

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/SiO₂/полиэтиленимин/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/SiO₂/ПЭИ путем фотостимуляции процесса адсорбции молекул фермента глюкозооксидазы (GOx) на поверхность этих структур;

разработана математическая модель вольт-фарадных характеристик структуры Si/SiO₂/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/SiO₂/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 полиэтиленимина (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/SiO₂ и SiO₂/ПЭИ в условиях фотостимуляции полупроводниковой подложки и нанесения полиэлектролитного покрытия;

проведена модернизация физической и математической моделей вольт-фарадной характеристики структуры Si/SiO₂/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/SiO₂ 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/SiO₂/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.