

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Богомолова Александра Ильинична

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Микроскопия поверхностного электрического потенциала кремний-  
германиевых микроструктур**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19309

**Научный руководитель:**

д.т.н. Гейдт Павел Владимирович  
Оценка научного руководителя  
Отлично

«14» декабря 2020г.

**Преподаватель практикума**

Краснопевцев Спартак Евгеньевич  
Оценка преподавателя практикума

*отлично*

«22» декабря 2020г.

**Куратор практикума:**

к.т.н Астрелин Виталий Тимофеевич  
Итоговая оценка

« » декабря 2020г.

Новосибирск 2020

## **Аннотация**

Работа посвящена знакомству с Кельвин-зонд микроскопией (КЗМ) – специальному режиму атомно-силовой микроскопии. Более подробно рассмотрен двухпроходной метод КЗМ, в котором одновременное отображение топографии и электрического потенциала определяет данный метод как уникальный инструмент для характеристики электрических свойств металлических и полупроводниковых наноструктур с высоким латеральным разрешением по поверхности. Для исследования были выбраны образцы кремний-германиевых микроструктур. Получение корректных данных в режиме КЗМ требует аккуратного выбора настроек и параметров сканирования, по этой причине большое внимание в работе посвящено разработке протокола проведения эксперимента. В итоге, были получены данные о поверхностном потенциале кремний-германиевых микроструктур.

Ключевые слова: Кельвин-зонд микроскопия, атомно-силовая микроскопия, кремний-германиевые микроструктуры, поверхностный потенциал.

## **Оглавление**

1. Введение .....	4
2. Теоретическая часть .....	4
2.1 Сканирующая зондовая микроскопия .....	4
2.2 Кельвин-зонд микроскопия .....	4
3. Экспериментальные исследования .....	6
3.1 Экспериментальная установка .....	6
3.2 Протокол измерения .....	6
4. Результаты .....	9
5. Вывод .....	12
6. Список литературы .....	12

## **1. Введение**

В настоящее время микроскопия поверхностного потенциала, также известная как зондовая силовая микроскопия Кельвина (КЗМ), является востребованной и широко используется в различных областях науки и техники для исследований поверхностей. КЗМ может предоставить важную информацию о распределении поверхностного потенциала, которое может помочь увеличить эффективность и производительность устройства.

Целью данной работы определение поверхностного потенциала кремний-германиевых микроструктур. Исследование проводилось методом измерения зонда Кельвина при помощи атомно-силового микроскопа «Солвер НЕКСТ» (производства НТ-МДТ, Зеленоград, Россия), который находится в аналитическом и технологическом исследовательском центре «Высокие технологии и наноструктурированные материалы» ФФ НГУ. Для проведения эксперимента использовалась программа «Nova PX», обработка данных проводилась при помощи программы «Image Analysis». Обе программы являются проприетарными разработками НТ-МДТ. Образцы были предоставлены в.н.с. ЛабФДНС АТИЦ ФФ д.ф.-м.н. А. А. Шкляевым.

## **2. Теоретическая часть**

### **2.1 Сканирующая зондовая микроскопия**

Сканирующая Зондовая Микроскопия (СЗМ) – общее название для ряда зондовых микроскопий, включая Атомно-Силовую Микроскопию (АСМ), Сканирующую Туннельную Микроскопию и др. Принцип работы СЗМ в общем случае заключается в сканировании поверхности образца зондовым датчиком, чье взаимодействие с поверхностью является короткодействующим. Сканирование производится под управлением контроллера, поддерживающего в процессе сканирования постоянный уровень взаимодействия зонд–образец. Изменение величины управляющего сканированием сигнала контроллера СЗМ отображает рельеф поверхности. Указанные методики СЗМ для отображения рельефа являются базовыми, однако в процессе сканирования зонды СЗМ могут регистрировать, помимо рельефа, другие характеристики и свойства поверхности. Это могут быть электрические, механические, магнитные и прочие физико-химические параметры.

### **2.2 Кельвин-зонд микроскопия**

Зондовая силовая микроскопия Кельвина (КЗМ), также известная как микроскопия поверхностного электрического потенциала, предназначена для

исследования поверхностей материалов, имеющих области с различными значениями поверхностного потенциала. Используя данную методику, можно с помощью определения работы выхода электронов из конкретной области на образце регистрировать распределение электрических зарядов на поверхности, измерять и анализировать неоднородно заряженные области, определять тип и степень легирования в полупроводниках. Метод чувствителен к обнаружению на поверхности объектов, линейные размеры которых могут быть в несколько раз меньше кончика АСМ зонда.

Применяемый в работе метод Зонда Кельвина основывается на двухпроходной методике сканирования. В первом проходе измеряется и запоминается рельеф поверхности образца с использованием прерывисто-контактного метода. Во втором проходе этот рельеф отслеживается при прохождении над образцом на определенной устанавливаемой оператором КЗМ высоте для определения поверхностного электрического потенциала.

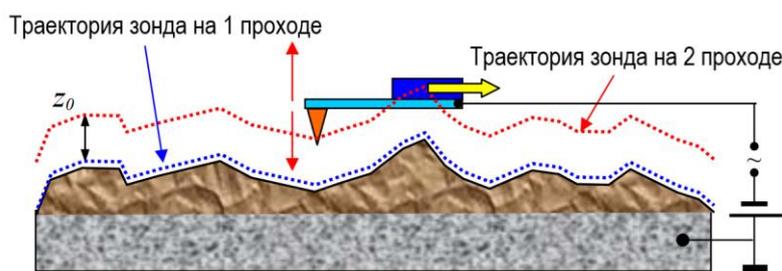


Рис. 1 Двухпроходная методика КЗМ

В течение второго прохода колебания кантилевера возбуждаются не механически, а электрически, путем приложения к зонду напряжения смещения, содержащего статическую и динамическую компоненты. Во время визуализации в динамическом режиме разность контактных потенциалов между зондом и образцом влияет на колебания кантилевера. Это означает, что на измерения топографии неоднородных образцов в динамическом режиме влияют вариации контактного потенциала образца, и их необходимо компенсировать. Другими словами, измеренная разница высот между двумя разнородными материалами содержит ошибку, вызванную различием в работе выхода электронов из материалов. Использование обратной связи КЗМ во время топографических измерений компенсирует эту ошибку, ее значение сохраняется системой обратной связи и, тем самым отображая зависимость значения этой ошибки от метода сканирования – т. е карту разности электрических потенциалов.

### 3. Экспериментальные исследования

#### 3.1 Экспериментальная установка

Для проведения исследования поверхностного потенциала использовался атомно-силовой микроскоп Солвер НЕКСТ. Данный микроскоп поддерживает двухпроходной метод кельвин-зонд микроскопии. В этом методе для получения информации о свойствах поверхности используется электрическое взаимодействие между зондом и образцом, поэтому мы рассматриваем систему, состоящую из проводящих материалов: проводящий зонд, образец, проводящий клей и металлическая подложка. Если в этой системе будет присутствовать изолятор, то измерения будут не возможными. В качестве образца в работе использовались кремний-германиевые микроструктуры.

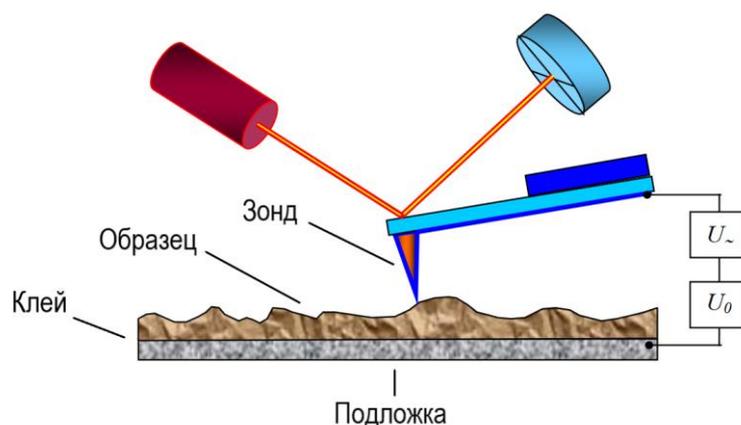


Рис. 2 Схема проводящей системы

#### 3.2 Протокол измерения

Перед началом проведения измерения, должна быть выполнена подготовительная работа: включение контроллера, запуск программы «NovaPx», а также подготовка образца.

Процедурная последовательность:

1. Подготовленный образец, прикрепленный на металлический диск, устанавливаем на держатель микроскопа, для установки зонда и образца, открываем дверцу микроскопа, нажав на клавишу «Open door». Устанавливаем зонд:

- а) Переворачиваем голову (крутим на себя).
- б) Поднимаем медную лапку в левой части АСМ головки.
- в) Берем пинцетом чип (зонд) под углом  $45^\circ$  консолью на себя и устанавливаем в лапку, пододвигая боковыми движениями.
- д) Опускаем лапку для зажатия чипа.
- е) Переворачиваем голову обратно.

2. Предварительно, перед установкой зонда во вкладке «Approach» регулируем положение держателя кнопкой «Remove» (для неизвестных типов образцов стандартное положение высоты держателя приблизительно -1.5 мм).

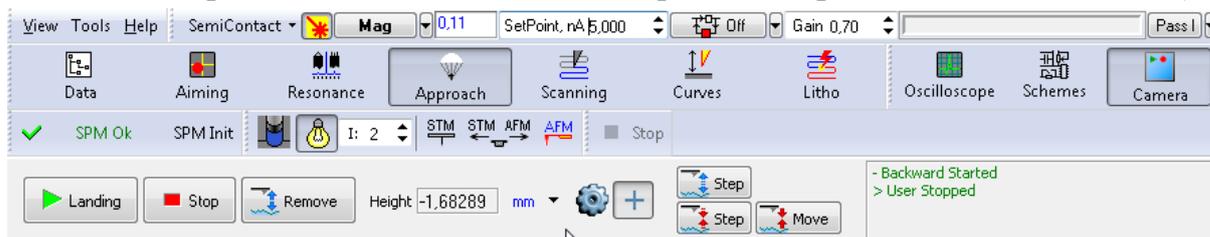


Рис. 3 Панель управления окна «Approach»

3. Включаем камеру, нажав клавишу «Camera», в маленьком окне появится изображение зонда и образца. Проверяем, что зонд находится в перпендикулярном положении относительно держателя зонда. После этого не забываем закрыть калитку микроскопа при помощи кнопки «Close door».

4. Настраиваем положение зонда относительно выбранной нами локации на образце при помощи кнопок «StageY», «StageY», «Zoom» и «Focus».

5. Настраиваем оптико-электронную систему детектирования АСМ:

а) Переходим во вкладку «Aiming», открывается окно 4-х секционного фотодетектора. В окне камеры, при наименьшем зуме, и мышкой указываем на острие, зажав клавишу «Shift».

б) Затем нажимаем на кнопку «Auto», производится автоматическая регулировка положения лазера, он должен попадать на конец балки (кантилевера).

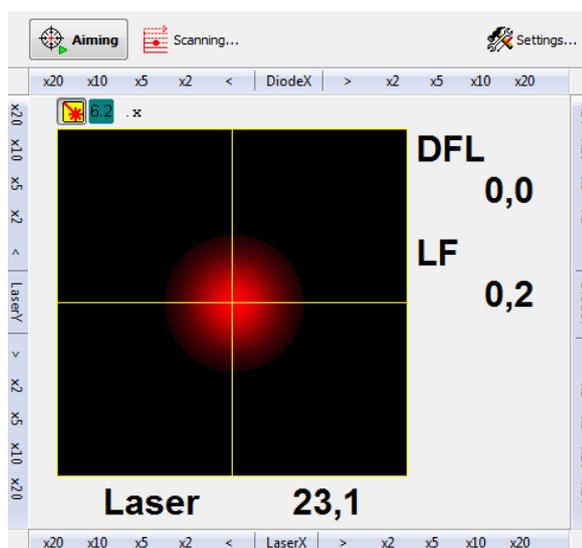


Рис. 4 Aiming Movers

6. Проводим процедуру измерения резонансного контура. Снимается амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) колебаний кантилевера в значениях в соответствии с выбранным типом зонда (выставляется диапазон в

кГц). Далее с помощью АЧХ автоматически находится пик резонанса и определяется его частота с точностью до 0.1 Гц.

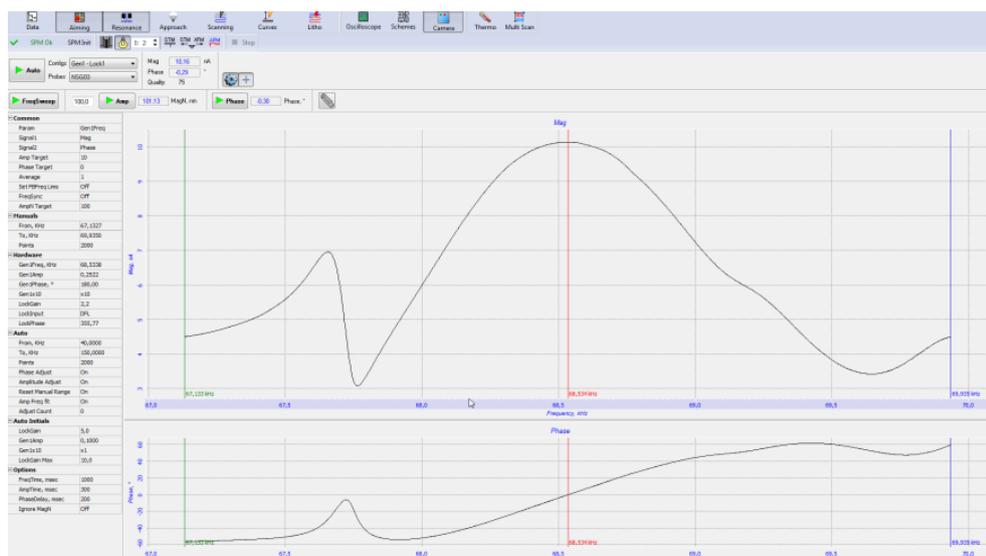


Рис. 5 Резонанс

7. Проводим процедуру подводки образца к зонду:

а) Заходим во вкладку «Approach». Нажимаем кнопки «Mag» и «Phase», включаются сигналы амплитуды и фазы колебаний кантилевера соответственно. Мы включаем эти сигналы, чтобы увидеть в дальнейшем шаге момент приземления (касание образцом зонда).

б) Запускаем процедуру подводки зонда к образцу кнопкой «Landing».

8. Проводим выбор параметров сканирования и запуск сканирования во вкладке «Scanning».

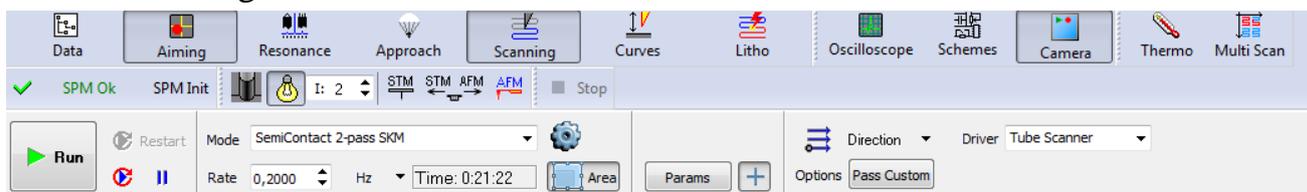


Рис. 6 Панель управления окна «Scanning»

9. Открыв вкладку «Scanning», выбираем режим сканирования «SemiContact 2 Pass SKM» в списке «Mode».

10. Нажимаем «Params» и выбираем регистрируемые сигналы:

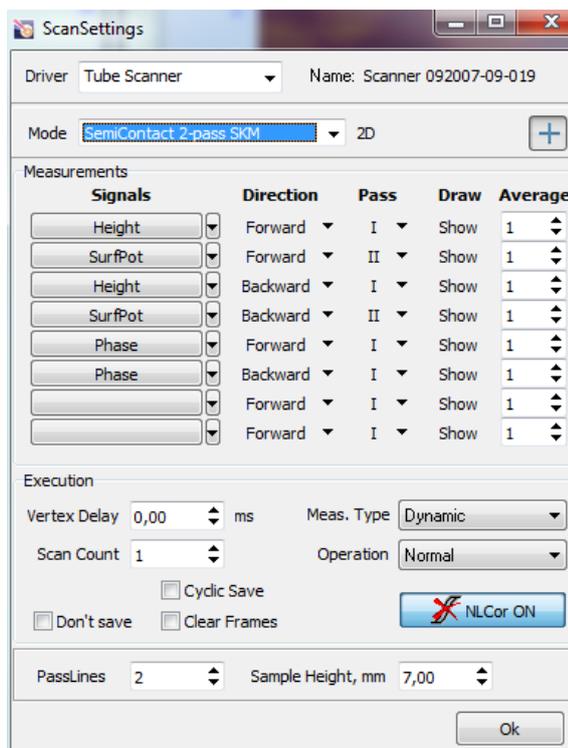


Рис. 7 ScanSettings

11. Нажимаем на кнопку «Area» и в дополнительном окне выбираем параметры сканирования: область сканирования, ширину и длину области сканирования, скорость сканирования, разрешение сканирования.

12. Нажимаем на кнопку «Run», начинается построчное сканирование поверхности образца.

13. После окончания сканирования, сохраняем полученные данные во вкладке «Data». Завершаем работу.

14. Проводим обработку данных в программе «Image Analysis», т. к. наряду с полезной информацией, наши снимки содержат также много побочной информации, искажающей интересующие нас данные о поверхности образца.

#### 4. Результаты

Для измерения поверхностного потенциала в окне оптического микроскопа, встроенного в АСМ, была выбрана данная область (примерный размер области выделенным красным цветом – 60x60 мкм в соответствии со шкалой справа, размер наших сканов был 10x10 мкм):

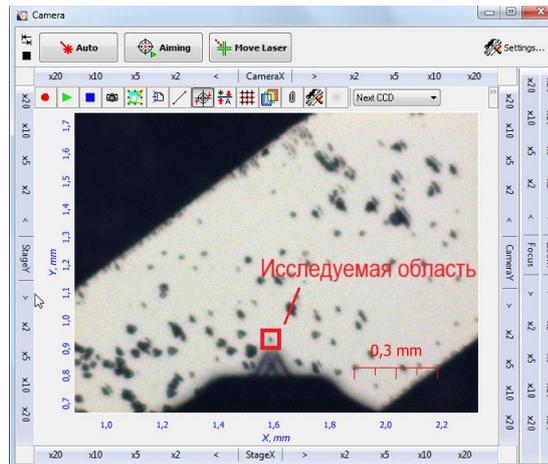


Рис. 8 Исследуемая область

Во время исследования области проводилась одновременная запись 3 типов сигналов: высоты, поверхностный потенциал и фазы, каждый из них был снят в 2 направлениях: «forward» и «backward». Съёмка в обоих направлениях не занимает дополнительного времени, но при этом она позволяет оператору АСМ выбрать оптимальное изображение, т. к. резкость перепада высот объектов на поверхности может повлиять на качество снимка в одном из направлений. После съёмки 1 скана были получены следующие первичные снимки (т. к. 6 каналов, изображений тоже 6):

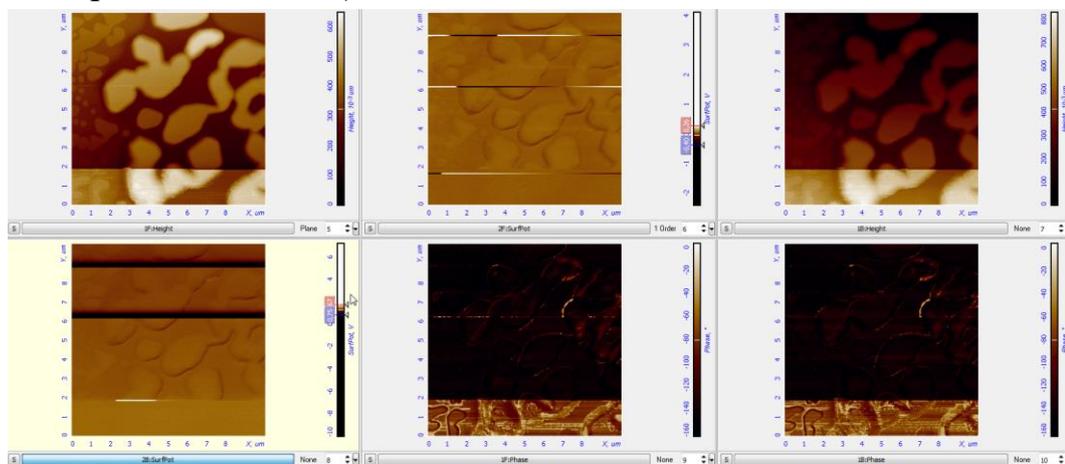


Рис. 9 Снимки исследуемой поверхности

На снимке топографии при 2D визуализации каждой точке поверхности ставится в соответствие цвет, для этого используются градиентные палитры. В градиентных палитрах раскраска изображения производится тоном определенного цвета, в соответствии с высотой точки поверхности, чем выше точка, тем светлее тон ей присваивается. Тут стоит особенно отметить, что цвета получаемых изображений не имеют ничего общего с цветом объектов, видимых человеческим глазом. Поскольку цветность объектов и материалов, как категория, возможна благодаря отражению света в видимой области

электромагнитного излучения (примерно 300-800 нм), а размер объектов, регистрируемых АСМ – гораздо ниже, то на снимке мы видим фиктивные цвета. Они нужны лишь для отображения рельефности поверхности. Основной цвет присваивается любой, на выбор оператора АСМ, и иногда если цвет объекта ясно известен: золото, серебро, бумага, - то присваивается соответствующий основной цвет: жёлтый, серый, белый.

Сравним области топографии (рис. 10) и поверхностного потенциала (рис. 11) после минимальной обработки данных:

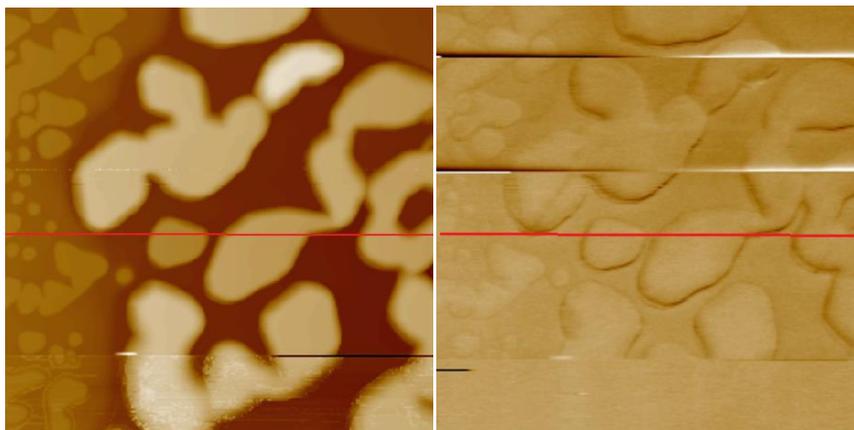


Рис. 10 Снимок топографии

Рис. 11 Снимок потенциала

Для анализа особенности распределения поверхностного потенциала нашей области на поверхности образца необходимо выбрать линию (профиль), по которой мы будем просматривать уровень потенциала. Рассмотрим потенциал профиля (рис. 12), который выделен красным цветом на рис. 10 и рис. 11:

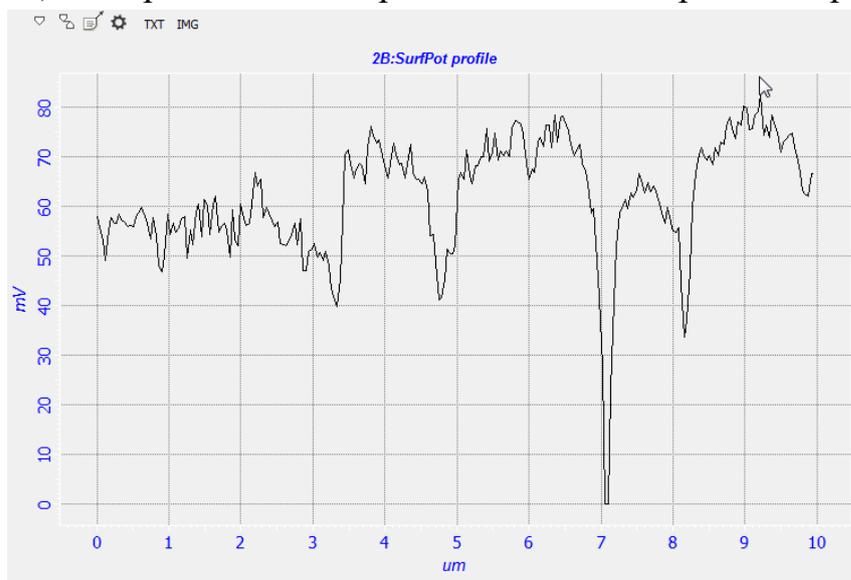


Рис. 12 Поверхностный потенциал

Сопоставляя профиль топографии и потенциала можно сделать вывод, что высокие области нашей поверхности имеют больший поверхностный потенциал, который составляет значение для объектов примерно 70. Потенциал

более гладкой поверхности равняется примерно 55 мВ, что по геометрическому расположению на топографии соответствует подложке из кремния. Можно посчитать разницу в поверхностном потенциале между кремнием и германием, которая составляет примерно 15 мВ. В рамках выполненной работы ставилась задача измерение разницы поверхностного электрического потенциала для наших материалов методом КЗМ, что нам и удалось сделать, но в перспективе можно рассчитать работу выхода, которая непосредственно связана с поверхностным потенциалом и сравнить ее с табличными значениями работы выхода электронов для кремния и германия. Точные количественные измерения поверхностного потенциала с помощью метода зонда-Кельвина обычно проводят в вакууме. Мы же проводили измерения в условиях окружающей среды, где на разность контактных потенциалов влияют поверхностные загрязнения зонда и образца (в частности, уровень влажности комнатного воздуха), что дополнительно затрудняет определение собственных характеристик кремния и германия.

## **5. Вывод**

Таким образом, в работе была изучена процедура проведения электрофизического эксперимента, используя метод Кельвин-зонд микроскопии. Показана применимость этого метода для изучения топографии и электрических свойств. Получены данные о поверхностном потенциале кремний-германиевых микроструктур, с помощью которых нам удалось измерить разницу потенциалов для наших материалов на поверхности образца. Что означает, что исследование методом Кельвин-зонд микроскопии при помощи микроскопа Солвер-НЕКСТ было проведено корректно.

## **6. Список литературы**

1. T. R. Albrecht, P. Grutter, D. Horne and D. Rugar 1991. J. Appl. Phys. Lett. 58, 1991.
2. Alexander Shklyayev, Leonid Bolotov, Vladimir Poborchii, Tetsuya Tada. Properties of three-dimensional structures prepared by Ge dewetting from Si(111) at high temperatures, 2015.
3. A. A. Shklyayev, L. Bolotov, V. Poborchii, T. Tada, K. N. Romanyuk. Kelvin force and Raman microscopies of flat SiGe structures with different compositions grown on Si(111) at high temperatures, 2018.
4. В. Л. Миронов. Основы сканирующей зондовой микроскопии, 2014. Е. Г. Дедкова, А. А. Чуприк, И. И. Бобринецкий, В. К. Неволи. Приборы и методы зондовой микроскопии, 2011.