

УДК
539
В-191

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
МЭИ

А. Д. Баринов, К. А. Карапетян, А. И. Попов

**Определение характеристик оптических дисков методами
туннельной и атомно-силовой микроскопии**

**Лабораторная работа
по курсу**

**Физика и технология
неупорядоченных полупроводников**

**Для студентов, обучающихся по направлению
Электроника и нанoeлектроника**

Москва

Цель работы: изучение принципов действия сканирующих туннельного и атомно-силового микроскопа, изучение топографии оптических дисков, расчёт информационной ёмкости оптических дисков и мощности лазерного излучения, которым эти диски записываются.

Методические указания

1. Сканирующие зондовые микроскопы

Сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ, англ. SPM – Scanning Probe Microscope) – класс микроскопов для получения изображения поверхности и её локальных характеристик. Процесс построения изображения основан на сканировании поверхности зондом. В общем случае позволяет получить как яркостное двухмерное, так и рельефное трёхмерное изображение поверхности с высоким разрешением (вплоть до атомарного). Отличительной особенностью СЗМ является наличие:

- зонда;
- системы перемещения зонда относительно образца по двум ($x - y$) или трём ($x - y - z$) координатам;
- регистрирующей системы.

Регистрирующая система отрицательной обратной связи (ОС) фиксирует значение некой функции $P = P(z)$, зависящей от расстояния зонд-образец (значение P однозначно определяет высоту z). На рис. 1. представлена схема организации ОС. Значение P_0 задаётся оператором. Если при движении зонда вдоль поверхности образца расстояние зонд-образец изменится на Δz , то система ОС отреагирует на это и изменит значение P на ΔP так, что $\Delta P = P - P_0$, которое усиливается и подаётся на исполнительный элемент (ИЭ). ИЭ обрабатывает этот разностный сигнал ΔP , приближая зонд к образцу или отдаляя его до тех пор, пока разностный сигнал не станет нулём. Таким образом поддерживается постоянное расстояние зонд-образец с высокой точностью.

Работа сканирующего зондового микроскопа основана на взаимодействии поверхности образца с зондом (кантилевер, игла или оптический зонд). При малом расстоянии между поверхностью и зондом действие сил взаимодействия (отталкивания, притяжения и других сил) и проявление различных эффектов (например, туннелирование электронов) можно зафиксировать с помощью современных средств регистрации. Для регистрации используют различные типы сенсоров, чувствительность которых по-

зволяет зафиксировать малые по величине возмущения. Для получения полноценного растрового изображения используют различные устройства развёртки по осям x и y (например, пьезотрубки, плоскопараллельные сканеры).

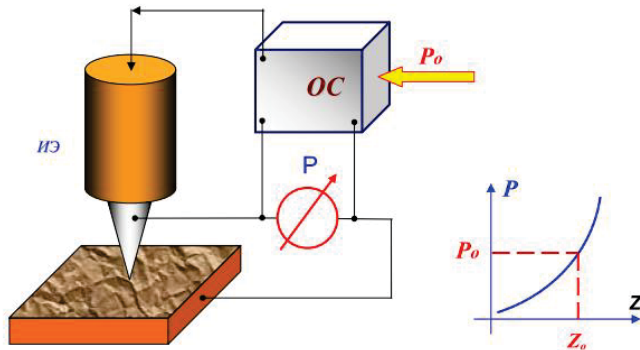


Рис. 1. Схема организации системы обратной связи

Существуют три основных типа сканирующих зондовых микроскопов:

- Сканирующий атомно-силовой микроскоп.
- Сканирующий туннельный микроскоп.
- Ближнепольный оптический микроскоп.

В настоящей работе используются первые два из них.

В сканирующем туннельном микроскопе (СТМ) для получения изображения используется эффект туннелирования электронов из материала зонда в образец, что позволяет получить информацию о топографии и электрических свойствах образца. В атомно-силовом микроскопе (АСМ) регистрируются силы взаимодействия между зондом и поверхностью образца. Это позволяет получить топографию поверхности и информацию о её механических и некоторых электрических свойствах. Часто режимы туннельной и атомно-силовой зондовой микроскопии совмещаются в одном устройстве.

Основные технические сложности при создании сканирующего зондового микроскопа заключаются в следующем:

- Конец зонда должен иметь размеры сопоставимые с исследуемыми объектами.
- Обеспечение механической (в том числе тепловой и вибрационной) стабильности на уровне лучше

- Детекторы должны надёжно фиксировать малые по величине возмущения регистрируемого параметра.
- Создание прецизионной системы развёртки.
- Обеспечение плавного сближения зонда с поверхностью.

2. Современное состояние и развитие сканирующей зондовой микроскопии

В настоящее время сканирующие зондовые микроскопы нашли применение практически во всех областях науки. В физике, химии, биологии используют в качестве инструмента исследования СЗМ. Перспективным направлением считается совмещение сканирующих зондовых микроскопов с другими традиционными и современными методами исследования, а также создание принципиально новых приборов. Например, совмещение СЗМ с оптическими микроскопами (традиционными и конфокальными микроскопами), электронными микроскопами, спектрометрами (например, спектрометрами комбинационного (рамановского) рассеяния и флуоресцентными), ультрамикротоматами.

В большинстве исследовательских лабораторий сканирующая зондовая и электронная микроскопия используются как дополняющие друг друга методы исследования в силу ряда физических и технических особенностей.

В сравнении с растровым электронным микроскопом (РЭМ) сканирующий зондовый микроскоп обладает рядом преимуществ. Так, в отличие от РЭМ, который даёт псевдотрёхмерное изображение поверхности образца, СЗМ позволяет получить истинно трёхмерный рельеф поверхности. Кроме того, в общем случае сканирующий зондовый микроскоп позволяет получать изображение как проводящей, так и не проводящей поверхности. Тогда как, для изучения не проводящих объектов с помощью РЭМ необходимо металлизировать поверхность. Для работы с РЭМ необходим вакуум, в то время как большая часть режимов СЗМ предназначена для исследований на воздухе, в вакууме и в жидкости. Благодаря этому, с помощью СЗМ возможно изучать материалы и биологические объекты в нормальных для этих объектов условиях. Например, изучение биомолекул и их взаимодействий, живых клеток. В принципе, СЗМ способен дать более высокое разрешение, чем РЭМ. Так было показано, что СЗМ в состоянии обеспечить реальное атомарное разрешение в условиях сверхвысокого вакуума при отсутствии вибраций. Сверхвысоковакуумный СЗМ

по разрешению сравним с просвечивающим электронным микроскопом (ПЭМ).

К недостатку СЗМ при его сравнении с РЭМ также следует отнести небольшой размер поля сканирования. РЭМ в состоянии просканировать область поверхности размером в несколько миллиметров в латеральной плоскости с перепадом высот в несколько миллиметров в вертикальной плоскости. У СЗМ максимальный перепад высот составляет несколько микрометров, а максимальное поле сканирования в лучшем случае порядка 150 x 150 мкм. Другая проблема заключается в том, что качество изображения определяется радиусом кривизны кончика зонда, что при неправильном выборе зонда или его повреждении приводит к появлению артефактов на получаемом изображении. При этом подготовка образцов для СЗМ занимает меньше времени, чем для РЭМ.

Обычный СЗМ не в состоянии сканировать поверхность также быстро, как это делает РЭМ. Для получения СЗМ-изображения, как правило, требуется несколько минут, в то время как РЭМ после откочки способен работать практически в реальном масштабе времени, хотя и с относительно невысоким качеством.

3. Сканирующие зондовые микроскопы, используемые в лабораторной работе

1. Лабораторный нанотехнологический комплекс (НТК) «Умка» и принцип его работы

Входящий в НТК «Умка» сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) «Умка-02-U» (рис. 2) относится к зондовым микроскопам, используемым для исследования неразрушающим методом свойств материалов и топографии поверхностей на атомарно-молекулярном уровне. При помощи СТМ «Умка-02-U» можно проводить исследования в воздушной атмосфере, как проводящих, так и слабопроводящих материалов (в том числе биологических объектов и их фрагментов размером не более 5-6 мкм), а также полупроводников.



Рис. 2. НТК «Умка»

Прибор позволяет:

- определять топологию поверхности образцов в виде чётких 2D- и 3D-изображений с атомарным разрешением;
- определять работу выхода и импеданса – определение примесей в исследуемом материале; измерять вольт-амперные и дифференциальные характеристики материала (определение типа проводимости материала, анализ структур проводящих и магнитных образцов) на атомно-молекулярном уровне;
- измерять параметры профиля (шероховатость, размер включений и наночастиц);
- измерять все типы дифференциальных спектров: dI/dU , dI/dH , dH/dU , а реализованные алгоритмы обработки данных – определять амплитуду и сдвиг фаз между измеряемыми каналами. Это даёт возможность использовать комплекс при изучении коррозии, в том числе и гетерогенных материалов, позволяя чётко определять структуру «зёрен» разного состава, исследовать композитные материалы, различать зоны с разным типом проводимости и уровнем легирования в полупроводниках;
- осуществлять оценку длительного внешнего воздействия на образцы в режиме реального времени (*in situ*) (определение коррозионной устойчивости, радиационного воздействия и т.д.).

Основой НТК "Умка" является сканирующий туннельный микроскоп "Умка-02-U". СТМ "Умка-02-U" – небольшой и компактный прибор, который может быть подключён к ПК и управляться с его помощью, что существенно облегчает работу с данными и их обработкой. Современный компьютер позволяет оперативно осуществлять обработку изображений: стро-

ить трёхмерные изображения поверхностей, поворачивая их под разными углами, меняя их цвета, используя разные графические эффекты и т.д.

В основе работы микроскопа лежит туннельный эффект – явление туннелирования электронов через узкий потенциальный барьер между металлическим зондом и поверхностью образца во внешнем электрическом поле. СТМ осуществляет детектирование локального взаимодействия (изменение силы тока), возникающего между зондом и поверхностью исследуемого образца при их взаимном сближении. При этом в цепь (рис. 3), состоящую из иглки (зонда), образца и источника напряжения, поступает ток. Данные о материале и топографии поверхности получают при изменении расстояния между образцом и иглой (уменьшении туннельного зазора), необходимом для поддержания постоянного туннельного тока, либо по изменению величины туннельного тока. С помощью СТМ можно получить изображение поверхности вплоть до атомарного разрешения.

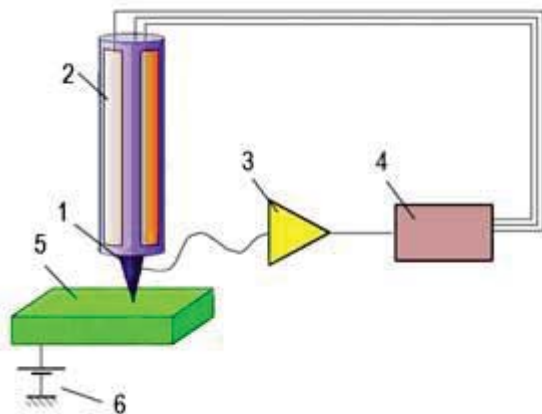


Рис.3. Устройство сканирующего туннельного микроскопа

Между зондом (1) и исследуемым образцом (5) прикладывается небольшая разность потенциалов (6). Величина приложенного напряжения должна соответствовать величине барьера: если приложить слишком большое напряжение, то вместо туннельного тока можно получить ионную эмиссию. Зонд микроскопа, укрепленный на пьезодвигателе (2), перемещается над образцом, не касаясь его, последовательно по линиям-строчкам (сканирует образец), образуя полный кадр. Частота сканируемых строк при этом зависит от требуемого разрешения изображения (скана). Туннельный ток, пройдя через усилитель (3), подается на модуль обратной связи (4), который управляет движением зонда.

В СТМ «Умка-02-U» используются зонды из вольфрамовой проволоки, острия которых заточены до размера, не более 30 нм. Изготовление зондов осуществляется методом электрохимического травления с помощью специальной установки для заточки зондов.

Требования к исследуемому образцу:

- форма – плоская квадратная пластинка со стороной примерно 10 мм;
- поверхность – гладкая;
- материал – электропроводящий, слабопроводящий или полупроводниковый.

2. Платформа NanoEducator II

Платформа NanoEducator II (рис. 4) создана для организации обучения принципам работы с СЗМ, приобретения навыков исследования нанобъектов и наноструктур, осуществления нанолитографии и наноманипуляций.



Рис.4. NanoEducator II

СЗМ NanoEducator II позволяет работать как в туннельном режиме, так и в режиме сканирующего атомно-силового микроскопа (АСМ).

В отличие от СТМ, АСМ позволяет исследовать как проводящие, так и непроводящие поверхности. Пространственное разрешение атомно-силового микроскопа зависит от размера кантилевера и радиуса кривизны его острия. Разрешение достигает атомарного уровня по горизонтали и существенно превышает его по вертикали. Обычно под взаимодействием понимают притяжение или отталкивание зонда и поверхности под действием близкодействующих сил Ван-дер-Ваальса, однако существует целый ряд модификаций метода для анализа иных взаимодействий, напри-

мер, электростатических, магнитных сил и сил трения. Когда игла находится на достаточно большом расстоянии от образца, зонд слабо притягивается к образцу. С уменьшением расстояния это притяжение усиливается до тех пор, пока электронные облака иглы и атомов поверхности не начнут испытывать электростатическое отталкивание. Суммарная сила обращается в ноль на расстоянии порядка длины химической связи (несколько десятых долей нанометров); при меньших расстояниях доминирует отталкивание.

В зависимости от расстояний зонд-образец, используемых для получения АСМ-изображений, возможны следующие режимы (моды) работы АСМ:

- контактный режим (contact mode);
- бесконтактный режим (non-contact mode);
- полуконтактный режим (tapping mode).

При контактном режиме расстояние зонд-образец составляет порядка нескольких десятых долей нанометров. Таким образом, игла АСМ находится в мягком физическом контакте с образцом и подвержена действию сил отталкивания. В этом случае взаимодействие между иглой и образцом заставляет кантилевер изгибаться, повторяя топографию поверхности. Топографические изображения в АСМ обычно получают в одном из двух режимов:

- режим постоянной высоты ;
- режим постоянной силы.

При бесконтактном режиме (режиме притяжения) кантилевер с помощью пьезокристалла колеблется над изучаемой поверхностью с некоторой амплитудой, не касаясь поверхности. По изменению амплитуды или сдвигу резонансной частоты колебаний в ходе сканирования поверхности определяется сила притяжения и формируется изображение поверхности.

Полуконтактный режим аналогичен бесконтактному режиму с тем отличием, что игла кантилевера в нижней точке своих колебаний слегка касается поверхности образца.

При использовании АСМ в нанолитографии работа ведется в контактном режиме с контролируемым перемещением острия зонда по заданной схеме.

Таким образом, основными преимуществами методов сканирующей зондовой микроскопии являются:

- 1) высокая локальность, которая определяется взаимодействием зонда и поверхности;

- 2) возможность использования зонда для модификации поверхности объекта (нанолитография);
- 3) возможность использования не только в вакууме, но и на воздухе и в жидкой среде.

Основными недостатками СЗМ являются:

- 1) сильная зависимость результатов от формы и природы зонда;
- 2) низкая скорость, обусловленная механической системой сканирования;
- 3) искажения латеральных расстояний и углов, что связано с температурным дрейфом, нелинейностью функционирования пьезокерамики и тем фактом, что данные от различных участков раstra получены в разные моменты времени.

Задание

1. Подготовить образец CD-R, DVD-R диска.
2. Отсканировать поверхности образца на НТП «Умка».
3. Отсканировать поверхности образца на NanoEducator II.
4. Провести необходимые геометрические измерения на скане.
5. Произвести расчёт информационной ёмкости оптического диска.
6. Произвести расчёт мощности лазера, которым диск был записан.

1. Порядок выполнения лабораторной работы

1. СТМ «Умка»

- 1) Необходимо установить «свежий» зонд в СТМ «Умка» (зонд взять у лаборанта). Для этого откройте шторку на манипуляторе, сдвинув ее в сторону. Аккуратно возьмите зонд пинцетом и вставьте его в трубочку – держатель зонда в манипуляторе. Зонд должен выступать из держателя примерно на 5 мм.
- 2) Необходимо подготовить держатель образца (кубик) к установке образца. Для этого возьмите кубик и, открутив фиксирующий винт на подставке, установите кубик в паз и заверните фиксирующий винт до упора.
- 3) Установка образца: из диска вырежьте ножницами фрагмент, размером 10 x 10 мм. Полученный фрагмент расщепите на две части.
- 4) Возьмите образец с блестящей проводящей поверхностью и установите его под пружинки на поверхность кубика, после чего при-

жмите образец пружинками к поверхности кубика и зафиксируйте винтом.

- 5) Возьмите пинцетом кубик с образцом за выступающий из него винт. Поставьте его образцом к зонду, таким образом, чтобы исследуемый объект не касался зонда. Затем аккуратно придвиньте кубик с образцом к зонду таким образом, чтобы расстояние между ними составляло 2-3 мм.
- 6) Закройте шторку на манипуляторе и запустите процедуру автоматического подвода в программе **STM**. Нажав на кнопку подвода.
- 7) После окончания процедуры подвода (погаснет индикатор подвода и станет доступна кнопка сканирования). Посмотрите на индикатор рельефа **ZFollow** – он должен быть заполнен примерно наполовину. Если он пуст, подвиньте бегунок вверх. Если индикатор рельефа заполнен полностью, то зонд коснулся поверхности исследуемого объекта. В этом случае необходимо сменить зонд и начать работу сначала.
- 8) После окончания процесса подвода зонда, запустите процесс сканирования.
- 9) После окончания процесса сканирования в рабочей панели под надписью Scan Template появится новая строчка – default_R. На ней необходимо нажать правой кнопкой мыши и из выпадающего меню выбрать Трансформировать. Появится окно результатов сканирования.

2. ACM NanoEducator II

- 1) Возьмите чистую металлическую подложку. Отрежьте полоску двухстороннего скотча, чуть шире, чем образец. Наклейте скотч на подложку, разгладьте его поверхность обратной стороной пинцета, чтобы удалить воздушные пузырьки между подложкой и скотчем. Положите образец на скотч и осторожно прижмите его пинцетом в нескольких местах (не касаясь предполагаемого места исследования). Установите подложку с закрепленным на ней образцом на магнитный фиксатор. Образец готов для проведения измерений по методам АСМ.
- 2) В программе **NanoEducator** откройте окно **Landing**.
- 3) Щёлкните на кнопке **Move** для перемещения образца в крайнее нижнее положение. Образец начнет опускаться. По достижении крайнего нижнего положения в журнале появится сообщение «Stopped by Backward Limiter».

- 4) Установите измерительную головку на базовый блок. При этом посадочные гнёзда измерительной головки должны вставать на опорные шарики базового блока.
- 5) Предварительный подвод образца выполняется на расстоянии 0.5-1 мм от зонда. Он необходим для того, чтобы с помощью видеосистемы можно было выбрать область сканирования и переместить эту область под зонд, не опасаясь, что зонд заденет поверхность образца.
 - а. Откройте окно **MicroCam**, кнопкой **Camera**.
 - б. Настройте положение видеокамеры регулятором вертикального положения видеокамеры таким образом, чтобы изображение зонда оказалось в центре кадра.
 - в. Сфокусируйте видеокамеру на кончике зонда с помощью колеса фокусировки видеокамеры.
 - г. Откройте окно **Landing**.
 - д. Запустите подвод кнопкой **Move**, в результате образец начнёт подниматься. Наблюдайте за процессом подвода по изображению, выводимому с видеокамеры. Как только на поверхности образца появится отражение зонда, остановите подвод повторным нажатием кнопки **Move**.
- 6) Переключите прибор для работы в качестве атомно-силового микроскопа, нажав кнопку **AFM** главного окна программы управления. Произойдет автоматическое конфигурирование прибора для работы по полуконтактным методам, в результате установятся следующие параметры:
 - Выходной сигнал цепи обратной связи – **Mag**;
 - **SetPoint** = 5 нА;
 - **Gain** = 1.
- 7) Выходной сигнал с генератора подаётся на пьезодрайвер, который, в свою очередь, сообщает колебания зонду. С помощью регулировки выходных параметров генератора, таких как частота, величина напряжения, сдвиг фаз, задаются параметры колебаний зонда при сканировании.
- 8) Амплитуда колебаний зонда (сигнал **Mag**), а также сдвиг фаз между выходным сигналом генератора и опорным сигналом (сигнал **Phase**) регистрируется синхронным детектором.
- 9) Программа управления позволяет устанавливать параметры генератора, а также задавать схемы детектирования, как автоматическую, так и ручную.

- 10) Откройте окно **Resonance**.
- 11) Для автоматической настройки параметров генератора щелкните на кнопке **Run** панели **Freq Scan**.
 - а. Будут измерены частотные зависимости амплитуды (сигнал **Mag**) и сдвига фазы (сигнал **Phase**) колебаний зонда;
 - б. Будет определена частота зонда;
 - в. Рабочая частота пьезо драйвера будет установлена равной резонансной частоте зонда;
 - г. Коэф. усиления (параметр **LockIn Gain**) будет подобран таким образом, чтобы амплитуда колебаний зонда на резонансной частоте равнялась заданной (**Magnitude Set**);
 - д. Значение сдвига фаз устанавливается равным заданному (параметр **Phase Set**);
 - е. Вблизи резонансной частоты будут построены частотные зависимости сигналов **Mag** и **Phase**.
- 12) Замкните цепь обратной связи (кнопка **FB off**). В результате кнопка перейдёт в положение **FB on**, цепь обратной связи замкнётся, сканер выдвигается на максимальную длину. Степень выдвижения сканера характеризуется длиной цветной полосы индикатора выдвижения сканера.
- 13) Задайте начальное значение параметра **SetPoint** на панели дополнительных параметров. В качестве начального рекомендуется установить значение **SetPoint** равным половине величины сигнала **Mag**.
- 14) Задайте начальное значение коэффициента обратной связи в поле ввода **Gain** в диапазоне 0.5-2.
- 15) Откройте окно подвода (**Landing**).
- 16) Запустите процедуру подвода кнопкой **Landing**, расположенной в окне **Landing**.
- 17) В процессе подвода следите за изменениями сигнала **Mag** по программному осциллографу, а также за состоянием индикатора выдвижения сканера, и ждите окончания процесса подвода. По окончании процесса подвода длина линии индикатора уменьшится и займёт некоторое промежуточное положение, шаговый двигатель отключится, в журнале окна **Landing** появится сообщение «Operation Completed».
- 18) На панели управления окна **Scanning** из раскрывающегося списка **Mode** выберите Полуконтактный Метод (пункт **Topography**) При

этом в качестве регистрируемого сигнала установится сигнал **SensHeight**.

- 19) Задаем снова параметр **Gain** (0.5-0.7 от порогового значения, при котором начинается генерация).
- 20) Далее выбирается область сканирования, скорость и направление сканирования.
- 21) Для начала сканирования нажмите кнопку **Start**.

После окончания сканирования как на «Умке», так и на NanoEducator II провести обработку изображений (измерить необходимые геометрические размеры).

3. Оптический диск с односторонней записью

Оптический диск оформляется в виде конструкции с воздушным зазором, так называемый «воздушный сэндвич». Две прозрачные подложки из пластика соединяются в оптический диск (рис. 5). Чувствительные слои, в данном случае представляющие собой плёнки теллура на обеих сторонах.

Запись на диск осуществляется, как и чтение, «через подложку». В системах односторонней записи применяется способ термоперфорации («выжигание отверстий»).

Запись, как и чтение, производится сфокусированным пучком лазера. Но в режиме записи мощность лазера выше, чем в режиме чтения. Информация записывается импульсно.

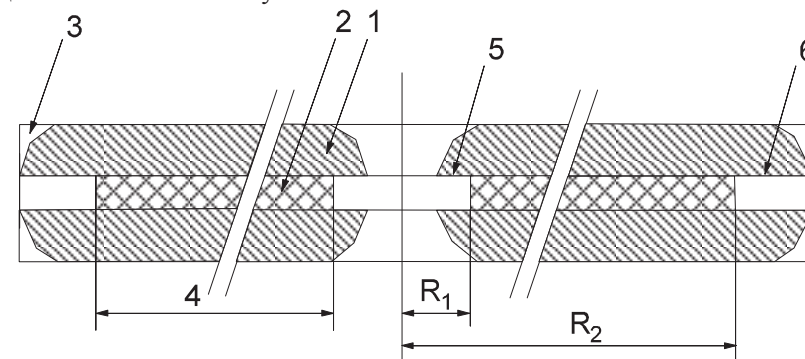


Рис. 5. Устройство оптического диска: 1 – подложка; 2 – чувствительный слой с предварительной разметкой; 3 – внешнее разделительное кольцо; 4 – информационная зона; 5 – внутренняя склейка; 6 – внешняя склейка

Расчётная часть. а. Информационная ёмкость

На полученных сканах поверхности оптического диска необходимо найти наименьшее по размерам углубление (питы). Определить следующие геометрические размеры (рис. 6):

- a – длина пита,
- d – расстояние между соседними дорожками,
- b – ширина пита,
- h – глубина пита.

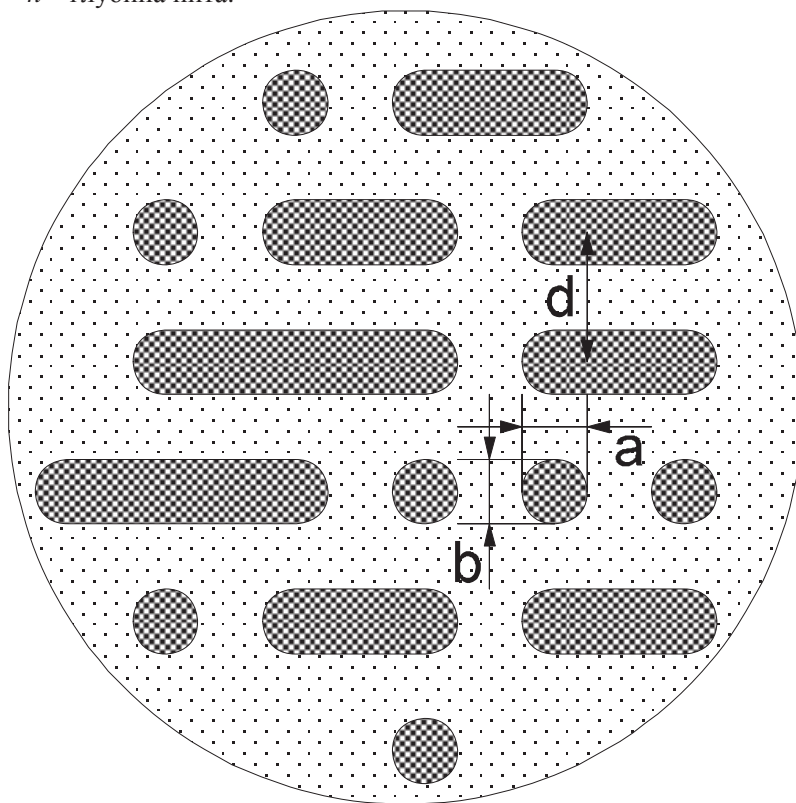


Рис. 6. Питы и их геометрические размеры

Все геометрические размеры снимаются при помощи измерения топографического профиля.

Площадь, занимаемая одним питом: $S = a \cdot d$.

Информационная плотность: $W = 1/S$.

Площадь дискового кольца: $S_{data} = \pi \cdot (R_2^2 - R_1^2)$, где R_1 , R_2 – радиусы внутреннего и внешнего круга соответственно (рис. 5).

Тогда информационная ёмкость: $C_{inf} = W \cdot S_{data}$.

а. Мощность лазера

Как было сказано выше, при записи информации на CD-R, DVD-R производится выжигание участка поверхности сфокусированным лазерным пучком. Выжигание требует затраты энергии, теплоты испарения $Q = L \cdot m$, где L – удельная теплота испарения, m – масса испаряемого вещества.

Масса испаряемого вещества легко находится, если известен объём пита: $m = \rho \cdot V \approx \rho \cdot S_{pit} \cdot h$, где ρ – плотность испаряемого вещества, $S_{pit} \approx \pi \cdot a \cdot b$ – площадь пита (упрощённо считаем, что пит имеет форму эллиптической призмы).

Тогда мощность лазера определяется как: $P = Q/t_{имп}$, где $t_{имп}$ – длительность импульса записи равная .

Помимо этого, можно определить плотность мощности излучения: $W = P/S_{pit}$.

Табл. 1. Физические и химические характеристики теллура

Удельная теплота испарения L , кДж/моль	Молярная масса M , г/моль	Плотность ρ , г/см ³
51	127.6	6.247

Контрольные вопросы

1. Принцип работы сканирующего зондового микроскопа.
2. Отличие сканирующего туннельного и атомно-силового микроскопа.
3. Отличие сканирующего зондового микроскопа от сканирующего электронного микроскопа.
4. Устройство оптического диска с одnorазовой записью и его отличие от диска с многократной записью.

Литература

1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – Н. Новгород, Ин-т физики микроструктур РАН, 2004.
2. Оптические дисковые системы: Пер. с англ./Г. Боухьюз, Дж. Браат, А. Хейсер и др. – М.: Радио и связь, 1991.
3. Сайт о химии – URL: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/4338.html>