

## СТРУКТУРНЫЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ГЕТЕРОПЕРЕХОДА *N-ZNO/P-SI*, ПОЛУЧЕННОГО ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ

*С.З. Зайнабидинов, Ш.Х. Йулчиев, А.Й. Бобоев*

Андижанский государственный университет им. З.М. Бабура  
170100, Узбекистан, г. Андижан, ул. Университетская д.129  
Тел.: +998(90) 122-20-50, +9989(74) 225-61-30; e-mail: aboboevscp@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2020.09.012

Заключение совета рецензентов: 23.08.20

Заключение совета экспертов: 23.08.20

Принято к публикации: 29.08.20

Получены тонкие металлооксидные слои ZnO на подложке монокристаллического кремния *p*-типа проводимости с кристаллографической ориентацией (100), способом спрей-пиролиза и определены оптимальные технологические режимы золь-гель метода для получения металлооксидных пленок с наиболее совершенной кристаллической структурой. Результаты рентгенографических исследований показали, что полученные пленки ZnO на кремнии имеют гексагональную сингонию и вюрцитную структуру с параметрами  $a = 0,3265$  нм и  $c = 0,5212$  нм, с размерами блоков 67 нм. Показано, что на поверхности пленок образуется нанокристаллы ZnO, со средним характерным размером  $L_{ZnO} \approx 84$  нм и имеющие дифракционные индексы –  $(102)_{ZnO}$  с  $d/n = 0,1911$  нм при  $(2\theta = 147,63^\circ)$ ,  $(110)_{ZnO}$  с  $d/n = 0,1630$  нм при  $(2\theta = 56,67^\circ)$  и  $(103)_{ZnO}$  с  $d/n = 0,1481$  нм при  $(2\theta = 62,93^\circ)$  соответственно. Обнаружено, что спектр фотолюминесценции гетероструктуры *n*-ZnO/*p*-Si имеет широкую полосу, охватывающий практически весь видимый диапазон излучения с максимумом при  $\lambda_{max} = 377$  нм. Это свидетельствует о том, что приведенные условия являются оптимальными для выращивания высококачественного слоя ZnO на Si практически без дефектов в видимой области излучения. Эксплуатационные параметры устройства на основе таких металлооксидов представляются перспективными для высокопроизводительных и недорогих коммерческих применений в детекторах светового излучения в ультрафиолетовой области. Определено, что металлооксидные слои *n*-ZnO и гетероструктуры на их основе также возможно использовать в устройствах для преобразования механической энергии деформации в электрическую, электрической энергии в световую и в преобразователях солнечной энергии в электрическую. Эти материалы обладают экологически чистотой, доступностью и невысокой ценой. Установлены, что синтез новых металлооксидных материалов, и разработка различных преобразователей энергии на их основе имеют высокую научную и практическую значимость.

**Ключевые слова:** металлооксид, кремний, спрей-пиролиз, золь-гель метод, рентгенограмма, отражения, вюрцитная структура, фотолюминесценция.

## STRUCTURAL AND PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF THE THIN-FILM HETEROJUNCTION N-ZNO/P-SI OBTAINED BY THE SOL-GEL METHOD

*S.Z. Zaynobodinov, Sh.Kh. Yulchiev, A.Y. Boboev*

Andijan State University named after Z.M. Babur  
170100, Uzbekistan, Andijan city, University street, h.129  
Phone: +998(90) 122-20-50, +9989(74) 225-61-30; e-mail: aboboevscp@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2020.09.012



Thin metal oxide layers of ZnO were obtained on a substrate of single - crystal silicon of p-type conductivity with a crystallographic orientation (100), by spray pyrolysis, and the optimal technological modes of the sol-gel method for obtaining metal oxide films with the most perfect crystal structure were determined. The results of X-ray studies showed that the obtained ZnO films on silicon have a hexagonal syngony and a wurtzite structure with parameters  $a = 0.3265$  nm and  $c = 0.5212$  nm, with block sizes of 67 nm. It is shown that ZnO nanocrystals are formed on the surface of the films, with an average characteristic size of  $L_{ZnO} \approx 84$  nm and having diffraction indices –  $(102)_{ZnO}$  with  $d/n = 0.1911$  nm at  $(2\theta = 147,63^\circ)$ ,  $(110)_{ZnO}$  with  $d/n = 0.1630$  nm at  $(2\theta = 56,67^\circ)$  and  $(103)_{ZnO}$  with  $d/n = 0.1481$  nm at  $(2\theta = 62,93^\circ)$ , respectively. It is found that the photoluminescence spectrum of the n - ZnO/p - Si heterostructure has a wide band covering almost the entire visible radiation range with a maximum at  $\lambda_{max} = 377$  nm. This indicates that these conditions are optimal for growing a high-quality ZnO layer on Si with virtually no defects in the visible radiation region. This indicates that these conditions are optimal for growing a high-quality ZnO layer on Si with virtually no defects in the visible radiation region. The operational parameters of a device based on such metal oxides are promising for high-performance and low-cost commercial applications in light radiation detectors in the ultraviolet region. It is determined that n - ZnO metal oxide layers and heterostructures based on them can also be used in devices for converting mechanical deformation energy into electrical energy, electrical energy into light energy, and in solar energy converters into electrical energy. These materials are environmentally friendly, affordable and low-cost. It is established that the synthesis of new metal oxide materials and the development of various energy converters based on them are of high scientific and practical importance.

**Keyword :** metal-oxide, silicon, spray pyrolysis, sol-gel method, X-ray picture, reflections, wurzite structure, photoluminescence.



Зайнобидинов С.З.  
Zaynobodinov S.Z.

**Сведения об авторе:** доктор физико-математических наук, профессор, кафедры физики Андijanского государственного университета, академик АН РУз

**Образование:** Ташкентский Государственный университет им. Мирзо Улугбека (1971).

**Область научных интересов:** Полупроводниковое материаловедение и физические эффекты в легированных полупроводниках и многослойных структурах на их основе.

**Публикации:** более 220 статей, 7 монографии, 6 патентов.

**Information about the author** doctor of science in physics and mathematics (1988), professor (1988), Chair of Physics, Andijan State University, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan

**Education:** Tashkent State university (1971)

**Research area:** Semiconductor material science and physical effects in doped semiconductors and multilayered structures on their basis.

**Publications:** more 220 articles, 7 monographs, 6 patents.



Йулчиев Ш.Х.  
Yulchiev Sh.Kh.

**Сведения об авторе:** кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Андijanского государственного университета.

**Образование:** Ташкентский Государственный университет им. Мирзо Улугбека (1996).

**Область научных интересов** радиационно-индуцированные и электрофизические, фотоэлектрические эффекты в МДП структурах.

**Публикации:** более 30 статей. 1 монография, 2 патента.

**Information about the author:** : doctor of philosophy in physics and mathematics, assistant professor Chair of Physics, Andijan State University.

**Education:** Tashkent State university (1996)

**Research area:** Radiation-induced, electro-physical and photoelectric effects in the MDS structures.

**Publications:** more 30 articles. 1 monograph, 2 patents.



Бобоев А.Й.  
Boboev A.Y.

**Сведения об авторе:** PhD по физико-математическим наукам, доцент кафедры физики Андижанского государственного университета

**Образование:** Андижанский Государственный Университет (2011)

**Область научных интересов:** рентгенография, фазовые переходы, радиационно-индуцированные и фотоэлектрические эффекты в полупроводниках структурах; взаимодействие примесей в алмазоподобных полупроводниках.

**Публикации:** более 30 статей.

**Information about the author:** doctor of philosophy in physics and mathematics, assistant professor Chair of Physics, Andijan State University.

**Education:** Andijan State University (2011)

**Research area:** roentgenography, phase transitions, and radiation-induced and photoelectric effects in semiconductor structures; interaction of impurities in diamond-like semiconductors.

**Publications:** more 30 articles.

## Введение

Ультрафиолетовые (УФ) фотоприемники имеют широкое коммерческое и военное применение, включая обнаружение пламени, очистку воды, подсчет денег, обнаружение озонового слоя, системы предупреждения о ракетном нападении и т. д. [1]. Хотя такие фотоприемники на основе GaN (~3,45 эВ) и SiC (~3,26 эВ) уже находятся в коммерческом использовании, их высокая стоимость и плохая совместимость с другими полупроводниками, включая Si, являются основными недостатками для достижения серийного производства эффективных УФ-детекторов [2]. В качестве альтернативы многие исследователи пытаются исследовать недорогой, экологически чистый и с широко-полосовым зазором (~3,34 эВ) оксид цинка (ZnO) с достаточно большой энергией экситона (~60 МэВ, у GaN ~25 МэВ) для применения в УФ-детекции [3]. Они проявили интерес к исследованиям УФ-фотоприемников на основе ZnO с различными конфигурациями, такими как диод Шоттки [3], МПМ (металл-полупроводник-металл) [4], МДПМ (металл-диэлектрик-полупроводник-металл) [4] и p-n гетеропереходные фотодиодные структуры [7]. Поскольку ZnO является внутренним полупроводником n-типа, изготовление стабильной и с управляемой толщиной тонкой пленки ZnO p-типа представляет собой сложный процесс [7]. Таким образом, ZnO используется в качестве полупроводникового слоя n-типа в большинстве p-n гетеропереходных УФ-фотодиодных структурах на основе ZnO [7].

Среди различных подложек, используемых для УФ-детекторов на основе тонких пленок ZnO [3], особый интерес представляет Si из-за его совместимости с современной технологией [7]. Тонкие пленки ZnO могут быть нанесены на большие пластины Si различными химическими и физическими методами, такими как перенос пара [5], гидротермальное [6], термическое испарение [7], импульсное лазерное осаждение [9], магнетронное напыление [10], атомно-слоевое осаждение [11] и золь-гель методы [8]. Поскольку рост затравочного слоя является дополнительным этапом, необходимым в процессе изготовления, стоимость изготовления выше, чем у устройств без затравочного слоя. Поскольку Si и ZnO имеют большое количество рассогласований решетки и разности тепловых коэффициентов [12], рост кристаллического ZnO непосредственно на Si имеет определенные трудности для преодоления которых и получения недорогих фотодиодов с гетеропереходом n-ZnO/p-Si достаточно хорошей производительностью необходимы адекватные технологии, исключая эти трудности. В этой работе предпринята попытка определить некоторые структурные и фотоэлектрические свойства тонкопленочного гетеропереходного диода n-ZnO/p-Si, полученного золь-гель методом.

Среди различных подложек, используемых для УФ-детекторов на основе тонких пленок ZnO [3], особый интерес представляет Si из-за его совместимости с современной технологией [7]. Тонкие пленки ZnO могут быть нанесены на большие пластины Si различными химическими и физическими методами, такими как перенос пара [5], гидротермальное [6], термическое испарение [7], импульсное лазерное осаждение [9], магнетронное напыление [10], атомно-слоевое осаждение [11] и золь-гель методы [8]. Поскольку рост затравочного слоя является дополнительным этапом, необходимым в процессе изготовления, стоимость изготовления выше, чем у устройств без затравочного слоя. Поскольку Si и ZnO имеют большое количество рассогласований решетки и разности тепловых коэффициентов [12], рост кристаллического ZnO непосредственно на Si имеет определенные трудности для преодоления которых и получения недорогих фотодиодов с гетеропереходом n-ZnO/p-Si достаточно хорошей производительностью необходимы адекватные технологии, исключая эти трудности. В этой работе предпринята попытка определить некоторые структурные и фотоэлектрические свойства тонкопленочного гетеропереходного диода n-ZnO/p-Si, полученного золь-гель методом.

Таблица обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
$\beta$	Бета
$\theta$	Тета
$h$	Постоянная Планка
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
Si	Кремний
ZnO,	Оксид цинки
$d/n$	Межплоскостное расстояние
$a_s$	Параметр кристаллической решетки подложки
C6/mmc	Пространственная группа
$L$	Полуширины пика
$a, c$	Параметр решетка вюрцитной структуры
Ga	Галлий
C	Углерод

N	Азот
S	Сульфид
Sb	Сурьма
As	Мишьяк
n, p,	p-дырочная проводимость, n-электронная проводимость
$N_a$	Акцепторная примесь, $N_a$ -донорная примесь
<i>Буквы русского алфавита</i>	
эВ	Электрон-вольт
нм	Нанометр
УФ	ультрафиолетовый
мВ	милливольт
мА	миллиампер
<i>Индексы нижние</i>	
2	Индекс



## 1. Методика эксперимента

Для получения тонких металлооксидных слоев ZnO на кремнии нами использован метод спрей-пиролиза по технологии, описанной в работе [13]. Нанесение производилось на подложке кремния  $p$ -типа проводимости с кристаллографической ориентацией (100). Подложки нагревались керамическим тепловым элементом размером 245x60 мм. Температура поверхности контролировалась пирометром HoldPeak hp-1500. Были опробованы разные температуры от 300 до 500 °C и выбрана оптимальная температура 420 °C для ZnO. Для нанесения раствора создавался аэрозоль при помощи аэрографа OPHIR AC004A, имеющего сопло диаметром 0,3 мм, давление воздуха для аэрографа создавалось безмасляным поршневым компрессором AS186.

Напыление пленок ZnO осуществлялось на поверхность предварительно разогретого кремния со скоростью 8 мл/мин. Расстояние от распыляющей головки до предварительно разогретого кремния составляло 85 см. Многослойное напыление пленки ZnO происходило по 1 мин с последующим перерывом 30 секунд для восстановления температуры подложки. Таким образом, было получено 20 слоев.

Структурные исследования подложек и полученных пленок были выполнены на XRD-6100 (Shimadzu, Япония). Рентгеновское напряжение составляет 40.0 кВ, а ток – 30.0 мА. Диапазон сканирования составляет 8.0-9.0, скорость сканирования 2 град/мин и шаг выборки = 0.02 град. Экспериментальные результаты, полученные с помощью XRD-6100, изучались методом Ритвельда с использованием программы Fullprof.

Спектры фотолюминесценции были получены на спектрометре LabRam HR800 в геометрии обратного рассеяния при комнатной температуре. Возбуждение производилось при помощи Ag<sup>+</sup> лазера с удвоением частоты (линия возбуждения 244 нм, плотность возбуждения 10<sup>21</sup> фотон/с·см<sup>2</sup>, мощность излучения, падающего на об-сне разец ~ 2.5 мВт). Для фокусировки лазерного излучения использовался объектив с 40-кратным увеличением, диаметр лазерного пятна на образце составлял 3-4 мкм.

## 2. Результаты и обсуждение

На рис.1 представлена рентгенограмма подложки  $p$ -Si. Видно, что в дифракционной картине присутствуют несколько структурных рефлексов селективного характера с различной интенсивностью. Анализ показал, что поверхность подложки соответствует кристаллографической плоскости (100). Об этом свидетельствуют присутствие на рентгенограмме серии селективных рефлексов типа {H00}, где (H = 2, 4, 5): интенсивные линии (200) с  $d/n = 0,2717$  нм ( $2\theta = 32,97^\circ$ ), (400) с  $d/n = 0,1357$  нм ( $2\theta = 69,23^\circ$ ). Бета ( $\beta$ ) составляющая основной селективной структурной линии (400) наблюдается при угле рассеяния  $2\theta = 61,75^\circ$ . Большая интенсивность ( $2 \cdot 10^5$  имп·сек<sup>-1</sup>) и узкая ширина ( $\text{FWHM} = 3,29 \cdot 10^{-3}$  рад) дифракци-

онного отражения (400) свидетельствуют о совершенстве кристаллической решетки подложки. Кроме того, только рефлекс (400) наиболее подходит для определения параметра решетки подложки, так как он самый интенсивный и узкий. Экспериментальное значение параметра решетки подложки, определенное по трем рефлексам-(200), (400) и (600) с помощью экстраполяционной функции Нельсона–Рейли составляло  $a_s = 0,54292$  нм. Однако, присутствие на рентгенограмме структурных линий с другими индексами - (111) с  $d/n = 0,3136$  нм ( $2\theta = 28,43^\circ$ ), (220) с  $d/n = 0,1924$  нм ( $2\theta = 47,4^\circ$ ) и (311) с  $d/n = 0,1638$  нм ( $2\theta = 56,12^\circ$ ) с малой интенсивностью и сравнительно большой шириной по сравнению с (400)<sub>Si</sub>, указывают на наличии также и поликристаллических участков в объеме монокремниевой подложки [14]. Такие отражения появляются при наличии искажений в решетке матрицы, связанные термоупругими напряжениями, возникающие в технологических процессах при получении образцов, а также напряжений, обусловленных с неоднородным распределением одного из основных фоновых примесей – кислорода в решетке кремния [15]. Кроме того, на рентгенограмме из серии отражений {H00} присутствует селективный рефлекс (200) с  $d/n = 0,2717$  нм ( $2\theta = 32,97^\circ$ ). По законам погасания, этот рефлекс появляется на рентгенограмме от неискаженной решетки алмазоподобной структуры кремния [16].

На рис. 2 представлена рентгенограмма полученной пленки ZnO и она существенно отличается от рентгенограммы подложки  $p$ -Si. На рентгенограмме пленки в малых углах рассеяния появились широкие диффузные отражения селективными рефлексами от плоскости (111) с  $d/n = 0,2774$  нм ( $2\theta = 31,7^\circ$ ), (002) с  $d/n = 0,2723$  нм ( $2\theta = 32,97^\circ$ ) и (101) с  $d/n = 0,249$  нм ( $2\theta = 36,34^\circ$ ). Видно, что структурная линия (002) с  $d/n = 0,2723$  нм ( $2\theta = 32,97^\circ$ ) является с самой сильной интенсивностью ( $\sim 10^5$  имп·с<sup>-1</sup>) и узкой шириной ( $\text{FWHM} = 2,62 \cdot 10^{-3}$  рад). Это также свидетельствует о высокой степени совершенства кристаллической решетки. Анализ экспериментальных данных этого пика показал, что структура относится к пространственной группе C6/mmc и кристаллическая решетка имеет гексагональную сингонию со структурой вюрцита (причем связь между атомами подрешетки цинка осуществляется через атомы кислорода) с параметрами  $a = 0,3265$  нм и  $c = 0,5212$  нм при комнатной температуре. Размеры субкристаллитов, оцененных по ширине данного пика, составили  $L_{\text{ZnO}} \approx 67$  нм.

Кроме того, на рентгенограмме пленки ZnO обнаружено ещё одно диффузное отражение в средних углах рассеяния с максимумом  $2\theta \approx 42,12^\circ$  ( $\text{FWHM} = 3,03 \cdot 10^{-1}$  рад). Над уровнем этого диффузного отражения четко выделяются еще три селективных рефлексов со слабой интенсивностью. Теоретические расчеты в [17] и анализ экспериментальных данных, полученной пленки показали, что эти рефлексы обусловлены нанокристаллитами ZnO на поверхности пленки, со средним характерным размером



$L_{\text{ZnO}} \approx 84$  нм и имеющие дифракционные индексы –  $(102)_{\text{ZnO}}$  с  $d/n = 0,1911$  нм ( $2\theta = 47,63^\circ$ ),  $(110)_{\text{ZnO}}$  с  $d/n$

$= 0,1630$  нм ( $2\theta = 56,67^\circ$ ) и  $(103)_{\text{ZnO}}$  с  $d/n = 0,1481$  нм ( $2\theta = 62,93^\circ$ ).

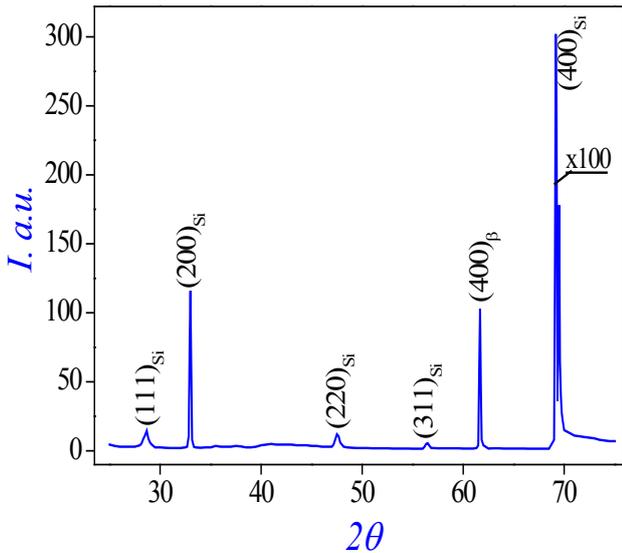


Рис.1. Рентгенограмма подложки p – Si  
Fig. 1. X-ray picture of the p - Si substrate

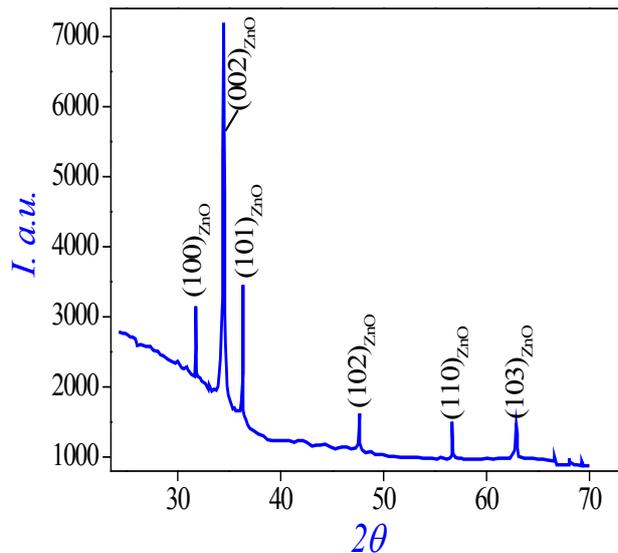


Рис. 2. Рентгенограмма полученной пленки ZnO  
Fig. 2. X-ray picture of the obtained ZnO film

Таким образом, анализ экспериментальных данных и сравнение их с теоретическими расчетами указывают на то, что полученные пленки ZnO на кремнии имеют гексагональную сингонию и вюрцитную структуру с параметрами  $a = 0.3265$  нм и  $c = 0.5212$  нм, с размерами блоков 67 нм. Нанокристаллы ZnO на поверхности пленки, со средним характерным размером  $L_{\text{ZnO}} \approx 84$  нм и имеющие дифракционные индексы –  $(102)_{\text{ZnO}}$  с  $d/n = 0,1911$  нм ( $2\theta = 147,63^\circ$ ),  $(110)_{\text{ZnO}}$  с  $d/n = 0,1630$  нм ( $2\theta = 56,67^\circ$ ) и  $(103)_{\text{ZnO}}$  с  $d/n = 0,1481$  нм ( $2\theta = 62,93^\circ$ ).

На рис. 3 показано фотолюминесцентная спектроскопия гетероструктуры ZnO/Si при комнатной температуре. В спектрах фотолюминесценции наблюдается только сильный ближний краевой пик излучения при 377 нм, обусловленный переходами пары донор-акцептор. Однако отсутствие каких-либо других эмиссионных пиков различных типов дефектов (например, эмиссия зеленой полосы из-за кислородной вакансии в пленке ZnO при  $\sim 550$  нм [5]) в характеристике фотолюминесцентных гетероструктур указывает на то, что выращенная пленка ZnO практически свободна от дефектов и является гетероструктурой с повышенным свойством УФ-детекции при  $\sim 377$  нм.

Таким образом, спектры фотолюминесценции показывают, что приведенные условия являются оптимальными для выращивания высококачественного слоя ZnO на Si практически без дефектов в видимой области. Такие параметры, предлагаемых гетероструктур, представляются перспективными для высокопроизводительных и недорогих коммерческих применений УФ-детектирования.

На рис. 4 показано, что у полученных пленок ZnO также повышается эффективность токосъема неравновесных носителей зарядов с поверхности кремния.

Гетероструктуры n-ZnO/p-Si полученные различными методами [18], демонстрируют вольтамперные характеристики с хорошими выпрямляющими свойствами. Структуры чувствительны к освещению белым светом, особенно их обратная ветвь, что можно использовать для контроля, видимого и УФ света. Однако, такие характеристики солнечных элементов, как напряжение холостого хода и ток короткого замыкания, очень малы, возможно, из-за наличия остаточного окисла на поверхности кремния, несогласованность параметров решеток и дефектность границ раздела, что препятствует разделению сфотогенерированных носителей зарядов.

Среди известных металлооксидов имеются материалы, пригодные для изготовления многослойных гетероструктур для преобразования солнечной энергии. Для этой цели на металлооксидные слои можно нанести широкозонные слои n-ZnO. В настоящее время имеются сведения, что исследования по методу синтеза и свойствам медноокисных слоев, однако результаты разработок эффективных солнечных элементов с использованием указанных выше металлооксидных слоев в общедоступной литературе пока отсутствуют.

Таким образом, металлооксидные слои n-ZnO применяются в устройствах для преобразования механической энергии деформации в электрическую, электрической энергии в световую, а также в преобразователях солнечной энергии в электрическую. Эти материалы обладают экологической чистотой, доступностью и невысокой ценой. Технологии синтеза металлооксидов отличаются разнообразием и доступностью. Синтез новых металлооксидных материалов и разработка различных преобразователей энергии на их основе имеют высокую научную и практическую значимость.

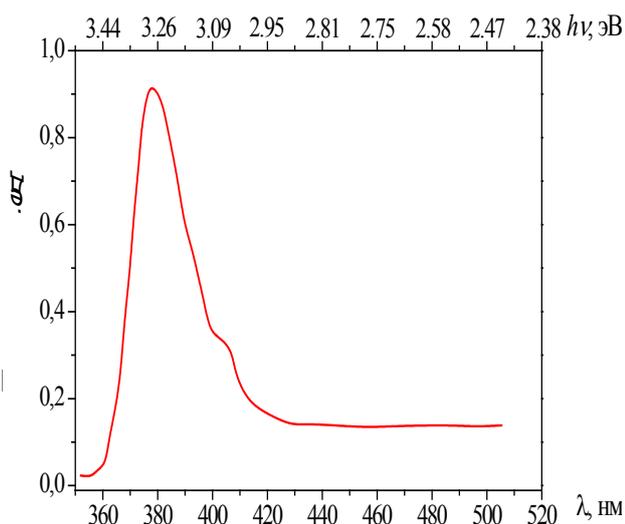


Рис. 3. Спектра фотолюминесценции пленки ZnO  
Fig. 3. Photoluminescence spectrum of the ZnO film

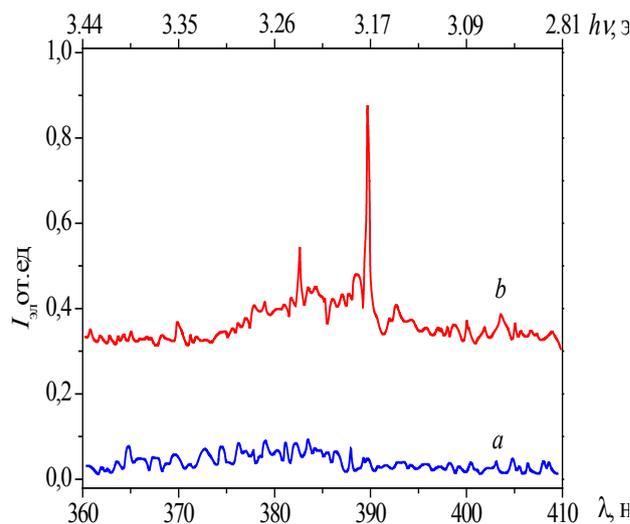


Рис. 4. Спектр излучения лазера при разных уровнях инжекции при комнатной температуре: а 10 и б – 20 мА  
Fig. 4. Laser emission spectrum at different injection levels at room temperature: a 10 and b - 20 mA

### Заключение

Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- полученные пленки ZnO на кремнии имеют гексагональную сингонию и вюрцитную структуру с параметрами  $a = 0.3265$  нм и  $c = 0.5212$  нм, с размерами блоков 67 нм. Нанокристаллы ZnO на поверхности пленки, со средним характерным размером  $L_{\text{ZnO}} \approx 84$  нм и имеющие дифракционные индексы –  $(102)_{\text{ZnO}}$  с  $d/n = 0,1911$  нм ( $2\theta = 147,63^\circ$ ),  $(110)_{\text{ZnO}}$  с  $d/n = 0,1630$  нм ( $2\theta = 56,67^\circ$ ) и  $(103)_{\text{ZnO}}$  с  $d/n = 0,1481$  нм ( $2\theta = 62,93^\circ$ );

- спектры фотолюминесценции показывают рост высококачественного слоя ZnO на Si практически без дефектов в видимой области. Эксплуатационные параметры устройства представляются перспективными для высокопроизводительных и недорогих коммерческих применений УФ-детектирования;

- металлооксидные слои n-ZnO применяются в устройствах для преобразования механической энергии деформации в электрическую, электрической энергии в световую, а также в преобразователях солнечной энергии в электрическую. Эти материалы обладают экологически чистотой, доступностью и невысокой ценой;

- синтез новых металлооксидных материалов, и разработка различных преобразователей энергии на их основе имеют высокую научную и практическую значимость.

### Список литературы

1. Jandow, N.N. Comparative study of the properties of ZnO thin films deposited on poly propylene carbonate (PPC) and glass substrates / N.N. Jandow [et al.] // Journal of Materials Science. – 2012. – Vol. 47, – P.1972–1976.

2. Ludwig Ostlund. 4H- and 6H-SiC UV photodetectors / Ludwig Ostlund [et al] // Physica Status Solidi C, – 2012. – Vol. 9(7), – P. 1680–1682.

3. Soci, C. ZnO Nanowire UV Photodetectors with High Internal Gain / C. Soci [et al] // Nano Letters. – 2007. – Vol. 7(4), – P. 1003-1009.

4. Ali, G.M. ZnO-based interdigitated MSM and MISIM ultraviolet photodetectors / G. M. Ali, and P. Chakrabarti // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2010. – Vol. 43(41), –P. 415103.

5. Luo, L. Fabrication and characterization of ZnO nanowires based UV photodiodes / L. Luo [et al]” Sensors and Actuators A. – 2006. – Vol. 127(1), – P. 201-206.

6. Shao, D. Heterojunction photodiode fabricated from hydrogen treated ZnO nanowires grown on p-silicon substrate / D. Shao [et al] // Applied Physics Letters. – 2012. – Vol. 101(21), – P. 211103.

7. Periasamy, C. Large-area and nanoscale n-ZnO/p-Si heterojunction photodetectors / C. Periasamy and P. Chakrabarti // Journal of Vacuum Science and Technology B. – 2011. – Vol. 29(5), pp. 051206.

8. Yakuphanoglu, F. ZnO/p-Si heterojunction photodiode by sol-gel deposition of nanostructure n-ZnO film on p-Si substrate / F. Yakuphanoglu [et al] // Material Science in Semiconductor Processing. – 2010. – Vol. 13(3), – P. 137-140.

9. Sahu, V.K. Studies on the electrical characteristics of n-ZnO/p-Si grown by pulsed laser deposition for UV photo detecting applications / V. K. Sahu [et al] // Physics Express. – 2013. – Vol. 3, – P. 10.

10. Sharma, P. Analysis of ultraviolet photoconductivity in ZnO films prepared by unbalanced magnetron sputtering / P. Sharma [et al] // Journal of Applied Physics. – 2003. – Vol. 93(7), – P. 3963-3970.



11.Chang, Y.M. Enhanced visible photoluminescence from ultrathin ZnO films grown on Si-nanowires by atomic layer deposition / Y.M. Chang [et al] // *Nanotechnology*. – 2010. – Vol. 21(38), – P.385705.

12.Wang, P. Quality improvement of ZnO thin layers overgrown on Si(100) substrates at room temperature by nitridation pretreatment / P. Wang [et al] // *AIP Advances*. – 2012. – Vol. 2(2), – P. 022139.

13.Юлчиев, Ш.Х. Использование пиролитических металлооксидных пленок для изготовления фотоэлектрических преобразователей энергии / Ш.Х. Юлчиев [и др.]. Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т. 15(5). – С. 72-77.

14.Zainabidinov, S.Z. Synthesis, Structure and Electro-Physical Properties n-GaAs-p-(GaAs)<sub>1-x-y</sub>(Ge<sub>2</sub>)<sub>x</sub>(ZnSe)<sub>y</sub> Heterostructures / S.Z. Zainabidinov [et al] // *Applied Solar Energy*. – 2019, – Vol. 55,(5), – P. 291.

15.Кислород в монокристаллах кремния // В.М. Бабич [и др.]; – Киев, Interpres LTD: – 1997. – 240 С.

16.Шульпина И.Л. Методы рентгеновской дифракционной диагностики сильнолегированных монокристаллов полупроводников / И.Л. Шульпина [и др.] // *ЖТФ*. – 2010, – Т. 80(4), – С. 105-114.

17.Теория формирования эпитаксиальных наноструктур // В.Г. Дубровский, – Москва: Физматлит, 2009. – С. 486.

18.Алексянц, А.Ю. Получение диодных гетероструктур p-Si/n-ZnO и исследование их вольтамперных характеристик / Алексянц, А.Ю. // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2013. – № 6. – С. 23–27.

## References

1.Jandow, N.N. Comparative study of the properties of ZnO thin films deposited on poly propylene carbonate (PPC) and glass substrates / N.N. Jandow [et al.] // *Journal of Materials Science*. – 2012. – Vol. 47, – P.1972–1976.

2.Ludwig Ostlund. 4H- and 6H-SiC UV photodetectors / Ludwig Ostlund [et al] // *Physica Status Solidi C*, – 2012. – Vol. 9(7), – P. 1680–1682.

3.Soci, C. ZnO Nanowire UV Photodetectors with High Internal Gain / C. Soci [et al] // *Nano Letters*. – 2007. – Vol. 7(4), – P. 1003-1009.

4.Ali, G.M. ZnO-based interdigitated MSM and MISIM ultraviolet photodetectors / G. M. Ali, and P. Chakrabarti // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2010. – Vol. 43(41), –P. 415103.

5.Luo, L. Fabrication and characterization of ZnO nanowires based UV photodiodes / L. Luo [et al] // *Sensors and Actuators A*. – 2006. – Vol. 127(1), – P. 201-206.

6.Shao, D. Heterojunction photodiode fabricated from hydrogen treated ZnO nanowires grown on p-silicon substrate / D. Shao [et al] // *Applied Physics Letters*. – 2012. – Vol. 101(21), – P. 211103.

7.Periasamy, C. Large-area and nanoscale n-ZnO/p-Si heterojunction photodetectors / C. Periasamy and P. Chakrabarti // *Journal of Vacuum Science and Technology B*. – 2011. – Vol. 29(5), pp. 051206.

8.Yakuphanoglu, F. ZnO/p-Si heterojunction photodiode by sol-gel deposition of nanostructure n-ZnO film on p-Si substrate / F. Yakuphanoglu [et al] // *Material Science in Semiconductor Processing*. – 2010. – Vol. 13(3), – P. 137-140.

9.Sahu, V.K. Studies on the electrical characteristics of n-ZnO/p-Si grown by pulsed laser deposition for UV photo detecting applications / V. K. Sahu [et al] // *Physics Express*. – 2013. – Vol. 3, – P. 10.

10.Sharma, P. Analysis of ultraviolet photoconductivity in ZnO films prepared by unbalanced magnetron sputtering / P. Sharma [et al] // *Journal of Applied Physics*. – 2003. – Vol. 93(7), – P. 3963-3970.

11.Chang, Y.M. Enhanced visible photoluminescence from ultrathin ZnO films grown on Si-nanowires by atomic layer deposition / Y.M. Chang [et al] // *Nanotechnology*. – 2010. – Vol. 21(38), – P.385705.

12.Wang, P. Quality improvement of ZnO thin layers overgrown on Si(100) substrates at room temperature by nitridation pretreatment / P. Wang [et al] // *AIP Advances*. – 2012. – Vol. 2(2), – P. 022139.

13.Yulchiev, SH.KH. Ispol'zovanie piroliticheskikh metalloksidnykh plenok dlya izgotovleniya fotoelektricheskikh preobrazovatelei ehnergii / SH.KH. Yulchiev [i dr.]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2019. – Т. 15(5). – S. 72-77.

14.Zainabidinov, S.Z. Synthesis, Structure and Electro-Physical Properties n-GaAs-p-(GaAs)<sub>1-x-y</sub>(Ge<sub>2</sub>)<sub>x</sub>(ZnSe)<sub>y</sub> Heterostructures / S.Z. Zainabidinov [et al] // *Applied Solar Energy*. – 2019, – Vol. 55,(5), – R. 291.

15.Kislород v monokristallakh kremniya // V.M. Babich [i dr.]; – Киев, Interpres LTD: – 1997. – 240 S.

16.Shul'pina I.L. Metody rentgenovskoi difraktsionnoi diagnostiki sil'nolegirovannykh monokristallov poluprovodnikov / I.L. Shul'pina [i dr.] // *ZHTF*. – 2010, – Т. 80(4), – S. 105-114.

17.Teoriya formirovaniya ehpitaksial'nykh nanostруктур // V.G. Dubrovskii, – Moskva: Fizmatlit, 2009. – S. 486.

18.Aleksyan, A.YU. Poluchenie diodnykh geterostруктур p-Si/n-ZnO i issledovanie ikh vol'tampernykh kharakteristik / Aleksyan, A.YU. // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2013. – № 6. – S. 23–27.

Транслитерация по BSI

