

**5046**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА МИКРО- И НАНОСИСТЕМ**

Методические указания  
к лабораторной работе № 2

**Изготовление зондов для сканирующего зондового микроскопа  
NanoEducator**

Рязань 2016

УДК 621.315.592

Методы анализа микро- и наносистем: методические указания к лабораторной работе № 2 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: А.П. Авачев, Н.В. Вишняков, Ю.В. Воробьев, Н.Б. Рыбин. Рязань, 2016. 16 с.

Содержат краткие теоретические сведения о способах изготовления зондов для сканирующих зондовых микроскопов, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине “Методы анализа микро- и наносистем”.

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.04.04.

Ил. 14. Библиогр.: 3 назв.

*Сканирующий зондовый микроскоп, зонд, электрохимическое травление*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и нанoeлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

#### Методы анализа микро- и наносистем

Составители: А в а ч е в Алексей Петрович  
В и ш н я к о в Николай Владимирович  
В о р о б ь е в Юрий Владимирович  
Р ы б и н Николай Борисович

Редактор Р.К. Мангутова  
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 30.06.16. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

## **Цель работы**

Получение практических навыков изготовления зондов для сканирующего зондового микроскопа NanoEducator методом электрохимического травления.

## **Краткие теоретические сведения**

В качестве зонда для СЗМ используются твердотельные иглы, размеры острия которых составляют ~10 нм. От типа сканирующего микроскопа зависят, как правило, вид зонда и способ его изготовления.

Так, для сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) зондом является острозаточенная металлическая проволока из W, Pt-Ir, Pt-Rh, Mo, на кончике которой теоретически расположен 1 атом. Такие зонды в СТМ позволяют получать атомарное разрешение изображения поверхности. Для атомно-силового микроскопа (АСМ) зондом в основном служит упругая балка (консоль или кантилевер), закрепленная на держателе, на свободном конце которой расположена остро заточенная игла. За счет силового взаимодействия между зондом и образцом консоль изменяет наклон. Это изменение может быть измерено и перестроено в изображение поверхности образца. Для электросилового и магнитно-силового микроскопов зонды имеют вид, схожий с зондами АСМ, только на рабочую поверхность зонда должно быть нанесено проводящее покрытие или покрытие из магнитного материала соответственно. Для сканирующего ближнепольного оптического микроскопа зондом является остро заточенное оптоволокно.

Форма зонда является определяющей при получении качественного изображения. Если для атомарно гладких поверхностей критичным является только радиус кончика, то для отображения

ступенек, склонов, ям и прочих резких перепадов по высоте критическим является угол заточки зонда.

### **Зонды для СТМ**

Зондами для СТМ являются, как правило, остро заточенные металлические иглы. Основные методы создания зондов могут характеризоваться как механические или физико-химические. Механические методы, как правило, предусматривают простые механические операции, такие как сдвиг или срез металлической проволоки из W, Pt-Ir, Pt-Rh, Mo, при котором непосредственно формируется острый кончик. Теоретически на кончике образуется несколько практически моноатомных щетинок, самая длинная из которых и используется в качестве зонда. Микроскопические волокна на конце механически обрезанной проволоки эффективны для получения атомного изображения в СТМ.

Электрохимическое травление является методом, используемым для придания металлическим зондам формы конуса с острой вершиной. Этот метод продолжает широко использоваться в своей простейшей форме: путем погружения металлической проволоки (W, Au, Ta, Fe, Pt, Ir, Pt-Ir) в соответствующий электролит и приложения напряжения к электродам. Пример устройства для травления игл (УТИ), производимого российской фирмой NT-MDT, представлен на рис. 1.

При изготовлении W зонда на кольцо 2 (рис. 1) наносится пленка раствора КОН или NaOH, в которую опускается W проволока 1. Между проволокой и кольцом пропускают электрический ток  $I$ , и в месте касания со щелочью W проволока перетравливается. Процесс контролируется через микроскоп 7.

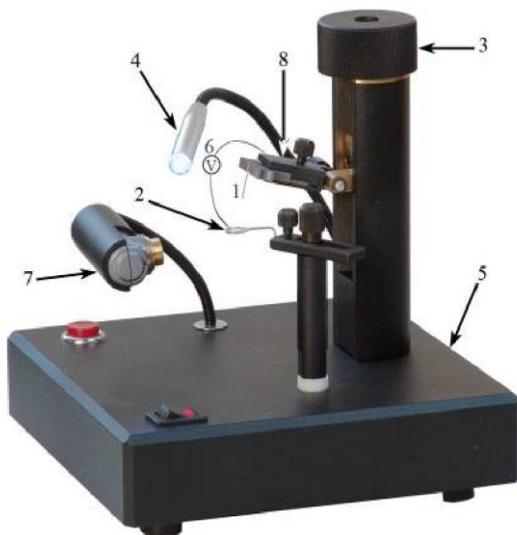


Рис. 1. Конструкция устройства для травления игл [1]: 1 – отрезок вольфрамовой проволоки; 2 – металлическое кольцо; 3 – винт перемещения по вертикали; 4 – подвижный светодиодный осветитель; 5 – основание; 6 – источник переменного электрического напряжения; 7 – микроскоп; 8 – держатель

За последние несколько десятков лет было изобретено множество методов электрохимического травления вольфрамовых зондов. В зависимости от решаемой задачи применялся наиболее подходящий метод. Это стало возможным благодаря большому разнообразию операций, приспособленных для тонкой регулировки важных функциональных характеристик, таких как симметрия кончика, острота, угол конуса.

Также возможно изготовление зондов с помощью ионной заточки. В этом случае созданный в вакууме поток ионов Ag направлен по касательной к зонду. В случае вольфрамового зонда эта операция

удаляет изоляционный слой оксида и создает зонд с радиусом закругления кончика несколько нм.

### **Зонды для АСМ**

Зондом для АСМ является остро заточенная игла, расположенная на свободном конце упругой балки, называемой консолью или кантилевером, которая формируется изотропным травлением пластины (чаще всего кремния). Другой конец консоли закреплен на основании (рис. 2).

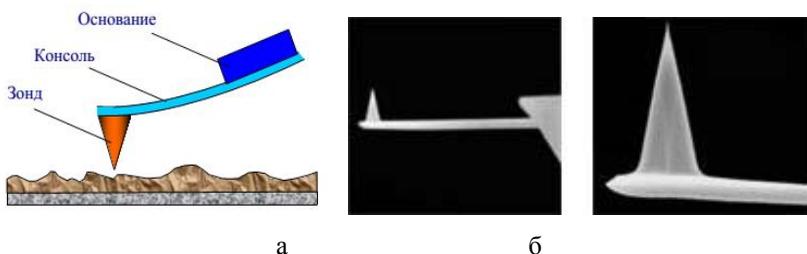


Рис. 2. Схематичное изображение зонда АСМ (а) [2] и изображение зонда, полученное с помощью электронного микроскопа (б) [3]

При приближении острия зонда к образцу на него, как описано выше, со стороны образца начинают действовать силы притяжения и отталкивания. При этом консоль изгибается, и по степени изгиба можно получать информацию о рельефе образца. Для регистрации степени изгиба консоли используется отражение от ее обратной стороны лазерного луча.

Разрешающая способность АСМ определяется радиусом закругления острия зонда и может находиться в пределах от нескольких десятков до единиц нанометров. Для различных методик

АСМ, для образцов с разными физическими свойствами существует множество разновидностей зондов.

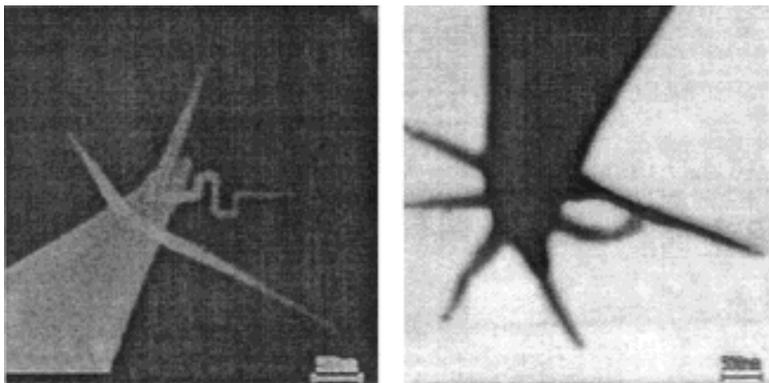


Рис. 3. Вискер-структуры, выращенные с использованием технологии электрон-стимулированного роста на кончиках игл кремниевых кантилеверов (НТ-МДТ и лаборатория Г.М. Михайлова ИПТМ РАН)

Зонды могут быть проводящими и непроводящими, иметь разную твердость материала зонда и разную жесткостью консоли и т.д. Для увеличения разрешающей способности АСМ и уменьшения искажений изображений на поверхности зонда формируют так называемые вискеры (рис. 3). Вискеры формируются сильно сфокусированным электронным лучом в установке электронно-лучевого экспонирования. Толщина вискероов может составлять 50–100 нм, радиус кривизны до 3 нм, длина до 3 мкм, что делает иглы такого типа чрезвычайно перспективными для применений как в аналитической атомно-силовой микроскопии, так и в нанотехнологии.

**Инструменты и материалы:** вольфрамовая проволока диаметром 0.15 мм; устройство для изготовления острия (рис. 4); ножницы; устройство для травления игл.

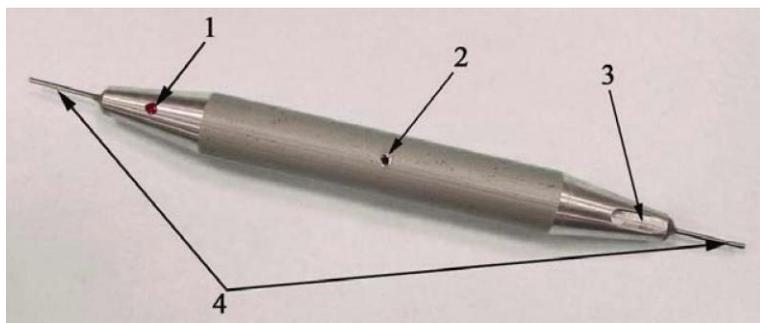


Рис. 4. Устройство для изготовления острия зондового датчика: 1 – маркер, 2 – отверстие, 3 – мерная канавка, 4 – капилляры

### ***Устройство для травления игл (УТИ)***

Устройство для травления игл (рис. 1) предназначено для изготовления и восстановления зондов для СЗМ методом электрохимического травления.

Принцип действия УТИ основан на том, что при протекании электрического тока между раствором щелочи и помещенным в нее металлом происходит электрохимический процесс травления металла, при котором атомы металла переходят в раствор. Для зондового микроскопа применяются заточенные таким способом иглы из вольфрамовой проволоки.

Отрезок вольфрамовой проволоки 1 закреплен на держателе 8, который перемещается вверх и вниз по вертикали вручную при помощи винта 3. Вращая винт 3, проволоку опускают в кольцо 2 до нужной глубины. Кольцо изготовлено из нихромовой проволоки.

Предварительно на кольцо 2 вешается капля 5-процентного раствора КОН или NaOH. После этого включается источник переменного электрического напряжения 6, обозначенный буквой V. Происходит процесс перетравливания вольфрамовой проволоки и образования острой иглы. Оператор наблюдает за процессом травления в оптический микроскоп или в видеомикроскоп 7.

Освещение обеспечивается подвижным светодиодным осветителем 4. Все элементы конструкции закреплены на основании 5. После окончания травления иглу вместе с держателем 8 поднимают в верхнее положение и вынимают.

### ***Технические характеристики УТИ***

Типичный радиус закругления кончика иглы	0.2 мкм
Материал заготовки иглы	вольфрамовая проволока диаметром 0.1 мм
Диапазон перемещения по вертикали	25 мм
Источник напряжения	6 ÷ 9 В / 0.5 А переменного тока
Увеличение видеомикроскопа	X 20
Время травления иглы	не более 2 мин

## Порядок выполнения работы

### *1. Подготовка к травлению: изготовление заготовки острия зонда*

1. Выпрямите проволоку на длину приблизительно 3 сантиметра.
2. Вставьте проволоку до упора в металлический капилляр со стороны мерной канавки устройства (рис. 5).

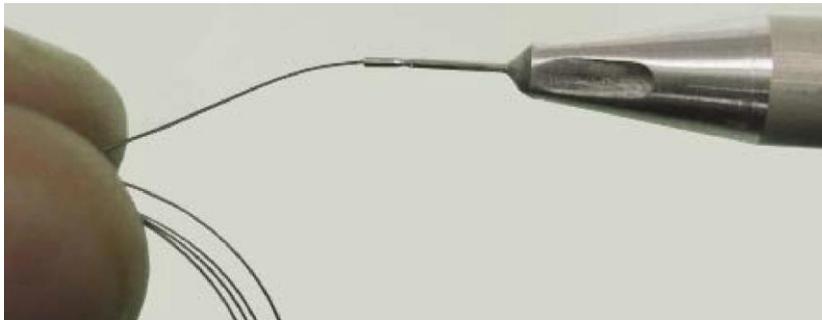


Рис. 5. Установка проволоки в капилляр

3. Загните проволоку на угол приблизительно 180 градусов, прижимая ее пальцем к металлическому капилляру (рис. 6, а).

4. Вытащите проволоку из капилляра. Вложите проволоку загнутым концом в мерную канавку до упора (рис. 6, б).



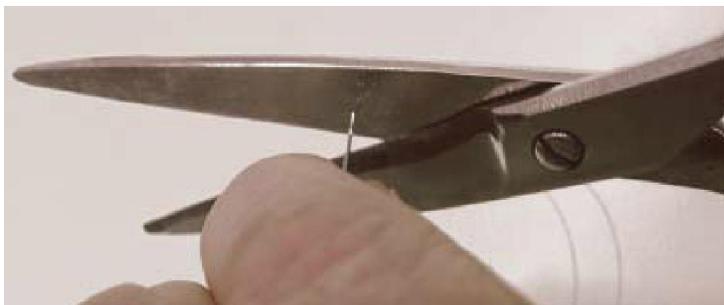
а

б

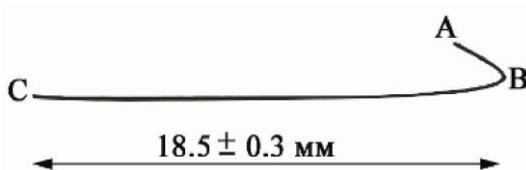
Рис. 6. Сгибание конца проволоки (а), определение длины заготовки (б)

5. Прижмите проволоку пальцем к мерной канавке.

6. Отрежьте проволоку ножницами, упираясь режущей плоскостью ножниц в торец капилляра (рис. 7, а). Важно обеспечить длину  $BC=18,5\pm 0,3$  мм (рис. 7, б).



а



б

Рис. 7. Обрезка проволоки (а), заготовка зонда после обрезки (б)

7. Для формирования угла  $ABC$  вставьте проволоку со стороны точки В (рис. 8, а) в отверстие, расположенное в центре приспособления.

8. Протащите проволоку сквозь отверстие (рис. 8, б).

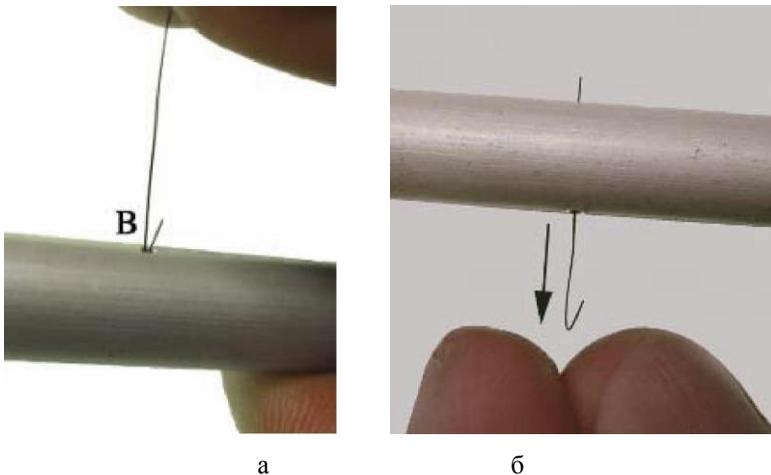


Рис. 8. Пропускание проволоки через отверстие приспособления для изготовления острия зондового датчика: а – начало процесса; б - окончание

9. Со стороны точки С вставьте проволоку до упора в капилляр, отмеченный красной точкой (рис. 9).



Рис. 9. Установка заготовки в капилляр, отмеченный красной точкой

10. Загните проволоку приблизительно на 90 градусов, прижимая ее пальцем (рис. 10).

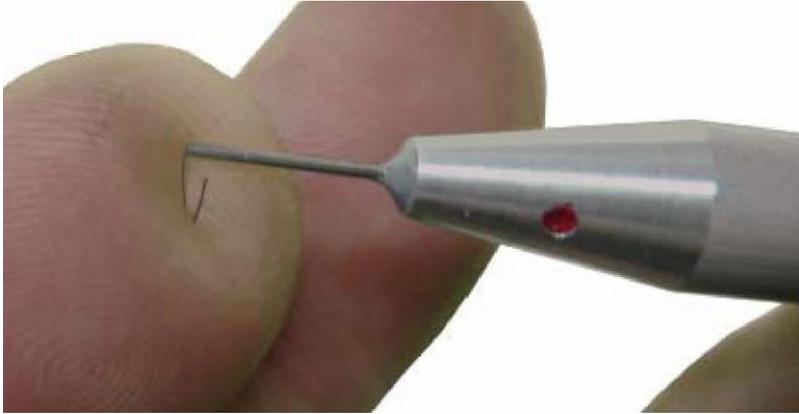


Рис. 10. Сгибание проволоки

11. Выньте проволоку из капилляра. Угол BDC (см. рис. 11) должен быть в пределах  $90 \pm 5$  градусов. Ширина зазора должна быть не меньше  $1,0 \pm 0,5$  мм. При слишком узком зазоре работа датчика может быть нестабильной.

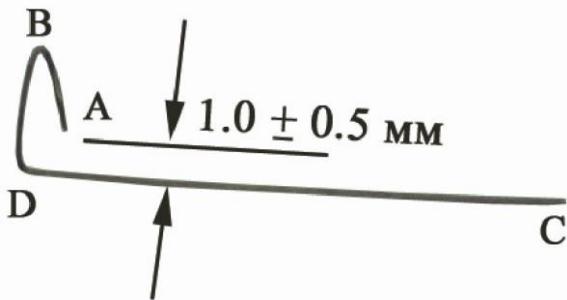


Рис. 11. Заготовка зонда перед установкой в зондовый датчик

12. Со стороны точки В вставьте проволоку в трубку датчика (рис. 12, а).

13. Утопите проволоку пальцем до упора.

14. Датчик готов для последующего изготовления острия путем электрохимического травления (рис. 12, б).

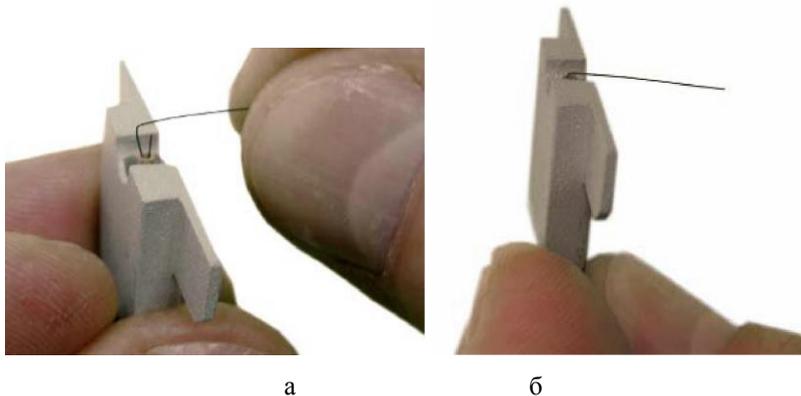


Рис. 12. Установка заготовки в зондовый датчик: а – начало процесса;  
б - окончание

## **2. Изготовление зонда для СЗМ**

1. Для изготовления зонда нужно взять универсальный датчик взаимодействия со сменным острием.

2. Осторожно извлеките старую иглу при помощи пинцета из пьезотрубки универсального датчика взаимодействия и вставьте новую заготовку.

3. Поверните кольцо 2 в сторону от держателя 8 (рис. 1).

4. Вставьте датчик в держатель 8 (рис. 1).

5. Подключите УТИ к адаптеру, входящему в комплект поставки, подключите адаптер к электрической сети 220 В.

6. Убедитесь, что режим травления выключен (не горит красная лампочка на выключателе).

7. Подключите цифровой микроскоп к порту USB компьютера

согласно инструкции пользования цифровым микроскопом NanoEducator.

8. Установите держатель с датчиком в такое положение, чтобы проволока-заготовка 1 была вертикальна.

9. Поднимите винтом 3 держатель 8 с датчиком в верхнее положение так, чтобы конец проволоки 1 был выше кольца 2.

10. Поверните кольцо 2 так, чтобы оно оказалось под проволокой.

11. Отрегулируйте положение цифрового микроскопа, изгибая рукой гибкий стержень-держатель цифрового микроскопа так, чтобы кольцо 2 было в фокусе микроскопа.

12. Поверните кольцо 2 в прежнее положение и навесьте на него каплю 5-процентного раствора КОН (или NaOH) из чашки Петри, как показано на рис. 13. Прикоснитесь поверхностью жидкости к проволочному кольцу, после этого опустите чашку вниз. На кольце образуется капля раствора. Если капля сорвалась при перемещениях кольца, повторно прикоснитесь поверхностью жидкости к проволочному кольцу.

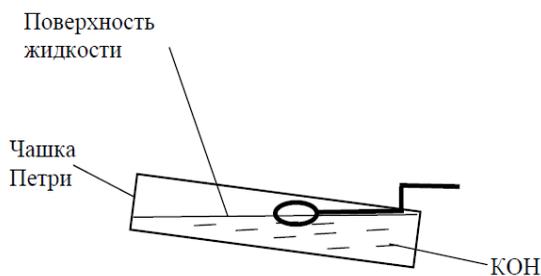


Рис. 13. Навешивание капли на кольцо

13. Снова поверните кольцо под проволоку 1 и опустите проволоку в каплю, вращая винт 3.

14. Установите зазор между каплей и нижней поверхностью датчика приблизительно 2 мм. При этом длина будущей иглы будет около 5 мм (рис. 14, а).

15. Включите процесс травления выключателем. При этом загорится лампочка на выключателе и жидкость начнет «кипеть».

16. Наблюдая за процессом травления в микроскоп, периодически выключайте травление выключателем и наблюдайте за утоньшением вольфрамовой проволоки внутри капли.

17. После перетравливания проволоки нижний конец ее падает.

**!!! ВНИМАНИЕ! Следите за процессом травления и немедленно отключите электропитание после падения нижней части заготовки.**

18. Поднимите держатель 8 с иглой в такое положение, чтобы только самый кончик иглы был погружен в жидкость.

19. Включите на короткое время (не более 1 с) процесс травления выключателем (рис. 14, б). Выключите травление.



а

б

Рис. 14. Погружение заготовки зонда в травитель (а), затачивание кончика зонда (б)

20. Поднимите держатель с датчиком при помощи винта 3.

21. Выньте датчик с готовым зондом из держателя.

22. Промойте зонд в струе проточной воды, держа его иглой вниз.

Просушите зонд под теплыми струями воздуха. Для просушки зонда можно использовать фен.

23. Вставьте датчик в физический узел и проверьте наличие резонансного пика согласно инструкции по работе с СЗМ.

24. Если пик имеет недостаточную амплитуду, повторно просушите зонд, так как остатки влаги могут электрически шунтировать электроды пьезоэлемента.

***ПРИМЕЧАНИЕ. Рекомендуется производить травление зонда не в том датчике, с которым вы будете работать, а в другом, так как пары щелочи могут образовать влажную пленку на пьезоэlemente и нарушить временно его работу. После травления и просушки иглы ее можно вставить в рабочий датчик.***

### **Контрольные вопросы**

1. Зонды для СТМ.

2. Способы изготовления зондов для СТМ.

3. Зонды для АСМ.

4. Способы изготовления зондов для АСМ.

5. Расскажите о методике изготовления зонда для СЗМ NanoEducator.

### **Библиографический список**

1. Сканирующий зондовый микроскоп NanoEducator: руководство пользователя. ЗАО " NT-MDT". 2008. 137 с.
2. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2005. 144 с.
3. Интернет-ресурс компании "НТ-МДТ": <http://ntmdt.ru>.

**5045**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА МИКРО- И НАНОСИСТЕМ**

Методические указания  
к лабораторной работе № 1

**Изучение устройства и принципов работы сканирующего  
зондового микроскопа NanoEducator**

Рязань 2016

УДК 621.315.592

Методы анализа микро- и наносистем: методические указания к лабораторной работе № 1 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: А.П. Авачев, Н.В. Вишняков, Ю.В. Воробьев, Н.Б. Рыбин. Рязань, 2016. 16 с.

Содержат краткие теоретические сведения о методах сканирующей зондовой микроскопии, устройстве СЗМ NanoEducator, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине “Методы анализа микро- и наносистем”.

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.04.04

Ил. 15. Библиогр.: 4 назв.

*Сканирующая зондовая микроскопия, атомно-силовая микроскопия*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и нанoeлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

#### Методы анализа микро- и наносистем

Составители: А в а ч е в Алексей Петрович  
В и ш н я к о в Николай Владимирович  
В о р о б ь е в Юрий Владимирович  
Р ы б и н Николай Борисович

Редактор Р.К. Мангутова  
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 30.06.16. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

## Цель работы

Изучение конструкции и принципа работы сканирующего зондового микроскопа NanoEducator, а также получение изображения в режиме программного эмулятора.

## Краткие теоретические сведения

### *Общая конструкция сканирующего зондового микроскопа*

СЗМ состоит из следующих основных компонентов (рис. 1): 1 – зонд; 2 – образец; 3 – пьезоэлектрические двигатели  $x$ ,  $y$ ,  $z$  для прецизионного перемещения зонда над поверхностью исследуемого образца; 4 – генератор развертки, подающий напряжения на пьезодрайверы  $x$  и  $y$ , обеспечивающие сканирование зонда в горизонтальной плоскости; 5 – электронный сенсор, детектирующий величину локального взаимодействия между зондом и образцом; 6 – компаратор, сравнивающий текущий сигнал в цепи сенсора  $V(t)$  с изначально заданным  $V_S$ , и, при его отклонении, вырабатывающий корректирующий сигнал  $V_{fb}$ ; 7 – электронная цепь обратной связи, управляющая положением зонда по оси  $z$ ; 8 – компьютер, управляющий процессом сканирования и получением изображения 9.

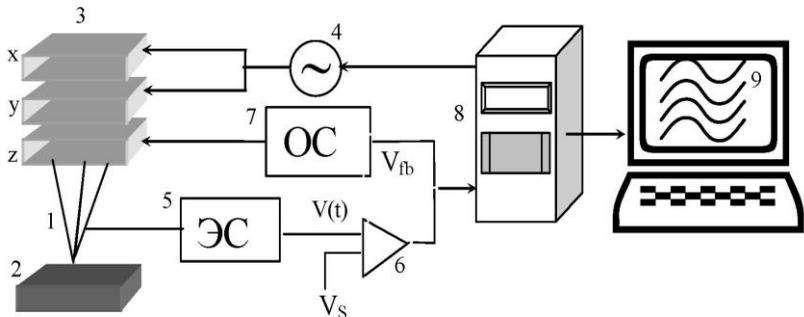


Рис. 1. Общая схема сканирующего зондового микроскопа: 1 – зонд; 2 – образец; 3 – пьезоэлектрические двигатели  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ; 4 – генератор напряжения развертки на  $x$ ,  $y$  пьезокерамики; 5 – электронный сенсор; 6 – компаратор; 7 – электронная цепь обратной связи; 8 – компьютер; 9 – изображение  $z(x,y)$

### Виды сенсоров

В основе сканирующей зондовой микроскопии лежит детектирование локального взаимодействия, возникающего между зондом и поверхностью исследуемого образца при их взаимном сближении до расстояния  $\sim \lambda$ , где  $\lambda$  – характерная длина затухания взаимодействия «зонд-образец». В зависимости от природы взаимодействия «зонд-образец» различают: сканирующий туннельный микроскоп (СТМ, детектируется туннельный ток), сканирующий силовой микроскоп (ССМ, детектируется силовое взаимодействие), ближнепольный сканирующий оптический микроскоп (БСОМ, детектируется электромагнитное излучение) и т.п. Сканирующая силовая микроскопия в свою очередь подразделяется на атомно-силовую микроскопию (АСМ), магнитно-силовую микроскопию (МСМ), электросиловую микроскопию (ЭСМ) и другие, в зависимости от вида силового взаимодействия.

Двумя основными методами зондовой микроскопии являются СТМ и АСМ.

При измерении туннельного тока в туннельном сенсоре (рис. 2) используется преобразователь ток – напряжение (ПТН), включенный в цепь протекания тока между зондом и образцом. Возможны два варианта включения: с заземленным зондом, когда напряжение смещения подается на образец относительно заземленного зонда, или с заземленным образцом, когда напряжение смещения прикладывается к зонду относительно образца.

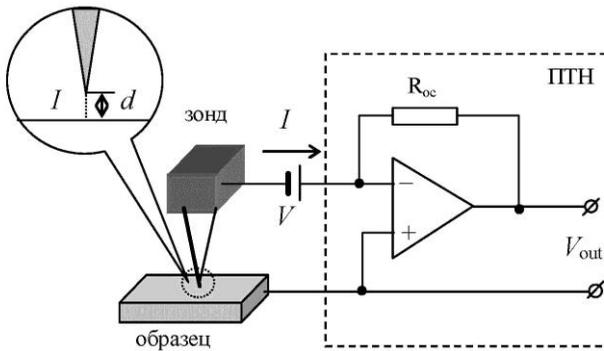


Рис. 2. Схема туннельного сенсора

Традиционным датчиком силового взаимодействия является кремниевая микробалка (консоль или кантилевер от англ. cantilever - консоль) с оптической схемой регистрации величины изгиба кантилевера, возникающего вследствие силового взаимодействия между образцом и зондом, расположенным на конце кантилевера (рис. 3).

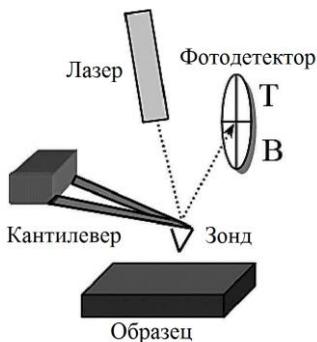


Рис. 3. Схема силового сенсора

Различают контактный, неконтактный и прерывисто-контактный («полуконтактный») способы проведения силовой микроскопии. Использование контактного способа предполагает, что зонд упирается в образец. При изгибе кантилевера под действием контактных сил отраженный от него луч лазера смещается относительно центра квадрантного фотодетектора. Таким образом, отклонение кантилевера может быть определено по относительному изменению освещенности верхней и нижней половинок фотодетектора.

При использовании неконтактного способа зонд удален от поверхности и находится в области действия дальнедействующих притягивающих сил. Силы притяжения и их градиенты слабее отталкивающих контактных сил. Поэтому для их детектирования обычно используется модуляционная методика. Для этого с помощью пьезовибратора кантилевер раскачивается по вертикали на резонансной частоте. Вдали от поверхности амплитуда колебаний кантилевера имеет максимальную величину. По мере приближения к поверхности вследствие действия градиента сил притяжения резонансная частота колебаний кантилевера изменяется, при этом уменьшается амплитуда его колебаний. Эта амплитуда регистрируется

с помощью оптической системы по относительному изменению переменной освещенности верхней и нижней половинок фотодетектора.

При «полуконтактном» способе измерений также применяется модуляционная методика измерения силового взаимодействия. В «полуконтактном» режиме зонд частично касается поверхности, находясь попеременно как в области притяжения, так и в области отталкивания.

Существуют и другие, более простые способы детектирования силового взаимодействия, при которых происходит прямое преобразование силового взаимодействия в электрический сигнал. Один из таких способов основан на использовании прямого пьезоэффекта, когда изгиб пьезоматериала под действием силового взаимодействия приводит к появлению электрического сигнала.

#### *Пьезоэлектрический двигатель. Сканеры*

Для контролируемого перемещения иглы на сверхмалых расстояниях в СЗМ используются пьезоэлектрические двигатели. Их задача – обеспечить прецизионное механическое сканирование зондом исследуемого образца путем перемещения зонда относительно неподвижного образца или перемещения образца относительно неподвижного зонда.

Работа большинства пьезоэлектрических двигателей, применяемых в современных СЗМ, основана на использовании обратного пьезоэффекта, который заключается в изменении размеров пьезоматериала под действием электрического поля.

Конструкции из пьезокерамик, обеспечивающие перемещение по трем координатам  $x$ ,  $y$  (в латеральной плоскости образца) и  $z$  (по вертикали), называются «сканерами». Существует несколько типов сканеров, наиболее распространенными из которых являются треногий и трубчатый (рис. 4).

В треногом сканере перемещения по трем координатам обеспечивают расположенные в ортогональную структуру три независимые пьезокерамики.

Трубчатые сканеры работают посредством изгиба полой пьезоэлектрической трубки в латеральной плоскости и удлинения или

сжатия трубки по оси  $z$ . Электроды, управляющие перемещениями трубки в  $x$  и  $y$  направлениях, размещаются в виде четырех сегментов по наружной поверхности трубки (рис. 4 б).

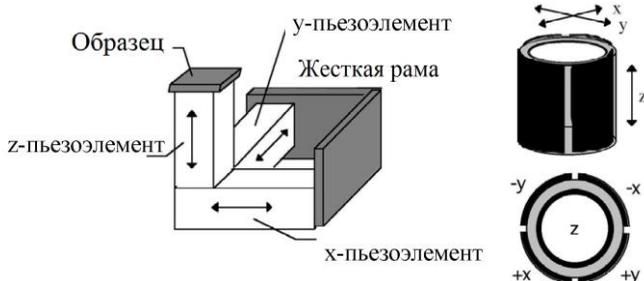


Рис. 4. Основные конструкции сканеров: а – треугольный, б – трубчатый

Для изгиба трубки в направлении  $x$ , на  $+x$  керамику подается напряжение для удлинения одной из ее сторон. Тот же самый принцип используется для задания движения в направлении  $y$ . Смещения в  $x$  и  $y$  направлениях пропорциональны приложенному напряжению и квадрату длины трубки. Движение в  $z$  направлении генерируется подачей напряжения на электрод в центре трубки. Это приводит к удлинению всей трубки пропорционально ее длине и приложенному напряжению.

Процесс сканирования поверхности в СЗМ (Рис. 5) имеет сходство с движением электронного луча по экрану в электроннолучевой трубке телевизора. Зонд движется вдоль линии (строки) сначала в прямом, а потом в обратном направлении (строчная развертка), затем переходит на следующую строку (кадровая развертка). Движение зонда осуществляется с помощью сканера небольшими шагами под действием пилообразных напряжений, подаваемых с генератора развертки (обычно цифроаналогового преобразователя). Регистрация информации о рельефе поверхности производится, как правило, на прямом проходе.

К числу основных параметров, выбираемых перед началом сканирования, относятся:

- размер скана;
- число точек на линии  $N_x$  и линий в скане  $N_y$ , определяющее шаг

сканирования  $\Delta$ ;  
- скорость сканирования.

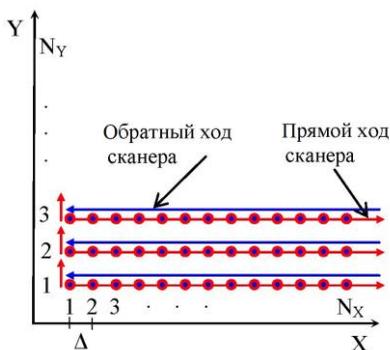


Рис. 5. Схематическое изображение процесса сканирования

Параметры сканирования выбираются исходя из предварительных данных (размера характерных поверхностных особенностей), которые имеются у исследователя об объекте исследования.

При выборе размера скана необходимо получить наиболее полную информацию о поверхности образца, т.е. отобразить наиболее характерные особенности его поверхности.

Число точек сканирования ( $N_x$ ,  $N_y$ ) выбирается таким образом, чтобы шаг сканирования  $\Delta$  (расстояние между точками, в которых производится считывание информации о поверхности) был меньше характерных ее особенностей, иначе произойдет потеря части информации, заключенной между точками сканирования. С другой стороны, выбор излишнего количества точек сканирования приведет к увеличению времени получения скана.

Скорость сканирования определяет скорость движения зонда между точками, в которых производится считывание информации. Излишне большая скорость может привести к тому, что система обратной связи не будет успевать отводить зонд от поверхности, что приведет к неправильному воспроизведению вертикальных размеров, а также к повреждению зонда и поверхности образца. Малая скорость сканирования приведет к увеличению времени получения скана.

### *Система обратной связи*

В процессе сканирования зонд может находиться над участками поверхности, имеющими различные физические свойства, в результате чего величина и характер взаимодействия зонд – образец будут изменяться. Кроме того, если на поверхности образца есть неровности, то при сканировании будет изменяться и расстояние  $\Delta Z$  между зондом и поверхностью, соответственно будет изменяться и величина локального взаимодействия.

В процессе сканирования производится поддержание постоянной величины локального взаимодействия (силы или туннельного тока) с помощью системы отрицательной обратной связи. При приближении зонда к поверхности сигнал сенсора возрастает. Компаратор (рис. 1) сравнивает текущий сигнал сенсора с опорным напряжением  $V_s$  и вырабатывает корректирующий сигнал  $V_{fb}$ , используемый в качестве управляющего для пьезопривода, который отводит зонд от поверхности образца. Сигнал для получения изображения топографии поверхности берется при этом из канала z-пьезопривода.

Отклик системы обратной связи на возникновение сигнала рассогласования определяется константой цепи обратной связи  $K$  (в приборе NanoEducator - **Feed Back Loop Gain**). Чем больше значение  $K$ , тем точнее цепь обратной связи обрабатывает черты сканируемой поверхности и тем достовернее данные, получаемые при сканировании. Однако при превышении некоторого критического значения  $K$  система обратной связи проявляет склонность к самовозбуждению, т.е. на линии скана наблюдается зашумленность.

### *Формат СЗМ данных, способы обработки и представления результатов эксперимента*

Информация, полученная с помощью сканирующего зондового микроскопа, хранится в виде СЗМ кадра – двумерного массива целых чисел  $Z_{ij}$  (матрицы). Каждому значению пары индексов  $i$  и  $j$  соответствует определенная точка поверхности в пределах поля сканирования. Как правило, СЗМ кадры представляют собой квадратные матрицы, имеющие размер 200x200 или 300x300 элементов.

Визуализация СЗМ кадров производится средствами

компьютерной графики, в основном, в виде двумерных яркостных (2D) и трехмерных (3D) изображений.

*Конструкция сканирующего зондового микроскопа NanoEducator*

На рис. 6 представлена конструкция измерительной головки. На основании 1 расположены сканер 8 с держателем образца 7 и механизм подвода 2 на основе шагового двигателя. Подвод зонда 6, закрепленного на датчике взаимодействия 4, к образцу можно также осуществлять с помощью винта ручного подвода 3. Предварительный выбор места исследования на образце осуществляется с помощью винтов 9 и 10.

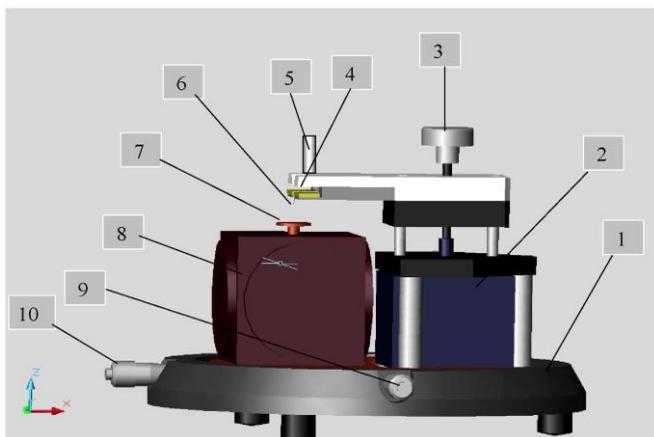


Рис. 6. Конструкция СЗМ NanoEducator: 1 – основание, 2 – механизм подвода, 3 – винт ручного подвода, 4 – датчик взаимодействия, 5 – винт фиксации датчика, 6 – зонд, 7 – держатель образца, 8 – сканер, 9, 10 – винты перемещения сканера с образцом

*Универсальный датчик туннельного тока и силового взаимодействия*

В приборе NanoEducator применяется универсальный датчик туннельного тока и модуляционного силового взаимодействия. Датчик выполнен в виде пьезокерамической трубки длиной  $l=7$  мм, диаметром  $d=1.2$  мм и толщиной стенки  $h=0.25$  мм, жестко закрепленной с одного

конца. На внутреннюю поверхность трубки нанесен проводящий электрод. На внешнюю поверхность трубки нанесены два электрически изолированных полуцилиндрических электрода. К свободному концу трубки прикреплена вольфрамовая проволока диаметром 100 мкм (рис. 7).

Свободный конец проволоки, используемой в качестве зонда, заточен электрохимически, радиус закругления имеет величину  $0.2 \pm 0.05$  мкм. Зонд имеет электрический контакт с внутренним электродом трубки, соединенным с заземленным корпусом прибора. При измерении туннельного тока пьезотрубка играет роль жесткой пассивной консоли. Электрическое смещение прикладывается к образцу относительно заземленного зонда.

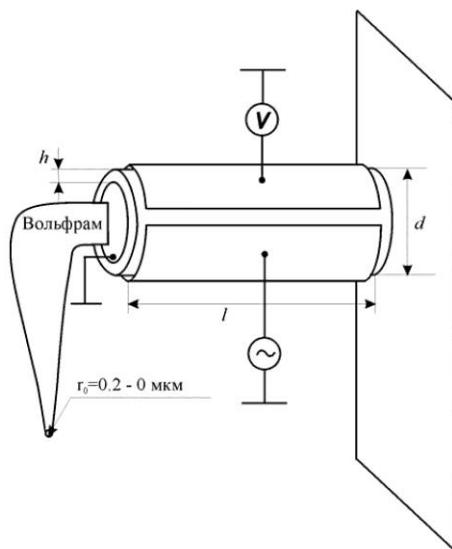


Рис. 7. Конструкция универсального датчика прибора NanoEducator

В качестве датчика силового взаимодействия одна часть пьезоэлектрической трубки используется как пьезовибратор, а другая – как датчик механических колебаний. К пьезовибратору подводится переменное электрическое напряжение с частотой, равной резонансной частоте силового датчика. Амплитуда колебаний при большом расстоянии зонд – образец максимальна.

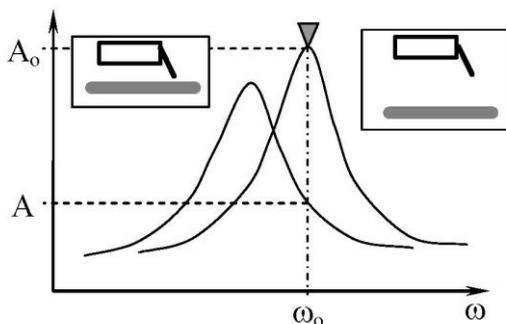


Рис. 8. Изменение частоты колебаний силового датчика при приближении к поверхности образца

При приближении зонда к поверхности образца зонд начинает касаться образца в процессе колебаний. Это приводит к смещению амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) колебаний датчика влево по сравнению с АЧХ, измеренной вдали от поверхности (рис. 8). Так как частота вынуждающих колебаний пьезотрубки поддерживается постоянной и равной  $\omega_0$  в свободном состоянии, то при приближении зонда к поверхности амплитуда его колебаний уменьшается и становится равной  $A$ . Эта амплитуда колебаний регистрируется со второй половины пьезотрубки.

### *Сканер*

Способ организации микроперемещений, использующийся в приборе NanoEducator, основан на использовании зажатой по периметру металлической мембраны, к поверхности которой приклеена пьезопластинка (рис. 9, а). Изменение размеров пьезопластинки под действием управляющего напряжения будет приводить к изгибу мембраны. Расположив такие мембраны по трем перпендикулярным сторонам куба и соединив их центры металлическими направляющими, можно получить трехкоординатный сканер (рис. 9, б).

В приборах NanoEducator максимальное перемещение образца составляет около 50-70 мкм, что и определяет максимальную площадь сканирования.

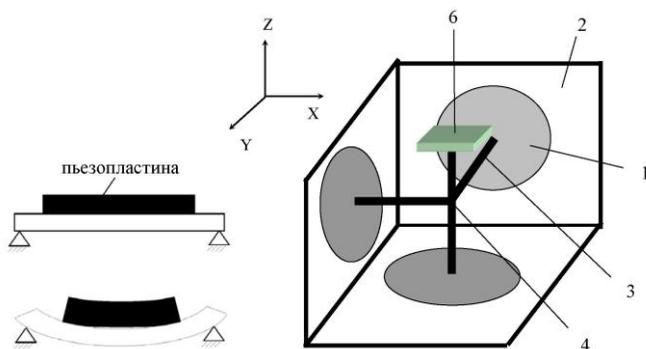


Рис. 9. Принцип действия (а) и конструкция (б) сканера прибора NanoEducator

*Механизм автоматизированного подвода зонда к образцу (захват обратной связи)*

Диапазон перемещений сканера по оси Z составляет около 10 мкм, поэтому перед началом сканирования необходимо приблизить зонд к образцу на это расстояние. Для этого предназначен механизм подвода, схема которого приведена на рис. 10. Шаговый двигатель 1 при подаче на него электрических импульсов вращает винт подачи 2 и перемещает планку 3 с зондом 4, приближая или отдаляя его от образца 5, установленного на сканере 6. Величина одного шага составляет около 2 мкм.

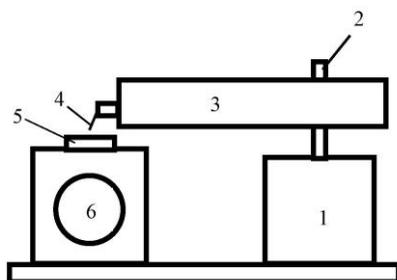


Рис. 10. Схема механизма подвода зонда к поверхности образца

Так как шаг механизма подвода значительно превосходит величину требуемого расстояния зонд-образец в процессе сканирования, то во избежание деформации зонда его подвод

осуществляется при одновременной работе шагового двигателя и перемещении сканера по оси  $Z$  по следующему алгоритму.

Система обратной связи отключается, и сканер “втягивается”, т. е. опускает образец в нижнее крайнее положение:

1. Механизм подвода зонда производит один шаг и останавливается.

2. Система обратной связи включается, и сканер плавно поднимает образец, одновременно производится анализ наличия взаимодействия зонд-образец.

3. Если взаимодействие отсутствует, процесс повторяется с п. 1.

Если во время вытягивания сканера вверх появится ненулевой сигнал, система обратной связи остановит движение сканера вверх и зафиксирует величину взаимодействия на заданном уровне.

### *Программное обеспечение для работы с СЗМ NanoEducator*

После вызова программы NanoEducator на экране компьютера появляется главное окно (рис. 11). Программа позволяет осуществлять просмотр и обработку данных параллельно с измерениями.

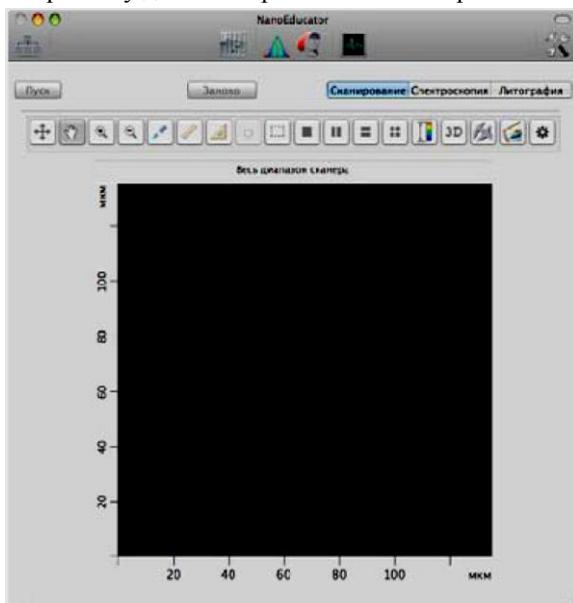


Рис. 11. Главное окно программы NanoEducator

Подготовку к измерениям рекомендуется проводить, используя окно «Подготовка к сканированию» (рис. 12). Окно открывается

кнопкой  на панели основных операций.

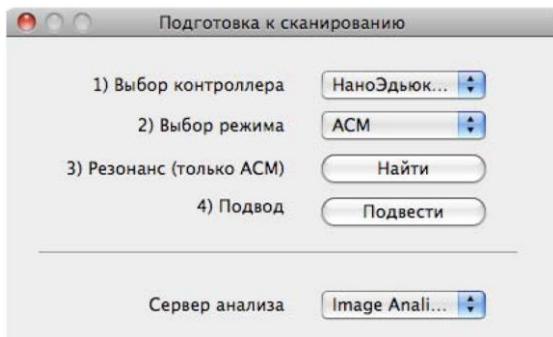


Рис. 12. Окно «Подготовка к сканированию»

Если программа была запущена до включения контроллера, то будет выбран режим эмуляции. В этом случае после включения контроллера его название следует выбрать в списке «Выбор контроллера». Для работы прибора в качестве атомно-силового микроскопа в меню «Выбор режима» выберите конфигурацию АСМ; для сканирующего туннельного микроскопа – конфигурацию СТМ.

Поиск резонанса и установка рабочей частоты колебаний зонда, которые рекомендуется выполнять перед началом каждого измерения, осуществляются в окне «Резонанс». Окно «Резонанс» (рис. 13)

открывается кнопкой  на панели основных операций главного окна программы.

Выполнение операции поиска резонанса предусматривает измерение амплитуды колебаний зонда при изменении частоты вынужденных колебаний, задаваемых генератором. Запуск автоматического поиска резонансной частоты осуществляется кнопкой «Старт». В результате измерения амплитуды колебаний зонда автоматически устанавливается частота генератора, равная частоте, при которой наблюдалась максимальная амплитуда. В процессе поиска резонансной частоты при необходимости автоматически

подстраивается амплитуда выходного сигнала генератора и коэффициент усиления таким образом, чтобы амплитуда колебаний зондового датчика на резонансной частоте была не менее 2 В.

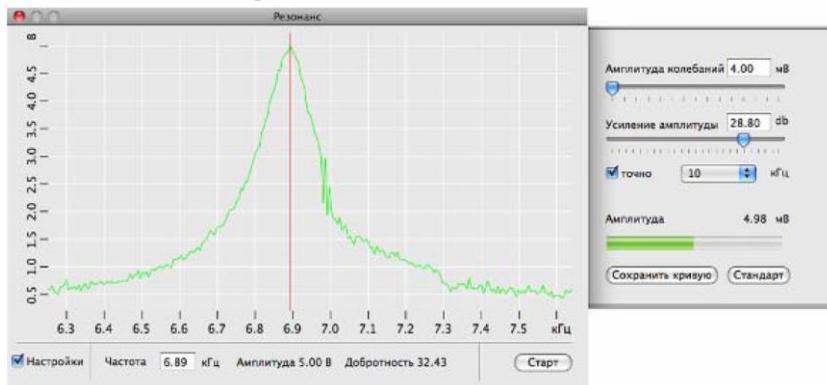


Рис. 13. Окно «Резонанс»

Окно «Подвод» (рис. 14) открывается кнопкой



на панели основных операций главного окна программы.

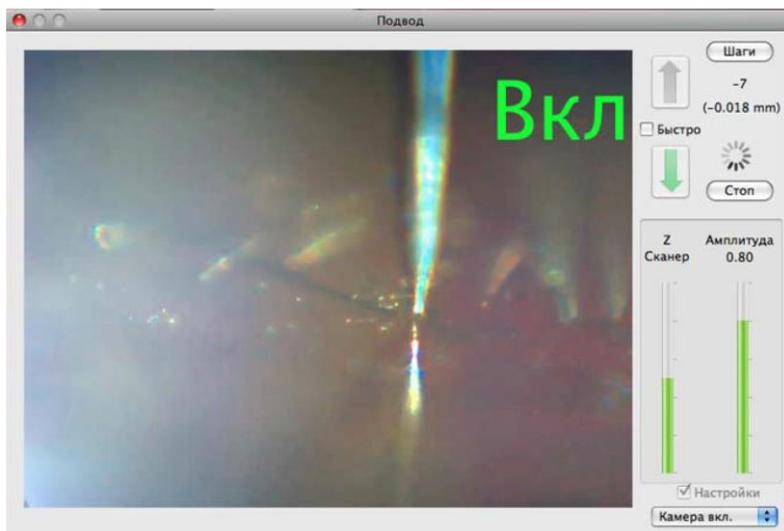


Рис. 14. Окно «Подвод»

Окно «Подвод» содержит элементы управления подводом зонда, а также индикации параметров, которые позволяют анализировать ход выполнения процедуры. В окне «Подвод» пользователь имеет возможность наблюдать за следующими величинами:

- вытянутость сканера (индикатор Сканер) по оси Z относительно максимально возможной, принятой за единицу. Величина относительного удлинения сканера характеризуется уровнем заполнения левого индикатора цветом, соответствующим зоне, в которой находится сканер в текущий момент: зеленый цвет – рабочая зона, красный – вне рабочей зоны, желтый - переходная зона. Если индикатор красного цвета и сканер втянут, это означает, что сканер подошел слишком близко к поверхности образца, что может повлечь деформацию зонда. Если индикатор красного цвета и сканер вытянут, это означает отсутствие контакта с поверхностью;

- амплитуда колебаний зонда (индикатор Амплитуда) относительно амплитуды его колебаний в отсутствие силового взаимодействия, принятой за единицу. Величина относительной амплитуды колебаний зонда показана на правом индикаторе уровнем его заполнения зеленым цветом;

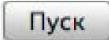
- количество шагов (Шаги), пройденных в заданном направлении.

Для осуществления процедуры сканирования в главном окне программы должна быть нажата кнопка «Сканирование». Параметры сканирования сгруппированы на панели сканирования,



открываемой кнопкой в правой части окна программы. Можно устанавливать следующие параметры:

- координаты начальной точки сканирования;
- размер области сканирования;
- шаг сканирования;
- разрешение (количество точек измерений);
- скорость сканирования;
- метод сканирования;
- усиление обратной связи;
- величину силового взаимодействия между зондом и образцом.

Запуск сканирования осуществляется кнопкой  в

главном окне программы. В результате начнется построчное сканирование поверхности образца и в области измерений, строчка за строчкой, будет появляться изображение сканируемой поверхности.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомьтесь с устройством прибора.
2. Запустите программное обеспечение СЗМ NanoEducator.
3. Изучите расположение и назначение кнопок в главном окне программы.
4. В окне «Подготовка к сканированию» в качестве контроллера выберите «Программный эмулятор».
5. Изучите расположение и назначение кнопок в окнах «Резонанс» и «Подвод». Получите и сохраните резонансную кривую.
6. В режиме программного эмулятора получите изображения методами АСМ и СТМ с разными разрешением и размером скана. Сохраните полученные изображения.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите основные компоненты СЗМ и их назначение.
2. Назовите виды сенсоров и принципы их действия.
3. Объясните понятие пьезоэлектрического эффекта и принцип действия пьезоэлектрического двигателя. Опишите различные конструкции сканеров.
4. Опишите общую конструкцию прибора NanoEducator.
5. Объясните конструкцию зондового датчика прибора NanoEducator и принцип его действия.
6. Опишите механизм подвода зонда к образцу в приборе NanoEducator.
7. Объясните принцип сканирования и работы системы обратной связи. Расскажите о критериях выбора параметров сканирования.

### **Библиографический список**

1. NanoEducator. Программное обеспечение под Mac OS X: учеб. пособие. ЗАО " NT-MDT", 2008. 196 с.
2. Сканирующий зондовый микроскоп NanoEducator: руководство пользователя. ЗАО " NT-MDT". 2008. 137 с.
3. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2005. 144 с.
4. Интернет-ресурс компании "НТ-МДТ": <http://ntmdt.ru>.

**5049**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА МИКРО- И НАНОСИСТЕМ**

Методические указания  
к лабораторной работе № 5

**Обработка и количественный анализ СЗМ-изображений**

Рязань 2016

УДК 621.315.592

Методы анализа микро и наносистем: методические указания к лабораторной работе № 5 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: А.П. Авачев, Н.В. Вишняков, Ю.В. Воробьев, Н.Б. Рыбин. Рязань, 2016. 16 с.

Содержат краткие теоретические сведения о методах обработки и количественного анализа СЗМ-изображений, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине “Методы анализа микро- и наносистем”.

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.04.04

Ил. 7. Библиогр.: 7 назв.

*Сканирующая зондовая микроскопия, обработка изображения, сглаживание, фильтрация, количественный анализ*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и нанoeлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

#### Методы анализа микро- и наносистем

Составители:      А в а ч е в Алексей Петрович  
                             В и ш н я к о в Николай Владимирович  
                             В о р о б ь е в Юрий Владимирович  
                             Р ы б и н Николай Борисович

Редактор Р.К. Мангутова  
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 30.06.16. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

## **Цель работы**

Получение практических навыков в области обработки и количественного анализа СЗМ изображений.

## **Краткие теоретические сведения**

СЗМ изображения, в силу специфики метода, обычно содержат шумы. Это связано с вибрацией зонда относительно образца, акустическими помехами, шумами электрической аппаратуры, всегда присутствующими при измерении слабых сигналов. Искажения в изображении также вносятся из-за теплового дрейфа зонда относительно образца, нелинейности и крипа в пьезокерамических элементах, из которых изготавливается сканер. В связи с этим для получения СЗМ изображений высокого качества и проведения их количественного анализа требуется специальная цифровая обработка этих изображений.

## **Основные методы фильтрации СЗМ изображений**

### *Сглаживание*

Сглаживание изображения в простейшем случае выполняется путем замены значения высоты в каждой точке усредненным значением величин в некоторой окрестности этой точки.

### *Медианная фильтрация*

При медианной фильтрации для каждой точки изображения строится вариационный (рис. 1, б) ряд для некоторой ее окрестности (рис. 1, а), то есть все элементы этой окрестности располагаются в

порядке возрастания (рис. 1, в) и значение в этой точке заменяется на значение элемента, занимающего центральное положение в вариационном ряду. Медианная фильтрация особенно эффективна при обработке изображений, содержащих импульсные помехи.

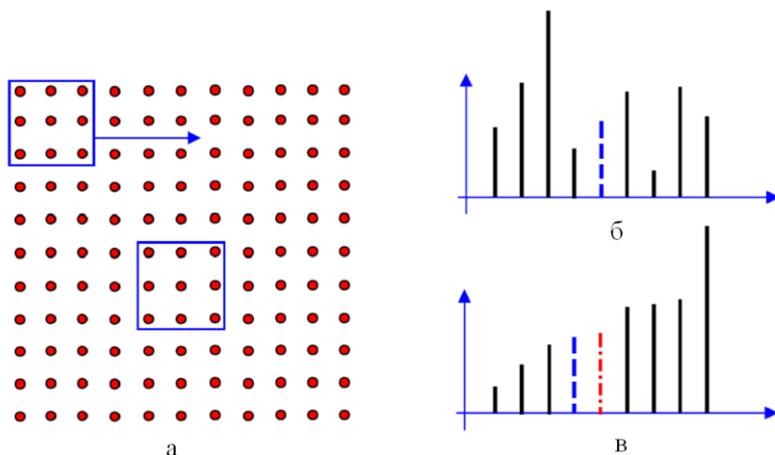
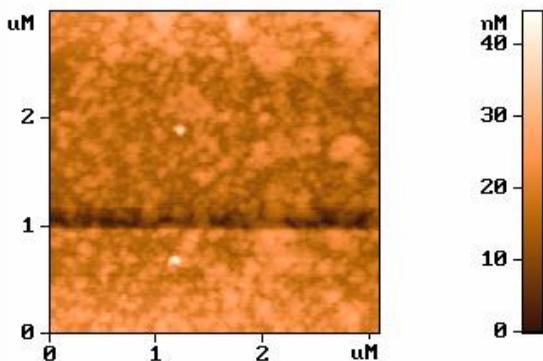


Рис. 1. Принцип работы медианного фильтра с окном  $3 \times 3$ : а – смещение окна в процессе фильтрации массива; б – расположение элементов в неотсортированном массиве (штриховой линией отмечен центральный элемент); в – расположение элементов в отсортированном массиве (новый центральный элемент отмечен штрихпунктирной линией) [1]

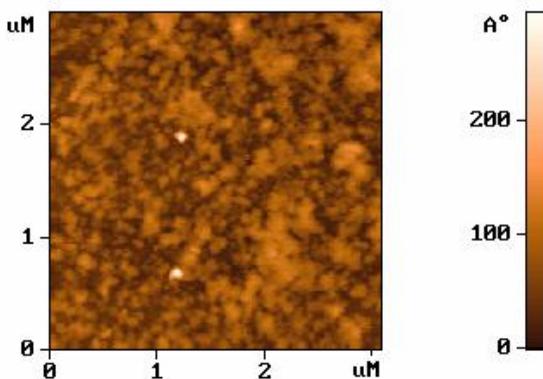
*Удаление горизонтальных полос на изображении путем выравнивания средних значений элементов в каждой строке изображения*

Наличие горизонтальных полос на изображении является характерным искажением СЗМ изображений. Это связано с тем, что

изображения в СЗМ эксперименте обычно получаются путем построчного сканирования и время между измерениями в соседних точках одной строки существенно меньше времени между измерениями соседних точек в направлении, перпендикулярном к направлению сканирования.



а



б

Рис. 2. АСМ изображения поверхности образца: а – до усреднения по строкам; б – после усреднения

Избавиться от таких дефектов СЗМ изображений можно с помощью процедуры выравнивания кадра по строкам. В каждой строке сканирования находится среднее значение рельефа. А затем из значений в каждой строке кадра вычитаются соответствующие средние значения. На рис. 2 представлен результат выравнивания по строкам реального АСМ изображения поверхности.

#### *Удаление наклона изображения путем вычитания плоскости*

Изображения поверхности, получаемые с помощью зондовых микроскопов, как правило, имеют общий наклон. Это может быть обусловлено несколькими причинами. Во-первых, наклон может появляться вследствие неточной установки образца относительно зонда; во-вторых, он может быть связан с температурным дрейфом, который приводит к смещению зонда относительно образца; в-третьих, он может быть обусловлен нелинейностью перемещений пьезосканера.

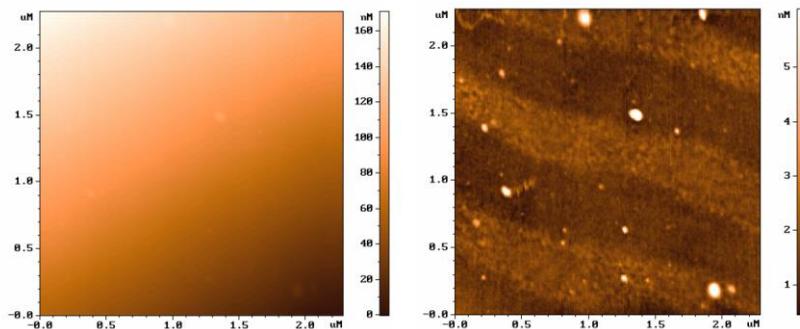


Рис. 3. Вычитание наклонной плоскости из АСМ изображения поверхности [1]

На отображение наклона тратится большой объем полезного пространства в СЗМ кадре, так что становятся не видны мелкие детали изображения. Для устранения данного недостатка производят операцию вычитания постоянного наклона (рис. 3) [1].

#### *Вычитание поверхности второго порядка*

Методами СЗМ преимущественно исследуют тонкую структуру поверхности, поэтому грубый рельеф часто не информативен и его необходимо устранять. Неидеальность свойств пьезосканера приводит к тому, что СЗМ изображение содержит ряд специфических искажений. Частично неидеальности сканера, такие как неравноправность прямого и обратного хода сканера (гистерезис), крип и нелинейность пьезокерамики, компенсируются аппаратными средствами и выбором оптимальных режимов сканирования. Однако несмотря на это, СЗМ изображения содержат искажения, которые трудно устранить на аппаратном уровне.

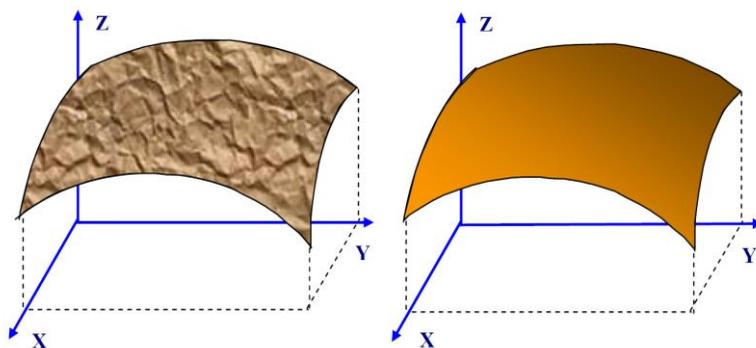


Рис. 4. Вычитание поверхности второго порядка из СЗМ изображения поверхности

В частности, поскольку движение сканера в плоскости образца влияет на положение зонда над поверхностью (по оси  $Z$ ), СЗМ изображения представляют собой суперпозицию реального рельефа и некоторой поверхности второго (а часто и более высокого) порядка (рис. 4) [1].

Для устранения искажений такого рода методом наименьших квадратов находится аппроксимирующая поверхность второго порядка и затем данная поверхность вычитается из исходного СЗМ изображения.

### **Количественный анализ СЗМ изображений**

#### *Построение гистограммы изображения*

Одним из методов анализа изображений является построение гистограммы значений в точках изображения. При построении гистограммы горизонтальная ось содержит весь диапазон значений в точках изображения, а по вертикальной оси откладываются количества точек, имеющих данное значение для всех значений из этого диапазона.

#### *Определение параметров шероховатости поверхности*

Для количественной характеристики СЗМ изображений часто используют параметры шероховатости изображения, которые определяются по формулам, представленным ниже.

$$(1) \quad \text{Средняя шероховатость } S_a = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |z(x_k, y_l) - \mu|,$$

где  $\mu = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} z(x_k, y_l)$  средняя высота изображения.

$$\text{Среднеквадратичная шероховатость } S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [z(x_k, y_l) - \mu]^2}. \quad (2)$$

Для корректного определения шероховатости необходимо предварительно удалить неровность фона изображения, для этого вычесть плоскость либо удалить поверхность второго порядка.

### *Построение Фурье-спектра изображения*

Фурье-спектр пространственных частот изображения является его частотным представлением в ортонормальном базисе, состоящем из комплексных экспонент. Представление изображения в таком пространстве дает возможность наблюдать его структурные особенности, связанные с периодичностью повторения элементов, наличием мелких деталей и др. Пространственные частоты имеют размерность, обратную единицам измерения расстояний на изображении.

Представление изображения в базисе комплексных экспоненциальных функций задается парой преобразований Фурье [рассматривается случай непрерывной функции интенсивности  $a(x, y)$ , заданной на бесконечном поле]. Прямое преобразование Фурье представляется функцией:

$$F(f_x, f_y) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} a(x, y) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy. \quad (3)$$

Обратное преобразование определяется функцией:

$$a(x, y) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} F(f_x, f_y) \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy, \quad (4)$$

где  $x, y$  - координаты в плоскости изображения,  $f_x, f_y$  - пространственные частоты.

Понятия, связанные с частотным представлением бесконечных непрерывных сигналов, могут быть распространены на случаи сигналов ограниченной протяженности и дискретных сигналов, встречающиеся при цифровой обработке на практике.

Рассмотрим прямоугольное изображение шириной  $N$  и высотой  $M$ . Преобразование Фурье такого изображения имеет вид:

$$F(u, v) = \int_{-M/2}^{M/2} \int_{-N/2}^{N/2} f(x, y) \exp(-i2\pi(ux + vy)) dx dy. \quad (5)$$

Преобразование Фурье ограниченного в пространстве сигнала ( $f(x,y)=0$  при  $|x|>N/2$  и  $|y|>M/2$ ), если его представить периодически размноженным по всей плоскости, является дискретным, т.е. содержит лишь счетное количество гармоник на частотах  $[k/N, l/M]$ ,  $-\infty < k, l < \infty$ .

Спектр неограниченного в пространстве дискретного изображения является периодической функцией. Если расстояния между точками, в которых заданы отсчеты изображения по осям  $OX$  и  $OY$ , равны соответственно  $\Delta x$  и  $\Delta y$ , то периоды преобразования Фурье равны  $1/\Delta x$  и  $1/\Delta y$ . Если начало отсчета поместить в центральной точке матрицы периодически повторяющегося Фурье-образа (рис. 5), то максимальные пространственные частоты будут равны  $\pm 1/(2\Delta x)$  и  $\pm 1/(2\Delta y)$ . Максимальная частота, которая может быть получена при заданном шаге дискретизации сигнала, называется частотой Найквиста. В полученном периодическом преобразовании Фурье дублирующиеся спектральные составляющие можно отбросить и считать, что

дискретный сигнал имеет ограниченный по частоте спектр.

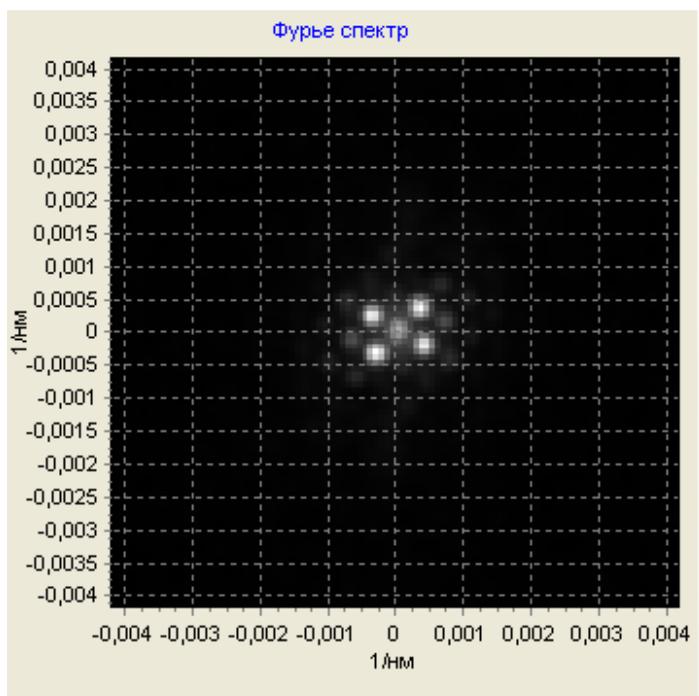


Рис. 5. Фурье-спектр периодического изображения

Таким образом, просуммировав приведенные рассуждения, можно сделать вывод, что преобразование Фурье ограниченного в пространстве дискретного изображения является также дискретным и ограниченным по частоте. Максимальные пространственные частоты определяются шагом дискретизации изображения.

Ограниченность спектра дискретного изображения по частоте можно продемонстрировать, рассмотрев простой пример. Самый маленький период повторения на изображении мы можем получить,

если будем чередовать белые и черные точки, например, вдоль оси ОХ. Этот период будет равен  $2\Delta x$ , а соответствующая пространственная частота равна  $1/2\Delta x$ .

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) изображения, заданного в точках  $f_{k,l}, k = 0, \dots, M-1, l = 0, \dots, n-1$ , определяется по формуле:

$$F_{m,n} = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} f_{k,l} \exp \left[ -i2\pi \left( \frac{km}{M} + \frac{ln}{N} \right) \right]. \quad (6)$$

Для графического представления Фурье-образа изображения строится матрица модулей комплексных величин преобразования, полученных по формуле (6). Для действительного изображения такая матрица является центрально симметричной. Отсчет частот ведется от ее центра. Значения пространственных частот увеличиваются от центра Фурье-образа к его краям. Фурье-образ изображения, состоящего из горизонтальных синусоидальных полос, представляет собой две точки, расположенные на вертикальной оси в частотной плоскости на одинаковом расстоянии  $f_0$  от центра. При этом период  $T$  – повторения

полос на изображении равен  $T = \frac{1}{f_0}$ .

### **Порядок выполнения работы**

Работа может проводиться в двух вариантах:

А. Анализ ранее полученного изображения.

Б. Проведение измерений получение нового изображения, обработка и анализ этого изображения.

### **Задание**

1. Выполнить фильтрацию изображения.

2. Измерить и сравнить параметры шероховатости изображений до и после фильтрации.

3. Построить Фурье-спектр изображения и измерить величины преобладающих пространственных частот спектра, сравнить соответствующие этим частотам периоды повторения элементов изображения с интервалами, полученными при измерениях на изображении. Определить углы между направлениями на изображении двумя способами и сравнить результаты.

### **Оборудование и принадлежности**

1. Прибор NanoEducator.

2. Образцы с периодическими структурами.

### **Последовательность выполнения работы**

В случае выполнения варианта А лабораторной работы необходимо:

– Выполнить все подготовительные действия для проведения СЗМ эксперимента в соответствии с инструкцией пользователя.

– Выполнить сканирование образца по одному из методов, описанных в руководстве.

– Полученное изображение сохранить в выбранном каталоге.

Следующие этапы работы, посвященные обработке и анализу данных, совпадают для вариантов А и Б.

Для их выполнения необходимо:

- Ознакомиться с главой «Работа с полученными ранее файлами» руководства пользователя.
- Перейти к просмотру и обработке данных с помощью программы NanoEducator.
- Открыть файл, с которым будет проводиться работа, провести контрольное сечение изображения.
- Определить характер имеющихся искажений и провести необходимую обработку и фильтрацию данных с помощью методов, доступных в программе.
- Провести контрольные сечения файла после обработки и сравнить с сечением исходного изображения.
- Вызвать окно **Image Analysis** (рис. 6) при активном окне обработанного изображения. Изучить и описать гистограмму изображения. Зафиксировать значения величин средней и среднеквадратичной шероховатости.
- Открыть закладку **Fourier Spectrum** (рис. 7). Определить по характеру спектра, имеются ли на изображении периодические структуры. Если имеются, то измерить величины преобладающих частот (переход в режим измерения частот осуществляется при нажатии кнопки **Freq**), указав на них на изображении Фурье-образа с помощью левой кнопки мыши.

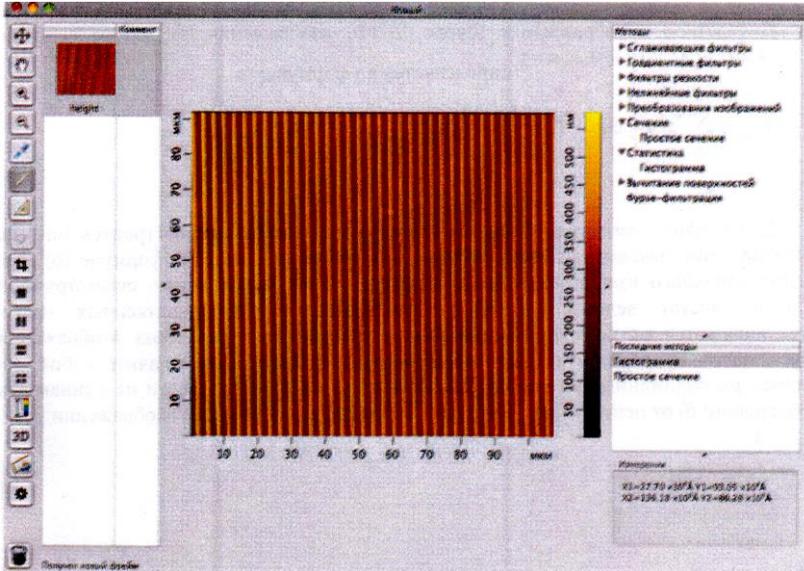


Рис. 6. Окно анализа изображений. Выполнение анализа свойств поверхности изображения

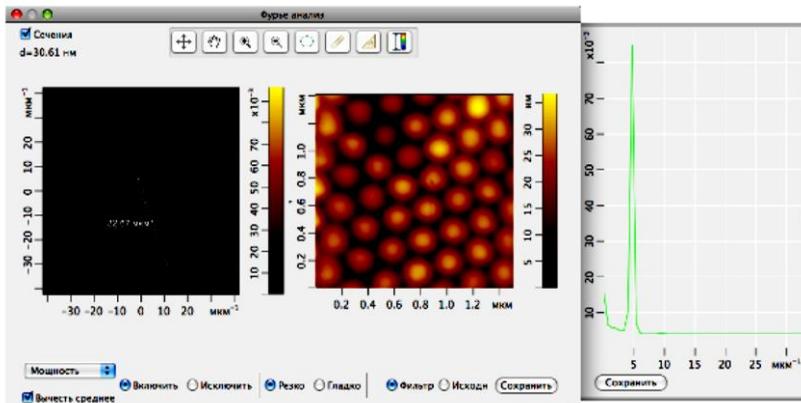


Рис. 7. Окно анализа изображений. Выполнение анализа Фурье-спектра изображения одномерной периодической структуры

Сравнить периодичность изображений, измеренную с помощью



инструмента, расположенного над исходным изображением, с результатами, полученными с помощью Фурье-образа.

Измерить величины углов между направлениями (инструмент



) по изображению Фурье-образа и сравнить с величинами углов между соответствующими сечениями исследуемого изображения.

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Исходное изображение.
3. Изображение поверхности, после проведения процедуры фильтрации.
4. Профили поперечного сечения исходного изображения и изображения после процедуры фильтрации.
5. Гистограмма изображения и значения величин средней и среднеквадратичной шероховатости.
6. Фурье-образ исследуемого изображения и полученные с его помощью величины преобладающих частот.
7. Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие типы искажений характерны для СЗМ-изображений?
2. По каким причинам возникают искажения СЗМ-изображений?
3. Каковы основные методы фильтрации СЗМ изображений?

4. Каким образом проводится медианная фильтрация?
5. Какими способами удаляют искажения, связанные с неидеальностью сканера?
6. Назовите некоторые методы определения количественных характеристик изображений.
7. Что такое гистограмма высот и для чего ее используют?
8. Для каких изображений следует воспользоваться частотным представлением?
9. Какую информацию об изображении можно получить по его Фурье-образу?

### **Цитируемая литература**

Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2005. 144 с.

### **Библиографический список**

1. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976. 511 с.
2. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982, книги 1, 2. 790 с.
3. Ярославский Л.П. Введение в цифровую обработку изображений. М.: Сов. радио, 1979. 312 с.
4. Сканирующий зондовый микроскоп NanoEducator: руководство пользователя. ЗАО " NT-MDT", 2008. 137 с.
5. Интернет-ресурс компании "НТ-МДТ": <http://ntmdt.ru>.
6. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы / под

ред. Лучинина В.В., Таирова Ю.М. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 552 с.

7. Вихров С.П., Вишняков Н.В. Нанотехнологии и их применение.

Часть 1. Рязань: ООО «Сервис», 2012. 208 с.

**5047**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА МИКРО- И НАНОСИСТЕМ**

Методические указания  
к лабораторной работе № 3

**Получение изображения поверхности СЗМ NanoEducator  
в режиме атомно-силовой микроскопии**

Рязань 2016

УДК 621.315.592

Методы анализа микро- и наносистем: методические указания к лабораторной работе № 3 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: А.П. Авачев, Н.В. Вишняков, Ю.В. Воробьев, Н.Б. Рыбин. Рязань, 2016. 16 с.

Содержат краткие теоретические сведения о принципе работы сканирующего зондового микроскопа NanoEducator, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине “Методы анализа микро- и наносистем”.

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.04.04.

Ил. 9. Библиогр.: 5 назв.

*Сканирующая зондовая микроскопия, атомно-силовая микроскопия, сканирование*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и нанoeлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

#### Методы анализа микро- и наносистем

Составители: А в а ч е в Алексей Петрович  
В и ш н я к о в Николай Владимирович  
В о р о б ь е в Юрий Владимирович  
Р ы б и н Николай Борисович

Редактор Р.К. Мангутова  
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 30.06.16. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

## **Цель работы**

Изучение конструкции и принципа работы СЗМ NanoEducator и получение изображения топологии исследуемого образца в режиме атомно-силовой микроскопии (АСМ).

## **Краткие теоретические сведения**

Атомно-силовой микроскоп (англ. AFM - atomic force microscope) – сканирующий зондовый микроскоп высокого разрешения, основанный на взаимодействии иглы кантилевера (зонда) с поверхностью исследуемого образца. Обычно под взаимодействием понимается притяжение или отталкивание кантилевера от поверхности из-за сил Ван-дер-Ваальса. Но при использовании специальных кантилеверов можно изучать электрические и магнитные свойства поверхности. Атомно-силовой микроскоп позволяет исследовать как проводящие, так и непроводящие поверхности даже через слой жидкости, что позволяет работать с органическими молекулами (ДНК). Пространственное разрешение атомно-силового микроскопа зависит от размера кантилевера и кривизны его острия. Разрешение по горизонтали достигает атомарного уровня.

СЗМ NanoEducator состоит из следующих основных компонентов (рис. 1): 1 - зонд; 2 - образец; 3 - пьезоэлектрические двигатели  $x$ ,  $y$ ,  $z$  для прецизионного перемещения зонда над поверхностью исследуемого образца; 4 - генератор развертки, подающий напряжения на пьезодвигатель  $x$  и  $y$ , обеспечивающий сканирование зонда в горизонтальной плоскости; 5 - электронный датчик, детектирующий величину локального взаимодействия между зондом и образцом; 6 - компаратор, сравнивающий текущий сигнал в цепи датчика  $P(t)$  с изначально заданным  $P_0$ , и, при его отклонении, вырабатывающий

корректирующий сигнал  $P_{fb}$ ; 7 - электронная цепь обратной связи, управляющая положением зонда по оси z; 8 - компьютер, управляющий процессом сканирования и получением изображения 9.

При работе прибора образец движется в плоскости XY (рис.2) построчно, таким образом, что кончик иглы постепенно проходит над всей заданной площадью образца с шагом  $\Delta$ . Этот процесс называется сканированием.

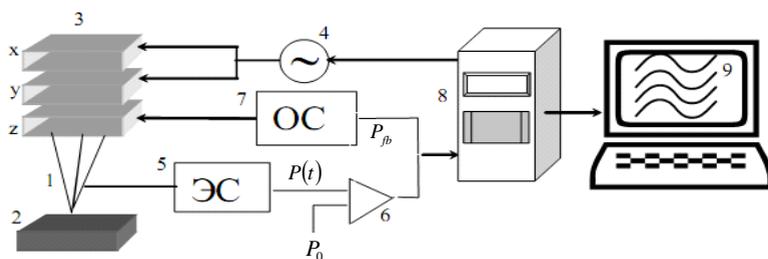


Рис. 1. Общая схема сканирующего зондового микроскопа

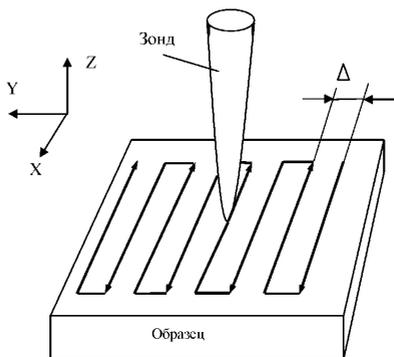


Рис. 2. Принцип сканирования

Информация, полученная с помощью сканирующего зондового микроскопа, хранится в виде СЗМ кадра - двумерного массива целых

чисел  $Z_{ij}$  (матрицы). Каждому значению пары индексов  $i$  и  $j$  соответствует определенная точка поверхности в пределах поля сканирования. Как правило, СЗМ кадры представляют собой квадратные матрицы, имеющие размер 200x200 или 300x300 элементов.

Визуализация СЗМ кадров производится средствами компьютерной графики, в основном в виде трехмерных (3D) и двумерных яркостных (2D) изображений. При 2D визуализации каждой точке поверхности  $Z = f(x,y)$  ставится в соответствие цвет. Наиболее широко используются градиентные палитры, в которых раскраска изображения производится тоном определенного цвета в соответствии с высотой точки поверхности. Наиболее эффективным способом раскраски 3D изображений является моделирование условий подсветки поверхности точечным источником, расположенным в некоторой точке пространства над поверхностью. При этом удается подчеркнуть мелкомасштабные неровности рельефа. Также средствами компьютерной обработки и графики реализуются масштабирование и вращение 3D СЗМ изображений (рис. 3).

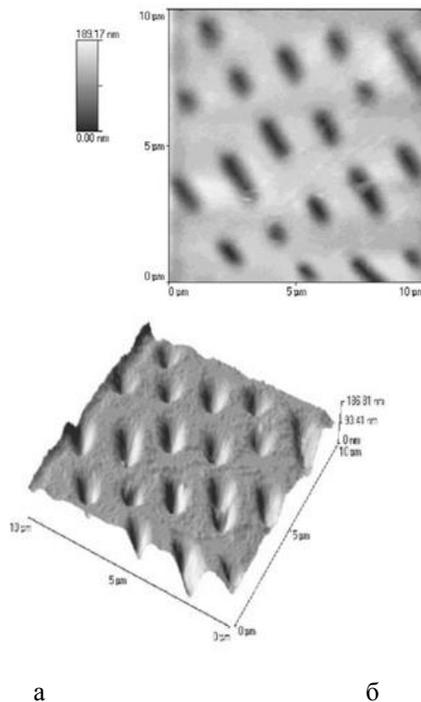


Рис. 3. Способы графического представления СЗМ-изображения: а –  
двумерное, б – трехмерное

В приборе NanoEducator применяется универсальный датчик туннельного тока и модуляционного силового взаимодействия. Датчик выполнен в виде пьезокерамической трубки длиной  $l=7$  мм, диаметром  $d=1.2$  мм и толщиной стенки  $h=0.25$  мм, жестко закрепленной с одного конца. На внутреннюю поверхность трубки нанесен проводящий электрод. На внешнюю поверхность трубки нанесены два электрически изолированных полуцилиндрических электрода. К свободному концу трубки прикреплена вольфрамовая проволока диаметром 100 мкм (рис. 4).

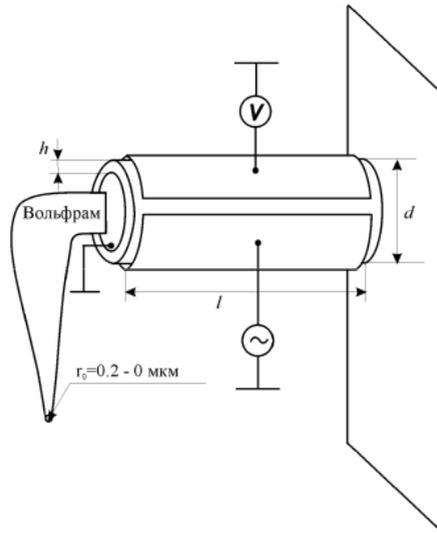


Рис. 4. Конструкция универсального датчика прибора NanoEducador

В качестве датчика силового взаимодействия одна часть пьезоэлектрической трубки используется как пьезовибратор, а другая - как датчик механических колебаний (рис. 5, а). К пьезовибратору подводится переменное электрическое напряжение с частотой, равной резонансной частоте силового датчика. Амплитуда колебаний при большом расстоянии зонд-образец максимальна. Как видно из рис. 5 б, в процессе колебаний зонд отклоняется от равновесного положения на величину  $A_0$ , равную амплитуде его вынужденных механических колебаний (она составляет доли микрона), при этом на второй части пьезоэлемента (датчике колебаний) возникает переменное электрическое напряжение, пропорциональное смещению зонда, которое и измеряется прибором.

При приближении зонда к поверхности образца зонд начинает касаться образца в процессе колебаний. Это приводит к смещению

амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) колебаний датчика влево по сравнению с АЧХ, измеренной вдали от поверхности (рис. 5, в). Так как частота вынуждающих колебаний пьезотрубки поддерживается постоянной и равной  $\omega_0$  в свободном состоянии, то при приближении зонда к поверхности амплитуда его колебаний уменьшается и становится равной  $A$ . Эта амплитуда колебаний регистрируется со второй половины пьезотрубки.

Для контролируемого перемещения иглы на сверхмалых расстояниях в СЗМ используются пьезоэлектрические двигатели. Их задача - обеспечить прецизионное механическое сканирование зондом исследуемого образца путем перемещения зонда относительно неподвижного образца или перемещения образца относительно неподвижного зонда.

Работа большинства пьезоэлектрических двигателей, применяемых в современных СЗМ, основана на использовании обратного пьезоэффекта, который заключается в изменении размеров пьезоматериала под действием электрического поля.

В СЗМ, как правило, в качестве пьезоматериала используются не кристаллические материалы вроде кварца, а пьезокерамика, обладающая более высоким пьезомодулем. Пьезокерамика представляет собой совокупность сегнетоэлектрических монокристаллических зерен с типичным размером 0.5 – 50 мкм. Основой большинства применяемых в СЗМ пьезокерамик является состав  $Pb(ZrTi)O_3$  (цирконат-титанат свинца, ЦТС) с различными добавками.

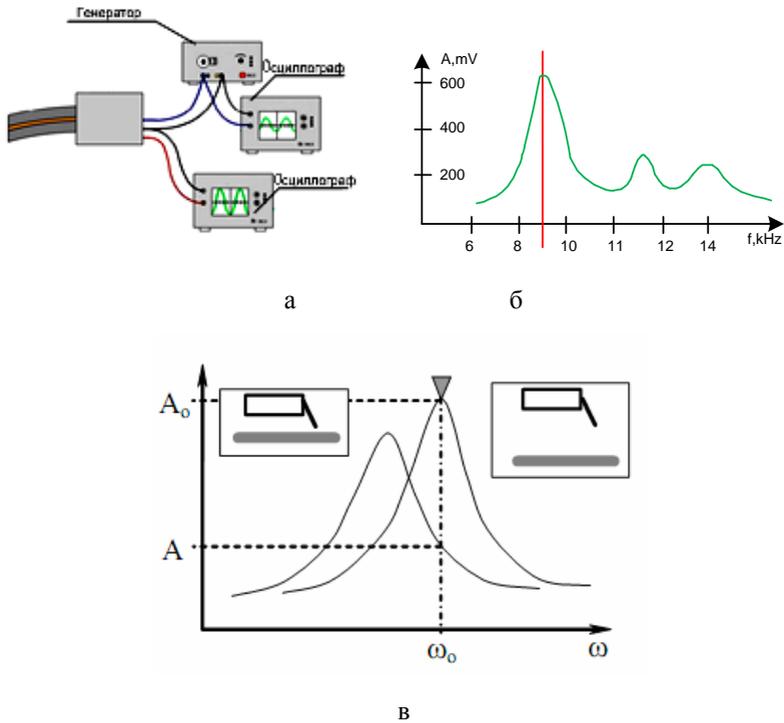


Рис. 5. Принцип работы пьезоэлектрической трубки в качестве датчика силового взаимодействия: а – подключение датчика; б – АЧХ; в – смещение АЧХ в процессе взаимодействия

Конструкции из пьезокерамик, обеспечивающие перемещение по трем координатам  $x$ ,  $y$  (в латеральной плоскости образца) и  $z$  (по вертикали), называются «сканерами». Существует несколько типов сканеров, наиболее распространенными из которых являются треногий и трубчатый (рис. 6).

В треногом сканере перемещения по трем координатам обеспечивают расположенные в ортогональную структуру три независимые пьезокерамики.

Трубчатые сканеры работают посредством изгиба полой пьезоэлектрической трубки в латеральной плоскости и удлинения или сжатия трубки по оси  $Z$ . Электроды, управляющие перемещениями трубки в  $X$  и  $Y$  направлениях, размещаются в виде четырех сегментов по наружной поверхности трубки (рис. 6, б). Для изгиба трубки в направлении  $X$  на  $+X$  керамику подается напряжение для удлинения одной из ее сторон. Тот же самый принцип используется для задания движения в направлении  $Y$ . Смещения в  $X$  и  $Y$  направлениях пропорциональны приложенному напряжению и квадрату длины трубки. Движение в  $Z$  направлении генерируется подачей напряжения на электрод в центре трубки. Это приводит к удлинению всей трубки пропорционально ее длине и приложенному напряжению.

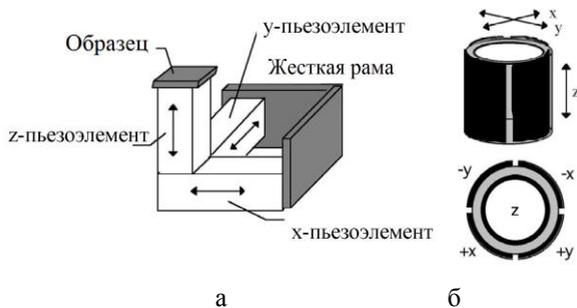


Рис. 6. Основные конструкции сканеров: а – треногий, б – трубчатый  
 Диапазон перемещений сканера по оси  $Z$  составляет около 10

мкм, поэтому перед началом сканирования необходимо приблизить зонд к образцу на это расстояние. Для этого предназначен механизм подвода, схема которого приведена на рис. 7. Шаговый двигатель 1 при подаче на него электрических импульсов вращает винт подачи 2 и перемещает планку 3 с зондом 4, приближая или отдаляя его от образца 5, установленного на сканере 6. Величина одного шага составляет около 2 мкм.

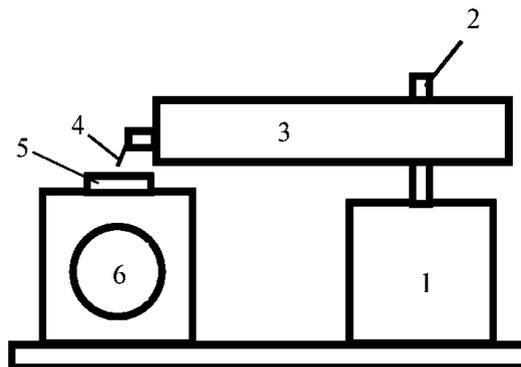


Рис. 7. Схема механизма подвода зонда к поверхности образца

Так как шаг механизма подвода значительно превосходит величину требуемого расстояния зонд-образец в процессе сканирования, то во избежание деформации зонда его подвод осуществляется при одновременной работе шагового двигателя и перемещении сканера по оси  $Z$  по следующему алгоритму:

1. Система обратной связи отключается и сканер "втягивается", т.е. опускает образец в нижнее крайнее положение.

2. Механизм подвода зонда производит один шаг и останавливается.

3. Система обратной связи включается, и сканер плавно поднимает образец, одновременно производится анализ наличия взаимодействия зонд-образец.

4. Если взаимодействие отсутствует, процесс повторяется с пункта 1.

Если во время вытягивания сканера вверх появится ненулевой сигнал, система обратной связи остановит движение сканера вверх и

зафиксирует величину взаимодействия на заданном уровне. Далее после остановки зонда и будет происходить сканирование.

### *Программное обеспечение АСМ*

После вызова программы NanoEducator на экране компьютера появляется главное окно (рис. 8). Программа позволяет осуществлять просмотр и обработку данных параллельно с измерениями.

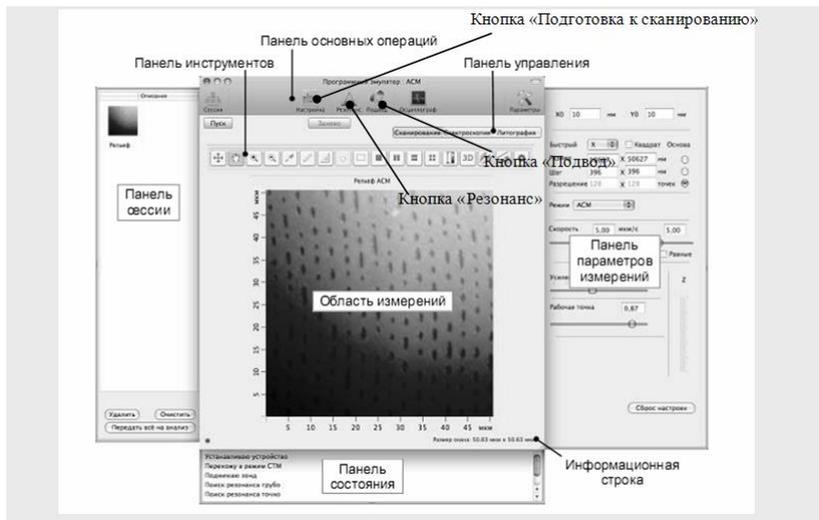


Рис. 8. Главное окно программы NanoEducator

Подготовку к измерениям рекомендуется проводить, используя окно «Подготовка к сканированию». Окно открывается кнопкой на панели основных операций.

Если контроллер прибора был включен до запуска программы NanoEducator, то при запуске программы произойдет автоматический выбор контроллера. Для работы прибора в качестве атомно-силового микроскопа в меню «Выбор режима» выберите конфигурацию АСМ. Для выбора участка для исследования на образце используйте винты

перемещения двухкоординатного столика, расположенного в нижней части прибора.

После этого необходимо произвести операцию предварительного подвода. Её желательно производить, если расстояние между кончиком зонда и поверхностью образца превышает 0.5 – 1 мм.

#### *Построение резонансной кривой и установка рабочей частоты*

Поиск резонанса и установку рабочей частоты колебаний зонда рекомендуется выполнять перед началом каждого измерения, более того, в процессе измерений иногда возникают ситуации, требующие повторного выполнения этой операции (например, при потере контакта).

Окно «Резонанс» открывается кнопкой на панели основных операций главного окна программы (рис. 9).

Выполнение операции поиска резонанса предусматривает измерение амплитуды колебаний зонда при изменении частоты вынужденных колебаний, задаваемых генератором. Запуск автоматического поиска резонансной частоты осуществляется кнопкой «Старт».

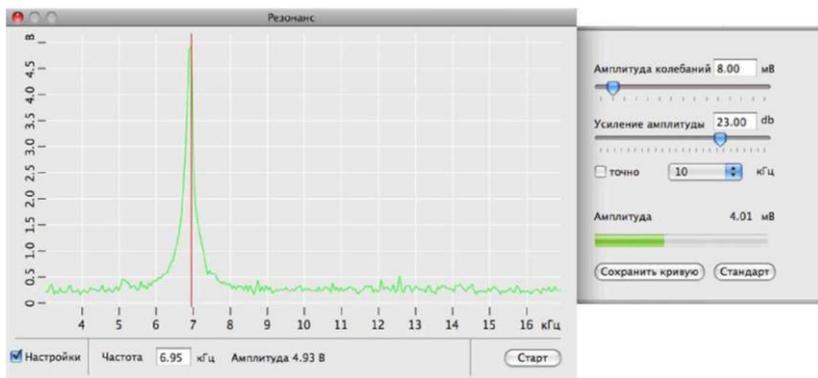


Рис. 9. Окно «Резонанс»

В результате измерения амплитуды колебаний зонда автоматически устанавливается частота генератора, равная частоте, при которой наблюдалась максимальная амплитуда. В процессе поиска резонансной частоты при необходимости автоматически подстраиваются амплитуда выходного сигнала генератора и коэффициент усиления таким образом, чтобы амплитуда колебаний зондового датчика на резонансной частоте была не менее 2 В. Если резонансный пик недостаточно ярко выражен или амплитуда при частоте резонанса мала (менее 1 В), то необходимо изменить параметры проведения измерений и повторно провести определение резонансной частоты.

#### *Захват взаимодействия*

Для захвата взаимодействия выполняется процедура контролируемого сближения зонда и образца с помощью механизма автоматизированного подвода.

Окно «Подвод» открывается кнопкой на панели основных операций главного окна программы.



Чтобы подвести зонд к образцу, щелкните на кнопку

В результате:

- 1) замкнется цепь обратной связи, и Z-сканер выдвинется на максимальную длину, что отобразится на индикаторе Z-сканер;
- 2) включится шаговый двигатель, выполняющий подвод образца к зонду;
- 3) индикатор «Шаги» начнет отсчитывать пройденные шаги.

Подвод закончится, когда амплитуда колебаний зонда уменьшится до значения параметра «Амплитуда остановки» (устанавливается в окне «Свойства»). Это уменьшение будет отражено на индикаторе «Амплитуда». По окончании подвода индикатор Z-сканер займет промежуточное положение, что соответствует середине полного диапазона удлинения сканера.

Для вывода зонда из области взаимодействия и увеличения



расстояния между зондом и образцом используется кнопка . Зонд отводится от образца на расстояние, заданное в поле «Шаги».

После выполнения всех пунктов закройте окна «Резонанс» и «Подвод».

### *Сканирование*

В главном окне программы нажмите кнопку «Сканирование».

В режиме сканирования необходимо установить параметры сканирования. Эти параметры сгруппированы на панели сканирования, открываемой кнопкой в правой части окна программы.

Участок сканирования можно выбрать в пределах максимально доступной области. Для этого нажмите кнопку  на панели инструментов главного окна программы и при помощи мыши с нажатой левой кнопкой выделите нужный участок.

Запуск сканирования осуществляется кнопкой «Пуск» в главном окне программы. В результате начнется построчное сканирование поверхности образца и в области измерений, строчка за строчкой, будет появляться изображение сканируемой поверхности.

Для сохранения результатов измерений выполните следующие действия:

1. В главном меню выберите Файл -> Сохранить как.
2. В открывшемся диалоговом окне выберите папку, в которой будут храниться полученные данные. Введите название файла и сохраните его с расширением \*.mdt.

В полученном файле будут содержаться фреймы, представленные в окне сессии в момент сохранения.

### **Порядок выполнения работы**

1. Убедитесь в том, что оператором были произведены следующие действия: в держатель образца установлен исследуемый образец; зондовый датчик вставлен в гнездо измерительной головки прибора; включен контроллер.

2. Запустите программу управления прибором NanoEducator. При этом на экране появится главное окно программы (рис.8).

3. Включите камеру прибора NanoEducator путем нажатия кнопки «Camera» на панели запуска программ удаленного рабочего стола.

4. На главном окне программы нажмите кнопку «Подготовка к сканированию».

5. Выберите режим «NanoEducator» и режим сканирования «АСМ». Закройте данное окно.

6. Нажмите на кнопку «Резонанс».

7. Установите флажок «Настройки». В результате справа от окна программы откроется панель параметров поиска резонанса.

8. Убедитесь, что флажок «точно» сброшен.

9. Щелкните на кнопке «Старт» для грубого поиска резонанса. В результате будет измерена АЧХ зонда и приблизительно установлена резонансная частота (подробнее процедура описана в п. 4).

10. Убедитесь, что резонансная кривая симметрична и максимум не менее 2 В. Если резонансный пик имеет искаженную форму или амплитуда колебаний зонда на частоте резонанса мала (менее 2 В), измените параметры **Амплитуда колебаний** и **Усиление амплитуды**, после чего повторно проведите определение резонансной частоты.

11. Установите флажок «точно». Щелкните на кнопке «Старт» для точного поиска резонанса. В результате в области максимума, найденного при грубом поиске, будет измерена АЧХ зонда и рабочая частота генератора (параметр Частота) будет установлена равной резонансной частоте зонда.

12. Закройте окно «Резонанс».

13. Нажмите на кнопку «Подвод». Процедура подвода описана в п. 5 данной лабораторной работы. Осуществите последовательность действий по выполнению подвода.

14. В главном окне программы нажмите кнопку «Сканирование».

15. Выберите область сканирования с помощью кнопки на панели инструментов главного окна программы и мыши.

16. Нажмите кнопку «Пуск» для начала сканирования.

17. Сохраните полученные результаты.

### **Содержание отчета, представляемого пользователем**

1. Амплитудно-частотная характеристика зонда.
2. Изображение топологии исследуемого образца.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите основные компоненты СЗМ.
2. Объясните понятие пьезоэлектрического эффекта и принцип действия пьезоэлектрического двигателя.
3. Опишите различные конструкции сканеров.
4. Объясните конструкцию зондового датчика силового взаимодействия прибора NanoEducator и принцип его действия.
5. Опишите механизм подвода зонда к образцу в приборе NanoEducator.
6. Поясните параметры, определяющие силу взаимодействия зонда с образцом.
7. Объясните принцип сканирования и работы системы обратной связи.
8. Расскажите о критериях выбора параметров сканирования.

### **Библиографический список**

1. Сканирующий зондовый микроскоп NanoEducator: руководство пользователя. ЗАО " NT-MDT". 2008. 137 с.
2. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2005. 144 с.
3. Интернет-ресурс компании "НТ-МДТ": <http://ntmdt.ru>.
4. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы / под ред. Лучинина В.В., Таирова Ю.М. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 552 с.
5. Вихров С.П., Вишняков Н.В. Нанотехнологии и их применение. Часть 1. Рязань. ООО «Сервис», 2012. 208 с.

**5048**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА МИКРО- И НАНОСИСТЕМ**

Методические указания  
к лабораторной работе № 4

**Проведение сканирующей зондовой литографии на сканирующем  
зондовом микроскопе NanoEducator**

Рязань 2016

УДК 621.315.592

Методы анализа микро- и наносистем: методические указания к лабораторной работе № 4 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: А.П. Авачев, Н.В. Вишняков, Ю.В. Воробьев, Н.Б. Рыбин. Рязань, 2016. 16 с.

Содержат краткие теоретические сведения о методах сканирующей зондовой литографии, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине “Методы анализа микро- и наносистем”.

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.04.04

Ил. 5. Библиогр.: 9 назв.

*Сканирующая зондовая микроскопия, литография, силовая литография*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и нанoeлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

#### Методы анализа микро- и наносистем

Составители: А в а ч е в Алексей Петрович  
В и ш н я к о в Николай Владимирович  
В о р о б ь е в Юрий Владимирович  
Р ы б и н Николай Борисович

Редактор Р.К. Мангутова  
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 30.06.16. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

## **Цель работы**

Изучение различных видов литографии, выполняемых с помощью сканирующего зондового микроскопа, выполнение литографии изображения с последующим сканированием.

## **Краткие теоретические сведения**

Литография – это процесс образования на поверхности подложки с помощью сверхчувствительных материалов локальных защитных участков пленки, рельеф которых повторяет рисунок топологии прибора или схемы, и последующего переноса этого микроизображения на подложку.

Сканирующий зондовый микроскоп можно использовать в качестве инструмента для модификации поверхности образца. В области локального контакта зонда с образцом могут возникать достаточно большие силы напряженности электрического поля и плотности электрических токов. Раздельное или совместное действие этих факторов может приводить к заметной локальной модификации поверхности образца и зонда. То есть повышая уровень взаимодействия между зондом и образцом, можно перевести СЗМ из измерительного режима работы с нулевым или минимальным уровнем разрушения исследуемой поверхности в литографический режим, обеспечивающий создание на поверхности образца заранее заданных структур с нанометровым уровнем пространственного разрешения. Таким образом, было открыто новое направление - зондовая нанотехнология.

Различают виды сканирующей зондовой литографии:

1. СТМ литография.
2. АСМ анодно-окислительная литография.
3. АСМ силовая литография.
4. Другие специфические виды (электростатическая зарядовая литография, литография с помощью зонда ближнепольного оптического микроскопа и др.).

### *СТМ литография*

С помощью СТМ можно производить ряд нанолитографических операций: модификацию поверхности, перенос материала зонда на образец и перенос материала образца на зонд. Если данные операции могут производиться управляемым и предсказуемым образом, то это открывает ряд широких возможностей: создание запоминающих сред, технологию создания литографических рисунков с нанометровым разрешением, манипулирование молекулами и отдельными атомами, наносборку миниатюрных устройств.

Наиболее простой способ модификации поверхности с помощью СТМ заключается в непосредственном контактном воздействии СТМ зонда на поверхность. Это приводит к появлению ямки на поверхности образца, но при этом может повреждаться зонд СТМ. Более щадящий способ воздействия на поверхность заключается в подаче на образец токового импульса. Поверхность образца под зондом при этом может расплавляться и даже частично испаряться (рис. 1).

### Локальное анодное окисление

АСМ анодно-окислительная литография (AFM Anodic Oxidation Lithography) является вариантом АСМ электрической литографии. С помощью электрической литографии можно изменять не только геометрические характеристики поверхности, но и ее локальные электрофизические свойства. Например, приложение электрического смещения к проводящему кантилеверу стимулирует протекание электрохимических процессов на поверхности непосредственно под образцом, при этом может происходить окисление металлических слоев.

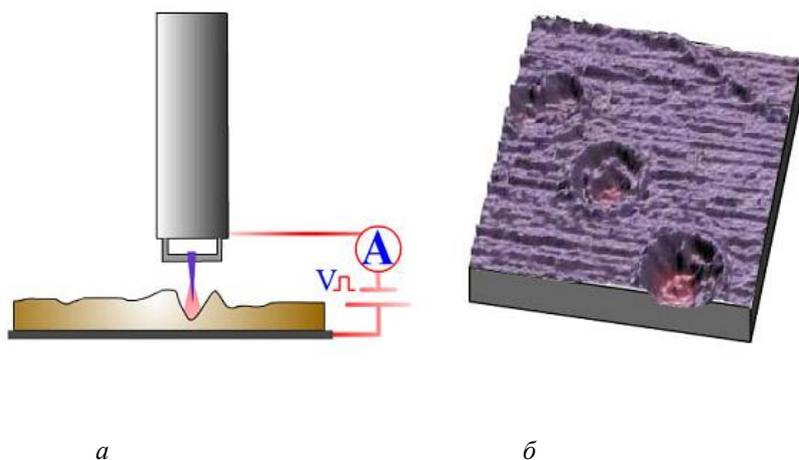


Рис. 1. Пример СТМ литографии. На СТМ изображении трехмонослойной проводящей пленки Ленгмюра - Блоджет (б) видны кратерообразные дефекты глубиной в один монослой после локального приложения трех импульсов напряжения (а)

В частности, индуцированный зондом процесс окисления сверхтонкого слоя титана на поверхности кремния представлен на рис. 2. В условиях окружающего воздуха или другой влажной среды поверхности образца и зонда покрыты слоем адсорбированной воды. Когда зонд приближается к поверхности достаточно близко, эти слои приходят в контакт и под действием капиллярных сил образуется водяной мостик. При приложении соответствующей разности потенциалов на границе вода - поверхность в воде и на зонде инициируется электрохимическая реакция. Если поверхность заряжена положительно, то зонд и поверхность вступают в электрохимическое взаимодействие как катод и анод соответственно. Окисел начинает расти в точке поверхности строго под зондом.

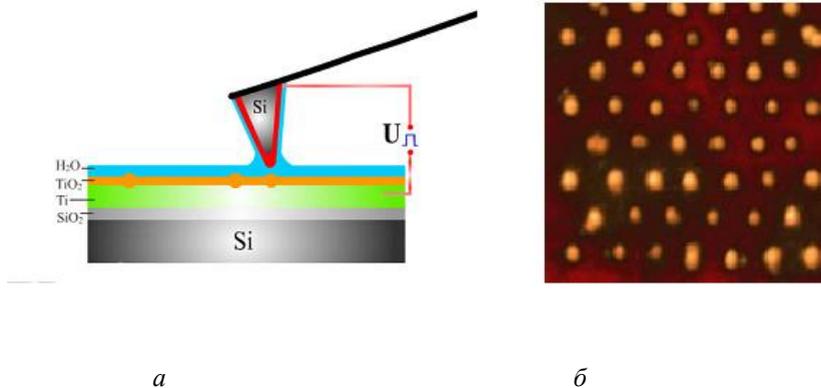


Рис. 2. Схема процесса локального анодного окислирования с помощью проводящего АСМ зонда (а) и изображение (размер скана 200x200 нм<sup>2</sup>) сверхтонкой пленки титана на поверхности кремния (б), окисленной в заданных точках

На рис. 3, а представлен пример векторной литографии на пленке титана, осуществленной путем локального окисления с помощью проводящего зонда. Ширина окисной полоски 8-10 нм позволяет формировать туннельно-прозрачные барьеры для электронов, а также одноэлектронные устройства, функционирующие по квантово-механическим законам при комнатной температуре.

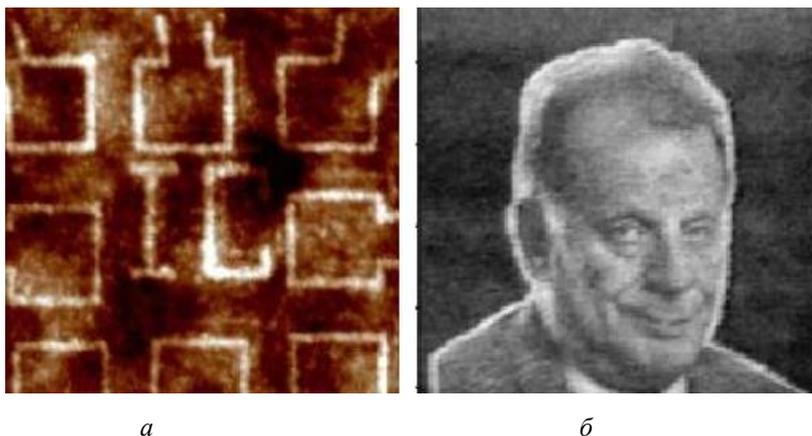


Рис. 3. Пример векторной (а) (размер скана  $500 \times 500 \text{ нм}^2$ ) и растровой (размер скана  $2,5 \times 3,0 \text{ мкм}^2$ ) литографии, осуществленной путем локального окисления с помощью проводящего зонда (б)

Для сложных рисунков можно проводить растровую литографию, которая осуществляется в процессе сканирования поверхности. То есть зонд проходит по всем точкам выбранной области сканирования, а не только по точкам и линиям, соответствующим рисунку шаблона, как в векторной литографии. Растровая литография осуществляется медленнее. В качестве шаблона в растровой литографии служит

заранее загружаемый графический файл. Разница между наибольшим и наименьшим возможными напряжениями на образце делится пропорционально в соответствии с наибольшим и наименьшим значениями яркости на исходном изображении, и, в соответствии с этим, будет меняться высота анодного оксидного слоя на поверхности образца, формируя на ней топографический контраст. Пример растровой литографии приведен на рис. 3, б.

### *Силовая литография*

СЗМ позволяет осуществлять непосредственное силовое воздействие зондом на поверхность образца. Это может производиться двумя способами – статическим воздействием (наногравировка) и динамическим воздействием (наночеканка).

### *АСМ литография-гравировка*

Процесс гравировки хорошо известен как средство формирования рисунка на поверхности предмета. Реализация такого процесса с использованием методов сканирующей зондовой микроскопии позволяет осуществлять наногравировку (нанолитографию) с нанометровым разрешением. При осуществлении наногравировки с использованием методики обычной контактной силовой микроскопии зонд микроскопа перемещается по поверхности подложки с достаточно большой силой прижима, так что на подложке (или на лежащем на ней слое резиста) формируется рисунок в виде углублений (царапин). Такая методика использует принцип вспашки: материал извлекается из подложки вполне определенным образом, оставляя

канавки с характерным сечением, определяемым формой кончика зонда. Применение наногравировки в качестве нанолитографической операции обладает определенными преимуществами: по сравнению с электронно- и ионно-лучевой литографиями не вносятся глубокие нарушения в подложку, нет необходимости применения дополнительных технологических операций, таких как травление подложки. Наногравировка была применена, например, для формирования мостиков из сверхпроводящих материалов (Джозефсоновских переходов), поверхностных квантовых ям.

В процессе сканирования с использованием контактного метода может осуществляться не только глубокая гравировка, но в зависимости от силы прижима зонда и более широкий набор режимов – от легкого скольжения без трения до остаточного истирания. Таким образом, СЗМ может быть использован для характеристики процессов стойкости различных материалов к истиранию, например магнитных считывающих головок, упаковочных полимеров, ЖК дисплеев и пр.

Прибор NanoEducator позволяет осуществлять нанолитографические операции двух видов – векторную и растровую.

#### *АСМ динамическая литография – наночеканка*

Динамическая силовая литографии (наночеканка) является модификацией поверхности за счет формирования углублений колеблющимся зондом, при этом используется прерывисто-контактный метод сканирования. Такой метод нанолитографии свободен от торсионных искажений и позволяет производить визуализацию сформированного рисунка без серьезного воздействия

на поверхность подложки или резиста. Кратковременное «укалывание» поверхности также защищает зонд от быстрого разрушения.

Данный метод, как и предыдущий, может осуществлять нанолитографические операции двух видов – векторную и растровую.

### **Выполнение растровой динамической силовой литографии на приборе NanoEducator**

Перед выполнением литографии необходимо провести сканирование участка поверхности, предназначенного для нанесения литографического рисунка. Для успешного проведения литографии необходимо, чтобы рабочая поверхность образца была достаточно гладкой и не имела существенных поверхностных дефектов и загрязнений. Поэтому при первом сканировании обычно выбирается размер площади сканирования, превышающей размер области, в которой предполагается провести литографию. Это дает возможность быстро найти наиболее подходящий участок. Рабочий участок рекомендуется выбирать в середине доступного поля сканирования.

Затем производится сканирование рабочего участка, на котором планируется проводить литографию. Рекомендуется выбирать участок, подходящий по соотношению сторон под изображение-шаблон, для этого необходимо задать количество точек сканирования по направлениям X,Y, соответствующим количеству пикселей в рисунке шаблона.

Процесс растровой литографии занимает достаточно длительное время, за которое в результате дрейфа сканер может сместиться

относительно выбранного участка поверхности, при этом формируемый в соответствии с шаблоном рельеф поверхности может быть сильно искажен. Во избежание этого следует отсканировать рабочую поверхность несколько раз, убедиться в отсутствии дрейфа и только после этого проводить процесс литографии.

Чеканка изображения на поверхности образца осуществляется на приборе NanoEducator растровым способом путем сканирования определенного участка и воздействия на образец в заданных точках с силой, зависящей от яркости соответствующих пикселей изображения-шаблона.

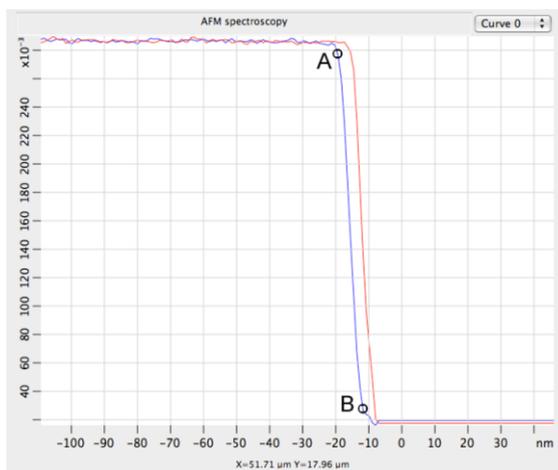


Рис. 4. Кривая спектроскопии в точке контакта для оценки расстояния между зондом и образцом

Для определения максимальной глубины воздействия рекомендуется выполнить процедуру спектроскопии и оценить по

кривой зависимости амплитуды колебаний зонда от расстояния (рис. 4) зазор между зондом и образцом.

Точка А соответствует появлению взаимодействия между зондом и образцом в результате их сближения. Начиная с этой точки, при дальнейшем сближении, амплитуда колебаний зонда уменьшается до полного затухания колебаний (точка В). Участок кривой правее точки В соответствует нахождению зонда в полном механическом контакте с поверхностью образца.

Процедура литографии вызывается при выборе закладки «Литография» в главном окне программы. При этом появляются управляющие элементы процедуры литографии (рис. 5).

Выполнение процедуры литографии состоит из следующих шагов:

1. Ввод изображения-шаблона, которое будет наноситься на поверхность образца. Изображение должно быть заранее сформировано и сохранено в графическом формате (\*.bmp). Диалог выбора и ввода изображения вызывается при нажатии кнопки «Изображение».

2. Установка величины максимально возможной глубины воздействия зонда на образец «Сила». Эту величину рекомендуется установить на 10÷50 % больше, чем полученный результат оценки расстояния между зондом и образцом с учетом шероховатости поверхности.

3. Установка величины времени воздействия «Время» в мкс. По умолчанию величина «Время» установлена 22 мкс.

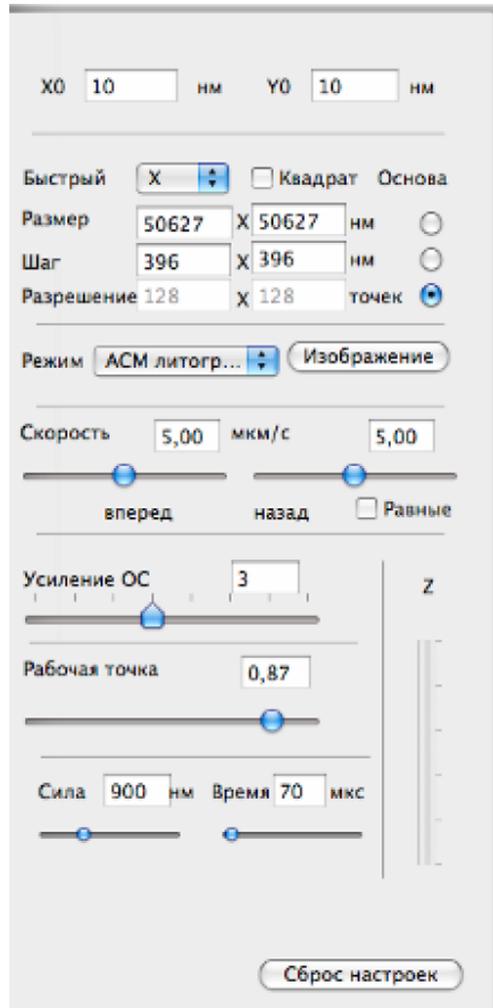


Рис. 5. Окно процедуры литографии

4. Установка расстояния между точками изображения на поверхности образца (шаг литографии по осям X, Y) осуществляется с помощью параметра «Шаг». По умолчанию этот параметр равен шагу

сканирования в предыдущем измерении рельефа поверхности. Изменение шага литографии влечет за собой изменение площади поверхности, на которой формируется литографическое изображение.

5. Нажатием кнопки «Пуск» начинается процесс литографии. В точках, соответствующих черному цвету на изображении-шаблоне, зонд будет постукивать по поверхности с амплитудой, равной величине максимально возможной глубины воздействия, при этом будет слышен характерный звук.

В левом поле главного окна выводится изображение поверхности, измеряемое при обратном ходе сканера. Таким образом, пользователь имеет возможность динамически контролировать результат воздействия на поверхность образца, производимого при литографии.

В процессе выполнения литографии можно увеличить максимальную глубину воздействия на образец в 2 или 4 раза.

После выполнения процедуры литографии необходимо проверить результат произведенного воздействия, для чего следует выполнить сканирование участка поверхности, на котором была проведена литография, или большего поля.

На приборе NanoEducator рекомендуется выполнять литографию зондом, имеющим радиус вершины не более 100 нм, при следующих параметрах: скорость сканирования 2000 нм/с, величина воздействия от 100 до 1000 нм, шаг между точками литографии ~ 100 нм.

### **Порядок выполнения работы**

1. Убедитесь в том, что оператором были произведены следующие действия: в держатель образца установлен исследуемый

образец; зондовый датчик вставлен в гнездо измерительной головки прибора; включен контроллер; выбран участок на поверхности образца для выполнения литографии.

2. Включите камеру прибора NanoEducator путем нажатия кнопки «Camera» на панели запуска программ удаленного рабочего стола.

3. Запустите управляющую программу прибора NanoEducator. Выберите режим атомно-силового микроскопа (АСМ).

4. Нажмите на кнопку «Резонанс». Определите амплитудно-частотную характеристику зондового датчика и установите рабочую частоту.

5. После действий оператора по сближению зонда с образцом осуществите захват взаимодействия в режиме АСМ.

6. Осуществите захват взаимодействия при значениях: «Амплитуда останова» = 0.3, «Усиление ОС» = 3.

7. Откройте окно сканирования. Задайте необходимые параметры сканирования, исходя из данных об изображении-шаблоне для выполнения литографии. Рекомендуется установить размер рабочей области сканирования  $10 \times 10$  мкм<sup>2</sup>, число точек сканирования, равное числу пикселей на изображении.

8. Получите СЗМ изображение рабочего участка поверхности образца. Сохраните полученные результаты.

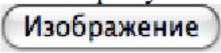
9. Выполнение литографии изображения.

Нажмите кнопку «Литография» в главном окне программы и установите параметры:

- скорость сканирования «Скорость» – 2000 нм/с;

- максимальная глубина воздействия «Сила» – от 100 нм;
- время воздействия «Время» - 100 мкс;
- шаг между точками литографии «Шаг» - 100 нм.

10. Загрузите шаблон с изображением, которое будет наноситься на поверхность. Диалог выбора изображения вызывается при нажатии

кнопки  на панели параметров измерений. После загрузки требуемого файла на экране появится окно с изображением шаблона.

11. Нажмите кнопку «Пуск» в главном окне программы. После этого начинается процесс литографии.

12. Получение изображения рельефа участка поверхности, на котором была выполнена литография.

12.1. После окончания процесса литографии перейдите на вкладку «Сканирование».

12.2. Не изменяя параметров сканирования и не смещая поле сканирования, произведите измерение рельефа участка поверхности, на котором была проведена литография. В случае частичного смещения литографированного изображения вследствие дрейфа сканера увеличьте поле сканирования так, чтобы оно полностью охватывало рабочий участок, на котором была проведена литография.

12.3. Получите СЗМ изображение рабочего участка поверхности образца. Сохраните полученные результаты.

12.4. Оцените качество литографированного изображения. При необходимости повторите процесс литографии при изменении

(увеличении или уменьшении) параметра максимально возможной глубины воздействия зонда на образец «Сила».

### **Содержание отчета**

1. Полученное литографическое изображение.
2. Оценка глубины вдавливания зондом по 3D-изображению исследуемого участка образца.
3. СЗМ изображение рабочего участка.

### **Контрольные вопросы**

1. Сканирующий зондовый микроскоп как инструмент для считывания и записи информации. Расскажите о физических основах зондовой нанотехнологии.
2. Что такое сканирующая зондовая литография? Расскажите об основных ее видах.
3. Расскажите об особенностях динамической силовой литографии на приборе NanoEducator.
4. Назовите критерии выбора образцов для проведения динамической силовой литографии.

### **Библиографический список**

1. Сканирующий зондовый микроскоп NanoEducator: руководство пользователя. ЗАО " NT-MDT". 2008. 137 с.
2. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2005. 144 с.
3. Интернет-ресурс компании "НТ-МДТ": <http://ntmdt.ru>.

4. Никишин В.И., Лускинович П.Н. Нанотехнология и наноэлектроника // Электронная промышленность. 1991. № 3. С. 4.

5. Неволин В.К. Основы туннельно-зондовой нанотехнологии: учеб. Пособие. М.: МИЭТ, 2000.

6. Matsumoto K., Ishii M., Segawa K., Oka Y., Vartanian B.J., Harris J.S. Room temperature operation of single electron transistor made by the scanning tunneling microscope nanooxidation process for the  $\text{TiO}_x/\text{TiO}$  system // Appl. Phys. Lett., 68, 34 (1996).

7. Cooper E.B., Manalis S.R. Fang H., Dai H., Matsumoto K., Minne S.C., Hunt T., Quate C.F. Terabit-per-square-inch data storage with the atomic force microscope // Appl. Phys. Lett., 75, 3566 (1999).

8. Рамбиди Н.Г., Замалин В.Н. Молекулярная микроэлектроника: физические предпосылки и возможные пути развития // Поверхность. Физика, химия, механика. 1986. № 8. С. 5.

9. Неволин В.К. Физические основы туннельно-зондовой нанотехнологии // Электронная промышленность. 1993. № 10. С. 8.

**5092**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**МИКРО- НАНОСЕНСОРЫ**

Методические указания  
к лабораторной работе № 3

**АКУСТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК**

Рязань 2016

## УДК 681.586.2-7

Микро- наносенсоры: методические указания к лабораторной работе № 3 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, Н.М. Толкач. Рязань, 2016. 12 с.

Содержат краткие теоретические сведения о принципах действия и измерения параметров акустического датчика, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Микро- наносенсоры».

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.04.04.

Ил. 9. Библиогр.: 2 назв.

*Акустический датчик, микрофон*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и нанoeлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

Микро- наносенсоры

Составители: В и ш н я к о в Николай Владимирович  
Г у д з е в Валерий Владимирович  
Е р м а ч и х и н Александр Валерьевич  
Р ы б и н Николай Борисович  
Т о л к а ч Никита Михайлович

Редактор Н.А. Орлова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 20.12.16. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

## **Цель работы**

Ознакомиться с принципами действия и измерения параметров акустического датчика.

## **Теоретическая часть**

### *Некоторые акустические термины и единицы*

Звук – волновой колебательный процесс, происходящий в упругой среде (воздухе, воде и др.) и вызывающий слуховое ощущение.

Звуковое поле – область пространства, в которой распространяются звуковые волны. Звуковое давление – разность между статическим (атмосферным) давлением и давлением в данной точке звукового поля. Различают максимальное (пиковое), минимальное, а также эффективное (среднеквадратическое) значения давления за полный период.

Звуковая волна – процесс переноса энергии механических колебаний в упругой среде. Звук невыраженной высоты – звук, который не может быть определён какой-либо высотой или неправильная последовательность звуковых волн. Звук рассеянный (диффузный) – когда плотность энергии звука равномерна во всём объёме помещения и направленность потока энергии в каждой точке равномерна.

Согласно Международной системе единиц физических величин СИ единицей звукового давления является Паскаль (Па).

Интенсивность звука (прежнее название: сила звука) – количество энергии, проходящее в секунду через единицу площади, перпендикулярной к направлению распространения волны. Единица интенсивности – ватт на квадратный метр ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ).

Звуковая мощность – поток звуковой энергии, проходящий за 1с данную поверхность, перпендикулярно к ней. Единица измерения – ватт (Вт).

Абсолютный порог слышимости – минимальный уровень звукового давления, при котором ещё возникает слуховое ощущение.

### *Микрофоны: общее рассмотрение*

Микрофон представляет собой датчик, преобразующий акустический сигнал в электрический. В основу микрофона могут быть положены различные принципы, в большинстве случаев используется комбинация механоакустического и электромеханического преобразования: движение молекул воздуха приводит в движение упругий элемент (мембрану), что в свою очередь вызывает электрический сигнал.

Широко распространенный микрофон, применяемый в телефонных трубках, основан на необратимом явлении: под действием давления происходит изменение сопротивления контакта частиц угля, заполняющих объем, закрытый мембраной. Микрофон этого типа, хотя и достаточно чувствителен, но не приспособлен для физических измерений, поскольку имеет гистерезис и ограниченную полосу пропускания. Для создания измерительных микрофонов (акустических датчиков) предпочтительнее методы преобразования, основанные на явлениях электромагнитного, электростатического, пьезоэлектрического или магнитострикционного типов.

### *Классификация акустических датчиков (АкД)*

В настоящее время можно выделить две основные группы АкД. Первые из них позволяют измерять акустическое давление, вторые используются для определения градиента давления. Важным преимуществом АкД, предназначенных для измерения градиента давления, является их чувствительность к направлению распространения волны. Если требуется минимальная чувствительность к паразитным звукам и к эффектам отражения, то выделяют еще промежуточную категорию АкД. Эти АкД имеют более выраженную направленность за счет чувствительности ко второму градиенту.

*АкД, чувствительные к давлению*

В АкД этого типа флуктуации  $P$  акустического давления приводят к смещению диафрагмы. Напротив, изменения атмосферного давления не вызывают какого-либо эффекта из-за наличия канала для выравнивания давления.

Подобные датчики содержат три основных элемента (рис. 1): полость, диафрагму и канал для прохода воздуха, которые можно представить соответственно с помощью емкости  $C$ , импеданса реактивного типа  $Z_d$  и активного сопротивления  $R$ .

Эквивалентная схема, построенная на основе аналогии с активным и реактивным сопротивлениями, представлена на рис. 2. Предполагается, что давления, действующие на диафрагму и в отверстии, одинаковы. Значение  $R$  можно подобрать таким, чтобы оно всегда было меньше  $Z_d$  и постоянная времени  $RC$  была больше  $0,1c$ ; этими параметрами определяется нижняя граничная частота, ниже которой ослабление достигает 6 дБ на октаву.

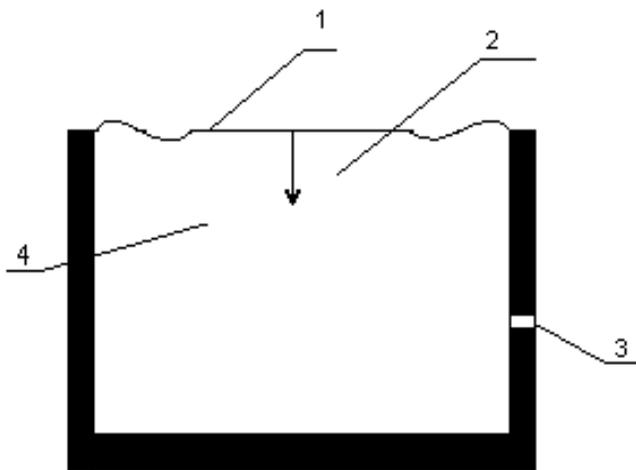


Рис. 1. АкД, чувствительные к давлению

1 – диафрагма, 2 – полость, 3 – капиллярный канал, 4 – механическая связь с преобразователем

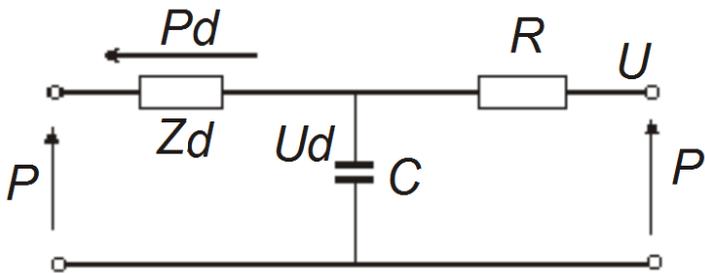


Рис. 2. Эквивалентная схема АкД, чувствительного к давлению

### *Конденсаторные акустические датчики*

Среди всех типов АкД, используемых в настоящее время, датчики на основе конденсаторов считаются наиболее перспективными. На рис. 3 представлена конструкция конденсаторного АкД.

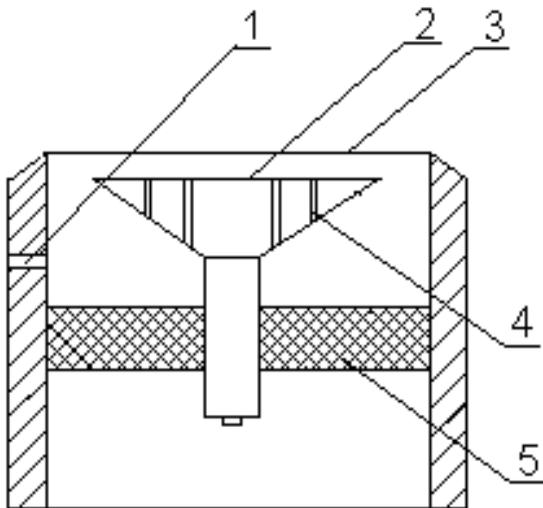


Рис. 3. Конструкция конденсаторного микрофона

1 – капиллярный канал, 2 – фиксированная обкладка, 3 – диафрагма,  
4 – демпфирующие отверстия, 5 – изолятор

Измеряемое давление воздействует на гибкую и тонкую (толщиной 10-20 мкм) диафрагму, играющую роль подвижной обкладки в датчике смещения емкостного типа. Другая обкладка зафиксирована и имеет отверстие для демпфирования: при движении диафрагмы воздух протекает через эти отверстия, происходит вязкостная диссипация энергии. Это демпфирование используется для контроля резонансной амплитуды диафрагмы и позволяет скорректировать высокочастотную часть характеристики преобразования в соответствии с объектом измерения.

Капиллярный канал позволяет уравнивать среднее давление по обе стороны мембраны. Он определяет низкочастотный отклик и обеспечивает защиту по отношению к колебаниям атмосферного давления.

В зависимости от типа мембраны различают три типа емкостных АқД: измерительные АқД с использованием внешнего напряжения питания, измерительные электретные датчики и бытовые электретные микрофоны.

В первых двух типах используются предварительно напряженные металлические пластины, а в третьем – мембраны из предварительно поляризованного фторопласта. В АқД второго типа электретная мембрана плотно прилегает к фиксированной обкладке и не играет никакой механической роли.

Если исключить из рассмотрения очень низкие частоты, то поведение конденсаторного датчика характеризуется прежде всего резонансом системы *напряженная мембрана – задняя полость* (объем воздуха позади мембраны мал). В зависимости от величины  $\omega$  на частотной характеристике можно выделить следующие области (рис.4).

При более высоких частотах теоретически должен существовать антирезонанс параллельного контура, и, кроме того, резонанс последовательного контура, образуемого внешней стороной мембраны и полостью, расположенной позади диафрагмы. При очень низких частотах к

влиянию капиллярного канала (ослабление 6 дБ/октава, зона 1) может добавляться электронный эффект, вызванный непостоянством заряда.

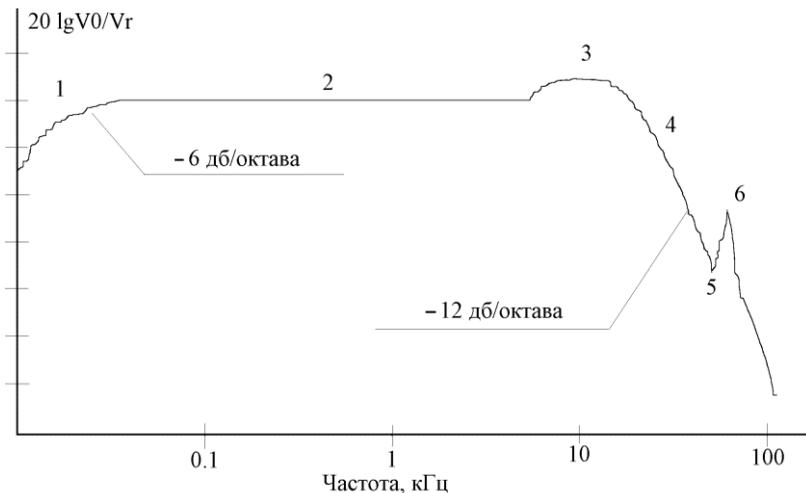


Рис. 4. Частотная характеристика АкД

*Электретные микрофоны (акустические датчики)*

Способность диэлектриков сохранять наэлектризованное состояние широко используется в целом ряде приложений. Электретные микрофоны являются электростатическими преобразователями, использующими в качестве чувствительного элемента заряженный твердый диэлектрик. На рис. 5 схематично показан поперечный разрез такого АкД, состоящего из металлизированной электретной диафрагмы, расположенной на металлическую плату-основание так, что между ними оставлен воздушный зазор.

В реальной ситуации указанные на рисунке размеры настолько малы, что всеми эффектами, связанными с конечностью поперечного размера можно пренебречь. Металлизированный слой соединен с основанием через нагрузочное сопротивление  $R$ . Заряд электрета, плот-

ность которого обозначена  $\delta_l$ , считается неизменным. Поле этого заряда имеет напряженность  $E_l$ .

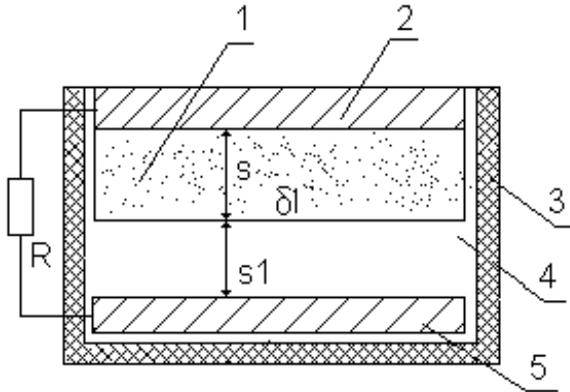


Рис. 5. Конструкция электретного микрофона

1 – диэлектрик, 2 – слой металла, 3 – корпус, 4 – воздушный зазор,  
5 – металлический электрод

При падении на диафрагму звуковой волны последняя начинает колебаться с амплитудой  $s$ , меняя толщину воздушного зазора  $s_l$ . В разомкнутом режиме поле и индуцированные заряды остаются неизменными, при этом можно найти амплитуду выходного напряжения. В качестве диафрагмы используется тефлоновая пленка толщиной от 10 до 25 мкм, одна из поверхностей которой покрыта слоем металла толщиной 500 -1000 Å. Неметаллизированная поверхность электретной фольги обращена к металлической пластине, служащей основанием, причем толщина указанного воздушного зазора (10-30 мкм) контролируется выступами или бугорками на поверхности основания. В качестве заднего электрода используется или металлический диск, или покрытый металлом диэлектрик; при этом коэффициент теплового рас-

ширения этого материала подбирают по возможности близким по значению к коэффициенту материала пленки.

Для уменьшения упругости воздушного слоя и увеличения чувствительности микрофона путем понижения резонансной частоты в пластине, служащей основанием, делают маленькие отверстия, а за ней устраивают большую полость, с которой оказывается связанным воздух в зазоре.

Электретные микрофоны обладают рядом достоинств. Они имеют широкий частотный диапазон, который распространяется на интервал от 0,001 Гц до сотен МГц. Кроме того, они обладают равномерной частотной характеристикой (рис. 6), низким уровнем нелинейных искажений, низкой вибрационной чувствительностью, не подвержены действию электрического поля.

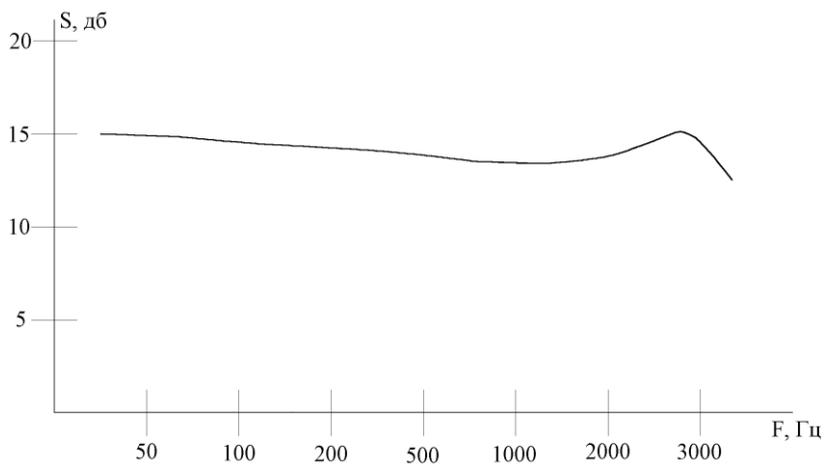


Рис. 6. Частотная характеристика электретного АқД

#### *Электродинамические АқД*

В электродинамических АқД движение диафрагмы преобразуется в электрический сигнал в результате перемещения в магнитном поле

проводника, скрепленного с этой диафрагмой. В зависимости от формы используемого проводника электродинамические микрофоны подразделяются на два основных вида: АкД с подвижной катушкой, которые можно отнести скорее к классу микрофонов, чувствительных к давлению, и ленточные АкД, которые близки к микрофонам, чувствительным к градиенту давления. Для ленточного АкД характерна лучшая характеристика преобразования в области низких частот с потерей чувствительности.

Обычно чувствительными к давлению являются АкД с подвижной катушкой (рис. 7).

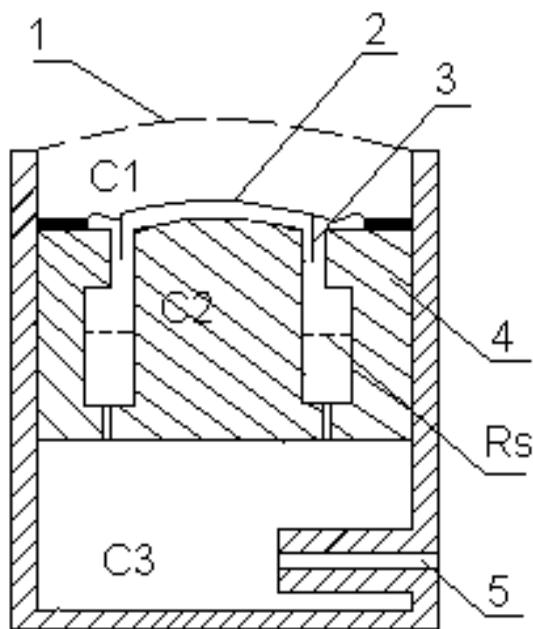


Рис. 7. Конструкция АкД с подвижной катушкой  
1 – сетка, 2 – диафрагма, 3 – катушка, 4 – магнит, 5 - трубка

На частотной характеристике такого датчика (рис. 8) можно выделить четыре основные области: область 1 соответствует резонансу зад-

ней полости; область 2 отвечает резонансу диафрагмы, который должен в значительной мере ослабляться сопротивлениями  $R_s$  и  $R_g$ ; емкость  $C_3$  (рис. 7) соответствует практически закорачиванию цепи; области 3 и 4 (рис. 8) отвечают соответственно резонансу воздуха позади диафрагмы и между диафрагмой и сеткой.

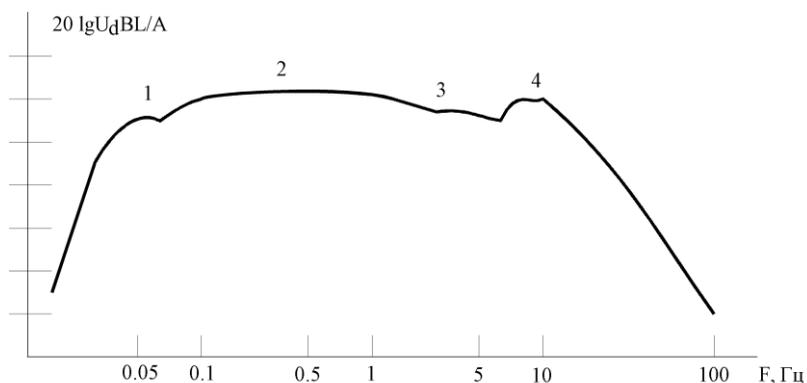


Рис. 8. Частотная характеристика АқД с подвижной катушкой

### Описание лабораторной установки

Измерительная ячейка приведена на рис. 9. Она состоит из динамика 2, на который от генератора подается низкочастотный сигнал; от динамика звуковые колебания попадают на микрофон 3, который прикреплен к подвижной стойке. Изменяя расстояние между микрофоном и динамиком, можно наблюдать различные амплитуды выходного сигнала с помощью осциллографа (или милливольтметра), при этом не меняя частоту и напряжение на генераторе.

Чтобы избежать побочных эффектов, измерительная ячейка экранирована в корпусе 1.

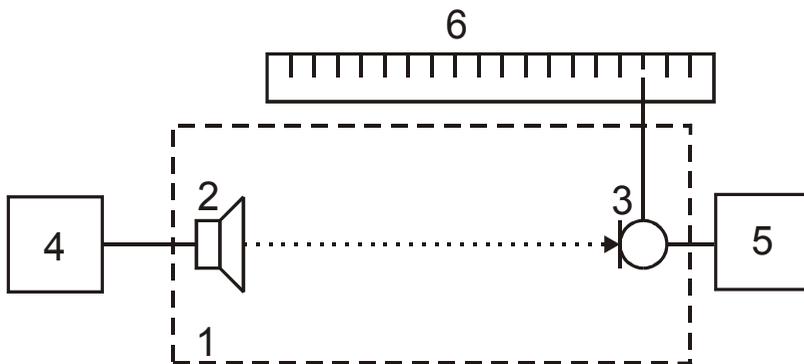


Рис. 9. Схема измерительной ячейки

1 – корпус, 2 – динамик, 3 – микрофон, 4 – генератор звуковой частоты, 5 – осциллограф, 6 – линейка

### Порядок выполнения работы

1. Включить тумблеры “Сеть” на генераторе, осциллографе (или милливольтметре) и на блоке питания.
2. На выходе блока питания установить 4,5 В.
3. Установить на генераторе выходное напряжение  $U_{ген1}=1,5\text{В}$ .
4. На измерительной ячейке вращением ручки установить соответствие между риску 10 подвижной части и 92 шкалы линейки. Данное положение будет соответствовать расстоянию  $l_1=25\text{ мм}$  между микрофоном и динамиком.
5. Произвести измерения напряжения на выходе микрофона в диапазоне частот генератора от 50 Гц до 3000 кГц.
6. Изменить напряжение на генераторе, установив его равным  $U_{ген2}=1\text{ В}$ , и произвести измерения по п. 5.

7. Повторить измерения по пп. 4-6, совместив риску 10 подвижной части с риской 82 на шкале линейки, при этом  $l_2 = 35$  мм.

8. Установив на генераторе  $f = 400$  Гц и  $U_{ген} = 1$  В, произвести измерения напряжения с выхода датчика в интервале расстояний от 25 до 65 мм.

9. Установив на генераторе  $U_{ген} = 1,5$  В, повторить п. 8.

10. Повторить пп. 8-9, установив  $f = 600$  Гц.

### **Содержание отчета**

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Схема экспериментальной установки.
4. Экспериментальные результаты.
5. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Акустические термины и единицы.
2. Виды акустических датчиков. Микрофоны. Конденсаторные микрофоны. Электретные микрофоны. Электродинамические микрофоны.

### **Библиографический список**

1. Электретный эффект и его применение: учеб. пособие/ В.И. Тимофеев, Н.В. Шемонаев. РГРТА, Рязань, 1996. 40 с.
2. Аш Ж. и соавторы. Датчики измерительных систем: в 2-х кн.: пер. с франц. М.: Мир, 1992. 480 с.

**5091**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**МИКРО- НАНОСЕНСОРЫ**

Методические указания  
к лабораторной работе № 2

**ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ**

Рязань 2016

## УДК 681.586.2-7

Микро- наносенсоры: методические указания к лабораторной работе № 2 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, Н.М. Толкач. Рязань, 2016. 12 с.

Содержат краткие теоретические сведения о свойствах пироэлектрических материалов; градуировке пироэлектрического датчика и об измерении с помощью него температуры нагретого тела, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Микро- наносенсоры».

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.04.04.

Ил. 8. Библиогр.: 5 назв.

*Пироэлектричество, пирометр, датчик температуры*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

Микро- наносенсоры

Составители: В и ш н я к о в Николай Владимирович  
Г у д з е в Валерий Владимирович  
Е р м а ч и х и н Александр Валерьевич  
Р ы б и н Николай Борисович  
Т о л к а ч Никита Михайлович

Редактор Н.А. Орлова  
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 20.12.16. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

### Цель работы

Изучение свойств пьезоэлектрических материалов; градуировка пьезоэлектрического датчика и измерение с его помощью температуры нагретого тела.

### Краткие теоретические сведения

#### Физика пьезоэлектричества

Пьезоэлектричество – возникновение электрических зарядов на поверхности некоторых полярных диэлектриков при их нагревании или охлаждении.

Это явление связано с особенностью кристаллической структуры пьезоэлектриков. На рис. 1, *a* показано образование элементарного диполя в линейном пьезоэлектрике со структурой вюрцита, характерной для соединений типа  $A^{II}B^{VI}$ . Ионы *A* и *B* создают взаимное тетраэдрическое окружение. Из-за искажения тетраэдра ион *A* располагается ниже его геометрического центра, вследствие чего тетраэдр приобретает элементарный дипольный момент. По этому принципу элементарные диполи образуются и в более сложных структурах, содержащих десятки атомов в элементарной ячейке. Расположение элементарных диполей, цепочками пронизывающих пространство монокристалла (рис. 1, *б*), создаёт поляризацию всего объёма. Количественной мерой этого состояния принято считать спонтанную поляризацию  $P_s$  пьезоэлектрика. Основными параметрами пьезоэлектриков являются пьезоэлектрический коэффициент и вольт-ваттная чувствительность.

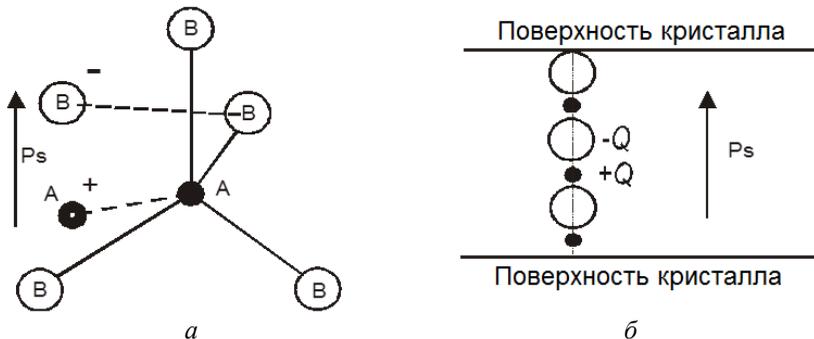


Рис. 1. Образование элементарных диполей в линейном пьезоэлектрике (*a*) и цепочечная модель пьезоэлектрического кристалла (*б*)

Напряжение  $U$ , образуемое на поверхности пироэлектрика, пропорционально полной энергии  $E_T$ , излучаемой с поверхности тела, которая пропорциональна температуре тела в четвёртой степени по закону Стефана-Больцмана.

$$U \sim E_T \sim T^4. \quad (1)$$

В дополнение к пироэлектрическим свойствам кристаллы пироэлектриков в той или иной степени являются пьезоэлектриками (ферроэлектрические кристаллы), т.е. в них появляются заряды в ответ на механическое напряжение. При температуре, превышающей точку Кюри, у кристаллитов исчезает дипольный момент, и материал теряет свои ферроэлектрические свойства. Можно выделить наиболее важные группы пироэлектриков. К первой группе относятся сегнетоэлектрики. К пироэлектрикам этого класса материалов относятся триглицинсульфат (ТГС) и изоморфные ему соединения со специальными добавками для мономоденизации: ниобат и танталат лития ( $\text{LiTaO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3$ ), тонкие пленки нитрата калия в сегнетофазе, керамические титанат свинца и цирконат-титанат свинца (ЦТС) с различными добавками. Все эти материалы являются нелинейными диэлектриками, в которых пироэлектрический коэффициент, обусловленный первичным пироэффектом, достигает максимума вблизи точки Кюри.

Вторая группа пироэлектриков – это линейные пироэлектрики, в которых направление спонтанной поляризации одинаково по всему объему кристалла и не может быть изменено электрическим полем. Спонтанная поляризация  $P_s$  в таких кристаллах не снимается до нуля, как в сегнетоэлектриках. К таким пироэлектрикам относятся соединения типа  $A^{II}B^{VI}$  со структурой вюрцита, например, монокристаллы  $\text{CdS}$ , а также сульфат лития, тетраборат лития и др. В пироэлектрических коэффициентах этих кристаллов наблюдается существенный вклад не только от первичного, но и от вторичного пьезоэффекта.

К третьей группе относятся пленочные полярные полимеры типа ПВДФ, которые весьма перспективны благодаря возможности получения из них тонких, эластичных, прочных пленок. Пироэлектрические свойства пленка приобретает после ее растяжения в 3,5 раза и поляризации при температуре около  $130^\circ\text{C}$  в поле порядка  $10^6$  В/см.

*Пироэлектрические приёмники излучения*

Пирозлектрический детектор можно представить в виде конденсатора, электрически заряжающегося от потока тепла (рис. 2). Поэтому пирозлектрические устройства можно считать детекторами потока тепла. Их иногда называют динамическими датчиками, что соответствует их физической природе. Когда пирозлектрический кристалл подвергается воздействию потока тепла (например, от источника ИК излучения), его температура повышается, и он также становится источником тепла. Поэтому с противоположной стороны кристалла возникает отток тепла (рис. 2).

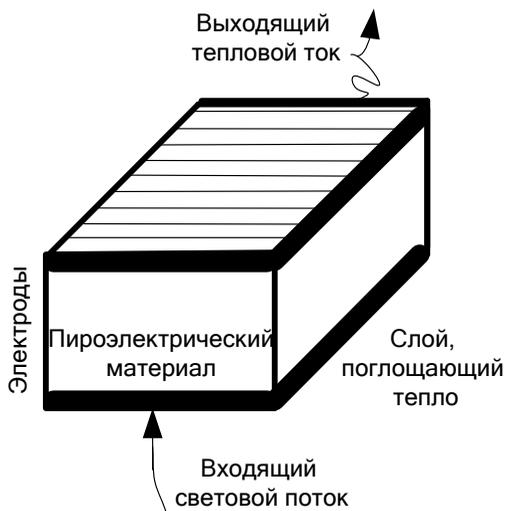


Рис. 2. Тепловые потоки в пирозлектрическом преобразователе

Существует несколько механизмов, объясняющих, почему изменение температуры приводит к возникновению пирозлектричества. Изменение температуры может привести к удлинению или укорачиванию отдельных диполей. На ориентацию диполей может повлиять их возбуждение от повышения температуры. Эти явления получили название первичного пирозлектричества. Существует также вторичное пирозлектричество, которое в упрощенном виде можно считать следствием пьезозлектрического эффекта. На рис. 2 показан пирозлектрический датчик, имеющий одинаковую температуру  $T_0$  в любой точке объема. Будучи электрически поляризованными, диполи ориентированы так, что одна сторона материала становится положительно заряженной, а вторая -

отрицательно. Однако в стационарных условиях свободные носители зарядов (электроны и дырки) нейтрализуют заряды, возникшие вследствие поляризации, и конденсатор, образованный электродами и пироэлектриком, разряжается, что приводит к появлению нулевого заряда на выходе датчика. Тепло на сенсор может поступать в виде теплового излучения, которое поглощается нижним электродом и распространяется по пироэлектрику, используя механизм теплопроводности. Нижний электрод иногда покрывают теплопоглощающим слоем из черного золота или органического красителя. В результате поглощения тепла нижняя часть сенсора нагревается, что приводит к его расширению, что, в свою очередь, вызывает изгиб датчика. Появившаяся деформация означает возникновение механического напряжения и, следовательно, изменение ориентации диполей. Поскольку материал сенсора также обладает и пьезоэлектрическими свойствами, его напряженное состояние приводит к появлению на электродах противоположных по знаку зарядов. Отсюда видно, что вторичный пироэлектрический эффект можно описать следующей последовательностью событий: тепловое излучение  $\rightarrow$  поглощение тепла  $\rightarrow$  механическое напряжение, индуцированное теплом  $\rightarrow$  электрический заряд.

Дипольный момент  $P_s$  объемного пироэлектрического датчика можно найти по выражению:

$$P_s = \mu Ah, \quad (2)$$

где  $\mu$  – дипольный момент на единицу объема,  $A$  – площадь датчика,  $h$  – его толщина.

Заряд  $Q_a$ , собранный на электродах, приводит к появлению в материале следующего дипольного момента:

$$P_{s0} = Q_a h. \quad (3)$$

$P_s$  из (2) должен быть равен  $P_{s0}$  из (3), поэтому

$$Q_a = \mu A. \quad (4)$$

Поскольку температура меняется, дипольный момент тоже не остается постоянным, что и приводит к индуцированию заряда на гранях кристалла.

Количество поглощенного тепла можно выразить через изменение дипольного момента, при этом  $\mu$  зависит как от температуры  $T_a$ , так и от приращения тепловой энергии  $\Delta W$ , поглощенной материалом:

$$\Delta Q_a = A\mu(T_a, \Delta W). \quad (5)$$

На рис. 3 показан пироэлектрический детектор, подсоединенный к нагрузочному резистору  $R_b$ , отображающему либо внутреннее

сопротивление утечки, либо входное сопротивление интерфейсной схемы, подключенной к выходу датчика. В правой части рисунка показана эквивалентная электрическая схема такого сенсора. Она состоит из следующих трех компонентов: источника тока ( $i$ ), приводящего к появлению тепла, емкости детектора  $C$  и сопротивления утечки  $R_b$ .

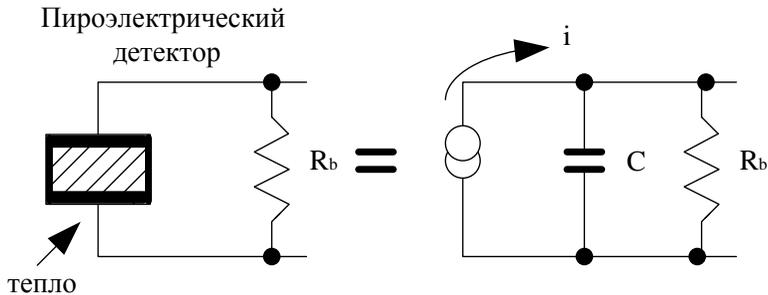


Рис. 3. Пирозлектрический детектор и его эквивалентная схема

Выходным сигналом пирозлектрического детектора в зависимости от конкретного применения может быть либо заряд (ток), либо напряжение. Поскольку пирозлектрический датчик является конденсатором, он будет разряжаться через сопротивление  $R_b$ . Величина электрического тока через этот резистор и напряжение на нем соответствуют заряду, индуцированному тепловым потоком. Пирозлектрический эффект характеризуется двумя коэффициентами:

- пирозлектрическим коэффициентом по заряду  $P_Q = dP_s/dT$ ;
- пирозлектрическим коэффициентом по напряжению  $P_V = dE/dT$ ,

где  $P_s$  – спонтанная поляризация,  $E$  – напряженность электрического поля, а  $T$  – температура в Кельвинах. Отношение двух коэффициентов можно выразить через диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_r$  и электрическую постоянную  $\epsilon_0$

$$\frac{P_Q}{P_V} = \frac{dP_s}{dE} = \epsilon_r \epsilon_0. \quad (6)$$

Поляризация зависит от температуры, и поэтому оба пирозлектрических коэффициента являются функциями температуры.

При воздействии источника тепла на пирозлектрик, его температура повышается на  $\Delta T$ , при этом происходят соответствующие изменения заряда и напряжения:

$$\Delta Q = P_Q \Delta T, \Delta V = P_V h \Delta T. \quad (7)$$

Если емкость датчика выразить в следующем виде:

$$C_e = \Delta Q / \Delta V = \varepsilon_r \varepsilon_0 A / h, \quad (8)$$

из уравнений можно вывести следующее соотношение:

$$\Delta V = P_Q \Delta T / C_e = P_Q \varepsilon_r \varepsilon_0 \Delta T / h. \quad (9)$$

Отсюда видно, что выходное напряжение датчика пропорционально росту температуры и пирозлектрическому коэффициенту по заряду и обратно пропорционально его толщине.

Когда пирозлектрический чувствительный элемент подвергается воздействию перепада температур, его поляризация (индуцируемый электрический заряд внутри кристалла) также меняется с температурой. На рис. 4 показана типовая зависимость поляризации от температуры. Пирозлектрический коэффициент по напряжению  $P_V$  соответствует наклону кривой поляризации. Приближаясь к точке Кюри, этот коэффициент резко возрастает, что объясняется исчезновением поляризации и потерей пирозлектрических свойств в этом температурном диапазоне. Предполагается, что нелинейность кривой поляризации объясняется увеличением чувствительности датчика с ростом температуры.

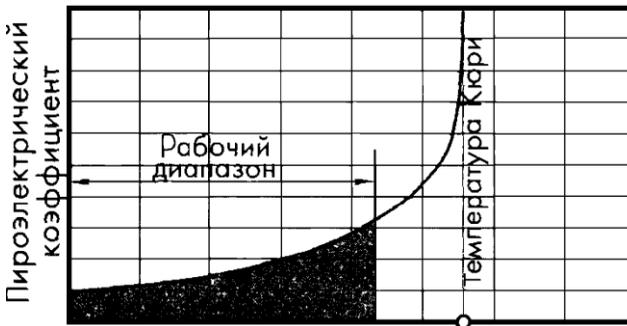


Рис. 4. Поляризация пирозлектрического кристалла.

Датчик должен работать и храниться при температурах, значительно меньших точки Кюри

Кристаллы три глицин сульфата (ТГС) являются самыми эффективными пирозлектрическими преобразователями. Но до недавнего времени из-за низкой температуры Кюри они редко применялись на практике. К тому же оказалось, что TGS датчики обладают довольно низкой стабильностью даже при температурах ниже точки Кюри. Однако было обнаружено, что при легировании

TGS кристаллов L-аланином в процессе выращивания не только повышается их стабильность, но и несколько увеличивается температура Кюри, которая после этого становится равной 60 °С, и, значит, верхний предел рабочих температур возрастает до уровня 55 °С, достаточного для многих практических применений.

На рис. 5 показаны временные диаграммы, построенные для пирозлектрического датчика при подаче на его вход ступенчатой тепловой функции. Из диаграмм видно, что электрический заряд достигает своего пикового значения практически мгновенно, а затем начинает уменьшаться с тепловой постоянной времени  $\tau_T$ . Это можно объяснить следующим образом: при нагреве поляризация первоначально происходит в самых поверхностных слоях кристаллического материала толщиной в несколько атомов, температура которых мгновенно повышается до максимального значения. При этом в материалах возникает высокий градиент температур, вызывающий максимальную поляризацию. После чего происходит распространение тепла по всему пирозлектрику, часть которого поглощается его массой пропорционально значению теплоемкости  $C$ , а другая часть отдается в окружающую среду через тепловое сопротивление  $R_T$ . Все это приводит к уменьшению первоначального заряда. Тепловая постоянная времени определяется произведением теплоемкости датчика на его тепловое сопротивление:

$$\tau_T = CR_T = cAhR_T, \quad (10)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость чувствительного элемента. Тепловое сопротивление  $R_T$  является функцией всех тепловых потерь в окружающую среду через конвекцию, теплопроводность и тепловое излучение. В низкочастотных устройствах желательно использовать датчики с большой тепловой постоянной времени, тогда как в быстродействующих системах (например, в измерителях лазерных импульсов)  $\tau_T$  должно быть значительно ниже. Для уменьшения  $\tau_T$  пирозлектрики иногда покрывают теплоотводами (кусочками алюминия или меди).

Предполагается, что на пирозлектрический датчик воздействует источник тепла, обладающий очень высокой теплоемкостью, поэтому его собственной теплоемкостью можно пренебречь. Тогда температура среды  $T_b$  во время проведения измерений считается постоянной, в то время как температура датчика является функцией времени и определяется плотностью, удельной теплоемкостью и толщиной детектора. Если входной тепловой поток имеет форму

ступенчатой функции, а датчик работает в воздушной среде, для выходного тока можно записать следующее выражение:

$$i = i_0 e^{-t/\tau}, \quad (11)$$

где  $i_0$  — пиковое значение тока.

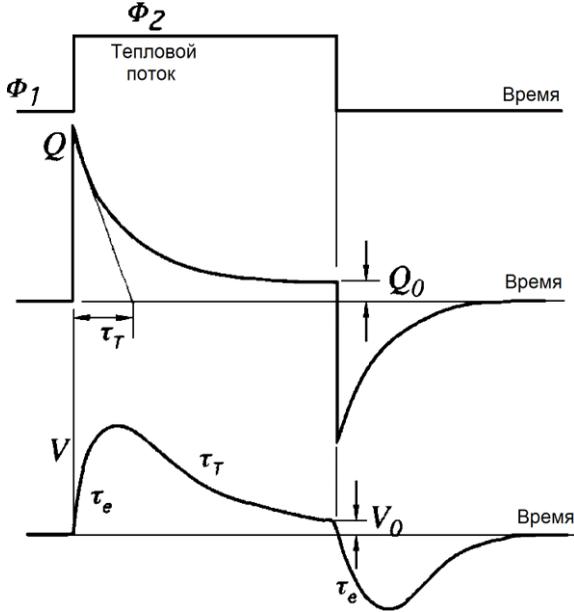


Рис. 5. Реакция пироэлектрического чувствительного элемента на тепловую ступенчатую функцию (значения заряда  $Q_0$  и напряжения  $V_0$  для ясности несколько увеличены)

Из рис. 5 видно, что заряд и напряжение никогда не снижаются до нуля. Это объясняется следующими причинами: пироэлектрик получает тепловую энергию со стороны датчика, за счет которой увеличивается температура материала. Рост температуры приводит к скачку заряда на электродах датчика, который со временем уменьшается с постоянной времени  $\tau_T$ . Однако датчик имеет еще одну сторону, контактирующую с более холодной средой, через которую происходит потеря тепловой энергии, т.е. охлаждение датчика. Поскольку стороны чувствительного элемента подвергаются воздействию разной температуры, через пироэлектрик постоянно проходит тепловой поток. Электрический ток на выходе пироэлектрического датчика всегда повторяет форму теплового

потока, проходящего через него. Проводя точные измерения, можно убедиться в том, что выходное напряжение пироэлектрического сенсора равно постоянному значению  $V_0$ , пропорциональному величине теплового потока.

На рис. 6, а представлена типовая конструкция твердотельных пироэлектрических детекторов. Кристалл пироэлектрика размещается в металлических корпусах ТО-5 либо ТО-39, что обеспечивает хорошее экранирование и защиту от действия окружающей среды. Оптическое окно обычно выполняется из кремния. Внутреннее пространство заполняется сухим воздухом или азотом. Обычно используется дифференциальная схема включения двух пироэлектрических элементов для лучшей компенсации быстроменяющихся тепловых потоков и акустических шумов и вибраций. Часто один из элементов покрывается красителем, имитирующим состояние абсолютно черного тела, а второй экранируется от излучения, а для улучшения его отражательной способности на него наносится слой золота. Двойной элемент изготавливается на одной подложке (рис. 6, б). Металлические электроды, нанесенные с двух сторон пластины, формируют два последовательно соединенных конденсатора  $C_1$  и  $C_2$ .

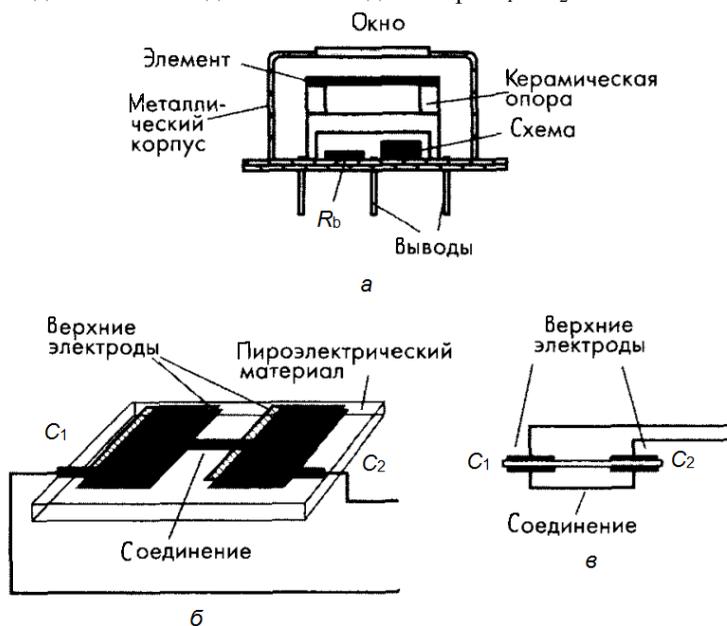


Рис. 6. Двойной пирозлектрический датчик

*a* – конструкция пиродатчика в металлическом корпусе ТО-5(ТО-39);  
*б* – металлические электроды (нанесены на противоположные стороны материала); *в* – эквивалентная схема двойного элемента

На рис. 6, в представлена эквивалентная схема двойного пирозлемента. Такая конструкция обеспечивает высокий коэффициент ослабления синфазных помех, возникающих за счет механических нагрузок и вибраций. Дополнительно для уменьшения действий механических нагрузок и вибраций в конструкции датчика предусматривается «механическая развязка» между деталями корпуса и пирозлементом, а также между ним и электрическими выводами.

В настоящее время входные блоки к пирозлектрическим датчикам собираются на полевых транзисторах. Способы включения пиродатчика в схеме с полевыми транзисторами показаны на рис. 7. Наиболее распространённая схема включения пиродатчика представлена на рис. 7, *a*. При использовании датчиков на основе триглицинсульфата (с недостаточно устойчивой доменной структурой) предпочтительно включать датчик в промежуток *затвор - сток* полевого транзистора (рис. 7, *б*).

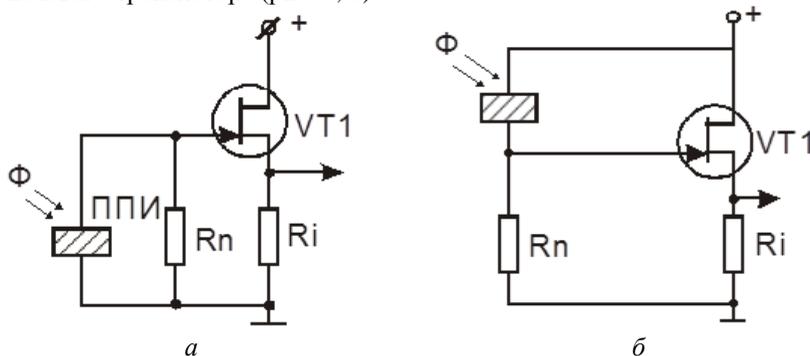


Рис. 7. Схемы включения одноэлементных пирозлектрических приемников излучения

Преимущества пиродатчиков перед другими типами тепловых приёмников:

- широкий рабочий спектральный интервал;
- достаточно большое быстродействие;
- высокая интегральная чувствительность;
- не требуется специального охлаждения;
- не требуется подача дополнительного смещения;

- реакция только на переменную составляющую падающего потока излучения;
- отсутствие токов утечки.

Отличительной особенностью пироприемников, предназначенных для регистрации теплового и электромагнитного излучений, является низкий коэффициент шумов и широкий спектральный диапазон излучений на частотах  $10^{10} \dots 10^{20}$  Гц (от сантиметровых волн до  $\gamma$ -лучей). Так как пироэлектрики реагируют только на переменную часть потока излучения, то модуляция потока может достигать 106 Гц. Диапазон регистрируемых мощностей излучения от  $10^{-9}$  до  $10^{20}$  Вт.

Пироэлектрические датчики применяются в медицине, ветеринарии, агрономии, в коммунальных службах, в металлургии, в текстильной промышленности, в электроэнергетике, электронике, в военной и космической промышленности. Пироэлектрические детекторы применяются для исследования пучков нейтронов, протонов и дейтронов в экспериментах по термоядерному синтезу, для изучения импульсного и стационарного  $\gamma$  и рентгеновского излучений и как измерители мощности и энергии лазеров оптического диапазона, включая УФ и ИК. В измерительной технике пироэлектрические приемники применяются в виде тепловых приемников, построенных по модели абсолютно черного тела. Измерительные приемники излучений, построенные в виде матриц, состоящих из  $10^3 \dots 10^5$  элементов, позволяют исследовать пространственное распределение излучений.

Пироэлектрики находят применение в тепловидении (инфракрасном или радиационном), имеющем большое значение в медицине и технике. Пироконы (пироэлектрические видиконы, тепловые передающие телевизионные трубки) применяются для контроля многообразных технологических процессов:

- оценка состояний высоковольтных линий передачи по данным вертолетной ИК - съемки;
- проверка однородности изоляции мощных электрических машин;
- автоматизированный технологический контроль электронных компонентов (конденсаторов, резисторов, СБИС) под нагрузкой;
- применение пироконов в медицине для диагностики глубоких латентных воспалительных процессов и т.п.;
- изучение характеристик излучения лазеров;
- ИК-картирование Земли с ИСЗ, планет и комет с космических зондов и т.п.

В теплотрии преобразователи на пироэлектриках для измерения температуры, теплоемкости, теплопроводности, теплообмена и т.д. имеют предельную чувствительность порядка  $10^{-7}$  К.

### Описание лабораторной установки

От источника *1* (рис. 8) излучение поступает на пироэлектрический приёмник *3*. Выходной сигнал пироэлектрического приёмника *3* измеряется вольтметром *4*. По показаниям датчика температуры *5* градуируется пироприёмник. Модулятор *2* служит для прерывания потока излучения, так как пиродатчик реагирует только на переменную составляющую падающего потока излучения. Питание пироэлектрического приёмника *3* осуществляется от источника питания *6*. Осциллограф *7* служит для контроля сигнала пироэлектрического приёмника *3*.

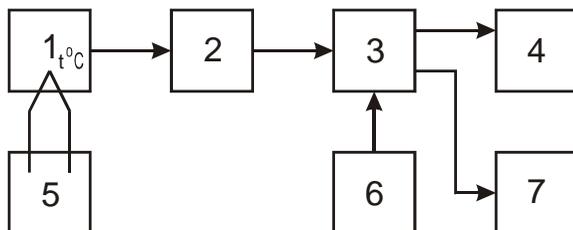


Рис. 8. Функциональная схема лабораторной измерительной установки  
 1 – источник теплового излучения (имитатор абсолютно черного тела);  
 2 – модулятор теплового потока; 3 – пироэлектрический приемник излучения МТ-30; 4 – вольтметр В7-39; 5 – вольтметр В7-26 для измерения ЭДС термопары хромель – копель; 6 – блок питания для МТ-30 ВИП-010; 7 – осциллограф

### Порядок выполнения работы

1. Включить приборы и провести их прогрев в течение 30 минут.
2. Провести градуировку пиродатчика:
  - 2.1. Постепенно увеличивая температуру источника излучения *I* (см. рис. 3) от 20 до 300 °С, снять порядка 15 показаний вольтметра *4* и датчика *5*, соответствующих одинаковым температурам.
  - 2.2. То же самое проделать при уменьшении температуры источника излучения *I*.

2.3. Рассчитать средние значения показаний вольтметра 4, чтобы исключить погрешность гистерезиса зависимости напряжения от температуры.

2.4. По полученным данным построить градуировочную кривую – зависимость температуры объекта  $T$  от напряжения на пироприёмнике  $U$ . Найти функцию аппроксимации.

3. Измерить поток излучения тела, указанного преподавателем, с неизвестной температурой.

3.1. Снять показания вольтметра 4.

3.2. Определить температуру тела по градуировочной кривой.

3.3. Оценить погрешность измерения температуры тела калиброванным пиродатчиком.

### **Содержание отчета**

1. Необходимые теоретические сведения.
2. Функциональная схема лабораторной установки.
3. Градуировочная кривая пироэлектрического датчика.
4. Функция аппроксимации и значения коэффициентов аппроксимирующей функции
5. Оценка погрешности измерений.
6. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Принципы и методы измерения температуры бесконтактным методом.
2. Пироэлектрический эффект: физическая сущность, пироэлектрические материалы.
3. Метрологические характеристики оптических датчиков температуры.
4. Функциональная схема оптического пирометра.
5. Болометры. Принципы работы, конструкции.

### **Библиографический список**

1. Гаврилова Н.Д., Данилычева М.Н., Новик В.К. Пироэлектричество. М.: Знание, 1989. 64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Физика», № 5).
2. Новик В.К., Гаврилова Н.Д., Фельдман Н.Б. Пироэлектрические преобразователи. М.: Сов. радио, 1979. 166 с.
2. Рез И. С., Поплавко Ю. М. Диэлектрики. Основные свойства и применения в электронике. Москва: Радио и связь, 1989, 287 с.

3. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник/ Пер. с англ. М.: Техносфера. 2006. 592 с.
4. Пирозлектрический эффект и его практические применения/ В. Ф. Косоротов и др.; под ред. Л. С. Кременчугского. Киев: Наукова думка, 1989 223 с.
5. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. М: Техносфера, 2007. 384 с.

**5093**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**МИКРО- НАНОСЕНСОРЫ**

Методические указания  
к лабораторной работе № 4

**ТЕНЗОДАТЧИК**

Рязань 2016

**УДК 681.586.2-7**

Микро- наносенсоры: методические указания к лабораторной работе № 4 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, Н.М. Толкач. Рязань, 2016. 12 с.

Содержат краткие теоретические сведения о преобразователях на основе тензорезистора, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине “Микро- наносенсоры”.

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.04.04.

Ил. 4. Библиогр.: 4 назв.

*Тензорезистор, тензодатчик*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

Микро- наносенсоры

Составители: В и ш н я к о в Николай Владимирович  
Г у д з е в Валерий Владимирович  
Е р м а ч и х и н Александр Валерьевич  
Р ы б и н Николай Борисович  
Т о л к а ч Никита Михайлович

Редактор Н.А. Орлова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 20.12.16. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

## Цель работы

Ознакомление с преобразователями на основе тензорезистора, определение основных параметров тензорезистора.

## Теоретическая часть

Знание механических напряжений, которые возникают в конструкции при определенных условиях эксплуатации, является главным условием ее функционирования. Измерение деформаций в соответствующим образом выбранных областях позволяет вычислить вызывающие их напряжения.

Тензорезисторами называют преобразователи, осуществляющие преобразование механических деформаций в изменение электрического сопротивления, т.е. преобразователи, основанные на тензоэффекте. Распространение получили проволочные, фольговые и полупроводниковые тензорезисторы. На рис. 1 показана конструкция проволочного тензопреобразователя.

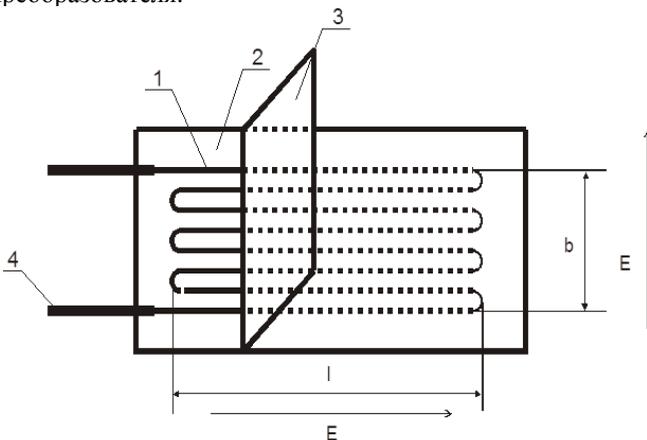


Рис. 1. Проволочный тензопреобразователь  
1 – решетка, 2 - изолирующая подложка, 3 - изоляционный слой,  
4 – выводы

Преобразователь наклеивается на поверхность исследуемой детали таким образом, чтобы витки обмотки были параллельны направлению вектора деформации  $E$ . При деформации детали витки обмотки удлиняются или укорачиваются, что вызывает изменение сопротивления датчика. При действии деформации  $E$  в поперечном направлении изменения не происходит, поскольку удлинения проводников не наблюдается. Деформации подвергаются участки изгибов витков решетки, размеры которых малы в сравнении с длиной решетки.

Дальнейшим развитием проволочных тензопреобразователей является конструкция фольгового тензорезистора. Решетку фольгового преобразователя получают методом вытравливания из фольги толщиной 1-12 мкм, нанесенной на лаковую основу. Технологический процесс изготовления позволяет получить практически любую форму и размеры решетки. Это является большим достоинством фольговых тензопреобразователей перед проволочными. Другим существенным достоинством является большая допустимая плотность тока по тензорезистору вследствие лучшей теплоотдачи от плоских тонких витков решетки. Фольговые датчики являются датчиками однократного действия, и повторно использовать их на другом месте уже нельзя.

В настоящее время большое распространение получили полупроводниковые тензорезисторы, благодаря высокому коэффициенту тензочувствительности (в 50 - 200 раз выше, чем у проволочных и фольговых). Это объясняется сильно выраженным тензоэффектом у германия, кремния, арсенида галлия и других полупроводниковых материалов.

Конструкция полупроводникового тензорезистора представляет собой пластину из полупроводника, к которой припаяны выводы. При деформации пластины изменяется ее сопротивление. Одной из первых конструкций датчиков с использованием тензорезистивного эффекта стали датчики на основе структур "кремний на сапфире". Они имеют широкий температурный диапазон, высокие эксплуатационные характеристики и относительно высокую стоимость.

#### *Погрешности тензорезисторов*

Погрешности измерения тензорезисторами возникают за счет следующих основных факторов:

- влияние температуры преобразователя на его сопротивление и линейное расширение;
- изменение характеристики, вызываемое остаточными деформациями в преобразователе при длительном действии нагрузок, близких к допустимым;
- невоспроизводимость характеристики при нагрузке и разгрузке;
- изменение крутизны характеристики преобразователя от времени из-за старения материалов, особенно из-за изменения свойств клеящих компонентов;
- снижение чувствительности при увеличении частоты деформаций, когда длина звуковой волны в детали становится соизмеримой с базой преобразователя;
- нелинейность коэффициента тензочувствительности в зависимости от деформации у полупроводниковых тензорезисторов.

### *Тензoeffект в металлах*

Удельное сопротивление большинства металлов уменьшается с увеличением приложенного к ним давления. Действительно, сокращение объема и, следовательно, межатомных расстояний, вызванное давлением, приводит к уменьшению удельного сопротивления. Удельное сопротивление металла это, в частности, диффузионный отток свободных электронов сквозь атомную решетку. Возможность диффузии тем выше, чем больше амплитуды колебаний атомов. С уменьшением ячеек атомной решетки при сближении атомов возрастают силы их взаимного притяжения, из-за чего уменьшаются амплитуды атомных колебаний. При этом вероятность диффузии свободных электронов снижается, что и приводит к уменьшению удельного сопротивления.

### *Тензoeffект в полупроводниках*

Природу тензoeffекта в примесных полупроводниках позволяет объяснить теоретическая модель, называемая “моделью долин”.

В кристалле кремния n-типа, имеющем кубическую структуру, вдоль каждой из трех осей куба есть минимальный энергетический уровень зоны проводимости, соответствующий “долине”. Из соображений симметрии все “долины” (их три) одинаковы и одинаково заполнены свободными электронами. В каждой “долине” подвижность электронов вдоль соответствующей оси минимальна, и, наоборот, в перпендикулярных направлениях подвижность этих электронов максимальна. Удельная проводимость каждой из осей имеет вид:

$$\sigma = qn(\mu_{\parallel} + \mu_{\perp}), \quad (1)$$

где  $n$  – плотность электронов в каждой “долине”;  $qn\mu_{\parallel}$  – представляет вклад электронов “долины”, параллельной электрическому полю;  $qn\mu_{\perp}$  – вклад каждой из “долин”, перпендикулярных к полю  $E$  (рис. 2, а). Приложение механического напряжения слегка меняет размеры кристаллической решетки и приводит к изменению в населенности “долин”. Например, при растяжении вдоль оси  $X$   $n$  электронов “долины”  $X$  перемещается в “долины”  $Y$  и  $Z$ , так что меняется удельная проводимость. Если электрическое поле  $E$  параллельно механическому напряжению (рис. 2, б), изменение проводимости (продольный эффект) выражается формулой:

$$\Delta\sigma_{\ell} = q(-\Delta n\mu_{\parallel} + \Delta n\mu_{\perp}) = q\Delta n(\mu_{\perp} - \mu_{\parallel}); \quad \Delta\sigma_{\ell} > 0. \quad (2)$$

Если же электрическое поле  $E$  перпендикулярно к механическому напряжению  $F$  (рис. 2, в), то изменение  $\Delta\sigma_{t}$  удельной проводимости (поперечный эффект) записывается следующим образом:

$$\Delta\sigma_{t} = q\left(\frac{\Delta n}{2}\mu_{\parallel} + \frac{\Delta n}{2}\mu_{\perp}\right) = \frac{q}{2}\Delta n(\mu_{\parallel} - \mu_{\perp}); \quad \Delta\sigma_{t} = -\frac{1}{2}\Delta\sigma_{\ell}. \quad (3)$$

При сжатии электроны перемещаются в обратном направлении:  $\Delta n/2$  электронов из каждой “долины”  $Y$  и  $Z$  переходят в “долину”  $X$ .

Тогда имеем для продольного и поперечного эффектов:

$$\Delta\sigma_{\ell} = q \Delta n (\mu_{\parallel} - \mu_{\perp}), \quad (4)$$

$$\Delta\sigma_{t} = \frac{q}{2} \Delta n (\mu_{\perp} - \mu_{\parallel}). \quad (5)$$

В случае кремния р-типа продольный и поперечный эффект также наблюдаются, но они отличаются знаком от эффектов, наблюдаемых в кремнии n-типа. Этот факт не объясняется моделью “долин”.

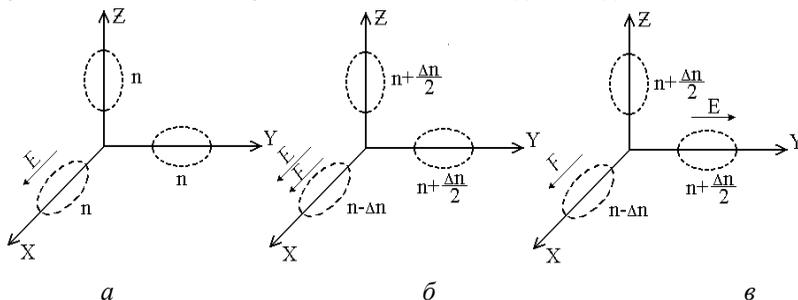


Рис. 2. Распределение электронов согласно теории “ долин ” в кристалле кремния n-типа (эллипсы, означают “долины”):  $a$  – в отсутствие механического напряжения либо при параллельном напряжении;  $b$  – при перпендикулярном напряжении;  $в$  – при перпендикулярном напряжении с приложенным электрическим полем  $E$

### *Метрологические характеристики преобразователей*

Резисторные датчики являются пассивными, так как они преобразуют в изменение сопротивления их собственную деформацию, практически равную деформации образца в области закрепления датчика.

Деформации, измеряемые с погрешностью до 0,1%, лежат в области примерно от  $\pm 10^{-5}$  до  $\pm 2 \cdot 10^{-1}$ . Нижний предел измерений определяется шумами датчика и связанной с ним электрической схемой; верхний предел зависит от упругости датчика и фиксирующего клея.

Обычно датчик состоит из сетки, образованной нитевидными проводниками с удельным сопротивлением  $\rho$ , площадью поперечного сечения нити  $S$  и длиной  $n\ell$ , где  $\ell$  – длина одного нитевидного элемента, а  $n$  – их количество. Для металлических датчиков  $n$  обычно составляет от 10 до 20, а для полупроводниковых – равно 1.

Одной из основных характеристик тензодатчика является коэффициент преобразования  $K_T$  (коэффициент тензочувствительности):

$$K_T = \frac{\Delta\ell/\ell}{\Delta R/R}. \quad (6)$$

Сопротивление датчика определяется выражением:

$$R = \rho \frac{n \ell}{S}. \quad (7)$$

Под действием деформации сопротивление датчика изменяется на

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \ell}{\ell} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho}. \quad (8)$$

Предельная деформация нити приводит к изменению ее поперечных размеров - сторон  $a$  и  $b$  в случае прямоугольного сечения, диаметра  $d$  для круглого сечения. Поперечная деформация пропорциональна продольной:

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta b}{b} = \frac{\Delta d}{d} = -\nu \left( \frac{\Delta \ell}{\ell} \right), \quad (9)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона, который близок к 0,3 в области упругих деформаций.

Поскольку  $S=ab$  (или  $S=\pi d^2/4$ ), имеем:

$$\frac{\Delta S}{S} = -2\nu \left( \frac{\Delta \ell}{\ell} \right). \quad (10)$$

Металлические и полупроводниковые датчики различаются как выражениями для изменения удельного сопротивления  $\Delta\rho/\rho$ , так и его величиной. Для металлических датчиков используется формула Бриджмена, связывающая изменение удельного сопротивления с изменением объема  $V$ :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = c \left( \frac{\Delta V}{V} \right), \quad (11)$$

где  $c$  – константа Бриджмена.

Поскольку  $V=Sn\ell$ ,

$$\frac{\Delta V}{V} = (1 - 2\nu) \frac{\Delta \ell}{\ell} \quad (12)$$

и

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = c(1 - 2\nu) \left( \frac{\Delta \ell}{\ell} \right), \quad (13)$$

то отсюда следует:

$$\frac{\Delta R}{R} = \left\{ (1 + 2\nu) + c(1 - 2\nu) \right\} \frac{\Delta \ell}{\ell} = K_T \left( \frac{\Delta \ell}{\ell} \right), \quad (14)$$

$$K_T = 1 + 2\nu + c(1 - 2\nu). \quad (15)$$

Учитывая численные значения постоянных ( $\nu=0,3$ ;  $c\approx 1$ ), получаем, что для металлических датчиков  $K_T \approx 2$ .

Для полупроводниковых датчиков  $\rho$  зависит от напряжения  $\sigma$  и коэффициента пьезорезистивности  $\pi$ . Выражение имеет вид:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi\sigma = \pi Y \left( \frac{\Delta\ell}{\ell} \right), \quad (16)$$

где  $Y$  – модуль Юнга материала.

Коэффициент пьезорезистивности  $\pi$  зависит:

■ от ориентации резистивных полосок относительно кристаллографических осей;

■ от типа ( $n$  или  $p$ ) и концентрации примесей.

Таким образом, для полупроводникового датчика изменение сопротивления можно записать так:

$$\frac{\Delta R}{R} = \{(1 + 2\nu) + \pi Y\} \frac{\Delta\ell}{\ell}, \quad (17)$$

откуда

$$K_T = 1 + 2\nu + \pi Y. \quad (18)$$

Коэффициент преобразования полупроводниковых датчиков достигает абсолютных значений от 100 до 200, а его знак определяется типом примеси.

### *Линейность*

Линейная зависимость между сопротивлением и деформацией обеспечивается, если нить датчика остается в пределах упругости. Как только деформация выходит за предел упругости ( $|\Delta\ell/\ell|$  составляет от 0,5% до 20% в зависимости от материала), коэффициент Пуассона возрастает до 0,5, и коэффициент преобразования датчика приближается к 2. Например, для сплава “изоэластик”  $K_T=3,5$  при  $|\Delta\ell/\ell| < 0,65\%$ , а за этим пределом  $K_T = 2$ .

У таких сплавов, как “ферри” и константан, с коэффициентом преобразования, близким к 2,  $K_T$  почти не изменяется при выходе за предел упругости; однако при этом в нити датчика накапливается остаточная деформация и происходит необратимое изменение сопротивления (гистерезис).

Значение  $K_T$  для полупроводниковых датчиков определяется концентрацией примесей. Его абсолютная величина равномерно убывает при возрастании концентрации примесей.

Строго говоря, изменение сопротивления в зависимости от деформации не является линейным:

$$\Delta R/R = K_1\varepsilon + K_2\varepsilon^2 + K_3\varepsilon^3. \quad (19)$$

Все коэффициенты  $K_i$  этого выражения зависят от концентрации примесей и обычно можно ограничиться второй степенью. Величина  $K_2$  имеет порядок от  $10^3$  до  $10^4$ , причем датчик на полупроводнике р-типа более линеен при растяжении, а датчик на полупроводнике п-типа – при сжатии. Из предыдущего выражения получаем для коэффициента преобразования:

$$K_T = K_1 + K_2\varepsilon + K_3\varepsilon^2. \quad (20)$$

Величина  $K_T$  зависит от деформации, но всегда возможно выбрать максимальное значение  $\varepsilon$ , ниже которого  $K_T$  можно рассматривать как константу (с заданной точностью). Линейность можно повысить, увеличивая количество примесей. Так у датчиков со значительной концентрацией легирующей примеси линейность почти такая же, что и у металлических датчиков. Разумеется, в этом случае снижается  $K_T$ .

### *Сопротивление*

Удельное сопротивление материала датчика должно быть достаточно высоким, чтобы требуемые значения сопротивления (от 100 до 5000 Ом) достигались на достаточно короткой нити и без существенного уменьшения её поперечного сечения. Чрезмерная длина приводит к завышению размера датчика; меньшей толщине нити соответствует более слабый измеряемый ток; и то, и другое уменьшает чувствительность датчика. Для полупроводников удельное сопротивление  $\rho$  уменьшается по мере повышения концентрации примесей. Это следует из общего выражения для  $\rho$ :

$$\rho = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)}, \quad (21)$$

где  $q$  – абсолютное значение заряда электрона;  $n$  и  $p$  – соответственно концентрации электронов и дырок;  $\mu_n$  и  $\mu_p$  – их подвижности.

$n \approx N_d$  и  $p \ll n$ , откуда для полупроводников п-типа с концентрацией донорных атомов  $N_d$ :

$$\rho = \frac{1}{q\mu_n N_d}, \quad (22)$$

$p \approx N_a$  и  $n \ll p$ , откуда для полупроводников с акцепторными примесями  $N_a$ :

$$\rho = \frac{1}{q\mu_p N_a}. \quad (23)$$

Изменение сопротивления от температуры происходит следующим образом: при температуре меньше 120 °С удельное сопротивление  $\rho$  увеличивается с ростом  $T$ , а температурный коэффициент, будучи

положительным, уменьшается с увеличением концентрации вводимых примесей; при высоких температурах  $\rho$  уменьшается с увеличением  $T$ , а  $TKC$ , будучи отрицательным, не зависит от концентрации примесей, а является коэффициентом самого кремния.

#### *Характеристики тензодатчика в динамическом режиме*

Характеристикой тензодатчика в динамическом режиме является максимальная допустимая частота. Существует как механическая максимальная допустимая частота, так и электрическая максимальная допустимая частота.

Механические частотные ограничения зависят от способа закрепления и размера датчика. База преобразователя должна быть гораздо меньше длины волны механических колебаний с тем, чтобы измеряемая под датчиком деформация была практически однородна. Как правило, принимают  $\ell \leq 0,1\lambda$ . Длина волны  $\lambda$  продольной вибрации, соответствующей динамической нагрузке, имеет выражение  $\lambda = V/f$ , где  $V$  - скорость звука в материале образца;  $f$  - частота.

$$V = \sqrt{\frac{Y}{d} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}, \quad (24)$$

где  $Y$  – модуль Юнга;  $\nu$  - коэффициент Пуассона;  $d$  – плотность материала образца.

Учитывая это, максимальная частота вибрации при использовании датчика длиной  $\ell$  определяется соотношением:  $f_{\max} = V/(10 \ell)$ .

Электрические частотные ограничения обуславливаются тем, что у тензорезистора имеется паразитная емкость около 20-100 пФ в зависимости от конструктивных особенностей.

#### *Схемы включения тензорезисторов*

При измерении упругих деформаций наклеиваемый тензорезистор располагается на детали в направлении главной (измеряемой) деформации. Тогда относительное изменение сопротивления тензорезистора  $\Delta R/R$  и относительная деформация будут связаны соотношением:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_T \frac{\Delta \ell}{\ell}. \quad (25)$$

В пределах упругих деформаций тензорезисторы характеризуются небольшим изменением сопротивления, которое нужно преобразовывать в большие относительные изменения выходных измерительных величин. Высокую точность при этом могут обеспечить два метода - нулевой и дифференциальный. Оба метода реализуются по одной схе-

ме включения - мостовой. Нулевому методу соответствует равновесный режим работы моста, дифференциальному - неравновесный.

Схема простейшего моста (рис. 3) содержит:  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$ ,  $R4$  – резисторы отдельных плеч моста; источник питания  $U$ , характеризуемый внутренним сопротивлением  $R_i$ ; электронный вольтметр  $V$ . Источник питания подключен к так называемой диагонали питания, вольтметр – к измерительной диагонали. Тензорезистор, воспринимающий деформации, включен в одно из плеч ( $R1$ ).

Состояние моста характеризуется напряжением на измерительной диагонали (напряжение между точками  $a$  и  $b$ ):

$$U_{ab} = U \left[ \frac{R1}{R1 + R2} - \frac{R3}{R3 + R4} \right]. \quad (26)$$

В исходном состоянии мост уравновешен. Положив  $U_{ab} = 0$ , получим условие равновесия моста:

$$R1 R4 = R3 R2. \quad (27)$$

Под действием деформации сопротивление тензорезистора изменяется, что можно представить как приращение  $R1 + \Delta R$ , где  $\pm \Delta R$  - знакопеременная функция измеряемых напряжений или деформаций.

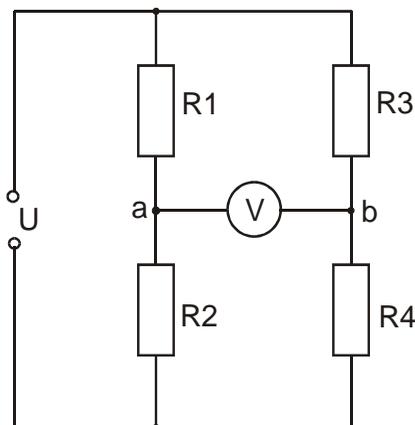


Рис. 3. Резистивный мост

### Описание лабораторного макета

В состав макета для проведения лабораторной работы “Исследование метрологических параметров тензодатчиков” входят следующие элементы (рис. 4). Тензодатчик  $R1$  включен в мост постоянного тока. Он приклеен к пластине из оргстекла, закреплённой с помощью струбины (Ст). Пластина может изгибаться вращением барабана микромет-

ра (Мк). Резистором  $R3$  устанавливается ноль на измерительной диагонали моста при отсутствии деформации пластины. Напряжение разбаланса усиливается с помощью усилителя постоянного тока (УПТ) и подаётся на вольтметр (типа В7-21). УПТ питается от источника напряжения БП (ВИП – 010). Измерительный мост и УПТ находятся внутри алюминиевого корпуса.

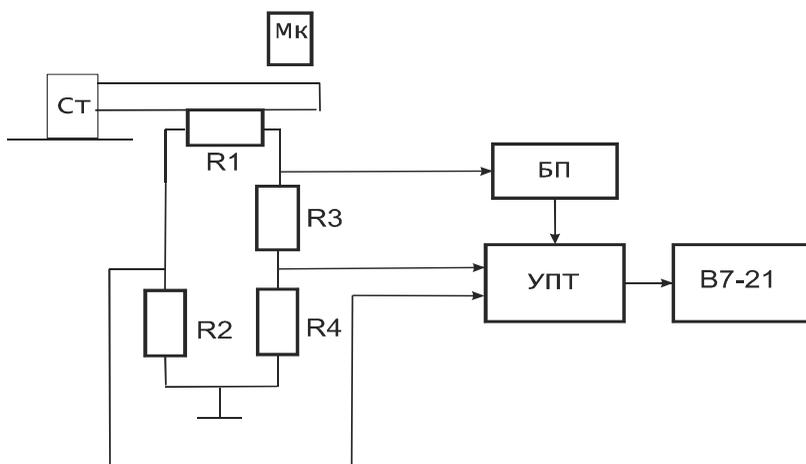


Рис. 4. Макет лабораторной установки

### Порядок расчета тензодатчика

Пластина, на которую наклеен тензодатчик, претерпевает деформацию изгиба. С помощью микрометра можно измерить расстояние, которое проходит конец пластины. При этом верхний слой пластины растягивается, следовательно, тензодатчик деформируется под действием растягивающей силы. Рассчитаем относительную деформацию тензодатчика.

Как известно, удлинение балки под воздействием растягивающей силы (усилие микрометра) можно представить в виде:

$$\Delta l = \varepsilon l_0, \quad (28)$$

где  $l_0$  – первоначальная длина балки;  $\varepsilon$  – относительная деформация балки.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{Y}, \quad (29)$$

где  $\sigma$  – механическое напряжение, возникающее в точке приложения силы к балке при ее изгибе;  $Y$  – модуль упругости материала.

С другой стороны, под действием деформирующей силы край балки перемещается на расстояние  $\Delta x$

$$\sigma = \frac{2 \Delta x Y \frac{h}{2}}{\ell_0 \left( \ell_0 - \frac{1}{3} \ell_0 \right)}, \quad (30)$$

где  $\Delta x$  – перемещение конца балки;  $h$  – толщина балки.

Коэффициент удлинения:

$$\alpha = \frac{\ell' - \ell_0}{\ell'}, \quad (31)$$

где  $\ell' = \ell_0 + \Delta \ell$ .

Удлинение самого тензорезистора составит:

$$\Delta \ell_{\text{тр}} = S_6 \alpha, \quad (32)$$

где  $S_6$  – база тензорезистора, наклеенного на балку.

Формула позволяет рассчитать относительное удлинение тензорезистора в зависимости от перемещения незакрепленного края балки и, как следствие, непосредственного удлинения самой балки. Она справедлива в том случае, если тензодатчик закреплён близко к закреплённому краю, а величина  $x$  – мала.

Теперь рассчитаем относительное изменение сопротивления тензодатчика. Тензодатчик (типа ПКБ – 0,2 – 200,8±0,2) является одним из плеч моста постоянного тока. Если мост сбалансирован, то напряжение на измерительной диагонали равно нулю и сопротивление датчика равно сопротивлению подстроенного резистора ( $R_{01} = R_3 = 200,8 \text{ Ом}$ ).

При изгибе пластины датчик растягивается и его сопротивление увеличивается. Рассчитаем сопротивление тензодатчика в зависимости от напряжения, которое покажет вольтметр.

$$U = \frac{ER_2}{R_1 + R_2} - \frac{ER_4}{R_3 + R_4}, \quad (33)$$

$$R_1 = \frac{ER_2(R_3 + R_4) - UR_2(R_3 + R_4) - ER_4R_2}{U(R_3 + R_4) + ER_4} = R_2 \frac{ER_3 - U(R_3 + R_4)}{ER_4 + U(R_3 + R_4)}, \quad (34)$$

$R_4 = R_2 = R$ , следовательно

$$R_1 = R \frac{ER_3 - U(R_3 + R)}{ER + U(R_3 + R)}. \quad (35)$$

Теперь с учётом того, что напряжение на измерительной диагонали усиливается в  $K = 20$  раз:

$$R_1 = R \frac{E R_3 - KU(R_3 + R)}{E R + KU(R_3 + R)}. \quad (36)$$

Отсюда изменение тензодатчика будет составлять:

$$\Delta R_{TP} = R_{01} - R_1. \quad (37)$$

### Порядок выполнения лабораторной работы

1. Начертить таблицу в отчёте к лабораторной работе.

Экспериментальная таблица

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X, мм										
V, В										
$\Delta R_{TP} \cdot 10^{-3}$ , Ом										
$\Delta \ell_{TP} \cdot 10^{-3}$ , мм										
$K_T$										

2. Установить на источнике питания ВИП - 010 напряжение 15 В (переключатель “грубо” – в положение “20 В”, ручка регулировки плавно - в среднем положении).

3. Проверить правильность подключения питания к стенду (**ВНИМАНИЕ**: если перепутаны полярности или подано напряжение только одной полярности, усилитель выйдет из строя!).

4. Подсоединить вольтметр к стенду. Включить приборы. По встроенным вольтметрам прибора ВИП-010 выставить напряжение + 15В и - 15В с помощью ручки “плавно”.

5. Произвести баланс моста с помощью подстроенного резистора (гнездо “Уст. 0” на стенде).

6. Вращая барабан микрометра, подвести подвижной шток к пластине, не изгибая ее. Записать показания микрометра  $X_0$ .

7. Записать в таблицу результаты 10 измерений, не допускать деформаций, при которых показания вольтметра больше 0,3 В.

8. Выключить приборы.

9. Произвести расчеты по формулам (28...40) и заполнить таблицу.

10. Построить график  $\Delta X = f(\Delta R)$ .

Перемещение незакрепленного края балки:

$$\Delta X = X_0 - X, \quad (38)$$

$$\Delta R_{TP} = R_{01} - R \frac{E R_n - KU(R_3 + R)}{E R + KU(R_3 + R)}, \quad (39)$$

где  $R_{01}$  – начальное сопротивление тензодатчика,  $R_{01} = 200,8$  Ом,  $R_3$  – сопротивление подстроечного резистора; в момент баланса моста  $R_{01} = R_3$ ,  $K=20$ ,  $R = 4,9 \cdot 10^3$  кОм,  $E$  – напряжение питания ( $\pm 15$  В),  $U$  – показания вольтметра (из таблицы).

$$\frac{\Delta R_{\text{ТР}}}{R_{\text{ТР}}} = K_{\text{T}} \frac{\Delta \ell_{\text{ТР}}}{\ell_{\text{оТР}}}; \text{ отсюда: } K_{\text{T}} = \frac{\Delta R_{\text{ТР}} / R_{\text{ТР}}}{\Delta \ell_{\text{ТР}} / \ell_{\text{оТР}}}, \quad (40)$$

где  $K_{\text{T}}$  – коэффициент тензочувствительности.

Металлическая балка, на которую наклеен тензорезистор, сделана из стали. Модуль упругости балки тогда будет составлять  $Y = 2,1 \cdot 10^5$  МПа. Линейные размеры балки и тензорезистора снимаются непосредственно с образцов.

### **Содержание отчета**

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Схема экспериментальной установки.
4. Экспериментальные результаты.
5. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислить основные типы тензорезисторов и дать краткую характеристику каждого из них.
2. Объяснить природу тензоэффекта в металлах.
3. Объяснить природу тензоэффекта в полупроводниках.
4. Перечислить основные метрологические характеристики тензопреобразователей.
5. Изобразить основные схемы включения тензорезисторов и перечислить их достоинства и недостатки.

### **Библиографический список**

1. Аш Ж. и соавторы. Датчики измерительных систем: в 2-х кн.: пер. с франц. М.: Мир, 1992. 480 с.
2. Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин/ Под ред. П.В. Новицкого. Л.: Энергия, 1966. 690 с.
3. Осипович Л.А. Датчики для биомедицинских исследований: учеб. пособие. Л.: СЗПИ, 1978. 78 с.
4. Нуберт Т.П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. Л.: Энергия, 1970. 360 с.

**5090**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**МИКРО- НАНОСЕНСОРЫ**

Методические указания  
к лабораторной работе № 1

**ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫЙ АНЕМОМЕТР**

Рязань 2016

## УДК 681.586.2-7

Микро- наносенсоры: методические указания к лабораторной работе № 1 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, Н.М. Толкач. Рязань, 2016. 12 с.

Содержат краткие теоретические сведения о различных видах анемометров, исследование работы терморезистивного анемометра, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Микро- наносенсоры».

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.04.04.

Ил. 11. Библиогр.: 3 назв.

*Анемометр, виды течений, расходомеры, трубка Пито*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

Микро- наносенсоры

Составители: В и ш н я к о в Николай Владимирович  
Г у д з е в Валерий Владимирович  
Е р м а ч и х и н Александр Валерьевич  
Р ы б и н Николай Борисович  
Т о л к а ч Никита Михайлович

Редактор Н.А. Орлова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 20.12.16. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

## Цель работы

Ознакомление с различными видами анемометров, исследование работы терморезистивного анемометра.

## Краткие теоретические сведения

В измерительной технике часто требуются точные методы определения скорости потока (течения) жидкости или газа. Измерители скорости потока называются анемометрами. По-гречески «анетмос» означает «ветер», т. е. в буквальном смысле анемометр – это «измеритель ветра». Существует большое количество различных методов измерения скорости потока. При выборе конкретного метода большое значение имеет вид измеряемого течения.

### *Виды течений*

В анемометрии используется классификация в зависимости от характера распределения скорости по площади поперечного сечения потока. Так, скорость потока по площади может быть либо постоянной, либо изменяться. В первом случае течение называется *ламинарным*, во втором – *турбулентным*.

В турбулентном течении измерение таких величин, как средняя скорость, является трудной задачей из-за наличия случайных пульсаций, амплитудой которых нельзя пренебрегать.

Для облегчения описания и сравнения различных течений в механике жидкости обычно используются безразмерными комплексами (критериями), позволяющими уменьшить число параметров, которыми определяется рассматриваемое течение. Так, в случае изотермического течения несжимаемой жидкости (плотность и температура постоянны) единственным безразмерным параметром, достаточным для определения этого течения, является число Рейнольдса:

$$\text{Re} = U \frac{D}{\nu}, \quad (1)$$

где  $U$  – характерная скорость течения (например, если речь идет о трубе, то это средняя по поперечному сечению потока скорость  $U=Q/S$ ,  $Q$  – объемный расход,  $S$  – площадь поперечного сечения);  $D$  – характерная длина (например, в упомянутом выше случае – диаметр трубы);  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости.

В аналогичных геометрических условиях два изометрических течения несжимаемой жидкости подобны, если их числа Рейнольдса одинаковы. Каков режим течения – ламинарный или турбулентный – зависит от величины числа Рейнольдса. Например, в трубе кругового сечения течение становится турбулентным, когда число Рейнольдса превышает 2200.

### Датчики и методы измерения скорости потока

Принцип действия лазерного анемометра показан на рис. 1.

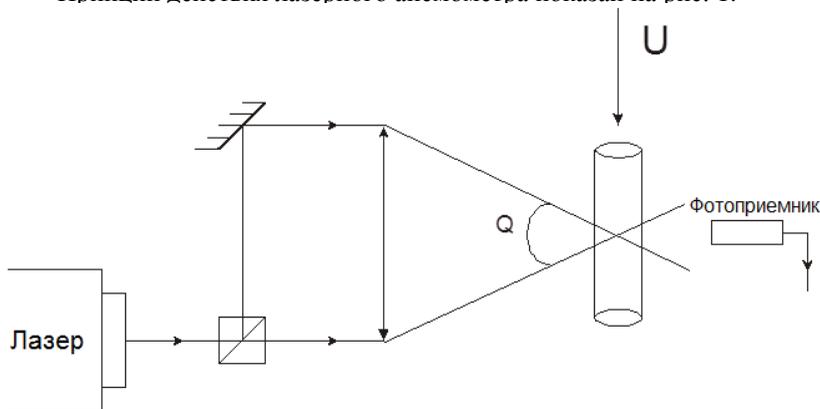


Рис. 1. Лазерный анемометр

Два лазерных луча фокусируются на одном и том же объеме жидкости ( $\sim 0,1$  мм), где образуются интерференционные полосы. Выражение для ширины полосы имеет вид:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin(Q/2)}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина световой волны;  $Q$  – угол между двумя лучами лазера.

Когда частицы, увлекаемые потоком, пересекают зону интерференции, они поочередно проходят через темные и светлые области. Поэтому рассеянный ими свет, воспринимаемый оптическим датчиком (фотодиодом или фотоумножителем), модулируется с частотой  $f_D$  (доплеровская частота), зависящей от скорости частиц и ширины интерференционных полос  $d$ :

$$f_D = \frac{U}{d} = \frac{2U}{\lambda} \sin \frac{Q}{2}, \quad (3)$$

где  $U$  – компонента скорости жидкости по нормали к полосам. Частота  $f_D$  является линейной функцией скорости  $U$ . Таким методом можно измерять скорости  $U$  в диапазоне от  $10^{-3}$  до  $10^3$  м/с.

### Ультразвуковой анемометр

Акустическая волна распространяется в данной среде со скоростью звука  $c$ , зависящей от свойств среды и от температуры. Для воздуха  $c = 331,4$  м/с при  $8^\circ\text{C}$  и  $c = 342,9$  м/с при  $20^\circ\text{C}$ . Скорость звука в жидкостях больше, чем в газах. Для воды при  $8^\circ\text{C}$   $c = 1435$  м/с. Если среда, в которой распространяется волна, движется со скоростью  $U$

относительно наблюдателя, то измеренная им скорость  $c'$  выражается формулой:

$$c' = c + U \cos \alpha, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – угол между скоростью  $U$  и направлением распространения волны (рис. 2).

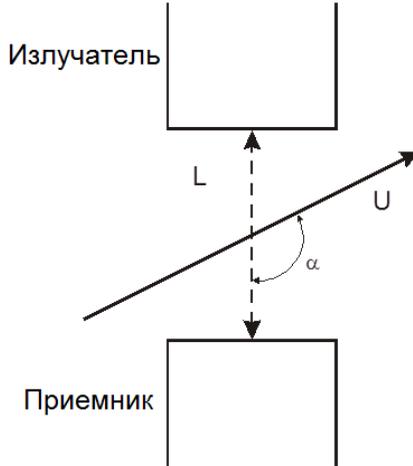


Рис. 2. Принцип действия звукового анемометра

Система для измерения скорости состоит из излучателя ультразвуковых импульсов и приемника, находящегося на расстоянии  $L$ . Длительность распространения импульсов между излучателем и приемником равна

$$t_P = \frac{L}{c + U \cos \alpha}. \quad (5)$$

Излучатель и приемник представляют собой пьезоэлектрические пластинки. Излучатель возбуждается электрическим напряжением, создающим серию волн высокой частоты (например, 1 МГц). Приемник выдает сигнал в форме изменений акустического давления, действию которого он подвергается. Такая система редко используется для измерения скорости, так как ее пространственное разрешение невелико (скорость интегрируется по расстоянию  $L$ ). Такую измерительную установку чаще применяют при измерении расхода.

#### *Крыльчатые анемометры*

Анемометры этого типа снабжены чувствительным элементом в виде системы крыльчаток, приводимых во вращение движущейся жидкостью или газом. Ось крыльчатого анемометра располагается вдоль скорости течения. Скорость вращения крыльчатки, измеренная соответствующим тахометрическим устройством, пропорциональна скоро-

сти потока. Пренебрегая трением, можно приближенно оценить скорость по частоте вращения крыльчатки в потоке. Получим соотношение:

$$U = hN, \quad (6)$$

где  $U$  – скорость течения,  $N$  – число оборотов в секунду,  $h$  – постоянная, определяемая для конкретного устройства экспериментально.

Недостатком крыльчатого анемометра является то, что его характеристики могут изменяться с течением времени, например из-за износа подшипников. Кроме того, эти анемометры непригодны для измерения потоков, меняющих свое направление, и очень медленных потоков из-за наличия порога страгивания (т. е. крыльчатка начинает вращаться при достижении потоком определенной скорости).

#### *Анемометры с тормозящим элементом*

Принцип действия анемометра с тормозящим элементом показан на рис. 3. Сила торможения, действующая на подвешенный в потоке элемент, определяется выражением:

$$F_d = \frac{C_d A U^2 \rho}{2}, \quad (7)$$

где  $C_d$  – коэффициент торможения,  $A$  – площадь поперечного сечения элемента,  $m^2$ ;  $\rho$  – плотность текучей среды,  $kg/m^3$ ;  $U$  – скорость потока,  $m/s$ .

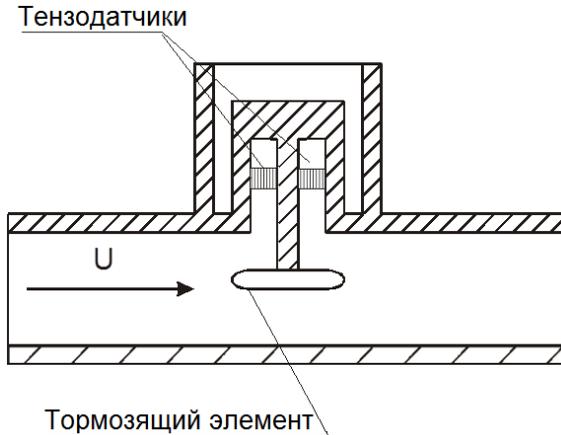


Рис. 3. Анемометр с тормозящим элементом

Коэффициент торможения зависит от формы тормозящего элемента и практически постоянен, если форма элемента была выбрана должным образом. Сила торможения чаще всего измеряется с помощью тензодатчика, закрепленного на несущем рычаге тормозящего элемента.

### Электромагнитные измерители потока

Электромагнитные измерители потока используются для измерения скорости потока, усредненной по его поперечному сечению, и пригодны почти для всех проводящих жидкостей. Их работа основана на том хорошо известном факте, что в любом проводнике, движущемся перпендикулярно к направлению силовых линий магнитного поля, индуцируется напряжение, величина которого прямо пропорциональна скорости проводника (в нашем случае – скорости жидкости). Принцип работы электромагнитного измерителя потока поясняет рис. 4.

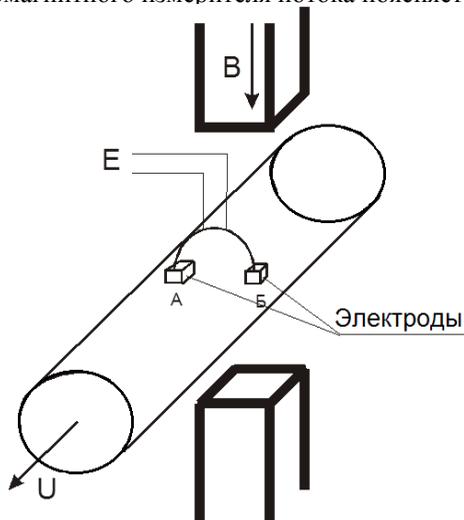


Рис. 4. Электромагнитный измеритель скорости потока

Магнитное поле  $B$  приложено перпендикулярно к направлению потока жидкости. Индуцируемое электрическое поле перпендикулярно как к направлению потока, так и к направлению магнитного поля.

Величина ЭДС определяется законом Фарадея:

$$E = \int_a^b \vec{U} \times \vec{B} d\vec{L}, \quad (8)$$

где  $E$  – индуцируемая ЭДС между точками  $A$  и  $B$ , в которых находятся электроды, В;  $B$  – магнитная индукция, Тл;  $L$  – расстояние между точками  $A$  и  $B$ , м;  $U$  – скорость жидкости, м/с.

Предполагая, что пространственные распределения поля  $B$  и скорости  $U$  однородны и что векторы  $B$ ,  $U$  и  $L$  ортогональны, получаем следующее простое выражение для ЭДС:

$$E = BLU. \quad (9)$$

Индукцируемая ЭДС  $E$  измеряется с помощью двух электродов, контактирующих с жидкостью. Тип используемых электродов зависит от типа жидкости. Для многих жидкостей, включая жидкие металлы, используются электроды, изготавливаемые из сравнительно химически неактивных металлов, например платины.

*Гидродинамические измерители потока*

В измерителях этого типа используется возможность установления связи между разностью давлений в двух характерных точках потока и скоростью потока. Эта разность давлений измеряется с помощью дифференциального преобразователя давления. К гидродинамическим измерителям потока относится трубка Пито.

Трубка Пито (рис. 5) обеспечивает измерение локальных скоростей жидкости или газа в потоке.

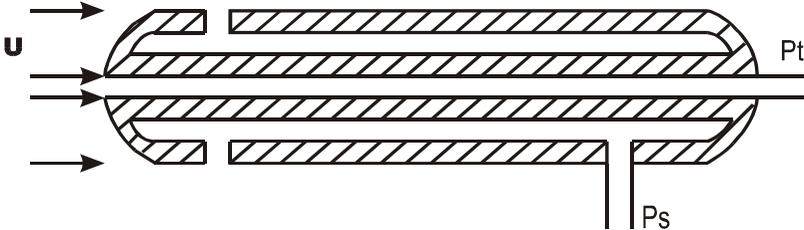


Рис. 5. Трубка Пито

В трубке имеется два типа отверстий, открытых для текущей среды. На статических входах (или входе), выполненных в виде отверстий, оси которых перпендикулярны к направлению потока, действует статическое давление текущей среды  $p_s$ . Вход (отверстие) на конце трубки собирает заторможенную массу жидкости или газа, находящуюся под полным давлением  $p_t$ . Если трубка Пито расположена параллельно потоку, то разность этих двух давлений находится из уравнения Бернулли:

$$p = p_t - p_s = \rho \frac{U^2}{2}, \quad (10)$$

где  $p$  – разность давлений, Па;  $p_s$  – давление на статическом входе, Па;  $p_t$  – полное давление, Па;  $\rho$  – плотность текущей среды, кг/м<sup>3</sup>;  $U$  – скорость потока, м/с. Отсюда для скорости потока несжимаемой текущей среды получаем

$$U = \sqrt{2 \frac{p_t - p_s}{\rho}}. \quad (11)$$

Для сжимаемой текущей среды (например, воздуха) скорость потока определяется по формуле

$$U = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_s}{\rho} \left[ \left( \frac{P_t}{P_s} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}, \quad (12)$$

где  $k = \frac{c_p}{c_v}$  – отношение удельных теплоемкостей.

#### *Тепловые измерители потока*

В тепловых измерителях потока используется нагреваемый элемент, устанавливаемый на пути потока жидкости или газа и обтекаемый этим потоком. Тепло передается от этого элемента к текучей среде с интенсивностью  $P$  ( $Вт$ ), определяемой разностью температур элемента и текучей среды, удельной теплоемкостью  $C$  ( $Дж/кгК$ ) и скоростью  $U$  ( $м/с$ ) последней, а также профилем потока. На принципе передачи тепла от нагреваемого элемента в поток основаны два метода измерения потока. В конвекционном методе измеряется количество тепла, рассеиваемого нагревательным элементом, тогда как в методе стационарной тепловой инъекции определяется изменение температуры текучей среды, связанное с инъекцией тепла в поток.

#### *Инжекционные измерители потока*

Средний массовый расход любой текучей среды можно определить путем инъекции в поток известного количества тепла и измерения изменения температуры этой среды за нагревателем (рис. 6).

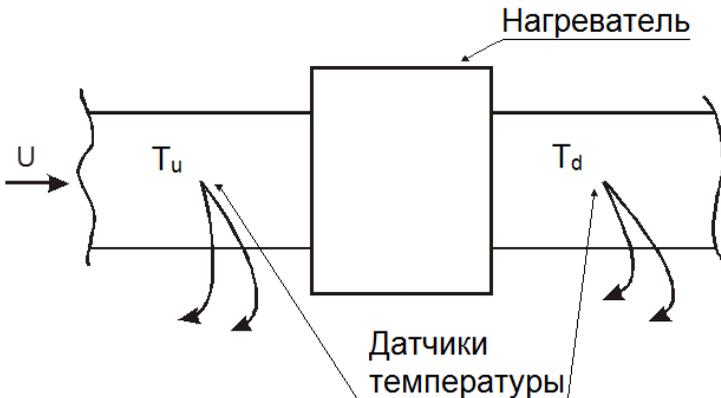


Рис. 6. Инжекционный измеритель потока

Средний массовый расход рассчитывается по формуле:

$$F = \frac{q}{C_b(T_d - T_u)}, \quad (13)$$

где  $F$  – массовый расход,  $кг/с$ ;  $q$  – скорость стационарной инъекции тепла,  $Вт$ ;  $C_b$  – удельная теплоемкость текучей среды,  $Дж/кгК$ ;  $T_u$  – температура текучей среды перед нагревателем (выше по течению),  $^{\circ}C$ ;  $T_d$  – температура текучей среды за нагревателем (ниже по течению),  $^{\circ}C$ .

#### *Конвекционные измерители потока*

Конвекционный измеритель потока обеспечивает определение локальной скорости жидкости или газа путем измерения количества тепла, которое рассеивает нагревательный элемент, обтекаемый потоком. В качестве такого элемента можно использовать любой резистивный нагреватель: вольфрамовую проволоку, терморезистор или тонкую металлическую пленку на подложке. Элемент нагревается выше температуры текучей среды путем пропускания через него электрического тока (джоулев нагрев). Между элементом и потоком возникает конвективный теплообмен. Этот теплообмен зависит от физических свойств жидкости или газа, от скорости потока и разности температур нагретого элемента и текучей среды.

Количество джоулевой теплоты  $P_j$ , выделяемой при температуре  $T$  резистором  $R$ , через который течет постоянный ток  $I$ , выражается формулой:

$$P_j = R(T)I^2. \quad (14)$$

Полагая, что теплообмен осуществляется только конвекцией в среде, имеющей температуру  $T_a$ , количество теплоты, участвующее в теплообмене, можно представить формулой:

$$P_a = hS_l(T - T_a), \quad (15)$$

где  $h$  – коэффициент теплообмена,  $S_l$  – боковая поверхность чувствительного элемента датчика.

При тепловом равновесии  $P_j = P_a$ , т. е.:

$$R(T)I^2 = hS_l(T - T_a). \quad (16)$$

Скорость жидкости  $U$  входит в выражение для  $h$ , для которого предложены различные эмпирические формулы в зависимости от характера течения. Для ламинарного течения справедлива формула Кинга:

$$h = a + b\sqrt{U}, \quad (17)$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные для конкретных жидкости (или газа) и датчика. Тогда получаем:

$$R(T)I^2 = (A + B\sqrt{U})(T - T_a), \quad (18)$$

где  $A = aS_l$ ,  $B = bS_l$

Зонды с нагреваемым элементом могут иметь различные конструкции.

Проволочный зонд (рис. 7) чаще всего используется для измерения скорости воздуха. Для обеспечения высокой чувствительности тонкая вольфрамовая проволока (диаметр 8 мкм, длина 1 мм) этого зонда накаляется практически докрасна. Проволока располагается перпендикулярно к направлению потока.

Тонкопленочный зонд (рис. 8) используется для измерения сверхзвуковых скоростей в воздушной среде. Тонкая платиновая пленка напыляется на изолирующую подложку, и в результате получается очень прочная структура.

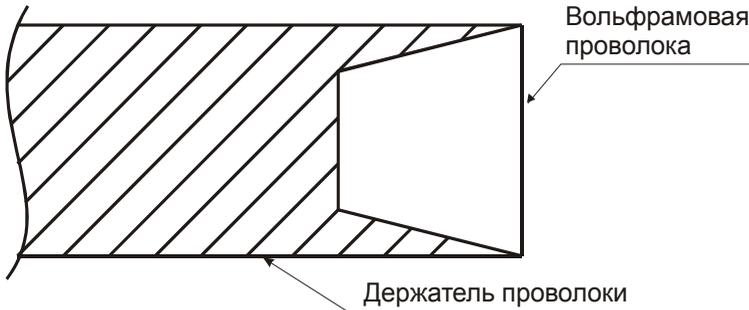


Рис. 7. Проволочный зонд

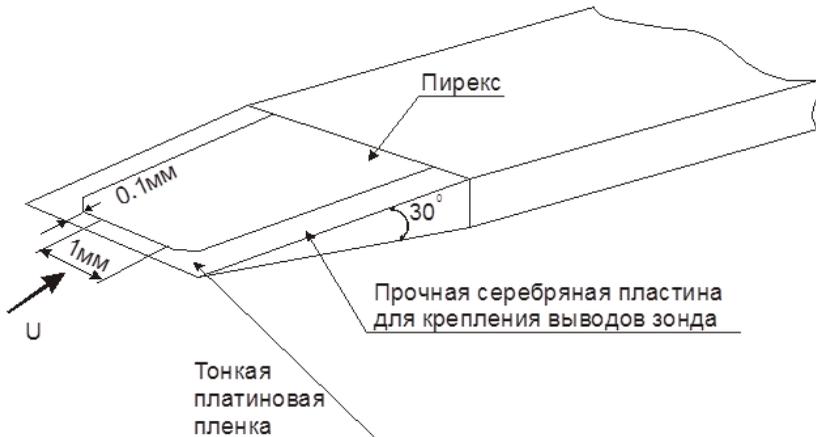


Рис. 8. Тонкопленочный зонд

Терморезисторные зонды часто применяются для измерения скорости кровотока в биологических исследованиях. Это связано, прежде всего, с высокой чувствительностью терморезистивных анемометров (из-за большого температурного коэффициента сопротивления терморезисторов), а также с тем, что существуют терморезисторы очень малых размеров. Простейшим зондом является один терморезистор, помещенный в поток. В биологических исследованиях применяют зонды с дополнительными терморезисторами для компенсации изменений температуры крови и определения направления потока.

#### *Измерительные схемы*

В термоанемометрах с резистивными нагревателями используются измерительные схемы двух типов: схема с постоянным током  $I$  и схема с постоянной температурой  $T$ .

*Схема с постоянным током.* Ток  $I$ , протекающий через нить, поддерживается постоянным с помощью либо балластного сопротивления, включенного последовательно с нитью, либо питающего источника тока. Так как количество теплоты, участвующей в теплообмене, зависит от скорости потока, то при изменении скорости изменяется и температура нити. Сопротивление нити зависит от ее температуры, поэтому с изменением скорости происходит изменение напряжения на ее концах. Измерительная схема такого типа упрощенно показана на рис. 9.

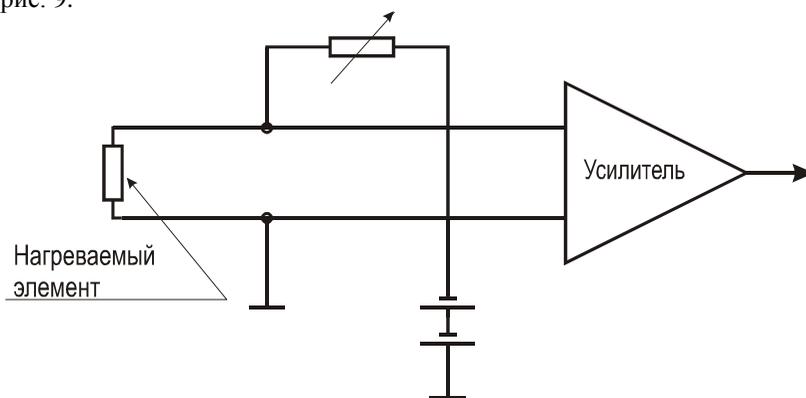


Рис. 9. Схема с постоянным током

*Схема с постоянной температурой.* В данной схеме температура и, следовательно, сопротивление поддерживаются постоянными. Датчик является одним из плеч моста Уитсона, и ток, необходимый для поддержания равновесия, зависит от скорости потока (рис. 10). Преимуществом этой схемы является меньшая тепловая инерция.

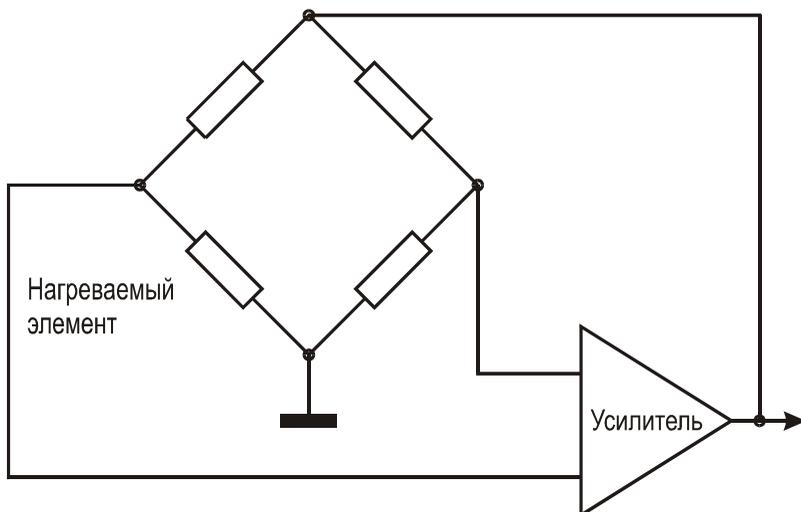


Рис. 10. Схема с постоянной температурой

### Экспериментальная часть

#### *Описание установки*

Установка для проведения данной лабораторной работы состоит из стенда термоанемометра, высокостабильного источника постоянного напряжения ВИП-010 и источника регулируемого переменного напряжения ЛАТР. В стенд вмонтирован вентилятор, частота вращения которого меняется источником регулируемого переменного напряжения, и микроамперметр. Кроме того, на передней панели стенда расположены гнезда для подачи питания от прибора ВИП-010, тумблер «Сеть» включения вентилятора и регулировочная ручка «Настройка нуля». Нагреваемым элементом является терморезистор, помещенный в поток позади вентилятора.

В данной лабораторной работе применена схема с постоянным током (рис. 11). При увеличении скорости потока температура терморезистора  $R(t)$  уменьшается и его сопротивление возрастает (из-за отрицательного ТКС). Следовательно, ток в цепи терморезистора уменьшается. Тогда падение напряжения на резисторе  $R2$  также уменьшается, вследствие чего транзистор  $VT1$  прикрывается. Из-за этого падение напряжения на этом транзисторе увеличивается, и транзистор  $VT2$  приоткрывается, что вызывает увеличение тока в цепи терморезистора. Таким образом, ток через терморезистор удерживается на постоянном уровне.

Подстроечный резистор  $R2$  служит для регулировки рабочей точки транзистора  $VT1$ . В связи с тем, что у вентилятора существует порог стагивания, измерения будем начинать с определенной скорости по-

тока. Так, начнем со скорости вентилятора при 100 В. При этом переменным резистором 3,3 к выставляем нулевые показатели на измерительном приборе. К установке прилагаются градуировочные характеристики, из которых определяется скорость потока по показаниям измерительного прибора при разных температурах воздуха.

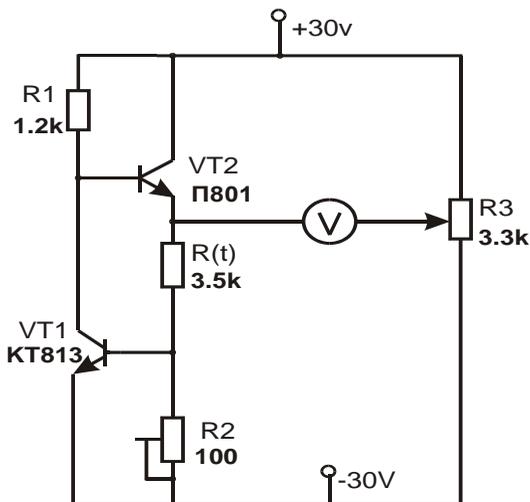


Рис. 11. Измерительная схема

### Порядок выполнения работы

1. Включить прибор ВИП-010 тумблером «Сеть» и выставить на нем напряжение 30 В.
2. Подать питание с прибора ВИП-010 на клеммы стенда, строго соблюдая полярность.
3. Установить на источнике регулируемого переменного напряжения 100 В.
4. Включить вентилятор тумблером «Сеть».
5. Ручкой регулятора «Установка нуля» в течение 3-х минут, пока схема окончательно не прогреется, добиваться нулевых показаний микроамперметра. Целью является получение таких показаний микроамперметра, когда стрелка совершает минимальный дрейф около нуля (в пределах одного деления шкалы).
6. Снять зависимость показаний микроамперметра от напряжения на вентиляторе в диапазоне от 100 до 250 В.
7. По градуировочным характеристикам построить график зависимости скорости воздушного потока от напряжения питания вентилятора.

### **Содержание отчета**

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Схема экспериментальной установки.
4. Экспериментальные результаты.
5. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Физические принципы измерения скорости и расхода газов и биожидкостей. Сравнительная характеристика методов и датчиков скорости, расхода газов и биожидкостей.
2. Терморезистивный анемометр. Конструкция, принцип работы. Схемы измерения с постоянным током и постоянной температурой.
3. Чашечные и крыльчатые анемометры, анемометры с тормозящей механической пластиной, трубка Пито.
4. Ультразвуковые и лазерные анемометры и расходомеры.
5. Доплеровские анемометры. Ионные и параметрические анемометры.

### **Библиографический список**

1. Аш Ж. с соавторами. Датчики измерительных систем: в 2-х книгах. Кн. 2: пер. с франц. М.: Мир, 1992. 424 с.
2. Нуберт Г. П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. Л.: Энергия, 1970. 360 с.
3. Виглеб Г. Датчики: устройство и применение: пер. с нем. М.: Мир, 1989. 196 с.