07

Влияние параметров $p-n$-переходов на оптимизацию конструкции контактов в фотоэлектрических преобразователях лазерного излучения

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

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: mamint@scell.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 23 июля 2025 г.
В окончательной редакции 8 октября 2025 г.
Принято к публикации 9 октября 2025 г.

Показано, что в фотоэлектрических преобразователях лазерного излучения величина токов насыщения $p-n$-переходов критически влияет на процессы растекания тока между контактными полосками и, как следствие, во многом определяет выбор оптимальной конструкции лицевой контактной сетки. Проведен расчет оптимальных конструкций контактных сеток для фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения с различной шириной запрещенной зоны E_g при варьировании величины сопротивления слоя растекания R_{SHEET} и ширины контактных полосков W_m.

Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи, солнечные элементы, сопротивление растекания, сопротивление контактов.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.04.62317.20452

Как известно, достижение высоких значений КПД фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), предназначенных для поглощения большой плотности мощности падающего излучения, требует детальной оптимизации лицевой контактной сетки чипов таких ФЭП [1–4]. Решение задачи такой оптимизации сводится к поиску компромисса между величинами резистивных и оптических потерь [2,4,5]. В частности, увеличение плотности полосков контактной сетки ведет к снижению резистивных потерь, но увеличивает оптические за счет затенения поглощающей поверхности ФЭП. Оптимальный дизайн контактных сеток и основные подходы к их оптимизации уже хорошо известны [2,6–9] и базируются на расчетах распределенных эквивалентных схем, учитывающих процессы растекания тока между контактными полосками. Основным фактором, определяющим результаты расчета, является величина сопротивления слоя растекания (R_{SHEET}). В современных концентраторных солнечных элементах, работающих в режимах преобразования большой мощности падающего излучения, этот параметр составляет порядка $550\,\Omega\cdot\mathrm{sq}^{-1}$ и может быть снижен до $250\,\Omega\cdot\mathrm{sq}^{-1}$ [1]. Дальнейшее снижение R_{SHEET} в солнечных элементах ограничивается невозможностью заметного утолщения поверхностных слоев эмиттера и широкозонного „окна“, по которым происходит растекание тока. В частности, из-за того, что солнечный спектр имеет широкий диапазон длин волн, утолщение слоя широкозонного „окна“ будет приводить к увеличению поглощения части падающего излучения в нем. В случае ФЭП лазерного излучения существует [10–12] возможность введения дополнительного приповерхностного слоя растекания (рис. 1) толщиной в несколько микрометров из полупроводникового материала, прозрачного для падающего излучения, что позволяет понизить R_{SHEET} до $15-50\,\Omega\cdot\mathrm{sq}^{-1}$ [2,13] и ниже. Расчет основных параметров ФЭП в зависимости от R_{SHEET} можно осуществить при помощи ряда моделей и методов [4,7,8,14–16]. При этом большинство работ сосредоточено на анализе результатов расчетов и оптимизации контактов ФЭП в зависимости от резистивных параметров, т. е. от параметров так называемой соединительной части ФЭП [15]. К соединительной части ФЭП относятся все полупроводниковые слои, находящиеся вне фотоактивного $p-n$-перехода, и металлические контакты (рис. 1). Сопротивление соединительной части можно разбить на латеральное сопротивление (R_L), характеризующее сопротивление в направлении вдоль $p-n$-перехода, и вертикальное сопротивление (R_V), характеризующее сопротивление в направлении, перпендикулярном $p-n$-переходу. В R_V входят сопротивление металлических контактов, сопротивления контактов металл–полупроводник, сопротивление подложки и эпитаксиальных слоев. К R_L относится латеральное сопротивление слоев эмиттера, широкозонного окна и растекания при распространении тока между контактными полосками (рис. 1). Работы, исследующие влияние на результат оптимизации контактных сеток ФЭП параметров $p-n$-переходов (параметров генераторной части ФЭП, включающей фотоактивный $p-n$-переход, рис. 1), отсутствуют, в то время как распределенный характер эквивалентной схемы, использующийся для описания процессов растекания тока, явно указывает на то, что на результат расчета влияет изменение любого из параметров схемы, в том числе и параметров $p-n$-переходов. Другими словами, это означает, что если изготовить два образца ФЭП с одинаковой соедини-

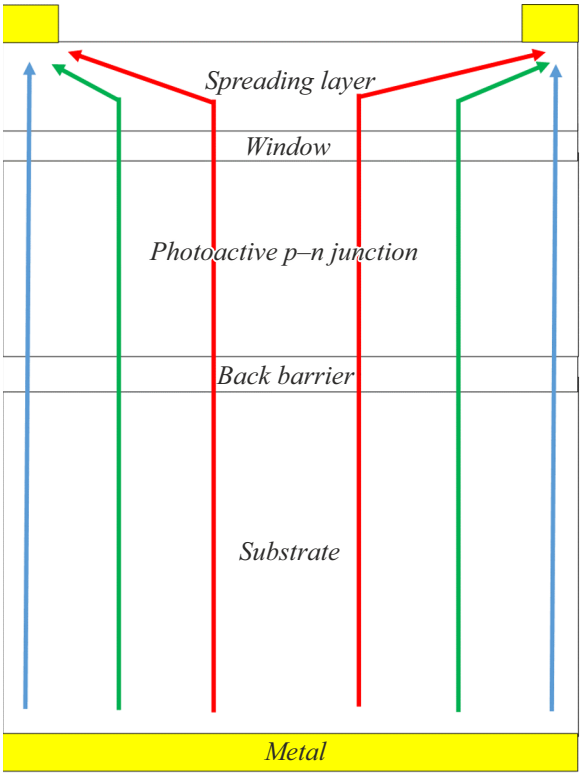

Рис. 1. Послойная схема ФЭП лазерного излучения со схематичным указанием растекания тока под контактными полосками.

тельной частью, но с $p-n$-переходами, выполненными из различных материалов, то из-за распределенного характера растекания тока падение напряжения на одинаковых резистивных элементах структуры ФЭП будет различным. В результате оптимальная конструкция контактной сетки ФЭП будет различна для приборов с отличающимися $p-n$-переходами. Этот факт ранее не обсуждался в литературе.

В настоящей работе рассмотрено влияние параметров $p-n$-перехода на выбор конструкции контактной сетки. Основными параметрами $p-n$-перехода ФЭП являются его токи насыщения (J_{01} и J_{02} — токи с коэффициентом идеальности $A = 1$ и 2 соответственно) и величина спектральной чувствительности (SR). В качестве основных параметров, определяющих конструкцию контактов, были выбраны сопротивление слоя растекания R_{SHEET}, расстояние между контактными полосками W и ширина контактного полоска W_m. Расчет проводился с помощью разработанной ранее трубковой модели растекания тока [15]. Модель рассчитывает вольт-амперную характеристику (ВАХ) ФЭП в зависимости от величины фотогенерированного тока J_g, токов насыщения J_{01} и J_{02}, а также двух резистивных параметров R_L и R_V. Согласно модели,

$$R_L = R_{SHEET}\left(\frac{W}{2}\right)^2, \tag{1}$$

т. е. может быть вычислено по основным задаваемым в расчете параметрам W и R_{SHEET}. Вертикальным сопротивлением в расчетах можно пренебречь, так как оно на несколько порядков величины меньше сопротивления растекания [15]. Расчет токов насыщения проводился с использованием модели токового инварианта [17], что позволяло получать величины J_{01} и J_{02} в зависимости от ширины запрещенной зоны $p-n$-перехода (E_g). Для определения фототока ФЭП обычно используется спектр квантовой эффективности (QE) фотоответа, являющейся безразмерной величиной, характеризующей отношение количества разделенных фотоактивным $p-n$-переходом электрон-дырочных пар к количеству приходящих на поверхность ФЭП фотонов. Для ФЭП лазерного излучения удобнее использовать спектральную чувствительность SR, которая является формализацией квантовой эффективности с размерностью A/W. Спектр SR получается из спектра QE следующим образом:

$$SR(\lambda) = \frac{q}{hc}\lambda \cdot QE(\lambda), \tag{2}$$

где λ — длина волны, q — заряд электрона, h — постоянная Планка, c — скорость света.

Полагая, что энергия фотона лазерного излучения равна E_g материала фотоактивного $p-n$-перехода, а $QE = 1$, получаем выражение для спектральной чувствительности на открытую поверхность

$$SR_0 = \frac{q}{E_g}. \tag{3}$$

Далее рассчитывался коэффициент затенения поверхности (W_m/W), после чего вычислялась спектральная чувствительность ФЭП

$$SR = SR_0\frac{W_m}{W}. \tag{4}$$

Расчет фотогенерированного тока проводился следующим образом:

$$J_g = SR \cdot P_{inc}, \tag{5}$$

где P_{inc} — задаваемая мощность падающего излучения.

Таким образом, для любой мощности падающего излучения P_{inc} может быть рассчитана ВАХ ФЭП, определяемая четырьмя параметрами: W, W_m, E_g, R_{SHEET}. Рассчитанная ВАХ позволяет определить мощность оптимальной нагрузки P_m и, как следствие, КПД прибора

$$Eff = P_m/P_{inc}. \tag{6}$$

С использованием такой процедуры были определены зависимости оптимального расстояния между контактными полосками от ширины запрещенной зоны $p-n$-перехода для разных комбинаций W_m (параметр варьировался от 5 до 15 μm) и R_{SHEET} (параметр варьировался от 10 до 50 $\Omega \cdot \mathrm{sq}^{-1}$). В расчетах в качестве материала контактных полосков бралось золото, а высота полосков составляла 2 μm.

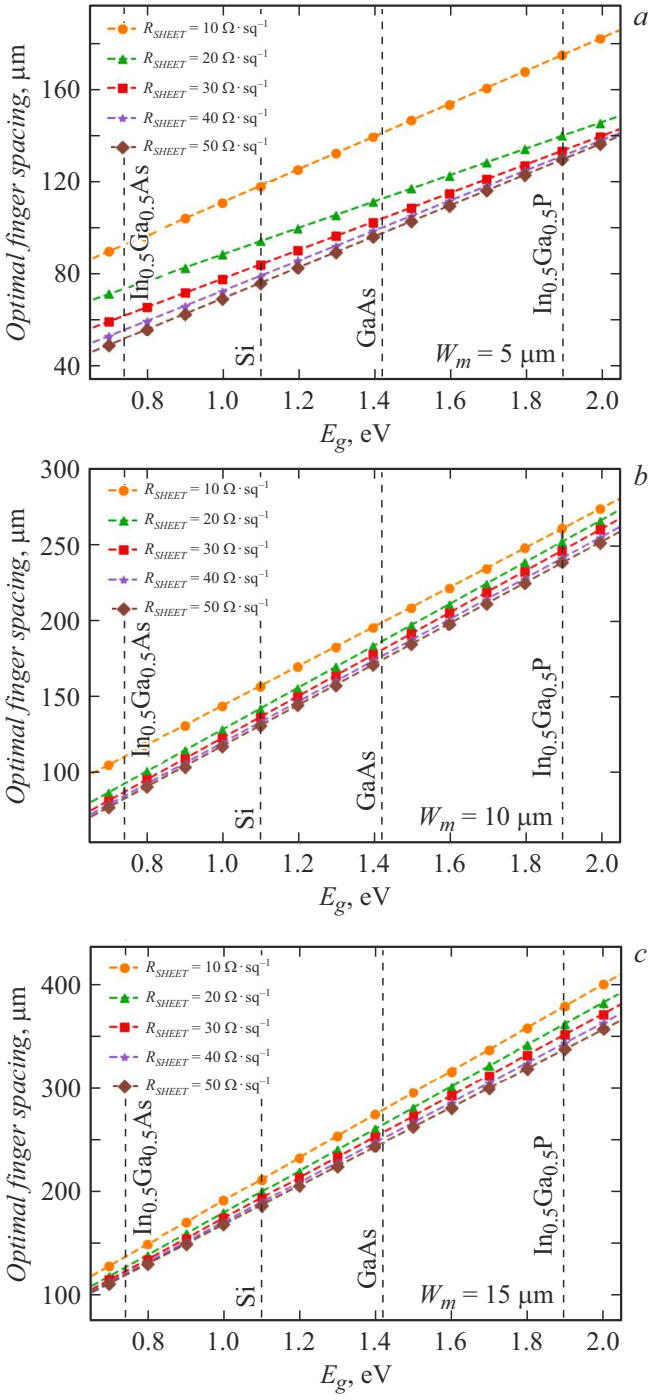

Рис. 2. Зависимости оптимального расстояния между контактными полосками от ширины запрещенной зоны $p-n$-перехода при различной величине сопротивления слоя растекания R_{SHEET}. Три варианта расчета для различной ширины контактов: $W_m = 5$ (a), 10 (b), 15 μm (c).

Результаты расчета приведены на рис. 2. Из приведенных зависимостей следует, что при любой толщине контактных полосков ширина запрещенной зоны критично влияет на выбор оптимальной конструкции лицевой контактной сетки ФЭП. Также видно, что с увеличением сопротивления слоя растекания его влияние на оптимальное расстояние между контактными полосками снижается, и выбор оптимальной конструкции на основе этого параметра становится затруднительным.

Важным результатом расчетов явилось то, что увеличение E_g $p-n$-перехода приводит к возможности увеличения расстояния между контактными полосками, что эквивалентно снижению сопротивления растекания. Это объясняется тем, что увеличение E_g $p-n$-перехода приводит к большему падению напряжения на диодах в распределенной эквивалентной схеме, т.е. при равных условиях освещенности большее напряжение падает на генераторной части ФЭП, что приводит к более равномерному протеканию тока поперек структуры ФЭП и уменьшению падения напряжения на соединительной части ФЭП. Таким образом, с ростом E_g $p-n$-перехода роль последовательного сопротивления уменьшается по сравнению с сопротивлением диодов. Вследствие изменения распределения токов изменяется ВАХ соединительной части ФЭП. При этом в области токов, близких к току оптимальной нагрузки, сопротивление растекания уменьшается с ростом E_g $p-n$-перехода.

Учет этого эффекта может значительно повлиять на КПД ФЭП, так как увеличение E_g $p-n$-перехода с 1 до 1.6 eV приводит к возможности уменьшения затенения лицевой поверхности ФЭП контактной сеткой более чем в 2 раза: от 8–9 до 3–4 % (рис. 1).

Также важно отметить, что сопротивление контактных полосков заметно влияет на ВАХ ФЭП, так как увеличение их ширины приводит к возможности значительного увеличения расстояния между ними. Если для полосков шириной 5 μm оптимальное расстояние в зависимости от слоевого сопротивления варьируется в диапазоне от 80 до 150 μm, то для полосков шириной 15 μm это расстояние уже варьируется от 180 до 320 μm. Однако при этом затенение лицевой поверхности полосками практически не изменяется.

Таким образом, показано, что при расчете оптимальных параметров конструкции контактной сетки ФЭП, работающих в режимах преобразования большой мощности лазерного излучения, обязательно следует учитывать токи насыщения $p-n$-перехода. Величины токов насыщения могут быть либо оценены на основе значения ширины запрещенной зоны материала $p-n$-перехода (например, с помощью токового инварианта), либо определены экспериментально с помощью анализа ВАХ приборов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] M. Klitzke, P. Schygulla, J. Schön, O. Höhn, G. Siefer, H. Helmers, F. Dimroth, D. Lackner, Solar RRL, **8** (10), 2400150 (2024). DOI: 10.1002/solr.202400150

[2] H. Helmers, E. Oliva, M. Schachtner, G. Mikolasch, L.A. Ruiz-Preciado, A. Franke, J. Bartsch, Prog. Photovolt.: Res. Appl., **32** (9), 636 (2024). DOI: 10.1002/pip.3804

[3] T.A. Gessert, X. Li, T.J. Coutts, Solar Cells, **30** (1-4), 459 (1991). DOI: 10.1016/0379-6787(91)90078-4

[4] N.A. Kalyuzhnyy, A.V. Malevskaya, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, Solar Energy Mater. Solar Cells, **262**, 112551 (2023). DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112551

[5] А.Д. Малевская, М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, Д.А. Малевский, Н.А. Калюжный, ФТП, **58** (10), 573 (2024). DOI: 10.61011/FTP.2024.10.59384.6619A [A.D. Malevskaya, M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, D.A. Malevskiy, N.A. Kalyuzhnyy, Semiconductors, **58** (10), 528 (2024). DOI: 10.61011/SC.2024.10.59948.6619A].

[6] R.J. Handy, Solid-State Electron., **10** (8), 765 (1967). DOI: 10.1016/0038-1101(67)90159-1

[7] A. De Vos, Solar Cells, **12** (3), 311 (1984). DOI: 10.1016/0379-6787(84)90110-8

[8] C. Algora, V. Díaz, Prog. Photovolt.: Res. Appl., **8** (2), 211 (2000). DOI: 10.1002/(SICI)1099-159X(200003/04)8:2<211::AID-PIP291>3.0.CO;2-D

[9] M. Steiner, S.P. Philipps, M. Hermle, A.W. Bett, F. Dimroth, Prog. Photovolt.: Res. Appl., **19** (1), 73 (2010). DOI: 10.1002/pip.989

[10] C. Algora, I. García, M. Delgado, R. Peña, C. Vázquez, M. Hinojosa, I. Rey-Stolle, Joule, **6**, 340 (2022). DOI: 10.5281/zenodo.6620474

[11] S. Fafarda, D.P. Masson, J. Appl. Phys., **130** (16), 160901 (2021). DOI: 10.1063/5.0070860

[12] H. Helmers, E. Lopez, O. Höhn, D. Lackner, J. Schön, M. Schauerte, M. Schachtner, F. Dimroth, A.W. Bett, Phys. Status Solidi RRL, **15** (7), 2100113 (2021). DOI: 10.1002/pssr.202100113

[13] E. Oliva, F. Dimroth, A.W. Bett, Prog. Photovolt.: Res. Appl., **16**, 289 (2008). DOI: 10.1002/pip.811

[14] M.N. Beattie, H. Helmers, G.P. Forcade, C.E. Valdivia, O. Höhn, K. Hinzer, IEEE J. Photovolt., **13** (1), 113 (2023). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2022.3218938

[15] М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный, ФТП, **50** (7), 987 (2016). [M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, N.Kh. Timoshina, M.Z. Shvarts, N.A. Kalyuzhnyy, Semiconductors, **50** (7), 970 (2016). DOI: 10.1134/S1063782616070162].

[16] V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, M.A. Mintairov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Lantratov, in *Proc. of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition/5th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion* (Valencia, Spain, 2010), vol. 2.33, p. 406. DOI: 10.4229/25THEUPVSEC2010-1DV.2.33

[17] M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts, N.A. Kalyuzhnyy, Solar Energy Mater. Solar Cells, **264**, 112619 (2024). DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112619