

ТЕРМИЧЕСКОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ФОСФИДА ИНДИЯ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ КОМПОЗИЦИЕЙ (90 %V₂O₅ + 10 % MnO₂)

© 2016 Н. Н. Третьяков, В. Е. Щедрина, Б. В. Сладкопеевцев, А. А. Самсонов, И. Я. Миттова

Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, 394006 Воронеж, Россия
e-mail: nikostretyakov@gmail.com

Поступила в редакцию 27.04.2016 г.

Аннотация. Цель данной работы — установление влияния магнетронно нанесённой композиции (90 %V₂O₅+10 %MnO₂) на кинетику термоокисления InP, состав и морфологию поверхности в сравнении с окислением «чистой» поверхности InP и гетероструктуры V₂O₅/InP. Показано, что модифицирование поверхности InP композитным хемостимулятором V₂O₅ + MnO₂, содержащим малое количество MnO₂ (10 мол.%) приводит к заметным изменениям кинетических характеристик процесса по сравнению как с собственным окислением InP, так и при использовании в качестве хемостимулятора нанесённых слоёв V₂O₅. Установлено, что процесс характеризуется достаточно большими значениями относительного увеличения толщины пленки (в среднем 2—5 раз). Значение эффективной энергии активации достаточно велико и сопоставимо с таковым для окисления InP (210 и 270 кДж/моль соответственно). Выявлено положительное влияние изучаемого композитного модификатора на такие характеристики плёнок, как состав и морфологию поверхности. Методом РФА показано обогащение выращенной плёнки одним из целевых продуктов — фосфатом индия — в сравнении с окисленной гетероструктурой V₂O₅/InP. После термоокисления гетероструктуры (90 %V₂O₅ + 10 %MnO₂)/InP формируются плёнки с зёрнистой структурой поверхности (средний размер 50 нм) и высотой рельефа, не превышающей 20 нм, что превосходит аналогичные характеристики для гетероструктуры V₂O₅/InP.

Ключевые слова: модифицирование, термоокисление, фосфид индия, оксид ванадия (V), оксид марганца (IV).

ВВЕДЕНИЕ

Термическое окисление является одним из распространённых способов создания функциональных плёнок на поверхности полупроводников [1—3]. Для оптимизации процесса термоокисления фосфида индия и устранения негативных последствий механизма собственного окисления (обогащения растущей пленки металлическим индием и появления омической проводимости в гетероструктуре оксид/InP) целесообразно использовать модифицирование поверхности нанесёнными слоями хемостимуляторов различной физико-химической природы [4]. Данный подход, позволяющий гибко управлять составом, скоростью роста, структурой (вплоть до наноструктурирования) сформированных в процессе термоокисления целевых плёнок за счёт изначального «программирования» применяемого композитного

хемостимулятора-модификатора, несомненно, является перспективным.

Применение в качестве модификатора композиции оксидов, которые могут являться как транзиторами, так и катализаторами [4, 5], позволило бы более эффективно управлять процессом формирования наноразмерных, функциональных плёнок.

Целью данной работы явилось установление влияния магнетронно нанесённой композиции (90 %V₂O₅ + 10 %MnO₂) на кинетику термоокисления InP, состав и морфологию поверхности в сравнении с окислением «чистой» поверхности InP и гетероструктуры V₂O₅/InP.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве полупроводниковых подложек использовали полированные пластины InP марки ФИЭ-1А ориентации (100), легированные оловом

(концентрация основных носителей заряда при 300 К не менее $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$), *n*-тип проводимости, предварительно обработанные полирующим травителем состава H_2SO_4 (ХЧ ГОСТ-4204-77, 92.80 %): H_2O_2 (ОСЧ ТУ 6-02-570-750, 56 %): $\text{H}_2\text{O} = 2 : 1 : 1$ в течение 10 мин и многократно промытые в бидистиллированной воде. Для магнетронного нанесения слоёв композиции (90 % V_2O_5 + 10 % MnO_2) на поверхность InP использовали вакуумную установку ионного распыления Covap II. Мишень, спрессованную из порошка диоксида марганца (чистота 99.8 %) и пентаоксида ванадия (чистота 99.8 %), распыляли в аргоновой атмосфере ($P = 4 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.). Локальным рентгеноспектральным микроанализом (ЛРСМА) в нанесённом на поверхность InP слое композиции хемостимуляторов установлено элементное содержание ванадия, марганца и кислорода, позволившее рассчитать относительное соотношение применяемых оксидов, составившее: V_2O_5 — 90 мол. % и MnO_2 — 10 мол. %. Толщина сформированного на InP слоя композиции (90 % V_2O_5 + 10 % MnO_2) по данным лазерной эллипсометрии (ЛЭ, ЛЭФ-754, $\lambda = 632.8$ нм, абсолютная погрешность ± 1 нм) составила 25 ± 1 нм. Диапазон толщины нанесенного слоя хемостимулятора в 25—30 нм обусловлен необходимостью стандартизации условий сравнения результатов, полученных при использовании других хемостимуляторов и полупроводниковых подложек [3, 4]. Сформированные гетероструктуры (90 % V_2O_5 + 10 % MnO_2)/InP оксидировали в печи резистивного нагрева МТП-2М-50-500 с точностью регулирования температуры ± 1 °С (ОВЕН ТРМ-10) в потоке кислорода (30 л/ч) при температурах 450, 475, 500, 530, 550 °С в течение 60 минут с контролем прироста толщины пленок методом ЛЭ: в начале процесса (первые 10 минут) толщину растущих плёнок контролировали через 1, 3, 5, 8, 10 минут после начала процесса, затем — через каждые 5 минут до достижения общего времени процесса, равного 60 мин. С целью контроля и подтверждения данных ЛЭ на спектральном эллипсометре (СЭ) «Эллипс-1891» снимали зависимости эллипсометрических параметров от длины волны и решали обратную задачу с использованием дисперсионной модели Коши и модели Бругемана. Фазовый состав плёнок, сформированных в процессе термического оксидирования гетероструктур (90 % V_2O_5 + 10 % MnO_2)/InP, определяли методом рентгеновского фазового анализа (РФА) на дифрактометре Empyrean (Cu $K_{\alpha 1}$ с $\lambda = 1.540562$ Å). Морфологию поверхности образцов исследовали методом атом-

но-силовой микроскопии (АСМ) на сканирующем зондовом микроскопе Solver P47 Pro (NT-MDT) с кантилевером HA_NC Etalon в полуконтактном режиме. Съёмка также проводилась в режиме фазового контраста, что позволило получить информацию о наноструктурированности поверхности сформированных плёнок. Так как по одним только данным АСМ сделать однозначный вывод о наличии на поверхности плёнки зёрен или агломератов зёрен не представляется возможным, то в данном исследовании при описании морфологии поверхности будем употреблять термин «зёрна».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее [6] было установлено, что термооксидирование гетероструктуры $\text{V}_2\text{O}_5/\text{InP}$ протекает по каталитическому механизму и процесс характеризуется значительным (на порядок) снижением эффективной энергии активации (ЭЭА) по сравнению с собственным оксидированием InP: с ~ 270 кДж/моль до ~ 30 кДж/моль. В результате обработки кинетических данных (рис. 1а) процесса оксидирования гетероструктур (90 % V_2O_5 + 10 % MnO_2)/InP в соответствии с уравнением $d = (k\tau)^n$ [6], установлено, что рассчитанное значение $n_{\text{cp}} = 0.117$ (табл. 1) значительно меньше 0.5, что свидетельствует о том, что в интервале температур 450—550 °С определяющим процессом является твердофазная реакция, лимитируемая диффузией в твердой фазе.

Значение ЭЭА, рассчитанное на основании аррениусовской зависимости усредненной константы скорости (рис. 1б), составило 210 кДж/моль, что типично для реакции твердое-твердое без каталитического эффекта [4], однако эта величина несколько ниже таковой для собственного термооксидирования InP (270 кДж/моль).

Относительное увеличение скорости роста оксидной пленки (табл. 2) при термооксидировании гетероструктур ($\text{V}_2\text{O}_5 + \text{MnO}_2$)/InP (10 мол. % MnO_2) рассчитано по формуле

$$b = \frac{\Delta d_{\text{V}_2\text{O}_5 + \text{MnO}_2 / \text{InP}}}{\Delta d_{\text{InP}}},$$

где Δd_{InP} — изменение толщины оксидной плёнки при оксидировании чистого фосфида индия (эталон), а $\Delta d_{\text{V}_2\text{O}_5 + \text{MnO}_2 / \text{InP}}$ — изменение толщины оксидной плёнки при оксидировании гетероструктур с нанесённым слоем модификатора за вычетом толщины последнего, при всех температурах свидетельствует об интенсификации процесса роста оксидной пленки в присутствии ($\text{V}_2\text{O}_5 + \text{MnO}_2$) по сравнению с оксидированием эталонного InP.

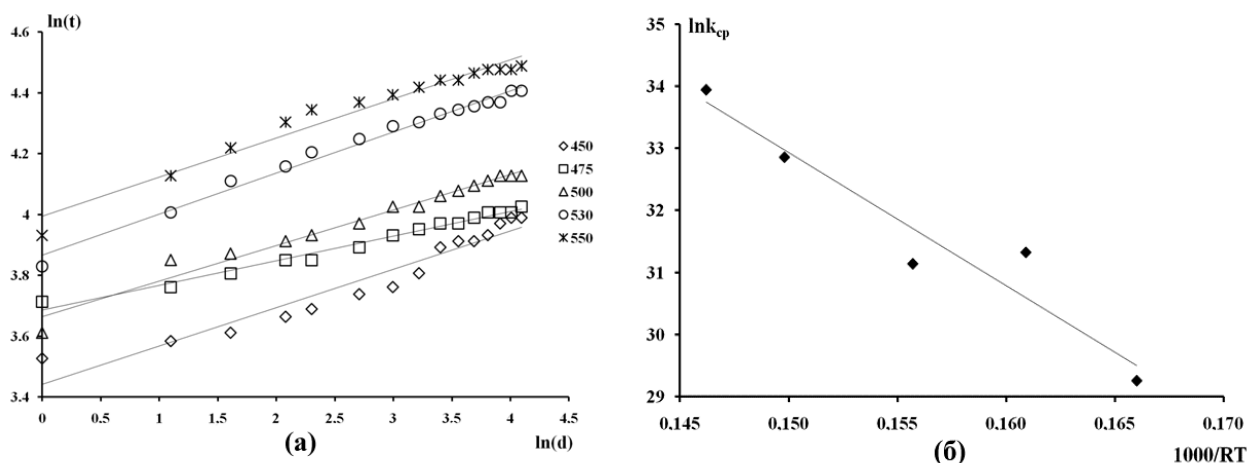


Рис. 1. Кинетические изотермы в двойных логарифмических координатах (а) и аррениусовская зависимость усредненной константы скорости (б) процесса оксидирования гетероструктур (90 %V₂O₅ + 10 %MnO₂)/InP в кислороде при 450, 475, 500, 530 и 550 °С

Таблица 1. Кинетические параметры процессов термооксидирования гетероструктур (90 %V₂O₅ + 10 %MnO₂)/InP, рассчитанные по степенному уравнению $d = (k \cdot t)^n$

| T, °C | lnk _{cp.} | $n \pm \Delta n$, нм ^{1/n} мин ⁻¹ | $n_{cp.}$ | ЭЭА, кДж/моль |
|-------|--------------------|---|------------|------------------|
| 450 | 29.2 | 0.12±0.025 | 0.11±0.036 | 210 |
| 475 | 31.3 | 0.08±0.030 | | |
| 500 | 31.1 | 0.11±0.029 | | |
| 530 | 32.8 | 0.13±0.003 | | |
| 550 | 33.9 | 0.12±0.018 | | |

Из табл. 2 следует, что максимальные значения относительного увеличения толщины пленки в присутствии (V₂O₅+MnO₂) характерны в первые 10 минут: 5.6 раз при температурах 450 и 550 °С и 3.2; 2.7 и 3.8 для 475, 500 и 530 °С соответственно. После 15 минут оксидирования наблюдается снижение темпа прироста толщины пленки с ростом времени при всех температурах процесса. В случае термооксидирования гетероструктуры V₂O₅/InP высокие значения относительного увеличения толщины плёнки имели место на протяжении всего времени процесса [6], однако при добавлении 10 мол.% MnO₂, как уже отмечалось выше, только на начальном этапе налицо ярко выраженный ускоренный рост плёнок.

Таблица 2. Относительное увеличение толщины пленки при термооксидировании гетероструктур (90 %V₂O₅ + 10 %MnO₂)/InP в различных режимах по сравнению с эталонным оксидированием InP

| T, °C | Относительное увеличение толщины пленки, раз | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | t, мин. | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1 | 3 | 5 | 8 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
| 450 | 5.6 | 2.7 | 2.1 | 1.9 | 1.6 | 1.4 | 1.3 | 1.3 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.4 |
| 475 | 3.2 | 3.3 | 2 | 1.8 | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.4 | 1.3 | 1.3 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.1 |
| 500 | 2.7 | 2.2 | 2.5 | 1.7 | 1.9 | 2 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 1.6 | 1.6 | 1.5 | 1.6 | 1.6 |
| 530 | 3.8 | 2.9 | 2.7 | 2.5 | 2.1 | 1.9 | 1.8 | 1.8 | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.7 |
| 550 | 5.6 | 2.7 | 2.1 | 1.9 | 1.6 | 1.4 | 1.3 | 1.3 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.4 |

На основании результатов исследования кинетики процесса можно утверждать, что магнетронно нанесенный слой композиции оксидов является транзитором кислорода в процессе термооксидирования InP. Об этом свидетельствуют как величина ЭЭА, по порядку близкая к таковой для собственного оксидирования InP, так и динамика изменения относительного увеличения толщины пленки, когда лишь на начальном этапе идет активная передача

кислорода от композиции оксидов к индию и фосфору, т. е. расход хемостимулятора в заметной мере не компенсируется его регенерацией.

Согласно данным СЭ для всех термооксидированных гетероструктур (90 %V₂O₅ + 10 %MnO₂)/InP экспериментальные спектры эллипсометрических параметров Ψ и Δ хорошо совпадают с рассчитанными (рис. 2), что свидетельствует о корректном описании моделью Бругемана [7].

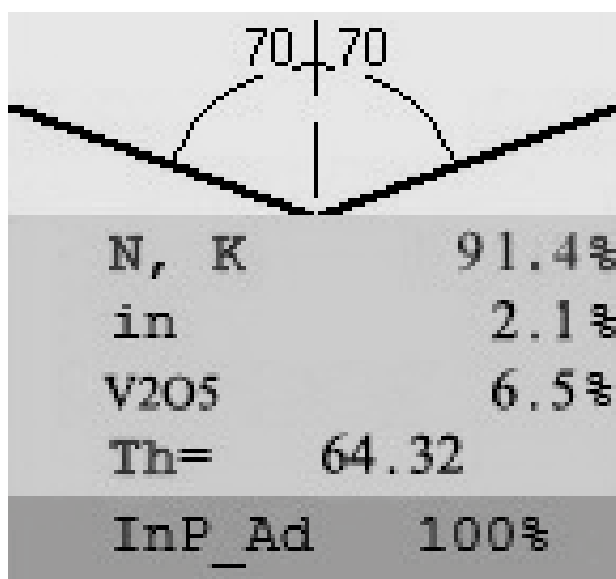
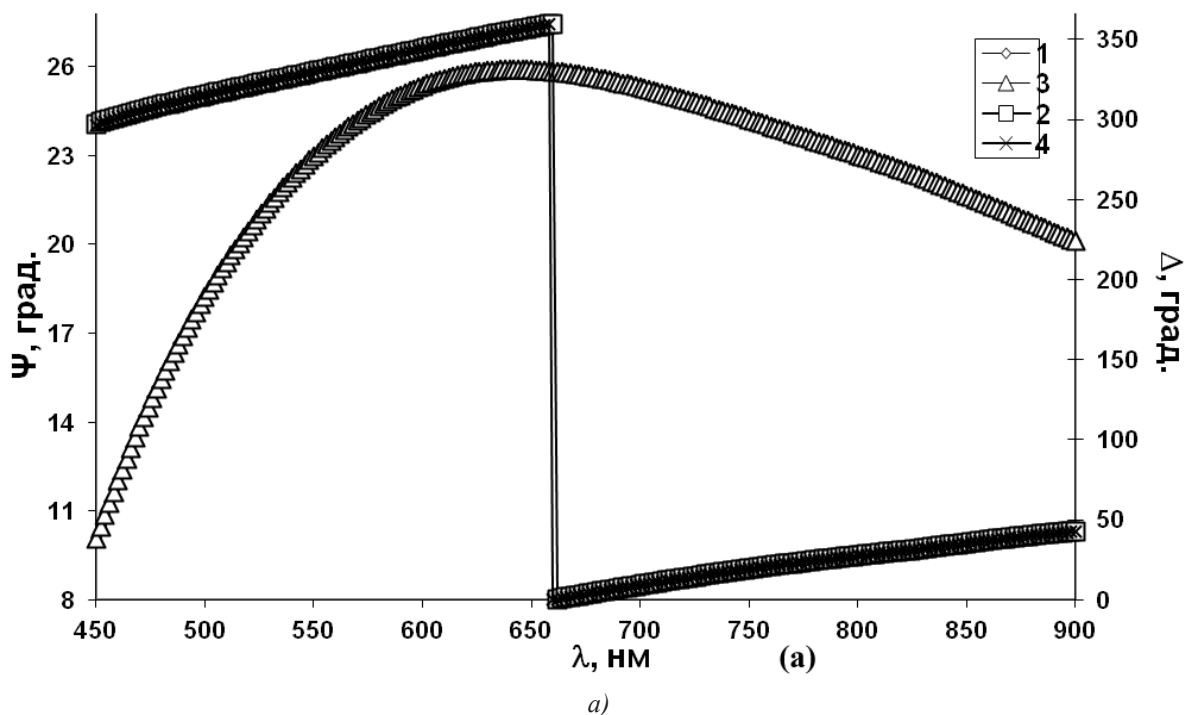


Рис. 2. Спектры эллипсометрических параметров ψ (1,2) и Δ (3,4) для образца, синтезированного термооксидированием гетероструктуры (90 %V₂O₅ + 10 %MnO₂)/InP в режиме 530 °С, 60 минут (2, 4 — измеренные, 1, 3 — рассчитанные по модели Бругемана) (а) и используемая модель (б). Толщина пленки 64 нм

Таким образом, после термооксидирования в течение 60 минут при температурах 450, 475, 500, 530 и 550 °С исследуемые пленки являются слабопоглощающими в области длин волн 450—900 нм (показатель поглощения k не превышает 0.1). Спектральные кривые хорошо описываются классической моделью Коши с нормальным законом дисперсии (после нанесения модификатора на поверхность InP) и моделью Бругемана (после термооксидирования гетероструктур (90 %V₂O₅ + 10 %MnO₂)/InP). С увеличением температуры термического оксидирования гетероструктур (90 %V₂O₅ + 10 %MnO₂)/InP содержание недоокисленного индия в пленке (СЭ) меняется: при температуре 450 °С характерно максимальное содержание In (2.5 %), при 475 °С — минимальное содержание (1.8 %), затем при 500 °С происходит небольшое увеличение содержания индия (2.1 %), при 530 °С — незначительное снижение (1.9 %), а при 550 °С содержание In остается тем же (1.9 %). Примерно такие же значения содержания неокисленного индия были обнаружены в случае оксидирования гетероструктуры V₂O₅/InP [8]. Таким образом, введение 10 мол. % MnO₂ в слой V₂O₅ не приводит к значительным изменениям данной характеристики плёнки.

Таким образом, транзитное воздействие хемостимулятора играет положительную роль в химическом связывании индия и соответственно в заметной степени блокирует диффузию недоокисленного индия в пленку, поскольку общее содержание его весьма низко по сравнению с таковым в собственных оксидных пленках (17—20 %) [8], обладающих омической проводимостью.

Ещё одним инструментом управления свойствами функциональных плёнок является варьирование их состава в процессе оксидирования в зависимости от режима и физико-химической природы применяемого композитного хемостимулятора. Сравнивая состав плёнок, сформированных в результате термооксидирования гетероструктур V₂O₅/InP и (90 %V₂O₅ + 10 %MnO₂)/InP (табл. 3), можно отметить, что, несмотря на сходные черты (наличие оксидов ванадия в различных степенях окисления и оксида индия), имеет место очень важное отличие, заключающееся в наличии фосфата индия в выращенной плёнке для гетероструктуры, содержащей MnO₂. При этом было обнаружено несколько достаточно интенсивных рефлексов, соответствующих фосфату индия. Его отсутствие на рентгенограммах для оксидированных в аналогичном режиме гетероструктур V₂O₅/InP может быть связано с тем, что он присутствует в плёнке

в аморфном состоянии. Таким образом, введение малого количества MnO₂ в исходных слой хемостимулятора приводит к формированию целевого продукта (InPO₄), который в конечном итоге способствует улучшению характеристик (в частности, электрофизических) сформированных плёнок.

Таблица 3. Данные РФА для гетероструктур V₂O₅/InP и (90 %V₂O₅ + 10 %MnO₂)/InP, оксидированных в режиме 500 °С, 60 минут

| Фаза | V ₂ O ₅ /InP | (90 %V ₂ O ₅ + 10 %MnO ₂)/InP |
|--------------------------------|------------------------------------|---|
| | d _{hkl} | |
| InP | 2.949 | 1.468; 2.935 |
| MnO ₂ | — | 2.005 |
| Mn ₂ O ₃ | — | 2.113 |
| In ₂ O ₃ | 5.010 | 4.999 |
| InPO ₄ | — | 1.451; 3.709 |
| V ₂ O ₅ | 4.391; 3.416 | 3.414; 4.392 |
| V ₂ O ₃ | 2.480; 2.244 | 2.497 |
| VO ₂ | 2.013 | — |

Ещё одним подтверждением улучшения характеристик плёнок могут служить данные о морфологии их поверхности. До термооксидирования для гетероструктуры (90 %V₂O₅ + 10 %MnO₂)/InP характерна гладкая поверхность слоя композитного модификатора (рис. 3), высота рельефа не превышает 5 нм. После термооксидирования (в режиме 500 °С, 60 минут) исследуемой гетероструктуры высота рельефа не превышает 20 нм, характеризуется зёрненной структурой поверхности со средним размером 50 нм (рис. 4).

Сравнивая полученную в результате термооксидирования гетероструктуры (90 %V₂O₅ + 10 %MnO₂)/InP поверхность с поверхностью, сформированной в процессе собственного оксидирования InP, можно сделать вывод о значительном улучшении качества плёнки: при собственном оксидировании имеются трещины, формирование которых можно связать с интенсивным испарением P₂O₅, высота рельефа составляет порядка 30 нм (рис. 5а, б). Неожиданным результатом является то, что полученная поверхность по своим характеристикам превосходит и результат термического

оксидирования в аналогичном режиме гетероструктуры с индивидуальным оксидом ванадия, ибо

в этом случае размер «зёрен» составляет порядка сотен нанометров при высоте рельефа 90 нм.

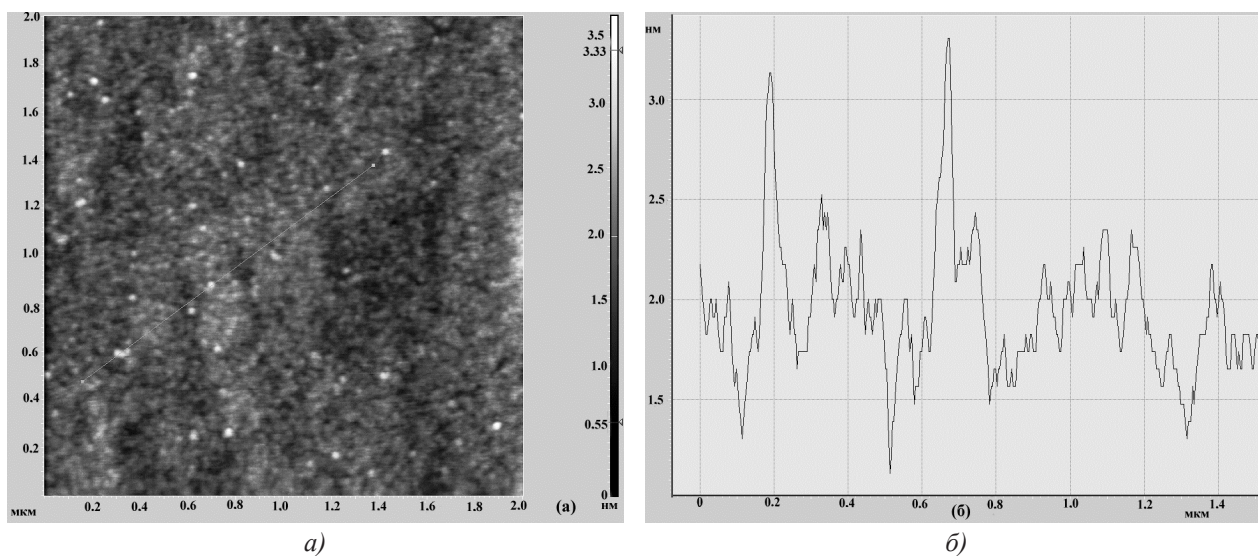


Рис. 3. АСМ-изображение (а) и профиль поверхности (б) гетероструктур (90 %V₂O₅ + 10 %MnO₂)/InP до оксидирования (размер области сканирования 2 × 2 мкм²)

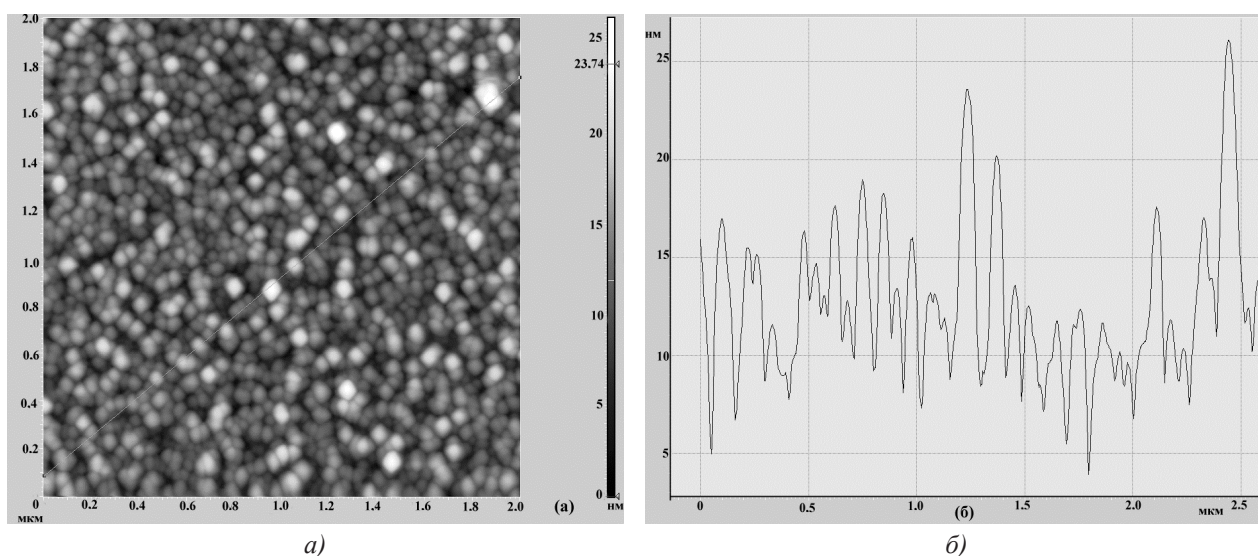


Рис. 4. АСМ-изображение (а) и профиль поверхности (б) гетероструктуры (90 %V₂O₅ + 10 %MnO₂)/InP после термооксидирования в режиме 500 °С, 60 минут (размер области сканирования 2 × 2 мкм²)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, добавление 10 мол.% MnO₂ к V₂O₅ приводит к заметным изменениям кинетических характеристик процесса (ЛЭ) по сравнению как с собственным оксидированием InP, так и с оксидированием гетероструктур V₂O₅/InP. Близость в пределах порядка значений ЭЭА исследуемого процесса и собственного оксидирования InP (210 и 270 кДж/моль соответственно) также подтвер-

ждает транзитный характер действия хемостимулятора в рассматриваемой системе, при этом (90 %V₂O₅ + 10 %MnO₂) оказывает положительное воздействие, что проявляется в химическом связывании индия и блокировке его диффузии в пленку (данные СЭ) и достаточно больших значениях относительного увеличения толщины пленки. Однако, несмотря на то, что в сравнении с гетероструктурой V₂O₅/InP значение ЭЭА резко увеличивается (на порядок), применение изучаемого ком-

позитного хемостимулятора выявило и положительное влияние на характеристики плёнок, а именно на состав и морфологию поверхности. По данным РФА сформированные плёнки помимо компонентов, образующихся при окислении гетероструктур V_2O_5/InP , содержат фосфат индия,

что в конечном итоге предполагает улучшение их электрофизических характеристик. Морфология поверхности выращенных плёнок по качеству превосходит как результаты собственного окисления InP , так и InP , модифицированного оксидом ванадия (V).

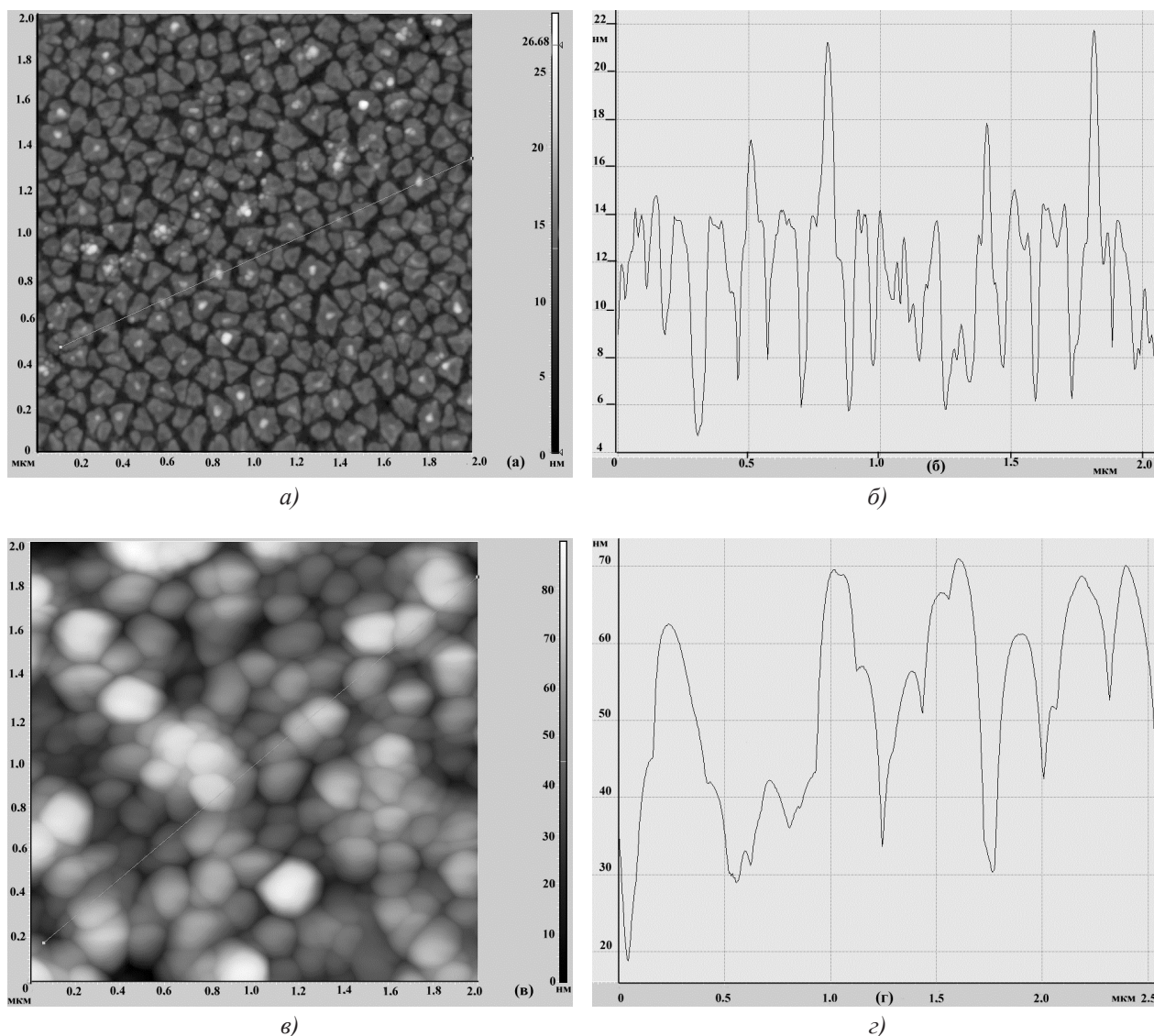


Рис. 5. АСМ-изображения (а, в) и профиль поверхности (б, г) InP и гетероструктуры V_2O_5/InP после термоокисления в режиме $500\text{ }^\circ\text{C}$, 60 минут (размер области сканирования $2 \times 2\text{ }\mu\text{m}^2$)

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ВУЗам в сфере научной деятельности на 2014—2016 годы (проект № 225) и поддержана грантом РФФИ № 16-43-360595 р_а.

Исследования проведены с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием Воронежского государственного университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Werner Martienssen Prof., Hans Warlimont Prof. *Springer handbook of condensed matter and materials data. Functional Materials. Part 4 — Semiconductors.* Springer Berlin Heidelberg, 2005, p. 575—694.
2. Arbiol J., Xiong Q. *Semiconductor Nanowires: Materials, Synthesis, Characterization and Applications.* Elsevier Ltd, 2015, 554 p.

3. Рудь В. Ю., Рудь Ю. В., Теруков Е. И., Ушакова Т. Н. // *ФТП*, 2012, Т. 46, вып. 6, с. 798—801.

4. Миттова И. Я. // *Неорг. матер.*, 2014, т. 50, № 9, с. 948—955.

5. Иевлев В. М., Миттова И. Я., Самсонов А. А., Томина Е. В., Кашкаров В. М. // *Доклады Академии наук*, 2007, т. 417, № 4, с. 497—501.

6. Миттова И. Я., Томина Е. В., Лапенко А. А., Сладкопцевцев Б. В. // *Наносистемы: физика, химия, математика*, 2012, т. 3, № 2, с. 116—138.

7. Tompkins H. G., Irene E. A. *Handbook of ellipsometry*. William Andrew Publishing, Springer, 2005, 870 p.

8. Миттова И. Я., Швеиц В. А., Томина Е. В., Самсонов А. А., Сладкопцевцев Б. В., Третьяков Н. Н. // *Неорг. матер.*, 2013, т. 49, № 10, с. 1037—1044.

THERMAL OXIDATION OF INDIUM PHOSPHIDE SURFACE, MODIFIED BY (90 %V₂O₅ + 10 % MnO₂) MIXTURE

©2016 N. N. Tretyakov, V. E. Shchedrina,
B. V. Sladkoptsev, A. A. Samsonov, I. Ya. Mittova

Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, 394006 Voronezh, Russia
e-mail: nikostretyakov@gmail.com

Recived 27.04.2016

Abstract. The purpose of this work was to establish the influence of the mixture (90 %V₂O₅ + 10 %MnO₂) deposited by the method of magnetron sputtering, on the kinetics of InP thermal oxidation, composition and surface morphology compared to the oxidation of a «clean» InP surface and V₂O₅/InP heterostructures. It was shown that the modification of the InP surface by the composite chemical stimulator V₂O₅ + MnO₂, containing a small amount of MnO₂ (10 mol.%), leads to noticeable changes in the kinetic characteristics of the process compared to both the oxidation of «clean» InP, as well as when used deposited layers of V₂O₅ chemical stimulator. It was found that the process is characterized by higher values of the relative increase of the film thickness (an average of 2—5 times). The effective activation energy is high enough and comparable to those for the oxidation of InP (210 and 270 kJ/mol respectively). It revealed a positive effect of the composite modifier on the characteristics of films such as the composition and surface morphology. It was shown (by XRD method) that the grown film is enriched by one of the end products — phosphate indium — in comparison with oxidized V₂O₅/InP heterostructure. After thermal oxidation of the (90 %V₂O₅ + 10 %MnO₂)/InP heterostructure films were formed with a grain surface structure (average size of 50 nm) and a height of relief not exceeding 20 nm, which exceeds the similar characteristics of the V₂O₅/InP heterostructure.

Keywords: modifying, thermal oxidation, indium phosphide, vanadium oxide (V), manganese oxide (IV).

REFERENCES

1. Werner Martienssen Prof., Hans Warlimont Prof. *Springer handbook of condensed matter and materials data. Functional Materials. Part 4 — Semiconductors*. Springer Berlin Heidelberg, 2005, p. 575—694.

2. Arbiol J., Xiong Q. *Semiconductor Nanowires: Materials, Synthesis, Characterization and Applications*. Elsevier Ltd, 2015, 554 p.

3. Rud' V. Yu., Rud' Yu. V., Terukov E. I., Ushakova T. N. // *Fizika i tekhnika polupro-vodnikov* [Semiconductors], 2008, 2012, vol. 46, no. 6, p. 798—801. Available: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/7727>

4. Mittova I. Ya. // *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials], 2014, vol. 50, no. 9, pp. 948—955.

5. Ievlev V. M., Mittova I. Ya., Samsonov A. A., Tomina E. V., Kashkarov V. M. // *Doklady Akademii nauk*, 2007, vol. 417, no 4, p. 497—501.

6. Mittova I. Ya., Tomina E. V., Lapenko A. A., Sladkoptsev B. V. // *Nanosistemy: fizika, khimiya, matematika*, 2012, vol. 3, no 2, p. 116—138.

7. Tompkins H. G., Irene E. A. *Handbook of ellipsometry*. William Andrew Publishing, Springer, 2005, 870 p.

8. Mittova I. Ya., Shvets V. A., Tomina E. V., Samsonov A. A., Sladkoptsev B. V., Tret'yakov N.N. // *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials], 2013, vol. 49, no. 10, p. 1037—1044.

Третьяков Никита Николаевич — аспирант кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, тел.: +7 (952) 551 95 31, e-mail: nikostretyakov@gmail.com

Щедрина Валентина Евгеньевна — магистрант кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, тел.: +7 (950) 7720782, e-mail: mushu92@mail.ru

Сладкопевцев Борис Владимирович — к. х. н., преподаватель кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, тел.: +7 (950) 7720782, e-mail: dp-kmins@yandex.ru

Самсонов Алексей Алексеевич — к. х. н., научный сотрудник кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, тел.: +7 (903) 6536485, e-mail: samsonjr@mail.ru

Миттова Ирина Яковлевна — д. х. н., профессор кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, тел.: +7 (473) 2555439, e-mail: imittova@mail.ru

Tretyakov Nikita N. — postgraduate, Science of Materials and Industry of Nanosystems Department, Voronezh State University, ph.: +7 (952) 5519531, e-mail: nikostretyakov@gmail.com

Shchedrina Valentina E. — master's degree, Science of Materials and Industry of Nanosystems Department, Voronezh State University, ph.: +7(950) 7720782, e-mail: mushu92@mail.ru

Sladkopevtcev Boris V. — Cand. Sci. (Chem.), Lecturer, Science of Materials and Industry of Nanosystems Department, Voronezh State University, ph.: +7 (905) 6505334, e-mail: dp-kmins@yandex.ru

Samsonov Alexey A. — Cand. Sci. (Chem.), Researcher, Science of Materials and Industry of Nanosystems Department, Voronezh State University, ph.: +7(903) 6536485, e-mail: samsonjr@mail.ru

Mittova Irina Ya. — Dr. Sci. (Chem.), Full Professor, Science of Materials and Industry of Nanosystems Department, Voronezh State University, ph.: +7(473) 2555439, e-mail: imittova@mail.ru