Известия НАН Армении, Физика, т.58, №2, с.202–212 (2023)

УДК 548.736.5, 539.26, 538.913, 538.953 DOI:10.54503/0002-3035-2023-58.2-202

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК ZnO:Tb

Е.П. ЗАРЕЦКАЯ¹*, В.Ф. ГРЕМЕНОК¹, В.В. МАЛЮТИНА-БРОНСКАЯ², А.С. МУСАЕЛЯН³, С.Г. ПЕТРОСЯН³

¹Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь

²Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Беларусь

³Институт радиофизики и электроники НАН Армении, Аштарак, Армения

*e-mail: ezaret@physics.by

(Поступила в редакцию 17 января 2023 г.)

Методом золь-гель осаждения на стеклянных и кремниевых подложках были получены однофазные и высоким коэффициентом пропускания света пленки ZnO:Tb с концентрацией Tb от 0.41 ат% до 0.78 ат%. Исследовано влияние ультрафиолетового излучения (УФ) на структурные и фотоэлектрические характеристики структур *n*-ZnO:Tb/*n*-Si. Установлено появление фотоэффекта при приложении напряжения смещения и воздействия УФ излучения (405 и 278 нм), причем при облучении более коротковолновым УФ излучением (278 нм) фотоэффект усиливается. Показано, что для повышения УФ фоточувствительности структур определяющим фактором выступает концентрация легирующей примеси Tb³⁺. Экспериментально установленная селективная чувствительность структур *n*-ZnO:Tb/*n*-Si к УФ излучению с длиной волны менее 405 нм демонстрирует возможность их использования в детекторах УФ излучения или солнечно-слепых детекторах.

1. Введение

Широкозонный полупроводник ZnO (ширина запрещенной зоны $E_g = 3.4 \text{ eV}$, энергия связи экситона 60 мэВ), обладающий уникальным сочетанием пьезоэлектрических и оптоэлектронных свойств, высокой радиационной и химической стойкостью, а также термической стабильностью, является одним из наиболее перспективных материалов для широкого ряда оптоэлектронных приборов [1]. Благодаря высоким люминесцентным свойствам, как в УФ, так и в видимой области спектра, он применяется в люминесцентных дисплеях с высоким разрешением, в солнечных элементах, биологических и химических сенсорах и т.д. [2–6]. Для получения тонких пленок ZnO используются различные технологии, такие как магнетронное распыление [7], золь-гель осаждение [8], химическое осаждение из паровой фазы [9] и метод послойного атомного осаждения [11]. Среди этих

методов золь-гель осаждение обладает рядом преимуществ, обусловленных простотой процесса и низкой стоимостью используемого оборудования, а также управляемостью размера кристаллитов в растущем слое.

Эффективным способом управления оптическими, электрическими и магнитными свойствами ZnO, имеющими важное значение для практических применений, является легирование элементами III и IV групп, а также редкоземельными элементами (P3Э) [12–15]. РЗЭ характеризуются глубокими уровнями, долгоживущими возбужденными состояниями, а также независимым от температуры люминесцентным излучением как в инфракрасном, так и в видимом диапазонах света [16,17]. В этом отношении тербий (Tb) является одним из наиболее изученных РЗЭ, поскольку, как известно, ионы Tb³⁺ могут послужить одним из наиболее важных источников зеленого излучения [18].

Известно, что УФ излучение оказывает значительное влияние на физические свойства тонких пленок ZnO [19–22]. Однако, приведенные в литературе данные о воздействии УФ излучения на их характеристики не однозначны. Так, в работе [19] сообщается об увеличении ширины запрещенной зоны ZnO при воздействии относительно длинноволнового излучения (> 365 нм) даже при низкой плотности мощности (~0.55 Вт/см²). С другой стороны, авторы работы [20] не установили существенного влияния УФ излучения на основные характеристики пленок ZnO. Рядом исследователей установлено обратимое увеличение проводимости, прозрачности и краевой люминесценции пленок ZnO в видимой и фиолетовой области спектра при облучении УФ излучением на воздухе и в вакууме [21, 22]. В этих работах заметной перестройки кристаллической решетки не было обнаружено, но было показано, что в изменении проводимости поликристаллических пленок ZnO, увеличении их прозрачности и яркости экситонного свечения определяющую роль играли процессы абсорбции-десорбции кислорода. В частности, установлено, что при адсорбции кислорода на границах кристаллитов прозрачность пленок уменьшается, как из-за изменения приповерхностного искривления зон, так и из-за эффективного поглощения поверхностными дефектами [21].

Поэтому исследование зависимостей характеристик пленок ZnO:Tb и их стабильности при воздействии УФ излучения, оказывающим в общем случае значительное влияние как на процессы фотогенерации электронно-дырочных пар, так и на возникновение кислородных вакансий (Vo), представляет особый интерес. Понимание взаимосвязи между различными условиями облучения и результирующими оптическими и электрическими свойствами слоев ZnO имеет также важное значение для создания устройств со стабильными характеристиками.

В данной работе представлены результаты исследования влияния ультрафиолетового излучения на структурные и фотоэлектрические характеристики структур ZnO:Tb/Si, сформированных методом золь-гель осаждения слоев ZnO с различной концентрацией тербия.

2. Методика эксперимента

2.1. Нанесение пленок

Слои ZnO и структуры ZnO:Tb/Si формировались нанесением коллоидного раствора (золя) методом центрифугирования на стеклянные и кремниевые подложки по методике, описанной в [23]. Определение химического состава золя

было проведено на основе теоретических расчётов и экспериментально установленной корреляция между параметрами коллоидного раствора и характеристиками слоев на основе ZnO:Tb. Коллоидный раствор золя был изготовлен на основе абсолютного изопропилового спирта, ацетата цинка и тербия. Для «созревания» раствора его выдерживали при температуре окружающей среды (22 ± 2)°C в течение 2–3 дней. На стеклянные и кремниевые монокристаллические подложки (марка КЭФ 20) наносились от 4 до 10 слоев ZnO:Tb с заданным соотношением легирующего компонента Tb в растворе золя. На последней стадии процесса подложки помещали в печь и нагревали поэтапно с интервалом 20°C с выдержкой в течение 60 мин при 550°C. Для измерения электрических характеристик омическим контактом к кремнию служила паста InGa, а контактирование к пленке ZnO:Tb осуществлялось с помощью зондовой системы.

2.2. Методы исследования

Исследование фазового состава пленок ZnO:Tb проводилось с использованием дифрактометра D8 Advance (BrukerAXS) на Cu K_{α} излучении ($\lambda = 0.1542$ нм), фильтрованным многослойным Ni/графитовым монохроматором. Идентификация фаз осуществлялась сравнением экспериментально установленных межплоскостных расстояний с данными JCPDS (Joint Council for Power Diffraction Standards, 2013).

Анализ топографии поверхности и поперечного сечения проводился с помощью сканирующего электронного микроскопа SEM H-800 (Хитачи, Япония) с разрешением 0.2 нм. Элементный состав материала пленок определялся посредством энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализатора «INCA 350» («Oxford Instruments», Великобритания) с разрешением 1.0 мкм и чувствительностью 0.1 ат%. Для получения спектров пропускания в диапазоне длин волн от 250 до 1100 нм с шагом 0.25 нм был использован спектрофотометр PHOTON RT (Беларусь).

Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) и высокочастотных вольтфарадных характеристик (ВЧ ВФХ) структур ZnO:Tb/Si проводилось с помощью автоматизированного базового лазерного испытательного комплекса с использованием светоизолирующего бокса [24]. В качестве источника глубокого УФ использовался светодиод TO-3535BC-UVC265-30-6V-Е мощностью 300 мкВт, размещенный в специализированной оснастке с максимумом излучения на длине волны 263–275 нм. Источником УФ излучения с длиной волны 405 нм служил полупроводниковый лазер мощностью 2.0 мВт. Все измерения были выполнены при комнатной температуре. Частоты сигнала измерения ВЧ ВФХ составляли 100 кГц и 1 МГц.

3. Экспериментальные результаты

При исследовании фазового состава пленок ZnO: Тb установлено, что полученные слои являются поликристаллическими и однофазными. В пределах разрешения никаких дополнительных фаз, содержащих тербий или его соединений,



Рис.1. Рентгенограмма ZnO:Тb пленки, полученной золь-гель осаждением 7 слоев ZnO:Тb (концентрация Tb = 0.62 ат%) на подложку монокристаллического кремния.

не было обнаружено даже при самом высоком уровне легирования Tb. На дифрактограммах пленок ZnO:Tb (рис.1) присутствуют только дифракционные пики, соответствующие гексагональной структуре вюрцита ZnO (JCPDS № 36–1451): (100) при 31.99°, (002) при 34.41° и (101) при 36.13°, а также рефлекс от кремниевой подложки (211) при 33.20° (JCPDS № 79-0613). Отсутствие рефлексов, относящихся к Tb или его соединениям, указывает на статистическое замещение ионов Zn²⁺ ионами Tb³⁺в кристаллической решетке ZnO и их возможное внедрение в кислородные тетраэдрические междоузлия. По сравнению с чистым ZnO, дифракционный рефлекс (002) слоев ZnO, легированных Tb³⁺, проявляет незначительное смещение в сторону меньших углов из-за большего чем у Zn²⁺ (0.074 нм) ионного радиуса Tb³⁺ (0.092 нм).

На рис.2 приведены SEM-изображения поверхности и скола пленки ZnO:Tb, осажденной на кремниевую подложку в последовательности 7 слоев с толщиной каждого слоя от 55.5 до 95.2 нм. Как видно из приведенных изображений пленок ZnO:Tb, они имеют развитую складчатую поверхность с высокой степенью шероховатости и упаковкой кристаллитов по типу «муаровой» структуры. Такой



Рис.2. SEM-изображения (а) поверхности (b,c) и скола пленки ZnO:Tb, осажденной на кремниевую подложку с последовательностью 7 слоев.

тип микрорельефа поверхности может быть обусловлен конкурирующими процессами формирования пленки ZnO, содержащей тяжелые элементы (в данном случае Tb), миграцией атомов по поверхности подложки и кристаллизацией агломератов золя на зародышевых центрах. Присутствие в золе тяжелых элементов приводит к снижению поверхностной скорости миграции атомов, соответственно, коалесценция агломератов и разрастание непрерывного монослоя на подложке происходит значительно медленнее, чем при кристаллизации на зародышевых центрах.

В результате доминирующего воспроизведения материала на островковых фрагментах с направлением роста перпендикулярном подложке, формируется пленка с высокой степенью шероховатости поверхности со складчатым микрорельефом. На приведенном изображении скола слоев ZnO:Tb (рис.2с) четко проявляется высокая воспроизводимость методики их формирования. Толщина каждого монослоя варьируется в пределах 55.5–95.2 нм, граница между слоями является непрерывной и плотно сопряженной, дефектов и проколов не наблюдается, что является весьма существенным фактором для уменьшения скорости рекомбинации носителей.

Содержание Тb в сформированных слоях составляет от 0.41 до 0.78 at%, что находится в пределах расчетных значений и хорошо соответствует составам золя. С увеличением числа последовательно осажденных слоев ZnO:Tb наблюдается незначительное возрастание концентрации тербия в пределах 0.04–0.05 at%. В табл. 1 приведен элементный состав для пленки ZnO:Tb с расчетной концентрацией тербия в золе 0.60 at%, осажденной с последовательностями 5 и 7 слоев.

5 слоев ZnO:Тb				7 слоев ZnO:Tb	
Элемент	Серия	Bec%	Ат%	Bec%	Ат%
0	К-серия	22.26	54.65	26.19	52.41
Zn	L-серия	74.38	44.71	69.12	46.92
Tb	L-серия	2.54	0.63	2.79	0.67

Табл.1. Элементный состав пленок ZnO:Tb на кремниевой подложке

Все осажденные на стеклянной подложке пленки ZnO:Tb имели коэффициент оптического пропускания в видимой области спектра свыше 85% (рис.3). Заметим, что осцилляционный характер коэффициента пропускания, как обычно, обусловлен интерференционными явлениями в системе пленка–стеклянная подложка. Длиноволновой же сдвиг края оптического поглощения (375 нм) относительно края поглошения в нелегированных образцах ZnO (350 нм) обусловлен наличием разного вида неупорядоченностей, приводящих к возникновению «хвостов» локализованных состояний в запрещенной зоне [25]. Из рисунка видно, что суммарная толщина пленок ZnO:Tb с одинаковой концентрацией тербия не оказывает существенного влияния на коэффициент пропускания света. Пленки меньшей толщины (4 слоя ZnO:Tb) в диапазоне длин волн от 400 нм до



Рис.3. Коэффициент оптического пропускания пленок ZnO:Tb (концентрация тербия 0.41 ат%) на стеклянной подложке: *1* – четыре слоя; *2* – шесть слоев; *3* – восемь слоев.

500 нм характеризуются коэффициентом пропускания 80–87%, что несколько ниже, чем для пленок с большим количеством слоев (8 слоев ZnO:Tb). Однако в диапазоне длин волн от 700 до 1100 нм коэффициенты пропускания практически одинаковы и составляют 85–90% для всех исследованных пленок ZnO:Tb.

При создании гетеростуктур типа ZnO/Si, необходимо иметь ввиду, что в зависимости от типа и уровня легирования исходных полупроводниковых материалов и от наличия заряженных состояний на гетерогранице электрические и фотоэлектрические свойства гетеропереходов, особенно изотипных, могут существенным образом изменяться [26]. На границе раздела неидеальных гетеропереходов возникают также дислокации, компенсирующие различие в постоянных решетки, приводящие к возникновению оборванных связей и двух наборов локальных состояний. Кроме вышесказанного, в случае описания свойств гетероперехода *n*-ZnO:Tb/*n*-Si необходимо иметь ввиду не только влияние уровней акцепторного типа, расположенных в верхней части запрещенной зоны и донорного типа, расположенных в нижней части запрещенной зоны, но и роль ионов Тb³⁺ в увеличении плотности поверхностных состояний. Наличие большого заряда границы раздела, сопоставимого с объемными зарядами (в расчете на единичную плошадь), обусловленными разностью в термодинамических работах выхода слоев неидеального гетероперехода, может существенным образом влиять на вид зонной диаграммы и емкостные свойства перехода [27].

Конкретный вид функции энергетического распределения плотности поверхностных состояний часто оказывается не очень важным, так как любой плотный набор заряженных состояний на границе раздела может создавать в изотипном гетропереходе двойной обеднённый слой, что приводит к одностроннему пропусканию тока или насыщению в обоих направлениях приложенного внешнего напряжения [27]. Именно такую модель изотипного гетероперехода *n*-ZnO/*n*-Si с большой концентрацией поверхностных состояний мы возьмем за основу для качественного объяснения его емкостных и фотоэлектрических характеристик. В таком гетеропереходе из-за более сильного легирования слоя ZnO:Tb следует ожидать, что область пространственного заряда в основном будет расположена в *n*-Si, где и приходится основная часть падения контактной разности потенциалов (V_{bi}) и внешнего напряжения (V). На гетерогранице из-за разрыва в электронных сродствах ZnO (4.35 эВ) и Si (4.05 эВ) для перехода электронов из ZnO в Si возникает скачкообразный барьер величиной в 0.3 эВ, определяющий обратный ток гетероперехода. Со стороны *n*-Si барьер для электронов определяется величиной $e(V_{bi} - V)$.



Рис.4. ВЧ ВФХ структуры *n*-ZnO:Tb/*n*-Si (5 осажденных слоев, содержание Tb = 0.41 ar%), измеренные в темноте и при воздействии лазерного излучения с длиной волны 405 нм.

На рис.4 представлены ВЧ ВФХ структуры n-ZnO:Tb/n-Si (5 осажденных слоев, концентрация ионов $Tb^{3+} = 0.41$ ат%), измеренные на частотах 100 кГц и 1 МГц в темноте и при воздействии УФ лазерного излучения с длиной волны 405 нм. Оказалось, что ВФХ, измеренные на частоте сигнала 1 МГц в темноте и при воздействии УФ лазерного излучения, совпадают, поэтому на рисунке приведена только темновая характеристика. При частоте сигнала 100 кГц на ВФХ в области напряжений от -5 B до +15 B наблюдаются особенности в виде максимумов, а в области напряжений от +4 В до +15 В – гистерезис шириной порядка 5 В. Гистерезис ВФХ при низкой частоте измерительного сигнала свидетельствует, во-первых, о значительном вкладе в емкость поверхностных состояний, а во вторых, об изменении их зарядового состояния как при прохождения тока, так и под воздействием УФ облучения. В случае обратного смещения (подложка *n*-Si смещена в положительном направлении относительно пленки) с ростом напряжения смещения, ширина слоя обеднения в n-Si увеличивается, и происходит уменьшение емкости структуры. В случае прямого смещения ширина слоя обеднения в подложке с ростом напряжения смещения уменьшается, рекомбинационные процессы на границе раздела усиливаются, а емкость выходит на постоянную величину, определяемую емкостью слоя ZnO и поверхностных состояний.

Под действием УФ-излучения наблюдается уменьшение низкочастотной емкости в областях максимума и гистерезиса, обусловленные, по-видимому, генерационно-рекомбинационными процессами на поверхностных состояниях границы раздела при генерации неравновесных электронно-дырочных пар в слое ZnO и подложке [29–31].

С ростом частоты сигнала общее значение емкости существенно изменяется: в области отрицательных напряжений оно уменьшается, а в области положительных – растет, а гистерезис и максимум в области напряжений от +4 В до +15 В вообще пропадают.Такое поведение ВФХ с ростом частоты сигнала и исчезновение максимума и гистерезиса обусловлено тем, что на высоких частотах (~1 МГц) заряды поверхностных состояний границы раздела не успевают следовать за сигналом переменного напряжения [28,30–34].

На рис.5 представлены типичные ВАХ структур *n*-ZnO:Tb/*n*-Si с разным количеством слоев ZnO:Tb (содержание Tb = 0.78 at%), измеренные в темноте и при воздействии УФ-излучения с длиной волны 278 нм. Аналогичные ВАХ наблюдаются и для других концентраций Tb. Видно, что в зависимости от толщины слоя ZnO:Tb BAX видоизменяется. Статические BAX исследованных структур с концентрацией Tb³⁺ = 0.62 at% и 0.78 at%, измеренные в темноте, проявляют четко выраженный выпрямляющий характер. Отношение токов в прямом и обратном направлениях (напомним, что прямому направлению тока соответствует подача положительного потенциала на ZnO) при смещении 5 В изменялось от образца к образцу от нескольких единиц до 50.

По-видимому, односторонное пропускание тока в нашем случае происходит на диоде типа «Шоттки» Si/граница раздела, так как концентрация примеси в ZnO больше (порядка 10^{18} – 10^{19} см⁻³), чем у кремния (3×10^{14} см⁻³) и вырожденный слой ZnO может играть роль металла [26,35]. При положительном смещении на *n*-Si подложке барьер для электронов из *n*-Si в ZnO увеличивается и обратный



Рис.5. Типичные BAX структур *n*-ZnO:Tb/*n*-Si: (a) 5 слоев; (b) 7слоев (содержание Tb = 0.78 at%).

ток гетероперехода, без учета пограничных состояний, определяется только надбарьерной инжекцией электронов из ZnO в Si и практически не зависит от внешнего смещения. При отрицательном же смещении на подложке барьер для электронов из Si уменьшается и инжекционный ток через гетерограницу возрастает.

При исследовании воздействия оптического излучения в диапазоне длин волн (от 278 до 1064 нм) на фотоэлектрические BAX структур n-ZnO:Tb/n-Si появление фототока наблюдалось при воздействии УФ излучения, например, с длинами волн 405 и 278 нм. Причем, при облучении более коротковолновым У Φ излучением (278 нм) структура проявляет большую фоточувствительность (рис.5), что в первую очередь определяется более высоким коэффициентом собственного поглощения света. Однако увеличение концентрации легирующей примеси Tb³⁺ в матрице ZnO тоже приводило к росту фоточувствительности. Мы считаем, что при увеличении концентрации легирующей примеси уменьшается толщина слоя обеднения в ZnO, одновременно увеличивается количество поверхностных состояний на границе раздела, имеющих разные глубины залегания в запрещенной зоне. Данные состояния в зависимости от степени их заполнения могут принимать непосредственное участие и в процессе прохождения фототока при сочетании туннельного (или термически активированного туннельного) захвата на них электронов и их последующей рекомбинации с дырками [27]. В частности, при наличии внешнего положительного смещения электроны из n-Si, которые за счет термической активации преодолели поверхностный барьер величиной $e(V_{bi} - V)$ и достигли гетерограницы, могут захватиться на не заполненные электронами граничные состояния, тем самым обеспечивая дополнительный рекомбинационный канал для прохождения тока. Возникновение фототока, кроме количества легируюшей примеси и величины изгиба зон, зависит также и от толщины пленки, определяющей в ней долю поглощенного излучения. Так, например, в структуре с пленкой толщиной в 5 слоев и содержанием Tb = 0.78ат%, фототок наблюдался лишь после приложенного напряжения смещения, подаваемого на пленку более чем –5 В (рис.5а). Для структуры с более толстой пленкой (7 слоев) при напряжениях на пленке более +2.5 В наблюдается отрицательный фотоэффект, а при напряжениях более чем –5 В наблюдался положительный фотоэффект (рис.5b). Причем, при напряжении -14В фоточувствительность структуры составила порядка 33.7 мА/Вт. В отличие от этого, для структуры ZnO:Tb/Si с концентрацией ионов Tb³⁺=0.62 ат% фототок наблюдался лишь при отрицательных напряжениях, подаваемых на ZnO (графики не представлены), а при напряжении смещения -14 В фоточувствительность составила порядка 11 мА/Вт, что приблизительно в 3 раза меньше, чем у структуры с концентрацией ионов $Tb^{3+} = 0.78$ ат%. Изменение величины и знака фотоэффекта в рассмотренной модели гетроперехода, по-видимому, обусловлено генерацией фотонапряжения в противоположных направлениях в слоях обеднения в ZnO и кремниевой подложке.

Таким образом, увеличение концентрации ионов Tb³⁺, вызывающее уменьшение толщины слоя обеднения в пленке и рост концентрации поверхностных состояний, способствует прохождению тока в обоих направлениях (при прямом и обратном смещении) и проводит к повышению фоточувствительности к УФ излучению структуры ZnO:Tb/Si.

4. Заключение

Методом золь-гель осаждения получены однофазные пленки ZnO:Tb на стеклянных и кремниевых подложках с концентрацией Tb^{3+} в пределах 0.41–0.78 ат%. Они характеризуются высоким коэффициентом пропускания от 82 до 92% в диапазоне длин волн от 370 до 1100 нм. Предположено, что емкостные и транспортные свойства структуры n-ZnO:Tb/n-Si определяются емкостью двух диодов: граница раздела-область обеднения в ZnO и граница раздела-область обеднения в Si, а также наличием поверхностных состояний в неидеальном гетропереходе. Обнаружено появление фотоэффекта при воздействии напряжения смещения и УФ излучения (405 и 278 нм). При более коротковолновом УФ излучении (278 нм) фотоэффект проявляется сильнее. Установлено, что для повышения УФ фоточувствительности определяющим фактором выступает концентрация примеси Tb^{3+} . С ростом ее от 0.6 до 0.78 ат% при одном и том же приложенном напряжении смещения наблюдается увеличение фоточувствительности от 11 до 33.7 мА/Вт. Полученные результаты демонстрируют возможность использования данных структур для детекторов высокого УФ излучения или солнечно-слепых детекторов.

Работа поддержана Белорусским Республиканским Фондом Фундаментальных Исследований (грант № Т21АРМ-003), Комитетом науки МОНКС Республики Армения (грант № 21 SC-BRFFR-1С003) и ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии».

ЛИТЕРАТУРА

- 1. S.J. Pearton, D.P. Norton, K. Ip, Y.W. Heo, T. Steiner. Prog. Mater. Sci., 50, 293 (2005).
- 2. N. Batra, M. Tomar, P. Jain, V. Gupta. J. Appl. Phys., 114, 124702 (2013).
- 3. K.R. Lee, B.O. Jung, S.W. Cho, K. Senthil, H.K. Cho. J. Mater. Res., 282, 605 (2013).
- M. Sessolo, H.J. Bolink, H. Brine, H. Prima-Garcia, R. Tena-Zaera. J. Mater., Chem., 22, 4916 (2012).
- 5. Y.-T. Yu. Sensors and Actuators B: Chemical, 165, 133 (2012).
- Y. Zeng, L. Qiao, Y. Bing, M. Wen, B. Zou, W. Zheng, T. Zhang, G. Zou. Sensors and Actuators B: Chemical, 173, 897 (2012).
- 7. T. Itoh, C. Lee, G. Sasaki, T. Suga. Mater. Chem. Phys., 44, 25 (1996).
- 8. J. Zhang, H. Feng, W. Hao, T. Wang. J. Sol-Gel Sci. Technol., 39, 37 (2006).
- 9. W.T. Chiou, W.Y. Wu, J.M. Ting. Diam. Relat. Mater., 12, 1841 (2003).
- 10. S. Ray, R. Das, A.K. Barua. Solar Energy Mater. Solar Cells, 74, 387 (2002).
- 11. J. Lim, C. Lee. Thin Solid Films, 515, 3335 (2007).
- 12. A. Douayar, A. Belayachi, M. Abd-Lefdil, K. Nouneh, Z. Laghfour, I.V. Kityk, A. Slezak, R. Miedzisnki. Journal of Alloys and Compounds, 550, 345 (2013).
- 13. H.J. Ko, Y.F. Chen, S.K. Hong, H. Wenisch, T. Yao, D.C. Look. Appl. Phys. Lett., 77, 3761 (2000).
- 14. E. Klaus, K. Andreas, R. Bernd. Springer Series in Materials Science, 104, 140 (2008).
- 15. Y. Terai, K. Yamaoka, K. Yoshida, T. Tsuji, Y. Fujiwara. Physica E, 42, 2834 (2010).
- 16. G. Kaur, Y. Dwivedi, S.B. Rai. J. Fluoresce, 21, 423 (2011).
- 17. G.M. Salley, R. Valiente, H.U. Gudel. J. Lumin., 94-95, 305 (2001).
- 18. V. Kumar, O.M. Ntwaeaborwa, H.C. Swart. J. Colloid Interface Sci., 465, 295 (2016).
- 19. H.-E. Lin, J.-S. Hong, R. Nitta, Y. Kubota, Y. Katayanagi, H. Wagata, T. Kishi,

T. Yano, N. Matsushita. Appl. Surf. Sci., 489, 135 (2019).

- 20. A.M. Soleimanpour, Y. Hou, A.H. Jayatissa. Appl. Surf. Sci., 257, 5398 (2011).
- 21. А.Н. Грузинцев, В.Т. Волков. ФТП, 45, 1476 (2011).
- 22. Н.Р. Агамалян, Р.К. Овсепян. Известия НАН Армении. Физика, 43, 143 (2008).
- 23. Е.П. Зарецкая, В.Ф. Гременок, А.А. Семченко, В.В. Сидский, Р.Л. Юсканес. ФТП, 49, 1297 (2015).
- 24. В.В. Малютина-Бронская, В.Б. Залесский, С.А. Сорока, О.В. Ермаков, О.А. Гребенщиков, Т.Р. Леонова. Сборник материалов 13-й международной научно-технической конференции "Приборостроение 2020", Минск, БНТУ, 391 (2020).
- 25. В.Т. Аванесян, П.С. Проворотов, В.М. Стожаров, М.М. Сычев, А.А. Ерузин. Оптика и спектроскопия, 129, 1142 (2021).
- 26. Л.В. Беляков, Д.Н. Горячев, О.М. Сресели, И.Д. Ярошецкий. ФТП, 27, 1815 (1993).
- 27. А. Милнс, Д. Фойхт. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник. М.: Мир, 1975.
- V. Malyutina-Bronskaya, V. Zalesski, A. Mudryi. Optical Materials, 127, 112305 (2022).
- 29. F. Yakuphanoglu. Applied Surface Science, 257, 1413 (2010).
- 30. I. Orak. Solid State Communications, 247, 17 (2016).
- 31. S.K. Singhetal. Superlattices and Microstructures, 91, 62 (2016).
- 32. A. Tataroglu, S. Altindal. Microelectronic Engineering, 85, 2256 (2008).
- 33. I. Orak, A. Kocyigit, A.Turut. J. Alloys and Compounds, 691, 873 (2016).
- 34. M. Geoghegan, G. Hadziioannou. Polymer Electronics, OUPOxford, 2013.
- 35. В.В. Малютина-Бронская, В.Б. Залесский, Т.Р. Леонова. Доклады БГУИР, 6(60), 39 (2011).

STUDY OF ULTRAVIOLET IRRADIATION EFFECT ON THE ZnO:Tb THIN FILMS CHARACTERISTCS

E.P. ZARTESKAYA, V.F. GREMENOK, V.V. MALYUTINA-BRONSKAYA S.G. PETROSYAN, A.S. MUSAYELYAN

Single phase and highly transparent ZnO:Tb films with a Tb concentration from 0.41 at.% up to 0.78 at.% were formed on glass and silicon substrates by sol-gel deposition. The effect of ultraviolet radiation on the structural and photoelectric characteristics of n-ZnO:Tb/n-Si structures has been studied.The appearance of a photoelectric effect under the influence of a bias voltage and UV radiation (405 nm and 278 nm) was established, with an increase in its intensity under deep UV radiation (278 nm). It was shown that the concentration of the Tb³⁺ dopant is the determining factor for increasing the UV photosensitivity of the structures. The experimentally established selective sensitivity of n-ZnO:Tb/n-Si structures to UV radiation with a wavelength of less than 405 nm demonstrates the possibility of their use in UV radiation detectors or sun-blind detectors.