

ОСОБЕННОСТИ ХЕМОСТИМУЛИРОВАННОГО ТЕРМООКСИДИРОВАНИЯ ФОСФИДА ИНДИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МЕТОДА НАНЕСЕНИЯ ХЕМОСТИМУЛЯТОРА V_2O_5 НА ПОВЕРХНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКА

© 2014 И. Я. Миттова, Е. В. Томина, Б. В. Сладкопевцев, А. А. Самсонов

*Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, 394006 Воронеж, Россия
e-mail: inorg@chem.vsu.ru*

Поступила в редакцию 05.11.2013 г.

Аннотация. Установлено, что реализация каталитического либо транзитного механизма хемотимулирующего действия V_2O_5 , нанесенного на поверхность InP, определяется методом формирования оксидируемой структуры — жестким или мягким. Жесткие методы — магнетронное распыление и электрический взрыв проводника — способствуют протеканию процесса оксидирования по каталитическому механизму. Мягкий метод модифицирования гелем V_2O_5 определяет транзитный механизм хемотимулированного оксидирования. Максимальная степень блокировки диффузии неокисленного индия в пленку достигается при использовании жесткого метода нанесения хемотимулятора на поверхность полупроводника — магнетронного распыления.

Ключевые слова: хемотимулированное оксидирование, фосфид индия, оксид ванадия (V), магнетронное распыление, электрический взрыв проводника.

ВВЕДЕНИЕ

Хемотимулированное оксидирование полупроводников $A^{III}B^V$ за счет смены механизма процесса по сравнению с собственным оксидированием позволяет целенаправленно изменять состав и свойства формирующихся оксидных пленок [1—3]. Методы нанесения хемотимулятора на поверхность можно разделить на две группы — жесткие и мягкие. Для жестких методов, использующих высокоэнергетические частицы или высокие температуры, характерно интенсивное воздействие на поверхность полупроводника, приводящее к взаимодействию слоя хемотимулятора с компонентами подложки уже в процессе нанесения. Вторая группа, аналогично методам мягкой химии, представляет собой относительно простые в реализации методы, протекающие при невысоких температурах и не влияющие интенсивно на поверхность полупроводника.

Уникальность физико-химической природы V_2O_5 [4] при его использовании в качестве хемотимулятора проявляется в возможности реализации как транзитного, так и каталитического меха-

низма термооксидирования, и позволяет модифицировать поверхность полупроводника как жесткими, так и мягкими методами. Переход от индивидуального хемотимулятора к композиции хемотимуляторов с участием V_2O_5 (например, $V_2O_5 + PbO$) позволяет установить смену механизмов хемотимулированного оксидирования полупроводника с каталитического на транзитный и использовать нелинейные эффекты совместного воздействия хемотимуляторов в целях тонкой регулировки состава и свойств пленок.

В качестве методов модифицирования поверхности фосфида индия слоем хемотимулятора в работе были выбраны магнетронное распыление, метод электрического взрыва проводника и осаждение диспергированного геля V_2O_5 из аэрозоля. Энергия распыленных частиц в несколько электронвольт при магнетронном нанесении хемотимулятора, высокие температуры и воздействие ультрафиолетового излучения, наблюдающиеся в момент электровзрыва проводника, позволяют рассматривать эти методы как жесткие [5, 6]. Осаждение геля V_2O_5 [7] из аэрозоля является малоэффективным для поверхности InP и реализуется без

обеспечения специальных условий при относительно невысоких температурах.

Целью данной работы являлось установление влияния метода нанесения V_2O_5 на поверхность InP на механизм хемостимулированного оксидирования сформированных структур и возможности блокирования диффузии неокисленного индия в растущие оксидные пленки с целью улучшения их электрофизических характеристик.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Слои хемостимуляторов нанометровой толщины наносили на полированные пластины фосфида индия марки ФИЭ-1А ориентации (100), легированные оловом с концентрацией основных носителей заряда при 300 К не менее $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, обработанные полирующим травителем состава H_2SO_4 (ХЧ ГОСТ-4204-77, 92.80 %): H_2O_2 (ОСЧ ТУ 6-02-570-750, 56%): $H_2O = 2 : 1 : 1$ в течение 10 мин и многократно промытые в бидистиллированной воде.

Для магнетронного нанесения хемостимулятора V_2O_5 и композиции хемостимуляторов $V_2O_5 + PbO$ разного состава на InP использовали модернизированную установку УВН-2М. Распыление индивидуальной ванадиевой и составной свинцово-ванадиевой мишени (чистота ванадия 99.20%, свинца 98.70%) осуществляли в кислородно-аргоновой атмосфере ($P_{O_2} = 1.2 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст.), расстояние до мишени составляло 10 см. Состав напыленных слоев контролировали методом локального рентгеноспектрального микроанализа (ЛРСМА; JXA-840, точность 0.05 %).

Наноостровковые структуры (V_2O_5)/InP, моделирующие активные примесные центры на поверхности полупроводника, синтезировали модифицированным методом электрического взрыва проводника согласно [8].

Гель оксида ванадия, синтезированный по методике [9], осаждали из аэрозоля на охлаждаемые с использованием элемента Пельтье полупроводниковые пластины InP. Время осаждения составило 3 минуты. Термический отжиг (ТО) слоев геля V_2O_5 на поверхности InP проводили при 300 °С на воздухе в течение 120 минут.

Все сформированные структуры термически оксидировали в проточном кварцевом реакторе горизонтальной печи резистивного нагрева (МТП-2М-50—500) с точностью регулировки температуры $\pm 1^\circ\text{C}$ (ОВЕН ТРМ-10) в температурном интервале 480—590 °С в потоке кислорода (30 л/ч). Максимальное время оксидирования составляло

120 мин, расчёт кинетических параметров проводился для временного интервала 1—60 мин. Выбор режимов оксидирования обусловлен максимальным ускорением роста оксидных пленок по сравнению с собственным оксидированием фосфида индия и началом термической деструкции полупроводника при температуре выше 600 °С.

Толщину осажденных слоев и сформированных оксидированием плёнок контролировали методом лазерной эллипсометрии (ЛЭФ-754, $\lambda = 632.8 \text{ нм}$, абсолютная погрешность $\pm 1 \text{ нм}$). Для подтверждения данных лазерной эллипсометрии на спектральном эллипсометре «Эллипс-1891» снимали зависимости эллипсометрических параметров от длины волны и решали обратную задачу с использованием дисперсионной модели Коши и модели Бругемана [10].

На основании эллипсометрических измерений рассчитывали относительное увеличение толщины плёнки по сравнению с собственным оксидированием, используя формулу:

$$b = \frac{\Delta d_{V_xO_y/InP} - \Delta d_{InP}}{\Delta d_{InP}} \cdot 100\%,$$

где Δd_{InP} — изменение толщины оксидной плёнки при оксидировании чистого фосфида индия, а $\Delta d_{V_xO_y/InP}$ — изменение толщины оксидной плёнки при оксидировании гетероструктур с нанесённым слоем хемостимулятора за вычетом толщины последнего.

Морфологию поверхности образцов после термооксидирования исследовали методами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ, комплекс нанотехнологического оборудования «УМКА») и растровой электронной микроскопии (РЭМ, JEOL JSM-6380 LV).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Механизм термооксидирования фосфида индия предопределяет формирование собственного оксида с невысокими диэлектрическими свойствами. Собственные оксидные пленки на InP представляют собой фосфаты, в которых атомное отношение O/P изменяется от 3 до 4 [11], и должны проявлять диэлектрические свойства. Однако протекание взаимодействия между оксидом индия и диффундирующим фосфором, в результате чего образуется неокисленный индий, способствует металлизации растущих оксидных пленок на поверхности InP и появлению омической проводимости. Это подтверждается спектрально-эллипсометрическими исследованиями образца InP, покрытого собствен-

ным оксидом, выращенном в режиме 500 °С, 2 часа [10]. Величина поглощения k данной оксидной пленки достигает значений 0.3. Согласно модели Бругемана, рассматривающей пленку как смесь диэлектрической матрицы с металлическими включениями [10], полученную величину поглощения в собственном оксиде можно объяснить включениями индия, объемное содержание которого должно составлять порядка 7—8%. Таким образом, собственное окисление фосфида индия не приводит к формированию качественных диэлектрических пленок на поверхности полупроводника.

Хемостимулятор V_2O_5 на поверхности фосфида индия изменяет механизм процесса по сравнению с собственным окислением, предопределяя его течение в зависимости от метода нанесения. В результате обработки кинетических данных процесса окисления магнетронно сформированных структур V_2O_5/InP (25 нм) с использованием уравнения $d = (kt)^n$ установлено резкое снижение эффективной энергии активации (ЭЭА) процесса (30 кДж/моль, табл. 1) по сравнению с собственным окислением InP (273 кДж/моль).

Таблица 1. Кинетические параметры процессов хемостимулированного окисления InP в зависимости от метода нанесения V_2O_5 на поверхность полупроводника

Структура	$T, ^\circ C$	$n_{ср}, \text{нм}^{1/n} \text{мин}^{-1}$	ЭЭА, кДж/моль	Относительное увеличение толщины плёнки по сравнению с собственным окислением, %
V_2O_5/InP (25 нм) магнетронное распыление	500—590	0.20±0.071	30	до 110
$(V_2O_5 + PbO) / InP$ магнетронное распыление V_2O_5 —10 мол%	400—550	0.16±0.05	113	до 70
$(V_2O_5 + PbO) / InP$ магнетронное распыление V_2O_5 —30 мол%	400—550	0.23±0.06	86	до 100
$(V_2O_5 + PbO) / InP$ магнетронное распыление V_2O_5 —40 мол%	400—550	0.23±0.07	70	до 130
$(V_2O_5 + PbO) / InP$ магнетронное распыление V_2O_5 —60 мол%	400—550	0.20±0.06	43	до 170
$(V_2O_5 + PbO) / InP$ магнетронное распыление V_2O_5 —75 мол%	400—550	0.26±0.04	32	до 190
V_2O_5/InP nanoостровковые структуры	на начальном этапе процесса	480—550	60—70	до 80
	на развитом этапе процесса	480—550	0.23±0.019	Практически отсутствует
V_xO_y/InP , сформированные с использованием геля оксида ванадия (V)	480—580	0.29±0.021	210	15—20

Одновременно наблюдающееся при этом значительное увеличение темпа прироста пленок (от 70% до 110% в зависимости от температуры) практически не зависит от времени процесса и количества нанесённого на полупроводник оксида ванадия (V) [12]. Все вышеизложенное свидетельствует в пользу синхронного каталитического механизма оксидирования [13] фосфида индия с нанесёнными слоями V_2O_5 наноразмерной толщины. Спектрально-эллипсометрическое исследование пленки, выращенной оксидированием магнетронно сформированной структуры V_2O_5/InP в режиме 500 °С, 60 мин, показывает весьма незначительную величину поглощения k , равную 0.02 [14]. Согласно модели Бругемана такое поглощение можно интерпретировать малым включением индия на уровне 0.5%. Ранее методом вторичной ионной масс-спектрометрии в образцах V_2O_5/InP , оксидированных при 500 °С за 5—10 минут, обнаружен In_2O_3 с небольшим содержанием металлического индия, что было интерпретировано как внедрение индия в решётку оксида за счёт нестехиометричности самого оксида [15]. Таким образом, магнетронное нанесение хемостимулятора V_2O_5 на поверхность фосфида индия практически блокирует диффузию неокисленного индия в оксидную пленку при последующем термооксидировании сформированной гетероструктуры.

Использование вместо индивидуального хемостимулятора композиции, в которой один хемостимулятор является катализатором, а другой транзитором, способствует выявлению смены механизмов хемостимулированного оксидирования полупроводника с каталитического на транзитный. Нанесение на поверхность фосфида индия композиции оксидов V_2O_5+PbO позволяет проследить динамику уменьшения каталитического действия V_2O_5 в ходе оксидирования при постепенном увеличении в композиции содержания PbO , являющегося транзитором кислорода для компонентов InP [16]. Из табл. 1 видно, что для процесса оксидирования структур $(V_2O_5+PbO)/InP$ с различным составом сложного хемостимулятора значения ЭЭА закономерно возрастают с увеличением содержания оксида свинца в нанесенной композиции, что подтверждает усиление транзитной составляющей хемостимулированного оксидирования полупроводника. Однако даже для композиции V_2O_5+PbO с минимальным из исследуемых содержанием V_2O_5 в 10 мол% ЭЭА процесса оксидирования в два раза меньше по сравнению с собственным оксидированием InP . Темп прироста толщины оксидных пленок также уменьшается

с уменьшением содержания V_2O_5 в нанесенной композиции. Значения ускорения процесса по сравнению с собственным оксидированием InP для композиций, содержащих более 40 мол% V_2O_5 , при определенных температурно-временных режимах оксидирования даже превышают таковые для оксидирования структуры V_2O_5/InP (табл. 1), что объясняется облегчением диффузионных процессов в растущей пленке при включении в неё объемных атомов свинца.

Спектрально-эллипсометрическое исследование пленки, сформированной оксидированием структуры $(V_2O_5+PbO)/InP$ с содержанием V_2O_5 40% при 475 °С в течение 70 мин, обнаруживает очень слабое поглощение (k не превышает 0.1) [14]. Содержание индия в рамках модели гетерогенной среды в таком случае составляет около 1%. Таким образом, при использовании композиции V_2O_5+PbO вместо индивидуального хемостимулятора V_2O_5 также наблюдается выраженная блокировка диффузии неокисленного индия в растущую пленку. Это позволяет сделать вывод об определяющей роли метода магнетронного распыления хемостимулятора на поверхность полупроводника для синтеза пленок с улучшенными по сравнению с собственным оксидированием InP электрофизическими характеристиками. Согласно [17] значения электрической прочности таких образцов достигают $7.1—8.6 \cdot 10^5$ В/см, а удельного сопротивления — $6—6.8 \cdot 10^8$ Ом·см.

Для nanoостровковых структур V_2O_5/InP процесс оксидирования начинается именно на искусственно созданных активных центрах хемостимулятора и протекает в два этапа [18]. Наибольшее воздействие островков проявляется на начальном этапе (в среднем до 10 минут) и заключается в значительном увеличении скорости роста пленок и уменьшении ЭЭА по сравнению с собственным оксидированием InP . Оценочный расчёт ЭЭА для изохронных сечений 5 и 10 минут оксидирования даёт значения 60 и 70 кДж/моль соответственно, что в совокупности с установленным ускорением в 50—80% позволяет сделать вывод о синхронном механизме каталитического действия островков V_2O_5 на начальном этапе процесса. На развитом этапе значение ЭЭА, равное 284 кДж/моль (табл. 1), практически совпадает с таковым для собственно оксидирования фосфида индия (273 кДж/моль). Значения n в интервале от 0.1 до 0.3 в совокупности с достаточно высокой ЭЭА свидетельствуют о том, что на этом этапе определяющий процесс не является каталитическим, а отвечает твердофазным

взаимодействиям первичных продуктов оксидирования (оксидов индия и фосфора) с преимущественным образованием фосфатов.

Исследование на спектральном эллипсомере пленки, выращенной оксидированием островковой структуры V_2O_5/InP в режиме $500\text{ }^\circ\text{C}$, 60 минут, с использованием модели Бругемана выявило значительное содержание индия — до 17% [10]. Это связано с малым количеством хемостимулятора и его локальным распределением в виде островков, проявляющих своё основное действие (интенсификация связывания индия кислородом) на начальном этапе, а далее процесс, по сути, представляет собой собственное оксидирование фосфида индия.

Таким образом, заблокировать поступление индия в пленку при нанесении V_2O_5 в виде островков на поверхность InP не удастся, однако хемостимулятор интенсифицирует оксидирование на началь-

ном этапе (до 50—80%), обуславливая протекание его по каталитическому механизму.

Для процесса оксидирования структур V_xO_y/InP , сформированных мягким методом, значение ЭЭА (210 кДж/моль) несколько снижено по сравнению с ЭЭА процесса собственного оксидирования InP , однако является величиной того же порядка (табл. 1). Это свидетельствует о транзитном характере взаимодействия нанесенного хемостимулятора V_2O_5 с компонентами полупроводниковой подложки при оксидировании. Относительное ускорение роста пленок невелико — 20—30% по сравнению с собственным, причем с развитием во времени ускорение уменьшается, что характерно для процессов хемостимулированного оксидирования, протекающих по транзитному механизму. Это связано с расходом хемостимулятора, диффузией ванадия в подложку

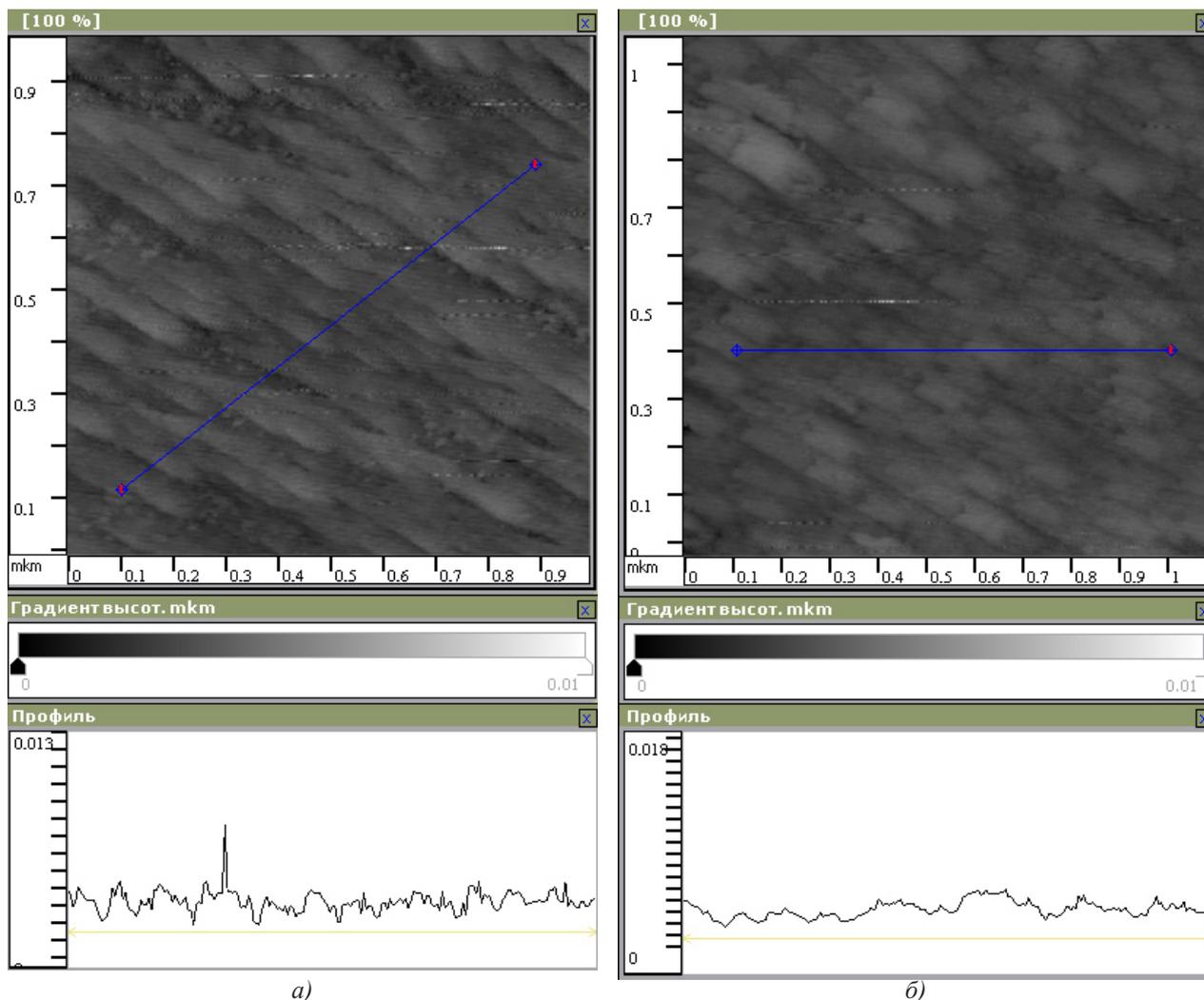


Рис. 1. СТМ-изображения поверхности гетероструктур V_xO_y/InP (ТО, $300\text{ }^\circ\text{C}$, 120 мин), оксидированных в режимах $530\text{ }^\circ\text{C}$, 60 мин (а) и $550\text{ }^\circ\text{C}$, 60 мин (б)

и соответственно неполной регенерацией активной формы ванадия в степени окисления +5 в ходе оксидирования. Спектрально-эллипсометрическое исследование с использованием модели Бругемана образца V_xO_y/InP , сформированного мягким методом и оксидированного в режиме 500 °С, 2 часа, показывает наличие в пленке несвязанного индия, содержание которого составляет 6.6% [10]. Примерно такое же содержание индия отмечено и в пленках, сформированных собственным термооксидированием фосфида индия. Таким образом, модифицирование поверхности InP оксидом ванадия (V) мягким методом с последующим оксидированием не блокирует поступление несвязанного индия в формирующиеся пленки, однако способствует их ускоренному формированию с относительно гладкой поверхностью и варьируемым составом [9]. По данным СТМ (рис. 1а, б) для сформированных мягкими методами гетероструктур, прошедших предварительный термический отжиг и последующее термооксидирование в режимах 530 °С, 60 мин и 550 °С, 60 мин, поверхность является достаточно гладкой, высота рельефа в ряде случаев не превышает 10—15 нм. Это проявляется даже при достаточно высоких температурах оксидирования (550 °С и выше), когда, например, для сформированных методом электровзрыва образцов уже видна значительная эрозия поверхности.

Для магнетронно сформированных гетероструктур в зависимости от режима оксидирования возможно получение наноструктурированных плёнок [19]. При оксидировании структур, сформированных методом электровзрыва проводника, растущие оксидные плёнки наследуют островковую структуру исходной поверхности (рис. 2).

Таким образом, метод нанесения хемостимулятора на поверхность полупроводника в значительной мере определяет и морфологию формирующихся при термооксидировании оксидных плёнок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод нанесения хемостимулятора V_2O_5 на поверхность фосфида индия (жесткий или мягкий) предопределяет механизм хемостимулированного оксидирования сформированных гетероструктур. В случае магнетронного напыления (жесткий метод) слоев оксида ванадия (V) реализуется синхронный каталитический механизм оксидирования за счет того, что граница хемостимулятор-полупроводник играет роль активного центра, на котором интенсивно развиваются взаимодействия V_2O_5 с компонен-

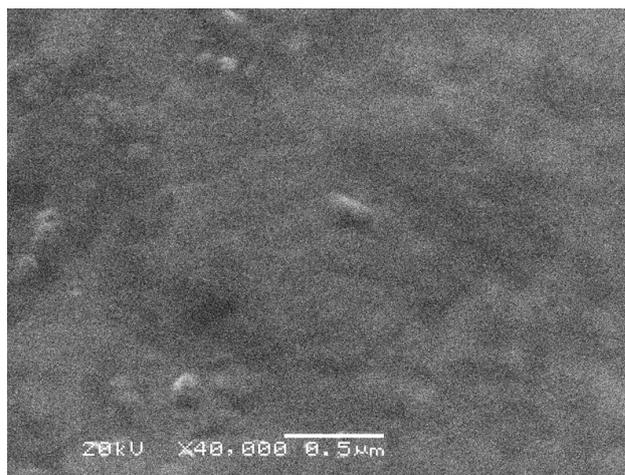


Рис. 2. РЭМ-изображение поверхности InP с нанесёнными островками V_2O_5 после 60 минут оксидирования при 550 °С

тами подложки. Каталитический вклад V_2O_5 при магнетронном формировании структур сохраняется и при использовании композиции хемостимуляторов (катализатор + транзитор), содержащей небольшое количество пентаоксида ванадия (10 мол.%). Использование жесткого метода электровзрыва проводника для модифицирования поверхности InP способствует реализации каталитического механизма действия наностроек V_2O_5 на начальном этапе оксидирования. Хемостимулированное оксидирование структур V_xO_y/InP , сформированных мягким методом диспергирования геля V_2O_5 , протекает по транзитному механизму. Максимальная блокировка диффузии несвязанного индия в растущие оксидные пленки согласно данным спектральной эллипсометрии достигается при магнетронном распылении хемостимулятора на поверхность InP.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ВУЗам в сфере научной деятельности на 2014—2016 годы (проект № 673) и поддержана грантом РФФИ № 13-03-00705-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лапенко А. А., Лисицын С. В., Томина Е. В. и др. // Неорган. материалы. 2008. Т. 44. № 11. С. 1293—1299 (Lapenko A. A., Lisitsyn S. V., Tomina E. V. et al. // Inorganic Materials. 2008. V. 44. № 11. P. 1163—1168).
2. Mittova I. Ya., Tomina E. V., Samsonov A. A. et al. // Inorganic Materials. 2005. Т. 41. № 4. С. 323—330.
3. Mittova I. Ya., Tomina E. V., Lapenko A. A. et al. // Inorganic Materials. 2004. Т. 40. № 5. С. 441—444.
4. Beke S. // Thin Solid Films. 2011. V. 519. P. 1761—1771.

5. Кузьмичев А. И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. К.: Аверс, 2008. 244 с.
6. Ильин А. П., Назаренко О. Б. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2008. Т. 51. Вып. 7. С. 61—64.
7. Mandouh El Z. S., Selim M. S. // Thin Solid Films. 2000. V. 37. № 1. P. 259—263.
8. Миттова И. Я., Томина Е. В., Лапенко А. А. и др. // Неорган. материалы. 2010. Т. 46. № 4. С. 441—446 (Mittova I. Ya., Tomina E. V., Lapenko A. A. et al. // Inorganic Materials. 2010. V. 46. № 4. P. 383—388).
9. Сладкопеев Б. В., Миттова И. Я., Томина Е. В. и др. // Неорган. материалы. 2012. Т. 48. № 2. С. 205—212 (Sladkoptsev B. V., Mittova I. Ya., Tomina E. V. et al. // Inorganic Materials. 2012. V. 48. № 2. P. 161—168).
10. Миттова И. Я., Швец В. А., Томина Е. В. и др. // Неорган. материалы. 2013. Т. 49. № 2. С. 173—179 (Mittova I. Ya., Shvets V. A., Tomina E. V. et al. // Inorganic Materials. 2013. V. 49. № 2. P. 179—184).
11. Hollinger G., Bergibnat E., Joseph J. // Jnl. Vac. Set. Technol. 1985. V. A3. P. 2082.
12. Миттова И. Я., Свиридова В. В., Семёнов В. Н. // Изв. АН СССР, сер. Неорган. материалы. 1991. Т. 27. № 12. С. 2491—2494.
13. Крылов О. В., Шуб Б. П. Неравновесные процессы в катализе. М.: Химия, 1990. 284 с.
14. Миттова И. Я., Швец В. А., Томина Е. В. и др. // Неорганические материалы. 2013. Т. 49. № 10. С. 1037—1044 (Mittova I. Ya., Shvets V. A., Tomina E. V. et al. // Inorganic Materials. 2013. V. 49. № 10. P. 963—970).
15. Миттова И. Я., Томина Е. В., Лапенко А. А. и др. // Физика и химия стекла. 2011. Т. 37. № 2. С. 304—309 (Mittova I. Ya., Tomina E. V., Lapenko A. A. et al. // Glass Physics and Chemistry. 2011. V. 37. № 2. P. 230—234).
16. Миттова И. Я., Пишестанчик В. Р., Малышев О. М. // Изв. АН СССР, сер. Неорган. материалы. 1992. Т. 28. № 5. С. 2041—2044.
17. Самсонов А. А., Миттова И. Я., Валухов Д. П. и др. // Неорган. материалы. 2011. Т. 47. № 2. С. 138—145 (Samsonov A. A., Mittova I. Ya., Valukhov D. P. et al. // Inorganic Materials. 2011. V. 47. № 2. P. 100—106).
18. Миттова И. Я., Сладкопеев Б. В., Томина Е. В. и др. // Неорган. материалы. 2011. Т. 47. № 8. С. 901—906 (Mittova I. Ya., Sladkoptsev B. V., Tomina E. V. et al. // Inorganic Materials. 2011. V. 47. № 8. P. 811—815.).
19. Третьяков Н. Н., Миттова И. Я., Чижов А. С. и др. // Журнал общей химии. 2013. Т. 83. № 8. С. 1360—1364 (Tret'yakov N. N., Mittova I. Ya., Chizhov A. S. et al. // Russian Journal of General Chemistry. 2013. V. 83. № 8. P. 1589—1593).

Миттова Ирина Яковлевна — д. х. н., профессор, профессор кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет; тел.: (473) 2208356, e-mail: imittova@mail.ru

Томина Елена Викторовна — к. х. н., доцент, доцент кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет; тел.: (473) 2208356, e-mail: tomina-e-v@yandex.ru

Сладкопеев Борис Владимирович — к. х. н., преподаватель кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет; тел.: (473) 2208356, e-mail: dp-kmins@yandex.ru

Самсонов Алексей Алексеевич — ассистент кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет; тел.: (473) 2208356; тел.: (903) 6536485, e-mail: samsonjr@mail.ru

Mittova Irina Y. — Dr. Sci. (Chem.), Professor, Professor of Materials Science and Industry of Nanosystems Chair, Voronezh State University; tel.: (473) 2208356, e-mail: imittova@mail.ru

Tomina Elena V. — Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Materials Science and Industry of Nanosystems Chair, Voronezh State University; tel.: (473) 2208356, e-mail: tomina-e-v@yandex.ru

Sladkoptsev Boris V. — Cand. Sci. (Chem.), Lecturer of Materials Science and Industry of Nanosystems Chair, Voronezh State University; tel.: (473) 2208356, e-mail: dp-kmins@yandex.ru

Samsonov Alexey A. — Assistant of Materials Science and Industry of Nanosystems Chair, Voronezh State University; tel.: (903) 6536485, e-mail: samsonjr@mail.ru