

Адаптивная геометрическая оптимизация топологии металлической сетки верхнего контакта фотопреобразователей

© В.А. Поздеев^{1,2}, А.В. Уваров¹, О.П. Михайлов^{1,3}, А.С. Гудовских^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова
Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина),
197376 Санкт-Петербург, Россия

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: pozdeev99va@gmail.com

Поступила в Редакцию 5 мая 2026 г.

В окончательной редакции 13 июля 2026 г.

Принята к публикации 14 июля 2026 г.

Проведена численная оптимизация фронтальной контактной сетки квадратных и круглых солнечных элементов на основе PEDOT:PSS/*n*-Si и *n*-GaP/*p*-Si с учетом возможностей термического напыления через теневую маску. Моделирование объединяет расчет идеальной вольт-амперной характеристики в AFORS-HET 2.5 с использованием дрейфово-диффузионной модели, экстракцию параметров двухдиодной модели кусочно-линейной регрессией и распределенное схемотехническое SPICE-моделирование с учетом омических потерь в транспортном слое, контактах и металлизации. Определены оптимальные шаг дорожек, ширина дорожек и шины. Показано, что для PEDOT:PSS/*n*-Si технологический предел ширины дорожки при термическом напылении через жесткую теневую маску не ограничивает эффективность, тогда как для *n*-GaP/*p*-Si он снижает эффективность на ~ 1.5 % относительно расчетного оптимума.

Ключевые слова: *n*-GaP, PEDOT:PSS, AFORS-HET, SPICE, фронтальная контактная сетка, теневая маска.

DOI: 10.61011/FTP.2026.07.63944.9785

1. Введение

Эффективность фотопреобразователей ограничена омическими потерями в верхнем контакте. Оптимизация фронтальной сетки представляет собой компромисс между омическими потерями, оптическим затенением, технологическими ограничениями (минимальная ширина линии, допустимая топология) и поверхностным сопротивлением слоя [1]. Фотолитография дает высокое разрешение, но многостадийность и химическая обработка ограничивают применимость к чувствительным материалам. В работе рассматриваются ограничения, характерные для термического напыления через жесткую теневую маску, характеризуемую минимальной шириной линии (~ 50 мкм для лазерной резки маски), толщиной металлизации (~ 1 мкм) и недопустимостью замкнутых контуров, поскольку такие участки материала лишаются механической связи с основной частью маски. Это требует пересчета оптимальных параметров контактной сетки. Отдельно решается задача оптимизации контактов для круглых элементов (концентраторная фотовольтаика, сенсоры, исследовательские ячейки [2]), где круглая подложка (например, PEDOT:PSS/*n*-Si, центробежное нанесение) обеспечивает более равномерный слой и минимизирует краевые эффекты. Для прямоугольной геометрии расчеты выполнены на примере *n*-GaP/*p*-Si.

2. Методика

Моделирование проводилось в два этапа: 1D-расчет идеального гетероперехода и экстракция диодных параметров, затем 2D-схемотехническое SPICE-моделирование всей ячейки с резистивными потерями. Расчет идеальной вольт-амперной характеристики (BAX) гетероперехода выполнен в пакете AFORS-HET 2.5, предназначенном для моделирования гетеропереходных структур. В рамках дрейфово-диффузионного подхода численно решается система полупроводниковых уравнений, включающая уравнение Пуассона, уравнения непрерывности для электронов и дырок, а также уравнения плотности тока. Далее для учета омических потерь используется распределенная электрическая схема, моделируемая в программе ngspice, которая представляет собой универсальный симулятор электронных цепей, позволяющий проводить нелинейный DC-анализ распределенных структур. Фототок рассчитывается пропорционально открытой площади, что учитывает затенение дорожками и шиной. Для каждого значения напряжения нагрузки решается система нелинейных алгебраических уравнений, описывающих распределенную цепь, и вычисляется полный ток ячейки. По полученным BAX определяются параметры ячейки, а КПД рассчитывается по полной площади, что включает потери на затенение шиной и дорожками. Моделирование выполняется на основе двухдиодной модели,

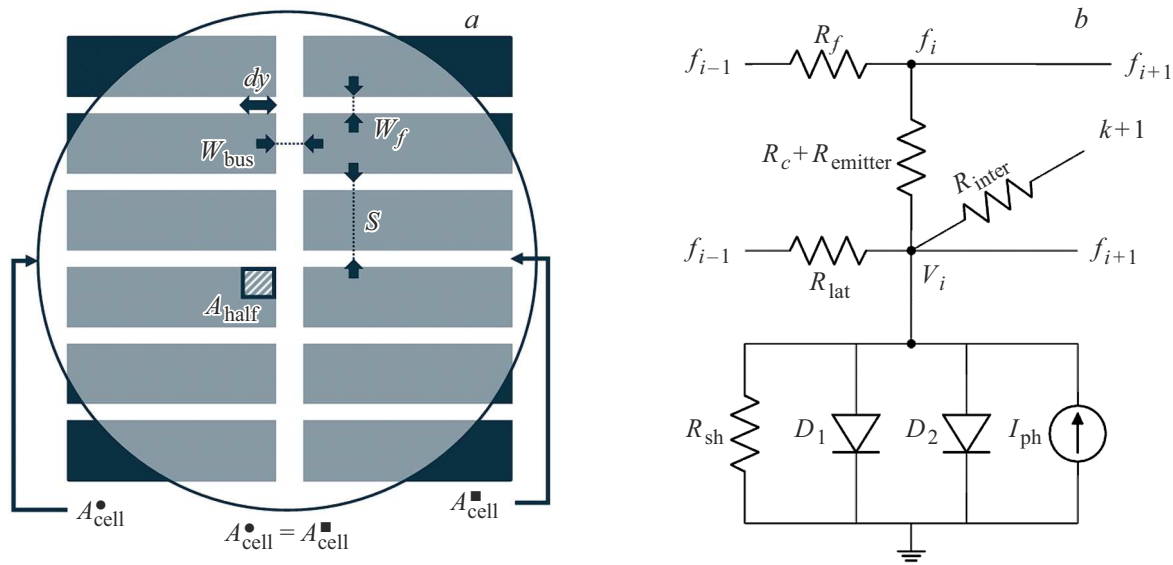


Рис. 1. Схема контактов с обозначением параметров сетки (а) и эквивалентная схема (полуполосы) субэлемента (b).

Таблица 1. Параметры двухдиодной модели и характеристики гетеропереходов по данным AFORS-HET (300 K, AM1.5G)

Номер*	J_{01} , 10^{-9} А/см ²	n_1	J_{02} , 10^{-12} А/см ²	n_2	J_{sc} , мА/см ²	V_{oc} , мВ	КПД _{ID} , %
1	10.3	1.79	20.9	1.12	28.7	609	17.3
2	8.18	1.80	1.45	1.12	31.6	623	19.7

Примечание. * 1 — PEDOT:PSS/n-Si, 2 — n-GaP/p-Si.

параметры которой (плотности токов насыщения J_{01} и J_{02} , факторы идеальности n_1 и n_2 , а также плотность фототока J_{ph}) извлекаются из рассчитанных ВАХ методом кусочно-линейной регрессии, выделяющим линейные участки полулогарифмической зависимости для раздельного определения параметров рекомбинационного и диффузионного диодов. Точка перегиба выбирается из условия минимума суммы среднеквадратичных ошибок аппроксимации обеих ветвей. Параметры, полученные в AFORS-HET и извлеченные кусочно-линейной регрессией, приведены в табл. 1, они задают верхний предел КПД, свободный от резистивных потерь.

Для квадратной ячейки моделируется элемент размером 3×3 см с центральной вертикальной шиной, шаг дорожек S , ширина дорожки W_f и ширина шины W_{bus} обозначены на рис. 1, а. Каждая дорожка разбита на $N_y = 10$ сегментов длиной dy . Сегмент собирает ток с двух идентичных полуполос транспортного слоя $A_{half} = (S - W_f)dy/2$. Каждая полуполоса представлена двухдиодной моделью с источником тока $J_{ph}A_{half}$, эквивалентная схема представлена на рис. 1, б.

Поверхностное сопротивление транспортного слоя $R_{sheet} = 1/(\sigma t)$, где σ — удельная проводимость. От узла полуполосы к дорожке включены: 1) сопротивление растекания: $R_{emitter} = R_{sheet}(S/4)/dy$, 2) контактное сопротивление: $R_c = 2\rho_c/(W_f dy)$, где ρ_c — удельное контактное сопротивление. Дорожки модели-

руются цепочкой резисторов $R_f = R_{sheet}^{Ag} \cdot dy/W_f$, а шина последовательно резисторов с номиналом $R_{bus} = R_{sheet}^{Ag} \cdot S/(W_{bus}/2)$, где R_{sheet}^{Ag} поверхностное сопротивление металлизации (для Ag толщиной 1 мкм $R_{sheet}^{Ag} = 0.016$ Ом/кв.см). Латеральные связи в слое представлены: 1) сопротивлением вдоль дорожки: $R_{lat} = R_{sheet} dy/S$; 2) сопротивлением перпендикулярно дорожке: $R_{inter} = R_{sheet} S/dy$; 3) сопротивлением $R_{tip} = R_{sheet}(S/2)/dy$, которое дополнительно включается на последнем сегменте дорожки и замыкает верхнюю и нижнюю полуполосы через транспортный слой.

Для круглой ячейки выбран радиус $R_{cell} = L_{cell}/\sqrt{\pi}$ с равной квадратной площадью. Координаты центров дорожек вдоль шины: $y = 0, \pm S, \pm 2S, \dots$ до границы $y_{max} = \sqrt{R_{cell}^2 - (W_{bus}/2)^2}$. Длина дорожки $L(y) = \sqrt{R_{cell}^2 - y^2} - W_{bus}/2$, каждая дорожка делится на $N_y = 10$ сегментов с индивидуальным $dy = L(y)/N_y$. Все элементы схемы повторяют квадрат, за исключением междорожковых связей: из-за разной длины дорожек берется среднее $\overline{dy} = (L_k + L_{k+1})/(2N_y)$ и $R_{inter} = R_{sheet} S/\overline{dy}$. Напряжение V_{load} (0–0.8 В, шаг 5 мВ) задает рабочую точку. В ngspice рассчитывается ток половины ячейки; полный ток $I(V) = 2I_{half}(V)$, плотность $J(V) = I(V)/A_{cell}$ ($A_{cell} = L_{cell}^2$ или πR_{cell}^2). $\text{КПД} = \max(V|J|A_{cell})/P_{in}$, $P_{in} = 0.1 \text{ Вт/см}^2 \cdot A_{cell}$. Оптимумы находятся трехмерным перебором S , W_f и W_{bus} .

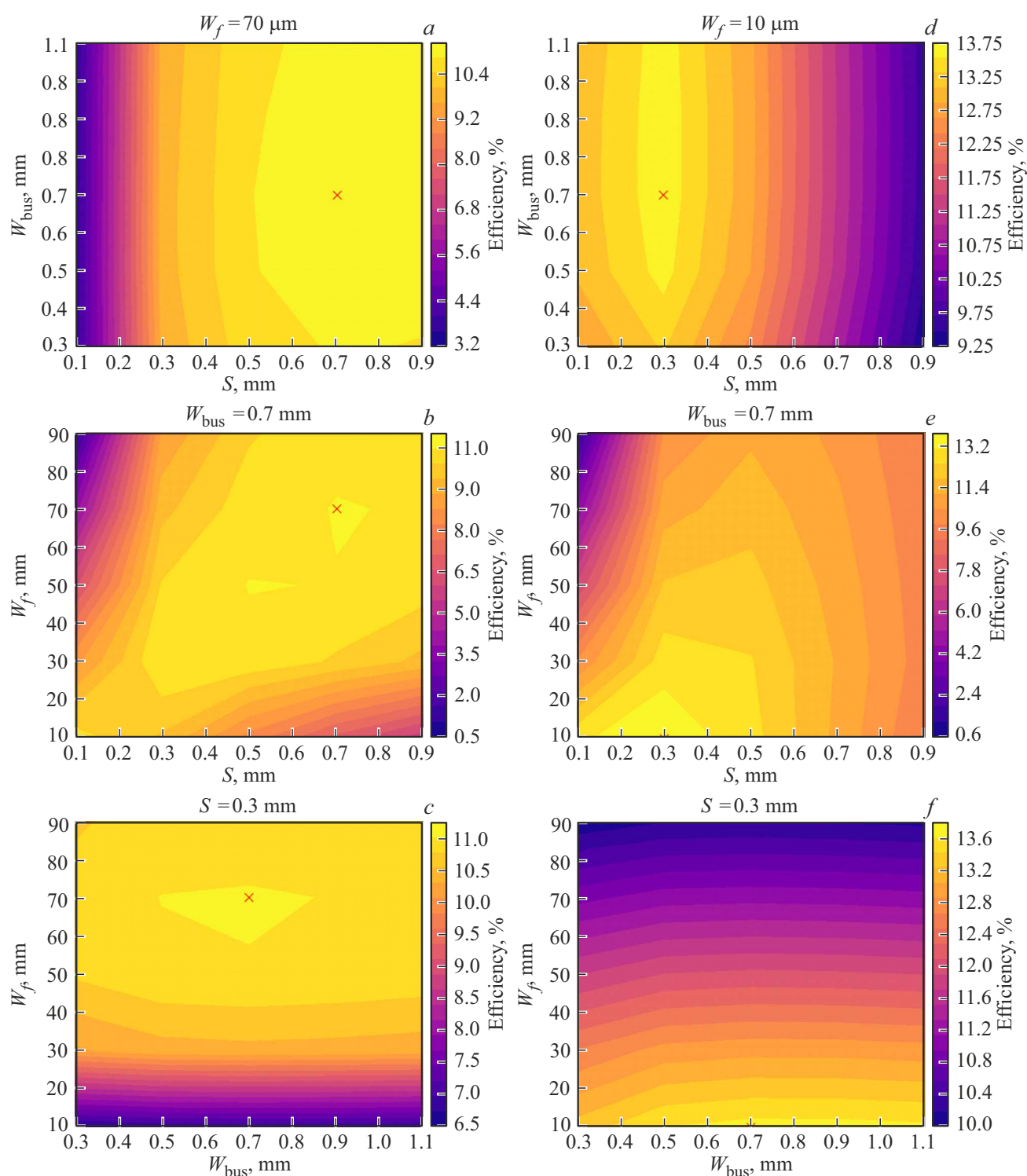


Рис. 2. Сечения КПД в координатах шаг дорожек: S – W_{bus} (a, d), S – W_f (b, e) и W_f – W_{bus} (c, f). Левый столбец (a–c): круглая ячейка PEDOT:PSS/ n -Si, правый столбец (d–f): квадратная ячейка n -GaP/ p -Si. Сечения через точку достижимого (с учетом технологических ограничений) оптимума, красный крест — максимум. Цветовая шкала — КПД, %.

Таблица 2. Характеристики солнечных элементов ($A = 9 \text{ см}^2$) с оптимальной контактной сеткой по результатам SPICE-моделирования

Структура ($A = 9 \text{ см}^2$)	Затенение, %	J_{sc} , мА/см^2	V_{oc} , мВ	FF	кпд, %
Круг $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$	5.88	29.78	621	0.740	13.67
Квадрат $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$	5.59	29.86	621	0.738	13.67
Круг PEDOT:PSS/ $n\text{-Si}$	12.38	25.16	606	0.722	11.02
Квадрат PEDOT:PSS/ $n\text{-Si}$	12.10	25.22	606	0.722	11.04

Параметры слоев взяты из литературы [3–7]. Для R_{sheet} использованы литературные значения удельной проводимости: 208 Ом/квадрат (960 См/см) для PEDOT:PSS [3,4] и 5.68 кОм/квадрат (35.2 См/см) для $n\text{-GaP}$ [5]; толщина слоев принята равной $t = 50 \text{ нм}$. Удельное контактное сопротивление принято $\rho_c = 1.7 \cdot 10^{-10} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ [6] для $n\text{-GaP}$ к Ti/Ag и равным $\rho_c = 0.14 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ для PEDOT:PSS к Ag [7].

3. Результаты и обсуждение

Результаты 2D-схемотехнического моделирования: ток короткого замыкания J_{sc} , напряжение холостого хода V_{oc} , коэффициент заполнения FF, КПД и затенение для оптимальных конфигураций контактной сетки сведены в табл. 2.

На рис. 2 показаны сечения пространства (S , W_{bus} , W_f), содержащие точку достижимого при заданных технологических ограничениях оптимума. Для PEDOT:PSS/ $n\text{-Si}$ оптимальная сетка различается: квадратная форма требует более плотной упаковки (шаг 0.50 мм, ширина дорожки 50 мкм), круглая форма допускает более грубую сетку (шаг 0.70 мм, ширина дорожки 70 мкм), что связано с высокой проводимостью полимерного слоя, снижающей резистивные потери за увеличение шага. КПД квадрата (11.04 %) и круга (11.02 %) практически совпадают. Абсолютное падение относительно 1D-предела (17.3 %) составляет $\sim 6.3\%$. Ширина шины во всех случаях — 0.7 мм. Для PEDOT:PSS/ $n\text{-Si}$ оптимальная ширина дорожки (50–70 мкм) лежит в пределах возможностей теневой маски. Таким образом, для PEDOT:PSS/ $n\text{-Si}$ оптимальная конфигурация сетки реализуема в рамках возможностей теневой маски без какого-либо снижения эффективности относительно глобального оптимума. Для $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ оптимум не достигается даже при ширине дорожки 10 мкм (шаг 0.30 мм), значения одинаковы для квадратной и круглой форм, КПД составляет 13.67 % для обеих геометрий. Абсолютное падение КПД относительно 1D-предела составляет 6 % (с 19.7 до 13.67 %), что обусловлено омическими потерями в транспортном слое и металле, а также оптическим затенением. Фиксация $W_f = 50 \text{ мкм}$ дает абсолютное снижение на 1.5 % (с 13.67 до 12.21 %) за счет одновременного роста затенения (J_{sc} падает на $\sim 7\%$) и омических потерь из-за увеличения шага сетки (коэффициент заполнения FF снижается с 0.740

до 0.708). Дальнейший рост эффективности за счет топологии контакта GaP-структур требует либо методов с разрешением выше возможностей теневой маски, либо двухуровневой металлизации с разделением функций токоотвода и контакта.

4. Заключение

Таким образом, для обеих структур при площади 9 см^2 форма элемента (круг/квадрат) практически не влияет на итоговый КПД: неоднородность длин дорожек в круглой ячейке компенсируется адаптацией шага и ширины дорожек. Выбор геометрии диктуется технологическими соображениями: совместимостью с методами нанесения слоев, требованиями к однородности покрытия, минимизацией краевых эффектов.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 24-19-00150, <https://rscf.ru/project/24-19-00150>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H. Helmers, E. Oliva, M. Schachtner, G. Mikolasch, L.A. Ruiz-Preciado, A. Franke, J. Bartsch. *Progr. Photovolt.*, **32**, 636 (2024). DOI: 10.1002/pip.3804
- [2] G.M.M.W. Bissels, M.A.H. Asselbergs, J.J. Schermer, E.J. Haverkamp, N.J. Smeenk, E. Vlieg. *Progr. Photovolt.*, **19**, 517 (2011). DOI: 10.1002/pip.1076
- [3] D. Muchahary, K. Priyanka, L.S. Ram, A. Prahitha, S. Kollem. *Optik*, **248**, 168102 (2021). DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.168102
- [4] А.В. Уваров, А.А. Максимова, Е.А. Вячеславов, А.И. Баранов, А.С. Гудовских. *Письма ЖТФ*, **49** (23), 52 (2023). DOI: 10.61011/PJTF.2023.23.56853.155A
- [5] E.F. Schubert. *Light-Emitting Diodes*, 3rd ed. (N.Y., 2018).
- [6] A.S. Gudovskikh, A.V. Uvarov, I.A. Morozov, A.I. Baranov, D.A. Kudryashov, E.V. Nikitina, J.-P. Kleider. *Phys. Status Solidi C*, **14** (10), 1700150 (2017). DOI: 10.1002/pssc.201700150
- [7] W. Seifert, H. Albrecht, S. Mietke, T. Koehler, M. Werner. *Proc. SPIE*, **5045**, 183 (2003). DOI: 10.1117/12.48428

Редактор Г.А. Оганесян

Adaptive geometric topology optimization of front metal grid contact for solar cells

V.A. Pozdeev^{1,2}, A.V. Uvarov¹, O.P. Mikhailov^{1,3},
A.S. Gudovskikh^{1,2}

¹ Alferov University,
194021 St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg Electrotechnical University „LETI“,
197376 St. Petersburg, Russia

³ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Numerical optimization of the front contact grid for square and circular PEDOT:PSS/ n -Si and n -GaP/ p -Si solar cells was performed, taking into account the limitations of thermal evaporation through a shadow mask. The simulation combines the calculation of the ideal IV-curve in AFORS-HET 2.5 using a drift-diffusion model, the extraction of the two-diode model parameters via piecewise linear regression, and distributed SPICE circuit simulation considering ohmic losses in the transport layer, contacts, and metallization. The optimal finger pitch, finger width, and busbar width were determined. It is shown that for PEDOT:PSS/ n -Si, the technological limit of the finger width during thermal evaporation through a rigid shadow mask does not restrict the efficiency, whereas for n -GaP/ p -Si, it reduces the efficiency by $\sim 1.5\%$ absolute compared to the calculated optimum.