

Разностный способ получения темновой вольт-амперной характеристики и ее виды для остаточной (негенерирующей) части многопереходного солнечного элемента

© М.А. Минтаиров[†], В.В. Евстропов, Н.А. Калужный, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, Н.Х. Тимошина, Р.А. Салий, В.М. Лантратов

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

(Получена 23 сентября 2013 г. Принята к печати 22 октября 2013 г.)

Работа посвящена фундаментальным потерям в негенерирующей (остаточной) части многопереходных солнечных элементов. Предложен и обоснован метод определения вольт-амперной характеристики остаточной части солнечных элементов. Метод является обобщением метода, пригодного для однопереходных фотоэлектрических преобразователей. В работе произведен учет дисбаланса сфотогенерированных токов и люминесцентной связи между субэлементами, что позволяет использовать предлагаемый метод и для многопереходных солнечных элементов. Метод применен к однопереходным (InGaP, GaAs, Ge) и трехпереходным солнечным элементам (InGaP/GaAs/Ge). Выявлено два вида вольт-амперных характеристик $J(V)$, для которых установлены эмпирические законы. Первый вид отличается монотонной сверхлинейностью $J \propto V^n$, $n \approx 1.3-1.4$, и обусловлен сопротивлением растекания, второй вид наблюдался только в трехпереходных солнечных элементах и характеризуется двухэкспоненциальной зависимостью с наличием сублинейности на начальном участке, $J \propto [e^{(V/E_1)} - e^{(-V/E_2)}]$, $E_1 \approx 0.35\text{В}$, $E_2 \approx 0.15-0.30\text{В}$. В результате удалось установить, что токопрохождение в остаточной части многопереходных солнечных элементов лимитируется не только сопротивлением растекания, но и другими факторами, например, изотипными гетероинтерфейсами.

1. Введение

В фотоэлектрических фотопреобразователях (ФЭП), например, в солнечных элементах (СЭ), различают несколько видов фундаментальных потерь, снижающих эффективность (кпд) преобразования энергии. В генерирующей части прибора — это термализационные и рекомбинационные потери. В сильно токовых (концентраторных) режимах эффективность начинает лимитироваться потерями, обусловленными протеканием тока через негенерирующую (остаточную) часть. Так как концентраторные СЭ в настоящее время рассматриваются как наиболее перспективное направление развития ФЭП, определение величин, свойств, природы и путей снижения „остаточных“ фундаментальных потерь является актуальной задачей фотовольтаики.

В однопереходных (ОП) СЭ эти „остаточные“ потери сводятся к омическим потерям на последовательном сопротивлении растекания, которое обусловлено растеканием тока в эмиттере. Следует отметить, что это сопротивление растекания нелинейное и управляется сфотогенерируемым током [1,2], т.е. описывается семейством нелинейных характеристик ток–напряжение, в котором параметром семейства является сфотогенерированный ток [3–5].

Однако в данной работе показано, что в монолитных многопереходных (МП) СЭ потери в их остаточной (негенерирующей) части не ограничиваются омическими потерями, обусловленными растеканием тока в эмиттере верхнего (наиболее широкозонного) субэлемента. Это было выяснено в результате анализа

формы темновой вольт-амперной характеристики остаточной части монолитных МП СЭ. Эта часть есть набор нескольких участков. В набор входят: во-первых, участки между фотовольтаическими (ФВ) $p-n$ -переходами, где, в частности, расположены также туннельные p^+-n^+ -переходы; во-вторых, участок между верхним (наиболее широкозонным) ФВ $p-n$ -переходом и контактной сеткой, где основной вклад дает сопротивление растекания; в-третьих, включающий подложку участок между нижним (самым узкозонным) ФВ $p-n$ -переходом и нижним контактом, где также может быть расположен брэгговский отражатель. Следует отметить, что каждый участок, в свою очередь, может состоять из звеньев, в том числе проявляющих фотовольтаический эффект. Так, например, в трехпереходном СЭ InGaP/GaAs/Ge остаточная часть состоит из четырех участков, внутри двух из которых могут быть фотовольтаические звенья (например, фоточувствительные туннельные диоды).

Стоит отметить, что в монолитных МП СЭ непосредственно измеряемая полная темновая вольт-амперная характеристика не является истинно темновой, как и „остаточная“. Действительно, в процессе измерений и работы ФВ $p-n$ -переходы люминесцируют [6], так как через них протекает прямой (внутренний) ток, имеющий диффузионную, рекомбинационную и туннельную компоненты [7]. В результате люминесценция широкозонного ФВ $p-n$ -перехода добавляется к внешнему освещению узкозонного ФВ $p-n$ -перехода и, следовательно, искажает вольт-амперную характеристику, в том числе темновую. Этот эффект в большей степени проявляется на паре ФВ $p-n$ -переходов GaAs–Ge [6]. Поэтому следует отличать безлюминесцентную вольт-амперную характеристику (в том числе темновую), которая явля-

[†] E-mail: mamint@mail.ioffe.ru

ется истинной, но ненаблюдаемой в монолитном многопереходном солнечном элементе, от люминесцентной, которая и измеряется непосредственно в эксперименте.

Проанализированная далее „остаточная“ темновая вольт-амперная характеристика выделена из полной темновой вольт-амперной характеристики разностным методом, применяемым для ОП СЭ [7] и обобщенным в данной работе на реалистичные дисбалансные (т.е. не сбалансированные по фотогенерированному току субэлементов) МП СЭ.

Цели настоящей работы:

- изложить и обобщить на дисбалансные МП СЭ разностный способ выделения „остаточной“ темновой вольт-амперной характеристики из полной темновой вольт-амперной характеристики прибора;
- получить экспериментально эти „остаточные“ характеристики для ОП ФЭП (InGaP, GaAs, Ge) и трехпереходных СЭ InGaP/GaAs/Ge;
- определить форму остаточных характеристик, найти для них эмпирические формулы и обсудить связь формы с механизмом токопрохождения в остаточной (негенерирующей) части СЭ;
- обсудить происхождение и соотношение этих механизмов.

2. Эквивалентная электрическая схема — обоснование

Обобщенный метод и метод-прототип базируются на эквивалентной электрической схеме, состоящей из двух последовательно соединенных частей — генерирующей и остаточной (негенерирующей), где каждая часть состоит из сосредоточенных элементов. Метод-прототип имеет область применения, ограниченную однопереходными (ОП) солнечными элементами, а также такими МП СЭ, в которых, во-первых, сбалансированы фотогенерированные токи и, во-вторых, допустимо пренебречь токами, наведенными электролюминесценцией [6], как, например, в немонолитных (механически состыкованных) МП СЭ. Метод-прототип является составной частью обобщенного метода и включен в описание последнего как его начальный этап (см. далее).

Для нашей цели МП СЭ удобно представить как набор участков различного вида.

Имеется участок, включающий широкозонное окно, эмиттер и верхний (наиболее широкозонный) фотовольтаический $p-n$ -переход. Он представлен на эквивалентной электрической схеме ветвью db (рис. 1, 2). На этом участке идет процесс растекания тока, который смоделирован электрической схемой с распределенными параметрами (рис. 1, вверху): омическими (линейными) неодинаковыми сопротивлениями и одинаковыми ФВ $p-n$ -переходами. Эта электрическая схема замещена другой, содержащей сосредоточенный ФВ $p-n$ -переход (рис. 1, 2, ветвь bc) и сосредоточенное нелинейное сопротивление (рис. 1, 2, ветвь cd), соединенные последовательно (рис. 1, внизу). Такое нелинейное сопротивление имеет сверхлинейную темновую вольт-амперную

характеристику [3,6] в пропускном для МП СЭ направлении. Такая замена необходима для обоснования данного метода, базирующегося на последовательно соединенных сосредоточенных элементах цепи.

Остальные ФВ $p-n$ -переходы ($pn^2 \dots pn^N$ на рис. 2) и сопротивления сразу моделируются как сосредоточенные.

Имеется несколько участков между ФВ $p-n$ -переходами, куда в частности входят туннельные p^+-n^+ -переходы, квазинейтральные области в ФВ и туннельных $p-n$ -переходах, лицевые и тыльные барьеры и др. (рис. 2, ветвь fe).

Имеется участок между нижним (самым узкозонным) ФВ $p-n$ -переходом и нижним контактом, куда в частности входит подложка и где может быть расположен брэгговский отражатель (так же ветвь fe на рис. 2).

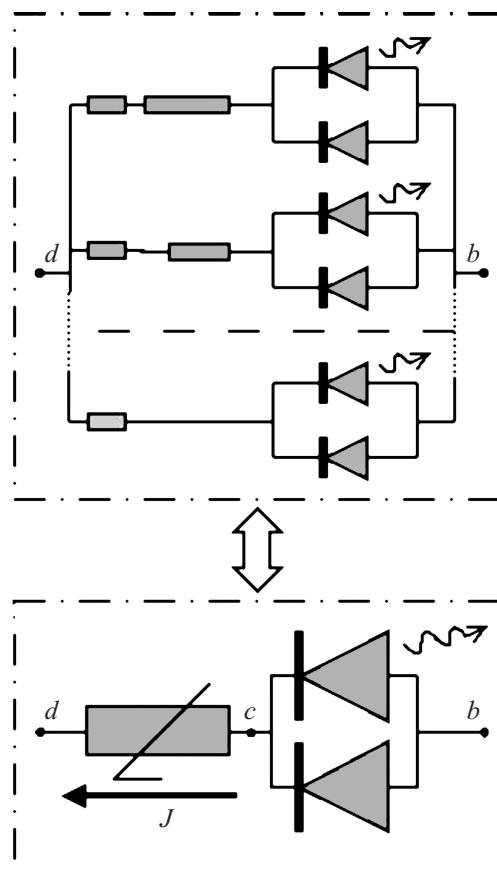


Рис. 1. Две эквивалентные электрические схемы одного и того же фрагмента МП СЭ: взаимно прилегающих эмиттера и верхнего (наиболее широкозонного) ФВ $p-n$ -перехода. Вверху: исходная (физически обоснованная) схема с распределенными параметрами — омическими (линейными) неодинаковыми сопротивлениями и одинаковыми $p-n$ -переходами с диффузионной люминесцирующей и рекомбинационной компонентами (в виде диодов). Внизу: замещающая схема с двумя сосредоточенными элементами, соединенными последовательно — нелинейным сопротивлением и двухкомпонентным (в виде двух диодов) $p-n$ -переходом. Обе схемы электрически эквивалентны. Показано действительное (темновое) направление тока J (стрелка).

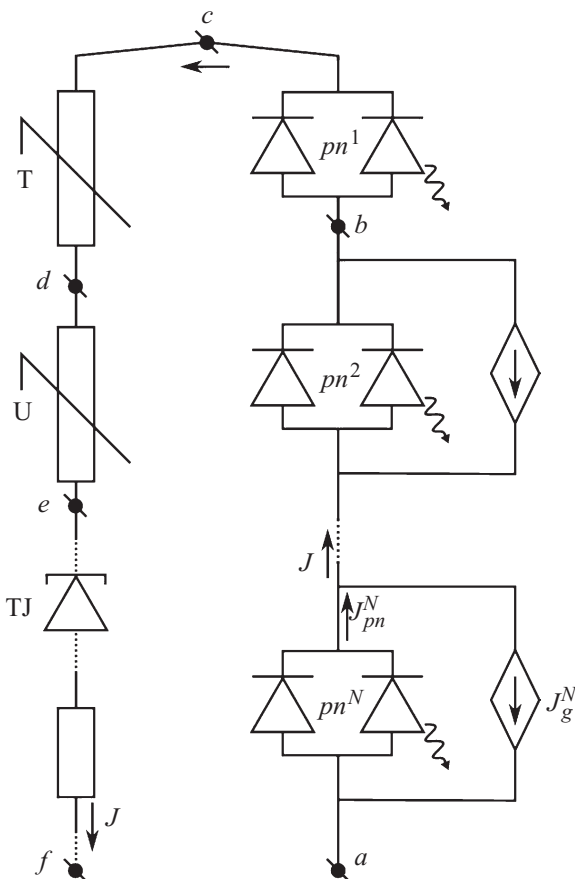


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема МП СЭ в виде двух последовательно соединенных частей: генерирующей (ветвь ac) и остаточной, негенерирующей (ветвь cf). Схема описывает так называемый условно-темновой (без внешнего освещения) режим с наведенными люминесценцией токами (J_g^N). Остаточная часть состоит из нелинейного сопротивления растекания T , другого нелинейного сопротивления U , туннельных диодов TJ и линейных сопротивлений.

Отметим, что в эквивалентную электрическую схему введена ветвь de (рис. 2), которая характеризует экспериментальные особенности полученных вольт-амперных характеристик остаточной части.

Итак, эквивалентная электрическая схема состоит из двух частей: генерирующей и остаточной. При этом генерирующая часть составлена из сосредоточенных ФВ $p-n$ -переходов, соединенных последовательно и упорядоченно, — ветвь (блок) ca на рис. 2. Остаточная (негенерирующая) часть — набор звеньев, соединенных последовательно и неупорядоченно, — ветвь fc на рис. 2, отображающих различные свойства указанных участков МП СЭ.

3. Сущность метода

Представленная в разд. 2 окончательная замещающая электрическая схема (рис. 2), является трехузловой (f, c, a) и взаимно связывает темновые вольт-амперные

характеристики трех ветвей в пропускном направлении МП СЭ для темнового режима.

Во-первых, — это вольт-амперная характеристика ветви fa (рис. 2), $V_{dev}(J)$, т.е. всего прибора в целом (кривые 2, 2' на рис. 3).

Во-вторых, — это умозрительная вольт-амперная характеристика ветви ca (рис. 2), $V_{gen}(J)$, т.е. одной только генерирующей части прибора (кривая 1, 1' на рис. 3).

В-третьих, — это также умозрительная искомая вольт-амперная характеристика ветви fc (рис. 2), $V_{res}(J)$, т.е. одной только остаточной части прибора (кривая 3* на рис. 4). Она, вследствие последовательного соединения ветвей, получается из вольтовой разности двух предыдущих характеристик.

Темновая характеристика $V_{dev}(J)$ получается непосредственным измерением темнового тока J_{dark} и темнового напряжения V_{dark} (кривая 2 на рис. 4). Характеристика $V_{gen}(J)$ конструируется из семейства экспериментальных световых вольт-амперных характеристик

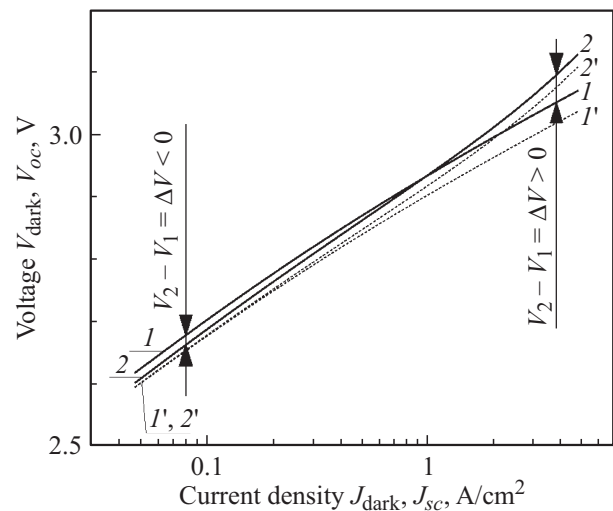


Рис. 3. Взаимное расположение расчетных характеристик МП СЭ: 1, 1' — фотовольтаические характеристики $V_{oc}(J_{sc})$, 2, 2' — темновые вольт-амперные характеристики $V_{dark}(J_{dark})$. 1, 2 — расчет при дисбалансе фотогенерируемых токов и при учете влияния электролюминесценции широкозонных $p-n$ -переходов на узкозонные $p-n$ -переходы соответственно; 1', 2' — расчет при балансе и без вышеупомянутого учета электролюминесценции соответственно. Семейство световых вольт-амперных характеристик, использованное для построения $V_{oc}(J_{sc})$ и включающее в себя темновую $V_{dev}(J)$ как частный случай, рассчитано по эквивалентной электрической схеме (рис. 2), в которую добавлены фотогенерированные токи от внешних осветителей и в которой остаточная ветвь fc аппроксимирована линейным сопротивлением $0.005 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$. Предэкспоненциальные множители: InGaP (диффузионный $J_{0d} = 1 \cdot 10^{-25} \text{ A/cm}^2$, рекомбинационный $J_{0r} = 1 \cdot 10^{-13} \text{ A/cm}^2$); GaAs ($J_{0d} = 1 \cdot 10^{-20} \text{ A/cm}^2$, $J_{0r} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ A/cm}^2$), Ge ($J_{0d} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, рекомбинационной компоненты нет). Для пары GaAs/Ge результативность люминесцентной связи $\gamma_s \approx 0.5$ [6], для пары InGaP/GaAs взято $\gamma_s = 0.5$, что выше экспериментальной величины 0.07 [6] (чтобы подчеркнуть влияние люминесцентной связи).

прибора. Каждая характеристика этого семейства дает пару значений напряжения холостого хода V_{oc} и тока короткого замыкания J_{sc} , а набор пар образует характеристику $V_{oc}(J_{sc})$ (кривая 1 на рис. 4). Кроме того, значения V_{oc} и J_{sc} могут быть получены путем независимых измерений напряжения холостого хода и тока короткого замыкания при фиксированной освещенности. В методе-прототипе она совпадает с умозрительной характеристикой $V_{gen}(J)$, а указанная разность соответственно с искомой характеристикой $V_{res}(J)$. В обобщенном методе (в варианте, не учитывающем электролюминесценцию) характеристика $V_{oc}(J_{sc})$ сдвинута по напряжению относительно умозрительной $V_{gen}(J)$ на постоянную в пределах моноэкспоненциального участка этих характеристик вольтовую величину $V_{a,oc}$. Оценка этой величины для трехпереходных СЭ GaInP/GaAs/Ge сделана в работе [4], и она равна $V_{a,oc} \approx 0.02$ В. Соответственно вышеуказанная вольтовая разность, соответствующая текущему значению тока J_c , $(V_{dev} - V_{gen})_{J_c}$, меньше искомого напряжения V_{res} на эту же постоянную вольтовую величину: $V_{res} = (V_{dev} - V_{gen})_{J_c} + V_{a,oc}$.

Учет влияния электролюминесценции, сделанный на основании данных, полученных в [5], показал, что для стандартных трехпереходных СЭ GaInP/GaAs/Ge при стандартных спектрах AM0, AM1.5, есть еще одна поправка разности $(V_{dev} - V_{gen})_{J_c}$, которая не превышает 0.003 В. При такой поправке относительная погрешность остаточного сопротивления на начальном участке кривой 4 на рис. 5, 6 составляет $\sim 3\%$.

Примечание: без учета электролюминесценции сдвинутая на величину $V_{a,oc}$ характеристика $V_{oc}(J_{sc})$ совпадает с умозрительной $V_{gen}(J)$, только если выполняется критерий $(V_{res})_{J_{sc}} < V_{oc}$, при выполнении ко-

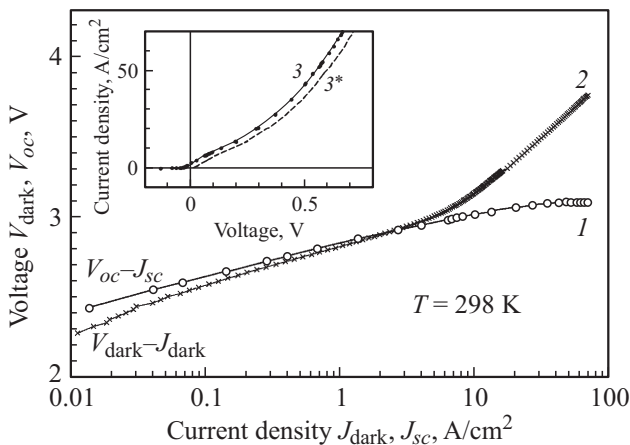


Рис. 4. Взаимное расположение характеристик СЭ InGaP/GaAs/Ge, полученных экспериментально: 1 — $V_{oc}(J_{sc})$, построенная на основе семейства световых вольт-амперных характеристик; 2 — темновая характеристика ток-напряжение с координатами J_{dark} , V_{dark} ($V_{dev}(J)$). На вставке: 3 — разностная характеристика $\Delta V(J)$, $\Delta V = (V_{dark} - V_{oc})_{J_c}$; 3* — характеристика ток-напряжение остаточной (негенерирующей) части (ветви f_c на рис. 2), полученная сдвигом кривой 3 (в тексте $V_{res}(J)$).

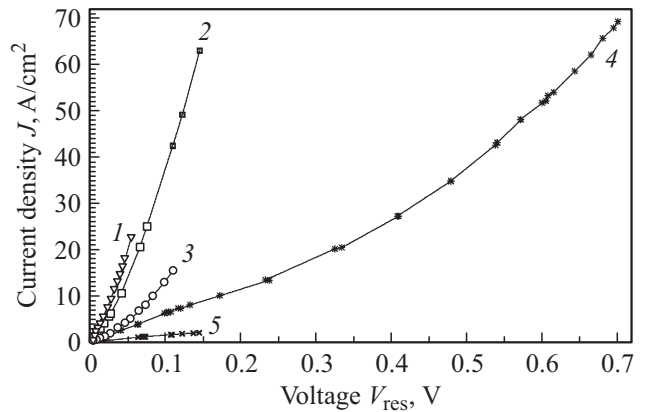


Рис. 5. Характеристики ток-напряжение остаточной (негенерирующей) части $V_{res}(J)$ (см. разд. 4) для однопереходных фотопреобразователей (1 — Ge, 2 — GaAs, 3 — InGaP) и трехпереходных элементов InGaP/GaAs/Ge (4, 5).

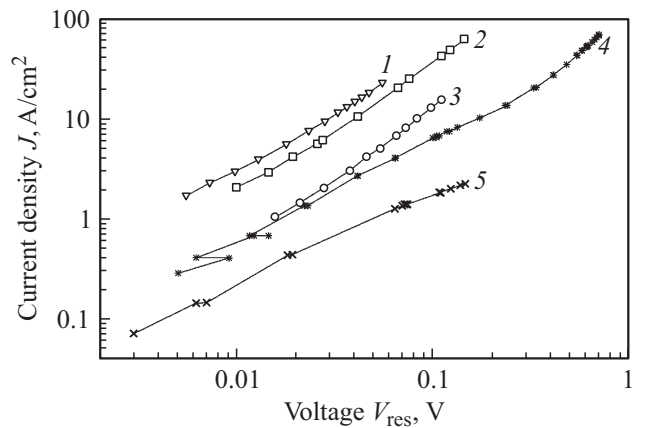


Рис. 6. Характеристики $V_{res}(J)$ (те же, что на рис. 5) в двойном логарифмическом масштабе.

торого $J_{sc} \approx J_g = \min\{J_g^1 \dots J_g^N\}$. Можно использовать практический критерий $J_{sc} R_s < V_{oc}$, где R_s — оценочная величина сопротивления остаточной части. Этот критерий всегда выполняется во всех СЭ вплоть до кратностей, при которых достигается максимум КПД (эффективности).

4. Процедура выделения темновой вольт-амперной характеристики остаточной части многопереходного солнечного элемента

Процедура состоит из четырех этапов.

- 1) Измерение прямой темновой характеристики прибора $V_{dark}(J_{dark})$ — рис. 4, кривая 2.
- 2) Построение характеристики $V_{oc}(J_{sc})$ — рис. 4, кривая 1.
- 3) Вычитание вольтовых координат кривых 1 и 2 на рис. 4 ($V_{dark} - V_{oc}$) при одинаковых токовых координатах

$J_{\text{dark}} = J_{sc}$ и формирование разностной характеристики — рис. 4, вставка, кривая 3.

4) Вольтовый сдвиг разностной характеристики (рис. 4, кривая 3), такой, чтобы она прошла через начало координат и тем самым дала искомую характеристику $V_{\text{res}}(J)$ — кривую 3* на рис. 4.

Этапы 1)–3) составляют содержание метода-прототипа.

5. Применение к фотовольтаическим приборам

Используем процедуру выделения $V_{\text{res}}(J)$ характеристики остаточной части (см. разд. 4) применительно к однопереходным ФЭП на основе InGaP, GaAs, Ge и к трехпереходным СЭ InGaP/GaAs/Ge. Исследуемые структуры были выращены авторами работы методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений). На рис. 5 и 6 приведены результаты выделения темновых характеристик $V_{\text{res}}(J)$. Для всех однопереходных ФЭП эти характеристики сверхлинейны в пропускном для прибора направлении, что является характерным признаком растекания тока под контактной сеткой [3,6]. На рис. 6 эти характеристики показаны в двойном логарифмическом масштабе, откуда отчетливо видно, что сверхлинейность имеет степенной вид $J \propto V_{\text{res}}^n$, показатель степени $n \approx 1.3–1.4$.

Однако характеристики трехпереходных СЭ в ряде случаев имели другой тип нелинейности: начальный сублинейный участок сменялся „мягким пробоем“ или, другими словами, характеристика $V_{\text{res}}(J)$ имела перегиб, что является характерным признаком изотипных гетероинтерфейсов [8,9]. Такое поведение характеристики можно описать двухэкспоненциальной функцией вида $J \propto [e^{(V/E_1)} - e^{(-V/E_2)}]$, $E_1 \approx 0.35$ В, $E_2 \approx 0.15–0.30$ В, $V = V_{\text{res}}$.

Итак, в трехпереходных СЭ, в отличие от однопереходных ФЭП, в нелинейном сопротивлении остаточной (негенерирующей) части имеется вклад не только от растекания под контактной сеткой, но и, возможно, от изотипных интерфейсов, на что ранее обращалось внимание в работах [8,10–12].

6. Заключение

Определение механизма токопрохождения в остаточной (негенерирующей) части МП СЭ — одна из актуальных задач для концентраторной фотовольтаической солнечной энергетики. В частности, требуется определять вид и параметры вольт-амперной характеристики остаточной части МП СЭ. Изложен способ выделения этой характеристики в темновом режиме и в пропускном для МП СЭ направлении тока. Используется известная процедура вольтового вычитания из темновой прямой характеристики прибора $V_{\text{dark}}(J_{\text{dark}})$ (включающей как генерирующую, так и остаточную части) характеристику $V_{oc}(J_{sc})$, которая нечувствительна к остаточной части.

Способ отличается от известного учетом дисбаланса фотогенерируемых токов, а также учетом влияния электролюминесценции широкозонных $p-n$ -переходов на узкозонные $p-n$ -переходы.

Способ применен к однопереходным фотопреобразователям (InGaP, GaAs и Ge) и к трехпереходным солнечным элементам (InGaP/GaAs/Ge). Получены зависимости двух видов: полностью сверхлинейные (обусловленные растеканием под контактной сеткой [3,6]) и двухэкспоненциальные с наличием сублинейности на начальном участке. Последние встречаются только среди МП СЭ. Очевидно, что токопрохождение в остаточной части МП СЭ определяется не только растеканием под контактной сеткой, но и другими факторами, среди которых целесообразно в дальнейшем рассмотреть изотипные гетероинтерфейсы. На это обращено внимание в работах [8,10–12].

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-08-00534-а) и Министерства образования и науки РФ (грант 14.516.11.001).

Список литературы

- [1] В.М. Андреев, В.А. Грилихес, В.Д. Румянцев. *Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения* (Л., Наука, 1989) гл. 2.1.
- [2] В.М. Евдокимов. Проблемы теории и перспективы повышения эффективности фотопреобразования. В сб.: *Фотоприемники и фотопреобразователи*, под ред. Ж.И. Алфёрова, Ю.В. Шмарцева (Л., Наука, 1986) с. 141.
- [3] Н.А. Калужный. Автореф. канд. дисс. (СПб., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2011).
- [4] М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, Н.А. Калужный, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Лантратов. *ФТП*, **46** (8), 1074 (2012).
- [5] 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 Photovoltaic Systems, Miyazaki, Japan, 2013)*, **1556**, 147 (2013).
- [6] V.D. Romyantsev. In: V.M. Andreev, V.A. Grilikhes, V.D. Romyantsev. *Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight* (John Wiley & Sons, Ltd., 1997) chap. 2.3.
- [7] V.S. Kalinovskiy, V.M. Andreev, V.V. Evstropov, N.A. Kalyuzhnyy, V.P. Khvostikov, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov. *Proc. 22th European Photovoltaic Solar Energy Conf. (Milan, Italy, 2007)*.
- [8] N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, V.M. Lantratov. *Proc. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conf. (Hamburg, Germany, 2009)* p. 538.
- [9] Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. *Полупроводниковые гетеропереходы* (М., Сов. радио, 1979) гл. 5.2.2.
- [10] A.S. Gudovskikh, N.A. Kaluzhniy, V.M. Lantratov, S.M. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev. *Thin Sol. Films*, **516**, 6739 (2008).
- [11] R. Hoheisel, A.W. Bett. *IEEE J. Photovolt.*, **2** (3), 398 (2012).
- [12] A.B. Or, P. Fuss-Kailuweit, S.P. Philipps, U. Fiedeler, S. Essig, E. Oliva, F. Dimroth, A.W. Bett. *Proc. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conf. (Frankfurt, Germany, 2012)* p. 150.

Редактор Л.В. Шаронова

A subtractive method for obtaining dark current–voltage characteristic and its types for the residual (non-generating) part of the multi-junction solar cell

*M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, N.A. Kalyuzhnyy,
S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, N.Kh. Timoshina,
R.A. Saliy, V.M. Lantratov*

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

Abstract The paper focused on the fundamental losses in the non-generating (residual) part of multi-junction solar cells. The method for obtaining the current–voltage curve of the residual part of solar cells proposed and proved. The method is based on known one for single-junction solar cells. The disbalance of photogenerated currents and luminescence coupling effect have been taken into account which allows to apply the proposed method to multi-junction solar cells. The method has been applied to single-junction (InGaP, GaAs, Ge) and triple-junction (InGaP/GaAs/Ge) solar cells. The two types of current–voltage characteristics $J(V)$ and empirical laws for them have been found. The first type is strongly monotonic superlinear $J \propto V^n$, $n \approx 1.3–1.4$, and is limited by the spreading resistance, the second type was observed only for triple-junction solar cells and was a double-exponential dependence with sublinearity in the initial part $J \propto [e^{(V/E_1)} - e^{-V/E_2}]$, $E_1 \approx 0.35$ V, $E_2 \approx 0.15–0.30$ V. As a result, it has been established that the current flow in the residual part of multi-junction solar cells is limited not only by the spreading resistance, but also by other factors, for example isotopic interfaces.