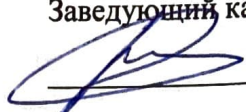


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой _____
(Индекс)



(И.О.Фамилия)

« ____ » _____ 20 ____ г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы бакалавра

Студент группы РЛ2-81Б

Малахов Кирилл Максимович
(фамилия, имя, отчество)

Тема квалификационной работы «Исследование и анализ оптико-электронной системы регистрации атомно-силового микроскопа»

Источник тематики (НИР кафедры, заказ организаций и т.п.)

ИТ-МЭТ Спектрум Инструментс

Тема квалификационной работы утверждена распоряжением по факультету
№ _____ от « ____ » _____ 20__ г.

Часть 1. Научно-исследовательская

Провести анализ и сравнение существующих методов микроскопии. Разработать теоретическую модель работы канала регистрации атомно-силового микроскопа. Провести проработку схемотехнических решений при проектировании функциональной схемы канала регистрации. Провести набор экспериментальных данных с калибровочными решетками TGZ1, TGZ2, TGZ3. Провести анализ и сравнение экспериментальной и теоретической спектральной плотности корреляционной функции калибровочных решеток.

Часть 2. Проектно - конструкторская

Провести расчёты чувствительности и шумовых характеристик изгибов кантилевера. Проанализировать организацию системы слежения лазерным лучом. Провести

светоэнергетический расчёт канала регистрации. Разработать функционально-оптическую схему канала регистрации. Разработать рабочие чертежи элементов конструкции канала регистрации.

Часть 3. Технологическая

Разработать технологический процесс сборки и юстировки канала регистрации.

Оформление квалификационной работы:

Расчетно-пояснительная записка на 71 листах формата А4.

Перечень графического (иллюстративного) материала (чертежи, плакаты, слайды и т.п.)

- 1) 1-А1 – «Функционально-оптическая схема канала регистрации».
- 2) 1-А1 – «Расчётно-графический лист: «Эквивалентная схема».
- 3) 1-А1 – «Расчётно-графический лист: «Теоретическая часть».
- 4) 1-А1 – «Расчётно-графический лист: «Экспериментальная часть».
- 5) 1-А1 – «Рабочие чертежи элементов конструкции канала регистрации»
- 6) 1-А1 – «Эскизы основных операций технологии сборки и юстировки элементов канала регистрации».

Дата выдачи задания «10» февраля 2021 г.

В соответствии с учебным планом выпускную квалификационную работу выполнить в полном объеме в срок до « ____ » _____ 20 ____ г.

Руководитель квалификационной работы


(Подпись, дата)


(И.О.Фамилия)

Студент


(Подпись, дата)


(И.О.Фамилия)

Примечание:

1. Задание оформляется в двух экземплярах: один выдается студенту, второй хранится на кафедре.

РЕФЕРАТ

Расчетно-пояснительная записка 71 с., рисунков 38, табл. 3, источников 12, приложений 1.

АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ, СКАНИРУЮЩАЯ-ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ, СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ.

Объектом исследования является процесс высокоточного аттестационного контроля показателей качества поверхности на основе атомно-силового микроскопа.

Предметом исследования является метод анализа поверхности с использованием спектральной корреляционной функции на основе атомно-силового микроскопа.

Поставленная цель достигается путем анализа и сравнения существующих методов микроскопии, а также изучением принципов действия атомно-силового микроскопа. Также осуществляется проработка схемотехнических решений для создания функциональной схемы канала регистрации. Для этого в рамках работы рассматривается теоретическая модель работы канала регистрации атомно-силового микроскопа. Кроме того, предлагается использовать спектральную плотность корреляционной функции (СПКФ), измеренную с помощью атомно-силового микроскопа для оценки качества поверхности исследуемого образца и его аттестации. Для этого проводится анализ и сравнение экспериментальных и теоретических СПКФ калибровочных решеток TGZ1, TGZ2, TGZ3.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Теоретические исследования методов атомно-силовой микроскопии	6
1.1 Обзор методов атомно-силовой микроскопии и их применение в науке, технике и медицине.....	6
1.2 Анализ существующих методов контроля положения кантилевера ...	16
1.3 Принцип работы атомно-силового микроскопа	20
1.4 Методы восстановления поверхности по атомно-силовому изображению.....	22
1.5 Теоретическая модель атомно-силового микроскопа	27
2 Расчет параметров канала регистрации атомно-силового микроскопа .	35
2.1 Влияние угловой апертуры лазерной системы на чувствительность и шумовые характеристики датчика изгибов кантилевера.....	35
2.2 Организация системы слежения лазерным лучом за кантилевером в процессе сканирования. Оптическая схема системы регистрации.....	40
2.3 Оценка размера лазерного пятна на фотодиоде	44
2.4 Светоэнергетический расчет.....	45
3 Экспериментальная апробация методики аттестации технологических изделий на основе атомно-силового микроскопа	51
3.2 Сравнение и анализ экспериментальной и теоретической СПКФ	52
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	58
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	60

ВВЕДЕНИЕ

Атомно-силовой микроскоп (АСМ) был изобретён в 1986 году Гердом Биннингом, Кэлвином Куэйтом и Кристофером Гербером. В основе работы АСМ лежит силовое взаимодействие между зондом и поверхностью, для регистрации которого используются специальные зондовые датчики, представляющие собой упругую консоль с острым зондом на конце. Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Регистрируя величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью [1].

С момента создания АСМ нашёл множество применений в качестве инструмента исследования во многих областях науки: биофизике, материаловедении, биохимии, фармацевтике, нанотехнологии, физики и химии поверхности, электрохимии, исследовании коррозии, электронике, фотохимии. Во многом это произошло благодаря тому, что АСМ не требует ни электрически проводимого образца, как сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), ни оптически прозрачного образца или подложки, как ближнепольный сканирующий оптический микроскоп. Одним из самых перспективных направлений считается совмещение АСМ с другими традиционными и современными методами исследованиями, а также создание принципиально новых приборов. Например, совмещение АСМ с оптическими микроскопами (традиционными и конфокальными микроскопами), электронными микроскопами, спектрометрами (например, спектрометрами комбинационного (рамановского) рассеяния и флюоресцентными), ультрамикротоматами [2].

Целью выпускной квалификационной работы является исследование и анализ оптико-электронной системы регистрации атомно-силового микроскопа и разработка методики аттестации современных технологических изделий на его основе.

Для достижения поставленной цели были выполнены следующие научно-технические **задачи**:

- Проведен анализ и сравнение существующих методов микроскопии.

- Разработана теоретическая модель работы канала регистрации.
- Проведена проработка схемотехнических решений при разработке функциональной схемы канала регистрации.
- Проведен набор экспериментальных данных с калибровочными решетками TGZ1, TGZ2, TGZ3.
- Проведен анализ и сравнение экспериментальной и теоретической спектральной плотности корреляционной функции калибровочных решеток.

Научная новизна квалификационной работы состоит в следующем:

- Проведен сравнительный анализ экспериментальных и теоретических спектральной плотности корреляционной функции калибровочных решеток.
- Создана теоретическая модель работы канала регистрации атомно-силового микроскопа.
- Разработана функциональная схема канала регистрации атомно-силового микроскопа

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации докладывались на двух международных научных мероприятиях:

- XV Всероссийская инновационная молодежная научно-инженерная выставка «Политехника», октябрь, 2020 г.
- X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ, 27-29 января 2021 г.

1 Теоретические исследования методов атомно-силовой микроскопии

В первой главе обсуждаются принципы работы атомно силового микроскопа (АСМ), а также существующие методы оптимизации положения лазерного пятна на кантилере и схемы канала регистрации в системе оптической регистрации. Кроме того, рассмотрены методы восстановления поверхности по атомно-силовому изображению. Разработана теоретическая модель устройства атомно-силового микроскопа. Чтобы подчеркнуть актуальность проведения исследований в настоящей области, представлены применения АСМ технологий в различных областях науки и техники.

1.1 Обзор методов атомно-силовой микроскопии и их применение в науке, технике и медицине

Наука и технологии продолжают развиваться в направлении производства наноустройств и систем для различных индустриальных, потребительских и биомедицинских применений. Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) входит в свое четвертое десятилетие как основная техника для исследований всех уровней, где требуется большое увеличение и высокое разрешение получаемого изображения, и за это время уже помогла исследователям по всему миру в бесчисленном множестве дисциплин и применений. Сканирующая зондовая микроскопия, обладая наибольшим увеличением и разрешением по сравнению с другими типами микроскопов, включает в себя атомно-силовую, сканирующую туннельную (СТМ) и ближнепольную оптическую микроскопию (БПОМ). СТМ и БПОМ, в отличие от АСМ, имеют более высокое увеличение и разрешение, однако вследствие громоздкости используются лишь в лабораторных условиях. Таким образом, АСМ является наиболее прецизионным методом, нашедшим широкое применение как в промышленности, так и в

научных исследованиях [2]. Сравнение принципов устройства различных видов микроскопов приведено на рисунке 1, а их точностные характеристики собраны в таблице 1.

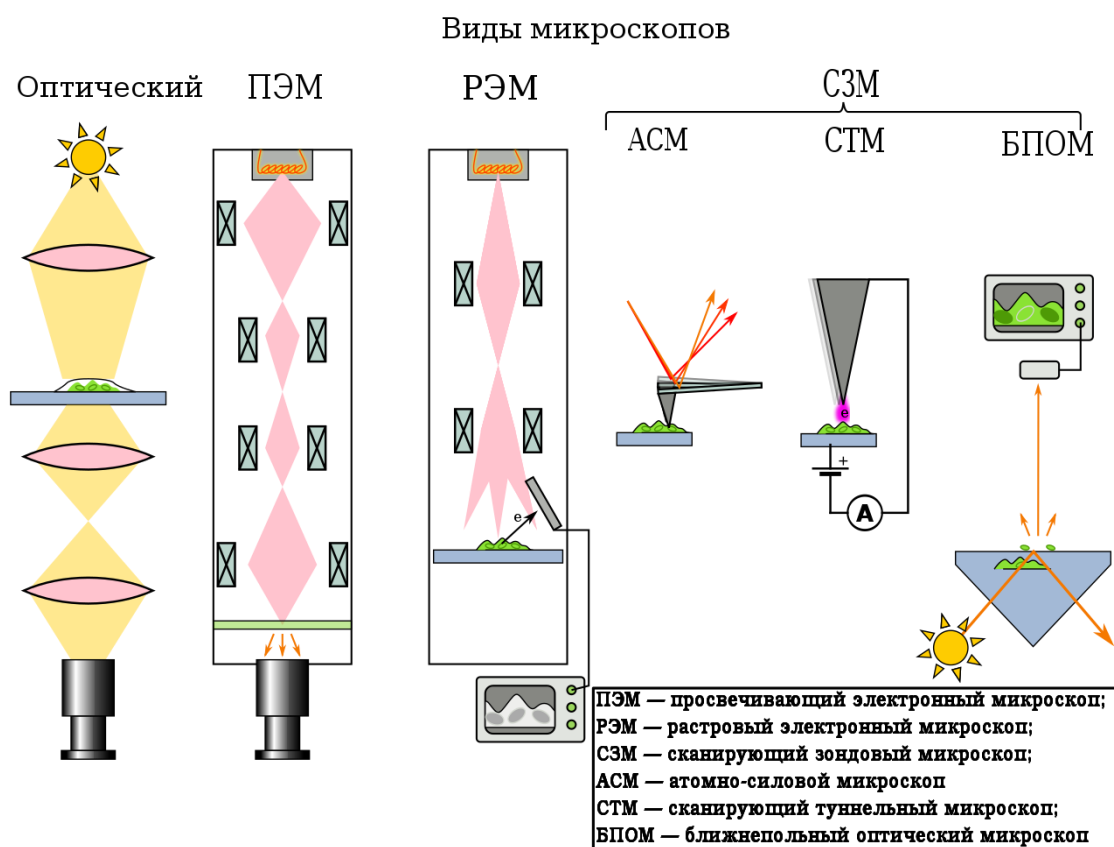


Рисунок 1 – Принципиальное устройство различных видов микроскопов [2].

Таблица 1 – Сравнение различных методов микроскопии [2].

	Оптический	Электронный	Конфокальный	Сканирующий зондовый
Увеличение	10^3	10^7	10^4	10^9
Разрешающая способность	200 нм	1 нм	10 нм	0,1 нм

Атомно-силовые микроскопия (АСМ) – это эффективный инструмент для исследований в сфере нанотехнологий, который обеспечивает необходимое разрешение для визуализации и измерений наноструктур, включая наночастицы, ДНК, тонкие пленки, полимеры с нижней границей шума 0,04 нм.

Одним из преимуществ АСМ является его возможность проведения измерений с непроводящими образцами, в отличие от сканирующего

туннельного микроскопа. Таким образом, данная технология была незамедлительно использована в биологических приложениях, таких как анализ кристаллов аминокислот и органических монослоев, анализ ДНК и РНК, белково-нуклеиновых комплексов, хромосом, клеточных мембран, протеинов и пептидов, молекулярных кристаллов, связей лиганд-рецептор. Биообразцы были исследованы на покрытом лизином стекле и слюдяной подложке, а также в буферном растворе. Благодаря использованию фазового режима сканирования стало возможным дифференцировать различные компоненты клеточных мембран.

Для проведения сканирования при помощи АСМ необходима небольшая предварительная подготовка образца. В большинстве случаев подготовка заключается в том, чтобы нанести несколько микролитров раствора на слюдяную или стеклянную подложку. Загрязнения на поверхности подложки и образца должны быть либо исключены, либо очищены. Сперва, адсорбционная подложка должны быть промыта при помощи большого количества буферного раствора. Затем нужно провести следующие процедуры: диализ, центрифугирование и гомогенизация. Для того чтобы получить хорошее разрешение и уменьшить количество механических повреждений мягких биологических материалов, образцы должны быть стабилизированы путем добавления ковалентных связывающих агентов или определенных катионов, которые способны соединять составляющие вещества образца друг с другом или с субстратом. Охлаждение также может сделать образец более твердым и устойчивым к механическим повреждениям. Тем не менее, все эти методы оказывают значительное влияние на свойства биомолекул.

Одна из областей со значительным прогрессом – визуализация нуклеиновых кислот. Возможность получать изображения с нанометровым разрешением неизмененных нуклеиновых кислот получило широкий спектр применений. Картирование, транскрипция и транслирование хромосом, маленьких молекул, взаимодействий ДНК, таких как интеркулирующие мутагены. Первое хорошо воспроизводимое изображение ДНК при помощи

АСМ было получено только в 1991 году. Высокое разрешение нуклеиновых кислот было получено благодаря четырем особенностям: контролю местной визуализации среды, включая модификацию образца; полуконтактному режиму сканирования; улучшенным АСМ зондам и подложкам, совместимым с биологическими образцами. Изображения ДНК и молекулы IgG1 полученные при помощи атомно-силового микроскопа приведены на рисунках 2 и 3, соответственно.

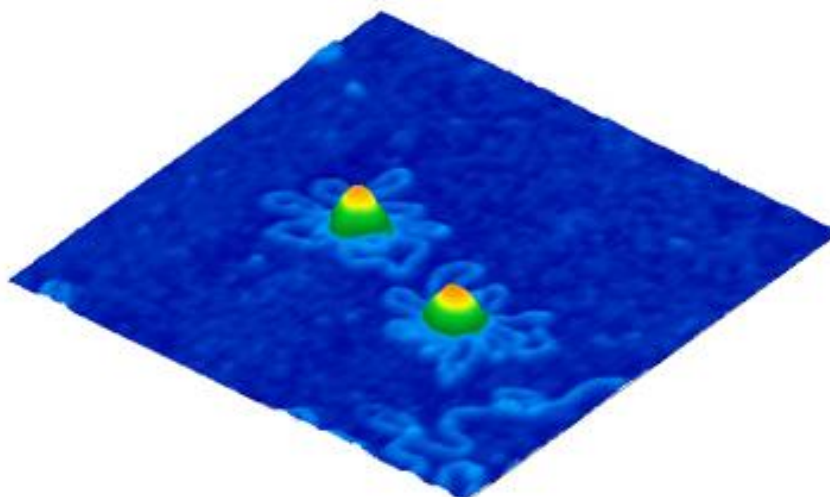


Рисунок 2 – 3-D изображение конденсированной ДНК (кольцевая плазмидная ДНК pEGFP, 3.4 т.п.н.) на слюде, обработанной поли-L-лизином [3].

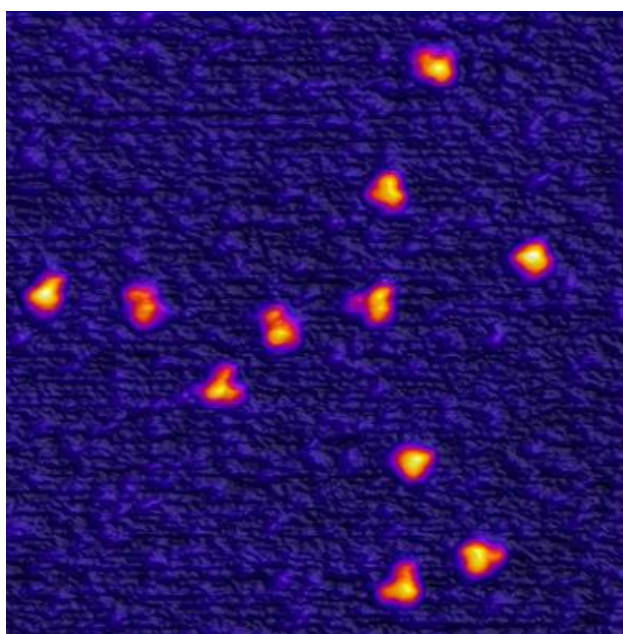


Рисунок 3 – Изображение молекулы IgG1 (MNA9 к А-цепи вискумина) [3].

Более того, клеточные биологи применили уникальные возможности АСМ для изучения динамического поведения живых и зафиксированных клеток, таких как красные и белые клетки крови, бактерии, тромбоциты, сердечные миоциты, живые клетки почечного эпителия, и глиальные клетки. Например, плазматическая мембрана в мигрирующих эпителиальных клетках была визуализирована в режиме реального времени. Динамический процесс инвагинации мембраны наблюдался в присутствии кальция, а при снижении уровня кальция этот процесс предотвращался. Образование липидных пор размером 30 нм также было зафиксировано при уменьшении количества кальция. АСМ визуализация клеток обычно имеет разрешение порядка 20-50 нм, что недостаточно для отображения мембран протеинов, но все же подходящее для разрешения других особенностей поверхности, таких как перераспределение плазматической мембраны или движения субмембранных нитей. Требование к буферному раствору для визуализации нестрогие до тех пор, пока он незначительно воздействует на целостность клеток. Культуры клеток обычно имеют хорошую адгезию с субстратом и не отображаются небольшими силовыми воздействиями зонда [4]. В качестве иллюстрации применения атомно-силового микроскопа для изучения культур клеток далее приведены изображения красных кровяных телец (рис. 4) и лимфоцитов (рис. 5).

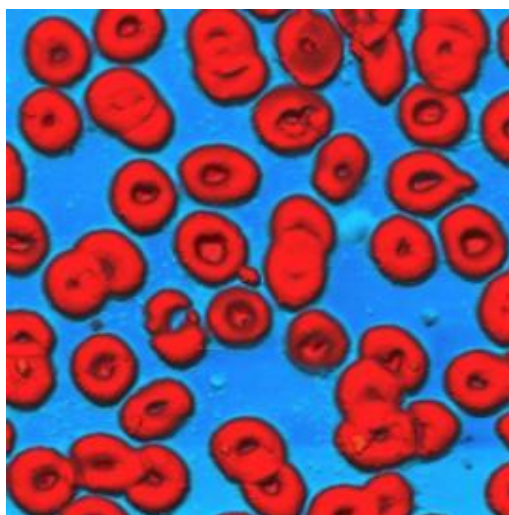


Рисунок 4 – Красные кровяные тельца [3].

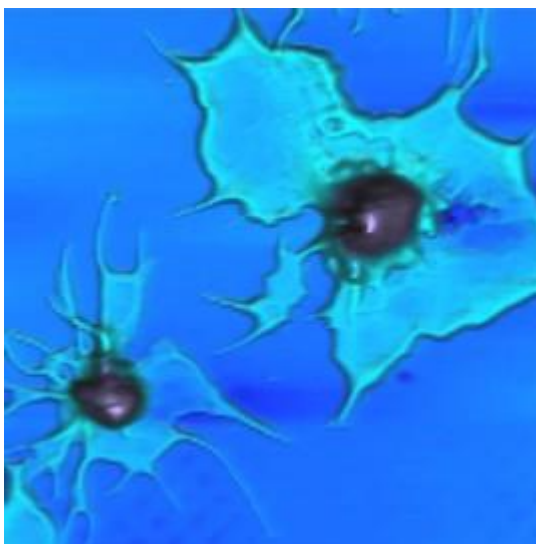


Рисунок 5 – Лимфоциты крови [3].

Поиск новых материалов с инновационными характеристиками наномасштаба в настоящее время определяет развитие многих индустрий. Чтобы исследовать и характеризовать наноматериалы ученые часто прибегают к помощи АСМ. Данный метод способен определять электрические, магнитные, механические и морфологические особенности материалов в определенных режимах работы.

АСМ обладает более хорошим горизонтальным и вертикальным разрешением, чем оптические и стилус измерители профиля. По этой причине, АСМ - это великолепный инструмент для анализа материалов, используемых в индустрии фотоники.

Некоторые преимущества использования АСМ для анализа материалов индустрии фотоники:

- Возможность измерения профиля по глубине и углов.
- Изображение не зависит от оптических свойств.
- Не нужна подготовка образца к измерениям: ни покрытий, ни поперечных разрезов.
- Чрезвычайно высокий контраст на плоских образцах.
- Неразрушающая методика.

АСМ применения в индустрии фотоники включают в себя анализ полированных подложек из плавленного кремния, линейчатых и голографических решетки.

Полированная поверхность подложки из плавленного кремния имеет шероховатость порядка 0,1 нм. С использованием АСМ стало возможным визуализировать данную поверхность, измерять текстуру поверхности, а также размерность структур, созданных процессом полирования [5].

Полуконтактный режим АСМ изображения кремниевой подложки дал СКО шероховатости 0,203 нм. Размер сканируемой области 1x2 микрон (рис. 6). Справа можно увидеть остаточный полированный след. Красная линия отображает линию профиля, которая позволила измерить глубины и ширину полированного следа (рис. 7). Полуширина полированного следа на изображении равна 19.4 нм и глубина характерных объектов 0,0354 нм представлены в таблице 2 [5].

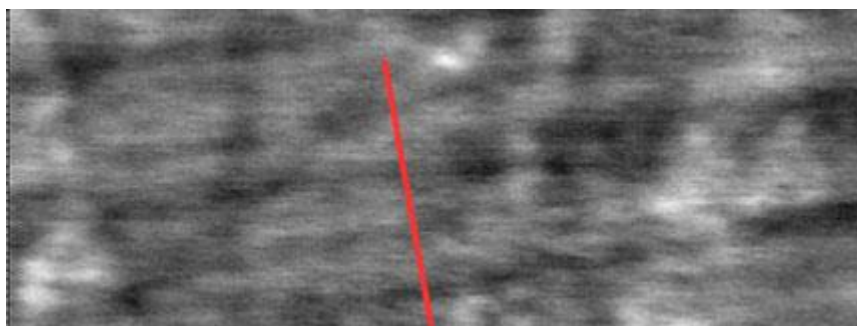


Рисунок 6 – Поверхность полированной подложки из плавленного кремния [5].

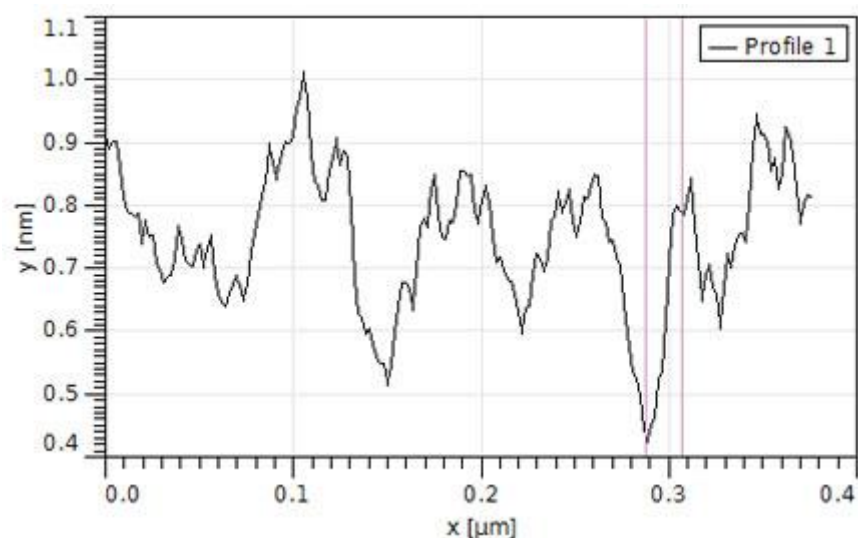


Рисунок 7 – Линейный профиль полированной подложки из плавленого кремния [5].

Таблица 2 – Характеристики линейного профиля [5].

Величина	Значение, нм
Среднее значение	0,743
Минимум	0,000
Максимум	1,723
Медиана	0,736
R_a	0,159
СКО	0,203

Рассмотрим АСМ скан и прямое измерение топографии линейчатой решетки. Из АСМ изображения возможно извлечь углы наклона, шаг и текстуру поверхности. Изображение линейчатой решетки размером 4x4 микрон было получено в полуконтактном режиме (рис. 8). Анализ линейного профиля показал, что угол наклона равен 19 градусам и шаг – 0,376 нм.

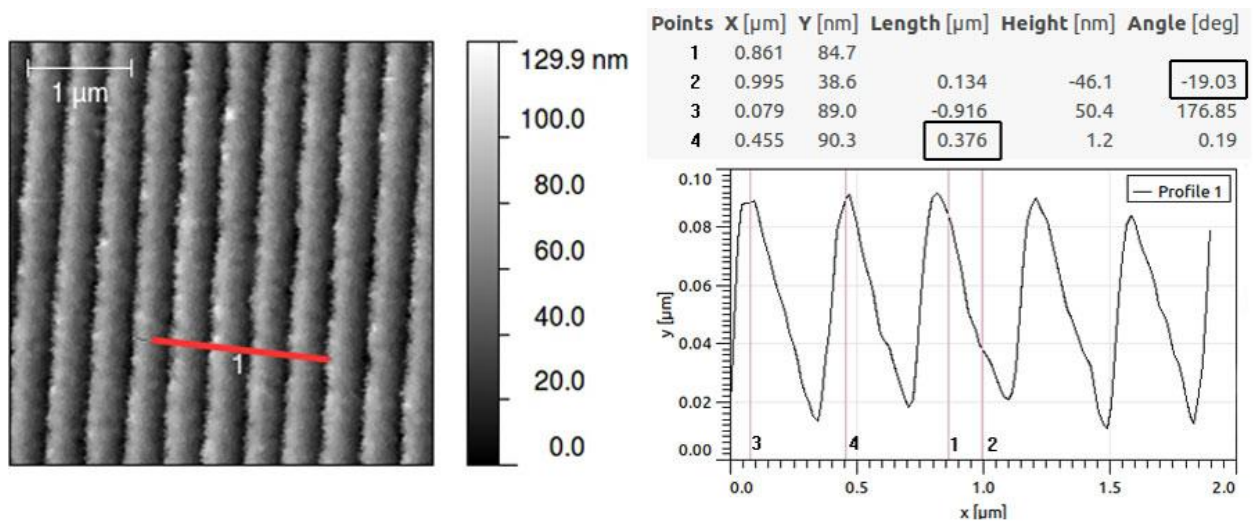


Рисунок 8 – Топография и линейный профиль линейчатой решетки [3].

3-D изображение решетки помогает лучше отобразить неровности поверхности (рис. 9).

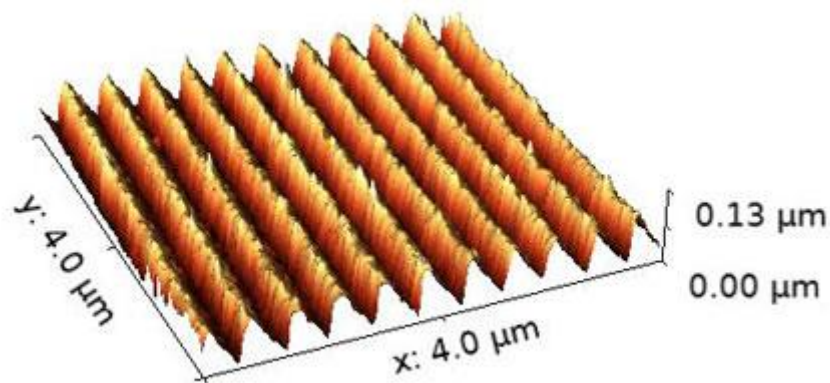


Рисунок 9 – 3-D изображение линейчатой решетки изображенной в цветовой гамме со световой проекцией [3].

Рассмотрим измерение голографических решеток (рис. 10). При измерениях голографических решеток технические характеристики, включая высоту, должны поддерживаться в очень жестких допусках (рис. 11). При правильном управлении АСМ может измерять высоту шага всего в несколько ангстрем с очень высокой точностью (рис. 12).

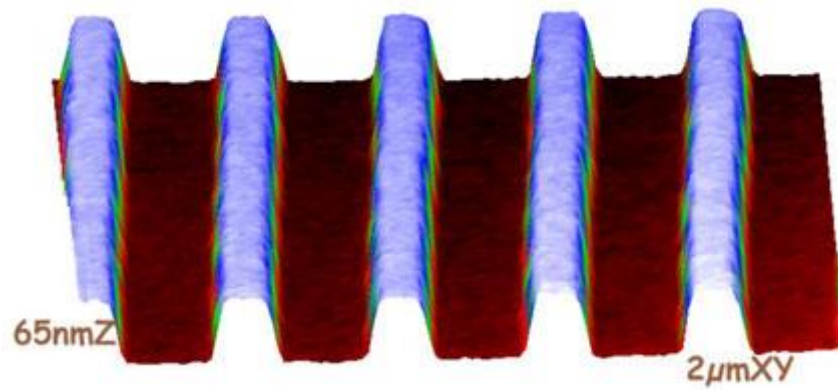


Рисунок 10 – 3-D изображение голографической решетки в цветовой гамме [3].

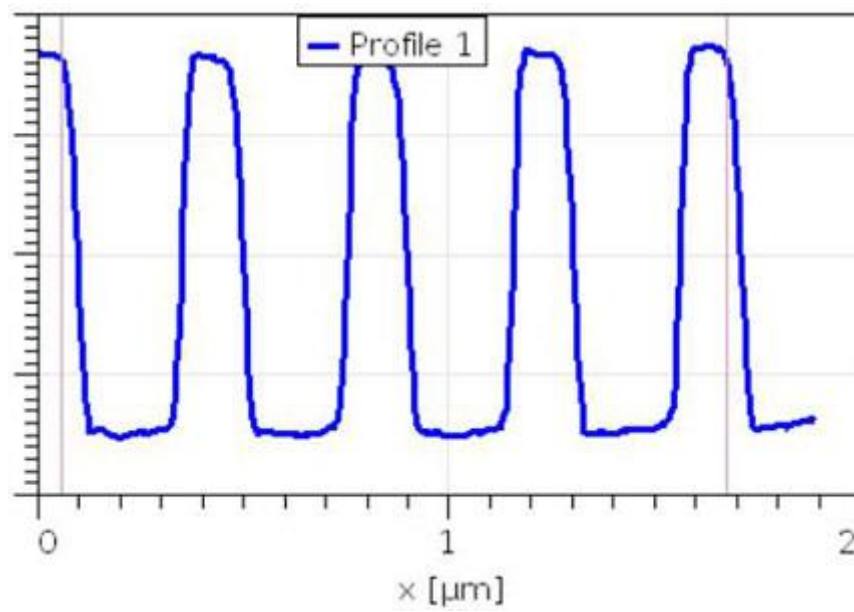


Рисунок 11 – Линейный профиль голографической решетки [3].

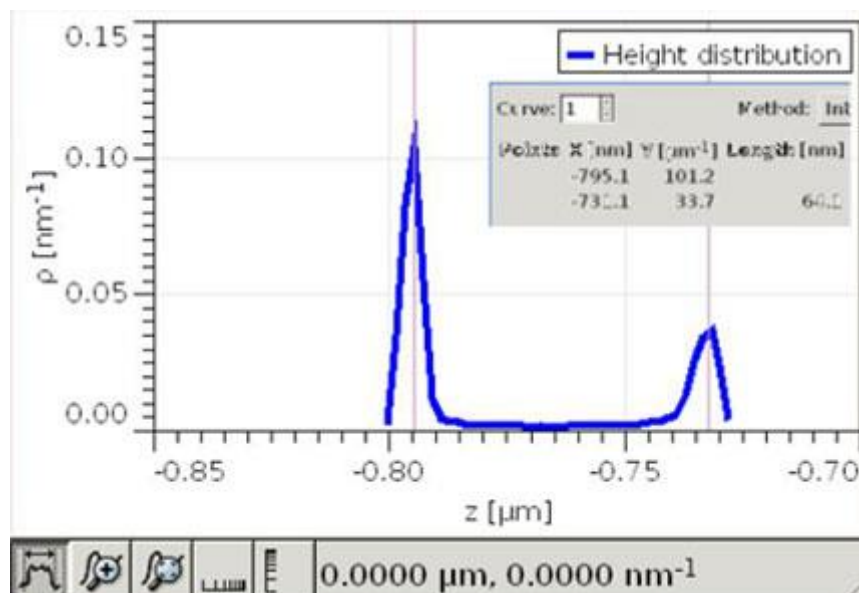


Рисунок 12 – Распределение высот голографической решетки [3].

1.2 Анализ существующих методов контроля положения кантилевера

Движения зонда вдоль измеряемой поверхности контролируется при помощи электрической петли обратной связи и пьезоэлектрических сканеров [2].

В первых АСМ, изгиб кантилевера измерялся при помощи сканирующего зондового микроскопа (СТМ) – задняя сторона кантилевера была покрыта металлом и туннелирующий зонд СТМ был поднесен близко к этой поверхности для измерения отклонений АСМ кантилевера [6].

Современные конструктивные решения в основном используют оптические (интерферометрический и биения лазерного пучка) или электрические (пьезорезисторный и пьезоэлектрический) методы измерения изгиба кантилевера. Также существуют малораспространенные сенсоры на основе емкостных и магнитных явлений [7].

Метод биения лазерного пучка, также известный как метод отражения оптического пучка, является самым распространенным способом контроля изгиба зонда АСМ, поскольку он надежен, вносит наименьший шум при

измерениях и позволяет использовать различные кантилеверы. Излучение полупроводникового лазерного диода, попадая на заднюю зеркальную поверхность кантилевера, отражается от нее и фиксируется чувствительным четырехсекционным фотодетектором. Этот детектор измеряет кривизну зонда посредством сдвига лазерного пятна во время того, как наконечник кантилевера сканирует образец. Измеренные изгибы кантилевера используются для того, чтобы воссоздать топографическую карту поверхности (рис. 13) [8].

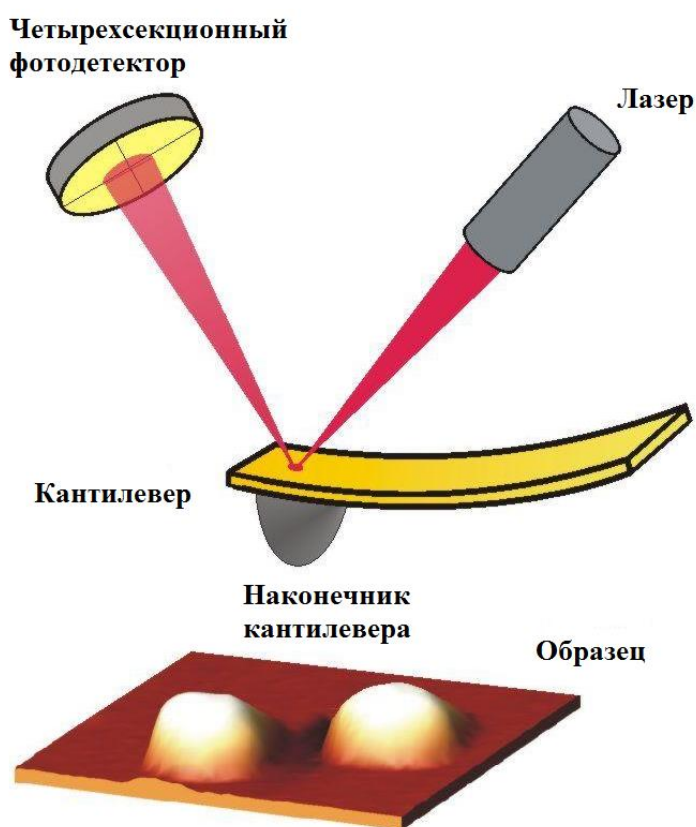


Рисунок 13 – Схематичное изображение работы метода биения лазерного пучка [8].

Метод биения лазерного пучка также имеет недостатки, включающие громоздкую измерительную установку, часто требующую выравнивания лазерного пятна; кантилевера с зеркальной поверхностью; артефактов во время эксперимента вследствие излучения от других источников. Более того, из-за дифракционного предела в данном методе могут быть использованы только кантилеверы с шириной несколько микрометров. Хорошо известно, что уменьшение размера зонда способствует как увеличению чувствительности, так и скорости сканирования. Таким образом, дифракционный предел представляет

собой главный теоретический барьер для улучшения метода биения лазерного пучка [7].

В АСМ основанных на интерферометрическом методе детектирования отклонения кантилевера, оптические возвратные потери системы могут быть изменены посредством дистанции между оптическим волокном (для доставки лазерного излучения и кантилевером. Оптические возвратные потери используются для регулирования характеристик интерферометра. В качестве оптической схемы интерферометра может быть использована как конструкция Майкельсона, так и Фабри-Перо. Коэффициент усиления интерферометра используется в качестве количественной меры контроля многолучевой интерференции в полости, образующейся на кантилевере при его изгибе. Этот экспериментально легко получаемый и регулируемый параметр обеспечивает контроль оптико-механического взаимодействия между лазерным пятном и кантилевером. Количественная оценка давления света, воздействующего на колеблющийся зонд в месте его полости, при помощи сдвига в частотном диапазоне также позволяет производить с высокой точностью *in-situ* измерения жесткости кантилевера [9].

Более того, важным преимуществом данного метода контроля кривизны зонда является возможность его использования в исследованиях при низких температурах в контактных режимах [9]

Качество измерения отклонения кантилевера может быть выражено схематическим графиком плотности шума отклонения и частоты. Плотность шума имеет зависимость $1/f$ для низких частот и приближается к постоянному значению (белому шуму) при частотах выше угловой частоты [2].

Пьезорезистивные измерения изменяют механические напряжения в зонде благодаря чему регистрируется топография поверхности. Напряжение на нейтральной линии вдоль всей длины кантилевера (рис. 14, пунктирная красная линия) всегда равняется нулю. Напряжение варьируется линейно вдоль толщины зонда, с максимальной деформацией сжатия снизу, нулевым напряжением на нейтральной линии и максимальной деформацией растяжения сверху. Вдоль

длины кантилевера напряжение также изменяется линейно от максимума на закрепленном конце до нуля на свободном конце зонда. Следовательно, пьезорезистор должен быть расположен в режиме максимального напряжения – сверху или снизу на зафиксированном конце зонда (рис. 14).

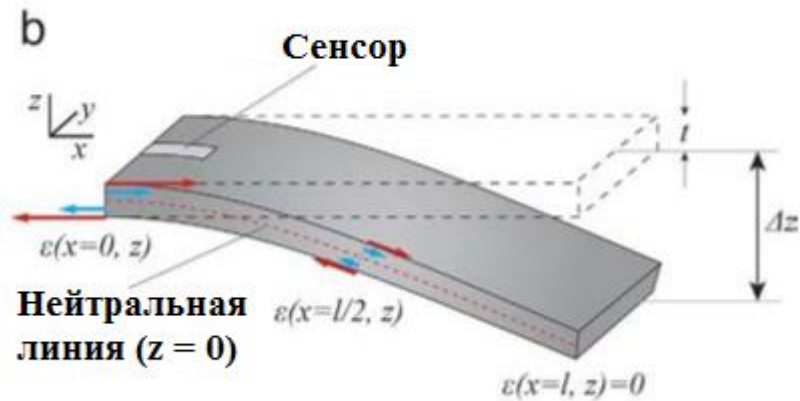


Рисунок 14 – Пьезорезисторный метод регистрации отклонения кантилевера.

Данный способ по сравнению с методом биения лазерного пучка имеет преимущество в большей зоне сканирования и возможности визуализации в чувствительных к свету или непрозрачных средах, но уступает в создаваемом шуме [7].

Пьезоэлектрический способ детектирования кривизны кантилевера использует сенсор, состоящий из зонда с пьезоэлектрической тонкой пленкой, осажденной на одной стороне. Кантилевер возбуждается вблизи первой частоты своего резонанса и воздействующие на него механические силы детектируются посредством изменения полной проводимости слоя, вызванной пьезоэлектрическим эффектом. Градиент силы между вибрирующим наконечником зонда и образцом изменяет амплитуду колебаний и, следовательно, вызывает изменение полной проводимости слоя [10].

1.3 Принцип работы атомно-силового микроскопа

В основе работы АСМ лежит силовое взаимодействие между зондом и поверхностью, для регистрации которого используются специальные зондовые датчики, представляющие собой упругую консоль с острым зондом на конце. В общем случае данная сила имеет как нормальную к поверхности, так и латеральную (лежащую в плоскости поверхности образца) составляющие. Реальное взаимодействие зонда с образцом имеет более сложный характер, однако основные черты данного взаимодействия сохраняются - зонд АСМ испытывает притяжение со стороны образца на больших расстояниях и отталкивание на малых. Получение АСМ изображений рельефа поверхности связано с регистрацией малых изгибов упругой консоли зондового датчика. В атомно-силовой микроскопии для этой цели широко используются оптические методы (рис. 15).

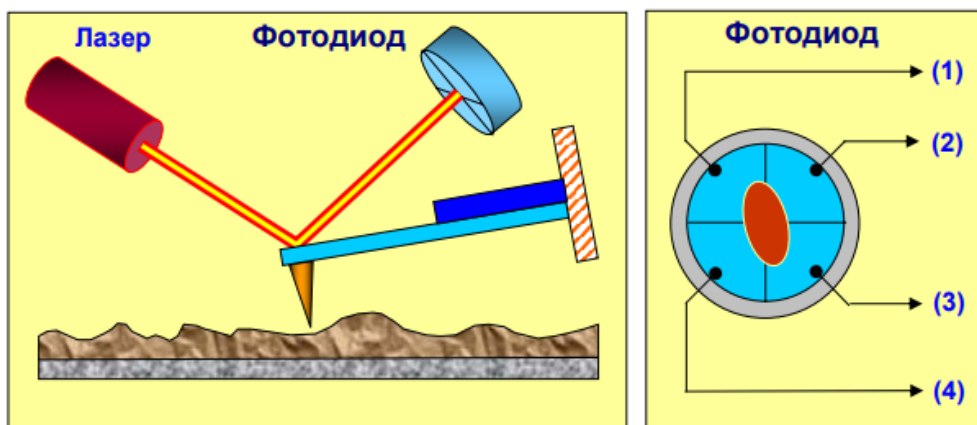


Рисунок 15 – Схема оптической регистрации изгиба консоли зондового датчика АСМ [1].

Оптическая система АСМ юстируется таким образом, чтобы излучение полупроводникового лазера фокусировалось на консоли зондового датчика, а отраженный пучок попадал в центр фоточувствительной области фотоприемника. В качестве позиционно - чувствительных фотоприемников применяются четырехсекционные полупроводниковые фотодиоды (рис. 16) [1].

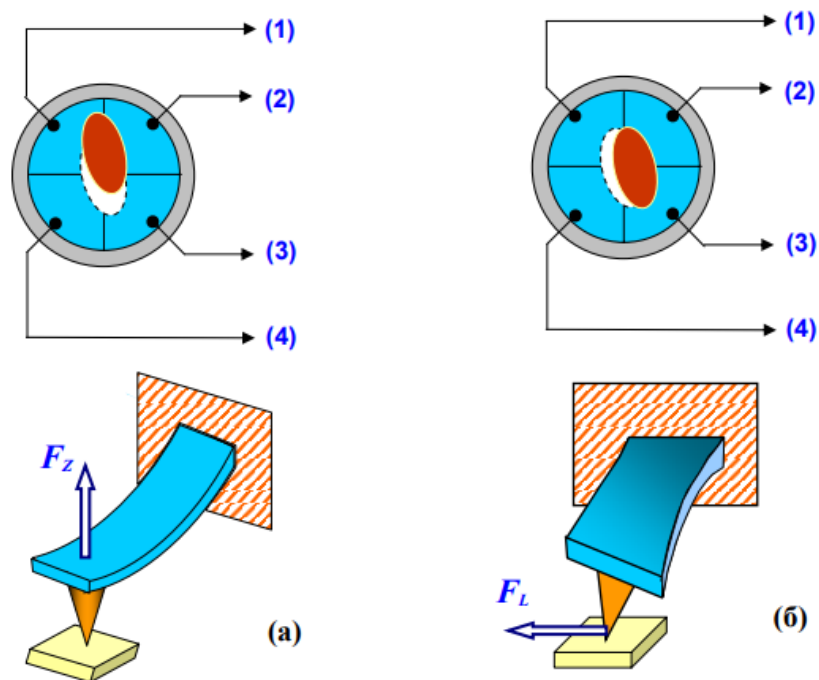


Рисунок 16 – Соответствие между типом изгибных деформаций консоли зондового датчика и изменением положения пятна засветки на фотодиоде [1].

Основные регистрируемые оптической системой параметры - это деформации изгиба консоли под действием Z -компонент сил притяжения или отталкивания (F_z) и деформации кручения консоли под действием латеральных компонент сил (F_L) взаимодействия зонда с поверхностью. Если обозначить исходные значения фототока в секциях фотодиода через $I_{01}, I_{02}, I_{03}, I_{04}$, а через I_1, I_2, I_3, I_4 - значения токов после изменения положения консоли, то разностные токи с различных секций фотодиода $\Delta I_i = I_i - I_{0i}$ будут однозначно характеризовать величину и направление изгиба консоли зондового датчика АСМ. Действительно, разность токов пропорциональна изгибу консоли под действием силы, действующей по нормали к поверхности образца (рис. 16(а)).

$$\Delta I_z = (\Delta I_1 + \Delta I_2) - (\Delta I_3 + \Delta I_4), \quad (1)$$

А комбинация разностных токов характеризует изгиб консоли под действием латеральных сил (рис. 16(б)).

$$\Delta I_L = (\Delta I_1 + \Delta I_4) - (\Delta I_2 + \Delta I_3), \quad (2)$$

Величина ΔI_z используется в качестве входного параметра в петле обратной связи атомно-силового микроскопа. Система обратной связи (ОС) обеспечивает $\Delta I_z = \text{const}$ с помощью пьезоэлектрического исполнительного элемента, который поддерживает изгиб консоли ΔZ равным величине ΔZ_0 , задаваемой оператором [2].

При сканировании образца в режиме $\Delta Z = \text{const}$ зонд перемещается вдоль поверхности, при этом напряжение на Z-электроре сканера записывается в память компьютера в качестве рельефа поверхности $Z = f(x, y)$. Пространственное разрешение АСМ определяется радиусом закругления зонда и чувствительностью системы, регистрирующей отклонения консоли. В настоящее время реализованы конструкции АСМ, позволяющие получать атомарное разрешение при исследовании поверхности образцов [8].

1.4 Методы восстановления поверхности по атомно-силовому изображению

Одним из недостатков, присущих всем методам сканирующей зондовой микроскопии, является конечный размер рабочей части используемых зондов. Это приводит к существенному ухудшению пространственного разрешения микроскопов и значительным искажениям в АСМ изображениях при сканировании поверхностей с неровностями рельефа, сравнимыми с характерными размерами рабочей части зонда. На рисунке 17 представлен процесс перемещения зонда по поверхности изучаемого образца.

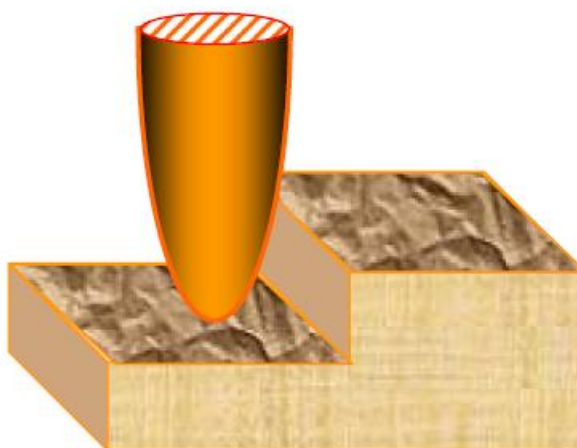


Рисунок 17 – Схематическое представление перемещение зонда по поверхности образца [1].

Фактически получаемое в АСМ изображение является "сверткой" зонда и исследуемой поверхности. Процесс "свертки" формы зонда с рельефом поверхности проиллюстрирован в одномерном случае на рисунке 18.

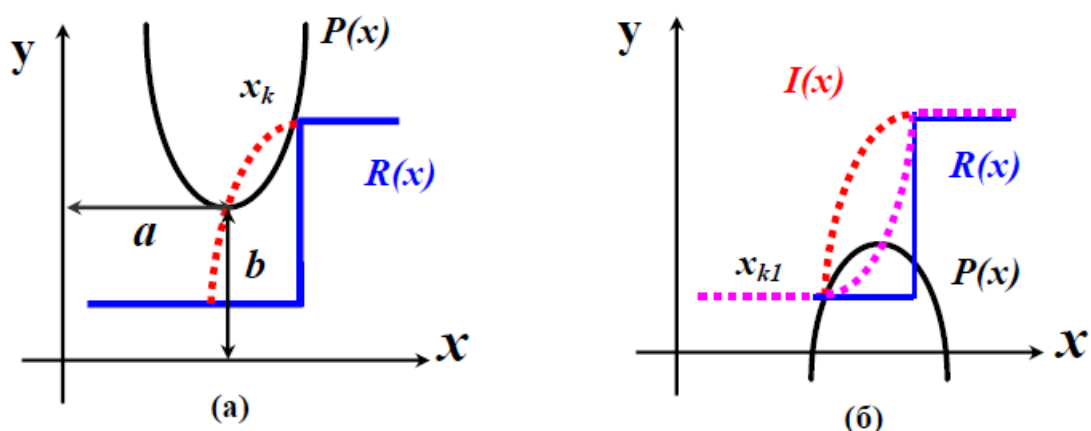


Рисунок 18 – Схематическое изображение процесса получения изображения в АСМ (а) и процесса частичного восстановления рельефа с учетом конечных размеров и формы зонда (б) [1].

Частично данную проблему позволяют решить развитые в последнее время методы восстановления АСМ изображений, основанные на компьютерной обработке АСМ данных с учетом конкретной формы зондов. Наиболее эффективным методом восстановления поверхности является метод численной деконволюции, использующий форму зонда, получаемую экспериментально при

сканировании тестовых структур с хорошо известным рельефом поверхности. Рассмотрим данный метод в одномерном случае. Если форма зонда описывается функцией $P(x)$, а форма истинного рельефа поверхности описывается функцией $R(x)$, то АСМ изображение поверхности получается в виде:

$$I(a) = R(x_k) - P(x_k - a), \text{ при условии } dR/dx = dP/dx \text{ в точках касания } x_k,$$

где a – смещение зонда в системе координат, связанной с поверхностью, нм.

Восстановление исходного рельефа поверхности в данном методе производится путем обратного преобразования. Суть этого метода состоит в том, что АСМ изображение поверхности повторно (но уже численно) сканируется инвертированным зондом. Тогда изображение восстановленного рельефа поверхности получится в виде: $R'(x) = I(x_{k1}) - P(x - x_{k1})$, при условии $dI/dx = dP/dx$ в точках касания x_{k1} . Здесь x_{k1} - абсцисса точки касания функции АСМ изображения и функции зонда, инвертированной по оси y и по оси x .

Следует отметить, что полное восстановление поверхности образца возможно лишь при соблюдении двух условий: зонд в процессе сканирования коснулся всех точек поверхности, и в каждый момент зонд касался только одной точки поверхности. Если же зонд в процессе сканирования не может достигнуть некоторых участков поверхности (например, если образец имеет нависающие участки рельефа), то происходит лишь частичное восстановление рельефа. Причем, чем большего числа точек поверхности касался зонд при сканировании, тем достовернее можно реконструировать поверхность. Процесс восстановления сканируемой поверхности представлен на рисунке 19.

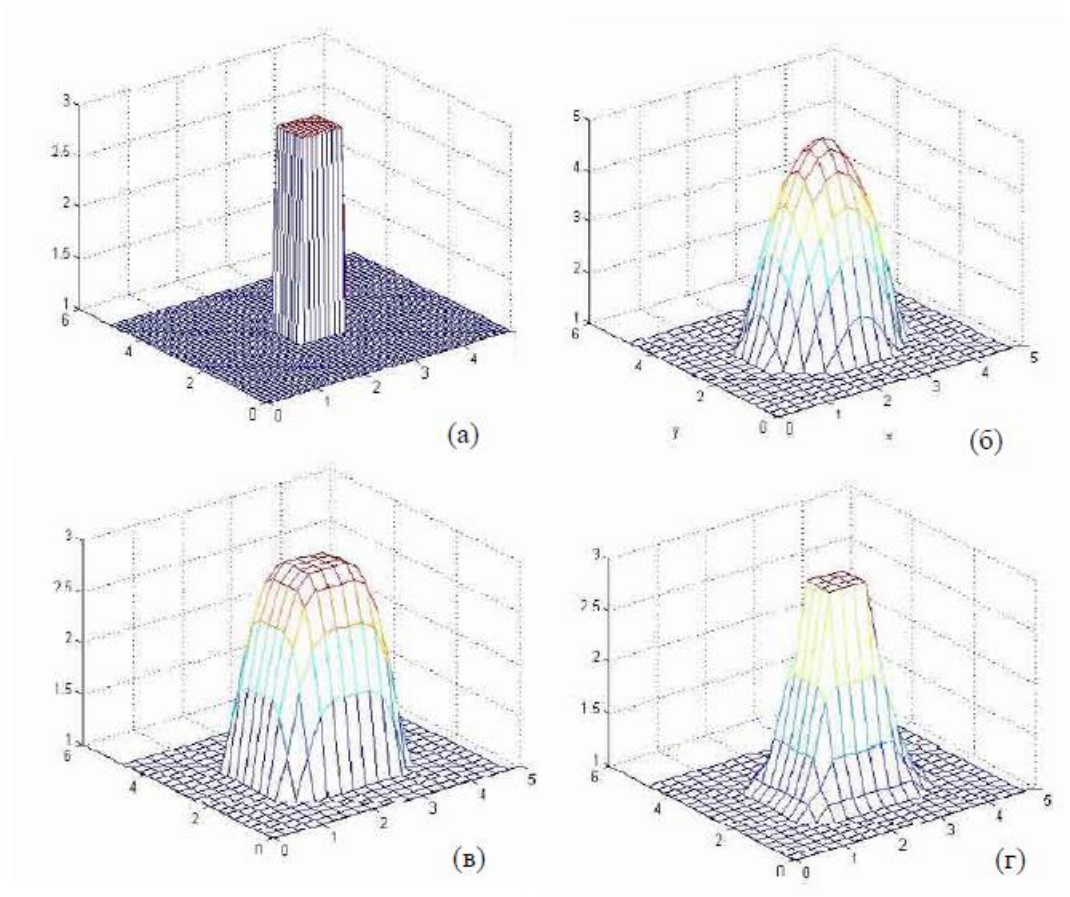


Рисунок 19 – Моделирование процесса восстановления рельефа поверхности (а) – Исходная поверхность с включением в виде прямоугольного параллелепипеда; (б) – модельная форма зонда в виде параболоида вращения; (в) – результат свертки зонда и исходной поверхности; (г) – восстановленное изображение поверхности. (Размеры изображений по осям X, Y, Z указаны в относительных единицах) [1].

На практике АСМ изображение и экспериментально определенная форма зонда представляют собой двумерные массивы дискретных значений, для которых производная является плохо определенной величиной. Поэтому вместо вычисления производной дискретных функций на практике при численной деконволюции АСМ изображений используется условие минимальности расстояния между зондом и поверхностью при сканировании с постоянной средней высотой: $\text{Min} \{I(x_{k1}) - P(x - x_{k1})\}$ [1].

В этом случае за высоту рельефа поверхности в данной точке можно принять минимальное расстояние между точкой зонда и соответствующей

точкой поверхности для данного положения зонда относительно поверхности. По своему физическому смыслу данное условие эквивалентно условию равенства производных, однако оно позволяет проводить поиск точек касания зонда с поверхностью более адекватным методом, что существенно сокращает время реконструирования рельефа.

Для калибровки и определения формы рабочей части зондов используются специальные тестовые структуры с известными параметрами рельефа поверхности. Виды наиболее распространенных тестовых структур и их характерные изображения, полученные с помощью атомно-силового микроскопа представлены на рисунках 20 и 21.

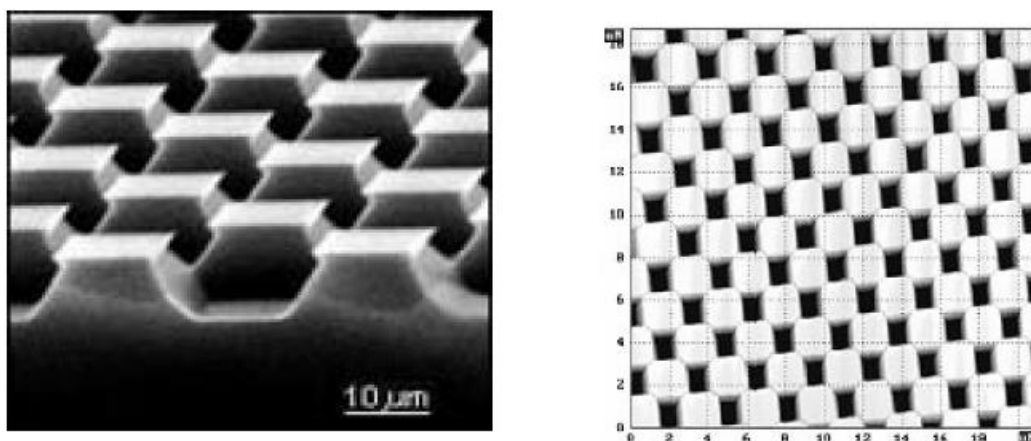


Рисунок 20 – Прямоугольная калибровочная решетка и ее АСМ изображение [1].

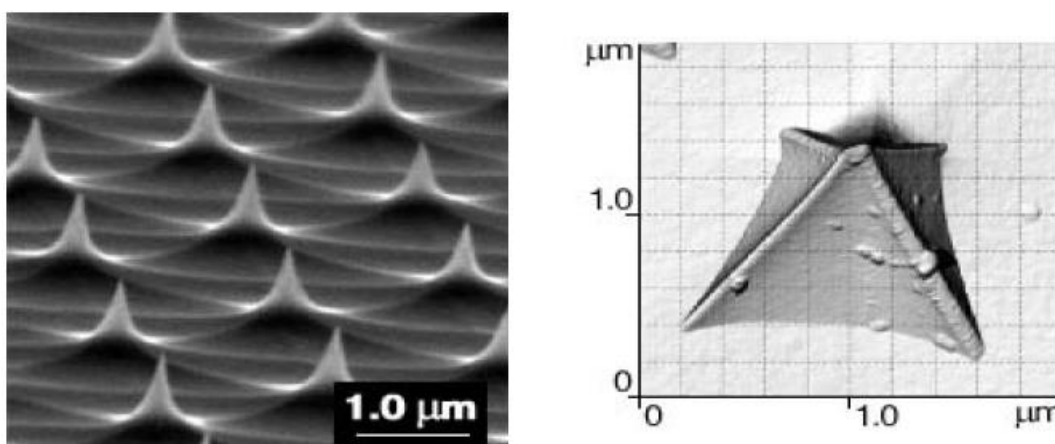


Рисунок 21 – Калибровочная решетка в виде острых шипов и ее АСМ изображение с помощью зонда пирамидальной формы [1].

Калибровочная решетка в виде острых шипов позволяет хорошо прописывать кончик зонда, в то время как прямоугольная решетка помогает восстановить форму боковой поверхности. Комбинируя результаты сканирования данных решеток, можно полностью восстанавливать форму рабочей части зондов. Процесс сканирования тестовой структуры в виде острых шипов представлен на рисунке 22.

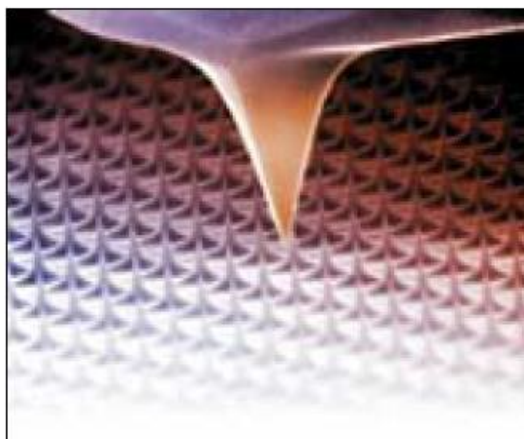


Рисунок 22 – Электронно-микроскопическое изображение зонда атомно-силового микроскопа в процессе сканирования тестовой структуры [1].

1.5 Теоретическая модель атомно-силового микроскопа

Рассмотрим модель прибора, изображенную на рисунке 23. Она включает в себя сканер, интегральный контроллер, систему зонд-фотодиод и усилитель с соответствующими передаточными функциями $C(s)$, $G_s(s)$, $G_p(s)$, $G_{ФД}(s)$ и $G_{ус}$ и выходное звено частотного анализа топографии поверхности образца при помощи построения спектральной плотности мощности корреляционной функции (СПКФ). Также модель содержит сигналы, которые генерируются соответствующими блоками, как ответ на входной сигнал: сигнал ошибки $\varepsilon(s)$, управляющее напряжение на сканере $U(s)$, положение сканера с образцом $Z(s)$, амплитуда раскачки зонда в нанометрах $A(s)$, амплитуда сигнала фотодетектора $DFL(s)$ и $Mag(s)$ - амплитуда сигнала после усиления, которая сравнивается с

сигналом Mag_{SP} . Форма рельефа $h(s)$ и шум по высоте $n(s)$ действуют как возмущение на зонд и обрабатываются сканером.

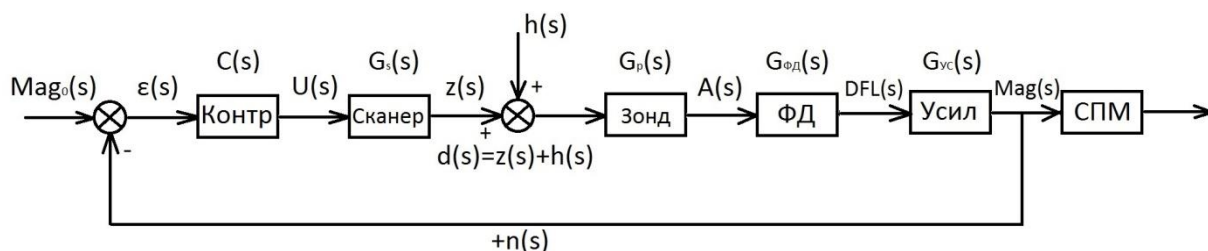


Рисунок 23 – Схема цепи обратной связи АСМ.

Опишем каждый элемент схемы.

Контроллер

Он вырабатывает управляющий сигнал для сканера, который пропорционален суммарной ошибке на входе блока за некоторый период времени T . Выходным сигналом для него является высокое напряжение, которое ограничено в пределах $\pm 300\text{В}$. Коэффициент усиления k_i имеет размерность $[\frac{\text{В}}{\text{нА}\cdot\text{сек}}]$.

Сканер

Трубчатый сканер имеет набор резонансных частот, относящихся к разным модам колебаний. Для Z сканера доминирующей является мода, связанная с продольными колебаниями трубки сканера. Ее резонансная частота для ненагруженного сканера лежит в районе 10 кГц и снижается в зависимости от массы образца вплоть до 6кГц.

Время реакции ненагруженного сканера на ступенчатое изменение высокого напряжения составляет $\sim 10^{-4}$ сек в режиме разомкнутой обратной связи. Реакция из-за наличия резонансной частоты содержит “звон”, который затухает с некоторым характерным временем (рис. 24а). Спектр “звонящей” части, показанный на рисунке 24в, состоит из нескольких компонент, главная из которых имеет максимум на частоте 9.8 кГц. Добротность сканера для этой моды колебаний, определяемая как отношением резонансной частоты к ширине

резонанса, равна 9, откуда следует, что время затухания колебаний $\tau_s = \frac{2Q}{2\pi f_0}$ составляет 0.3 мс, что хорошо согласуется с приведенным графиком на Рис. 24б.

Спектр может существенно изменяться в зависимости от закрепления образца на сканере, но при этом он всегда содержит доминирующий пик, ответственный за продольные колебания сканера.

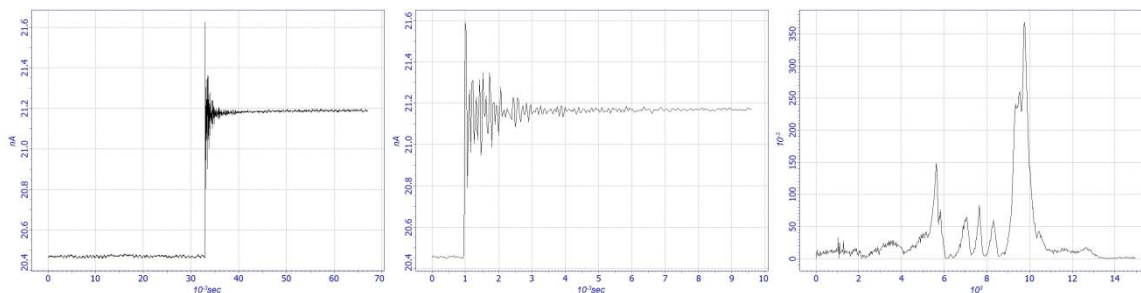


Рисунок 24 – а) Реакция сканера на ступенчатое изменение напряжения в случае разомкнутой обратной связи, б) увеличенное изображение осциллирующей части, в) Фурье -спектр.

Эта модель сканера позволяет объяснить большую часть особенностей сканирования таких, как затягивание переднего и заднего фронтов ступеньки, перерегулирование, проявляющееся в виде выбросов на фронтах, а также найти условие потери устойчивости и перехода обратной связи в самовозбуждение.

Зонд

Для зонда NSG01 типичные значения параметров при сканировании в воздухе $f_0 \sim 150$ кГц и $2\mu = \frac{\omega_p}{Q} \sim 6 \cdot 10^3$ с⁻¹ соответственно, а расчетное время затухания $\tau_p = 0,3$ мс, то есть примерно такое же, как и у сканера. Взаимодействие зонда с поверхностью приводит к тому, что амплитуда, добротность и резонансная частота зонда изменяются и становятся зависящими от расстояния между ним и поверхностью, а также от реологических и механических свойств образца и адгезионных взаимодействий между наконечником зонда и поверхностью.

Все это существенно усложняет динамическую модель зонда и для ее более точного определения требуется применять более продвинутые методы по сравнению с моделью гармонического осциллятора, колеблющегося под действием вынуждающей силы.

Конечное время установления стационарной амплитуды при ступенчатом воздействии на зонд позволяет в первом приближении рассматривать его как звено с временной задержкой, а если исключить случай быстрого сканирования, то в нулевом приближении передаточную функцию зонда можно принять равной постоянной величине, зависящей только от расстояния между зондом и поверхностью образца.

Найти некоторую аппроксимацию зависимости амплитуды вынужденных колебаний зонда от расстояния до поверхности $A=A(z)$ можно, исходя из следующих допущений. Будем считать, что при контакте зонда с поверхностью деформация поверхности значительно меньше амплитуды раскачки и колебание зонда можно представить, как урезанную снизу синусоиду. Тогда первая гармоника a_1 в ее разложении в ряд Фурье даст амплитуду колебаний:

$$a_1 = \frac{A}{\pi} \left[\arccos(-\lambda) + \lambda * \sqrt{1 - \lambda^2} \right] * [\chi(\lambda + 1) - \chi(\lambda - 1)] \quad (3)$$

где h - высота равновесного положения зонда над поверхностью, нм;

$A = A_0 \cos\beta$ - проекция амплитуды раскачки зонда на ось Z , нм;

A_0 - истинная амплитуда раскачки зонда, нм.

Необходимо отметить, что формула не зависит от амплитуды раскачки в приведенных координатах a_1/A (или Mag/A) и h/A , то есть форма кривой подвода в них является универсальной и не зависит от амплитуды раскачки.

Формула (4) позволяет рассчитать амплитуду раскачки зонда по кривой подвода. Для этого необходимо определить наклон прямолинейного участка кривой подвода и амплитуду сигнала Mag_T в момент касания. Амплитуда раскачки A вычисляется по формуле:

$$A = \frac{2}{\pi} Mag_T \frac{\Delta Z}{\Delta Mag} \quad (4)$$

где Mag_T – амплитуда сигнала Mag в момент касания зонда поверхности образца, нм.

На рисунке 25а показан график функций (3) в приведенных координатах, а на рисунке 25б экспериментальные кривые подвода для разных амплитуд раскачки и соответствующие кривые, рассчитанные по формуле (3). Амплитуды раскачки, определенные по формуле (4), показаны на рисунке справа.

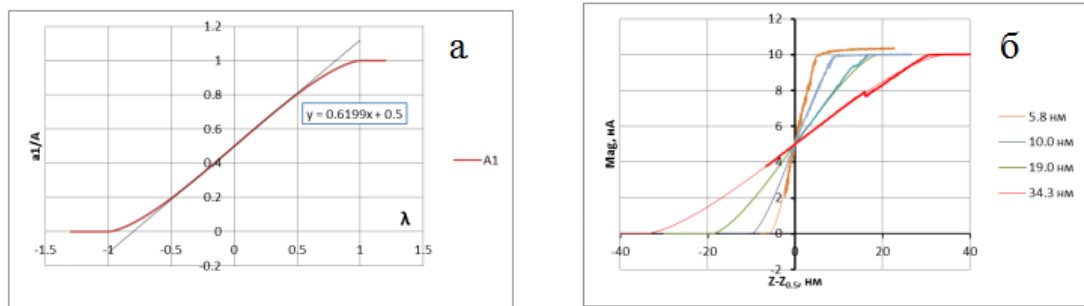


Рисунок 25 – а) График зависимости приведенной амплитуды первой гармоники колебаний зонда от приведенного расстояния до поверхности образца, б) экспериментальные кривые подвода рассчитанные по формуле (3).

Амплитуды указаны справа.

В рамках модели ограниченного линейного отклика зависимость $Mag(z)$ можно выразить следующим образом:

$$Mag = \begin{cases} Mag_T & z > z_t \\ \frac{1}{2A} Mag_T (z - z_t) + Mag_T & z_t - 2A < z < z_t \\ 0 & z < z_t - 2A \end{cases} \quad (5)$$

Выразим расстояние от кантилевера до поверхности в зависимости от амплитуды колебаний при заданных начальных параметрах A и Mag_T :

$$Z = \frac{\pi}{2} \frac{A}{Mag_T} Mag \quad (6)$$

Фотодиод

Выходным сигналом фотодиода является осциллирующий токовый сигнал DFL пропорциональный мгновенному отклонению луча лазера от нулевого положения на фотодиоде. Амплитуда DFL_0 осциллирующего сигнала DFL связана с амплитудой колебаний зонда A_0 соотношением:

$$DFL_0 = \frac{A}{InvOS} \quad (7)$$

где $InvOS$ - коэффициент обратной оптической чувствительности системы лазер-зонд-фотодетектор.

Таким образом, $K_{pd} = \frac{DFL_0}{A} = \frac{1}{InvOS}$ и для зондов NSG01 и NSG10 имеет значения ~ 5 и 6 нм/нА, соответственно.

Фазочувствительный усилитель

Фазочувствительный усилитель имеет полосу пропускания 5МГц и выходным сигналом этого звена является амплитуда Mag . Значение коэффициента, который связывает изменение сигнала Mag с изменением расстояния между зондом и поверхностью определяется из кривой подвода на ее прямолинейном участке как отношение $\frac{\Delta Mag}{\Delta Z}$. Напомним, что это отношение зависит от амплитуды раскачки как $\sim \frac{1}{A}$, поэтому для малой амплитуды оно может быть достаточно большим, чтобы сделать работу обратной связи неустойчивой.

Звено частотного анализа

На данном этапе осуществляется частотный анализ профиля контролируемой детали в заданном диапазоне масштабов локальных

неоднородностей, совокупность которых описывает структуру её исследуемой поверхности.

В общем случае функцию, описывающую структуру локальных отклонений профиля оптической детали, можно представить в виде набора гармоник соответствующих пространственных частот, определяющих такие его технологические параметры, как непрямолинейность и волнистость. Эти локальные отклонения обусловлены свойствами обрабатывающих инструментов с погрешностью метода обработки оптических изделий. Помимо указанных параметров формы профиля, высокочастотные гармоники характеризуют степень шероховатости, которая образуется при съёме материала в процессе формообразования детали полирующими суспензиями. Данная методика анализа уже была апробирована и хорошо себя зарекомендовала в контроле качества изготовления активных лазерных сред технологического комплекса NIF (National Ignition Facility, США) посредством интерферометрических исследований искажения волнового фронта.

Используя методики атомно-силовой микроскопии, мы предлагаем восстановить по амплитуде сигнала Mag профиль поверхности образца и построить СПКФ исследуемого рельефа. В одномерном случае она (известная также как англ. Power Spectral Density, PSD) выглядит следующим образом:

$$PSD(\nu_x) = \bar{h}(\nu_x) = \frac{|F\{h(x)\}|^2}{T_x} \quad (8)$$

где $h(x)$ - топография исследуемой поверхности, нм;

$F\{h(x)\}$ - Фурье-образ исследуемого рельефа, нм^{-1} ;

T_x - длина профиля калибровочной решетки вдоль оси X , мкм.

Используя СПКФ, мы можем проанализировать, как часто встречаются объекты характерных размеров (включения, царапины, пылинки) на

исследуемой поверхности и на основе этого произвести метрологическую аттестацию изделия.

2 Расчет параметров канала регистрации атомно-силового микроскопа

В настоящей главе описываются основные источники шума атомно-силового микроскопа, рассматривается вопрос о влиянии угловой апертуры лазерной системы датчика на его чувствительность и уровень шумов, а также устройство слежения лазерным лучом за кантилевером. Описана оптическая схема канала регистрации атомно-силового микроскопа. Проведен расчет оптимального размера лазерного пятна на кантилевере и фотодиоде.

2.1 Влияние угловой апертуры лазерной системы на чувствительность и шумовые характеристики датчика изгибов кантилевера

Шумы оптического датчика изгибов кантилевера обычно рассматривают в низкочастотном диапазоне (в полосе 10-1000 Гц), важном для контактного режима АСМ. В качестве основных источников шума обычно рассматривают шум лазера, тепловые колебания кантилевера, дробовой шум фотодиода и тепловой шум нагрузочного резистора в предусилителе.

Последние два источника шума дают в указанной полосе вклад на уровне не более нескольких пикометров. Для выпускаемых серийно АСМ величина шумов системы регистрации в указанной полосе составляет 0.04-0.05 нм. Спектральная плотность теплового шума кантилевера описывается следующим соотношением:

$$n(f) = \sqrt{\frac{2kT}{\pi f_0 k Q [1 - (f/f_0)^2]^2 + [f/(f_0 Q)]^2}} \quad (9)$$

где f – частота колебаний кантилевера, Гц;

f_0 – резонансная частота колебаний кантилевера, Гц;

κ – жесткость кантилевера, Н/м;

Q – добротность кантилевера;

k – постоянная Больцмана, Дж*К;

T – температура окружающей среды, К.

Характерные значения резонансной частоты зондов, используемых в экспериментах по определению уровня шумов системы регистрации, составляют по порядку величины 200 кГц, поэтому для рассматриваемой низкочастотной области, где $f \ll f_0$, можно записать:

$$n(f) = \sqrt{\frac{2kT}{\pi f_0 \kappa Q}} \quad (10)$$

Даже для случая, когда кантилевер находится на воздухе, где его добротность составляет ~ 300 , полагая (для зонда NSG10 производства NT-MDT Spectrum Instruments) $f_0 = 240$ кГц, $\kappa = 12$ Н/м получим в полосе до 1 кГц тепловые шумы кантилевера на уровне ~ 150 фм, что много меньше других составляющих общего шума. В работе показано, что существенным источником шума являются шумы лазера, связанные преимущественно с поперечными и угловыми блужданиями падающего на кантилевер пучка. Для снижения вклада шумов лазера используются различные приемы, такие как диафрагмирование лазерного пучка, термостабилизация и высокочастотная модуляция лазера. Тем не менее, в перечисленных работах обходят вниманием вопрос о влиянии угловой апертуры лазерной системы датчика на его чувствительность и уровень шумов; рассмотрение этого вопроса важно в нашем случае.

Для рассмотрения этого вопроса нам потребуется сначала проанализировать зависимость чувствительности датчика изгибов кантилевера от основных геометрических параметров системы регистрации. Для этого рассмотрим функционально-оптическую схему канала регистрации изгибов кантилевера, представленную на рисунке 26.

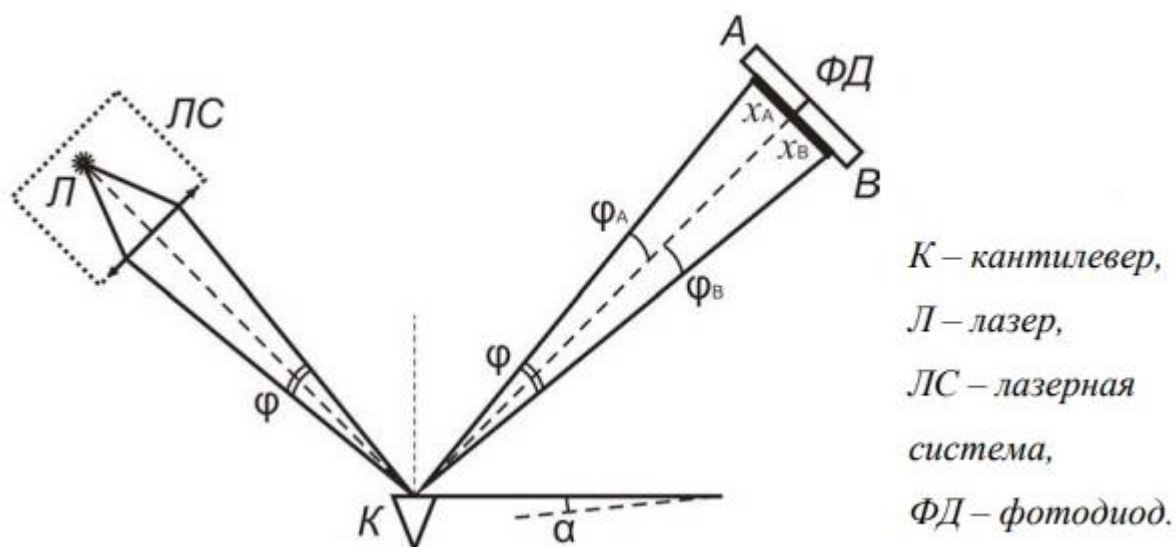


Рисунок 26 – Оптический датчик изгибов кантилевера [11].

Будем предполагать при этом, что фотодиод идеален, а интенсивность лазерного излучения распределена в пучке равномерно. Отраженный от кантилевера лазерный луч падает на секционированный фотодиод, секции которого обозначены как А и В. Разностный сигнал с этих секций, который обозначим как DFL, пропорционален изгибу кантилевера, то есть $DFL \sim P_A - P_B$, где P_A и P_B - мощности лазерного излучения, падающего на секции А и В соответственно. Если P – общая мощность лазерного излучения, то для P_A и P_B можно записать.

$$P_A = k \frac{x_A}{x_A + x_B} P = k \frac{\varphi_A}{\varphi_A + \varphi_B} P = \frac{k\varphi_A}{\varphi} P \quad (11)$$

$$P_B = k \frac{x_B}{x_A + x_B} P = k \frac{\varphi_B}{\varphi_A + \varphi_B} P = \frac{k\varphi_B}{\varphi} P \quad (12)$$

где x_A и x_B - размеры соответствующих частей лазерного пятна на секциях А и В, мм;

φ_A и φ_B - углы, под которыми эти секции видны из точки падения луча на кантилевер, град;

$\varphi = \varphi_A + \varphi_B$ - угол схождения лазерного пучка, град;

k – коэффициент пропускания оптической системы, то есть отношение мощности лазерного излучения, попавшего на фотодиод, к мощности выходящего из лазерной системы света.

Тогда для сигнала DFL получим:

$$DFL = \frac{kP}{\varphi} (\varphi_A - \varphi_B) = \frac{kP}{\varphi} \alpha \quad (13)$$

где α - угол изгиба кантилевера, град.

Отсюда для чувствительности S системы имеем:

$$S = \frac{\partial DFL}{\partial \alpha} = \frac{kP}{\varphi} \quad (14)$$

Опущенный в (14) коэффициент пропорциональности, определяется (с точностью до числового множителя) величиной сопротивления нагрузочного резистора в предусилителе и чувствительностью фотодиода. Отметим, что чувствительность оптического датчика не зависит от расстояния между кантилевером и фотодиодом, а произведение kP в числителе правой части (14) представляет собой мощность излучения, попавшую на фотодиод. Из (14) видно, что при уменьшении угловой апертуры лазерной системы, чувствительность датчика возрастает. Одновременно, возрастает и вклад в шумы системы регистрации, обусловленный паразитными блужданиями пучка, делая тем самым соотношение сигнала к шуму неизменным. В тоже время, с уменьшением угловой апертуры, увеличивается размер лазерного пятна на кантилевере. Так, например, в случае гауссова пучка для его полуширины a можно записать:

$$a = \frac{2\lambda}{\pi\varphi} \quad (15)$$

где λ - длина волны лазера, нм.

Для упрощения дальнейшего анализа будем считать пятно равномерно засвеченным квадратом со стороной $2a$, центр которого совпадает с центром кантилевера (рис. 27). Когда размер пятна превосходит ширину кантилевера, часть мощности падающего пучка теряется. Если $w < 2a < l$, где w и l – ширина и длина кантилевера соответственно, то при увеличении a величина мощности отраженного от кантилевера пучка падает линейно, и из формул (14) и (15) видно, что чувствительность системы остается постоянной. Обратим внимание, что в этом случае кантилевер начинает играть роль диафрагмы, вырезая из всего распределения интенсивности в пучке наиболее пологую часть, уменьшая тем самым влияние паразитных блужданий и уровень вызванных ими шумов.

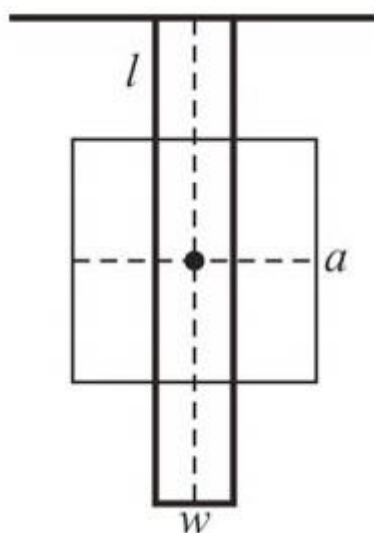


Рисунок 27 – Лазерное пятно на кантилевере [11].

При дальнейшем уменьшении угловой апертуры лазерной системы (то есть при увеличении размера пятна на кантилевере), когда становится $2a > l$, мощность излучения, попавшего на фотодиод, уменьшается квадратично, и чувствительность системы линейно падает.

Отсюда ясно, что оптимальное значение апертуры лазерной системы следует искать в диапазоне, где размер лазерного пятна на кантилевере удовлетворяет условию $w < 2a < l$. С точки зрения рассмотренной упрощенной модели, в тех случаях, когда основной вклад в шум обуславливается блужданиями лазерного пучка, следует выбирать апертуру таким образом, чтобы

пятно в продольном направлении максимально покрывало кантилевер. Здесь, конечно, в качестве поправки надо учитывать то, что изгиб кантилевера вдоль его длины не является однородным. В тех случаях, когда позиционные и угловые шумы лазера малы по сравнению с дробовыми шумами фотодиода, следует выбирать апертуру таким образом, чтобы размер пятна был равен ширине кантилевера.

Расчет согласно (15) показывает, что оптимальные расстояния от лазерной системы до кантилевера в нашем случае лежат в пределах от 140 мм до 420 мм (угловые апертуры равны при этом 0.03 и 0.01 соответственно). Экспериментально оптимум наблюдается при расстояниях около 200 – 250 мм.

2.2 Организация системы слежения лазерным лучом за кантилевером в процессе сканирования. Оптическая схема системы регистрации

В процессе сканирования зонд перемещается по растру размером 80×80 мкм, в то время как характерный размер лазерного пятна на кантилевере составляет 20-30 мкм. По этой причине приходится вводить в конструкцию систему слежения лазерного луча за кантилевером. Сканирование в плоскости XY организовано при помощи пьезотрубки, при подаче высокого (до 300 В) напряжения на которую, происходит ее изгиб. При этом остается неподвижным т.н. центр вращения трубки, который с хорошей точностью совпадает с ее геометрическим центром. Если теперь закрепить на трубке зеркало 31 таким образом, что созданное им изображение K' кантилевера совпадет с центром вращения, то при сканировании, то есть смещении кантилевера в некоторое положение K'' , луч лазера, отразившись от зеркала 31 вновь попадет на кантилевер (рис. 28).

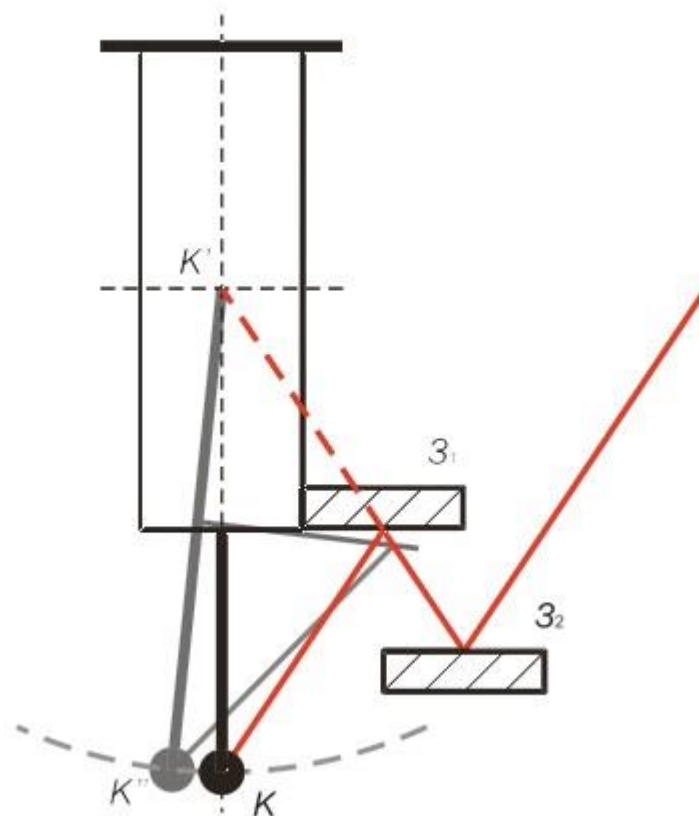


Рисунок 28 – Система слежения лазерным лучом за кантилевером в процессе сканирования [11].

При рассмотрении хода луча от кантилевера до фотодиода можно пренебречь неплоскостностью сканера, которая составляет не более 200 нм. После того, как организована система слежения лазерным лучом за кантилевером, перемещение кантилевера в процессе сканирования будет вызывать параллельный снос отраженного луча (паразитный эффект), а изгиб кантилевера – поворот луча (полезный эффект). Эти эффекты следует разделить. Для этого между фотодиодом и кантилевером устанавливают линзу так, чтобы фотодиод находился в ее фокусе (рис. 29). В таком случае параллельный снос отраженного луча более не влияет на положение лазерного пятна на фотодиоде, в то время как вращение отраженного луча приводит к смещению выходящего из линзы луча и, соответственно, появлению на фотодиоде полезного сигнала.

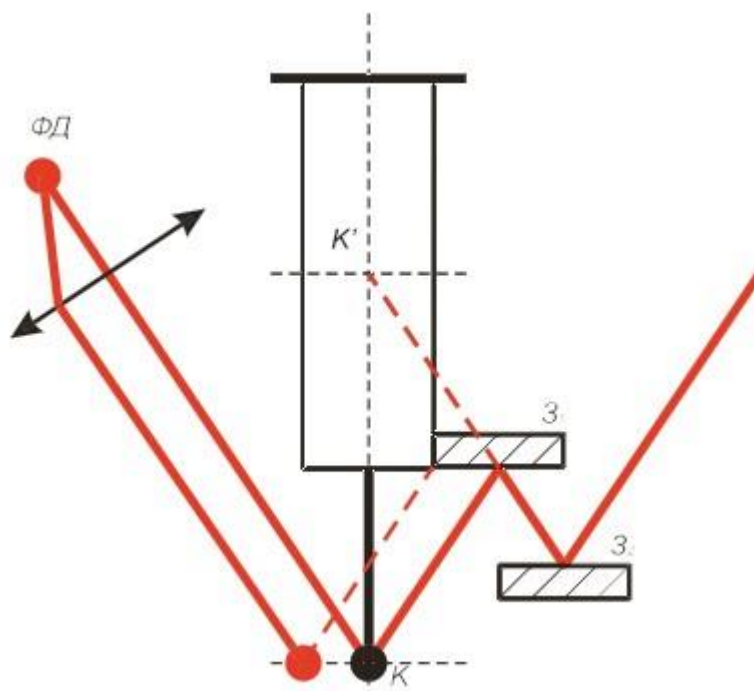


Рисунок 29 – Установка линзы между кантилевером и фотодиодом позволяет разделить снос отраженного луча при сканировании и его поворот при изгибе кантилевера [11].

Конструктивное решение на рисунке 29 предлагает устанавливать линзу между кантилевером и фотодиодом так, чтобы они находились в противоположных фокусах линзы. Этот прием позволяет преобразовать вращение отраженного от кантилевера луча в параллельное смещение выходящего из линзы лазерного пучка и таким образом одновременно согласовать размер лазерного пятна на фотодиоде с размером матрицы фотодиода без введения в оптическую систему дополнительных элементов. Оптическая схема системы регистрации изгибов кантилевера представлена на рисунке 30, а конструктивное исполнение ее элементов иллюстрирует рисунок 31.

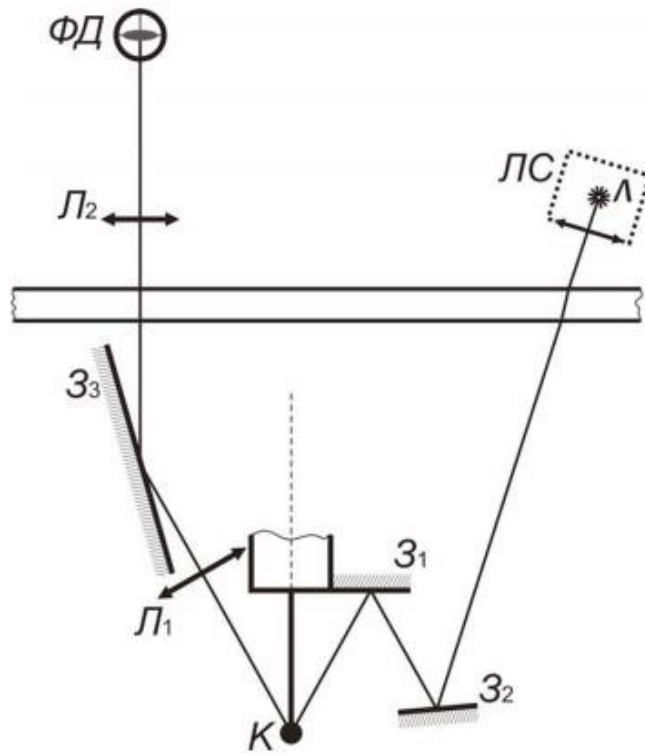


Рисунок 30 – Оптическая схема системы регистрации изгибов кантилевера [11].

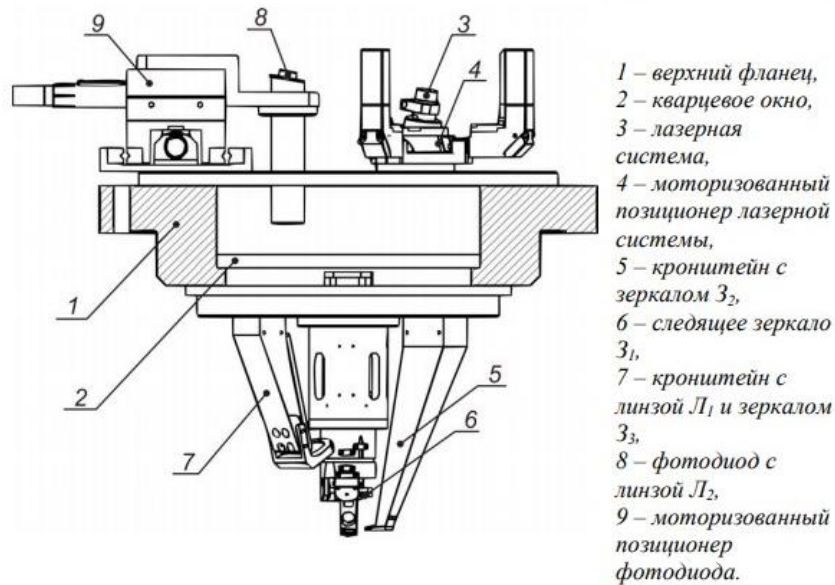


Рисунок 31 – Исполнение элементов системы регистрации [11].

В силу конструктивных особенностей, в оптическую схему системы регистрации введена линза L_2 , а также зеркало Z_3 . Линза L_2 позволяет создать изображение заднего фокуса линзы L_1 в точке, в которой расположен фотодиод. При юстировке фотодиода линза L_2 перемещается вместе с ним.

2.3 Оценка размера лазерного пятна на фотодиоде

Оценим (пренебрегая дифракционной расходимостью пучка) размер лазерного пятна на фотодиоде. На выходе из лазера имеем пятно прямоугольной формы размером $a \times b = 4 \times 2$ мм. Лазер ориентируется таким образом, чтобы более широкая сторона прямоугольного светового пятна была перпендикулярна кантилеверу. Фокусируется лазер на расстояние $l = 200$ мм, соответственно сходимости пучка в двух взаимно перпендикулярных направлениях:

$$\varphi_a = \frac{a}{l} \quad (16)$$

$$\varphi_a = \frac{4}{200} = 0.02$$

$$\varphi_b = \frac{b}{l} \quad (17)$$

$$\varphi_b = \frac{2}{200} = 0.01$$

Отраженный от кантилевера расходящийся пучок преобразуется в параллельный линзой Л1, в фокусе которой расположен кантилевер. Следовательно, для характерного размера $r_a \times r_b$ пятна на фотодиоде будем иметь:

$$r_a = \varphi_a F_1 \quad (18)$$

$$r_b = \varphi_b F_1 \quad (19)$$

По формулам (18), (19) $r_a = 1$ мм, $r_b = 2$ мм, что при размере каждой секции фотодиода 1.3×1.3 мм является приемлемым. Заметим, что в таком расчете

предполагается, что интенсивность излучения лазера распределена в пучке равномерно (это вполне допустимо для оценки). В действительности, распределение интенсивности в пучке ближе к гауссовому, поэтому измеряемый экспериментально (по интенсивности) размер лазерного пятна на фотодиоде приблизительно на 20% меньше расчетного. Отметим, что юстировка лазера и фотодиода оптической системы регистрации изгибов кантилевера автоматизирована шаговыми двигателями.

2.4 Светоэнергетический расчет

Рассчитаем размеры лазерного пятна на элементах, используя эквивалентную функционально-оптическую схему, представленную на рисунке 32.

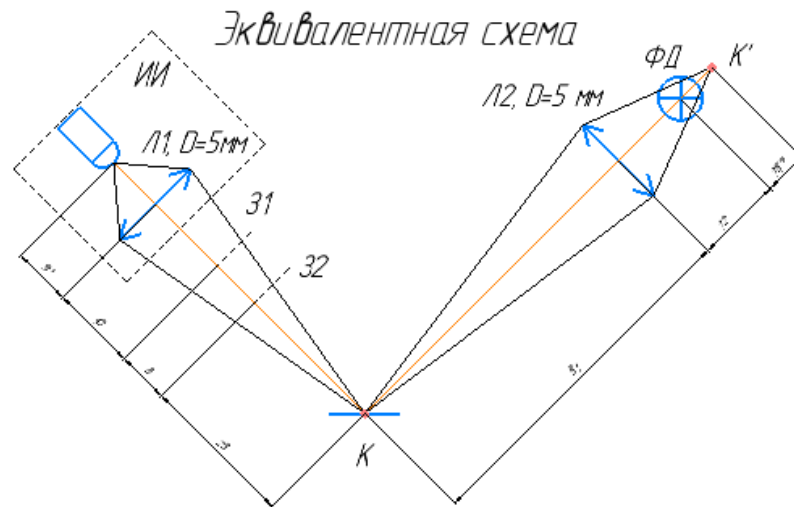


Рисунок 32 – Эквивалентная функционально-оптическая схема канала регистрации, используемая в светоэнергетическом расчете.

Зеркало 1 (31): $\frac{31}{41} = \frac{\phi_{31}}{5} \Rightarrow \phi_{31} = 3.8 \text{ мм}$ - из подобия треугольников

Зеркало 2 (32): $\frac{23}{41} = \frac{\phi_{32}}{5} \Rightarrow \phi_{32} = 2.8 \text{ мм}$ - из подобия треугольников

Определим диаметр лазерного пятна на кантилевере по критерию Рэлея:

$$\phi_{31} = 2.44 \frac{\lambda f}{D} \quad (20)$$

Кантилевер (К): $\phi_{31} = 2.44 \frac{650 \text{ нм} * 40 \text{ мм}}{5 \text{ мм}} = 13 \text{ мкм}$

Рисунок 33 иллюстрирует распространение излучения от кантилевера до фотодиода (ФД):

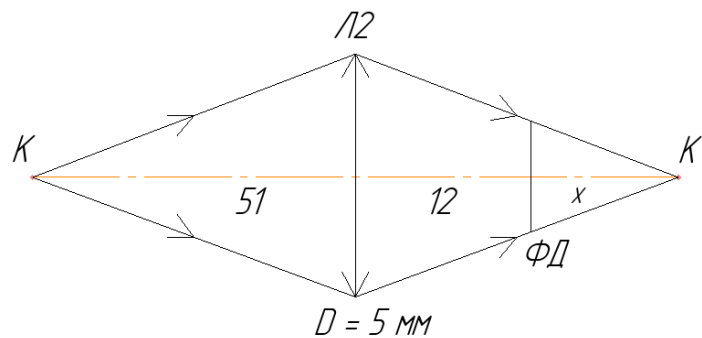


Рисунок 33 – Схема распространения излучение от кантилевера (К) до фотодиода (ФД).

По формуле тонкой линзы определим расстояние от плоскости фотодиода до изображения кантилевера:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad (21)$$

где f - фокусное расстояние линзы, мм;

a - расстояние от предмета до линзы, мм;

b - расстояние от линзы до изображения, мм.

$$\frac{1}{12} = \frac{1}{51} + \frac{1}{x}$$

$$x = \frac{12 * 51}{39} = 15.7 \text{ мм}$$

Из подобия треугольников определим размер лазерного пятна на фотодиоде:

$$\frac{\Phi_{\text{ФД}}}{5} = \frac{15.7}{27.7} \Rightarrow \Phi_{\text{ФД}} = 2.83 \text{ мм}$$

В качестве ФПУ выберем кремниевый фотодиод ФД-20КП (рис. 34) со следующими характеристиками:

Размеры фоточувствительного элемента, мм (число элементов): 2x2

Область спектральной чувствительности, мкм: 0.5...1.1

Длина волны максимальной спектральной чувствительности, мкм: 0.85...0.92

Рабочее напряжение, В: 7

Темновой ток, мА: 0.1

Интегральная чувствительность по току, А/Вт: 4

Масса: 4 г

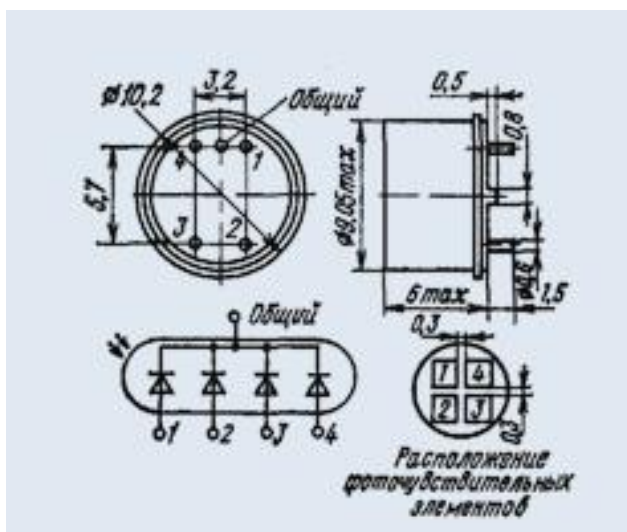


Рисунок 34 – Габаритный чертеж ФД-20КП.

Размеры фоточувствительных площадок 2x2 мм, расстояние между двумя ФП составляет 0.3 мм. А между центрами 4, 3 и 1, 2 площадок ФП 3.2 мм.

Тогда ширина интерференционной полосы:

$$h_{\text{ИК}} = 4 \cdot d_{\text{П}} \quad (22)$$

$$h_{\text{ик}} = 4 \cdot 2,83 = 11,32 \text{ мм}$$

В резонаторе формируется поток мощностью 1 мВт, тогда выводится лишь 0.1% из резонатора:

$$\Phi = 1 \cdot 0.001 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$$

Определим засвеченную площадь З1:

$$\emptyset_{31} = 3.8 \text{ мм} \Rightarrow A = \pi r^2 = 11,2 \text{ мм}^2 - \text{общая площадь засветки З1}$$

Облученность З1:

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (23)$$

$$E = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{11,2} = 0.89 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Светимость З1:

$$M = \rho E \quad (24)$$

$$M = 0.98 \cdot 0.89 = 0.88 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Поток, излученный зеркалом З1:

$$\Phi_{31} = A \cdot M \quad (25)$$

$$\Phi_{31} = 0.98 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$$

По аналогии для З2, К, Л2:

$$\Phi_{32} = 0.96 \cdot 10^{-6} \text{Вт}$$

$$\Phi_{\text{к}} = 0.94 \cdot 10^{-6} \text{Вт}$$

$$\Phi_{\text{Л2}} = 0.9 \cdot 10^{-6} \text{Вт}$$

Рассчитаем площадь облученных чувствительных площадок фотодиода

$$A_0 = \pi r^2 = 6.29 \text{ мм}^2 \text{ — общая площадь засветки}$$

$$A_1 = 0.3 \cdot 2.83 = 0.85 \text{ мм}^2 \text{ — площадь нечувствительного канала 1}$$

$$A_2 = 0.3 \cdot 2.53 = 0.76 \text{ мм}^2 \text{ — площадь нечувствительного канала 2}$$

$$A = 4.7 \text{ мм}^2 = 4.68 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \text{ — площадь засвеченных чувствительных элементов}$$

По формуле (23) определим облученность чувствительных площадок фотодиода:

$$E = \frac{0.9 \cdot 10^{-6}}{4.68 \cdot 10^{-6}} = 0.192 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Интегральная чувствительность фотоприемника:

$$S = 4 \frac{\text{А}}{\text{Вт}}$$

Сигнальный фототок с учетом интерференции (ширина ЧП $a=1.5 \text{ мм}$)

$$I = S \cdot A \cdot E \cdot \left(1 + \frac{\sin\left(\pi \frac{a}{d_{\text{п}}}\right)}{\pi \frac{a}{d_{\text{п}}}} \right) \quad (26)$$

$$I = 57.7 \cdot 10^{-7} \text{ А}$$

Из паспорта приемника известно, что темновой ток равен:

$$I_{\text{т}} = 0.1 \text{ мкА} = 10^{-7} \text{ А}$$

Отношение сигнал/шум:

$$\mu = \frac{I}{I_{\text{т}}} \quad (27)$$

$$\mu = 57.7$$

Вывод: при текущем ОСШ возможна регистрация движения кантилевера. Для улучшения ОСШ можно увеличить мощность потока выходящего из резонатора, изменить оптическую длину пути пучка до ФПУ.

3 Экспериментальная апробация методики аттестации технологических изделий на основе атомно-силового микроскопа

В настоящей главе описывается проведение эксперимента с калибровочными решетками TGZ1, TGZ2 и TGZ3 с высотой ступеньки 20 ± 2 нм, 110 ± 2 нм и 520 ± 3 нм, соответственно, и периодом 3 мкм. Также были построены идеальные модели профиля данных решеток, описанные прямоугольной функцией $\text{rect}(x)$. Было проведено сравнение и анализ нормированных теоретических и экспериментальных СПКФ вышеназванных образцов.

3.1 Измерение калибровочных решеток прямоугольного профиля

В данной работе был использован модульный сканирующий зондовый микроскоп NTEGRA (рис. 35), который применяется для решения широкого спектра задач в области АСМ. В нем предусмотрена возможность изучения физических свойств поверхности образца с высокой точностью: ошибка измерения линейных размеров $\pm 0,5\%$, уровень шума вдоль оси Z - 0,04 нм, вдоль X, Y - 0,2 нм.

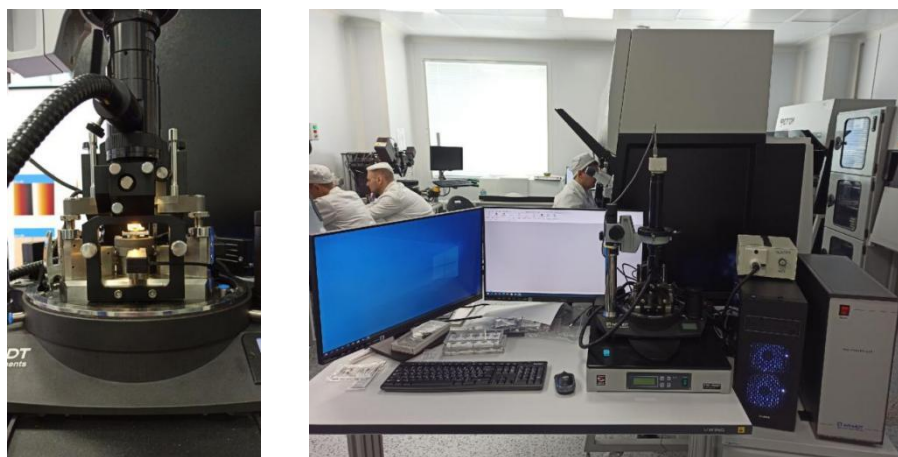


Рисунок 35 – Модульный сканирующий зондовый микроскоп NTEGRA.

В ходе серии экспериментов были получены изображения топографии калибровочных решеток TGZ1, TGZ2, TGZ3 с высотой ступеньки 20 ± 2 нм, 110 ± 2 нм и 520 ± 3 нм, соответственно, и периодом 3 мкм (рис. 36).

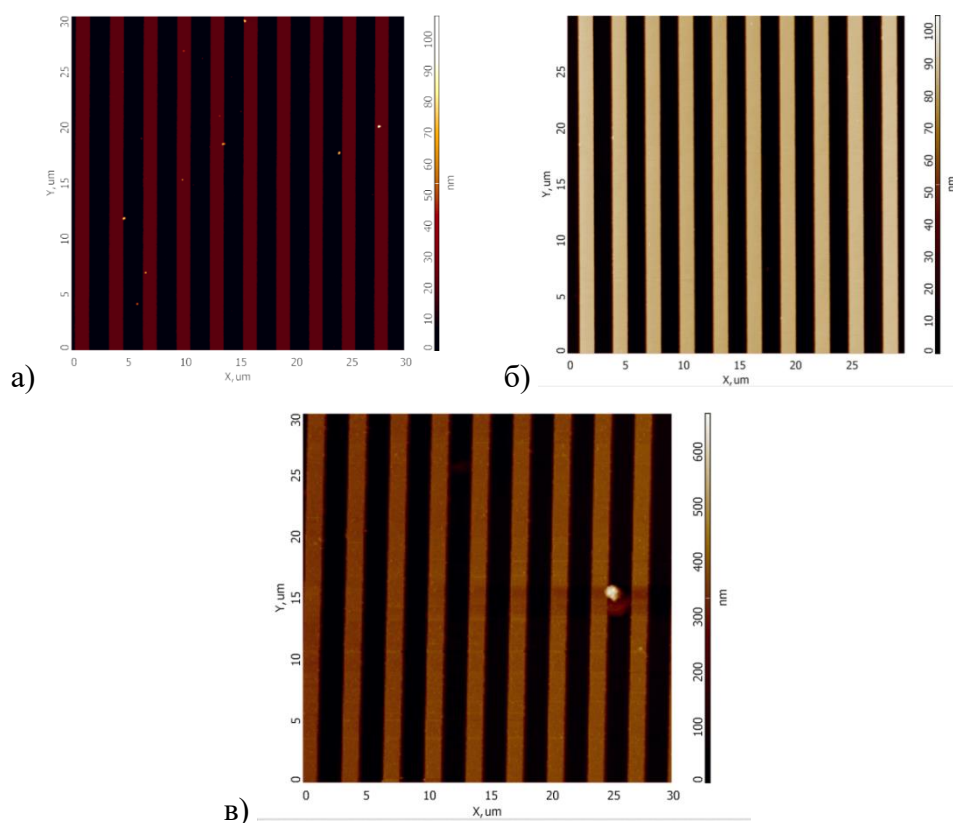


Рисунок 36 – Калибровочные решетки: а) TGZ1, б) TGZ2, в) TGZ3.

Измерения калибровочных решеток проводились с использованием головки микроскопа Smena и верхнего сканера в полуконтактной методике сканирования. В ходе эксперимента использовался зонд NSG01. Экспериментальная установка располагалась на вибростоле для подавления случайных шумов.

3.2 Сравнение и анализ экспериментальной и теоретической СПКФ

Для аттестации вышепредставленных изделий предложено проводить частотный анализ их профилей в заданном диапазоне пространственных частот локальных неоднородностей, совокупность которых описывает структуру их исследуемых поверхностей.

В общем случае функцию профиля оптической детали, можно представить в виде набора гармоник соответствующих пространственных частот, определяющих такие его технологические параметры, как непрямолинейность,

волнистость и шероховатость. Эти локальные отклонения обусловлены свойствами обрабатывающих инструментов и погрешностью метода обработки оптических изделий [12].

Используя методики АСМ, в работе предлагается восстанавливать по амплитуде сигнала Mag профиль поверхности образца и строить СПКФ исследуемой топографии. В одномерном случае СПКФ может быть записана в виде выражения (8) [3].

Как можно видеть из (8) СПКФ характеризует частотный спектр локальных неоднородностей исследуемого профиля в заданном диапазоне их пространственных частот. Следовательно, используя СПКФ, мы можем проанализировать наличие определенных объектов (включения, царапины, пылинки) на исследуемой поверхности по характеру и значению функции СПКФ, автоматизируя процедуру метрологического аттестационного контроля [13].

Зная восстановленную по серии АСМ-изображений СПКФ можно рассчитать среднеквадратическое отклонение (СКО) высоты поверхности (Rq):

$$Rq = \sqrt{2\pi \int_{v_1}^{v_2} PSD(v_x) dv_x} \quad (28)$$

где v_1 и v_2 - значения минимальной и максимальной пространственных частот локальных неоднородностей в области проводимых исследований, мкм^{-1} ;

$PSD(v_x)$ - одномерная СПКФ исследуемого рельефа вдоль оси X .

Минимальная и максимальная частоты лежат в области определения восстановленной СПКФ и могут быть выбраны с учетом специфики конкретной задачи [14].

В результате частотного анализа данных на основе выражения (8) были получены одномерные СПКФ вдоль оси X представленные на рисунке 37. Были построены идеальные модели профиля данных решеток, описанные

прямоугольной функцией $\text{rect}(x)$ высотой 20 нм для TGZ1, 110 нм для TGZ2, 520 нм для TGZ3 и периодом 3 мкм, и их теоретические СПКФ (рис. 38).

На основе СПКФ для каждой калибровочной решетки определим расстояние между нулевым и первым максимумами, то есть частоту следования ступенек, и период. Стоит отметить, что расположение первых максимумов теоретической СПКФ, представленное на рисунке 38, совпадает для всех решеток, поскольку их периоды идентичны (табл. 3). Также, на рисунке 37 мы можем наблюдать отсутствие плавного уменьшения высот побочных максимумов, связанное с искажением идеального прямоугольного профиля ступенек.

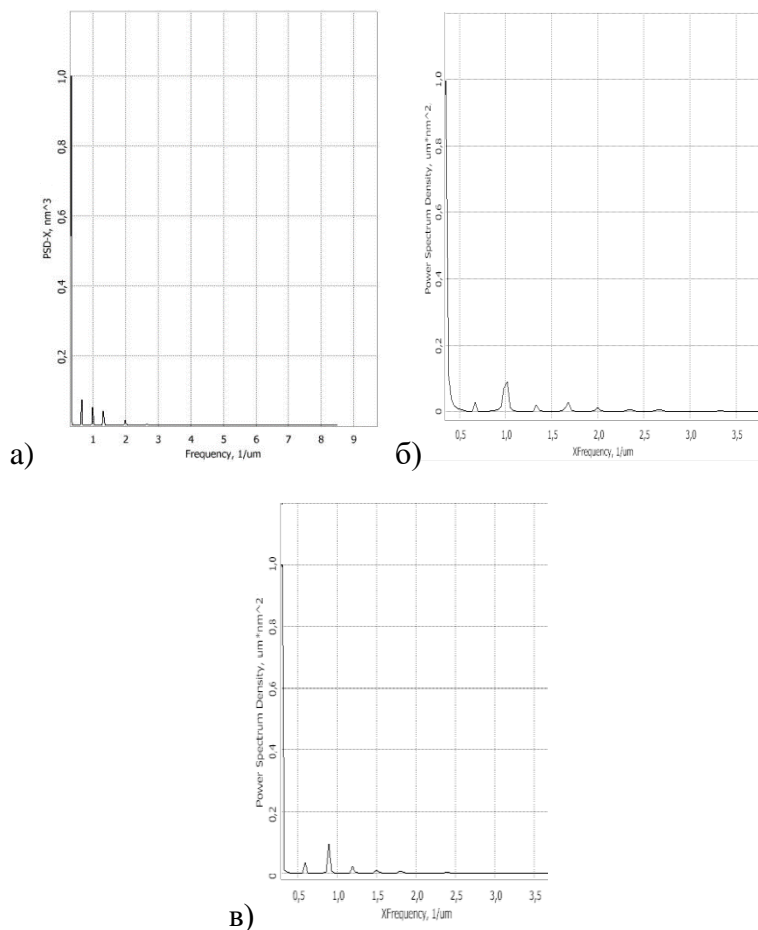


Рисунок 37 – Нормированная экспериментальная функция СПКФ: а) TGZ1, б) TGZ2, в) TGZ3.

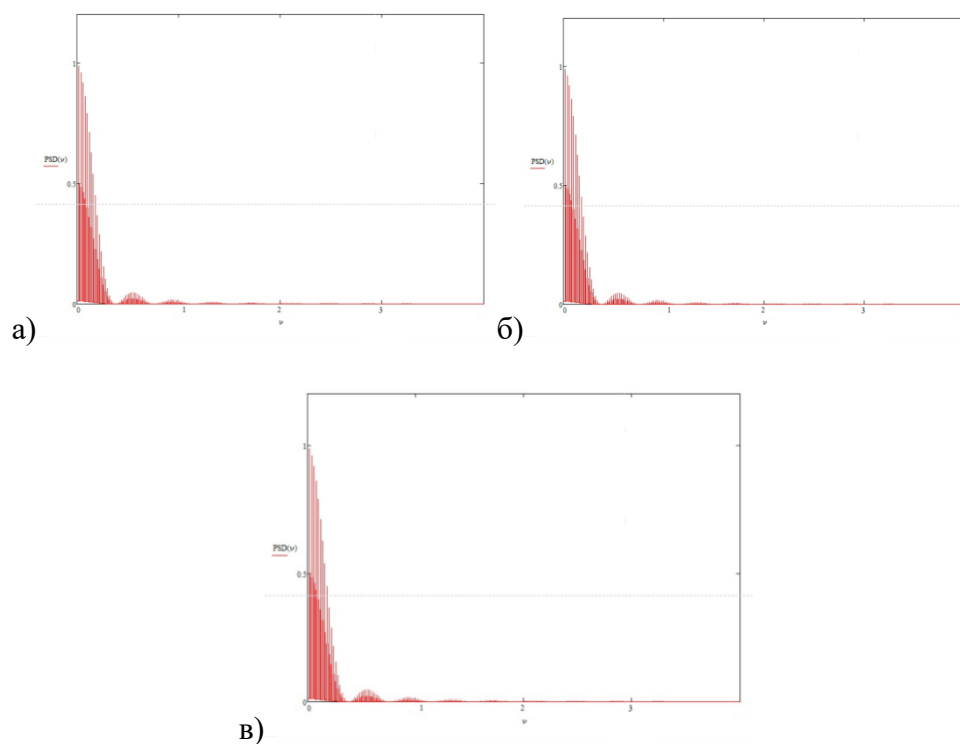


Рисунок 38 – Нормированная теоретическая функция СПКФ: а) TGZ1, б) TGZ2, в) TGZ3.

Таблица 3 – Сравнение экспериментальных и теоретических характеристик

Название калибровочной решетки	Эксперимент			Паспортные данные		
	ν_x , мкм ⁻¹	T_x , мкм	h, нм	T_x , мкм	h, нм	σ , %
TGZ1	0,33	3,03	19,4	3	20±2	24,3
TGZ2	0,32	3,13	107,3	3	110±2	22
TGZ3	0,30	3,33	538,6	3	550±3	20,3

Анализируя рисунки 37 и 38 можно увидеть, что характер распределения экспериментальных и расчетных значений функций в области заданных пространственных частот является схожим. Сравнение экспериментальных и теоретических характеристик шероховатости калибровочных решеток собраны в таблице 3.

Вычислим среднеквадратические погрешности измерения высоты калибровочных решеток TGZ1, TGZ2, TGZ3 по следующей формуле [15]:

$$\sigma = \frac{\sqrt{h_{q,пасп}^2 - h_{q,эксп}^2}}{h_{q,пасп}} \quad (29)$$

где $h_{q,пасп}$, $h_{q,эксп}$ - паспортная и измеренная высота ступеньки калибровочной решетки, нм.

$$\text{TGZ1: } \sigma = \frac{\sqrt{20^2 - 19,4^2}}{20} \cdot 100\% = 24,3\%$$

$$\text{TGZ2: } \sigma = \frac{\sqrt{110^2 - 107,3^2}}{110} \cdot 100\% = 22\%$$

$$\text{TGZ3: } \sigma = \frac{\sqrt{550^2 - 538,6^2}}{550} \cdot 100\% = 20,3\%$$

Важно отметить, что с увеличением высоты профиля изучаемых калибровочных решеток увеличивается среднеквадратическая погрешность их измерения.

Сравнительный анализ графиков, представленных на рисунках 37 и 38, а также информации, представленной в таблице 3, выявил взаимосвязь наличия определенных частот в спектре с объектами характерных размеров. Данная особенность может быть использована для аттестации перспективных технологических изделий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе разработана методика автоматической аттестации современных технологических изделий на основе атомно-силового микроскопа. Для достижения данной цели решен ряд задач:

- Проведение анализа и сравнения существующих методов микроскопии.
- Разработка теоретической модели работы канала регистрации атомно-силового микроскопа.
- Проведение проработки схемотехнических решений при разработке функциональной схемы канала регистрации.
- Проведение набора экспериментальных данных с калибровочными решетками TGZ1, TGZ2, TGZ3.
- Построение экспериментальной и теоретической функции спектральной плотности мощности калибровочных решеток.

Полученные результаты имеют большое значение для проверки характеристик качества поверхностей перспективных технологических изделий. Предложенный нами метод аттестации на основе атомно-силового микроскопа позволит осуществлять контроль изделий с высокой точностью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. В. Миронов Основы сканирующей зондовой микроскопии // РИЦ Техносфера, 2004.
2. Bharat Bhushan Handbook of Nanotechnology // Boston, MA: Springer US, 2004.
3. [Электронный ресурс] // NT-MDT - компания-производитель атомно-силовых микроскопов. URL: <https://www.ntmdt-si.ru/> (дата обращения 23.03.2021)
4. Hong-Qiang Li Biological Applications of AFM, 1997.
5. Б.А. Грибков Сканирующая зондовая микроскопия поверхностной шероховатости и магнитных наноструктур, 2006.
6. Binning, Quate, Gerber: Atomic force microscope // Phys. Rev. 56, 930-933, 1986.
7. Maja Dukic, Jonathan D. Adams and Georg E. Fantner Piezoresistive AFM cantilevers surpassing standard optical beam deflection in low noise topography imaging // Scientific Reports, 5, 16393, 2015.
8. Robert A. Wilson and Heather A. Bullen Introduction to Scanning Probe Microscopy (SPM) Basic Theory Atomic Force Microscopy (AFM) // Department of Chemistry, Northern Kentucky University, Highland Heights, KY 41099.
9. A. von Schmidsfeld and M. Reichling Controlling the opto-mechanics of a cantilever in an interferometer via cavity loss // Appl. Phys. Lett. 107, 123111, 2015.
10. T. Itoh and T. Suga Development of a force sensor for atomic force microscopy using piezoelectric thin films // Nanotechnology, 4(4), 1993.
11. В. В. Поляков Сверхвысоковакуумный сканирующий зондовый микроскоп

совместимый с базовыми методами нанотехнологий, 2009.

12. Д.Г. Денисов Измерение параметров шероховатостей шлифованных и полированных оптических поверхностей с помощью высокоточных методов лазерной интерферометрии // Успехи прикладной физики, 5(4), 393-411, 2017.
13. Б.Г. Львов, Г.Г. Бондаренко, А.В. Николаевский Цифровая обработка и анализ изображений поверхностных наноструктур в сканирующем зондовом микроскопе, 2011.
14. М.Л. Занавескин Атомно-силовая микроскопия в исследовании шероховатости наноструктурированных поверхностей, 2008.
15. И. А. Кострикина, Л. А. Макаркин Методика измерения шероховатости объектов высокого класса чистоты // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль., 1(27), 48-54, 2019.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Графическая часть дипломного проекта

В графическую часть дипломного проекта входят:

- Функционально-оптическая схема канала регистрации изгибов кантилевера атомно-силового микроскопа (рис. А1)
- Эквивалентная функционально-оптическая схема канала регистрации изгибов кантилевера атомно-силового микроскопа (рис. А2)
- Схема устройства системы слежения лазерным лучом за кантилевером в процессе сканирования в атомно-силовом микроскопе (рис. А3)
- Экспериментальные результаты измерения калибровочных решеток прямоугольного профиля (рис. А4)
- Схема юстировки оптического канала регистрации изгибов кантилевера атомно-силового микроскопа (рис. А5)
- Чертеж кожуха атомно-силового микроскопа (рис. А6)
- Чертеж крышки платы атомно-силового микроскопа (рис. А7)
- Чертеж втулки сканера атомно-силового микроскопа (рис. А8)
- Чертеж держателя зеркала канала регистрации изгибов кантилевера атомно-силового микроскопа (рис. А9)
- Чертеж зеркала канала регистрации изгибов кантилевера атомно-силового микроскопа (рис. А10)
- Чертеж линзы фотодиода канала регистрации изгибов кантилевера атомно-силового микроскопа (рис. А11)

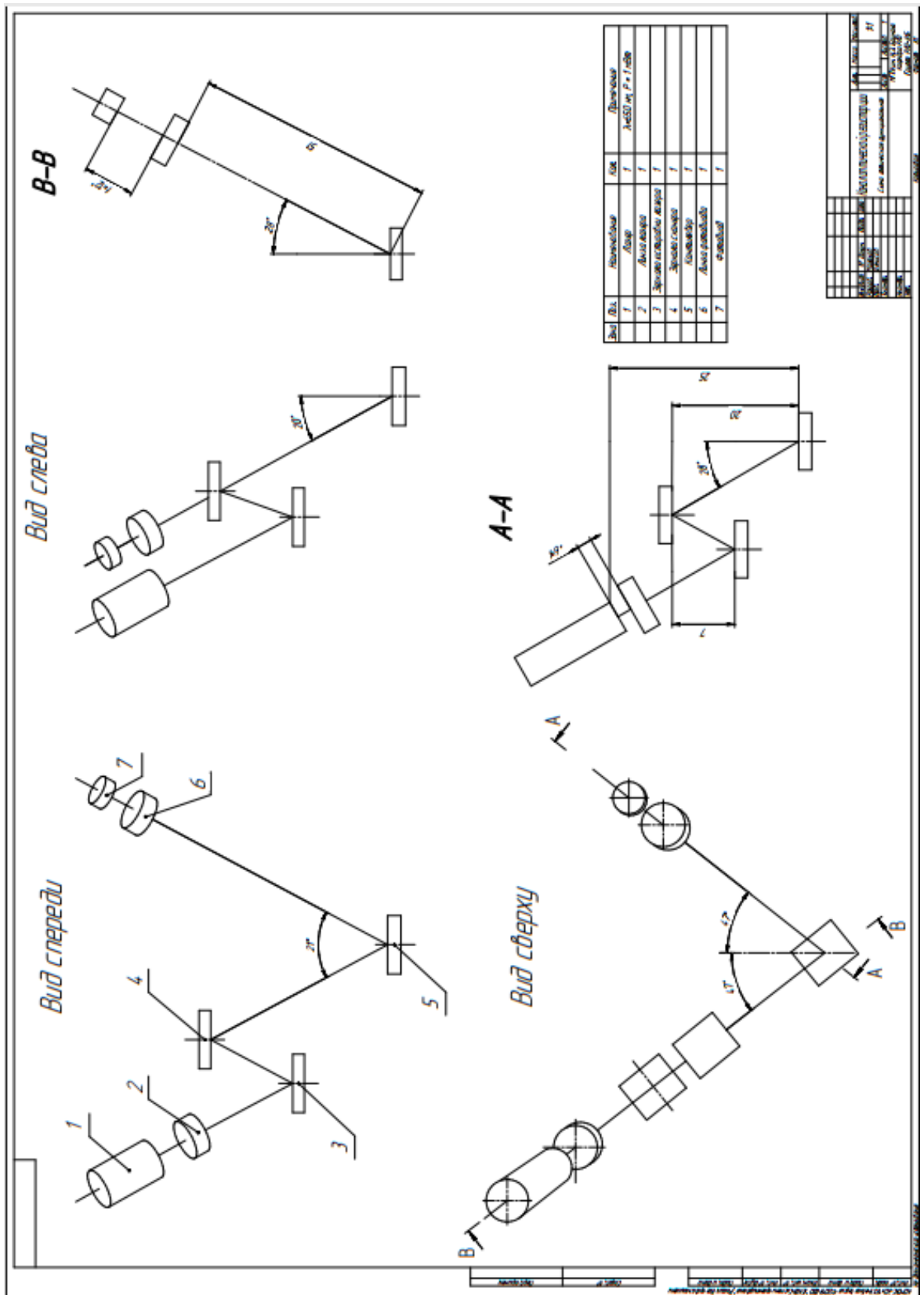
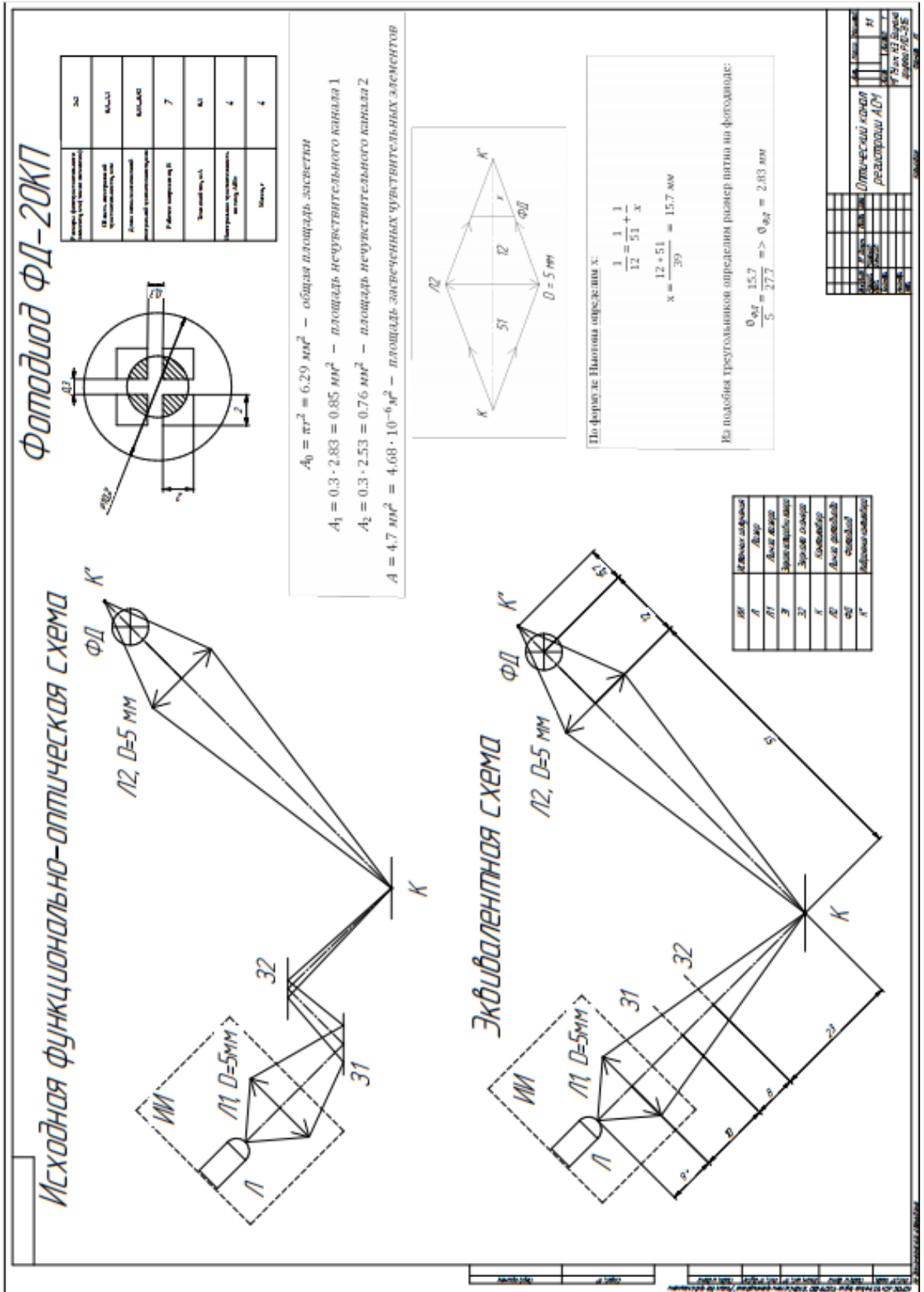


Рисунок А1 – Функционально-оптическая схема канала регистрации изгибов кантилевера атомно-силового микроскопа.



Элемент	Л1	Л2	М1	М2	М3	М4	М5	М6	М7
Материал	Л1	Л2	М1	М2	М3	М4	М5	М6	М7
Диаметр	Л1	Л2	М1	М2	М3	М4	М5	М6	М7
Положение	Л1	Л2	М1	М2	М3	М4	М5	М6	М7
Угол наклона	Л1	Л2	М1	М2	М3	М4	М5	М6	М7
Угол поворота	Л1	Л2	М1	М2	М3	М4	М5	М6	М7
Угол наклона	Л1	Л2	М1	М2	М3	М4	М5	М6	М7
Угол поворота	Л1	Л2	М1	М2	М3	М4	М5	М6	М7
Угол наклона	Л1	Л2	М1	М2	М3	М4	М5	М6	М7
Угол поворота	Л1	Л2	М1	М2	М3	М4	М5	М6	М7

Рисунок А2 – Эквивалентная функционально-оптическая схема канала регистрации изгибов кантилевера атомно-силового микроскопа.

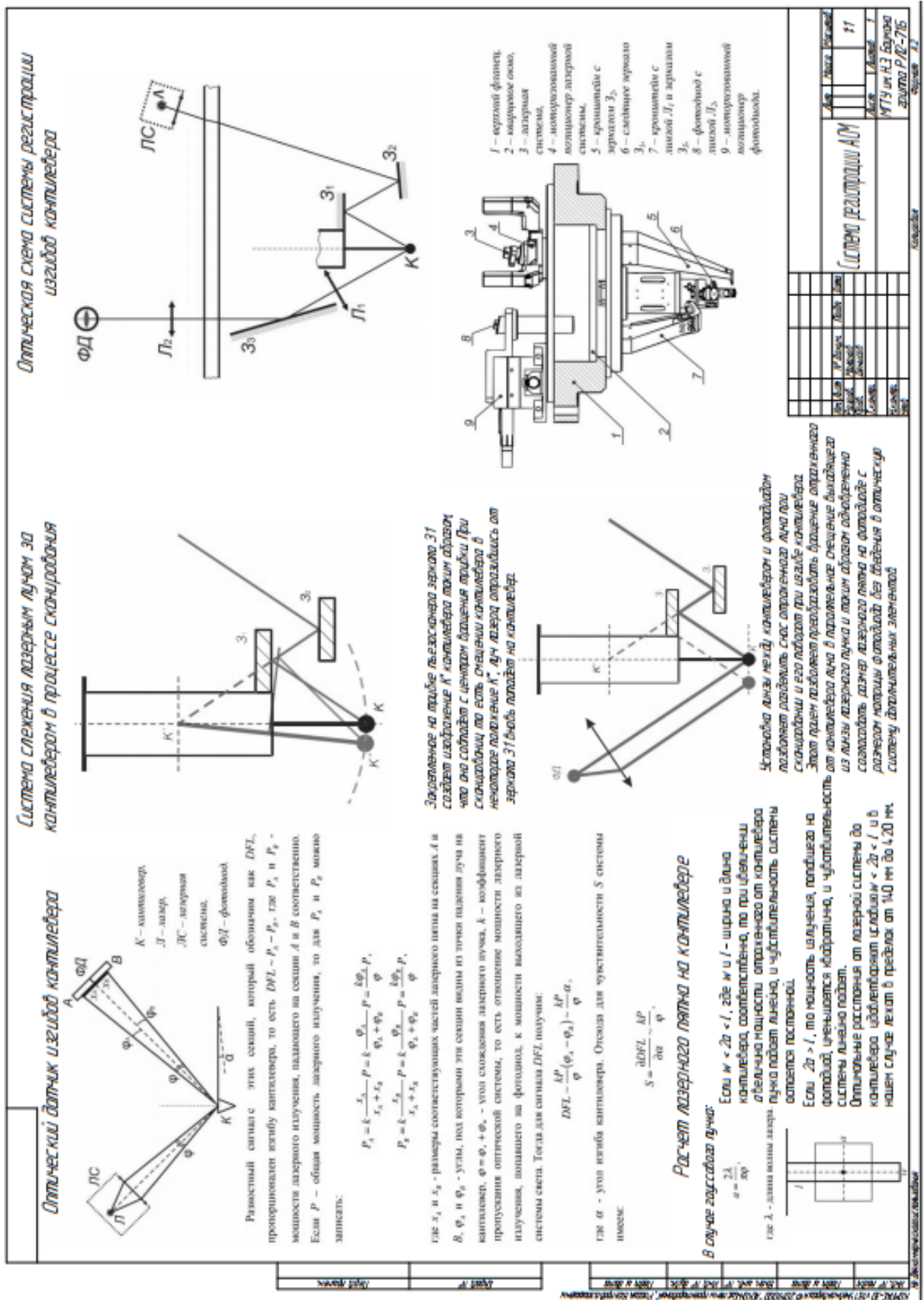


Рисунок А3 – Схема устройства системы слежения лазерным лучом за кантилевером в процессе сканирования в атомно-силовом микроскопе.

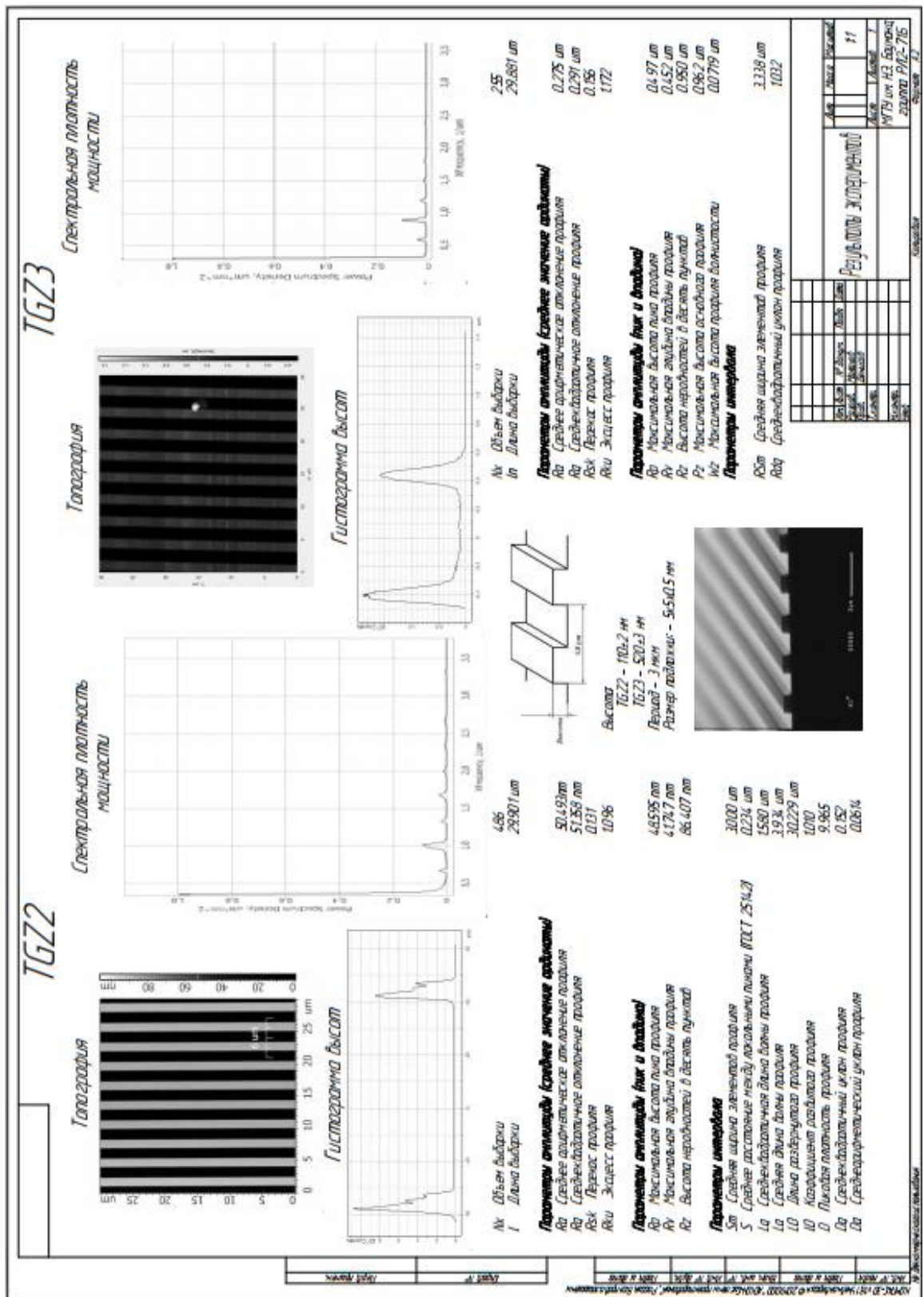


Рисунок А4 – Экспериментальные результаты измерения калибровочных решеток прямоугольного профиля.

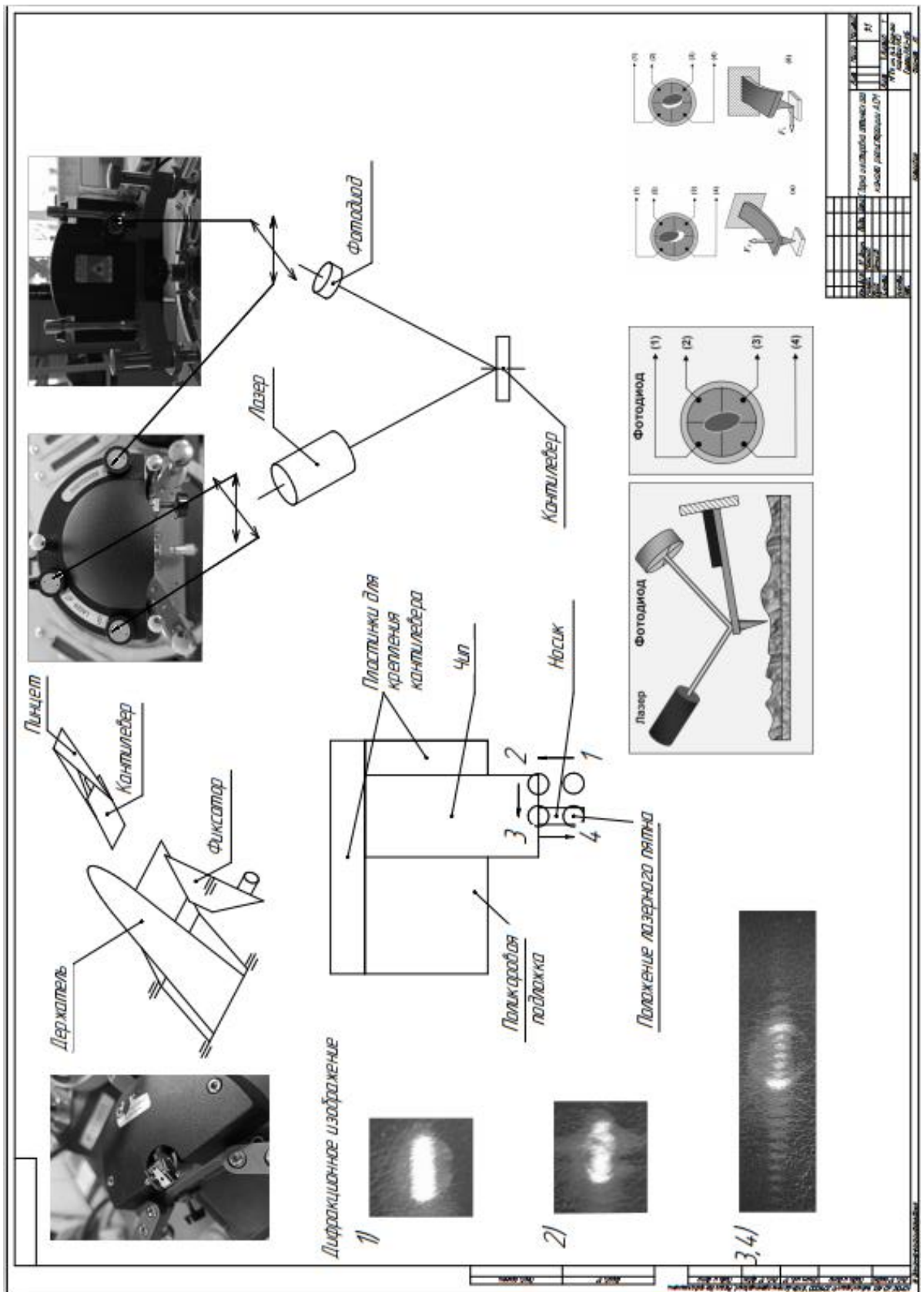


Рисунок А5 – Схема юстировки оптического канала регистрации изгибов кантилевера атомно-силового микроскопа.

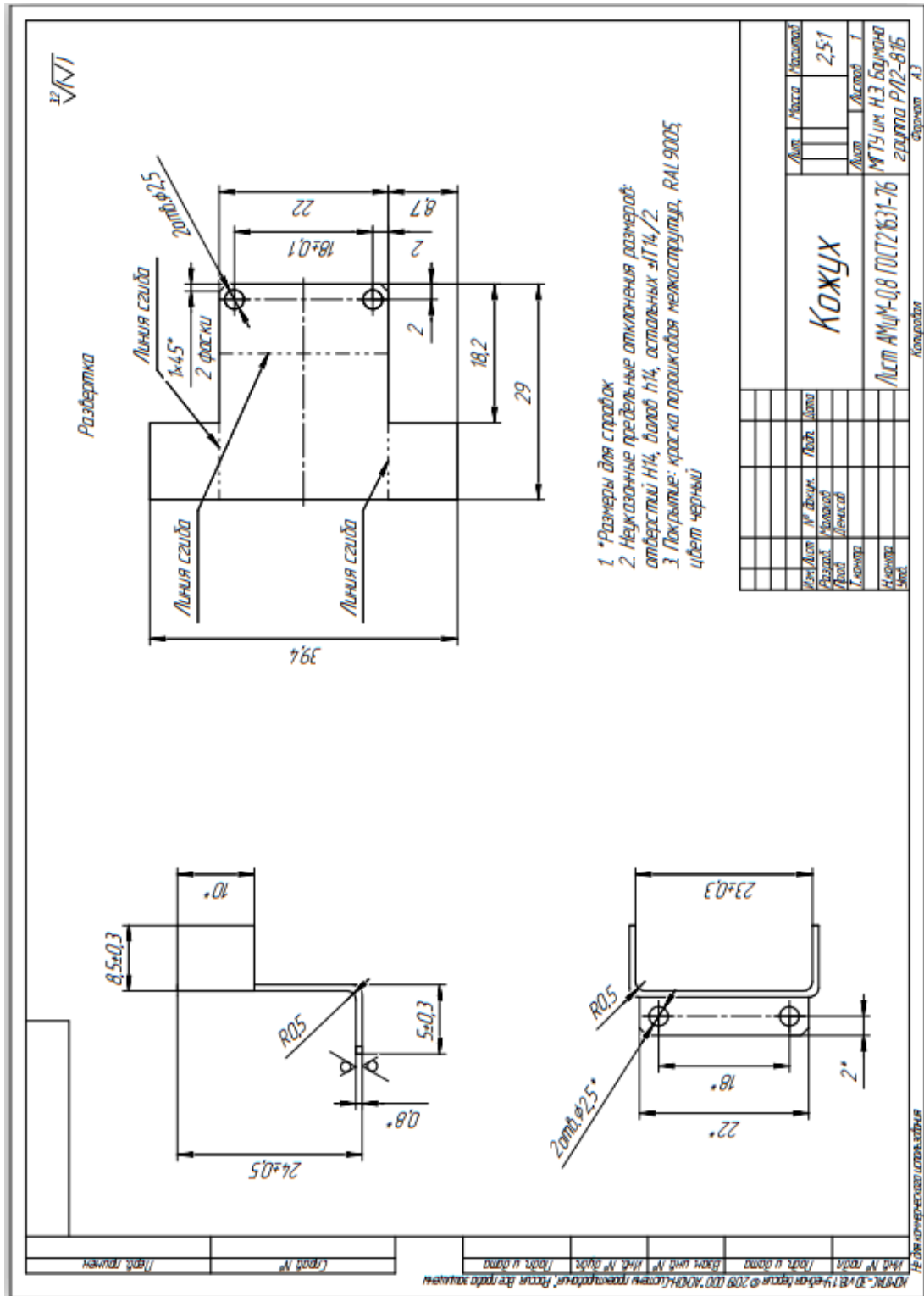


Рисунок А6 – Чертеж кожуха атомно-силового микроскопа.

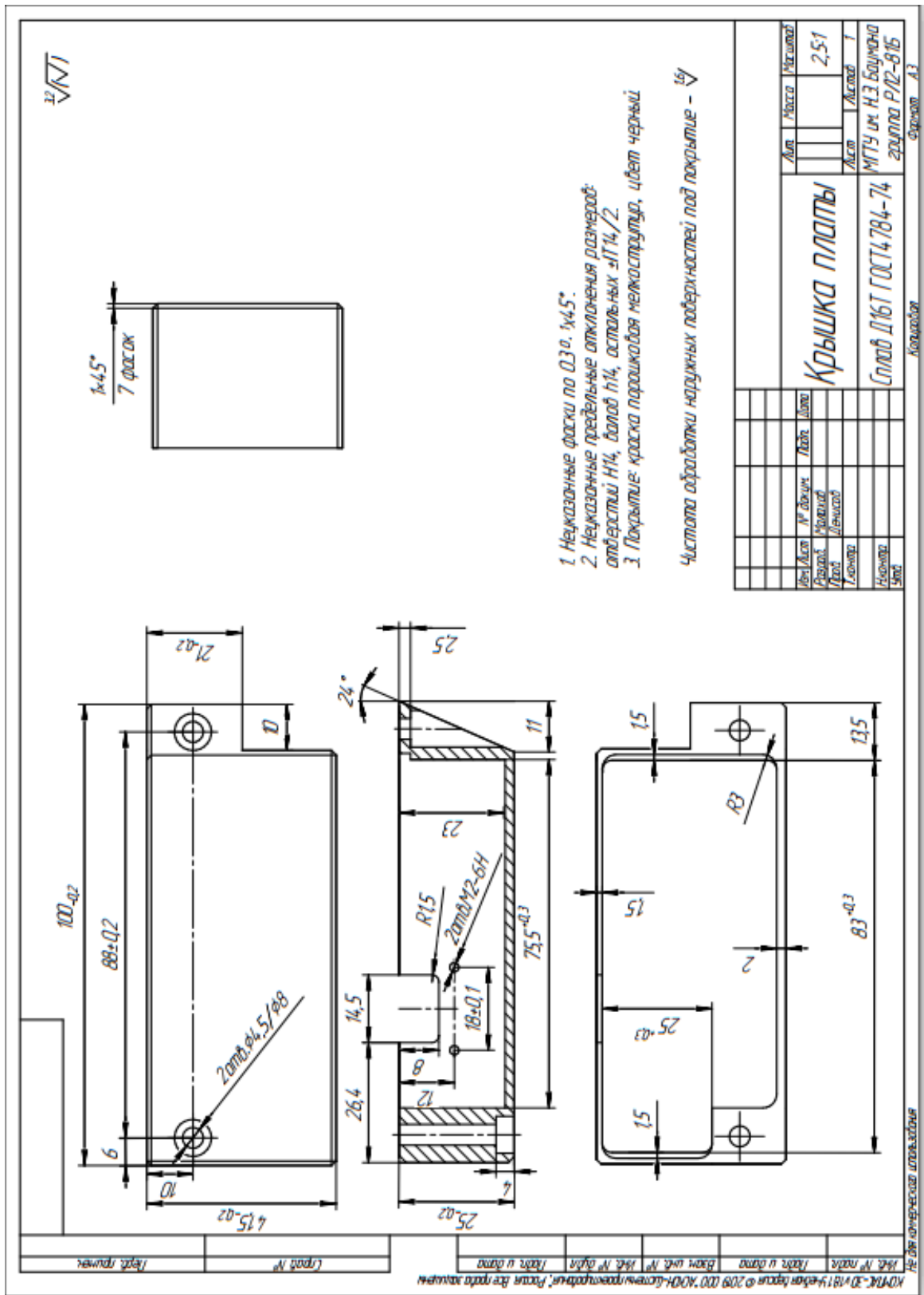


Рисунок А7 – Чертеж крышки платы атомно-силового микроскопа.

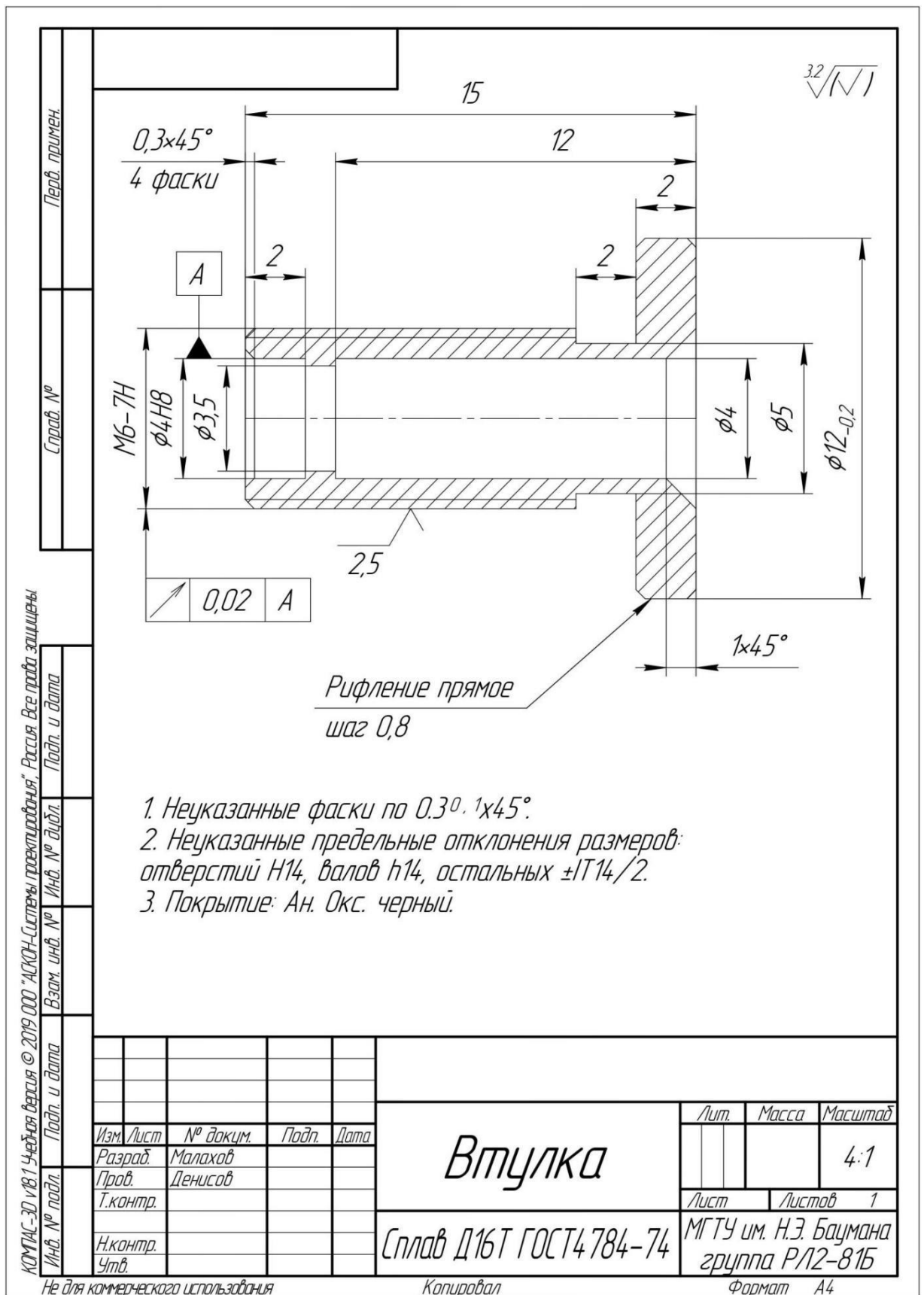


Рисунок А8 – Чертеж втулки сканера атомно-силового микроскопа.

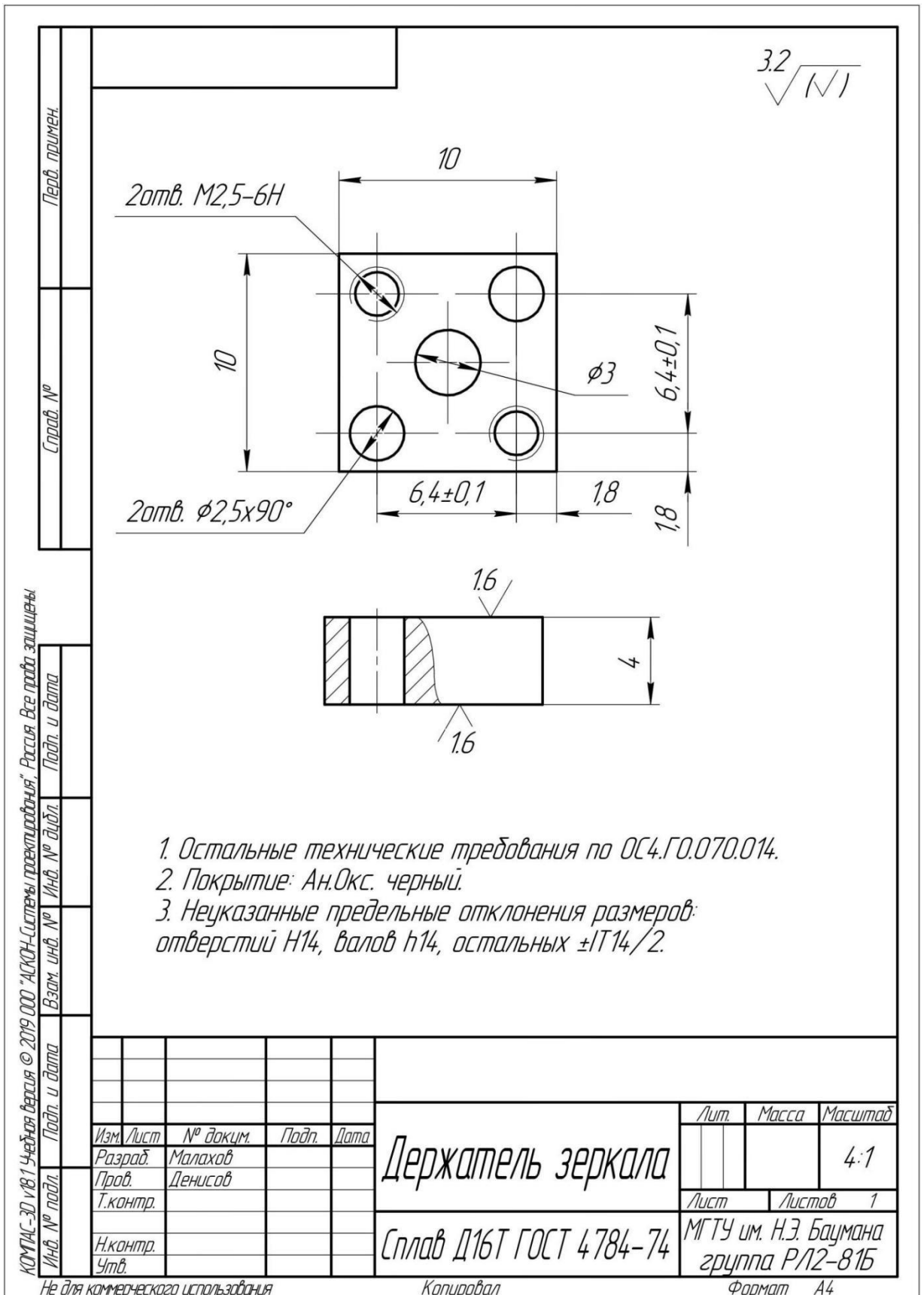


Рисунок А9 – Чертеж держателя зеркала канала регистрации изгибов кантилевера атомно-силового микроскопа.

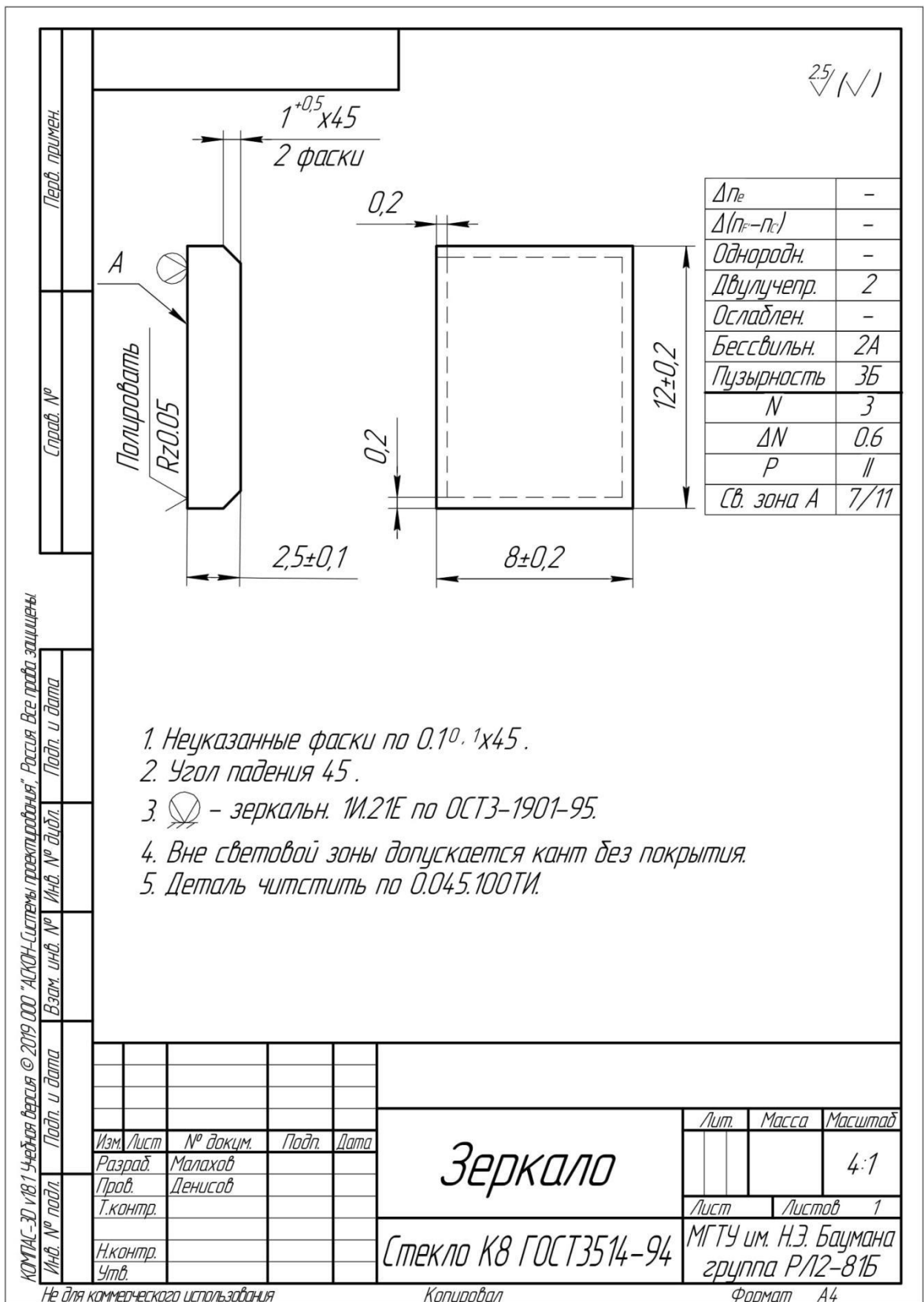


Рисунок А10 – Чертеж зеркала канала регистрации изгибов кантилевера атомно-силового микроскопа.

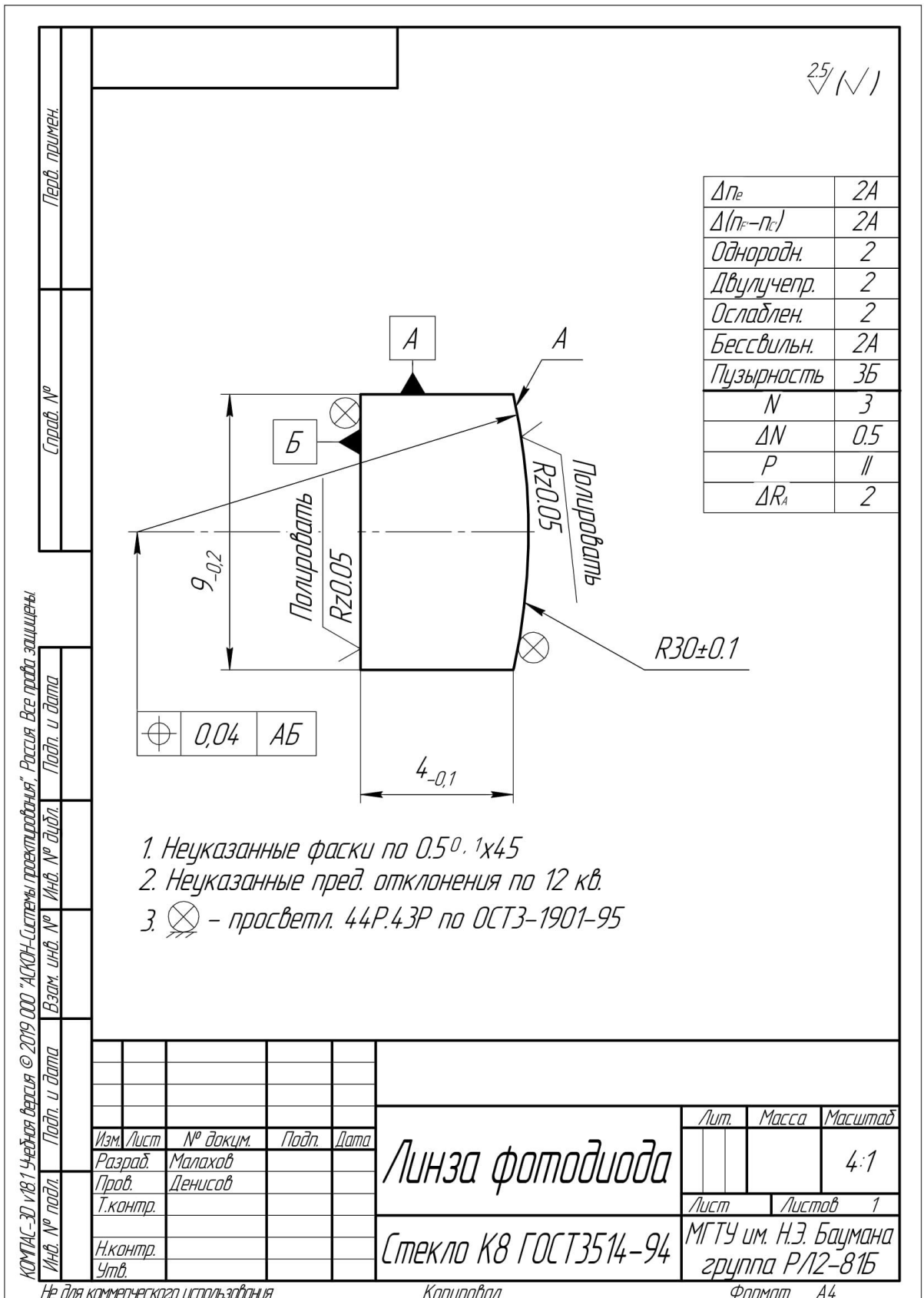


Рисунок А11 – Чертеж линзы фотодиода канала регистрации изгибов кантилевера атомно-силового микроскопа.