

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

УДК 544.653.23; 53.082.64

Гога  
Александр Владимирович

Анодные термочувствительные элементы с внутренней самоорганизованной  
наноструктурой

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-41 80 01 «Микро и наноэлектроника»

Научный руководитель  
Плиговка Андрей Николаевич,  
канд. техн. наук

---

Минск 2024

## ВВЕДЕНИЕ

Использование металлооксидных наноструктур на сегодняшний день является актуальной задачей, так как в значительной мере ускорит технологический прогресс. Процесс формирования наноматериалов должен следовать принципам экономичности, простоты, воспроизводимости результата. Таким требованиям отвечает процесс электрохимического анодного окисления (анодирования) вентильных металлов: алюминия, титана, тантала, вольфрама, ниобия, ванадия, гафния. Данный метод позволяет формировать пористый анодный оксид алюминия (АОА). АОА давно находит применение в различных отраслях промышленности и электроники. Использование пористого АОА в нанoeлектронике стало возможным после того, как были разработаны методы повышения упорядочивания системы, которые позволяют матрице пор АОА соответствовать требованиям высокой воспроизводимости параметров. Среди этих методов можно выделить нанесение дефектов на поверхности алюминия при помощи упорядоченного шаблона микропирамидок карбида кремния, за счет этого на поверхности образуются упорядоченные дефекты, которые способствуют равномерности и однородности зарождения и роста пор. Однако данный метод требует дорогостоящего оборудования, оснастки и расходных материалов, кроме того является низкоэкономичным по причине быстрого износа пирамидок. Дешевой альтернативой является метод двухстадийного анодирования. Альтернативой является метод двухстадийного анодирования. Совместное использование литографии и электрохимических методов формирования АОА позволяет создавать наноразмерные планарные и многоуровневые шаблоны металлических соединений в сверхбольших интегральных схемах. Также при использовании различных электролитов и режимов импульсного анодирования возможно формирование 1D фотонного кристалла, основой которого является модуляция пор АОА по диаметру. Подобные фотонные кристаллы можно формировать на основе анодного пористого оксида титана, применяя методику модулирования. Используя упорядоченную матрицу АОА, через в ее порах посредством электрохимического оксидирования вентильных металлов можно создавать массивы равномерно гексагонально-упакованных наноструктурированных оксидных неоднородностей. Морфологией, составом и физическими свойствами которых можно управлять, изменяя режимы анодирования. Реанодирование таких неоднородностей приводит к формированию полноценных наностолбиков оксидов вентильных металлов.

Таким образом, исследование наноструктурированных анодно-оксидных пленок, с управляемыми физическими свойствами, представляет научный и практический интерес, так как позволяет оценить применение данных наноструктур в качестве функциональных элементов приборов электроники или самостоятельных устройств наноэлектроники.

В развитие данного направления, объектом исследования выбраны наноструктурированные анодно-оксидные пленки WTi (НАОП). Наноструктурированные анодно-оксидные пленки формируются анодированием двухслойной системы Al/WTi, полученной последовательным магнетронным распылением на подложку монокристаллического кремния и стеклянную подложку. Наноструктурированная анодно-оксидная пленка состоит из массива столбиков оксида WTi (МСОВ). Массив представляет собой регулярно расположенные столбики оксида WTi (СОВ), стоящие на сплошном оксидном слое. Предлагается использование наноструктурированной анодно-оксидной пленки WTi в качестве термочувствительного элемента в составе конечного устройства – трубчатого волноводного СВЧ калориметра.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы магистерской диссертации.**

Наноструктурированные оксидные пленки, полученные анодированием двухслойных систем Al/Nb, Al/Ta, Al/W, Al/Ti, являются широко исследуемыми материалами на предмет применения в приборах электронной техники. Однако наноструктурированные пленки полученные анодированием сплавов малоизучены. В частности сплав WTi обладает технологическими и экономичными преимуществами, так как двухслойная система Al/WTi широко используется в полупроводниковой промышленности. Исследование механизмов формирования, морфологии, электрофизических и оптические характеристик, термочувствительных свойств наноструктурированных анодно-оксидных пленок полученных анодированием Al/WTi позволит определить конструкторско-технологические принципы построения перспективных приборов электроники на их основе, а также позволит оценить коррозионную стойкость данного материала в различных электрохимических условиях.

**Цель работы** – установление закономерностей формирования наноструктурированных анодно-оксидных пленок WTi, исследование их морфологии, состава, оптических, электрофизических характеристик и разработка на их основе термочувствительных элементов для трубчатой СВЧ калориметрии.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

1. Провести анализ современного состояния в области объекта и предмета исследования и разработки.
2. Исследовать особенности формирования наноструктурированных анодно-оксидных пленок WTi.
3. Исследовать оптимальные условия формирования наноструктурированных анодно-оксидных пленок WTi на подложке монокристаллического кремния и стеклянной подложке.
4. Исследовать морфологические и электрофизические параметры наноструктурированных анодно-оксидных пленок WTi.
5. Исследовать зависимости морфологических и электрофизических параметров наноструктурированных анодно-оксидных пленок WTi и алюминия от условий формирования.
6. Исследовать состав наноструктурированных анодно-оксидных пленок WTi.
7. Определить оптимальные морфологических и электрофизических параметры, технологические условия формирования наноструктурированного

анодного термочувствительного элемента трубчатого волноводного СВЧ калориметра.

8. Разработать демонстрационный конструкторско-технологический маршрут изготовления наноструктурированного анодного термочувствительного элемента трубчатого волноводного СВЧ калориметра.

**Объект исследования** – наноструктурированные анодно-оксидные пленки  $WTi$ .

**Предмет исследования** – закономерности формирования, состав, оптические, морфологические и электрофизические характеристики.

**Область исследования:** Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-41 80 01 «Микро и нанoeлектроники».

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в установленных особенностях формирования, состава, морфологии, оптических и электрофизических характеристиках наноструктурированных анодно-оксидных пленок  $WTi$ .

#### **Положение, выносимое на защиту**

1. Наноструктурированные анодно-оксидные пленки  $WTi$ , сформированные в 0,4 М водном растворе щавелевой кислоты в гальваностатическом режиме 6 мА/см<sup>2</sup> состоят из столбикового оксида и сплошного оксидного слоя, формирование которого не останавливается после переключения в потенциостатический режим и продолжается вплоть до полного окисления металлического подслоя толщиной не менее 125 нм.

2. Наноструктурированные анодно-оксидные пленки  $WTi$ , сформированные в смешанном водном растворе 1 М винной кислоты и 0,1 М щавелевой кислоты в гальваностатическом режиме 6 мА/см<sup>2</sup> состоят из двух типов столбиков, – отдельно стоящие столбики в поре АОА и столбики с общей границей столбик|ячейка АОА. Первый и второй тип столбиков имеет высоту и диаметр 370 и 15 нм, 190 нм и 45 нм, соответственно.

**Личный вклад магистранта** состоял в проведении анализа литературы, анодировании двухслойных систем  $Al/WTi$ , подготовке образцов к проведению микроскопических, оптических и электрофизических исследований, измерение электрофизических характеристик, обработка полученных результатов.

#### **Апробация и внедрение результатов исследования**

Результаты исследования были представлены на конференциях: «Углеродные наноструктуры, тонкие пленки и композиты: синтез, физико-химические свойства и применения» («БелРосНано-2022»), Минск, октябрь 2022 г., БГУ; «Физика конденсированного состояния», Гродно, апрель 2023 г. ГрГУ им. Янки Купалы; «Новые материалы: Перспективные технологии

получения материалов и методы их исследования», Москва, октябрь 2023 г., НИЯУ МИФИ.

**Структура и объем работы.** Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследований. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, библиографического списка. Общий объем диссертации – 60 страниц. Работа содержит 3 таблицы, 24 рисунка и 1 приложение. Библиографический список включает 40 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** описано современное состояние проблемы, связанной с формированием анодно-оксидных пленок вентильных металлов; дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы цели и задачи диссертационной работы, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлено положение, выносимое на защиту, приведены сведения об апробации результатов диссертационной работы.

В **первой** главе рассматриваются общие сведения об анодно-оксидных пленках WTi, рассмотрены конструкции терморезистивных СВЧ калориметров.

Во **второй** главе рассматриваются условия формирования наноструктурированного металлооксидного термочувствительного элемента, методики исследования морфологии при помощи сканирующей электронной микроскопии, методика исследования вольтамперных характеристик и температурного коэффициента сопротивления наноструктурированного металлооксидного термочувствительного элемента..

В **третьей** главе представлены результаты исследований морфологии и электрофизических характеристик наноструктурированного анодного термочувствительного элемента, путем исследования морфологии, и электрофизических характеристик наноструктурированных анодно-оксидных пленок WTi и алюминия.

В **четвертой** главе представлены конструкторско-технологические рекомендации изготовления наноструктурированного анодного термочувствительного элемента трубчатого волноводного СВЧ калориметра

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертации были разработаны процессы формирования и изучены процессы формирования наноструктурированного анодного оксида WTi на кремниевых и стеклянных подложках. Установлена зависимость высоты столбиков оксида WTi от напряжения реанодирования. Определены оптимальные условия электрохимического анодирования. Исследованы электрофизические характеристики: вольтамперные характеристики, температурный коэффициент сопротивления, сопротивление ультратонких пленок WTi и сплошной оксидной пленки WTi. Исследованы спектральные характеристики в оптическом и СВЧ диапазонах. На основании проведенных исследований предложены конструкторско-технологические рекомендации изготовления наноструктурированного анодного термочувствительного элемента трубчатого волноводного СВЧ калориметра.

В ходе выполнения работы были получены следующие основные результаты:

1. Наноструктурированный анодный термочувствительный элемент можно представить в виде НАОП оксида WTi и алюминия. НАОП, в свою очередь, представляет собой МСОВ находящийся в пористой матрице АОА.

2. Морфология НАОП зависит от условий электрохимического анодирования, так как морфология матрицы пористого АОА определяет морфологию МСОВ. Диаметр и межстолбиковое расстояние СОВ полностью зависят от диаметра и межпористого расстояния матрицы АОА. В свою очередь диаметр и межпористое расстояния матрицы АОА зависят от напряжения анодирования – при увеличении напряжения анодирования диаметр и межпористое расстояние матрицы АОА увеличиваются. Напряжение реанодирования влияет на высоту СОВ: чем выше напряжение реанодирования, тем выше СОВ.

4. Применение наноструктурированного анодного термочувствительного элемента в трубчатом волноводном СВЧ калориметре с тонкопленочным металлическим слоем, чувствительным к СВЧ излучению, позволит улучшить настройку калориметра при увеличении мощности входного сигнала или изменения рабочей частоты.

5. Двухслойную систему Al/WTi (1000/200 нм) напыляли из мишеней 99,995% Al и 99,95% WTi с использованием метода магнетронного напыления при помощи установок вакуумного напыления «Оратория-29» на пластины Si и SiO<sub>2</sub> 100 мм .

6. Анодирование слоя алюминия проводилось при постоянных анодных напряжениях 37 В в водных растворах 0,4 М ЩК напряжение анодирования подавалось с разверткой 1 В/с. После чего у образцов, сформированных при напряжениях 37 В реанодировали подслоем ниобия в 0,5 М водном растворе борной кислоты с 0,05 М  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  до напряжения 200, 300, 340, 380, 400, 420, 535, 550, 571 В.

7. Электрофизические характеристики НАОП измерялись на структурах, сформированных при напряжении 37 В, в которых затем реанодировали подслоем  $\text{WTi}$  до напряжения 380 В.

8. НАОП сформированные при анодировании двухслойной системы  $\text{Al/WTi}$  при напряжениях 37 и 68 В можно сделать три вывода. Первый, морфологический параметры: межстолбиковое расстояние и диаметр столбиков, зависят от напряжения анодирования, так как полностью определяются морфологией пористой матрицы АОА. Второй, образование сплошного слоя и островко-сетчатая структуры также определяется напряжением анодирования. Эти два вывода также справедливы и для анодирования двухслойных систем  $\text{Al/Nb}$  и  $\text{Al/Ta}$ . Третий вывод, при длительной выдержке столбики частично растворяются в порах АОА и также наблюдается два типа эмбриональных СОВ, которые смешиваются с загрязненным слоем поры АОА или не смешиваются, при этом они обладают разной морфологией. Третий вывод наблюдался только при анодировании двухслойной системы  $\text{Al/WTi}$  и совершенно не характерен для систем  $\text{Al/Nb}$  и  $\text{Al/Ta}$ .

9. Реанодирование эмбриональных МСОВ через пористую матрицу АОА приводит к вытягиванию анодного оксида  $\text{WTi}$  в полноценный столбик.

10. Высота СОВ линейно зависит от приложенного напряжения реанодирования.

11. ВАХ НАОП имеют ярко выраженный экспоненциальный характер до 1,5 В, ВАХ нелинейная несимметричная на данном участке. После 1,5 В на прямой ветви ВАХ имеет линейный характер. Обратная ветвь ВАХ имеет такой участок после 0,5 В.

12. ТКС я составил  $-0,84 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$  для НАОП  $\text{WTi}$  и  $\text{Al}$  на стекле, реанодированных при 380 В.

13. НАОП имеет степень прозрачности порядка 95 % в диапазоне 8–12 ГГц и не обладает отражением.

14. НАОП  $\text{WTi}$  сформированной на стекле при напряжении 37 В с выдержкой 4 часа с удаленным АОА. не имеет почти отражения, при этом данная пленка имеет 61 % пропускания, при длине волны 392 нм. Данная пленка имеет сопротивление порядка  $2 \text{ kOhm} \cdot \square^{-1}$

15. Анодирование до 195 В со скоростью развертки  $0,3 \text{ В} \cdot \text{с}^{-1}$  пленки WTi позволяет получить двухслойную систему ультратонкой металлической пленки WTi с сопротивлением в диапазоне от 100 до 300 Ом·□<sup>-1</sup>, закрытой оксидом WTi, что является достаточным и необходимым условием для использования в ультратонкую пленку в качестве активного слоя в тонкопленочном СВЧ калориметре.

16. Предложены конструкции наноструктурированного анодного термочувствительного элемента на основе НАОП WTi. Первая конструкция представляет собой совмещенный на одной подложке два НАОП WTi и алюминия, первая НАОП выступает в качестве активной, вторая НАОП в качестве термочувствительного элемента. Вторая конструкция выполняется на стекле. Ее особенностью является то, что активный ультратонкий металлический слой формируется на этапе реанодирования. Третья конструкция (см. рисунок 4.1) выполнена на кремнии, на обратную сторону необходимо напылить ультратонкий металлический активный слой. Геометрические размеры предложенной конструкции наноструктурированного анодного термочувствительного элемента трубчатого волноводного СВЧ калориметра: площадь элемента от 0,5 до 3 см<sup>2</sup> в зависимости от рабочего диапазона калориметра, толщина элемента 100 и 300 мкм для стекла и кремния соответственно, толщина контактных площадок 200 нм, площадь контактных площадок 0,8 мм<sup>2</sup>. Все конструкции имеют одинаковый принцип работы: СВЧ излучение попадая на активный слой, нагревает его, при этом изменяется сопротивление термочувствительного элемента, что позволяет пересчитать мощность СВЧ излучения. Три варианта конструкции позволяют выбирать наиболее удобную, исходя из технологических возможностей производства.

17. Демонстрационный конструкторско-технологический маршрут изготовления наноструктурированного анодного термочувствительного элемента трубчатого волноводного СВЧ калориметра включает 10 операций. Основные операции: вакуумное напыление, анодирование, химическое травление.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Pligovka, A. Two-Level 3D Column-like Nanofilms with Hexagonally-Packed Tantalum Fabricated via Anodizing of Al/Nb and Al/Ta Layers – A Potential Nano-Optical Biosensor / A. Pligovka, A. Poznyak, A. Lazavenka, U. Turavets, A. Hoha, M.Salerno // MDPI: Materials, 2023. – Vol.16, Iss.3. – P.993.

2. Pligovka, A. Two-Level 3D Column-like Nanofilms with Hexagonally-Packed Tantalum Fabricated via Anodizing of Al/Nb and Al/Ta Layers – A Potential Nano-Optical Biosensor [Electronic resource: Supplementary Materials] / A. Pligovka, A. Poznyak, A. Lazavenka, U. Turavets, A. Hoha, M.Salerno // MDPI: Materials, 2023. – Vol.16, Iss.3. – Mode of access: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/ma16030993/s1>. – Date of access: 21.01.2023.

3. Poznyak, A. Porous and Ag-, Cu-, Zn-doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Fabricated via Barrier Anodizing of Pure Al and Alloys / A. Poznyak, G. Knörnschild, A. Hoha, A. Pligovka // MDPI: Coatings, 2023. – coatings-2801672.

4. Poznyak, A. Porous and Ag-, Cu-, Zn-doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Fabricated via Barrier Anodizing of Pure Al and Alloys [Electronic resource: Supplementary Coatings] / A. Poznyak, G. Knörnschild, A. Hoha, A. Pligovka // MDPI: Coatings, 2023. – coatings-2801672.

5. Гога, А.В. Наноструктурированные оксиды сформированные анодированием трехслойных систем Al/Ti/Nb / А.В. Гога [и др.] // Новые материалы: Перспективные технологии получения материалов и методы их исследования [Электронный ресурс]: 21-я междуна. школа-конф. им. Б.А. Калина, Москва, 17–19 октября 2023 г./ НИЯУ МИФИ, 2023 . – С. 116-117

6. Туровец, У.Е. Влияние методов синтеза наночастиц CsPbBr<sub>3-x</sub>I<sub>x</sub> на люминесцентные свойства для тонкопленочных светоизлучающих электрохимических ячеек / Туровец У.Е., Позняк А.А., Гога А.В., Козак У.М., Плиговка А.Н. // Новые материалы: Перспективные технологии получения материалов и методы их исследования [Электронный ресурс] : 21-я междуна. школа-конф. им. Б.А. Калина, Москва, 17–19 октября 2023 г./ НИЯУ МИФИ, 2023 . – С.185-186.

7. Гога, А.В. Влияние анодной обработки на электросопротивление нанопленок сплава WTi / А.В. Гога [и др.] // Физика конденсированного состояния [Электронный ресурс] : материалы XXXI междуна. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 13–14 апр. 2023 г./ ГрГУ им. Янки Купалы ; редкол.: Г. А. Гачко (гл. ред.), Н. Г. Валько (зам. гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2023. – С.269-271.

8. Гога, А. В. Анодно-оксидная наноструктура, сформированная анодированием двухслойной системы Al/Nb, для приборных приложений СВЧ трубчатой калориметрии / А.В. Гога [и др.] // Материалы конференции VI Белорусско-Российский семинар-конференция «Углеродные наноструктуры, тонкие пленки и композиты: синтез, физико-химические свойства и применения», Минск, 2-5 ноября 2022 г. / Институт ядерных проблем БГУ ; редкол.: С. А. Максименко (гл.ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2022. – С. 22.

9. Pligovka, A. Reflective optical characteristics of planar film with the nanoscale inner structure formed via anodizing Al/Nb layers on glass / A. Pligovka, A. Poznyak, S. Zavadski, U. Turavets // 25th Congress of the International Commission for Optics (ICO) and the Conference of International Society on Optics Within Life Sciences (OWLS), 2022: TS 1-4, Photonic Crystals, Nano Structures and Functions.

10. Poznyak, A. Transmittance optical characteristics of columnar nanoscale niobia arrays formed via anodizing of Al/Nb layers on glass / A. Poznyak, A. Pligovka, D. Golosov, A. Hoha // Journal of the European Optical Society : 25th Congress of the International Commission for Optics (ICO) and the Conference of International Society on Optics Within Life Sciences (OWLS) : Photonic Crystals, Nano Structures and Functions : Poster session.

11. Гога, А. В. Анодная композиционная наноструктура: формирование, Морфология, оптические и фотолюминесцентные свойства / А. В. Гога [и др.] // Доклады БГУИР, 2022. – Vol. 20. – No 5. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-40-47>.

12. Ап-конверсионная люминесценция в ксерогеле титаната бария, легированном эрбием и иттербием, в пористом анодном оксиде алюминия / Е. И. Лашковская [и др.] // Доклады БГУИР. – 2022. – Т. 20, № 7. – С. 28 – 35.

13. Pligovka, A. Morphology and composition of defect arrays of niobium oxide heterogeneity formed by anodizing two-layer systems Al/Nb / A. Pligovka, P. Yunin, A. Hoha, S Korolyov, G. Gorokh, E. Skorokhodov / Technical Physics. — 2020. — Vol.90. — Iss. 11. — P. 1854-1859. DOI: 10.1134/S1063784220110213;

14. Pligovka, A. Formation features, morphology and optical properties of nanostructures via anodizing Al/Nb on Si and glass / A. Pligovka [et al.] // Materials Today: Proceedings – 2021. – Vol. 37, № 4. – P. A8–A15.

15. Гога, А. В. Электронный транспортный слой наностолбиков анодного оксида ниобия для высокоэффективных перовскитных фотопреобразователей / А. В. Гога, И. Д. Озимко, В. Ю. Карженевская // Электронные системы и технологии : сборник тезисов докладов 56-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 18–20 мая 2020 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. — Минск, 2020. — С. 306-307.

16. Гога, А. В. Схема питания термостатированной электрохимической ячейки для воспроизводимого формирования металлооксидных наноструктур / А. В. Гога, У. Е. Туровец // 55-я юбилей-ная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»: материалы конференции по направлению 2: Информационные технологии и управление, Минск, 22–26 апреля 2019 г. / редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. — Минск: БГУИР, 2019. — С. 110.

17. Makarov, R. Nanocomposites and nanomaterials Phenomenon of photoluminescence in anodic column-like nanocomposite from niobium and aluminum oxides[Text] / R. Makarov, A. Hoha, A. Pligovka, A. Poznyak, E. Chubenko // 8th International Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" NANO-2020, Lviv, 26–29 August 2020. — Mode of access: <http://nano-conference.iop.kiev.ua/phenomenon-of->

photoluminescence-in-anodic-column-like-nanocomposite-from-niobium-and-aluminum-oxides.html. — Date of access : 09.06.2020.

18. Гога, А. Фотолюминесценция, оптическое отражение и морфология анодной композиционной наноструктуры оксидов ниобия и алюминия на Si / А. Гога, А. Плиговка, А. Позняк, У. Туровец, С. Завадский // Наноструктурированные оксидные пленки и покрытия: сборник статей по материалам Пятой международной молодежной научной школы-семинара (Петрозаводск, 1–4 июня 2021). — Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2021. — С.157-163.

19. Poznyak, A. Transmittance optical characteristics of columnar nanoscale niobia arrays formed via anodizing of Al/Nb layers on glass / A. Poznyak, A. Pligovka, D. Golosov, A. Hoha // Journal of the European Optical Society : 25th Congress of the International Commission for Optics (ICO) and the Conference of International Society on Optics Within Life Sciences (OWLS) : Photonic Crystals, Nano Structures and Functions : Poster session.

20. Плиговка А.Н., Гога А.В., Туровец У.Е. Схема питания термостатированной электрохимической ячейки для воспроизводимого формирования металлооксидных наноструктур, 55-я Юбилейная Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР, 2019, с. 110.

21. Плиговка А.Н., Гога А.В., Туровец У.Е. Анодное формирование ниобиевых наносеток с полупроводниковыми островками, 55-я Юбилейная Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР, 2019, с. 381-382.

22. Pligovka, U. Turavets, A. Hoha, S. Zavadski and A. Poznyak, "Niobium and Tantalum-Anodic-Oxide Nanocolumn Arrays for 2-D Reflective Photonic-Crystals," 2020 International Conference Laser Optics (ICLO), Saint Petersburg, 2020, pp. 1-1, doi: 10.1109/ICLO48556.2020.9285405.

23. Pligovka, A. Nanocolumn-like 3D photonic crystals of anodic valve metal oxide / A. Pligovka, U. Turavets, A. Hoha, S. Zavadski // 19th International Conference Laser Optics (ICLO 2020), R9: Optical Nanomaterials, Poster session, St. Petersburg, 8–12 June, 2020. – St. Petersburg, 2020. – P.21.

24. Гога, А. Фотолюминесценция, оптическое отражение и морфология анодной композиционной наноструктуры оксидов ниобия и алюминия на Si / А. Гога, А. Плиговка, А. Позняк, У. Туровец, С. Завадский // Наноструктурированные оксидные пленки и покрытия: сборник статей по материалам Пятой международной молодежной научной школы-семинара (Петрозаводск, 1–4 июня 2021). — Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2021. — С.157-163.

25. Плиговка, А. Н. Формирование, морфология и состав массивов зародышей наностолбиков анодного оксида ниобия [электронный ресурс] / А. Н. Плиговка, П. А. Юнин, Г. Г. Горох, С. А. Королёв, А. В. Гога, Е. В. Скороходов // Полупроводниковые наноструктуры: элект., оптич. св-ва, методы формирования : XXV Международный симпозиум «Нанопфизика и нанoeлектроника», Н. Новгород, 10-13 мар. 2020 г. – С. 699-700.