

Растекание тока в солнечных элементах: двухпараметрическая трубковая модель

© М.А. Минтаиров, 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

E-mail: mamint@mail.ioffe.ru

(Получена 14 декабря 2015 г. Принята к печати 22 декабря 2015 г.)

Явление растекания является существенным для концентраторных солнечных элементов, так как лимитирует эффективность (кпд) при больших кратностях концентрирования солнечного излучения. Предложена и разработана модель, описывающая закономерности растекания тока под контактной сеткой солнечного элемента. Модель использует стилизованное представление о линиях тока и соответственно о трубках тока: она содержит два резистивных параметра, учитывающих переменную латеральную (горизонтальную) и постоянную вертикальную составляющие сопротивления каждой трубки. В модели учтено, что толщина области растекания значительно меньше расстояния между полосками контактной сетки, поэтому значительный вклад в результирующие сопротивления дают латеральные участки трубок. Получены расчетные вольт-амперные характеристики солнечного элемента в резистивном и безрезистивном случаях. Вольт-амперная характеристика сопротивления растекания, полученная вольт-амперным вычитанием этих характеристик, является нелинейной и зависит от фотогенерированного тока. Таким образом, электрическая эквивалентная схема солнечного элемента содержит сосредоточенное нелинейное сопротивление, параметрически зависящее от фотогенерированного тока.

Сделано сопоставление экспериментальных и расчетных ВАХ на примере Ge, GaAs и GaInP солнечных элементов и определены оба резистивных параметра модели. Модель правильно описывает закономерности растекания в однопереходных солнечных элементах и может быть расширена на многопереходные солнечные элементы.

1. Введение

В солнечных элементах (СЭ), преобразующих концентрированное солнечное излучение, наиболее существенными являются внутренние резистивные потери, снижающие эффективность (кпд) η прибора. Наличие резистивных потерь приводит к тому, что зависимость η от фотогенерированного тока J_g (пропорционального кратности солнечного излучения, $X \propto J_g$) содержит максимум [1]. На вольт-амперную характеристику (ВАХ) СЭ влияет сопротивление растекания, вызванное главным образом продольным распространением носителей в верхнем слое СЭ между токособирающими полосками фронтальной сетки. Основными свойствами сопротивления растекания являются нелинейность и зависимость от уровня освещенности (кратности) [2,3]. Для описания сопротивления растекания применяются различные подходы: численное моделирование с использованием ячеек (звеньев) [4–6], двумерные и трехмерные схемы [7–9], а также модель сосредоточенного эквивалента [10].

В данной работе для описания сопротивления растекания предложен подход с наглядным физическим содержанием, построенный на представлении о линиях тока (о „трубках“ тока). Последние представлены модельными траекториями, изломанными под прямыми углами (рис. 1). Учитывая, что при этом путь носителей заряда в продольном направлении много больше, чем в поперечном (соотношение светочувствительной площади поверхности к площади затененной контактной сеткой $\gg 1$), то полное сопротивление на этом участке

будет в основном определяться продольным распространением („растеканием“) носителей заряда.

С точки зрения составления электрической эквивалентной схемы СЭ такая модель выглядит проще, чем трехмерные схемы, использующиеся в численных расчетах. Эквивалентная схема в данном случае составлена из параллельных ветвей (шунтов) и включает линейные резистивные компоненты (рис. 2, а), поэтому позволяет получать достаточно простые аналитические выражения для каждой ветви схемы.

В данной работе решены следующие задачи:

1. представлена двухпараметрическая модель растекания тока под контактной сеткой в солнечных элементах;
2. составлена сосредоточенная эквивалентная схема, которая учитывает распределенное сопротивление растекания (рис. 2, б);
3. получен набор ВАХ, задающий сосредоточенное сопротивление растекания и характеризующий распределенное сопротивление растекания;
4. установлены отличительные признаки этого набора.

2. Модель нелинейного сопротивления СЭ

Введение „трубок тока“ является распространенным приемом [11]: соленоидальный характер постоянного тока в отсутствие источников тока позволяет всегда провести такое разбиение.

При типичной конструкции СЭ толщина области, в которой происходит растекание тока (h_s), значительно

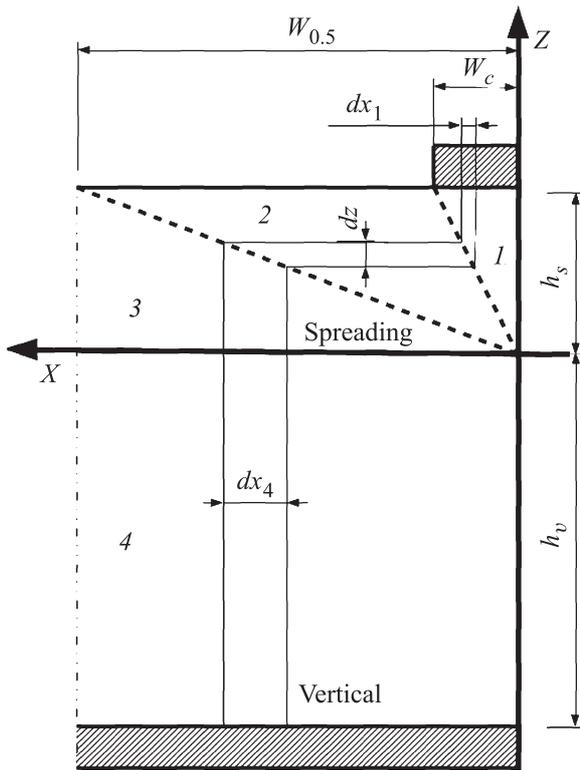


Рис. 1. Трубковая модель растекания тока в СЭ. СЭ представлен в виде нескольких областей: 1, 2, 3 — области, в которых происходит растекание (Spreading) тока, трубки тока идут как вертикально (1), (3) так и горизонтально (2); 4 (Vertical) — область, в которой трубки тока идут только вертикально. Металлические контакты — штриховка. $p-n$ -переход расположен по оси „X“, его ширина не изображена.

меньше расстояния между центрами контактных полос (W) и меньше ширины каждой полоски (W_d). Исходя из указанного условия (условия вертикальной „сжатости“ картины линий тока) считаем, что линии тока можно представить набором прямолинейных отрезков (горизонтальных и вертикальных, пренебрегая их более сложной „гладкой“ формой).

На рис. 1 показано поперечное сечение участка СЭ, представляющего собой половину периода, при трансляции которого по оси „x“ воспроизводится рисунок поперечного сечения СЭ (введена система координат с осями „X“, „Z“, в предположении бесконечной протяженности СЭ вдоль оси „Y“ — двумерность). Введены обозначения: $W_c = W_d/2$ — полуширина контактной полоски, $W_{0,5} = W/2$ — половина расстояния между центрами контактных полосок. Поперечное сечение СЭ состоит из следующих областей: верхний и нижний (сплошной) металлические контакты, область толщиной h_s , в которой происходит растекание тока, $p-n$ -переход (расположен на оси X) и область толщиной h_v , в которой ток течет „вертикально“.

Каждая трубка тока включает четыре омических участка (рис. 1): 1 — вертикальный участок в обла-

сти растекания тока под лицевым контактом, высоту которого обозначим h_1 , 2 — горизонтальный участок в области растекания тока, длину которого обозначим l_2 , 3 — вертикальный участок в области растекания тока, высоту которого обозначим как h_3 , и 4 — вертикальный участок с высотой $h_4 = h_v$. Проводимости области растекания тока и вертикальной области обозначим ρ_s и ρ_v соответственно. Считая трубки тока тонкими, их толщину на вертикальных участках можно выразить через дифференциал dz (рис. 1):

$$dx_1 = \frac{W_c}{h_s} dz \quad \text{и} \quad dx_4 = dx_3 = \frac{W_{0,5}}{h_s} dz.$$

Выразим через координату z длины участков 1, 2, 3: $h_1 = h_s - z$, $l_2 = x_3 - x_1 = \frac{W_{0,5} - W_c}{h_s} z$, $h_3 = z$. Толщину любой поперечной трубки тока dz можно выразить через количество трубок тока n : $dz = h_s/n$, так и через номер трубки $dz = z/i$ (индекс $i = 1, \dots, n$). Тогда $i = z/dz$ и $n = h_s/dz$. Как видно, длина и, следовательно, сопротивление вертикального участка h_4 не зависят от индекса i , т.е. от положения трубки, в то время как сопротивления участков 1, 2 и 3 зависят от положения трубки (от индекса i). Распишем слагаемые, представляющие собой сопротивления каждого участка для i -й трубки, при этом для простоты записи принимаем протяженность по координате „Y“ равной единице длины. Тогда слагаемые последовательного сопротивления, с учетом приведенных выше соотношений, имеют вид:

$$R_1 = \rho_s \frac{h_1}{dx_1} = \rho_s \frac{(h_s - z)h_s}{W_c dz} = \rho_s \frac{h_s}{W_c} n - \rho_s \frac{h_s}{W_c} i, \quad (1a)$$

$$R_2 = \rho_s \frac{l_2}{dz} = \rho_s \frac{W_{0,5} - W_c}{h_s} \frac{z}{dz} = \rho_s \left(\frac{W_{0,5}}{h_s} - \frac{W_c}{h_s} \right) i, \quad (1b)$$

$$R_3 = \rho_s \frac{h_3}{dx_3} = \rho_s \frac{zh_s}{W_{0,5} dz} = \rho_s \frac{h_s}{W_{0,5}} i, \quad (1c)$$

$$R_4 = \rho_v \frac{h_4}{dx_4} = \rho_v \frac{h_v h_s}{W_{0,5} dz} = \rho_v \frac{h_v}{W_{0,5}} n. \quad (1d)$$

Перейдя к сопротивлению, приведенному к площади (умножив все слагаемые только на длину $W_{0,5}$, так как по „Y“ длина равна единице), запишем итоговое значение приведенного сопротивления (с размерностью Ом · см²) i -й трубки тока:

$$R_i = W_{0,5}(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) = R_V n + R_L i, \quad (2)$$

где

$$R_V = W_{0,5} \left[\rho_s \frac{h_s}{W_c} + \rho_v \frac{h_v}{W_{0,5}} \right] = \rho_s h_s \frac{W_{0,5}}{W_c} + \rho_v h_v, \quad (3)$$

$$R_L = W_{0,5} \left[-\frac{\rho_s h_s}{W_c} + \rho_s \left(\frac{W_{0,5}}{h_s} - \frac{W_c}{h_s} \right) + \frac{\rho_s h_s}{W_{0,5}} \right] = \frac{\rho_s (W_{0,5})^2}{h_s} \left(1 - \frac{W_c}{W_{0,5}} \right) \left(1 - \frac{h_s^2}{W_c W_{0,5}} \right). \quad (4)$$

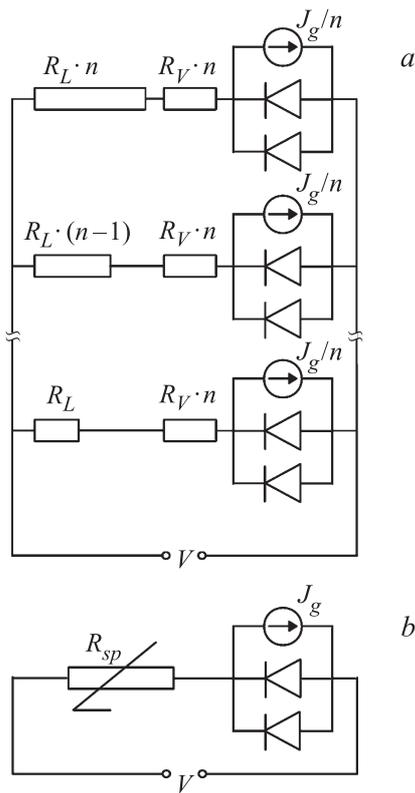


Рис. 2. Эквивалентная схема СЭ: *a* — полная (распределенная) схема, *b* — сосредоточенная.

Таким образом, приведенное сопротивление каждой трубки R_i состоит из двух слагаемых: постоянного (R_V) и переменного, зависящего от номера трубки ($R_L i$). Причем параметры R_V и R_L одинаковы для каждой трубки. Это отобразено на эквивалентной схеме (рис. 2, *a*).

Стоит отметить, что в типичной конструкции СЭ $h_v \gg h_s$ ($h_v \approx 5 \cdot 10^{-6}$ см, $h_s \approx 2 \cdot 10^{-2}$ см) и $W_c/W_{0.5} \approx 0.04-0.07$. При этом основной вклад в вертикальную составляющую сопротивления дает подложка, поэтому $\rho_v \approx \rho_w$ и $h_v \approx h_w$, где ρ_w — удельное сопротивление подложки, h_w — толщина подложки. Тогда (3) принимает вид

$$R_V \approx \rho_w h_w. \tag{5}$$

Отметим, что величина R_V задается удельным сопротивлением подложки, которое обычно известно.

Кроме того, $W_{0.5} \gg h_s$ и h_s одного порядка с W_c , поэтому (4) принимает вид

$$R_L \approx \frac{\rho_s}{h_s} (W_{0.5})^2. \tag{6}$$

Отметим, что множитель $\rho_s/h_s = R_{sheet}$ является слоевым сопротивлением, которое определяется из независимых измерений. Таким образом, величина R_L задается слоевым сопротивлением и расстоянием между контактными полосками.

3. Эквивалентная схема СЭ: генераторная и соединительная части

На рис. 2 представлены полная (распределенная) (рис. 2, *a*) и сосредоточенная (рис. 2, *b*) равноправные эквивалентные схемы СЭ. Полная эквивалентная схема состоит из параллельных ветвей, характеризующих трубки тока. Количество ветвей равно n . Омическое сопротивление каждой ветви представлено в соответствии с (2) в виде двух слагаемых, фотоактивный $p-n$ -переход в каждой ветви представлен двумя параллельно соединенными диодами (диффузионным и рекомбинационным) и источником тока J_g/n . Сосредоточенная схема представляет СЭ в соответствии с [12] в виде двух частей: генераторной и соединительной. Генераторная часть — это фотовольтаический $p-n$ -переход, а соединительная часть — это нелинейное сопротивление, зависящее от J_g (сопротивление растекания). Важным достоинством сосредоточенного представления (рис. 2, *b*) является возможность экспериментального получения ВАХ генераторной части (безрезистивной ВАХ) и соединительной части по отдельности. ВАХ генераторной части может быть получена исходя из экспериментальной зависимости напряжения холостого хода (V_{oc}) от тока короткого замыкания (J_{sc}) [12], которая совпадает с безрезистивной темновой. ВАХ сопротивления растекания получается путем вольтовой разности полной ВАХ (измеряемой напрямую) и безрезистивной (генераторной). В дальнейшем в работе анализируются экспериментальные ВАХ сопротивления растекания, которые получались при помощи описанной выше разности вольт-амперных характеристик (полной и полученной из $V_{oc} - J_{sc}$ зависимости). Аналогично, расчетные ВАХ сопротивления растекания получались путем вольтового вычитания резистивной и безрезистивной ($R_L = 0$ и $R_V = 0$) расчетных ВАХ.

Расчет ВАХ базировался на полной эквивалентной схеме (рис. 2, *a*). Для каждой ветви: генератор тока — J_g/n , диффузионная предэкспонента — J_{01}/n , рекомбинационная — J_{02}/n . Тогда ток каждой ветви описывается выражением

$$J_i = \frac{J_g - \left[J_{01} \left(\exp\left(\frac{V + J_i R_i}{kT/q}\right) - 1 \right) + J_{02} \left(\exp\left(\frac{V + J_i R_i}{2kT/q}\right) - 1 \right) \right]}{n}. \tag{7}$$

Расчет суммы токов ветвей производился отдельно для каждого напряжения ВАХ. Необходимые для расчета величины J_{01} и J_{02} определялись путем аппроксимации экспериментальной зависимости $V_{oc} - J_{sc}$, (рис. 3). При этом ток в каждой ветви J_i определялся решением трансцендентного уравнения (7) методом Ньютона [13]. В результате сравнения расчетной и экспериментальной ВАХ определялись параметры R_L и R_V (см. разд. 4).

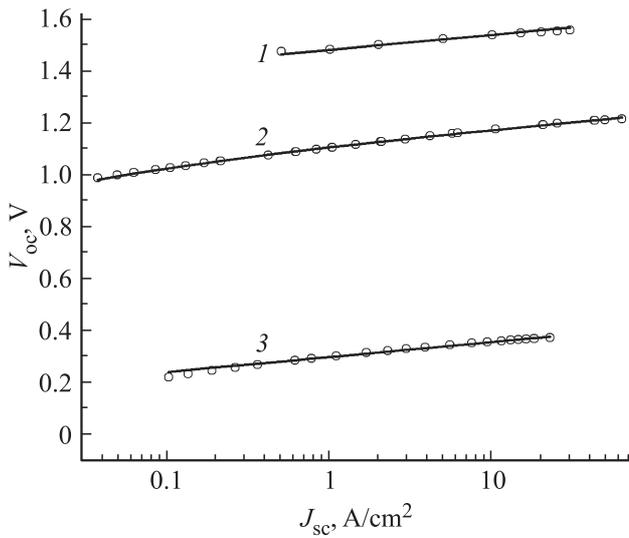


Рис. 3. Зависимость напряжения холостого хода от тока короткого замыкания для трех СЭ: 1 — GaInP, 2 — GaAs, 3 — Ge. Эксперимент — символы, расчет — линии.

4. Сопротивление растекания в GaInP, GaAs, Ge СЭ

В работе были получены вышеописанным способом ВАХ сосредоточенного сопротивления растекания и определены параметры R_L и R_V для СЭ на основе GaInP, GaAs и Ge. Толщины подложек составляли $h_w \approx 200-450$ мкм, расстояние между центрами полосок сетки лицевого контакта составляло $W \approx 100$ мкм. На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости $V_{oc}-J_{sc}$, которые использовались для определения предэкспоненциальных множителей J_{01} и J_{02} , требуемых для расчета вольт-амперных характеристик по формуле (7) и определения параметров R_L и R_V . Аппроксимация зависимостей $V_{oc}-J_{sc}$ приведена на рис. 3, полученные значения J_{01} и J_{02} составляли: $1 \cdot 10^{-20}$ и $1 \cdot 10^{-10}$ А/см² для GaAs СЭ и $6 \cdot 10^{-6}$ и 0 А/см² для Ge СЭ. Для GaInP СЭ J_{02} не определено (при расчетах взято за 0), а J_{01} составляло $2 \cdot 10^{-26}$ А/см².

На рис. 4–6 справа приведены полные (резистивные) ВАХ СЭ. Слева на рис. 4–6 приведены вольт-амперные характеристики сосредоточенного сопротивления растекания. Определенные резистивные параметры R_L и R_V приведены в таблице. Видно, что общий вид ВАХ для всех исследуемых образцов — одинаковый. Отметим

Два резистивных параметра, характеризующих сопротивление растекания

	R_L , Ом · см ²	R_V , Ом · см ²
GaInP	$4.2 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
GaAs	$8.3 \cdot 10^{-3}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$
Ge	$5.8 \cdot 10^{-3}$	$3.5 \cdot 10^{-4}$

некоторые особенности вида ВАХ для сопротивления растекания (рис. 4–6 слева):

- ВАХ сублинейна при положительных плотностях тока;
- форма ВАХ зависит от фотогенерированного тока $J_g = J_{sc}$ и, следовательно, от освещенности, при этом с увеличением J_g величина напряжения для любого фиксированного значения тока уменьшается;
- с уменьшением плотностей тока ВАХ с разными J_g сгущаются;
- при отрицательных токах ВАХ почти линейна.

Следует отметить, что полные расчетные и экспериментальные ВАХ Ge и GaAs СЭ хорошо согласуются

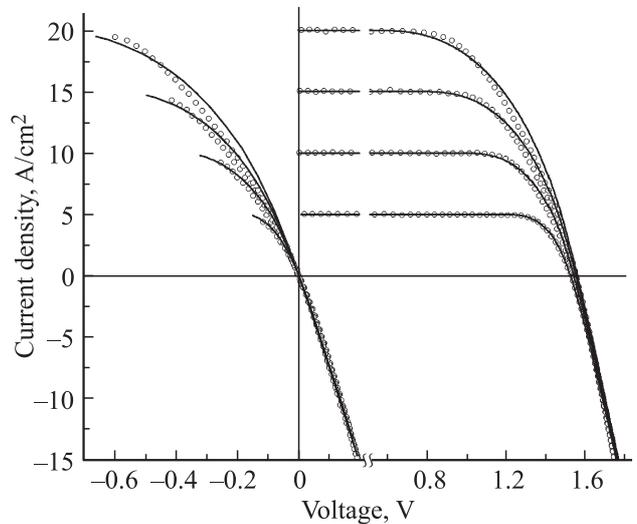


Рис. 4. Набор вольт-амперных характеристик для GaInP СЭ при разных значениях фотогенерированного тока $J_g = J_{sc}$. Справа — световые ВАХ. Слева — набор ВАХ, задающий нелинейное сосредоточенное сопротивление растекания, управляемое фотогенерированным током.

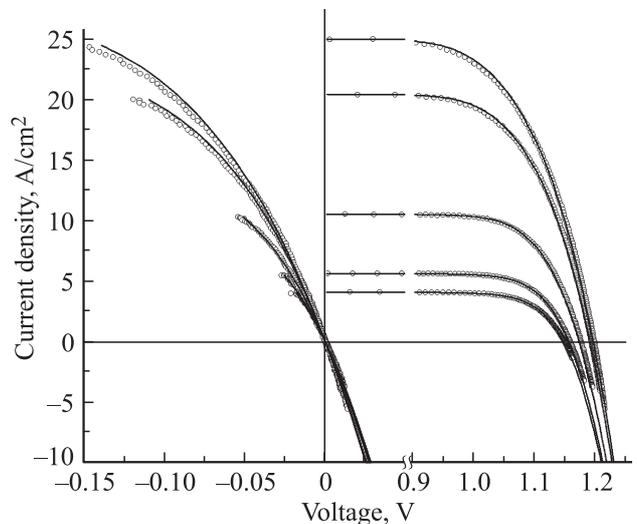


Рис. 5. Набор вольт-амперных характеристик для GaAs СЭ (аналогично рис. 4).

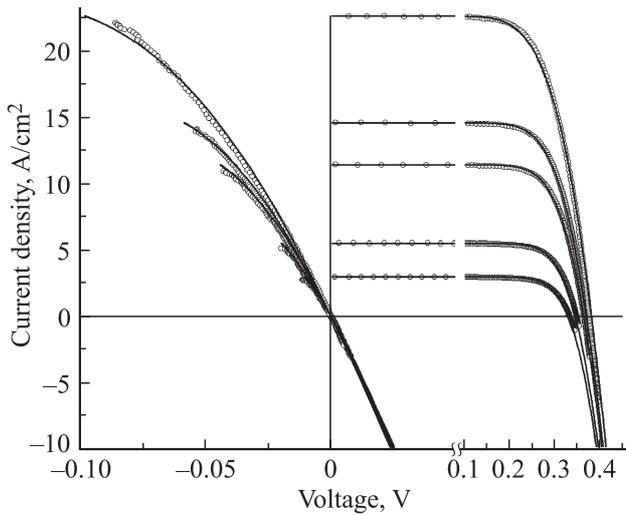


Рис. 6. Набор вольт-амперных характеристик для Ge СЭ (аналогично рис. 4).

друг с другом (рис. 5, 6 справа). Для случая GaInP (рис. 4 справа) при больших значениях J_g ВАХ согласуются не полностью, возможно это вызвано наличием дополнительных факторов, о чем также могут свидетельствовать повышенные сопротивления R_L и R_V (см. таблицу, 1-я строка). В целом модель хорошо описывает экспериментальные особенности, характерные для сопротивления растекания в солнечных элементах. Таким образом, сосредоточенное сопротивление растекания (R_{sp} , рис. 2, b) следует характеризовать семейством ВАХ (рис. 4–6 слева). О таком результате ранее упоминалось в литературе (см., например, [2,3]). Причем модель позволила описать семейство ВАХ сопротивления растекания двумя параметрами R_L и R_V . Отметим, что параметр R_V задается удельным сопротивлением подложки и ее толщиной, а параметр R_L слоевым сопротивлением и расстоянием между контактными полосками. Следовательно, параметр R_L позволяет определить слоевое сопротивление области растекания в готовом приборе.

5. Заключение

Предложена модель растекания тока под контактной сеткой в солнечных элементах. Предполагается, что главный вклад в латеральную составляющую сопротивления растекания дает только тонкая область под контактной сеткой. Толщина этой области h_s значительно меньше половины расстояния между полосками $W_{0.5}$. Использовано представление о линиях тока и о протекании тока по трубкам разной длины, соединенным параллельно и включающим источники тока (рис. 2). Модель имеет два резистивных параметра растекания: R_L — латеральное сопротивление, приведенное к единице площади, и соответственно R_V — „вертикальное“ сопротивление.

С помощью модели решались задачи получения набора ВАХ, задающего сосредоточенное сопротивление

растекания, и набора резистивных ВАХ СЭ. Модель применена к трем однопереходным СЭ на основе GaInP, GaAs и Ge. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными. Показано, что экспериментальные ВАХ описываются двухпараметрической моделью (рис. 4–6).

Следует отметить, что резистивный параметр R_L связан со слоевым сопротивлением области растекания R_{sheet} , а R_V с удельным сопротивлением подложки ρ_w . Следовательно, модель позволяет определять R_{sheet} и ρ_w в готовом приборе.

Показано, что распределенное сопротивление растекания может быть представлено сосредоточенным сопротивлением, которое является нелинейным и управляется фотогенерированным током. Определены закономерности, свойственные сопротивлению растекания, с целью отличать его от других факторов, влияющих на последовательное сопротивление.

Поскольку предполагается, что растекание тока происходит только в тонкой области под контактной сеткой, то результаты, полученные для однопереходного GaInP СЭ (рис. 4), могут быть использованы для анализа растекания в трехпереходном GaInP/Ga(In)As/Ge солнечном элементе.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 13-08-00534-а).

Список литературы

- [1] М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Лантратов. *ФТП*, **46** (8), 1074 (2012)
- [2] В.М. Андреев, В.А. Грилихес, В.Д. Румянцев. *Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения* (Л., Наука, 1989).
- [3] А.М. Васильев, А.П. Ландсман А.П. *Полупроводниковые преобразователи* (М., Сов. радио, 1971).
- [4] G.M. Smirnov, J.E. Mahan. *Sol. St. Electron.*, **23** (10), 1055 (1980).
- [5] C. Fang, J. Hauser. *Proc. 13th IEEE Photovolt. Spec. Conf.* (N.Y., 1978) p.1306.
- [6] Х.К. Арипов, В.Д. Румянцев. *ФТП*, **17** (2), 358 (1983).
- [7] M. Steiner, S.P. Philipps, M. Hermle, A.W. Bett, F. Dimroth. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **19** (1), 73 (2011).
- [8] I. Garcia, C. Algora, I. Rey-Stolle, B. Galiana. *Proc. 33rd PVSC* (San Diego, USA, May 11–16, 2008). p. 4922-908.
- [9] V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, M.A. Mintairov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Lantratov. *Proc. 25th PVSEC* (Valencia, Spain, 6–10 September, 2010) p.406.
- [10] A. De Vos. *Solar Cells*, **12** (3), 311 (1984).
- [11] В.Г. Левич, Ю.А. Вдовин, В.А. Мямлин. *Курс теоретической физики* (М., ФМЛ, 1962) т. 2.
- [12] М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц. *AIP Conf. Proc.*, vol. 1679, p. 050007 (2015).
- [13] Н.С. Бахвалов. *Численные методы* (М., Наука, 1975).

Редактор А.Н. Смирнов

Current spreading in solar cells: two-parameter tube model

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

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Phenomenon of the current spreading under a contact grid is essential for concentrator solar cells, since it limits the conversion efficiency at high sunlight concentration ratios. A model is proposed and developed, which describes regularities of the mentioned phenomenon. It uses a stylized representation on current lines and, respectively, on current tubes: it contains two resistive parameters allowing for the variable lateral (horizontal) and constant vertical components of each tube resistance. In the model, it is taken into account that the spreading region thickness is substantially less than the distance between contact grid strips. For this reason, the tube lateral portions contribute significantly into the total resistance. The *IV*-curves for the resistive and resistanceless cases were obtained. The spreading resistance *IV*-curves obtained by voltage subtraction of these characteristics is nonlinear one and depends on the photogenerated current. Thus, a electric equivalent circuit contains a lumped nonlinear resistance depending parametrically on the photogenerated current. Comparison of experimental and rated *I–V* characteristics on the example of Ge, GaAs and GaInP solar cells was performed, and both resistive parameters have been determined. The model describes correctly the spreading regularities in single-junction solar cells and can be extended to multijunction ones.