

## ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДА ЦИНКА, ЛЕГИРОВАННЫХ СКАНДИЕМ И ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ

Н. А. Босак<sup>1\*</sup>, А. Н. Чумаков<sup>1</sup>, А. А. Шевченко<sup>2</sup>, Л. В. Баран<sup>3</sup>, А. Г. Кароза<sup>1</sup>,  
В. В. Малютина-Бронская<sup>4</sup>, Т. Ф. Райченко<sup>1</sup>, М. Г. Сугак<sup>5</sup>

УДК 621.373.826:539.216.2

<sup>1</sup> Институт физики НАН Беларуси,

220072, Минск, Беларусь; e-mail: n.bosak@ifanbel.bas-net.by

<sup>2</sup> Белорусский национальный технический университет,

220013, Минск, Беларусь; e-mail: alexshev56@mail.ru

<sup>3</sup> Белорусский государственный университет,

220030, Минск, Беларусь; e-mail: baran@bsu.by

<sup>4</sup> ГНПО “Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника”,

220072, Минск, Беларусь; e-mail: malyutina@oelt.basnet.by

<sup>5</sup> НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,

220072, Минск, Беларусь; e-mail: m.sugak@yandex.ru

(Поступила 26 мая 2020)

Методом высокочастотного импульсно-периодического ( $f \sim 10\text{—}15$  кГц) лазерного воздействия с длиной волны  $\lambda = 1.064$  мкм и плотностью мощности  $q = 85$  МВт/см<sup>2</sup> на керамику из оксида цинка, легированную оксидом скандия, при давлении в вакуумной камере  $p = 2 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст. получены наноструктурированные тонкие пленки на кремниевой подложке. Изучена морфология полученных пленок с помощью атомно-силовой микроскопии. Выявлены особенности спектров пропускания в видимой, ближней и средней ИК-областях. Полученные при возбуждении разными длинами волн спектры люминесценции практически не изменяются. Проведен анализ электрофизических свойств гетероструктуры ZnO+0.9%Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Si. Установлено, что основным механизмом проводимости является ток, ограниченный пространственным зарядом в пленке оксида с глубокими ловушками.

**Ключевые слова:** высокочастотное лазерное воздействие, легированный скандием оксид цинка, структура тонких пленок, спектры пропускания и люминесценции, электрофизические характеристики.

Nanostructured thin films on a silicon substrate were obtained using a high-frequency pulse-periodic  $f \sim 10\text{—}15$  kHz laser action at a wavelength  $\lambda = 1.064$   $\mu\text{m}$ , a power density  $q = 85$  MW/cm<sup>2</sup>, and a pressure in a vacuum chamber  $p = 2 \cdot 10^{-2}$  mm Hg on zinc oxide ceramics doped with scandium oxide. The morphology of the obtained films was studied using atomic force microscopy. The features of transmission spectra in the visible, near and middle infrared regions were revealed. The luminescence spectra obtained upon excitation by different wavelengths were practically unchanged. The electrophysical properties of the

---

## OPTICAL AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF DOPED WITH SCANDIUM THIN ZINC OXIDE FILMS OBTAINED BY LASER DEPOSITION

N. A. Bosak<sup>1\*</sup>, A. N. Chumakov<sup>1</sup>, A. A. Shevchenok<sup>2</sup>, L. V. Baran<sup>3</sup>, A. G. Karoza<sup>1</sup>, V. V. Malutina-Bronskaya<sup>4</sup>, T. F. Raichenok<sup>1</sup>, M. G. Sugak<sup>5</sup> (<sup>1</sup> B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 220072, Belarus; e-mail: n.bosak@ifanbel.bas-net.by; <sup>2</sup> Belarusian National Technical University, Minsk, 220013, Belarus; e-mail: alexshev56@mail.ru; <sup>3</sup> Belarusian State University, Minsk, 220030, Belarus; e-mail: baran@bsu.by; <sup>4</sup> SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Tehnology”, Minsk, 220072, Belarus; e-mail: malyutina@oelt.basnet.by; <sup>5</sup> NPC National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science, Minsk, 220072, Belarus; e-mail: m.sugak@yandex.ru)

*ZnO + 0.9%Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Si heterostructure were analyzed. It is established that the main conduction mechanism is the current limited by the space charge in the oxide film with deep traps.*

**Keywords:** *high-frequency laser irradiation, scandium doped zinc oxide, the structure of thin films, transmission and luminescence spectra, electrophysical characteristics.*

**Введение.** Оксид цинка — широкозонный полупроводник, перспективный для создания лазеров и светодиодов в УФ-области спектра. В настоящее время для синтеза ZnO широко используются методы лазерного [1] и магнетронного [2, 3] распыления. В [4] методами термического испарения и электроразрядного синтеза сформированы низкоразмерные структуры оксида цинка в газовых и жидких средах с применением и без применения легирующих добавок. Изучены элементный и фазовый состав, морфология и люминесцентные свойства синтезированных структур. При лазерном испарении цинка и серебра в растворе нитрата аммония образуется оксид цинка с двойным акцепторным легированием, что подтверждено методами рентгеноструктурного анализа, фотолюминесценции и спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) света [5]. Тонкие оксидные пленки успешно применяются как в науке, так и в технике [6—9]. Прозрачные проводящие пленки оксида цинка сочетают относительно высокие значения оптического пропускания и электропроводности и представляют большой интерес для создания различных оптоэлектронных приборов и устройств [10—12]. Оксид цинка может быть использован в оптоэлектронных преобразователях как люминесцентный материал в виде прозрачных электродов, чувствительных слоев газовых и биологических сенсоров, катализаторов, УФ-детекторов, рентгеновского и гамма-излучений [13, 14].

Задачи по созданию сенсоров стимулировали исследования тонких пленок ZnO. Их применение в качестве чувствительных слоев микро- и наносенсоров обосновано результатами исследований их структурных, электрических, акустических и оптических свойств [15]. Управление физико-химическими свойствами тонких пленок ZnO может обеспечиваться путем введения в их состав различных легирующих добавок [15—17].

В настоящей работе исследованы свойства пленок оксида цинка с легирующей добавкой оксида скандия в количестве 0.9 мас.%. Выбор легирующей добавки обусловлен высокой чувствительностью соединений редкоземельных элементов (в том числе Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) к различным внешним воздействиям, а также улучшением пьезоэлектрических свойств тонких пленок ZnO [16]. Исследованы морфология полученных тонких пленок ZnO+0.9% Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, их вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные характеристики (ВФХ), а также спектры пропускания, люминесценции и КР.

**Экспериментальная установка и методы.** Для исследования особенностей высокочастотного многоимпульсного лазерного воздействия на металлы и композиционные материалы при атмосферном, пониженном и повышенном давлении окружающего воздуха создана экспериментальная установка (рис. 1, а) на основе промышленного лазера ГОС-1001 2. Использование полусферического резонатора с выносными зеркалами (глухое зеркало 1 с радиусом кривизны 2.5 м, полупрозрачное 3 — плоское с коэффициентом отражения  $R \approx 37\%$ ,  $\lambda = 1.064$  мкм) обеспечивало получение квазинепрерывных лазерных импульсов либо серии повторяющихся лазерных импульсов с длительностью ~1 мкс в зависимости от юстировки резонатора. Однако получить режим регулярных импульсов лазерного излучения (ЛИ) длительностью ~85 нс (рис. 1, в) на полувысоте с управляемой частотой повторения от 5 до 50 кГц (рис. 1, б) удалось лишь при использовании крупногабаритного пассивного затвора из радиационно облученного фторида лития с F<sub>2</sub><sup>-</sup>-центрами окраски 1.

Для инициирования приповерхностной плазмы ЛИ фокусировалось линзой 8 с фокусным расстоянием  $f = 62$  мм на поверхность облучаемых материалов 11 в относительно однородное пятно диаметром 2 мм. Измерение энергии и регистрация формы импульсов воздействующего ЛИ осуществлялись с помощью измерителя энергии ИМО-2Н 21 и фотоприемников на основе фотоэлементов ФК-19 15, 20 и фотодиода ФД-10Г 22, сигналы с которых подавались на запоминающие осциллографы С8-14 и С8-13 23. Плотность мощности ЛИ на поверхности мишени изменялась в диапазоне  $10^5$ — $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> с помощью нейтральных светофильтров 8. Для экспериментов в широком диапазоне давлений воздуха установка оснащена вакуумной камерой 10 с устройством для откачки воздуха до  $2 \cdot 10^{-2}$  мм рт.ст. При многоимпульсном высокочастотном лазерном воздействии на поверхность распыляемой мишени реализовывался режим эффективного эрозионного плазмообразования [18]. Осаждение макроскопически однородных тонких пленок ZnO с легирующими добавками Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на кремниевую подложку 13 достигалось при плотности мощности ЛИ  $q = 85$  МВт/см<sup>2</sup> и частоте повторения импульсов  $f \sim 10$ — $15$  кГц. Для получения многоимпульсного режима генерации лазера с высо-

кой частотой повторения импульсов внутри резонатора вблизи глухого зеркала установлен пассивный оптический затвор из радиационно облученного кристаллического фторида лития LiF с  $F_2^-$ -центрами окраски. Частота повторения лазерных импульсов изменялась за счет варьирования уровня накачки лазера и оптической плотности затвора.

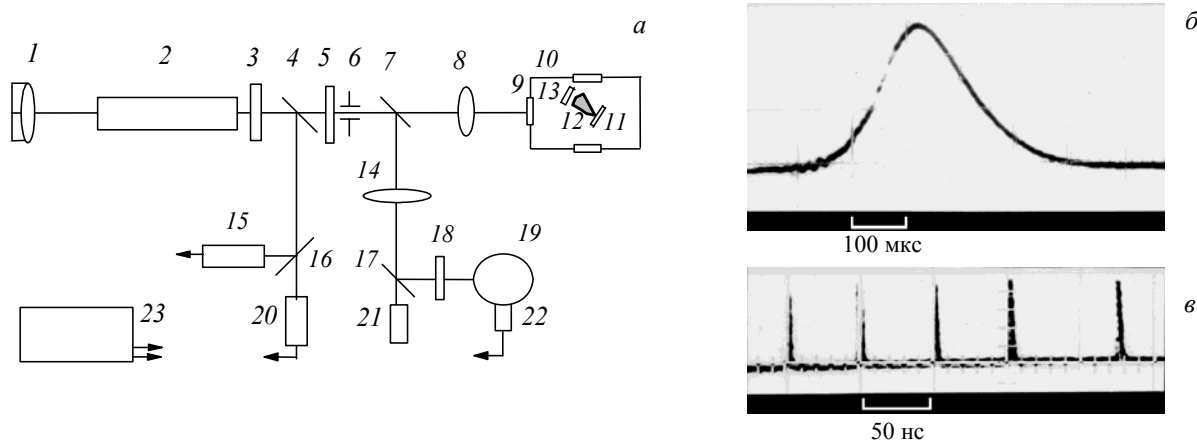


Рис. 1. Схема лазерной установки (а): 1 — пассивный затвор с  $LiF:F_2^-$ -центрами окраски, совмещенный с глухим зеркалом; 2 — активный элемент на неодимовом стекле; 3 — выходное зеркало; 4, 7, 16, 17 — светоделители; 5, 18 — светофильтры; 6 — диафрагма; 8, 14 — фокусирующие линзы; 9 — входное окно; 10 — вакуумная камера; 11 — мишень; 12 — плазменный факел; 13 — кремниевая подложка; 15, 20 — фотоприемники ФК-19; 19 — интегрирующая сфера; 21 — измеритель энергии ИМО-2Н; 22 — фотодиод ФД-10Г; 23 — блок осциллографов; б — серия и мпульсов, генерируемая лазером с пассивным затвором; в — форма отдельного лазерного импульса

В качестве исходного материала для изготовления мишеней использован оксид цинка марки чда (УП “Белреахим”). Анализ степени чистоты, элементного состава, формы частиц и их распределения по размерам показал, что исходный порошок  $ZnO$  содержит 99.96 % основного вещества, суммарное содержание примесей в котором  $\leq 0.04$  мас.%. Весовой процент цинка в порошке 80.3 %, кислорода 19.7 %. В основной массе частицы оксида цинка имеют продолговатую форму, длину 0.2—0.5 мкм, ширину 0.2—0.4 мкм, средний размер 0.3 мкм, фактор-формы  $\sim 0.85$ . Удельная поверхность исходного порошка  $ZnO$ , измеренная методом Брюнера—Эммета—Теллера,  $3.5 \text{ м}^2/\text{г}$ , измельченного  $5.3 \text{ м}^2/\text{г}$ . По данным сканирующей электронной микроскопии порошок  $Sc_2O_3$  (квалификации осч) представляет собой пластинки длиной 5—10 мкм, толщиной  $\sim 1$  мкм, которые состоят из наночастиц  $\sim 50$  нм. Форма и топография поверхности исходного порошка оксида цинка и легирующей добавки  $Sc_2O_3$  с разным увеличением приведены на рис. 2.

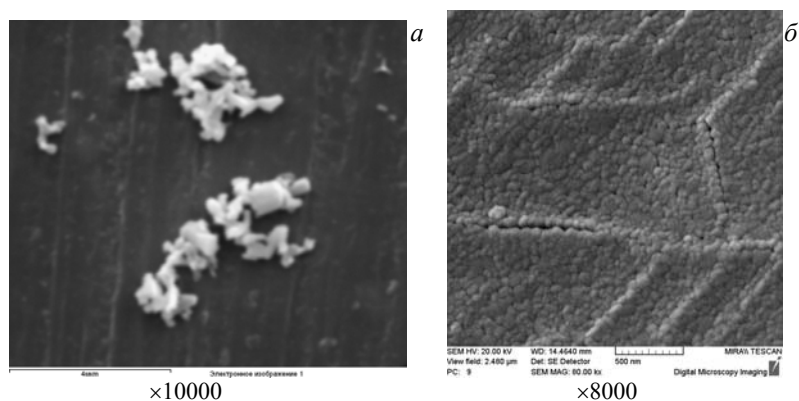


Рис. 2. Форма и топография поверхности исходного порошка оксида цинка (а) и легирующей добавки  $Sc_2O_3$  (б)

Эксперименты по гомогенизации и смешиванию порошков проведены в планетарной шаровой мельнице “САНД” с халцедоновыми шарами и чашами при скорости вращения последних  $340 \text{ мин}^{-1}$  в этиловом спирте в течение 2 ч. Распыляемые керамические мишени получены методом статического формования на прессе ZD-40 при давлении 500 МПа, спекание выполнено в камерной лабораторной электропечи ВТП 12/15 в воздушной среде при температуре  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 2 ч.

Структура тонких пленок легированного оксида цинка, полученных на стеклянной и кремниевой подложках КДБ-12 (100), изучена методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver P47 PRO. Использованы бесконтактные кремниевые кантилеверы с коэффициентом жесткости 2.5—10 Н/м, резонансной частотой 115—190 кГц и радиусом закругления кончика иглы  $<10 \text{ нм}$ . Исследование топографии поверхности проведено методом постоянной силы.

Измерения ВАХ и ВФХ проведены с использованием лабораторного стенда на основе измерителя иммитанса E7-20 при комнатной температуре без освещения и с освещением (светодиод с  $\lambda = 625 \text{ нм}$ ). Указанные характеристики регистрировались при смещении в диапазоне от  $-10$  до  $+10 \text{ В}$ . Частота сигнала при измерении ВФХ 50 кГц и 1 МГц. Пропускание оптического излучения тонкими пленками в ближнем ИК-диапазоне измерено на спектрофотометре Cary 500 Scan. Спектры пропускания в средней ИК-области зарегистрированы с помощью ИК-Фурье-спектрометра NEXUS (Thermo Nicolet) в диапазоне  $400\text{—}4000 \text{ см}^{-1}$ , спектры КР — на спектрометре NanoFlex (входная щель монохроматора 100 мкм и объектив с увеличением 100 $\times$ ) в интервале  $50\text{—}900 \text{ см}^{-1}$ . Время накопления сигнала при записи одного спектра 60 с. В качестве источника возбуждения КР использован аргоновый лазер с  $\lambda = 488 \text{ нм}$  и мощностью на образце 2 мВт. Спектры фотолюминесценции зарегистрированы на автоматизированном спектрофлуориметре CM 2203 (“Солар”, Беларусь).

**Результаты и их обсуждение.** Морфология тонких пленок оксида цинка, легированных оксидом скандия, полученных на кремниевых подложках КДБ-12 (100), представлена на рис. 3. Методом АСМ установлено, что при осаждении на кремниевую подложку формируются пленки нанокристаллической структуры. Средний латеральный размер частиц пленок 25—30 нм, при этом на поверхности наблюдаются крупные конгломераты диаметром 150—300 нм, но их количество незначительно.

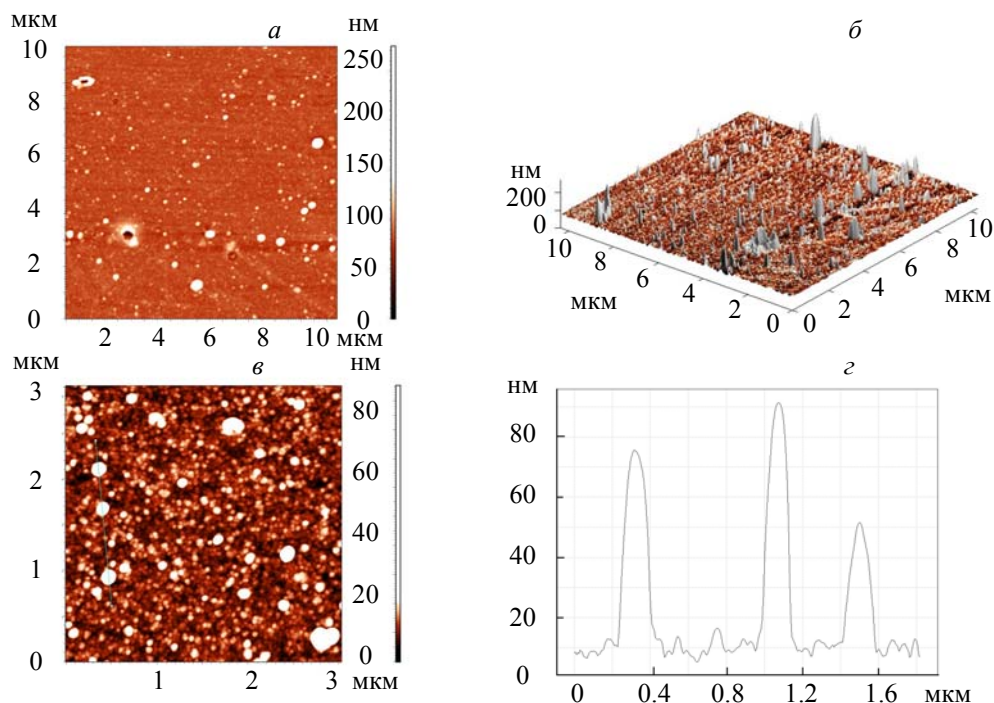


Рис. 3. Топография поверхности (а—д) и профиль сечения вдоль выделенной линии (е) лазерно-осажденной тонкой пленки  $\text{ZnO}+0.9\% \text{ Sc}_2\text{O}_3$  на кремниевой подложке

Средняя высота рельефа поверхности пленок  $\leq 25$  нм, средняя арифметическая шероховатость 4 нм (рис. 3, з). Пропускание лазерно-осажденной пленки ZnO с добавкой оксида скандия Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в ближней ИК-области 1—2.6 мкм достигает  $\sim 3.5$  %, в средней ИК-области 2.5—10 мкм  $\sim 6$  % (рис. 4). Такие пленки могут найти применение в качестве светозащитных покрытий для фотоприемников ближней и средней ИК-областей.

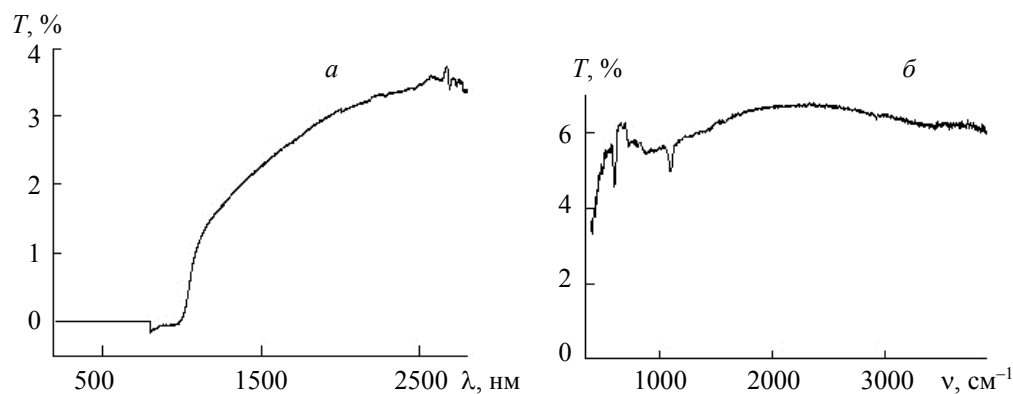


Рис. 4. Спектр пропускания лазерно-осажденной пленки ZnO+0.9% Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на кремниевой подложке в видимой и ближней (а), средней ИК-областях (б)

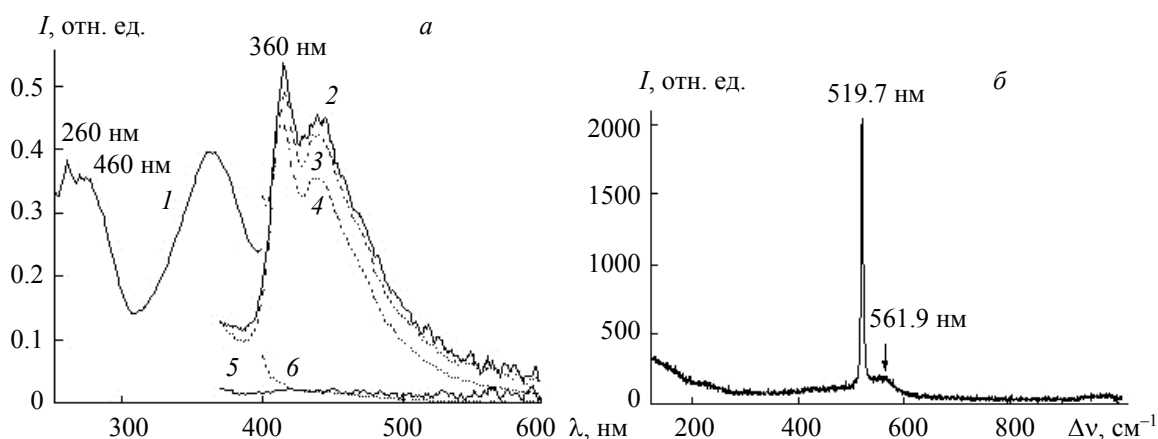


Рис. 5. Спектры люминесценции (а) образцов пленки ZnO+0.9%Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на кремнии (2—4) и подложек кремния (5, 6) при  $\lambda_{\text{возб}} = 260$  (2), 280 (3, 5) и 340 нм (4, 6),  $I$  — спектр возбуждения люминесценции образца пленки на кремнии;  $\lambda_{\text{рег}} = 460$  нм; б — КР-спектр тонких пленок на кремниевой подложке

Измерены спектры возбуждения люминесценции образца пленки ZnO+0.9 % Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на кремнии. Спектр возбуждения люминесценции имеет две полосы с максимумами 260 и 360 нм (рис. 5, а). Спектры люминесценции получены при возбуждении излучением с  $\lambda = 260$ , 280 и 340 нм, соответствующими этим двум полосам возбуждения, и практически не изменяются по форме. Это может свидетельствовать о том, что за люминесцентные свойства пленки ZnO+0.9 %Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> отвечает только один центр испускания. Для установления природы центра, отвечающего за свечение, требуется дополнительное исследование. Однако в связи с тем что люминесценция Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> характеризуется наличием более длинноволновых полос [19] по сравнению с ZnO [20], можно предположить, что ответственным за свечение исследуемой пленки ZnO+0.9 %Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> может быть оксид скандия Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Спектр КР тонкой пленки оксида цинка, легированного оксидом скандия, на кремниевой подложке представлен на рис. 5, б. Наблюдается интенсивная линия кремния Si 519.7 нм.

ВАХ структуры  $\text{ZnO}+0.9\% \text{Sc}_2\text{O}_3$  на кремниевой подложке представлена на рис. 6, а. Темновая ВАХ имеет вид, характерный для ВАХ-гетероперехода. При положительном смещении, подаваемом на электрод, на пленке  $\text{ZnO}+0.9\% \text{Sc}_2\text{O}_3$  можно выделить три участка, каждый из которых описывается степенной зависимостью тока от напряжения (характерно для тока с ограниченным пространственным зарядом в пленке оксида с глубокими ловушками):  $I \sim U^m$ . Первый омический участок наблюдается при напряжениях  $< 1.22$  В. На втором участке  $1.22-4$  В  $m = 1.24$  и при напряжении  $> 4$  В  $m = 1.26$  (третий участок). При напряжении порядка  $+1.2$  В наблюдается участок с отрицательной дифференциальной проводимостью, воспроизводимый при повторных измерениях. При освещении светодиодом с  $\lambda = 625$  нм в диапазоне смещения от  $+1$  до  $+6$  В проводимость резко увеличивается в 10 раз [21]. ВФХ измерены при частотах 50 кГц и 1 МГц (рис. 6, б). Высокочастотная характеристика при 1 МГц имеет вид, характерный для структуры металл-оксид-полупроводник на подложке кремния  $p$ -типа проводимости. Емкость оксида определяется высокочастотной емкостью в режиме обогащения (при отрицательных напряжениях смещения от  $-4$  до  $-11$  В). Низкочастотная, измеренная на 50 кГц ВФХ отличается от классического вида ВФХ МОП-структур. В области модуляции емкости при низкой частоте емкость начинает резко возрастать из-за того, что энергетические зоны изгибаются вниз, на границе раздела собираются носители заряда и может происходить эффективный динамический обмен зарядом между подложкой и наноструктурированной пленкой.

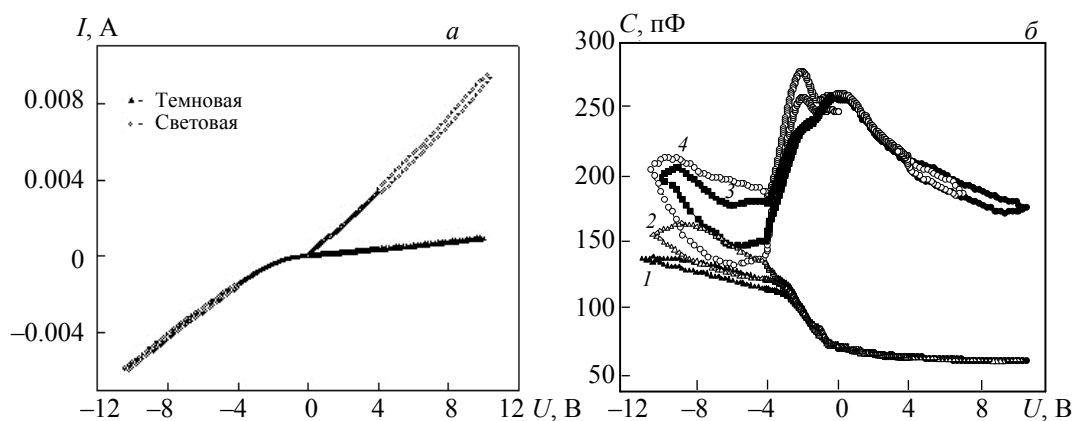


Рис. 6. Вольт-амперная (а) и вольт-фарадная (б) характеристики структуры с пленкой  $\text{ZnO}+0.9\% \text{Sc}_2\text{O}_3$  на кремниевой подложке;  $f = 1$  МГц, темновая (1) и световая (2);  $f = 50$  кГц, темновая (3) и световая (4)

Обмен зарядом в течение периода измерений “уменьшает” эффективную толщину пленки, что выражается в увеличении дифференциальной емкости структуры. Толщина оксида порядка десятка нанометров, следовательно, возможен стимулированный электрическим полем туннельный переход через оксид, а так как на границе раздела присутствуют различные разрешенные состояния, то возможны переходы на эти уровни [22, 23]. При отрицательных напряжениях наблюдается небольшой фотоэффект, обусловленный поверхностными состояниями в оксиде (рис. 6, б).

**Заключение.** Представлены результаты исследований морфологии тонких пленок  $\text{ZnO}+0.9\% \text{Sc}_2\text{O}_3$ , их вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик, а также спектров пропускания в видимой, ближней, средней ИК-областях и спектров люминесценции образцов пленки. Такие пленки могут найти применение в качестве светозащитных покрытий для фотоприемников ближней и средней ИК-областей. Спектры люминесценции, полученные при возбуждении излучением с разными длинами волн, практически не изменяются. Это свидетельствует о том, что за люминесцентные свойства пленки  $\text{ZnO}+0.9\% \text{Sc}_2\text{O}_3$  отвечает только один центр испускания. В спектре комбинационного рассеяния света тонкими пленками наблюдается интенсивная линия кремния. Дан анализ электрофизических свойств гетероструктуры  $\text{ZnO}+0.9\% \text{Sc}_2\text{O}_3/\text{Si}$ . Основным механизмом проводимости является ток, ограниченный пространственным зарядом в пленке оксида с глубокими ловушками. При воздействии излучением с длиной волны 625 нм в диапазоне смещения от  $+1$  до  $+6$  В проводимость увеличивается в 10 раз. Толщина наноструктурированной пленки и наличие встроенных состояний определяют поведение зависимости емкости от напряжения при высоких и низких частотах сигнала.

- [1] А. Н. Жерихин, А. И. Худобенко, Р. Т. Вилльямс, Дж. Вилкинсон, К. Б. Усер, Г. Хионт, В. В. Воронов. Квант. электрон., **33**, № 11 (2003) 975—980
- [2] S.-H. Jeong, B.-S. Kim, B.-T. Lee. Appl. Phys. Lett., **82**, N 16 (2003) 2625—2627
- [3] T. Minami, T. Yamamoto, T. Miyata. Thin Solid Films, **366** (2000) 63—68
- [4] В. С. Бураков, Н. В. Тарасенко, Е. А. Невар, М. И. Неделько. ЖТФ, **81**, № 2 (2011) 89—97
- [5] N. Tarasenko, A. Butsen, V. Pankov, T. Velusamy, D. Mariotti, N. Tarasenko. Nano-Structures & Nano-Objects, **12** (2017) 210—219
- [6] X. Yu, T. J. Marks, A. Facchetti. Nature Mater. Rev., **15** (2016) 383—396
- [7] A. Stadler. Materials, N 5 (2012) 661—683
- [8] Т. В. Семикина, В. Н. Комашенко, Л. Н. Шмырева. Электроника и связь, № 3 (2010) 20—28
- [9] J. F. Wager, D. A. Keszler, R. E. Presley. Transparent Electronics, Springer Science+Business Media, LLC (2008)
- [10] M. Caglar, S. Pican, Y. Caglar, F. Yakuphanoglu. Appl. Surf. Sci., **255** (2009) 4491—4496
- [11] Г. В. Лашкарев, В. А. Карпина, Л. И. Овсянникова, В. В. Каргузов, М. В. Дранчук, М. Годлевский, Р. Петрушка, В. В. Хомяк, Л. И. Петросян. Физика низких температур, **43**, N 4 (2017) 515—519 [G. V. Lashkarev, V. A. Karpyna, L. I. Ovsyannikova, V. V. Kartuzov, M. V. Dranchuk, M. Godlewski, R. Pietruszka, V. V. Khomyak, L. I. Petrosyan. Low Temper. Phys., **43**, N 4 (2017) 643—648]
- [12] А. А. Бобков, А. И. Максимов, В. А. Мошников, П. А. Сомов, Е. И. Теруков. ФТП, **49**, N 10 (2015) 1402—1406
- [13] D. Tainoff, V. Masenelli, O. Voiron, G. Guiraud, P. Mélinon. J. Phys. Chem. C, **112** (2008) 12623—12627
- [14] K. Ellmer. In “Handbook of Transparent Conductors”, Eds. D. S. Ginley, H. Hosono, D. C. Paine, New York, Springer (2010) 193—263
- [15] М. Э. Бугаева, В. М. Коваль, В. И. Лазоренко, Г. В. Лашкарев, В. А. Карпина, В. Д. Храповский. Сенсорная электроника и микросистемные технологии, **3** (2005) 34—42
- [16] В. М. Колешко, А. В. Гулай, А. А. Шевченко, Т. А. Кузнецова, М. А. Андреев. Порошковая металлургия. Респуб. межвед. сб. науч. тр., **34** (2011) 106—111
- [17] D.-S. Liu, C.-Y. Wu, C.-S. Sheu, F.-C. Tshai, C. H. Li. Jpn. J. Appl. Phys., **45**(4B) (2006) 3531—3536
- [18] Л. Я. Минько, А. Н. Чумаков, Н. А. Босак. Квант. электрон., **17**, № 11 (1990) 1480—1484
- [19] О. М. Бордун. Журн. прикл. спектр., **68**, № 2 (2001) 232—234 [O. M. Bordun. J. Appl. Spectr., **68** (2001) 304—307]
- [20] A. M. Ismailov, V. A. Nikitenko, M. R. Rabadanov, L. L. Emiraslanova, I. Sh. Aliev, M. Kh. Rabadanov. Vacuum, **168** (2019) 108854(1—6)
- [21] В. В. Малютина-Бронская, В. Б. Залесский, Т. Р. Леонова. Докл. БГУИР, № 6 (2011) 39—43
- [22] М. Д. Ефремов, Г. Н. Камаев, В. А. Володин, С. А. Аржанникова, Г. А. Качурин, С. Г. Черкова, А. В. Кретинин, В. В. Малютина-Бронская, Д. В. Марин. ФТП, **39**, № 8 (2005) 945—951
- [23] В. В. Малютина-Бронская, В. Б. Залесский, Т. Р. Леонова, А. И. Белоус, В. И. Плебанович. Докл. БГУИР, № 5 (2006) 99