

# 09 Фотоэлектрический приемник лазерного излучения на основе германия

© О.А. Хвостикова, С.В. Сорокина, М.З. Шварц, Б.Я. Бер, Д.Ю. Казанцев, В.П. Хвостиков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: svSOROKINA@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 5 декабря 2023 г.  
В окончательной редакции 13 марта 2024 г.  
Принято к публикации 14 марта 2024 г.

Проведена оптимизация диффузионного легирования германия и конструктивных особенностей фотоэлектрического преобразователя для работы с инфракрасным лазерным излучением высокой мощности. Проведено исследование преобразователей под равномерным, расфокусированным и сфокусированным лучом с длиной волны 1550 nm. При согласовании спектральной чувствительности преобразователей с рабочей длиной лазера достигнута монохроматическая эффективность  $\sim 20\%$  (0.2 W).

**Ключевые слова:** лазерное излучение, германий, фотоэлектрический преобразователь, диффузия, КПД.

DOI: 10.61011/JTF.2024.05.57819.297-23

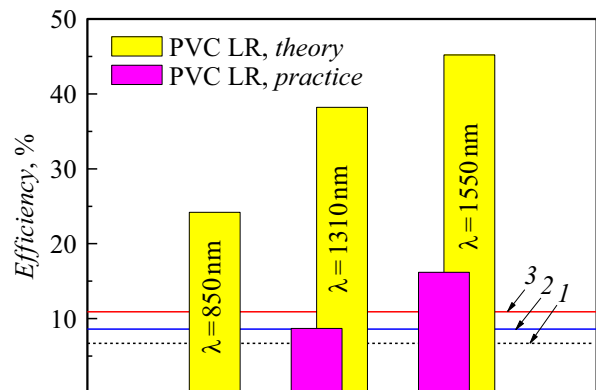
## Введение

Преобразование лазерного излучения (ЛИ, LR) — отдельное и быстро развивающееся направление в фотоэнергетике, охватывающее все большее число полупроводниковых соединений и длин волн [1–10]. Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП, PVC) излучения разных длин волн  $\lambda$  применяют для дистанционного питания портативной электроники, бытовой техники и компьютерных устройств [11], подзарядки беспилотных летательных аппаратов/роботов [12–14], беспроводной передачи оптической энергии автономному [15] или удаленному объекту (в том числе космическому [16,17]) и др. Все большее значение приобретают медицинские приложения — для повышения срока службы вживляемых пациентам биологических протезов, медицинских датчиков [18,19], кардио- и нейростимуляторов [20]. Области применения дистанционной передачи оптического сигнала с участием ФЭП разнообразны и непрерывно расширяются. При этом проблемные „звенья“ таких систем остаются прежними — эффективная генерация ЛИ и его обратное преобразование в электрическую энергию с минимальными потерями.

Германий — широко распространенный материал электронной техники, характеризующийся развитым промышленным производством и относительно невысокой стоимостью. В научной литературе последних лет обсуждается возможность применения германиевых ФЭП при облучении ЛИ с длинами волн 850 [21], 980 [22], 1310 [21] и 1550 nm [21, 22]. Особый интерес представляет  $\lambda = 1550$  nm, попадающая в окна прозрачности атмосферы и оптического волокна, что дает возможность построения открытых (через атмосферу) беспроводных систем приема–передачи и волоконно-оптических линий связи большой протяженности. Кроме

того, для 1550 nm доступны эффективные эрбиевые усилители, способные работать с оптическим сигналом практически без искажения [23,24].

Монохроматическая эффективность ФЭП ЛИ на основе германия для  $\lambda = 1550$  nm значительно превосходит КПД ( $\eta$ ) аналогичных солнечных элементов. Достигнутые на практике значения  $\eta$  для спектра AM1.5 представлены на рис. 1 линиями 1–3 [25,26], монохроматические КПД — гистограммой малинового цвета [21]. Максимальные значения монохроматического КПД идеализированного ФЭП (гистограмма желтого цвета) для разных длин волн ЛИ приведены для величины фототока 1 A·cm<sup>2</sup>. В расчетах для идеализированных ФЭП [27] не учитывались потери на отражение ЛИ от поверхности ФЭП, на затенение контактами, а



**Рис. 1.** Гистограмма значений КПД при длинах волн 850, 1310 и 1550 nm для идеализированного (желтый цвет, [27]) и реализованных на практике (малиновый цвет, [21]) ФЭП на основе германия. Пунктирными кривыми показаны значения КПД для солнечных элементов: 1 — AM1.5, диффузия фосфора в Ge [25]; 2, 3 — AM1.5, диффузия цинка в структуры GaAs/Ge, полученные методом МОГФЭ и жидкофазной эпитаксией [26].

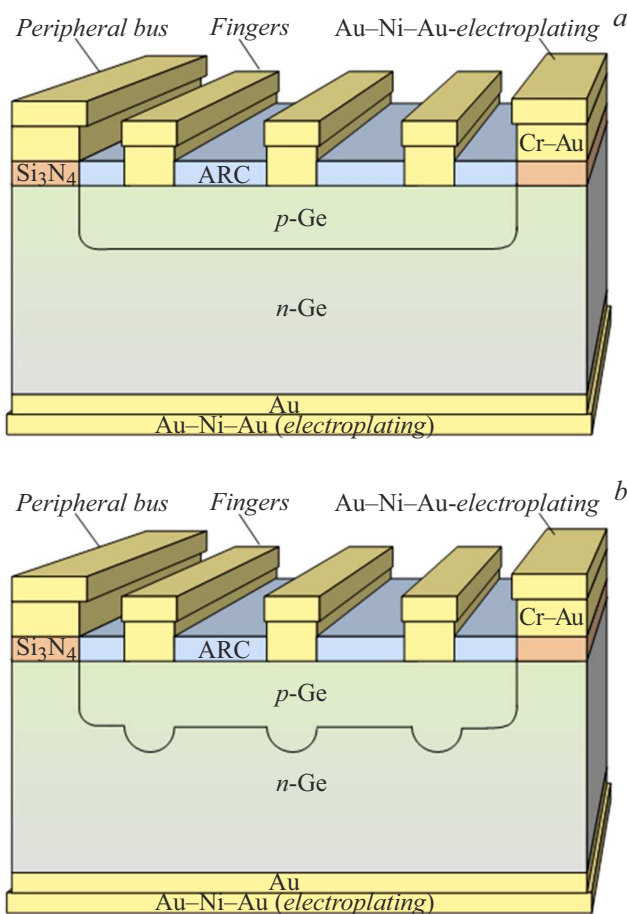
также рекомбинационные потери. Из рис. 1 следует, что достигнутые на сегодня значения монохроматической эффективности преобразователей значительно уступают предельным. Реализация высоких КПД при относительно простой структуре преобразователя и воспроизводимой технологии его изготовления позволят „проявить“ новое применение германия и интегрировать такие ФЭП в системы беспроводной передачи энергии по открытому каналу или через оптоволокно.

Настоящая работа посвящена адаптации технологии ФЭП на основе германия под рабочую длину волны промышленного лазера с  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  и исследование их возможностей при засветке равномерным и неравномерным падающим ЛИ.

## 1. Эксперимент

### 1.1. Особенности технологического процесса ФЭП ЛИ

Структуры ФЭП ЛИ формировали диффузионным легированием из газовой фазы. Процесс проводился в потоке водорода, предотвращающего окисление подложек. Диффузию проводили через предварительно сформиро-



**Рис. 2.** Структура ФЭП ЛИ на основе германия при одиночной (a) и двухстадийной (b) диффузии.

ванную диэлектрическую маску ( $\text{Si}_3\text{N}_4$  или  $\text{SiO}_2$ ), защищающую боковую поверхность ФЭП от образования  $p-n$ -перехода (рис. 2) и, следовательно, снижающего токи утечки. Максимум спектральной фоточувствительности ( $SR$ ) и минимум отражения ( $R$ ) просветляющих покрытий (ARC на рис. 2) согласовывались с длиной волны падающего излучения  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ .

Важнейшее значение имел выбор легирующей примеси. Величина спектральной чувствительности ФЭП ( $SR$ ) определялась по результатам внешнего квантового выхода фотоответа. Применение фосфина не позволило воспроизводимо получать фоточувствительные структуры требуемого качества ( $SR < 0.2$ ). Удовлетворительные значения спектральной чувствительности были получены при использовании диборана  $\text{B}_2\text{H}_6$  ( $SR \leq 0.8$ ) или Sb ( $SR \leq 0.8$ , кривая 1 рис. 3, a). Существенный рост  $SR$  был достигнут при диффузии цинка (рис. 3, b). Предельные значения спектральной чувствительности определялись выражением  $SR(\lambda) = \frac{q}{hc \cdot 1000} \lambda (nm) = \frac{\lambda (nm)}{1239.86}$ .

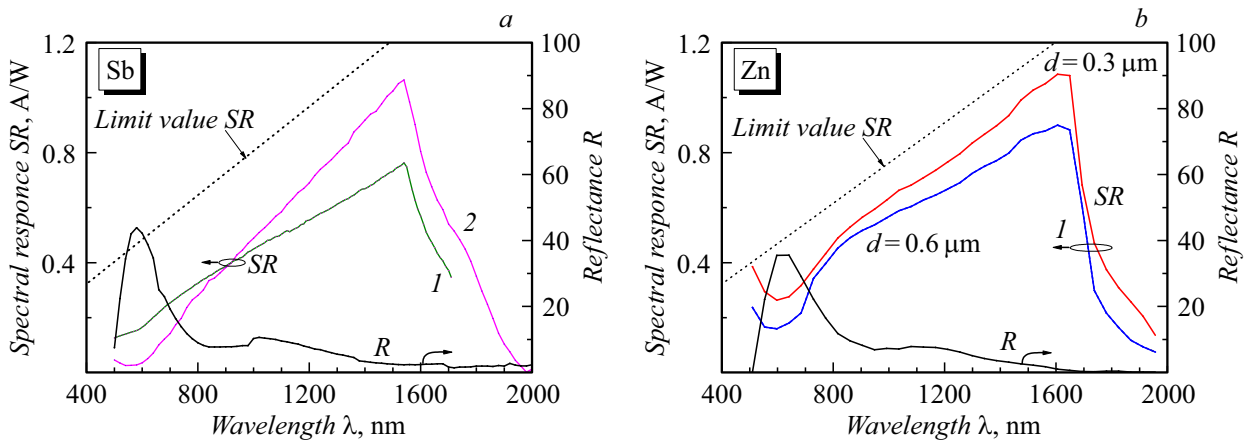
### 1.2. Специфика при легировании сурьмой

Диффузию сурьмы и цинка проводили с использованием графитовой кассеты, позволяющей создавать квазиравномерное распределение паров диффузанта над рабочей поверхностью подложки. При одноэтапном легировании сурьмой (температура  $600^\circ\text{C}$ , 30 min) наблюдалось ухудшение морфологии подложки, что приводило в дальнейшем к значительному падению фототока ФЭП ЛИ. Снижение температуры диффузии уменьшало глубину  $p-n$ -перехода, вследствие чего возникали существенные утечки тока. Удовлетворение противоречивых требований к структуре и процессу достигалось усложнением технологического цикла и формированием переменного диффузионного профиля — с мелким ( $0.3 \mu\text{m}$ ) эмиттером и локальным глубоким ( $0.7-1.0 \mu\text{m}$ )  $p-n$ -переходом под контактами (рис. 2, b). Такая двухэтапная технология успешно применялась ранее для получения фотоэлементов на основе GaSb [9,28,29]. Кривые 1 и 2 на рис. 3, a демонстрируют значения  $SR$  при одиночном или двухстадийном диффузионном процессе соответственно. В последнем случае спектральная чувствительность при  $1550 \text{ nm}$  близка к теоретическому пределу.

### 1.3. Оптимизация ФЭП при легировании цинком

При легировании цинком высокие значения  $SR$  достигались даже при одиночном диффузионном процессе (рис. 3, b). Диффузию проводили при температуре  $650-690^\circ\text{C}$ .

Профили распределения цинка при различном времени диффузионного отжига измерялись методом динамической вторично-ионной масс-спектрографии (ДВИМС) на вторично-ионном микрозонде IMS-7f (фирма CAMECA, Франция) с использованием глубин-



**Рис. 3.** Спектральная чувствительность ФЭП при легировании сурьмой (а) и цинком (б) в процессе одиночной (1) или двухстадийной (2) диффузии. Для (б) глубина залегания  $p-n$ -перехода  $d$  составляет 0.3 и 0.6  $\mu\text{m}$ .

ного профилирования. Первичными ионами служили  $^{16}\text{O}_2^+$  с кинетической энергией удара по образцу 5.5 keV, которые фокусировались на поверхности образца в пучок диаметром 20  $\mu\text{m}$ . Указанный пучок сканировал на поверхности образца растр размером 200  $\times$  200  $\mu\text{m}$ . В качестве вторичных (аналитических) ионов использовались ион матрицы  $^{73}\text{Ge}^+$  и ион примеси  $^{64}\text{Zn}^+$ . Регистрировались только аналитические ионы, эмитированные из центральной области дна кратера ионного травления диаметром 33  $\mu\text{m}$ . Это подавляло вклад в аналитические сигналы ионов, распыленных со стенок кратера на его дно.

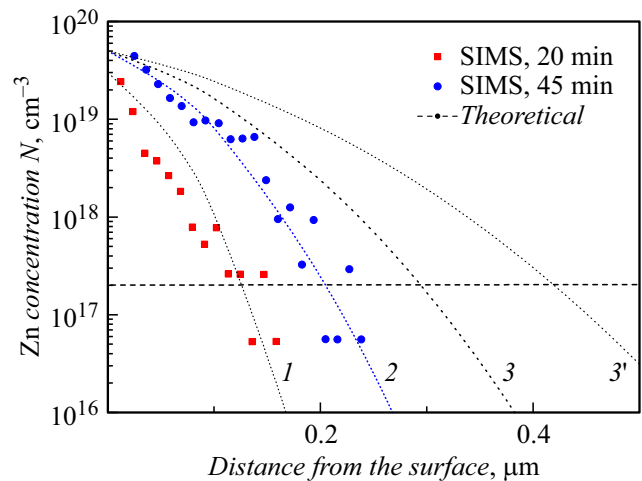
Глубины профиля концентрации примеси измерялись по скорости ионного травления, для чего с помощью механического стилусного профилометра AMBIOS XP-1 (фирма AMBIOS, США) определялась полная глубина кратера ионного травления.

Количественный анализ содержания примеси цинка по глубине профиля осуществлялся методом коэффициентов относительной чувствительности [30] с проведением коррекции на значения изотопных распространенностей для аналитических изотопов  $^{73}\text{Ge}$  и  $^{64}\text{Zn}$  [31]. Результаты Д-ВИМС глубинного профилирования распределения цинка представлены на рис. 4.

Теоретическая оценка для диффузии из постоянного источника в полуограниченное тело [32] представлена пунктирными кривыми 1–3. Распределение атомов в глубину полупроводника оценивалось по формуле

$$N = N_0 \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right), \quad (1)$$

где коэффициент диффузии принимался равным  $D \sim (1-2) \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$  [32]. Глубина  $p-n$ -перехода вычислялась подстановкой значения концентрации остаточных доноров в подложке, а коэффициент диффузии считался не зависящим от концентрации Zn.



**Рис. 4.** Теоретические распределения (пунктир) и ВИМС профили (сплошные кривые) цинка в германии при температуре 670°С. Время диффузионного отжига составляет: 1 — 20, 2 — 45, 3 — 90 min. Расчетные кривые представлены для  $D \sim 11 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$  (1–3) и для  $D \sim 2 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$  (3').

Итоговая зависимость глубины залегания  $p-n$ -перехода от времени диффузии при температуре 670°С показана на рис. 5. Представлены данные измерений растровыми электронными микроскопами CamScan и JSM-35, результаты измерений ВИМС и теоретические зависимости для расчета по формуле (1) с коэффициентами диффузии  $D \sim 1 \cdot 10^{-14}$  и  $\sim 2 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$ .

Максимальные КПД и воспроизводимость параметров преобразователей получены при диффузии цинка в течение  $\sim 35 \text{ min}$  (глубина залегания  $p-n$ -перехода  $\leq 0.3 \mu\text{m}$ , данные JSM-35). При более тонких эмиттерах в ФЭП ЛИ возрастали токи утечки в процессе вжигания контактов. Кроме того, в случае мелкого  $p-n$ -перехода напряжение холостого хода более критично к скорости поверхностной рекомбинации.

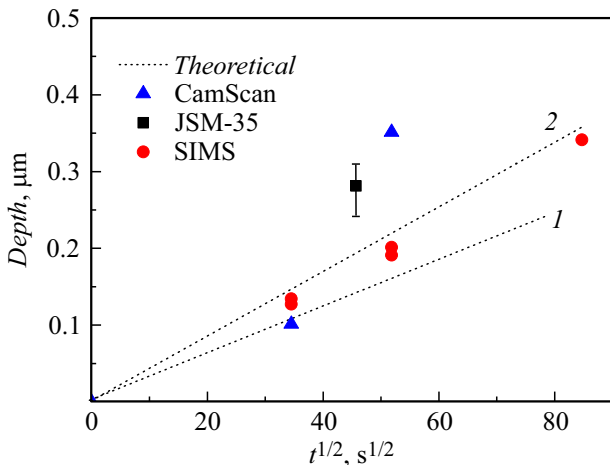


Рис. 5. Зависимость глубины залегания  $p$ - $n$ -перехода от времени диффузии при температуре  $670^\circ\text{C}$ : 1 —  $D = 1 \cdot 10^{-14}$ , 2 —  $2 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$ .

#### 1.4. Конструктивные особенности ФЭП ЛИ

Омические контакты к ФЭП ЛИ создавались напылением тонких пленок Au или Cr–Au с последующим гальваническим наращиванием металлизации до  $1\text{--}3 \mu\text{m}$  электрохимическим осаждением Au–Ni–Au (рис. 2). Для минимизации оптических потерь на заключительном этапе технологического процесса наносилось двухслойное просветляющее покрытие  $\text{ZnS}\text{--}\text{MgF}_2$ , спектр отражения которого показан кривыми  $R$  на рис. 3.

Для эффективного приема-передачи энергии в лазерных трактах требуются максимально возможные плотности падающей мощности. Наряду с ростом КПД, повышение мощности падающего излучения (требуемое, в свою очередь, уменьшения размера чипа и снижения его последовательного сопротивления) становится насущной технологической задачей. Диаметр светового пятна, получаемого от лазера при тестировании образцов, тоже был ограничен. Поэтому изготавливались чипы с общим размером  $2 \times 2 \text{ mm}$  и  $2.5 \times 2.5 \text{ mm}$ . Площадь для подвода излучения (designated illumination area)  $S_{\text{DIA}}$  составляла 2 и  $3.14 \text{ mm}^2$  соответственно.

Конфигурация контактной сетки для обоих размеров ФЭП была практически одинаковой — с эквидистантным (50 и  $100 \mu\text{m}$  соответственно) расположением контактных полос (шириной 10 и  $6 \mu\text{m}$  соответственно) внутри круглой фоточувствительной области и широкой периферической токосъемной шиной (рис. 6).  $S_{\text{DIA}}$  включает в себя площадь тонких контактных полосков. Периферическая токосборная шина находится вне этой зоны [33]. С увеличением плотности падающей на образец мощности роль омических потерь возрастает, поэтому для уменьшения последовательного сопротивления у ФЭП с  $S_{\text{DIA}} = 2 \text{ mm}^2$  шаг контактной сетки уменьшался, а коэффициент затенения возрастал от 6 до 20%.

Для эффективного отвода тепла и предотвращения перегрева под мощным лазерным излучением ФЭП уста-

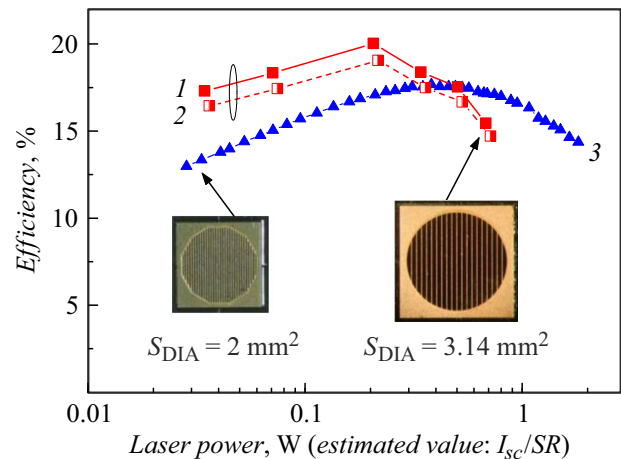


Рис. 6. Монохроматическая эффективность ФЭП при равномерной засветке,  $\lambda$ : 1, 3 — 1550, 2 — 1310 nm.

навливались на теплопроводные электро-изоляционные платы компании „Резонит“ из алюминиевого сплава слоя диэлектрика и медной фольги. Монтаж проводился с использованием паяльной пасты на базе сплава  $\text{PbSnAg}$  с температурой плавления  $180^\circ\text{C}$ .

## 2. Результаты

Идеальная оптическая система должна создавать круглое световое пятно с равномерным пространственным распределением плотности падающей мощности в фотоактивной площади ФЭП. Любые искажения луча и несогласованность формы/геометрических размеров между световым пятном и преобразователем будут вызывать потери эффективности. В реальных системах при передаче ЛИ всегда создается определенная неравномерность излучения на поверхности преобразователя ( $\pi$ -образное распределение для рассеянного излучения, гауссовый или близкий к нему пучок для одномодовых и маломодовых волокон [34], более сложный профиль для многомодового световода [35]). Кроме того, мощное ЛИ будет вызывать нагрев ФЭП и падение КПД. Поэтому в настоящей работе оценка выходных параметров чипов проводилась как в режиме равномерной импульсной засветки (ксеноновая лампа, длительность вспышки  $\sim 1.5 \text{ ms}$ ), так и частично неравномерного облучения (непрерывный лазер с  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  с подводкой ЛИ по оптоволокну).

### 2.1. Эффективность ФЭП при равномерном ЛИ

Импульсная ксеноновая лампа создает равномерное распределение светового потока на поверхности фотопреобразователя и успешно моделирует облучение лазером без нагрева фотоприемника. Зависимости напряжения холостого хода  $V_{oc}$ , тока короткого замыкания  $I_{sc}$ ,



фактора заполнения нагрузочной характеристики  $FF$  и КПД от мощности ЛИ для равномерной засветки представлены на рис. 6 и далее на рис. 8. Увеличенная толщина металлизации и малый шаг фронтальной контактной сетки позволили для световых ВАХ обеспечить значения  $FF$  более 65%. При мощности излучения 0.2 W достигнут монохроматический ( $\lambda = 1550$  nm) КПД  $\sim 20\%$  (рис. 6, кривая 1). Данные представлены для преобразователя с диффузионным легированием цинком, глубиной залегания  $p$ - $n$ -перехода 0.3  $\mu\text{m}$  и площадью  $S_{\text{DIA}} = 3.14$   $\text{mm}^2$ . Рис. 6 дополнен пунктирной кривой 2 для эффективности указанного ФЭП при  $\lambda = 1310$  nm ( $\eta = 19.1\%$ , 0.2 W). Передача оптического сигнала на длине волны 1310 nm, как и в случае  $\lambda = 1550$  nm, характеризуются низкими потерями (второе окно прозрачности оптоволокна).

Для аналогичного преобразователя с  $S_{\text{DIA}} = 2$   $\text{mm}^2$  (рис. 6, кривая 3) наибольший монохроматический ( $\lambda = 1550$  nm) КПД  $\eta = 17.7\%$  достигается при 0.5 W. Незначительное снижение пиковой эффективности в этом случае преимущественно связано с ростом коэффициента затенения фоточувствительной области (20% вместо 6%). При этом область максимальных КПД сдвигается по плотности подаваемой мощности от 5–7  $\text{W}/\text{cm}^2$  до 10–40  $\text{W}/\text{cm}^2$ . Полученные значения монохроматической эффективности заметно превосходят опубликованные ранее практические результаты для  $\lambda = 1550$  и 1310 nm ( $\eta = 15.9$  и 8.5% [21] соответственно).

## 2.2. Эффективность ФЭП при неоднородном ЛИ

При облучении лазером с  $\lambda = 1550$  nm было реализовано два варианта засветки:

- сфокусированным по центру преобразователя лучом с гауссовым распределением мощности (кривая 1, рис. 7). Подвод излучения осуществлялся через оптоволокно. Круглое световое пятно характеризовалось сильной неоднородностью с радиально уменьшающейся к периферии интенсивностью засветки (рис. 7).

- расфокусированным с использованием оптического гомогенизатора излучением с  $\pi$ -образным профилем распределения освещенности (кривая 2, рис. 7, световое пятно диаметром  $\sim 2$  mm, слабая неоднородность ЛИ).

Для наглядности на вставках показано графическое изображение светового пятна на поверхности ФЭП, где изменение интенсивности иллюстрируется окрашиванием фона.

Подача одиночных световых импульсов лампы-вспышки не вызывает радиационного нагрева ФЭП при записи вольт-амперных характеристик и регистрации напряжения холостого хода, о чем свидетельствует логарифмический рост  $V_{oc}$  с освещенностью вплоть до значений падающей мощности ЛИ 1 W. Аналогично облучение импульсным лазером с  $\lambda = 1550$  nm не вызывает значительного радиационного нагрева располо-

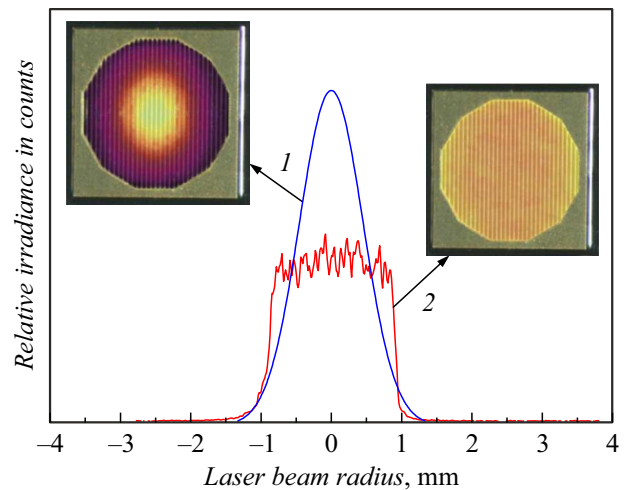


Рис. 7. Распределение интенсивности излучения лазерного луча: 1 — гауссово распределение мощности (сфокусированный лазерный луч); 2 — преобразованный  $\pi$ -образный профиль (расфокусированный лазерный луч).

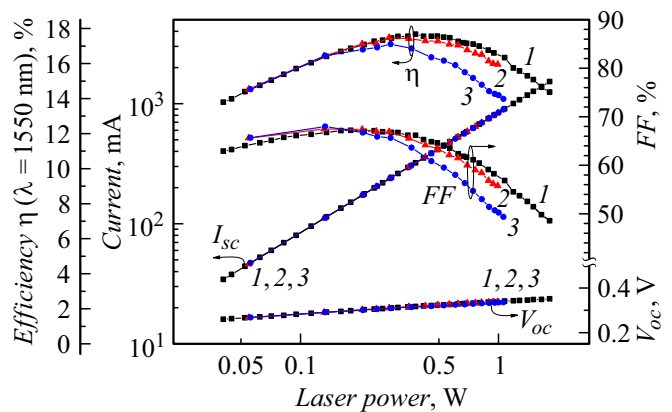


Рис. 8.  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $FF$  и КПД ФЭП ( $S_{\text{DIA}} = 2.0$   $\text{mm}^2$ ) в зависимости от мощности ЛИ: 1 — ксеноновая лампа (равномерная засветка), 2, 3 — засветка лазерным лучом ( $\lambda = 1550$  nm) со слабой ( $\pi$ -образным профилем) и сильной (гауссово распределение) неоднородностью соответственно.

женного на теплоотводе преобразователя и заметного снижения его  $V_{oc}$ . Данные на рис. 8 представлены для засветки ФЭП с  $S_{\text{DIA}} = 2.0$   $\text{mm}^2$ . При падающей мощности 0.4 W преобразователь демонстрирует пиковый КПД 17.7% (лампа Хе, равномерное освещение, кривая 1). Длительность и периодичность импульсов лазера составляют 250 и 50000  $\mu\text{s}$  соответственно. Локальная неравномерность освещения (сфокусированный лазерный луч) способствует снижению  $FF$  и, следовательно, эффективности ( $\Delta\eta = 2\%$  при 1 W, кривые 3). Кривые 2 показывают зависимости выходных параметров ФЭП от мощности, когда лазерное излучение расфокусировано по площади образца. Использование оптического гомогенизатора позволяет снизить потери на неравномер-

ность лазерного облучения и получить при падающей мощности 0.2–0.6 W КПД более 17%.

## Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что диффузионное легирование из газовой фазы цинком обеспечивает формирование качественного  $p-n$ -перехода и воспроизводимое получение фотоэлементных структур, превосходящих по спектральной чувствительности аналоги с диффузией диборана, фосфина и сурьмы. При равномерной облученности малоразмерных ( $S_{\text{DIA}} = 3.14 \text{ mm}^2$ ) ФЭП на основе германия получен монокроматический ( $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ) КПД  $\sim 20\%$ .

## Благодарности

Исследования методом ВИМС проводились с использованием оборудования ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ (ФТИ им. А.Ф. Иоффе).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] C. Algora, I. García, M. Delgado, R. Pena, C. Vázquez, M. Hinojosa, I. Rey-Stolle. *Joule*, **6**, 1 (2021). DOI: 10.1016/j.joule.2021.11.014
- [2] M. Perales, M. Yang, C. Wu, C. Hsu, W. Chao, K. Chen, T. Zahuranec. *Proc. of SPIE-High-Power Diode Laser Technology and Applications XIV*, ed. by M.S. Zediker, vol. 9733, 97330U, 2016. DOI: 10.1117/12.2213886
- [3] S. Fafard, D.P. Masson. *J. Appl. Phys.*, **130** (16), 160901 (2021). DOI: 10.1063/5.0070860
- [4] H. Helmers, E. Lopez, O. Höhn, D. Lackner, J. Schön, M. Schauerte, M. Schachtner, F. Dimroth, A.W. Bett. *Phys. Status Solidi RRL*, **15** (7), 2100113 (2021). DOI: 10.1002/pssr.202100113
- [5] S. Fafard, D.P. Masson. *Photonics*, **9** (7), 438 (2022). DOI: 10.3390/photonics9070438
- [6] Y. Gou, H. Wang, J. Wang, Y. Zhang, R. Niu, X. Chen, B. Wang, Y. Xiao, Z. Zhang, W. Liu, H. Yang, G. Deng. *Optics Express*, **30** (23), 42178 (2022). DOI: 10.1364/OE.474693
- [7] В.П. Хвостиков, Н.А. Калужный, С.А. Минтаилов, Н.С. Потапович, О.А. Хвостикова, С.В. Сорокина, М.З. Шварц. *ЖТФ*, **90** (10), 1764 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.10.49811.43-20 [V.P. Khvostikov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, N.S. Potapovich, O.A. Khvostikova, S.V. Sorokina, M.Z. Shvarts. *Tech. Phys.*, **65** (10), 1690 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220100096]
- [8] В.П. Хвостиков, Н.А. Калужный, С.А. Минтаилов, Н.С. Потапович, С.В. Сорокина, М.З. Шварц. *ФТП*, **53** (8), 1135 (2019). DOI: 10.21883/FTP.2019.08.48007.9118. [V.P. Khvostikov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, N.S. Potapovich, S.V. Sorokina, M.Z. Shvarts. *Semiconductors*, **53** (8), 1110 (2019). DOI: 10.1134/S1063782619080116]
- [9] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, Ф.Ю. Солдатенков, Н.Х. Тимошина. *ФТП*, **49** (8), 1104 (2015). [V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, F.Yu. Soldatenkov, N.Kh. Timoshina. *Semiconductors*, **49** (8), 1079 (2015). DOI: 10.1134/S1063782615080114]
- [10] V.P. Khvostikov, A.N. Panchak, O.A. Khvostikova, P.V. Pokrovskiy. *IEEE Electron Device Lett.*, **43** (10), 1 (2022). DOI: 10.1109/LED.2022.3202987
- [11] J.D. López-Cardona, D.S. Montero, C. Vázquez. *IEEE Sensors J.*, **19** (17), 7328 (2019). DOI: 10.1109/JSEN.2019.2915613
- [12] В.А. Богушевская, О.В. Заяц, Я.Н. Масляков, И.С. Мацак, А.А. Никонов, В.В. Савельев, А.А. Шептунов. *Труды МАИ*, **51**, 1 (2012).
- [13] M.-A. Lahmeri, M.A. Kishk, M.-S. Alouini. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **22** (1), 518 (2023). DOI: 10.1109/TWC.2022.3195867
- [14] P. Anand, R. Pandiarajan, P. Raju. *J. Mechan. Eng. Research*, **5** (1), 137 (2015).
- [15] J. Mukherjee, W. Wulfken, H. Hartje, F. Steinsiek, M. Perren, S.J. Sweeney. *Proc. IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference* (2013). DOI: 10.1109/PVSC.2013.6744326
- [16] Р.А. Евдокимов, В.Ю. Тугаенко, Н.В. Щербенко. *Инженерный журнал: наука и инновации*, **7**, 1 (2022). DOI: 10.18698/2308-6033-2022-7-2196
- [17] А. Сигов, В. Магюхин. *Современная электроника*, **1**, 18 (2015).
- [18] M. Mujeeb-U-Rahman, D. Adalian, Ch.-F. Chang, A. Scherer. *J. Biomed. Optics*, **20** (9), 095012 (2015). DOI: 10.1117/1.JBO.20.9.095012
- [19] A. Ahnood, R. Cheriton, A. Bruneau, J.A. Belcourt, J.P. Ndadakuranye, W. Lemaire, R. Hilkes, R. Fontaine, J.P.D. Cook, K. Hinzer, S. Prawerl. *Advance Biosystems.*, **4**, 2000055 (2020).
- [20] C. Algora, R. Peña. *Artificial Organs*, **33**(10), 855 (2009). DOI: 10.1111/j.1525-1594.2009.00803.x
- [21] G. Allwood, G. Wild, S. Hinckley. *Proc. Conference: Optoelectronic and Microelectronic Materials & Devices (COMMAD)* (2012). DOI: 10.1109/COMMAD.2012.6472337
- [22] G. Allwood, G. Wild, S. Hinckley. *Proc. of SPIE — The International Society for Optical Engineering*, **8204**, 2011. DOI: 10.1117/12.903294
- [23] А.С. Курков, О.Е. Наний. *LIGHTWAVE Russ. Edition*, **1**, 14 (2003).
- [24] А.В. Дорофеенко, И.А. Нечепуренко, А.П. Базакуца, О.В. Бутов. *Современная электродинамика*, **2** (4), 17 (2023).
- [25] N.E. Posthuma, J. van der Heide, G. Flamand, J. Poormans. *Proc. of the 6th Conference Thermophotovoltaic Generation of Electricity*, A. Gorpınath et al., eds. (Freiburg, Germany, 2004), p. 337–344. DOI:10.1063/1.1841911
- [26] О.А. Хвостикова. *Фотоэлектрические преобразователи излучения на основе узкозонных полупроводников (GaSb, Ge, InAs): дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.10* Хвостикова О.А. (СПб., 2009), 131 с.
- [27] В.М. Андреев. *Современная электроника*, **6**, 20 (2014).
- [28] L.M. Fraas, V.S. Sundaram, J.E. Avery, P.E. Gruenbaum, E. Malocsay. *III-V Solar Cells and Doping Processes*. (Патент US5217539A от 8.06.1993)

- [29] В.М. Андреев, С.В. Сорокина, Н.Х. Тимошина, В.П. Хвостиков, М.З. Шварц. ФТП, **43** (5), 695 (2009). [V.M. Andreev, S.V. Sorokina, N.Kh. Timoshina, V.P. Khvostikov, M.Z. Shvarts. Semiconductors, **43** (5), 668 (2009). DOI: 10.1134/S1063782609050236]
- [30] R.G. Wilson, F.A. Stevie, C.W. Magee. *Secondary Ion Mass Spectrometry: A Practical Handbook for Depth Profiling and Bulk Impurity Analysis* (Wiley, NY., 1989)
- [31] CIAAW. *Isotopic Compositions of the Elements* (2021). Available online at <https://www.ciaaw.org/isotopic-abundances.htm>
- [32] Б.И. Болтакс. *Диффузия в полупроводниках* (Физматгиз, М., 1961)
- [33] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop. Prog. Photovolt: Res. Appl., **20**, 12 (2012). DOI: 10.1002/pip.2163
- [34] И.С. Мацак. *Метод и экспериментальная установка для прецизионного измерения характеристик широко-апертурных пучков непрерывного лазерного излучения* (Дис. канд. техн. наук, М., 2019), 152 с.
- [35] М.В. Горбунков, П.В. Кострюков, В.Б. Морозов, А.Н. Оленин, Л.С. Телегин, В.Г. Тункин, Д.В. Яковлев. Квантовая электроника, **35** (12), 1121 (2005). [M.V. Gorbunkov, P.V. Kostryukov, V.B. Morozov, A.N. Olenin, L.S. Telegin, V.G. Tunkin, D.V. Yakovlev. Quant. Electron., **35** (12), 1121 (2005). DOI:10.1070/QE2005v035n12ABEH013037]