, Р. М. Имамов // Кристаллография. – 1997. – Т. 42. – С. 747–754.
25. Арутюнов, П. А. Сканирующая зондовая микроскопия (туннельная и силовая) в задачах метрологии нанoeлектроники [Текст] / П. А. Арутюнов, А. Л. Толстихина // Микроэлектроника. – 1997. – Т. 26, № 6. – С. 426–439.
26. Nanda, K. K. Measurement of Surface Roughness by Atomic Force Microscopy and Rutherford Backscattering Spectrometry of CdS Nanocrystalline Films [Text] / K. K. Nanda, S. N. Sarangi, S. N. Sahu // Applied Surface Science. – 1998. – Vol. 133. – P. 293–297.
27. Sprague, R. Surface Roughness Measurement Using White Light Speckle [Text] / R. Sprague // Applied Optics. – 1972. – Vol. 11, Issue 12. – P. 2811–2816.
28. Zhenrong, Z. Roughness Characterization of Well-polished Surfaces by Measurements of Lightscattering Distribution [Text] / Z. Zhenrong, Z. Jing, G. Peifu // Optica Applicata. – 2010. – Vol. XL, No. 4. – P. 811–818.
29. Корольков, В. П. Модернизация микроинтерферометров МИИ-4 и МИИ-4М [Текст] / В. П. Корольков, А. Е. Качкин, Р. В. Шиманский // Мир измерений. – 2012. – № 10. – С. 37–42.
30. Шероховатость от «МИКРОТЕХ®» [Текст] / Металлообработка. – 2008. – № 4. – С. 19.
31. Оптический профилометр на базе микроинтерферометра МИИ-4М [Электронный ресурс] / ЗАО «Дифракция», г. Новосибирск. – Режим доступа : <http://www.diffraction.ru/products-ru/mii-4>.
32. Невлюдов, И. Ш. Технология автоматизированного контроля качества поверхности [Текст] / И. Ш. Невлюдов, Е. П. Второв, В. В. Токарев // Вестник Харьковского экономического университета. – 1998. – Вып. 1. – С. 86–88.
33. Невлюдов, И. Ш. Автоматизированный контроль шероховатости высокоточных деталей в приборостроении [Текст] : сб. науч. пр. / И. Ш. Невлюдов, В. В. Токарев // ХВУ. – 2001. – Вып. 5(35). – С. 196–199.
34. Невлюдов, И. Ш. Методология и оборудование контроля параметров компонентов волоконно-оптических систем передачи информации [Текст] / И. Ш. Невлюдов, А. И. Филипенко, Б. А. Малик // Прикладная радиоэлектроника: сб. АН Прикладной радиоэлектроники. – 2002. – Т. 1, № 1. – С. 51–56.
35. Зырин, И. Д. Обзор возможностей математического моделирования шероховатости поверхности низкотемпературной керамики [Текст] : матер. 23-ей Междуна. конф. / И. Д. Зырин, В. М. Карабан, С. Б. Сунцов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2013), 8-13 сентября 2013, Севастополь. – С. 181–182.