

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра материаловедения, технологии  
и управления качеством

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ  
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ С НАНОСЛОЯМИ  
АМОРФНОГО КРЕМНИЯ И ПОЛИЭТИЛЕНИМИНА НА  
ПОВЕРХНОСТИ**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 4 курса 421 группы  
направления 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»  
факультета нано- и биомедицинских технологий

Анфеногорова Андрея Андреевича

Научный руководитель  
доцент, к.ф.-м.н., доцент  
\_\_\_\_\_

должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

С.В. Стецюра

\_\_\_\_\_

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой  
профессор, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_

должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

С.Б. Вениг

\_\_\_\_\_

инициалы, фамилия

Саратов 2019

**Введение.** Исследование многослойных пленочных структур нанометровой толщины на различных подложках в последние годы достаточно интенсивно развивается [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Важным элементом систем автоматического контроля и управления машинами и технологическими процессами являются разнообразные датчики, преобразующие физические величины в электрический сигнал. Один из способов повышения чувствительности датчиков состоит в применении в качестве исходных материалов тонкопленочных полупроводниковых веществ [**Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден.**], к которым относится и аморфный кремний (a-Si). Данный тонкопленочный полупроводник технологичен и обладает высокими оптическим поглощением и фоточувствительностью в видимой области спектра. Использование этого полупроводника в датчиках автоматических систем в настоящее время незначительно.

Для использования полупроводниковых структур в биологии и медицине в качестве биодатчиков необходима модификация поверхности полупроводника с помощью органических монослоев [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**], их проводят с различными целями для широкого круга применений. Сравнительно низкая стоимость органических полупроводников и технологии их изготовления является главным стимулом в исследовании их свойств, в частности полимеров с сопряженными связями, олигомеров и низкомолекулярных органических веществ [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Целью работы является получение и исследование влияния слоя аморфного кремния (a-Si) различной толщины на вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные характеристики (ВФХ) структуры Si/SiO<sub>2</sub> и оценка влияния органического слоя полиэлектролита на ВФХ указанных структур.

Для выполнения цели работы были поставлены и выполнены следующие задачи:

- изучить тип контакта кремния с алюминием и титаном по литературным данным;
- изучить технологию нанесения металлических контактов с помощью магнетронного распыления и термического напыления (испарения) пленочных материалов;
- получить ВАХ слоя аморфного кремния и оценить его удельное сопротивление;
- изучить технологию нанесения органического слоя на примере полиэтиленimina (ПЭИ)
- изучить ВАХ полученных МДП структур и провести их анализ;
- изучить ВФХ МДП структур и провести их анализ
- оценить перспективы использования подобных многослойных гибридных структур.

Дипломная работа занимает 45 страницы и имеет 31 рисунок.

Обзор составлен по 36 информационным источникам.

Структура дипломной работы состоит в первой главе из введения и обзора литературы по теме “электрофизические характеристики МДП структур на основе кремния для создания биодатчиков”. Вторая глава состоит из экспериментальной части. А также заключение и список использованных источников.

Во введение рассматривается актуальность работы, устанавливается цель и выдвигаются задачи для достижения поставленной цели.

Первый раздел представляет собой определение и описание МДП структур на основе кремния, а также модификации поверхности полупроводникового кремния разных типов проводимости органическими покрытиями и аморфным кремнием. Изучение контактных явлений между некоторыми металлами и кремнием, и способами нанесения этих металлов на кремний

Во втором разделе работы представлено измерение ВАХ и ВФХ кремниевых пластин разных типов проводимости с нанесённым слоем аморфного кремния и органической плёнкой, и их анализ.

### **Основное содержание работы**

**Ферментативные биосенсоры, работающие на эффекте поля:** в которых используются физико-химические преобразователи различных типов; оптические, акустические, кондуктометрические, калориметрические, электрохимические и компонент биологической системы.

Определены основные типы датчиков и чем они определяются определяется. И немного о применении биодатчиков в разных отраслях человеческой деятельности, от пищевой промышленности до медицины.

**Выпрямляющие и омические контакты в МДП-структурах на основе кремния.** Контакты между полупроводником и металлом широко используются для формирования внешних выводов от полупроводниковых приборов (невыпрямляющие контакты) и создание быстродействующих диодов и транзисторов (выпрямляющие контакты).

Это явление основано на разности работ выхода между материалами, приведёнными в контакт. Так при приведении в контакт полупроводника и металла могут образовываться как омические контакты, если разность работ выхода между полупроводником n-типа проводимости и металлом отрицательная, а для полупроводника с p-типом проводимости – положительная, когда для выпрямляющего контакта это наоборот.

Контакт диэлектрик-металл возникает при приведении в контакт металла и диэлектрика. Различают омический, нейтральный и блокирующий тип контакта. Как и для полупроводника, металл с диэлектриком образует омический контакт, когда разность работ выхода меньше нуля, если работа выхода из диэлектрика меньше работы выхода из металла, то контакт называют блокирующим и при равной работе выхода – нейтральный.

**Методы нанесения покрытий на подложку.** Для получения металлических контактов на кремнии использовали два метода нанесения на подложку, это метод магнетронного распыления и термическое нанесение тонких пленок.

Магнетронное распыление – технология нанесения тонких плёнок на подложку с помощью катодного распыления мишени в плазме магнетронного разряда – диодного разряда в скрещенных полях.

Термическое нанесение же заключается в испарении металла или сплава в вакууме и конденсации его паров на поверхности подложки.

Для органических тонких пленок используют несколько методов получения: нанесение на вращающуюся подложку, термическое осаждение, химическое и электрохимическое осаждение, метод Ленгмюра-Блоджетт и послойная сборка. В зависимости от методов получения пленки различаются по своим характеристикам.

**Кремниевые структуры на основе монокристалла, аморфного кремния.** Слои аморфного кремния представляют особый интерес для фотоэлектрических применений. Фактически, когда тонкие слои аморфного кремния покрывают поверхность кристаллического кремния (с-Si), образование центров рекомбинации исключается, и образуются высококачественные границы раздела, что представляет большой интерес для гетероперехода с собственным тонким слоем. Этот тип фоточувствительного элемента состоит из гетероперехода с-Si/a-Si, и между обоими слоями вводится очень тонкая пленка (~ 5 нм) собственного аморфного кремния (ia-Si: H) [5]. Слой ia-Si: H насыщает оборванные связи поверхности кремния, и, следовательно, эта поверхность пассивируется.

**Описание исследуемой структуры и технологии её получения.** В дипломной работе рассматривается два типа МДП структур, общий вид которых показан на рисунке 1. Первый тип структур состоит из подложки монокристаллического кремния р-типа толщиной ~400 мкм с удельным сопротивлением 4 Ом.см и нанесённого на него диэлектрического слоя

аморфного кремния, толщина которого в первом случае 50 нм, а во втором –100 нм.

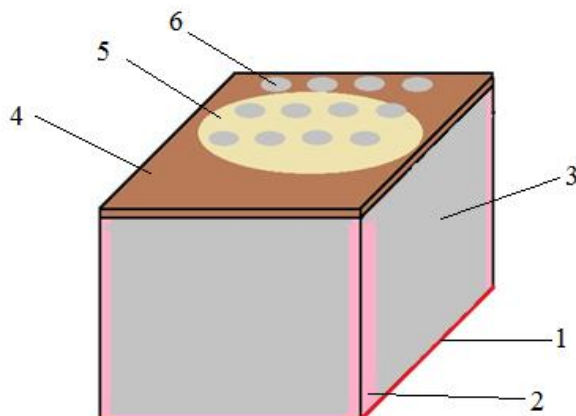


Рисунок 1 – Кремниевая структура, где 1 – нижний контакт Ti, 2 – поверхностный слой SiO<sub>2</sub>, 3 – кремниевая подложка, 4 – аморфный кремний, 5 –полиэтиленимин, 6 – верхний контакт Al.

Второй тип представляет собой подложку монокристаллического кремния n-типа проводимости толщиной ~400 мкм и нанесённого на него диэлектрического слоя аморфного кремния, толщина которого в первом случае 50 нм, а во втором – 100 нм. Аморфный кремний получали в соответствии с технологией, разработанной авторами [6], на установке магнетронного распыления. Размер каждой изучаемой подложки составлял примерно 1,21 см<sup>2</sup>.

Кремниевые подложки обрабатывались в перекисно-аммиачном растворе для удаления механических загрязнений с их поверхности: перекись водорода (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) окисляет кремний и образует слой оксида кремния (SiO<sub>2</sub>) непосредственно на поверхности подложки, а аммиак подтравливает образовавшийся слой SiO<sub>2</sub>, что способствует удалению с поверхности кремниевых пластин загрязнений.

Нижний контакт Ti наносился методом магнетронного напыления на маску с вырезом в виде квадрата для исключения подпыления торцов подложки металлом. Такой выбор метода и материала был обусловлен тем, что титан более химически устойчив, но при этом более тугоплавкий чем алюминий (у алюминия температура плавления 660,3°C, а у титана -1668°C), а метод

магнетронного распыления обеспечивает лучшую адгезию металла к подложке, чем метод термического испарения, и более подходит для распыления тугоплавких металлов. Химическая стойкость контакта и адгезия необходимы, поскольку предполагалось дальнейшее использование данной структуры в растворах электролитов (для получения слоя ПЭИ). После нанесения нижнего контакта на поверхность, свободную от контакта, наносили полиэтиленимин (ПЭИ) в течение 30 минут, таким образом, чтобы он не попал на нижний контакт и не занимал всю площадь (по центру подложки). Верхние контакты (контактные круглые площадки площадью 1 мм<sup>2</sup>) наносился методом термического испарения в вакууме на ВУП-5, таким образом, чтобы контактные площадки располагались и на ПЭИ, и на «чистом» Si. Метод был выбран как более щадящий для того, чтобы не повредить слой ПЭИ. Материалом для верхнего контакта является алюминий, так как метод термического испарения адаптирован к этому материалу.

**Измерение и анализ ВАХ исследуемых структур на основе кремния.** Для определения сопротивления пленки измеряли ВАХ. для a-Si с толщиной слоя 100 нм на рисунке 2.

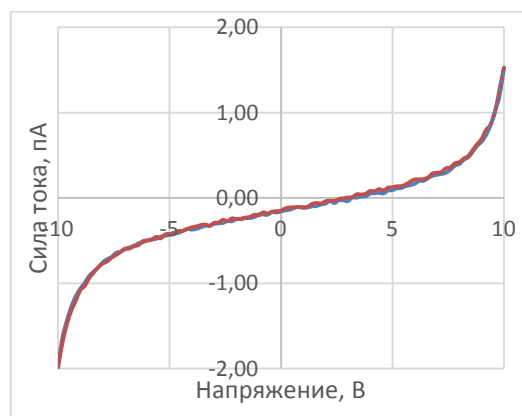


Рисунок 2 – ВАХ a-Si толщиной 100 нм

На нем видна близкая к симметричной ВАХ, это подтверждает вывод о том, что влияние проводящей подложки в случае слоя a-Si толщиной 100 нм слабо выражено, по крайней мере, на малых напряжениях (от -6 до 6 В). Рост тока начинается при напряжении ~7,7 – 8 В. Рассчитаем сопротивление и удельное сопротивление для a-Si толщиной 100 нм, используя участок от -6 до

6 В. Сопротивление равно  $1,3 \cdot 10^{13}$  Ом, а удельное сопротивление  $1,3 \cdot 10^{10}$  Ом·см, что уже свойственно диэлектрикам. Для оценки сопротивления собственно a-Si без влияния проводящей подложки будем руководствоваться расчетом по рисунку 2. Таким образом, удельное сопротивление a-Si больше удельного сопротивления монокристаллического n-Si на 9-10 порядков. Следующим этапом снимали ВАХ полученных структур (рисунок 3).

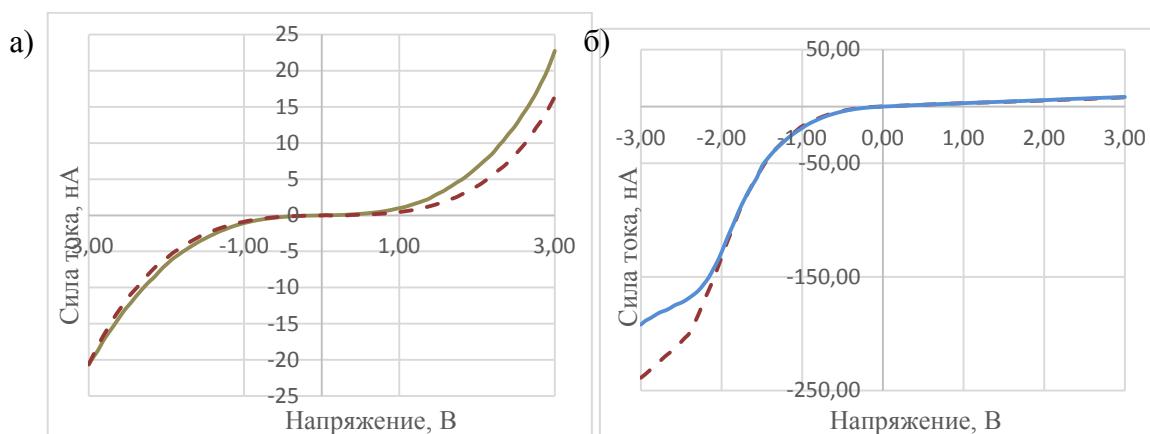


Рисунок 3 – ВАХ структуры на n-типе (а) и p-типе (б)

Анализ ВАХ образца Al/(a-Si50 нм)/p-Si/Ti (рисунок 3б) показал, что темновая характеристика является практически симметричной, но при освещении прямая ветвь характеристики не совпадает с обратной, из чего можно предположить, что в токе участвуют неравновесные (световые) носители заряда преимущественно одного знака – электроны.

#### **Измерение и анализ ВФХ исследуемых структур на основе кремния.**

ВФХ измеряли структуры с аморфным кремнием толщиной 50 и 100 нм при освещении и без него (рисунок 4).

Эта ВФХ говорит о том, что емкость верхней полки  $C_{\max}$  во многом определяется слоем аморфного кремния – увеличение толщины аморфного слоя в 2 раза привело к изменению ёмкости  $C_{\max}$  на 10 %, что связано не только с параметрами геометрической емкости, но и с уменьшением токов утечки через нанослой a-Si.



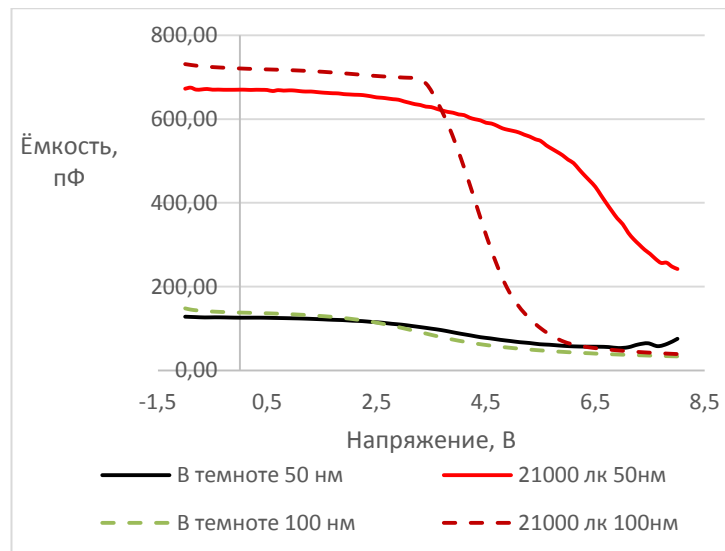


Рисунок 4 – ВФХ образцов p-Si/a-Si

**Заключение.** В ходе выполнения выпускной квалификационной работы получены следующие основные результаты:

1. По экспериментальным ВАХ изучен тип контактов исследуемых структур, что совпало с теоретическими данными.
2. Установлено, что нанесение слоев аморфного кремния и полиэтиленimina значительно влияет на вид ВАХ и значения токов.
3. Значения емкости структуры на основе p-Si сильно зависят от освещения структуры. При максимальной освещенности 21000 лк и минимальной частоте напряжения 1 кГц емкость  $C_{\max}$  увеличилась в 5 раз по отношению к значениям  $C_{\max}$  в темноте, а ёмкость  $C_{\min}$  – в 3 раза. Для n-типа освещение не так сильно влияет, как для p-типа, однако для структуры с ПЭИ повышение ёмкости происходит примерно на 2,7 % по сравнению с темновой, когда без ПЭИ происходил спад емкости при включении освещения.
4.  $C_{\max}$  структур на p-и n-типе проводимости во многом определяется слоем аморфного кремния – увеличение толщины аморфного слоя в 2 раза привело к изменению ёмкости  $C_{\max}$  на 10 %, что связано не только с параметрами геометрической емкости, но и с уменьшением токов утечки через нанослой a-Si. Наличие ПЭИ приводит к уменьшению ёмкости  $C_{\max}$  для p-полупроводника на 6,8 – 8,8 % на частоте 1 кГц, когда для n-полупроводника значение  $C_{\max}$  выросло на порядок.

6. Заключение о перспективности применения подобных структур на данном этапе основано на регистрации существенного влияния освещения на ВФХ гибридной структуры в целом (включая изменение сопротивления не фоточувствительного a-Si). Это происходит за счет диффузии в a-Si неравновесных НЗ, генерированных светом в моно-Si. В свою очередь, слой a-Si влияет на поверхностные свойства моно-Si, насыщая его поверхностные электронные состояния за счет многочисленных оборванных связей в a-Si.

#### **Список использованных источников**

1 Крылов, П. Н. Структура границы раздела и свойства контакта алюминий-кремний / П. Н. Крылов, С. А. Кривелевич, Е. А. Ускова // Химическая физика и мезоскопия. - 2011. - Т. 13, № 2. - С. 238-244.

2 Каррыев, А. Н. Тонкоплёночные датчики на основе аморфного кремния / А. Н. Каррыев, П. Н. Крылов, Н. К. Комарова // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. - 2012. - Т. 3, № 35. - С. 82-84.

3 Струнин, В. И. Влияние внешних параметров осаждения на структурные изменения в тонких пленках аморфного кремния / В. И. Струнин, Л. В. Баранова, Г.Ж. Худайбергенов // Вестн. Ом. ун-та. - 2015. - № 2. - С. 23-25.

4 Стецюра, С. В. Влияние фотоэлектронных процессов в полупроводниковой подложке на адсорбцию поликатионных и полианионных молекул / С. В. Стецюра, А. В. Козловский // Письма в ЖТФ. - 2017. - Т. 43, № 6. - С. 15-22.

5 García, H. Electrical Characterization of Amorphous Silicon MIS-Based Structures for HIT Solar Cell Applications / H. García et al. // Nanoscale Res Lett. - 2016. - 335p.

6 Митин, Д. М. Особенности роста тонких плёнок аморфного кремния, полученных методом магнетронного распыления / Д. М. Митин и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2015. - №6. - С. 31-37.