

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК \_\_\_\_\_

Тимошевич  
Ирина Владимировна

Планарный волновод на основе пористого оксида алюминия

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-41 80 03 «Нанотехнологии и наноматериалы»  
(в электронике)

---

*(подпись магистранта)*

Научный руководитель  
Лазарук Сергей Константинович  
доктор физико – математических наук,  
профессор

---

*(подпись научного руководителя)*

Минск 2017

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с прогрессивным развитием науки и техники в мировом научном сообществе значительное внимание уделяется изучению эффектов и явлений в наноразмерных структурах. Полученные знания призваны обеспечить развитие принципиально новых технологий, так называемых нанотехнологий. Особенно это касается твердотельной электроники, где с возникновением новых перспективных областей, таких, как наноэлектроника, нанофотоника, спинтроника, появляются принципиально новые возможности для обработки и передачи информации.

К таким перспективным направлениям относится развитие интегральной оптоэлектроники. Используя особенности наноразмерных эффектов и явлений, представляется возможным создавать принципиально новые изделия интегральной электроники. В гигагерцевом диапазоне частот информация передается за счет быстрых фотонов, поэтому используются оптические межсоединения ИС, поскольку применение электронных межсоединений ИС в таких случаях невозможно по причине характерных для них резистивно-емкостных задержек.

Одним из условий получения качественных оптических межсоединений является изготовление эффективной волноводной структуры. Оксидные пленки вентильных металлов весьма перспективны для изготовления тонкопленочных волноводов, применяемых в интегральной электронике. За последние годы был достигнут значительный прогресс в оптимизации волноводных свойств оксидных пленок на основе вентильных металлов. Тем не менее, для их практического использования в качестве волноводных структур необходимо дальнейшее совершенствование их параметров с учетом требований реальных приборов, в частности, по их эффективности, быстродействию и стабильности. Для повышения эффективности и других параметров волноводов необходимо проведение исследований влияния структуры оксидной пленки на оптические свойства. Использование наноструктурированного пористого оксида алюминия в качестве разделительного диэлектрика с низкой диэлектрической проницаемостью весьма перспективно, поскольку способно повысить быстродействие существующих ИС за счет снижения паразитных резистивно-емкостных задержек в системе металлических межсоединений.

В последние годы мировое научное сообщество уделяет особое внимание исследованию возможности применения анодных пленок наноструктурированных оксидов вентильных металлов (алюминия, титана и тантала) в качестве эффективных волноводных структур и светоотражающих покрытий изготовленных по технологии «глаз мотылька», что позволяет наиболее эффективно использовать весь спектр солнечного света.

Упомянутые наноструктурированные материалы формируются электрохимическим анодированием алюминия и прочих вентильных металлов. В связи с вышеотмеченным значительный практический интерес представляет проведение исследований по получению новых оксидных пленок на основе наноструктурированных оксидов вентильных металлов методом электрохимического анодирования, изучение их электрофизических свойств и изготовление на их основе устройств для интегральной электроники, в частности, планарных волноводов. Решение названных проблем позволит получать наноструктурированные пленки с требуемыми оптическими свойствами, а также создавать на их основе волноводные структуры, используемые в изделиях оптоэлектроники.

Все вышесказанное определяет *актуальность исследований*, связанных с получением и изучением свойств оксидных пленок на основе наноструктурированных материалов, формируемых методом электрохимического анодирования вентильных металлов, и их применением в приборах интегральной оптоэлектроники.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы магистерской диссертации.** Актуальность работы определяется необходимостью улучшения волноводных свойств анодных пленок вентильных металлов, применяемых в качестве планарных волноводов.

**Цель и задачи исследования.** Создание структуры планарного волновода на основе пористого оксида алюминия

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

Измерение оптических параметров исследуемых пленок вентильных металлов.

Исследование влияния режимов анодирования на параметры формируемых пленок.

Исследование влияния режимов формирования волноводных структур на параметры планарных волноводов.

**Объект и предмет исследования.** В качестве *объекта исследования* выбраны наноструктурированные пленки, получаемые электрохимическим анодированием алюминия, титана, и тонкопленочных композиций на их основе. *Предмет исследования* – волноводные свойства получаемых анодных пленок и закономерности изменения этих свойств в зависимости от режимов анодирования.

**Связь работы с приоритетными направлениями научных исследований и запросами реального сектора экономики.** Работа выполнена в соответствии с утвержденной темой магистерской диссертации приказом по университету от 15 сентября 2015 года, рассмотрена и утверждена на заседании кафедры МНЭ (протокол от 07 сентября 2015 года).

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Увеличение толщины анодных оксидных пленок титана и тантала с ростом напряжения происходило по линейной зависимости.
2. Предельная толщина формируемых пленок анодных оксидов ограничена наступлением локальных электрических пробоев, приводящих к неоднородности полученных пленок.
3. Коэффициент преломления анодного оксида алюминия варьирует от 1,5 до 1,78 за счет примесного содержания титана в исходной пленке.
4. Анодный оксид алюминия, имеющий низкую пористость, содержащий сердцевину из нанокompозита оксид алюминия – оксид титана, обладающую повышенным коэффициентом преломления до 1,8, позволил снизить оптические потери в формируемых волноводных структурах до 0,8 дБ/см.

**Личный вклад соискателя.** Личный вклад соискателя заключается в выборе направления и постановке задач исследований, анализе и интерпретации результатов, а также в непосредственном выполнении основных исследований. Аналитическое исследование современного состояния исследований по формированию волноводных структур проводилось соискателем лично.

Выбранная тема потребовала глубоких знаний и не могла быть изучена без участия опытных высококвалифицированных специалистов в области микро- и наноэлектроники. Автор глубоко признателен соавторам научных публикаций, в особенности своему научному руководителю Лазаруку Сергею Константиновичу, который принимал участие в обсуждении задач и полученных результатов, оказывал консультативную помощь в процессе выполнения и оформления работы, без помощи которых выполнение работы было бы невозможно.

Во время работы над диссертацией соискателем были исследованы зависимости толщины пленки и коэффициента формовки от напряжения формовки, исследованы спектральные характеристики полученных пленок, изучены структурно – морфологические свойства пористого оксида алюминия, проведено исследование влияния режимов анодирования на параметры формируемых пленок, также исследование режимов формирования волноводных структур на параметры планарных волноводов. Разработка и применение волноводной структуры на основе пористого оксида алюминия в оптических межсоединениях интегральных микросхем проводилась совместно с научным руководителем.

**Публикации.** Основные положения, научно – исследовательской деятельности и результаты диссертации опубликованы в 2 (двух) статьях, будучи представлены в материалах V международной научной конференции Наноструктурные материалы - 2016: Беларусь- Россия- Украина: НАНО-2016 и в журнале «Доклады БГУИР» №5, 2016 года.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав с выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников, включающего 50 наименований, графического материала.

Общий объем диссертационной работы составляет 66 страниц, из которых 52 страницы основного текста, 28 рисунков на 24 страницах, 6 таблиц на 6 страницах, библиография из 48 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Логика построения диссертации заключается следующей последовательности структурных частей:

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы поиска способа изготовления эффективной волноводной структуры для создания качественных оптических межсоединений, применяемых в интегральной оптоэлектронике. Представлена перспектива изготовления тонкопленочных волноводов методом электрохимического анодирования вентильных металлов, в частности оксида алюминия, таким образом дано обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **первой главе** проведен анализ современного состояния исследований по формированию волноводных структур, в частности, обобщены существующие типы волноводных структур, особое внимание уделено структуре и свойствам планарного волновода. Рассмотрены различные методы получения тонкопленочных волноводов с учетом их достоинств и недостатков, в ходе чего дано обоснование преимущественной эффективности использования с данной целью метода электрохимического анодирования вентильных металлов, в частности, обоснована перспективность использования оксида алюминия. Также приведены способы возбуждения планарных волноводов. В конце главы даны выводы о том, что наноструктурированные пленки оксидов вентильных металлов, в частности, алюминия, титана, тантала и тонкопленочные композиции на их основе перспективно применять в интегральной и волоконной оптоэлектронике, в силу присущей им волноводной способности. Актуально применение нанотекстурированных оксидных пленок в волоконной оптике, различных сенсорах, медицинских диагностических устройствах и медицинских имплантатах.

Методом электрохимического анодирования можно формировать наноструктурные пленки материалов ряда  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $Ta_2O_5$  и других вентильных металлов, каждый из которых при наноструктурировании демонстрирует принципиально новые свойства, отличающиеся от их объемных аналогов. Среди этих свойств отмечена анизотропия оптических свойств пористого оксида алюминия, также анизотропия процесса пористого анодирования алюминия.

Во **второй главе** приведена методика подготовки и исследования экспериментальных образцов. Описана экспериментальная установка, дано ее схематическое изображение в виде фторопластовой электрохимической ячейки с вольфрамовым катодом, представляющей собой ёмкость с отверстием в донной части, внутрь которой залит электролит. Далее подробно описан режим анодирования, с указанием всех основных параметров, также приведены

наименования приборов, которые использовались для контроля режима анодирования.

Приведена методика измерения оптических параметров исследуемых пленок, рассмотрена суть метода цветных оттенков Ньютона и приведены необходимые формулы.

Далее описан метод измерения спектров отражения сформированных пленок.

В соответствии с темой исследования изложена методика формирования многослойного алюмооксидного волновода, для наглядности приведено схематичное изображение фрагмента поперечного сечения разрабатываемой конструкции планарного многослойного волновода.

В **третьей главе** приведены результаты экспериментов по формированию планарных волноводных структур методом электрохимического анодирования вентильных металлов, при этом поясняется, что в процессе анодирования при погружении оксидов алюминия, титана, тантала в электролит, не растворяющий оксидную пленку, и подаче положительного смещения происходит рост оксидной пленки. Путем анализа полученных результатов, сделаны выводы о том, что параметры формируемых пленок задаются режимами анодирования, в связи с чем существует возможность получения заданных размеров гексагональных ячеек за счет варьирования макроскопическими параметрами электрохимического процесса, что делает этот технологический процесс перспективным для изготовления ряда устройств, использующих наноразмерные эффекты и явления.

К особенностям наноструктур относятся анизотропия показателя преломления, определяемая направлением и местом прохождения светового потока, и фотолюминесценция в голубой области видимого диапазона. Анизотропия оптических свойств пористого оксида алюминия является причиной ряда оптических эффектов, среди которых преимущественное распространение света вдоль направления пор и двулучепреломление.

Различие цвета и, следовательно, толщины сформированных на титановой и танталовой поверхностях анодных пленок наиболее значимо для высоких значений напряжения формовки, при этом цвет сформированных пленок перекрывает весь цветовой диапазон видимого спектра от фиолетового до красного. Цвет анодной пленки определяется длиной волны, соответствующей наибольшему интерференционному пику. При неизменной длине волны и фиксированном угле падения отражательная способность изменяется с толщиной оксида. В зависимости от длины волны и угла падения возникают минимумы отражательной способности, характерные для определенной толщины пленки. Таким образом, минимумы при отражении соответствуют длинам волн, дающим максимум при прохождении света.

Существует зависимость электрических свойств пористого оксида алюминия от режимов его формирования. В частности, пористые оксиды, выращенные при высоких напряжениях формовки, имеют более качественные диэлектрические свойства. Изменение показателя преломления ( $n$ ) и диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) в исследуемых пленках связано с изменением пористости, алюминиевых пленок, имеющих исходную толщину до 1 мкм. При формировании пленок толщиной более 1 мкм, следует учитывать также, что при увеличении пористости формируемого оксида, упругость материала уменьшается. При этом коэффициент объемного роста для различных режимов формовки составляет от 1,1 до 1,6.

Для получения идеальной гексагональной структуры анодного оксида требуется анодирование нескольких микрометров, а значит, переход от произвольного роста пор при их зарождении к упорядоченному происходит после анодирования алюминиевого слоя определенной толщины. Для получения самоупорядоченных гексагональных ячеек оксида алюминия необходимо правильно подобрать электрические режимы формовки.

Кроме электрических режимов формовки процесс анодирования алюминия также зависит от ряда внешних условий, таких как температура электролита и освещенность обрабатываемой поверхности. Увеличение температуры и освещенности приводит к увеличению скорости анодирования. За счет выбора электролита можно варьировать значение показателя преломления формируемых пленок в диапазоне от 1,37 до 1,58, а значение диэлектрической проницаемости - в диапазоне от 5,8 до 8,2.

Многослойную структуру на основе пористого оксида алюминия с варьированием показателя преломления представляется возможным сформировать в результате изменения режимов процесса анодирования. Высшее значение показателя преломления пористого оксида алюминия соответствует 1,8, тогда как нижнее - 1,3.

По мнению автора, применение многослойной структуры на основе пористого оксида алюминия, перспективно в плане новых возможностей для оптических межсоединений в микроэлектронике. При этом приведенная интегрированная система СД-СВ-ФП способна работать в наносекундном диапазоне, обеспечивая эффективное преобразование электрического сигнала в световой и обратно в электрический.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, достижения последних лет по наноструктурированию материалов электрохимическим анодированием открывают принципиально новые возможности для развития нанотехнологий в различных областях науки и техники, среди которых особо следует отметить наноэлектронику и нанофотонику

В процессе работы над магистерской диссертацией был проведен аналитический обзор современного состояния исследований по формированию волноводных структур, методов получения наноструктурированных оксидных пленок с требуемыми оптическими свойствами для создания на их основе планарных волноводов, используемых в изделиях интегральной оптоэлектроники. Теоретически было обосновано, что метод электрохимического анодирования является наиболее перспективным для получения наноструктурированных оксидов вентильных металлов, поскольку за счет выбора электролита можно варьировать значение показателя преломления формируемых пленок в диапазоне от 1,37 до 1,58, а значение диэлектрической проницаемости - в диапазоне от 5,8 до 8,2.

В лабораторных условиях были проведены опыты и получены данные о том, что варьируя напряжение формовки в диапазоне от 10 до 200 В можно выращивать барьерные оксидные пленки толщиной от 30 до 300 нм.

Путём сравнения цветовой гаммы пленок, сформированных на титановой и танталовой поверхностях методом электрохимического анодирования, сделан вывод, что различие цвета и, следовательно, толщины исследуемых пленок наиболее значимо для высоких значений напряжения формовки.

Установлено, что увеличение толщины анодных пленок с ростом напряжения формовки происходит по линейной зависимости. В наших экспериментах максимальное анодное напряжение составило 200 В, т.к. при более высоких значениях наблюдались локальные электрические пробои, что приводило к неоднородности получаемых пленок.

Очевидно, что предельная толщина формируемых пленок анодных оксидов ограничена наступлением локальных электрических пробоев, приводящих к неоднородности полученных пленок.

Отметим, что получаемые нанокompозитные оксиды могут иметь показатель преломления в диапазоне от 1,5 до 1,78, причем разработанный метод позволяет формировать пленки с градиентным изменением показателя преломления за счет изменения концентрации титана внутри нанокompозитной пленки. Результаты исследований были использованы для разработки конструкции планарного многослойного волновода на основе пористого оксида алюминия.

В настоящей работе предложена интегральная оптоэлектронная ячейка, состоящая из двух смежных светодиодов, соединенных между собой волноводом на основе анодного пористого оксида алюминия.

Коэффициент объемного роста в исследуемых наноструктурированных анодных пленках составил от 2 до 2,5, что существенно отличается от обычного процесса пористого анодирования алюминия, когда данный параметр не превышает величину 1,6. Стоит отметить, что именно высокое значение коэффициента объемного роста обеспечивает минимальное значение пористости формируемых пленок. Таким образом удалось получить пленки с пористостью до 1%. Установлено, что минимальные оптические потери наблюдаются в случае волноводной структуры, содержащей сердцевину и обладающей минимальной пористостью. Низкая пористость оксидных пленок, а также наличие внутреннего нанокompозитного слоя, обеспечивающего увеличение показателя преломления до 1,8, позволили снизить оптические потери в формируемых волноводных структурах до 0,8 дБ/см. Достигнутый уровень соизмерим с аналогичными результатами зарубежных исследователей, полученными для алюмооксидных волноводов. Для дальнейшего улучшения этих параметров необходимо уменьшать пористость алюмооксидных пленок и оптимизировать геометрию и оптические параметры сердцевины.

Таким образом продемонстрирована возможность интеграции разработанного волновода со светоизлучающими и фотоприемными устройствами на кремниевом чипе, что является значимым шагом на пути к реализации оптических внутричиповых межсоединений.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1] – А. Планарный алюмооксидный волновод для оптических межсоединений на кремнии С. К. Лазарук, А. А. Лешок, Д. А. Сасинович, И.В.Тимошевич, В. Е.Борисенко Наноструктурные материалы - 2016: Беларусь-Россия- Украина: НАНО-2016: материалы V Междунар. науч. конф., Минск, 22-25 нояб. 2016 г. - С. - 546-549.

[2] – А. Оптические свойства анодного оксида титана, его применение в челюстно – лицевой хирургии / И.В.Тимошевич, Е.А.Гвоздовская, К.А. Корзун и др. // Доклады БГУИР. – 2016. – № 5. – С. 48-53.

Библиотека БГУИР