

**"УТВЕРЖДАЮ"**

И. о. директора Самарского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН)



С.Ю. Савинов

2019 г.

## **ОТЗЫВ**

### **ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу Рогожиной Галины Андреевны  
**«Экспериментальные методы изготовления и исследования диодных структур на базе нанокристаллического пористого кремния»**,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

#### **1. Актуальность темы**

Актуальность диссертационной работы определяется тем, что применение нанокристаллических материалов в различных отраслях электроники позволяет не только значительно улучшить характеристики существующих приборов, но и создавать устройства с новыми функциональными возможностями. Перспективным нанокристаллическим материалом является пористый кремний, отличающийся от других наноматериалов относительно простой технологией изготовления при широчайшем спектре электрических и оптических свойств. Большая площадь его поверхности и наличие наноразмерных кристаллов в порах делают пористый кремний перспективным для использования как в фоточувствительных, так и в люминесцентных структурах. Однако применение пористого кремния в электронных устройствах сдерживается из-за сложности в управлении свойствами получаемого пористого слоя, особенно в возможности получить низкоомный материал и создать на основе пористого кремния диодную структуру.

В связи с этим тема диссертационной работы Г.А. Рогожиной, посвященная исследованию методов создания диодных структур на основе пористого кремния, является актуальной, а результаты, приведенные в диссертации, име-

ют научное и практическое значение.

## **2. Новые научные результаты, полученные в диссертационной работе**

1. Впервые показано, что при образовании пор на поверхности с микрорельефом в процессе электролитического травления основным фактором, определяющим локацию, концентрацию и геометрию пор, является распределение напряженности электрического поля вблизи микрорельефа.

2. Разработан метод изготовления диодных структур с рабочим слоем из пористого кремния, позволяющий получать структуры со стабильно воспроизводимыми характеристиками, допускающими приборную реализацию.

3. Разработан комплекс методов, адаптированных к исследованию структур с пористым слоем, и впервые исследованы электрические и оптические характеристики изготовленных диодных структур с рабочим слоем из пористого кремния. Показано, что по своим параметрам такие структуры превосходят классические планарные кремниевые диодные структуры и могут быть использованы в фоточувствительных и люминесцентных устройствах. Фоточувствительность и квантовая эффективность образцов с рабочим слоем из пористого кремния превышает 8-10 раз характеристики классических кремниевых структур и расширены в спектральную область 200...400 нм, где классические структуры проявляют минимальную фоточувствительность. Показано, что допированные эрбием образцы с рабочим слоем из пористого кремния проявляют устойчивую, интенсивную люминесценцию с пиком на 1,5 мкм при комнатной температуре, при этом электрические характеристики структуры допускают возбуждение люминесценции электрическим током.

## **3. Значимость результатов для науки и практики**

- Установлены основные технологические параметры, управляющие процессом порообразования на поверхностях с микрорельефом.

- Разработаны экспериментальные методы изготовления диодных структур с рабочим слоем из пористого нанокристаллического кремния, обладающих высокими электрическими и оптическими параметрами:

- фотолюминесценцией при комнатной температуре с пиком на длине волны 1,55 мкм,
- повышенной фоточувствительностью в коротковолновой части спектра от 450 до 550 нм,

- высокой квантовой эффективностью 70...85 % в спектральном диапазоне 300...1000 нм,
- низким удельным сопротивлением 2...10 Ом·см,
- коэффициентом отражения до 0,2 % в диапазоне от 200 до 1000 нм.

Это делает диодные структуры перспективными для использования в качестве основы фотоэлектрических и люминесцентных устройств: фотоэлектронных преобразователей солнечных элементов, светодиодов, искусственной сетчатки глаза.

Полученные в диссертационной работе результаты были использованы при создании экспериментальных панелей солнечных элементов для малого космического аппарата «Аист-2Д», участвующего в совместном космическом эксперименте Самарского университета и РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

**4. Достоверность полученных результатов** диссертационной работы обеспечивается взаимодополняющими экспериментальными методами исследования, воспроизводимостью экспериментальных результатов, использованием общепринятого математического аппарата, а также взаимным согласованием результатов численного и натурального экспериментов.

#### **5. Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы**

Разработанные в диссертации методы создания диодных структур на базе пористого кремния могут быть использованы при разработке технологии высокоэффективных кремниевых солнечных элементов и фотоприемников, светодиодов и оптических интегральных схем на кремниевой подложке.

#### **6. Замечания**

1. При обсуждении механизмов порообразования не обсуждается влияние температуры на данный процесс.

2. В главе 1 подробно проанализированы теоретические подходы к описанию процессов электрохимического травления полупроводников и механизмов порообразования; в главе 2 (табл. 2.1) приведены экспериментальные результаты по использованию различных составов травителей и различных режимов травления, но далее не указано, какой именно электролит и почему выбран для получения пористых материалов.

3. При исследовании фотолюминесценции (п.3.1.3) проводится сравнение

образцов между собой, но ничего не говорится об абсолютной интенсивности излучения и нет никаких сравнений со светодиодами, получаемыми по другим технологиям.

4. В главе 2 изложена методика получения гетероструктур с карбидом кремния, в разделе 3.3.2 исследуются не только структуры SiC – por-Si, но и структуры с покрытием из фторида диспрозия, но о методике нанесения этих слоев ранее ничего не сказано. Не ясно, является ли получение слоев DyF<sub>3</sub> результатом данной диссертационной работы или это работа сторонних исполнителей по нанесению покрытий на пористый кремний.

5. В описании численной модели приведены только расчетные уравнения, начальные и граничные условия, но не указаны выбранные авторами значения констант, используемых в расчете – коэффициента диффузии и проводимостей электролита и полупроводника.

6. Имеется некоторая небрежность в оформлении ссылок на литературу: во введении используется формат ссылок [Фамилия автора; год издания], далее по тексту работы формат ссылки имеет вид: [номер в списке литературы].

## **7. Оценка диссертации в целом**

Сделанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертационной работы, которая является завершенным исследованием и соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Все основные результаты диссертационной работы отражены в 26 публикациях автора, включая 7 статей в рецензируемых журналах, внесённых в Перечень журналов и изданий, утверждённых ВАК. Содержание диссертации соответствует содержанию опубликованных работ. Полученные в работе результаты соответствуют поставленным целям, соответствие темы диссертации и научной специальности не вызывает сомнений. Автореферат диссертации правильно отражает её содержание. Диссертационная работа Рогожиной Г.А. прошла необходимую апробацию в ходе обсуждения ее результатов на 19 Международных и Всероссийских научно-технических конференциях.

По выбранной теме, характеру проведенных исследований, полученным результатам рассматриваемая диссертация Рогожиной Г.А. соответствует спе-

циальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики и является научно-квалификационной работой, в которой разработаны положения, совокупность которых можно квалифицировать как определенный вклад в разработку методов создания и исследования приборов оптоэлектроники с расширенными функциональными возможностями. Таким образом, диссертационная работа Рогожиной Г.А. удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв подготовлен:

научный сотрудник

Самарского филиала ФГБУН

Физического института им. П.Н. Лебедева

Российской академии наук

Е.Ю. Тарасова

Тарасова Екатерина Юрьевна, научный сотрудник Самарского филиала ФГБУН Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Адрес: 443011, Самара, ул. Ново-Садовая, 221

телефон: +7 (846) 3359545

эл. адрес: [kat@fian.smr.ru](mailto:kat@fian.smr.ru)

Самарский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН).

Адрес: 443011, Самара, ул. Ново-Садовая, 221

телефон: +7 (846) 3341481

сайт: <http://www.fian.smr.ru>; эл. адрес: [laser@fian.smr.ru](mailto:laser@fian.smr.ru)

Диссертационная работа и отзыв были рассмотрены и одобрены на заседании Ученого совета Самарского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (протокол №8 от 20 ноября 2019 г.)

Ученый секретарь

СФ ФИАН, д.т.н.



С.И. Ярьско