

Н.И. СЛИПЧЕНКО, д-р. физ.-мат. наук, В.А. ПИСЬМЕНЕЦКИЙ, канд. техн. наук,
А.В. ФРОЛОВ, канд. техн. наук, Н.В. ГЕРАСИМЕНКО, М.Ю. ГУРТОВОЙ, Е.С. ГЛУШКО,
Т.Е. СТЫЦЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛЕНОЧНЫХ КРЕМНИЕВЫХ АМОРФНЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА *p-i-n*-СТРУКТУРАХ

Введение

В последнее время при изготовлении пленочных фотопреобразователей аморфный кремний выступил в качестве более дешевой альтернативы монокристаллическому благодаря гораздо большему оптическому поглощению (в 20 раз), малой толщине пленок а-Si:H (0,5 – 1,0 мкм) и, как следствие, сокращению расхода кремния. Кроме этого, достоинством пленочной технологии являются более низкие рабочие температуры ($T \leq 300^\circ\text{C}$).

Более высокой эффективностью преобразования обладают солнечные элементы на основе аморфного кремния с *p-i-n*-структурой [1]. Для ее эффективной работы необходимо обеспечить поглощение основной части светового потока, генерацию фотоносителей заряда и их ускорение в *i*-области под действием электрического поля.

Основная часть

В процессе выполнения работы планировалось проведение исследований:

- солнечной ячейки на основе пленочной кремниевой *p-i-n*-структуры;
- тандемного пленочного фотопреобразователя на двух *p-i-n*-ячейках.

Кроме этого было предусмотрено проведение оптимизации параметров верхней и нижней *p-i-n*-ячеек тандемных пленочных фотопреобразователей и выполнение экспериментальных исследований подсистемы солнечной станции, состоящей из аморфных кремниевых панелей BS-50.

Оценка исходных параметров *p-i-n*-фотопреобразователей (ФП) была выполнена на основе оптических характеристик солнечного излучения при потоке 100 мВт/см^2 .

Для решения этой задачи были использованы известные соотношения для спектрального энергетического $S(\epsilon)$ и удельного спектрального потока фотонов $S_{\text{уд}}(\epsilon)$ [3].

Для вычисления плотности тока генерации *p-n*-перехода интегрируем спектральное распределение $S_{\text{уд}}(\epsilon)$, а для перехода к фототоку вводим коэффициент собирания K_{SO} , учитывающий различные виды потерь фотогенерированных носителей заряда. Тогда согласно [3] для плотности тока генерации $J_{\text{Г}}$ фототока верхнего *p-n*-перехода $J_{\phi 1}$ и фототока нижнего *p-n*-перехода $J_{\phi 2}$ можно применить расчетные формулы:

$$j_{\text{Г}} = K_{\text{SO}} \cdot e \cdot \int_{\epsilon}^{\infty} S_{\text{уд}}(\epsilon) d\epsilon; \quad (1)$$

$$j_{\phi 1} = K_{\text{SO}} \cdot e \cdot \int_{\epsilon 1}^{\infty} S_{\text{уд}}(\epsilon) d\epsilon; \quad (2)$$

$$j_{\phi 2} = K_{\text{SO}} \cdot e \cdot \int_{\epsilon 1}^{\epsilon 2} S_{\text{уд}}(\epsilon) d\epsilon. \quad (3)$$

Для определения напряжения холостого хода используем известное соотношение [2] при $J_{\text{кз}} \sim J_{\phi}$:

$$U_{\text{ХХ}} = U_t \cdot \ln\left(\frac{J_{\phi}}{J_s} + 1\right),$$

где U_t – температурный потенциал, равный $U_t = 26 \text{ мВ}$ при температуре 300 К.

Поскольку рекомбинационный ток возрастает с увеличением напряжения гораздо медленнее ($\sim e^{U/2kT}$), чем обратный ток, связанный с током насыщения ($\sim e^{U/kT}$) при высокой плотности излучения роль рекомбинационного тока меньше.

Для улучшения собирания необходимо расширение i -слоя, ширина которого должна считаться сопоставимой с диффузионной длиной L_n неосновных носителей (электронов) в базе. При расчетах полагаем, что интенсивность падающего излучения довольно высока и концентрация неравновесных носителей в i -области существенно превышает концентрацию равновесных.

Таким образом, считая, что на поверхность фотоэлемента падает поток монохроматических фотонов $S(\varepsilon)$, ток короткого замыкания имеет вид [2]:

$$i_\phi = e i_\phi = e S(\varepsilon) (1 - e^{-\alpha d}) + e S(\varepsilon) \cdot \frac{e^{-\alpha d} \cdot \alpha L_n}{1 + \alpha L_n},$$

где α – коэффициент поглощения.

Для определения ВАХ фотоэлемента рассмотрим концентрацию неравновесных носителей в i -слое, ширина которого мала по сравнению с параметрами L_n . Поэтому концентрация неравновесных носителей постоянна во всех точках i -слоя. Концентрация электронов равна концентрации дырок, так как в противном случае должны были бы возникнуть аномально сильные электрические поля. При $n \approx p \gg n_i$ число рекомбинирующих носителей в i -слое в единицу времени:

$$\frac{nd}{\tau} = \frac{pd}{\tau},$$

где $\tau = \tau_n + \tau_p$.

Если при выбранной ширине слоя d решающую роль играет рекомбинационный ток, то:

$$\begin{aligned} i_\phi - i &= \frac{epd}{\tau}; \\ p = n &= \frac{i_\phi - i}{d\tau}, \end{aligned} \quad (4)$$

где i – ток нагрузки.

Для расчета выходного напряжения фотоэлемента используем выражения для контактной разности потенциалов на n - i и i - p -переходах [2]. При этом общее изменение контактной разности потенциалов между n и p областями с промежуточным i -слоем имеет вид

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \cdot \ln \frac{n}{n_i}.$$

Если из последней величины вычесть омическое падение напряжения при прохождении тока через i -слой, получим выходное напряжение:

$$U = 2 \frac{kT}{e} \cdot \ln \left(\frac{p}{n_i} \right) - \frac{id}{(\mu_n + \mu_p) \cdot p \cdot e}, \quad (5)$$

где μ_n и μ_p – подвижности электронов и дырок; $d/[(\mu_n + \mu_p)pe]$ – сопротивление 1 см^2 i -слоя.

Из (5) с учетом (4) имеем:

$$U = 2 \frac{kT}{e} \cdot \ln \left(\frac{i_\phi - i}{i_r} \right) - \frac{d^2 i}{(\mu_n + \mu_p) \cdot (i_\phi - i) \cdot \tau}, \quad (6)$$

где $i_r = en_i d / \tau$ – поток рекомбинации (или генерации) в равновесном состоянии.

Формула (6) дает окончательное выражение для вольтамперной характеристики фотоэлемента с p - i - n -структурой.

Освоение нанотехнологий открывает перспективы создания наноразмерных p - i - n -диодов (рис. 1). Для расчета их параметров можно воспользоваться ранее приведенными соотношениями.

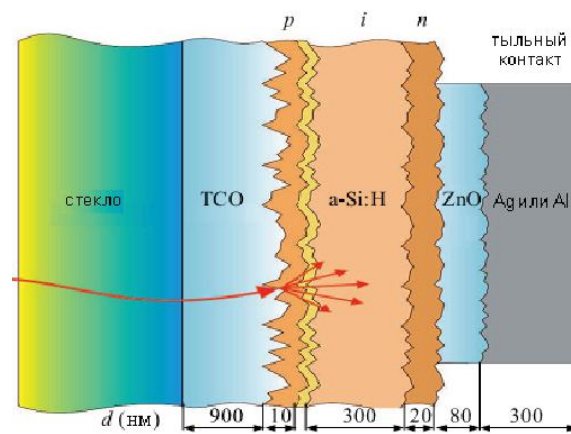


Рис. 1. Структура тонкопленочного однопереходного фотопреобразователя на основе p - i - n -ячейки

Результаты расчетов приведены на рис. 2 – 6. На рис. 2 демонстрируется зависимость оптимального выходного напряжения от ширины запрещенной зоны, когда толщина i -области принимает значение 0,2; 0,5; 1 и 2 мкм.

Вполне понятно, что оптимальное напряжение растет пропорционально увеличению ширины запрещенной зоны. При расширении i -области потери напряжения на ее последовательном сопротивлении растут, и соответственно уменьшается оптимальное выходное напряжение.

При росте толщины i -области увеличивается количество фотоносителей заряда, что приводит к росту плотности тока и иллюстрируется на рис. 2, б.

Уменьшение плотности оптимального тока при росте ширины запрещенной зоны хорошо согласуется со спектральной характеристикой потока фотонов и интегральным соотношением, с помощью которого рассчитывается фототок.

Зависимости напряжения холостого хода от ширины запрещенной зоны фактически повторяют аналогичные зависимости оптимального напряжения на рис.2, а при различных значениях толщины i -области.

Зависимости выходной удельной мощности от ширины запрещенной зоны вполне понятны как результат перемножения оптимального напряжения на оптимальную плотность тока.

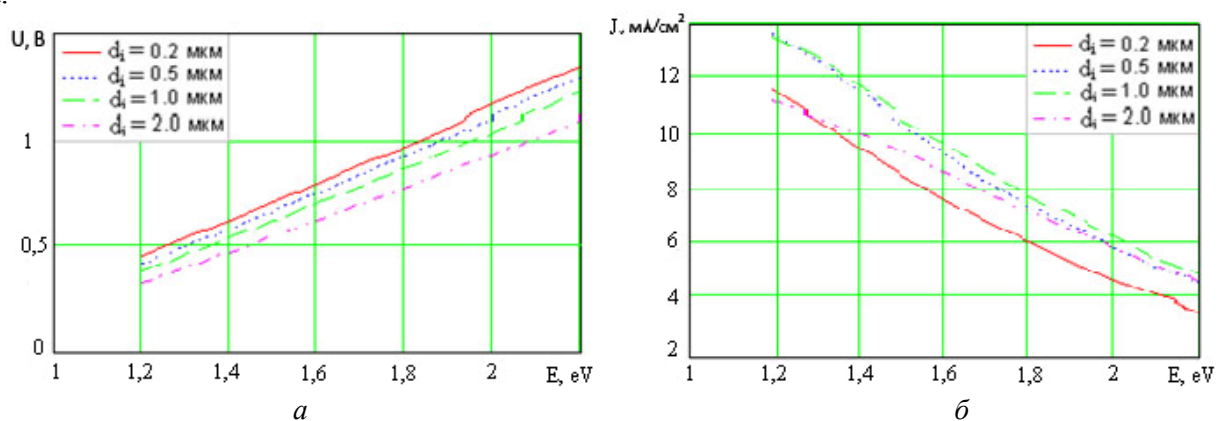


Рис. 2. Зависимость: а – оптимального напряжения; б – оптимальной плотности тока от ширины запрещенной зоны

Эти зависимости позволяют определить оптимальные значения ширины запрещенной зоны.

Зависимости КПД от ширины запрещенной зоны фактически повторяют аналогичные зависимости удельной мощности.

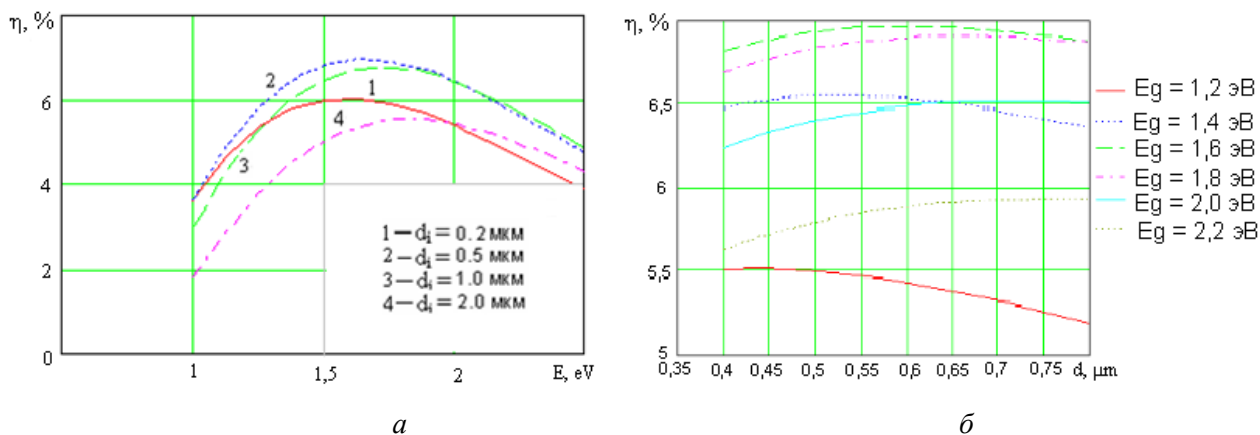


Рис.3. Зависимость КПД от ширины: *a* – запрещенной зоны; *б* – *i*-области

На рис.3, *б* приведены зависимости КПД от ширины *i*-области при различных значениях ширины запрещенной зоны. Как видим, существует оптимальная ширина *i*-области, которая полностью совпадает с ранее полученными результатами по оптимальной толщине аморфной пленки в гетероструктурных ФП на основе α -Si:H/Si(c)

На рис. 4 представлены зависимости оптимальной плотности тока и оптимального напряжения соответственно от ширины запрещенной зоны верхней *p-i-n*-ячейки двухпереходного фотопреобразователя. Наличие максимума связано со спектром поглощения пленки α -Si:H. Смещение максимума обусловлено перемещением спектра поглощения пленки α -Si:H с уменьшением ее толщины. С ростом толщины *i*-слоя наблюдается рост фототока и падение напряжения на *i*-области. Выходное напряжение растет пропорционально ширине запрещенной зоны.

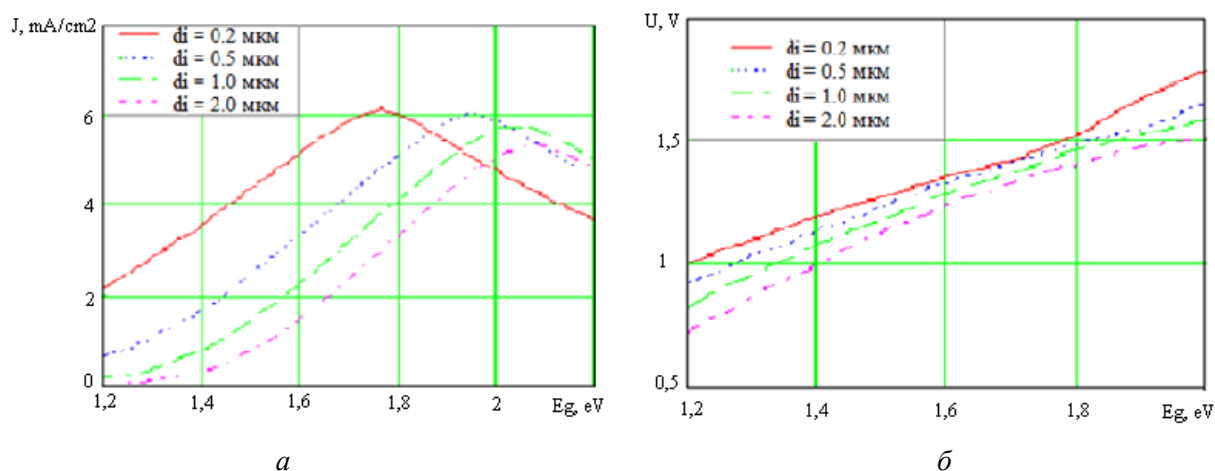


Рис. 4. Зависимость: *a* – оптимальной плотности тока; *б* – оптимального напряжения от ширины запрещенной зоны верхней *p-i-n*-ячейки двухпереходного фотопреобразователя

На рис. 4 представлены зависимости оптимальной плотности тока и оптимального напряжения соответственно от ширины запрещенной зоны нижней *p-i-n*-ячейки двухпереходного фотопреобразователя. Уменьшение фототока с ростом E_g связано с уменьшением ширины спектра светового потока. С уменьшением толщины пленки d_i ее спектр поглощения смещается вправо. С ростом параметра d_i увеличивается фототок и падает напряжение. При этом напряжение пропорционально ширине запрещенной зоны.

На рис. 5 приведены зависимости КПД тандемной гетероструктуры с учетом ширины запрещенной зоны E_g для верхней и нижней *p-i-n*-ячеек при разной толщине *i*-слоя. На графиках четко просматривается оптимальное значение параметра E_g на величину которого

влияет толщина i -слоя. Таким образом, целесообразно проведение процедуры оптимизации по значениям параметра E_g верхней и нижней p - i - n -ячеек.

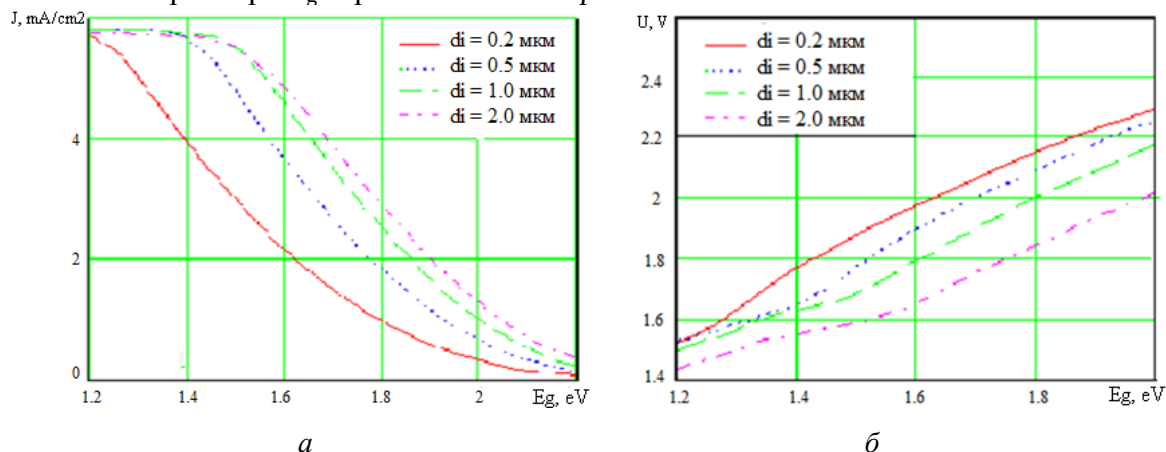


Рис. 5. Зависимость: a – оптимальной плотности тока; b – оптимального напряжения от ширины запрещенной зоны нижней p - i - n -ячейки двухпереходного фотопреобразователя

Результаты выполнения процедуры оптимизации по максимальному значению КПД с использованием метода градиентного спуска при толщине i -слоя, равного 0,5 мкм, представлены на рис.7. Оптимальные значения ширины запрещенной зоны E_g составили для верхней p - i - n -ячейки 2,075 эВ и для нижней – 1,45 эВ. Соответственно максимальное значение КПД равно 9,3 %.

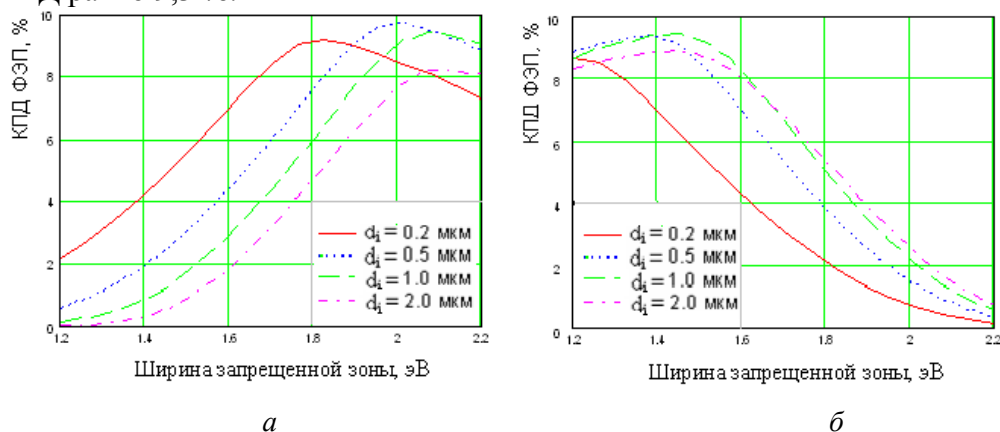


Рис. 6. Зависимость КПД для: a – верхней; b – нижней p - i - n ячеек тандемного фотопреобразователя

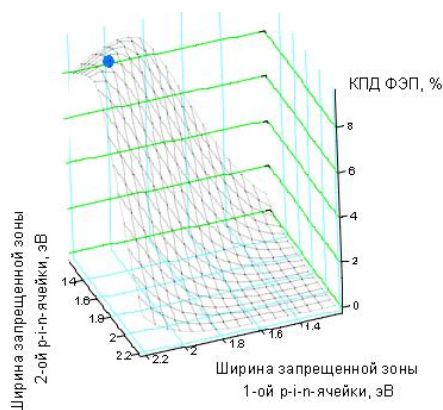
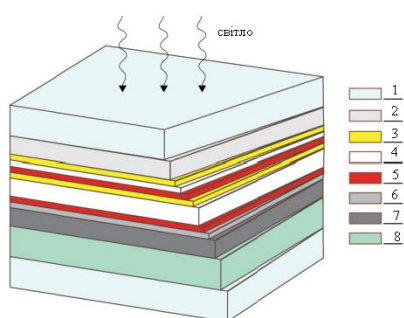


Рис. 7. Поиск оптимальных значений ширины запрещенной зоны обеих p - i - n -ячеек тандемной структуры

На рис. 8 приведена структура tandemного ФП, сформированного на двух последовательно соединенных $p-i-n$ -переходах с использованием пленок аморфного гидрогенезированного кремния $a-Si:H$. Такие tandemные ФП изготавливаются фирмой BudaSolar, а на их основе солнечные аморфные модули BS-50 с выходной мощностью 50 Вт, КПД – 6,3 %, и площадью 0,79 м².



- 1 – стекло; 2 – ITO;
3 – пленка $p-a-Si:H$;
4 – пленка $i-a-Si:H$;
5 – пленка $n-a-Si:H$;
6 – слой ZnO;
7 – слой алюминия;
8 – фольга EVA

а



б

Рис. 8. *а* – структура тонкопленочного tandemного двухпереходного $p-i-n$ ФП,
б – солнечный модуль из аморфного кремния BS-50.

Подсистема из модулей модели BS-50 с активной площадью 876 м² генерирует выходную мощность 54 кВт в составе солнечной электростанции мощностью 100 кВт для автономного энергообеспечения районного сельскохозяйственного комплекса в Белгородской области (Россия) (рис.9).

Авторами работы (рис. 12) в период с 26 по 28 октября 2011 г. были проведены исследования временных характеристик энергетической подсистемы на основе аморфных модулей BS-50.



Рис. 9. Подсистема солнечной станции из панелей BS-50

На рис. 10 представлены зависимости освещенности и тока короткого замыкания от времени суток. Из графиков можно сделать вывод, что зависимость тока $I_{кз}$ практически совпадает с графиком изменения освещенности. Это объясняется тем, что для кремниевых монокристаллических преобразователей ток $I_{кз}$ практически совпадает с током $I_{ф}$, который равен [4, 5]

$$I_{кз} = I_{\phi} = \frac{e \cdot \Phi_0}{h\nu} \cdot (1 - R) \cdot \eta \cdot K_c \cdot S,$$

где Φ_0 – входной световой поток; R – коэффициент отражения светового потока от фронтальной поверхности; η – квантовый выход; K_c – коэффициент собирания фотоносителей; S – площадь фронтальной поверхности.

Из формулы для I_{ϕ} следует, что все сомножители кроме параметра Φ_0 являются константами, и поэтому временная зависимость тока $I_{кз}$ действительно воспроизводит график изменения освещенности.

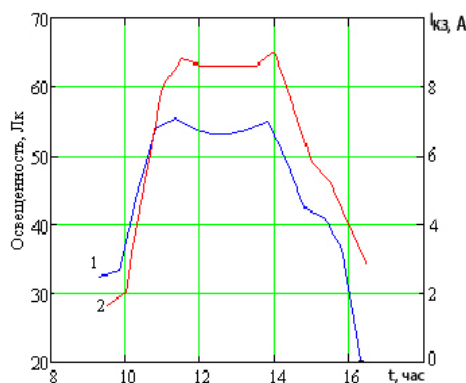


Рис. 10. Зависимости освещенности (1) и тока короткого замыкания (2) от времени суток

Зависимости U_{xx} и U_p от времени суток и освещенности представлены на рис. 11.

Характерно, что напряжение U_{xx} на этом же отрезке времени практически мало изменяется, что легко объясняется с помощью известного соотношения:

$$\varphi_T = \frac{kT}{e}, \quad I_{кз} = \phi_T \cdot \ln\left(\frac{I_{\phi}}{I_0} + 1\right),$$

где I_0 – ток насыщения, e – заряд электрона.

В пределах светового дня исследовались временные зависимости напряжения холостого хода U_{xx} (рис. 11, а), рабочего напряжения (рис. 11, б).

Поскольку температура медленно изменяется с течением времени множитель ϕ_T в процессе эксперимента практически остается постоянным, как и ток насыщения I_0 . Следовательно, параметр U_{xx} связан с током $I_{кз}$ логарифмической зависимостью и поэтому мало изменяется.

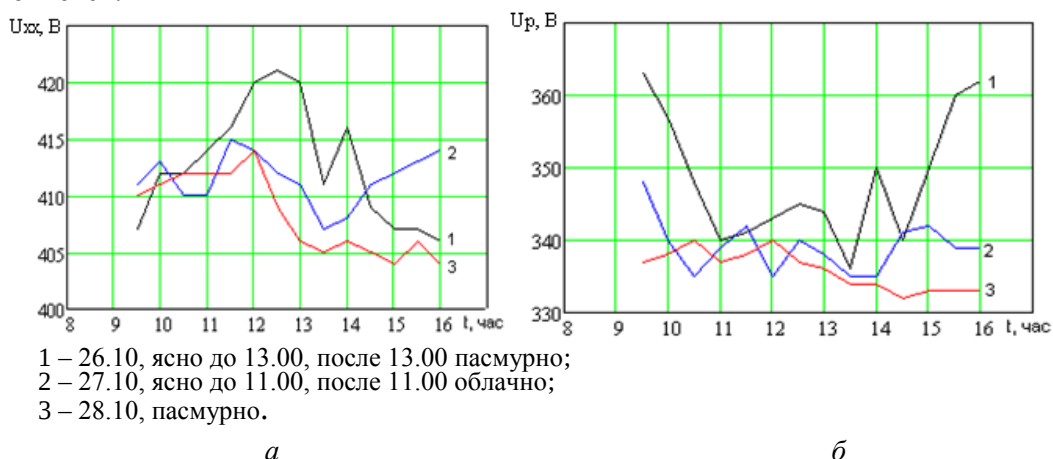


Рис. 11. Зависимости: а – U_{xx} ; б – U_p от времени суток и освещенности

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Показано что, базовая $p-i-n$ -фотоячейка характеризуется оптимальными значениями параметров E_g и d_i по критерию максимального КПД фотопреобразования.

2. Для нормальной работы тандемной $p-i-n$ структуры необходимо сопряжение по току верхней и нижней фотоячеек, которое реализуется с помощью предложенного алгоритма.
3. Оптимизацию по параметру E_g ячеек тандемной $p-i-n$ структуры целесообразно выполнять с применением метода градиентного спуска.
4. Проведенные экспериментальные исследования солнечных $p-i-n$ панелей типа BS-50 подтвердили целесообразность оптимизации параметров фотоячеек по максимальному КПД.



Рис. 12. Общий вид солнечной электростанции
на хуторе Крапивенские Дворы Белгородской области

Авторы выражают искреннюю признательность Генеральному директору ООО «ГК-Агро-Белогорье» В.Ф. Зотову, Генеральному директору ООО «Альт-Энерго» Н.С. Прокопенко за предоставленную возможность проведения исследований выходных фотоэлектрических характеристик солнечной электростанции на хуторе Крапивенские Дворы Белгородской области.

Список литературы: 1. Мейтин. Фотовольтаика: материалы, технологии, перспективы. Пусть всегда будет солнце! // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2000. – №6. – С. 40-46. 2. Васильев, А.М., Ландсма, А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи. – М. : Сов. радио, 1971. – С.248. 3. Слипченко, Н.И., Письменецкий, В.А. и др. Оптимизация параметра состава x по выходным характеристикам фотопреобразователей структурой $Al_xGa_{1-x}As-In_xGa_{1-x}As-GaAs$ // Вестник нац. техн. ун-та «ХПИ». – 2011. – № 54. – С. 144-152. 4. Бродски, М., Карлсон, Д., Коннел, Дж. и др. Аморфные полупроводники. – М. : Мир, 1962. – С. 419. 5. Слипченко, Н.И., Письменецкий, В.А. и др.. Экспериментальные исследования характеристик солнечной панели KV 150/24(12) в зимних условиях // Вестник нац. техн. ун-та «ХПИ». – 2011. – №24. – С. 86-92.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 03.09.2012