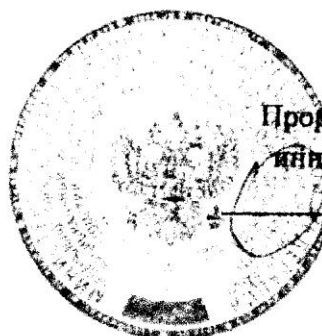


Ministry of Education and Science of the Russian Federation  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
"National Research Tomsk Polytechnic University" (TPU)  
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia  
Tel. (3822) 60 63 33, (3822) 70 17 79,  
Fax (3822) 56 38 65, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru  
OKPO (National Classification of Enterprises and Organizations):  
02069303,  
Company Number: 1027000890168,  
VAT / KPP (Code of Reason for Registration):  
7018007264/701701001, BIC 046902001

Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет» (ТПУ)  
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия  
тел.: (3822) 60 63 33, (3822) 70 17 79,  
факс: (3822) 56 38 65, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru  
ОКПО 02069303, ОГРН 1027000890168,  
ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 046902001

№ \_\_\_\_\_  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по научной работе и  
инновациям ТПУ, д.т.н., проф.  
Дьяченко А. Н.  
«04» 05 2017 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации Воронина Антона Сергеевича  
на тему «Формирование серебряных микросетчатых прозрачных проводящих  
покрытий при помощи самоорганизованных шаблонов и композиты на их основе»  
представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук  
по специальности 05.16.06 – порошковая металлургия и композиционные материалы

На отзыв представлены:

- диссертационная работа объемом 182 страницы основного текста, включая 83 рисунка и 10 таблиц, библиографический список состоит из 240 наименований, выполненная в ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск;
- автореферат на 23 страницах, в котором изложены основные положения диссертации и представлен список публикаций автора по теме работы.

#### Актуальность работы

Покрyтия, сочетающие высокое пропускание видимого света и большую электропроводность, весьма востребованы в различных областях науки, техники и промышленности. Например, они широко применяются для модификации поверхности листового стекла, что значительно повышает энергоэффективность окон и других светопрозрачных ограждений зданий и сооружений. Кроме того, они активно используются во многих современных электронных устройствах в качестве электрических контактов и сенсоров.

Однако быстрое развитие электроники и оптоэлектроники ставит задачи по разработке прозрачных проводящих покрытий для изделий на базе гибких материалов. Плёнки на основе прозрачных легированных оксидов индия, олова и цинка в этом смысле

хорошо показали себя на твёрдых подложках. Но они могут существенно уменьшить свою электропроводность при больших углах сгиба и в этом их недостаток.

Таким образом, актуальность работы Воронина А.С. заключается в том, что в ней сделана попытка создать прозрачные проводящие покрытия, сохраняющие свои электрические свойства при деформации.

**Целью** диссертации является разработка способа изготовления микросетчатых прозрачных проводящих покрытий при помощи шаблонов, формируемых в режиме самоорганизации, и изучение их свойств. Второй аспект её - получение и исследование композиционных покрытий с квазиплоской структурой на основе серебряных микросеток и углеродных наноматериалов.

Цель и задачи, решаемые в процессе работы, соответствуют современным тенденциям в материаловедении, электронике и оптоэлектронике.

#### **Анализ содержания диссертации**

Во *Введении* обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и поставлены задачи исследований, приведены защищаемые положения, обоснованы научная новизна и практическая значимость работы.

В *Главе 1* дан обзор литературы по теме работы. На его основе автором уточнены основные задачи исследований. Выполнено описание свойств исследуемых прозрачных проводящих покрытий.

*Глава 2* посвящена описанию особенностей получения однородно растрескавшихся плёнок кремнезёма, которые можно использовать в качестве шаблонов. Исследована золь-гель методика осаждения таких плёнок и определены её параметры, обеспечивающие воспроизводимость геометрических характеристик шаблонов.

*Глава 3* содержит результаты исследования процессов формирования серебряных микросетчатых покрытий, а также композиций «серебряная микросетка – одностенные углеродные нанотрубки». Значительная часть её посвящена изучению их механических, оптических и электрических свойств. Эти покрытия обладают низким поверхностным сопротивлением и большими коэффициентами пропускания в видимой области, и вместе с тем практически не меняют свои свойства после деформации и нагрева.

В *Главе 4* исследованы методики получения микросетки из одностенных углеродных нанотрубок и серебряной микросетки с гальванически осаждённой медной оболочкой. Проанализированы электрические и оптические параметры данных структур. Подобная композиция показала наивысшие на сегодняшний день коэффициенты пропускания и минимальное поверхностное сопротивление.

*Глава 5* посвящена улучшению коррозионной стойкости серебряных микросеток путём их защиты слоем окисленного графена. Изучены режимы осаждения защитного слоя и характеристики полученного прозрачного проводящего покрытия. На примере электрохромной структуры показано существенное повышение стойкости такого покрытия к воздействию химически агрессивной среды.

В *Заключении* обобщены основные результаты диссертационной работы.

### **Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Защищаемые положения, выводы и рекомендации следуют из полученного в работе экспериментального материала. В целом они корректно сформулированы (правда, ниже есть замечание по этому поводу) и адекватно отражают содержание диссертации.

### **Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации**

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации, а также выводы и положения, выносимые на защиту.

**Достоверность результатов** обеспечивается применением современного аттестованного и сертифицированного оборудования и методов измерения характеристик исследуемых образцов, а также корректным сравнением полученных данных со сведениями, приведёнными в научных публикациях других авторов.

Результаты, изложенные в диссертации, носят непротиворечивый характер, взаимно дополняют друг друга и соответствуют существующим представлениям о процессах на поверхности твёрдого тела и свойствах тонких плёнок. Они согласуются с данными, приведёнными в работах других авторов.

Кроме того, она подтверждена апробацией полученных результатов на ряде научных семинаров, а также в процессе выступлений автора на российских и международных конференциях.

**Научная новизна** работы заключается в следующих результатах, расширяющих наши представления о процессах и технологиях получения прозрачных проводящих покрытий.

1. Проведены исследования золь-гель методики формирования самоорганизованных растрескавшихся плёнок кремнезёма. Изучена роль таких параметров как кислотность реакционной среды, толщина слоя жидкого золя, степень его смачивания подложки, режим сушки образцов и пр. на геометрические характеристики получаемых плёнок. Определены их значения, при которых имеет место воспроизводимость геометрических характеристик тонких плёнок кремнезёма. Показано, что их можно использовать в качестве шаблона для создания микросетчатых прозрачных проводящих покрытий.

2. Изучен процесс формирования микросетчатых прозрачных проводящих покрытий путём осаждения слоя серебра на растресканные плёнки кремнезёма с помощью магнетронного распыления. Проведён анализ электрических и механических свойств таких покрытий. Показано, что добавление слоя одностенных углеродных трубок позволяет снизить неоднородность его поверхностного сопротивления до 10%. При этом покрытие практически не меняет своих электрических свойств после многократной деформации.

3. Исследован процесс получения покрытий типа «ядро-оболочка» на основе гальванического наращивания медной плёнки на нитях серебряной микросетки. Изучены основные параметры процесса и свойства сформированных структур. Показано, что в данном случае можно снизить поверхностное сопротивление вплоть до 0,7 Ом/квadrat и при этом добиться коэффициентов пропускания света в видимой области на уровне 92%.

4. Проведено исследование физико-химических свойств самоорганизованных микросетчатых покрытий после их защиты слоем окисленного графена. На примере электрохромной структуры показано, что данный подход позволяет получать покрытия, стойкие в агрессивных средах.

#### **Практическая значимость результатов работы**

Проведённые исследования позволяют разработать перспективную технологию получения микросетчатых прозрачных проводящих покрытий с весьма низким поверхностным сопротивлением, от единиц до десятых долей Ом/квадрат, и относительно высоким коэффициентом пропускания (85-92%), сохраняющих свои свойства при значительных деформациях. По данным характеристикам эти покрытия значительно превосходят существующие образцы плёнок легированного оксида индия на гибких подложках.

Результаты работы могут быть использованы для создания технологии получения таких покрытий на рулонных полимерных плёнках, что снижает их себестоимость и расширяет сферы применения в электронной и оптоэлектронной промышленности в качестве гибких прозрачных электрических контактов, сенсоров, нагревателей и пр.

#### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследований и научной новизне соответствует паспорту специальности 05.16.06 – порошковая металлургия и композиционные материалы; область науки и техники п.4 Разработка новых материалов для функциональных покрытий и технологий их нанесения на изделия.

Результаты диссертационной работы опубликованы и доложены на российских и международных научных конференциях, а также изданы в журналах, индексируемых в системе SCOPUS и рекомендованных ВАК. Получено два патента РФ.

Мы не обнаружили в работе серьёзных смысловых ошибок и противоречий. Но есть несколько замечаний, которые обращают на себя внимание.

1. Защищаемые положения сформулированы нечётко. Не сразу можно понять что в них защищается.

2. Не воспринимается термин «оксид графена». Рекомендуем вместо него использовать, например, словосочетание «окисленный графен», что более точно определяет свойства этого материала.

3. Выводы, приведённые в заключении, плохо отредактированы. Они содержат слишком много частных результатов, затрудняющих восприятие основной идеи текста.

Высказанные замечания не снижают нашей общей положительной оценки работы, которая выполнена на должном уровне. Диссертация Воронина Антона Сергеевича является завершённым научным трудом, включающим большой объём исследований и глубокую критическую оценку полученных результатов.

## Заключение

Проведённый анализ позволяет утверждать, что диссертация Воронина А.С. является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для порошковой металлургии и композиционных материалов. Кроме того, получены новые данные, которые являются физико-химическими основами технологии изготовления серебряных микросетчатых прозрачных проводящих покрытий и композитов на их основе.

Считаем, что по содержанию, объёму проведённых исследований, качеству полученных результатов, научной новизне и практической значимости представленная работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Воронин Антон Сергеевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – порошковая металлургия и композиционные материалы.

Диссертация и автореферат были рассмотрены и обсуждены на семинаре кафедры экспериментальной физики Физико-технического института ТПУ, протокол № 174 от 28.04.2017.

Отзыв составили:

Заведующий кафедрой экспериментальной физики Национального исследовательского Томского политехнического университета, доктор физико-математических наук, профессор



Кривобоков В.П.

Кривобоков Валерий Павлович, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30  
Телефон: (3822) 606-418, факс 417-956, E-mail: [krivobokov@tpu.ru](mailto:krivobokov@tpu.ru)

Научный сотрудник лаборатории 23 кафедры экспериментальной физики Национального исследовательского Томского политехнического университета, кандидат технических наук



Баинов Д.Д.

Баинов Даши Дамбаевич, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30  
Телефон: (3822) 606-415, E-mail: [das@tpu.ru](mailto:das@tpu.ru)