

Влияние резистивных параметров фотоэлектрических преобразователей на карты электролюминесценции и вольт-амперные характеристики

© А.Д. Малевская, М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, Д.А. Малевский,
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 2025 г.

В окончательной редакции 10 июля 2025 г.

Принята к публикации 27 июля 2025 г.

Исследованы вольт-амперные характеристики и карты электролюминесценции четырех AlGaAs/GaAs фотоэлектрических преобразователей, отличающихся конструкцией контактных сеток. Показано, что сравнительный анализ вида карты электролюминесценции позволяет определить, как изменяется процесс растекания тока как внутри полупроводниковых слоев (растекание между контактными полосками), так и внутри металлических контактов. Характеристики всех образцов были проанализированы разработанным ранее методом с применением трубковой модели растекания тока. Для всех фотоэлектрических преобразователей были определены токи насыщения, слоевое сопротивление растекания, а также сопротивление металлических контактов. Полученные значения согласовались с отличиями, заложенными при проектировании контактных сеток фотоэлектрических преобразователей.

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

DOI: 10.61011/FTP.2025.05.61473.8072

В настоящее время актуальной задачей становится развитие фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) лазерного излучения для систем передачи энергии. Достижение высокой эффективности таких ФЭП, предназначенных для преобразования излучения большой мощности [1–4], требует поиска компромисса между величиной резистивных потерь и затенением фотоприемной поверхности фронтальной контактной сеткой. Оптимизация конструкции фронтальных контактов ФЭП возможна с помощью моделирования процессов растекания тока. Существуют различные подходы [5–8], включая используемую в работе трубковую модель [8], основанную на представлениях о трубках тока, траектория которых характеризуется изломами под прямым углом. Достоинством модели является ее физическая простота и возможность экспериментального определения основных параметров модели. Проблемой применения моделей растекания тока для описания экспериментальных вольт-амперных характеристик (ВАХ) является то, что, как показано в работе [8], параметры сопротивления металлического контакта и сопротивления слоя растекания оказывают эквивалентное влияние на ВАХ ФЭП. В результате анализ только вольт-амперных характеристик не позволяет однозначно определить ни величину сопротивления слоя растекания, ни величину сопротивления металлического контакта. В трубковой модели эти величины характеризуются параметрами R_{sheet} (слоевое сопротивление растекания) или зависящим от него параметром R_L (характеризует

суммарное латеральное сопротивление структуры) и параметром R_M (сопротивление металлического полоска). Одним из решений указанной проблемы является проведение дополнительного анализа карты электролюминесценции (ЭЛ) поверхности ФЭП [8,9]. Анализ карт ЭЛ является известным подходом, позволяющим судить о качестве контактов ФЭП, в том числе о резистивных потерях [10]. При этом ранее детально влияние на вид карты ЭЛ величины слоевого сопротивления растекания и сопротивления контактов не исследовалось. В данной работе подробно рассмотрено, как изменяется карта ЭЛ ФЭП в зависимости от параметров R_M и R_L . Также проведена оценка, насколько корректно разработанные ранее методы позволяют определять величины R_M и R_{sheet} .

Анализ карт ЭЛ и ВАХ проведен в соответствии с трехпараметрической трубковой моделью [8,9]. Дадим кратко общее описание подхода расчета ВАХ и карты ЭЛ. В модели поверхность ФЭП, заключенная между каждой парой контактов ФЭП, разбивается на M частей. Каждая часть соединена с соседней сопротивлением контакта R_M/M . Далее, каждая часть дополнительно разбивается на N трубок тока, так же как в работе [6], где каждая трубка включает в себя p – n –переход и два сопротивления — вертикальное R_V и латеральное. Латеральное сопротивление зависит от постоянного параметра R_L , определяемого расстоянием между контактными полосками W и слоевым сопротивлением R_{sheet} . ВАХ каждой части ФЭП рассчитывается

по формуле

$$J = J_g - \Sigma \left(J_{0,ir,j} \exp \left(\frac{q[V - J \cdot R]}{A_j k_B T} \right) \right), \quad (1)$$

где J — плотность тока, J_g — фотогенерированный ток, V — приложенное напряжение, k_B — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, q — заряд электрона, $J_{0,ir,j} = \frac{J_{0,j}}{N \cdot M}$ — токи насыщения для трубок тока, A_j — соответствующие им диодные коэффициенты. В соответствии с данными работы [9] сопротивление R задается формулой

$$R = R_V \cdot N \cdot M + R_L \cdot i \cdot M + \frac{1}{4} \cdot R_M \cdot k \cdot N \cdot S, \quad (2)$$

где S — площадь образца, i — номер трубки, k — номер части контакта, R_M рассчитывается по формуле

$$R_M = \frac{\rho_m}{W_m \cdot h_m} \cdot l_m, \quad (3)$$

где ρ_m — удельное сопротивление металла, из которого выполнен контакт, l_m , W_m , h_m — длина, ширина и высота контактной шинки соответственно. Сложение ВАХ для всех частей фотоэлектрического преобразователя, полученных при помощи (1), дает полную ВАХ ФЭП. Тот факт, что для каждой части фотоэлектрического преобразователя ВАХ рассчитывается отдельно, позволяет определить значения напряжений на p – n -переходах всех частей, а значит, и определить распределение интенсивности ЭЛ по поверхности ФЭП. Расчет интенсивности ЭЛ (L) каждой части производится по формуле

$$L = L_0 \exp \left(\frac{qV}{k_B T} \right), \quad (4)$$

где L_0 — предэкспоненциальный множитель.

При изучении карты ЭЛ интерес представляет случай, рассмотренный в работе [8], когда ток подается к краю контактной сетки ФЭП. В этом случае, анализируя спад яркости ЭЛ от края, можно определить характерные величины, влияющие на процесс растекания тока. В работе исследованы именно такие характеристики и то, как изменяется их вид в зависимости от величин параметров R_L и R_M . Для этого исследованы ВАХ и карты ЭЛ четырех AlGaAs/GaAs ФЭП, в которых изменялся как параметр R_L (варьированием расстояния между контактами ФЭП: $W = 100$ и 140 мкм), так и R_M (изменением геометрии контактных полосок: $W_m = 2$ мкм, $h_m = 7$ мкм и $W_m = 5$ мкм, $h_m = 8$ мкм). Все четыре ФЭП изготовлены из одной структуры, выращенной методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений. Структура ФЭП представлена на рис. 1.

Карты ЭЛ исследовались в широком диапазоне токов, пропускаемых через структуру ФЭП (0.1 до 20 А/см²). На рис. 2 приведены данные для части измерений (10 и 20 А/см²). При этих токах наиболее четко регистрировались изменения карт ЭЛ.

| |
|---|
| GaAs – n^+ (Si) $6 \cdot 10^{18}$ см ⁻³ [150 μm] contact layer |
| Al _{0.16} Ga _{0.84} As – n (Si) $3 \cdot 10^{18}$ см ⁻³ [2000 μm] wide-bandgap window |
| Al _{0.35} Ga _{0.65} As–GaAs – n (Si) $2 \cdot 10^{17}$ см ⁻³ [1000 μm] emitter |
| GaAs – p (Zn) $1 \cdot 10^{17}$ см ⁻³ [3400 μm] base |
| Al _{0.2} Ga _{0.8} As – p (Zn) $4 \cdot 10^{18}$ см ⁻³ [200 μm] back surface field |
| GaAs – p -wafer |

Рис. 1. Схема эпитаксиальной гетероструктуры ФЭП.

Сравнение карт ЭЛ образцов 1 и 2 при токе 20 А/см² демонстрирует влияние параметра R_L . Наиболее наглядно это видно в области, обведенной желтым прямоугольником на рис. 1. Так, в образце 1 (с меньшим R_L , обусловленным меньшим расстоянием между контактами W) наблюдается более равномерное распределение интенсивности ЭЛ внутри полоски, ближайшей к краю ФЭП. В образце 2, напротив, из-за большего R_L ток преимущественно течет по самой правой контактной полоске, что менее выражено в образце 1. Таким образом, уменьшение R_L регистрируется по более равномерной карте свечения между двумя контактными полосками.

Сравнение карт ЭЛ образцов 1 и 2 с образцами 3 и 4 демонстрирует влияние параметра R_M . При обоих токах наблюдается более равномерное распределение интенсивности ЭЛ в образцах с меньшим сопротивлением контактов R_M (образцы 3 и 4), обусловленным большим сечением их контактов (у образцов 3 и 4 ширина и высота составляли 5 и 8 мкм соответственно, а у образцов 1 и 2 эти же величины были 2 и 7 мкм). Таким образом, уменьшение R_M регистрируется по увеличению равномерности интенсивности ЭЛ всей поверхности ФЭП.

Использование трубковой модели и метода из работ [7,8] для анализа карт ЭЛ (рис. 2) и ВАХ (рис. 3) позволило определить параметры R_L и R_M для исследованных образцов. Метод базируется на подборе параметров модели при помощи как аппроксимации ВАХ, так и при помощи аппроксимации затухания интенсивности ЭЛ полосок вблизи контактов (рис. 4). Отметим, что выражение (2) полностью корректно для описания ВАХ, полученных в условиях, обеспечивающих равномерное поступление тока ко всем контактными полоскам. Условия представленного эксперимента отличались (ток подавался к краю контактной сетки), поэтому коэффициент $1/4$, входящий в выражение (2), должен

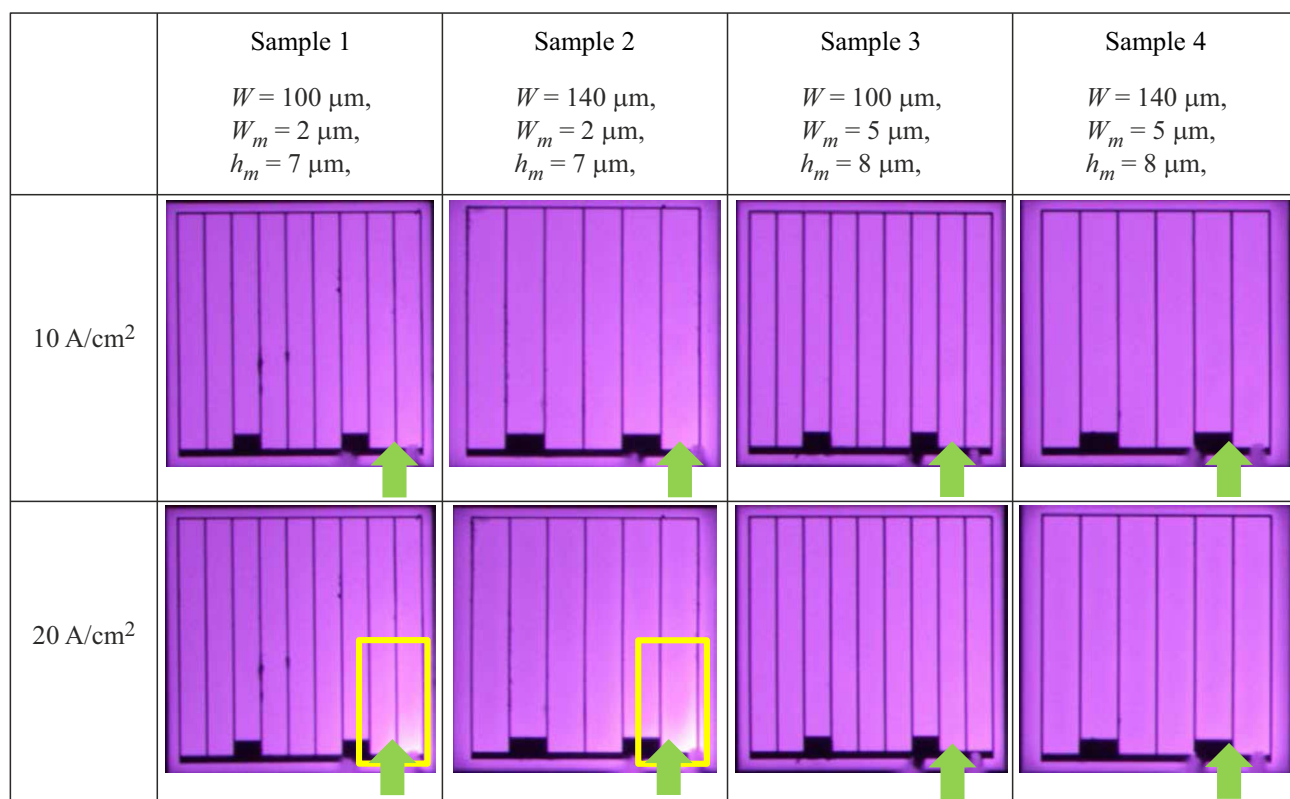


Рис. 2. Карты ЭЛ для образцов ФЭП с шагом контактной сетки 100 и 140 мкм и двумя типами контактных шинок ($W_m = 2 \mu\text{м}$, $h_m = 7 \mu\text{м}$ и $W_m = 5 \mu\text{м}$, $h_m = 8 \mu\text{м}$). Стрелкой показано место подключения контакта.

измениться. Эмпирически было установлено, что он равен 1/8. Полученные параметры модели представлены в таблице.

Найденные параметры R_{sheet} (сопротивление слоя растекания) слабо изменяются между образцами AlGaAs/GaAs ФЭП. Теоретическая оценка этого же параметра дает близкое значение $R_{\text{sheet}} = 12 \text{ Ом}$. При этом полученные значения R_M расходятся с теоретической оценкой, которая составила 1.41 Ом для образцов 1 и 2 и 0.49 Ом для образцов 3 и 4. Наблюдаемое несоответствие может быть связано с различиями между фактическими и проектными размерами контактов ($\sim 0.4 \mu\text{м}$ для образцов 1 и 2; $\sim 1.0 \mu\text{м}$ для образцов 3 и 4) или с неучтенным сопротивлением на границе металл-полупроводник. При этом стоит отметить, что полученные данные позволяют установить, что у образцов 3 и 4 в среднем сопротивление R_M в 2.95 раза меньше, чем у образцов 1 и 2. Эта величина хорошо согласуется с теоретической оценкой, которая дает цифру 2.87. Все расчеты давали значение R_V , близкое к нулю, что свидетельствует о том, что его вклад в общие резистивные потери значительно меньше вклада R_L и R_M . Также отметим, что сопротивление металлических контактов у пар образцов 1 и 2, 3 и 4 различается при одинаковых значениях геометрических параметров. Скорее всего это связано с наличием большого количества дефектов

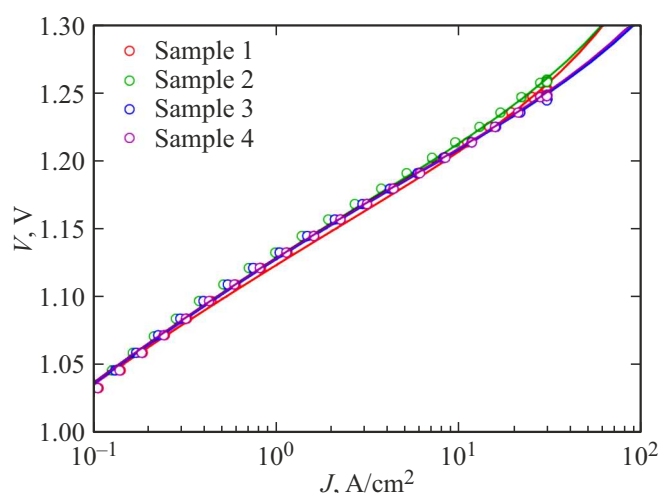


Рис. 3. ВАХ исследуемых образцов AlGaAs/GaAs ФЭП. Символы — экспериментальные темновые ВАХ, сплошные линии — результат аппроксимации трубковой моделью.

(в виде темных пятен на картах ЭЛ вблизи контактных шинок) у образцов 1 и 4 (рис. 2). Это позволяет сделать вывод, что метод анализа ВАХ и карт ЭЛ при помощи трубковой модели позволяет с высокой точностью определять слоевое сопротивление R_{sheet} , а также

Результаты аппроксимации карт ЭЛ и ВАХ исследуемых образцов AlGaAs/GaAs ФЭП

| | Образец 1 $W = 100 \text{ мкм},$ $W_m = 7 \text{ мкм},$ $h_m = 2 \text{ мкм}$ | Образец 2 $W = 140 \text{ мкм},$ $W_m = 7 \text{ мкм},$ $h_m = 2 \text{ мкм}$ | Образец 3 $W = 100 \text{ мкм},$ $W_m = 8 \text{ мкм},$ $h_m = 5 \text{ мкм}$ | Образец 4 $W = 140 \text{ мкм},$ $W_m = 8 \text{ мкм},$ $h_m = 5 \text{ мкм}$ |
|---|--|--|--|--|
| $J_{01}, \text{A/cm}^2$ | $4.0 \cdot 10^{-7}$ | $3.0 \cdot 10^{-7}$ | $3.0 \cdot 10^{-7}$ | $3.0 \cdot 10^{-7}$ |
| $J_{01.5}, \text{A/cm}^2$ | $1.4 \cdot 10^{-13}$ | $1.0 \cdot 10^{-13}$ | $1.05 \cdot 10^{-13}$ | $1.0 \cdot 10^{-13}$ |
| $J_{02}, \text{A/cm}^2$ | $7.0 \cdot 10^{-11}$ | $1.0 \cdot 10^{-10}$ | $1.0 \cdot 10^{-10}$ | $1.0 \cdot 10^{-10}$ |
| $R_{\text{sheet}}, \text{Ом} \cdot \text{см}^2$ | 12.20 | 12.75 | 12.0 | 12.24 |
| $R_V, \text{Ом}$ | | | 0.0 | |
| $R_M, \text{Ом}$ | 1.20 | 0.99 | 0.35 | 0.40 |

Примечание. J_{01} , $J_{01.5}$ и J_{02} — токи насыщения с коэффициентами идеальности $A = 1, 1.5$ и 2 , R_V — вертикальное сопротивление структуры, R_M — сопротивление контактной шинки (длина шинки 0.1 см), R_{sheet} — сопротивление слоя растекания, рассчитывается по формуле $R_{\text{sheet}} = R_L h_s / (W/2)^2$ [6], где h_s — толщина области растекания тока (в указанных образцах $h_s = 3 \text{ мкм}$).

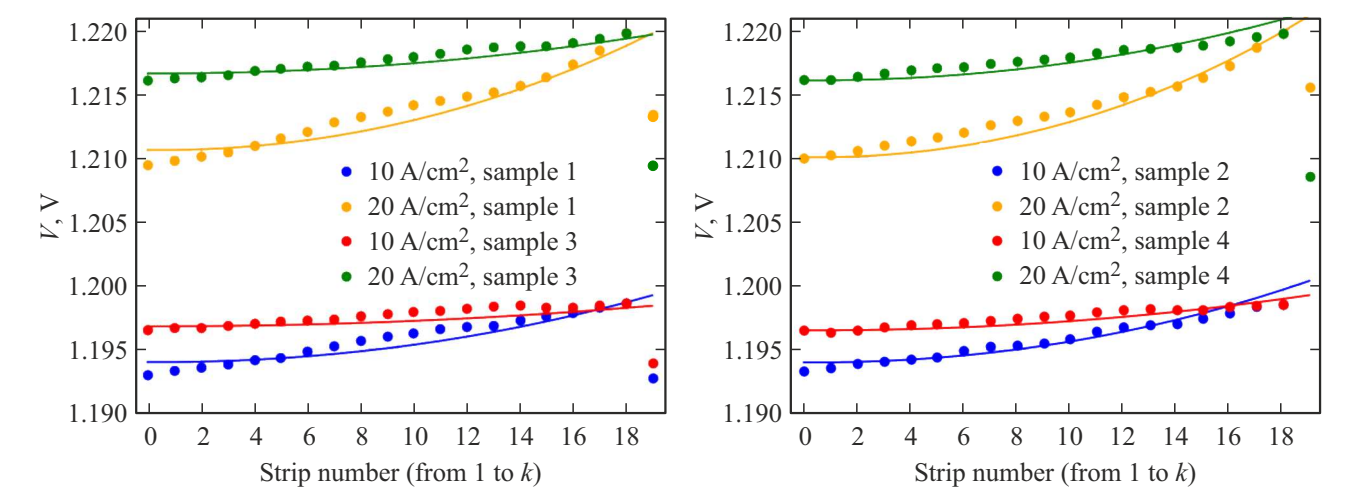


Рис. 4. Затухание интенсивности ЭЛ полосок. Точки — экспериментальные данные, линии — результат аппроксимации.

проводить сравнительный анализ нескольких образцов и определять, насколько у них отличаются сопротивления металлических шинок. Предложенный метод обеспечивает эффективную характеристику резистивных потерь и позволяет моделировать токораспределение в ФЭП.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Z.I. Alferov, V.M. Andreev, V.D. Rumyantsev. In: *High-Efficient Low-Cost Photovoltaics*, ed. by V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberger (Cham., Springer, 2020), Springer Ser. Opt. Sci., v. 140, p. 133.

[2] M. Steiner, S.P. Philipps, M. Hermle, A.W. Bett, F. Dimroth. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **19** (1), 73 (2011).

[3] H. Helmers, Ed. Oliva, M. Schachtner, G. Mikolasch, L.A. Ruiz-Preciado, Al. Franke, J. Bartsch. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **32** (9), 636 (2024).

[4] C. Algora, I. García, M. Delgado, R. Peña, C. Vázquez, M. Hinojosa, I. Rey-Stolle. *Joule*, **6** (2), 340 (2022).

[5] B. Galiana, C. Algora, I. Rey-Stolle. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **16**, 331 (2008).

[6] М.А. Минтаилов, В.В. Евстропов, С.А. Минтаилов, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, Н.А. Калужный. *ФТП*, **50** (7), 987 (2016).

[7] A.D. Malevskaya, M.M. Mintairov, V.V. Evstropov, D.A. Malevskiy, A.V. Malevskaya, N.A. Kalyuznyy. *St. Petersburg State Polytech. Univ. J. Phys. Math.*, **18** (1.1), 111 (2025).

[8] А.Д. Малевская, М.А. Минтаилов, В.В. Евстропов, Д.А. Малевский, Н.А. Калужный. *ФТП*, **58** (10), 573 (2024).

[9] T. Trupke, R.A. Bardos, M.C. Schubert, W. Warta. *Appl. Phys. Lett.*, **89** (4), 44107 (2006).

[10] T. Fuyuki, H. Kondo, T. Yamazaki, Y. Takahashi, Y. Uraoka. *Appl. Phys. Lett.*, **86** (26), 262108 (2005).

Редактор А.Н. Смирнов

Photovoltaic converters resistive parameters effect on its IV-curves and electroluminescence maps

*A.D. Malevskaya, M.A. Mintairov, V.V. Evstropov,
D.A. Malevsky, R.A. Saliy, N.A. Kalyuzhny*

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The IV-curves and electroluminescence (EL) maps of four AlGaAs/GaAs photovoltaic converters (PVCs) differing in the design of contact grids have been investigated. It is shown that EL map form comparative analysis allows to determine how the current flow process changes both inside the semiconductor layers (between the contact strips) and inside the metal contacts. The characteristics of all samples have been analyzed by a previously developed method with using the tube model of current flow. For all PVCs, saturation currents, sheet resistance, and resistance of metal contacts have been determined. The obtained values agreed with the differences incorporated in the design of PVC contact grids.