

*На правах рукописи*

КОЗЛОВСКИЙ АЛЕКСАНДР ВАЛЕРЬЕВИЧ

ФОТОСТИМУЛЯЦИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СЕНСОРНЫХ  
СТРУКТУР НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ И ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНОГО  
ПОКРЫТИЯ

Специальность 05.27.01 – твердотельная электроника,  
радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника,  
приборы на квантовых эффектах

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Саратов - 2019

Работа выполнена на кафедре материаловедения, технологии и управления качеством федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

**Научный руководитель:**

Кандидат физико-математических наук, доцент

**Стецюра Светлана Викторовна**

**Официальные оппоненты:**

Кузнецова Ирен Евгеньевна, доктор физико-математических наук, доцент, профессор РАН, ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН», г. Москва, главный научный сотрудник лаборатории электронных процессов в полупроводниковых материалах

Сысоев Виктор Владимирович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов, профессор кафедры «Физика», научный руководитель лаборатории сенсоров и микросистем

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «20» декабря 2019 г. в 17:30 на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 в Саратовском национальном исследовательском государственном университете имени Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, III корпус СГУ, 34 ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского (Саратов, ул. Университетская, 42).

Автореферат разослан «\_\_» октября 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.ф.-м.н., профессор



Аникин Валерий Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования:** В настоящее время активно разрабатываются новые физические принципы, используемые при создании твердотельных электронных приборов, в частности сенсоров на основе гибридных структур, содержащих органические и неорганические компоненты [1, 2], которые бы могли привести к существенному улучшению параметров и характеристик твердотельных сенсорных структур. Органическая компонента является неотъемлемой частью биосенсорных систем – их функциональным элементом. Наличие полупроводника в конструкции биосенсора становится необходимо, когда ставится задача совмещения биосенсоров с другими приборами и компонентами твердотельной электроники. В этом случае в качестве твердой подложки, на которую наносят функциональные органические слои, и которая выполняет функцию преобразования биохимического сигнала в электрический, используют полупроводник [3]. Для исследования и разработки физических принципов создания и совершенствования приборов с заданными свойствами на основе таких структур необходимо понимание явлений на границе раздела «полупроводник – органическое покрытие», а также учет взаимного влияния компонентов гибридной твердотельной структуры. Также для таких структур существует проблема получения органических покрытий с заданными структурными, морфологическими и физико-химическими параметрами, которая актуальна и далека от окончательного решения [4].

В качестве органических материалов часто используют полиэлектролитные молекулы, которые широко применяются для создания защитных и/или функциональных слоев на поверхности твердотельных полупроводниковых приборов и систем, а также для модификации свойств полупроводников. Поэтому для реализации управления этими свойствами и использования органических покрытий для модификации поверхности полупроводников необходимо понимать механизмы адсорбции (в первую очередь, электростатические) полиэлектролитных молекул, а также учитывать факторы (освещение, рН, температура, электрические поля, электромагнитные излучения и др.), влияющие на нанесение и характеристики органического покрытия полупроводника.

Поскольку большинство полупроводников в той или иной мере чувствительны к излучению оптического диапазона, то имеется достаточно много работ, посвященных фотостимулированным взаимодействиям полупроводникового материала с инородными молекулами и слоями на его поверхности [5, 6]. Но при этом нет комплексных исследований, направленных на подбор и обоснование режима освещения в процессе формирования и эксплуатации сенсорной гибридной системы, при котором за счет изменения и взаимовлияния полупроводника и чувствительного адсорбируемого слоя на его поверхности улучшались бы основные характеристики сенсора.

Таким образом, актуальной является задача улучшения параметров твердотельных сенсоров (селективность, чувствительность и др.) на основе гибридных структур «полупроводник/органические слои», решаемая исходя из результатов исследований фотостимулированных взаимодействий полупроводниковой подложки с адсорбируемыми органическими слоями во время создания и эксплуатации сенсорной структуры.

**Целью диссертационной работы** является установление связи фотоэлектронных процессов в полупроводниковой структуре с параметрами полиэлектролитных функциональных слоев на её поверхности, а также этих параметров с электрофизическими, фотоэлектрическими и сенсорными характеристиками гибридной структуры, сформированной методом последовательного нанесения полиэлектролитных молекул на поверхность кремниевых подложек различного типа проводимости; улучшение чувствительности биосенсоров на основе таких структур для распознавания и количественного определения химических веществ в биологических жидкостях.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены и решены следующие **задачи исследования**:

- 1) экспериментальное и теоретическое исследование особенностей фотоэлектронных процессов в полупроводниковых структурах при формировании полиэлектролитного покрытия на её поверхности в условиях фотостимуляции в зависимости от типа проводимости полупроводника;
- 2) установление зависимости параметров полиэлектролитных слоев (таких как толщина, шероховатость, поверхностный потенциал) от

- характеристик освещения (интенсивность, длина волны) полупроводника в процессе нанесения на его поверхность полиэлектrolитных слоев;
- 3) теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение влияния фотостимуляции полупроводника в процессе нанесения на него полиэлектrolитного покрытия на электрофизические (вольт-амперные, вольт-фарадные и частотные), а также сенсорные характеристики гибридной структуры Si/SiO<sub>2</sub>/полиэтиленмин (ПЭИ);
  - 4) реализация эффекта фотопамяти - длительной релаксации поверхностного потенциала после выключения освещения, на полупроводниковой подложке монокристаллического кремния со слоем аморфного кремния (*a*-Si) для воздействия на процесс осаждения на его поверхность полиэлектrolитного покрытия после выключения освещения;
  - 5) разработка математической модели вольт-фарадной характеристики гибридной структуры Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ, помещенной в раствор электролита, учитывающей влияние освещения в процессе её создания;
  - 6) экспериментальное исследование и теоретическое обоснование влияния фотостимуляции полупроводника на этапе нанесения молекул глюкозооксидазы (GOx), до и после добавления глюкозы в раствор электролита на чувствительность к глюкозе гибридных структур Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ/ GOx, помещенных в электролит.

#### **Научная новизна работы**

- 1) Показано, что толщина буферного слоя ПЭИ уменьшается от времени освещения в процессе создания гибридной структуры на основе полупроводника и это изменение происходит по экспоненциальному закону. Указанный эффект объясняется процессом туннелирования неравновесных носителей заряда (ННЗ), генерируемых в Si при освещении, через слой SiO<sub>2</sub>, стимулированного электрическим полем иммобилизованных молекул ПЭИ.
- 2) Показано, что освещение увеличивает степень электрической пассивации Si полиэлектrolитным покрытием. Этот эффект зависит от типа проводимости Si, интенсивности освещения, длины волны оптического излучения и определяется процессами перезарядки электронных состояний при освещении и туннелировании

электронов в слой  $\text{SiO}_2$ , стимулированного электрическим полем адсорбируемых ионов.

- 3) Обнаружено, что эффект сохранения заряда на поверхностных электронных состояниях границ раздела  $n\text{-Si}/a\text{-Si}/\text{ПЭИ}$  связан с наличием изолированных оборванных связей в  $a\text{-Si}$  и знаком их заряда.
- 4) Разработанная математическая модель вольт-фарадных характеристик структуры «органическое покрытие-оксид-полупроводник», помещенной в раствор электролита, построена с учетом изменений, вносимых фотостимулированным осаждением полиэлектролитного покрытия и процессом туннелирования ННЗ через слой  $\text{SiO}_2$ , стимулированного электрическим полем адсорбируемых ионов.

#### **Практическая значимость работы**

- 1) Реализация режима фотостимулированного нанесения молекул  $\text{GOx}$  на поверхность структуры  $n\text{-Si}/\text{SiO}_2/\text{ПЭИ}$  приводит к значительному увеличению её чувствительности к глюкозе (в 3 раза) по сравнению с осаждением  $\text{GOx}$  в темноте, что полезно учитывать при изготовлении емкостного полевого биосенсора.
- 2) Увеличение длительности релаксации заряда поверхностных электронных состояний после выключения освещения, достигнутое при формировании на поверхности структуры  $n\text{-Si}/\text{SiO}_2$  наноразмерного слоя аморфного кремния позволяет проводить фотостимуляцию кремниевой подложки до погружения в раствор полиэлектролита, что актуально при необходимости локальной фотостимуляции полупроводниковой подложки.
- 3) Разработанная математическая модель вольт-фарадных характеристик структуры на основе монокристаллического кремния со слоем полиэтиленimina, погруженной в электролит, позволяет теоретически определить изменение чувствительности сенсора на основе гибридной структуры, полученной с применением метода фотостимулированного нанесения полиэлектролитного покрытия.
- 4) По результатам исследований получены 2 патента РФ на изобретения: на «Способ электрической пассивации поверхности монокристаллического кремния» и на «Способ изготовления биосенсорной структуры».

#### **Положения, выносимые на защиту**

- 1) Воздействие на кремниевую структуру светом с длинами волн из

- области основного поглощения Si во время нанесения наноразмерного слоя ионизованных молекул полиэтиленimina (ПЭИ) на её поверхность снижает плотность заряженных поверхностных электронных состояний (эффект электрической пассивации) в Si в 10-20 раз по сравнению с темновым осаждением.
- 2) Слой аморфного кремния (*a*-Si) толщиной 100 нм на поверхности монокристаллической пластины Si увеличивает время релаксации поверхностного потенциала структуры Si/*a*-Si после её освещения и изменяет влияние освещения на результат нанесения на её поверхность отрицательно заряженных молекул фермента глюкозооксидазы (GOx) из раствора: для структур *n*-Si/*a*-Si/ПЭИ освещение во время адсорбции увеличивает относительное изменение площади покрытия поверхности подложки молекулами GOx по сравнению с нанесением в темноте на 140-150 %, а для *p*-Si/*a*-Si/ПЭИ – уменьшает на 70-75 %.
  - 3) Разработанная математическая модель вольт-фарадной характеристики структуры на основе Si/SiO<sub>2</sub> со слоем полиэтиленimina, погруженной в электролит, позволяет количественно прогнозировать изменение вольт-фарадных характеристик указанной структуры, полученной с применением метода фотостимулированного нанесения полиэтиленimina, благодаря учету процессов генерации неравновесных носителей заряда в Si при освещении и их туннелирования из Si к «медленным» состояниям в SiO<sub>2</sub>, стимулированного электрическим полем иммобилизованных молекул полиэтиленimina.
  - 4) Освещение полупроводника в процессе нанесения на него слоя полиэтиленimina приводит к большему сдвигу потенциала плоских зон (до 35 %), чем в случае осаждения в темноте, и к увеличению чувствительности сенсорной структуры к pH раствора электролита на 20 – 25 %.
  - 5) Освещение Si *n*-типа на этапах создания полимерного (буферного) и ферментного (биочувствительного) слоев на его поверхности приводит к повышению чувствительности к глюкозе биосенсорной структуры типа Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ/GOx примерно в 3 раза, что обусловлено соответствующим повышением плотности иммобилизованных молекул фермента за счет увеличения сил электростатического притяжения GOx к подложке при освещении и стабилизации генерированного освещением заряда на

поверхностных электронных состояниях границ раздела Si/SiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub>/ПЭИ после выключения освещения за счет увеличения пассивирующего эффекта молекул ПЭИ.

**Достоверность** выполненных исследований диссертации определяется использованием в ходе работы современных методов анализа экспериментальных результатов, применением автоматизированных аппаратно-программных технологических и измерительных комплексов, согласованием теоретических и практических результатов с литературными данными других авторов, использованием статистических методов обработки полученных результатов.

**Личный вклад автора.** Экспериментальные исследования, построение математических моделей и компьютерное моделирование выполнены лично автором. Часть измерений были проведены совместно с научными сотрудниками Саратовского университета, что отражено в соответствующих публикациях. Обсуждение и анализ полученных результатов проводились при участии научного руководителя и соавторов работ.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях и симпозиумах: Всероссийская конференция молодых учёных «Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2013, 2014, 2016, 2018, 2019), Всероссийская научная школа-семинар "Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами" (Саратов, 2014, 2019), Международная школа-семинар «Nanoparticles, Nanostructured Coatings and Microcontainers: Technology, Properties, Applications» (Саратов, 2015), Всероссийская научная школа-семинар "Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине" (Саратов, 2013-2015), Международная научно-техническая конференция «Технологии микро- и нанoeлектроники в микро- и наносистемной технике» (Москва, 2016), Международная научно-техническая конференция "Микро- и нанотехнологии в электронике" (п. Эльбрус, 2017, 2018), Симпозиум «Современная химическая физика» (п. Шепси, 2015, 2016, 2018), 5 Международная школа-конференция "Saint-Petersburg OPEN-2018" по оптоэлектронике, фотонике, нано- и биотехнологиям (Санкт-Петербург, 2018), Международная конференция «Scanning Probe



Microscopy» (Екатеринбург, 2017-2019), Всероссийская молодежная конференция «Новые материалы и технологии: состояние вопроса и перспективы развития» (Саратов, 2014).

**Материалы диссертационной работы использовались** при выполнении исследований в рамках проектов:

1) гранты РФФИ № 14-02-31089-мол\_а «Создание хемо- и биосенсоров на основе гибридных структур «полупроводник-органический слой-нанообъекты»» (2014 г.); №16-08-00524-а «Формирование регулируемого освещением пространственного и потенциального рельефа на границе раздела «полупроводник-органическое покрытие»» (2016-2018 гг);

2) грант Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (У.М.Н.И.К. - 2014), проект «Разработка электрохимического биодатчика с улучшенными характеристиками» 2015–2016 гг.;

3) гранты Немецко-российского междисциплинарного научного центра (G-RISC), проект № В-2017b-5 "Fabrication of multienzymatic coatings by photo-assisted adsorption of enzyme molecules onto a silicon substrate" (2017 г.); проект № Р2018a-10 "Random sequential adsorption model for describing kinetics of photo-assisted adsorption of polyelectrolyte microcapsules on silicon substrates" (2018 г.).

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликовано 36 печатных работ – 5 статей опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России (из них 4 индексируются базами Web of Science и Scopus), 2 статьи в профильных изданиях, индексируемых в базе Scopus, и 29 работ – в трудах конференций. Получено 2 патента РФ на изобретения.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения и списка литературы. Основная часть работы изложена на 160 страницах машинописного текста, включая 18 страниц библиографии, содержащей 166 наименований источников. Работа содержит 40 рисунков и 5 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость результатов. Приводятся положения, выносимые на защиту, а также сведения о публикациях и апробации работы.

**Раздел 1** содержит обзор и анализ научной периодической литературы, характеризующей накопленные за последнее время результаты в области технологии создания гибридных сенсорных структур на основе Si и органического покрытия, а также принципы действия и регистрации сигнала твердотельных биосенсоров на основе таких структур.

**Раздел 2** содержит экспериментальные результаты, показывающие влияние параметров освещения, типа проводимости и удельного сопротивления полупроводника на электрофизические, фотоэлектрические и морфологические характеристики гибридных структур на основе Si и органического покрытия. Проведена оценка влияния адсорбированного слоя ПЭИ на вольт-амперные характеристики кремниевой структуры, рассчитаны значения коэффициента неидеальности и эффективной высоты потенциального барьера (таблица 1), сделаны выводы о механизме токопереноса в случае нанесения молекул ПЭИ на *n*-Si и *p*-Si.

Таблица 1 - Значения эффективного потенциального барьера  $\varphi_B$  и коэффициента неидеальности  $n$  для Si после перекисно-аммиачной обработки и после пассивации слоем ПЭИ

Расчетные параметры	Si/SiO <sub>2</sub> без ПЭИ		Si/SiO <sub>2</sub> , пассивированная ПЭИ			
			В темноте		При освещении	
	<i>p</i> -Si, 10 Ω·см	<i>n</i> -Si, 10 Ω·см	<i>p</i> -Si, 10 Ω·см	<i>n</i> -Si, 10 Ω·см	<i>p</i> -Si, 10 Ω·см	<i>n</i> -Si, 10 Ω·см
$n$	1,02	1,16	1,02	1,20	1,05	1,17
$\varphi_B, мВ$	681	728	718	713	899	670

Также были измерены вольт-фарадные характеристики (ВФХ) и частотные зависимости емкости при приложении напряжения перпендикулярно поверхности подложек (Рис. 1, 2). Так как вид ВФХ всех типов исследуемых структур соответствовал высокочастотным (Рис.1), то это позволяет применить известную [7] методику расчета плотности поверхностных электронных состояний (ПЭС)  $N_{ss}$  из значений емкости и потенциала плоских зон.

Из частотных характеристик в диапазоне частот 1 кГц – 1 МГц (Рис. 2), были рассчитаны времена релаксации заряда ПЭС:

$$\tau = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{C_1^2 - C_2^2}{(C_2 \cdot f_2)^2 - (C_1 \cdot f_1)^2}} \quad (1)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — значения емкости на частотах  $f_1$  и  $f_2$  в Гц, соответственно.

Значение частоты  $f_2$  выбиралось таким, чтобы величина емкости на этой частоте была в  $e$  раз меньше, чем при  $f_1$ .

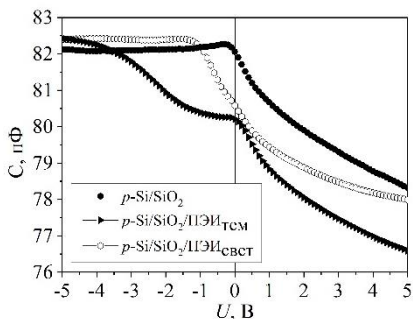


Рис. 1. Типичные ВФХ структур на основе  $p$ -Si, измеренные на частоте 400 кГц

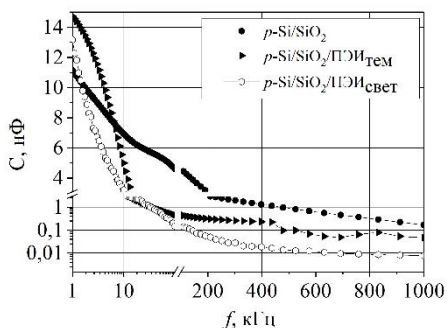


Рис. 2.  $C$ - $f$  характеристики исследуемых структур на основе пластин  $p$ -Si

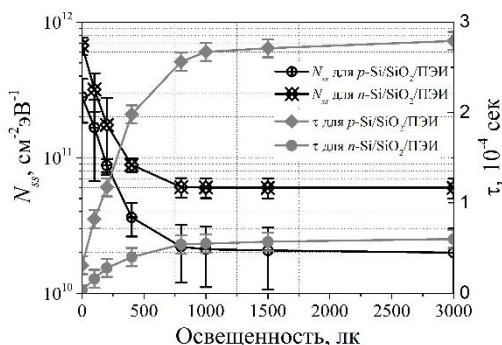


Рис. 3 - Влияние интенсивности освещения в процессе нанесения ПЭИ на Si/SiO<sub>2</sub> на  $N_{ss}$ , (черные линии) и  $\tau$  (серые линии)

Результаты расчета  $\tau$  и  $N_{ss}$ , полученные в результате обработки экспериментальных ВФХ для всех типов полученных структур, приведены на Рис.3, из которого следует, что наибольшее изменение параметров происходило до значений освещенности 800–1000 лк.

Эффект фотостимулированной пассивации поверхности кремния

полиэлектролитом объяснен с помощью модели перезарядки электронных состояний: при освещении Si светом из области его основного поглощения генерируются электронно-дырочные пары, которые разделяются полем вблизи границы Si/SiO<sub>2</sub>. Величина и направление электрического поля определяются эффективным зарядом ПЭС, ловушек в оксиде и адсорбированных на SiO<sub>2</sub> молекул, и в случае иммобилизации молекул ПЭИ этот заряд положительный. Поэтому при освещении во время адсорбции ПЭИ неравновесные электроны будут дрейфовать из объема Si к границе Si/SiO<sub>2</sub> и частично захватываться

«быстрыми» ПЭС. Наличие некомпенсированного положительного заряда молекул ПЭИ способствует как удержанию электронов на ПЭС, так и их туннелированию в слой SiO<sub>2</sub>, захвату ловушками внутри слоя и на «медленные» ПЭС поверхности оксида. В результате происходит стабилизация зарядового состояния этих уровней и электрофизических параметров структуры в целом. Таким образом, было сформулировано 1-е положение, выносимое на защиту.

Также, как и с поликатионными молекулами ПЭИ была проведена серия экспериментов осаждения полианионных молекул GOx на поверхность структуры Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ при разных уровнях освещенности. Результаты контролировались с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) и методом сканирующей зондовой микроскопии Кельвина (СЗМК) - Рис. 4, 5. По СЗМК-сканам были определены средние значения контактной разности потенциалов  $\varphi_{КРП}$  для «чистой» поверхности Si, после нанесения слоя ПЭИ, а также после нанесения слоя GOx. Получено, что после нанесения положительно заряженного ПЭИ на поверхность Si значение  $\varphi_{КРП}$  увеличивается на 750–1000 мВ независимо от типа проводимости Si. Последующее нанесение отрицательно заряженного слоя GOx на поверхность Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ в темноте приводит к уменьшению  $\varphi_{КРП}$  на 400–600 мВ, то есть изменение при темновом нанесении поверхностного потенциала ( $\delta\varphi_{КРП}$ ) структуры происходит в среднем на 45%. Значение  $\delta\varphi_{КРП}$  определяли по формуле:

$$\delta\varphi_{КРП} = \frac{\varphi_{КРП\_GOx} - \varphi_{КРП\_ПЭИ}}{\varphi_{КРП\_ПЭИ}} \cdot 100\% \quad (2)$$

где  $\varphi_{КРП\_ПЭИ}$  и  $\varphi_{КРП\_GOx}$  — средние значения контактной разности потенциалов, измеряемые после нанесения слоев ПЭИ и GOx, соответственно. Значение  $\delta\varphi_{КРП}$  прямо пропорционально изменению поверхностной плотности молекул фермента ( $N_{GOx}$ ), поэтому большее число иммобилизованных молекул на участке той же площади приведет к большему значению  $\delta\varphi_{КРП}$ . Результаты обработки СЗМК-сканов в соответствии с формулой (2) представлены на Рис.5.

Из Рис. 5 следует, что с увеличением уровня освещенности в случае использования пластины *p*-Si происходит уменьшение  $\delta\varphi_{КРП}$  по сравнению с адсорбцией GOx в темноте в 2–2,5 раза, а в случае *n*-Si — увеличение в 10–12 раз, что в свою очередь означает уменьшение и увеличение  $N_{GOx}$  при освещении Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ в момент нанесения, соответственно. Это коррелирует с анализом АСМ-изображений.

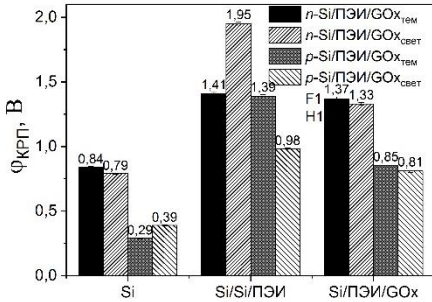


Рис. 4 - Значения контактной разности потенциалов до и после нанесения при освещении или в темноте полиэлектронитных слоев на поверхности *n*-Si и *p*-Si

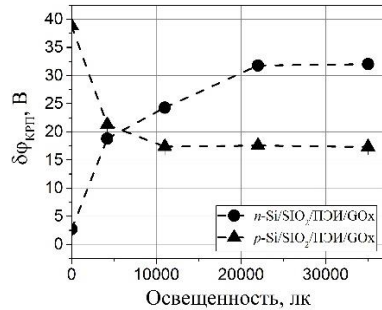


Рис. 5 - Кривые изменения  $\delta\varphi_{KPP}$  после нанесения слоя GOx от уровня освещенности пластины кремния с дырочной и электронной проводимостью

Было исследовано влияние нанослоя аморфного Si (*a*-Si) на поверхности монокристаллической пластины Si на адсорбционные свойства структуры в условиях фотостимуляции. Анализ АСМ-сканов, представленных на Рис.6, позволяет утверждать, что качественно наличие слоя *a*-Si не меняет результат: плотность иммобилизованных молекул GOx увеличивается на структуре *n*-Si/*a*-Si при освещении по сравнению с нанесением в темноте и уменьшается при использовании *p*-Si/*a*-Si. При этом использование пленки *a*-Si увеличивает эффект от фотостимулированного нанесения органического слоя на ~60% в случае подложек *n*-Si, и на 27% в случае подложек *p*-Si. Этот результат наглядно поясняется результатами измерения контактной разности потенциалов  $\varphi_{KPP}$  методом зонда Кельвина в темноте и при продолжительном освещении образцов (Рис. 7). Из Рис.7а следует, что на структурах без слоя *a*-Si релаксация заряда происходит быстро и исходные значения  $\varphi_{KPP}$  восстанавливаются практически «мгновенно». Изменения  $\varphi_{KPP}$  для структур *c*-Si/*a*-Si (Рис. 7б) как это и следовало ожидать, более «затянуты» и при включении, и при выключении света. Но при этом на зависимости, соответствующей структуре *p*-Si/*a*-Si, происходят сначала резкие «скачки»  $\varphi_{KPP}$  с последующим медленным уменьшением (рисунок 7б, область I) или увеличением (рисунок 7б, область II).

Для структур *n*-Si/*a*-Si резкого скачка  $\varphi_{KPP}$  не наблюдается, освещение непрерывно уменьшает  $\varphi_{KPP}$  при включении света (рисунок 7б, область I), но через час после выключения света релаксация  $\varphi_{KPP}$

составляет не более 50% от исходного значения, то есть за 10–15 минут (время, достаточное для проведения адсорбции GOx)  $\phi_{KPP}$  освещенной области релаксирует лишь на 15–16%.

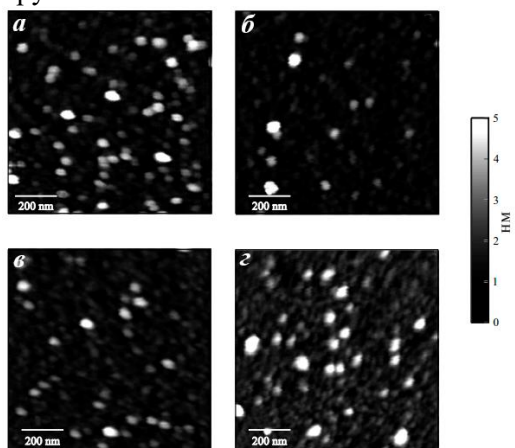


Рис. 6. АСМ-изображения структур  $p$ -Si/ $a$ -Si/ПЭИ/GOx (а, б) и  $n$ -Si/ $a$ -Si/ПЭИ/GOx (в, г) после нанесения слоя молекул GOx в темноте (а, в) и при освещении (б, г) пластины Si во время адсорбции GOx

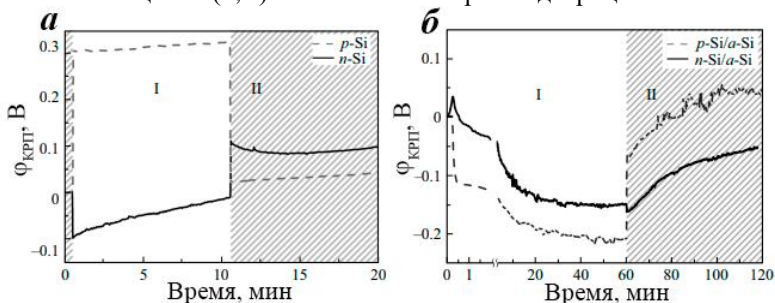


Рис.7. Изменение  $\phi_{KPP}$  для структур на основе Si  $n$ - и  $p$ -типов без слоя  $a$ -Si (а) и со слоем  $a$ -Si (б) при включении (диапазон времени I) и выключении (диапазон времени II) освещения

Полученный результат пояснён наличием изолированных оборванных связей в  $a$ -Si, что приводит к долговременной релаксации фотопроводимости, а образование комплексов близких оборванных связей способствует быстрому возвращению  $a$ -Si к исходному состоянию. Следовательно, наличие фотопамети или, наоборот быстрой релаксации неравновесного сигнала, зависит от знака заряда

оборванных связей. Таким образом, было сформулировано 2-е положение, выносимое на защиту.

**В разделе 3** смоделированы вольт-фарадные характеристики (ВФХ) структуры «электролит-оксид-полупроводник» со слоем полиэтиленimina (ПЭИ) различной толщины. Толщина ПЭИ модулировалась освещением Si в процессе создания гибридной структуры. Концентрация ННЗ при освещении полупроводника определялась по следующей формуле:

$$\Delta n(x) = \Delta p(x) = \frac{(1-R)\Phi\alpha\tau}{\alpha^2 L^2 - 1} \times \left[ \frac{K_1 \sinh\left(\frac{d-x}{L}\right) + K_2 \cosh\left(\frac{d-x}{L}\right) + e^{-\alpha d} (K_3 \sinh\left(\frac{x}{L}\right) + K_4 \cosh\left(\frac{x}{L}\right))}{\left(\frac{s_1 s_2 L}{D} + \frac{D}{L}\right) \sinh\left(\frac{d}{L}\right) + (s_1 + s_2) \cosh\left(\frac{d}{L}\right)} - e^{-\alpha x} \right], \quad (3)$$

где  $K_1 = \frac{s_1 s_2 L}{D} + s_2 \alpha L$ ,  $K_2 = s_1 + \alpha D$ ,  $K_3 = \frac{s_1 s_2 L}{D} - s_1 \alpha L$ ,  $K_4 = s_2 - \alpha D$ ,  $\Phi$  – световой поток,  $x$  – толщина полупроводника (расстояние от поверхности), для которого рассчитывается  $\Delta n$  или  $\Delta p$ .

Получено, что освещение пластины Si излучением с длиной волны 650 нм и интенсивностью 85 мВт/см<sup>2</sup> генерирует  $6,72 \times 10^{13}$  см<sup>-3</sup> и  $7,12 \times 10^{13}$  см<sup>-3</sup> электронно-дырочных пар, что соответствует изгибу зон 35 мэВ (*p*-Si) и 140 мэВ (*n*-Si), соответственно.

Учет перезарядки электронных состояний за счет туннелирования электронов через слой SiO<sub>2</sub> в поле катионного полиэлектролита, иммобилизованного на его поверхности, осуществлялся при помощи следующей формулы:

$$j = \frac{C_{ox} + C_{SC}}{C_{ox} \cdot C_{SC}} \frac{d\varphi_{light}}{dt}, \quad (4)$$

где  $d\varphi_{light}/dt$  – изменение контактной разности потенциалов во времени при освещении. Используя экспериментально полученные значения  $d\varphi_{light}/dt$  и формулу (4), было получено, что за 10 минут освещения светом с  $\lambda = 650$  нм и  $I = 85$  мВт/см<sup>2</sup> плотность заряженных состояний возрастает на: для *p*-Si – до  $2,95 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>; для *n*-Si – до  $1,67 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>.

Установлено, что с увеличением времени освещения во время адсорбции уменьшение толщины слоя ПЭИ происходит по экспоненциальному закону (Рис.8), а именно:

$$d_{ПЭИ} = d_0 + S \cdot \tau \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (5)$$

где  $d_0$ ,  $S$  и  $\tau$  – константы;  $t$  – время освещения в процессе адсорбции молекул ПЭИ. Для  $n$ -Si минимальная толщина слоя ПЭИ, нанесенного при освещении,  $d_0 = 4,29$  нм; скорость уменьшения толщины слоя ПЭИ  $S = 1,125$  нм/мин; характеристическое время, за которое в среднем осуществляется туннелирование электрона через слой  $\text{SiO}_2$  в электрическом поле ПЭИ,  $\tau = 4$  мин. Для  $p$ -Si  $d_0 = 4,81$  нм;  $S = 5,08$  нм/мин;  $\tau = 3,9$  мин.  $\tau$  практически не зависит от типа проводимости Si.

Моделирование ВФХ гибридных структур, помещенных в электролит, осуществлялось путем объединения модели протонирования/депротонирования функциональных групп с моделью поверхностного заряда Si. Благодаря такому подходу можно теоретически предсказать ВФХ для любых значений концентрации катионов водорода в электролите, концентраций ионов электролита, степени легирования полупроводника, толщины и материала диэлектрика.

Расчет предполагает, что ВФХ измеряют в квазистатическом режиме, соблюдаются условия электронейтральности и непрерывности потенциала, заряды в системе в сумме равны нулю, а падения потенциала в системе в сумме равны приложенному напряжению:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\text{ддс}} + \sigma_{\text{пэи}} + \sigma_{\text{SiO}_2} - \sigma_{\text{Si}} = 0 \\ V_G = (\psi_{\text{elec}} - \psi_{\text{пэи}}) - (\psi_{\text{пэи}} - \psi_{\text{SiO}_2}) - (\psi_{\text{SiO}_2} - \psi_{\text{Si,surf}}) - (\psi_{\text{Si,surf}} - \psi_{\text{Si,bulk}}) + \Phi \\ \frac{1}{C} = \left( \frac{1}{C_{\text{ддс}}} + \frac{1}{C_{\text{пэи}}} + \frac{1}{C_{\text{SiO}_2}} + \frac{1}{C_{\text{Si}}} \right) \end{array} \right. \quad (6)$$

где  $\sigma_{\text{ддс}}$  – заряд диффузионного двойного слоя;  $\sigma_{\text{пэи}}$  – поверхностный заряд слоя ПЭИ;  $\sigma_{\text{SiO}_2}$  – поверхностный заряд слоя окисла;  $\sigma_{\text{Si}}$  – поверхностный заряд Si;  $V_G$  – напряжение смещения;  $\psi$  – электростатический потенциал;  $\Phi$  – разность работ выхода электронов из Si и электрода сравнения;  $C$  – электрическая емкость;  $S$  – площадь контакта.

В этой системе уравнений  $C_{\text{пэи}}$  зависит от толщины слоя ПЭИ, которая в свою очередь зависит от интенсивности освещения в процессе адсорбции молекул ПЭИ. Система нелинейных уравнений решалась численно в среде Matlab. В расчетах использовались значения толщин слоя ПЭИ, соответствующие «темновому» и фотостимулированному осаждению на кремниевую структуру. ВФХ систем  $p$ -Si/SiO<sub>2</sub>/электролит и  $p$ -Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ/электролит были рассчитаны при различных значениях рН электролита и условий нанесения слоя ПЭИ. Результаты расчетов показаны на Рис.9. Таким образом, были



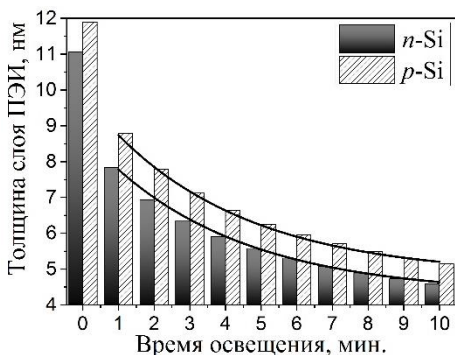


Рис.8. Зависимость толщины покрытия ПЭИ, осажденного на поверхности подложек *p*-Si и *n*-Si от времени фотостимулированного осаждения

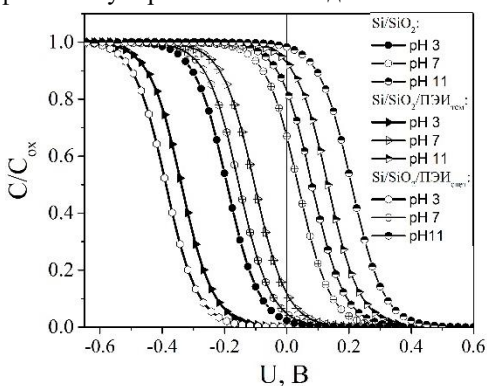


Рис.9. Расчётные ВФХ структур *p*-Si/SiO<sub>2</sub> и *p*-Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ, помещенных в электролит. ПЭИ наносили в темноте и при освещении

измерения ВФХ полученных структур.

Поскольку принцип работы ООП-датчика, содержащего слой ферментов, основан на обнаружении изменений поверхностного потенциала, вызванных ферментативной реакцией, то первоначально была доказана чувствительность структуры Si/SiO<sub>2</sub> к изменению pH раствора. У созданных структур на основе *p*- и *n*-Si наблюдается линейный отклик на изменение pH в диапазоне значений 3,8 – 7,5 с чувствительностью в среднем около 43-44 мВ/pH на измерительной частоте 1 кГц, что позволяет сравнивать результаты для *p*-Si и *n*-Si на

сформулированы 3-е и 4-е положения, выносимые на защиту.

#### В разделе 4

показаны результаты исследования влияния фотостимулирования подложки Si в процессе адсорбции на неё полиэлектролитных молекул на ВФХ биосенсорной структуры Ti/Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ/GOx, помещенной в раствор электролита/глюкозы, и проведен анализ изменения потенциала плоских зон по ВФХ системы «электролит – органический слой-оксид-полупроводник (ООП)» и чувствительности ферментативного сенсора к глюкозе за счет фотостимуляции полупроводника. Детектирование глюкозы осуществлялось в растворах D-глюкозы с концентрацией от 1 мМ до 10 мМ с помощью

чувствительность ООП-сенсора к глюкозе между собой. Из Рис. 10 видно, что для ООП-сенсора, где молекулы GOx осаждались в темноте, чувствительность к глюкозе составляет 1,9 мВ/мМ, а в случае фотостимулированного нанесения GOx – 5,8 мВ/мМ.

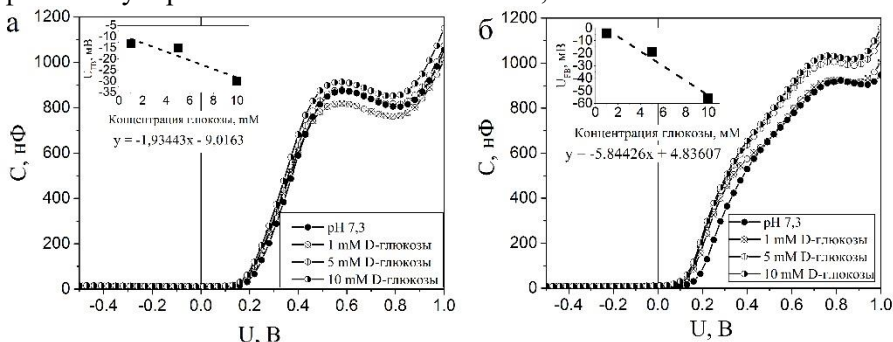


Рис. 10. Типичные ВФХ ООП-датчиков, измеренных в калий-фосфатном буфере и в растворах глюкозы с различными концентрациями от 1 до 10 мМ; GOx наносилась на *n*-Si в темноте (а) и при освещении (б), соответственно.

На вставках показаны калибровочные кривые

Установлено, что изменение чувствительности ООП-сенсора в случае фотостимуляции структуры Si/SiO<sub>2</sub> при осаждении GOx происходит за счет изменения поверхностной плотности адсорбированного фермента. Таким образом, было сформулировано 5-е положение, выносимое на защиту.

**В заключении** подводятся итоги диссертационного исследования, излагаются его основные результаты:

1. Установлено, что на ВАХ структур Si/SiO<sub>2</sub> оказывает существенное влияние не только нанесение нанометрового покрытия ПЭИ, но и то, в каких условиях наносилось это покрытие – в темноте или при освещении. Причем параметры гибридной структуры в целом и свойства слоя ПЭИ зависят от длины волны и интенсивности облучения. Наилучшие результаты получены при воздействии на Si светом с длиной волны 532 нм – шероховатость нанометрового покрытия ПЭИ уменьшилась в 2 раза. Показано, что для создания более однородного по толщине покрытия слой ПЭИ должен осаждаться при облучении Si светом с длинами волн, поглощаемыми в полупроводнике на глубине, примерно равной ширине ОПЗ.

2. Показано, что слой ПЭИ, нанесенный в темноте, является диэлектриком с большими токами утечки ввиду неоднородного

распределения молекул ПЭИ на поверхности полупроводника. Поэтому при толщинах такого слоя до нескольких нм, он не приводит к повышению сопротивления структуры за счет собственного сопротивления, а изменения ВАХ (и для подложек на основе *n*-Si, и для *p*-Si) при нанесении ПЭИ в темноте связаны с положительным зарядом молекул ПЭИ. Изменения ВАХ после фотостимулированного нанесения ПЭИ объясняются уже изменениями характеристик слоя ПЭИ – большей однородностью и плотностью.

3. Обнаружено влияние фотостимуляции кремния на эффективность пассивации структур *p*-Si/SiO<sub>2</sub> и *n*-Si/SiO<sub>2</sub> катионным полиэлектролитом на примере ПЭИ. Получено, что освещение во время нанесения слоя ПЭИ приводит к более значительному уменьшению интегральной плотности электрически активных ПЭС: освещение уменьшает плотность электрически активных ПЭС для *p*-Si примерно в 10-20 раз, а для *n*-Si – более чем в 10 раз.

4. Установлено, что освещение кремниевой структуры во время осаждения на неё ПЭИ из раствора оказывает в случае *n*-Si наибольшее пассивирующее влияние на «медленные» состояния (ловушки в оксиде и на его поверхности), а в случае *p*-Si – на быстрые ловушки, локализованные на границе Si/SiO<sub>2</sub>. Вывод подтвержден расчетом из экспериментальных ВФХ времен релаксации ПЭС: после фотовозбуждения полупроводника: для структур на основе *p*-Si произошел рост значений времен релаксации «медленных» состояний в 3,0 – 3,5 раза, а для «быстрых» ПЭС значение  $\tau$  увеличилось более чем в 20 раз по сравнению с проведением пассивации слоем ПЭИ в темноте. По сравнению с непассивированной структурой эти изменения  $\tau$  составили, соответственно, 7 и 30 раз. Для *n*-Si время релаксации «медленных» состояний увеличилось по сравнению с темновой адсорбцией почти в 2 раза и в 6,5 раз по сравнению с непассивированной структурой. Время релаксации, характеризующее быстрые ПЭС, возросло, соответственно, на 60 % и в 2 раза.

5. Показано на примере фермента GOx, что нанесение на поверхность структуры Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ последующего слоя анионного полиэлектролита стимулирует дальнейшее перераспределение заряда на границах раздела и в приповерхностных областях структуры, а влияние освещения способно изменить либо интенсифицировать лимитирующие стадии этого процесса (захват дырок на ПЭС) и их вклад в конечный результат: число адсорбированных на *n*-Si молекул

GOx увеличилось почти в 7 раз по сравнению с темновой адсорбцией и уменьшило адсорбцию GOx на *p*-Si более чем в 3 раза. Показано, что изменение  $N_{GOx}$  при осаждении слоя анионных молекул GOx на Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ связано в основном с процессами нейтрализации и перезарядки ПЭС на границах раздела структуры Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ, которые активируются освещением.

6. Обнаружено, что нанесение на поверхность кремниевой пластины слоя *a*-Si толщиной 100 нм изменяет эффективность фотостимулированного нанесения GOx и влияет на время релаксации фотопроводимости. Для структур *n*-Si/*a*-Si/ПЭИ фотостимуляция увеличивает относительное изменение площади покрытия молекулами GOx по сравнению с темновым на 140 %, а для *p*-Si/*a*-Si/ПЭИ – уменьшает примерно на 74 %. Показано, что только на структуре *n*-Si/*a*-Si возможна реализация метода предварительной (до погружения в раствор) фотостимуляции адсорбции.

7. Установлено, что освещение подложек *p*-Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ при нанесении молекул GOx из водного раствора снижает чувствительность к глюкозе по сравнению с нанесением GOx в темноте. Фотостимулированная адсорбция молекул GOx на структуру *n*-Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ приводит к увеличению чувствительности к глюкозе по сравнению с осаждением GOx в темноте с 1,9 мВ/мМ до 5,8 мВ/мМ.

8. Построена математическая модель вольт-фарадных характеристик структуры на основе моно-Si со слоем ПЭИ, полученной с применением метода фотостимулированного нанесения и погруженной в электролит. Математическая модель учитывает влияние на ВФХ структуры Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ параметров и характеристик наноразмерного полимерного покрытия, формирующегося в условиях освещения полупроводника, и, соответственно, учитывает:

- генерацию ННЗ в Si,
- туннелирование ННЗ в SiO<sub>2</sub> в электрическом поле иммобилизованных на полупроводник молекул ПЭИ,
- изменение эффективного поверхностного заряда ООП-структуры в результате суммарного действия генерации ННЗ и их туннелирования через слой SiO<sub>2</sub>,
- различные конформации адсорбирующихся полиэлектролитных молекул, вызванные изменяющейся в процессе освещения величиной поверхностной плотности заряда подложки.

9. Показано, что туннелирование неравновесных электронов через слой

$\text{SiO}_2$  в поле ПЭИ дает изменение плотности заряженных состояний  $\Delta\sigma_{\text{ox}}$  для  $p\text{-Si}$ , сравнимое с действием освещения на полупроводниковую структуру в отсутствие полиэлектrolитного покрытия, а для  $n\text{-Si}$   $\Delta\sigma_{\text{ox}}$  превышает  $\Delta\sigma_{\text{ill}}$  более чем в 20 раз. Поскольку этот процесс при освещении является специфичным для фотостимулированного осаждения полиэлектrolита на полупроводниковую подложку, то существенное различие значений для соотношения  $\Delta\sigma_{\text{ox}}/\Delta\sigma_{\text{ill}}$  в случае  $n$ - и  $p\text{-Si}$  является одним из факторов, определяющих различную эффективность освещения при изменении характеристик полиэлектrolитных покрытий, наносимых на Si различных типов проводимости.

10. Теоретически показано, что уменьшение толщины полиэлектrolитного покрытия в условиях фотостимулированного нанесения на полупроводник объясняется изменением конформации полиэлектrolитных молекул под действием электрического поля поверхностных состояний структуры  $\text{Si}/\text{SiO}_2$ , изменения которого вызваны, в свою очередь, освещением.

11. Рассчитаны и теоретически обоснованы ВФХ структуры  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{ПЭИ}$ , помещенной в электролит и полученной методом фотостимулированной адсорбции, на основе модели ЭОП-системы, объединяющей модель протонирования/депротонирования функциональных групп (гидроксо- и аминогруппы) на поверхности диэлектрика с моделью поверхностного заряда полупроводника.

12. Показано, что изменение параметров буферного слоя ПЭИ, вызванное освещением пластины Si в процессе адсорбции молекул ПЭИ, приводит на 35% к большему сдвигу потенциала плоских зон, чем в случае адсорбции в темноте.

13. Получено, что освещение структуры  $p\text{-Si}/\text{SiO}_2$  во время осаждения молекул ПЭИ на её поверхность приводит к увеличению чувствительности твердотельного сенсора к pH раствора электролита.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

*Публикации в журналах из перечня ВАК и в изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus:*

1) Стецора С.В., Козловский А.В., Митин Д.М., Сердобинцев А.А. Влияние слоя аморфного кремния на адсорбционные свойства полупроводниковой структуры в условиях фотостимуляции // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45, вып. 2. С. 14-17;

- 2) Стецюра С.В., Козловский А.В., Маляр И.В. Влияние типа проводимости кремниевой подложки на эффективность метода фотостимулированной адсорбции полиэлектролитов // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, вып. 8. С. 26-33;
- 3) Стецюра С.В., Козловский А.В. Влияние фотоэлектронных процессов в полупроводниковой подложке на адсорбцию поликатионных и полианионных молекул // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, вып. 6. С. 15-22;
- 4) Стецюра С.В., Буланов М.С., Козловский А.В., Маляр И.В. Электростатический потенциал как фактор контролируемого синтеза гибридных структур // Нано- и микросистемная техника. 2017. №2. С. 85-92;
- 5) Стецюра С.В., Козловский А.В., Маляр И.В. Электрическая пассивация поверхности кремния полиэлектролитным покрытием // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 4. С. 24-32;
- 6) A.V. Kozłowski, S.V. Stetsyura, I.V. Malyar The influence of photo-stimulated adsorption of polyelectrolyte molecules on electro-physical characteristics of structures based on single crystal silicon substrates // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1124, 081006 (5 p.);
- 7) A.V. Kozłowski, E.D. Kiseleva, A.A. Maslennikova, S.V. Stetsyura Change in the surface density of immobilized enzyme molecules induced by photoelectron processes in a silicon substrate // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 443, 012016 (6 p.);

***Патенты на изобретения:***

- 8) Патент на изобретение RU 2562991 C2, МПК H01L21/312 Стецюра С.В., Козловский А.В., Маляр И.В. Способ электрической пассивации поверхности монокристаллического кремния // Пат. RU 2562991, МПК H01L21/312, заявка 2014105510/05, опубл. 10.09.2015. Бюл. № 25. - 18 с.: ил.: Приор. от 31.01.2014
- 9) Патент на изобретение RU 2644979 C2, МПК H01L51/00 Стецюра С.В., Козловский А.В. Способ изготовления биосенсорной структуры // Пат. RU 2644979, МПК H01L51/00, заявка 2016126165, опубл. 15.02.2018. Бюл. № 5. - 17 с.: ил.: Приор. от 30.06.2016

***Прочие основные публикации по теме диссертации:***

- 10) Козловский А.В., Стецюра С.В. Анализ вольт-фарадных характеристик структур «электролит-диэлектрик-полупроводник», полученных при фотостимулированной адсорбции поликатионных и полианионных молекул // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы X Международной научно-технической конференции — Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2018. С. 143-147;
- 11) Стецюра С.В., Козловский А.В., Сердобинцев А.А., Митин Д.М. Структуры для биосенсорики на основе Si/a-Si, полученные с помощью фотостимулированной адсорбции. // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы X Международной научно-технической конференции — Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2018. С.350-354;

- 12) Козловский А.В., Маляр И.В., Стецюра С.В. Фотоэлектрические процессы и процессы токопереноса при фотостимулированной адсорбции наноразмерного слоя полиэтиленimina на поверхность Si со слоем SiO<sub>2</sub> // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы IX Международной научно-технической конференции. — Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2017. С. 188-192. ISBN 978-5-93-681035-0;
- 13) Козловский А.В., Маляр И.В., Стецюра С.В. Электрические свойства и морфология гибридной структуры на основе кремния при изменении режима фотоадсорбции молекул органического пассивирующего покрытия // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы IX Международной научно-технической конференции. — Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2017. С. 328-332. ISBN 978-5-93-681035-0;
- 14) Козловский А.В., Маляр И.В., Стецюра С.В. Влияние фотоэлектронных процессов в полупроводниковой подложке на иммобилизацию молекул фермента // Технологии микро- и нанoeлектроники в микро- и наносистемной технике: труды 5-ой международной научно-практической конференции. — Москва: ИНМЭ, 2016. С. 203-205;
- 15) Козловский А.В., Стецюра С.В. Модификация интерфейсного слоя биодатчика излучением оптического диапазона разных длин волн // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: материалы Всерос. научной школы-семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова. — Саратов: изд-во Саратовский источник, 2016. С. 53-56;
- 16) Козловский А.В., Стецюра С.В. Воздействие оптического излучения на процесс формирование слоя глюкозооксидазы при её адсорбции на полупроводниковый трансдьюсер // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: материалы Всерос. научной школы-семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова. — Саратов: изд-во Саратовский источник, 2015. С. 104-106;
- 17) Козловский А.В., Александров В.А., Маляр И.В., Стецюра С.В. Эффективность пассивации поверхности кремния полиэлектролитным покрытием, полученным при освещении // Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика: тез. докл. VIII Всерос. конф. молодых ученых. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2013. С. 126-127;

#### ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang X., Yang D., Yang Z., Guo X., Liu B., Ren X., Liu S. Improved PEDOT:PSS/c-Si hybrid solar cell using inverted structure and effective passivation // Scientific Reports. 2016. Vol. 6, P. 1-8;

2. Антонова И.В., Соотс Р.А., Селезнев В.А., Принц В.Я. Электрическая пассивация поверхности кремния органическими монослоями 1-октадецена // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41, № 8. С. 1010-1016;
3. Schöning M.J. "Playing around" with Field-Effect Sensors on the Basis of EIS Structures, LAPS and ISFETs // Sensors. 2005. Vol. 5, P. 126-138;
4. Abouzar M.H., Poghossian A., Siqueira J.R., Oliveira O.N., Moritz W., Schoning M.J. Capacitive electrolyte-insulator-semiconductor structures functionalised with a polyelectrolyte/enzyme multilayer: New strategy forenhanced field-effect biosensing // Phys. Status Solidi A. 2010. Vol. 207, No. 4. P. 884–890;
5. Alberi K., Scarpulla M.A. Photoassisted physical vapor epitaxial growth of semiconductors: a review of light-induced modifications to growth processes // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. Vol. 51, P. 023001;
6. Бару В.Г., Волькенштейн Ф.Ф. Влияние облучения на поверхностные свойства полупроводников. Москва: Наука, 1978. 288 с.;
7. Королевич Л.Н., Борисов А.В., Прокопенко А.С., Миняйло А.Н. CV-исследования электрофизических параметров тонких пленок  $\text{CeO}_2$  в МДП-структуре Al-CeO<sub>2</sub>-n-Si-Al // Электроника и связь. 2008. № 42. С. 35-37.

*Козловский Александр Валерьевич*

## **ФОТОСТИМУЛЯЦИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СЕНСОРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ И ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНОГО ПОКРЫТИЯ**

### **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Подписано в печать                      г. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 1.0  
Тираж 100 экз. Заказ №

Типография «Техно-Декор».  
Саратов, Московская, 160, тел.: 77-07-48, [www.sar-print.ru](http://www.sar-print.ru).