

УДК 538.95

ЛЕГИРОВАННЫЕ ПЛЕНКИ ОКСИДА ЦИНКА ДЛЯ КОНВЕРСИИ СПЕКТРА КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.В. Малютина-Бронская¹, В.Б. Залесский¹, А.В. Семченко², В.В. Сидский²

¹Государственное научно-производственное объединение
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск

²Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

ALLOYED ZINC OXIDE THIN FILMS FOR THE CONVERSION OF THE SILICON SOLAR CELLS SPECTRUM

V.V. Malyutina-Bronskaya¹, V.B. Zaleski¹, A.V. Semchenko², V.V. Sydsky²

¹State Scientific and Production Association "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk

²F. Scorina Gomel State University

Представлены оптические и фотоэлектрические свойства пленок ZnO:Me:RE³⁺ на стекле и кремнии, изготовленных с помощью золь-гель технологии методом центрифугирования. Показано, что структуры Al/ZnO:Me:RE³⁺/Si обладают фоточувствительностью в видимом и ИК спектральных диапазонах. Характеристики, полученные для системы солнечный элемент/ ZnO:Me:RE³⁺/стекло, показали возможность использования исследуемой системы в качестве даун-конвертера спектра поступающего излучения, поскольку при ее использовании наблюдается вклад в увеличение КПД солнечного элемента по сравнению с системой солнечный элемент/ ZnO:Al/ стекло.

Ключевые слова: оксид цинка, редкоземельные ионы, кремниевые солнечные элементы, пропускание, фоточувствительность, конверсия спектра.

Optical and photoelectrical properties of ZnO:Me:RE³⁺ thin films on glass and silicon substrates, formed by means of the sol-gel technique by the spin-coating method are presented. It is shown, that the Al/ZnO:Me:RE³⁺/Si structures obtain photosensitivity in visible and IR spectral ranges. Characteristics obtained for the system "Solar Cell / ZnO:Me:RE³⁺/ glass" have presented a possibility of the use of the studied system as the down-converter of the entering irradiation, as it gives a contribution to the performance factor of the individual solar cell as compared to the "Solar Element/ZnO:Al/glass" system.

Keywords: zinc oxide, rare-earth ions, silicon solar cells, transmission, photosensitivity, spectrum conversion.

Введение

Пленки ZnO имеют широкое применение в оптоэлектронике, в частности, в прозрачно-проводящих электродах в светодиодах, плоских панельных дисплеях и солнечных элементах (СЭ) [1]–[3]. Это связано с такими свойствами оксида цинка, как высокий коэффициент пропускания в видимой области спектра и хорошая электропроводность [4]. Высокая проводимость связана со стехиометрией пленки и наличием внутренних дефектов кристалла. Введение в кристаллическую структуру пленки различных примесей приводит к изменению как оптических свойств, так и электрических свойств пленки [5]–[7].

Легирование ZnO является важным направлением в исследовании оптических и электрических свойств, имеющее решающее значение для практического применения этого материала. Среди легирующих примесей особое место занимают ионы редкоземельных ионов (РЗИ), которые обладают уникальными электрическими, оптическими и люминесцентными свойствами для самых различных применений [8], [9]. В настоящее время материалы, легированные РЗИ элементами интенсивно исследуются, в частности, как материалы для фотоники [10], [11].

Наиболее существенными механизмами, понижающими эффективность кремниевых солнечных элементов, являются неполное поглощение солнечного спектра и термализация фотоэлектронов, возбужденных фотонами с энергией, существенно превышающей ширину запрещенной зоны полупроводника. Два этих механизма ответственны за потерю почти 50% солнечной энергии. Одним из способов минимизации потерь является более эффективное использования солнечного спектра, как например, в тандемных солнечных элементах. Еще один способ – это трансформировать широкий солнечный спектр в спектр с узким распределением фотонов по энергии вблизи оптимального для конкретного полупроводника значения [12]. Кремниевые фотоэлементы эффективно преобразуют энергию солнечного излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов (500–900 нм). Имеется возможность повысить КПД фотоэлемента в области ниже 500 нм и выше 900 нм.

В новейших СЭ повышение КПД достигается за счет расширения спектра «действенного» солнечного излучения. Идея конверсии длин волн излучения в фотоэлектричестве заключается в возможности, используя необходимые материалы,

изменить солнечный спектр с тем, чтобы задействовать фотоны, энергии которых не соответствуют диапазону поглощения фотоэлектрических приборов. Поглощение фотона, а затем испускание одного или нескольких фотонов с более низкой энергией называется преобразованием с повышением частоты (фотолюминисценция), или «даун-конверсией», в то время как поглощение двух и более фотонов, а затем испускание одного фотона с более высокой энергией называется преобразованием с понижением частоты, или «ап-конверсией» [13]–[15]. Один из методов повышения эффективности солнечных фотоэлементов связан с использованием материалов легированных РЗИ, которые характеризуются сильной люминесценцией в видимом диапазоне [10]. Такие преобразователи солнечного излучения используют люминесцентную среду для изменения длины волны фотонов, энергия которых превышает допустимый диапазон энергий полупроводникового прибора. Данный подход обладает рядом преимуществ по сравнению с другими способами повышения эффективности солнечных батарей [16], [17]. Прежде всего, преобразователи являются внешними дополнительными приспособлениями, поэтому не требуется модификация самих фотоэлементов. Преобразователь способен поглощать как прямое, так и рассеянное излучение, тем самым значительно повышая используемую спектральную плотность. Одним из уникальных преимуществ данной концепции является его совместимость со множеством существующих технологий производства солнечных элементов, так как модифицируется только поступающий спектр солнечной энергии (рисунок 0.1). Еще одно дополнительное преимущество связано с тем, что, поглощая значительную долю высокоэнергичных фотонов, преобразователь будет поглощать и высвобождаемую тепловую энергию. Это дает возможность уменьшить тепловую нагрузку на фотоэлемент, тем самым улучшая его работоспособность.

К таким преобразователям можно отнести среды на органических красителях, но они имеют высокую деградацию и неорганические люминесцентные среды, например активированные стекла, стеклокерамики и кристаллы [18], [19]. В свою очередь стекла могут быть органически включены в структуру солнечного элемента, причем люминесцентная среда может быть как на поверхности, так и в объеме стеклообразной матрицы.

К таким активным материалам можно отнести пленки ZnO, легирование РЗИ, нанесенные на стекло. Данные пленки проявляют люминесцентные свойства, зависящие от вида РЗИ и способа получения материала [20].

Для получения пленок ZnO используются различные виды напыления, молекулярно-лучевая эпитаксия, осаждение из газовой фазы, золь-гель

метод [21]. Золь-гель метод получения пленок ZnO имеет такие преимущества, как простота оборудования, возможность контроля стехиометричности пленки, низкая стоимость, гибкость технологии, ее экологическая безопасность. При синтезе пленок на основе оксида цинка золь-гель методом появляется возможность управления оптическими и электрофизическими свойствами. В работе [22] показаны фотоэлектрические свойства слоев оксида цинка легированных Er и Tb, полученные реактивным магнетронным распылением мишени и показывающие их возможность использования в качестве активных слоев оптоэлектроники.

Целью данной работы было изучение оптических и фотоэлектрических свойств набора пленок ZnO легированных РЗИ на стекле и кремнии, полученных золь-гель методом, определить возможность применения их в качестве спектрального преобразователя для кремниевых солнечных элементов.

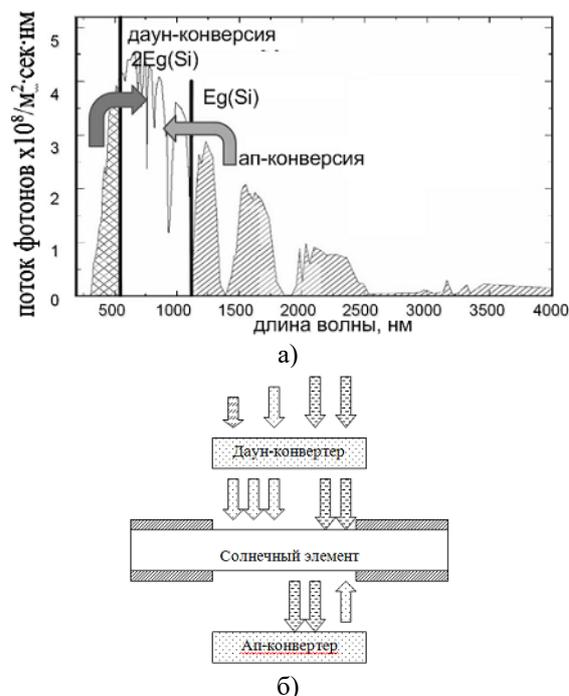


Рисунок 0.1 – Спектр солнечного света (а) и структура тестируемого солнечного элемента для преобразования спектра солнечного элемента (б)

1 Методика эксперимента

В данной работе рассматриваются пленки оксида цинка на стекле, полученные золь-гель методом. В качестве легирующей примеси были использованы ионы РЗЭ: Eu, Er, Sm, Tb, Yb. Для улучшения проводимости некоторые пленки дополнительно со-легировались ионами алюминия (Al) или серебра (Ag).

Легированные пленки ZnO ($\text{ZnO}:\text{Me}:\text{RE}^{3+}$) на стекле и кремнии были изготовлены с помощью

золь-гель технологии методом центрифугирования. Химический состав золя подобран экспериментальным путём. Пленки синтезировались на основе ацетата цинка, изопропилового спирта с содержанием ионов Me (5 ат.% нитрата алюминия (Al) или 0,5 ат. % нитрата серебра (Ag) и 2 ат. % нитратов RE^{3+}). Пленкообразующий раствор готовился из ацетата цинка, который заливался абсолютным изопропиловым спиртом и перемешивался. После нанесения золя на поверхность пластин (стекла, монокристаллического кремния), образцы отжигались при температуре $400^\circ C$ с выдержкой в течение 1 часа. Полученные пленки имеют толщину порядка 300 нм. Данные пленки характеризуются однородной мелкозернистой микроструктурой с размерами зерен 19 нм [23].

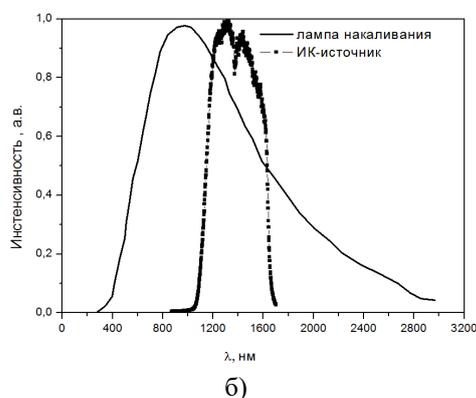
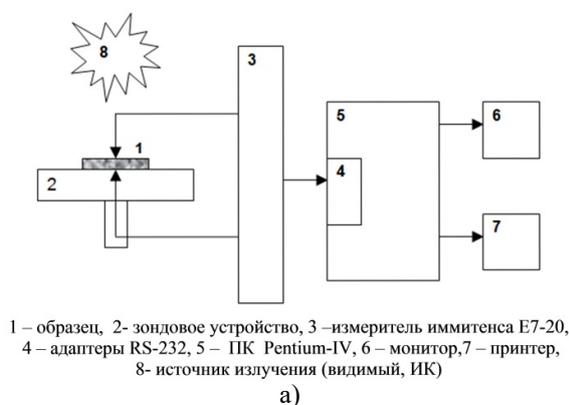


Рисунок 1.1 – Автоматизированная установка на основе измерителя иммитанса E7-20 (а). Спектры лампы накаливания и ИК-источника (б)

Измерение спектров пропускания проведено на спектрофотометре PV 1251С. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) производились на измерителе иммитанса E7-20 при комнатной температуре (рисунок 1.1, а). Измерения ВАХ проводились как в темноте, так и при освещении лампой накаливания и ИК – источником. Спектр ИК-источника, полученный с помощью спектрометра SDH-IV, показал, что данная лампа излучает в ближнем ИК диапазоне от 1,1 до 1,6 мкм (рисунок 1.1, б).

Измерение параметров солнечного элемента проводилось с использованием импульсного тестера ИФТ-4/3 (имитатора солнечного излучения со спектром АМ 1,5), представленном на рисунке 1.2. Импульсный тестер ИФТ-4/3 (рисунок 1.2, а) представляет собой комбинацию импульсного источника излучения (рисунок 1.2, б) и электронного измерительного устройства. Комплект оборудования тестера включает в себя осветитель и блок измерения и управления со светозащитным кожухом, источник питания осветителя и управляющий компьютер. Тестер предназначен для проведения научных исследований и тестирования параметров фотоэлектрических преобразователей, в том числе солнечных, на основе аморфного или кристаллического кремния, а также на основе многослойных наногетероструктур материалов A_3B_5 . Схема активной электронной нагрузки выдает биполярный импульс напряжения сложной формы, прикладываемого к СЭ до светового импульса и во время светового импульса, а электронный измерительный блок регистрирует зависимости во времени для приложенного напряжения и генерируемого фототока. На основе этих данных строились темновая и нагрузочная вольт-амперные характеристики СЭ. Управление и контроль процессом измерений, а также обработка результатов осуществлялись в персональном компьютере по специально разработанной программе.

Тестер дополнен системой контроля интенсивности освещения, так что перечисленные выше характеристики могут быть измерены как в условиях стандартной засветки, соответствующей одной (или менее) солнечной постоянной (100 мВт/см^2), так и при концентрированной солнечной засветке, причем с минимальным температурным воздействием на СЭ благодаря импульсному режиму работы. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс предназначен для измерения и расчета в автоматическом режиме параметров и характеристик фотоэлектрических преобразователей, таких, как, вольт-амперная кривая, ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, эффективность преобразования световой энергии (КПД), коэффициент заполнения.

Параметры СЭ измерялись по следующей методике: изначально измерялись параметры исходного кремниевого СЭ, после чего на лицевую сторону СЭ клали стеклянную подложку и измеряли параметры; далее на лицевую сторону СЭ вместо стеклянной подложки клали преобразователь солнечного излучения (с люминесцентной средой для изменения длины волны фотонов) представляющий собой стекло с нанесенной пленкой $ZnO:Me:RE^{3+}$ и вновь проводилось измерение параметров.

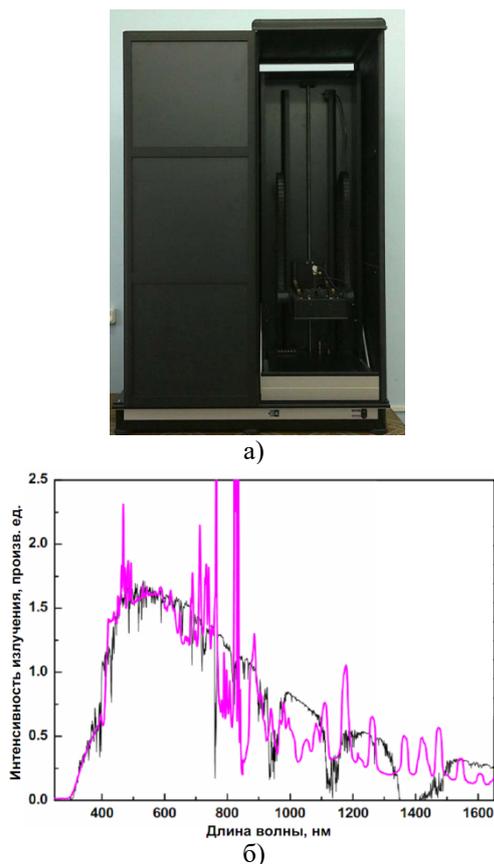


Рисунок 1.2 – Внешний вид осветителя и блока измерения и управления со светозащитным кожухом (на правом рисунке дверца сдвинута для обеспечения доступа к тестируемому образцу) (а) и спектр излучения импульсных ламп при подборе фильтров и напряжений заряда конденсаторных батарей для формирования стандартного солнечного спектра AM 1,5D (б)

2 Результаты и их обсуждение

На рисунке 2.1 представлены спектры пропускания стекла и пленок нелегированного и легированного оксида цинка на стеклянной подложке. Можно выделить две области: в первой области $\lambda < 400$ нм энергия квантов падающего излучения больше, чем ширина запрещенной зоны ZnO:Me:RE^{3+} , поглощение света резко увеличивается. Вторая область лежит в интервале длин волн ($400 \text{ нм} < \lambda < 1000 \text{ нм}$), здесь энергия падающих фотонов низкая, и в результате пленки ZnO:Me:RE^{3+} практически прозрачна для этого диапазона длин волн, и соответственно, поглощение света минимально. Как можно увидеть в области длин волн от 400 нм до 800 нм наибольшим коэффициентом пропускания обладают пленки ZnO:Al и ZnO с пропусканием порядка 85%, далее с пропусканием порядка 75% пленки $\text{ZnO:Al:Yb}^{3+}:\text{Tb}^{3+}$ и ZnO:Al:Er^{3+} , а для остальных пленок этот параметр лежит в диапазоне от 65% до 75%. В области длин волн более 900 нм коэффициент пропускания для всех пленок практически

одинаковый на уровне 80–85%. Небольшой разброс по значению пропускания может быть обусловлен структурой пленки, в частности, размером зерен. Уменьшение размера зерна приводит к улучшению оптических свойств пленок [6].

На рисунке 2.2 представлены типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) МОП структур Al/ZnO:Al:Eu^{3+} и Al/ZnO:Ag:Eu^{3+} на кремнии. Аналогичные по характеру зависимости наблюдались и для всех типов МОП-структур $\text{Al/ZnO:Me:RE}^{3+}/\text{Si}$. Фоточувствительность наблюдается только при приложенном смещении. Для анализа сравнивались значения тока и фототоков, полученных при смещении 2 В, приложенного к структуре $\text{Al/ZnO:Me:RE}^{3+}/\text{Si}$. Результаты значений тока и фототоков исследуемых МОП-структур представлены в таблице 2.1. Максимальная чувствительность к ИК-излучению проявилась на структурах $\text{ZnO:Al:Er}^{3+}/\text{Si}$, а к видимому диапазону $\text{ZnO:Al:Yb}^{3+}:\text{Tb}^{3+}/\text{Si}$. Для МОП-структуры $\text{ZnO:Al:Er}^{3+}/\text{Si}$ наблюдается высокая фоточувствительность как в видимом так и ИК-диапазоне длин волн.

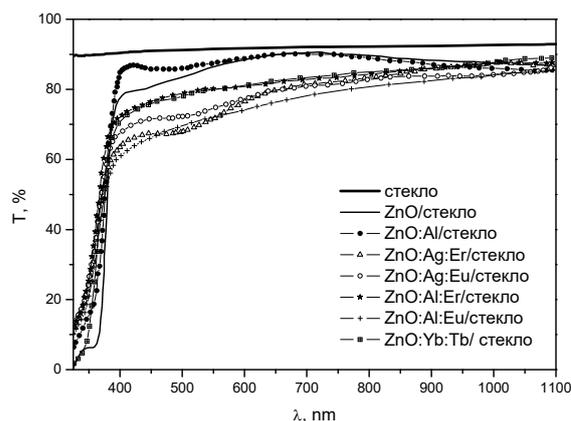


Рисунок 2.1 – Спектры пропускания стекла и структур ZnO/стекло и $\text{ZnO:Me:RE}^{3+}/\text{стекло}$

Данный эффект можно связать с тем, что при легировании РЗИ и Me возможна реализация резонансного механизма передачи возбуждения от матрицы ZnO к РЗИ и от одного РЗИ к другому при со-легировании, а также достижение сенсibilизации излучения 4f-внутрицентровых переходов в определенном диапазоне длин волн. Для трехвалентных ионов Eu^{3+} , Tb^{3+} это видимый диапазон спектра (400 нм – 700 нм), для ионов Er^{3+} , Yb^{3+} – это ИК-область спектра (950 нм – 1540 нм). Введение дополнительной примеси, такой как Al или Ag, может способствовать оптимальному положению акцепторного уровня в запрещенной зоне ZnO , позволяющего обеспечить эффективные пути переноса энергии возбуждения от матрицы к РЗИ, созданию дополнительных оптически активных центров, что в свою очередь позволит найти управляющий параметр для увеличения фоточувствительности в требуемом спектральном диапазоне.

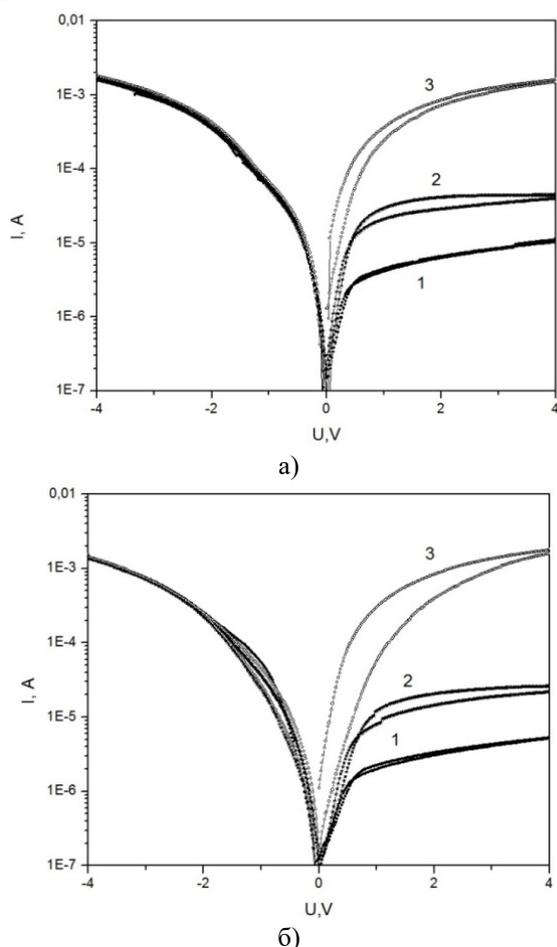


Рисунок 2.2 – Вольт-амперные характерные характеристики пленок ZnO:Al:Eu³⁺ (а) и ZnO:Ag:Eu³⁺ (б) на кремнии. Источники освещения: 1 – без освещения (темновая), 2 – ИК источник, 3 – лампа накаливания

Результаты измерения фотоэлектрических характеристик, полученных с использованием имитатора солнечного спектра (рисунок 1.2) для исходного солнечного элемента и СЭ, состыкованного со структурой ZnO:Me:RE³⁺/стекло представлены на рисунке 2.3. В качестве исходного солнечного элемента был выбран монокристаллический кремниевый солнечный элемент изготовленный по стандартной технологии площадью порядка 2 см². При стыковке солнечного элемента и исследуемых структур на стекле,

площадь стекла была сопоставима с площадью СЭ, так чтобы исследуемая структура полностью покрывала СЭ.

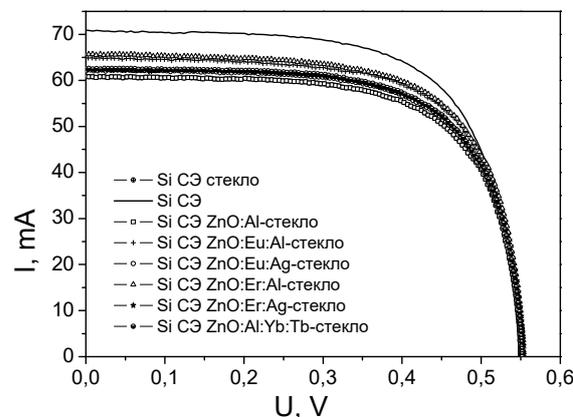


Рисунок 2.3 – Вольт-амперные характеристики кремниевого солнечного элемента с различной структурой

Как видно из рисунка 2.3 и таблицы 2.2, напряжение холостого хода практически не меняется, незначительно изменяется ток короткого замыкания. Максимальное падение параметров происходит, как только мы стыкуем СЭ со стеклом без дополнительного покрытия. Как видно из спектров пропускания, за счет стекла происходят потери порядка 10%, а на КПД СЭ при этом уменьшается на 17% от первоначального значения. Это обусловлено потерей в мощности падающего спектра через стекло.

При совмещении СЭ со структурой ZnO:Me:RE³⁺/стекло, в зависимости от легирующей примеси пленки ZnO, параметры СЭ, по сравнению с реперным образцом, увеличиваются: I_{cs} на величину от 1,27 мА/см² до 3,70 мА/см², а КПД – на величину от 0,5% до 1,46%. При использовании пленок ZnO:Eu:Al и ZnO:Er:Al на стекле наблюдается максимальное повышение КПД на 1,32% и 1,46% соответственно. Состыковка СЭ со структурой ZnO:Er:Al/стекло дает максимальный вклад в увеличение параметров СЭ, это может быть обусловлено тем, что для этих пленок наблюдается хорошая фоточувствительность в широком диапазоне длин волн (таблица 1.1) и коэффициент пропускания для этой пленки – более 75%.

Таблица 2.1 – Значение тока при напряжении +2В, где: I_D – темновой ток, I_{IR} – фототок при освещении ИК-источником, I_L – фототок при освещении лампой накаливания

№ п/п	Структура образца	I_D , А	I_{IR} , А	I_L , А	I_{IR}/I_D	I_L/I_D
1	ZnO:Al	$3,24 \cdot 10^{-5}$	$2,45 \cdot 10^{-4}$	$2,30 \cdot 10^{-3}$	7,56	70,99
2	ZnO:Al:Er/Si	$2,65 \cdot 10^{-6}$	$8,42 \cdot 10^{-5}$	$1,83 \cdot 10^{-4}$	31,77	69,06
3	ZnO:Ag:Er/Si	$4,64 \cdot 10^{-6}$	$4,32 \cdot 10^{-5}$	$3,32 \cdot 10^{-4}$	9,31	71,55
4	ZnO:Al:Eu/Si	$6,54 \cdot 10^{-6}$	$4,15 \cdot 10^{-5}$	$7,11 \cdot 10^{-4}$	6,35	108,72
5	ZnO:Ag:Eu/Si	$3,31 \cdot 10^{-6}$	$2,06 \cdot 10^{-5}$	$3,91 \cdot 10^{-4}$	6,22	118,13
6	ZnO:Al:Yb:Tb/Si	$1,20 \cdot 10^{-6}$	$2,14 \cdot 10^{-5}$	$1,67 \cdot 10^{-4}$	17,83	139,17

Таблица 2.2 – Значение фотоэлектрических параметров кремниевого солнечного элемента с различной структурой

№ п/п	Измеряемая система	Ток короткого замыкания, I_{cs} , мА/см ²	Напряжение холостого хода, U_{oc} , В	Фактор заполнения FF, %	КПД, %
1	Si-CЭ	35,45	0,548	67,8	13,16
2	стекло/ Si –CЭ (репер)	29,17	0,550	68,1	10,92
3	ZnO:Al/стекло/ Si –CЭ	30,44	0,550	68,2	11,42
4	ZnO:Eu:Ag/стекло/ Si –CЭ	31,07	0,551	68,4	11,71
5	ZnO:Er:Ag/стекло/ Si –CЭ	31,18	0,553	68,3	11,79
6	ZnO:Al:Yb:Tb/стекло/ Si –CЭ	31,32	0,552	68,5	11,84
7	ZnO:Eu:Al/стекло/ Si –CЭ	32,44	0,554	68,1	12,24
8	ZnO:Er:Al/стекло/ Si –CЭ	32,87	0,553	68,1	12,38

Это связано с тем, что спектры пропускания отличаются для разных пленок в широком диапазоне значений. Для структур ZnO:Eu:Al, хоть пропускание и самое низкое из всех, более 60%, зато в видимой области значение I_L/I_D на 40% выше, чем значение I_L/I_D для структур ZnO:Er:Al/Si.

Как можно заметить по полученным данным, введение Al лучше способствует оптимальному положению акцепторного уровня в запрещенной зоне ZnO, позволяющего обеспечить эффективные пути переноса энергии возбуждения от матрицы к РЗИ для увеличения фоточувствительности.

Заключение

Представлены оптические и фотоэлектрические характеристики структур Al/ZnO:Me:RE³⁺/Si и ZnO:Me:RE³⁺/стекло, изготовленных по золь-гель технологии. В качестве легирующих примесей были использованы ионы металлов: нитрата Al или нитрата Ag и нитраты редких земель, таких как Er, Eu, Yb, Tb. Анализ спектров пропускания показал, что в области длин волн от 400 нм до 800 нм наибольшим коэффициентом пропускания обладают пленки ZnO:Al и ZnO с пропусканием порядка 85%, а все пленки с добавками РЗИ обладают пропусканием более 65% в видимом спектральном диапазоне и более 80% в ИК-диапазоне длин волн. Установлено, что структуры Al/ZnO:Me:RE³⁺/Si обладают фоточувствительностью. Максимальная чувствительность к ИК-излучению при смещении + 2 В (отношение значения фототока к значению темного тока составило 31,77) проявилась на структурах ZnO:Al:Er³⁺/Si, а к видимому диапазону – у структур ZnO:Al:Yb:Tb/Si (отношение значения фототока к значению темного тока составило 139,17). Для МОП-структуры ZnO:Al:Er³⁺/Si наблюдается высокая фоточувствительность как в видимом так и ИК-диапазоне длин волн (отношение значения фототока к значению темного тока в ИК – области и в видимой области спектра составило 31,77 и 69,06 соответственно). Данный эффект можно связать с

тем, что при легировании РЗИ и ионами металла возможна реализация резонансного механизма передачи возбуждения от матрицы ZnO к РЗИ и от одного РЗИ к другому при со-легировании, а также достижение сенсбилизации излучения 4f-внутри-центровых переходов в определенном диапазоне длин волн.

Характеристики, полученные для системы CЭ/ ZnO:Me:RE³⁺/стекло и исходного солнечного элемента, показали, что в качестве даунконвертера подходит структура ZnO:Er:Al/ стекло, поскольку дает максимальный вклад в увеличение КПД CЭ на 1,46% по сравнению со структурой CЭ/ ZnO:Al/ стекло.

Таким образом, исследованные пленки являются перспективными кандидатами в качестве активных слоев фотодиодов и даун-конвертеров для повышения эффективности солнечных элементов, в частности, кремниевых.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jagadish, C. Zinc oxide bulk, thin films and nanostructures processing, properties and applications / C. Jagadish, S. Pearton. – Elsevier, 2006. – 589 p.
2. Zinc oxide thin films: characterization and potential applications / S. O'Brien [et al.] // Thin Solid Films. – 2010. – Vol. 518, № 16. – P. 4515–4519.
3. Growth of pure and doped ZnO thin films for solar cell applications / M. Sathya [et al.] // Advances in Applied Science Research. – 2012. – Vol. 3, № 5. – P. 2591–2598.
4. Pandal, S.K. Preparation of transparent ZnO thin films and their application in UV sensor devices / S.K. Pandal, C. Jacob // Solid-State Electronics. – 2012. – Vol. 73. – P. 44–50.
5. Structural, electrical and optical properties of N-doped ZnO films synthesized by SS-CVD / J. Lu [et al.] // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2002. – Vol. 5, № 6. – P. 491–496.
6. Transport properties of phosphorus-doped ZnO thin films / Y.W. Heo [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2003. – Vol. 83. – P. 1128.

7. Singha, C. Variation of electrical properties in thickening Al-doped ZnO films: role of defect chemistry / C. Singha, E. Panda // RSC Adv. – 2016. – Vol. 6. – P. 48910–48918.
8. Kenyon, A.J. Recent developments in rare-earth doped materials for optoelectronics / A.J. Kenyon // Progress in Quantum Electronics. – 2002. – Vol. 26, № 4–5. – P. 225–284.
9. Voncken, J.H.L. The Rare Earth Elements / J.H.L. Voncken. – Springer, 2016. – 125 p.
10. Steckl, A.J. Photonic applications of rare-earth-doped materials / A.J. Steckl, J.M. Zavada // MRS Bulletin. – 1999. – Vol. 24, № 9. – P. 16–20.
11. Rare-Earth doped ZnO films: a material platform to realize multicolor and near-infrared electroluminescence / Y. Yang [et al.] // Advance optical materials. – 2014. – Vol. 2, № 3. – P. 240–244.
12. van Sarka, W.G.J.H.M. Enhancing solar cell efficiency by using spectral converters / W.G.J.H.M. van Sarka // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2005. – Vol. 87, № 1–4. – P. 395–409.
13. Modifying the solar spectrum to enhance silicon solar cell efficiency – An overview of available materials / C. Strumpel [et al.] // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. – 2007. – Vol. 91. – P. 238–249.
14. Chen, D. Lanthanide nanomaterials with photon management characteristics for photovoltaic application / D. Chen, Y. Wang, M. Hong // Nano Energy. – 2012. – № 1. – P. 73–90.
15. Richards, B. Enhancing the performance of silicon solar cells via the application of passive luminescence conversion layers / B. Richards // Sol. En. Mat. Sol. Cell. – 2006. – Vol. 90. – P. 2329.
16. Application of a silicon nanocrystal down-shifter to a c-Si solar cell / S.L. Luxembourg [et al.] // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 55. – P. 190–196.
17. Enhancing solar cell efficiency using photon upconversion materials / Y. Shang [et al.] // Nanomaterials (Basel). – 2015. – Vol. 5, № 4. – P. 1782–1809.
18. Jing, Z. Upconversion luminescent materials: advances and applications / Z. Jing // Chem. Rev. – 2015. – Vol. 115, № 1. – P. 395–465.
19. Photon upconversion in organic nanoparticles and subsequent amplification by plasmonic silver nanowires / Z. Qu [et al.] // Nanoscale. – 2018. – Vol. 10. – P. 985–991.
20. Кузьмина, И.П. Окись цинка. Получение и оптические свойства / И.П. Кузьмина, В.А. Никитенко. – М.: Наука, 1984. – 168 с.
21. Основы золь-гель-технологии нанокм-позитов / Ю.М. Таиров [и др.]. – СПб.: Техноме-диа, Элмор, 2007. – 255 с.
22. Активные слои легированные редкоземельными металлами для повышения эффективности солнечных элементов / В.В. Малютина-Бронская [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2012. – № 4 (13). – С. 26–29.
23. Свойства пленок ZnO:Er³⁺, полученных золь-гель методом / В.В. Малютина-Бронская [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51/3. – С. 409–413.

Поступила в редакцию 27.06.18.