

## Раздел V. Нанотехнологии

УДК 621.38-022.532

DOI 10.18522/2311-3103-2020-2-228-237

**А.А. Гелдаш, Л.Э. Левенец, Е.Ю. Гусев, В.Н. Джуплин**

### **ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЁНОК ZnO:Ga МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ**

*Основной целью данной работы является исследование режимов формирования тонких нанокристаллических плёнок ZnO:Ga методом магнетронного распыления на постоянном токе. Основной задачей исследования является получение тонких (~ 300 нм), прозрачных, проводящих плёнок со значением удельного сопротивления менее  $5 \cdot 10^{-3}$  Ом·см, которые могут быть применимы в качестве контактов для наноструктур фоточувствительных элементов, а также исследование технологических параметров оборудования магнетронного распыления и мишеней оксидов металлов. Проведено исследование морфологии получаемых тонких плёнок ZnO:Ga. Выявлено, что поверхность плёнок состоит из отдельных кристаллов, объединившихся между собой в процессе осаждения материала. Эти кристаллы имеют ярко выраженные грани и вершины. При увеличении значения мощности источника постоянно увеличивается толщина пленки, и возрастает толщина пленки, вследствие увеличения скорости распыления материала мишени на подложку. Далее исследованы электрические характеристики полученных плёнок и выведены зависимости влияния мощности (толщины) пленки на концентрацию носителей, их подвижность, а также удельное сопротивление. При увеличении толщины пленки с 320 нм до 340 нм подвижность носителей тока увеличивается с  $3,027 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  до  $3,228 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , и при увеличении толщины пленки с 800 нм до 1200 нм возрастает с  $6,511 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  до  $6,547 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . При увеличении толщины пленки с 320 нм до 340 нм концентрация носителей тока уменьшается с  $1,571 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  до  $1,489 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , и при увеличении толщины пленки с 800 нм до 1200 нм концентрация носителей тока также уменьшается с  $2,481 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  до  $1,653 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . При увеличении толщины пленки с 320 нм до 340 нм удельное сопротивление увеличивается с  $1,303 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{см}$  до  $1,385 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , и при увеличении толщины пленки с 800 нм до 1200 нм удельное сопротивление также увеличивается с  $3,851 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{см}$  до  $5,779 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .*

*Тонкие; прозрачные; проводящие пленки; магнетронное распыление; ZnO:Ga.*

**A.A. Geldash, L.E. Levenets, E.Y. Gusev, V.N. Dzhuplin**

### **STUDY OF THE MODES OF FORMING ZnO:Ga NANOCRYSTALLINE FILMS BY MAGNETRON SPUTTERING**

*The main goal of this work is to study the modes of formation of thin nanocrystalline ZnO:Ga films by direct current magnetron sputtering. The main objective of the study is to obtain thin (~ 300 nm), transparent, conductive films with a resistivity value of less than  $5 \cdot 10^{-3}$  Ohm cm, which can be used as contacts for nanostructures of photosensitive elements, as well as studying the technological parameters of magnetron sputtering equipment and metal oxide targets. The morphology of the resulting thin ZnO:Ga films was studied. As a result of the study, it was revealed that the surface of the films consists of individual crystals, united together during the deposition of the material. These crystals have pronounced faces and peaks. It was also revealed that with an increase in the power of a direct current source, the crystals on the film surface increase several times in proportion to the increase in power, and the film thickness increases due to an*

*increase in the speed of sputtering of the target material on the substrate. Further, the electrical characteristics of the obtained films were investigated and the dependences of the influence of the power (thickness) of the film on the carrier concentration, their mobility, and also resistivity were derived. Thus, it was revealed that with an increase in the film thickness from 320 nm to 340 nm, the mobility of current carriers increases from  $3.027 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  to  $3.228 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , and with an increase in the film thickness from 800 nm to 1200 nm of current carriers increases from  $6.511 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  to  $6.547 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ . With an increase in the film thickness from 320 nm to 340 nm, the concentration of current carriers decreases from  $1.571 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  to  $1.489 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , and with an increase in the film thickness from 800 nm to 1200 nm, the concentration of current carriers decreases from  $2.481 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  to  $1.653 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . As the film thickness increases from 320 nm to 340 nm, the resistivity increases from  $1.303 \cdot 10^{-2} \Omega\cdot\text{cm}$  to  $1.38 \cdot 10^{-2} \Omega\cdot\text{cm}$ , and as the film thickness increases from 800 nm to 1200 nm, the resistivity increases from  $3.851 \cdot 10^{-2} \Omega\cdot\text{cm}$  to  $5.779 \cdot 10^{-2} \Omega\cdot\text{cm}$ .*

*Thin; transparent; conductive films; magnetron sputtering; ZnO:Ga.*

**Введение.** Проводимые прозрачные слои широко применяются в электронных приборах, таких как солнечные батареи, светодиоды, и другие типов электронных приборов, параметры которых зависят от прохождения излучения через эти слои [1–3]. Поиск и исследование альтернативных прозрачных проводимых слоев в настоящее время является широко распространенной задачей, так как с каждым годом мировой спрос на источники альтернативной энергии увеличивается [4, 5].

ZnO:Ga является прозрачным проводниковым материалом. Этот материал является альтернативой дорогостоящему ИТО. Оксид металла ZnO:Ga, является одновременно и прозрачным и проводящим. Эти свойства присущи и другим оксида металлов, например ZnO:In или ИТО. Поэтому в большинстве случаев, при использовании современных прозрачных проводников (слоев, пленок), они сформированы именно из оксидов металлов. На электропроводность и оптические свойства таких материалов влияют прежде всего их природа (количества и атомного расположения катионов металла в структуре оксида), а также наличия собственных или введенных дефектов кристаллической структуры [6–8]. Тем временем как электрическая проводимость обусловлена легированием, кислородными вакансиями или введением примеси. Легирование оксида цинка галлием усиливает генерацию свободных носителей в пленках ZnO [7–9]. Применение ZnO:Ga обусловлено низкими материальными затратами и относительно низкими температурами осаждения [10], в данной работе ZnO:Ga рассматривается как одна из альтернатив применению ИТО слоев или пленок. До недавнего времени ИТО слои являлись неким «стандартом» прозрачных проводящих пленок со значением удельного сопротивления порядка  $\sim 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}$  и коэффициентом пропускания более 80 %. Но из-за его недостатков и разрастающегося применения таких слоев, сегодня остро стоит задача в поиске и исследовании альтернативных оксидов металлов близкими ИТО электрическими и оптическими параметрами. Основным недостатком ИТО является высокая стоимость индия, входящего в его соединение, а также ограничение оптической настройки и плохой механической гибкости.

Для напыления тонких пленок проводящих, резистивных и диэлектрических материалов широко используется магнетронное распыление [11–13]. Данный метод позволяет проводить контролируемое распыление тонких слоев с требуемыми параметрами. Сама технология основывается на нанесении тонкой пленки на подложку с помощью катодного распыления мишени в плазме магнетронного разряда – диодного разряда в скрещенных полях [14–17]. Метод магнетронного распыления на сегодняшний день является одним из наиболее перспективных и широко применяемых методов формирования тонких нанокристаллических пленок различных материалов для применения в микро- и нанoeлектронике. С помощью данного метода можно проводить контролируемое распыление тонких слоев с тре-

буемыми параметрами, но с учетом преждевременной проработки режимов, включающих в себя как исследование возможностей конкретного технологического оборудования, так и конкретной мишени (материала мишени), а также исследование влияния множества параметров в процессе нанесения слоев [18]. Все эти подготовительные операции крайне важны для получения слоев с требуемыми параметрами, а также для дальнейшей воспроизводимости подобных слоев или пленок. Именно эти операции служат в качестве «отправной точки» в исследовании возможности получения требуемых (возможных) слоев или пленок для различного назначения. Данный метод формирования тонких пленок развивается благодаря тому, что все больше требований предъявляется к параметрам формируемых слоев и пленок, особенно к их морфологическим и электрическим характеристикам [19–22]. При воспроизводимости тонких слоев или пленок методом магнетронного распыления, стоит учитывать очень важную особенность самой мишени – это образование зоны эрозии («круговой канавки» мишени, формируемой между центром мишени и ее краями, в процессе магнетронного распыления), так как эта особенность влияет на скорость распыления материала мишени и следовательно на саму толщину пленки. А толщина пленки, при магнетронном распылении, напрямую влияет на величину удельного электрического сопротивления. Так при уменьшении толщины пленки оно увеличивается, а при увеличении толщины уменьшается. Это в свою очередь приведет к невозможности требуемых характеристик и параметров тонких пленок. С помощью метода магнетронного распыления можно формировать тонкие проводящие, резистивные или диэлектрические слои.

В качестве оборудования для формирования тонких пленок ZnO:Ga выступает установка для магнетронного и электронно-лучевого осаждения серии AUTO 500 на постоянном токе. Она оснащена высокочастотным магнетроном и магнетроном постоянного тока. При помощи магнетронного распыления могут быть нанесены пленки практически из всех металлов, сплавов и соединений. Стехиометрический состав пленки, полученной магнетронным распылением, остается неизменным для большинства материалов, в отличие от термического испарения, при котором соединение распадается на отдельные фракции. Установка, так же, имеет линию подачи кислорода и, следовательно, присутствует возможность нанесения широкого спектра оксидов металлов и полупроводников. Электронный луч с 4 тиглями позволяет напылять сложные структуры в вакууме. Для контроля толщины нанесенных пленок используется кварцевый толщиномер. Основными достоинствами установки являются: Возможность объединить несколько источников в связку (в круг), для направленного распыления; Наличие системы магнетронного распыления как на постоянном токе ПТ, так и на токе высокой частоты ВЧ; системы ПТ и ВЧ травления; Возможность комбинирования систем ПТ, ВЧ, Резистивного и электронно-лучевого испарения; Возможность подачи небольшого ВЧ-напряжения на подложку в процессе напыления. Установка AUTO 500 также характеризуется наличием устройства распределения мощности для систем ВЧ и ПТ травления, водоохлаждаемого, изолированного по ВЧ напряжению подложкодержателя, автоматической системы управления напуском технологического газа, системы автоматического управления технологическим процессом, а также системы косвенного нагрева подложек.

**Методическая часть.** В данной работе для получения тонких прозрачных проводящих пленок применялся метод магнетронного распыления на постоянном токе. В качестве подложек, на которых формировались пленки ZnO:Ga, выступали стекло, ситалл и Si p-типа с концентрацией носителей тока порядка  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Все подложки перед нанесением подвергались химической очистке от загрязнений и окислов. Формирование пленки ZnO:Ga на три типа подложек осуществлялось в одном технологическом режиме, но в две экспериментальные сессии.

Перед началом процесса магнетронного распыления, было осуществлен не-прямой подогрев подложкодержателей с образцами до температуры 250 °С, с удержанием этой температуры на время 10–20 минут, для того чтобы во время процесса распыления значение температуры не падало, так как процесс происходит без параллельного нагрева. Далее была осуществлена проработка мишени, продолжительностью около 15 минут. Проработка подразумевает снятия окисла с поверхности мишени, и выхода на её рабочий режим распыления. При завершении процесса проработки свечение от мишени становится голубым, что косвенно подтверждает проработку мишени и распыление «чистого» материала. Основные параметры при магнетронном распылении таковы: время осаждения – 18 минут, мощность источника постоянного тока – 100 Вт для первого образца и 170 Вт для второго образца, поток рабочего газа Ar – порядка 10 см<sup>3</sup> в минуту, диапазон значений постоянного напряжения 406–434 В, диапазон значения тока 223–238 А. Температура в процессе нанесения падала со 143 °С до 114 °С, со скоростью 1–2 °С в минуту.

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 1 представлены РЭМ изображения двух образцов с пленкой ZnO:Ga, сформированной на поверхности Si, методом магнетронного распыления на постоянном токе. РЭМ изображения получены с помощью растрового электронного микроскопа Nova Nanolab 600. На рис. 1,а представлено РЭМ изображение образца с пленкой ZnO:Ga на Si, сформированной при мощности источника постоянного тока 100 Вт. На рис. 1, б представлено РЭМ изображение образца с пленкой ZnO:Ga на Si, сформированной при мощности источника постоянного тока 170 Вт.

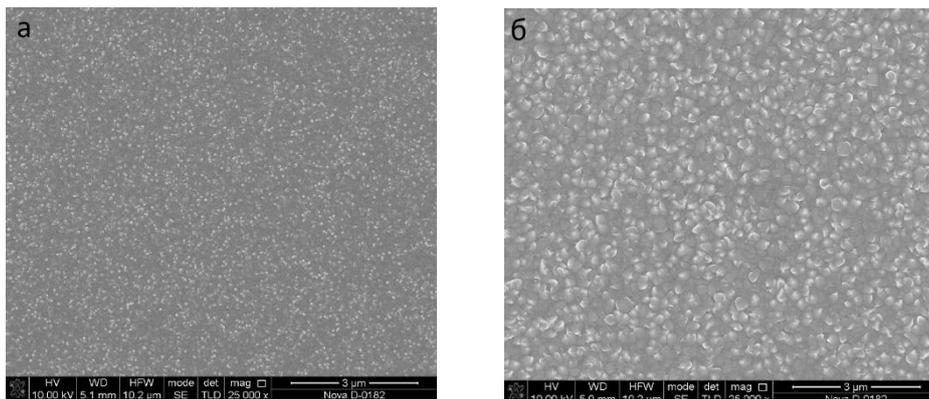


Рис. 1. РЭМ изображения поверхности тонких пленок ZnO:Ga: а – пленка ZnO:Ga на Si, сформированной при мощности источника постоянного тока 100 Вт; б – пленка ZnO:Ga на Si, сформированной при мощности 170 Вт

Как видно из рис. 1,а тонкая пленка ZnO:Ga представляет собой не гладкую поверхность, а состоящую из кристаллов, объединенных между собой. Такой характер морфологии поверхности характерен для пленок, сформированных магнетронным распылением. Он обуславливается прежде всего высокими скоростями распыления материала мишени на подложку.

На рис. 2 представлены РЭМ изображения двух образцов с пленкой ZnO:Ga, сформированной на поверхности Si, методом магнетронного распыления на постоянном токе, при увеличении  $\times 250000$ .

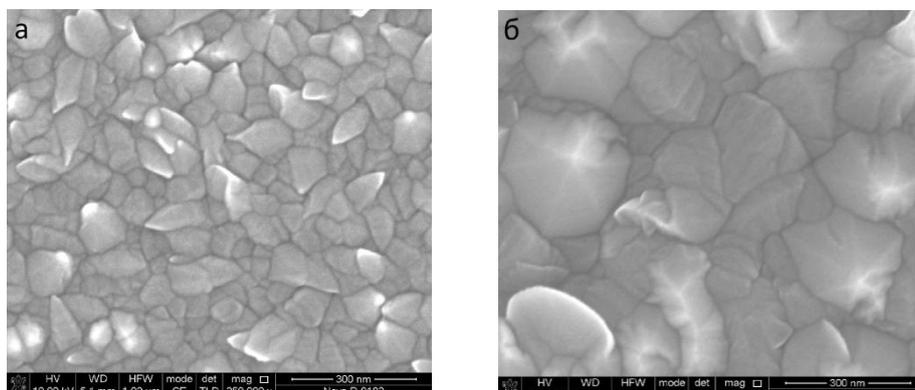


Рис. 2. РЭМ изображения поверхности тонких пленок ZnO:Ga, сформированных методом магнетронного распыления (при увеличении  $\times 250000$ ): а – образец, сформированной при мощности источника постоянного тока 100 Вт; б – образцы, сформированной при мощности 170 Вт

Как видно из рис. 2,а поверхность пленки ZnO:Ga сформирована кристаллами плоской и заостренной формы. Они имеют разные геометрические размеры по всей поверхности пленки. Однако просматривается единый характер их построения на поверхности. На рис. 2,б видно, что кристаллы на поверхности пленки ZnO:Ga на рис. 2,а. Что также следует из того, что мощности источника постоянного тока в обоих случаях различались. И следовательно, при большей мощности, скорости распыления больше, при одинаковом времени распыления, и объему подаваемого рабочего газа Ar. Стоит также отметить, что на рис. 2,б более отчетливо видны вершины кристаллов, сформировавшиеся на поверхности пленки, или являющиеся одновременно и самой пленкой ZnO:Ga. У этих кристаллов просматриваются также грани, их б.

На рис. 3 представлены РЭМ изображения двух образцов с пленкой ZnO:Ga, сформированной на поверхности Si, методом магнетронного распыления на постоянном токе, но уже под наклоном. Эти РЭМ изображения были получены для первичной оценки размеров кристаллов на поверхности пленки ZnO:Ga.

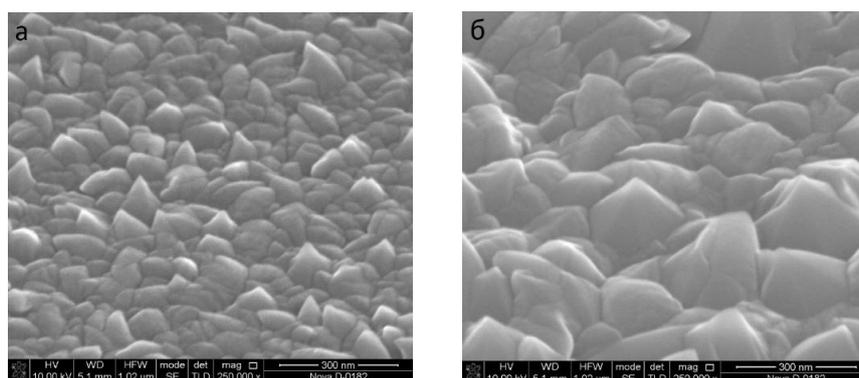


Рис. 3. РЭМ изображения поверхности тонких пленок ZnO:Ga, сформированных методом магнетронного распыления: а – образец с пленкой ZnO:Ga на Si, сформированный при мощности источника постоянного тока 100 Вт; б – образец с пленкой, сформированный при мощности 170 Вт

Из рис. 3 видно, что при увеличении мощности источника постоянного тока, а следовательно скорости распыления материала на подложку, уменьшается количество кристаллов на поверхности пленки, но увеличиваются размеры самих кристаллов, на величину схожую с величиной пары или нескольких пар кристаллов. Вероятно, при более высоких скоростях роста, кристаллы формируются с большими размерами.

Исследованы зависимости концентрации носителей тока от толщины пленки ZnO:Ga, при различных значениях мощности источника постоянного тока. На рис. 4, а показана зависимость концентрации носителей тока от толщины пленки ZnO:Ga при 100 Вт. При увеличении толщины пленки с 320 нм до 340 нм концентрация носителей тока уменьшается с  $1,571 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  до  $1,489 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Уменьшение концентрации происходит не значительно. На рис. 4, б показана зависимость концентрации носителей тока от толщины пленки ZnO:Ga при 170 Вт. При увеличении толщины пленки с 800 нм до 1200 нм концентрация носителей тока уменьшается с  $2,481 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  до  $1,653 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Уменьшение концентрации также происходит не значительно.

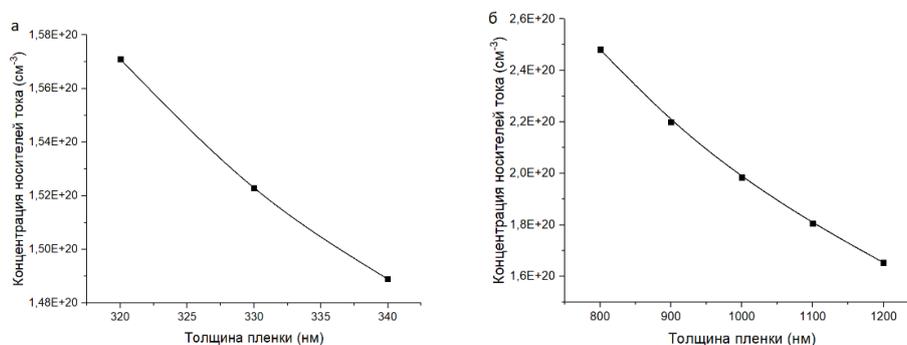


Рис. 4. Зависимости концентрации носителей тока от толщины пленок ZnO:Ga: а – сформированной при 100 Вт; б – при 170 Вт

Определены зависимости подвижности носителей тока от толщины пленки ZnO:Ga, при различных значениях мощности источника постоянного тока. На рис. 5,а показана зависимость подвижность носителей тока от толщины пленки ZnO:Ga при 100 Вт. При увеличении толщины пленки с 320 нм до 340 нм подвижность носителей тока увеличивается с  $3,027 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  до  $3,228 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Увеличение подвижность происходит не значительно. На рис. 5,б показана зависимость подвижность носителей тока от толщины пленки ZnO:Ga при 170 Вт. При увеличении толщины пленки с 800 нм до 1200 нм подвижность носителей тока увеличивается с  $6,511 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  до  $6,547 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Увеличение подвижность носителей тока также происходит не значительно.

Также определены зависимости удельного сопротивления от толщины пленки ZnO:Ga, при различных значениях мощности источника постоянного тока. На рис. 6, а показана зависимость удельного сопротивления от толщины пленки ZnO:Ga при 100 Вт. При увеличении толщины пленки с 320 нм до 340 нм удельное сопротивление увеличивается с  $1,303 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}$  до  $1,385 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Увеличение удельного сопротивления происходит не значительно. На рис. 6, б показана зависимость удельного сопротивления от толщины пленки ZnO:Ga при 170 Вт. При увеличении толщины пленки с 800 нм до 1200 нм удельное сопротивление увеличивается с  $3,851 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}$  до  $5,779 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Увеличение удельного сопротивления также происходит не значительно, если учитывать его на отдельных образцах.

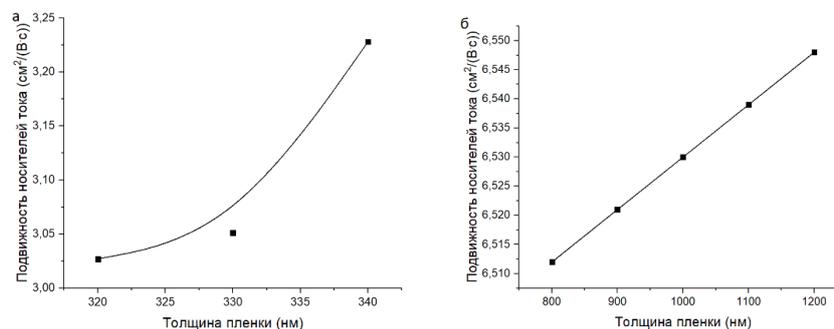


Рис. 5. Зависимости концентрации носителей тока от толщины пленок ZnO:Ga: а – сформированной при 100 Вт; б – при 170 Вт

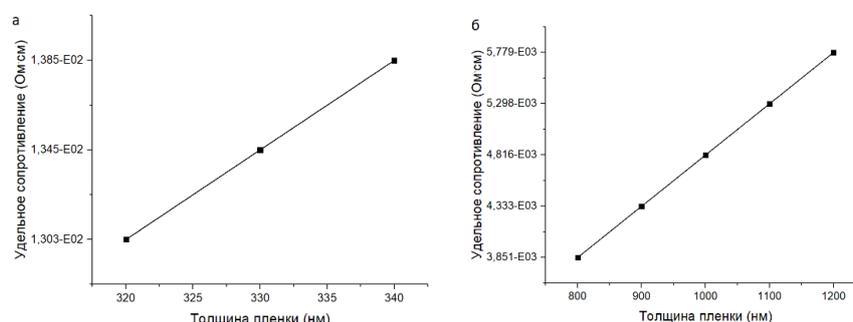


Рис. 6. Зависимости удельного сопротивления от толщины пленок ZnO:Ga: а – сформированной при 100 Вт; б – при 170 Вт

**Заключение.** В работе проведены экспериментальные исследования по получению тонких нанокристаллических пленок ZnO:Ga методом магнетронного распыления на постоянном токе, а также исследование электрических характеристик в зависимости от режимов формирования пленок. Исследована морфология тонких пленок ZnO:Ga. Было выявлено, что при увеличении мощности источника постоянного тока, размер зерен на поверхности пленок увеличивается в несколько раз, пропорционально увеличению мощности. Также значение мощности источника постоянного тока напрямую влияет на скорость распыления материала мишени, и следовательно, на итоговую толщину пленки. Одной из трудностей в формировании таких пленок является неравномерность осаждения материала на подложку, из-за особенностей технологического оборудования. В заключении исследования морфологии поверхности пленок, стоит выявить явное отличие самих кристаллов на поверхности, так как они различаются геометрическим построением в зависимости от скорости осаждения материала, и следовательно, от мощности источника постоянного тока. Мы показали, что в зависимости от мощности источника постоянного тока, форма поверхности слоя и его структура характерны или мелкими или крупными кристаллами. То есть, прозрачность подобного слоя для проникающего излучения будет разной для разных длин волн. Это один из вариантов создания селективных фильтров проникающего или отраженного света для видимого, инфракрасного или ультрафиолетового диапазонов.

Что касается исследования электрических характеристик сформированных пленок ZnO:Ga, то они были проведены преимущественно с помощью метода Холла. Было выявлено, что концентрация носителей тока в пленке уменьшается с увеличением ее толщины, плотность носителей заряда при этом увеличивалась, а удельное сопротивление возрастало.

Только пленки ZnO:Ga с толщинами порядка 800-1000 нм соответствуют минимальным требованиям, которые предъявлялись в планировании исследования. Так как основная задача состояла в том, чтобы получить тонкие (порядка 300 нм), прозрачные, проводимые пленки со значением удельного сопротивления менее  $10^{-3}$  Ом·см. Которые в дальнейшем будут использоваться в качестве контактных слоев к фоточувствительным структурам. Дальнейшая работа по данной тематике будет нацелена на дальнейшее исследование и оптимизация технологического процесса получения тонких, прозрачных проводящих слоев, то дальнейшая работа по данной тематике может быть направлена на оптимизацию технологического процесса получения слоев, а также на увеличение концентрации Ga в исходной мишени.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-37-90139, № 19-38-60052, № 18-28-11019 мк. Результаты были получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра и Центра коллективного пользования «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Агеев О.А., Коноплев Б.Г. и др.* Нанотехнологии в микроэлектронике. – М.: Наука, 2019. – С. 112-165.
2. *Kelly P.J., Arnell R.D.* Магнетронное распыление: обзор последних разработок и применений // *Vacuum*. – 2000. – Т. 56. – С. 159-172.
3. *Климин В.С., Резван А.А., Агеев О.А.* Исследование применения плазменных методов для формирования полевых эмиттеров на основе углеродных наноразмерных структур // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Т. 1124. – С. 071020.
4. *Томинов П.В., Смирнов В.А., Авиллов В.И., Федотов А.А., Климин В.С., Черненко Н.Е.* Формирование мемристорных структур ZnO методом сканирующей зондовой нанолитографии // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Т. 443. – С. 012036.
5. *Murdick D.A., Wadley H.N., Zhou X.W.* Механизмы конденсации пара, обогащенного мышьяком, на поверхности GaAs (001) // *Phys. Rev. B*. – 2007. – Т. 75. – С. 125318.
6. *Вакулов З.Е., Ивонин М., Замбург Е.Г., Климин В.С., Волик Д.П., Голосов Д.А., Завадский С.М., Достанко А.П., Миаконкич А.В., Клементе И.Е., Руденко К.В., Агеев О.А.* Размерные эффекты в тонких пленках LiNbO<sub>3</sub>, полученных методом импульсного лазерного напыления // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Т. 1124. – С. 022032.
7. *Балакирев С.В., Еременко М.М., Михайлин И.А., Климин В.С., Солодовник М.С.* Капельная эпитаксия наноструктур In/AlGaAs на As-стабилизированной поверхности // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Т. 1124. – С. 022018.
8. *Tseng A.* Последние разработки в области микрообработки с использованием технологии сфокусированных ионных пучков // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2004. – Т. 14. – С. 15.
9. *Han J., Lee H., Min B., Lee S.* Прогнозирование топологии наноматериалов с использованием двумерного фокусированного ионного фрезерования с интервалами облучения пучком // *Microelectronic Engineering*. – 2010. – Т. 87. – С. 1-9.
10. *Климин В.С., Солодовник М.С., Лисицин С.А., Резван А.А., Балакирев С.В.* Формирование наноразмерных структур на поверхности арсенида галлия при локальном анодном окислении и плазмохимическом травлении // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Т. 1124. – С. 041024.
11. *Adachi S.* Свойства полупроводников группы IV, III-V и II-VI. – John Wiley & Son, 2005. – 408 с.
12. *Cao G.* Наноструктуры и наноматериалы. Синтез, свойства и применение. – Imperial College Press, 2004. – 448 с.
13. *Агеев А.Л.* Нанотехнологии в полупроводниковой электронике. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – 368 с.
14. *Jha N.K., Chen D.* Проектирование нанoeлектронных схем design. – Springer, 2011. – 290 p.
15. *Piccin P. et al.* Рост методом молекулярно-лучевой эпитаксии и электрическая характеристика нановискеров GaAs // *Physica E*. – 2007. – Т. 37. – С. 134-137.

16. Черненко Н.Е., Балакирев С.В., Еременко М.М., Солодовник М.С. Межфазное взаимодействие в системе Ga-As-ZnO в условиях молекулярно-лучевой эпитаксии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 2 (204). – С. 184-192.
17. Балакирев С.В., Блинов Ю.Ф., Солодовник М.С. Модель начальной стадии гомоэпитаксиального роста GaAs методом МЛЭ с учетом соотношения потоков ростовых компонент // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 9 (158). – С. 94-105.
18. Chu C-P., Arafin S., Nie T. Наноразмерный рост GaAs на узорчатых подложках Si (111) методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Crystal Growth & Design. – 2014. – Т. 14. – С. 593-598.
19. Гусев Е.Ю., Житяева Ю.Ю., Агеев О.А. Влияние условий PECVD на механическое напряжение пленок кремния // Materials Physics and Mechanics. – 2018. – Т. 37, № 1. – С. 67-72.
20. Гусев Е.Ю., Житяева Ю.Ю., Коломийцев А.С., Гамалеев В.А., Коц И.Н., Быков А.В. Исследование режимов жидкостного травления жертвенного слоя SiO<sub>2</sub> для формирования микромеханических структур на основе Si<sup>+</sup>/SiO<sub>2</sub>/Si // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 2 (163). – С. 236-245.
21. Sze S. Физика полупроводниковых приборов. – Т. 1. – М.: Мир, 1984. – С. 258-261.
22. Епифанов Г.И. Физика Основы микроэлектроники. – М.: Советское радио, 1971. – С. 145-156.

## REFERENCES

1. Ageev O.A., Konoplev B.G. *i dr.* Nanotekhnologii v mikroelektronike [Nanotechnology in Microelectronics]. Moscow: Nauka, 2019, pp. 112-165.
2. Kelly P.J., Arnell R.D. Magnetronnoe raspylenie: obzor poslednikh razrabotok i primeneniy [Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications], *Vacuum*, 2000, Vol. 56, pp. 159-172.
3. Klimin V.S., Rezvan A.A., Ageev O.A. Issledovanie primeneniya plazmennyykh metodov dlya formirovaniya polevykh emitterov na osnove uglerodnykh nanorazmernyykh struktur [Research of using plasma methods for formation field emitters based on carbon nanoscale structures], *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1124, pp. 071020.
4. Tominov R.V., Smirnov V.A., Avilov V.I., Fedotov A.A., Klimin V.S., Chernenko N.E. Formirovanie memristornykh struktur ZnO metodom skaniruyushchey zondovoy nanolitografii [Formation ZnO memristor structures by scratching probe nanolithography], *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 443, pp. 012036.
5. Murdick D.A., Wadley H.N., Zhou X.W. Mekhanizmy kondensatsii para, obogashchennogo mysh'yakom, na poverkhnosti GaAs (001) [Condensation mechanisms of an arsenic-rich vapor on GaAs (001) surfaces], *Phys. Rev. B*, 2007, Vol. 75, pp. 125318.
6. Vakulov Z.E., Ivonin M., Zamburg E.G., Klimin V.S., Volik D.P., Golosov D.A., Zavadskiy S.M., Dostanko A.P., Miakonkikh A.V., Klemente I.E., Rudenko K.V., Ageev O.A. Razmernye efekty v tonkikh plenkakh LiNbO<sub>3</sub>, poluchennykh metodom impul'snogo lazernogo naplyeniya [Size effects in LiNbO<sub>3</sub> thin films fabricated by pulsed laser deposition], *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1124, pp. 022032.
7. Balakirev S.V., Eremenko M.M., Mikhaylin I.A., Klimin V.S., Solodovnik M.S. Kapel'naya epitaksiya nanostruktur In/AlGaAs na Asstabilizirovannoy poverkhnosti [Droplet epitaxy of In/AlGaAs nanostructures on the As-stabilized surface], *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1124, pp. 022018.
8. Tseng A. Poslednie razrabotki v oblasti mikroobrabotki s ispol'zovaniem tekhnologii sfokusirovannykh ionnykh puchkov [Recent developments in micromilling using focused ion beam technology], *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, Vol. 14, pp. 15.
9. Han J., Lee H., Min B., Lee S. Prognozirovaniye topologii nanomaterialov s ispol'zovaniem dvumernogo fokusirovannogo ionnogo frezerovaniya s intervalami oblucheniya puchkom [Prediction of nanopattern topography using two-dimensional focused ion beam milling with beam irradiation intervals], *Microelectronic Engineering*, 2010, Vol. 87, pp. 1-9.
10. Klimin V.S., Solodovnik M.S., Lisitsin S.A., Rezvan A.A., Balakirev S.V. Formirovanie nanorazmernyykh struktur na poverkhnosti arsenida galliya pri lokal'nom anodnom okislenii i plazmokhimicheskom travlenii [Formation of nanoscale structures on the surface of gallium arsenide by local anodic oxidation and plasma chemical etching], *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1124, pp. 041024.

11. *Adachi S.* Svoystva poluprovodnikov gruppy IV, III-V i II-VI [Properties of group-IV, III-V and II-VI semiconductors]. John Wiley & Son, 2005, 408 p.
12. *Cao G.* Nanostruktury i nanomaterialy. Sintez, svoystva i primeneniye [Nanostructures & nanomaterials. Synthesis, properties & applications]. Imperial College Press, 2004, 448 p.
13. *Aseev A.L.* Nanotekhnologii v poluprovodnikovoy elektronike [Nanotechnology in semiconductor electronics]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2004, 368 p.
14. *Jha N.K., Chen D.* Proektirovaniye nanoelektronnykh skhem design [Nanoelectronic circuit design]. Springer, 2011, 290 p.
15. *Piccin P. et al.* Rost metodom molekulyarno-luchevooy epitaksii i elektricheskaya kharakteristika nanoviskerov GaAs [Growth by molecular beam epitaxy and electrical characterization of GaAs nanowires], *Physica E*, 2007, Vol. 37, pp. 134-137.
16. *Chernenko N.E., Balakirev S.V., Eremenko M.M., Solodovnik M.S.* Mezhfaznoye vzaimodeystviye v sisteme Ga-As-ZnO v usloviyakh molekulyarno-luchevooy epitaksii [Interfacial interaction in the Ga-As-ZnO system under molecular beam epitaxy], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 2 (204), pp. 184-192.
17. *Balakirev S.V., Blinov Yu.F., Solodovnik M.S.* Model' nachal'noy stadii gomoepitaksial'nogo rosta GaAs metodom MLE s uchetom sootnosheniya potokov rostovykh komponent [The model of the initial stage of GaAs homoepitaxial growth by the MBE method taking into account the ratio of the fluxes of growth components], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 94-105.
18. *Chu C-P., Arafin S., Nie T.* Nanorazmernyy rost GaAs na uzorchatykh podlozhkakh Si (111) metodom molekulyarno-luchevooy epitaksii [Nanoscale Growth of GaAs on Patterned Si (111) Substrates by Molecular Beam Epitaxy], *Crystal Growth & Design*, 2014, Vol. 14, pp. 593-598.
19. *Gusev E.Yu., Zhityaeva Yu.Yu., Ageev O.A.* Vliyaniye usloviy PECVD na mekhanicheskoye napryazheniye plenok kremniya [Effect of PECVD conditions on mechanical stress of silicon films], *Materials Physics and Mechanics*, 2018, Vol. 37, No. 1, pp. 67-72.
20. *Gusev E.Yu., Zhityaeva Yu.Yu., Kolomiitsev A.S., Gamaleev V.A., Kots I.N., Bykov A.V.* Issledovaniye rezhimov zhidkostnogo travleniya zhertvennogo sloya SiO<sub>2</sub> dlya formirovaniya mikromekhanicheskikh struktur na osnove Si\*/SiO<sub>2</sub>/Si [Study of liquid etching modes of a sacrificial SiO<sub>2</sub> layer for the formation of micromechanical structures based on Si\*/SiO<sub>2</sub>/Si], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 2 (163), pp. 236-245.
21. *Sze S.* Fizika poluprovodnikovyykh priborov [Physics of semiconductor devices]. Vol. 1. Moscow: Mir, 1984, pp. 258-261.
22. *Epifanov G.I.* Fizika Osnovy mikroelektroniki [Physics Fundamentals of Microelectronics]. Moscow: Sovetskoye radio, 1971, pp. 145-156.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. доц. И.Е. Лысенко

**Гелдаш Андрей Александрович** – Южный федеральный университет; e-mail: andrewgeldash@gmail.com; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 89515242876; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

**Левенец Лев Эдуардович** – кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; студент.

**Гусев Евгений Юрьевич** – кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

**Джуплин Владимир Николаевич** – e-mail: dzhuplin@mail.ru; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

**Geldash Andrei Aleksandrovich** – Southern Federal University; e-mail: andrewgeldash@gmail.com; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +79515242876; the department of nanotechnologies and microsystems; graduate student.

**Levenets Lev Eduardovich** – the department of nanotechnologies and microsystems; student.

**Gusev Evgenii Yrevich** – the department of nanotechnologies and microsystems; senior researcher.

**Dzhuplin Vladimir Nikolaevich** – e-mail: dzhuplin@mail.ru; the department of nanotechnologies and microsystems; senior researcher.