

# Исследование механизмов токопрохождения в гетероструктуре CdS/*por*-Si/*p*-Si

© В.В. Трегулов<sup>1</sup>, В.Г. Литвинов<sup>2</sup>, А.В. Ермачихин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина, 390000 Рязань, Россия

<sup>2</sup> Рязанский государственный радиотехнический университет, 390005 Рязань, Россия

E-mail: trww@yandex.ru

(Получена 16 мая 2017 г. Принята к печати 22 ноября 2017 г.)

Исследована температурная зависимость прямых и обратных ветвей вольт-амперной характеристики, а также спектр фотоэдс полупроводниковой гетероструктуры CdS/*por*-Si/*p*-Si. Установлено, что механизмы токопрохождения определяются генерационно-рекомбинационными процессами в области пространственного заряда гетероперехода *por*-Si/*p*-Si, туннелированием носителей заряда в пленке *por*-Si и моделью токов, ограниченных пространственным зарядом. Предложен упрощенный вариант зонной диаграммы исследуемой гетероструктуры.

DOI: 10.21883/FTP.2018.07.46047.8648

## 1. Введение

Пористый кремний (*por*-Si) считается перспективным материалом для применения в современной оптоэлектронике. Формирование пленки *por*-Si на фронтальной поверхности традиционного фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии позволяет существенно улучшить его характеристики за счет снижения потерь на отражение и пассивации дефектов [1]. Также на основе гетероперехода между *por*-Si и монокристаллическим кремнием могут быть созданы быстродействующие фотодиоды, способные регистрировать наносекундные световые импульсы [2].

В последнее время усилился интерес к структурам, в которых на поверхности *por*-Si сформированы полупроводниковые пленки, такие как ZnO [3], CdS [4,5] и др. Прежде всего это вызвано стремлением расширить спектральный диапазон fotocувствительности.

Данная статья посвящена исследованию гетероструктуры CdS/*por*-Si/*p*-Si. Пленки CdS могут успешно применяться при создании фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии с поглощающим слоем на основе кремния. Согласно [6], эффективность фотоэлектрического преобразователя на основе гетероперехода CdS/*p*-Si может достигать 24%. Здесь пленка CdS играет роль оптического окна и существенно расширяет область спектральной чувствительности по сравнению с традиционным преобразователем на основе *p*–*n*-перехода [6]. Для формирования пленки CdS в исследованной в данной работе гетероструктуре, использовался метод гидрохимического осаждения, который в литературе также называют методом химической ванны [7]. Главными достоинствами данного метода являются простота реализации и возможность получения достаточно качественных пленок CdS на подложках с большой площадью поверхности, пригодных для использования в качестве оконных слоев

фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии и оптических датчиков [7]. Также следует отметить, что слой *por*-Si может играть роль буфера [8], снижающего механические напряжения, возникающие между кремниевой подложкой и выращиваемой пленкой CdS.

Несмотря на достаточно большое внимание к гетероструктурам CdS/*por*-Si/*p*-Si, механизмы токопрохождения в них исследованы недостаточно. В то же время такие исследования актуальны, потому что особенности механизмов токопрохождения в значительной степени определяют основные характеристики полупроводниковых приборов.

Цель настоящей работы состоит в изучении механизмов токопрохождения в полупроводниковой структуре CdS/*por*-Si/*p*-Si на основе исследования температурной зависимости темновых вольт-амперных характеристик и спектров фотоэдс.

## 2. Описание образцов и методики исследования

Основой исследуемой структуры является кремниевая монокристаллическая подложка *p*-типа проводимости с ориентацией поверхности (100) и удельным сопротивлением 1 Ом·см. Пленка *por*-Si выращивалась на поверхности подложки методом анодного электрохимического травления в электролите, состоящем из смеси HF и C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH в соотношении 1 : 1. Электрохимическое травление производилось в гальваностатическом режиме при плотности тока 18 мА/см<sup>2</sup> в течение 10 мин. В качестве катода использовался спектрально-чистый графит. После выращивания пленки *por*-Si производилось травление поверхности образца в водном растворе HF (10%) в течение 10 мин. В результате толщина пленки *por*-Si составила 2,2 мкм.

Пленка **CdS** формировалась на поверхности слоя *por*-Si осаждением из водных растворов хлорида кадмия  $\text{CdCl}_2$  (концентрация 0.44 М) и тиомочевина  $\text{N}_2\text{H}_4\text{CS}$  (концентрация 0.22 М). Хлорид кадмия является источником ионов кадмия, тиомочевина — источником ионов серы для образования соединения  $\text{CdS}$ . В качестве комплексообразователя использовался концентрированный водный раствор аммиака  $\text{NH}_4\text{OH}$ . Вначале к раствору  $\text{CdCl}_2$  добавлялся раствор аммиака до полного растворения выпавшего осадка, затем к полученному раствору добавлялся такой же объем водного раствора тиомочевина. Далее в раствор погружались подложки с предварительно сформированной пленкой *por*-Si, проводилось нагревание до  $90^\circ\text{C}$  и в течение 20 мин выращивалась пленка  $\text{CdS}$ . Затем слой  $\text{CdS}$  со стороны *p*-Si полностью стравливался 30%-м раствором  $\text{HCl}$ . Образцы промывались дистиллированной водой и высушивались в сушильном шкафу. Пленка  $\text{CdS}$  имела *n*-тип проводимости, ее толщина составляла 1.8 мкм.

На заключительном этапе формировались омические контакты к подложке *p*-Si и пленке  $\text{CdS}$  посредством пайки индия.

Для исследования фотоэлектрических свойств измерялись спектры фотоэдс при температуре 300 К с помощью экспериментальной установки на основе монохроматора УМ-2, селективного вольтметра В3-38 и обтюлятора с частотой вращения диска 7 Гц. Освещение исследуемой структуры производилось со стороны слоя  $\text{CdS}$ , вдоль нормали к фронтальной поверхности.

С целью изучения механизмов токопрохождения проводились измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) в прямом и обратном смещении в диапазоне температур 80–300 К с шагом 10 К, без освещения поверхности исследуемого образца. Для измерений использовалась экспериментальная установка на базе гелиевого криостата замкнутого типа Janis CCS 400/204N и электрометра Keithley-6517B со встроенным источником постоянного напряжения. При измерении ВАХ прямое смещение исследуемой полупроводниковой структуры соответствует приложению отрицательного потенциала к контакту на поверхности слоя  $\text{CdS}$ , положительного потенциала — к контакту на *p*-Si.

### 3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Спектры нормированной фотоэдс ( $U_{OC}$ ) исследуемой структуры представлены на рис. 1. Для сравнения на рис. 1 приведен спектр для кремниевое фотоэлектрического преобразователя на основе  $n^+$ –*p*-перехода.

При освещении исследуемой полупроводниковой структуры со стороны слоя  $\text{CdS}$  на контакте к  $\text{CdS}$  появляется отрицательный потенциал, на контакте к *p*-Si — положительный. Длинноволновая граница спектра гетероструктуры  $\text{CdS}/\text{por-Si}/\text{p-Si}$  совпадает с краем поглощения монокристаллического кремния (рис. 1).

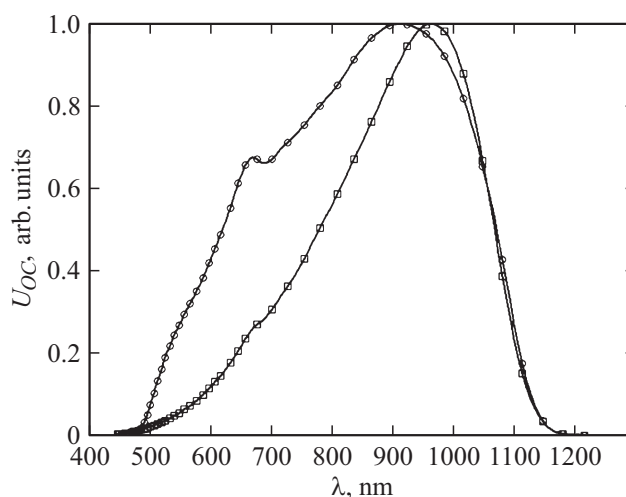


Рис. 1. Спектры фотоэдс гетероструктуры  $\text{CdS}/\text{por-Si}/\text{p-Si}$  (○) и кремниевое фотоэлектрического преобразователя на основе  $n^+$ –*p*-перехода (□).

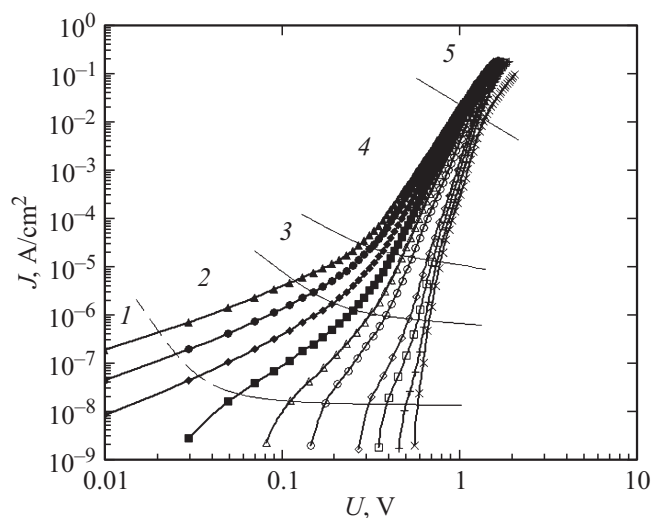
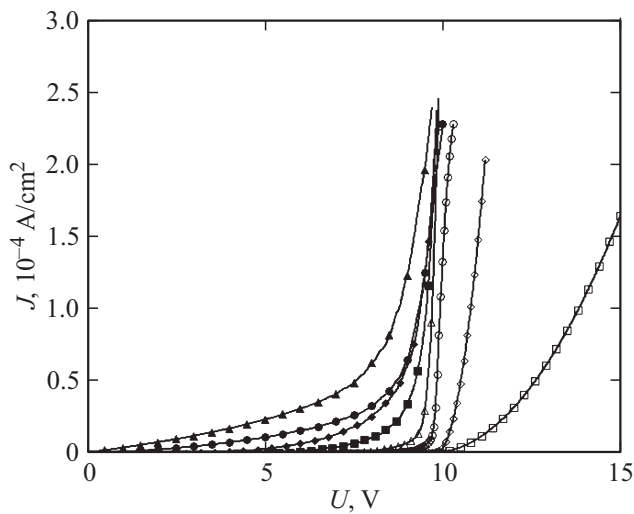


Рис. 2. Прямые ветви ВАХ при температуре  $T$ , К: × — 80, + — 110, □ — 140, ◇ — 160, ○ — 200, △ — 220, ■ — 240, ◆ — 260, ● — 280, ▲ — 300.

Это свидетельствует о преимущественном поглощении длинноволнового излучения в *p*-Si.

Прямые ветви ВАХ, измеренные в диапазоне абсолютных температур ( $T$ ) 80–300 К, представлены на рис. 2 в виде зависимости плотности тока  $J$  от приложенного постоянного напряжения смещения  $U$  в двойном логарифмическом масштабе. Ветви ВАХ при обратном смещении, измеренные в том же диапазоне температур, представлены на рис. 3 в линейном масштабе. Из рис. 2 и 3 следует, что ВАХ структуры  $\text{CdS}/\text{por-Si}/\text{p-Si}$  имеют выпрямляющий характер. Величина коэффициента выпрямления, определенная как отношение значений плотностей токов при  $U = 1.5$  В для прямого и обратного



**Рис. 3.** Обратные ветви ВАХ при температуре  $T$ , К:  $\square$  — 80,  $\diamond$  — 110,  $\circ$  — 140,  $\triangle$  — 160,  $\blacksquare$  — 200,  $\blacklozenge$  — 240,  $\bullet$  — 280,  $\blacktriangle$  — 300.

смещения, составила  $1.41 \cdot 10^6$  при  $T = 80$  К и  $2.37 \cdot 10^4$  при  $T = 300$  К.

На прямых ветвях ВАХ (рис. 2) можно выделить 5 участков, которые приблизительно аппроксимируются отрезками прямых и описываются степенной зависимостью вида

$$J \propto U^m, \quad (1)$$

где  $m$  — показатель степени, характеризующий наклон соответствующего участка [9].

Для участка 1 прямых ветвей ВАХ (рис. 2) при  $T = 80$ –240 К величина  $m > 2$ . Это может быть объяснено в рамках модели токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ), влиянием на процессы токопрохождения ловушек с экспоненциальным распределением по энергии активации [9]. При  $T = 250$ –300 К участки 1 и 2 практически сливаются (рис. 2) и выполняется условие  $1 < m < 2$ . С точки зрения модели ТОПЗ это означает, что концентрация инжектированных носителей заряда становится сравнимой с концентрацией термически генерированных носителей [9].

Одновременно участок 2 при  $T = 80$ –300 К может быть представлен экспоненциальной зависимостью вида

$$J \propto \exp\left(\frac{qU}{nkT}\right), \quad (2)$$

где  $q$  — элементарный заряд,  $n$  — показатель неидеальности гетероперехода,  $k$  — постоянная Больцмана [6]. Выражение (2) может применяться для описания изотипных гетеропереходов, не имеющих тенденции к насыщению прямой ветви ВАХ [6], что соответствует исследуемой структуре. В нашем случае выражение (2) описывает гетеропереход *por*-Si/*p*-Si. В диапазоне температур 8–300 К величина  $n$  изменяется от 4.2 до 1.7, следовательно, в этих условиях механизм токопрохождения определяется рекомбинацией носителей в области

пространственного заряда гетероперехода *por*-Si/*p*-Si. Так как при  $T = 250$ –300 К участки 1 и 2 прямых ветвей ВАХ (рис. 2) практически сливаются, область действия указанного механизма токопрохождения распространяется на участок 1 в указанном температурном диапазоне.

Температурная зависимость плотности тока исследуемой структуры при  $U = 0$  В может быть представлена выражением

$$J \propto \exp\left(\frac{-\Delta E}{kT}\right), \quad (3)$$

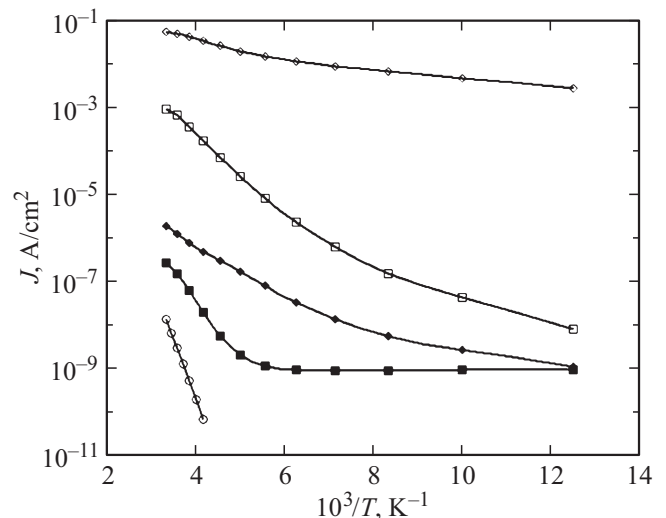
где  $\Delta E$  — высота барьера [6]. График, отражающий зависимость (3), приведен на рис. 4 в виде отрезка прямой в диапазоне температур 240–300 К. Величина  $\Delta E$ , определенная по наклону графика, составила  $0.55$  эВ, что примерно соответствует половине ширины запрещенной зоны кремния. Следовательно, область пространственного заряда изотипного гетероперехода *por*-Si/*p*-Si преимущественно сосредоточена в *p*-Si. Экспериментальные точки при  $T < 240$  К на графике (рис. 4) не показаны, так как в указанных условиях исследуемая структура имеет высокое сопротивление и плотность тока практически не зависит от температуры.

Таким образом, прямые ветви ВАХ на участке 2 при  $T = 80$ –300 К, а также на участке 1 при  $T = 250$ –300 К могут быть описаны зависимостью

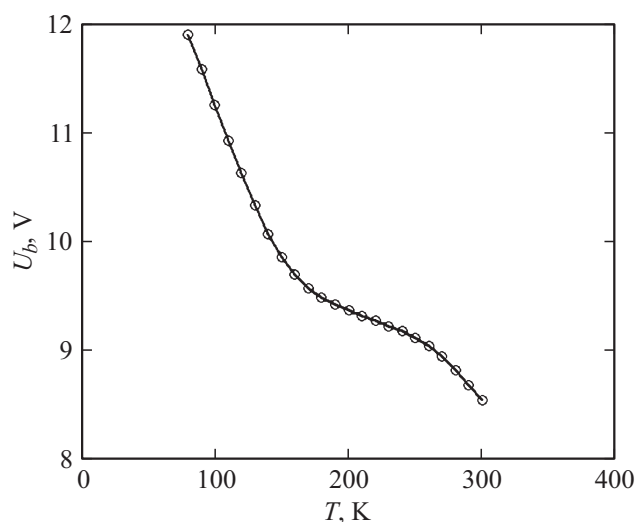
$$J \propto \exp\left(\frac{-\Delta E}{kT}\right) \exp\left(\frac{qU}{nkT}\right), \quad (4)$$

характерной для изотипного гетероперехода [6].

Участки 3 и 4 прямых ветвей ВАХ (рис. 2) при  $T = 80$ –300 К характеризуются разным наклоном, причем в обоих случаях  $m > 2$ . В рамках модели ТОПЗ это может быть объяснено влиянием на процессы токопрохождения нескольких групп ловушек с разными значениями энергии активации [9].



**Рис. 4.** Зависимость плотности тока от температуры при прямом смещении для значений  $U$ , В:  $\circ$  — 0,  $\square$  — 0.6,  $\diamond$  — 1.2 и обратном смещении для значений  $U$ , В:  $\blacksquare$  — 1.0,  $\blacklozenge$  — 6.0.



**Рис. 5.** Зависимость напряжения пробоя гетероструктуры  $\text{CdS}/\text{por-Si}/\text{p-Si}$  от температуры.

Для прямых ветвей ВАХ при  $T = 80\text{--}140\text{ К}$  в области  $U = 1.0\text{--}1.8\text{ В}$ , а также при  $T = 250\text{--}300\text{ К}$  и значениях  $U = 1.0\text{--}1.5\text{ В}$  имеет место слабая зависимость величины  $d(\ln J)/dV$  от температуры. Это свидетельствует о наличии туннельного механизма токопрохождения [6] на участке 5 и конечной области участка 4 прямых ветвей ВАХ (рис. 2) в указанных условиях. Туннелирование носителей заряда может происходить внутри пленки  $\text{por-Si}$  между энергетическими уровнями ловушек на поверхности кремниевых кристаллитов через барьеры  $\text{SiO}_x$  [10].

Графики температурной зависимости плотности тока для прямого смещения при  $U > 0\text{ В}$  имеют вид гладких кривых (рис. 4). Это означает, что процессы токопрохождения определяются ловушками с энергиями активации, распределенными в некотором непрерывном диапазоне. Такая ситуация может быть характерна для поверхностных состояний. При  $U = 0.6\text{ В}$  энергия активации ловушек изменяется в пределах  $0.059\text{--}0.190\text{ эВ}$  (рис. 4). При  $U = 1.2\text{ В}$  диапазон энергии активации составляет  $0.018\text{--}0.058\text{ эВ}$ . Наблюдаемое снижение энергии активации с ростом  $U$  может быть объяснено особенностью пространственного распределения ловушек.

Ветви ВАХ при обратном смещении, измеренные в диапазоне температур  $80\text{--}300\text{ К}$ , имеют достаточно четко выраженный участок пробоя (рис. 3). При  $T = 140\text{--}240\text{ К}$  и  $U = 5\text{--}7\text{ В}$  имеет место наиболее слабая зависимость величины  $d(\ln J)/dV$  от температуры. Согласно [6], это может свидетельствовать о преобладании туннелирования носителей заряда в указанных условиях.

Напряжение пробоя ( $U_b$ ) исследуемой структуры снижается с ростом температуры (рис. 5). Немонотонный характер кривой на рис. 5 может определяться конкуренцией двух процессов: наличием туннельной составляющей механизма пробоя и увеличением вклада генерации

носителей заряда, связанной с перезарядкой энергетических уровней ловушек. Наблюдаемый рост наклона обратных ветвей ВАХ (рис. 3) в предпробойной области ( $0\text{--}6\text{ В}$ ), особенно заметный в диапазоне температур  $240\text{--}300\text{ К}$ , может быть объяснен возрастанием вклада генерационных процессов при перезарядке глубоких уровней ловушек.

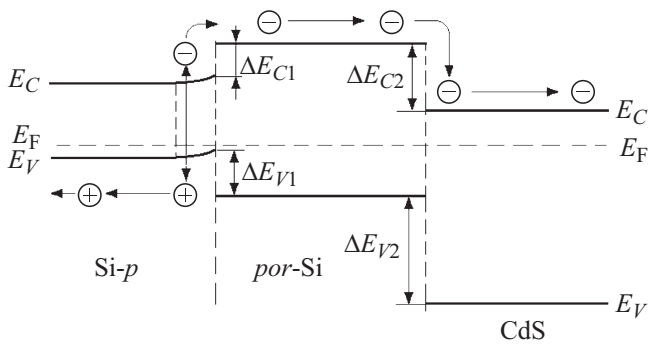
Для области обратного смещения кривые температурной зависимости плотности тока представлены на рис. 4 для  $U = 1$  и  $6\text{ В}$ . При  $U = 1\text{ В}$  в области температур  $190\text{--}300\text{ К}$  процессы токопрохождения определяются перезарядкой моноэнергетического уровня с энергией активации  $0.282\text{ эВ}$  (рис. 4). В данном случае механизм токопрохождения можно также объяснить в рамках модели термоэлектронной эмиссии носителей заряда через потенциальный барьер для электронов [6] высотой  $0.282\text{ эВ}$ , находящийся в зоне проводимости на гетерогранице  $\text{por-Si}/\text{p-Si}$  со стороны  $\text{p-Si}$ . При  $T < 190\text{ К}$  и  $U = 1\text{ В}$  плотность тока практически не зависит от температуры, что может объясняться отсутствием влияния перезарядки энергетических уровней ловушек на процессы токопрохождения (рис. 4). При  $U > 3\text{ В}$  в обратном смещении графики температурной зависимости плотности тока имеют вид гладких кривых, как и при прямом смещении. При  $U = 6\text{ В}$  энергия активации ловушек изменяется в пределах  $0.031\text{--}0.148\text{ эВ}$  (рис. 4). Наблюдаемое снижение энергии активации с ростом  $U$  можно объяснить особенностью пространственного распределения ловушек.

#### 4. Выводы по результатам эксперимента

Учитывая особенности процессов токопрохождения, установленные на основе анализа спектра фотоэдс (рис. 1), а также температурной зависимости ВАХ, измеренной в темновых условиях (рис. 2 и 3), можно предложить упрощенную схему зонной диаграммы исследуемой гетероструктуры  $\text{CdS}/\text{por-Si}/\text{p-Si}$  при равновесных условиях в виде рис. 6. Стрелками на рис. 6 условно показаны процессы генерации и разделения электронно-дырочных пар в гетеропереходе  $\text{por-Si}/\text{p-Si}$  при освещении образца, а также процессы переноса созданных таким образом носителей заряда к внешним контактам. Параметры величин разрывов разрешенных энергетических зон являются предметом для проведения дальнейших исследований.

Прямые ветви ВАХ (рис. 2) на участке 1 при  $T = 250\text{--}300\text{ К}$  и участке 2 при  $T = 80\text{--}300\text{ К}$  могут быть описаны выражением (4) и определяются рекомбинацией носителей в области пространственного заряда изотипного гетероперехода  $\text{por-Si}/\text{p-Si}$ , которая главным образом сосредоточена в  $\text{p-Si}$ . Зонная диаграмма изотипного гетероперехода на рис. 6 часто используется в литературе при описании свойств структуры  $\text{por-Si}/\text{p-Si}$  (например, [10]). В пользу выбранной модели также





**Рис. 6.** Схема зонной диаграммы гетероструктуры CdS/*por*-Si/*p*-Si.

свидетельствует тот факт, что режим прямого смещения этого гетероперехода возникает при подаче положительного потенциала на узкозонный полупроводник (*p*-Si) [6], что соответствует исследуемому случаю.

При более высоких напряжениях прямого смещения (участки 3,4,5 на рис. 2) приложенное напряжение распределяется между *por*-Si и CdS. Здесь процессы токопрохождения определяются перезарядкой ловушек и объясняются в рамках модели ТОПЗ. Пленка CdS представляет собой частично компенсированный полупроводник *n*-типа проводимости, содержащий ловушки с мелкими и глубокими энергетическими уровнями, возникающими вследствие наличия вакансий серы и избыточного количества кадмия [11], а также сопутствующих химических примесей. Кроме того, в этой области прямых ветвей ВАХ (участки 4,5 на рис. 2) наблюдается туннелирование носителей заряда внутри пленки *por*-Si с участием ловушек. Вследствие высокой плотности поверхностных состояний на анизотипном гетеропереходе *por*-Si/CdS уровень Ферми может оказаться зафиксированным на гетерогранице [12]. При этом заметной модуляции ширины области пространственного заряда гетероперехода *por*-Si/CdS приложенным напряжением смещения наблюдаться не будет и изгибом зон можно пренебречь (рис. 6). По этой же причине уровень Ферми может быть зафиксирован на гетерогранице *por*-Si/*p*-Si со стороны *por*-Si, следовательно, изгибом зон в *por*-Si здесь также можно пренебречь (рис. 6).

Моделью ТОПЗ можно объяснить токопрохождение на начальном участке прямых ветвей ВАХ при низких температурах (участок 1 на рис. 2 при  $T = 80\text{--}240\text{ К}$ ).

В обратном смещении процессы токопрохождения определяются туннелированием носителей в слое *por*-Si и генерацией в области пространственного заряда гетероперехода *por*-Si/*p*-Si, связанной с перезарядкой энергетических уровней ловушек.

При освещении исследуемой гетероструктуры кванты света проходят через слои CdS и *por*-Si, которые играют роль оптического окна, и поглощаются в *p*-Si. Электронно-дырочные пары разделяются полем гете-

роперехода *por*-Si/*p*-Si (рис. 6). Дырки выводятся из области пространственного заряда в квазинейтральную область *p*-Si и далее к внешнему контакту. Электроны проходят над барьером  $\Delta E_{C1}$  в *por*-Si, далее попадают в CdS и на внешний контакт. При этом часть электронов захватывается ловушками (эти процессы на рис. 6 не показаны). Фотогенерация носителей в CdS и *por*-Si возможна в коротковолновой области спектра. Однако эти процессы в нашем случае не вносят существенного вклада в общий фототок вследствие рекомбинации носителей с участием ловушек. В связи с этим наиболее вероятной причиной увеличения ширины области спектральной чувствительности гетероструктуры CdS/*por*-Si/*p*-Si по сравнению с фотоэлектрическим преобразователем на основе  $n^+ - p$ -перехода (рис. 1) можно считать интерференционные эффекты в системе CdS/*por*-Si.

Применению гетероструктуры CdS/*por*-Si/*p*-Si, исследуемой в данной работе, в качестве фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии препятствует достаточно большое последовательное сопротивление, которое при  $T = 300\text{ К}$  составляет 40.2 Ом. Как известно, даже небольшой рост последовательного сопротивления существенно снижает эффективность фотоэлектрических преобразователей [12].

В то же время гетероструктура CdS/*por*-Si/*p*-Si может быть использована для изготовления оптических датчиков с широкой полосой области спектральной чувствительности.

## 5. Заключение

Таким образом, процессы токопрохождения в исследуемой гетероструктуре CdS/*por*-Si/*p*-Si определяются несколькими механизмами: **генерационно-рекомбинационными процессами в области пространственного заряда гетероперехода *por*-Si/*p*-Si, туннелированием и моделью ТОПЗ**. Как в прямом, так и в обратном смещении, процессы токопрохождения определяются ловушками, энергии активации которых распределены в непрерывном диапазоне значений.

Гетероструктура CdS/*por*-Si/*p*-Si может быть использована при создании оптических датчиков с широкой полосой спектральной чувствительности. Проведение работ, направленных на оптимизацию технологии формирования слоев *por*-Si и CdS, а также омических контактов с целью снижения последовательного сопротивления, позволит изготавливать на основе гетероструктуры CdS/*por*-Si/*p*-Si фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии.

Представленные результаты получены в рамках выполнения государственного задания Министерства образования и науки России № 3.9506.2017/БЧ в Рязанском государственном университете им. С.А. Есенина, а также в рамках работ по гранту Президента Российской Федерации № 14.Z56.16.4518-МК в Рязанском государственном радиотехническом университете.

## Список литературы

- [1] *Handbook of Porous Silicon*, ed. by L. Canham. (Springer International Publishing, 2014).
- [2] J.P. Zheng, K.L. Jiao, W.P. Shen. *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 459 (1992).
- [3] H.A. Thjeel, A.M. Suhail, A.N. Naji. *Adv. Mater. Phys. and Chem.*, **1**, 70 (2011).
- [4] S.A. Hasoon, I.M. Ibrahim, M.S. Raad. *Int. J. Current Engin. Technol.*, **4** (2), 594 (2014).
- [5] M.A. Jafarov, E.F. Nasirov, S.A. Jahangirova. *Int. J. Sci. Engin. Research*, **6** (7), 849 (2015).
- [6] Б.Л. Шарма. *Полупроводниковые гетеропереходы* (М., Сов. радио, 1979).
- [7] L. Fangyang, L. Yanging, L. Jun. *J. Alloys Comp.*, **493** (1,2), 305 (2010).
- [8] Ю.Б. Болховитянов, О.П. Пчеляков, С.И. Чикичев. *УФН*, **171** (7), 689 (2001).
- [9] М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах* (М., Мир, 1973).
- [10] А.А. Евтух, Э.Б. Каганович, Э.Г. Манойлов, Н.А. Семененко. *ФТП*, **40** (2), 180 (2006).
- [11] К. Чопра, С. Дас. *Тонкопленочные солнечные элементы* (М., Мир, 1986).
- [12] А. Фаренбух, Р. Бьюб. *Солнечные элементы: Теория и эксперимент* (М., Энергоатомиздат, 1987).

Редактор Г.А. Оганесян

## Investigation of Current Flow Mechanisms in the CdS/*por*-Si/*p*-Si heterostructure

V.V. Tregulov<sup>1</sup>, V.G. Litvinov<sup>2</sup>, A.V. Ermachikhin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ryazan State University named for S. Yesenin, 390000 Ryazan, Russia

<sup>2</sup> Ryazan State Radio Engineering University, 390005 Ryazan, Russia

**Abstract** The temperature dependence of the forward and reverse bias of the current-voltage characteristic, as well as the spectrum of the photo-emf of the semiconductor heterostructure CdS/*por*-Si/*p*-Si, are studied. It is found that the current flow mechanisms determined by generation-recombination processes in the space charge region of a heterojunction *por*-Si/*p*-Si, tunneling of charge carriers in *por*-Si film and a model of the currents limited by the space charge. A simplified version of the band diagram of the investigated heterostructure has been proposed.