

07

Источник электрической энергии на основе $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}$ фотоэлектрического преобразователя и $\text{YPO}_4:\text{Eu}/(^{238}\text{Pu})$ радиолюминесцентного излучателя

© К.К. Прудченко, И.А. Толкачев, Е.В. Контрош, Е.А. Силантьева, В.С. Калиновский

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

Поступило в Редакцию 8 августа 2022 г.

В окончательной редакции 23 сентября 2022 г.

Принято к публикации 24 сентября 2022 г.

Исследован $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ фотоэлектрический преобразователь для макета экологически безопасного радиоизотопного источника энергии сверхдлительного использования с радиолюминесцентным излучателем $\text{YPO}_4:\text{Eu}/(^{238}\text{Pu})$ с предельно низким содержанием изотопа $^{238}\text{Pu} < 0.1 \text{ wt.}\%$. Проведено моделирование $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}$ -гетероструктуры для преобразования нановаттных уровней мощности оптического сигнала. Расчетный и экспериментальный коэффициент полезного действия макета с фотоэлектрическим преобразователем при мощности радиолюминесцентного источника 1 нВт составил $\sim 1.4\%$.

Ключевые слова: радиоизотопный источник энергии, $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ -фотопреобразователь, радиолюминесцентный источник оптического излучения, механизмы токопрохождения, эффективность преобразования.

DOI: 10.21883/JTF.2022.12.53754.199-22

Введение

В различных областях современной техники и наноэлектроники возникает потребность в слаботочных, со сверхдлительным сроком использования, электрических источниках питания. В связи с этим большое внимание уделяется разработке и усовершенствованию радиоизотопных источников энергии (РИЭ), в которых энергия радиоактивного распада изотопов преобразуется в электрическую энергию [1–4]. Такие источники энергии могут быть применимы в наноэлектронике, медицине, приборостроении, в сложных труднодоступных или агрессивных средах, атомной и химической промышленности. Срок использования таких источников определяется временем полураспада радионуклида, для ^{238}Pu он составляет 87 лет.

В настоящее время существуют источники энергии, основанные на радиоактивном распаде радионуклидов. К ним, в первую очередь, относятся радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГ). Они имеют большие габаритные размеры, высокое содержание изотопов, что приводит к их ограниченному применению и радиационной небезопасности. Существуют устройства, основанные на бета-вольтаическом эффекте, когда энергия β -излучения непосредственно преобразуется в электрическую энергию в активной области полупроводникового элемента [5,6]. Такие источники питания, как правило, изготавливаются на основе таких изотопов, как тритий ^3H , никель ^{63}Ni , углерод ^{14}C и т.д. РИЭ с прямым преобразованием энергии радиоактивного распада в электричество, как правило, из-за разрушающего воздействия ионизирующего излучения непосредственно

на питаемые ими устройства требуют дополнительной защиты от радиационного излучения и обладают значительно меньшим сроком службы, в отличие от РИЭ с двойным преобразованием. В радиоизотопных фотоэлектрических генераторах (РиФЭГ) энергия распада изотопов преобразуется в оптическое излучение, а затем в электричество при помощи фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Устройства РиФЭГ имеют меньший уровень электрической энергии на выходе, но и значительно меньшие размеры, более высокую надежность, безопасность и более длительный срок службы. В целом, такие устройства могут достигать эффективности преобразования (КПД) более 5% [7]. При этом РиФЭГ с фотоэлементами, преобразующими оптическое излучение, стимулированное β -излучением [6,7], как правило, менее эффективны в сравнении с источниками питания с α -излучающей основой. Благодаря тому что α -частицы намного более высокоэнергетические, существенна разница в удельной мощности ионизирующего излучения и, как следствие, эффективность фотовольтаического преобразования выше.

Источником оптического излучения в РиФЭГ могут служить радиационно-стойкие минералоподобные матрицы, например, кристаллы типа ксенотим YPO_4 , допированные радионуклидом $^{238}\text{Pu} \leq 0.1 \text{ wt.}\%$ и легированные ионами европия $\text{Eu}^{3+} \sim 2\text{--}3 \text{ wt.}\%$ [8]. Вероятно также использование других подобных радиолюминесцентных источников на основе кристаллов ортосиликата циркония ZrSiO_4 : (Tb^{3+} — 0.2 wt.%), (^{238}Pu — 0.02 wt.%), керамики на основе поликристаллического кубического циркония ZrO_2 : (Eu^{3+} — 9.4 wt.%), (Tb^{3+} — 1.3 wt.%), (^{238}Pu — 0.3 wt.%) [9]. Было проведено множе-

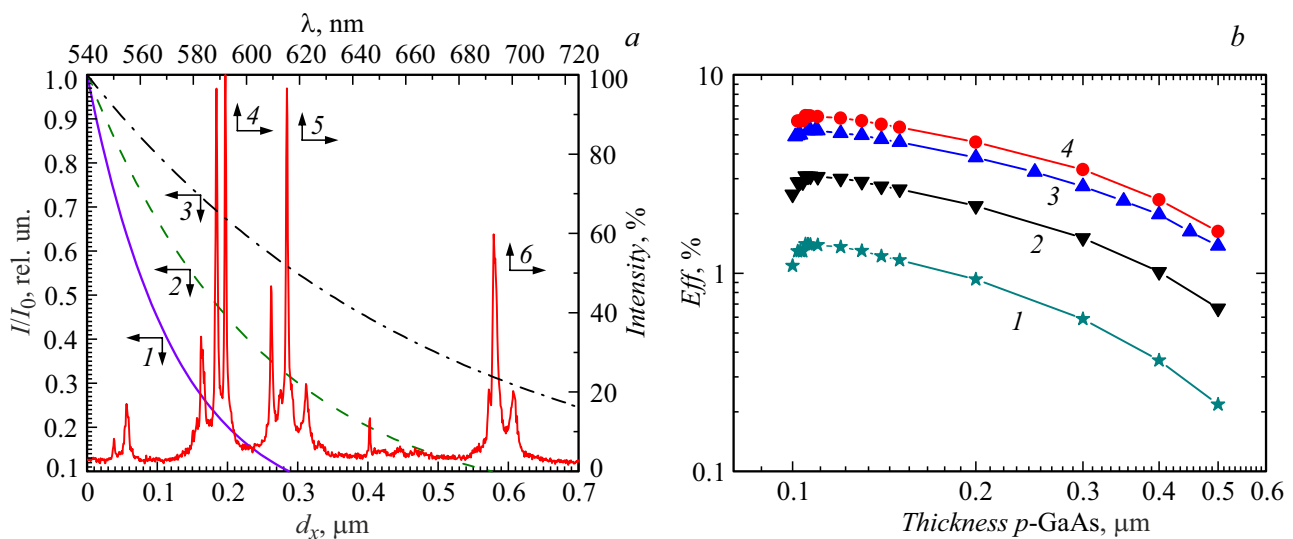


Рис. 1. *a* — расчетные кривые поглощения (1–3) в *p*-GaAs люминесцентного излучения радиоизотопного источника $\text{YPO}_4:\text{Eu}/(^{238}\text{Pu})$ на длинах волн $\lambda_1 = 595 \text{ nm}$ (4), $\lambda_2 = 615 \text{ nm}$ (5), $\lambda_3 = 695 \text{ nm}$ (6) соответственно; *b* — расчетные зависимости КПД от толщины эмиттерного *p*-слоя в GaAs *p*-*n*-переходе ФЭП при возбуждении оптическим излучением ($\lambda_1 = 595 \text{ nm}$) мощностями: 1 — 1, 2 — 10, 3 — 50, 4 — 100 нВт.

ство исследований по изучению радиационной стойкости данных радиолюминесцентных источников [10]. Использование высокоэффективных наногетероструктурных AlGaAs/GaAs ФЭП и безопасных радиолюминесцентных источников позволяет обеспечить в течение длительного времени, порядка периода полураспада изотопа, максимальную производительность РИЭ. Учитывая практически полное отсутствие радиационного воздействия, предлагаемый AlGaAs/GaAs ФЭП, таким образом, обладает типичным для фотоприемников и солнечных элементов (СЭ) на основе GaAs сроком службы. Цель настоящей работы — разработка структуры на основе AlGaAs/GaAs ФЭП и исследование ее характеристик с оценкой эффективности применения в макете РиФЭГ.

1. Моделирование

Выполнен расчет зависимости поглощения оптического излучения в *p*-GaAs [11] для длин волн, соответствующих максимумам пиков интенсивности в спектре радиолюминесцентного источника $\text{YPO}_4:\text{Eu}/(^{238}\text{Pu})$ [9]. Расчеты проводились с концентрациями легирующей примеси $N_D = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ и коэффициентами поглощения $k_1 = 8 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_1 = 595 \text{ nm}$); $k_2 = 4 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_2 = 615 \text{ nm}$); $k_3 = 2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_3 = 695 \text{ nm}$) [12].

Из расчетных кривых (рис. 1, *a*), где стрелками указаны соответствующие им оси, видно, что глубина поглощения света на выбранных длинах волн находится в диапазоне 0.15–0.5 μm . Учитывая то, что максимальный по интенсивности и энергии пик оптического излучения радиоизотопного источника $\text{YPO}_4:\text{Eu}/(^{238}\text{Pu})$ соответствует длине волны $\lambda_1 = 595 \text{ nm}$, считаем, что оптимальная глубина залегания *p*-*n*-перехода относительно

фронтальной поверхности ФЭП не должна превышать величину $\sim 100 \text{ nm}$ и определяется наименьшей длиной волны в спектре оптического излучения источника ($\lambda_1 = 595 \text{ nm}$ (рис. 1, *a*)).

В программном пакете было выполнено моделирование структуры $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}$ ФЭП, оптимизированной под радиолюминесцентный источник оптического излучения нановаттной мощности на базе минералоподобного кристалла ксенотима $\text{YPO}_4:\text{Eu}/(^{238}\text{Pu})$, и ее ВАХ. Критериями оценки оптимальности структуры AlGaAs/GaAs ФЭП, преобразующей сверхнизкие субнановаттные уровни мощности источника оптического излучения, являлись глубина залегания *p*-*n*-перехода, толщина *p*-слоя, уровни легирования, и как результат — эффективность преобразования линейчатого спектра радиолюминесцентного источника. Моделирование структуры выполнялось в следующей конфигурации (сверху вниз): подконтактный слой (*p*-GaAs, $N_A = 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) толщиной $h = 300 \text{ nm}$, широкозонное окно (*p*- $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$, $N_A = 7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), $h = 35 \text{ nm}$; *p*-*n*-переход из *p*-GaAs, $N_A = 7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ и *n*-GaAs, $N_D = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ с толщинами *p* и *n*-слоев 100 nm и 3 μm соответственно; тыльный барьер (*n*- $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, $N_D = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), $h = 50 \text{ nm}$ и буферный слой (*n*-GaAs, $N_D = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), $h = 200 \text{ nm}$ на подложке *n*-GaAs, $N_D = 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ толщиной $h = 350 \mu\text{m}$. Спектр излучения задавался максимально приближенным к спектру радиолюминесцентного источника $\text{YPO}_4:\text{Eu}/(^{238}\text{Pu})$.

Из расчетов, представленных на рис. 1, *b*, видно, что при толщинах *p*-слоя, меньших 105 nm, наблюдается рост КПД моделируемого ФЭП, затем при оптимальной толщине *p*-слоя $\sim 105 \text{ nm}$ значение КПД достигает

максимума и после при дальнейшем увеличении p -слоя снижается.

2. Эксперимент

2.1. Материалы и методы

Для проведения экспериментальных исследований и оценки выполненных расчетов были использованы две $AlGaAs/GaAs$ -гетероструктуры (табл. 1). Одна — полученная методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) и совпадающая с моделируемой, где в качестве акцепторной примеси был использован бериллий (Be), а в качестве донорной — кремний (Si).

Вторая структура $AlGaAs/GaAs$ ФЭП, полученная методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), содержит под-контактный слой $p-GaAs:Zn$, $N_A \geq 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ толщиной $h \geq 500 \text{ nm}$, широкозонное окно $p-Al_{0.8}Ga_{0.2}As:Zn$, $N_A = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ толщиной $h < 2000 \text{ nm}$, затем p -слой $GaAs$ толщиной $h < 1500 \text{ nm}$ ($p-GaAs:Zn$, $N_A = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) и $n-GaAs:Sn$ базой толщиной $h = 20 \mu\text{m}$ ($GaAs:Sn$, $N_D = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) на подложке $n-GaAs:Sn$, ($N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), $h = 350 \mu\text{m}$. Данная структура была использована с учетом того, что методом ЖФЭ можно вырастить высококачественный $p-n$ -переход в $GaAs$, с малыми значениями токов „насыщения“ для туннельно-ловушечного, „избыточного“ и рекомбинационного механизмов токопрохождения, что важно при преобразовании слабых, нановаттных оптических сигналов.

В экспериментах исследовались образцы структур МПЭ и ЖФЭ с многослойным контактом с поверх-

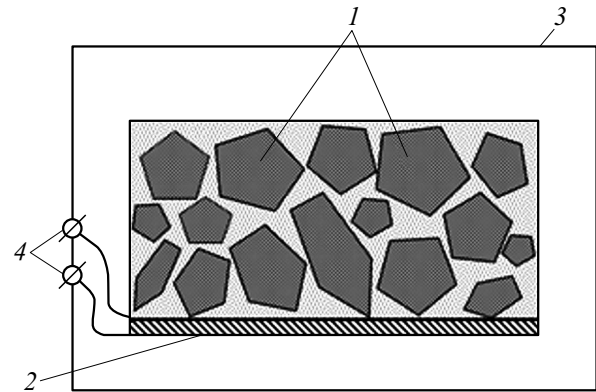


Рис. 2. Схематическое изображение РиФЭГ на основе разработанного $AlGaAs/GaAs$ -фотопреобразователя и $YPO_4:Eu/(^{238}Pu)$ радиоломинесцентного источника излучения: 1 — матрица с радиоломинесцентными кристаллами, 2 — $AlGaAs/GaAs$ -фотопреобразователь, 3 — защитный корпус, 4 — внешние электрические контакты.

ностной металлизацией золотом размерами $3 \times 3 \text{ mm}$ и $2 \times 2 \text{ mm}$ соответственно.

Для оценки эффективности создаваемого макета РиФЭГ (рис. 2) были выполнены измерения спектральных чувствительностей, темновых и световых ВАХ ФЭП этих типов структур. Характеристики представлены на рис. 3, 4. Следует отметить, что для увеличения эффективности макета $AlGaAs/GaAs$ ФЭП могут размещаться с двух сторон от источника оптического излучения [13]. Зависимости внешней квантовой эффективности ФЭП от длины волны в диапазоне $400-890 \text{ nm}$ производились на установке, созданной на базе монохроматора (M266) с галогеновой лампой в качестве источника излучения. Измерения ВАХ ФЭП и макета РиФЭГ проводились на зондовой станции с использованием высокоточного источника — измерителя (Keithley 2635A), позволяющего проводить измерения в диапазоне токов 10 pA ($0.15\% + 120 \text{ fA}$) — 1.5 A ($0.05\% + 3.5 \text{ mA}$). Уровень мощности источника оптического излучения контролировался измерителем оптической мощности с калиброванным кремниевым фотодетектором со спектральной чувствительностью в диапазоне ($400-1100$) nm и уровнем минимальной измеряемой мощности 20 pW .

2.2. Результаты

Для анализа экспериментальных темновых ВАХ была использована методика, описанная в [14]. Методика основана на представлении прямой ветви темновой ВАХ, состоящей из трех экспоненциальных участков, соответствующих туннельно-ловушечному („избыточному“), рекомбинационному и диффузионному механизмам то-

Таблица 1. Состав и толщины слоев гетероструктур

Номер слоя	Толщина слоя, nm	Состав	Концентрация примеси, cm^{-3}
Метод МПЭ			
1	300	$GaAs:Be$	$4 \cdot 10^{18}$
2	35	$Al_{0.8}Ga_{0.2}As:Be$	$7 \cdot 10^{17}$
3	100	$GaAs:Be$	$7 \cdot 10^{17}$
4	3000	$GaAs:Si$	$1 \cdot 10^{17}$
5	50	$Al_{0.2}Ga_{0.8}As:Si$	$3 \cdot 10^{18}$
6	200	$GaAs:Si$	$5 \cdot 10^{18}$
7	35 0000	$GaAs:Si$	$2 \cdot 10^{18}$
Метод ЖФЭ			
1	1000	$Al_{0.8}Ga_{0.2}As:Zn$	$5 \cdot 10^{18}$
2	1500	$GaAs:Zn$	$3 \cdot 10^{18}$
3	20 000	$GaAs:Sn$	$1 \cdot 10^{17}$
4	35 0000	$GaAs:Sn$	$1 \cdot 10^{18}$

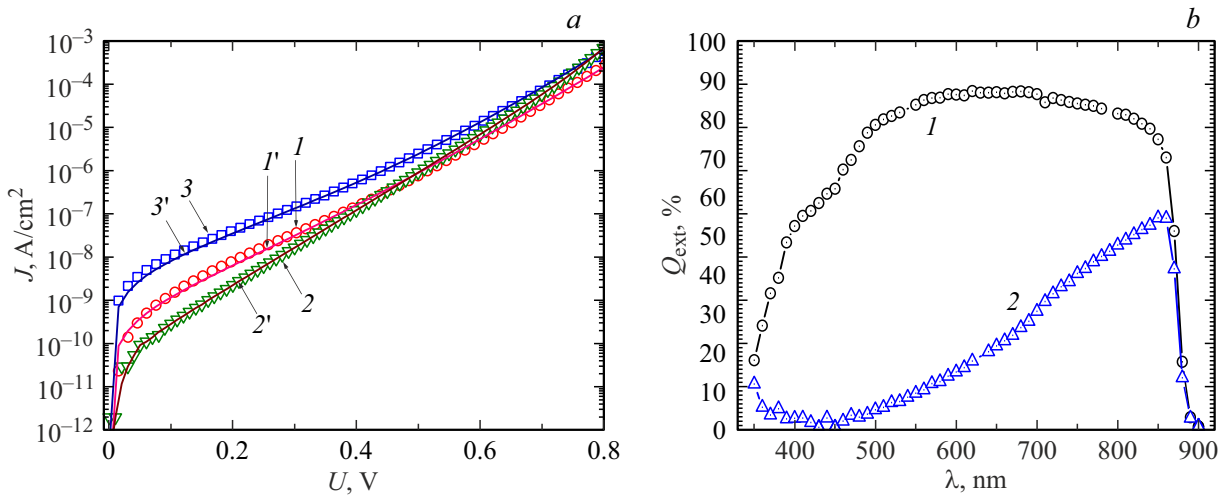


Рис. 3. *a* — прямые „темновые“ ВАХ AlGaAs/GaAs ФЭП. Структура МПЭ: эксперимент (1), смоделированная в Silvaco (2); структура ЖФЭ: эксперимент (3), 1'–3' — соответствующие расчетные кривые (по формуле (1)); *b* — спектральные характеристики внешней квантовой эффективности Al_{0.8}Ga_{0.2}As/GaAs ФЭП: 1 — структура МПЭ, 2 — структура ЖФЭ.

копрохождения, описываемых выражением (1):

$$J = J_{0r}(\exp(qV_j/A_r kT) - 1) + J_{0r}(\exp(qV_j/A_r kT) - 1) + J_{0d}(\exp(qV_j/A_d kT) - 1), \quad (1)$$

где $qV_j = (F_n - F_p)$ — разность электронного и дырочно-го квазиуровней Ферми на границах области пространственного заряда (ОПЗ) p - n -перехода. Соответственно V_j — так называемое безрезистивное напряжение, не зависящее от последовательного сопротивления структуры R_S , $V_j = V - JR_S$, где V — напряжение на всей p - n -структуре. $A_r > 2$, $A_r = 2$, $A_d = 1$ — соответствующие диодные коэффициенты.

Из фитинга экспериментальных темновых ВАХ по трехэкспоненциальной модели (рис. 3, *a*) и литературы [14,15] следует, что доминирующими механизмами токопрохождения в области объемного заряда (ООЗ) GaAs ФЭП при преобразовании слабых нановаттных уровней мощности оптического излучения источника являются туннельно-ловушечный („избыточный“) и рекомбинационный.

В нашем случае значения токов „насыщения“ туннельно-ловушечного, рекомбинационного и диффузионного механизмов токопрохождения для структуры ФЭП, выращенной МПЭ, составили

$$J_{0r} = 3.4 \cdot 10^{-10} \text{ A/cm}^2, J_{0r} = 2 \cdot 10^{-11} \text{ A/cm}^2, \\ J_{0d} = 2.4 \times 10^{-20} \text{ A/cm}^2,$$

что несколько ниже соответствующих значений, полученных для структуры ФЭП, выращенной ЖФЭ:

$$J_{0r} = 3.6 \cdot 10^{-9} \text{ A/cm}^2, J_{0r} = 6 \cdot 10^{-11} \text{ A/cm}^2, \\ J_{0d} = 8.6 \cdot 10^{-19} \text{ A/cm}^2.$$

Из спектральных зависимостей, представленных на рис. 3, *b*, видно, что структура ФЭП, полученная МПЭ и близкая к математически смоделированной (оптимизированной), отличается существенно более высокой чувствительностью, чем структура, выращенная методом ЖФЭ, в интересующем нас диапазоне оптического излучения.

Мощность люминесцентного излучения радиоизотопного YPO₄:Eu/(²³⁸Pu) источника на длинах волн $\lambda_{1-3} = (595, 615, 695) \text{ nm}$ (рис. 1, *a*), использованного в макете РиФЭГ, составляла $P_{\text{opt}} = 1 \text{ nW}$. Из рис. 4 и табл. 2 следует, что для макета РиФЭГ с разработанным Al_{0.8}Ga_{0.2}As/GaAs ФЭП (МПЭ), значение КПД со-

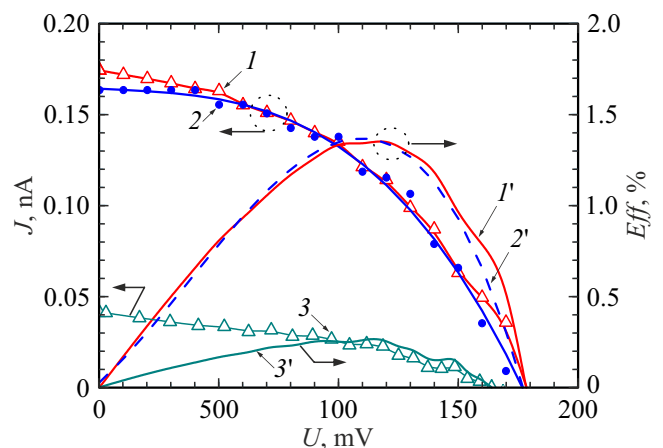


Рис. 4. Экспериментальные (1, 3) и смоделированная (2) световые ВАХ; рассчитанные из экспериментальных ВАХ (1', 3') и смоделированная (2') зависимости КПД для исследованных структур ФЭП при возбуждении люминесцентным излучением радиоизотопного источника YPO₄:Eu/(²³⁸Pu) мощностью 1 нВт (кривые 1, 1', 2, 2' — структура МПЭ, кривые 3, 3' — структура ЖФЭ).

Таблица 2. Параметры, определенные из фиттинга экспериментальных и смоделированных темновых и световых ВАХ ФЭП, выращенных методами МПЭ и ЖФЭ

Структура	A_t	$J_{0t}, A/cm^2$	A_r	$J_{0r}, A/cm^2$	A_d	$J_{0d}, A/cm^2$	$R_s, \Omega \cdot cm^2$	$I_{sh.cir.}, \mu A$	U_{idle}^{**}, V	$P_{max}^{***}, \mu W$	$FF^{****}, \%$	КПД, %
МПЭ (эксперимент)	> 2	$3.4 \cdot 10^{-10}$	2	$2 \cdot 10^{-11}$	1	$2.4 \cdot 10^{-20}$	2.6	175	0.18	16.5	52	1.4
МПЭ (моделирование)	> 2	$1.9 \cdot 10^{-11}$	2	$2.2 \cdot 10^{-11}$	1	$1.9 \cdot 10^{-20}$	0.002	163	0.17	16	58	1.38
ЖФЭ (эксперимент)	> 2	$3.6 \cdot 10^{-9}$	2	$6 \cdot 10^{-11}$	1	$8.6 \cdot 10^{-19}$	0.05	40	0.17	4.7	72	0.3

Примечание. * — ток короткого замыкания, ** — напряжение холостого хода, *** — мощность в точке оптимальной нагрузки, **** — фактор заполнения нагрузочной характеристики (FillFactor).

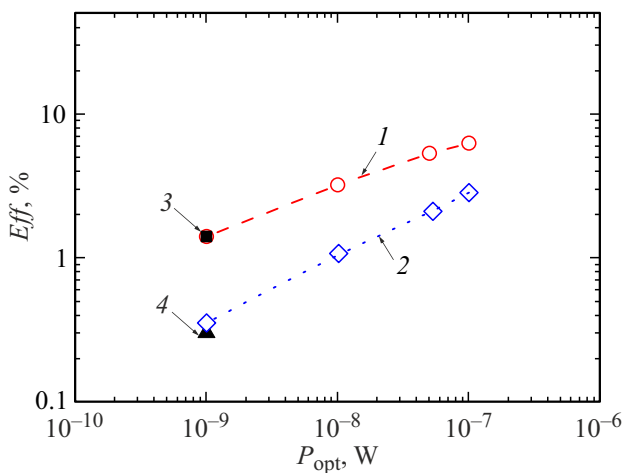


Рис. 5. Смоделированные зависимости КПД (кривые 1, 2) от мощности падающего оптического излучения и полученные экспериментально значения КПД (точки 3, 4) для $Al_{0.8}Ga_{0.2}As/GaAs$ ФЭП, выращенных соответственно МПЭ и ЖФЭ технологиями, при падающей оптической мощности $P_{opt} = 1$ нВт.

ставляет 1.4%, а с ФЭП (ЖФЭ) с неоптимизированной структурой — < 0.3%.

Для ФЭП из структур, выращенных методами МПЭ и ЖФЭ, наблюдается хорошее соответствие между значениями КПД, полученными моделированием и из измерений при мощности оптического излучения 1 нВт (рис. 5).

Отметим, что для использованных в расчетах параметров структур ФЭП КПД зависит как от мощности падающего излучения, так и величин токов „насыщения“ доминирующих механизмов токопрохождения. Например, при оптической мощности ~ 100 нВт для $Al_{0.8}Ga_{0.2}As/GaAs$ ФЭП (МПЭ) КПД возрастает до 6%, (рис. 5, кривая 1).

Заключение

Показана возможность использования $AlGaAs/GaAs$ ФЭП в безопасных, экологических, долгодействующих

радиоизотопных фотоэлектрических источников энергии с радиолюминесцентным излучателем на основе $YPO_4:Eu/(^{238}Pu)$.

$AlGaAs/GaAs$ ФЭП, полученный методом МПЭ, при уровне оптического излучения 1 нВт обеспечил в макете РиФЭГ значение КПД $\sim 1.4\%$. Полученное экспериментальное значение КПД хорошо согласуется с результатами моделирования и расчетов эффективности $AlGaAs/GaAs$ ФЭП. Как показывают проведенные расчеты, при повышении оптической мощности радиолюминесцентных источников излучения на основе $YPO_4:Eu/(^{238}Pu)$, можно обеспечить уровень выходной электрической мощности до 0.2 мВт и более в течение периода полураспада изотопа, импрегнированного в матрицу ксенотима.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Г.В. Климко и В.П. Хвостикову за предоставление образцов структур ФЭП для проведения экспериментов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] O.L. Ayodele, K.O. Sanusi, M.T. Kahn. J. Engineering, Design and Technology, **17** (1), 172 (2019). DOI: 10.1108/JEDT-02-2017-0011
- [2] Z. Xu, Yu. Liu, Zh. Zhang, W. Chen, Z. Yuan, K. Liu, X. Tang. Wiley Energy Research, **42** (4), 1729 (2018). DOI: 10.1002/er.3982
- [3] А.А. Краснов, С.А. Леготин. Приборы и техника эксперимента, **4**, 5 (2020). DOI: 10.31857/S0032816220040151 [A.A. Krasnov, S.A. Legotin. Instruments and Experimental Techniques, **63** (4), 437 (2020).]
- [4] Zh.-R. Zhang, X.-B. Tang, Yu.-P. Liu, Zh.-H. Xu, Z.-Ch. Yuan, K. Liu, W. Chen. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, **398**, 35 (2017). DOI: 10.1016/j.nimb.2017.03.060

- [5] A.A. Svintsov, E.B. Yakimov, M.V. Dorokhin, P.B. Demina, Yu.M. Kuznetsov. *Semiconductors*, **53** (1), 96 (2019).
- [6] S. Deus. Proc. 28st IEEE Photovoltaics Specialist Conf., 1246–1249 (2000).
- [7] В.В. Светухин, С.Г. Новиков, А.В. Беринцев, А.А. Черторийский, А.С. Алексеев. Известия вузов. Электроника, **21** (5), 429 (2016). [V.V. Svetukhin, S.G. Novikov, A.V. Berintsev, A.A. Chertoriysky, A.S. Alekseev. *Proceedings of Universities. Electronics*, **21** (5), 429 (2016).]
- [8] B.E. Burakov, V.M. Garbuzov, A.A. Kitsay, V.A. Zirlin, M.A. Petrova, Ya.V. Domracheva, M.V. Zamoryanskaya, E.V. Kolesnikova, M.A. Yagovkina, M.P. Orlova. *Semiconductors*, **41** (4), 427 (2007). DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063782607040124>
- [9] M.V. Zamoryanskaya, E.V. Dementeva, K.N. Orekhova, V.A. Kravets, A.N. Trofimov, G.A. Gusev, I. Ipatova, B.E. Burakov. *Materials Research Bulletin*, **142**, 111431 (2021). DOI: 10.1016/j.materresbull.2021.111431
- [10] B.E. Burakov, M.I. Ojovan, W.E. Lee (Ed.). *Crystalline Materials for Actinide Immobilization, 1* (Imperial College Press, 2010)
- [11] B. Wardle. *Principles and Applications of Photochemistry* (Wiley, 2010), p. 30.
- [12] С.М. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (Мир, М., 1984), т. 2, с. 347. [S.M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices* (John Wiley & Sons, NY, Chichester, Brisbar, Toronto, Singapore, 1981)]
- [13] К.К. Прудченко, М.В. Заморянская, В.С. Калиновский, Е.В. Контрош, И.А. Толкачев, К.Н. Орехова, А.Н. Трофимов, Б.Е. Бураков, Е.В. Дементьева. Радионуклидный источник энергии, Патент РФ № RU 207 579 (02.11.2021)
- [14] В.М. Андреев, В.В. Евстропов, В.С. Калиновский, В.М. Лантратов, В.П. Хвостиков. ФТП, **43** (5), 671 (2009). [V.M. Andreev, V.V. Evstropov, V.S. Kalinovsky, V.M. Lantratov, V.P. Khvostikov. *Semiconductors*, **43** (5), 644 (2009). DOI: 10.1134/S1063782609050200]
- [15] В.С. Калиновский, Е.В. Контрош, Г.В. Климко, Т.С. Табаров, С.В. Иванов, В.М. Андреев. Письма в ЖТФ, **44** (22), 33 (2018). DOI: <http://dx.doi.org/10.21883/PJTf.2018.22.46919.17471> [V.S. Kalinovskii, E.V. Kontrosh, G.V. Klimko, T.S. Tabarov, S.V. Ivanov, V.M. Andreev. *Tech. Phys. Lett.*, **44** (11), 1013 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018110214]