

Особенности тестирования микроразмерных фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения

© П.В. Покровский, В.П. Хвостиков, А.В. Малевская, О.А. Хвостикова

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

E-mail: olgakhv@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 30 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 25 июня 2025 г.

Принята к публикации 15 июля 2025 г.

Для тестирования микроразмерных (30–300 мкм) фотоэлектрических преобразователей разработан измерительный стенд с использованием оптоволокна для передачи лазерного излучения. Установка позволяет исследовать основные характеристики фотопреобразователей малого размера: вольт-амперные, быстродействие прибора и регистрировать спектр электролюминесценции. Показаны особенности измерения фотоэлектрических параметров преобразователей различного типа.

Ключевые слова: лазерное излучение, микроразмерный фотоэлектрический преобразователь, измерительный стенд.

DOI: 10.61011/FTP.2025.04.61250.7952

1. Введение

Одним из перспективных направлений энергетики является развитие технологии передачи энергии (беспроводной или по оптическому волокну) лазерного излучения (ЛИ) на значительные расстояния с ее последующим преобразованием в электрическую энергию с помощью фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) [1]. Для эффективного развития данной технологии требуются ФЭП, преобразующие лазерное излучение с плотностью мощности от 100 Вт/см² и выше. Преобразование ЛИ высокой плотности мощности ($\sim$ кВт/см²) позволило бы увеличить расстояние, на которое может передаваться оптическая энергия, и область использования данной технологии [2]. В последнее время созданию и исследованию таких высокомоощных преобразователей уделяется все большее внимание [3–7]. Одним из путей увеличения плотности мощности преобразуемого излучения является создание высокоэффективных фотопреобразователей с линейными размерами фотоприемной поверхности от 30 до 300 мкм (рис. 1). Во фронтальных ФЭП — это диаметр круга, в „торцевых“ ФЭП — толщина волноводного слоя и фотоактивной области ($p-n$ -переход). Для исследования характеристик таких микроразмерных ФЭП необходима разработка прецизионных стендов, позволяющих производить измерения параметров фотопреобразователей при засветке лазерным излучением высокой плотности без влияния температурных эффектов.

В работе [4] были исследованы характеристики GaAs ФЭП с диаметром фотоприемной поверхности 30, 50 и 150 мкм, однако условия работы измерительного стенда (засветка импульсным или постоянным ЛИ) для плотностей мощности 550–1900 Вт/см² не были указаны. В настоящей работе были продолжены исследования параметров ФЭП лазерного излучения высокой плот-

ности в квазистационарном режиме работы измерительного стенда (при облучении импульсами 300 нс) [6] и проведены его дальнейшие усовершенствования. Установка позволяет исследовать характеристики не только традиционных фронтальных фотопреобразователей, в которых фотоприемная поверхность параллельна $p-n$ -переходу (рис. 1, *a*) [3,4], но и „торцевых“ ФЭП, в которых фотоприемная поверхность перпендикулярна $p-n$ -переходу (рис. 1, *b*) [5]. Измерительный стенд позволяет записывать вольт-амперные характеристики (ВАХ) при плотностях мощности лазерного излучения от 100 до 15000 Вт/см², измерять быстродействие приборов на пробных импульсах с длительностью на полувысоте $\sim$ 2 нс, записывать и анализировать спектр электролюминесценции и дополнительно оценивать толщину волноводного слоя „торцевого“ ФЭП.

Измерительный стенд предназначен для работы в нескольких режимах:

- 1) режим измерения ВАХ при облучении импульсами 300 нс (рис. 2, *a*);
- 2) режим измерения параметров быстродействия пробными импульсами 2 нс (рис. 2, *b*);
- 3) режим регистрации электролюминесценции (рис. 2, *c*).

Структурная схема стенда для разных режимов приведена на рис. 2, *a–c*. Неизменной частью установки являются оптическое волокно (например, 50/125 мкм), ФЭП ЛИ (LPVC), микроскоп и трехкоординатная система микрометрических подвижек, так как в микроразмерных фотоэлектрических преобразователях необходима повышенная точность совмещения выходного торца оптического волокна с входным окном или фотоприемной поверхностью ФЭП.

Режим измерения ВАХ при облучении импульсами 300 нс. Измерение ВАХ фотоэлектрического преобразователя в квазинепрерывном режиме подачи ла-

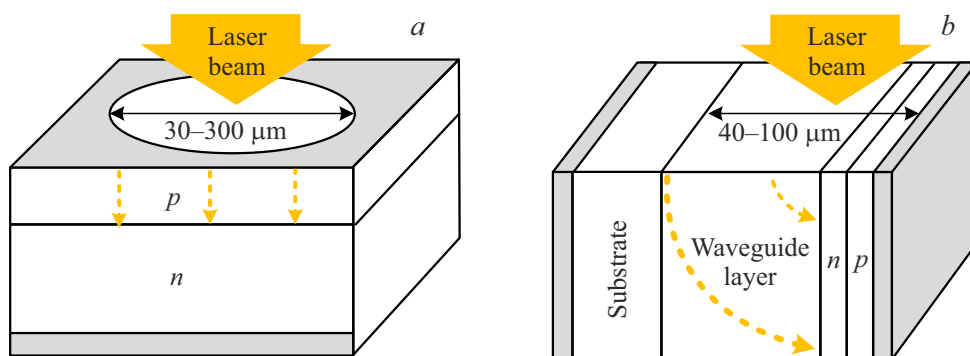


Рис. 1. Два типа микроразмерных фотопреобразователей с характерными размерами фотоприемной поверхности: *a* — фронтальные; *b* — „торцевые“ с волноводным слоем.

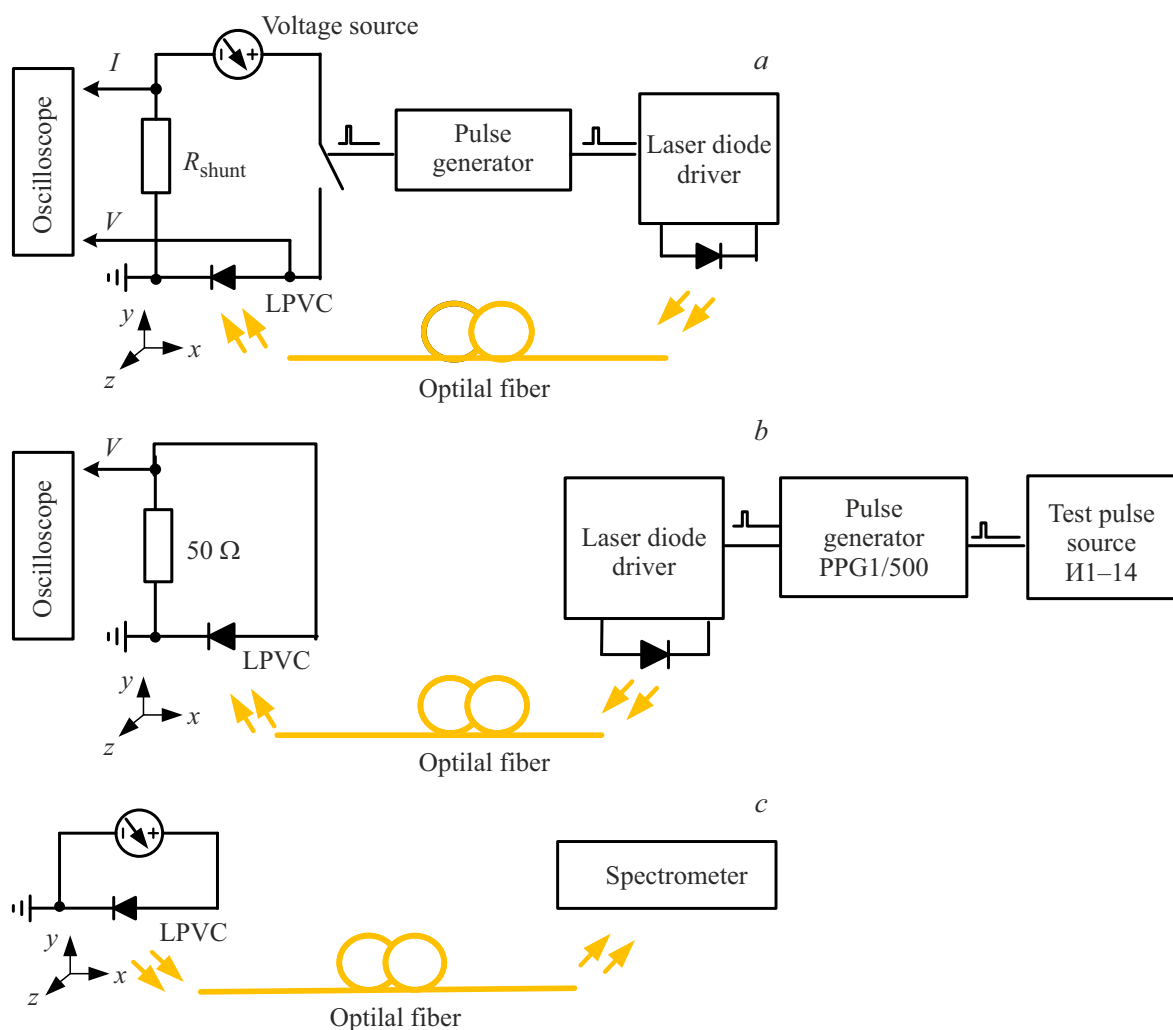


Рис. 2. Схема установки для исследования параметров микроразмерных фотопреобразователей в различных режимах: *a* — измерения ВАХ; *b* — измерения быстродействия; *c* — регистрации электролюминесценции.

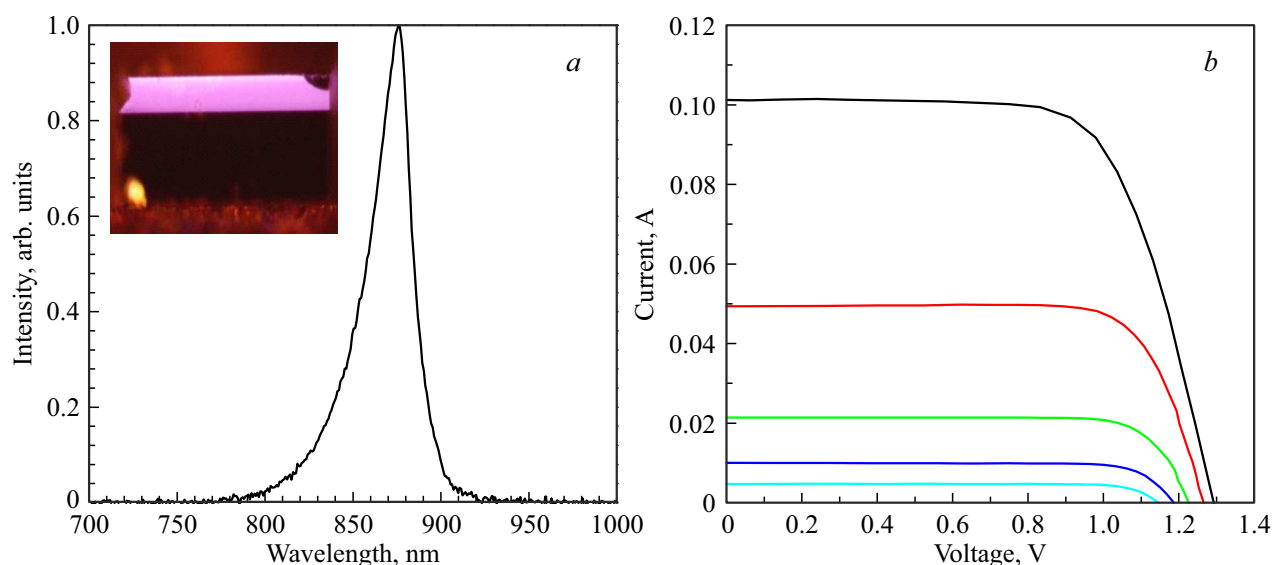


Рис. 3. Характеристики микроразмерных ФЭП: *a* — спектр и фотография электролюминесценции „торцевого“ GaAs ФЭП; *b* — ВАХ GaAs „торцевого“ ФЭП, полученные при различной мощности лазерного излучения.

зерного излучения позволяет исследовать ФЭП при больших мощностях засветки лазерного излучения (до 15000 Вт/см^2) без влияния нагрева. В качестве источника излучения использовался лазерный диод с длиной волны излучения 850 нм для исследования GaAs ФЭП и 1550 нм для тестирования GaSb ФЭП. Драйвер лазерного диода обеспечивал режим генерации прямоугольных импульсов излучения длительностью 300 нс и частотой следования 1 кГц. Лазерный диод сопряжен с оптическим волокном диаметром 50/125 мкм с числовой апертурой 0.22 со ступенчатым профилем изменения показателя преломления. Такой режим предотвращает нагрев ФЭП, так как средняя мощность лазерного излучения мала из-за большой скважности импульсов, а энергии одиночного импульса недостаточно для существенного разогрева области p – n -перехода. Длительность импульса определяется временем жизни неосновных носителей в полупроводниковом материале и переходными процессами в цепи измерения электрических параметров ФЭП. Для предотвращения нагрева ФЭП при прямом протекании тока напряжение прикладывается тоже импульсно при помощи ключа, состоящего из двух полевых транзисторов, включенных встречно-последовательно. Синхронизация импульсов излучения и напряжения осуществлялась генератором импульсов. Запись значений тока и напряжения производится при помощи цифрового осциллографа с полосой пропускания до 1 ГГц. Измерение тока осуществлялось на сопротивлении шунта 1 Ом.

Режим измерения параметров быстродействия. Данный режим позволяет определить полуширину на полувысоте, время нарастания и спада, а также амплитуду импульса фотоответа при приеме наносекундных лазерных импульсов. Источником импульсов служит лазерный диод, подключенный к генератору импульсов

PPG-1/500, который позволяет получить оптические импульсы с полушириной 2.3 нс. Для запуска генератора используется источник испытательных импульсов И1-14, выдающий синхрои́мпульсы длительностью 100 нс с частотой 1 кГц. С помощью осциллографа MDO3102 производилась запись формы импульса напряжения при различных мощностях лазерного излучения.

Режим регистрации электролюминесценции. При пропускании через фотоприемник прямого тока он работает в режиме светодиода. Таким образом, по пику спектра электролюминесценции возможно определить ширину запрещенной зоны полупроводникового материала (рис. 3, *a*). По изображению светящегося участка скола ФЭП также можно установить размеры фотоприемной поверхности „торцевого“ фотопреобразователя. Пик спектра позволяет контролировать, а при необходимости в следующем эпитаксиальном процессе корректировать согласование длины волны источника лазерного излучения и ширины запрещенной зоны материала активной области ФЭП. Для регистрации спектров электролюминесценции использовалось то же оптическое волокно, что и при измерении ВАХ. При фиксировании изображения скола „торцевой“ фотопреобразователь помещался на держателе под микроскоп с цифровой камерой. В обоих случаях к образцу прикладывалось прямое напряжение смещения. При этом величина тока была выбрана $\sim 1 \text{ мА}$, чтобы избежать нагрева кристалла без применения теплоотвода.

Следует отметить некоторые особенности расчета удельных параметров микроразмерных ФЭП. Так, для расчета плотности мощности падающего лазерного излучения используется площадь фотоприемной поверхности (рис. 1) [8]. В то время как для расчета плотности тока ФЭП используется площадь p – n -перехода. Для фронтальных фотопреобразователей (рис. 1, *a*) площадь

p – n -перехода под контактом может быть сравнима с площадью фотоактивной области p – n -перехода. Например, в работе [3] были измерены характеристики GaSb фронтального лазерного ФЭП с диаметром фотоприемной поверхности 30 мкм, в то время как p – n -переход был сформирован в окнах $\varnothing$ 50 мкм. В случае „торцевых“ микроразмерных ФЭП (рис. 1, b) площадь p – n -перехода может быть на порядок больше площади фотоприемной боковой поверхности из-за продольных размеров ФЭП. Это позволяет эффективно преобразовывать излучение с высокой оптической плотностью.

На рис. 3, b приведены вольт-амперные характеристики „торцевого“ GaAs ФЭП, полученные при различной мощности лазерного излучения — от 600 до 13000 Вт/см². Величину спектрального отклика SR можно оценить по формуле $SR(A/Bт) = I_{sc}(A)/P_{in}(Bт)$ [9], по значению фототока (I_{sc}) фотопреобразователя при фиксированной входящей мощности излучения (P_{in}). Измеренные значения фактора заполнения нагрузочной характеристики FF , напряжение холостого хода U_{oc} и тока короткого замыкания I_{sc} позволяют рассчитать эффективность приборов (η) для различной входной мощности ЛП P_{in} , соответственно, разной плотности мощности падающего лазерного излучения. Для „торцевых“ ФЭП на основе GaAs с волноводным слоем AlGaAs (50 мкм) была получена $\eta = 50$ –53 % при плотности лазерного излучения 1000–8000 Вт/см² [5]. В режиме проверки быстродействия получены полуширина 3.2 нс и время нарастания фронта импульса фотоответа 0.88 нс для вентильного режима работы ФЭП, а при обратном смещении 10 В — 2.6 и 0.77 нс соответственно. Для фронтальных фотопреобразователей на основе GaSb с диаметром фотоприемной поверхности 30 и 80 мкм получена $\eta = 35$ –38 % до 1600 Вт/см² [3].

Стенд позволяет имитировать условия работы фотоэлектрических преобразователей в широком диапазоне уровней засветки (от 100 до 15000 Вт/см²) без влияния температурных эффектов и исследовать параметры микроразмерных ФЭП в трех различных режимах, что создает условия для дальнейшей оптимизации технологии получения высокоэффективных ФЭП, предназначенных для преобразования лазерного излучения сверхвысокой плотности.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.А. Гаркушин, В.В. Криштоп, В.А. Максименко, М.А. Гарипова, Н.С. Миллюков, К.Д. Трапезников, Е.В. Нифонтова, П.В. Зуева. Прикл. фотоника, **10** (1), 46 (2023). DOI: 10.15593/2411-4375/2023.1.03
- [2] C. Outes, E. F. Fernández, N. Seoane, F. Almonacid, A.J. Garcia-Loureiro. IEEE Electron Dev. Lett., **42** (12), 1882 (2021). DOI: 10.1109/LED.2021.3121501
- [3] В.П. Хвостиков, А.В. Малевская, П.В. Покровский, О.А. Хвостикова, Ф.Ю. Солдатенков, М.В. Нахимович. Письма ЖТФ, **51** (4), 50 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.04.59845.20142
- [4] A. Ghods, D. Sandquist, K. Tatah, M. Dummer, G. Xu, E. Ambrosius, J. Ren, K. Johnson. Proc. SPIE, 12416, 1241607 (2023). DOI: 10.1117/12.2650476
- [5] V.P. Khvostikov, A.N. Panchak, O.A. Khvostikova, P.V. Pokrovskiy. IEEE Electron Dev. Lett., **43**, 1717 (2022). DOI: 10.1109/LED.2022.3202987
- [6] А.Н. Паньчак, П.В. Покровский, Д.А. Малевский, В.Р. Ларионов, М.З. Шварц. Письма ЖТФ, **45** (2), 26 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.02.47218.17491
- [7] 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
- [8] M.A. Green, E.D. Dunlop, G. Siefer, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, X. Hao. Progr. Photovolt.: Res. Appl., **31**, 3 (2023). DOI: 10.1002/pip.3646
- [9] M. York, S. Fafard. J. Phys. D: Appl. Phys., **50**, 173003 (2017). DOI: 10.1088/1361-6463/aa60a6

Редактор Редактор А.Н. Смирнов

Features of testing the characteristics of micro-sized photovoltaic converters of laser radiation

P.V. Pokrovskiy, V.P. Khvostikov, A.V. Malevskaya, O.A. Khvostikova

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg Russia

Abstract A measuring stand using optical fiber for transmitting laser radiation has been developed for testing micro-sized (30–300 μm) photovoltaic converters. The setup allows to study the main characteristics of small-sized photovoltaic converters: volt-ampere characteristics, response speed, and the spectrum of electroluminescence. Features of measuring photovoltaic parameters of converters of various types are shown.