

УДК 621.383

ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВСТРОЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ

С. П. Вихров, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник РГРТУ; vikhrovsergey@mail.ru

Н. В. Вишняков, к.т.н., доцент, директор РЦЗМкп РГРТУ; rcpm-rgrtu@yandex.ru

А. Д. Маслов, аспирант РГРТУ; maslov.a.d@mail.ru

В. Г. Мишустин, к.ф.-м.н., доцент кафедры МНЭЛ РГРТУ; vgmish@yandex.ru

А. Г. Романов, аспирант РГРТУ; alex7371@yandex.ru

Рассматривается задача экспериментального измерения распределения встроенных электрических полей в многослойных барьерных гомо- и гетероструктурах на основе кристаллических и неупорядоченных полупроводников. Целью работы является применение метода компенсации тока нестационарной фотопроводимости для исследования полупроводниковых барьерных $p-i-n$ и гетероструктур. В работе приведено описание экспериментального метода, его математического аппарата, разработанной экспериментальной установки и тестовых структур. Приведены результаты экспериментального исследования распределения встроенного поля в $p-i-n$ -структуре на $a-Si:H$ и гетероструктуре $a-Si:H/c-Si$, анализ экспериментальных данных, сформулировано направление работы по дальнейшему развитию метода.

Ключевые слова: распределение электрического поля, компенсационный метод, ток нестационарной фотопроводимости, гомо- и гетероструктуры, солнечные элементы.

DOI: 10.21667/1995-4565-2018-66-4-2-23-29

Введение

Применение многослойных барьерных структур с использованием полупроводниковых материалов с разной шириной запрещенной зоны является одним из способов создания высокоэффективных солнечных элементов (СЭ). По последним данным (конец 2017 года) для двухкаскадных солнечных элементов достигнута эффективность преобразования порядка 32,8 %, а для трехкаскадных – 37,9 % [1].

В настоящее время для оценки характеристик многослойных СЭ используют значения КПД преобразования солнечной энергии. Этот параметр характеризует интегральные свойства конечного изделия и не позволяет анализировать причины потерь и снижения эффективности СЭ. Информация о профиле распределения электрического поля в барьерной структуре позволяет оценить вклад отдельных слоев в процесс разделения носителей заряда, их транспорта, рассчитать плотность состояний на границах раздела и в объеме полупроводниковых слоев. При этом существует проблема экспериментального измерения электрических полей в многослойных барьерных структурах на основе кристаллических и неупорядоченных полупроводников. Это

обусловлено особенностями электрофизических свойств применяемых материалов (низкая подвижность носителей заряда, дисперсионный характер их переноса, неоднозначность используемых математических моделей), которые затрудняют измерения и интерпретацию полученных результатов [2].

Целью данной работы является применение метода компенсации тока нестационарной фотопроводимости [3, 4] для исследования распределения встроенного электрического поля в полупроводниковых барьерных $p-i-n$ и гетероструктурах, являющихся элементами каскадных многослойных солнечных элементов с гомо- и гетеропереходами на основе кристаллических и неупорядоченных полупроводников.

Теоретическая часть

Особенности барьерных структур на основе неупорядоченных полупроводников

При описании барьерных структур на основе неупорядоченных полупроводников необходимо учитывать такие особенности этих материалов, как влияние локализованных состояний в щели подвижности полупроводника и квантово-размерных эффектов на границах раздела на барьерные свойства структуры. Учет этих осо-

бенностей позволяет рассчитывать пространственное распределение объемного заряда и внутреннего электрического поля по ширине барьерной структуры с высоким пространственным разрешением.

Для неупорядоченных полупроводников характерно наличие непрерывного энергетического спектра состояний, локализованных в щели подвижности. Существует несколько моделей, по-разному описывающих распределение плотности состояний по энергии [3], но все они учитывают следующие особенности:

- наличие пика плотности состояний вблизи середины щели подвижности, который связывают с оборванными ковалентными связями Si - Si;
- наличие «хвостов» плотности состояний вблизи дна зоны проводимости и потолка валентной зоны, которые объясняются нарушением трансляционной симметрии во взаимном расположении атомов полупроводника;
- закрепление уровня Ферми вблизи середины щели подвижности.

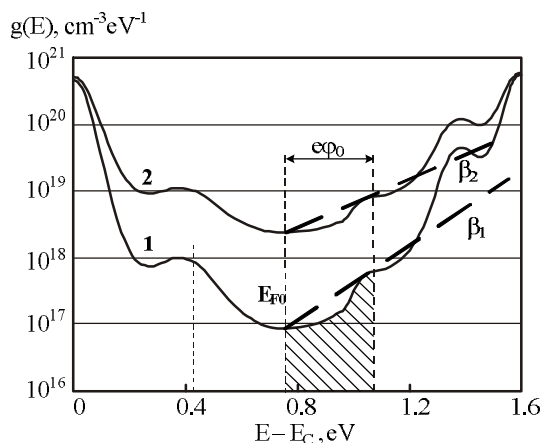


Рисунок 1 – Модель распределения плотности локализованных состояний $g(E)$ в щели подвижности некристаллического полупроводника [5]

В данной работе за основу взята модель распределения плотности локализованных состояний, предложенная в работе [5]. Используются следующие граничные условия и приближения: энергия на зонных диаграммах и в расчетах отсчитывается от уровня вакуума (рисунок 1); локализованные состояния вблизи уровня Ферми являются электрически- и фотоактивными; распределение плотности состояний аппроксимируется экспоненциальной функцией вида:

$$g(E) = g_{F0} \exp(-\beta(E - E_{F0})), \quad (1)$$

где g_{F0} – величина плотности состояний вблизи E_{F0} , β – коэффициент аппроксимации. Заштрихованная область на рисунке 1 соответствует ионизированным состояниям, ϕ_0 – встроенный потенциал.

Характеристиками барьерной структуры являются ширина области пространственного заряда (ОПЗ) W , пространственное распределение объемного заряда $\rho(x)$, напряженности $F(x)$ и электростатического потенциала $\phi(x)$ внутреннего электрического поля. Эти параметры зависят от величины встроенного потенциала ϕ_0 , плотности состояний вблизи уровня Ферми g_{F0} и распределения плотности этих состояний в щели подвижности (параметр аппроксимации β , рисунок 1, уравнение 1)

Моделирование характеристик ОПЗ барьерной структуры проводится на основе решения одномерного уравнения Пуассона (2), с учетом приближений и граничных условий [6]:

$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = \frac{\rho(x)}{\epsilon\epsilon_0}. \quad (2)$$

Граничные условия: координата x отсчитывается от поверхности вглубь полупроводника; на внутренней границе ОПЗ электрическое поле отсутствует ($\phi(W) = 0$, $F(W) = 0$); используется приближение полного обеднения, т.е. все локализованные состояния, находящиеся ниже E_{F0} нейтральны, выше – полностью ионизированы.

Решение уравнения (2) с учетом вышеприведенных приближений и граничных условий представляет собой аналитические выражения (3) – (5), которые связывают характеристики ОПЗ (W , $F(x)$, $\phi(x)$) и параметры барьерной структуры (g_{F0} , β , ϕ_0) при воздействии внешним электрическим полем напряжением V :

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{e^2 g_{F0}}} \arccos[\exp(-\frac{\beta e(\phi_0 - V)}{2})]; \quad (3)$$

$$F(x) = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{e^2 g_{F0}}} \operatorname{tg}\left(\frac{W - x}{\sqrt{2\epsilon\epsilon_0/e^2 g_{F0}}}\right); \quad (4)$$

$$\phi(x) = -\frac{2}{\beta e} \ln \left| \cos\left(\frac{W - x}{\sqrt{2\epsilon\epsilon_0/e^2 g_{F0}}}\right) \right|. \quad (5)$$

Здесь считается, что $V > 0$ при прямом смещении и $V < 0$ – при обратном.

Экспериментальный метод

В качестве экспериментального метода для исследования распределения электрического поля в многослойных барьерных структурах используется метод компенсации тока нестационарной фотопроводимости (МКТНФ) [3, 4]. Он позволяет исследовать неупорядоченные полупроводники, для которых характерны низкая подвижность носителей зарядов, а также дисперсионный характер их переноса. Метод учитывает потери фотогенерированных носителей при их переносе через ОПЗ из-за рекомбинации на локализованных состояниях и является дальней-

шим развитием модифицированного времяпролетного (time-of-flight – TOF) метода [7]. Традиционный TOF метод используется для исследования кинетических характеристик полупроводниковых материалов, таких как дрейфовая подвижность μ носителей заряда и их время жизни τ [8]. В отличие от традиционного TOF метода модифицированный TOF метод позволяет измерять коэффициент собирания фотогенерированного заряда G в зависимости от длины волны λ оптического излучения и напряжения внешнего электрического поля V . Встречно включенное внешнее поле компенсирует внутреннее. Это позволяет получить следующие преимущества: длительность светового импульса может быть больше, чем время прохождения фотогенерированных носителей заряда; мелкие энергетические ловушки не влияют на количество собранного заряда [9].

Результатом обработки полученных данных является пространственное распределение напряженности $F(x)$ и электростатического потенциала $\varphi(x)$ внутреннего электрического поля ОПЗ, дрейфовый сдвиг носителей $\mu\tau$ и т.д., как в простых контактах типа барьера Шоттки или p-i-n структуре, так и в многослойных структурах [10].

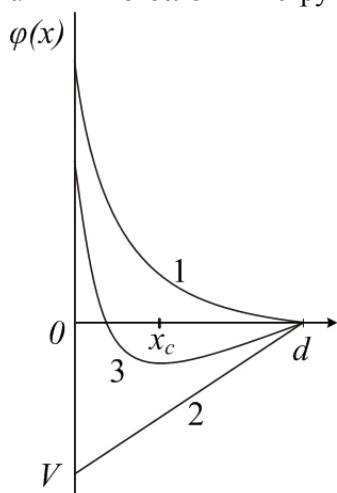


Рисунок 2 – Распределение электростатического потенциала электрического поля по толщине структуры: 1 – внутреннее поле, 2 – внешнее поле, 3 – суперпозиция полей [7]

Распределение электрического поля $F(x)$ рассчитывается по величине внешнего компенсирующего напряжения V и толщине d :

$$F(x_c) = \frac{V_{G=0}}{d}. \quad (6)$$

Здесь x_c – координата, в которой рассчитывается напряженность внутреннего поля. Длительность импульса компенсирующего напряжения не должна превышать время перераспределения поля (время релаксации Максвелла τ_M). При этом

условии можно считать, что внешнее поле распределено в образце равномерно, как в диэлектрике (рисунок 2).

В случае использования стандартной методики Гехта [7] коэффициент собирания заряда G рассчитывается следующим образом:

$$G = \frac{Q}{Q_0} = \frac{\mu\tau F}{d} [1 - \exp(-\frac{d}{\mu\tau F})], \quad (7)$$

где Q – собранный на электродах заряд, Q_0 – полный заряд фотогенерированных носителей. В предлагаемом методе коэффициент собирания заряда G определяется из следующего выражения:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^{Q_0/e} G_i}{Q_0/e} = \frac{\int_0^d n(x_g) G_i(x_g) dx_g}{\int_0^d n(x_g) dx_g}, \quad (8)$$

где $n(x_g)$ – концентрация носителей, сгенерированных под действием света на глубине x_g , $G_i(x_g)$ – коэффициент собирания этих носителей.

Для определения точной координаты, где внешнее поле компенсирует внутреннее, необходимо установить соотношение между коэффициентом оптического поглощения $\alpha(h\nu)$ и координатой x_c . Эта зависимость рассчитывается из уравнения (8) при условии полной компенсации переходного фототока импульсом внешнего напряжения. Если $G(V, \alpha) = 0$, то

$$\int_0^d \exp(-\alpha x_g) (x_c - x_g) [1 - \exp(-\frac{d}{|x_c - x_g|})] dx_g = 0. \quad (9)$$

Если выполняется условие, что весь фотогенерированный заряд стекает в точку с минимальным значением потенциала (координата x_c , рисунок 2), то коэффициент собирания заряда равен нулю.

Полученное уравнение устанавливает связь между координатой x_c , в которой внутреннее электрическое поле равно внешнему компенсирующему полю, коэффициентом поглощения света $\alpha(h\nu)$ на данной длине волны λ и толщиной структуры d . Зная зависимость $\alpha(h\nu)$ для конкретного образца и решая уравнение (9) численными методами, получаем зависимость координаты x_c от длины волны λ света.

Экспериментальные исследования

Экспериментальная установка

Для практической реализации метода МКТНФ разработана экспериментальная установка, с помощью которой можно одновременно воздействовать на исследуемую структуру импульсным оптическим монохроматическим излучением и электрическим полем от внешнего источника. Носители заряда генерируются ко-

ротким импульсом монохроматического света. Их дрейф под действием суперпозиции внутреннего и внешнего электрических полей создает ток нестационарной фотопроводимости через измерительную цепь. Назначение установки – измерение тока нестационарной проводимости. Технические особенности установки:

- четкая синхронизация момента подачи оптического импульса и компенсирующего электрического поля;
- возможность изменять время задержки между оптическим и электрическим воздействием;
- диапазон измеряемых токов 50 пА – 1 мА, длительность переходных процессов 100 нс – 1 с.

Структурная схема установки представлена на рисунке 3. В качестве источника широкополосного оптического излучения используется импульсная лампа-вспышка. Необходимая длина волны выделяется с помощью монохроматора MDR-206. Фотодетектор используется для контроля интенсивности излучения. Монохроматическое излучение заданной интенсивности попадает в измерительную ячейку.

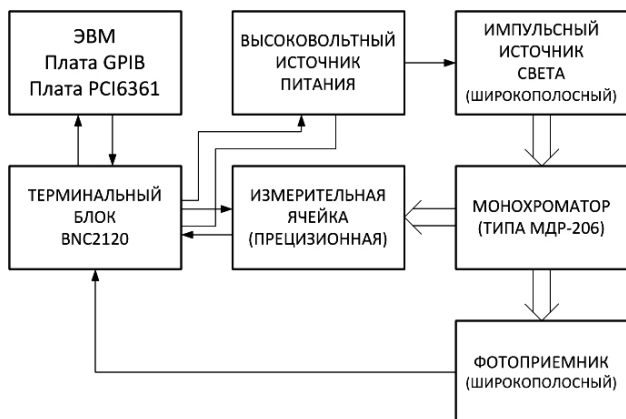


Рисунок 3 – Структурная схема экспериментальной установки

В измерительной ячейке размещается тестовая структура и измерительная схема. Для защиты от внешних электромагнитных воздействий корпус измерительной ячейки выполнен из пермаллоя. Сигнальная, корпусная «земля» и «земля» по питанию организованы по выделенным медным шинам и соединены в точке наименьшего потенциала, питание измерительной схемы осуществляется от аккумуляторов. В качестве прецизионного усилителя был использован ОУ AD8066AR, обладающий высоким быстродействием и низким уровнем собственных шумов [11]. Схемотехнические решения и применяемые электронные компоненты обеспечивают заданные технические характеристики.

Управление измерительной установкой автоматизировано с помощью ПК. Программа уп-

равления выполнена в среде инженерного графического проектирования LabVIEW, сигналы управления и экспериментальные данные заводятся в виртуальный прибор через блок коммутации BNC 2120.

Тестовые структуры

В качестве тестовых структур были выбраны p-i-n структуры солнечных элементов на основе аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si:H) и гетероструктуры a-Si:H/c-Si, являющиеся элементами НИТ-структуры (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) [12] (рисунок 4). Слои a-Si:H в тестовых структурах обоих типов были сформированы методом разложения моносилана в плазме тлеющего разряда в лаборатории НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург.

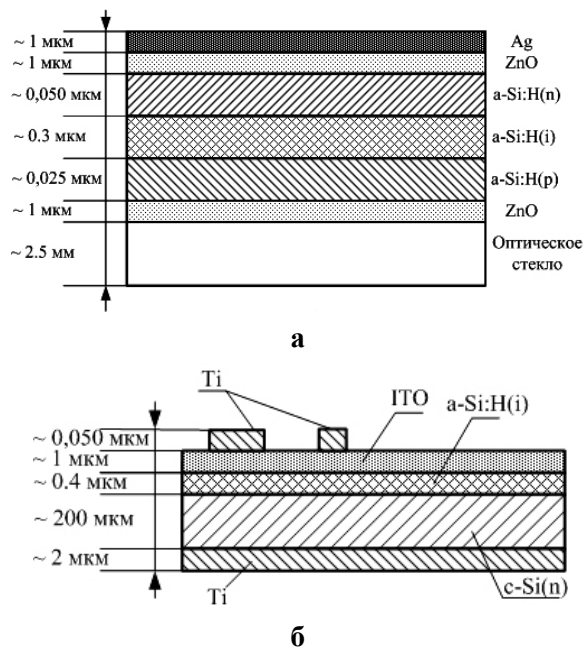


Рисунок 4 – Структура тестовых образцов:
а – p-i-n структура на основе a-Si:H,
б – гетероструктура на основе a-Si:H/c-Si

Первая группа образцов представляет собой p-i-n структуру на основе a-Si:H. Они входят в состав серийно производимых тонкопленочных двухкаскадных солнечных элементов. Для обеспечения электрического контакта поверхность образцов покрыта тонкой пленкой серебра. Засветка образцов производится со стороны прозрачной подложки.

Вторая группа образцов представляет собой гетероструктуры a-Si:H/c-Si, которые являются основой для солнечных элементов с НИТ-структурой. Толщина пленки a-Si:H (i) варьируется в диапазоне 0,4...1,2 мкм. В качестве подложки используются пластины c-Si(n), легированные фосфором ($\rho = 2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) и c-Si(n), леги-

рованные сурьмой ($\rho = 0,01 \text{ Ом}\cdot\text{см}$). Засветка образцов производится со стороны прозрачного ИТО (оксид индия-олова) слоя.

Экспериментальные результаты измерения распределения встроенного электрического поля в слое a-Si:H тестовой структуры представлены на рисунке 5. Координата x в p-i-n-структуре на основе a-Si:H отсчитывается от границы раздела a-Si:H(n)/a-Si:H(i) вглубь пленки a-Si:H(i). В гетероструктуре a-Si:H(i)/c-Si(n) отсчет координаты ведется от границы ИТО/a-Si:H(i) вглубь пленки a-Si:H(i).

Для p-i-n-структуры на основе a-Si:H напряженность электрического поля находится в пределах $5...8 \times 10^3 \text{ В/см}$, для гетероструктуры a-Si:H/c-Si – около $2 \times 10^4 \text{ В/см}$. Значения встроенного потенциала оказались одинаковыми для всех образцов – порядка 0,8 В.

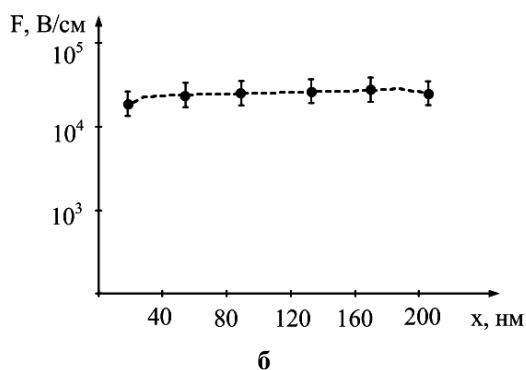
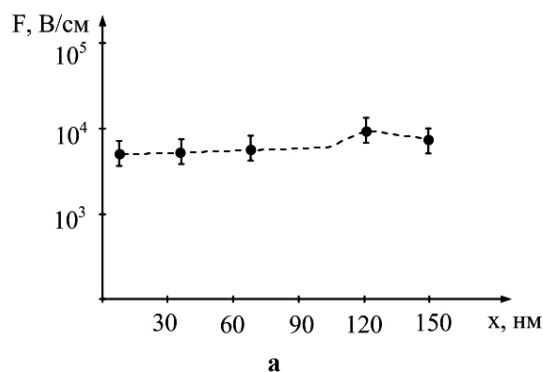


Рисунок 5 – Распределение встроенного электрического поля в приповерхностной области a-Si:H(i): а – p-i-n структура на основе a-Si:H; б – гетероструктура a-Si:H/c-Si

Расчетное усредненное значение напряженности встроенного электрического поля в i-слое p-i-n структуры, полученное при моделировании солнечных элементов в пакетах программ PC1D [13] и AMPS-1D [14] составляет $2,5 \times 10^4 \text{ В/см}$ против измеренного значения порядка $5 \times 10^3 \text{ В/см}$. Для гетероструктуры a-Si:H(i)/c-Si расчетное значение составило $7,5 \times 10^4 \text{ В/см}$ против измеренного $2 \times 10^4 \text{ В/см}$ [15]. На рисунке 6 представлены упрощенные зонные диаграммы исследуемых структур.

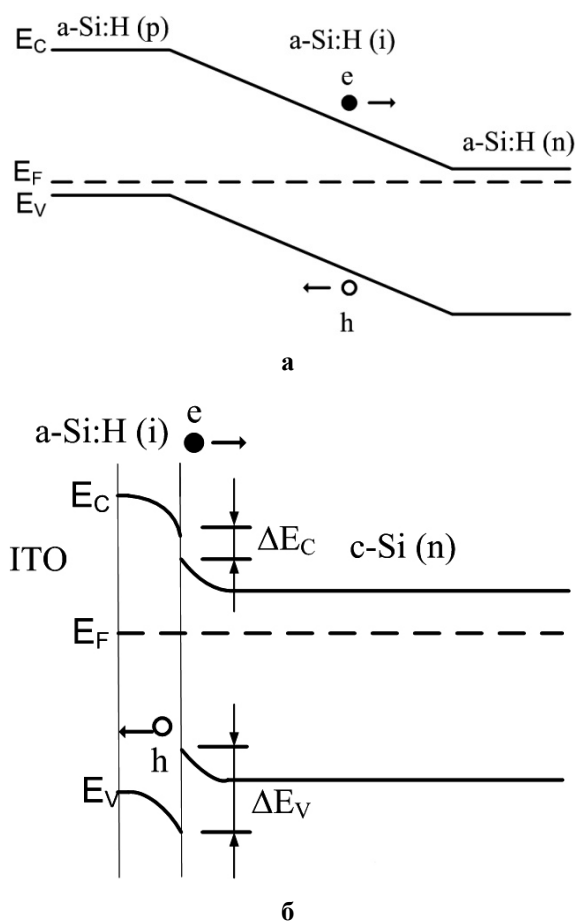


Рисунок 6 – Зонные диаграммы тестовых структур: а – p-i-n-структуры на основе a-Si:H; б – гетероструктуры a-Si:H(i)/c-Si(n)

Экспериментально измеренные величины встроенных электрических полей оказываются заметно меньше расчетных. Расхождение теоретических и экспериментальных результатов можно объяснить действием «суперпозиции» нескольких механизмов токопрохождения в барьерной и квазинейтральной областях a-Si:H, в том числе рекомбинацией части фотогенерированных носителей через ловушки, локализованные в щели подвижности a-Si:H [16]. Эти факторы достаточно сложно математически интерпретировать, и они, как правило, не принимаются во внимание при моделировании характеристик барьерных структур на основе неупорядоченных полупроводников. Кроме того, некоторый разброс значений напряженности электрического поля в p-i-n-структуре (рисунок 5, а) по координате x (нормали к поверхности) отражает особенности формирования потенциального барьера и несет информацию о распределении в щели подвижности a-Si:H(i) плотности локализованных электронных состояний [2]. В гетероструктурах a-Si:H/c-Si электрическое поле в пленке a-Si:H(i) распределено практически равномерно по исследуемому координатному направлению x

(рисунок 5, б). Этому факту пока трудно дать корректное объяснение, т.к. структуры были получены в разных технологических циклах, хотя и при одинаковых технологических параметрах (давление в рабочей камере, мощность ВЧ разряда и температура подложки).

Заключение

Теоретические и экспериментальные результаты, представленные в работе, позволяют сделать следующие выводы и замечания.

1. Моделирование и экспериментальные исследования р-і-n- и гетероструктур на а-Si:H методом МКТНФ и сравнение результатов показывают заметные различия в значениях встроенного электрического поля в барьерных слоях, что является следствием несовершенства имеющихся математических моделей барьерных структур с неупорядоченными полупроводниковыми материалами.

2. Метод МКТНФ позволяет проводить измерения встроенного электрического поля в высокоомных слоях р-і-n- и гетероструктур на а-Si:H, однако для анализа многослойных каскадных элементов этот метод требует существенной доработки как в теоретическом плане, так и в плане технической реализации. На данный момент проблематично измерить встроенное поле в материалах с высокой подвижностью носителей заряда. Кроме того, необходимо иметь точную информацию о толщинах слоев, их оптических и электрофизических свойствах.

3. Дальнейшее развитие метода МКТНФ предусматривает учет квантово-размерных эффектов в многослойных барьерных структурах с квантовыми ямами (НІТ-структурах) в процессе разделения и переноса носителей заряда.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект 8.8760.2017/БЧ) с использованием научного оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета в научно-образовательном центре неупорядоченных и наноструктурированных материалов и устройств на их основе.

Библиографический список

1. Best Research-Cell Efficiency [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png> (Дата обращения: 07.11.2018).
2. **Vishnyakov N. V., Vikhrov S. P., Mishustin V. G. et al.** The measurement of electric field distribution in the barrier structures based on disordered semiconductors by

using the transient photocurrent compensation method. Journal of nanoelectronics and optoelectronics. 2014. Vol. 9, no. 6, pp. 773-777.

3. **Мишустин В. Г., Романов А. Г.** Метод компенсации тока нестационарной фотопроводимости для исследования полупроводниковых материалов и барьерных структур на их основе // Материалы научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика-2017». Сборник статей. Москва, 2017. С. 123-128.

4. **Вишняков Н. В., Воробьев Ю. В., Гудзев В. В. и др.** Развитие методов исследования полупроводниковых материалов и приборных структур микро- и нанoeлектроники // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 60. С. 164-170.

5. **Меден А., Шо М.** Физика и применение аморфных полупроводников: Пер. с англ. - М.: Мир, 1991. – 670 с.

6. **Vikhrov S. P., Vishnyakov N. V., Mishustin V. G. et al.** Speciality of Poisson equation solution and calculation of barrier profile on the interface to non-crystalline semiconductor. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. 2003. Vol. 5, no. 5, pp. 1249-1254.

7. **Юшка Г. Б., Монтримас Э. А.** Измерение распределения электрического поля в тонких структурах а-Si:H // Литовский физический сборник. 1992. Т. 32. № 4 С. 612-617.

8. **Vikhrov S. P., Vishnyakov N. V., Mishustin V. G. and Maslov A. A.** Time-of-Flight Technique for Investigation of amorphous chalcogenides and barrier structures on their base. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. 2001. Vol. 3. pp. 407-410.

9. **Вихров С. П., Вишняков Н. В., Мишустин В. Г. и др.** Анализ и уточнение математического аппарата для модифицированного времяпролетного метода // Физика и техника полупроводников. 2002. Т. 36. Вып. 4. С. 433-436.

10. **Алпатов А. В., Верин И. А., Вихров С. П. и др.** Исследование контактных явлений в фотозлектрических датчиках на основе наноструктурированных неупорядоченных полупроводников // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 30. С. 58-62.

11. AD8066AR datasheet (Analog Devices) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.analog.com/en/search.html> (Дата обращения: 20.12.2017).

12. **W. van Sark, Korte L., Roca F.** Physics and technology of amorphous-crystalline heterostructure silicon solar cells, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.

13. PC1D (Introduction to Simulation), [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/welcome-to-pvcdrom/pc1d> (Дата обращения: 14.11.2017).

14. AMPS-1D (User Manual), [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ampsmodeling.org/latest.html> (Дата обращения: 14.11.2017).

15. **Kusakin D. S., Mishustin V. G., Piryugin A. V., Vikhrov S. P.** Simulation of electrophysical parameters of multilayer barrier homo- and hetero-structures based on non-crystalline semiconductors. Embedded Computing (MECO) 6th Mediterranean Conference on, Bar, Montenegro. 11th – 16th June 2017, pp. 287-291.

16. **Ermachikhin A. V., Kholomina T. A., Litvinov V. G., et al.** Investigation of recombination processes in multicrystalline silicon solar cells. Embedded Computing (MECO) 6th Mediterranean Conference on, Bar, Montenegro. 11th – 16th June 2017, pp. 259-262.

UDC 621.383

MEASUREMENT OF THE BUILT-IN ELECTRIC FIELDS DISTRIBUTION IN SEMICONDUCTOR BARRIER STRUCTURES

S. P. Vikhrov, Dr. Sc. (Phys. and Math.), full professor, Chief Researcher, RSREU, Ryazan; vikhrovsergey@mail.ru

N. V. Vishnyakov, Ph.D. (Tech.), Head of Regional Center of Probe Microscopy for collective use of RSREU; rcpm-rgrtu@yandex.ru

A. D. Maslov, post-graduate student, RSREU, Ryazan; maslov.a.d@mail.ru

V. G. Mishustin, Ph.D. (Phys. and Math.), assistant professor, RSREU, Ryazan; vgmish@yandex.ru

A. G. Romanov, post-graduate student, RSREU, Ryazan; alex7371@yandex.ru

The problem of experimental measuring of built-in electric fields in multilayer barrier homo- and heterostructures based on crystal and disordered semiconductors is studied. The aim of the work is to apply the method of non-stationary photoconductivity current compensation for investigating semiconductor barrier p-i-n and heterostructures. The experimental method and its mathematical model, measuring equipment to realize this method and used test structures are described. The results of an experimental study of the distribution of the built-in electric fields in the p-i-n structure on a-Si:H and a-Si:H/c-Si heterostructure, analysis of experimental data are presented. The direction of work on the further development of the method is formulated.

Key words: electric field distribution, compensation method, non-stationary photoconductivity current, homo- and heterojunctions, solar cells.

DOI: 10.21667/1995-4565-2018-66-4-2-23-29

References

1. Best Research-Cell Efficiency [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/ef-ficiency-chart.png> (Дата обращения: 07.11.2018).
2. **Vishnyakov N. V., Vikhrov S. P., Mishustin V. G. et al.** The measurement of electric field distribution in the barrier structures based on disordered semiconductors by using the transient photocurrent compensation method. *Journal of nanoelectronics and optoelectronics*. 2014. Vol. 9, no. 6, pp. 773-777.
3. **Mishustin V. G., Romanov A. G.** Metod kompensatsii toka nestatsionarnoy fotoprovodimosti dlya issledovaniya poluprovodnikovykh materialov i baryernykh struktur na ikh osnove. *Materialy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Mikroelektronika i informatika-2017»*. Sbornik statey. Moskva. 2017. Pp. 123-128. (in Russian).
4. **Vishnyakov N. V., Vorobyev Yu. V., Gudzev V. V. i dr.** Razvitiye metodov issledovaniya poluprovodnikovykh materialov i pribornykh struktur mikro- i nanoelektronik. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2017, no. 60, pp. 164-170 (in Russian).
5. **Madan A. and Shaw M.** The Physics and Applications of Amorphous Semiconductors, Academic Press, 1988. 670 p.
6. **Vikhrov S. P., Vishnyakov N. V., Mishustin V. G. et al.** Speciality of Poisson equation solution and calculation of barrier profile on the interface to non-crystalline semiconductor. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2003. Vol. 5, no. 5, pp. 1249-1254.
7. **Yushka G. B., Montrimas E. A.** Izmereniye raspredeleniya elektricheskogo polya v tonkikh strukturakh a-Si:H// Litovskiy fizicheskiy sbornik. 1992. Vol. 32, pp. 612-617. (in Russian).
8. **Vikhrov S. P., Vishnyakov N. V., Mishustin V. G. and Maslov A. A.** Time-of-Flight Technique for Investigation of amorphous chalcogenides and barrier structures on their base. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2001. Vol. 3, pp. 407-410.
9. **Vikhrov S. P., Vishnyakov N. V., Mishustin V. G. i dr.** Analiz i utochneniye matematicheskogo apparata dlya modifitsirovannogo vremyaproletnogo metoda. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2002. Vol. 36, no. 4, pp. 433-436. (in Russian).
10. **Alpatov A. V., Verin I. A., Vikhrov S. P. i dr.** Issledovaniye kontaktnykh yavleniy v fotoelektricheskikh datchikakh na osnove nanostrukturirovannykh neuporyadochennykh poluprovodnikov. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2009, no. 30, pp. 58-62. (in Russian).
11. AD8066AR datasheet (Analog Devices) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.analog.com/en/search.html> (Data obrashcheniya: 20.12.2017).
12. **W. van Sark, Korte L., Roca F.** Physics and technology of amorphous-crystalline heterostructure silicon solar cells, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
13. PC1D (Introduction to Simulation), [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/welcome-to-pvcdrom/pc1d> (Data obrashcheniya: 14.11.2017).
14. AMPS-1D (User Manual), [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ampsmodeling.org/latest.html> (Data obrashcheniya: 14.11.2017).
15. **Kusakin D. S., Mishustin V. G., Piryugin A. V., Vikhrov S.P.** Simulation of electrophysical parameters of multilayer barrier homo- and hetero-structures based on non-crystalline semiconductors. *Embedded Computing (MECO) 6th Mediterranean Conference on, Bar, Montenegro*. 11th – 16th June 2017, pp. 287-291.
16. **Ermachikhin A. V., Kholomina T. A., Litvinov V. G., et al.** Investigation of recombination processes in multicrystalline silicon solar cells. *Embedded Computing (MECO) 6th Mediterranean Conference on, Bar, Montenegro*. 11th – 16th June 2017, pp. 259-262.