

## Фронтальный контакт к GaSb-фотопреобразователям: свойства и температурная стабильность

© С.В. Сорокина, Ф.Ю. Солдатенков, Н.С. Потапович, В.П. Хвостиков

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

E-mail: svsorokina@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 16 мая 2022 г.

В окончательной редакции 12 июля 2022 г.

Принята к публикации 10 августа 2022 г.

Рассмотрены вопросы термической стабильности фронтальных контактов на основе Cr–Au и Cr–Au–Ag–Au к фотоэлектрическим преобразователям на основе GaSb в рабочих (температура на элементе  $T \sim 50^\circ\text{C}$ ) и стандартных для квалификационных испытаний условиях ( $\sim 80^\circ\text{C}$ ), а также при форсированной тепловой деградации ( $\sim 125$  и  $\sim 200^\circ\text{C}$ ). Показано, что фотоэлектрический преобразователь с сереброрсодержащим контактом обладает лучшими характеристиками по стабильности контактного сопротивления, фоточувствительности,  $FF$ ,  $V_{oc}$  и, соответственно, по кпд. Определен срок службы преобразователей при рабочих и повышенных температурах.

**Ключевые слова:** контакт, деградация, фотоэлектрический преобразователь, GaSb.

DOI: 10.21883/FTP.2023.01.54928.3692

### 1. Введение

Важнейшим параметром солнечных батарей является срок службы и стабильность электрических характеристик, которые зависят от выбора материалов, приборной структуры и конструктивного оформления фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), качества изготовления и строгости соблюдения особенностей технологических процессов, степени согласования отдельных компонентов модуля, а также от реальных климатических воздействий, в которых они эксплуатируются.

Для фотоэлектрических преобразователей и модулей на их основе разработаны общие последовательности технических квалификационных испытаний, которые проводят в соответствии с требованиями стандартов (например, ГОСТ Р 56980-2016 для наземных кремниевых батарей [1] или ГОСТ Р 56983-2016 для концентраторных модулей [2]). Квалификационное испытание обычно применяется для оценки качества фотоэлементов и модулей при их постановке на производство [3], а также в процессе производства для неразрушающего контроля и отбраковки готовой продукции и проверки соблюдения принятого технологического цикла их изготовления. Согласно [1], тестирование на устойчивость к длительному воздействию агрессивной среды проводят при температуре  $85^\circ\text{C}$  и относительной влажности 85% (продолжительность испытаний 1000 ч). Дополнительно изучаются термоциклирование в диапазоне температур  $-40$ – $+85^\circ\text{C}$  (до  $110^\circ\text{C}$  в концентраторных модулях), стойкость к локальному перегреву. Кроме того, определяется способность модуля противостоять ультрафиолетовому излучению, механическим (т.е. ветровым, снежным, ледовым) нагрузкам, воздействию града и другие проверки.

При разработке новых типов фотоэлектрических преобразователей задачи тестирования иные и сводятся к оценке недостатков конструкции и резервов повышения качества, надежности и срока службы фотоэлементов, к выявлению наиболее перспективных материалов и т.д. Выбор контактной системы является важнейшей составляющей проектирования/отработки технологии изготовления ФЭП, так как качество контакта существенным образом влияет не только на его параметры, но и на безотказность и долговечность работы. Штатные испытания в этом случае не будут достаточно результативны, окажутся неоправданно долгими и трудоемкими. Стандартная процедура выходного контроля может быть упрощена и сведена, например, к тестированию на устойчивость к длительному воздействию температуры.

Изучению стабильности золото- и сереброрсодержащих контактных композиций к  $p$ -GaSb посвящена работа [4]. В ней отмечалось, что в условиях экстремального ( $200^\circ\text{C}$ ) нагрева ФЭП деградация проявлялась в проплавлении металлизацией тонкого  $p$ - $n$ -перехода, а также в ухудшении состояния поверхности и частичном осыпании слоев контакта. В данной работе представлены результаты исследований термически инициированной деградации фронтальных контактов ФЭП при нагреве до  $\sim 80$  и  $120^\circ\text{C}$ . Тестирование при  $T \sim 80^\circ\text{C}$  приближено к рекомендациям стандарта [1] и условиям работы ФЭП, нагрев которого, как правило, не превышает  $50$ – $70^\circ\text{C}$  и зависит от способа его эксплуатации — в солнечных батареях [5–9], термофотоэлектрических генераторах [10–12], при преобразовании лазерного излучения. Температура  $120^\circ\text{C}$  выбрана как еще один режим форсированной деградации. Работоспособность преобразователей при  $T \sim 50^\circ\text{C}$  в силу длительности эксперимента оценена теоретически с использованием

экспериментальных данных для  $T \sim 200, 120$  и  $80^\circ\text{C}$  (см. далее разд. 2.6).

Цель данного исследования заключалась в сравнении стабильности и срока службы двух контактных систем: традиционной для ФЭП на основе GaSb композиции Cr–Au и ее модификации на основе серебра Cr–Au–Ag–Au.

При выборе золото- или серебросодержащих контактных композиций и способов их формирования особое значение должно уделяться величине контактного сопротивления. В литературе содержится достаточно мало сведений о температурно-временной стабильности металлизации к GaSb. В работе [13] исследовались контакты на основе золота (без подслоя хрома), изначально вожженные в течение 60 с при температуре  $200^\circ\text{C}$  в атмосфере водорода и азота (forming gas). При повторном вжигании в течение 60 с при  $T = 250^\circ\text{C}$  значения удельного контактного сопротивления ухудшались от  $\rho_c \sim 5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  до  $\rho_c \sim 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ . При более низких температурах ( $100^\circ\text{C}$ ) контакты оставались стабильными по величине  $\rho_c > 10$  ч.

В работе [14] осаждались золотосодержащие контакты Au (100 Å)–Zn (100 Å)–Au (800 Å) и измерялись значения удельных контактных сопротивлений в зависимости от температуры их вжигания в атмосфере 92%  $\text{N}_2$  + 8%  $\text{H}_2$ . Минимальные значения  $\rho_c \sim 1 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  достигались при  $T = 300^\circ\text{C}$  и времени отжига 15 мин. Исследование оже-профилей и спектров обратного рассеяния Резерфорда подтвердило диффузию золота в GaSb, а также обратную диффузию Ga и диффузию Zn. Эти факторы будут влиять на предрасположенность такого золотосодержащего контакта к деградации.

В работе [15] исследовалась температурно-временная стабильность Au-, Ag- и Al-контактов к  $p$ -GaSb (с  $p = 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и  $p = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ). Установлено, что контакты на основе серебра оставались стабильными по значениям переходного контактного сопротивления при температурной выдержке  $350^\circ\text{C}$  в атмосфере водорода и азота (forming gas) в течение 100 ч. Поэтому можно ожидать, что при длительной эксплуатации приборов (несколько тысяч часов и более) при более низких рабочих температурах указанные контактные системы также будут оставаться стабильными. Контакты на основе алюминия наименее устойчивы и отличались резким ростом  $\rho_c$  уже при температурах  $\sim 100^\circ\text{C}$ . Для контактов на основе золота наблюдался рост переходного контактного сопротивления после 30-часового прогрева при  $T = 250^\circ\text{C}$ . Следовательно, серебросодержащие контакты более стабильны по сравнению с золотосодержащими за счет того, что образование интерметаллических соединений Ag с Ga и Sb происходит при более высоких температурах, чем аналогичные соединения с Au. Вывод авторов работы [15] о стабильности серебросодержащих контактов в целом подтверждается результатами текущей работы (см. далее разд. 2.2).

## 2. Экспериментальные результаты

### 2.1. Особенности изготовления фотоэлектрических преобразователей

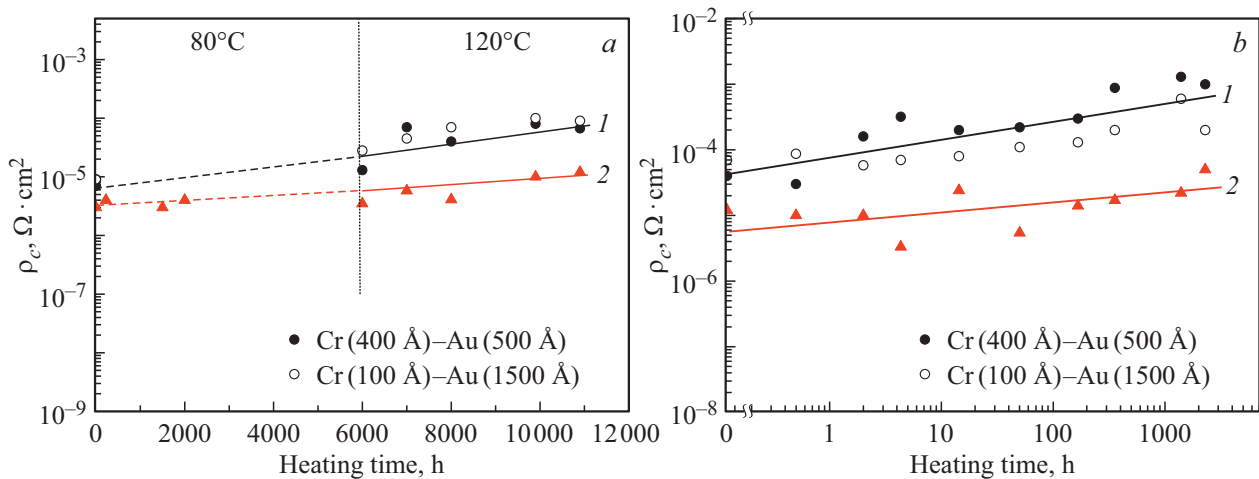
Фотоэлектрические преобразователи на основе антимида галлия изготавливались методом двухстадийной диффузии цинка из газовой фазы в подложку  $n$ -GaSb [16,17]. Полосковые контакты на основе композиций Cr (10–40 нм)–Au (1.0–1.5 мкм) и Cr (10–40 нм)–Au (100 нм)–Ag (0.9–1.4 мкм)–Au (50 нм) формировались к фронтальной (лицевой) поверхности  $p$ -GaSb ( $p \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) методом резистивного термического испарения в вакууме при давлении остаточных газов в камере  $\sim 10^{-6}$  мм рт.ст. Перед напылением область под контактной сеткой подвергалась ионно-плазменной обработке. Изготовление контактов на основе Cr–Au заключалось в предварительном напылении „тонкого“ ( $d \sim 0.3$  мкм) контакта с последующим гальваническим осаждением токопроводящего слоя золота до общей толщины 1.0–1.5 мкм. Для формирования многослойного контакта Cr–Au–Ag–Au с  $d \sim 1.0$ –1.5 мкм, наносимого в ходе единого процесса напыления, применялась двухслойная литография с использованием LOR резистов (lift-off resist). Особенности изготовления указанных контактов к ФЭП на основе GaSb посвящена работа [18].

Тыльная металлизация на основе AuGe–Ni–Au формировалась до напыления и отжига фронтальной контактной сетки. Вжигание тыльного и фронтального контактов проводилось в атмосфере водорода при температуре 200–230 и  $170^\circ\text{C}$  соответственно. Продолжительность отжига составляла  $\sim (15–60)$  с.

Эксперименты по термической деградации ФЭП проводились на воздухе с использованием термостата.

### 2.2. Температурно-временная стабильность контактного сопротивления

Причиной ухудшения свойств контактов под воздействием температуры может стать значительный рост удельного сопротивления  $\rho_c$ . Наши данные об удельном переходном сопротивлении золото- и серебросодержащих контактов разных типов к  $p$ -GaSb ( $p \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) при кратковременном вжигании в атмосфере водорода представлены в работе [18]. Изменения  $\rho_c$  при длительном прогреве предварительно вожженных ( $T = 225^\circ\text{C}$ ) контактов Cr–Au и Cr–Au–Ag–Au показаны на рис. 1. Многочасовой отжиг на воздухе проводился при температуре  $\sim 80^\circ\text{C}$  ( $t \leq 6000$  ч), близкой к стандартной температуре тестирования фотоэлектрических преобразователей. Продолжение экспериментов осуществлялось в ускоренном режиме при  $T \sim 120^\circ\text{C}$  ( $t > 6000$  ч, рис. 1, а). Аналогичные зависимости изменения контактного сопротивления при предельно высокой для фотоэлемента температуре  $\sim 200^\circ\text{C}$  показаны на рис. 1, б.



**Рис. 1.** Изменение контактного сопротивления после прогрева структур: *a* — при  $T \sim 80$  и  $120^\circ\text{C}$ ; *b* — при  $T \sim 200^\circ\text{C}$ . 1 — Cr–Au, 2 — Cr–Au–Ag–Au.

Измерение контактного сопротивления проводилось методом LTML (linear transmission line model, метод линии передачи с линейной геометрией контактных площадок). Полученные данные свидетельствуют о постепенном росте  $\rho_c$  и лучшей температурно-временной стабильности исследованных серебрясодержащих контактов по сравнению с золотосодержащим аналогом. Зависимости  $\rho_c(T)$  для контактов с разными толщинами хрома (открытые и закрашенные круглые символы на рис. 1, *a* и *b*) представлены общей кривой 1. Незначительные отличия в значениях  $\rho_c$  находятся в пределах погрешности метода.

### 2.3. Изменение поверхности контакта под воздействием температуры

Термическое воздействие может не только влиять на параметры фотоэлектрических преобразователей, но и изменять внешний вид контактов, вызывая, например, окисление поверхности, растрескивание, осыпание и отслаивание металлических пленок. Внешний вид LTML-структур на момент окончания их прогрева на воздухе при  $200^\circ\text{C}$  (2300 ч) показан на рис. 2. Образцы сфотографированы с многократным увеличением через объектив оптического микроскопа. На снимках различимы прямоугольные контактные площадки, расположенные на расстоянии 20, 40, 80 и 100 мкм друг от друга. Изменение цвета контакта Cr–Au–Ag–Au после длительного отжига (рис. 2, *c*) свидетельствует о том, что толщина верхнего слоя золота в 50 нм оказывается недостаточной для защиты поверхности от содержащихся в воздухе кислорода и серы. Для предотвращения данного нежелательного эффекта, по-видимому, ее следует увеличить или ввести между верхним защитным слоем золота и слоем серебра барьерный слой хрома, никеля или платины. Для композиции Cr–Au повышение толщины адгезионного слоя хрома от 100 до 400 нм способ-

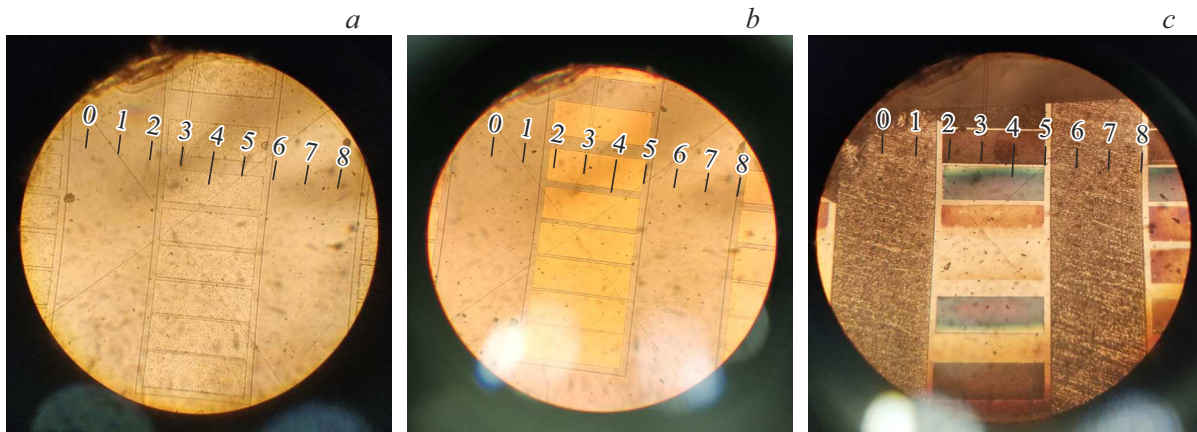
ствует улучшению морфологии поверхности контакта (рис. 2, *a* и *b*).

### 2.4. Тепловая деградация контактов при $T \sim 80^\circ\text{C}$

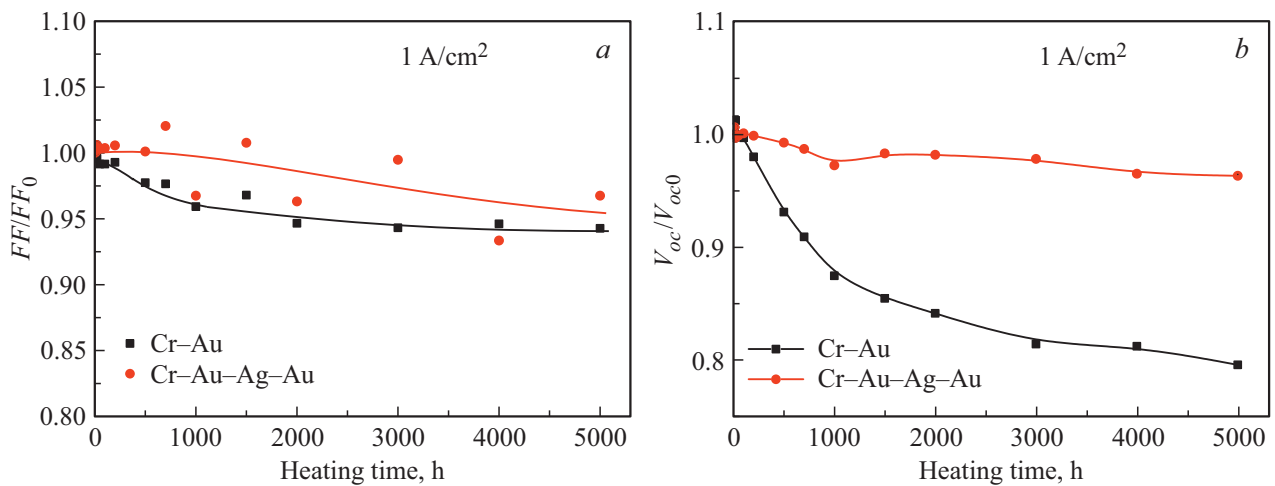
Визуальный контроль изготовленных ФЭП, осуществляемый с использованием оптических микроскопов, показал, что при длительном прогреве при  $80^\circ\text{C}$  контакт Cr–Au имел однородную структуру, в то время как для Cr–Au–Ag–Au также наблюдалось постепенное изменение цвета металлизации как в узких полосках, так и в широких токосборных шинах по периферии ФЭП. Выявленного ухудшения просветляющих покрытий не наблюдалось. При этом падение напряжения холостого хода  $V_{oc}$  и фактора заполнения  $FF$  (рис. 3) происходило для Cr–Au уже на начальном этапе экспериментов, а фотоэлементы с контактной сеткой на основе серебра имели значительно более стабильные электрические характеристики. Существенных изменений  $V_{oc}$  в этом случае не отмечено (рис. 3, *b*). Разброс значений  $FF$  для ФЭП с Cr–Au–Ag–Au на рис. 3, *a*, возможно, связан с ухудшением поверхности контакта.

### 2.5. Форсированная деградация при $T \sim 120^\circ\text{C}$

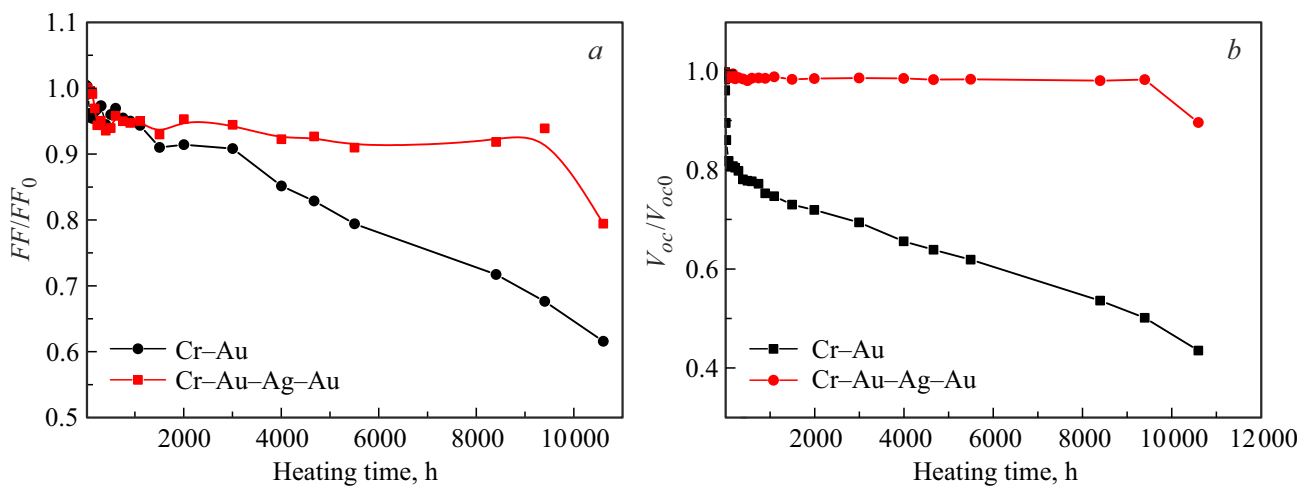
Результаты экспериментов по форсированной деградации ФЭП при  $T \sim 120^\circ\text{C}$  приведены на рис. 4. Указанное значение  $T$  заметно превышает усредненный рабочий температурный диапазон [5–12] как для солнечных батарей, так и для термофотоэлектрических преобразователей. Однако поведение ФЭП при таких нештатных условиях тоже может быть интересно с практической точки зрения: в термофотоэлектрических генераторах преобразователь должен быть максимально (до 1–3 см) приближен к нагреваемому эмиттеру, при этом его перегрев будет сильно возрастать. В реализованных на



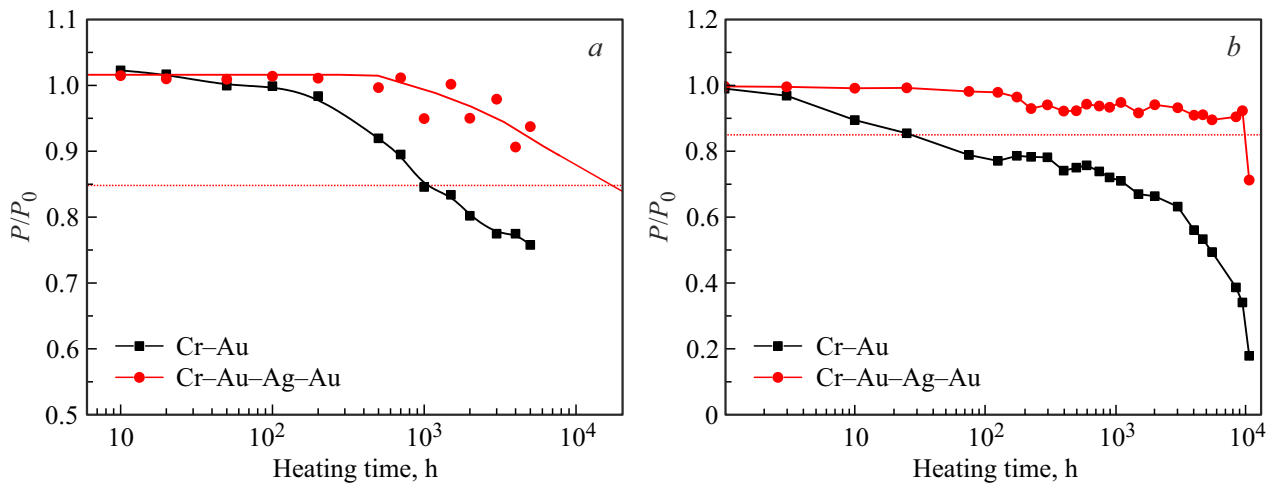
**Рис. 2.** Морфология поверхности контактов в ПЛМ-структурах (прогрев при  $200^\circ\text{C}$ , 2280 ч): *a* — Cr(100 нм)–Au; *b* — Cr(400 нм)–Au; *c* — Cr–Au–Ag–Au.



**Рис. 3.** Изменение  $FF$  и  $V_{oc}$  (нормированные значения) после прогрева фотоэлементов при  $T \sim 80^\circ\text{C}$ .



**Рис. 4.** Изменение  $FF$  и  $V_{oc}$  (нормированные значения) фотоэлементов с разными контактными системами после прогрева при  $T \sim 120^\circ\text{C}$ ,  $J_{sc} = 1 \text{ A/cm}^2$ .



**Рис. 5.** Изменение мощности в фотоэлементах с разными контактными системами после прогрева при температурах 80°C (a) и 120°C (b). Данные приведены для условий засветки, соответствующей плотности фототока 1 А/см<sup>2</sup>.

**Таблица 1.** Фототок преобразователей после прогрева при температуре 120°C

Тип контактов	Время воздействия при T ~ 120°C, ч	Плотность фототока, мА/см <sup>2</sup>	
		АМ0	АМ1.5G
Cr–Au–Ag–Au	0	41.1	31.6
	5500	41.1	31.6
Cr–Au	0	41.1	31.6
	5500	40.5	31.2

практике термофотоэлектрических системах расстояние эмиттер–ФЭП, как правило, заведомо больше минимального, что связано с опасностью ухудшения V<sub>oc</sub> преобразователей под влиянием температуры и сокращением срока их службы в экстремально неблагоприятных условиях.

Отсутствие заметной деградации спектральной чувствительности ФЭП под воздействием прогрева на воздухе подтверждают результаты табл. 1. Представлены данные для засветки преобразователей космическим (АМ0) и наземным (АМ1.5G) солнечным излучением.

### 2.6. Оценка времени деградации фотоэлектрического преобразователя

В качестве параметра, определяющего работоспособность фотоэлемента и сохранность контакта, был выбран период времени, в течение которого падение выходной мощности не превышало 15% от исходного значения (см. рис. 5). Этот период менее продолжителен, чем физический срок службы фотоэлектрического преобразователя, когда прибор продолжает функционировать, но в силу эффекта старения и деградации работает неэффективно. В строгом понимании это время не

является сроком службы преобразователя и потому, что учитывает лишь термическую нагрузку на прибор без его засветки.

Время устойчивости ФЭП к деградации при различной (80, 120, 200°C) температуре, определенное на основании представленных данных и результатов работы [4], суммировано в табл. 2.

Полученные экспериментальные результаты падения выходной мощности при повышенных температурах позволяют оценить время деградации преобразователей в рабочих режимах эксплуатации. Использовалась методика определения надежности приборов, изложенная в работах [18–20]. По результатам испытаний для T<sub>A</sub> = 120°C и T<sub>B</sub> = 200°C оценивалась энергия активации деградационного процесса E<sub>a</sub> и коэффициент ускорения деградации K<sub>a</sub> относительно температуры эксплуатации ФЭП (T<sub>N</sub> = 50°C):

$$E_a = k \frac{\ln(t_A/t_B)}{(1/T_A) - (1/T_B)}, \quad (1)$$

$$K_a = \frac{\exp(E_a/kT_N)}{\exp(E_a/kT_F)}, \quad (2)$$

где k — постоянная Больцмана, t<sub>A</sub> и t<sub>B</sub> — время деградации преобразователя при T<sub>A</sub> и T<sub>B</sub> соответственно

**Таблица 2.** Время устойчивости к деградации в условиях повышенной температурной нагрузки (эксперимент)

	Тип контактной системы	Температура прогрева ФЭП, °C		
		200	120	80
Время устойчивости к деградации, час	Cr–Au	0.1	30	1050
	Cr–Au–Ag–Au	6	9900	~ 17600*

*Примечание.* \* Аппроксимация экспериментальных результатов рис. 5.

**Таблица 3.** Параметры деградации контактов. Значения  $K_a$  приведены для форсированного режима при  $T_F = 120^\circ\text{C}$

Контакт	$E_a$ , эВ	$K_a$	Время деградации ФЭП при $50^\circ\text{C}$ , ч
Cr–Au	1.13	$1.2 \cdot 10^3$	$4.2 \cdot 10^5$
Cr–Au–Ag–Au	1.58	$2.4 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^8$

(табл. 2),  $T_N$  и  $T_F$  — температура в нормальном и форсированном режимах.

Из данных рис. 5,  $b$  определялось время форсированной деградации  $\tau_F$ :

$$\tau_F = \frac{t_1 - t_2}{\ln(P_2/P_1)}, \quad (3)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  — значения времени на линейном участке зависимости и соответствующие им значения мощности  $P_1$  и  $P_2$ .

Время деградации преобразователей  $\tau$  для номинального режима работы получали умножением постоянной времени  $\tau_F$  на коэффициент ускорения  $K_a$ :

$$\tau = \tau_F \cdot K_a. \quad (4)$$

Результаты расчетов для времени деградации при температуре  $50^\circ\text{C}$  представлены в табл. 3.

### 3. Заключение

ФЭП с сереброрсодержащим фронтальным контактом Cr–Au–Ag–Au имеет преимущество перед аналогом с Cr–Au по временной стабильности большинства фотоэлектрических параметров (фоточувствительности,  $FF$ ,  $V_{oc}$ , КПД) и сроку службы как в рабочих для фотопреобразователей условиях, так и при экстремально высоких температурах. В агрессивных условиях эксплуатации (в частности, в условиях значительного теплового нагрева) толщина защитного слоя золота в композиции Cr–Au–Ag–Au должна превышать 50 нм. Расчеты для времени деградации ФЭП при температуре  $50^\circ\text{C}$  показали, что спрогнозированный срок службы металлизации в отсутствие других разрушающих воздействий составляет не менее 48 лет.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Национальный стандарт РФ „Модули фотоэлектрические из кремния наземные. Методы испытаний“, ГОСТ Р 56980-2016 (МЭК 61215:2005) IEC 61215. Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules — Design qualification and type approval: International Electro technical commission, 2005.
- [2] Национальный стандарт РФ „Устройства фотоэлектрические с концентраторами. Методы испытаний“, ГОСТ Р 56983-2016 (МЭК 62108:2007) IEC 62108. Concentrator photovoltaic (CPV) modules and assemblies — Design qualification and type approval, 2007.
- [3] A. Vogt, G. Peharz, J. Jaus, A. Bösch, A.W. Bett. *Proc. 21st Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf.* (Dresden, Germany, 2006) p. 2225.
- [4] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, Ф.Ю. Солдатенков, Н.Х. Тимошина. *ФТП*, **48** (9), 1280 (2014). <http://journals.ioffe.ru/articles/40822> [V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, N.S. Potapovich, F.Yu. Soldatenkov, N.Kh. Timoshina. *Semiconductors*, **48** (9), 1248 (2014). DOI: 10.1134/S1063782614090115]
- [5] Y. Kemmoku, T. Egami, M. Hiramatsu, Y. Miyazaki, K. Araki, N.J. Ekins-Daukes, T. Sakakibara. *Proc. 19th EU PVSEC* (Paris, France, 2004).
- [6] K. Araki, H. Uozumi, M. Yamaguchi. *Proc. 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (New Orleans, LA, USA, 2002) p. 1568. DOI: 10.1109/PVSC.2002.1190913
- [7] J. Jaus, G. Peharz, A. Gombert, J. Rodriguez, F. Dimroth, F. Eltermann, O. Wolf, M. Passig, G. Siefer, A. Hakenjos, S.V. Riesen, A.W. Bett. *Proc. 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2009) p. 001931.
- [8] Ya. Ota, H. Nagai, K. Araki, K. Nishioka. *Proc. 8th Int. Conf. on Concentrating Photovoltaic Systems (CPV-8)* (Toledo, Spain, 2012).
- [9] O.I. Chosta, V.A. Grilikhes, A.A. Soluyanov, M.Z. Shvarts. *Proc. 20th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf.* (Barcelona, Spain, 2005) p. 519.
- [10] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, О.А. Хвостикова, А.В. Малевская, А.С. Власов, М.З. Шварц, Н.Х. Тимошина, В.М. Андреев. *ФТП*, **44** (2), 270 (2010). <http://journals.ioffe.ru/articles/7062> [V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, N.S. Potapovich, O.A. Khvostikova, A.V. Malievskaya, A.S. Vlasov, M.Z. Shvarts, N.K. Timoshina, V.M. Andreev. *Semiconductors*, **44** (2), 255 (2010). DOI: 10.1134/S1063782610020223]
- [11] А.С. Власов, В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, В.С. Калиновский, Е.П. Ракова, В.М. Андреев, А.В. Бобыль, Г.Ф. Терещенко. *ФТП*, **44** (9), 1284 (2010). <http://journals.ioffe.ru/articles/7233>
- [12] Z. Utlu. *Int. J. Low-Carbon Technologies*, **15** (2), 277 (2020). <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz049>
- [13] B. Tadayon, C.S. Kyono, M. Fatemi, S. Tadayon, J.A. Mittereder. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **13** (1), 1 (1995). DOI: 10.1116/1.587979
- [14] J.B. Oliveira, C.A. Olivieri, J.C. Galzerani, A.A. Pasa, F.C. de Prince. *J. Appl. Phys.*, **66** (11), 5484 (1989). DOI: 10.1063/1.343699
- [15] A.G. Milnes, M. Ye, M. Stam. *Solid State Electron.*, **37** (1), 37 (1994). DOI: 10.1016/0038-1101(94)90101-5
- [16] В.М. Андреев, С.В. Сорокина, Н.Х. Тимошина, В.П. Хвостиков, М.З. Шварц. *ФТП*, **43** (5), 695 (2009). <http://journals.ioffe.ru/articles/6851> [V.M. Andreev, S.V. Sorokina, N.Kh. Timoshina, V.P. Khvostikov, M.Z. Shvarts. *Semiconductors*, **43** (5) 668 (2009). DOI: 10.1134/S1063782609050236]

- [17] V.M. Andreev, V.P. Khvostikov, V.D. Rumyantsev, S.V. Sorokina, V.I. Vasil'ev. *Proc. 4th NREL Conf. on Thermophotovoltaic Generation of Electricity* (Denver, CO, 1998) p. 384. DOI: 10.1063/1.57818
- [18] Ф.Ю. Солдатенков, С.В. Сорокина, Н.Х. Тимошина, В.П. Хвостиков, Ю.М. Задиранов, М.Г. Растегаева, А.А. Усикова. *ФТП*, **45** (9), 1266 (2011). <http://journals.ioffe.ru/articles/7520> [F.Y. Soldatenkov, S.V. Sorokina, N.Kh. Timoshina, V.P. Khvostikov, Y.M. Zadiranov, M.G. Rastegaeva, A.A. Usikova. *Semiconductors*, **45** (9), 1219 (2011). DOI: 10.1134/S1063782611090193]
- [19] И.М. Викулин, В.И. Ирха, Б.В. Коробицын, В.Э. Горбачев. *ТКЕА*, **2**, 55 (2004). [http://www.tkea.com.ua/tkea/2004/2\\_2004/st\\_14.htm](http://www.tkea.com.ua/tkea/2004/2_2004/st_14.htm) [I.M. Vikulin, V.I. Irkha, B.V. Korobitsyn, V.E. Gorbachev. *ТКЕА*, **2**, 55 (2004)].
- [20] М.И. Черных, Г.А. Велигура, В.А. Буслов, В.А. Кожевников, А.Н. Цоцорин. *Электрон. техн., сер. 2. Полупроводниковые приборы*. **3** (234), 35 (2014). <https://www.niiet.ru/wp-content/uploads/pub13.pdf>

*Редактор А.Н. Смирнов*

## Front contact to the GaSb-photovoltaic converter: Properties and thermal stability

*S.V. Sorokina, F.Yu. Soldatenkov, N.S. Potapovich, V.P. Khvostikov*

loffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Issues related to the thermal stability of front contacts, based on Cr–Au and Cr–Au–Ag–Au, to GaSb-based photovoltaic cells have been considered at the operational (the cell temperature is 50°C) and standard conditions as well as at the forced thermal degradation (at 125 and 200°C). It is shown that the photovoltaic converter with the silver-containing contact is preferable in terms of the stability of contact resistivity, external quantum yield,  $FF$ ,  $V_{OC}$ , and therefore, the cell efficiency and lifetime. The durability of the cells is determined at operational and elevated temperatures.