

# Оценка потенциальной эффективности многопереходного солнечного элемента при предельном балансе фотогенерированных токов

© М.А. Минтаиров<sup>†</sup>, В.В. Евстропов, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 30 сентября 2014 г. Принята к печати 20 октября 2014 г.)

Предложен способ оценки потенциальной эффективности, которую можно достичь в исходно-несбалансированном многопереходном солнечном элементе, если осуществлять взаимное сближение фотогенерированных токов: отбирать этот ток от относительно-узкозонного элемента и добавлять его в относительно-широкозонный. Уже известно, что свойствами, благоприятствующими взаимному сближению, обладают такие объекты, как связанные экситоны, квантовые точки, донорно-акцепторные пары и др., расположенные в относительно-широкозонных элементах. Предложенный способ сводится по факту к задаче получения такой требуемой световой вольт-амперной (IV) характеристики, которая соответствует равенству всех фотогенерированных токов в режиме короткого замыкания. Использовано два метода получения требуемой световой IV характеристики. Первый — подбор спектрального состава излучения, падающего на многопереходный солнечный элемент от осветителя. Вторым — двойной сдвиг темновой IV характеристики: токовый на  $J_g$  (единный задаваемый фотогенерированный ток) и вольтовый на  $(-J_g \cdot R_s)$ , где  $R_s$  — последовательное сопротивление. Для световой и темновой IV характеристик выведено общее аналитическое выражение, учитывающее влияние так называемой люминесцентной связи в многопереходных солнечных элементах. Сделано сравнение экспериментальных IV характеристик с расчетными для трехпереходного InGaP/GaAs/Ge солнечного элемента, имеющего  $R_s = 0.019 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  и максимальную фактическую эффективность 36.9%. Оценена его максимальная потенциальная эффективность 41.2%.

## 1. Введение

Повышение эффективности (кпд) солнечных элементов, как известно, — постоянная цель полупроводниковой фотовольтаики. Один из признанных путей к этой цели — увеличение числа субэлементов многопереходного (МП) солнечного элемента (СЭ). Между тем уже созданные трехпереходные InGaP/Ga(In)As/Ge СЭ имеют неиспользованный потенциал увеличения эффективности. В этих СЭ фотогенерированный (ФГ) ток нижнего (Ge) субэлемента значительно (в  $\sim 1.5$  раза) превышает ФГ токи среднего (GaAs) и верхнего (GaInP) субэлементов, что приводит к рекомбинационным потерям в нижнем субэлементе.

Рекомбинационные потери можно уменьшить, если, например, каким-либо образом получить в запрещенной зоне относительно-широкозонного субэлемента скоррелированную пару уровней, способную поглотить фотоны и затем термически эмиттировать (забрасывать) в разрешенные зоны свободные электроны и дырки, увеличивая тем самым фотогенерированный ток. Из-за этого поглощения будет уменьшаться поток фотонов в относительно узкозонный (обладающим избытком ФГ тока) субэлемент, тем самым уменьшая в нем ФГ ток. Таким образом будет осуществляться взаимное сближение ФГ токов двух соседних субэлементов. При наилучшем (для эффективности) предельном варианте взаимного сближения конечный единый ФГ ток равен

среднему арифметическому исходных ФГ токов. Нужная скоррелированная пара уровней в запрещенной зоне возникает, как известно, от наличия связанного экситона, квантовой точки [1,2] и других материальных объектов экситонного типа (двухуровневых систем с экситонным характером поведения). Отметим, что взаимное сближение ФГ токов дает нужный результат (уменьшение рекомбинационных потерь и соответственно повышение эффективности МП СЭ) независимо от способа исполнения этого сближения. Отмеченная независимость использована в настоящей работе, где сближение моделировалось экспериментально путем подбора спектрального состава излучения, падающего на МП СЭ от спектрально-регулируемого осветителя.

Цели работы предложить способ оценки потенциальной эффективности (кпд), которая может быть достигнута, если осуществить взаимное сближение ФГ токов за счет образования в субэлементах объектов экситонного типа; применить способ на примере типичного InGaP/GaAs/Ge СЭ, который, как известно, не сбалансирован по ФГ токам при солнечном освещении.

Способ, предложенный в работе, основан на использовании темновой вольт-амперной (IV) характеристики, которая после соответствующего сдвига (параллельных переносов темновой IV характеристики вдоль осей токов и напряжений, разд. 4.2.) дает световую IV характеристику в предельном случае сближения ФГ токов субэлементов. Дано аналитическое обоснование предложенного способа, при этом учтено влияние так называемой люми-

<sup>†</sup> E-mail: mamint@mail.ioffe.ru

несцентной связи между субэлементами на их ФГ токи. Предложена процедура экспериментального получения световых IV характеристик МП СЭ, соответствующих наилучшему варианту взаимного сближения ФГ токов. В работе проведено моделирование экспериментальных IV характеристик: темновой, набора световых (для спектра AM1.5D) и набора сбалансированных в режиме короткого замыкания по ФГ току. На примере рассмотренного трехпереходного GaInP/GaAs/Ge СЭ, имеющего  $R_s = 0.019 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  и максимальную фактическую эффективность 36.9% показано, что наилучший вариант взаимного сближения ФГ токов может повысить эффективность на 4.4% абс. (для спектра AM1.5D).

## 2. Аналитическая IV характеристика МП СЭ с учетом люминесцентной связи

На рис. 1 приведена эквивалентная схема МП СЭ. Согласно этой схеме, для любого фотовольтаического  $p-n$ -перехода ток состоит из двух компонент:

$$J_{pn} = J_{0d} \left( e^{\frac{V_{pn}}{kT/q}} - 1 \right) + J_{0r} \left( e^{\frac{V_{pn}}{2kT/q}} - 1 \right). \quad (1)$$

Это квадратное уравнение относительно  $e^{\frac{V_{pn}}{2kT/q}}$ , решая которое получим [3]:

$$V_{pn} = 2kT/q \cdot \ln \frac{\sqrt{J_{0r}^2 + 4J_{0d}(J_{pn} + J_{0r} + J_{0d})} - J_{0r}}{2J_{0d}}. \quad (2)$$

При освещении  $J_{pn} = J_g - J$ , где  $J_g = J_{gE} + J_{gL}$ ,  $J_{gE}$  — фотогенерированный ток, индуцированный внешним освещением;  $J_{gL}$  — ток, индуцированный люминесценцией;  $J$  — ток во внешней цепи (рис. 1).

При наличии люминесцентной связи имеем

$$J_{gL,i+1} = \gamma_i \cdot J_{pn,i}, \quad (3)$$

где  $i = 1 \dots N$  — индекс субэлемента,  $N$  — число субэлементов,  $\gamma_i = f(J_{pn,i})$  — результативность связи [4].

Применяя эту связь (3), можно получить  $J_{pn}$  для любого  $p-n$ -перехода и, следовательно, его IV характеристику (2). Отметим, что вид (2) в сочетании с (3) позволяет упростить расчет этой характеристики за счет использования процедуры цикла. Сложение напряжений (2) всех  $p-n$ -переходов дает безрезистивную IV характеристику МП СЭ. Для учета резистивности к полученной сумме надо добавить слагаемое  $V_r$ , которое для прикладных режимов работы можно аппроксимировать линейной функцией от тока [5]:

$$V_r = J \cdot R_s. \quad (4)$$

Отметим частный случай работы СЭ, при котором все ФГ токи, индуцированные внешним освещением ( $J_{gE,i}$ ),

равны между собой. В дальнейшем такой режим, как и соответствующая IV характеристика, будут называться сбалансированными. Именно такой режим достигается в результате вышеупомянутого взаимного сближения ФГ токов субэлементов, что дает, за счет уменьшения рекомбинационных потерь, повышение эффективности.

## 3. Сдвиговая связь между темновой и сбалансированной световой IV характеристиками

В темновом режиме все ФГ токи, индуцированные внешним освещением, равны нулю ( $J_{gE,i} = 0$ ,  $i = 1 \dots N$ ), что является частным случаем сбалансированной IV характеристики. Из рис. 1 видно, что если ввести ненулевые равные между собой  $J_{gE}$  токи ( $J_{gE,i} = J_{gE}$ ,  $i = 1 \dots N$ ), то получим световую сбалансированную характеристику. В безрезистивном случае это соответствует положительному токовому сдвигу темновой IV характеристики на величину  $J_{gE}$ . В случае линейного последовательного сопротивления следует делать дополнительный отрицательный вольтовый сдвиг на величину  $(-J_{gE} \cdot R_s)$ . Такая сдвиговая связь между темновой и сбалансированной световой IV характеристиками является очевидной при отсутствии люминесценции ( $J_{gL,i} = 0$ ,  $i = 1 \dots N$ ). В этом случае световая, как и темновая, IV характеристики МП СЭ состоят из

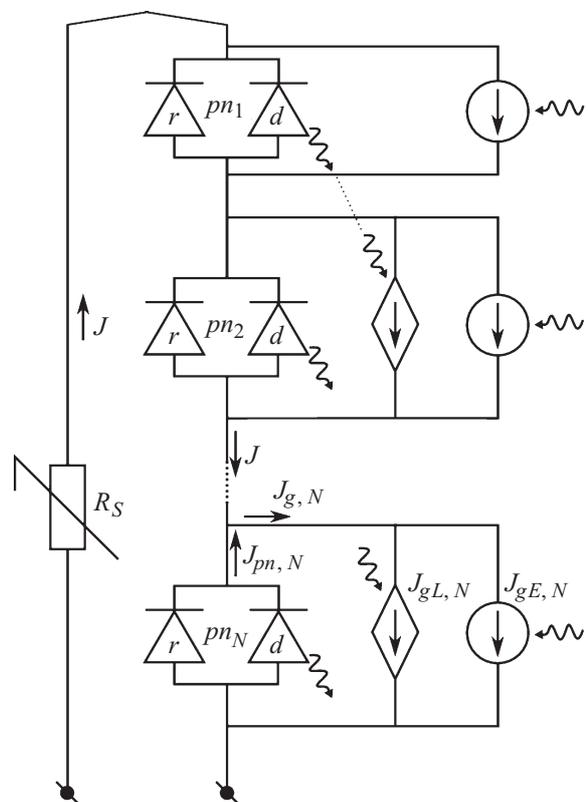


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема МП СЭ с учетом фотогенерированных токов, наведенных люминесценцией  $J_{gL}$ .

суммы сегментов и могут быть представлены следующими выражениями [5,6]:

$$J_{\text{light}} = J_g - \sum_s J_{0,s} \left( e^{\frac{V_{\text{light}} + J_{\text{light}} \cdot R_s}{A_s kT/q}} - 1 \right), \quad (5a)$$

$$J_{\text{dark}} = - \sum_s J_{0,s} \left( e^{\frac{V_{\text{dark}} + J_{\text{dark}} \cdot R_s}{A_s kT/q}} - 1 \right), \quad (5b)$$

где  $J_g$  — единый ФГ ток при балансе,  $i$  — индекс субэлемента,  $N$  — количество субэлементов,  $A_s = \sum_{i=1}^N A_{i,s}$  —

коэффициент идеальности сегмента,  $J_{0,s} = \sqrt{A_s \prod_{i=1}^N J_{0,i,s}^{A_{i,s}}}$  —

предэкспоненциальный ток сегмента,  $s$  — идентификатор сегмента,  $A_{i,s}$  и  $J_{0,i,s}$  — значения коэффициентов идеальности и предэкспоненциальных множителей субэлемента  $i$  для сегмента  $s$ . В данной работе, располагаясь при  $A_{i,s}$  и  $J_{0,i,s}$ , и учитывая соседний индекс  $i$ , идентификатор  $s$  преобразуется в индекс  $d$  или  $r$ . Следовательно, он указывает на доминирующий механизм протекания тока ( $d$  — диффузионный или  $r$  — рекомбинационный, рис. 1) в субэlemente с индексом  $i$ . Уравнения (5a) и (5b) связаны, так из (5b) можно получить (5a), произведя замену пары темновых переменных  $J_{\text{dark}}$ ,  $V_{\text{dark}}$  на пару световых  $J_{\text{light}}$ ,  $V_{\text{light}}$ :

$$\begin{cases} J_{\text{light}} = J_{\text{dark}} + J_g \\ V_{\text{light}} = V_{\text{dark}} - J_g \cdot R_s. \end{cases} \quad (6)$$

Справедливость замены (6) легко проверить, например, подставив (6) в (5a) и получив (5b). Таким образом, выполняя, согласно (6), двойной сдвиг темновой IV характеристики, можно получить сбалансированную световую. Эта операция используется в работе, при этом предполагается, что процедура сдвига темновой IV характеристики остается в основном справедливой и при учете люминесценции. Это предположение было проверено экспериментально (разд. 4.2, 4.3).

## 4. Экспериментальное получение и моделирование IV характеристики, сбалансированной в режиме короткого замыкания

### 4.1. Объект и методика исследования

В данной работе для создания различных режимов баланса ФГ токов использовались та же методика, установка и тот же трехпереходный GaInP/GaAs/Ge СЭ, что и в работе [4]. При численном моделировании на базе формулы (2) принимались следующие значения: линейное последовательное сопротивление  $R_s = 0.019 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  (определялось при помощи методики [5]), результативность связи 0.07 для пары GaInP/GaAs и 0.5 для пары GaAs/Ge; ФГ токи, индуцированные внешним освещением, для реалистичного случая

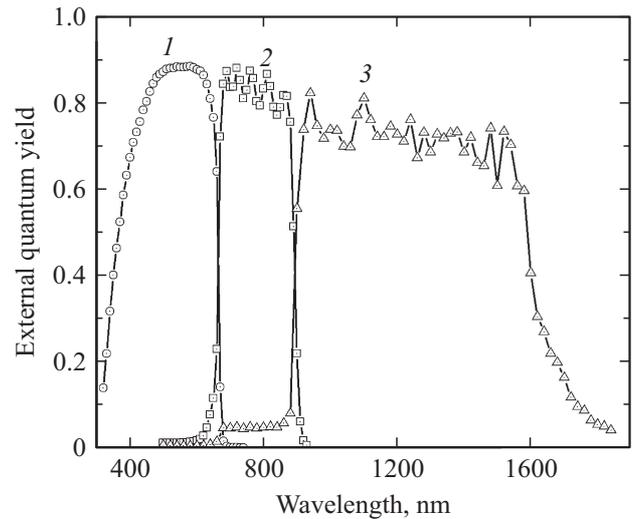


Рис. 2. Спектральная зависимость внешнего квантового выхода для субэлементов исследуемого GaInP/GaAs/Ge СЭ: 1 — GaInP, 2 — GaAs, 3 — Ge.

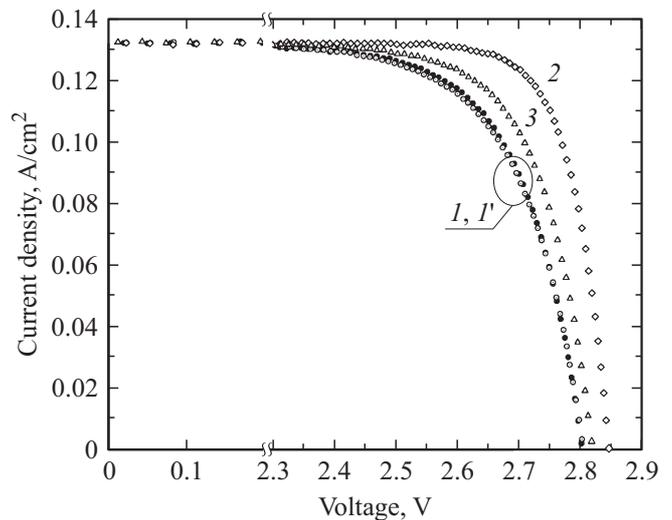


Рис. 3. IV характеристики: 1 — экспериментальная световая кривая, полностью сбалансированная подбором спектрального состава излучения (пустые круги), 1' — сконструированная световая кривая (темные круги), которая получена двойным сдвигом экспериментальной темновой IV характеристики и совпадает с кривой 1; 2 и 3 — экспериментальные световые кривые, не полностью сбалансированные по ФГ токам субэлементов.

(AM1.5D) получены из рис. 2:  $J_{gE, \text{GaInP}} = 14.0 \text{ mA/cm}^2$ ,  $J_{gE, \text{GaAs}} = 13.43 \text{ mA/cm}^2$ ,  $J_{gE, \text{Ge}} = 19.3 \text{ mA/cm}^2$ .

### 4.2. Световая IV характеристика, сбалансированная в режиме короткого замыкания

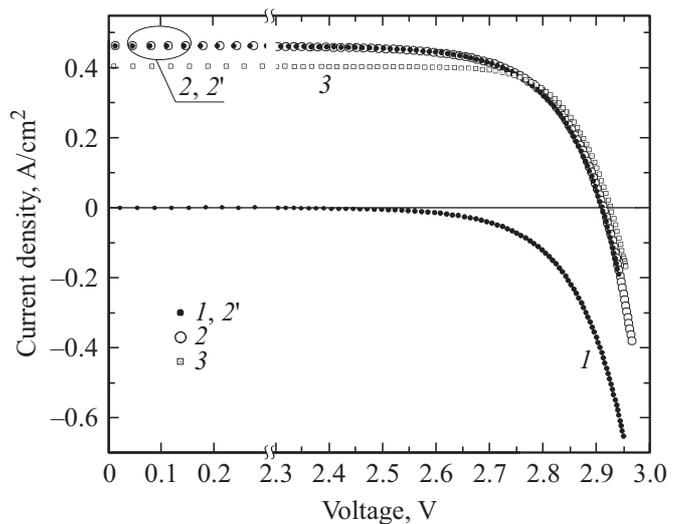
Сдвиговая связь (6) между темновой и сбалансированной IV характеристикой была экспериментально проверена. На рис. 3 приведен набор световых IV характе-

ристик (кривые 1, 2, 3), имеющих одинаковую величину токов короткого замыкания ( $\sim 132 \pm 1 \text{ mA/cm}^2$ ), и темновая IV характеристика, сдвинутая по току на указанную величину (кривая 1'). Значение тока короткого замыкания было выбрано по следующим соображениям. С одной стороны, такой ток достаточно мал, так что влияние последовательного сопротивления на IV характеристику практически не сказывается. С другой стороны, он достаточно велик, поэтому вклад туннельного тока в общий ток пренебрежимо мал. Световые IV характеристики отличались друг от друга соотношениями наведенных внешним освещением ФГ токов. Варьирование этих соотношений производилось до тех пор пока не достигалась предельная экспериментальная IV характеристика, характеризуемая минимальными значениями  $V_{oc}$  (рис. 3, кривая 1), так как  $V_{oc}$  достигает минимального значения при равенстве ФГ токов субэлементов в режиме короткого замыкания. Именно такая предельная характеристика и является сбалансированной характеристикой. Она же получена путем сдвига темновой IV характеристики (рис. 3, кривая 1').

#### 4.3. Сопоставление сбалансированной и реалистичной световых IV характеристик

Сопоставление основано на возможности повышения эффективности несбалансированного МП СЭ путем взаимного сближения ФГ токов его субэлементов. Действительно, увеличение поглощения в субэлементе и, следовательно, увеличение его ФГ тока, индуцированного внешним освещением, может повлечь уменьшение ФГ тока в следующем субэлементе, при этом, в наилучшем случае, сумма этих двух изменяющихся ФГ токов сохраняется. Под наилучшим случаем подразумевается, что фотон поглотится либо в одном, либо в другом субэлементе, т.е. приращение (убыль) ФГ тока в одном из субэлементов равно убыли (приращению) в другом. В предельном случае взаимного сближения ФГ токов субэлементов возникает их равенство, что соответствует наибольшей (за счет достижения предельного баланса ФГ токов) эффективности МП СЭ. Как было отмечено выше, существует несколько путей осуществления взаимного сближения, например, внедрение объектов, проявляющих экситонный характер поведения (квантовые точки [1,2], донорно-акцепторные пары, связанные экситоны и др.).

На рис. 4 сопоставлены характеристики трехпереходного InGaP/GaAs/Ge СЭ: кривая 3 — экспериментальная несбалансированная IV характеристика при спектре AM1.5D, кривая 2 — экспериментальная сбалансированная, полученная методом варьирования соотношений ФГ токов, наведенных внешним освещением. Сконструированная сбалансированная (рис. 4, кривая 2') IV характеристика получена путем двойного сдвига (по току и напряжению, см. разд. 3) темновой IV характеристики (рис. 4, кривая 1). При этом ток короткого замыкания для экспериментальной сбалансированной (рис. 4,



**Рис. 4.** Сопоставление темновой IV характеристики со световыми: 1 — экспериментальная темновая (темные круги), 2 — экспериментальная световая кривая, которая сбалансирована подбором спектрального состава излучения (пустые круги), 2' — сконструированная световая кривая (темные круги), которая получена двойным сдвигом экспериментальной кривой 1 и совпадает с кривой 2, 3 — экспериментальная световая несбалансированная (спектр AM1.5D, кратность концентрации  $X=30$ ) кривая (квадраты).

кривая 2) и сдвинутой темной IV характеристики (рис. 4, кривая 2') задавался как среднее арифметическое исходных (до достижения баланса) ФГ токов субэлементов. Это соответствует случаю их предельного взаимного сближения (до равенства). Из рис. 4 видно, каким образом перераспределение ФГ токов, при сохранении их суммы, влияет на IV характеристику: ток короткого замыкания растет, а напряжение холостого хода падает. При этом относительный рост тока короткого замыкания больше соответствующего падения напряжения холостого хода.

Стоит отметить, что предположение, сделанное в разд. 3, о том, что сдвиг темновой IV характеристики справедлив и при учете люминесцентной связи [4], оправдалось. При этом достоинством способа основанного на сдвиге темновой IV характеристики, является возможность сконструировать сбалансированную IV характеристику, избегая использования значительно более сложной продолжительной экспериментальной процедуры (разд. 4.2). При этом стоит упомянуть, что вольтовый сдвиг темновой IV характеристики основан на том, что резистивность аппроксимируется фиксированным последовательным сопротивлением  $R_s$ . Отметим, что для оценки влияния баланса ФГ токов на эффективность МП СЭ предпочтительнее использовать сдвинутую темновую IV характеристику, поскольку такая оценка остается справедливой вплоть до кратностей концентрации солнечного излучения, при которых достигается максимум КПД СЭ [5].

#### 4.4. Оценка потенциальной эффективности МП СЭ

Для оценки влияния баланса ФГ токов на эффективность, как и в разд. 4.2, сопоставлялась экспериментальная световая IV характеристика (рис. 5, кривая 1) со сдвинутой темновой IV характеристикой (рис. 5, кривая 2). Сопоставление производилось при такой кратности концентрирования солнечного излучения, при которой достигался максимум эффективности рассмат-

Результаты подбора параметров (предэкспоненциальных токов) при численном расчете характеристик трехпереходного СЭ

	GaInP	GaAs	Ge
$J_{0d}, \text{A/cm}^2 (A_d = 1)$	$9.5 \cdot 10^{-27}$	$1.05 \cdot 10^{-20}$	$1.8 \cdot 10^{-6}$
$J_{0r}, \text{A/cm}^2 (A_r = 2)$	$8.0 \cdot 10^{-15}$	$1.85 \cdot 10^{-11}$	—

риваемого трехпереходного СЭ. Кроме того, эти же характеристики были определены численным методом, используя уравнения разд. 2 (рис. 5, кривые 1', 2', 2'').

Численный метод опирался на экспериментальные данные, полученные при измерении световых IV характеристик СЭ при различных кратностях концентрирования излучения для спектра AM1.5D и при спектре, дающем режим баланса, а также на темновую IV характеристику (рис. 6, кривые 1). Анализируются зависимости  $V_{oc}(J_{sc})$  (рис. 6, кривые 3) и  $\eta(J_{sc})$  (рис. 6, кривые 2). При реализации численного метода приведенные в разд. 4.1 параметры были фиксированы, а пять предэкспонент для уравнений (1) и (2) подбирались. Результат подбора приведен в таблице.

На рис. 6 приведены экспериментальные и расчетные зависимости  $V_{\text{dark}}(J_{\text{dark}})$ ,  $\eta(J_{sc})$  и  $V_{oc}(J_{sc})$ . Отметим, что наблюдаются отклонения экспериментальных точек от расчетных кривых. Для темновой IV характеристики, при малых токах (менее  $0.02 \text{ A/cm}^2$ ), отклонение, возможно, обусловлено туннельными токами (рис. 6, кривые 1). Стоит отметить, что лучшее совпадение расчетной кривой с экспериментальными точкам для резистивной части темновой IV характеристики (более  $0.5 \text{ A/cm}^2$ ) было достигнуто при меньшем  $R_s$ , чем приведенном в разд. 4.1. Это, возможно, вызвано нелинейностью  $R_s$ . При токах, больших  $4 \text{ A/cm}^2$ , расхождение  $\eta(J_{sc})$  зависимостей обусловлено нелинейностью последовательного сопротивления (рис. 6, кривые 2), а для  $V_{oc}(J_{sc})$  расхождение может быть вызвано влиянием противодействующей эдс (рис. 6, кривые 3). В остальных участках, в том числе вплоть до максимума КПД, расчетные кривые хорошо совпадают с экспериментальными.

На рис. 5 показано влияние взаимного сближения ФГ токов субэлементов на эффективность рассматриваемого СЭ. Расчет сбалансированной IV характеристики произведен для двух случаев: единое  $R_s$  для прямого и обратного направлений тока (рис. 5, штриховая линия 2') и разное  $R_s$  для этих направлений (рис. 5, сплошная линия 2''). Отметим, что точка максимальной мощности ( $P_{\text{mpp}}$ , рис. 5) при обоих способах расчета не меняется. Поэтому для оценки влияния баланса на эффективность МП СЭ можно пользоваться более простым случаем — единое  $R_s$  для двух направлений тока. При использовании методологии взаимного сближения ФГ токов возможно получение прироста в  $\sim 4\%$  абс. по КПД для типичного GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ с 36.9% до 41.2%.

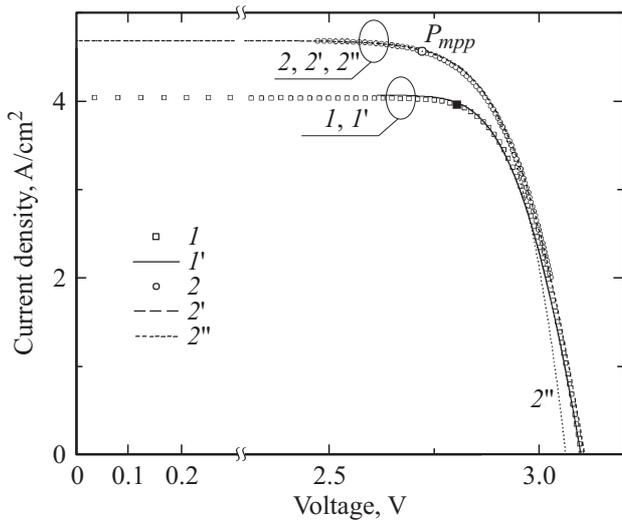


Рис. 5. Экспериментальные (символы) и расчетные (линии) IV характеристики для кратности солнечного излучения ( $X = 300$ ), при которой наблюдался максимум эффективности. Две реалистичные (AM1.5D) несбалансированные кривые: 1 — эксперимент, 1' — расчет. Три сбалансированные кривые: 2 — полученная двойным сдвигом экспериментальной темновой, 2' — расчет с использованием одного сопротивления, 2'' — расчет с использованием двух сопротивлений.

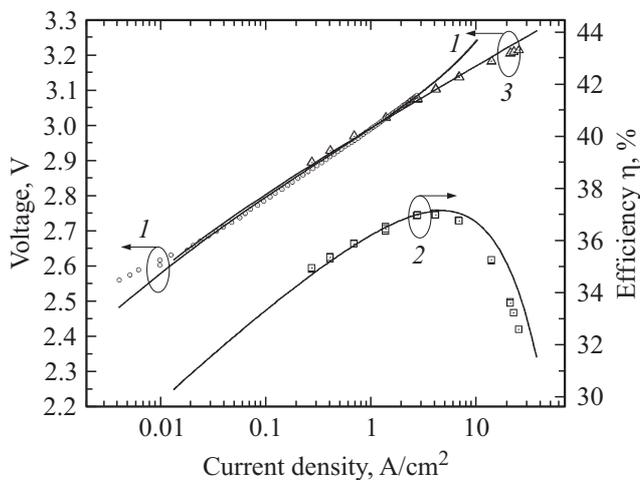


Рис. 6. Сравнение экспериментальных (символы) и расчетных (линии) зависимостей: 1 — темновые IV характеристики,  $V_{\text{dark}}(J_{\text{dark}})$ , 2 — зависимости эффективности от тока короткого замыкания  $\eta(J_{sc})$ , 3 — зависимость напряжения холостого хода от тока короткого замыкания  $V_{oc}(J_{sc})$ .

## 5. Заключение

Многопереходный солнечный элемент, несбалансированный по фотогенерированным токам субэлементов при солнечном освещении, имеет, как известно, рекомбинационные потери. Типичным примером является трехпереходный InGaP/GaAs/Ge солнечный элемент.

Рассмотрена возможность повышения его эффективности (кпд) путем взаимного сближения фотогенерированных токов: путем увеличения их в относительно-широкозонных субэлементах за счет отбирания их из относительно-узкозонного субэлемента, причем желательно с сохранением суммы этих токов. В наилучшем варианте такого взаимного и сохраняющего сумму сближения конечный единый фотогенерированный ток равен среднему арифметическому исходных фотогенерированных токов.

Один из известных практических путей такого сближения — это введение в относительно-широкозонные субэлементы таких материальных объектов, которые проявляют экситонный характер поведения. Это, например, связанные экситоны, квантовые точки [1,2], донорно-акцепторные пары и др.

В работе решалась задача разработки способа оценки предельной эффективности, которую можно достичь осуществляя взаимное сближение фотогенерированных токов. Эта задача тесно связана и в конечном итоге сводится к задаче получения так называемой сбалансированной световой IV характеристики, т.е. такой кривой, для получения которой необходимо обеспечить равенство (баланс) всех фотогенерированных токов в режиме короткого замыкания. Использовано два способа получения требуемой сбалансированной световой IV характеристики и показано, что предпочтение должно быть отдано способу, базирующемуся на сдвиге темновой IV характеристики. В частности по тому, что он менее трудоемкий.

Этот способ основан на возможности получения требуемых сбалансированных IV характеристик при помощи двойного (диагонального) сдвига темновой IV характеристики: токового сдвига на  $J_g$  и вольтового на  $(-J_g \cdot R_s)$ . Способ обоснован аналитически с учетом влияния люминесцентной связи. Он также проверен экспериментально. Для этого при помощи подбора спектрального состава падающего излучения от спектрально-регулируемого осветителя были получены сбалансированные IV характеристики. Кривые, полученные экспериментально, совпадали с характеристиками, полученными предлагаемым способом.

Рассмотрен трехпереходный InGaP/GaAs/Ge солнечный элемент, имеющий  $R_s = 0.019 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  и максимальную фактическую эффективность 36.9%. При помощи разработанного способа и при помощи теоретического расчета была оценена его потенциальная максимальная эффективность 41.2%.

Работа выполнена при поддержке Российского научно-го фонда, соглашение № 14-29-00178.

## Список литературы

- [1] С.А. Блохин, А.В. Сахаров, А.М. Надточий, А.С. Паюсов, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, В.М. Лантратов, С.А. Минтаиров, Н.А. Калюжный, М.З. Шварц. ФТП, **43** (4), 537(2009).
- [2] C.G. Bailey, D.V. Forbes, S.J. Polly, Z.S. Bittner, Y. Dai, C. Mackos, R.P. Raffaele, S.M. Hubbard. IEEE J. PV, **2** (3), 269 (2012).
- [3] Daniel J. Friedman, John F. Geisz, Myles A. Steiner. IEEE J. PV, **3** (4), 1429 (2013).
- [4] M.Z. Shvarts, M.A. Mintairov, V.M. Emelyanov, V.V. Evstropov, V.M. Lantratov, N.Kh. Timoshina. AIP Conf. Proc. 9th Int. Conf. Concentrator Photovolt. Systems (Miyazaki, Japan, 2013) v. 1556, p. 147.
- [5] М.А. Минтаиров, В.В. Евструпов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Лантратов. ФТП, **46** (8), 1074 (2012).
- [6] V.S. Kalinovskiy, V.V. Evstropov, V.M. Lantratov, P.V. Pokrovskiy, V.M. Andreev. Proc. 25th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf. (Valencia, Spain, Sept. 6–10, 2010) p. 979.

Редактор А.Н. Смирнов

### Multijunction solar cells potential efficiency estimation at a limiting balance of the photogenerated currents

M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, N.Kh. Timoshina, N.A. Kalyuzhnyy

Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** A procedure is proposed for estimating a potential efficiency, which can be achieved in initially imbalanced multijunction solar cell by mutual convergence of the photogenerated currents: to take-off photogenerated current from a relatively-narrowband cell and to add it to a relatively-wideband one. It is already known that the properties, which favour equalizing, inherent to such objects as bound excitons, quantum dots, donor-acceptor pairs and others located in relatively-wideband cells. The proposed procedure is reduced, as a fact, to problem of obtaining such a required light IV characteristic, which corresponds to the equality of all photogenerated currents in the short circuit mode. Two methods for obtaining the required light IV characteristic were used. The first one is adjustment of spectral irradiation on a multijunction solar cell. The second one—a double shift of the dark IV characteristic: a current shift  $J_g$  (common photogenerated current) and a voltage one  $(-J_g \cdot R_s)$ , where  $R_s$  is the series resistance. For the dark and light IV characteristic a general analytical expression allowing for the effect of so called luminescent coupling in multijunction solar cells has been deduced. A comparison of the experimental IV characteristics with the rated ones for a triple-junction InGaP/GaAs/Ge solar cell, which has  $R_s = 0.019 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}^2$  and the maximum factual efficiency of 36.9%, has been carried out. Its maximum potential efficiency 41.2% has been obtained.