

Влияние дисбаланса фотогенерированных токов на вольт-амперные характеристики многопереходных солнечных элементов

© М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: mamint@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 12 мая 2023 г.

В окончательной редакции 21 июля 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Исследовано влияние эффекта дисбаланса фотогенерированных токов на вольт-амперные и фотовольтаические характеристики многопереходных солнечных элементов. Показано, что эффект дисбаланса вызывает отклонение световых вольт-амперных характеристик от логарифмической формы. При этом фотовольтаические зависимости, определяемые режимами холостого хода и оптимальной нагрузки (включая эффективность и фактор заполнения вольт-амперных характеристик), остаются логарифмическими, но смещенными относительно случая баланса фотогенерированных токов на постоянные значения. Экспериментально указанное поведение характеристик зарегистрировано для трехпереходного GaInP/GaAs/Ge солнечного элемента.

Ключевые слова: дисбаланс фотогенерированных токов, вольт-амперные характеристики, многопереходные солнечные элементы.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.23.56849.171A

Работа посвящена влиянию эффекта дисбаланса фотогенерированных токов многопереходных (МП) солнечных элементов (СЭ) на световые вольт-амперные характеристики (ВАХ) и фотовольтаические (ФВ) зависимости, получаемые из анализа световых ВАХ. К указанным характеристикам обычно относятся зависимости от уровня освещенности или от фотогенерированного (ФГ) тока таких величин, как напряжение холостого хода (V_{oc}), напряжение оптимальной нагрузки (V_m), эффективность, коэффициент заполнения, максимальная вырабатываемая мощность. В солнечной фотовольтаике проблема дисбаланса ФГ-токов обычно рассматривается как фактор, отрицательно влияющий на КПД прибора. Поэтому значительная часть разработок посвящена поиску таких конструкций приборов, при которых все или часть субэлементов будут находиться в токовом балансе [1–4]. При этом не рассматривается другой важный эффект, связанный с дисбалансом ФГ-токов, — изменение вида световых ВАХ. Частично этот вопрос упомянут в работах [5,6], где рассмотрена проблема связи между несколькими световыми вольт-амперными характеристиками МП СЭ. Отметим, что для однопереходных фотопреобразователей такая связь является простой: характеристики сдвигаются на разный ФГ-ток относительно темновой ВАХ. В МП СЭ при дисбалансе ФГ-токов такая связь нарушается. В настоящей работе этот эффект исследован модельно: при помощи аналитической модели, представленной в [7], с последующей экспериментальной проверкой для трехпереходного GaInP/GaAs/Ge СЭ. Основной вывод — дисбаланс ФГ-токов отклоняет световую ВАХ от логарифмического вида. Важность этого вывода связана с тем, что существует большое число аналитических подхо-

дов, применяющих однопереходные модели (в которых ВАХ полагается имеющей логарифмическую форму) к МП СЭ [5,6,8–11]. Следует отметить, что основные ФВ-зависимости сохраняют логарифмический вид, но смещаются относительно случая баланса ФГ-токов (это подтверждается анализом положения точек режима холостого хода и оптимальной нагрузки на световых ВАХ, так как именно эти точки определяют все основные ФВ-характеристики).

При последовательном соединении субэлементов полная ВАХ (т.е. для всего МП СЭ) получается „вольт-товым сложением“ ВАХ субэлементов (сложением напряжений при одинаковых токах). При этом в случае, когда субэлементы генерируют одинаковый ФГ-ток (случай баланса ФГ-токов), ВАХ всегда состоит из линейных участков (сегментов) в логарифмическом по току масштабе. В работе на основании методики описания вольт-амперной характеристики МП СЭ [7] используется моноэкспоненциальное выражение для каждого сегмента ВАХ с дисбалансной вольтовой добавкой, которая обращается в нуль при полном балансе ФГ-токов. Далее эта модель применена для расчета ВАХ.

Для простоты анализа расчет сделан для двухпереходного СЭ, токи $p-n$ -переходов которого определяются только диффузионным механизмом протекания. В качестве субэлементов выбраны GaInP и GaAs, в которых ФГ-токи при единичной кратности составляли $J_{g,1} = 0.015 \text{ A/cm}^2$ и $J_{g,2} = 0.02 \text{ A/cm}^2$. Диффузионные токи насыщения принимались равными $J_{01} = 1 \cdot 10^{-25} \text{ A/cm}^2$ и $J_{01} = 1 \cdot 10^{-20} \text{ A/cm}^2$ для GaInP и GaAs $p-n$ -переходов соответственно. Согласно [7], вольт-амперная характеристика МП СЭ получалась при

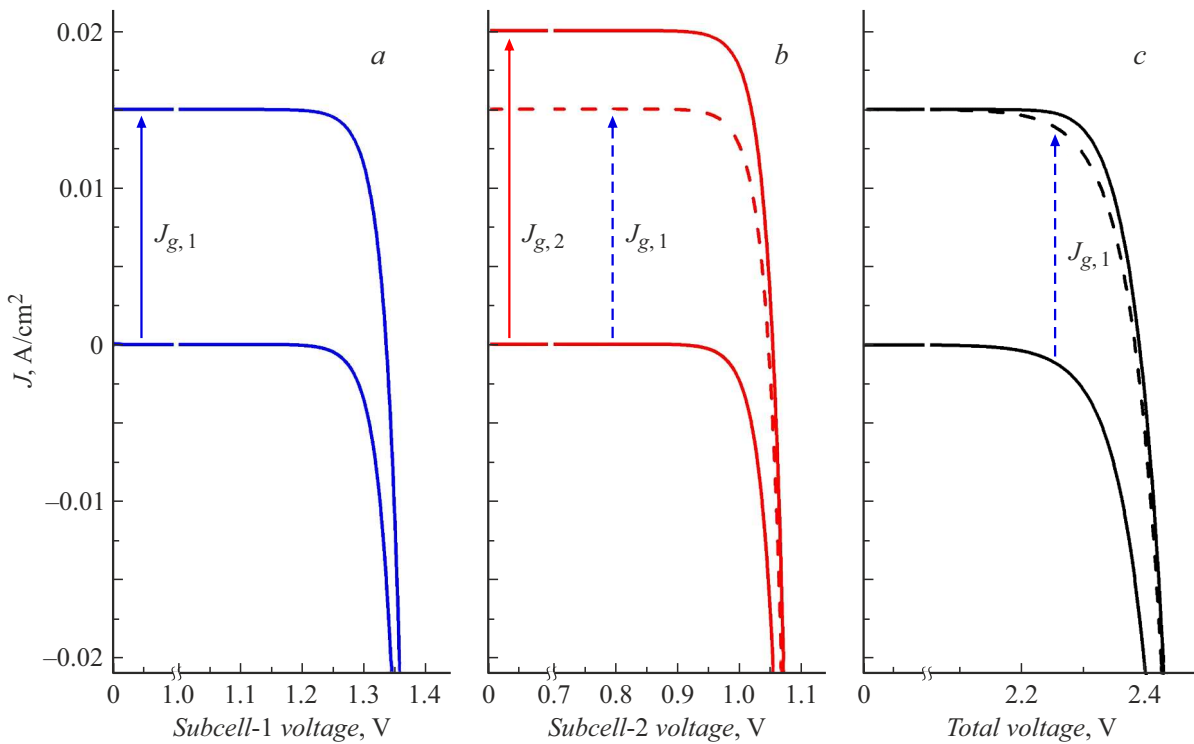


Рис. 1. Расчет набора ВАХ для субэлементов и МП СЭ моделируемой структуры. *a* — верхний GaInP-субэлемент, *b* — нижний GaAs-субэлемент, *c* — двухпереходный GaInP/GaAs СЭ. Нижние сплошные линии — темновые ВАХ. Верхние сплошные линии — световые ВАХ для условия дисбаланса ФГ-токов ($J_{g,GaInP} = 0.015 \text{ A/cm}^2$ и $J_{g,GaAs} = 0.02 \text{ A/cm}^2$). ВАХ, показанные штриховыми линиями, получены путем смещения темновой ВАХ на ток короткого замыкания СЭ.

помощи выражения

$$V(J) = \frac{AkT}{q} \ln \left[\frac{J_g - J}{J_0} \right] + \frac{kT}{q} \ln \left[\prod_{i=1}^n \left(\frac{\kappa_i J_g - J}{J_g - J} \right)^{A_i} \right]$$

$$= \frac{AkT}{q} \ln \left[\frac{J_g - J}{J_0} \right] + V_a, \quad (1)$$

где i — номер субэлемента, A_i — диодный коэффициент субэлемента, $A = \sum_{i=1}^n A_i$, $J_0 = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n J_{0,i}^{A_i}}$ — ток насыщения сегмента, $J_{0,i}$ — ток насыщения субэлемента, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, q — заряд электрона, κ_i — коэффициент дисбаланса субэлемента (равен отношению ФГ-тока субэлемента к ФГ-току СЭ), J_g — ФГ-ток СЭ. В (1) второе слагаемое (V_a) называется добавочным напряжением дисбаланса (обращается в нуль при полном балансе ФГ-токов).

На рис. 1 показан результат расчета ВАХ. Для обоих субэлементов (рис. 1, *a, b*) были рассчитаны две ВАХ: темновая и световая. Далее было проведено вольтовое сложение соответствующих ВАХ и получены суммарные темновая и световая характеристики двухпереходного СЭ (рис. 1, *c*). Также были получены и другие световые ВАХ — путем токового сдвига темновой ВАХ на величину тока короткого замыкания СЭ. Исходя из выбранных значений ФГ-ток первого субэлемента (на рис. 1 обозначен как $J_{g,1}$) является наименьшим и равен

току короткого замыкания СЭ. Поэтому ВАХ, полученная при операции сдвига, для данного субэлемента совпадает с его световой ВАХ. У второго субэлемента ФГ-ток выбран избыточным, поэтому сдвиг его темновой ВАХ на тот же ток приведет к получению ВАХ, представленной на рис. 1, *b* штриховой линией. Такой ВАХ обладал бы второй субэлемент в случае полного баланса ФГ-токов. Такая же операция сдвига была сделана и для общей ВАХ СЭ, результат показан штриховой линией на рис. 1, *c*. Из графических построений очевидно, что эта ВАХ является сбалансированной и может быть получена также путем вольтового сложения световой ВАХ первого субэлемента со световой ВАХ второго субэлемента в условиях баланса (показана штриховой линией).

Очевидно, что вольтовая разница световых ВАХ на рис. 1, *c* равна вольтовой разнице световых ВАХ второго субэлемента, обладающего избыточным током (рис. 1, *b*), и в соответствии с (1) описывается добавочным напряжением дисбаланса:

$$V_a = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{\kappa_i J_g - J}{J_g - J} \right), \quad (2)$$

где J_g — ФГ-ток МП СЭ, равный наименьшему из ФГ-токов (в рассматриваемом расчете $J_g = J_{g,1}$), $\kappa_i = \frac{J_{g,2}}{J_{g,1}}$ — коэффициент дисбаланса. В линейном по току масштабе (рис. 1, *b*) наличие добавочного напряжения

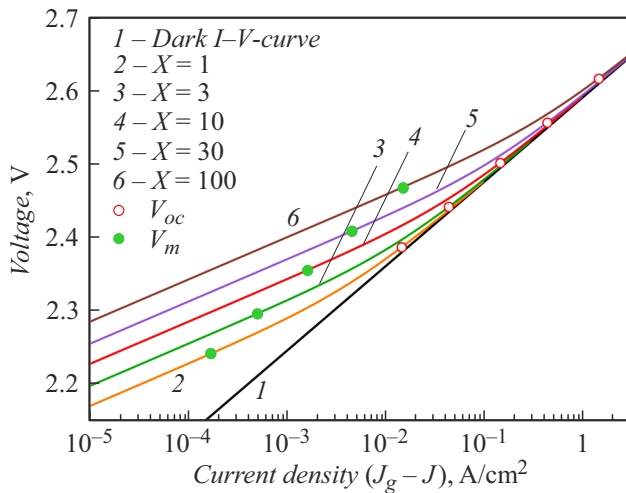


Рис. 2. Сравнение расчетных темновой (*Dark I-V-curve*) и световых ВАХ генераторной части моделируемой структуры МП СЭ. Световые ВАХ построены как функция $V(J_g - J)$, т.е. являются преобразованными ВАХ. Световые ВАХ получены для разных кратностей концентрирования падающего излучения X . Символами отмечены положения на световых ВАХ точек напряжения холостого хода (светлые кружки) и напряжения оптимальной нагрузки (закрашенные кружки).

незначительно изменяет форму световой ВАХ, однако по факту такое изменение характеристики критично для применения логарифмических моделей ВАХ. На рис. 2 приведено сравнение темновой и световых ВАХ, рассчитанных для разных кратностей концентрирования падающего излучения X (кривая с $X = 1$ соответствует световой ВАХ, приведенной на рис. 1, с). Сравнение проведено в логарифмическом по току масштабе. Для этого ток всех световых ВАХ уменьшен на величину ФГ-тока и взят с обратным знаком, что равно обратному сдвигу световой ВАХ. Такая операция для однопереходных СЭ приводит к совмещению световой и темновой ВАХ. Таким образом, если преобразовать все вольт-амперные зависимости $V(J)$ в зависимости $V(J_g - J)$ (где V — напряжение световой ВАХ, J_g — ФГ-ток, J — ток световой ВАХ), то полученные характеристики будут совпадать.

Поскольку в проводимых расчетах учитывался только один ток насыщения (диффузионный), общая вольт-амперная характеристика МП СЭ должна состоять из одного сегмента и выглядеть линейной функцией в логарифмическом по току масштабе. Из рис. 2 отчетливо видно, что этим критериям соответствует только темновая ВАХ, которая является сбалансированной по ФГ-токам характеристикой (все ФГ-токи равны нулю). Световые ВАХ значительно отклоняются, причем отклонение происходит в сторону увеличения напряжения с уменьшением тока, что является аномальным поведением ВАХ. Таким образом, можно заключить, что, несмотря на схожесть (в линейном по току масштабе) внешней формы световых вольт-амперных характеристик МП СЭ

с типичными ВАХ однопереходных СЭ, применение к первым классическим (многодиодных) моделей является некорректным. Отметим также, что при больших $J_g - J$ все световые характеристики сливаются. Это является следствием того, что при больших J в выражении (2) можно пренебречь J_g по сравнению с J . Тогда добавочное напряжение дисбаланса становится равным нулю.

Отдельно следует отметить поведение точек на ВАХ, соответствующих режимам напряжения холостого хода и напряжения оптимальной нагрузки (светлые и закрашенные кружки на рис. 2 соответственно). Видно, что эти ФВ-характеристики — $V_{oc}(J_g)$ и $V_m(J_g - J_m)$ — сохраняют логарифмическую форму и имеют вольтовый сдвиг относительно темновой ВАХ. В соответствии с оценками в [7] это связано с тем, что добавочное напряжение для точек напряжения холостого хода и оптимальной нагрузки — константы, не зависящие от кратности X . Строгое доказательство этого факта — задача дальнейших исследований. В настоящей работе для проверки наблюдаемого поведения как световых ВАХ, так и ФВ-зависимостей были измерены и построены экспериментальные характеристики (схожие с рассчитанными на рис. 2) для трехпереходного GaInP/GaAs/Ge СЭ. Характеристики представлены на рис. 3. Все измерения проводились в режиме меняющейся освещенности световым потоком AM1.5D.

Экспериментальные световые ВАХ отклоняются от темновой ВАХ схожим образом (как в расчете для рис. 2). При этом в представленном токовом диапазоне темновая ВАХ состоит из двух сегментов с разными диодными коэффициентами ($A = 12$ и 4). В соответствии с (1) на каждом сегменте добавочное напряжение дисбаланса различно, поэтому сдвиг точек V_{oc} и V_m должен

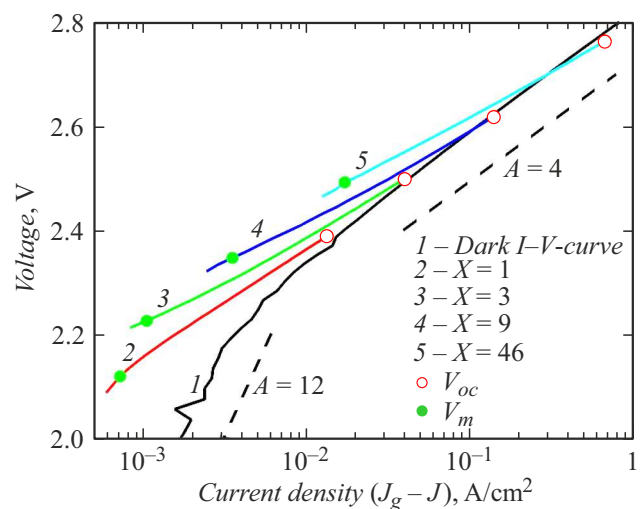


Рис. 3. Экспериментальные зависимости темновой и световых ВАХ генераторной части трехпереходного GaInP/GaAs/Ge СЭ. Все построения выполнены таким же образом, как для расчетных ВАХ на рис. 2. Штриховыми линиями показаны характеристики с диодными коэффициентами $A = 12$ и 4 .

различаться. Отметим, что малость сдвига для точки напряжения холостого хода не позволила наблюдать его экспериментально, в то время как для точки оптимальной нагрузки на каждом сегменте виден константный сдвиг характеристики $V_m(J_g - J_m)$ относительно темновой ВАХ.

Таким образом, в работе исследовано влияние эффекта дисбаланса ФГ-токов на световые ВАХ и положение точек напряжения оптимальной нагрузки и напряжения холостого хода на этих характеристиках. Отметим, что именно эти две точки определяют основные фотовольтаические зависимости СЭ, такие как фактор заполнения и КПД. Расчетно и экспериментально показано, что световые ВАХ при дисбалансе ФГ-токов отклоняются от типичной сегментной формы темновой ВАХ. При этом фотовольтаические зависимости V_{oc} и V_m остаются логарифмическими, но смещенными на близкую к постоянной вольтовой добавку в зависимости от сегмента ВАХ. Соответственно такого же поведения можно ожидать и от других характеристик, основанных на анализе точек оптимальной нагрузки и напряжения холостого хода, в том числе и для такой практически значимой характеристики, как эффективность СЭ. Следует отметить, что эффект дисбаланса фотогенерированных токов влияет на форму экспериментальных характеристик СЭ, что должно учитываться при их анализе.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Bonnet-Eymard, M. Boccard, G. Bugnon, F. Sculati-Meillaud, M. Despeisse, C. Ballif, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **117**, 120 (2013). DOI: 10.1016/j.solmat.2013.05.046
- [2] M. Wanlass, S.P. Ahrenkiel, R.K. Ahrenkiel, D.S. Albin, J.J. Carapella, A. Duda, J.F. Geisz, S. Kurtz, T. Moriarty, R.J. Wehrer, B. Wernsman, in *Conf. Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (IEEE, 2005), p. 530–535. DOI: 10.1109/PVSC.2005.1488186
- [3] M. Meusel, R. Adelhelm, F. Dimroth, A.W. Bett, W. Warta, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **10**, 243 (2002). DOI: 10.1002/pip.407
- [4] I. Garcia, R.M. France, J.F. Geisz, W.E. McMahon, M.A. Steiner, S. Johnston, D.J. Friedman, *IEEE J. Photovolt.*, **6**, 366 (2016). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2015.2501722
- [5] C. Dominguez, I. Antón, G. Sala, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **18**, 272 (2010). DOI: 10.1002/pip.965
- [6] E.F. Fernandez, G. Siefert, F. Almonacid, A.J. García Loureiro, P. Pérez-Higueras, *Solar Energy*, **92**, 221 (2013). DOI: 10.1016/j.solener.2013.03.012
- [7] M.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, V.V. Evstropov, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, A. Luque, *IEEE J. Photovolt.*, **5**, 1229 (2015). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2015.2416006
- [8] G.S. Kinsey, P. Hebert, K.E. Barbour, D.D. Krut, H.L. Cotal, R.A. Sherif, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* **16**, 503 (2008). DOI: 10.1002/pip.834
- [9] M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, S.A. Kozhukhovskaia, N.A. Kalyuzhnyy, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **917**, 052034 (2017). DOI: 10.1088/1742-6596/917/5/052034
- [10] В.М. Андреев, Е.А. Гребенщикова, П.А. Дмитриев, Н.Д. Ильинская, В.С. Калиновский, Е.В. Контрош, А.В. Малевская, А.А. Усикова, *ФТП*, **48** (9), 1249 (2014). [V.M. Andreev, E.A. Grebenshchikova, P.A. Dmitriev, N.D. Ilinskaya, V.S. Kalinovsky, E.V. Kontrosh, A.V. Malevskaya, A.A. Usikova, *Semiconductors*, **48** (9), 1217 (2014). DOI: 10.1134/S1063782614090024].
- [11] R. Adelhelm, K. Bucher, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **50**, 185 (1998). DOI: 10.1016/S0927-0248(97)00143-8