

Оригинальные статьи

DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2535>

ISSN 1606-867X

Поступила в редакцию 26.01.2020

eISSN 2687-0711

Принята к публикации 15.02.2020

Опубликована онлайн 25.03.2020

УДК 621.3.038.825.5:546.71

Влияние наноразмерных слоев хемостимулятора-модификатора $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2$ на процесс термического оксидирования GaAs, состав и морфологию формируемых плёнок

© 2020 Е. В. Томина^{✉а}, Б. В. Сладкопевцев^а, А. И. Донцов^{а,б}, Л. И. Перфильева^а, И. Я. Миттова^а

^аВоронежский государственный университет, Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

^бВоронежский государственный технический университет, Московский пр., 14, Воронеж 394026, Российская Федерация

Аннотация

Одним из подходов к формированию функциональных наноразмерных плёнок на поверхности $A^{III}B^V$ является хемостимулированное термоокисление. Для получения требуемого результата необходимо обоснованно выбрать объект, который может выступать в роли хемостимулятора процесса или модификатора структуры и свойств формируемых в результате оксидирования плёнок. Использование сложных соединений, способных совмещать обе эти функции, представляется перспективным. Цель статьи – исследование воздействия наноразмерных слоев хемостимулятора-модификатора $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2$ на процесс термического оксидирования GaAs, состав и морфологию формируемых пленок.

Объект исследования – арсенид галлия (100) с нанесёнными на его поверхность наноразмерными слоями ванадат-фосфата марганца $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2$. С целью увеличения скорости процесса и обеспечения высокой химической гомогенности продукта предлагается микроволновая активация синтеза хемостимулятора-модификатора $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2$ и дальнейшее его нанесение на поверхность полупроводника методом spin-coating. Сформированные гетероструктуры $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2/GaAs$ термически оксидировали в интервале температур 490–550 °С в течение 60 минут в потоке кислорода.

Осуществляли контроль толщины растущих плёнок (методами лазерной и спектральной эллипсометрии), их состав (рентгенофазовый анализ, Оже-электронная спектроскопия) и морфологию поверхности (атомно-силовая микроскопия).

Исследования кинетики термоокисления гетероструктур $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2/GaAs$ показали, что определяющим процессом является твердофазная реакция, лимитируемая диффузией в твердой фазе, и реализуется транзитный характер действия хемостимулятора без каталитического эффекта. Выявлено, что ванадат-фосфат марганца способствует увеличению прироста формируемой пленки в среднем на 70–220% по сравнению с эталонным оксидированием GaAs, приводит к интенсификации вторичных взаимодействий оксидов компонентов подложки с продуктами термолитиза $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2$ и отсутствию сегрегации мышьяка в плёнке в неокисленном состоянии.

При термоокислении гетероструктур $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2/GaAs$ формируются наноразмерные (50-200 нм) плёнки с достаточно выраженным рельефом. Необходимо дальнейшее исследование электрофизических характеристик плёнок, т. к. данные о составе позволяют предположить их диэлектрический характер. Это может быть использовано на практике для формирования на поверхности $A^{III}B^V$ плёнок функционального назначения с варьируемыми в широких пределах характеристиками.

Ключевые слова: арсенид галлия, ванадат-фосфат марганца, наноразмерные плёнки, хемостимулированное оксидирование, микроволновый синтез.

Источник финансирования: Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант No. 18-03-00354 А).

✉ Томина Елена Викторовна, e-mail: tomina-e-v@yandex.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Томина Е. В., Сладкопечев Б. В., Миттова И. Я., Перфильева Л. И. Влияние наноразмерных слоев хемостимулятора-модификатора $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2$ на процесс термического оксидирования GaAs, состав и морфологию формируемых плёнок. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2020; 22(1): 116–123. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2535>

1. Введение

Гетероструктуры на арсениде галлия находят широкое применение в технологии производства сверхвысокочастотных интегральных схем, различных оптоэлектронных устройств, полевых транзисторов [1–6]. Результатом появления арсенид-галлиевой микроэлектроники стало создание на основе гетероструктур GaAs/GaAlAs эффективных и мощных инжекционных лазеров и светодиодов в диапазоне длин волн 600–900 нм [7–9]. При этом разнообразие объектов, формируемых на поверхности GaAs и обладающих широким спектром свойств, чрезвычайно велико: квантовые точки, одномерные наноструктуры и тонкие плёнки. В последнем случае возможно нанесение самых разнообразных оксидов, сульфидов, нитридов, сложных соединений, и в настоящее время существует ряд физических и химических методов создания таких тонкоплёночных гетероструктур на основе $A^{III}B^V$ [10–13]. Однако до сих пор не решена задача синтеза функциональных наноразмерных плёнок сравнительно простыми и технологичными способами.

Формирование на поверхности GaAs функциональных наноразмерных плёнок термическим оксидированием требует использования обоснованно выбранных хемостимуляторов синтеза и модификаторов плёнок [14, 15]. Хемостимуляторы изменяют механизм оксидирования полупроводника и позволяют предотвратить сегрегацию мышьяка в свободном состоянии на внутренней границе плёнки. Модификаторы в процессе термооксидирования встраиваются в плёнку и обеспечивают ее быстрый рост, целевое изменение состава и наноструктуры.

Представляется эффективным использование в процессе термооксидирования $A^{III}B^V$ сложных соединений. Их катионная составляющая включает хемостимулятор. Анионная может выступать в роли модификатора, в качестве группировки включаясь в состав плёнки (фосфаты, сульфаты и т. д.), а также содержать второй, дополнительный, хемостимулятор (например, ванадаты). В этом случае появляется дополнительная возможность тонкой регулировки процессов синтеза с использованием эффектов совместного воздействия хемостимулятора и модификатора. В данной работе в качестве хемостимулятора-модификатора выбран ванадат-фосфат марганца

$Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2$. Оксиды марганца выступают эффективными хемостимуляторами процессов оксидирования $A^{III}B^V$ [16]. Ванадатные группы VO_4^{3-} , изоструктурные арсенат-анионам AsO_4^{3-} [17], являются готовыми фрагментами формирующихся в процессе оксидирования плёнок. Помимо этого кислородные соединения ванадия даже в анионной составляющей способны проявлять функцию хемостимулятора [18]. Допирование ванадата марганца фосфором обеспечивает включение в плёнки фосфатных групп PO_4^{3-} , проявляющих диэлектрические свойства [19].

Цель работы – исследование воздействия наноразмерных слоев хемостимулятора-модификатора $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2$ на процесс термического оксидирования GaAs, состав и морфологию формируемых плёнок.

2. Экспериментальная часть

Реакции синтеза ванадат-фосфата марганца $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2$ из раствора прекурсоров осуществляли под воздействием микроволнового излучения (рабочая частота 2450 МГц, P_{max} источника – 800 Вт) [20]. Оксид ванадия (V) V_2O_5 (Ч.Д.А., ТУ 6-09-4093-88) растворяли в избытке 20% раствора NaOH (Ч.Д.А., ГОСТ 432877), что приводило к образованию метаванадата натрия $NaVO_3$. Для синтеза $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2$ к раствору $NaVO_3$ добавляли растворы $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ (Ч.Д.А., ГОСТ 4172-76) и $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ (ИМП, Ч.). Воздействовали микроволновым излучением мощностью 600 Вт в течение 10 минут. Полученную суспензию охлаждали до комнатной температуры и отделяли от неё на вакуум-фильтре осадок $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2$. Затем осадок промывали, сушили и отжигали при температуре 400 °С в течение 2 часов в муфельной печи (SNOL 8,2/1100).

Определение фазового состава методом рентгенофазового анализа (РФА) проводили с использованием дифрактометра ARL X'TRA в непрерывном режиме. Угловой диапазон исследования находился в интервале от 10 до 80° ($CuK_{\alpha 1}$ с $\lambda = 1.540562 \text{ \AA}$) при 25 °С. Размер областей когерентного рассеивания (ОКР) по данным рентгенофазового анализа (РФА) для синтезированного порошка $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2$ рассчитывали по формуле Шеррера [21]:

$$D_{hkl} = \frac{kx\lambda}{\beta_{hkl} \cos\theta},$$

где D_{hkl} – средний размер частиц, Å, k – поправочный коэффициент (для кубической и орторомбической структуры $k = 0.9$), λ – длина волны рентгеновской трубки, θ – положение максимума пика, град., β_{hkl} – истинное физическое уширение дифракционного максимума, рад.

В качестве полупроводниковых подложек использовали монокристаллические пластины арсенида галлия (100) марки АГЦЧ-1. GaAs легирован цинком, концентрация основных носителей заряда составляет $1.5 \cdot 10^{18} - 2.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Для создания гетероструктур $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2/GaAs$ с наноразмерными слоями ванадат-фосфата применяли метод spin-coating [22]. К порошку $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2$ приливали дистиллированную воду. Затем осуществляли диспергирование в ультразвуковой ванне (ВУ-09-«Я-ФП»-0) в течение 15 минут. Добавляли небольшое количество желатина для улучшения адгезии с подложкой при нанесении методом spin-coating. Конечный раствор перемешивали при 80 °С в течение 15 минут магнитной мешалкой (Magnetic Stirrer MSH-300).

Перед формированием тонкоплёночных гетероструктур полупроводниковые подложки GaAs обрабатывали концентрированной HF (49 %) в течение 10 мин [23].

Термоокисление гетероструктур $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2/GaAs$ проводили в проточном кварцевом реакторе горизонтальной печи резистивного нагрева (МТП-2М-50-500) с регулированием температуры с погрешностью 1 °С (ОВЕН ТРМ-201). Процесс осуществляли в токе кислорода (медицинский (99.5 %) ГОСТ 5583-78, код ОКП: 21 1411 0200) с объёмной скоростью потока 30 л/ч (линейная скорость потока газа в реакторе составляет 10 см/мин). Окисление образцов проводили в интервале температур 490–550 °С в течение 60 минут.

Измерение толщины нанесённых слоев ванадат-фосфата и выращенных термоокислением плёнок проводили на лазерном эллипсометре ЛЭФ-754 (ЛЭ, точность ± 1 нм) и на спектральном эллипсометре «Эллипс-1891» (СЭ) [24]. Согласно данным ЛЭ и СЭ толщина слоев $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2$ на поверхности полупроводника составляла 25 ± 1 нм.

Элементный состав оксидных плёнок на GaAs и распределение компонентов по толщине устанавливали методом Оже-электронной спектроскопии (ОЭС) на спектрометре ЭСО-3 с анализатором DESA-100, точность ± 10 %. В работе применяли методику послойного травления плёнок ионами аргона для получения ин-

формации о распределении элементов по глубине плёнки.

Съёмку поверхности образцов методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) проводили на сканирующем зондовом микроскопе Solver P47 Pro (NT-MDT) с кантилевером HA_NC Etalon.

3. Результаты и обсуждение

В работе предлагается микроволновая активация синтеза хемостимулятора-модификатора $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2$ с целью значительного увеличения скорости процесса и обеспечения высокой химической гомогенности продукта [25–27].

Согласно [28] разложение кристаллогидратов $3d$ -элементов в микроволновом поле осуществляется до оксидной фазы в несколько ступеней. Изначально растворы кристаллогидратов поглощают микроволновое излучение за счёт кристаллизационной воды. При температурах 130–180 °С начинается гидролиз солей с формированием в качестве промежуточных продуктов оксо- и гидроксо соединений. Образующиеся после разложения солевых композиций высокодисперсные частицы оксидов, равномерно распределённые по реакционному объёму, способны активно взаимодействовать друг с другом. Значительный вклад вносит и специфическое «нетермическое» воздействие микроволнового излучения, связанное с генерацией ионных токов на межкристаллитных границах, интенсивность которых существенно возрастает в высокодисперсных системах.

Результаты РФА синтезируемого порошка $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2$ помимо присутствия целевой фазы показали наличие примесей в виде $Mn_3(PO_4)_2$ ($d_{hkl} = 2.8745 \text{ Å}; 1.8610 \text{ Å}$) и V_2O_5 ($d_{hkl} = 4.3611 \text{ Å}; 4.0797 \text{ Å}; 3.3979 \text{ Å}; 2.7566 \text{ Å}$). Несмотря на избыток гидроксида натрия при синтезе метаванадата не удалось добиться полного расходования V_2O_5 , что согласно литературным данным [29] может наблюдаться в подобных реакциях. Однако присутствие оксида ванадия (V) в синтезированном нанокристаллическом порошке не является недостатком, поскольку ранее [18] выявлено эффективное хемостимулирующее действие V_2O_5 по каталитическому механизму в процессах термического окисления полупроводников $A^{III}B^V$. Средний размер ОКР составляет 30 нм.

Кинетические характеристики процессов окисления гетероструктур $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2/GaAs$, обработанные с использованием уравнения $d = (k \cdot \tau)^n$, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Кинетические параметры уравнения $d = k^n t^n$ для процесса термооксидирования гетероструктур $\text{Mn}_3(\text{P}_{0.1}\text{V}_{0.9}\text{O}_4)_2/\text{GaAs}$

Хемостимулятор-модификатор	Температурный интервал оксидирования, °C	$n_{\text{cp}} \pm \Delta n$, $\text{nm}^{1/n} \text{мин}^{-1}$	ЭЭА, кДж/моль	Максимальное относительное увеличение толщины пленок, %
$\text{Mn}_3(\text{P}_{0.1}\text{V}_{0.9}\text{O}_4)_2/\text{GaAs}$	490–550	0.39±0.01	156	220
GaAs (эталон)	450–550	0.56±0.01	110	–

При термооксидировании гетероструктур $\text{Mn}_3(\text{P}_{0.1}\text{V}_{0.9}\text{O}_4)_2/\text{GaAs}$ значение n_{cp} меньше 0.5, что свидетельствует о том, что в данном температурном интервале определяющим процессом является твердофазная реакция, лимитируемая диффузией в твердой фазе [16]. Значение ЭЭА исследуемого процесса несколько больше (156 кДж/моль) по сравнению с собственным термооксидированием GaAs (110 кДж/моль). Это типично для реакции твердое-твердое без каталитического эффекта и указывает на транзитный характер действия хемостимулятора в рассматриваемом процессе [14].

Относительный прирост толщины пленки g в процессе хемостимулированного термооксидирования $\text{Mn}_3(\text{P}_{0.1}\text{V}_{0.9}\text{O}_4)_2/\text{GaAs}$ (табл. 2) по сравнению с собственным оксидированием полупроводника рассчитывали по формуле:

$$g = \frac{\Delta d_{\text{Mn}_3(\text{P}_{0.1}\text{V}_{0.9}\text{O}_4)_2/\text{GaAs}}}{\Delta d_{\text{GaAs}}} \cdot 100 \%,$$

где $\Delta d_{\text{Mn}_3(\text{P}_{0.1}\text{V}_{0.9}\text{O}_4)_2/\text{GaAs}}$ – изменение толщины пленки, сформированной в процессе термооксидирования исследуемых гетероструктур с нанесенным слоем хемостимулятора за вычетом толщины последнего, а Δd_{GaAs} – изменение толщины оксидной пленки при собственном оксидировании арсенида галлия.

При использовании хемостимулятора-модификатора $\text{Mn}_3(\text{P}_{0.1}\text{V}_{0.9}\text{O}_4)_2$ во всем температурно-временном диапазоне имеет место увеличение прироста формируемой пленки в среднем на 70–220% по сравнению с оксидированием GaAs. Это, видимо, связано как с встраиванием готовых изоструктурных фосфатных и ванадатных группировок в растущие пленки, так и

с эффективным хемостимулирующим действием катионной составляющей ванадат-фосфата и обнаруженного в исходном порошке оксида ванадия V_2O_5 .

Пленки, сформированные оксидированием гетероструктур $\text{Mn}_3(\text{P}_{0.1}\text{V}_{0.9}\text{O}_4)_2/\text{GaAs}$, содержат MnAsO_4 , $\text{Mn}_3(\text{VO}_4)_2$, $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2$, GaAs, GaAsO_4 (табл. 3). При повышении температуры оксидирования увеличивается интенсивность рефлексов арсената галлия и арсената марганца, что подтверждает интенсификацию вторичных взаимодействий оксидов компонентов подложки с продуктами термолиза хемостимулятора.

Анализ профилей распределения элементов по глубине пленки, сформированной оксидированием гетероструктуры $\text{Mn}_3(\text{P}_{0.1}\text{V}_{0.9}\text{O}_4)_2/\text{GaAs}$ в режиме 510 °C, 60 мин, показывает (рис. 1), что пленка по всей толщине обогащена кислородом (до 50–60 %). Это свидетельствует об отсутствии сегрегации мышьяка в пленке в неокисленном состоянии (что является атрибутом процесса собственного термооксидирования арсенида галлия), а значит об эффективном хемостимулирующем воздействии ванадат-фосфата марганца. Присутствие галлия и мышьяка на поверхности пленки подтверждает их значительную диффузию в слой хемостимулятора. Фосфор в пленке практически не фиксируется, что, возможно, связано с его небольшим количеством за счет испарения в виде оксидов и пределом обнаружения элементов методом ОЭС. При дальнейшем продвижении вглубь пленки окисленные галлий и мышьяк существуют в виде арсената галлия, что коррелирует с данными РФА.

По данным АСМ для неоксидированной гетероструктуры $\text{Mn}_3(\text{P}_{0.1}\text{V}_{0.9}\text{O}_4)_2/\text{GaAs}$ средний пе-

Таблица 2. Относительное увеличение толщины оксидной пленки при термическом оксидировании гетероструктур $\text{Mn}_3(\text{P}_{0.1}\text{V}_{0.9}\text{O}_4)_2/\text{GaAs}$ в сравнении с эталоном GaAs

Образец	Относительное увеличение толщины в зависимости от времени оксидирования, %						
	$T, \text{°C}/t, \text{мин}$	10	20	30	40	50	60
$\text{Mn}_3(\text{P}_{0.1}\text{V}_{0.9}\text{O}_4)_2/\text{GaAs}$	530	68	83	84	82	83	90
	550	69	90	115	190	196	220

Таблица 3. Состав плёнок, сформированных термоокисидированием гетероструктур $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2/GaAs$ (данные РФА [30])

Гетероструктура, режим термоокисидирования	$d_{hkl}, \text{Å}$	Угол 2θ , град.	Фаза
$Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2/GaAs$, 500 °C, 60 мин	1.7829	51.195	$MnAsO_4$
	1.3898	67.320	$Mn_3(VO_4)_2$
	3.5777; 2.7806	24.867; 32.166	$Mn_3(PO_4)_2$
	3.2541	27.386;	GaAs
	1.6299; 2.0674	56.406; 43.752	$GaAsO_4$
$Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2/GaAs$, 530 °C, 60 мин	1.7909	24.823	$MnAsO_4$
	3.2542	27.385	GaAs
	3.5840; 2.774	24.823; 32.204	$Mn_3(PO_4)_2$
	2.0679	43.739	$GaAsO_4$

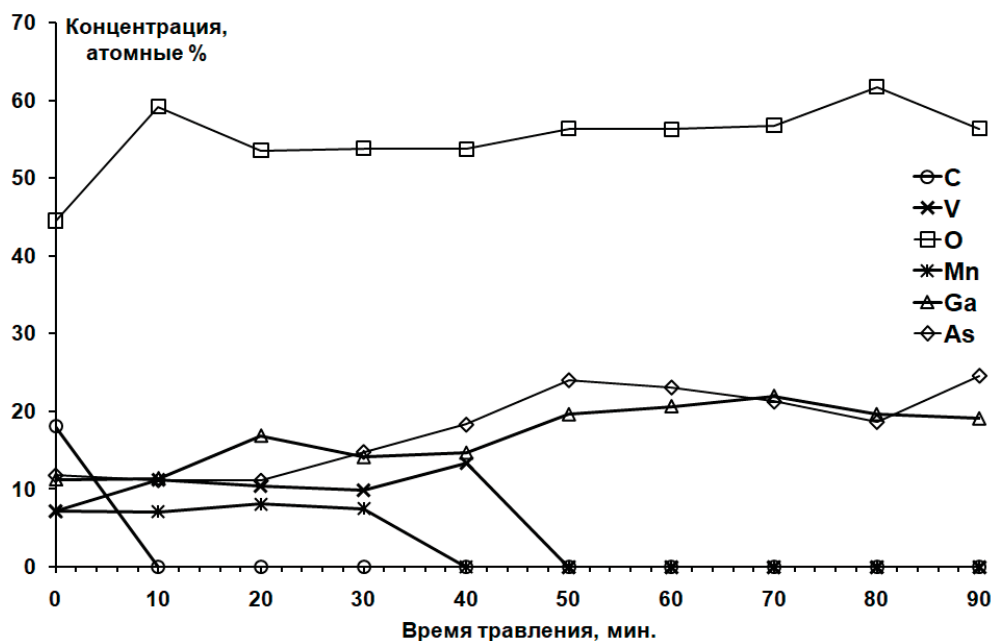


Рис. 1. Оже-профили распределения элементов в плёнке, сформированной окисидированием гетероструктуры $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2/GaAs$ в режиме 510 °C, 60 мин

репад высоты рельефа составляет порядка 15 нм (рис. 2). Для гетероструктуры $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2/GaAs$, окисидированной в режиме 490 °C, 60 минут, перепад высот уменьшается до 8–10 нм. Средний размер зерна находится в пределах 200 нм (рис. 3а, б). При увеличении температуры окисидирования до 550 °C пленки становятся более рельефные (рис. 3в, г). Перепад высот увеличивается до 20–25 нм, средний размер зерна – до 300 нм.

Таким образом, при термическом окисидировании гетероструктур $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2/GaAs$ формируются наноразмерные (диапазон толщин 50–200 нм) пленки с достаточно выраженным рельефом. При увеличении температуры окисидиро-

вания более ярко проявляется зеренная структура пленок.

4. Выводы

Хемостимулированное окисидирование арсенида галлия с наноразмерным слоем ванадат-фосфат марганца на поверхности протекает по транзитному механизму. Об этом свидетельствует значение ЭЭА процесса (порядка 156 кДж/моль), несколько большее в сравнении с эталонным окисидированием GaAs (~110 кДж/моль). Согласно результатам РФА в пленках не обнаружен хемостимулятор с ярко выраженным каталитическим механизмом действия V_2O_5 , первоначально присутствующий

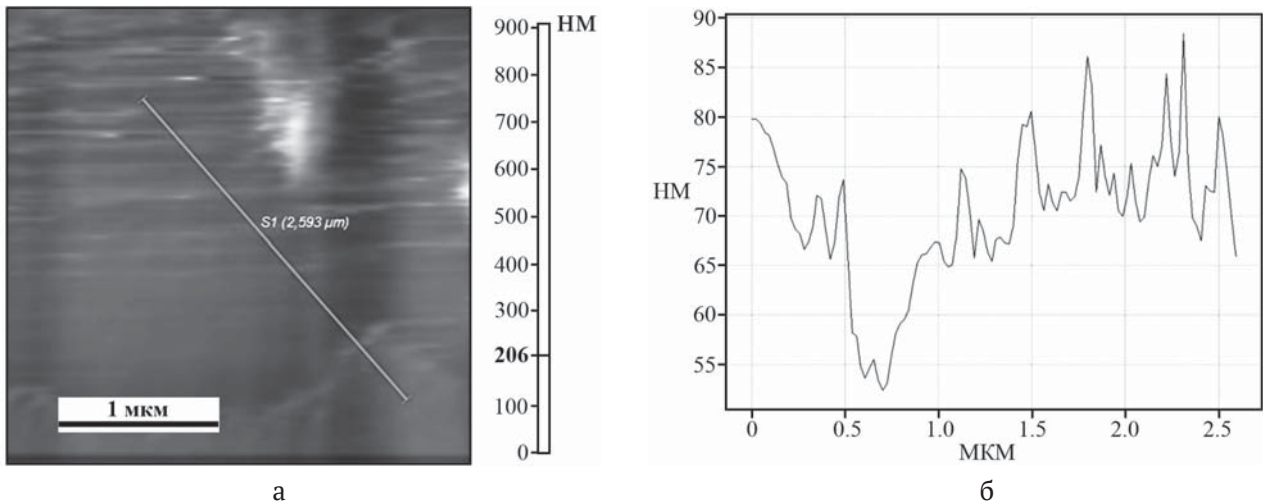


Рис. 2. АСМ-изображение поверхности неоксидированной гетероструктуры $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2/GaAs$: а) топография; б) профиль. Размер области сканирования $3 \times 3 \text{ мкм}^2$

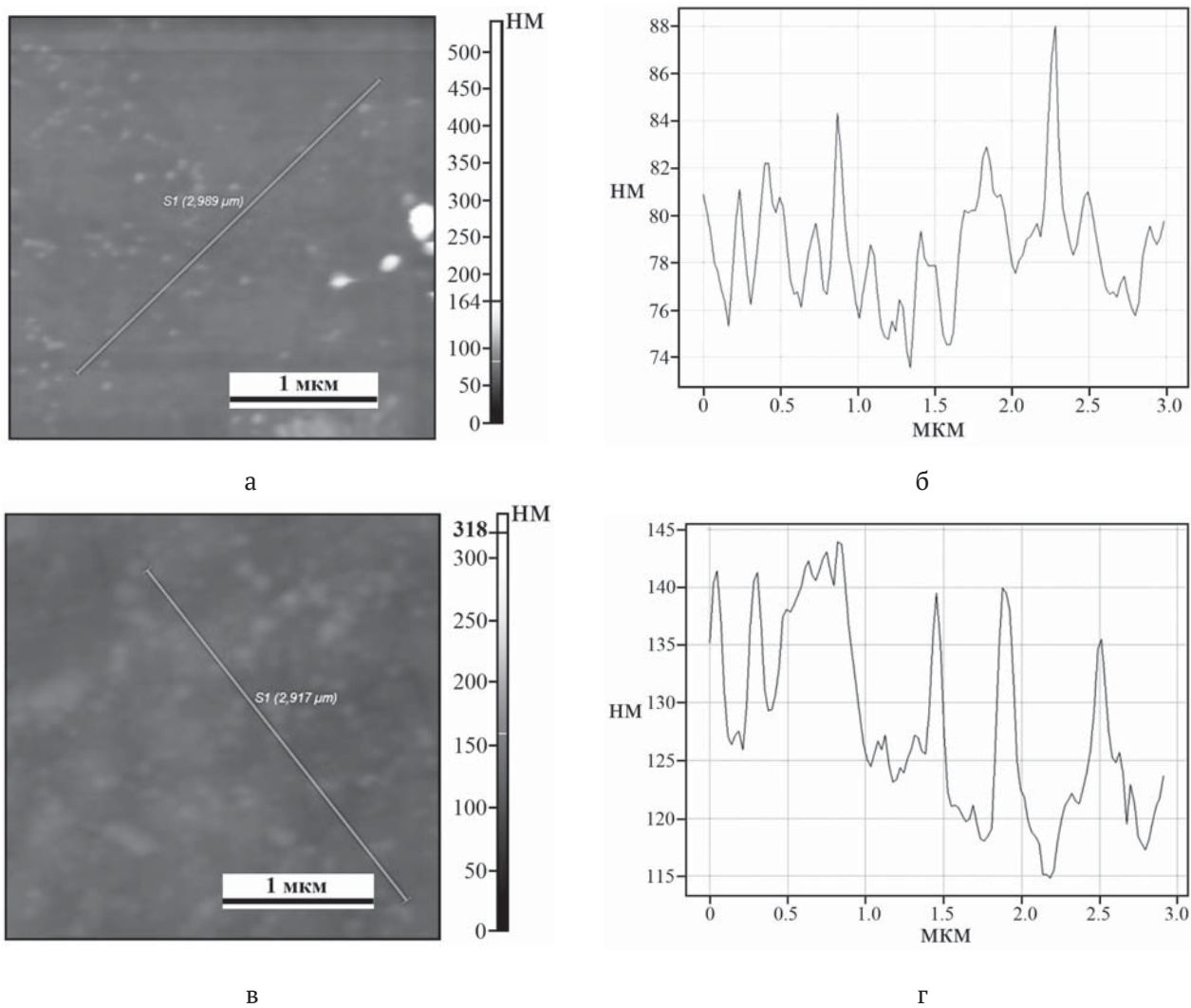


Рис. 3. АСМ-изображения поверхности плёнок (а, в) и профиль (б, г), сформированных оксидированием гетероструктур $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2/GaAs$ в режиме 490 °С, 60 минут (а, б) и 550 °С, 60 минут (в, г). Размер области сканирования $3 \times 3 \text{ мкм}^2$

в исходном ванадат-фосфате, что подтверждает отсутствие цикла регенерации катализатора $V_2O_5 \leftrightarrow VO_2$. Пленки, сформированные оксидированием гетероструктур $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2/GaAs$, находятся в диапазоне толщин 50–200 нм, содержат в основном арсенаты марганца и галлия, имеют выраженный рельеф при размере зерен в интервале 200–300 нм.

Благодарности

Результаты исследований частично получены на оборудовании Центра коллективного пользования Воронежского государственного университета. URL: <http://ckp.vsu.ru>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Tang M., Park J.-S., Wang Z., Chen S., Jurczak P., Seeds A., Liu H. Integration of III-V lasers on Si for Si photonics. *Progress in Quantum Electronics*. 2019;66: 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2019.05.002>
2. Torkhov N. A., Babak L. I., Kokolov A. A. On the application of Schottky contacts in the microwave, extremely high frequency, and THz ranges. *Semiconductors*. 2019;53: 1688–1698. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782619160280>
3. Lutz J., Schlangenotto H., Scheuermann U., De Doncker R. *Semiconductor power devices. Physics, characteristics, reliability*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2018. 714 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70917-8>
4. Yadav S., Rajan C., Sharma D., Balotiya S. GaAs-SiGe based novel device structure of doping less tunnel FET. In: Sengupta A., Dasgupta S., Singh V., Sharma R., Kumar Vishvakarma S. (eds.) *VLSI Design and Test. VDAT 2019. Communications in computer and information science, vol. 1066*. Singapore: Springer; 2019. p. 694–701. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9767-8_57
5. Klotzkin D. J. *Semiconductors as laser materials 1: Fundamentals. In: Introduction to semiconductor lasers for optical communications*. Springer, Cham; 2020. p. 31–52. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-24501-6_3
6. Paswan R. K., Panda D. K., Lenka T. R. Dielectric Modulated AlGaAs/GaAs HEMT for label free detection of biomolecules. In: Sharma R., Rawal D. (eds.) *The physics of semiconductor devices. IWPSD 2017. Springer proceedings in physics, vol. 215*. Springer, Cham; 2017. p. 709–715. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-97604-4_109
7. Eichler H. J., Eichler J., Lux O. Semiconductor lasers. In: *Lasers. Springer Series in Optical Sciences, vol. 220*. Springer, Cham; 2018. p. 165–203. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-99895-4_10
8. Mikhailova M. P., Moiseev K. D., Yakovlev Y. P. Discovery of III–V semiconductors: physical properties and application semiconductors. *Semiconductors*. 2019;53(3): 273–290. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782619030126>
9. Анфертьев В. А., Вакс В. Л., Реутов А. И., Баранов А. Н., Teissier R. Изучение частотных характеристик ТГц квантовых каскадных лазеров с использованием открытого оптического резонатора. *Журнал радиоэлектроники*. 2018;12: 14–24. DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.12.5>
10. Pawar S. A., Kim D., Kim A., Park J. H., Shin J. C., Kim T. W., Kim H. J. Heterojunction solar cell based on n-MoS₂/p-InP. *Optical Materials*. 2018;86: 576–581. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.10.052>
11. Sugiyama H., Uchida K., Han X., Periyanyagam G. K., Aikawa M., Hayasaka N., Shimomura K. MOVPE grown GaInAsP/GaInAsP SCH-MQW laser diode on directly-bonded InP/Si substrate. *Journal of Crystal Growth*. 2019;507: 93–97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.10.024>
12. Sharma S. K., Singh S. P., Kim D. Y. Fabrication of the heterojunction diode from Y-doped ZnO thin films on p-Si substrates by sol-gel method. *Solid State Communications*. 2018;270: 124–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2017.12.010>
13. Asalzadeh S., Yasserian K. The effect of various annealing cooling rates on electrical and morphological properties of TiO₂ thin films. *Semiconductors*. 2019;53: 1603–1607. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782619160036>
14. Томина Е. В., Миттова И. Я., Сладкопевцев Б. В., Кострюков В. Ф., Самсонов А. А., Третьяков Н. Н. Термическое оксидирование как способ создания наноразмерных функциональных пленок на полупроводниках A^{III}B^V: хемостимулирующее воздействие оксидов металлов : обзор. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2018;20(2): 184–203. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2018.20/522>
15. Liu H. A short review on thermal vapor sulfuration of semiconductor thin films for optoelectronic applications. *Vacuum*. 2018;154: 44–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.04.050>
16. Миттова И. Я., Сладкопевцев Б. В., Томина Е. В., Самсонов А. А., Третьяков Н. Н., Пономаренко С. В. Синтез диэлектрических пленок термооксидированием MnO₂/GaAs. *Неорганические материалы*. 2018;54(11): 1149–1156. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002337X18110106>
17. Housecroft C., Sharpe A. G. *Inorganic chemistry* (4th ed.). Издательство: Pearson; 2012. 1213 p.
18. Миттова И. Я., Томина Е. В., Лапенко А. А., Хорохордина А. О. Твердофазные процессы при

термическом окислении GaAs с поверхностью, модифицированной ванадием. *Неорганические материалы*. 2004;40(5): 519–523.

19. Spicer W. E., Lindau I., Skeath P., Su C. Y., Chye P. Unified mechanism for Schottky-barrier formation and III-V oxide inter-face states. *Physical Review Letters*. 1980;44: 420. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.44.420>

20. Томина Е. В., Миттова И. Я., Бурцева Н. А., Сладкопеевцев Б. В. Способ синтеза люминофора на основе ортованадата иттрия: *Патент № 2548089 РФ*. Заявл. 12.11.2013. Опубл. 20.05.2015. Бюл. №2013133382/05.

21. Брандон Д., Каплан У. *Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля*. М.: Техносфера; 2004. 384 с.

22. Popielarski P., Mosinska L., Bala W., Paprocki K., Zorenko Yu., Zorenko T., Sypniewska M. Persistent photoconductivity in ZnO thin films grown on Si substrate by spin coating method. *Optical Materials*. 2019;97: 109343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109343>

23. Feng C., Zhang Y., Liu J., Qian Y., Bai X. Optimized chemical cleaning procedure for enhancing photoemission from GaAs photocathode. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2019;91: 41–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.11.003>

24. Mittova I. Ya., Tomina E. V., Sladkopevtsev B. V., Tretyakov N. N., Lapenko A. A., Shvets V. A. High-speed determination of the thickness and spectral ellipsometry investigation of films produced by the thermal oxidation of InP and V_xO_y/InP structures. *Inorganic Materials*. 2013;49(2): 179–184.

25. Костюхин Е. М. Синтез наночастиц магнетита в условиях микроволнового и конвекционно-го нагрева. *Журнал физической химии*. 2018;92(12): 1875–1878. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0044453718120233>

26. Черепов В. В., Кропачев А. Н., Будин О. Н. Перспективы развития способов синтеза титанатов перовскитоподобной структуры и допирования их редкоземельными элементами. *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2018;6: 31–41. DOI: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2018-6-31-41>

27. Kuznetsova V. A., Almjasheva O. V., Gusev V. V. Influence of microwave and ultrasonic treatment on the formation of $CoFe_2O_4$ under hydrothermal conditions. *Glass Physics and Chemistry*. 2009;35(2):

205–209. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1087659609020138>

28. Третьяков Ю. Д. Развитие неорганической химии как фундаментальной основы создания новых поколений функциональных материалов. *Успехи химии*. 2004;73(9): 899–914.

29. Красненко Т. И., Самигуллина Р. Ф., Ротермель М. В., Николаенко И. В., Зайцева Н. А., Ищенко А. В., Онуфриева Т. А. Влияние способа синтеза на морфологические и люминесцентные характеристики $\alpha-Zn_2V_2O_7$. *Журнал неорганической химии*. 2017;62(3): 263–268. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0044457X17030114>

30. JCPDC PCPDFWIN: A Windows Retrieval/Display program for Accessing the ICDD PDF – 2 Data base. International Centre for Diffraction Data; 1997.

Информация об авторах

Томина Елена Викторовна, д. х. н., доцент, кафедра материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: tomina-e-v@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>.

Сладкопеевцев Борис Владимирович, к. х. н., кафедра материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: dp-kmins@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0372-1941>.

Донцов Алексей Игоревич, к. ф.-м. н., доцент кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, доцент кафедры физики, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: dontalex@mail.ru. ORCID iD <https://orcid.org/0000-0002-3645-1626>.

Перфильева Лидия Игоревна, магистрант 1 года обучения, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: stepina-Lidija97@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1603-3662>.

Миттова Ирина Яковлевна, д. х. н., профессор, кафедра материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: imittova@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6919-1683>.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.