

**МЕТОД ТОКОВОЙ РСГУ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ  
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ**

**В.В. Трегулов**

*Кафедра «Общая и теоретическая физика и МПФ»;  
ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина»;  
trww@yandex.ru*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** гетероструктура; глубокие уровни; интегральное уравнение; поверхностные состояния; релаксационная спектроскопия; фотоэлектрический преобразователь.

**Аннотация:** Представлены результаты исследования поверхностных состояний в гетероструктуре CdS/Si(p), изготовленной методом гидрохимического осаждения. Показана возможность применения метода токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней для измерения спектра энергетической плотности поверхностных состояний при неэкспоненциальной релаксации.

---

Целью данной работы является исследование спектра энергетической плотности поверхностных состояний  $D_{ss}(E)$  в гетероструктурах CdS/Si(p), предназначенных для применения в качестве фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) солнечной энергии. Поверхностные состояния способствуют снижению эффективности преобразования ФЭП [1].

Исследуемые гетероструктуры изготавливались методом гидрохимического осаждения пленок CdS на поверхности кремниевых подложек р-типа проводимости с удельным сопротивлением 1 Ом·см. Технология изготовления гетероструктур CdS/Si(p) описана в статье [2]. Образцы, исследуемые в данной работе, отличались от представленных в [2] тем, что они были изготовлены при более высоком содержании аммиака. Это позволило увеличить напряжение холостого хода ФЭП на 0,1 В без легирования слоя CdS примесью индия. Пленки CdS имели проводимость n-типа, а толщина составила 2,5 мкм.

При гидрохимическом осаждении формируются поликристаллические пленки CdS, содержащие достаточно большое количество дефектов. Вследствие этого на гетерогранице CdS/Si(p) возникают поверхностные состояния с энергетическими глубокими уровнями (ГУ) [1]. В настоящее время для исследования дефектов с ГУ широко применяется метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней [3–5].

В данной работе исследование поверхностных состояний в гетероструктуре CdS/Si(p) проводится с помощью токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) с оптическим заполнением ГУ. Заполнение ГУ образцов ос-

вещалось со стороны пленки CdS прямоугольными импульсами света с длиной волны 660 нм (использовался красный светодиод). Сигнал релаксации фототока  $I(t, T)$  гетероструктуры измерялся после прекращения действия светового заполняющего импульса. Измерения производились в диапазоне температур 130...344 К. Длительность световых импульсов составляла  $2,00 \cdot 10^{-4}$  с, что было достаточно для стационарного заполнения ГУ во всем диапазоне температур.

Гетероструктура работала в фотовольтаическом режиме, характерном для ФЭП. Внешнее напряжение смещения не подавалось. При этом ширина области пространственного заряда (ОПЗ) гетероструктуры минимальна. Таким образом, наибольший вклад в результат измерений вносят ГУ, сосредоточенные на гетерогранице CdS/Si(p).

Обработка измеренных зависимостей  $I(t, T)$  проводилась с использованием стандартной корреляционной процедуры [3]:

$$S(T) = \int_{t_1}^{t_2} I(t, T) w(t, r) dt, \quad (1)$$

где  $S(T)$  – спектр ГУ;  $T$  – абсолютная температура;  $w(t, r)$  – взвешивающая функция (функция двухимпульсного интегратора);  $r$  – постоянная времени коррелятора;  $t_1$  и  $t_2 = t_1 + \Delta t$  – временная задержка и длительность взвешивающей функции соответственно (рис. 1).

Значение  $r$  для используемой функции  $w(t, r)$  задается выражением [4]:

$$r = \frac{t_2 - t_1}{\ln(t_2/t_1)}. \quad (2)$$

Для поверхностных состояний, локализованных на гетерогранице, характерно наложение спектров отдельных ГУ с близкими значениями энергии активации и постоянных времени релаксации. При этом сигнал релаксации тока  $I(t, T)$  является неэкспоненциальным, так как представляет собой наложение нескольких экспоненциальных процессов.

При неэкспоненциальном характере релаксационного процесса метод РСГУ не позволяет корректно определить основные параметры ГУ [4].

В этом случае ГУ характеризуются спектром энергетической плотности поверхностных состояний  $D_{ss}(E)$ , который связан со спектром  $S(T)$  с помощью интегрального уравнения:

$$S(T) = \int_{E_1}^{E_2} K(T, E) D_{ss}(E) dE, \quad (3)$$

где  $E_1, E_2$  – границы энергетической локализации спектра плотности поверхностных состояний;  $K(T, E)$  – передаточная функция токового РСГУ-спектрометра (ядро интегрального уравнения). Аналогичный подход используется для определения  $D_{ss}(E)$  в диодах Шоттки и МДП-структурах [5].

Значения  $E_1, E_2$  вычисляются из граничных температур измерения РСГУ-спектра по формуле

$$E = kT \ln(r). \quad (4)$$

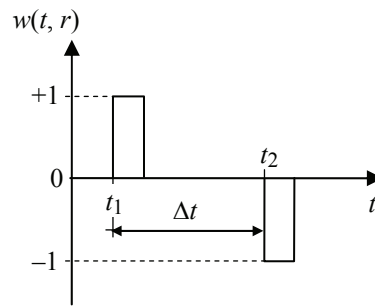


Рис. 1. Взвешивающая функция  $w(t, r)$

Ядро интегрального уравнения (3) задается выражением

$$K(T, E) = \frac{qA}{2\tau(T, E)} \left[ \exp\left(-\frac{t_1}{\tau(T, E)}\right) - \exp\left(-\frac{t_2}{\tau(T, E)}\right) \right], \quad (5)$$

где  $q$  – заряд электрона;  $A$  – площадь гетероструктуры;  $\tau(T, E)$  – постоянная времени релаксации, характеризующая темп термоэмиссии носителей заряда с ГУ и являющаяся функцией температуры и энергии активации ГУ; смысл величин  $t_1$  и  $t_2$  пояснен на рис. 1.

Если ГУ являются ловушками электронов, то

$$\tau(T, E) = (N_C \sigma_n v_n)^{-1} \exp\left(\frac{E}{kT}\right), \quad (6)$$

где  $N_C$  – плотность состояний в зоне проводимости;  $\sigma_n$  – сечение захвата электронов на ГУ;  $v_n$  – тепловая скорость электронов;  $E$  – энергия активации ГУ;  $k$  – постоянная Больцмана [4].

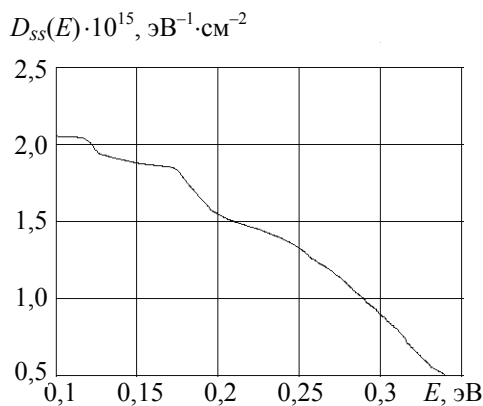
Функция, описывающая спектр энергетической плотности поверхностных состояний  $D_{ss}(E)$ , есть решение уравнения (3), которое является интегральным уравнением Фредгольма 1-го рода, для решения которого использовался численный метод квадратурных формул [6].

На рисунке 2 представлен спектр энергетической плотности поверхностных состояний  $D_{ss}(E)$  при  $r = 1,10 \cdot 10^{-5}$  с. Наблюдаемые поверхностные состояния являются ловушками электронов.

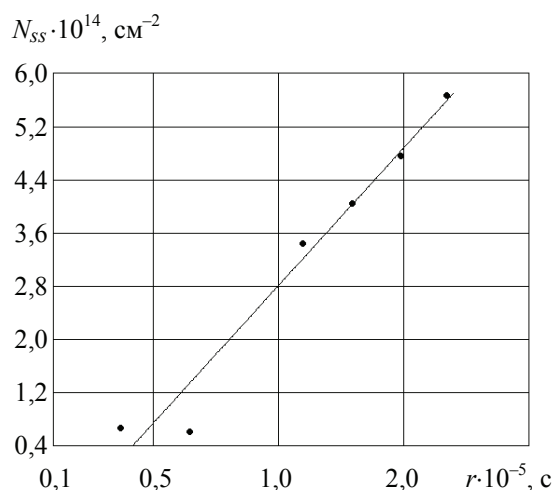
Концентрация поверхностных состояний в заданном диапазоне энергий активации  $N_{ss}$  вычисляется из зависимости  $D_{ss}(E)$  следующим образом:

$$N_{ss} = \int_{E_1}^{E_2} D_{ss}(E) dE. \quad (7)$$

Для спектра  $D_{ss}(E)$ , показанного на рис. 2,  $N_{ss} = 3,43 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>. Полученное значение  $N_{ss}$  свидетельствует о том, что механизм протекания тока через гетеропереход обусловлен рекомбинацией носителей в ОПЗ с участием ГУ, локализованных на гетерогранице [1].



**Рис. 2.** Спектр энергетической плотности поверхностных состояний при  $r = 1,10 \cdot 10^{-5}$  с



**Рис. 3. Зависимость концентрации поверхностных состояний от постоянной времени настройки коррелятора**

Энергетическое разрешение при измерении спектра  $D_{ss}(E)$  составляет 0,01 эВ. Оно определяется скоростью изменения температуры образца и точностью измерения температуры. Скорость изменения температуры образца не должна превышать 0,5 К/с. Относительная погрешность определения плотности поверхностных состояний составляет 20 %.

Исследовалась зависимость спектра  $D_{ss}(E)$  и величины  $N_{ss}$  от постоянной времени настройки коррелятора  $r$ . Значение  $r$  определялось по формуле (2) и изменялось за счет увеличения  $\Delta t$  при постоянной времени задержки  $t_1$  и длительности импульсов (см. рис. 1).

Установлено, что вид спектральной кривой  $D_{ss}(E)$  практически не зависит от  $r$ . С увеличением  $r$  возрастают значения энергетической плотности  $D_{ss}(E)$  и концентрации  $N_{ss}$ . Величина  $N_{ss}$  линейно возрастает с увеличением  $r$  (рис. 3).

Это объясняется тем, что на гетерогранице CdS/Si(p) присутствуют ГУ с разными значениями постоянной времени релаксации  $\tau(T, E)$ . Наличие зависимости  $N_{ss}$  от  $\tau(T, E)$  свидетельствует о существенной неэкспоненциальности релаксационного процесса.

Таким образом, токовая РСГУ в сочетании с обработкой спектра ГУ  $S(T)$  на основе интегрального уравнения (3) может применяться для исследования поверхностных состояний в гетероструктурах ФЭП даже в случае существенно неэкспоненциального релаксационного сигнала.

#### *Список литературы*

1. Фаренбух, А. Солнечные элементы: Теория и эксперимент / А. Фаренбух, Р. Бьюб. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.
2. Трегулов, В.В. Исследование фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии на основе гетероструктуры CdS/Si(p) / В. В. Трегулов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 4. – С. 892 – 896.
3. Вывенко, О.Ф. Оптимизация корреляционной процедуры в методах термостимулированной релаксационной спектроскопии полупроводников / О.Ф. Вывенко, А.А. Истратов // Физика и техника полупроводников. – 1992. – Т. 26, вып. 10. – С. 1693–1700.

4. Статистический метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней в полупроводниках / Е.А. Татохин [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, вып. 8. – С. 1031–1037.

5. Дорджин, Г.С. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней. Методические основы применения / Г.С. Дорджин, В.Н. Лактюшкин, М.В. Сорокина // Обзоры по электрон. технике. Сер. 7. Технология, организация пр-ва и оборудование. – 1989. – Вып. 4 (1434). – С. 14–20.

6. Васильева, А.Б. Интегральные уравнения / А.Б. Васильева, Н.А. Тихонов. – М. : Физматлит, 2002. – 160 с.

---

## **The Technique of Current DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) to Study the Surface States in Heterostructures of Photoelectric Converters of Soar Energy**

**V.V. Tregulov**

*Department “General and Theoretical Physics and Teaching Methods of Physics”;  
Ryazan State University named after S.A. Yesenin; trww@yandex.ru*

**Key words and phrases:** deep levels; heterostructure; integral equation; photoelectric converter; relaxation spectroscopy; the surface states.

**Abstract:** The paper presents the results of the investigation of the surface states in the heterostructure CdS/Si(p) produced by hydro-chemical deposition. The possibility of applying the method to measure the current DLTS spectrum of the energy density of the surface states at nonexponential relaxation is shown.

---

## **Methode der strömigen DLTS für die Untersuchung der oberflächlichen Zustände in den Geterostrukturen der pfootelektrischen Umformer der Sonnenenergie**

**Zusammenfassung:** Es sind die Resultate der Untersuchung der oberflächlichen Zustände in der Geterostruktur CdS/Si(p), die durch die Methode der hydrochemischen Fällung erzeugt ist, angeführt, Es ist die Möglichkeit der Benutzung der Methode der strömigen DLTS für die Messung des Spektrums der energetischen Dichte der oberflächlichen Zustände bei der nichtexponentialen Relaxation gezeigt.

---

## **Méthode de DLTS de courant de relaxion des niveaux profonds pour l'étude des états de surface dans les hétérostructures des convertisseurs photoélectriques de l'énergie solaire**

**Résumé:** Sont présentés les résultats des études des états de surface dans une hétérostructure CdS/Si(p), fabriquée par la méthode de la précipitation hydrochimique. Est montrée la possibilité de l'application de la méthode de DLTS de courant de relaxion des niveaux profonds pour la mesure du spectre de la densité énergétique des états de surface lors de la relaxion non exponentielle.

---

**Автор:** *Трегулов Вадим Викторович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Общая и теоретическая физика и МПФ», ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина».

**Рецензент:** *Коненков Николай Витальевич* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Общая и теоретическая физика и МПФ», ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина».