

УДК 621.315.592

Исследование особенностей растекания тока при анализе линейной топологии фронтальных контактов фотоэлектрических преобразователей

© А.Д. Малевская, М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, Д.А. Малевский,
А.В. Малевская, Р.А. Салий, Н.А. Калюжный

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
E-mail: anmalevskaya@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2026 г.

В окончательной редакции 7 июня 2026 г.

Принята к публикации 14 июля 2026 г.

Исследованы особенности формирования карт электролюминесценции фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения с линейной топологией фронтальной контактной сетки. Распределение интенсивности электролюминесценции характеризует изменение напряжения в p – n -переходе и критически зависит от соотношения сопротивления металлических полос и слоевого сопротивления растекания в полупроводниковой структуре. Применена методика численного моделирования на основе трехмерной распределенной эквивалентной схемы, позволившая установить количественную связь между градиентами напряжения вдоль и поперек контактных полосок и эффективностью фотоэлектрических преобразователей.

Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи, карта электролюминесценции, сопротивление растекания, сопротивление контактов.

DOI: 10.61011/FTP.2026.08.63950.9678

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) лазерного излучения на основе гетероструктур $A^{III}B^V$ являются ключевыми элементами систем беспроводной передачи энергии по оптоволокну [1–3]. Наиболее важными утилитарными параметрами ФЭП в данных системах считаются эффективность преобразования энергии лазерного луча в электричество (кпд) и мощность преобразуемого излучения. При этом рекордные значения кпд в настоящее время показаны для малой и средней плотности мощности, например, максимальная оценка кпд составляет $> 68\%$ для плотности мощности, эквивалентной 11 Вт/см^2 [4]. Непосредственно измеренное максимальное значение кпд на мощном лазере 170 Вт/см^2 составляет $\sim 62\%$ и падает до 60% при 350 Вт/см^2 [5]. При переходе в диапазон мощностей 500 – 1000 Вт/см^2 рекордные измеренные кпд не превышают 55% [6]. Работа при столь высоких плотностях тока предъявляет жесткие требования к минимизации резистивных потерь, которые в значительной степени определяются конструкцией фронтальной металлической контактной сетки.

Традиционная оптимизация контактной сетки сводится к поиску компромисса между двумя конкурирующими факторами: увеличением плотности контактов для снижения сопротивления растекания и уменьшением затенения фотоактивной поверхности для повышения тока генерации [7]. Существующие подходы к моделированию процессов растекания тока включают как аналитические модели (трубковая модель [8]), так и численные методы на основе распределенных эквивалентных схем [7,9,10]. Однако задача однозначного определения резистивных

параметров только по вольт-амперным характеристикам (ВАХ) не имеет единственного решения [10].

Дополнительную информацию о процессах растекания тока предоставляют карты электролюминесценции (ЭЛ), которые визуализируют распределение плотности тока по поверхности прибора [11–13]. Анализ карт ЭЛ широко применяется для контроля качества ФЭП и выявления локальных дефектов, однако количественная связь между видом карты ЭЛ и резистивными параметрами контактной сетки до настоящего времени исследована недостаточно.

В данной работе проведено исследование влияния резистивных параметров фронтальной контактной сетки на вид карт ЭЛ ФЭП лазерного излучения. Определены особенности свечения AlGaAs/GaAs ФЭП. Разработана методика численного моделирования на основе расчета трехмерной распределенной схемы, позволяющая количественно связать экспериментально наблюдаемые особенности с величинами сопротивлений. Определены критерии достижения оптимального баланса между резистивными потерями и токообразованием.

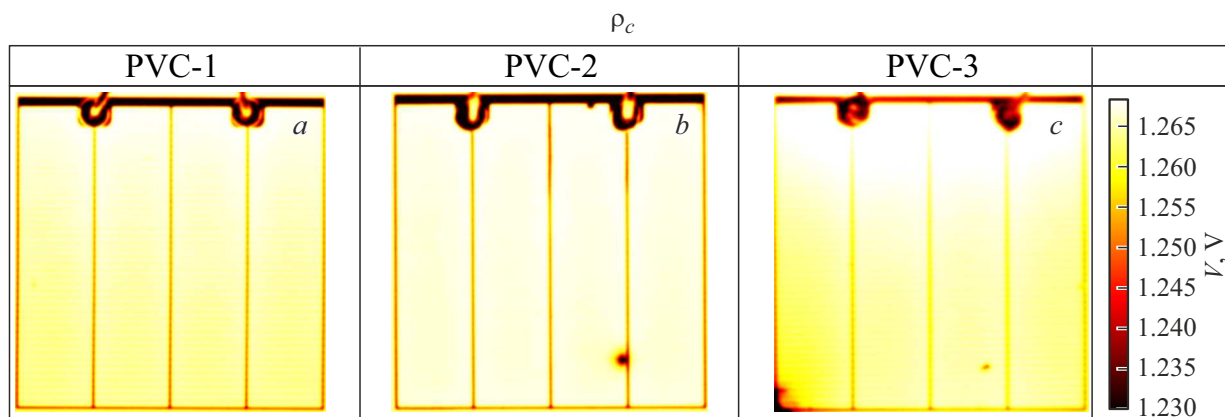
Электролюминесценция в ФЭП возникает при протекании прямого тока через p – n -переход. Интенсивность ЭЛ L экспоненциально зависит от напряжения на p – n -переходе V :

$$L = L_0 \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \text{ или } V = \frac{kT}{q} \log(L) - \frac{kT}{q} \log(L_0), \quad (1)$$

где q — заряд электрона, k — постоянная Больцмана, T — температура. Таким образом, пространственное

Таблица 1. Геометрические и резистивные параметры контактных полосков ФЭП

Номер ФЭП	Ширина полоска w , мкм	Высота полоска h , мкм	Контактное сопротивление AuGe/Ni/Au к n -GaAs ρ_c , Ом · см ²
1	7.5	2.0	$(1-3) \cdot 10^{-6}$
2	8.2	5.2	$(1-3) \cdot 10^{-6}$
3	7.5	2.0	$(6-8) \cdot 10^{-4}$

Рис. 1. Экспериментальные карты градиента напряжений при токе 100 А/см².

распределение интенсивности ЭЛ непосредственно отражает распределение напряжения вдоль p – n -перехода, которое в свою очередь определяется процессами растекания тока по слоям структуры и металлическим контактам.

Из (1) очевидно, что разность логарифмов интенсивности ЭЛ в двух точках может быть использована для получения разности напряжений на p – n -переходе:

$$\Delta V = \frac{q}{kT} \cdot (\log(L_1) - \log(L_2)). \quad (2)$$

Таким образом, применение формулы (2) к картам ЭЛ позволяет получить карту градиента напряжений. Исследованы три типа образцов (ФЭП-1, ФЭП-2, ФЭП-3) на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs, выращенной методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений на подложке GaAs p -типа проводимости. ФЭП-2 являлся реперным образцом (изготавливался по стандартной технологии). Постростовая обработка включала формирование тыльного сплошного контакта и фронтальной контактной сетки различной конфигурации. Тыльный омический контакт выполнялся на основе слоев NiCr/Ag/Au, значение удельного контактного сопротивления ρ_c составило $(1-3) \cdot 10^{-5}$ Ом · см² к GaAs p -типа проводимости при температуре вжигания 370 °С. Фронтальная контактная сетка формировалась на основе системы AuGe/Ni/Au с расстоянием между контактными полосками $W = 220$ мкм. У исследуемых ФЭП отличалось удельное контактное сопротивление, для этого вжигание контактов выполнялось при

различной температуре — 370 °С для ФЭП-1 и 2 ($\rho_c = (1-3) \cdot 10^{-6}$ Ом · см² к GaAs n -типа проводимости) и 290 °С для ФЭП-3, что позволило искусственно увеличить ρ_c до $(6-8) \cdot 10^{-4}$ Ом · см². Контактные полоски формировались путем электрохимического наращивания контактной системы Ag/Ni/Au. При этом у ФЭП-2 было увеличено поперечное сечение контактов до 2 мкм (ФЭП-1, 3) и 5 мкм (ФЭП-2), это позволило получить наименьшее сопротивление контактного полоска R_M . Все образцы изготовлены размером 1×1 мм². Параметры ФЭП приведены в табл. 1.

На рис. 1 представлены экспериментальные карты градиента напряжений для трех типов ФЭП при токе 100 А/см².

Качественный анализ карт показывает: ФЭП-2 демонстрирует наиболее равномерное изменение градиента по всей площади; в образце ФЭП-1 наблюдается заметный спад градиента вдоль контактных полосков; ФЭП-3 характеризуется резким падением величины градиента по мере удаления от точек подключения к токосборным шинам. Для количественной оценки равномерности электролюминесценции образцов при различной конфигурации и характеристиках контактов, в частности удельного контактного сопротивления ρ_c , было выполнено численное моделирование.

В работах [6,7] было показано, что вид карты ЭЛ качественно изменяется в зависимости от соотношения двух ключевых параметров: слоевого сопротивления растекания R_{sheet} и сопротивления металлического контактного полоска R_M . При малом сопротивлении контактов и

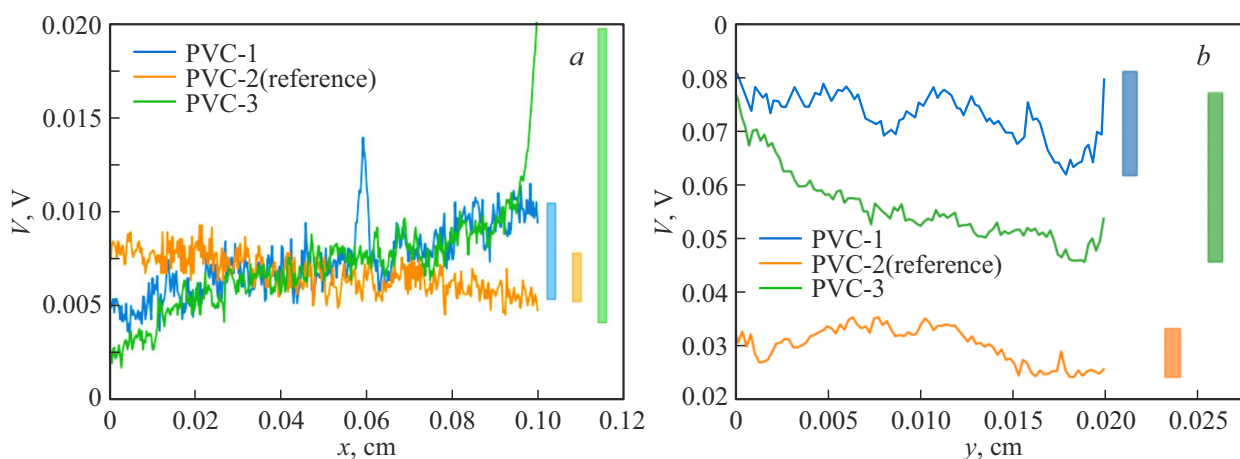


Рис. 2. Профили градиента напряжения вдоль (а) и поперек (b) полоска.

значительном R_{sheet} максимум интенсивности ЭЛ локализуется в областях, наиболее удаленных от точек подключения контактной сетки к токосборным шинам. Напротив, при высоком сопротивлении контактов и малом R_{sheet} область максимальной яркости смещается вблизи точек подключения. Наличие любой из этих выраженных особенностей является индикатором неоптимальности конструкции, ведущей к росту резистивных потерь.

Разработана методика численного моделирования, основанная на построении трехмерной распределенной эквивалентной схемы ФЭП. Поверхность прибора разбивается на элементарные ячейки, каждая из которых содержит нелинейный элемент, описывающий p – n -переход, и соединена с соседними ячейками резисторами. Такая эквивалентная схема позволяет моделировать растекание тока по слоям структуры и металлическим контактам [3]. Расчет выполнен методом узловых потенциалов.

Для количественной оценки неоднородности распределения напряжения введены градиенты вдоль горизонтального G_x (вдоль полосков) и вертикального G_y (перпендикулярно полоскам) направлений. Продольные и поперечные профили строились по различному количеству экспериментальных точек. При построении длинного профиля использовалось большее число точек, вследствие чего он в большей степени отражает локальную неоднородность карты электролюминесценции и содержит более выраженные высокочастотные флуктуации. Поперечный профиль, построенный с меньшим учетом точек, имеет более гладкий вид. Профили градиента напряжения вдоль полосы, к которой подведен внешний контакт, приведены на рис. 2. Справа от каждого графика указана разница между начальным и конечным значениями градиента.

Из экспериментальных зависимостей видно, что профиль градиента напряжения для реперного ФЭП демонстрирует плавное монотонное снижение G_x вдоль полосы по мере удаления от точки токоподвода. Такая форма распределения соответствует наиболее равномерному

протеканию тока по площади прибора. Профили других ФЭП отклоняются от этой монотонности с ростом резистивных потерь.

Следует отметить, что влияние контактного воздействия наиболее выражено вблизи токосборных шин, где осуществляется переход тока из металлического полоска в полупроводник. При контактном сопротивлении ток низкого уровня эффективно инжектируется в полупроводник уже вблизи точек токоподвода, в результате чего происходит градиент напряжения вдоль полоски монотонного переноса. При повышенном контактном сопротивлении переход тока в полупроводник затруднен, поэтому на начальном участке большая часть тока продолжает распространяться по металлической полоске. В центральной части полоска нижнего контакта минимальна, из-за чего разница между профилями оказывается незначительной. Наиболее заметные проявления вновь проявляются на периферийных участках, где начинает доминировать влияние удаленного контакта.

Поперечный градиент G_y для всех ФЭП имеет начальный участок быстрого изменения, после чего выходит на практически постоянное значение. Анализ экспериментальных профилей позволяет ввести разность между начальным и конечным значениями градиента как для продольного, так и для поперечного направлений. Эти величины обозначены как ΔG_x и ΔG_y . По физическому смыслу обе величины характеризуют, насколько равномерно шаблон контактной сетки позволяет распределить напряжение (и, следовательно, плотность тока) в плоскости p – n -перехода. Чем они меньше, тем ближе система к оптимальному компромиссу между оптическими и резистивными потерями. На рис. 3 представлены результаты моделирования.

В отличие от эксперимента при моделировании удастся зарегистрировать область, в которой градиент близок к нулю. Эта область находится в непосредственной близости от контактов. При этом соотношения величин ΔG_x

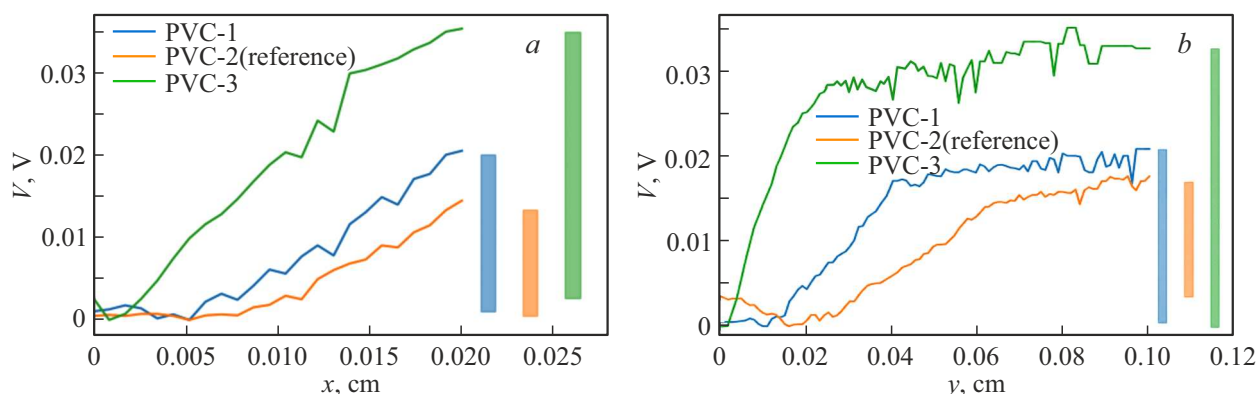


Рис. 3. Результаты численного моделирования распределения градиентов напряжения вдоль (а) и поперек (б) полоска.

Таблица 2. Характеристики разностей градиентов напряжения и потери эффективности преобразования

Номер ФЭП	Эксперимент		Моделирование		Относительные потери эффективности, %
	ΔG_x , мВ	ΔG_y , мВ	ΔG_x , мВ	ΔG_y , мВ	
1	5.1	19.3	20.3	19.0	0.8
2	2.6	9.2	13.4	12.8	0 (репер)
3	15.6	31.6	32.6	32.3	1.5

и ΔG_y , полученные в моделировании и в эксперименте, полностью коррелируют. Результаты представлены в табл. 2.

Это дополнительно подтверждает, что данные параметры характеризуют, насколько контактная сетка оптимизирована. Экспериментальные карты ЭЛ сложнее модельных, что указывает на необходимость учета неоднородности легирования и дефектов. Методика применима к ФЭП любого типа.

Применение данных критериев позволяет на этапе проектирования выбрать оптимальную геометрию контактов, обеспечивающую баланс между резистивными потерями и затенением поверхности, и, как следствие, достичь максимальной эффективности для целевого значения плотности мощности падающего лазерного излучения.

В работе проведен анализ карт ЭЛ ФЭП лазерного излучения на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs с различными параметрами фронтальной контактной сетки. Предложена методика анализа карт электролюминесценции, позволяющая получать карты градиента напряжения на $p-n$ -переходе. Показано, что равномерность карты градиента напряжений напрямую связана с тем, насколько конкретный шаблон контактной сетки близок к обеспечению баланса между оптическими и резистивными потерями. Установлены количественные критерии равномерности растекания тока — разности начального и конечного значений продольного ΔG_x и поперечного ΔG_y градиентов напряжения. Экспериментально и расчетным путем показано, что увеличение

этих разностей коррелирует со снижением эффективности преобразования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] P. Sanmartín, E.F. Fernandez, A. García-Loureiro. Renewable and Sustainable Energy Rev., **223**, 116031 (2025). DOI: 10.1016/j.rser.2025.116031
- [2] E.P. Putra, R. Theivindran, H. Hasnul, H.J. Lee, P.J. Ker, M.Z. Jamaludin, R. Awang, F.A.M. Yusof. J. Photonics Energy, **13**, 011001 (2023). DOI: 10.1117/1.JPE.13.011001
- [3] C. Algora, I. García, M. Delgado, R. Peña, C. Vázquez, M. Hinojosa, I. Rey-Stolle. Joule, **6**, 340 (2022). DOI: 10.1016/j.joule.2021.11.014
- [4] H. Helmers, E. Lopez, O. Hohn, D. Lackner, J. Schon, M. Schauerte, M. Schachtner, D. Frank, A.W. Bett. Phys. Status Solidi — Rapid Res. Lett., **15**, 2100113 (2021). DOI: 10.1002/pssr.202170026
- [5] V.M. Andreev, V.S. Kalinovskii, N.A. Kalyuzhnyy, E.V. Kontrosh, A.V. Malevskaya, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts. Techn. Phys. Lett., **50** (10), 1 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.10.59683.19957
- [6] N.A. Kalyuzhnyy, A.V. Malevskaya, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **262**, 112551 (2023). DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112551
- [7] M. Steiner, S.P. Philipps, M. Hermle, A.W. Bett, F. Dimroth. Progr. Photovolt.: Res. Appl., **19** (1), 73 (2011). DOI: 10.1002/pip.98

- [8] А.Д. Малевская, М.А. Минтаиров, В.В. Евсτροпов, Д.А. Малевский, А.В. Малевская, Р.А. Салий, Н.А. Калужный. *НТБ СПбГПУ*, **18** (1.1), 111 (2025). DOI: 10.18721/JPM.181.119
- [9] V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, M.A. Mintairov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Lantratov. *Proc. 25th EU PVSEC*, **23** (2010). DOI: 10.4229/25thEUPVSEC2010-1DV.2.33
- [10] B. Galiana, C. Algora, I. Rey-Stoll. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **16** (4), 331 (2008). DOI: 10.1002/pip.805
- [11] T. Trupke, R.A. Bardos, M.C. Schubert, W. Warta. *Appl. Phys. Lett.*, **89** (4), 44 (2006). DOI: 10.1063/1.2234747
- [12] T. Fuyuki, H. Kondo, T. Yamazaki, Y. Takahashi, Y. Uraoka. *Appl. Phys. Lett.*, **86** (26), 262 (2005). DOI: 10.1063/1.1978979
- [13] Z. Hameiri, A. Mahboubi Soufiani, M.K. Juhl, L. Jiang, F. Huang, Y.-B.Cheng, T. Trupke. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **23** (12), 1697 (2015). DOI: 10.1002/pip.2716

Редактор Г.А. Оганесян

Investigation of current spreading characteristics in the analysis of linear topology of front contacts of photovoltaic converters

*A.D. Malevskaya, M.A. Mintairov, V.V. Evstropov,
D.A. Malevskiy, A.V. Malevskaya,
R.A. Salii, N.A. Kalyuzhnyy*

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The features of the formation of electroluminescence maps of photovoltaic converters of laser radiation with a linear topology of the front contact grid have been studied. The electroluminescence intensity distribution characterizes the voltage variation in the $p-n$ junction and critically depends on the ratio of the metal strip resistance to the sheet spreading resistance in the semiconductor structure. A numerical simulation technique based on a three-dimensional distributed equivalent circuit was applied, which made it possible to establish a quantitative relationship between the voltage gradients along and across the contact strips and the emission efficiency.