

07.2;07.3;08.3;09.1;13.1;13.4

Токовый инвариант как метод поиска оптимальной ширины запрещенной зоны субэлементов многопереходных солнечных элементов

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

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

E-mail: mamint@scell.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 23 октября 2023 г.

В окончательной редакции 28 ноября 2023 г.

Принято к публикации 28 ноября 2023 г.

Исследована возможность применения полуэмпирического выражения, определяющего величины основных токов насыщения p - n -перехода, для расчета эффективности многопереходных солнечных элементов. Выражение основывается на полученных ранее величинах токовых инвариантов: J_{Z1} — для тока насыщения J_{01} (коэффициент идеальности $A = 1$), J_{Z2} — для тока насыщения J_{02} ($A = 2$). Показано, что использование J_{Z1} и J_{Z2} позволяет значительно повысить точность расчетов относительно стандартных методов, основанных на модели солнечного элемента Шокли–Квиссера. Добавление в расчет тока насыщения J_{02} является новшеством. Показано, что учет J_{02} необходим для реалистичной оценки эффективности многопереходных солнечных элементов с количеством субэлементов больше двух.

Ключевые слова: солнечный элемент, ток насыщения, токовый инвариант, КПД.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.05.57182.19776

Концепция многопереходных (МП) солнечных элементов (СЭ) является активно развивающимся направлением современной фотовольтаики. Помимо классической технологии трехпереходных СЭ активно развиваются также четырех-, пятипереходные, а в последнее время и шестипереходные СЭ [1]. Существует ряд технологических подходов для создания структур МП СЭ [2], каждый из которых накладывает ограничение на выбор полупроводниковых материалов для изготовления субэлементов. Поэтому для каждого подхода выполняется поиск оптимального набора материалов субэлементов. Решение этой задачи требует оценки параметров МП СЭ в зависимости от комбинаций ширин запрещенных зон (ЗЗ) субэлементов.

В литературе представлен ряд работ, посвященных расчетам оптимальных ширин ЗЗ [3–9]. В своей основе они базируются на так называемом принципе детального баланса (detailed balance) — расчете, предложенном Шокли и Квиссером [10]. Используемые идеализации в модели детального баланса приводят к тому, что все методики расчета, основанные на данном методе, значительно завышают КПД СЭ. В случае солнечного спектра AM1.5 при преобразовании прямого солнечного излучения для однопереходных СЭ величина завышения может составлять порядка 4–7 абсолютных процента (в [3,9] расчет дает порядка 32.5%), что является значительной величиной на фоне КПД однопереходных СЭ (15–28% [1]). С увеличением числа субэлементов разница между расчетным и экспериментальным значениями эффективности увеличивается, достигая 17 абсолютных процентов. Так, в [3,6] расчет эффективности

дает порядка 40 и 56% для двух- и шестипереходных СЭ соответственно, при этом практически регистрируются значения порядка 33 и 39% для тех же МП СЭ [1].

Поиск метода расчета эффективности СЭ, дающего реалистичные значения, является актуальной задачей, решение которой позволит как оптимизировать существующие МП СЭ, так и более точно проектировать новые. В настоящей работе предложен и апробирован новый подход для расчета эффективности МП СЭ. Подход реализует идею, предложенную в [9], а именно использование для определения тока насыщения полуэмпирического выражения. При этом существенным новшеством является включение в расчет двух токов насыщения, определяющих два основных механизма протекания тока через p - n -переход. Первый ток насыщения (J_{01}) определяет ток с коэффициентом идеальности $A = 1$, протекающий за счет рекомбинации в квазинейтральных областях [11] либо за счет межзонной рекомбинации в области пространственного заряда. Второй ток насыщения (J_{02} , $A = 2$) определяет ток, протекающий за счет рекомбинации через глубокие уровни в области пространственного заряда [12]. Ранее методы, основанные на модели Шокли–Квиссера, позволяли вычислить только величину J_{01} , в то время как J_{02} часто значительно влияет на вольт-амперную характеристику СЭ. В качестве полуэмпирического подхода к вычислению токов насыщения был выбран подход, основанный на полученных ранее двух токовых инвариантах (J_{Z1} и J_{Z2}), устанавливающих зависимости обоих токов насыщения от ширины запрещенной зоны (E_g) и

температуры (T) [13–15]:

$$J_{0,A} = J_{ZA} \exp\left(\frac{-E_g}{AkT}\right), \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана, J_{Z1} и J_{Z2} — токовые инварианты, являющиеся константами ($J_{Z1} \approx 2.5 \cdot 10^5$ A/cm², $J_{Z2} \approx 1.4 \cdot 10^2$ A/cm²).

Фотогенерированные (ФГ) токи субэлементов (J_g) определялись таким же способом, как и в других работах: при помощи стандартного расчета фототока из энергетического спектра падающего излучения [16]. У всех моделируемых субэлементов полагалась стопроцентная эффективность внешнего квантового выхода фототока для всех фотонов, энергия которых больше энергии ЗЗ субэлемента. Таким образом, с помощью (1) и расчета ФГ-тока по заданному набору ширины ЗЗ для всех субэлементов определялись наборы значений J_{01} , J_{02} , J_g . На основе этих величин при помощи выражения двухдиодной модели

$$J = J_g - \left[J_{01} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) + J_{02} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \right] \quad (2)$$

рассчитывались вольт-амперные характеристики всех субэлементов, которые использовались для определения эффективности МП СЭ. В (2) q — заряд электрона. В том случае, когда у двух рядом расположенных (соседних) субэлементов ФГ-ток более широкозонного субэлемента был выше, учитывалась возможность согласования токов J_g (токи усреднялись).

Применимость метода была исследована при помощи сравнения расчетных значений эффективности различных СЭ с экспериментальными. Для этого были выбраны как одно-, так и многопереходные СЭ, эффективность которых была измерена для спектра AM1.5G при прямом

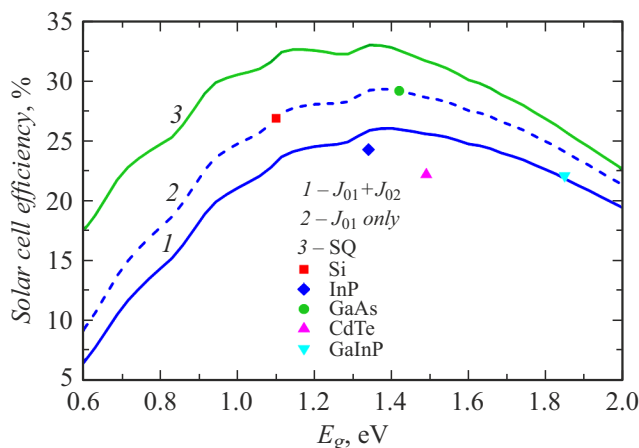


Рис. 1. Расчетная эффективность однопереходного СЭ в зависимости от ширины запрещенной зоны его p - n -перехода. Линия 1 — расчет по двухдиодной модели, линия 2 — расчет по однодиодной модели (без учета тока насыщения J_{02}), линия 3 — расчет тока насыщения по модели Шокли–Квиссера. Точками показаны экспериментальные значения для различных СЭ.

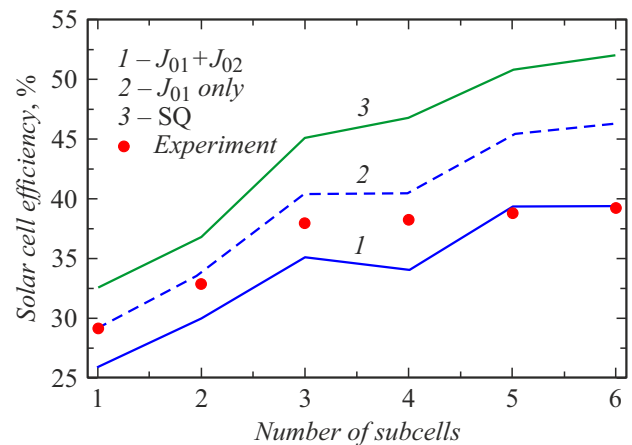


Рис. 2. Экспериментальные данные для эффективности рекордных СЭ с различным количеством субэлементов (от одного до шести) и расчет эффективности при помощи предложенного метода. Линия 1 — расчет по двухдиодной модели, линия 2 — расчет по однодиодной модели (без учета тока насыщения J_{02}), линия 3 — расчет тока насыщения по модели Шокли–Квиссера.

(неконцентрированном) солнечном излучении. Основная часть экспериментальных данных взята из актуальной таблицы рекордных значений эффективности СЭ [1]. Таблица не содержит данных для четырехпереходного СЭ, поэтому данные для него взяты из работы [17]. Все расчеты проведены в двух вариантах: с учетом и без учета вклада механизма токопрохождения с $A = 2$. Второй вариант соответствует случаю очень малых J_{02} , что может быть достигнуто в p - n -переходах высокого качества. Дополнительно был проведен расчет J_{01} по методике детального баланса Шокли–Квиссера. Для этого случая использовалось выражение для J_{01} из работы [18], ток J_{02} считался равным нулю.

На рис. 1 приведены данные для однопереходных СЭ. Видно, что эффективность наиболее исследованных и оптимизированных Si- и GaAs-СЭ хорошо описывается предложенной моделью при учете только J_{01} . Другие образцы ближе к модели с двумя токами насыщения. Эффективность СЭ на основе CdTe значительно меньшей расчетной, что может быть связано либо с низкой эффективностью внешнего выхода фототока (в расчетах полагается эффективность 100%), либо с наличием дополнительных утечек (туннельного тока), не включенных в используемую двухдиодную модель (2).

На рис. 2 приведены данные для рекордных СЭ, содержащих различное количество субэлементов. Все экспериментальные точки попадают в диапазон между двумя вариантами расчета при помощи предложенного метода, причем с увеличением числа субэлементов требование к учету рекомбинационного механизма протекания тока ($A = 2$) возрастает. Это, возможно, связано с тем, что с повышением сложности структур МП СЭ может увеличиваться количество дефектов, создающих глубокие

уровни, что приведет к росту темпа рекомбинации через них и увеличению влияния рекомбинационного тока. Поэтому при разработке МП СЭ необходимо учитывать оба тока насыщения, что выполнено в предлагаемом методе.

Таким образом, определение токов насыщения на основе токовых инвариантов J_{Z1} и J_{Z2} позволяет гораздо точнее предсказывать эффективность МП СЭ, чем при использовании модели на основе детального баланса, что видно из данных, приведенных на рис. 1 и 2. Предложенный метод дает высокую точность, что делает его перспективным инструментом для оптимизации существующих и разработки новых МП СЭ.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00158 (<https://rscf.ru/project/22-19-00158/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.A. Green, E.D. Dunlop, G. Siefer, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, X. Hao, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **31** (1), 3 (2023). DOI: 10.1002/pip.3646
- [2] S.P. Philipps, F. Dimroth, A.W. Bett, in *Mcevoy's handbook of photovoltaics* (Elsevier, 2017), p. 439–772. DOI: 10.1016/B978-0-12-809921-6.00012-4
- [3] D.N. Micha, R.T. Silveira, Jr., *Sci. Rep.*, **9** (1), 20055 (2019). DOI: 10.1038/s41598-019-56457-0
- [4] J. Zeitouny, E.A. Katz, A. Dollet, A. Vossier, *Sci. Rep.*, **7** (1), 1766 (2017). DOI: 10.1038/s41598-017-01854-6
- [5] R.R. King, A. Boca, W. Hong, X.-Q. Liu, D. Bhusari, D. Larrabee, K.M. Edmondson, D.C. Law, C.M. Fetzer, S. Mesropian, N.H. Karam, in *24th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf.* (Hamburg, Germany, 2009). DOI: 10.4229/24thEUPVSEC2009-1AO.5.2
- [6] T. Zdanowicz, T. Rodziewicz, M. Zabkowska-Waclawek, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **87** (1-4), 757 (2005). DOI: 10.1016/j.solmat.2004.07.049
- [7] I. Tobías, A. Luque, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **10** (5), 323 (2002). DOI: 10.1002/pip.427
- [8] C.H. Henry, *J. Appl. Phys.*, **51** (8), 4494 (1980). DOI: 10.1063/1.328272
- [9] G. Létay, A. Bett, in *Proc. of the 17th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf.* (Munich, Germany, 2001), p. 178–181.
- [10] W. Shockley, H.J. Queisser, *J. Appl. Phys.*, **32** (3), 510 (1961). DOI: 10.1063/1.1736034
- [11] W. Shockley, *Bell Syst. Tech. J.*, **28** (3), 435 (1949). DOI: 10.1002/j.1538-7305.1949.tb03645.x
- [12] C. Sah, R. Noyce, W. Shockley, in *Proc. of the IRE*, **45** (9), 1228 (1957). DOI: 10.1109/JRPROC.1957.278528
- [13] M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Saliy, M.Z. Shvarts, N.A. Kalyuzhnyy, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **264**, 112619 (2024). DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112619
- [14] N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Emelyanov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Saliy, M.Z. Shvarts, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **217**, 110710 (2020). DOI: 10.1016/j.solmat.2020.110710
- [15] M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, M.Z. Shvarts, N.A. Kalyuzhnyy, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1697** (1), 012170 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012170.
- [16] *Handbook of concentrator photovoltaic technology*, ed. by C. Algora, I. Rey-Stolle (John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 2016).
- [17] F. Dimroth, T.N.D. Tibbits, M. Niemeyer, F. Predan, P. Beutel, C. Karcher, E. Oliva, G. Siefer, D. Lackner, P. Fub-Kailuweit, A.W. Bett, R. Krause, C. Drazek, E. Guiot, J. Wasselin, A. Tauzin, T. Signamarcheix, *IEEE J. Photovolt.*, **6** (1), 343 (2016). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2015.2501729
- [18] R.R. King, D. Bhusari, A. Boca, D. Larrabee, X.-Q. Liu, W. Hong, C.M. Fetzer, D.C. Law, N.H. Karam, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **19** (7), 797 (2011). DOI: 10.1002/pip.1044