

## **ИССЛЕДОВАНИЕ БЛОКИРОВАНИЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН 8-14 МКМ ПЛЕНКАМИ НАНОПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ**

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

*Аль-Камали М. Ф. С. Х.*

*Врублевский И. А. – канд. техн. наук, доц.*

В работе представлены результаты исследований по влиянию пленки из нанопористого анодного оксида алюминия на тепловую контрастность излучения от биообъекта (ладонь человека) на экране неохлаждаемого тепловизора.

В настоящее время активно развиваются методы создания наноструктурированных материалов, основанные на использовании процессов шаблонного формирования и самоформирования. Одним из материалов, вызывающих практический интерес, является пористый анодный оксид алюминия. Мембраны на основе нанопористого оксида алюминия востребованы в нанотехнологии, микробиологии и ядерной физике, поскольку они обладают рядом уникальных физических и оптических свойств, а также механической прочностью, термической стабильностью и химической стойкостью [1-3].

Для формирования оксидных структур на основе Si, Al, Ti и других материалов наиболее часто используется электрохимическое анодирование, которое характеризуется технологической доступностью и совместимостью с традиционными технологическими процессами микро- и наноэлектроники. Разработанные технологии позволяют проводить процессы отделения пористых анодных пленок от подложки, что расширяет перспективы их использования в качестве свободных мембран, масок и матриц с требуемыми тополого-геометрическими параметрами пор.

Тепловой контроль основан на измерении, мониторинге и анализе температуры контролируемых объектов. Основным условием применения теплового контроля является наличие в контролируемом объекте тепловых потоков. Процесс передачи тепловой энергии, выделение или поглощение тепла в объекте приводит к тому, что его температура изменяется относительно окружающей среды. Распределение температуры по поверхности объекта является основным параметром в тепловом контроле, так как несет информацию об особенностях процесса теплопередачи, режиме работы объекта, его внутренней структуре и наличии скрытых внутренних дефектов. Тепловые потоки в контролируемом объекте могут возникать по различным причинам. Следует отметить, что основной вклад в наблюдаемый тепловой контраст вносят собственные излучения наблюдаемого объекта и фона. В ряде случаев существенные изменения контрастов объектов обуславливаются не только собственным излучением тел, но и отраженными от объектов (по законам оптики) нагретыми слоями атмосферы при пригоризонтном наблюдении и холодными излучениями зенитных областей заатмосферных излучений при наблюдении объектов с авиационных и космических носителей. В некоторых задачах тепловых измерений необходимо селектировать отраженные составляющие тепловых потоков от контролируемого объекта собственной температуры объектива наблюдательного прибора и даже собственной температуры приёмника излучения. Подобные ситуации учитываются в прецизионных измерениях, при использовании тепловизора в режиме термографических исследований.

В настоящее время для визуализации теплового изображения объектов используются два типа тепловизоров: охлаждаемые тепловизоры, работающие в коротковолновом диапазоне (3–5 мкм), и неохлаждаемые тепловизоры в средневолновом диапазоне (8–14 мкм). Для обнаружения и идентификации таких тепловых объектов, как человек, спектральная длина волны теплового излучения которого составляет 9,3 мкм, применяются неохлаждаемые тепловизоры. Наряду с развитием технологий теплового сканирования ведется интенсивный поиск новых материалов, позволяющих рассеивать и поглощать тепловое излучение и, таким образом, обеспечить скрытность объектов от наблюдения в ИК-диапазоне.

В данной работе представлены результаты исследований по влиянию маски из нанопористого анодного оксида алюминия на тепловую контрастность излучения человека (ладонь человека) на экране неохлаждаемого тепловизора.

Для исследования картины теплового поля при проведении экспериментов использовали неохлаждаемый тепловизор (Infrared imaging camera system MobIR M4) (рис. 1). Для создания тепловых пятен с температурой человека мы использовали фторопластовую пластину с двумя отверстиями размером 14 мм. Фторопластовая пластина размещалась над ладонью человека, пропуская тепловое излучение только в сквозные отверстия. Используемые в качестве маски пленки нанопористого анодного оксида алюминия получали методом анодирования алюминиевой фольги толщиной 100 мкм в 0,4 М водном растворе щавелевой кислоты в потенциостатическом режиме при 60 В.

В экспериментах пленки нанопористого анодного оксида алюминия помещались на фторопластовой пластине над одним из отверстий. Фторопластовая пластина располагалась таким образом, чтобы маска из нанопористого анодного оксида алюминия была удалена на расстоянии 3–5 мм от биообъекта. В наших экспериментах второе отверстие, через которое тепловое излучение проходило без препятствий, являлось контрольным, чтобы можно было оценить эффект маскирования. Один из результатов исследований представлен на рисунке 2.



- 1 – видеокамера камера; 2 – наружный экран; 3 – многофункциональная кнопка «Влево»;
- 4 – многофункциональная кнопка «Вправо»;
- 5 – разъем для звукового устройства;
- 6 – лазерный дальномер

Рисунок 1 – Тепловизионная камера MobIR M4

Проведенные тепловые исследования показали, что температура ладони, измеренная снаружи, и через отверстие на фторопластовой пластине практически одинаковая ( $\Delta T \sim 0,6^\circ\text{C}$ ). Небольшая разница в значениях объясняется неоднородностью распределения тепла по все ладони.



а



б

- а – фотография фторопластовой пластины с двумя отверстиями; б – тепловизионная картина фторопластовой пластины с тепловыми пятнами от биообъекта с маскированием одного отверстия пленкой нанопористого анодного оксида алюминия

Рисунок 2 – Тепловизионные исследования

Температура на поверхности фторопластовой пластине составляла около 30,3 °С, а в отверстии с тепловым излучением от ладони 34,5 °С. Представленные результаты тепловизионных исследований показали, что пленка нанопористого оксида алюминия, расположенная на фторопластовой пластине толщиной 5 мм, обеспечивает эффективное экранирование теплового излучения тела человека. При этом регистрируемое изменение разницы температур от биообъекта при наличии и отсутствии анодной пленки составляет не менее 4–5 градусов. Несмотря на оптическую прозрачность в видимом диапазоне, пленки нанопористого анодного оксида алюминия заметно ослабляют пропускание излучения в среднем ИК диапазоне ( $\lambda = 8\text{--}14$  мкм), что может позволить использовать их в качестве фильтров для поглощения излучения биообъектов.

Проведенные исследования показали, что пленки нанопористого анодного оксида алюминия имеют хорошие теплоизоляционные и экранирующие свойства для ИК излучения в области длин волн 8–14 мкм и могут быть использованы в качестве теплозащитных экранов для сглаживания контраста тепловых излучений объекта и окружающего фона и для повышения эффективности тепловой маскировки объектов. В результате нагретый объект на тепловом фоне теряет контрастность и становится малозаметным.

#### Список использованных источников

1. Masuda H., Abe A., Nakao M., et. Al. Ordered mosaic nanocomposites in anodic porous alumina // Journal of Advanced Materials. 2003. № 15(2). P.161–164.
2. Напольский К.С. Синтез пространственно-упорядоченных металл-оксидных нанокмозитов на основе пористого оксида алюминия. Описание задач спецпрактикума «Методы получения и анализа неорганических материалов. М.: МГУ, 2011, 31 с.
3. Врублевский, И.А. Структура пленок пористого оксида алюминия, формируемых в электролитах на основе органических кислот / И.А. Врублевский, С.К. Дик, А.С. Терех и др. // Проблемы физики, математики и техники. – 2012. – Т. 12, № 3. – С. 101–105.

## МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

*Сергеенко В. С.*

*Данилюк А. Л. – канд. физ.-мат. наук, доц.*

Эффект гигантского магнитосопротивления, наблюдаемый в большом числе магнитных многослойных структур, состоящих из чередующихся ферромагнитных и проводящих немагнитных слоёв, привлек значительный интерес в течение последних лет в сферах фундаментальных и прикладных исследований. Данный эффект наблюдается во многих многослойных магнитных структурах, в которых магнитные слои разделены немагнитными металлическими слоями толщиной порядка 10-20 ангстрем (Fe/Cr/Fe, Co/Cu/Co, Fe/Cu/Fe, NiFe/Cu/NiFe и др.). В настоящее время широко признано, что основным механизмом этого эффекта является когерентное спин-зависимое рассеяние электронов. С теоретической точки зрения природа магнитосопротивления анализировалась с помощью квазиклассических подходов и квантово-статистического формализма Кубо. Магнитосопротивление обычно больше в антиферромагнитной конфигурации, т. е. когда направления намагниченностей соседних слоёв антипараллельны, и уменьшается под действием магнитного поля, индуцирующего переход в параллельную конфигурацию.

Физической основой рассматриваемых эффектов служит явление спин-зависимого рассеяния электронов (spin-depend scattering). При этом существенно то, что длина свободного пробега электрона без изменения спина в многослойной структуре много больше толщины каждого из слоёв.

Существуют несколько подходов к теоретическому описанию магнитосопротивления многослойных наноструктур. Основные существенные детали могут быть учтены в модели, в рамках которой принимается, что при антипараллельной ориентации намагниченностей в соседних магнитных слоях электроны с фиксированными спинами имеет различные химические потенциалы в зависимости от того, параллелен или антипараллелен спин по отношению к намагниченности данного слоя с учетом шероховатость возникающих потенциальных барьеров.

Наиболее точно учет квантовых эффектов рассеяния электронов на границах раздела, а также в ферромагнитных слоях производится с помощью формализма функций Грина, в котором проводимость в направлении, перпендикулярном плоскости наноструктуры имеет вид

$$\sigma(Z) = \frac{\hbar e^2}{\pi N \alpha_0^4} \int \int_0^D dZ dZ' \left\{ \sum_R v_R^2 G_R(Z, Z', E + i0) G_R(Z', Z, E - i0) \right\}_{E=E_F}$$

где  $\alpha_0$  – постоянная решетки,  $Z$  – координата в плоскости многослойной наноструктуры;  $D$  – общая толщина наноструктуры;  $N$  – соотношение между длинами свободного пробега электронов со спином вверх и спином вниз в материале первого слоя;  $v_R$  – компоненты скорости электронов в плоскости структуры;  $R$  – компоненты импульса электронов в плоскости структуры; функция Грина  $GR(Z, Z')$  является решением дифференциального уравнения Шредингера с дискретным энергетическим спектром  $E$ .

Исходя из условий непрерывности функций  $G(Z, Z')$  и  $(\partial G / \partial Z)$  на внутренних интерфейсах получают уравнения для расчета функций Грина и проводимости многослойных наноструктур. На рисунке 1 представлены результаты оценочного расчета изменения проводимости структуры, состоящей из трех слоев различной толщины.

Как можно видеть из полученных результатов, зависимость проводимости от толщины носит немонокотный характер, что может быть использовано для оптимизации величины магнитосопротивления многослойных наноструктур.

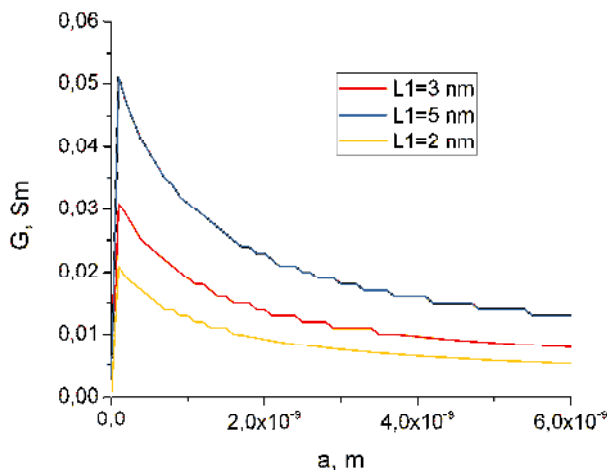


Рисунок 1 – Проводимость трехслойной структуры в зависимости от толщины первого ферромагнитного слоя  $a$ :  $L1$  – длина свободного пробега для электронов со спином вверх в материале первого слоя

## АДСОРБЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ГРАНИЦЕ ЛИТИЙСОДЕРЖАЩЕГО РАСТВОРА И КРЕМНИЯ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Рудь М.П.

Петрович В.А. – канд. физ.-мат. наук, доц.

В настоящее время развитие технологии производства литий-ионных и литий-полимерных аккумуляторов является одной из актуальных задач в области электроники и автомобилестроения. Основным материалом для анода в таких батареях служит графит, однако на данный момент продолжается поиск новых материалов с большей сорбционной емкостью ионов лития, что позволит сократить время заряда батареи и увеличить продолжительность ее работы.

Наиболее перспективным материалом для анода литий-ионных аккумуляторов является кремний. Это связано с тем, что сплав  $\text{Li}_{22}\text{Si}_5$  обладает самой высокой теоретической удельной емкостью 4,2 Ач/г по сравнению с другими известными анодными материалами.

Для описания адсорбционных процессов лития на пористом кремнии, ввиду сложности изготовления и измерения такой структуры, крайне важно изучить процессы адсорбции ионов лития на поверхности монокристаллического кремния, а также проникновение их в подповерхностный слой.

Целью настоящих исследований является изучение и анализ процессов, протекающих на поверхности кремния в литийсодержащем растворе и факторов, влияющих на эти процессы. Для исследования процессов адсорбции на границе литийсодержащего раствора и кремния использовался 0,2н раствор хлористого лития в диметилформамиде.

На рисунке 1 представлена зависимость потенциала кремниевого электрода от времени в растворе 0,2н хлористого лития в диметилформамиде при температурах раствора 20 и 90 °С. Как можно судить по рисунку, при повышении температуры раствора подвижность молекул и их склонность к переориентации возрастает, поэтому скорость дрейфа  $\phi$  от времени становится больше, а следовательно, увеличивается скорость протекания адсорбции.

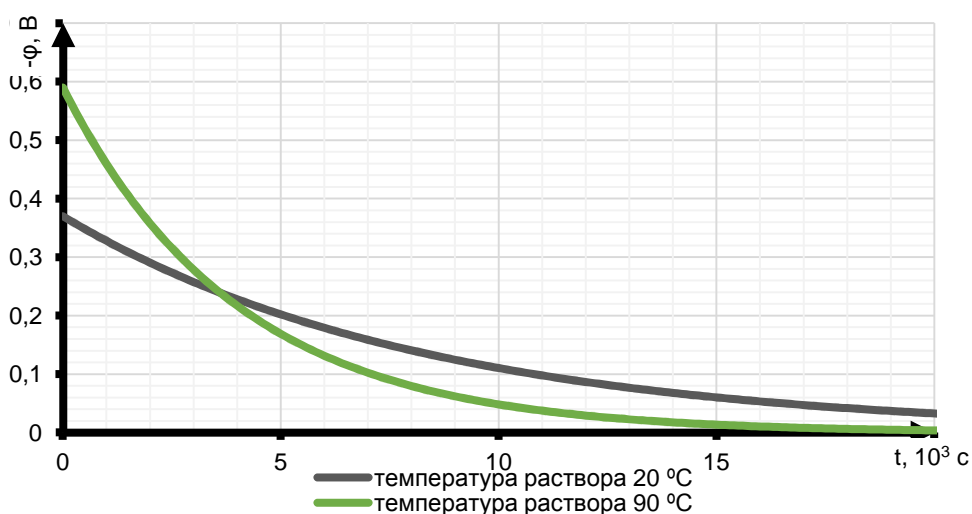


Рисунок 1 – Зависимость потенциала от времени для кремния КЭФ-0,5 в 0,2н растворе хлористого лития в диметилформамиде при различных температурах раствора

В ходе проведения экспериментов было замечено, что в случае добавления в раствор хлористого лития в ДМФ кислот происходит увеличение скорости дрейфа потенциала, а следовательно, и скорости протекания адсорбции. Данное явление обусловлено более высокой подвижностью частиц кислоты по отношению к молекулам диметилформамида. Исследования показали, что промывка образцов кремния в различных спиртах, эфирах, ацетоне, хлороформе не приводит к полному восстановлению его начального потенциала, что свидетельствует о том, что в проведенных экспериментах имеет место не только физическая, но и химическая адсорбция, связи которой на порядок сильнее. Также было замечено, что время, в течении которого процессы адсорбции практически заканчиваются, составляет десятки минут [1].

#### Список использованных источников:

1. Адсорбционные процессы на границе литийсодержащего раствора и кремния: дипломный проект / М. П. Рудь. – Минск : БГУИР, 2017, – п.з. – 67 с.

## ФОРМИРОВАНИЯ ПОР БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОДСЛОЯ НИОБИЯ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Гранник В.В.

Плиговка А.Н. – к.т.н., с.н.с.

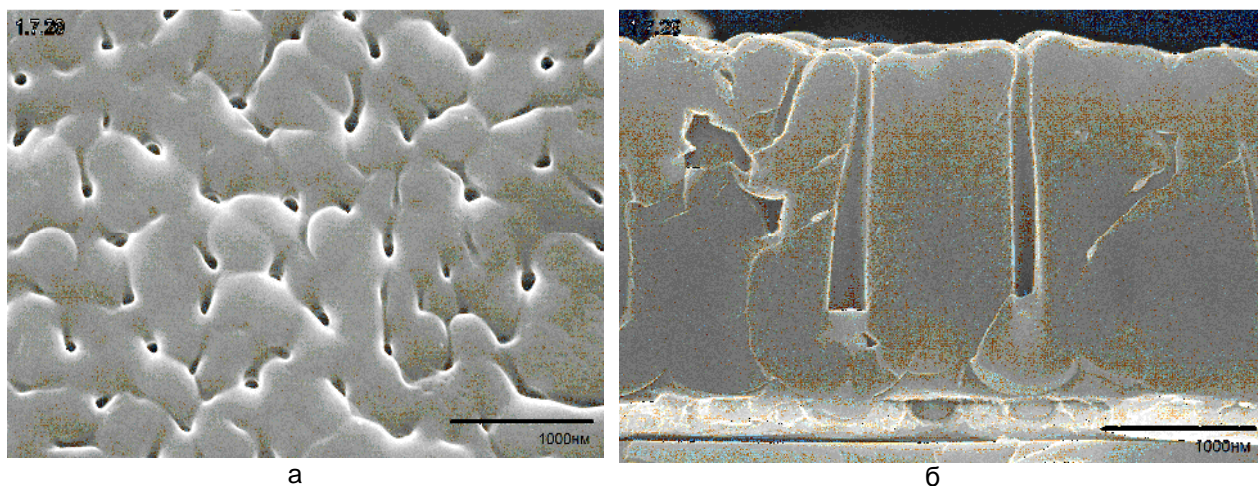
Методами магнетронного напыления и электрохимического анодирования были сформированы поры большого диаметра анодного оксида алюминия (АОА) на поверхности подслоя ниобия. Исследована их морфология с помощью сканирующего электронного микроскопа. Установлена невысокая степень структуризации АОА, диаметр пор составлял от 150 до 250 нм, толщина барьерного слоя варьировалась в пределах 350 нм. Важной особенностью сформированных пор является наличие зародышевого наностолбика анодного оксида Nb на границе (барьерный слой АОА)/(пленка Nb).

Пористый АОА и наноструктуры созданные с его применением все чаще становятся объектом для всесторонних исследований. Особый интерес представляет изучение процессов формирования пор АОА большого диаметра – 100 нм и больше. В работах [1, 2] представлены процессы формирования пор АОА диаметром от 150 до 980 нм. Однако они имеют существенные недостатки, например, использование дополнительных методов обработки или применение опасных растворов кислот, что ведет к усложнению и удорожанию всего процесса.

В данной работе методом электрохимического анодирования Al в водном растворе одной органической кислоты были сформированы поры большого диаметра на поверхности подслоя Nb.

В качестве исходных образца использовали кремниевую подложку диаметром 100 мм, на которую методом магнетронного распыления в вакууме была нанесена тонкопленочная система Nb (снизу) – Al (200 нм-1,5 мкм). Анодирование Al проводили в потенциостатическом режиме в 0.2 М водном растворе лимонной кислоты при напряжении 300 В.

В результате проведенной работы были сформированы поры большого диаметра от 150 до 250 нм без применения дополнительных видов обработки. На рис. 1 видно, что поры не обладают повышенной структурированностью и вертикальностью, что характерно при естественном процессе формирования пористого АОА без дополнительных методов структурирования [3]. На рис. 1, б отчетливо видна столбиковая наноструктура, анодного оксида Nb, которая сформировалась вследствие анодирования подслоя Nb через пору АОА.



а

б

а – поверхность; б – скол.

Рисунок 1 – Изображения пор большого диаметра АОА на подслое Nb, полученные на сканирующем электронном микроскопе

Полученные в работе результаты показывают возможности формирования пор большого диаметра и наноструктур с новыми морфологическими характеристиками на их основе, что существенно расширяет сферы применения АОА.



Список использованных источников:

1. Masude, H. Self-Ordering of Cell Configuration of Anodic Porous Alumina with Large-Size Pores in Phosphoric Acid Solution / H. Masude, K. Yada // Japanese Journal of Applied Physics – 1998. – Vol. 37, № 2. – P. 11.
2. Chu, S. Z. Large-Scale Fabrication of Ordered Nanoporous Alumina Films with Arbitrary Pore Intervals by Critical-Potential Anodization / S. Z. Chu, K. Wada, S. Inoue, M. Isogai, Y. Katsuta, A. Yasumori // J. Electrochem. Soc. – 2006. – Vol. 153, № 9. – P. 384-391.
3. Mozalev, A.M. Growth of Multioxide Planar Film with the Nanoscale Inner Structure via Anodizing Al/Ta layers on Si / A.M. Mozalev, A.J. Smith, S. Borodin, A. Plihaika, A.W. Hassel, M. Sakairi, H. Takahashi // Electrochimica Acta. – 2009. – № 54. – P. 935-945.

## ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОЕВ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ МЕТОДОМ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Гаронин В. П., Филатов С. А.

Степанов А. А. – к.т.н.

Современное высокотехнологическое производство немислимо без широкого использования устройств микросистемной техники (МСТ), к числу которых могут быть отнесены, в частности, интеллектуальные системы сбора, обработки и отображения информации. В процессе данного производства довольно большое количество полупроводниковых материалов удаляются с подложки для формирования активных элементов микросхемы[1] Однако с появлением технологии трехмерной печати появилась возможность перейти от этих процессов субтрактивного производства к аддитивному производству, ярким представителем которого является трехмерная печать[2].

Трехмерная печать – это использующее метод послойного создания физического объекта по цифровой 3D-модели. 3D-печать основана на концепции построения объекта последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры модели. Схема работы трехмерного принтера работающего по технологии моделирования методом послойного наплавления (FDM) представлена на рисунке 1:



Рисунок 1 – Схема работы типичного FDM принтера

Изделие, или «модель», производится выдавливанием («экструзией») и нанесением микрокапель расплавленного термопластика с формированием последовательных слоев, застывающих сразу после экструдирования [3].

Возможности трехмерной печати уже сейчас используются для создания моделей и компонентов микроэлектронных устройств, что можно использовать в различных производственных, образовательных и научных целях. При этом реализуются такие преимущества трехмерной печати, как:

- Использование меньшего количества материала;
- Быстрое прототипирование микроэлектронных изделий;
- Быстрое создание мелкосерийных изделий[3].

Трехмерная печать позволяет печатать различными материалами, что уже сейчас используется для создания приборов и устройств электроники, в том числе на гибких подложках[4]. Так же развитие трехмерной печати позволит быстрое создание моделей и опытных образцов изделий, что так же скажется на скорости и качестве разработки микроэлектронных устройств.

Список использованных источников:

1. Scotten W. Jones, Introduction to Integrated Curcuit Technology: Textbook / ICKnowledge LCC. – Georgetown, MA, 2012.
2. 3D-printed microelectronics for integrated circuitry and passive wireless sensors: Article / Sung-Yueh Wu, Chen Yang, Wensyang Hsu [& others] // Nature. – 2015. – July. – 20.
3. 3dtoday [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://3dtoday.ru/>.
4. Hiroki Ota, Sam Emaminejad, Yuji Gao, Application of 3D Printing for Smart Objects with Embedded Electronic Sensors and Systems / Esther Levy // Advanced Materials Technologies – April 2016.

## ОСОБЕННОСТИ АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ КРЕМНИЯ ПРИ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

*Трафименко А.Г.*

*Данилюк А.Л. – к.ф.-м.н., доцент*

В настоящее время активно исследуются наноструктуры, функционирующие за счет наличия вакуумных промежутков. Особенно важным представляется использование кремниевых технологий. В данной работе анализируются особенности автоэлектронной эмиссии из кремния в вакуум при низкой температуре, связанные с механизмами проводимости легированного кремния в определенных температурных диапазонах.

Преимущества вакуумных наноэлектронных приборов состоят в существенном снижении влияния рассеяния электронов на их электрические характеристики, повышении быстродействия и уменьшении потребляемой мощности [1]. Особенно перспективными для создания элементной базы вакуумной наноэлектроники считаются наноструктуры на основе кремния. Во-первых, из-за развитой кремниевой технологии, а также подходящих эмиссионных свойств самого кремния. Однако, в настоящее время вакуумные наноструктуры еще не имеют широкого практического применения. Причины состоят в недостаточной изученности физики автоэлектронных процессов эмиссии из кремния, в том числе, при низких температурах, а также в необходимости снизить потенциальный барьер на поверхности кремния (работа выхода кремния обычно немногим больше 4 эВ).

В данной работе рассматриваются факторы, обуславливающие особенности автоэлектронной эмиссии легированного кремния n-типа при низкой температуре. К ним, в первую очередь, относится механизм проводимости, определяемый концентрацией доноров. Как установлено в работах [2, 3], в области температур 2-4 К и 30-90 К механизм проводимости кремния, легированного сурьмой при концентрации  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>, является активационным, но при этом характеризуется весьма низкой величиной энергии активации,  $\epsilon_a = 1.45-1.73$  мэВ. Это приводит к тому, что в области 30-90 К проводимость является практически металлической (величина  $\epsilon_a < kT$ ). Здесь  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура. Эти особенности связаны с наличием, так называемой,  $\epsilon_2$  – проводимости. Она определяется переносом электронов по верхней полосе примесной зоны Хаббарда, где транспорт осуществляется за счет переходов между примесными центрами, находящимися в нейтральном состоянии (D- – состояния). Энергия



связи электрона, находящегося в синглетном спиновом состоянии на нейтральном примесном центре, мала и поэтому электроны относительно легко перемещаются по таким состояниям.

В области 2-4 К проводимость также подчиняется простому активационному закону, характеризуемому относительно малым потенциальным барьером,  $\epsilon_a/kT \approx 4$ . При росте электрического поля до 1 В/см на вольтамперной характеристике (ВАХ) возникает область отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) S-типа, характеризующаяся скачком тока при достижении порогового значения внешнего смещения. Так как характерная величина напряженности электрического поля при этом не превышает 1 В/см, то можно говорить о том, что механизм ОДС не связан с электрическим пробоем и лавинным умножением электронов, а определяется электронными кулоновскими корреляциями на D- состояниях. При достижении критической концентрации происходит уменьшение энергии связи электронов на D- состояниях, что ведет к невозможности захвата инжектированных электронов на эти состояния и соответствующему скачку тока.

Таким образом, для осуществления эффективной автоэлектронной эмиссии, обусловленной  $\epsilon_2$  – проводимостью, необходимо обеспечить совпадение энергетического уровня электронов D- состояний с подходящими уровнями поверхностных состояний кремния, т.е. создать на поверхности кремния высокую плотность состояний, энергия которых совпадает с энергией D- состояний, находящихся в его запрещенной зоне. В этом случае автоэлектронной эмиссии будет способствовать эффект резонансного туннелирования. Также можно обеспечить рост эффективности автоэлектронной эмиссии данного кремния путем осаждения 2-D кристаллов на его поверхность с подходящими эмиссионными свойствами, например, графена.

В области 2-4 К при наличии ОДС, этот эффект можно использовать для создания кремниевого автоэлектронного катода, функционирующего в импульсном режиме. Генерация импульсов тока может осуществляться путем использования области нелинейной ВАХ S-типа, содержащей три значения тока при одном и той же величине потенциала внешнего смещения. Возникающая в этом случае нестабильность ведет к генерации импульсов тока. В этом случае также необходимо обеспечить или снижение потенциального барьера на поверхности кремния, или совпадение энергетических уровней на поверхности с большой плотностью состояний с энергией D- состояний кремния.

#### Список использованных источников:

1. Han J.-W., Oh J.S., Meyyappan M. Vacuum nanoelectronics: Back to future? – Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor // Appl. Phys. Letters – 2012. – Vol.100, No.21. – P. 213505.
2. Danilyuk A.L., Trafimenko A.G., Fedotov A.K., Svito I.A., Prischepa S.L. Negative Differential Resistance in n-Type Noncompensated Silicon at Low Temperature // Appl. Phys. Letters. – 2016. – Vol. 109, No. 22. – P.222104.
3. Danilyuk A.L., Trafimenko A.G., Fedotov A.K., Svito I.A., Prischepa S.L. Low Temperature Conductivity in n-Type Noncompensated Silicon Below Insulator-Metal Transition // Advances in Condensed Matter Physics. – 2017. – Vol. 2017. – Article ID 5038462.

## ОСОБЕННОСТИ АНОДИРОВАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СИСТЕМЫ Al/V/Cu

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

*Щадинская Д.А.*

*Лозовенко А.А. – м. н. с. НИЛ 4.10*

Разработана методика формирования проницаемых структур с металлическим подслоем, основанная на двухстадийном анодировании тонкопленочной системы Al/V/Cu.

В мире становится актуальными исследования нитевидных проводящих наноструктур [1, 2]. Разрабатываются методики и технологии формирования темплейтов. Одним из вариантов создания нанопроводов является синтез массивов нанопроводов в темплейтах матриц пористого анодного оксида алюминия (АОА).

Ранее проведённые исследования показали, что массивы нанопроводов наиболее воспроизводимо формируются на металлическом подслое [3]. Однако при непосредственном анодировании плёнок на медном подслое происходит плохо контролируемый процесс растворения барьерного оксидного слоя. Так как у плёнки АОА плохая адгезия к меди, было предложено использовать буферный подслоу ванадия, поскольку он обладает хорошими адгезионными свойствами и широко используется в микроэлектронике [4].

В работе исследованы процессы анодирования в тонкоплёночной системе Al/V/Cu и представлена методика формирования проницаемых слоёв АОА с металлическим подслоем.

Исследование процесса анодирования Al/V/Cu проводили по кинетике, снятой при анодировании напыленной на Si подложку трёхслойной системы Al/V/Cu толщиной 1,5 мкм, 0,05 мкм и 1 мкм соответственно. Анодирование осуществлялось в гальваностатическом режиме при плотности анодного тока 4 мА/см<sup>2</sup> в водном 0,4 М растворе щавелевой кислоты во фторопластовой ячейке.

На рисунке 1 представлена кинетика анодирования, на которой можно выделить 6 стадий:

- 1) быстрый рост напряжения, обусловленный нарастанием на поверхности металла плотного барьерного слоя, стадия завершается достижением максимально возможной при данных условиях толщины барьерного слоя при одновременном зарождении пор, соответствующей максимуму напряжения на временной диаграмме;
- 2) спад напряжения, происходящий вследствие завершения формирования ячеисто-пористой структуры АОА;
- 3) практически постоянное во времени значение напряжения, рост пористой части плёнки, тогда как толщина барьерного слоя остаётся практически постоянной;
- 4) резкий спад напряжения (растворение барьерного слоя, начало анодного растворения ванадия);
- 5) установление стационарного уровня напряжения (растворение ванадия);
- 6) рост напряжения (анодное окисление меди).

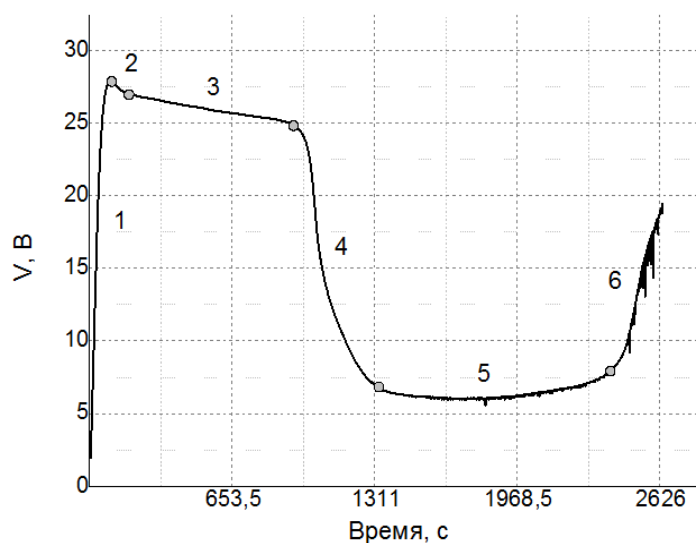


Рисунок 1 – Кинетика анодирования тонкоплёночной системы Al/V/Cu

Анодирование экспериментальных образцов проводилось в два этапа. На первом этапе анодировался слой алюминия; на втором этапе растворялся барьерный слой, анодировался ванадий. Во время анодирования визуально было обнаружено, что в местах некачественного напыления и/или дефектов пленки алюминия возможно локальное анодирование быстрее, чем в других участках образца. В этих дефектных местах происходит шунтирование тока. Чтобы избежать данного эффекта и равномерно окислять пленку алюминия, было решено уменьшить ток анодирования в 10 раз в момент резкого спада напряжения (начало стадии 4).

На втором этапе анодирования начинает утоняться барьерный слой АОА, далее идёт локальное растворение слоя ванадия под каждой порой и формирование проницаемого канала к медному подслою (рисунок 2, а). Процесс растворения ванадия контролировали визуально, наблюдая за изменением цвета образца с серебристого (пористый оксид алюминия толщиной 1,5 мкм полностью прозрачный, плёнка ванадия серебристого цвета) на чёрный (нанопорошок меди с размером частиц менее 50 нм может быть чёрного цвета). При дальнейшем выдерживании

образца при минимальном токе, происходит постепенное расширение канала в подслое ванадия, образец изменяет цвет с чёрного на тёмно-бурый, рыжий. На этом этапе подслоем ванадия полностью растворяется, и плёнка оксида алюминия отслаивается (рисунок 2, б).

Разработана методика формирования проницаемых структур с металлическим подслоем. Определены оптимальные условия равномерного анодирования плёнки алюминия и растворения барьерного оксидного слоя. Выявлены два основных этапа анодирования тонкоплёночной системы Al/V/Cu. Проведены электронно-микроскопические исследования созданных темплейтов. Полученные темплейты могут быть использованы для последующего синтеза массивов нанопроводов из различных материалов.

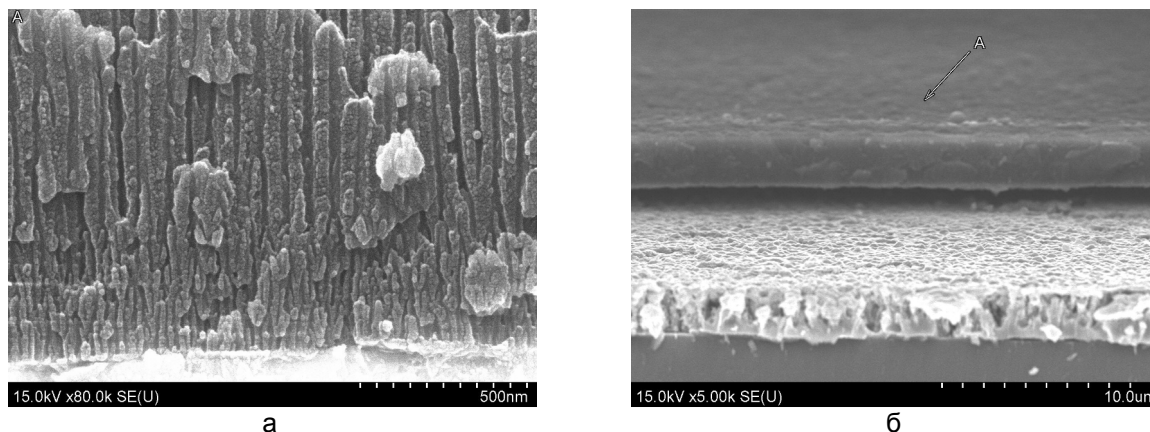


Рис. 2 – Поперечные сколы тонкоплёночной системы Al/V/Cu в различных точках кинетики анодирования

Список использованных источников:

1. Обухов И.А., Смирнова Е.А. Нанопровод как активный элемент генератора СВЧ излучения // Нано- и микросистемная техника. – 2016. – Т. 18. – № 8. – С. 509–514.
2. Kuo et al. Room temperature-synthesized vertically aligned InSb nanowires: electrical transport and field emission characteristics // Nanoscale Research Letters [Electronic resource] – 2013. – Mode of access: <http://www.nanoscalereslett.com/content/8/1/69>. – Date of access : 07.04.2017.
3. Горох Г.Г [и др.]. Синтез нанопроводов InSb в модифицированных матрицах анодного оксида алюминия // Материалы 22-й междунар. Крымской конференции «СВЧ-техника и коммуникационные технологии», 10–14 сент. 2012 г., Севастополь, Крым, Украина. Издательское предприятие «Вебер», Москва, Киев, Минск, Севастополь, 2012. – С. 655–658,
4. Величко А.А [и др.] / Плазмохимическое проявление резиста на основе аморфного оксида ванадия // Современные наукоёмкие технологии. – 2004. – № 2. – С. 50–52. – Режим доступа: <https://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=21624>. – Дата доступа: 07.04.2017.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИСЛОТНОСТИ РАСТВОРОВ ПО ИХ ИММИТАНСНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

*Дуцник А.И.*

*Петрович В.А. – к.ф.-м.н., доцент*

Для определения значения pH растворов используют несколько методик. pH можно оценивать с помощью индикаторов, точно измерять pH-метром или путём проведением кислотно-основного титрования. [1]

Мы предлагаем другой способ измерения pH, основанный на выявленной нами зависимости иммитансных параметров от pH растворов, в частности – тангенса угла потерь ( $\tan \delta$ ).

Контрольные измерения pH растворов проводились на pH метре pH-150, а регистрация тангенса угла потерь, проводилась на измерителе иммитанса E7-25 в диапазоне частот 1 кГц ÷ 10 кГц.

В ходе эксперимента было установлено, что для измерения зависимости  $\tan \delta$  от pH раствора, оптимальной является частота  $f=3$  кГц.

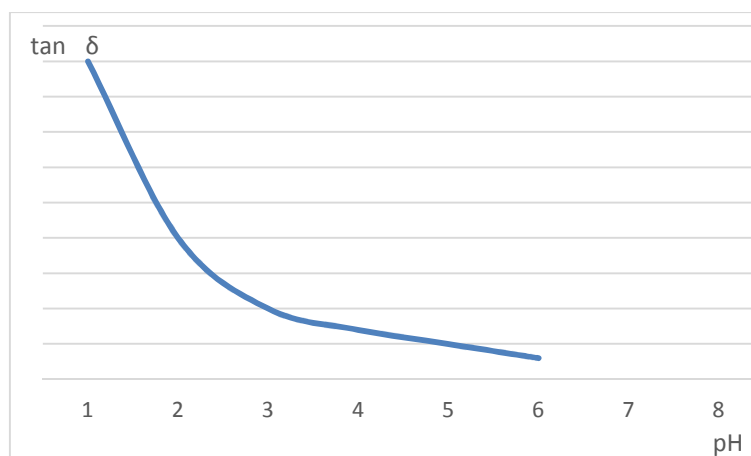


Рисунок 1 – Зависимость тангенса угла потерь от pH раствора

Зависимость тангенса угла потерь от pH раствора представлена на Рисунке 1. Из рисунка видно, что определенному значению pH соответствует определенное значение  $\tan \delta$ , что позволяет успешно определять величины pH растворов, с достаточной для практики точностью

Характерно также, что разрешающая способность метода, предлагаемого нами, возрастает с уменьшением значений pH.

Список использованных источников:

1. Бейтс Р. Определение pH. Теория и практика. Изд. „Химия“, 1972

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОЩАДИ РАЗВИТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

*Дуцник А.И.*

*Петрович В.А. – к.ф.-м.н., доцент*

Известно, что поверхность любого твердого тела, а так же граница раздела “твердое тело – воздух”, “твердое тело – жидкость” или “твердое тело – твердое тело” не являются абсолютно плоскими. В действительности мы имеем дело с шероховатой поверхностью, рельеф которой зависит от метода обработки поверхности.

Развитый рельеф поверхности исследуемого объекта приводит к увеличению площади реального контакта, которая может значительно превышать видимую площадь. Последствия этого факта для электрических параметров контакта не всегда очевидны, но прежде чем оценивать их влияние на характеристики приборов, необходимо оценить свойства реальной поверхности с развитым рельефом, в частности – площадь такой поверхности. Современные методы определения площади не позволяют обеспечить высокую точность и скорость измерения. Например, при использовании растрового электронного микроскопа, площади захвата области ограничивается размерами пучка электронов, и для оценки площади поверхности размером даже несколько см<sup>2</sup> необходимо существенное время.

Нами предложен метод «кривых разряданий» который позволяет с достаточно высокой точностью определить площадь развитой, на атомном уровне, поверхности.

Известно, что поверхность тела при приложении к ней потенциала способна адсорбировать на своей поверхности ионы. Их количество пропорционально площади исследуемой поверхности, из чего следует, что, организовав поверхностный слой из ионов и проведя соответствующие измерения, можно определить эту площадь.

Представим электродную систему, где в качестве катода используется исследуемый объект. Электрод, используемый в качестве анода, помещен в отдельную емкость, соединенную с катодом солевым мостиком. Создав разность потенциалов, на катоде образуется слой из ионов растворенного вещества. В качестве ионов могут выступать  $H^+$ ,  $Li^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  и другие. Важно ими равномерное покрытие поверхности исследуемого объекта, при этом без восстановления на ней. Для этого применяются различные комбинации растворов, ионов и приложенных разностей потенциалов.

После образования ионного слоя на поверхности объекта, система "катод-раствор" представляет из себя конденсатор, при разрядке которого через измерительную систему пройдет заряд, равный заряду адсорбированных ионов вещества, который, как указывалось ранее, пропорционален площади. Измерение заряда производится путем получения зависимости  $i(t)$  и последующим интегрированием. Характерный вид зависимости  $i(t)$  приведен на рис. 1.

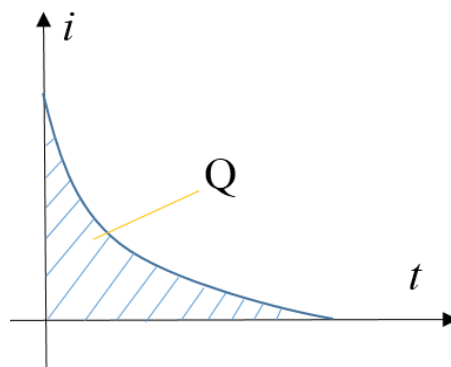


Рисунок 1 – Зависимость тока от времени

Как видно из рисунка, ток убывает от своего максимального значения до нуля, в чем заключается преимущество метода "кривых разрядки" над методом «кривых зарядки», где помимо тока разрядки конденсатора необходимо учитывать еще и паразитные токи, возникающие из-за побочных реакций, что значительно затрудняет считывание информации.

#### Список использованных источников

1. С.Моррисон, ред. Ф.Ф. Волькештейн; Химическая физика поверхности твердого тела. «Мир». Москва 1980.
2. В.В. Скорчеллетт; Теоретическая электрохимия. «Химия». Ленинград 1974.

## ПОЛУЧЕНИЕ И ВРЕМЕННАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ СВОЙСТВ АНОЛИТА И КАТОЛИТА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск. Республика Беларусь

*Новицкий Р. А. Островский А. И.*

*Петрович В.А. к.ф-м.н., доцент кафедры МНЭ, БГУИР*

При анодной электрохимической обработке кислотность воды увеличивается, поверхностное натяжение увеличивается, увеличивается электропроводность, увеличивается количество растворенного кислорода, уменьшается концентрация водорода, азота, изменяется структура воды, рН=3-5 ед.. В результате катодной электрохимической обработки воды приобретает щелочную реакцию, уменьшается поверхностное натяжение, снижается количество растворенного кислорода и азота, уменьшается концентрация водорода, уменьшается электропроводность, рН=8-10 ед.. И католиту, и анолиту присуща чрезвычайно высокая физико-химическая активность, обусловленная тремя факторами :

1. Стабильные продукты электрохимических реакций в католите и анолите.
2. Высокоактивные неустойчивые продукты электрохимических реакций с весьма ограниченным временем жизни.

3. Долгоживущие активированные структуры в областях, прилегающих к поверхности электродов.

Именно они и наделяют анолит и католит чрезвычайными каталитическими способностями, позволяя им (католиту и анолиту) изменить активационные барьеры между взаимодействующими компонентами.

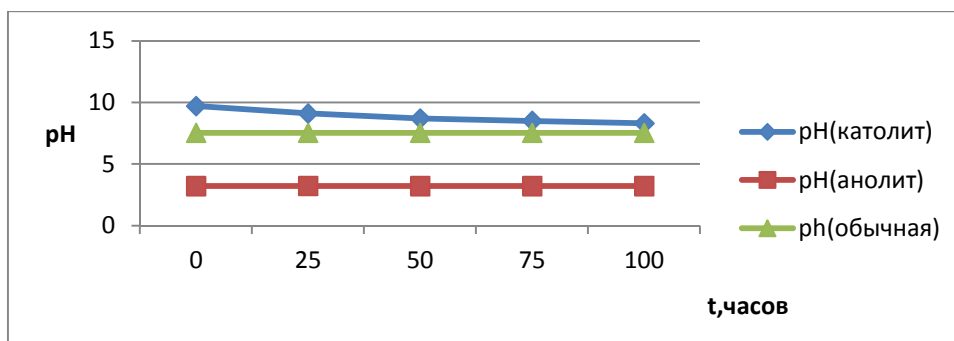


Рисунок 1 – График зависимости анолита и католита от времени t.

Из рисунка 1 видно, что анолит стабилен по pH во времени и сохраняет свои свойства в течении времени от 0 до 100 часов. В то же время у католита наблюдается существенный временной дрейф, pH уменьшилось почти на 2 единицы.

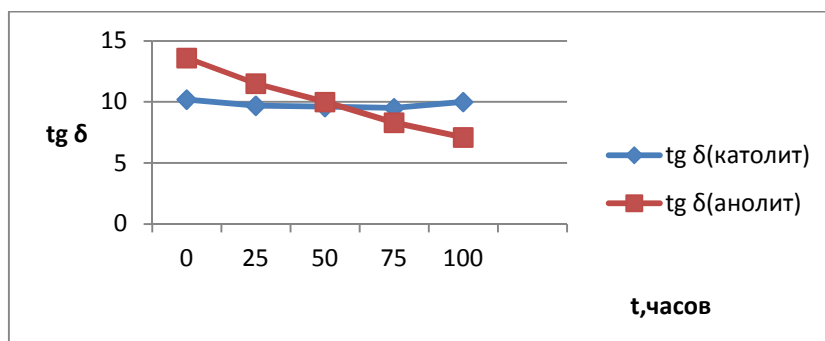


Рисунок 2 – График зависимости tg δ от времени при частоте f=10kHz.

Также установлено, что у католита тангенс диэлектрических потерь стабилен от 0 до 100 часов. Анолит при этом значительно уменьшил свое значение тангенса от 14 единиц при 0 часов, до 7 единиц при 100 часов. Вопрос, почему так происходит, находится на стадии изучения, и в скором времени мы надеемся дать ответ.

## ПОЛУЧЕНИЕ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПЛЕНОК НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ДИОКСИДА ТИТАНА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

*Панцулая Ш.Н.*

*Петрович В.А. – доцент, канд. физ.-мат. наук*

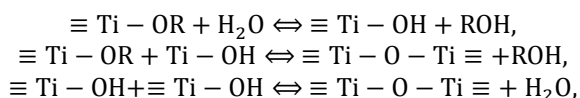
Образцы диоксида титана создавались по золь-гель методу. Для создания золя использовались этиловый спирт ( $C_2H_5OH$ ) и бутанол-1 ( $C_4H_9OH$ ). Смешивались в соотношении 1:1 по 3,7 г каждый. После чего в раствор добавляли 0,166 г ацетилацетона ( $C_5H_8O_2$ ). Далее, раствор перемешивали на протяжении 5 минут при скорости 500 оборотов в минуту. После чего, не останавливая перемешивание, по каплям добавляли 0,788 г тетраизопророксида титана ( $C_{12}H_{28}O_4Ti$ ), ждали 15 минут и добавляли 0,1 г дистиллированной воды. После 20 минут перемешивания в золь добавлялся порошок  $TiO_2$ . Было подготовлено 3 раствора золь с



микроструктурированным, наноструктурированным и смесью (1:1) порошков TiO<sub>2</sub>, каждый 8% от массы раствора.

В качестве подложки использовался предварительно очищенный алюминий 15x10 мм. Алюминий окунался в раствор соответствующего золя на 1 минуту, после чего происходила сушка в печи при 200 °С в течении 3 минут. Таким образом было нанесено 3 слоя, после чего образцы отправились на отжиг при 500 °С в течении 30 минут в муфельной печи.

При погружении в золь на поверхности алюминия происходят следующие последовательные реакции:



где R – C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>.

Измерения емкостных характеристик проводились на различных контактах образцов. Измерения проводились при частоте 10 кГц, измерительном напряжении 40 мВ и 0 В напряжении смещения при комнатной температуре. При этом необходимо отметить обязательное использование чехла от электромагнитных излучений, поскольку предварительные расчеты показали емкости порядка сотен пФ, то даже обычное фоновое электромагнитное излучение будет создавать значительную погрешность при измерениях. Результаты измерений занесены в таблицу 1.

Таблица 1 – Емкостные характеристики пленок диоксида титана

Номер контакта	Cp, пФ	Cs, пФ	Rs, кОм	Rp, МОм	Q	D
1	208	210	5	1,2	15,5	0,065
2	133	132	8,3	1,61	15	0,065
3	253	253	2,9	1,27	21	0,045
4	309	308	3,27	78	15,5	0,064
5	156	157	7,19	1,4	14	0,07
6	264	267	4	950	15	0,07
7	150	179	385	2,73	2,3	0,43
8	173	210	353	1,86	2	0,5
9	154	187	370	2,37	2,27	0,43
10	99	112	513	4,5	2,71	0,35
11	123	143	467	2,99	2,31	0,43
12	400	490	119	1,28	2,7	0,37
13	422	510	121	1	2,5	0,39
14	233	270	200	2,16	2,9	0,33
15	227	259	190	2,4	3,7	0,31
16	342	298	158	1,7	2,86	0,34
17	269	311	167	1,9	2,9	0,33

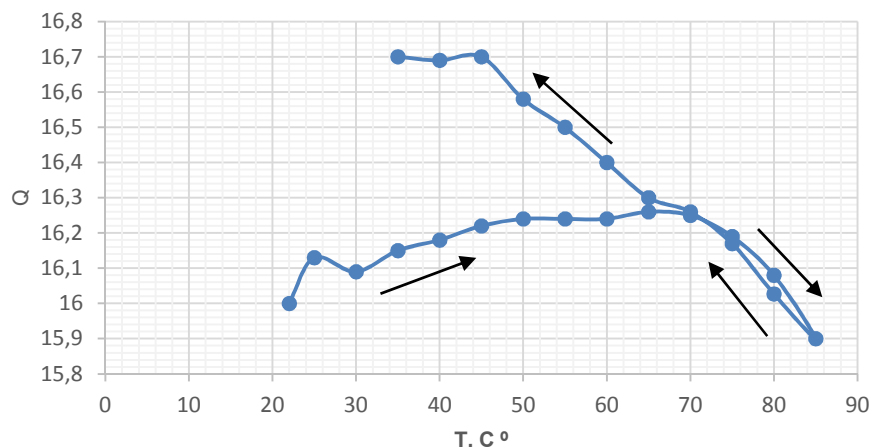
В таблице 1 D – тангенс угла диэлектрических потерь; Cp, Rp и Cs, Rs – соответственно, емкость и сопротивление при параллельной и последовательной эквивалентных схемах измерения; Q – добротность.

Для измерения зависимости добротности от температуры использовалась металлическая спираль, которая нагревалась до 85 °С за 2 часа. Исследования проводились на микроструктурированном образце на контакте 1 при подаваемой мощности 30 Вт и частоте 10 кГц. Полученные результаты изображены на рисунке 1.

Из рисунка видно присутствие гистерезиса, что объясняется краевыми эффектами – десорбцией на границе раздела диоксид титана/алюминий, для уменьшения краевых эффектов возможно применение охранного кольца. К тому же на присутствие гистерезиса так же влияет разница в погрешностях и измерениях при нагреве и охлаждении, как было сказано ранее.

После чего было найдено практическое пробивное напряжение Uпроб, которое составило 6-8 В в зависимости от образца и контакта.

Добротность данных образцов довольно низкая для использования в качестве конденсаторов, соответственно, необходимо улучшение технологии производства образцов и дополнительные исследования.



В качестве улучшения для золь-гель технологии возможно использование электрофореза для уменьшения количества шагов, и, соответственно, количества дефектов в диоксиде титана. Возможно также изменять поверхностную вязкость золя приложением потенциала. После улучшения технологии осаждения диоксида титана необходимо проведение дополнительных исследований новых образцов.

## ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОЕВ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ

В. П. Гаронин<sup>а)</sup>, А. А. Степанов<sup>а)</sup>, С. А. Филатов<sup>б)</sup>

<sup>а)</sup> *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

<sup>б)</sup> *Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,  
г. Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время в микроэлектронной промышленности широко используются методы субтрактивного производства. В процессе данного производства довольно большое количество полупроводниковых материалов удаляются с подложки для формирования активных элементов микросхемы[1]. Появление и возможности трехмерной печати позволят снизить эти потери и перейти к аддитивному производству в микроэлектронной промышленности[2].

В докладе были озвучены возможности аддитивного производства и трехмерной печати в микроэлектронной промышленности. Преимущества трехмерной печати:

- Использование меньшего количества материала;
- Быстрое прототипирование микроэлектронных изделий;
- Быстрое создание мелкосерийных изделий[3].

Трехмерная печать позволяет печатать различными материалами, что уже сейчас может использоваться для создания приборов и устройств электроники, в том числе на гибких подложках[4]. Так же развитие трехмерной печати позволит быстрое создание моделей и опытных образцов изделий, что так же скажется на скорости и качестве разработки микроэлектронных устройств.

### Литература

1. Scotten W. Jones, Introduction to Integrated Circuit Technology : Textbook / ICKnowledge LCC. – Georgetown, MA, 2012.
2. 3D-printed microelectronics for integrated circuitry and passive wireless sensors : Article / Sung-Yueh Wu, Chen Yang, Wensyang Hsu [ & others] // Nature. – 2015.– July.– 20.
3. 3dtoday [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://3dtoday.ru/>.
4. Hiroki Ota, Sam Emaminejad, Yuji Gao, Application of 3D Printing for Smart Objects with Embedded Electronic Sensors and Systems / Esther Levy // Advanced Materials Technologies – April 2016.