

На правах рукописи

РЕДУТО Игорь Владимирович

Термо-полевая модификация для формирования наноструктур
на поверхности стекол

специальность: 01.04.07 – физика конденсированного состояния

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук»

Научный руководитель:

Липовский Андрей Александрович

доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Смирнов Михаил Борисович

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики твердого тела физического факультета ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»

Нашекин Алексей Викторович

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Диагностика материалов и структур твердотельной электроники» ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе» РАН

Ведущая организация:

Акционерное общество "Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения Всероссийского научного центра "Государственный Оптический Институт им. С. И. Вавилова"

Защита состоится "24" октября 2019 г. в 16-00 час. на заседании диссертационного совета Д 002.269.01 при федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук» по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д.8, корпус 3, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академического Университета и на сайте <http://www.spbau.ru> в разделе «Диссертационный совет».

Автореферат разослан "___" ____ 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.269.01

доктор физико-математических наук

Максимов М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Как в высоковольтных электрических системах, так и в устройствах и элементах субмикронного масштаба возникают высокие электрические поля. Задача предотвращения протекания паразитных электрических токов через диэлектрические элементы подобных систем успешно решается. При высоких полях зачастую наблюдается явление поляризации диэлектрика. Существует большая группа диэлектриков, содержащих способные к дрейфу ионы, характеризующиеся малыми подвижностями и высокими энергиями активации. К таким материалам относятся стекла и нанокомпозиты на их основе. Широкая область использования этих материалов определяется их низкой стоимостью, технологичностью и широкой вариабельностью свойств. Сравнительно недавно было продемонстрировано существование линейного электрооптического эффекта [1] и генерации второй оптической гармоники (ГВГ) [2,3] в стеклах после приложения к ним постоянного электрического поля при повышенной температуре [4]. Такую обработку принято называть термо-электрической поляризацией (ТЭП) стёкол. До настоящего времени исследования ТЭП были, в основном, направлены на повышение эффективности ГВГ [5]. В поляризованных стеклах также зарегистрированы такие эффекты, как изменение показателя преломления [6,7], подавление нуклеации металлических наночастиц при фазовом распаде [8], изменение состава модифицированной области [9], ее химической стойкости [10] и формирование поверхностного рельефа [11,12]. Причиной последнего является релаксация объема поляризованной области стекла. Поляризация с помощью рельефного анодного электрода, обеспечивающего заданное распределение поляризованных областей на поверхности стеклянной подложки, может быть использована для формирования двумерного профиля поверхности стекла [5], при этом, если анодный электрод допускает многократное использование, то достаточно легко может быть обеспечено тиражирование таких структур. Изменение химической стойкости при поляризации стекла [10] дает возможность селективного химического травления поляризованных областей, что позволяет увеличить высоту рельефа сформированной при

поляризации двумерной структуры. При этом существенной является локальность поляризации, обусловленная, прежде всего, краевыми эффектами [13].

Проблемой, на решение которой направлена диссертационная работа, является 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 и стеклометаллических композитов – 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 изготавлении структур фотоники.

Целью диссертационной работы являлась разработка подходов к применению термоэлектрической поляризации многокомпонентных стекол для создания рельефных структур и формирования металлических наноструктур на их поверхности.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Исследование влияния края электрода на результаты поляризации стекол с использованием плоского и структурированного электрода.
2. Исследование применимости, поляризованной с помощью структурированного электрода, области стекла в качестве маски для химического или реактивного ионного травления.
3. Установление связи между размерами структурного элемента («окна») поляризованной области ионообменного стекла и результатами роста металлических наноструктур при обратной диффузии металла из неполяризованной области стекла при его термообработке в атмосфере водорода.
4. Формирование демонстрационных рельефных структур на поверхности поляризованных стекол.

Научная новизна результатов исследований, выполненных в рамках диссертационной 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» поляризируемой 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.

Основные методы исследования

Методы формирования и модификации субмикронных структур на поверхности стёкол включали в себя термоэлектрополевую модификацию, химическое и реактивно-ионное травление, ионный обмен, отжиг в восстановительной атмосфере водорода и электронную литографию для изготовления анодных электродов. Исследования полученных структур проводились при помощи сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии (АСМ), вторично-ионной масс спектрометрии (ВИМС), оптической и механической профилометрии, а также спектроскопии комбинационного рассеяния.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. 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^- .

2. 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.
3. При поляризации стекла в воздухе при напряжениях выше 300 В существенно искается переносимая на стекло с помощью травления структура, задаваемая анодным электродом.
4. 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.

Научная и практическая значимость

Полученные результаты представляют особую важность как с фундаментальной точки зрения - для понимания особенностей процессов, протекающих в стеклах при поляризации, так и для решения актуальных задач микро- и наноструктурирования, микрофлюидики, плазмоники и сенсорики. Формируемые с помощью технологии термоэлектрополевой 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.

Личный вклад автора

Результаты, изложенные в диссертации, и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Экспериментальные исследования проводились совместно с соавторами, обработка экспериментальных данных проведена автором лично. Постановка задачи, выбор методов исследования, анализ полученных результатов и их интерпретация осуществлялись совместно с научным руководителем.

Апробация работы

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

Объект интеллектуальной собственности представлен свидетельством о государственной регистрации патента: Способ получения структурированных сплошных и

островковых плёнок на поверхности стекла: пат. 2562619 Рос. Федерации МПК С 03 С 21/00, В 82 Y 30/00 / Червинский С.Д., Редьков А.В., Редуто И.В., Сергеев В.Ю., Липовский А.А.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный политехнический ун-т. – № 2014106390/03; заявл. 20.02.2014; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 25. – 10 с.: ил.

По теме диссертации сделано 12 докладов, представленных на всероссийских и международных конференциях. Основные результаты диссертационной работы отражены в **публикациях**, входящих во всероссийский перечень ВАК и международные базы SCOPUS и Web of Science – 12 статей. Список публикаций приведен в конце реферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемых источников. Полный объем диссертации составляет 128 страниц, включая 56 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 130 библиографических наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, определены цель и задачи диссертационного исследования, охарактеризованы новизна и практическая ценность работы, сформулированы основные защищаемые положения и представлена общая информация о содержании диссертации.

Первая глава диссертации - «Обзор литературы», описывает текущее состояние в области исследований к началу выполнения работы. Рассмотрены общие представления об объекте исследования - многокомпонентных стеклообразных материалах. Подробно описаны поляризация стекла и протекающие при этом процессы. Представлены данные, относящиеся к смещению различных ионов-модификаторов стекла, ответственных за возникновение объемного заряда в приповерхностной области стекла, под действием электрического поля, и о связи высоты формирующегося при поляризации стекол рельефа поверхности стекла с параметрами процесса поляризации: температурой, приложенным напряжением, приложенным давлением и прошедшим зарядом. Обсуждены работы, в которых продемонстрирована возможность электрополевой печати изображения электрода. Подробно рассмотрена доступная информация, относящаяся к краевым эффектам при ТЭП.

Вторая глава - «Техника измерений и экспериментальные методики». В этой главе подробно рассмотрены использованные при выполнении работы методы исследования особенностей, возникающих в стекле вблизи края электрода при поляризации образца. Механическая и оптическая профилометрии позволяют исследовать высоты структур микронного масштаба. Атомно-силовая и сканирующая растровая микроскопии дают возможность исследования морфологии субмикронных- и наноструктур. Оптическая спектроскопия используется как экспресс-методика контроля роста серебряных наноостровковых плёнок. Вторично-ионная масс спектрометрия и спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) позволяют проводить исследования химического состава и структуры поляризованных стёкол. Применимость серебряных наноостровковых плёнок в сенсорике демонстрируется спектроскопией комбинационного рассеяния.

Помимо методов измерений вторая глава описывает набор методик подготовки и обработки экспериментальных образцов. Изготовление анодных электродов (см. Рисунок 1) для поляризации было выполнено при помощи электронной- и фотолитографий. Детально описаны использованные методики поляризации стекол, а также поляризации ионообменных стекол с последующим

их отжигом в восстанавливающей атмосфере для выращивания серебряных наноструктур. Химическое, реактивно-ионное и плазмо-химическое травление применяются для увеличения высоты рельефа поверхности после поляризации, при этом поляризованная область

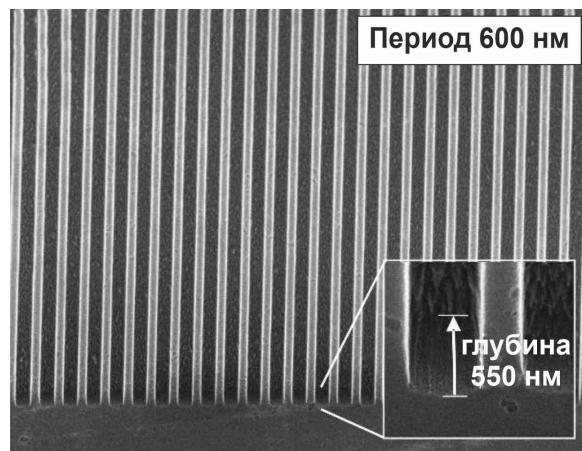


Рисунок 1 - Изображение стеклографитового электрода.

стекла выступает в качестве маски для травления (см. Рисунок 2). Также рассмотрена методика осаждения атомных слоёв диэлектриков, использованная при исследовании краевых эффектов при поляризации стекол в отсутствие доступа примесей, поступающих из атмосферы.

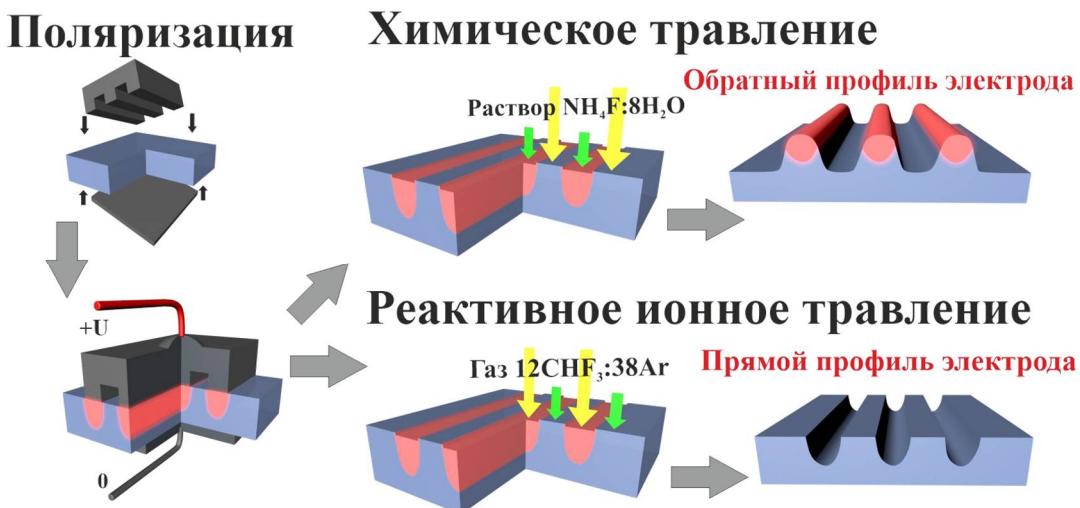


Рисунок 2 - Схема термоэлектрополевой модификации, «мокрого» химического и «сухого» реактивно-ионного травления стекла (РИТ). Приложение 300-1000 В при помощи профилированного анодного электрода к нагретому до 300°C стеклу приводит к формированию скрытой структуры, то есть локальному смещению вглубь стекла щелочных и щелочно-земельных ионов. При химическом травлении скорость травления чистой (неполяризованной) области стеклянного слайда выше, в результате формируется «обратный» профиль электрода. При реактивном ионном травлении выше скорость травления поляризованной области стекла, в результате чего формируется прямой профиль электрода [14].

Третья глава «Структурирование поверхности стекол при поляризации и термообработке» содержит описание результатов исследования эффектов, проявляющихся в поляризованных стеклах вблизи областей, соответствующих краям электрода или его структурных элементов. В частности, в исследованиях использована поляризация стёкол анодными электродами с периодическим рельефом с периодами от 200 нм до 80 мкм. Третья глава также включает результаты исследования увеличения высоты сформированного в процессе поляризации рельефа на поверхности стекла при дополнительной термообработке после поляризации. Продемонстрировано увеличение высоты со 150 нм до 300 нм за счет дополнительной релаксации поляризованной области, которая описана в рамках реологической модели Бюргера [15,16]. В рамках докторской работы исследовано влияние атмосферного электрического разряда, возникающего близи края электрода, на качество получаемой на стекле структуры (см. Рисунок 3). Показано, что при напряжениях поляризации выше 300 В область атмосферного электрического разряда выступает в качестве вторичного анодного электрода.

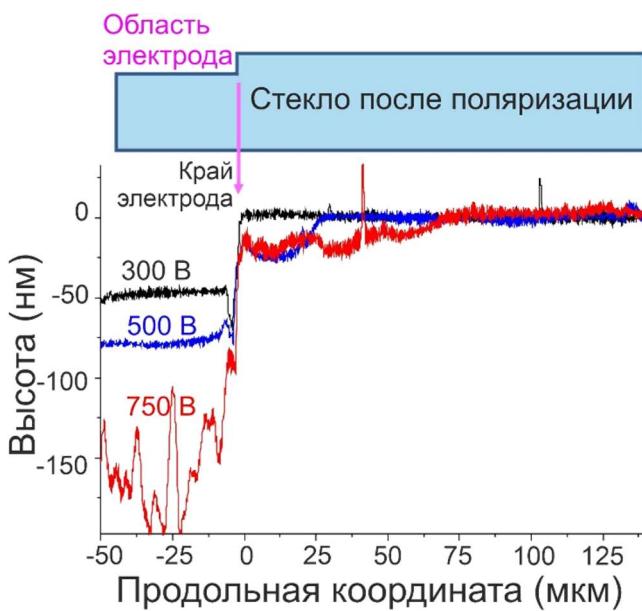


Рисунок 3 - Схематическое изображение формирования рельефа на поверхности стекла и рельеф поверхности стекла вблизи края анодного электрода. Рельеф получен в результате ТЭП стекла при температуре 300°C под приложенным напряжением 300, 500 и 750 В [17].

При помощи спектроскопии комбинационного рассеяния охарактеризованы структурные изменения стекла вблизи края используемого при поляризации электрода (см. Рисунок 4). Обнаружено, что вблизи края электрода в стекле формируется область, структура которой отличается от структуры стекла под электродом и от структуры исходного стекла, что связано с особенностями электрического поля на краю электрода и притоком гидрогенизованных примесей из атмосферы. Выполнено моделирование упругих напряжений, возникающих в стекле

при поляризации (см. Рисунок 5). Вторично-ионная масс спектрометрия позволила получить данные об изменении элементного состава поляризованной области стекла. Заглублённый пик концентрации кальция свидетельствует о смещении и накоплении ионов кальция в субанодной области стекла, в отличие, от ионов натрия, которые смещаются дальше от поверхности и не образуют пика концентрации.

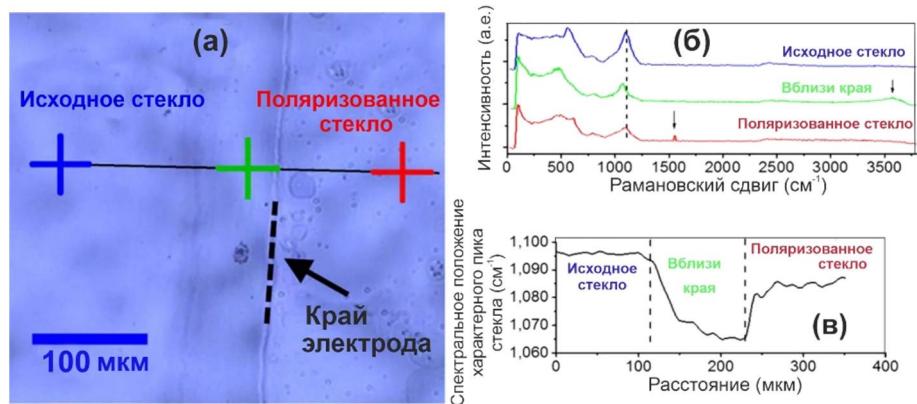


Рисунок 4 - Определение характера поляризации стекла вблизи края анодного электрода при помощи микроспектроскопии комбинационного рассеяния. Схема измерения (а); спектры комбинационного рассеяния образца в отмеченных на рисунке точках (б) и зависимость положения максимума характерной полосы КР силикатного стекла в диапазоне 890-1240 см^{-1} при сканировании образца вдоль чёрной линии (в). Край электрода обозначен чёрной пунктирной линией [17].

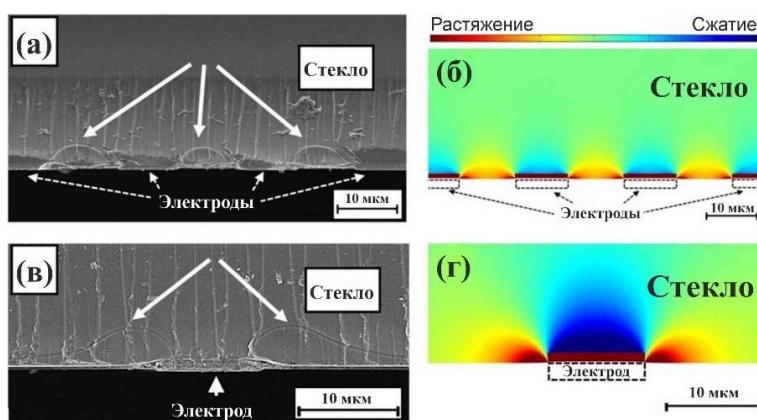


Рисунок 5 - Визуализация напряжений в стекле при его поляризации электродом со структурой периодом 20 мкм (а) и с отдельной полосой шириной 10 мкм (в). На рисунках (б,г) представлены результаты моделирования с помощью пакета программного обеспечения Comsol Multiphysics распределения напряжений в стеклах, соответствующие ситуациям (а,в) [17].

областями соответствующего углубления («окна») на поверхности анодного элек-

Особое внимание уделено процессу формирования и управлению параметрами получаемых методом обратной диффузии серебра при отжиге в атмосфере водорода групп из наноостровков серебра на поверхности поляризованного ионообменного стекла. В третьей главе предложены режимы формирования наноостровков на поверхности стекла. Единичные наноостровки формируются под

трова со сторонами размерами $\sim 200 - 300$ нм. Увеличение размеров области приводит к формированию двух, трёх и более близко-расположенных островков (см. Рисунок 6), а также цепочек из наноостровков. Проанализировано влияние условий поляризации и отжига образцов в атмосфере водорода на расстояние между наноостровками, их размеры и взаиморасположение. Сформированы островки с размерами от 50 нм до 200 нм при расстояниях между ними в группе от десятков до сотен нанометров (в зависимости от режима).

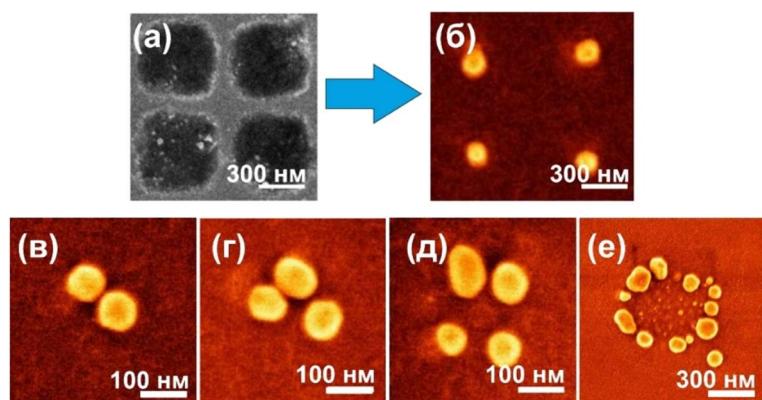


Рисунок 6 - Изображение СЭМ одного из электродов (а), и изображения массива из одиночных наноостровков (б), а также групп из двух (в), трёх (г), четырёх (д) и более (е) наноостровков серебра, выращенных, в процессе отжига в водороде, на поверхности ионообменного стекла, поляризованного с помощью структурированных электродов.

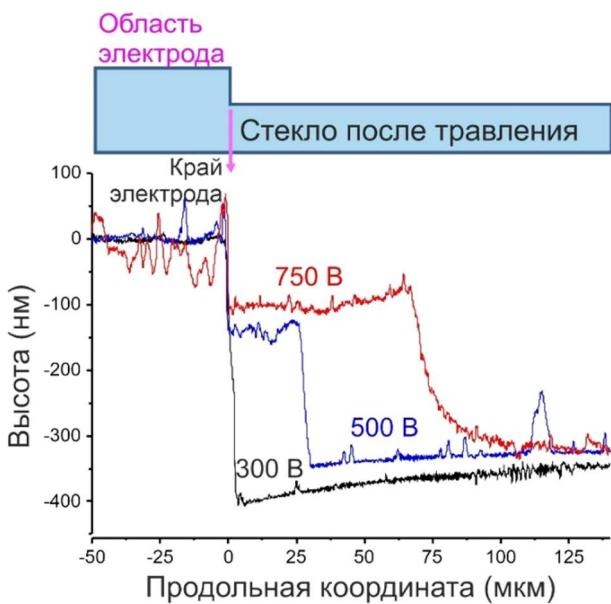


Рисунок 7 - Рельеф вблизи края электрода получен в результате травления стекол, обработанных ТЭП (стекла соответствует образцам, описанным на Рисунке 3). Травление выполнялось в течение 10 минут в NH_4F , разведённом в соотношении 1:8 дистиллированной водой [17].

Четвёртая глава «Структурирование поверхности поляризованных стекол при травлении» посвящена формированию рельефных структур на поверхности стекол посредством травления через «скрытую» маску, формируемую в результате поляризации. Показано, что при химическом травлении стекла поляризованного в воздухе при напряжениях выше 300 В наблюдается образование плато профиля поверхности (см. Рисунок 7)

вследствие поляризации стекла около края электрода за счет атмосферного электрического разряда.

При поляризации профилированным анодным электродом локально изменяются структура, состав и, соответственно, свойства субанодной области стекла. Отличие скоростей травления поляризованных и неполяризованных областей обеспечивает образование рельефа поверхности стекла при травлении.

В этой главе представлены результаты исследования влияния краевых эффектов, возникающих при поляризации, проявляющихся при травлении поляризованных стёкол (см. Рисунки 7 и 8). В экспериментах обнаружено, что при поляризации в стекле вблизи края электрода формируется область, со структурой, отличной от структуры стекла под электродом и от структуры исходного стекла из-за вхождения примесей из атмосферы и особенностей электрического поля на краю электрода.

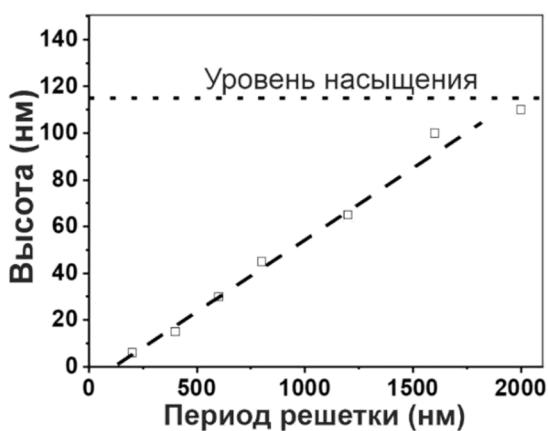


Рисунок 9 - Высота субмикронных решеток в процессе РИТ. ТЭП выполнена при помощи прижимного стеклографитового электрода при температуре 300°C под напряжением 300 В в течение 30 минут, РИТ в составе смеси газов 12CHF₃:38Ar.

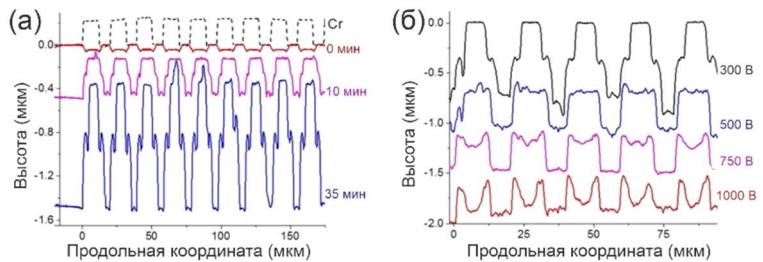


Рисунок 8 - Профили поверхности стекла после ТЭП с помощью периодического пленочного анодного электрода и химического травления. Профили после ТЭП при температуре 300°C под приложенным напряжением 300 В (0 мин.) и последующего травления в течение 10 мин, затем ещё 25 мин (а), и после ТЭП под напряжениями 300, 500, 750 и 1000 В и травления в течение 10 мин (б) [17]

Продемонстрировано эффективное формирование на поверхности поляризованных стёкол периодических структур микронного (см. Рисунок 8) и субмикронного (см. Рисунки 9 и 10) латерального разрешения. Высота профиля формируемых таким методом структур достигает единиц микрон.

Исследование жидкостного травления поляризованных стекол в полирующем кислотном травителе, показало, что при этом

может быть обеспечена высота рельефа в 4 раза превышающая достижимую при использовавшемся ранее травлении в щелочном растворе, скорость травления при этом выше в ~ 20 раз.

Выполнено сравнение жидкостного травления с плазмохимическим и реактивно-ионным травлением (РИТ). Разобраны особенности каждой из выбранных методик травления, проявляющиеся при обработке поляризованных стекол. Максимально достигнутая высота профиля поверхности стекла, поляризованного с использованием структурированного анодного электрода при жидкостном травлении, в ~ 20 раз больше, чем при РИТ. Продемонстрировано формирование структур нанометрового масштаба высокого качества при использовании реактивно-ионного травления. Отжиг стекол после поляризации позволяет увеличить высоту сформированного при поляризации рельефа в ~ 2.5 раза.

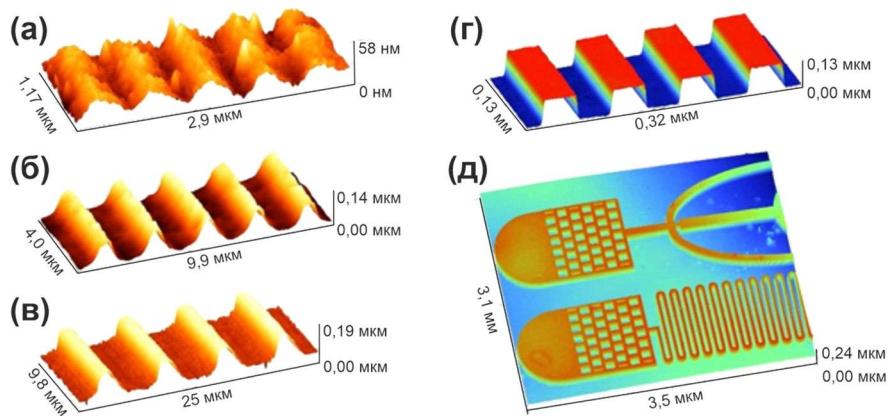


Рисунок 10 - Изображения структур, полученных на поверхности стекла при помощи РИТ. Изображения АСМ решеток с периодами 0,6 (а), 2 (б) и 6 мкм (и). Изображения решетки периодом 80 мкм (г) и фрагмента структуры для микрофлюидики (д), полученные при помощи оптического профилометра.

В заключении обобщены результаты диссертационной работы:

- Обнаружено, 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 поступления примесей из атмосферы.
- Построена модель механических напряжений, возникающих в стекле при его поляризации с использованием структурированных электродов.

- Показано, что при поляризации в воздухе при напряжениях выше 300 В существенно искажается переносимая на стекло структура анодного электрода за счет того, что область разряда в атмосфере вблизи края анодного электрода выступает в качестве вторичного анода.
- Показано, что термообработка в атмосфере водорода стекла, содержащего ионы серебра, профиль концентрации которых задан с помощью поляризации, приводит к обратной диффузии атомов серебра из подложки с последующим формированием на поверхности стекла групп из наночастиц. Количество наночастиц серебра в группе задаётся параметрами соответствующего углубления («окна») на поверхности анодного электрода, условиями поляризации и отжига образца в атмосфере водорода. В частности, единичные наночастицы формируются под областями «окон» электрода со сторонами размерами $\sim 200 - 300$ нм. Увеличение размеров области приводит к формированию двух, трёх и более близко-расположенных частиц, а также цепочкам из наноструктур.
- Травление поляризованных стёкол обеспечивает эффективное формирование дифракционных решёток с высотой профиля порядка единиц микрон. Максимально достигнутая высота профиля поверхности стекла, поляризованного с использованием структурированного анодного электрода при жидкостном травлении в ~ 20 раз больше, чем при реактивно-ионном травлении.
- Реактивное ионное травление позволяет обеспечить формирование субмикронных рельефных структур на поверхности поляризованных стекол, отжиг стекол после поляризации позволяет увеличить высоту сформированного при поляризации рельефа в ~ 2.5 раза.

Обнаруженные в работе особенности поляризации многокомпонентных стёкол могут быть применены для улучшения качества формируемых на поверхности стекол дифракционных решёток и других рельефных структур. Разработанная методика управляемого роста групп из наноструктур методом обратной диффузии не ограничивается наночастицами серебра и может быть применена для других материалов, в частности, для наночастиц меди.

Список основных публикаций по теме диссертации

- A1. 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;
- A2. Reduto I. V. RIE for structuring E-field processed glasses / I. Reduto, D. Raskhodchikov, E. Gangrskaya, V. Kaasik, Yu. Svirko, A. Lipovskii // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1124. – P. 051059;
- A3. 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;
- A4. 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;
- A5. 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;
- A6. 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;
- A7. Редуто И. В. Самоорганизованное выращивание малых групп наноструктур на поверхности поляризованных ионообменных стекол / И. В. Редуто, С. Д. Червинский, А. Н. Каменский, Д. В. Карпов, А. А. Липовский // Письма в ЖТФ. – 2016. – Vol. 42. – № 2. – P. 72-78;
- A8. 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;
- A9. 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;

- A10. 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;
- A11. 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;
- A12. 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.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Long X.-C. Measurement of the linear electro-optic coefficient in poled amorphous silica / X.-C. Long, R.A. Myers, S.R.J. Brueck // Optics Letters. – 1994. – Vol. 19. – № 22. – P. 1819-1821.
2. Horinouchi S. Second harmonic generation (SHG) in corona-poled glass film waveguides / S. Horinouchi, G.J. Zhang, T. Kinoshita, K. Mito, K. Sasaki // Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology Section B: Nonlinear Optics. – 1995. – Vol. 14. – P. 301-312.
3. Myers R.A. Large second-order nonlinearity in poled fused silica / R.A. Myers, N. Mukherjee, S.R.J. Brueck // Optics Letters. – 1991. – Vol. 16. – № 22. – P. 1732.
4. Krieger U.K. Field assisted transport of Na⁺ ions, Ca²⁺ ions and electrons in commercial soda-lime glass I: Experimental / U.K. Krieger, W.A. Lanford // Journal of Non-Crystalline Solids. – 1988. – Vol. 102. – P. 50-61.
5. Liu Q. Second harmonic generation in N-doped H : SiO₂ films by poling under x-ray irradiation / Liu Q., Poumellec, B., Cortes, R., Du, J. // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2013. – Vol. 46. – P. 505102.
6. Lipovskii A.A. Imprinting phase/amplitude patterns in glasses with thermal poling / A.A. Lipovskii, V. V. Rusan, D.K. Tagantsev // Solid State Ionics. – 2010. – Vol. 181. – № 17-18. – P. 849-855.
7. Oven R. Measurement of planar refractive index profiles with rapid variations in glass using interferometry and total variation regularized differentiation / R. Oven // Journal of Modern Optics. – 2015. – Vol. 62. – № S2. – P. S59-S66.
8. Chervinskii S. 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. – № 224301.
9. Mariappan C.R. Mechanism and kinetics of Na⁺ ion depletion under the anode during electro-thermal poling of a bioactive glass / C.R. Mariappan, B. Roling // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2010. – Vol. 356. – P. 720-724.
10. Margulis W. Interferometric study of poled glass under etching / W. Margulis, F.

- Laurell // Optics Letters. – 1996. – Vol. 21. – № 21. – P. 1786.
11. Брунков П.Н. Формирование рельефа с субмикронным разрешением при поляризации стекол и стеклометаллических нанокомпозитов / П. Н. Брунков, В.Г. Мелехин, В.В. Гончаров, А.А. Липовский, М.И. Петров // Письма в Журнал Технической Физики. – 2008. – Vol. 34. – № 23. – Р. 73-79.
 12. Ikutame N. Low-temperature fabrication of fine structures on glass using electrical nanoimprint and chemical etching / N. Ikutame, K. Kawaguchi, H. Ikeda, D. Sakai, K. Harada, S. Funatsu, J. Nishii // Journal of Applied Physics. – 2013. – Vol. 114. – № 8. – Р. 083514.
 13. Dussauze M. Accurate Second Harmonic Generation Microimprinting in Glassy Oxide Materials / M. Dussauze, V. Rodriguez, F. Adamietz, G. Yang, F. Bondu, A. Lepicard, M. Chafer, T. Cardinal, E. Fargin // Advanced Optical Materials. – 2016. – Vol. 4. – № 6. – Р. 929-935.
 14. Reduto I. Relief micro- and nanostructures by the reactive ion and chemical etching of poled glasses / I. Reduto, A. Kamenskii, P. Brunkov, V. Zhurikhina, Yu. Svirko, A. Lipovskii // Optical Materials Express. – 2019. – Vol. 9. – № 7. – Р. 3059-3068.
 15. Brawer S. Elementary theory of relaxation and viscoelasticity, chapter 4, Relaxation in Viscous Liquids and Glasses / S. Brawer. – Columbus, Ohio: American Ceramic Society Inc., 1985. – 63–74 p.
 16. Shen J. Stress relaxation of a soda lime silicate glass below the glass transition temperature / J. Shen, D. Green, R. Tressler, D. Shelleman // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2003. – Vol. 324. – Р. 277-288.
 17. Reduto I. Mechanisms and peculiarities of electric field imprinting in glasses / I. Reduto, A. Kamenskii, A. Redkov, A. Lipovskii // Journal of the Electrochemical Society. – 2017. – Vol. 164. – № 13. – Р. E385-E390.