

Токопрохождение и потенциальная эффективность (КПД) солнечных элементов на основе $p-n$ -переходов из GaAs и GaSb

© В.М. Андреев, В.В. Евстропов, В.С. Калиновский[¶], В.М. Лантратов, В.П. Хвостиков

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

(Получена 9 июля 2008 г. Принята к печати 18 июля 2008 г.)

Изучена зависимость эффективности многопереходных и однопереходных солнечных элементов от механизмов токопрохождения в фотоактивных $p-n$ -переходах, а именно от вида темновой характеристики ток–напряжение $J-V$. Безрезистивная (не учитывающая последовательное сопротивление) $J-V_j$ -характеристика многопереходного солнечного элемента имеет такой же вид, как и у однопереходного: набор экспоненциальных участков. Это позволило развить единый аналитический метод расчета эффективности одно- и многопереходных солнечных элементов. Выведено уравнение, связывающее эффективность и фотогенерируемый ток на каждом из участков $J-V_j$ -характеристики. Для $p-n$ -переходов из GaAs и GaSb измерены характеристики: темновая $J-V$, интенсивность освещения–напряжение холостого хода $P-V_{OC}$, интенсивность люминесценция–прямой ток $L-J$. Построены расчетные зависимости потенциальной (при идеализированном условии равенства единице внешнего квантового выхода) эффективности от фотогенерируемого тока для однопереходных GaAs и GaSb солнечных элементов и тандема GaAs/GaSb. Вид этих зависимостей соответствует виду $J-V_j$ -характеристики: имеются диффузионный и рекомбинационный участки, а в некоторых случаях и туннельно-ловушечный. При малых степенях концентрирования солнечного излучения ($C < 10$) существенный вклад в фотогенерируемый ток дает рекомбинационная компонента. Именно рост этой компоненты при высокоэнергетичном 6.78 МэВ протонном и 1 МэВ электронном облучениях определяет уменьшение эффективности при преобразовании неконцентрированного солнечного излучения.

PACS: 73.40.Kp, 78.55.Cr, 84.60.Jt, 85.30.Kk

1. Введение

Зависимость эффективности (кпд) от плотности фотогенерируемого тока (фототока) и, следовательно, от кратности концентрирования солнечного излучения (C) — одна из главных характеристик однопереходных и многопереходных солнечных элементов (СЭ). Эта зависимость определяется видом и структурой темновой безрезистивной (не учитывающей последовательное сопротивление R_S) характеристики ток–напряжение ($J-V_j$) как одиночного $p-n$ -перехода, так и нескольких последовательно соединенных фотоактивных $p-n$ -переходов в многопереходном солнечном элементе (МСЭ).

В настоящее время основное внимание уделяется диффузионной компоненте тока, при этом для определения ожидаемой эффективности используются численные методы. Цель настоящей работы — показать необходимость учета рекомбинационной компоненты тока, особенно при малых кратностях концентрирования ($C < 10$) солнечного излучения, соответственно определить вид и структуру характеристики ток–напряжение для МСЭ и установить аналитическую связь между этой характеристикой и эффективностью СЭ.

В работе, во-первых, проанализированы для фотоактивных $p-n$ -переходов два способа получения безрезистивной $J-V_j$ -характеристики. Способы основаны на согласовании экспериментальной темновой характеристики ток–напряжение ($J-V$) с характеристиками,

не зависящими от последовательного сопротивления исследуемых $p-n$ -структур. Для этого использованы: фотовольтаическая характеристика $p-n$ -перехода, интенсивность освещения — напряжение холостого хода ($P-V_{OC}$) и электролюминесцентная характеристика прямой ток–интенсивность люминесценции ($L-J$). Следует отметить, что построение зависимостей генерируемого фототока от напряжения холостого тока (J_g-V_{OC}), а также использование пропорциональности между интенсивностью электролюминесценции и диффузионной компонентой тока в режиме холостого хода применялись в работе [1]. В этой работе описана бесконтактная методика измерения электрических и фотоэлектрических параметров СЭ со структурой $p-AlGaAs/p-n-GaAs$.

Во-вторых, проанализирована результирующая темновая безрезистивная $J-V_j$ -характеристика МСЭ, образовавшаяся при последовательном соединении фотоактивных $p-n$ -переходов. Она имеет в точности такой же вид, как и у однопереходного: набор экспоненциальных участков. Это дает основание ввести понятие результирующего $p-n$ -перехода, имитирующего последовательно соединенные фотоактивные $p-n$ -переходы.

В-третьих, из безрезистивной темновой $J-V_j$ -характеристики (в том числе и результирующей) получена зависимость эффективности (η) СЭ от фотогенерируемого тока при различных типах засветки, (AM0, AM1.5 и др.). Для этого выведено уравнение [2], выражающее фотогенерируемый ток (J_g) через вспомогательную величину — эффективное напряжение (V_η), т.е. получена зависимость $V_\eta-J_g$. Это напряжение пропорционально

[¶] E-mail: vitak.sopt@mail.ioffe.ru

эффективности с коэффициентом пропорциональности, зависящим только от конкретных условий освещения СЭ. Таким образом, все конкретные требуемые варианты для рассматриваемого $p-n$ -перехода, в том числе и результирующего, содержатся в единой $V_\eta - J_g$ -характеристике, где $V_\eta \propto \eta$, а $J_g \propto C$.

Полученные и перечисленные в настоящей работе результаты применимы для согласованных по фототоку фотоактивных $p-n$ -переходов в МСЭ. В нашем случае они были применены к согласованной паре $p-n$ -переходов из GaAs и GaSb. Исследованные GaAs и GaSb $p-n$ -структуры были выращены методами МОС-гидридной и НТ ЖФЭ эпитаксий [3].

2. Темновая безрезистивная характеристика прямой ток–напряжение: способы получения и связь с эффективностью

2.1. Соответствие темновой и световой характеристик ток–напряжение

В наиболее общем виде плотность прямого темнового тока фотоактивного $p-n$ -перехода из материалов $A^{III}-B^V$ складывается по крайней мере из 3 компонент экспоненциального вида,

$$J = J_{0r} \left(\exp \frac{qV_j}{AkT} - 1 \right) + J_{0r} \left(\exp \frac{qV_j}{2kT} - 1 \right) + J_{0d} \left(\exp \frac{qV_j}{kT} - 1 \right), \quad (1)$$

туннельно-ловушечной ($A > 2$), рекомбинационной и диффузионной (рис. 1, 2). Здесь $qV_j = (F_n - F_p)$ — разность электронного и дырочного квазиуровней Ферми на границах области пространственного заряда (ОПЗ) $p-n$ -перехода. Соответственно V_j — так называемое безрезистивное напряжение, не зависящее от последовательного сопротивления структуры R_S , $V_j = V - J \cdot R_S$, где V — напряжение на всей $p-n$ -структуре.

В солнечных элементах при используемых за светках ($C \geq 1$) плотность фототока, как правило, $J_g \geq 10^{-2} \text{ A/cm}^2$. Поэтому, во-первых, рабочие токи определяются в основном рекомбинационным и диффузионным механизмами токопрохождения, так что туннельно-ловушечный механизм в данной работе не рассматривается. Во-вторых, $J_g \gg J_0$, и в выражении (1) можно пренебречь единицей по сравнению с экспонентой. В результате для СЭ темновая безрезистивная (не учитывающая R_S) $J-V_j$ -характеристика принимает двухэкспоненциальный вид:

$$J = J_{0r} \exp qV_j/2kT + J_{0d} \exp qV_j/kT. \quad (2)$$

Соответственно получаемые из нее [4,5] световая (нагрузочная) $j-V$ -характеристика, а также характеристика фотогенерируемый ток–напряжение холостого хода

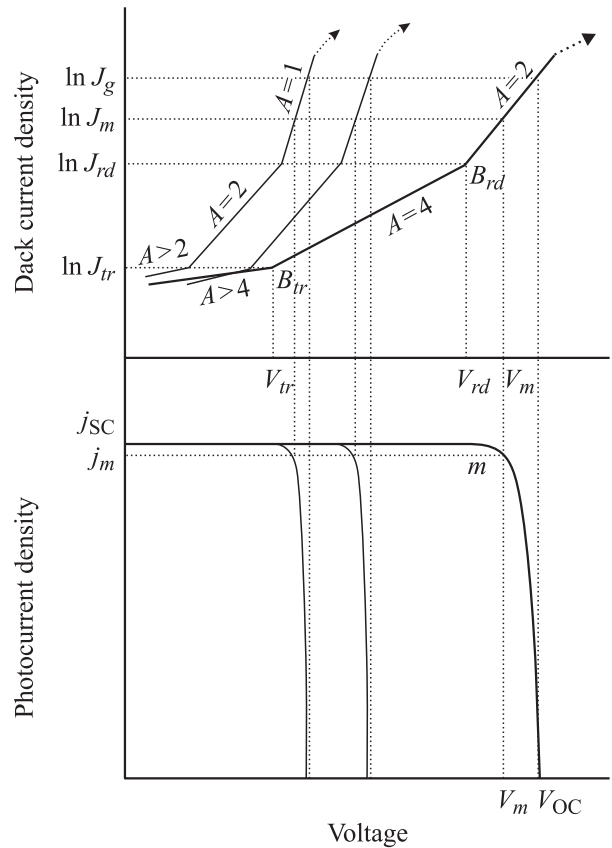


Рис. 1. Структура темновых $J-V_j$ и световых $j-V_j$ характеристик двух одиночных фотоактивных $p-n$ -переходов и тандема, составленного из них.

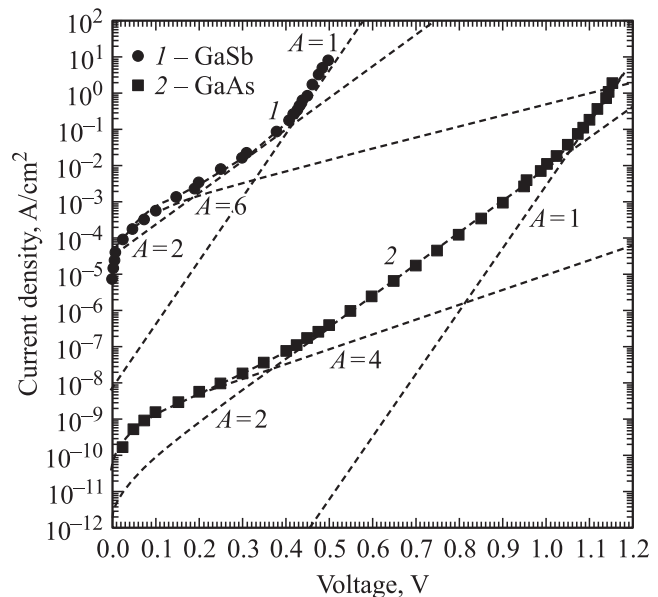


Рис. 2. Безрезистивные темновые $J-V_j$ -характеристики $p-n$ -переходов из GaSb (1) и GaAs (2).

$(J_g - V_{OC})$ принимают вид

$$j = J_g - (J_{0r} \exp q(V + jR_S)/2kT + J_{0d} \exp q(V + jR_S)/kT), \quad (3)$$

где j — плотность тока через нагрузку

$$J_g = J_{0r} \exp \frac{qV_{OC}}{2kT} + J_{0d} \exp \frac{qV_{OC}}{kT}. \quad (4)$$

Вид характеристики $J_g - V_{OC}$ (4) в точности такой же, как и у искомой темновой безрезистивной $J - V_j$ -характеристики (2), что в дальнейшем дает основание для формальных замен $J_g \rightarrow J$, $V_{OC} \rightarrow V_j$ при преобразовании фотовольтаической характеристики $P - V_{OC}$ (интенсивность освещения–напряжение холостого хода) в искомую $J - V_j$.

2.2. Получение темновой безрезистивной характеристики ток–напряжение ($J - V_j$)

2.2.1. Характеристика интенсивность освещения–напряжение холостого хода ($P - V_{OC}$). Данная $P - V_{OC}$ -характеристика преобразуется из $J - V_j$ -характеристики (2), которая эквивалентна характеристике $J_g - V_{OC}$ (4). Фотогенерируемый ток J_g пропорционален интенсивности освещения $P = \chi \cdot J_g$ и из уравнения (4) получим $P - V_{OC}$:

$$P = P_{0r} \exp \frac{qV_{OC}}{2kT} + P_{0d} \exp \frac{qV_{OC}}{kT}, \quad (5)$$

где $P_{0r} = \chi J_{0r}$, $P_{0d} = \chi J_{0d}$.

2.2.2. Характеристика интенсивность электролюминесценции–прямой ток ($L - J$). Эта $L - J$ -характеристика, так же как $P - V_{OC}$ (4), преобразуется из темновой безрезистивной $J - V_j$ (2). Как хорошо известно [6], интенсивность межзонной и квазимежзонной электролюминесценции L выражается через безрезистивное напряжение V_j такой же зависимостью, как и диффузионный темновой ток:

$$V_j = \frac{kT}{q} \ln L/L_0. \quad (6)$$

Для рабочего участка, подставив (6) в (2), получим $J - L$ -характеристику:

$$J = k_r \sqrt{L} + k_d L, \quad (7a)$$

где

$$k_r = J_{0r}/\sqrt{L_0}, \quad a \quad k_d = J_{0d}/L_0. \quad (7b)$$

2.2.3. Преобразование $P - V_{OC}$ - и $J - L$ -характеристик в искомую темновую безрезистивную $J - V_j$ -характеристику. Обе рассматриваемые характеристики $P - V_{OC}$ и $J - L$ не зависят от последовательного сопротивления $p - n$ -структуры и были преобразованы

(разд. 2.2.1 и 2.2.2) из темновой безрезистивной $J - V_j$. Поэтому экспериментально полученные $P - V_{OC}$ и $J - L$ зависимости можно преобразовать обратно в искомую безрезистивную $J - V_j$ -характеристику, если определить параметры преобразования χ для $P - V_{OC}$ (разд. 2.2.1) и L_0 для $J - L$ (разд. 2.2.2) способом, который использован в данной работе (разд. 3). Способ пригоден только для однопереходных солнечных элементов. Он использует шивку с непосредственно измеренной темновой $J - V_j$ -характеристикой на рекомбинационном участке, где еще не сказывается влияние R_S . Определив на этом участке J_{0r} , найдем соответственно параметры преобразования — χ для $P - V_{OC}$ - и L_0 для $J - L$ -характеристик, т. е. $\chi = \frac{P_{0r}}{J_{0r}}$, $L_0 = (J_{0r}/k_r)^2$. Более того, даже не делая указанных преобразований, можно ограничиться вычислением J_{0d} — диффузионного предэкспоненциального множителя, необходимого для расчета потенциальной эффективности (разд. 2.4) на диффузионном участке:

$$J_{0d} = \frac{P_{0d}}{\chi} = J_{0r} \frac{P_{0d}}{P_{0r}} \quad \text{из } (P - V_{OC}), \quad (8a)$$

$$J_{0d} = k_d L_0 = k_d \left(\frac{J_{0r}}{k_r} \right)^2 \quad \text{из } (J - L). \quad (8b)$$

2.3. Безрезистивные темновая и световая ток–напряжение характеристики многопереходного солнечного элемента

Если в многопереходном солнечном элементе все $p - n$ -переходы электрически соединены последовательно, то напряжения на каждом из $p - n$ -переходов суммируются. Каждый из участков темновой безрезистивной $J - V_j$ -характеристики (2) имеет вид

$$V_j = A \frac{kT}{q} \ln \frac{J}{J_0} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J}{J_0} \right)^A, \quad \text{где } A = 1 \quad \text{или} \quad 2. \quad (9)$$

Сумма безрезистивных напряжений на $p - n$ -переходах есть безрезистивное напряжение на МСЭ:

$$V_{jMJ} = \frac{kT}{q} \sum_{k=1}^n \ln \left(\frac{J}{J_{0k}} \right)^{A_k} = \frac{kT}{q} \ln \prod_{k=1}^n \left(\frac{J}{J_{0k}} \right)^{A_k} \\ = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J}{J_{0MJ}} \right)^{A_{MJ}} = A_{MJ} \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J}{J_{0MJ}} \right), \quad (10a)$$

где

$$A_{MJ} = A_1 + A_2 + \dots + A_n, \quad J_{0MJ} = (J_{01}^{A_1} J_{02}^{A_2} \dots J_{0n}^{A_n})^{1/A_{MJ}}. \quad (10b)$$

Таким образом, для МСЭ темновая безрезистивная $J - V_j$ -характеристика состоит из набора экспоненциальных участков (10a), как и у одиночного $p - n$ -перехода (9) (рис. 1). Поэтому целесообразно использовать понятие результирующего $p - n$ -перехода, имитирующего последовательно соединенные $p - n$ -переходы на каждом из

экспоненциальных участков темновой результирующей безрезистивной $J-V_{MJ}$ -характеристики.

В частности, если на рассматриваемом участке результирующей характеристики все встроенные фотоактивные $p-n$ -переходы имеют одинаковый диодный коэффициент ($A = 1$ или 2), то результирующий диодный коэффициент увеличивается в n раз, $A_{MJ} = nA$, а результирующий предэкспоненциальный множитель — есть среднее геометрическое соответствующих предэкспоненциальных множителей, $J_{0MJ} = \sqrt[n]{J_{01} \cdot J_{02} \cdot \dots \cdot J_{0n}}$. Если при освещении МСЭ, например солнечным светом, обеспечить согласование по току, т.е. обеспечить равенство фотогенерируемых токов, текущих через каждый последовательно включенный $p-n$ -переход $J_{g1} = J_{g2} = \dots = J_{gn} = J_{gMJ}$, то для описания световой (нагрузочной) $j-V$ -характеристики МСЭ также можно использовать понятие результирующего $p-n$ -перехода. Для МСЭ на каждом из рассматриваемых участков световая (нагрузочная) безрезистивная ($R_S = 0$) характеристика ток—напряжение имеет такой же вид, как и для однопереходного СЭ (3):

$$j = J_g - J_{0MJ} \exp\left(\frac{qV_j}{A_{MJ}kT}\right). \quad (11)$$

Следовательно, при согласовании по фотогенерируемому току эффективность многопереходных и однопереходных СЭ можно вычислять одним и тем же способом (разд. 2.4), применимым для моноэкспоненциальных участков (рис. 1) темновой $J-V_j$ -характеристики.

2.4. Характеристика эффективности—фотогенерируемый ток ($\eta-J_g$)

Выведем уравнение, связывающее фотогенерируемый ток J_g ($\propto C$) и эффективность (кпд) η . При стандартном подходе ($R_S = 0$) [4] анализируется отдельно каждый экспоненциальный участок выражения (11). В рабочей точке (точке оптимальной нагрузки) выделяемая удельная мощность $P = j \cdot V_j$ максимальна. Приравнивание к нулю производной $\frac{d}{dV_j}(j \cdot V_j) = 0$, где j дается уравнением (11), приводит, как известно [4,7], к трансцендентному уравнению, связывающему напряжение холостого хода V_{OC} и безрезистивное напряжение в рабочей точке V_m :

$$u_{OC} = \ln(1 + u_m) + u_m, \quad (12a)$$

или

$$\exp u_{OC} = (1 + u_m) \exp u_m, \quad (12b)$$

где использованы безразмерные величины: $u_m = \frac{qV_m}{AkT}$, $u_{OC} = \frac{qV_{OC}}{AkT}$. Согласно (4), имеем

$$J_g = J_0 \exp u_{OC}, \quad (13)$$

в рабочей точке (j_m, u_m), согласно (11),

$$j_m = J_g - J_0 \exp u_m. \quad (14)$$

Подставляя $\exp(u_{OC})$ из (12б) в (13) и затем J_0 из (13) в (14), получим для плотности тока j_m :

$$j_m = J_g \left[1 - \frac{\exp u_m}{(1 + u_m) \exp u_m} \right] = J_g \frac{u_m}{1 + u_m}. \quad (15)$$

Следуя [4,8], выразим, используя (15), выделенную удельную мощность через фотогенерируемый ток и эффективное напряжение V_η , т.е. $P_m = j_m V_m = J_g V_\eta$, где

$$V_\eta = \frac{AkT}{q} \frac{u_m^2}{1 + u_m}. \quad (16)$$

Следовательно, эффективность $\eta = \frac{P_m}{P_{inc}}$ выражается через отношение эффективного напряжения к переводному напряжению V_{conv} ,

$$\eta = \frac{V_\eta}{V_{conv}}, \quad (17)$$

где $V_{conv} = \frac{P_{inc}}{J_g} = \left(\frac{P_{inc}}{J_g}\right)_{C=1}$, где P_{inc} — плотность мощности падающего на СЭ оптического излучения. Переводное напряжение V_{conv} не зависит от интенсивности освещения и, следовательно, кратности концентрирования солнечного излучения, так как $J_g \propto P_{inc} \propto C$, но определяется спектральным составом падающего и поглощаемого оптического излучения (АМ0, АМ1.5, лазер и др.). Фотогенерируемый ток J_g выражается через эффективность η . Из (16) следует, что

$$u_m = \frac{1}{2}(u_\eta + \sqrt{u_\eta(u_\eta + 4)}), \quad (18a)$$

где

$$u_\eta = \frac{qV_\eta}{AkT}. \quad (18b)$$

Равенства (13), (12б) и (18a) для $J_g \propto C$ и (17), (18b) для $V_\eta \propto \eta$ дают в результате искомое уравнение:

$$J_g = J_0 \left(1 + \frac{u_\eta + \sqrt{u_\eta(u_\eta + 4)}}{2} \right) \exp \frac{u_\eta + \sqrt{u_\eta(u_\eta + 4)}}{2}, \quad (19a)$$

где

$$u_\eta = \frac{qV_{conv}}{AkT} \eta. \quad (19b)$$

Полученное уравнение (19a) будет использовано далее (разд. 4) для построения зависимости $V_\eta(\propto \eta)$ от $J_g(\propto C)$ на различных участках рассматриваемых темновых безрезистивных $J-V_j$ -характеристик. Влияние последовательного сопротивления R_S на эффективность учитывается путем корректировки уравнения (19b): вводится поправка $J_g R_S$, справедливая при $J_g < \frac{V_{OC}}{2R_S}$ и несущественная при $R_S \rightarrow 0$,

$$u_\eta = \frac{q(\eta \cdot V_{conv} + J_g R_S)}{AkT}. \quad (19b)$$

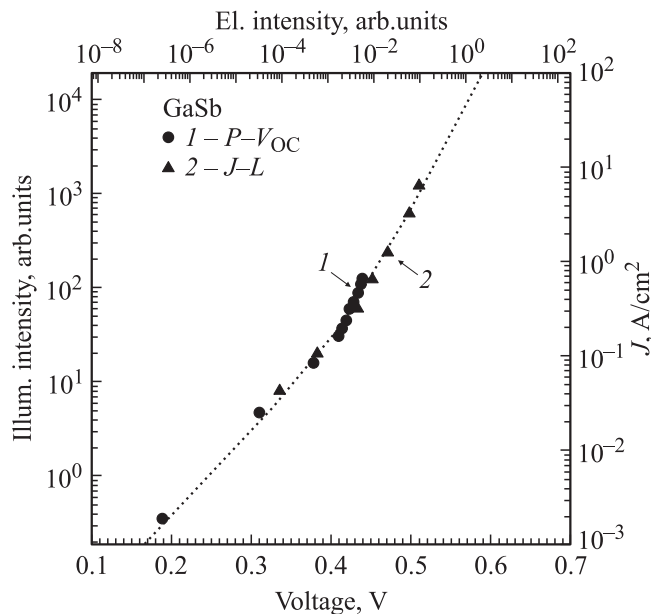


Рис. 3. Фотовольтаическая $P-V_{OC}$ (1) и электролюминесцентная $J-L$ (2) характеристики GaSb $p-n$ -перехода, преобразованные в безрезистивную темновую $J-V_j$ -характеристику.

3. Определение рекомбинационной и диффузионной компонент в фотоактивных $p-n$ -переходах из GaAs и GaSb

Вплоть до плотностей прямого тока $J < \frac{AkT}{qR_s}$, когда справедливо безрезистивное приближение, непосредственное измерение темновых тока и напряжения позволяет уверенно выявить только две компоненты (рис. 2): туннельно-ловушечную (избыточную, $A > 2$) и рекомбинационную ($A = 2$). Для рекомбинационной компоненты предэкспоненциальные множители составляют обычно при комнатных температурах $J_{0r} = (1-5) \cdot 10^{-11}$ А/см² (GaAs), $J_{0r} = (1-5) \cdot 10^{-5}$ А/см² (GaSb) [9]. При больших плотностях тока для точного определения диффузионной компоненты нами использованы результаты разд. 2.2.1 и 2.2.2 и дополнительно измерены две характеристики: фотовольтаическая $V_{OC}-P$ (разд. 3.1) и электролюминесцентная $L-J$ (п. 3.2), которые позволили получить полную безрезистивную $J-V_j$ -характеристику (рис. 2).

3.1. Характеристика напряжение холостого хода–интенсивность освещения ($V_{OC}-P$) в GaSb $p-n$ -переходах

GaSb $p-n$ -структуры освещались полупроводниковым лазером ($\lambda = 1.3$ мкм, $h\nu = 0.95$ эВ), создававшим освещенность до 3 Вт/см². Экспериментально полученные зависимости напряжения холостого хода V_{OC} от интенсивности освещения P (рис. 3) соответствуют уравнению (5) и, следовательно, дают параметры P_{0r} и P_{0d} .

Эти параметры комбинируются с J_{0r} , полученными из экспериментальной темновой $J-V$ -характеристики.

В результате из (8а) определены искомые диффузионные предэкспоненциальные множители $J_{0d} = (5-10) \cdot 10^{-9}$ А/см² (GaSb). Найден также параметр преобразования χ (разд. 2.2.3) и в результате характеристика $V_{OC}-P$ „сшита“ с темновой $J-V$ -характеристикой (рис. 2).

3.2. Характеристика интенсивность электролюминесценции–прямой ток ($L-J$) в GaAs и GaSb $p-n$ -переходах

Интегральная интенсивность люминесценции измерялась при комнатной температуре при пропускании через GaAs- и GaSb-структуры прямого импульсного тока ($\tau = 1$ мкс, $f = 1$ кГц), исключаяющего их нагрев. При использованных плотностях накачки ($10^{-2}-10^2$) А/см² в спектрах излучения доминировали полосы межзонной и близкой к ней краевой люминесценции, что дает основание использовать метод, изложенный ранее (разд. 2.2.2). Экспериментально полученная зависимость интенсивности электролюминесценции от тока в GaAs и GaSb $p-n$ -переходах (рис. 4) соответствовала уравнению (7а), т.е. $L-J$ -характеристика имела два степенных участка с показателями степени 2 и 1, которые равны диодным коэффициентам соответствующей темновой безрезистивной $J-V_j$ -характеристики (2). Параметры k_r и k_d уравнения (7а), как показано ранее (разд. 2.2.3), комбинируются с предэкспоненциальными множителями J_{0r} , полученными из темновой $J-V$. В результате определены из (8б) искомые диффузионные предэкспоненциальные множители, $J_{0d} = (1-10) \cdot 10^{-20}$ А/см² (GaAs) и $J_{0d} = (5-10) \cdot 10^{-9}$ А/см² (GaSb). Определен параметр преобразования L_0 (разд. 2.2.3) и в результате

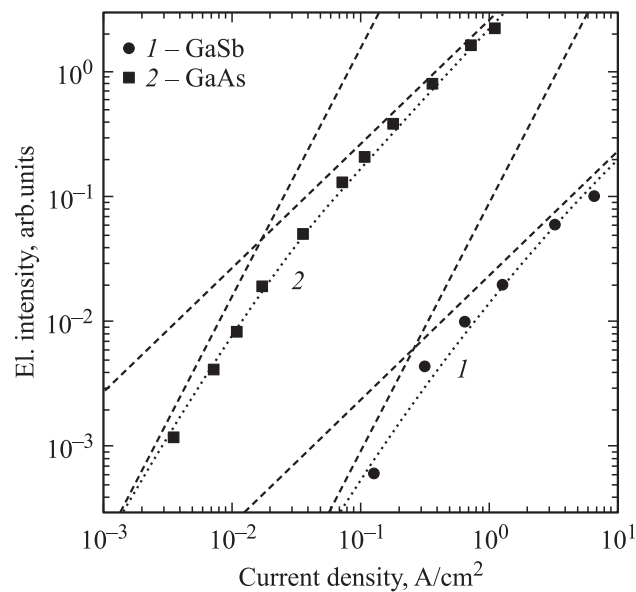


Рис. 4. Электролюминесцентные $J-L$ -характеристики $p-n$ -переходов из GaSb (1) и GaAs (2).

характеристика $\lg J - \lg L$ „счита“ с темновой $\lg J - V$ (рис. 2).

4. Потенциальная эффективность солнечных элементов на основе GaAs и GaSb $p-n$ -переходов

4.1. Зависимость потенциальной эффективности СЭ от фотогенерируемого тока ($\eta - J_g$)

Под потенциальной эффективностью здесь подразумевается эффективность однопереходного СЭ либо МСЭ, состоящего из $p-n$ -переходов, имеющих реальные и варьируемые величины предэкспоненциальных множителей и диодных коэффициентов при идеализированных условиях: внешний квантовый выход при генерации фототока равен единице ($\gamma = 1$); СЭ имеет нулевое последовательное сопротивление ($R_s = 0$). Потенциальная эффективность СЭ растет с ростом фотогенерируемого тока [4] и, следовательно, с кратностью концентрирования падающего светового излучения. Используя уравнения (19 а, б), получены и показаны на рис. 5 зависимости между эффективным напряжением V_η и плотностью фототока J_g для GaAs и GaSb $p-n$ -переходов, а также для GaAs/GaSb тандема, составленного из этих последовательно соединенных $p-n$ -переходов. В этом случае

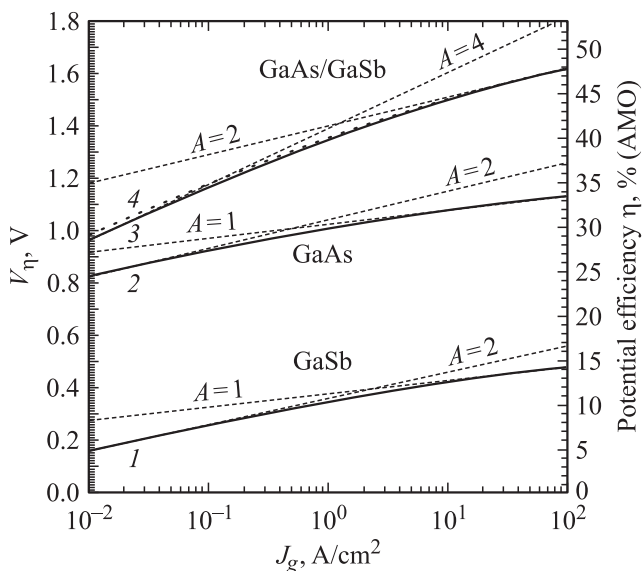


Рис. 5. Зависимость эффективного напряжения V_η и потенциальной эффективности η от фотогенерируемого тока для $p-n$ -переходов из GaSb (1), GaAs (2) и тандема GaAs/GaSb (3); кривая 4 — сумма эффективностей одиночных $p-n$ -переходов из GaSb (1), GaAs (2). Использованные предэкспоненциальные множители: GaSb ($J_{0r} = 3.7 \cdot 10^{-5} \text{ A/cm}^2$, $J_{0d} = 5.5 \cdot 10^{-9} \text{ A/cm}^2$), GaAs ($J_{0r} = 1.4 \cdot 10^{-11} \text{ A/cm}^2$, $J_{0d} = 1.2 \cdot 10^{-20} \text{ A/cm}^2$); тандем GaAs/GaSb ($J_{0r} = 4.5 \cdot 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, $J_{0d} = 4.1 \cdot 10^{-16} \text{ A/cm}^2$).

Таблица 1.

Флюенс протонов, $F_p, \text{ см}^{-2}$	Потенциальная эффективность, η ($C = 1, \text{ AM0}$)		
	GaAs	GaSb	GaAs/GaSb
0	26.1	6.2	32
$3 \cdot 10^{10}$	24.6	5	28.9
$3 \cdot 10^{11}$	23.9	3.5	26.5
$3 \cdot 10^{12}$	22.2	2.5	23.5

Примечание. Энергия протонов $E_p = 6.78 \text{ МэВ}$.

(рис. 5) токовые границы B_{rd} (рис. 1) между рекомбинационным и диффузионным участками для GaAs и GaSb $p-n$ -переходов практически совпадают (рис. 2). В общем случае эти границы могут не совпадать. На рис. 5 два участка кривой $J_g - \eta$ соответствуют рекомбинационному (нижний участок) и диффузионному (верхний участок) механизмам протекания тока. Так как число переходов $n = 2$, то, согласно (10б), на нижнем участке диодный коэффициент $A_{MJ} = 4$, а предэкспоненциальный множитель $J_{0r(MJ)} = \sqrt{J_{0r(\text{GaAs})} J_{0r(\text{GaSb})}}$, на верхнем участке $A_{MJ} = 2$, $J_{0d(MJ)} = \sqrt{J_{0d(\text{GaAs})} J_{0d(\text{GaSb})}}$. Зависимости потенциальных эффективностей от фототока $J_g (\propto C)$ получены умножением V_η на коэффициент пропорциональности $1/V_{\text{conv}}$ (17), соответствующий конкретным условиям освещения (AM0). При условии, что последовательно включенные $p-n$ -переходы из GaAs и GaSb хорошо согласованы по току, переводной коэффициент $1/V_{\text{conv}}$ один и тот же для всех трех рассматриваемых случаев, $V_{\text{conv}} = \frac{P_{\text{inc}}}{J_g} = 3.4 \text{ В}$, $P_{\text{inc}}|_{C=1} = 136.5 \text{ мВт/см}^2$, $J_g|_{C=1} = 40 \text{ мА/см}^2$ (расчетный при $\gamma = 1$).

Кривые, представленные на рис. 5, получены по аналогии с темновой безрезистивной $J - V_j$, а именно суммированием фотогенерируемых токов, рассчитанных отдельно при использовании рекомбинационных или диффузионных параметров. Отметим, что сумма потенциальных эффективностей автономно работающих (подключенных к независимым нагрузкам) СЭ на основе GaAs и GaSb $p-n$ -переходов несколько больше эффективности GaAs/GaSb тандема (рис. 5, табл. 1). Это справедливо при условии, что автономно работающий GaSb $p-n$ -переход находится в тех же условиях освещенности, что и в тандеме GaAs/GaSb, т. е. спектр падающего излучения ограничен с коротковолновой стороны условием прохождения через GaAs-фильтр.

4.2. Снижение потенциальной эффективности (кпд) СЭ при радиационной деградации $J - V_j$ -характеристики

Увеличение предэкспоненциального множителя J_0 , в том числе и результирующего J_{0MJ} (10б), ведет к уменьшению эффективности η , как это видно из (19).

Таблица 2.

Флюенс электронов, F_e см ⁻²	Рекомбинационный предэкспоненциальный множитель, J_{0r} А/см ²	Потенциальная эффективность, η ($C = 1$, AM0) %
0	$1.3 \cdot 10^{-11}$	26.2
$3 \cdot 10^{14}$	$2.6 \cdot 10^{-11}$	25.3
$3 \cdot 10^{15}$	$6.9 \cdot 10^{-11}$	23.9
$3 \cdot 10^{16}$	$1.9 \cdot 10^{-10}$	22.5

Примечание. Энергия электронов $E_e = 1$ МэВ; GaAs $p-n$ -переход.

На практике причинами увеличения J_0 в фотоактивных $p-n$ -переходах могут быть условия роста структур СЭ, постростовые технологические факторы, а также действие повреждающих радиационных облучений.

Облучение высокоэнергетическими протонами и электронами фотоактивных $p-n$ -переходов из GaAs и GaSb увеличивает рекомбинационный предэкспоненциальный множитель J_{0r} [9]. Как видно из рис. 5, именно J_{0r} определяет эффективность GaAs и GaSb фотоактивных $p-n$ -переходов при неконцентрированном ($C \leq 1$) солнечном облучении. Поэтому при $C = 1$ снижение расчетной потенциальной эффективности обусловлено главным образом ростом J_{0r} . В табл. 1 приведены результаты расчета потенциальной эффективности $p-n$ -переходов из GaAs и GaSb и тандема на основе этих $p-n$ -переходов при 6.78 МэВ протоном облучения. В табл. 2 приведены соответствующие результаты для $p-n$ -переходов из GaAs при 1 МэВ электронном облучении. Использованный при расчетах эффективностей (табл. 1, 2) фотогенерируемый ток $J_g = 40$ мА/см² соответствует идеализированному фототоку при $C = 1$, AM0. Значения J_{0r} взяты из работы [9]. В отличие от предыдущего (разд. 4.1) расчет производится не по уравнению (19 а, б), а путем последовательного вычисления следующих величин: u_{OC} — из равенства (13), u_m — из решения трансцендентного уравнения (12), V_η — из (16) и η — из (17).

5. Заключение

Как показано, многопереходные солнечные элементы имеют структуру темновой безрезистивной $J-V_j$ -характеристики такую же, как и у однопереходных солнечных элементов: темновой ток складывается из экспоненциальных компонент, каждая из которых задана своим предэкспоненциальным множителем $J_{0(MJ)}$ и своим диодным коэффициентом A_{MJ} . Это сходство характеристик позволило использовать и развить один и тот же аналитический метод для расчета эффективности как для однопереходных, так и многопереходных солнечных элементов.

Выведено уравнение, связывающее фотогенерируемый ток и эффективность СЭ при заданных значениях предэкспоненциальных множителей J_0 и диодных коэффи-

циентов A , определяемых из темновой безрезистивной $J-V_j$ -характеристики СЭ. Как следствие, согласованный фотогенерируемый ток имеет столько же компонент, сколько и темновой, и по предположению складывается аналогично темновому из соответствующих компонент.

Для $p-n$ -переходов из GaAs и GaSb получены безрезистивные (не учитывающие последовательное сопротивление структуры) $J-V_j$ -характеристики, из которых сформирована $J-V_j$ -характеристика GaAs/GaSb тандема. Полученные характеристики использованы для расчета потенциальной эффективности (т.е. при идеализации: внешний квантовый выход равен единице и последовательное сопротивление равно нулю).

Установлено, что при уменьшении интенсивности освещения в фотогенерируемом токе возрастает вклад рекомбинационной компоненты. Следовательно, при неконцентрированном солнечном излучении ($C = 1$) эффективность СЭ определяется в основном рекомбинационным механизмом протекания тока.

Облучение 1 МэВ электронами и 6.78 МэВ протонами увеличивает рекомбинационный предэкспоненциальный множитель, что приводит к снижению эффективности при неконцентрированном солнечном излучении.

Как следует, в частности, из выведенного уравнения (19), эффективность как для однопереходного, так и многопереходного СЭ уменьшается с увеличением предэкспоненциального множителя J_0 , в том числе и результирующего $J_{0(MJ)}$. Соответственно уменьшается эффективность η для GaAs и GaSb $p-n$ -переходов и образованного из них GaAs/GaSb тандема.

Для однопереходных и многопереходных солнечных элементов, при освещении неконцентрированным солнечным излучением ($C = 1$), эффективность МСЭ определяется в основном рекомбинационным механизмом протекания тока, хотя в некоторых случаях необходимо учитывать также влияние туннельно-ловушечного механизма, проявляющегося преимущественно в широкозонном фотоактивном $p-n$ -переходе МСЭ.

Авторы благодарят проф. В.Д. Румянцеву за плодотворные обсуждения и конструктивные замечания, Г.В. Ильменкова и Ю.М. Шернякова за помощь в работе.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований проект № 07-08-13526.

Список литературы

- [1] А.Б. Гучмазов, Х.-А. Родригес, В.Д. Румянцев. ФТП, **25** (1), 143 (1991).
- [2] V.S. Kalinovskiy, V.M. Andreev, V.V. Evstropov, N.A. Kaluzhniy, V.P. Khvostikov, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov. Proc. 22nd Europ. Photovoltaic Solar Energy Conference (Milan, Italy, 2007) p. 675.
- [3] V.S. Kalinovskiy, V.M. Andreev, V.V. Evstropov, V.P. Khvostikov, V.M. Lantratov. Proc. 3rd World Conf. Photovolt. Energy Conv. (Osaka, Japan, 2003) Paper 3pb534.

- [4] В.М. Андреев, В.А. Гриликес, В.Д. Румянцев. *Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения* (Л., Наука, 1989) гл. 1.4. [Пер. на англ. V.M. Andreev, V.A. Grilikhes and V.D. Romyantsev. *Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight* (John Wiley & Sons Ltd., 1997) ch. 1.4].
- [5] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) кн. 2, гл. 14.2. [Пер. с англ.: S.M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices* (John Wiley & Sons, 1981) ch. 14.2].
- [6] M. Gershenson, R.A. Logan, D.F. Nelson. *Phys. Rev.*, **149**, 580 (1966).
- [7] W. Shockley, H.J. Queisser. *J. Appl. Phys.*, **32** (3), 510 (1961).
- [8] С.Н. Henry. *J. Appl. Phys.*, **51** (3), 4494 (1980).
- [9] В.М. Андреев, В.В. Евструпов, В.С. Калиновский, В.М. Лантратов, В.П. Хвостиков. *ФТП*, **41** (6), 756 (2007).

Редактор Л.В. Беляков

Current flow and potential efficiency of solar cells based on GaAs and GaSb $p-n$ -junctions

V.M. Andreev, V.V. Evstropov, V.S. Kalinovskiy,
V.M. Lantratov, V.P. Khvostikov

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

Abstract Studied was the dependence of the efficiency of multijunction solar cells and singlejunction solar cells on the current flow mechanism in photovoltaic $p-n$ -junctions, namely of the dark current–voltage ($J-V$) characteristic shape. The multijunction solar cell resistanceless (not allowing for the series resistance) $J-V_j$ characteristic has the some shape as that of a single-junction solar cell: a set of exponential portions. This allowed developing a common analytical method for calculating the efficiency of single- and multi-function solar cells.

The equation binding up the efficiency and the photogenerated current on every portion of the $J-V_j$ characteristic has been derived. For the GaAs and GaSb $p-n$ -junctions the dark $J-V$, illumination intensity–open current voltage $P-V_{OC}$, luminescence intensity–forward current $L-J$ characteristics have been studied. Plotted were the rated dependencies of the potential (at the idealized condition when the external quantum yield is equal to unity) efficiency on the photogenerated current for singlejunction GaAs and GaSb solar cells and GaAs/GaSb tandem. The shapes of these dependences correspond to the $J-V_j$ characteristic shape: there are the diffusion and recombination portions, and in some cases tunnel-trap one. At low sunlight concentration ratios ($C < 10$), essential contribution into the photogenerated current comes from the recombination component. Just the increase of this component at high-power 6.78 MeV proton and 1 MeV electron irradiation defines the drop of the efficiency in converting the nonconcentrated sunlight.