



УДК 621.793; 621.039.624

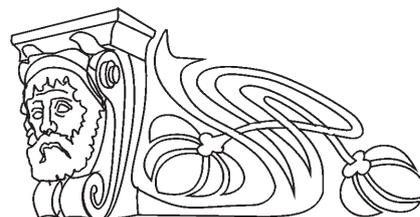
## ФОРМИРОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПОТОКАХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

А. А. Сердобинцев<sup>1,2</sup>, С. Б. Вениг<sup>1</sup>, В. А. Александров<sup>1,2</sup>,  
Д. М. Митин<sup>1</sup>, А. Г. Веселов<sup>2</sup>, О. А. Кирясова<sup>2</sup>, В. И. Елманов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Саратовский государственный университет

<sup>2</sup> Саратовский филиал ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН

E-mail: SerdobintsevAA@info.sgu.ru



В работе приводятся результаты экспериментальных исследований, направленных на получение материалов с модифицированными свойствами. Разработанная методика синтеза в потоках низкотемпературной плазмы позволяет эффективно управлять параметрами плёночных материалов. На примере ZnO и Si показана возможность управления оптическими, морфологическими и электрофизическими свойствами плёночных материалов.

**Ключевые слова:** модифицированные материалы, низкотемпературная плазма, магнетронное распыление.

### Formation of Modified Materials in Flows of Low-temperature Plasma

A. A. Serdobintsev, S. B. Venig, V. A. Alexandrov,  
D. M. Mitin, A. G. Veselov, O. A. Kiryasova, V. I. Elmanov

In this paper the results of experimental studies are presented. The experiments were aimed to synthesis of materials with modified properties. A special technique of synthesis in low-temperature plasma flows allows controlling film material parameters. The possibility to control optical, morphological and electrophysical properties is shown by the examples of ZnO and Si films.

**Key words:** modified materials, low-temperature plasma, magnetron sputtering.

Поиск путей модификации свойств известных материалов является актуальной задачей современного физического материаловедения. В то же время одной из важнейших проблем в

последние годы стало создание так называемых «умных материалов», изменяющих свои свойства в зависимости от воздействия внешних факторов. Модификация традиционных материалов с целью надления их «умными» свойствами представляется одним из возможных подходов к решению данной задачи.

Усилия коллектива авторов работы в последние годы сконцентрированы на исследованиях в этой области. За основу был взят широко использующийся в научных исследованиях и промышленности метод магнетронного распыления на постоянном токе. Оптимизация конструкции магнетронной распылительной системы (МРС) позволила добиться формирования интенсивного потока компонент низкотемпературной плазмы, направленного в область роста синтезируемой плёнки [1]. Управлять энергетикой частиц потока оказалось возможным путём варьирования давления рабочего газа в процессе напыления, что было продемонстрировано с помощью специально разработанной оригинальной методики.

Измерение воздействия потока осаждения на синтезируемую плёнку производилось с помощью специального измерительного узла, сконструированного на основе микроподвеса (рис. 1, поз. 4) и спиральных механических пружин (рис. 1, поз. 3).

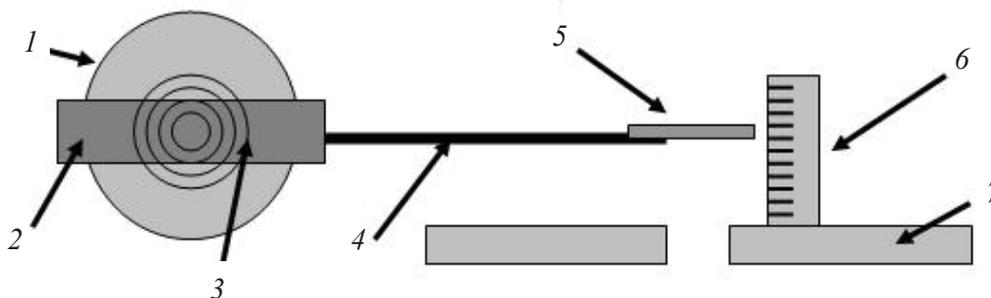


Рис. 1. Схема узла для измерения давления потока осаждения в МРС: 1 – основание подвесной системы; 2 – рамка с закреплённой на ней стрелкой 4 с флажком 5. Пружины 3 уравнивают давление измеряемого потока. Закреплённая на аноде 7 шкала 6 служит для количественной регистрации отклонения стрелки



Использование подвесной системы со спиральными пружинами позволило получить наибольший рабочий диапазон и наилучшую чувствительность датчика давления потока осаждения. Конструкция датчика показана на рис. 1. С помощью вышеописанного датчика были произведены измерения давления потока осаждения в МРС и получена его зависимость от давления рабочего газа (рис. 2).

Из графика, приведённого на рис.2, видно, что при меньших давлениях рабочего газа давление потока осаждения больше. Данный эффект объясняется уменьшением вероятности столкновения частиц направленного потока осаждения с диффузно движущимися атомами рабочего газа, а также увеличением напряжения стабилизации тлеющего разряда.

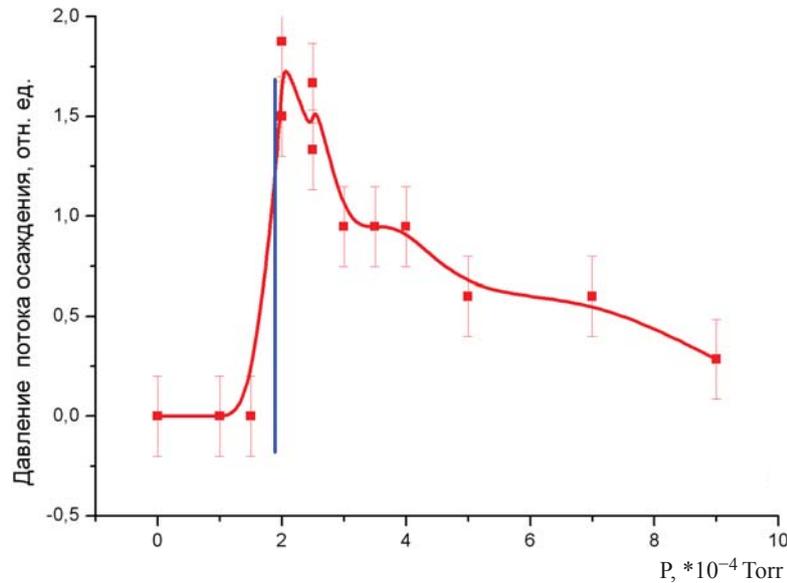


Рис. 2. Зависимость давления потока осаждения от давления рабочего газа. Вертикальной чертой показана граница зажигания тлеющего разряда. При более низких значениях давления рабочего газа наблюдается горение темного разряда, сравнительно низкий ток которого обуславливает чрезвычайно низкие значения давления потока осаждения

Возможности разработанной МРС были продемонстрированы на примере плёнок ZnO. В частности, была установлена зависимость меж-

плоскостного расстояния [2], оптической ширины запрещённой зоны и показателя преломления [3] от давления рабочего газа (рис. 3).

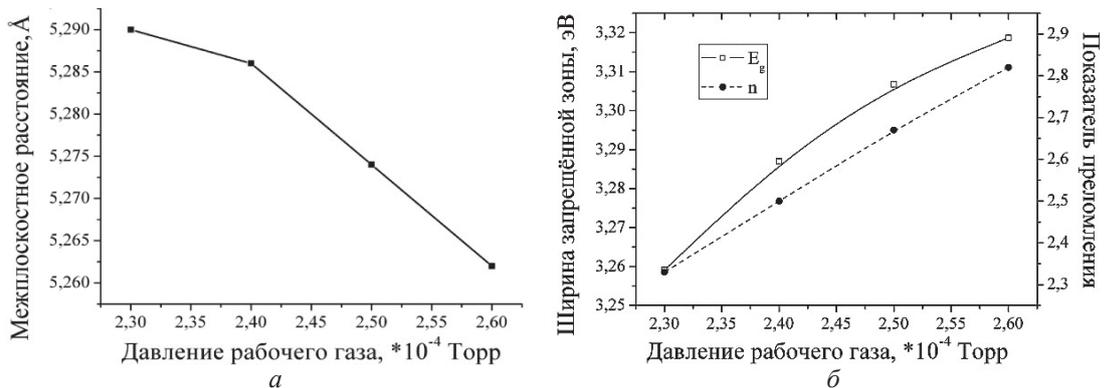


Рис. 3. Зависимость межплоскостного расстояния (а), оптической запрещённой зоны и показателя преломления (б) плёнок ZnO от давления рабочего газа

Может сложиться впечатление, что приведённые результаты являются неким частным случаем для конкретного материала, а именно оксида

цинка. Однако модификация свойств в потоках низкотемпературной плазмы должна наблюдаться и для других материалов. Для подтверждения дан-



ного предположения были начаты исследования по модификации свойств плёнок кремния, полученных в аналогичной МРС.

Напыление производилось на постоянном токе, в качестве мишени использовалась пластина монокристаллического кремния. Варьируемым параметром синтеза было давление рабочего газа (аргона) в камере. Остальные параметры оставались фиксированными для всех плёнок.

При анализе АСМ-исследований было обнаружено, что среднеквадратичная шероховатость пленок изменяется пропорционально давлению (рис. 4). Увеличение шероховатости с ростом давления может быть объяснено снижением плотности плёнок. Чем большей плотностью обладает полупроводник, тем меньше дефектов (пустот и полостей) в его структуре, а наличие дефектов прямо влияет на протекание тока в пленке [4]. В связи с этим можно предположить, что более плотные пленки будут обладать меньшим сопротивлением, что подтверждается данными, приведенными ниже.

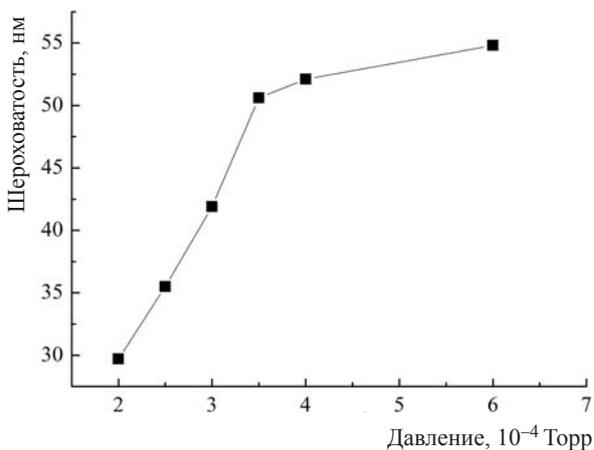


Рис. 4. Зависимость шероховатости от давления

На рис. 5 представлены зависимости омического и туннельного сопротивления от давления. Оба параметра определялись при напряжении смещения 2,5 В. Графики показывают, что с ростом давления синтеза увеличивается сопротивление плёнок.

Результаты всех экспериментов свидетельствуют о существовании некоторого критического давления рабочего газа, выше которого свойства плёнок практически перестают меняться. Величина критического давления составляет  $(3,5-4) \cdot 10^{-4}$  Торр, что хорошо коррелирует с результатами измерений давления потока осаждения (см. рис. 1). Из приведённых результатов следует, что при давлениях рабочего газа выше

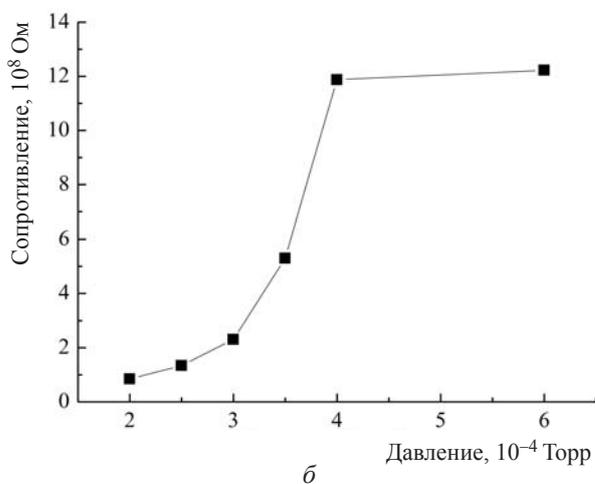
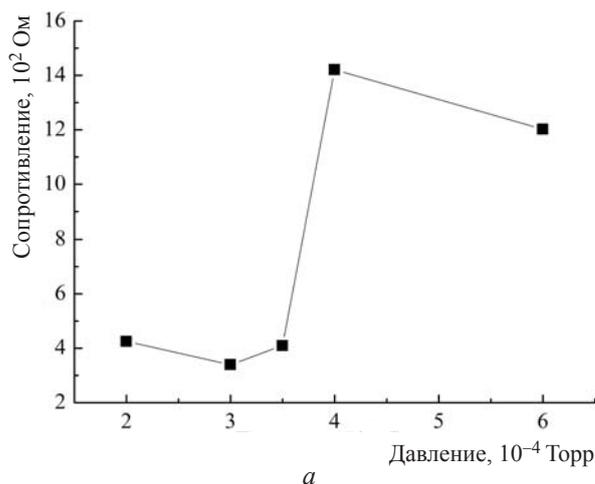


Рис. 5. Зависимость омического (а) и туннельного (б) сопротивления от давления

$4 \cdot 10^{-4}$  Торр давление потока осаждения снижается более чем в два раза от максимального.

Таким образом, обнаружена область рабочих давлений, в которой возможно управление свойствами получаемых плёнок кремния и оксида цинка. Представленные в работе результаты по синтезу двух материалов (ZnO, Si) в потоковой плазме даже в предварительных экспериментах показывают значительное изменение их структурных и электрофизических свойств. Управляемый характер процесса, простота реализации, а также значительность изменений стимулируют как дальнейший поиск физических факторов, определяющих этот процесс, так и исследование свойств новых материалов и структур, полученных с применением данной методики.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 12-07-31241, 11-08-00529).*



## Список литературы

1. Бурьлин Е. И., Веселов А. А., Веселов А. Г., Джумалиев А. С., Иванов С. Н., Кирясова О. А. Образование молекул и кластеров оксида цинка в квазизамкнутом объеме реактивной газоразрядной плазмы // ПЖТФ. 2000. Т. 26, вып. 7, С. 31–34.
2. Сердобинцев А. А., Веселов А. Г., Кирясова О. А. Свойства пленок оксида цинка, синтезированных в низкотемпературном плазменном разряде в условиях бомбардировки компонентами плазмы // ФТП. 2008. Т. 42, вып. 4. С. 496–499.
3. Сердобинцев А. А., Бурьлин Е. И., Веселов А. Г., Кирясова О. А., Джумалиев А. С. Показатель преломления и постоянная решетки пленок оксида цинка, модифицированных в низкотемпературной плазме // ЖТФ. 2008. Т. 78, вып. 3. С. 83–85.
4. Вавилов В. Е., Кив А. Е., Ниязова О. Р. Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках. М.: Наука, 1981. 368 с.

УДК 537.6; 544.7

## МАГНИТНЫЕ КОМПОЗИТЫ С НАНОЧАСТИЦАМИ МАГНЕТИТА: ПОЛУЧЕНИЕ, УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ, ПРИМЕНЕНИЕ

Д. В. Воронин<sup>1,2</sup>, А. В. Садовников<sup>1</sup>,  
Е. Н. Бегинин<sup>1</sup>, Д. Г. Щукин<sup>2,3</sup>, Д. А. Горин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет

<sup>2</sup>Макс Планк институт коллоидов и границ раздела фаз, Германия

<sup>3</sup>Университет Ливерпуля, Великобритания

E-mail: devoronin@yandex.ru

В работе описано получение композитных покрытий, содержащих наночастицы магнетита, методом последовательной адсорбции из раствора. Показана возможность управления физическими свойствами таких нанокompозитов путем варьирования числа циклов адсорбции магнитных наночастиц, а также проведен обзор возможных вариантов применения магнитных композитных материалов, основанных на их управляемых свойствах.

**Ключевые слова:** наночастицы магнетита, нанокompозитные покрытия, последовательная адсорбция, ферромагнитный резонанс, спектроскопия бриллюэновского светорассеяния.

### Magnetic Composites with Embedded Magnetite Nanoparticles: Preparation, Control of Physical Properties, Applications

D. V. Voronin, A. V. Sadovnikov,  
E. N. Beginin, D. G. Shchukin, D. A. Gorin

The formation of nanocomposites with embedded magnetite nanoparticles using layer-by-layer deposition is described in this review. It was shown, that physical properties of these composites are controllable by the variation of the magnetic nanoparticles layers number in their structure. The review of some practical application of magnetic nanocomposite materials based on their controllable properties was carried out as well.

**Key words:** magnetite nanoparticles, nanocomposites, layer-by-layer deposition, ferromagnetic resonance, brillouin light scattering spectroscopy.

Одной из актуальных задач современной науки и техники является создание новых функциональных материалов с управляемыми пара-

метрами для разработки миниатюрных устройств и приборов с заданными характеристиками. Весьма перспективным в этой связи выглядит использование композитных материалов, представляющих собой искусственно созданные наноструктурированные среды, основанные на принципах естественной самоорганизации молекул и наноразмерных компонентов [1–16]. Хорошо зарекомендовавшим себя способом получения композитных материалов является метод последовательной адсорбции из раствора противоположно заряженных полиэлектролитов [1, 4]. Также метод последовательной адсорбции позволяет включать в структуру получаемых материалов органические и неорганические наночастицы для придания новых функциональных свойств [17]. Основными преимуществами метода последовательной адсорбции перед другими методами получения нанокompозитных покрытий, таких, например, как метод Лэнгмюра – Блоджетт, является простота, хорошая воспроизводимость и высокое качество получаемых покрытий.

В последнее время активно исследуются нанокompозитные материалы, содержащие в своей структуре магнитные наночастицы, в связи с возможностью применения таких материалов в качестве радиопоглощающих покрытий [18, 19], сред для хранения информации [20, 21], в каче-

