



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ АКАДЕМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

194021, С.-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А

Телефон (факс): (812) 448-69-80

www.spbau.ru

ОКПО 59503334, ОГРН 1027802511879

ИНН/КПП 7804161723/780401001

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке
СПБАУ РАН
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН



Жуков А.Е.
М.П.

«22» июля 2019 г

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Санкт-Петербургского национального
исследовательского Академического университета Российской академии
наук»**

о

диссертационной работе Редуто Игоря Владимировича «Термо-полевая
модификация для формирования наноструктур на поверхности стекол»,
представляемой на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика
конденсированного состояния»

Диссертация «Термо-полевая модификация для формирования наноструктур на поверхности стекол» выполнена на базе кафедры физики и технологии наногетероструктур Академического университета. В период подготовки диссертации соискатель **Редуто Игорь Владимирович** обучался в очной аспирантуре в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук» (СПБАУ РАН) по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния. С января 2016 года работает в научно-образовательном центре «Физики и технологии гетерогенных материалов и наногетероструктур» ФГАОУ ВО СПбПУ в должности младшего научного сотрудника. В 2015 г. Редуто Игорь Владимирович окончил магистратуру СПБАУ РАН по направлению 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника» и в том же году поступил в аспирантуру СПБАУ РАН.

Научный руководитель - доктор физико-математических наук, профессор, **Липовский Андрей Александрович**, профессор кафедры физики и технологии наногетероструктур Академического университета.

По итогам обсуждения диссертации «Термо-полевая модификация для формирования наноструктур на поверхности стекол» принято следующее заключение:

1. **Оценка выполненной соискателем работы.** По теме доклада Редуто И. В. было задано 7 вопросов, на которые были получены исчерпывающие, аргументированные ответы. Даны компетентные рекомендации. В обсуждении диссертационной работы Редуто И. В. приняли участие: д.ф.-м.н., чл.-корр. Жуков А.Е., д.ф.-м.н. Максимов М.В., д.ф.-м.н., профессор Липовский А.А., д.ф.-м.н. Крыжановская Н.В., к.ф.-м.н. Никитина Е.В.

Центр нанотехнологий Академического университета отмечает, что в результате выполненных соискателем исследований:

- показано, что в стекле вблизи края электрода при поляризации формируется область, структура которой отличается от структуры стекла под электродом и от структуры исходного стекла из-за особенностей электрического поля на краю электрода и притока примесей из атмосферы. Из области стекла под электродом уходят ионы щелочных металлов, которые частично замещаются примесями, поступающими из атмосферы. Возникновение газового разряда вблизи края электрода приводит к расширению области поляризации, также в стекле в области вблизи края электрода появляются группы OH^- ;
- в работе впервые установлено, что термообработка в атмосфере водорода стекла, содержащего ионы серебра, профиль концентрации которых был задан с помощью поляризации, приводит к формированию на поверхности стекла групп наночастиц. Состав группы зависит от размера и формы «окна» в структуре анодного электрода, а именно: при размерах «окна» $300 \times 300 \text{ нм}^2$, $200 \times 500 \text{ нм}^2$ и $200 \times 600 \text{ нм}^2$ формируются одна, две и три наночастицы, соответственно;
- впервые продемонстрирован новый эффект: при поляризации стекла в воздухе при напряжениях свыше 300 В существенно искажается переносимая на стекло с помощью травления структура, задаваемая анодным электродом;
- определено, что при травлении поляризованных стекол высота рельефа, которая может быть получена с помощью химического травления, превышает высоту, получаемую при реактивном ионном травлении, в ~ 20 раз. Отжиг поляризованных с помощью структурированного анодного электрода стекол позволяет увеличить высоту сформированного при поляризации рельефа в ~ 2.5 раза.

Во всех выступлениях была дана положительная оценка диссертационной работы, отмечены актуальность темы проведенного исследования, обоснованность и достоверность научных положений и выводов, новизна, научная и практическая значимость полученных результатов. Выступлений с отрицательной оценкой не было.

Выполненная соискателем работа представляет собой завершённое исследование в области физики конденсированного состояния, а полученные результаты соответствуют требованиям к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

2. Актуальность диссертационной работы.

Диссертационная работа направлена на установление природы и выявление закономерностей процессов, протекающих в стеклах в сверхсильных локальных электрических полях и ответственных за формирование рельефа поверхности. Актуальность этой проблемы определяется перспективой разработки нового типа технологии нано- и микроструктурирования стеклообразных материалов – электрополевой печати, обеспечивающей формирование заданного поверхностного рельефа и рельефа химической стойкости для последующего химического травления. Особенностью такого подхода является простота реализации, не требующей применения стандартных литографических методов. Разрабатываемая методика может найти широкое применение при изготовлении структур фотоники. Широкая область использования стёкол и нанокompозитов на их основе определяется их низкой стоимостью, технологичностью и широкой вариабельностью свойств. На сегодняшний день в области физики и технологии формирования субмикронных структур на основе стеклообразных материалов остается достаточно много пробелов, требующих детального изучения. Поэтому тема диссертационной работы Редуто И. В. безусловно, является актуальной.

3. Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации.

За время обучения в аспирантуре Редуто И. В. зарекомендовал себя на кафедре физики и технологии наногетероструктур Академического университета как высококвалифицированный специалист, обладающий отличной подготовкой и способный успешно решать разнообразные научно-технические задачи.

Постановка задачи, выбор методов исследования, анализ полученных результатов и их интерпретация осуществлялись И. В. Редуто совместно с научным руководителем. Экспериментальные исследования проводились преимущественно И. В. Редуто, в небольшой части совместно с соавторами опубликованных статей, обработка всех экспериментальных данных и

интерпретация результатов выполнены И.В. Редудо лично. Результаты, изложенные в диссертации, и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

4. Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается использованием современного оборудования и экспериментальных методов исследований, сопоставлением экспериментальных данных с результатами расчёта, численного моделирования и описанными в литературе данными. Полученные результаты не имеют внутренних противоречий.

5. Научная новизна работы состоит в следующем:

1. впервые обнаружено, что при поляризации стекол в воздухе область разряда в атмосфере вблизи края анодного электрода выступает в качестве вторичного анода, размер которого увеличивается с ростом напряжения;
2. впервые рассчитаны механические напряжения, возникающие в стекле при его поляризации с использованием структурированных электродов;
3. впервые установлена связь между размерами «окна» поляризуемой области и результатами роста наночастиц при обратной диффузии из поляризованного ионообменного стекла под действием атмосферы водорода;
4. с помощью химической обработки стекла, поляризованного с помощью структурированного электрода, в полирующем травителе впервые сформированы эффективные дифракционные решетки;
5. впервые показана применимость реактивного ионного травления для формирования рельефа на поверхности поляризованных стекол и сформированы субмикронные рельефные структуры.

6. Значимость полученных результатов для теории и практики:

Полученные результаты представляют особую важность как с фундаментальной точки зрения для понимания особенностей процессов, происходящих в стекле при поляризации, так и для решения актуальных задач микро- и наноструктурирования, микрофлюидики, плазмоники и сенсорики. Формируемые с помощью технологии термоэлектродолевой печати элементы могут найти широкое применение, в частности, при тиражировании монолитных оптических схем с интегрированными дифракционными структурами, микроканалов, интегрируемых с чувствительными элементами рамановских датчиков, двумерных фазовых масок и др.

7. Внедрение результатов работы. Результаты данного диссертационного исследования использовались при выполнении следующих проектов и грантов: РФФИ 16-32-00451 (2016г.); Минобрнауки 16.1233.2014/К (2014-2016 гг); FP7 269140 “Nanocom” (2015).

8. Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. IV Международная конференция по метаматериалам и нанофотонике «METANANO 2019», 15-19 июля 2019, Санкт-Петербург, Россия;
2. Международная конференция «Optics & Photonics Days», 27-29 мая 2019, Эспоо, Финляндия;
3. XLII Научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ», 19-24 ноября 2018, Санкт-Петербург, Россия;
4. III Международная конференция по метаматериалам и нанофотонике «METANANO 2018», 17 - 21 сентября 2018, Сочи, Россия;
5. Международная конференция «Optics & Photonics Days», 28 - 30 мая 2018, Ювяскюля, Финляндия;
6. V Международная школа-конференция «Saint-Petersburg OPEN 2018», 2-5 апреля 2018, Санкт-Петербург, Россия;
7. IV Международная школа-конференция «Saint-Petersburg OPEN 2018», 3-6 апреля 2017, Санкт-Петербург, Россия;
8. Международная конференция «Physics Days», 21-23 марта 2017, Турку, Финляндия;
9. Международная конференция «Symposium on Future Prospects for Photonics», 14-15 декабря 2016, Тампере, Финляндия;
10. II Международная научная конференция «Наука будущего – наука молодых», 20-23 сентября 2016, Казань, Россия;
11. Международная конференция «Optics & Photonics Days 2016», 17-18 мая, Тампере, Финляндия;
12. III Международная школа-конференция «Saint-Petersburg OPEN 2016», 28-30 мая 2016, Санкт-Петербург, Россия.

Личный вклад автора. В представленных работах, опубликованных вместе с соавторами, личный вклад автора состоял в разработке методик, непосредственном проведении экспериментов и анализе экспериментальных исследований.

9. Публикации.

Материалы диссертационных исследований Редута И. В. отражены в 12 работах, опубликованных в журналах, входящих во всероссийский перечень ВАК и международные базы SCOPUS и Web of Science:

1. Reduto I. V. Relief micro- and nanostructures by reactive ion and chemical etching of poled glasses / **I. Reduto**, A. Kamenskii, V. Zhurikhina, Yu. Svirko, A. Lipovskii // *Optical Materials Express*. – 2019. – Vol. 9. – № 1. – P. 3059;
2. Reduto I. V. RIE for structuring E-field processed glasses / **I. Reduto**, D. Raskhodchikov, E. Gangrskaaia, V. Kaasik, Yu. Svirko, A. Lipovskii // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1124. – P. 051059;
3. Reduto I. V. Volume relaxation of poled glasses: surface relief enhancement / **I.V. Reduto**, V.P. Kaasik, A.A. Lipovskii, D.K. Tagantsev // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2018. – Vol. 499 – P. 360-362;
4. Reduto I. V. Peculiarities of glass surface structuring via electric field imprinting / **I. Reduto**, A. Kamenskii, A. Redkov, A. Lipovskii // *Journal of the Electrochemical Society*. – 2017. – Vol. 164 – №. 13 – P. E385-E390;
5. Alexandrov S. E. Plasma-etching of 2D-poled glasses: A route to dry lithography / S. E. Alexandrov, A. A. Lipovskii, A. A. Osipov, **I. V. Reduto**, D. K. Tagantsev // *Applied Physics Letters*. – 2017. – Vol. 111. – № 11. – P. 111604;
6. Kamenskii A. N. Effective diffraction gratings by acidic etching of thermally poled glasses / A. N. Kamenskii, **I. V. Reduto**, V. D. Petrikov, A. A. Lipovskii // *Optical Materials*. – 2016. – Vol. 62. – P. 250-254;
7. Редута И. В. Самоорганизованное выращивание малых групп наноостровков на поверхности поляризованных ионообменных стекол / **И. В. Редута**, С. Д. Червинский, А. Н. Каменский, Д. В. Карпов, А. А. Липовский // *Письма в ЖТФ*. – 2016. – Vol. 42. – № 2. – P. 72-78;
8. Kamenskii A. N. Modes of silver nanoisland film growth on the surface of ion-exchanged glass / A. Kamenskii, **I. Reduto**, J. Kobert, A. Lipovskii // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2015. – Vol. 643. – P. 012125;
9. Chervinskii S. D. 2D-patterning of self-assembled silver nanoisland films / S. Chervinskii, **I. Reduto**, A. Kamenskii, I. Mukhin, A. Lipovskii // *Faraday Discussions*. – 2015. – Vol. 186;
10. Redkov A. V. Plasmonic molecules via glass annealing in hydrogen / A. Redkov, S. Chervinskii, A. Baklanov, **I. Reduto**, V. Zhurikhina, A. Lipovskii // *Nanoscale Research Letters*. – 2014. – Vol. 9. – P. 606;
11. Reduto I.V. SERS-applicable silver nanoisland films grown under protective coating / **I. Reduto**, S. Chervinskii, A. Matikainen, A. Baklanov, A. Kamenskii, A. Lipovskii // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2014. – Vol. 541. – P. 012073;

12. Chervinskii S. D. Formation and 2D-patterning of silver nanoisland film using thermal poling and out-diffusion from glass / S. Chervinskii, V. Sevriuk, **I. Reduto**, A. Lipovskii // Journal of Applied Physics. – 2013. – Vol. 114. – P. 224301.

Заслушав доклад Редудо И. В. об основных положениях выполненной диссертации, рассмотрев и обсудив содержание диссертации, представляемой автором на защиту, семинар Центра нанотехнологий постановил:

Диссертация «Термо-полевая модификация для формирования наноструктур на поверхности стекол» Редудо Игоря Владимировича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния».

(Протокол № 4 от «22» июля 2019 г.).

Диссертационная работа рассмотрена и настоящее заключение подготовлено и утверждено научным семинаром Центра нанотехнологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургского национального исследовательского Академического университета Российской академии наук».

Заместитель Председателя
семинара Центра нанотехнологий
Академического университета,
д.ф.-м.н. Максимов М. В.

Секретарь
семинара Центра нанотехнологий
Академического университета,
к.ф.-м.н. Мухин И. С.