

УДК 62-4

DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.1.63>

ВОЗМОЖНОСТИ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ В СОЗДАНИИ ЛОВУШЕК ЭКСИТОНОВ И ТРИОНОВ ДЛЯ НАНОЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

**И. И. Попов, А. В. Мороз, А. А. Гладышева, А. В. Иванов, А. Ю. Леонтьев,
Д. В. Минеев, Н. И. Сушенцов**

Поволжский государственный технологический университет,
Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3
E-mail: biht.oro@gmail.com

Предлагается обзор экспериментальных исследований по получению с помощью метода магнетронного распыления наноразмерных ловушек экситонов и трионов. Через снятие вольт-амперной характеристики (ВАХ) обнаружена связь мемристорных свойств плёнки оксида цинка с наполняемостью ловушек экситонов. Предложены технологии коррекции текстуры плёнок и формирования кристаллических волокон в виде одномерных нанообъектов.

Ключевые слова: магнетронное распыление тонких плёнок; экситонные ловушки; квантовые точки; мемристор; одномерные нанообъекты; нанoeлектронное приборостроение.

Введение. В настоящее время оксид цинка является одним из перспективных материалов, применяемых в технологиях нанoeлектронного приборостроения. Результаты исследования электрических и оптических свойств плёнок оксида цинка, нанесённых методом ионно-лучевого распыления оксидной мишени, приведены в работе [1]. Результаты исследований плёнок оксида цинка, полученных методом магнетронного распыления, приведены в работе [2]. При этом резонансные свойства оксида цинка, особенности технологических режимов магнетронного распыления, обеспечивающих формирование на поверхности кристаллических волокон наноразмерных ловушек экситонов и трионов различных линейных размеров и форм, изучены недостаточно. Идея поиска и исследования в тонких плёнках областей, обладающих свойствами квантовых точек, возникла на основе результатов наблюдения в этих плёнках сигналов фо-

тонного эха. Фотонное эхо является оптическим откликом резонансной среды на воздействие двух (или более) разнесённых во времени лазерных импульсов на резонансный переход между двумя (или более) квантовыми уровнями энергии, формируемым за время, меньшее длительности затухания релаксационных процессов в среде после воздействия на неё возбуждающего излучения [3]. Факт наблюдения фотонного эха на длине волны 800 нм при возбуждении плёнки оксида цинка лазерными импульсами на длине волны 800 нм, на которой у оксида цинка не было линии поглощения излучения, был объяснен нами возбуждением эхо-сигнала на дискретных уровнях энергии, формирующихся в квантово-размерных объектах, имеющих квантовый переход на длине волны 800 нм, создаваемых на группах поверхностных дефектов кристаллических волокон тонкой плёнки, являющихся ловушками экситонов и трионов. Эти

© Попов И. И., Мороз А. В., Гладышева А. А., 2021.

Для цитирования: Попов И. И., Мороз А. В., Гладышева А. А., Иванов А. В., Леонтьев А. Ю., Минеев Д. В., Сушенцов Н. И. Возможности магнетронного распыления в создании ловушек экситонов и трионов для нанoeлектронного приборостроения // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 1 (49). С. 63-79. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.1.63>

резонансные уровни формировались в ловушках экситонов и трионов, имеющих линейные размеры в районе 100 нм, в результате дискретизации в них энергии локализованных экситонов или трионов, после поглощения плёнкой в режиме двухфотонного возбуждения лазерных импульсов на длине волны 400 нм. Такой вывод мотивировал нас на поиск технологий получения этих квантовых точек и исследование их свойств. Таким образом появился цикл исследований, приведённый в данной работе, подтвердивший нашу гипотезу и давший новый толчок технологическому развитию процесса создания этих квантовых точек и их практическому применению.

В настоящее время известно большое количество свойств тонких плёнок, полученных методом магнетронного распыления [4–11]. Однако информации о возможностях магнетронного распыления, связанных с получением наноразмерных объектов, обладающих квантово-размерными ограничениями в одном, двух или трех направлениях пространства, ни в результате обзора научной литературы, ни патентного поиска не обнаружено. Потому данный цикл исследований является актуальным, так как направлен на разработку технологий получения квантово-размерных объектов методом магнетронного распыления, обладающих свойствами наноразмерного квантования энергии локализованных в них экситонов или трионов. Также приводятся результаты исследования свойств таких тонких плёнок, содержащих эти ловушки. Полученные результаты формируют хорошие предпосылки для разработки новых физических принципов оригинальных наноэлектронных приборов, работающих при комнатной температуре.

Цель работы заключается в определении возможностей метода магнетронного распыления в получении различных видов наноразмерных ловушек экситонов и трионов на поверхностных дефектах кристаллических волокон и в исследовании применимости процессов, протекаю-

щих в этих ловушках, для разработки новых физических принципов построения нано-электронных приборов.

Задачи исследований включают:

- разработку технологии и получение тонких плёнок с отдельными наноразмерными зонами скопления поверхностных дефектов кристаллической решётки, формируемыми на волоконно-кристаллической текстуре тонких плёнок, обладающими свойствами ловушек экситонных и трионных состояний, функционирующих при комнатной температуре;

- исследование возможности влияния на ток ВАХ, снимаемой с плёнки, обладающей мемристорным эффектом процессов, протекающих на элементах сверхтонкой структуры квантовых уровней с противоположными спинами, формируемых при дискретизации энергии в наноразмерной ловушке экситонов, возбуждаемых под воздействием напряжения, прикладываемого к плёнке;

- формализацию параметров модели универсального первичного элемента микророботства, отражающего все принципы формирования природной гармонии (квазирезонансного процесса, протекающего с минимальными энергетическими затратами) в параметры технологического процесса магнетронного распыления тонких плёнок при воздействии на формируемую плёнку кодовой последовательности акустических импульсов;

- разработку методики коррекции кривизны формы поверхности, кристаллических волокон тонких плёнок, определяющих параметры ловушек экситонов и трионов, формирующихся на их поверхности, реализуемой под воздействием кодовой последовательности акустических импульсов.

- разработку и экспериментальную реализацию вариантов технологических процессов коррекции кривизны формы поверхности кристаллических волокон плёнки, совершаемой под воздействием кодовой последовательности акустических импульсов

Технология получения тонких плёнок с наноразмерными ловушками экситонов и трионов. В основу разработки технологии коррекции текстуры тонких плёнок, формируемых методом магнетронного распыления, обеспечивающей формы их текстуры, оптимальные для реализации новых физических принципов построения нанoeлектронных приборов, положена методика формализации в параметрах применяемого технологического процесса – параметров универсальной первичной модели мироустройства, отражающей принципы природной гармонии (квазирезонансного процесса, протекающего с минимальными энергетическими затратами). Эта модель [11-а] построена на принятии природного дуализма во всех проявлениях жизни. При обеспечении значений двух противоположно ориентированных инерций движения жизненных ресурсов (мелкодисперсной материи, не принявшей форму природного объекта, энергии и информации) в заданном диапазоне, определяющем граничные условия для протекающих процессов, в выбранном уровне их масштабирования, формируется режим природной гармонии. С учётом иерархического построения мира (внутри крупной сферы движения жизненных ресурсов существует несколько более мелких сферических форм движения ресурсов) принципы природной гармонии соблюдаются на всех уровнях мировой иерархии.

В этой модели мироустройства особо организованное движение энергии и её мелкодисперсных материальных носителей передается от более крупных объектов к меньшим под воздействием двух сил (обеспечивающих природный дуализм), со встречно-направленным вращением по спирально вихревым траекториям, то есть имеющих противоположные спины (от Вселенной – к Галактикам, от Галактики к созвездиям и так далее от Солнца – к Земле, от Земли к объектам биологической жизни, доходя до объектов микромира). После перетекания энергии и её носите-

лей от более крупного природного объекта к меньшему увеличивается частота их вращения в соответствующей новой спиральной траектории движения. Временной интервал такого перетекания энергии и её материальных носителей должен быть в π -раз меньше паузы, во время которой происходит полный период укладывания очередного витка вращения энергии и её материальных носителей с меньшим диаметром и большей частотой. Такая пульсация плотности энергии и её материальных носителей имеет одинаковые соотношения для их перетекания на любом уровне иерархии мироустройства. В момент перетекания энергии и её материальных носителей открывается окно возможностей для этого перетекания от внешнего источника. Несущая частота отвечает за частоту перетекания по новой траектории качества движения энергии и её носителей, связанных с размерами новой сферы формирующейся, на этом потоке перетекания.

В данном цикле исследований сообщаем об экспериментальных результатах воздействия на энергию перемещения дислокаций кристаллической структуры энергией поверхностных акустических волн, возбуждаемых кодовой последовательностью акустических импульсов. Общий вид последовательности приведён на рис. 1. Здесь T_1 – период повторения импульсов несущего сигнала (отражает период вращения энергии и её материальных носителей), T^2 – период повторения импульсов модулирующего сигнала (отражает период пульсации плотности энергии и её материальных носителей), $T_{и1}$ – длительность импульса несущего сигнала; $T_{и2}$ – длительность импульса модулирующего сигнала (отражает длительность окна возможностей для перетекания энергии и её материальных носителей), $T_{п1}$ – пауза между импульсами последовательности, поступающими с несущей частотой сигнала, $T_{п2}$ – пауза между импульсами последовательности, поступающими с частотой модулирующего сигнала (отражает длительность

паузы между двумя окнами возможностей). Меняя отношение T_{n2}/T_{n1} , мы получаем различные формы текстуры тонкой плёнки, приведённые на рис. 2. Разработанная модель процессов коррекции формы и кривизны поверхности кристаллических волокон предполагает наличие циклического перераспределения энергии между компонентами сверхтонкой структуры вращательного воздействия.

В момент доминирования энергии, модулированной информацией, на сверхтонкой структуре вращательного воздействия, обладающего отрицательным спином (с центростремительной инерцией движения – против часовой стрелки), происходит захват энергии кристаллизующейся структурой, сопровождающийся охлаждением мелкодисперсного материального носителя энергии (не принявшего форму охлаждённого тела). Дальнейшее движение ресурсов сопровождается по-

следующей их кристаллизацией и частичным выпадением на поверхности нижнего полюса сферической орбиты их движения. Это выпадение ресурсов, перешедших в твердую фазу обеспечивает формирование новых элементов твёрдого тела. Окно возможностей для такого выпадения (обновления формы твёрдого тела) формируется при выполнении вышеупомянутых граничных условий и фазовых соотношений энергии обеих зеркальных компонент сверхтонкой структуры вращательного воздействия (циркулирующих по соответствующей конической спирали). Зеркальные этим фазовые соотношения при доминировании энергии на компонентах сверхтонкой структуры с положительным спином формируют окна возможностей для принятия в циклический оборот материальных ресурсов, потраченных на формирование обновления материального тела в предыдущем цикле.

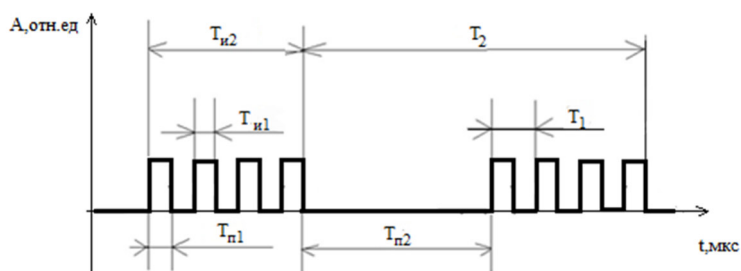


Рис. 1. Диаграмма взаимодействия несущего и модулирующего сигналов (в мкс.)

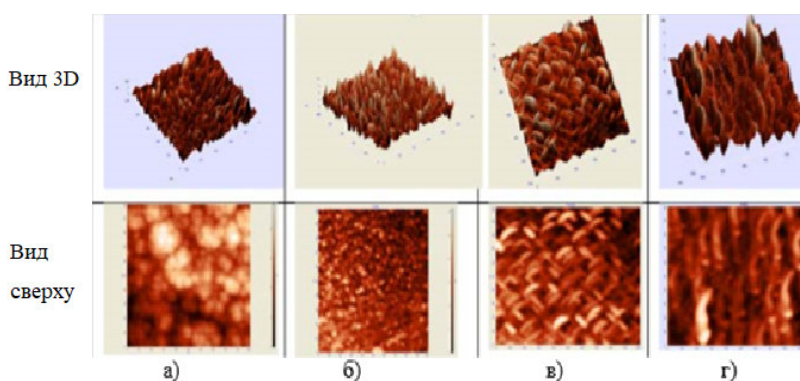


Рис. 2. Коррекция характера изменения дислокаций при воздействии различных вариантов кодовой последовательности акустических импульсов: а – контроль; б – скважность S модулирующих импульсов при отношении T_{n2}/T_{n1} равна 6,5; в – скважность S при отношении T_{n2}/T_{n1} равна $(\pi + 1)$; г – скважность S при отношении T_{n2}/T_{n1} равна $(e + 1)$ (где « e » – основание натурального логарифма, равное 2,7...)

Рис. 2. Коррекция характера изменения дислокаций при воздействии различных вариантов кодовой последовательности акустических импульсов: а – контроль; б – скважность S модулирующих импульсов при отношении T_{n2}/T_{n1} равна 6,5; в – скважность S при отношении T_{n2}/T_{n1} равна $(\pi + 1)$; г – скважность S при отношении T_{n2}/T_{n1} равна $(e + 1)$ (где « e » – основание натурального логарифма, равное 2,7...)

Частота низкочастотной модуляции задаёт момент открытия окна возможностей для формирования кристаллической фазы материала в составе волокон пленки, то есть перетекания частиц распыляемого материала и энергии в новую формирующуюся сферу. Структурная схема технологического процесса магнетронного формирования тонких плёнок при воздействии импульсно-модулированного акустического излучения приведена на рис. 3.

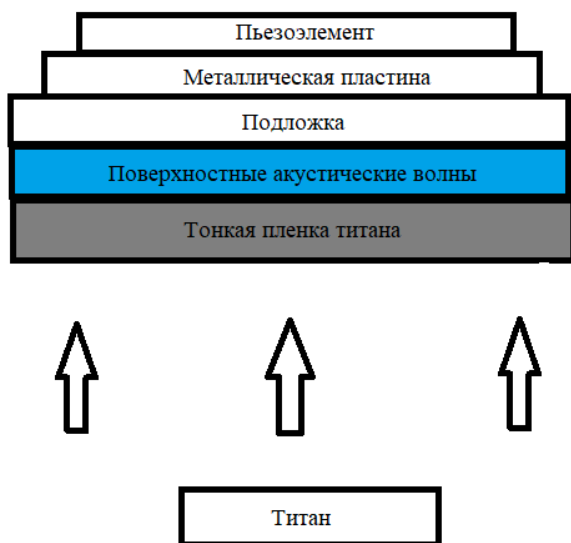


Рис. 3. Структурная схема технологического процесса магнетронного распыления тонких плёнок под воздействием импульсно-модулированного акустического излучения

Рис. 3. Структурная схема технологического процесса магнетронного распыления тонких плёнок под воздействием импульсно-модулированного акустического излучения

Методология применения режимов коррекции текстуры тонких плёнок, получаемых методом магнетронного распыления, включает следующее. Рассчитав траекторию движения материала, распыляемого в установке магнетронного формирования тонких плёнок, определяем параметры импульса и периода модуляции искусственного акустического кодового сигнала (см. рис.1). При этом обеспечивается процесс формирования плёнки под воздействием импульсов искусственно задаваемых внешних пульсаций. Исходя из размеров и времени осаждения на под-

ложке капле распыляемого вещества рассчитывается несущая частота повторения акустических импульсов в кодовой их последовательности.

Таким образом создаются искусственно сформированные условия (окна возможностей) перетекания подаваемых с внешней среды частиц распыляемого материала и их энергии, поступающих на подложку в виде разогретого потока частиц осаждаемого материала, которые используются для создания требуемой формы материального тела. Кодовая последовательность акустических импульсов выполняет роль потока импульсов внешних пульсаций, упорядочивающих движение остывающего и конденсируемого на подложке вещества. Во время действия импульса кодовой последовательности формируется кристаллическая фаз волокон пленки, а во время паузы распыляемый материал оседает на подложке в пространстве между волокнами в виде бесформенной ренгеноаморфной фазы. В результате обмена энергией между подложкой и конденсатом распыляемого вещества происходит формирование кристаллической твердотельной фазы этого вещества. Задавая частоту перетекания энергий из одной сферы в другую и смещая окно возможностей перетекания с помощью подачи низкочастотного модулирующего импульса в акустическом кодовом сигнале, мы добиваемся нужных изменений формы кристаллических волокон формируемой тонкой плёнки. На рис. 2, б приведены результаты эксперимента, формирования текстуры пленки в виде обостренных кристаллических волокон. Это связано с тем, что длительность наличия окна возможностей для перетекания частиц распыляемого материала в кристаллическую решетку была в пять-шесть раз меньше паузы (скважность S равна 6,6), то есть доля длительности импульса, открывающего окно возможностей для перетекания частиц распыляемого материала, в периоде наиболее низкая по сравнению с

другими опытами. Также она меньше естественного окна возможностей, характерного для данного материала. На рис. 2, *г* приведены результаты эксперимента, когда при условиях, аналогичных предыдущему эксперименту, длительность модулирующего импульса составляет наибольшую долю в периоде повторения импульсов (S равна 3,7), также она значительно превышает длительность импульса естественных внешних пульсаций. В этом случае после завершения действия естественного импульса внешних пульсаций продолжалось укладывание твердотельной фазы вещества, пока не завершался акустический импульс искусственных внешних пульсаций, потому произошло размазывание формы волокна за пределы его естественного состояния, приведённого на рис. 2, *а* (вариант контроля). На рис. 2, *в* приведены результаты эксперимента, когда длительность акустического импульса искусственных пульсаций соответствовала времени заполнения пространства между противофазными источниками центробежной и центростремительной сил (S равнялась 4,14). Два ортогональных направления выкладки твёрдой фазы вещества связаны с тем, что медь имеет кубическую кристаллическую решётку (то есть за один продольный цикл сферического движения на входе сферы открывается два, окна возможностей для перетекания энергии и её материальных носителей в ортогональных направлениях).

В наших работах [12 – 15] впервые показано, что на криволинейной поверхности кристаллических волокон тонких плёнок, полученных методом магнетронного распыления, формируются локальные наноразмерные зоны скопления дислокаций кристаллической решётки материала плёнок на базе её поверхностных дефектов. На этих зонах возникают ловушки экситонных (или трионных) состояний полупроводниковой плёнки. Заметим, что экситон – это квазичастица, состоящая из электрона, возбуждённого до

одного из квантовых уровней дислокации, находящихся в запрещённой зоне, связанного кулоновской связью с дыркой в узле кристаллической решётки, из которого он вышел. Трион (заряженный экситон) – это квазичастица, связывающая электрон, возбуждённый до квантового уровня, характерного для запрещённой зоны с двумя дырками, соответствующими двумя кулоновскими связями с противоположным спином. Поскольку диаметр волокон имеет значения в диапазоне от 50 до 300 нм, то максимальные линейные размеры ловушек экситонов и трионов на их поверхности не превышают 100 нм. Заметим, в полупроводниковых структурах размерами не более 100 нм возникает размерное квантование: энергия электрона может принимать только вполне определённые значения, т. е. разрешённые значения импульса электрона в направлении ограничения его движения. То есть происходит создание искусственных кристаллов, молекул и даже атомов с заданными свойствами – квантово-размерных структур, так как электроны в этих структурах ведут себя как в квантовых объектах: квантовых ямах, нитях и точках. Квантовые точки создаются методом молекулярно-лучевой эпитаксии, методом газовой фазной эпитаксии, методами коллоидной химии. Получение наноразмерных объектов, обладающих свойствами квантовых объектов, с помощью метода магнетронного распыления выполнено впервые. В технологических исследованиях использованы как классические методы магнетронного распыления тонких плёнок, так и оригинальные авторские разработки с введением в технологический процесс воздействия кодового акустического сигнала, благодаря которому обеспечивалась коррекция форм и кривизны кристаллических волокон тонких плёнок, влияющих на параметры квантово-размерных зон скопления поверхностных дефектов кристаллической решетки материала пленок. Формирование плёнок проводилось на основе запол-

нения дислокаций кристаллической решётки осаждаемым на подложку материалом плёнки. В процессе этого осаждения формируется вид кристаллической решётки плёнки, характерный для её материала. Количественная характеристика искажения кристаллической решётки вокруг дислокации описывается вектором Бюргерса. Существуют краевые и винтовые дислокации. У краевой дислокации вектор Бюргерса равен межатомному расстоянию и перпендикулярен дислокационной линии, у винтовой дислокации – параллелен ей. Полные дислокации легко перемещаются под действием возникающих напряжений в отличие от частичных дислокаций, у которых вектор Бюргерса меньше межатомного расстояния. В кристаллах содержатся дислокации разных знаков, различающиеся ориентацией векторов Бюргерса. Дислокации одного знака, расположенные в одной плоскости, отталкиваются друг от друга, а противоположных знаков – притягиваются.

В силу кривизны поверхности кристаллических волокон тонкой плёнки, полученной методом магнетронного распыления, линия дислокаций искривляется. При этом она образует замкнутую кривую линию, описывающую зону скопления на поверхности плёнки дислокаций с узлами решётки, обладающими меньшей энергией по отношению к узлам кристаллической решётки, расположенными с внешней стороны этой линии (рис. 4).

Если уменьшение энергии узлов кристаллической решётки, расположенных внутри кривой линии дислокации, превышает тепловую энергию экситонов, локализовавшихся в ней в процессе миграции по поверхности плёнки, то такая зона локализации экситонов является своеобразной ловушкой для них. Попад в такую ловушку, экситон в процессе экситон-фононного взаимодействия с кристаллической решёткой теряет часть своей энергии, перемещаясь к месту энергетического дна ловушки.

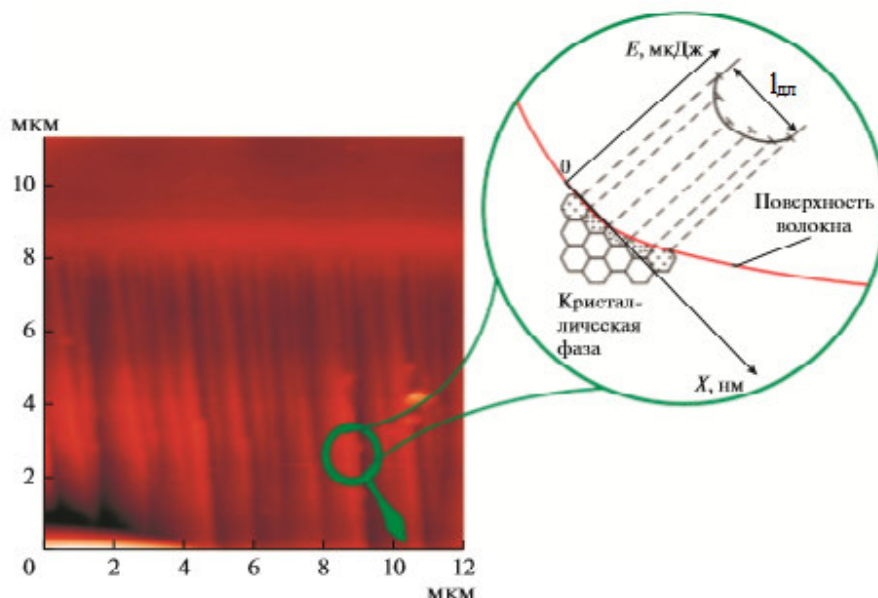


Рис. 4. Изображение скола тонкой плёнки, полученной методом магнетронного распыления:
 $l_{дл}$ – максимальный линейный размер зоны концентрации дислокаций; E – энергия возбуждения экситонного состояния; X – координата поверхностных дефектов кристаллической решётки вдоль максимального линейного размера зоны их локального скопления

Рис. 4. Изображение скола тонкой пленки, полученной методом магнетронного распыления:
 $l_{дл}$ – максимальный линейный размер зоны концентрации дислокаций; E – энергия возбуждения экситонного состояния; X – координата поверхностных дефектов кристаллической решетки вдоль максимального линейного размера зоны их локального скопления.

Экситоны, локализовавшиеся в этой зоне скопления дислокаций, имеющие тепловую энергию больше энергетического барьера, отделяющего их энергию от энергии узлов кристаллической решётки на краю ловушки, покидают её. После выхода экситона из ловушки электрон и дырка, его составлявшие, связанные кулоновской связью в этой квазичастице, называемой экситоном, рекомбинируют. Эта рекомбинация происходит в течение короткого времени, составляющего единицы фемтосекунд. Оставшиеся в ловушке электроны, связанные с материнской дыркой кулоновским взаимодействием, оказавшись локализованными в этой ловушке, образуют новую физическую среду в наноразмерном объеме, обладающую свойствами экситонного газа, помещённого в квантовую точку, с энергией, распределяющейся между положительными (с центробежным её вращением, т.е. по часовой стрелке) и отрицательными (с центростремительным её вращением, т.е. против часовой стрелки) элементами сверхтонкой структуры формирующихся квантовых уровней среды.

Формирование нитевидных нанокристаллов меди. В данном цикле исследова-

ний путём акустического воздействия на длительность окна возможностей протекания энергии и её материальных носителей в формирующийся природный объект, в рамках которого формировалось новое материальное тело, и на длительность паузы между окнами возможностей создавались различные технологические режимы получения оригинальных форм текстуры тонких плёнок меди. При параметрах акустического сигнала, приведённых в табл. 1, и форме акустического кодового сигнала, приведённого на рис. 5, получалась текстура тонких медных плёнок, приведённая на рис. 6. На поверхности плёнки формируются продольно ориентированные в одном направлении нитевидные нанокристаллы (ННК). Эти ННК имели винтовую форму поверхности. ННК – это одномерный объект с наноразмерным сечением порядка 100 – 200 нм, у которого длина соизмерима с диаметром. Параметры формируемых ННК (длина и диаметр ННК, шаг винтовой навивки формы ННК и шаг повторения решётки ННК (расстояние между параллельно расположенными ННК) приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры последовательности акустических импульсов (в мкс) и ННК (в мкм)
(во втором эксперименте)**

Параметры КПАИ								Параметры ННК		
Несущий сигнал				Модулирующий сигнал						
$\tau_{н1}$	$\tau_{п1}$	f_1	T_1	$\tau_{н2}$	$\tau_{п2}$	f_2	T_2	l	d	t
80	79	6300	159	1000	0	1000	1000	0,64-0,84	0,21-0,34	0,12

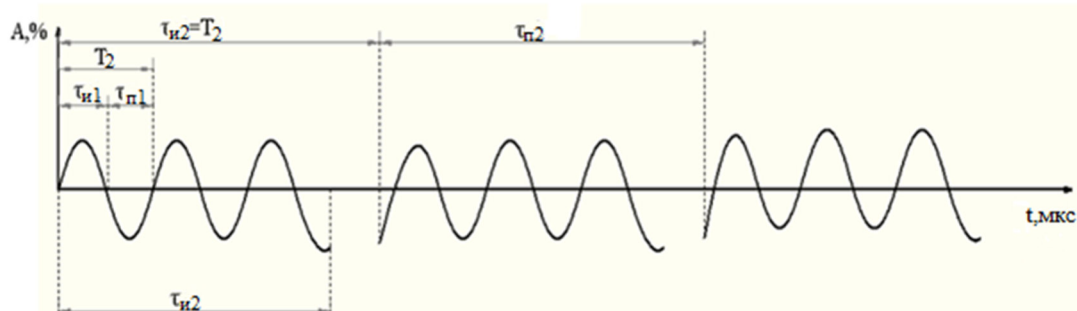


Рис. 5. Кодовая последовательность подряд идущих модулирующих акустических импульсов, когда пауза между ними равна нулю, с разной начальной фазой несущей частоты частотой в каждом импульсе

Рис. 5. Кодовая последовательность подряд идущих модулирующих акустических импульсов, когда пауза между ними равна нулю, с разной начальной фазой несущей частоты частотой в каждом импульсе

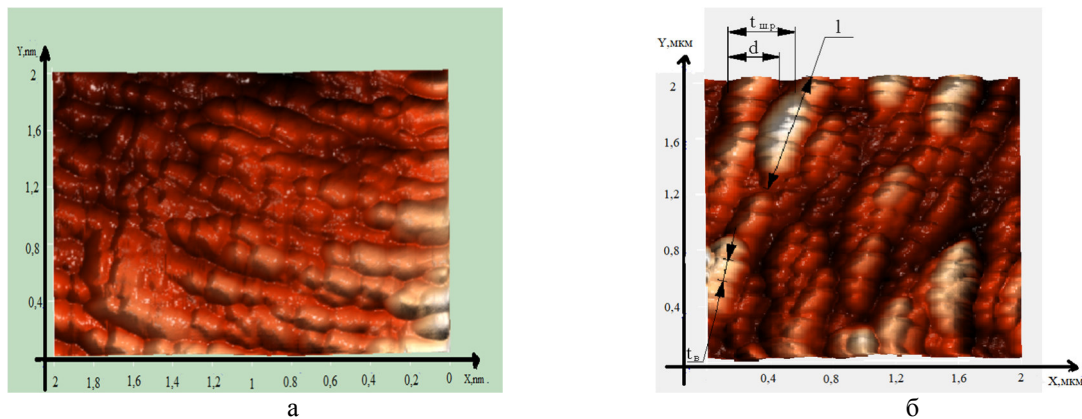


Рис. 6. Тонкие медные плёнки под воздействием последовательных подряд идущих модулирующих акустических импульсов с разной начальной фазой несущей частотой в каждом импульсе:

а – контроль; б – эксперимент

Рис. 6. Тонкие медные плёнки под воздействием последовательных подряд идущих модулирующих акустических импульсов с разной начальной фазой несущей частотой в каждом импульсе:

а – контроль; б – эксперимент

Формирование одномерных нанообъектов из плёнок титана и оксида цинка. Манипулируя параметрами акустического сигнала формировались несколько видов текстуры тонких плёнок титана, обладающих гексагональной кристаллической решёткой, в отличие от экспериментов для плёнок меди, обладающих прямоугольной кристаллической решёткой. Также исследовались тонкие плёнки оксида цинка. Приведены результаты контрольной плёнки и трёх вариантов плёнок, полученных при различных параметрах кодовой последовательности акустических импульсов, приведённых в табл. 2.

На рис. 7 приведены плёнки с одномерными нанообъектами, полученными методом магнетронного формирования тонких плёнок титана.

В табл. 3 приведены параметры кодовой последовательности акустических

импульсов (КПАИ) и параметры нитевидных нанокристаллов. На рис. 8 показаны результаты изменения формы кристаллических волокон, следовательно, состава трионных ловушек, трехслойной плёнки Si(P)/Si(B)/ZnO (с верхним слоем из оксида цинка) кодовой последовательности акустических импульсов, имеющих разное содержание её параметров.

Снимки сканированных изображений плёнок (рис. 8) получены при воздействии различных кодовых последовательностей акустических импульсов: среднее значение высоты волокон – 50 нм (вариант “А”), 65 нм (вариант “Б”) и 65 нм (вариант “В”). Вариант “В” – наиболее оптимальный. Их анализ подтверждает работоспособность этого метода коррекции текстуры плёнок сложного состава, оксида цинка, а не только чистых металлов меди и титана.

Таблица 2

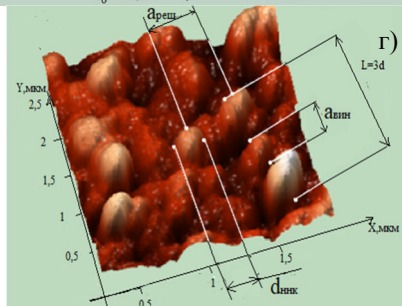
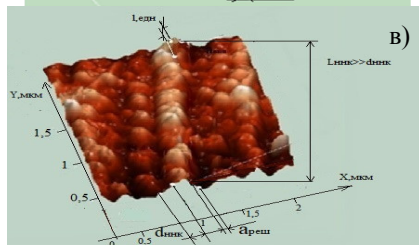
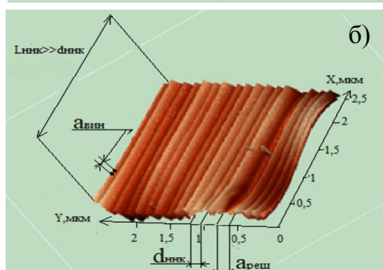
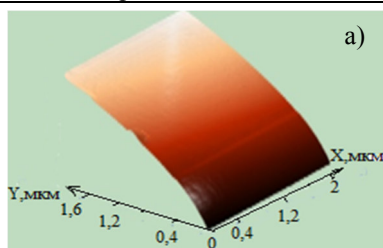
Параметры кодовой последовательности акустических импульсов (в мкс) и ННК (в нм) (третий эксперимент)

№ п/п	Параметры КПАИ										Параметры ННК			
	Несущий сигнал					Модулирующий сигнал								
	$\tau_{н1}$	$\tau_{п1}$	q_1	f_1	T_1	$\tau_{н2}$	$\tau_{п2}$	q_2	f_2	T_2	$a_{реш}$	$a_{вин}$	k_l	$d_{ннк}$
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	80	79	2	6300	159	14559	1590	2,09	33	30459	78	29	>>1	102
3	7001	22127	4,14	34	29128	91606	2912800	32,8	0,33	3004406	132	48	>>1	97
4	7668	24078	4,14	0,31	31746	60317	3174600	53,6	0,3	3234917	257	143	3	112

Таблица 3

Параметры технологического процесса получения трёхслойной плёнки Si(P)/Si(B)/ZnO

Параметры технологического режима напыления плёнок	Виды плёнок		
Время напыления, t сек.	Si(P)	Si(B)	ZnO
Температура нагревателя, T_n^0 C	80-240	80-240	300-600
I, A	100	100	100
U, B	0,5	0,3	0,3
Аргон, Ar, %	455	460	385
Кислород, O ₂ , %	100	100	20;30
Давление, P, Па	-	-	80;70
Порядок напыления	2	2	2
Время напыления, t сек.	1	2	3



Контроль

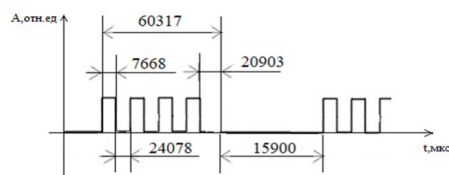
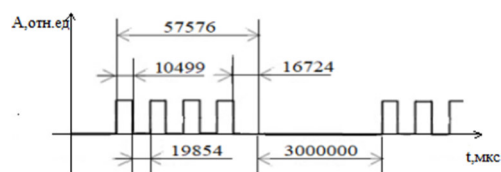
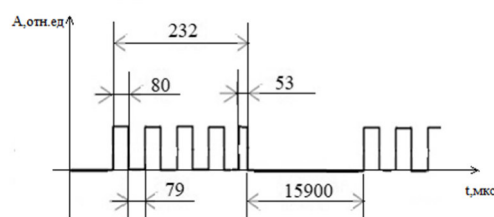


Рис. 7. Плёнки с одномерными нанообъектами с винтовой формой поверхности, полученными методом магнетронного распыления тонких плёнок титана (слева – сканы плёнок, справа соответствующая диаграмма акустического кодового сигнала): а – контроль; б – вариант получения квантовой проволоки; в – вариант получения нановискеров; г – вариант получения нитевидных нанокристаллов (временные величины – в мкс)

Рис. 7. Плёнки с одномерными нанообъектами с винтовой формой поверхности, полученными методом магнетронного распыления тонких плёнок титана (слева – сканы плёнок, справа соответствующая диаграмма акустического кодового сигнала): а – контроль; б – вариант получения квантовой проволоки; в – вариант получения нановискеров; г – вариант получения нитевидных нанокристаллов (временные величины – в мкс)

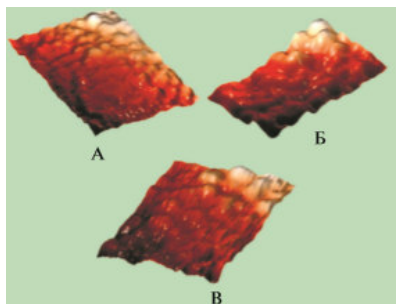


Рис. 8. Снимки сканированных изображений трёхслойных плёнок Si(P)/Si(B)/ZnO , при различных температурах нагрева подложки (А – при 80°C , Б – при 100°C , В – при 120°C)

Рис. 8. Снимки сканированных изображений трёхслойных плёнок Si(P)/Si(B)/ZnO , при различных температурах нагрева подложки (А – при 80°C , Б – при 100°C , В – при 120°C)

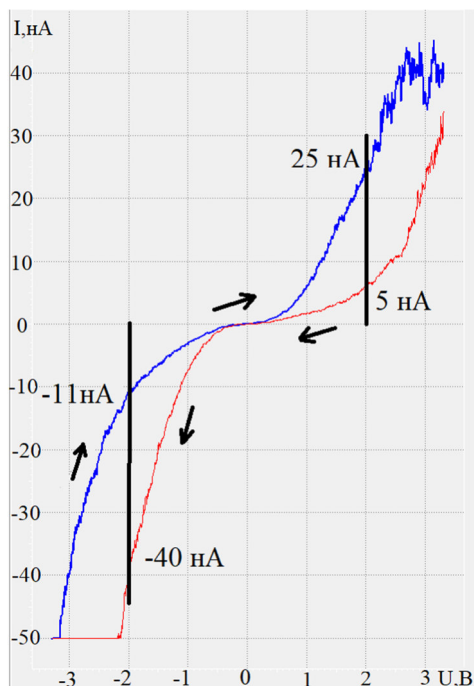
Эффект модулирования мемристорных свойств оксида цинка за счёт захвата части электронов в локализованные экситонные состояния. Оригинальными оказались полученные нами результаты экспериментов по исследованию мемристорного эффекта в оксиде цинка. Полученные нами результаты В проявления мемристорных свойств оксида цинка существенно отличаются от ранее полученных авторами работы [16] в этой плёнке, сформированной методом химического осаждения. Рабочая плёнка оксида цинка в нашем эксперименте была изготовлена из десяти слоёв оксида цинка, имевших различную концентрацию кислорода от 0 до 90 %, отличающуюся между каждыми соседними слоями на 10 %. Нижний слой с отсутствием кислорода, то есть состоящий из одного цинка, выполнял роль нижнего контакта мемристора. С другой стороны, к многослойной плёнке оксида цинка подводился платиновый электрод зондового микроскопа. Напряжение, подававшееся на платиновый электрод микроскопа относительно нижнего электрода, представленного нижним цинковым слоем, изменялось сначала от $-3,5\text{ В}$ до $+3,5\text{ В}$ с шагом $0,007\text{ В}$, а затем от $+3,5\text{ В}$ до $-3,5\text{ В}$. При этом снималась вольтамперная характеристика сначала одной ветви петли гистерезиса, затем – другой (см. рис. 9, а). Полученная петля гистерезиса, демонстрирующая мемри-

сторный эффект, сравнивалась с аналогичной петлей (рис. 5, б), снятой также для плёнки оксида цинка, но полученной методом химического осаждения [16].

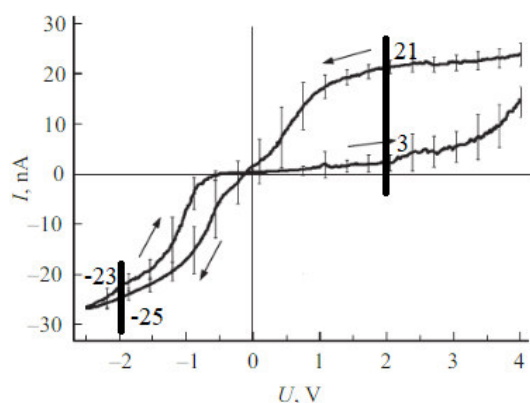
При протекании тока диффузии в полупроводниковом материале оксиде цинка в прямом направлении часть узлов кристаллической решётки оказывается задействована в формировании экситонных состояний, локализовавшихся в их ловушках. Эти ловушки возникают в зоне скопления поверхностных дефектов кристаллической решётки, оказавшихся внутри замкнутой кривой линии дислокаций. Участие некоторых узлов кристаллической решётки в формировании экситонных состояний уменьшает величину тока при наращивании и снижении прямого напряжения, прикладываемого к плёнке, то есть снижает формирующийся при этом мемристорный эффект плёнки, определяемый коэффициентом мемристорного переключения сопротивления. Различное проявление в нашем эксперименте асимметрии верхней и нижней частей петли мемристорного гистерезиса при многократном снятии вольтамперной характеристики плёнки связано с меняющимся составом групп, задействованных экситонных ловушек. В случае приложения напряжения в обратном направлении изменение величины переключения сопротивления плёнки по сравнению с результатами работы [16] не наблюдается. Это

показывает, что отсутствует процесс формирования локализованных экситонных состояний, так как не происходит перевод электрона из валентной зоны в запрещённую. Практическая значимость этой асимметрии, фиксируемой при различных значениях прикладываемого напряжения, может заключаться в использовании её для характеристики количества и качества экситонных ловушек в тонких плёнках, формируемых методом магнетронного распыления. В один из моментов экспериментального наблюдения в оксиде цинка мемристорного эффекта нами зарегистрированы следующие результаты: перепад тока меняется в нашей плёнке при обратном напряжении -2 В составил 29 нА

(от -11 до -40 нА; при прямом напряжении $+2$ В этот перепад составил 20 нА (от 25 до 5 нА). Получилось, что перепад тока в верхней половине петли гистерезиса (при прямом токе полупроводника) меньше, чем в нижней (при обратном токе). Перепад обратного тока в плёнке, полученной методом химического осаждения [16], при обратном напряжении -2 В равнялся 2 нА (от -25 до -23 нА), а при прямом напряжении $+2$ В он составил 18 нА (от 21 до 3 нА). При этом ток в обратном направлении был больше, чем в прямом. При этом перепад тока в верхней половине петли гистерезиса (при прямом токе полупроводника) был больше, чем в нижней.



а) перепад тока меняется от -29 нА (при обратном напряжении -2 В) до $+20$ нА (при прямом напряжении $+2$ В), т. е. перепад тока в верхней полупетле (при прямом токе полупроводника) меньше, чем в нижней (при обратном токе)



б) перепад тока меняется от -2 нА (при обратном напряжении -2 В) до $+18$ нА (при прямом напряжении $+2$ В), т. е. перепад тока в верхней полупетле (при прямом токе полупроводника) больше, чем в нижней (при обратном токе) [16]

Рис. 9. Петля мемристорного гистерезиса в оксиде цинка, полученного:
а) методом магнетронного распыления; б) методом химического осаждения
Рис. 9. Петля мемристорного гистерезиса в оксиде цинка, полученного:
а) методом магнетронного распыления; б) методом химического осаждения

Этот результат мы связываем с тем, что в нашем случае часть узлов кристаллической решётки в момент приложения прямого напряжения участвует в создании экситонных состояний, локализуемых в их ловушках, а потому не участвует в формировании прямого тока, снижая его величину и его перепад между разными ветвями мемристорной петли. Классическое объяснение мемристорного эффекта за счёт перетекания кислородных вакансий под воздействием внешнего электрического поля не предусматривает уменьшение тока перепада в верхней половине петли гистерезиса по сравнению с нижней. Тем самым демонстрируется наличие нового физического эффекта, связанного с влиянием свойств ловушек экситонов на величину потока свободных электронов в зоне проводимости (то есть электрического тока, проходящего через полупроводниковую структуру, обладающую свойством мемристорной памяти).

Заключение. В результате выполнения запланированного цикла экспериментальных работ показано, что в тонких плёнках, формируемых магнетронным распылением, можно получать текстуру, содержащую новые наноразмерные объекты. Квантование энергии экситонов и трионов внутри ловушки позволяет разрабатывать новые физические принципы построения наноэлектронных приборов. При этом поставленные задачи выполнены в полном объёме. Сформулированы и экспериментально реализованы принципы получения нано-размерных ловушек экситонных и трионных состояний, возбуждаемых при комнатной температуре в полупроводниковой плёнке. В обнаруженных ловушках получены наноразмерные объёмы экситонного и трионного газов. Энер-

гия этих локализованных в ловушках квазичастиц испытывает квантово-размерную дискретизацию её спектров. На основе процессов локализации экситонных состояний в их ловушках в тонкой плёнке оксида цинка, полученной методом магнетронного распыления, экспериментально обнаружен новый физический эффект, связанный с влиянием свойств ловушек экситонов на величину потока свободных электронов в зоне проводимости (то есть электрического тока, проходящего через полупроводниковую структуру, обладающую свойством мемристорной памяти). Влияние ловушек подтверждается фактом отсутствия этого результата в аналогичной плёнке, полученной методом химического осаждения (не имеющей экситонных ловушек).

На основе разработанного технологического процесса магнетронного распыления тонких плёнок под воздействием кодового акустического сигнала показана возможность формирования различных по кривизне и форме поверхностей кристаллической фазы этих плёнок, причём из материалов, обладающих разным видом кристаллической решётки. В качестве модельных материалов использовались медь, титан и оксид цинка. Из этих материалов получены одномерные нанообъекты в виде квантовой проволоки, нановикерсов и нитевидных нанокристаллов с винтовой формой поверхности, от кривизны которой зависят параметры ловушек экситонов и трионов. Установлена связь диаметра, длины, шага винта и шага повторения этих одномерных нанообъектов с параметрами кодовой последовательности акустических импульсов, включающими частоту и скважность как несущих, так и модулирующих импульсов.

Список литературы

1. Электрические и оптические свойства пленок оксида цинка, нанесенных методом ионно-лучевого распыления оксидной мишени / А.П. Достанко, О.А. Агеев, Д.А. Голосов и др. //

Физика и техника полупроводников. 2014. Т.48. Вып. 9. С. 1274-1279.

2. Вольян О.Д., Обод Ю.А., Яковлев П.П. Получение оптических пленок оксида цинка маг-

нетронным распылением на постоянном и переменном токе// Прикладная физика. 2010. № 3. С. 24-30.

3. Маныкин Э. А., Самарцев В. В. Оптическая эхо-спектроскопия. Москва: Наука, 1984. 270 с.

4. Electrochemical stability enhancement in reactive magnetron sputtered vn films upon annealing treatment./ A. Achour, M. Islam, I. Ahmad et al. // Coatings. 2019. Vol. 9. No. 2 Pp. 1-7 <https://doi.org/10.3390/coatings9020072>.

5. Correlative experimental and theoretical investigation of the angle-resolved composition evolution of thin films sputtered from a compound mo2bc target / J. Achenbach, S. Mráz, D. Primetzhofner et al. // Coatings. 2019. Vol. 9. No. 3. Pp. 1-14. <https://doi.org/10.3390/coatings9030206>.

6. Cougnon F., D. Depla. The seebeck coefficient of sputter deposited metallic thin films: the role of process conditions // Coatings. 2019. Vol. 9. No. 5. Pp. 1-13. <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/5/299>

7. Gas sensing with nanoplasmonic thin films composed of nanoparticles (au, ag) dispersed in a cuo matrix / M. Proença, M. Rodrigues, J. Borges et al. //Coatings. 2019. Vol. 9. No. 5. Pp. 1-11. <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/5/337>.

8. Nickel film deposition with varying rf power for the reduction of contact resistance in NiSi / S. Eadi; H. Song; H. Song et al. //Coatings. 2019. Vol. 9. No. 6. Pp. 1-9 <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/6/349>.

9. Experimental and modeling study of the fabrication of mg nano-sculpted films by magnetron sputtering combined with glancing angle deposition / H.Liang, X. Geng, W. Li et al. // Coatings. 2019. Vol. 9. No. 6. Pp. 1-12. <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/6/361>.

10. Phase Selectivity in cr and n co-doped TiO2 films by modulated sputter growth and post-deposition flash-lamp-annealing / R. Gago, S. Prucnal, R. Hübner et al. // Coatings. 2019. Vol. 9. No. 7. Pp. 1-13 <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/7/448>.

11. The effect of RF sputtering conditions on the physical characteristics of deposited GeGaN thin film / C. Thao, D. Kuo, T. Tuan et al. // Coatings. 2019. Vol. 9. No. 10. Pp. 3-10. <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/10/645>.

12. Фотонное эхо в однослойных и трехслойной полупроводниковых пленках различной наноразмерной толщины и исследование их свойств/ И.И. Попов, Н.С. Вашурин, С. Э. Путилин и др. // Известия РАН. Серия физическая. 2014. Т. 78. № 2. С. 229–232.

13. Технологические методы формирования тонких пленок / Н.И. Сушенцов, А.В. Мороз, С.А. Степанов и др. // Известия РАН. Серия физическая. 2014. Т. 78. № 3. С. 313–315.

14. Фотонное эхо и зондовая микроскопия как методы исследования тонких пленок для микроэлектронных датчиков/ А.В. Мороз, Н.С. Вашурин, И.И. Попов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2012. № 2 (16). С. 64-72.

15. Фотонное эхо в парах молекулярного йода и нанопленках как метод оптической обработки информации / И.И. Попов, Н.С. Вашурин, К.Ш. Газизов и др. // Изв. РАН, сер. физ. 2012. Т. 76. № 3. С. 322-325.

16. Исследование мемристорного эффекта в нанокристаллических пленках ZnO / В.А. Смирнов, Р.В. Томинов, В.И. Авилов и др // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53. Вып. 1. С. 77–82.

Статья поступила в редакцию 12.02.2021

Принята к публикации 15.03.2021

Информация об авторах

ПОПОВ Иван Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – оптическая спектроскопия, нанозлектронное приборостроение Автор 400 научных публикаций.

МОРОЗ Андрей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – формирование тонких пленок магнетронным распылением и исследование взаимосвязи их свойств с технологическим режимом. Автор 30 научных публикаций.

ГЛАДЫШЕВА Анна Андреевна – студент, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – моделирование экспериментальных результатов. Автор шести научных публикаций.

ИВАНОВ Андрей Валерьевич – аспирант кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – технология нанозлектронного приборостроения. Автор двух научных публикаций.

ЛЕОНТЬЕВ Александр Юрьевич – аспирант кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – моделирование технологических процессов наноэлектронного приборостроения. Автор трёх научных публикаций.

МИНЕЕВ Дмитрий Васильевич – аспирант кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – технология наноэлектронного приборостроения. Автор трёх научных публикаций.

СУШЕНЦОВ Николай Иванович – кандидат технических наук, заведующий аспирант кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – формирование тонких пленок магнетронным распылением и исследование взаимосвязи их свойств с технологическим режимом. Автор 250 научных публикаций.