

**ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ТОНКИХ ПЛЕНОК ZnO С ЛЕГИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ ITO**

<sup>1</sup>Чумаков А.Н., <sup>2</sup>Гулай А.В., <sup>2,3</sup>Шевченко А.А., <sup>4</sup>Баран Л.В., <sup>1</sup>Кароза А.Г.,  
<sup>5</sup>Малютина-Бронская В.В., <sup>2</sup>Гулай В.А., <sup>1</sup>Босак Н.А.  
<sup>1</sup>ИФ НАН Беларуси, <sup>2</sup>БНТУ; <sup>3</sup>ИПМ НАН Беларуси, <sup>4</sup>БГУ,  
<sup>5</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,  
г. Минск, Беларусь, E-mail: alexshev56@mail.ru

**Введение**

Задачи микро-наносенсорики стимулировали исследования тонких пленок оксида цинка. Результаты исследований структурных, электрических, акустических и оптических свойств ряда тонких пленок ZnO и процессов их получения представлены в [1]. Повышение интереса к тонким пленкам ZnO связано с поиском активных материалов для чувствительных элементов микро-наносенсоров [2]. Управление физико-химическими свойствами тонких пленок оксида цинка может обеспечиваться путем введения в их состав различных легирующих добавок [3].

В настоящей работе варьирование электрофизических свойств подобных пленок достигнуто за счет использования легирующих добавок оксида индия – олова (ITO) в количестве 10 % по массе. Выбор таких легирующих добавок в ZnO обусловлен высокой чувствительностью параметров соединений ITO к различным внешним воздействиям. Пленки ZnO с легирующими добавками ITO осаждались методом многоимпульсного высокочастотного лазерного распыления керамических мишеней. В работе представлены результаты исследования микроструктуры распыляемых керамических мишеней стехиометрического состава, морфологии получаемых тонких пленок ZnO + ITO, их вольт-амперных характеристик, а также спектров пропускания и комбинационного рассеяния света.

**Методика получения и исследования тонких пленок**

Экспериментальная лазерная установка с регулируемой частотой повторения лазерных импульсов от 5 до 50 кГц содержала: источник лазерного излучения, оптическую систему транспортировки лазерного излучения к распыляемой мишени, вакуумную камеру и измерительно-диагностический модуль. В качестве источника излучения в установке использован лазер на неодимовом стекле ( $\lambda = 1,06$  мкм). Для получения многоимпульсного режима генерации лазера с высокой частотой повторения импульсов внутри резонатора вблизи глухого зеркала установлен пассивный оптический затвор из радиационно облученного кристаллического фторида лития LiF с F<sub>2</sub><sup>-</sup>-центрами окраски. Частота повторения лазерных импульсов изменялась за счет варьирования уровня накачки лазера и оптической плотности затвора; длительность лазерных импульсов на полувысоте составляла ~ 85 нс. Вакуумная система установки обеспечивала проведение экспериментов при пониженном давлении до 2,7 Па. При многоимпульсном высокочастотном лазерном воздействии на поверхность распыляемой мишени реализовывался режим эффективного эрозионного плазмообразования [4]. Осаждение макроскопически однородных тонких пленок достигалось при плотности мощности лазерного излучения  $q = 120$  МВт/см<sup>2</sup> и частоте повторения импульсов  $f \sim 20-30$  кГц.

Распыляемые керамические мишени получали методом статического формования на прессе ZD-40 при давлении 500 МПа; спекание выполняли в камерной лабораторной электропечи ВТП 12/15 на воздухе при температуре 1300°C в течение 2 часов.

Топография поверхности тонких пленок ZnO с легирующими добавками ITO на кремниевой подложке КДБ-12 (100) исследовалась с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver P47-Pro (НТ-МДТ, Россия) в полуконтактном режиме. Измерения вольт-амперных характеристик проводилось с использованием лабораторного стенда на основе измерителя иммитанса Е7-20 при комнатной температуре без освещения. Указанные характеристики регистрировались при изменении напряжения прямого и обратного смещения в диапазоне от – 10 до + 10 В.

Пропускание оптического излучения тонкими пленками в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне спектра измерялось на спектрофотометре Carry 500 Scan. Спектры пропускания в средней инфракрасной области регистрировались с помощью ИК-Фурье-спектрометра NEXUS (ThermoNicolet) в диапазоне  $400-4000\text{ см}^{-1}$ . В спектральном интервале  $200-2550\text{ см}^{-1}$  спектры КРС регистрировались на спектрометре SpectroPro 500i.

### Полученные результаты и их обсуждение

Исследована микроструктура материала распыляемой керамической мишени ZnO + 10 % ITO. Зерна материала мишени имели развитую поверхность. Установлено, что полученные пленки оксида цинка с легирующими добавками ITO, осажденные на кремниевой подложке, имели аморфную структуру. На АСМ-изображениях поверхности тонкой пленки наблюдалось наличие острых микровыступов, средняя высота которых варьировалась в достаточно широких пределах: от 4,52 до 7,55 нм (рис. 1,б). Средний латеральный размер частиц составлял порядка 100 нм, число крупных конгломератов незначительно.

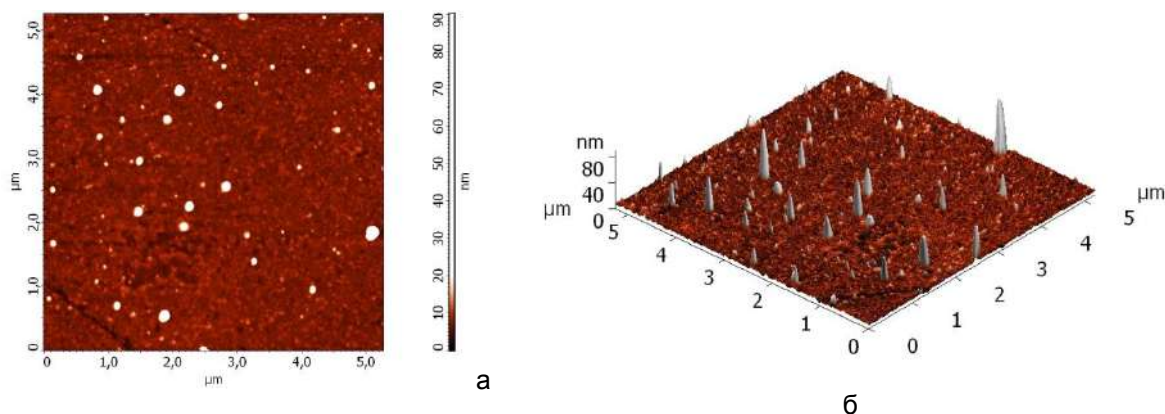


Рисунок 1 – АСМ-изображения поверхности тонкой пленки: а – в режиме латеральных сил; б – в режиме топографии

Вольт-амперные характеристики, зарегистрированные при прямом и обратном смещении и представлены на рисунке 2, типичны для структуры ZnO + ITO/Si. Установлено, что как в отрицательной, так и в положительной области напряжений на вольт-амперной характеристике  $I \sim U^n$  наблюдаются два типичных участка с разными значениями  $n$ . В области малых напряжений до 0,5 В значение  $n = 1,8$ , что характерно для случая протекания тока, ограниченного пространственным зарядом. Такой режим устанавливается, когда пленка диэлектрика имеет достаточно малую толщину, и заряд инжектированных из металла электронов заполняет всю область полупроводника. При напряжениях более 0,5 В в структуре ZnO + ITO/Si наблюдается омическая проводимость. Зависимость емкости от напряжения (рис. 3) характерна для высокочастотных характеристик МОП-структур на р- типе кремния, что говорит о возможном избытке кислорода в пленке. Пропускание лазерно-осажденной пленки ZnO с добавкой ITO в ближней ИК-области спектра от 1,2 до 3 мкм составляло величину  $\sim 4,5\%$ , примерно такая же величина пропускания сохранялась и в средней ИК-области спектра до 5 мкм (рис. 4).

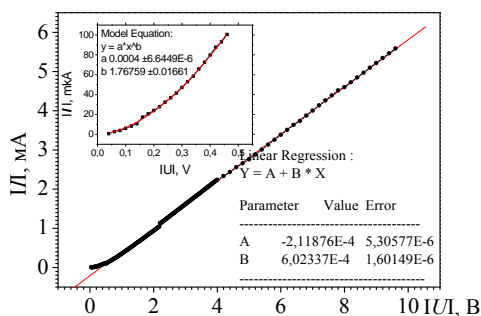


Рисунок 2-Вольт-амперная характеристика структуры ZnO + ITO/Si.

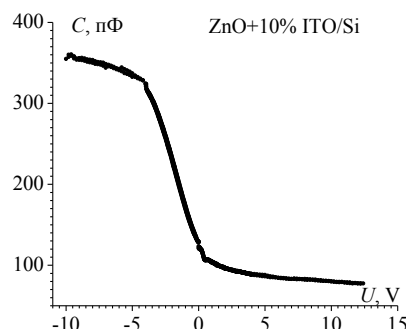


Рисунок 3- Вольт-фарадная характеристика структуры ZnO+ ITO/Si..

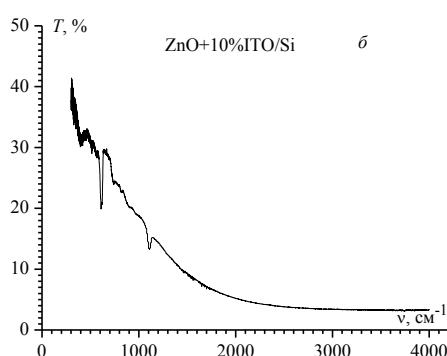
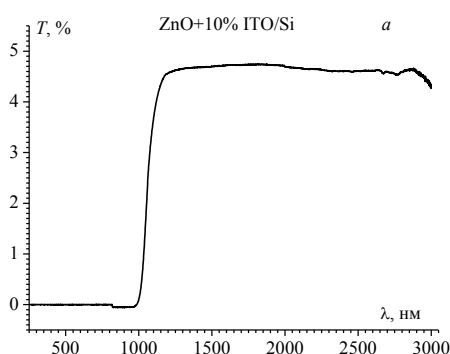


Рисунок 4- Спектр пропускания тонкой пленки: а – в ближней ИК-области; б – в средней ИК-области спектра.

### Заключение

Методом импульсного высокочастотного лазерного осаждения керамических мишеней в вакууме получены тонкие пленки ZnO с легирующими добавками ITO для сенсорных структур. Представлены результаты исследований микроструктуры распыляемых керамических мишеней стехиометрического состава, морфологии получаемых тонких пленок ZnO + ITO, их вольт-амперных характеристик, а также спектров пропускания и комбинационного рассеяния света. На основании выполненных исследований дан анализ свойств полученных тонких пленок и механизмов транспорта носителей заряда.

### Список литературы:

1. Бугаева, М. Э. Газовые сенсоры на основе оксида цинка (Обзор) / М. Э. Бугаева, В. М. Коваль, В. И. Лазоренко, Г. В. Лашкарев, В. А. Карпина, В. Д. Храновский // Sensors Electronics and Microsystem Technologies. 3/2005. – р.34-42.
2. Колешко, В. М. Мультисенсорная интегральная микросистема для интеллектуального контроля многокомпонентных газов / В. М. Колешко, А. В. Гулай, В. А. Гулай / Электроника-инфо. – 2010. – № 2. – С. 63-67.
3. Колешко, В. М. Получение тонких пленок ZnO с микродобавками соединений РЗЭ при распылении керамических мишеней / В. М. Колешко, А. В. Гулай, А. А. Шевченко, Т. А. Кузнецова, М. А. Андреев // Порошковая металлургия. Республиканский межведомственный сборник научных трудов. Вып. 34, 2011. – С. 106-111.
4. Минько, Л. Я. Об эффективном режиме эрозионного приповерхностного плазмообразования в воздухе при импульсно-периодическом лазерном воздействии / Л. Я. Минько, А. Н. Чумаков, Н. А. Босак // Квантовая электроника. – 1990. – Т. 17, № 11. – С. 1480-1484.