

быстрее проводит окислительный процесс и, следовательно, в нашем случае мы имеем значительное увеличение фазы магнетита.

Так же были проведены дополнительные исследования полученного материала. Часть полученного порошка оксида железа была подвергнута температурному влиянию, нагрев происходил в течение часа при температуре 600°C. Необходимо было рассмотреть изменения магнитных свойств и размеров частиц оксидов железа под влиянием температуры и времени.

Вывод. Приведенные экспериментальные данные показали возможность синтеза нанодисперсных гетерофазных порошков оксида железа новым плазмодинамическим методом с относительно высокой производительностью и низкими энергетическими затратами.

Магнитные свойства nano размерных частиц определяются многими факторами – химический состав, тип кристаллической решетки, размер и форма, так же и взаимодействие их с другими частицами. Изменяя размеры, форму и состав частиц можно в определенных пределах управлять магнитными характеристиками материалов на их основе. Однако, контролировать все эти факторы при плазмодинамическом синтезе удастся далеко не всегда, поэтому и свойства однотипных материалов могут различаться.

Список литературы:

1. Губин С.П., Кокшаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства// Успехи химии. – 2005. – №74(6). – С.539-574.
2. Осипов В.В., Платонов В.В., Уймин М.А., Подкин А.В. Лазерный синтез нанопорошков магнитных оксидов железа// Журнал технической физики. – 2012. – Т.82. – №4. – С.123-129.
3. Лютоев А.А., Смирнов Ю.Г. Моделирование поведения магнитных наночастиц в жидкой среде с целью разработки технологии очистки загрязненных нефтью сточных вод// Информационные технологии в управлении и экономике. – 2012. – №2. – Ухта, УГТУ.
4. Сивков А.А., Найден Е.П., Герасимов Д.Ю. Прямой динамический синтез нанодисперсного нитрида титана в высокоскоростной импульсной струе электроэрозионной плазмы// Сверхтвердые материалы. – 2008. – №5(175). – С.33-39.
5. Найден Е.П., Итин В.И., Магаева А.А., Терехова О.Г. Процессы старения в наноразмерных порошках феррошпинелей// Физика твердого тела. – 2009. – Т.51. – в.8. – С.1576-1579.

Исследование морфологии тонкопленочного гетероперехода $p\text{-SnS}/n\text{-ZnO}$

Дронова М. В.
dronova.mariya@mail.ru

Научный руководитель: к.т.н., доцент, Ан В.В., кафедра наноматериалов и нанотехнологий, ТПУ

В работе представлены результаты исследования морфологии тонкопленочного гетероперехода $p\text{-SnS}/n\text{-ZnO}$, полученного методом магнетронного распыления в DC

и HF режимах. Определены основные параметры структуры пленок с использованием инструмента визуализации и анализа АСМ-изображений Gwyddion, а также их элементный состав.

Сульфид олова – многообещающий полупроводниковый материал для фотовольтаики с высоким коэффициентом поглощения и оптимальным значением ширины запрещенной зоны равной 1.3 эВ [1].

Большинство существующих методов синтеза пленок SnS (термическое испарение [2], гидрохимическое осаждение из водных сред [3]), плазмохимическое осаждение, молекулярная эпитаксия) обладают рядом существенных недостатков. Для первых двух случаев характерны малая скорость нанесения покрытия, небольшой выход материала в вопросах промышленного применения. Основной недостаток для последних двух методов заключается в повышении пористости пленки и неравномерного распределения осаждаемых элементов по толщине за счет протекания неоднородных газовых потоков в вакуумном объеме [4].

Наряду с этим, большой интерес для получения тонкопленочных структур с низкой стоимостью и стабильностью процесса при высокой скорости осаждения напыляемого материала представляет собой метод магнетронного распыления [5].

Типичный гетеропереход, базирующийся на тонкопленочных технологиях содержит: сплошной тыльный контакт (Ag), полупроводник *p*-типа (SnS) и лицевое покрытие *n*-типа (ZnO). Значительный интерес при исследовании гетеропереходов такого типа связан с анализом топографии, являющийся первоначальным базовым этапом перед тем, как переходить к рассмотрению оптоэлектрических процессов, протекающих на границе раздела *p*-SnS/*n*-ZnO. В связи с этим, в данной работе изучены параметры поверхности тонкопленочного гетероперехода Ag/*p*-SnS/*n*-ZnO, полученного магнетронным распылением.

Однослойные пленки Ag, SnS, ZnO, а также многослойные тонкопленочные гетеропереходы Ag/SnS/ZnO напылялись на керамические подложки методом магнетронного распыления на установке ННВ-6 «Булат» при параметрах, подробно описанных в Таблице 1. Для предварительной ионно-плазменной очистки подложек установка оснащена ионным источником с замкнутым дрейфом электронов. Время очистки 5 минут, ток пучка 10 мА, напряжение 1000 В.

Напыление образцов проводили в атмосфере аргона при давлении газа равным $6 \cdot 10^{-3}$ Па. Расстояние между мишенью и подложками составляло 55 мм.

Для анализа морфологии пленочных структур использовали атомно-силовой микроскоп (АСМ) «Ntegra-Aura» с полем сканирования 40×40 мкм в полуконтактном режиме с использованием кремниевых кантилеверов NSG01. Обработка и анализ АСМ-изображений осуществлялись с помощью программного модуля Gwyddion. На основе функциональных возможностей программного модуля Gwyddion определяли следующие параметры: средняя шероховатость R_a , поверхностная пористость P_{surf} и средний размер пор D_{por} . Согласно [6], поверхностная пористость определяется как:

$$P_{surf} = \frac{S_{por}}{S_{scan}},$$

где S_{por} – площадь, занимаемая порами, S_{scan} – площадь всего снимка.

Элементный анализ проводили методом оптической спектроскопии высокочастотного тлеющего разряда (RF-GD-OES) Gd-Profilер2 в постоянном режиме.

Таблица 1. Условия напыления

Мишень	Ag	SnS	ZnO
Остаточное давление	$6 \cdot 10^{-3}$ Па		
Мощность режима	HF, W=100 Вт ; F=100 кГц; D=80%	DC, W =40 Вт	DC, W=40 Вт
Давление газа	2–2,5 Па		
Расстояние мишень-подложка	55 мм		
Рабочая среда (газ)	Аргон	Аргон	Аргон
Температура подложки	комнатная	комнатная	120–125°C
Время напыления, мин	2	3	5

Визуализация поверхностных параметров для образцов Ag, SnS и ZnO проводилась с помощью атомно-силовой микроскопии, результаты исследования представлены на Рисунке 1. Результаты АСМ-анализа позволяют предположить механизм роста пленок в системе p -SnS/ n -ZnO по Фольмеру-Вебера. Такой механизм предполагает зарождение пленки путем образования изолированных трехмерных островков – зародышей с последующим ростом и их увеличением в размерах до образования сплошной пленки [7]. Экспресс-анализ по определению толщины, а также значения средней шероховатости R_a исследуемого гетероперехода представлены в Таблице 2.

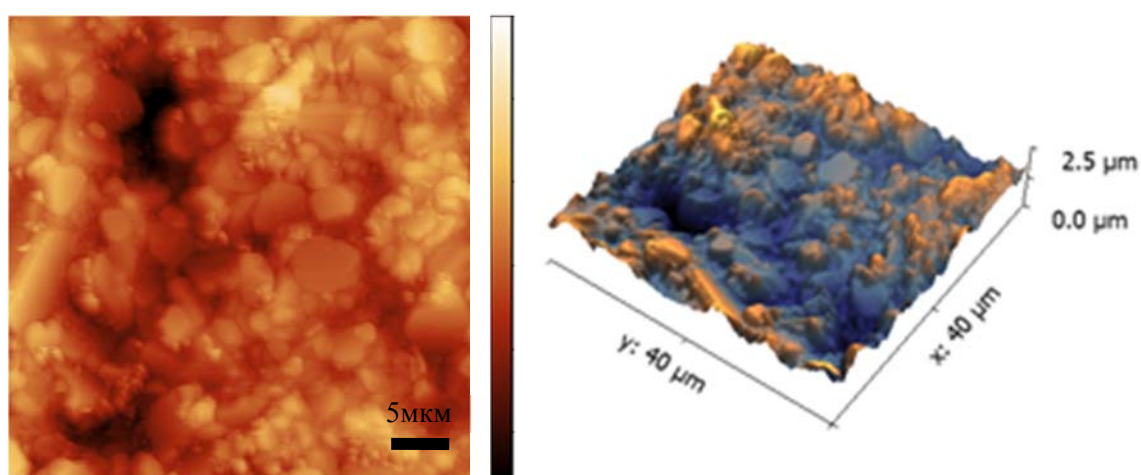


Рисунок 1. АСМ-снимок поверхности тонкопленочного гетероперехода Ag/ p -SnS/ n -ZnO в 2D и 3D вариациях

Таблица 2. Результаты по определению средней высоты профиля R_z и средней шероховатости R_q пленок Ag, SnS, ZnO и всего гетероперехода Ag/p-SnS/n-ZnO на керамической подложке

Образец	Средняя высота профиля R_z , нм	Средняя шероховатость R_a , нм
Ag	≈90	73
SnS	≈50	56
ZnO	≈20	50
Ag/p-SnS/n-ZnO	≈ не более 200	15

Параметры P_{surf} и D_{por} для каждого из образцов, полученные с помощью программного модуля Gwyddion, приведены в Таблице 3.

На всех АСМ-снимках помимо частиц напыляемого образца наблюдаются также крупные зерна керамической подложки. Топография тонких пленок характеризуются расположением некоторого числа глубоких впадин порядка 6-8 мкм в связи с большой неоднородностью самой подложки, число которых в полностью сформированной структуре Ag/p-SnS/n-ZnO заметно снижается, и параметр шероховатости падает до значения 15 нм.

Уменьшение пористости и соответственно размера пор в системе «Подложка–Ag–SnS–ZnO» можно связать с постепенным заполнением пустот, вызванных большой шероховатостью керамики частицами серебра, сульфида олова и оксида цинка, что способствует созданию более однородной структуры. Характерный размер пор в структуре Ag/p-SnS/n-ZnO достигает порядка 1,04 мкм, значение поверхностной пористости составляет 1,8%.

Таблица 3. Результаты по определению P_{surf} и D_{por} исследуемых образцов

	P_{surf} , %	D_{por} , мкм
Ag	5,6	1,28
Ag/p-SnS	3,6	1,07
Ag/p-SnS/n-ZnO	1,8	1,04

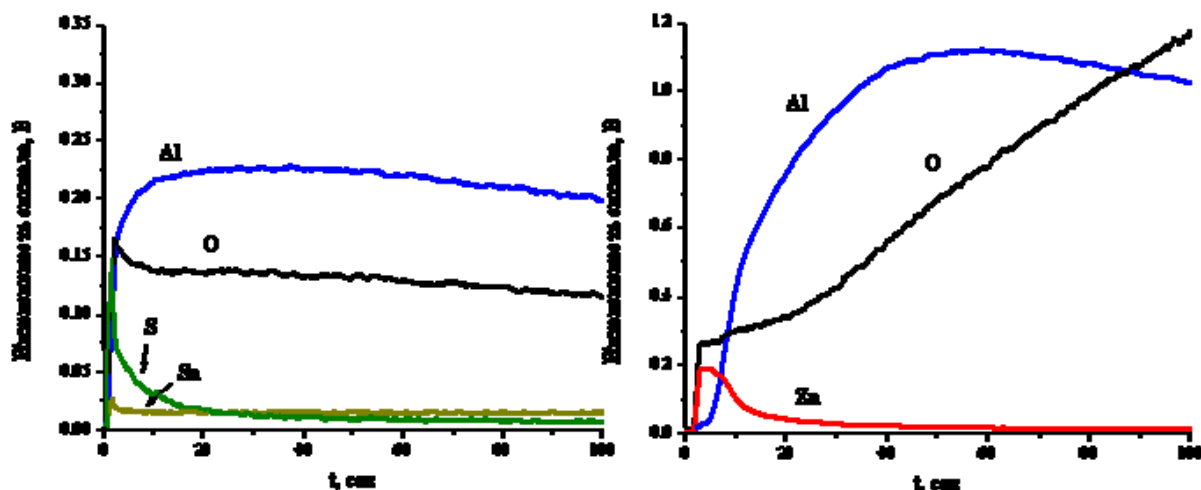


Рисунок 2. Результаты элементного анализа пленок SnS, ZnO на спектрометре тлеющего разряда

Качественные профили пленок сульфида олова и оксида цинка представлены на Рисунке 2. По четко сформированным полочкам на начальных этапах распыления для Zn, O и Sn, S элементов можно предположить об образовании фаз Zn_xO_y и Sn_xS_y . С увеличением времени распыления аргона, а, соответственно, и продвижением вглубь поперечного сечения образцов интенсивность кривых для Al и O, являющихся элементами используемых подложек, растет. Малую интенсивность линий для Zn, O и Sn, S можно связать с достаточно небольшой толщиной исследуемых образцов, которая была определена по АСМ-снимкам в программном модуле Gwyddion.

Таким образом, исследуемый гетеропереход характеризуется небольшой пористостью и шероховатостью, отчасти вызванной влиянием керамических пластин. Толщина всего гетероперехода составляет не более 200 нм. Результаты элементного анализа подтвердили наличие напыляемых элементов в образцах.

Список литературы:

1. S.A. Bashkirov, V.F Gremenok, V.A. Ivanov, V.V. Lazenka, K. Bente // Thin Solid Films, v. 520, pp. 5807–5810, (2012);
2. P.A. Nwofe, K.T. Ramakrishna Reddy, J.K. Tan, I. Forbes, R.W. Miles // Physics Procedia, v. 25, pp.150–157, (2012);
3. Федорова Е.А., Базанова Е.А., Маскаева Л.Н., Марков В.Ф. Механизм формирования пленок SnS химическим осаждением из водных растворов
4. Удовиченко С.Ю. Пучково-плазменные технологии для создания материалов и устройств микро- и наноэлектроники. Часть 1-я: Методическое пособие, Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2014. – с.28;
5. J. Orava, T. Kohoutek, T. Wagner // Chalcogenide Glasses. Preparation, Properties and Applications, p. 278, (2014);
6. V.V. Bolotov, Yu.A. Stenkin, N.A. Davletkildeev, O.V. Krivozubov, I.V. Ponomareva // Physics and techniques of semiconductors, v. 43, №1, p.101, (2009);
7. Иевлев В.М., Трусков Л.И., Холмянский В.А. Структурные превращения в тонких пенках. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1988. – 6 с.