

Определение дисбаланса фотогенерированных токов в многопереходных фотопреобразователях лазерного излучения

© М.А. Минтаилов, В.В. Евстропов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаилов,
М.В. Нахимович, М.З. Шварц

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

E-mail: mamint@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2025 г.

В окончательной редакции 7 июля 2025 г.

Принята к публикации 14 июля 2025 г.

Предложен метод определения коэффициента дисбаланса фотогенерированных токов многопереходных фотопреобразователей при помощи анализа их вольт-амперных характеристик. Метод применен к двух-переходному GaAs/GaAs-фотопреобразователю лазерного излучения, оптимизированному на длину волны 800 нм. Для демонстрации метода были получены характеристики при спектральном составе падающего излучения АМ0 (космический спектр солнца), в котором фотопреобразователь работал в режиме дисбаланса фотогенерированных токов. Применение метода показало, что величина дисбаланса в этом случае составляет $\kappa = 1.8$.

Ключевые слова: фотопреобразователь, лазерное излучение, кпд, фототок, математическое моделирование.

DOI: 10.61011/FTP.2025.04.61253.8082

Многопереходные (МП) фотопреобразователи лазерного излучения (ФПЛИ) являются востребованными приборами в оптоэлектронных системах благодаря возможности генерировать высокое напряжение [1–3]. Как известно, в монолитных МП структурах, где субэлементы соединены последовательно, общее напряжение равно сумме напряжений, генерируемых субэлементами, а фотогенерированный ток (ФГТ) равен наименьшему току из генерируемых субэлементами. Таким образом, для достижения максимальных значений кпд МП ФПЛИ оптимальным является случай, когда ФГТ равны [4]. Поэтому важной задачей при разработке МП ФПЛИ является выбор толщин слоев субэлементов таким образом, чтобы при преобразовании лазерного излучения с требуемой длиной волны все субэлементы структуры имели одинаковые ФГТ.

Для контроля величин ФГТ в МП солнечных элементах (СЭ) обычно используются экспериментальные методики измерения внешнего квантового выхода фототока [5,6]. Однако эти методы основываются на том, что для каждого субэлемента МП СЭ существует такая длина волны падающего излучения, которая поглощается только в нем. Другими словами, эти методы применимы к МП СЭ, субэлементы которых имеют разную ширину запрещенной зоны. Применение этих методов для МП ФПЛИ структур, где субэлементы выполнены из одинаковых материалов, является весьма сложной, а зачастую не реализуемой метрологической задачей. Поэтому поиск новых методов регистрации величины дисбаланса ФГТ МП ФПЛИ является важной и актуальной задачей.

Одно из решений предложено в работе [7], где авторы измеряют вольт-амперные характеристики и благодаря

наличию у всех субэлементов больших обратных токов утечки регистрируют при обратном смещении фототоки отдельных субэлементов. Требования обязательного наличия обратных токов утечки существенно ограничивают применение этого метода.

В данной работе предложен новый метод, основанный на экспериментальной регистрации величины добавочного напряжения дисбаланса [8] и последующего его анализа. В работе описано применение предложенного метода к структуре GaAs/GaAs МП ФПЛИ.

Структура исследованного МП ФПЛИ была выращена методом металлорганической газовой эпитаксии (МОГФЭ) с использованием горизонтального реактора пониженного давления. В качестве источников атомов III группы использовались триметилгаллия и триметилалюминия, в качестве источника мышьяка — арсин, в качестве источников донорной и акцепторной примесей — силан и диэтилцинк соответственно. Структура ФПЛИ состояла из двух последовательно соединенных через туннельный диод GaAs p – n -переходов, с барьерными слоями AlGaAs и имеющих коэффициенты идеальности A_1 и A_2 соответственно. Коэффициент дисбаланса κ есть отношение большего ФГТ к меньшему.

В соответствии с [8] эквивалентная схема такого МП ФПЛИ может быть преобразована к двум элементам, соединённым последовательно. Первый элемент включает два p – n -перехода, соединенных последовательно, с одинаковыми ФГТ, равными наименьшему из токов субэлементов. Такой элемент схемы может быть заменен на один p – n -переход с коэффициентом идеальности $A_s = A_1 + A_2$ и током насыщения (J_0), равным среднему геометрическому токов насыщения p – n -переходов. Второй элемент генерирует напряжение V_a , которое в

работе [8] названо добавочным напряжением дисбаланса:

$$V_a = \frac{A \cdot kT}{q} \ln \left(\frac{\kappa J_g - J}{J_g - J} \right), \quad (1)$$

где q — заряд электрона, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, A — коэффициент идеальности субэлемента с избыточным фототоком (в зависимости от того, какой субэлемент находится в режиме дисбаланса A может принимать значение либо A_1 , либо A_2). Полная ВАХ прибора при этом описывается выражением

$$V = \frac{A_s \cdot kT}{q} \ln \left(\frac{J_g - J}{J_0} \right) + V_a. \quad (2)$$

Использование выражения (1) позволяет определить коэффициент дисбаланса κ . При этом величина V_a может быть получена экспериментально. Для этого требуется сравнить световую вольт-амперную характеристику (ВАХ) с темновой. Последняя всегда регистрируется в режиме баланса ФГТ (ФГТ всех субэлементов равны нулю). Далее темновая ВАХ сравнивается с набором световых ВАХ, полученных при разной мощности падающего излучения. Это позволяет многократно регистрировать величину V_a . Для этого была предложена методика, которая основывается на преобразовании ВАХ — зависимости напряжения от тока ($V - J$) — в характеристику $V - J/J_g$, т.е. зависимости напряжения от отношения тока к ФГТ. Введем величину ε , равную указанному отношению, $\varepsilon = J/J_g$. Подставим в (1) $J = \varepsilon \cdot J_g$ и получим

$$V_{a,\varepsilon} = \frac{A \cdot kT}{q} \ln \left(\frac{\kappa J_g - \varepsilon J_g}{J_g - \varepsilon J_g} \right) = \frac{A \cdot kT}{q} \ln \left(\frac{\kappa - \varepsilon}{1 - \varepsilon} \right). \quad (3)$$

Из (3) следует, что величина добавочного напряжения не зависит от уровня освещения при токах, составляющих постоянную долю от фотогенерированного тока ε . Введем величины V_ε и J_ε , так что V_ε — это напряжение на световой ВАХ при токе $J = J_\varepsilon = \varepsilon \cdot J_g$. Как известно, сравнение напряжений фотопреобразователя (ФП) в разных режимах (например, в световом и темновом) должно производиться при одинаковом токе, протекающем через p – n –переход ФП, т.е. при токе $J_{pn} = J_g - J$. В случае темнового напряжения этот ток равен темновому току $J_{pn} = J_{\text{dark}}$, в случае световых ВАХ для тока J_ε получим $J_{pn} = J_g - \varepsilon \cdot J_g = J_g(1 - \varepsilon)$. Таким образом, из световых ВАХ можно сформировать новую фотовольтаическую зависимость V_ε от $J_g(1 - \varepsilon)$, которая будет смещена относительно темновой ВАХ на постоянную величину добавочного напряжения дисбаланса $V_{a,\varepsilon}$, определяемую выражением (3). Основываясь на этом, в данной работе проведено измерение набора световых ВАХ и конструирование $V_{a,\varepsilon} - J_g(1 - \varepsilon)$ характеристик с последующим сравнением их с безрезистивной темновой ВАХ. Сравнение сделано при разных ε , что позволило построить экспериментальную

зависимость $V_{a,\varepsilon}$ и, аппроксимируя ее выражением (3), определить величину токового дисбаланса κ .

Двухпереходный GaAs/GaAs ФПЛИ, использованный для экспериментальной апробации описанной выше методики, был оптимизирован для преобразования лазерного излучения с длиной волны 800 нм. Оптимизация проводилась за счет подбора толщин субэлементов, на основании расчета поглощения света с длиной волны 800 нм в GaAs-слоях. В расчете считалось, что поглощение на данной длине волны происходит экспоненциально, с коэффициентом поглощения $a = 1.2161$ [9]. Расчетные толщины составляли 558 нм для верхнего субэлемента и 3700 нм для нижнего. Экспериментально баланс ФГ токов подтверждался тем, что его характеристики $V_\varepsilon - J_g(1 - \varepsilon)$, полученные при освещении лазером с длиной волны 800 нм, совпадали, что возможно, если $V_{a,\varepsilon} = 0$ и $\kappa = 1$. Для демонстрации предложенного подхода определения коэффициента дисбаланса κ этот же образец был освещен на имитаторе солнечного излучения [10] космическим солнечным спектром АМ0, что привело к дисбалансу ФГТ. Далее, был измерен и обработан набор его экспериментальных ВАХ. При этом в качестве темновой ВАХ применялась зависимость напряжения холостого хода от тока короткого замыкания ($V_{OC} - J_g$), полученная в условиях баланса ФГТ. Причина ее применения в том, что она совпадает с темновой ВАХ, но в отличие от последней — безрезистивная, что позволяет более наглядно продемонстрировать предложенный метод.

На рис. 1 показаны полученные экспериментальные характеристики V_ε от $(J_g - J_\varepsilon)$ для разных ε . Исследуемые характеристики показали наличие нескольких сегментов ВАХ (рис. 2). Под сегментом подразумевается участок характеристики, на котором не изменяется ее коэффициент идеальности (коэффициент идеальности сегмента A_s). Для точного получения искомых вели-

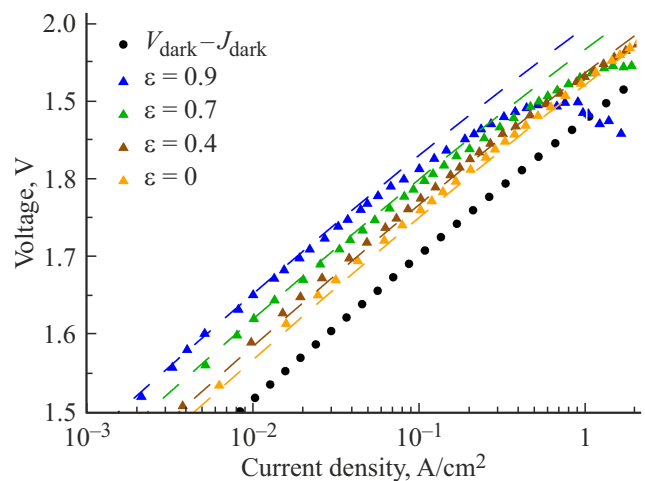


Рис. 1. Зависимости V_ε от $(J_g - J_\varepsilon)$ для разных ε и темновая безрезистивная ВАХ, полученная из $V_{OC} - J_g$ характеристики при условиях баланса ФГТ.

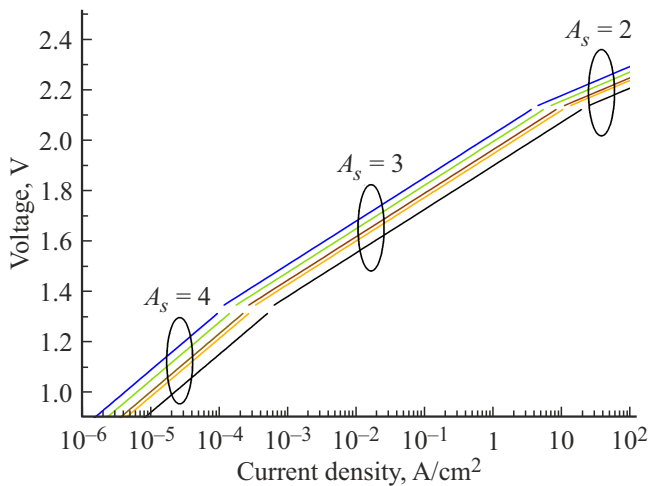


Рис. 2. Сегменты зависимостей V_ϵ от $(J_g - J_\epsilon)$, представленных на рис. 1. Цвета линий соответствуют цветам на рис. 1.

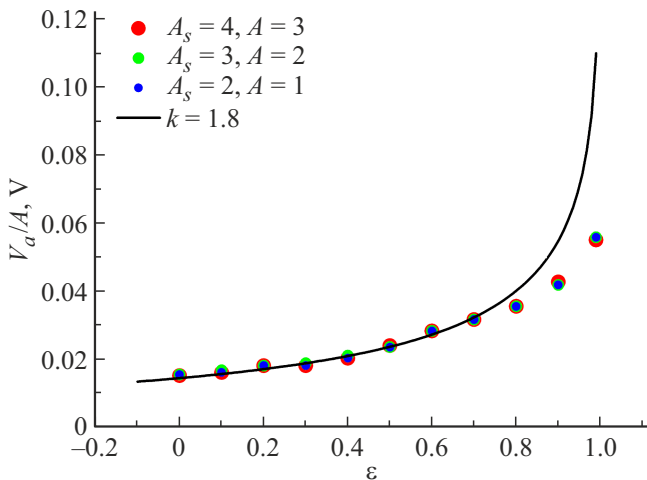


Рис. 3. Зависимости добавочного напряжения, деленного на коэффициент идеальности V_a/A , от доли фотогенерированного тока ϵ (символы — зависимости для трех сегментов с разным коэффициентом идеальности A_s ; линия — результат аппроксимации выражением (3)).

чин экспериментальные характеристики аппроксимировались суммой трех экспонент с различным A_s (2, 3 и 4). Экспериментальные данные и результат аппроксимации приведены на рис. 2. Результат аппроксимации представлен в двух видах: на рис. 2 показаны найденные ВАХ сегментов, а на рис. 1 — суммарная ВАХ (результат сложения токов ВАХ сегментов при одинаковом напряжении).

ВАХ для трех сегментов приведены на рис. 2. Отметим, что выражение (3) применимо для характеристик с одним сегментом, поэтому для дальнейшего нахождения $V_{a,\epsilon}$ мы использовали наборы $V_\epsilon - J_g(1 - \epsilon)$ характеристик, представленные на рис. 2, относящиеся к одному сегменту. Это позволило определить V_a для сегментов с коэффициентом идеальности $A_s = 2$, $A_s = 3$ и $A_s = 4$.

При этом на рис. 2 видно, что вольтовая разница между темновой ВАХ и характеристиками $V_\epsilon - (J_g - J_\epsilon)$ увеличивается с ростом A_s . Это свидетельствует о том, что увеличение добавочного напряжения дисбаланса вызвано изменением коэффициента идеальности A , входящего в выражение (3). Был подобран параметр A таким образом, чтобы величина V_a/A была одинаковой для всех трех сегментов. Из (3) очевидно, что эта величина должна быть постоянной. На рис. 3 приведен результат проделанной процедуры.

Аппроксимация полученных зависимостей V_a/A позволила найти величину коэффициента дисбаланса $\kappa = 1.8$. Таким образом, разработан метод, позволяющий из набора экспериментальных ВАХ, получить экспериментально величины добавочного напряжения дисбаланса для набора токов, составляющих постоянную долю от ФГТ. Показано, что эту величину можно получить для разных сегментов ВАХ, что позволяет регистрировать ее несколько раз. Подбирая положение сегментов таким образом, чтобы приведенное значение V_a/A совпадало для одинаковых токов, можно повысить достоверность получаемых значений V_a , а также определить коэффициенты идеальности A субэлемента с избыточным ФГТ. Полученная в итоге предложенной процедуры характеристика V_a/A от ϵ может быть аппроксимирована выражением (3) с одним параметром подбора — коэффициентом дисбаланса κ . Таким образом, в работе предложен метод, позволяющий на основании анализа ВАХ, определять величину дисбаланса ФГТ для ФЭП ЛИ с несколькими $p-n$ -переходами. Метод применен к двухпереходному ФЭП, однако без существенных изменений может применяться и к ФЭП ЛИ с любым количеством субэлементов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J. Schubert, E. Oliva, F. Dimroth, W. Guter, R. Loeckenhoff, A.W. Bett. IEEE Trans. Electron Dev., **56**, 170 (2009).
- [2] S. Fafard, F. Proulx, M.C.A. York, L.S. Richard, P.O. Provost, R. Ares, V. Aimez, D.P. Masson. Appl. Phys. Lett., **109**, 131107 (2016).
- [3] Y.M. Zhao, Y.R. Sun, Y. He, S.Z. Yu, J.R. Dong. Sci. Rep., **6**, 38044 (2016).
- [4] L. Wagner, S.K. Reichmuth, S.P. Philipps, E. Oliva, A.W. Bett, H. Helmers. Progr. Photovolt., **29**, 172 (2021).
- [5] M. Meusel, C. Baur, G. Létay, A.W. Bett, W. Warta, E. Fernandez. Progr. Photovolt., **11**, 499 (2003).
- [6] J. Garcés, H. Socolovsky, J. Pla. Meas. Sci. Technol., **28**, 055203 (2017).
- [7] An-Cheng Wang, Yu-Run Sun, Shu-Zhen Yu, Jia-Jin, Wey Zhang, Jun-Cheng Wang, Qiu-Xue Fu, Jian-Rong Dong. Appl. Phys. Lett., **118**, 233902 (2021).

- [8] М.А. Минтаиров, В.В. Евсеров, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, Н.А. Калужный. Письма ЖТФ, **49** (23), 38 (2023).
- [9] Horst K. Zimmermann. *Integrated Silicon Optoelectronics* (Springer Berlin–Heidelberg, 2009).
- [10] M.Z. Shvarts, V.R. Larionov D.A. Malevskiy, M.V. Nakhimovich. AIP Conf. Proc., **2550** (1), 020010 (2022).

Редактор Г.А. Оганесян

Determination of imbalance of photogenerated currents in multijunction photoconverters of laser radiation

M.A. Mintairov, V.V. Evsropov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, M.Z. Shvarts

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract A method for determining the imbalance coefficient of photogenerated currents of multijunction photoconverters by analyzing their I/V characteristics is proposed. The method is applied to a dual-junction GaAs/GaAs laser radiation photoconverter optimized for a wavelength of 850 nm. To demonstrate the method, the characteristics were obtained for the spectral composition of incident radiation AM0 (the space spectrum of the sun), in which the photoconverter operated in the imbalance mode of photogenerated currents. Application of the method showed that the imbalance value in this case is $\kappa = 1.8$.