

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 212.243.01**  
на базе Федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Саратовский национальный исследовательский государственный  
университет  
имени Н.Г. Чернышевского», Минобрнауки РФ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_

Решение диссертационного совета от 20 декабря 2019 года № 107 о  
присуждении **Козловскому Александру Валерьевичу**, гражданину  
Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических  
наук

Диссертация «Фотостимуляция твердотельных сенсорных структур на основе кремния и полиэлектrolитного покрытия» по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах» принята к защите 17.10.2019, протокол № 104 диссертационным советом 212.243.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, №75/нк от 15.02.2013; в состав совета внесены изменения приказами Минобрнауки РФ от 15.12.2015 №1598/нк-9; от 28.09.2016 № 1180/нк-52; от 15.02.2017 № 116/нк-38, от 26.01.2018 № 92/нк-50, от 17.04.2018 № 431/нк-26, от 23.11.2018 № 301/нк-66, от 24.09.2019 № 873/нк.

**Соискатель**, *Козловский Александр Валерьевич*, 1992 года рождения, в 2015 году окончил ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по специальности «Материаловедение и технология материалов» с присвоением квалификации «инженер». В 2019 году соискатель освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по направлению подготовки 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи», направленность «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах». С 2016 года по настоящее время работает

ассистентом кафедры материаловедения, технологии и управления качеством факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», Минобрнауки РФ.

Диссертация выполнена на кафедре материаловедения, технологии и управления качеством ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», Минобрнауки РФ.

**Научный руководитель** – кандидат физико-математических наук, доцент *Стецюра Светлана Викторовна*, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», кафедра материаловедения, технологии и управления качеством, доцент.

**Официальные оппоненты:**

1. *Кузнецова Ирен Евгеньевна*, доктор физико-математических наук, доцент, профессор РАН, ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, лаборатория электронных процессов в полупроводниковых материалах, главный научный сотрудник;

2. *Сысоев Виктор Владимирович*, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», кафедра «Физика», профессор,

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург – в своем положительном заключении, составленном Филимоновым Алексеем Владимировичем, доктором физико-математических наук (01.04.04), доцентом, профессором высшей инженерно-технической школы, указала, что диссертационная работа Козловского А.В. посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию влияния фотоэлектронных процессов в полупроводниковых структурах при формировании на их поверхности полиэлектrolитного покрытия на электрофизические и сенсорные характеристики этих структур, содержит оригинальные результаты, имеющие важное фундаментальное и прикладное значение, и удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», а сам диссертант заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

По теме диссертационной работы соискатель имеет 36 печатных работ общим объемом 10,25 п.л. (авторский вклад 4,26 п.л.), в том числе 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, 27 работ в трудах международных и всероссийских конференций, 2 патента РФ на изобретения. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1) Стецюра С.В., Козловский А.В. Влияние фотоэлектронных процессов в полупроводниковой подложке на адсорбцию поликатионных и полианионных молекул // Письма в «Журнал технической физики». 2017. Т. 43. Вып. 6. С. 15-22;

2) *Стецюра С.В., Козловский А.В., Маляр И.В.* Электрическая пассивация поверхности кремния полиэлектролитным покрытием // Письма в «Журнал технической физики». 2015. Т. 41. Вып. 4. С. 24-32;

3) Стецюра С.В., Козловский А.В., Маляр И.В. Влияние типа проводимости кремниевой подложки на эффективность метода фотостимулированной адсорбции полиэлектролитов // Письма в «Журнал технической физики». 2017. Т. 43. Вып. 8. С. 26-33.

На автореферат поступило 7 положительных отзывов: из Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова от Г.Б. Хомутова, д.ф.-м.н. (03.01.02); из Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН от А.Ю. Лешко, к.ф.-м.н. (01.04.10); из Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» от В.В. Ховайло, д.ф.-м.н. (01.04.11); из Саратовского филиала института радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН от Ю.В. Никулина, к.ф.-м.н. (05.27.01); из Волгоградского государственного университета от И.В. Запороцковой, д.ф.-м.н. (05.27.01); из Сколковского института науки и технологий от А.М. Яценка, к.ф.-м.н. (05.27.01), д.ф.-м.н. (03.01.02); из Центрального научно-исследовательского института измерительной аппаратуры от А.П. Креницкого, д.т.н. (05.11.17).

В отзывах сделаны замечания об отсутствии в автореферате: оценки погрешностей при измерении контактной разности потенциалов; некоторых условий проведения экспериментов (таких как материал и форма зонда в измерениях методом зонда Кельвина, мощность лазерного излучения в экспериментах с пленками аморфного кремния, концентрации полиэтиленimina и глюкозооксидазы, значений толщины диэлектрического слоя и т.д.); описания метода определения потенциала плоских зон по вольт-

фарадным характеристикам гибридной структуры и методики определения сенсорных характеристик структуры с помощью значений этого потенциала; описания метода и параметров нанесения плёнки аморфного кремния на поверхность монокристаллического кремния; обоснования выбора частоты переменного напряжения при измерении вольт-фарадных характеристик структур Si/SiO<sub>2</sub>/полиэтиленмин/глюкозооксидаза, помещенных в электролит.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их известностью своими научными достижениями в области твердотельной микро- и нанoeлектроники и сенсорики, близостью их сфер исследования теме диссертации, наличием публикаций в ведущих российских и зарубежных научных журналах, а также отсутствием совместных печатных работ с соискателем. Выбор ведущей организации обосновывается её высоким авторитетом среди научно-исследовательских организаций, эффективно работающих над решением актуальных задач твердотельной электроники, наличием в ней ученых, являющихся специалистами по тематике диссертации, а также отсутствием договорных отношений с соискателем.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**предложен** способ увеличения чувствительности к глюкозе сенсорных структур *n*-Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ путем фотостимуляции процесса адсорбции молекул фермента глюкозооксидазы (GOx) на поверхность этих структур;

**разработана** математическая модель вольт-фарадных характеристик структуры Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ, погруженной в электролит и полученной методом фотостимулированной адсорбции, которая учитывает различные конформации адсорбирующихся полиэлектролитных молекул, вызванные изменяющейся в процессе освещения величиной поверхностной плотности заряда подложки;

**доказано**, что освещение структуры *n*-Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ во время адсорбции на её поверхность молекул GOx приводит к увеличению чувствительности к глюкозе по сравнению с осаждением GOx в темноте более чем в 3 раза;

**установлено**, что для создания более однородного по толщине покрытия слой полиэтиленмина (ПЭИ) должен осаждаться при облучении Si светом с длинами волн, поглощаемыми в полупроводнике на глубине, примерно равной ширине области пространственного заряда полупроводника;

**обнаружено**, что освещение во время нанесения слоя ПЭИ приводит к более значительному (в 10-20 раз в зависимости от типа проводимости Si) уменьшению интегральной плотности электрически активных поверхностных электронных состояний.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

**установлена** закономерность влияния фотоэлектронных процессов в полупроводниковой структуре на параметры полиэлектролитных функциональных слоев на её поверхности, а также этих параметров на электрофизические, фотоэлектрические и сенсорные характеристики гибридной структуры, сформированной методом последовательного нанесения полиэлектролитных молекул на поверхность кремниевых подложек различного типа проводимости;

**изучены** механизмы перезарядки электронных состояний на границах Si/SiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub>/ПЭИ в условиях фотостимуляции полупроводниковой подложки и нанесения полиэлектролитного покрытия;

**проведена модернизация** физической и математической моделей вольт-фарадной характеристики структуры Si/SiO<sub>2</sub>/ПЭИ, полученной при фотостимуляции полупроводника и погруженной в электролит, которая может теоретически предсказать изменения вольт-фарадных характеристик для любых значений концентрации катионов водорода в электролите, концентраций ионов электролита, степени легирования полупроводника, толщины и материала диэлектрика.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

**определены** фотоэлектронные процессы, приводящие к увеличению длительности релаксации заряда поверхностных электронных состояний после выключения освещения за счёт формирования на поверхности структуры *n*-Si/SiO<sub>2</sub> наноразмерного слоя аморфного кремния, что позволяет проводить фотостимуляцию кремниевой подложки до погружения в раствор полиэлектролита и актуально при необходимости локальной фотостимуляции полупроводниковой подложки;

**разработан и внедрен** в учебный процесс на факультете нано- и биомедицинских технологий СГУ имени Н.Г. Чернышевского метод фотостимулированного нанесения наноразмерных слоев полиэлектролитных молекул на поверхность полупроводниковой структуры;

**получено 2 патента РФ** на изобретения: «Способ электрической пассивации поверхности монокристаллического кремния» и «Способ изготовления биосенсорной структуры»;

**исследования выполнялись** при поддержке РФФИ (проекты № 14-02-31089-мол\_а и № 16-08-00524-а), Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (У.М.Н.И.К. - 2014), Немецко-

российского междисциплинарного научного центра (проекты № В-2017б-5 и № Р2018а-10).

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

**идея** фотостимуляции полупроводника в процессе нанесения на него функциональных слоев с целью улучшения характеристик сенсорной структуры базируется на обобщении новых экспериментальных результатов и передового научного опыта в области исследования фоточувствительных полупроводниковых материалов и сенсорных структур на их основе;

**использовано** современное технологическое и измерительное оборудование, обоснованы условия проведения экспериментов, показана воспроизводимость результатов исследования;

**теория**, описывающая влияние фотоэлектронных процессов в полупроводнике на ёмкость итоговой гибридной структуры Si/SiO<sub>2</sub>/полиэтиленмин, погруженной в раствор электролита, построена с использованием элементов известных и проверенных моделей, результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными;

**установлено** качественное и количественное совпадение рассчитанных вольт-фарадных характеристик исследуемой гибридной структуры с теоретическими и экспериментальными результатами, представленными в литературе по данной тематике.

**Личный вклад соискателя.** 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.

Результаты работы могут быть полезны при разработке сенсорных структур, эксплуатации систем на их основе, построении и изучении соответствующих курсов для магистрантов и аспирантов. Работа может быть рекомендована к использованию в научных и производственных организациях, образовательных учреждениях, сферой деятельности которых являются исследования фотоэлектронных процессов в твердотельных сенсорах на основе гибридных структур, а также их производство и эксплуатация. Например, это ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (г. Москва), ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», ФГЛОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», ФГАОУ ВО

«Волгоградский государственный университет», Научно-производственное предприятие «Инжект» (г. Саратов), АО «Центральный научно-исследовательский институт измерительной аппаратуры» (г. Саратов) и т.д.

В диссертации решены актуальные задачи твердотельной электроники, соответствующие п.1 и п.4 паспорта специальности 05.27.01 и направленные на увеличение чувствительности к глюкозе твердотельных сенсорных структур, работающих на полевом эффекте. Содержание диссертации удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых к кандидатским диссертациям.

На заседании 20 декабря 2019 года диссертационный совет принял решение присудить Козловскому А.В. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человека, из них 8 докторов наук по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах», участвовавших в заседании, из 28 человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» - 21, «против» - нет, недействительных бюллетеней - нет.

Председатель

диссертационного совета



Аникин Валерий Михайлович

Ученый секретарь

диссертационного совета

Слепченков Михаил Михайлович

20 декабря 2019 г.