

**Анализ возможности влияния легкоплавких металлов на качество функционирования космических аппаратов**

**Analysis of possibility of light-alloy metals influence on spacecraft operation quality**

**Лебедев / Lebedev E.**

Евгений Леонидович

(zlebedev@yandex.ru)

доктор технических наук, доцент.

ФГКВОУ ВО «Военно-космическая академия имени

А. Ф. Можайского» (ВКА им. А. Ф. Можайского)

МО РФ, начальник кафедры контроля качества

испытаний вооружения, военной и специальной техники и фотограмметрии.

г. Санкт-Петербург

**Уханов / Ukhanov I.**

Игорь Геннадьевич

(ighor\_ux@mail.ru)

кандидат технических наук.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

заместитель начальника факультета конструкции

летательных аппаратов.

г. Санкт-Петербург

**Верещагин / Vereshchagin M.**

Михаил Викторович

(tuapse.70@mail.ru)

кандидат технических наук.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

заместитель начальника кафедры космических

аппаратов и средств межорбитальной

транспортировки.

г. Санкт-Петербург

**Чашин / Chaschin I.**

Игорь Вячеславович

(chaschin.igor21631@yandex.com)

ВКА им. А. Ф. Можайского,

адъюнкт кафедры космических аппаратов

и средств межорбитальной транспортировки.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: космический аппарат – spacecraft; система электроснабжения – electric power supply system; эвтектика легкоплавных металлов – eutectic of light-alloy metals; фотоэлектрические преобразователи – photoelectric converters; р-п переход – p-n junction.

В статье рассматривается вопрос влияния на выходную мощность фотоэлектрических преобразователей систем электроснабжения космических аппаратов попадания эвтектик легкоплавких металлов на их полупроводниковую поверхность или токосъемные полосы.

The article considers question how eutectics of light-alloy metals release on semiconductive surface or current-collecting strips of electric power supply systems influence on power output of spacecraft electric power supply system photoelectric converters.

В издании российской ежедневной общественно-политической газеты от 22 января 2009 года говорится, что 4 июля 2008 года сеть американских станций наблюдения за космическим пространством обнаружила вокруг космического аппарата (КА) "Плазма-А" ("Космос-1818"), предназначенного для отработки и испытаний новой ядерной энергетической установки

"Топаз-1", облако обломков. Удалось зафиксировать около 30 фрагментов сферической формы. Они двигались относительно "Космоса" со скоростью менее 15 м/с, из чего можно сделать вывод о том, что их отделение было вызвано (или сопровождалось) незначительным выбросом энергии. Возможно, из системы охлаждения реактора в открытый космос попал теплоноситель, представляющий собой эвтектику легкоплавких металлов. [1]

Считается, что долговременный перепад температур и периодическое изменение агрегатного состояния эвтектики, сопровождающееся увеличением объема, привело к нарушению герметичности конструкции системы охлаждения реактора КА. Данное обстоятельство привело к истечению эвтектики легкоплавких металлов из системы охлаждения в космическое пространство и образованию металлических фрагментов шарообразной формы.

При рассмотрении воздействия данных образований на элементы конструкций КА необходимо учитывать, что образовавшиеся «шарики» эвтектики легкоплавких металлов могут находиться в космическом пространстве в двух агрегатных состояниях: жидком и твердом. Процесс воздействия на элементы конструкции КА «твердых» шариков достаточно ясен, а вот к каким последствиям может привести нанесение эвтектики легкоплавких металлов в жидком состоянии?

В жидком состоянии эвтектики легкоплавких металлов могут: «закрашивать» датчики оптоэлектронной аппаратуры или аппаратуры астроориентации и наблюдения; разупрочнять конструкционные материалы орбитальных средств [2]; «блокировать» работу фотопреобразователей панелей солнечных батарей.

Последнее предположение является малоизученным, поэтому целью данной статьи является рассмотрение воздействия эвтектик легкоплавких металлов на работу фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) систем электроснабжения (СЭС) КА.

Для решения данной задачи была создана экспериментальная установка, задачей которой является определение вольт-амперных характеристик (ВАХ) ФЭП в условиях локального нанесения легкоплавких металлов на его поверхность и определение шунтирующего сопротивления ФЭП.

Исследования проводились с кремниевыми ФЭП размером 12x18 мм площадью 216 мм<sup>2</sup> и 20x30 мм площадью 600 мм<sup>2</sup>.

Всего проведены испытания с двумя десятками образцов. На исследуемые образцы наносилось примерно по 1 мкг эвтектики легкоплавких металлов на основе галлия, что соответствует закрытию площади ФЭП на 3–5%, в следующей последовательности:

– непосредственно на кремниевый полупроводник со стороны его легирования;

- на внутренние токосъемные полосы;
- на внешние токосъемные полосы;
- на торцевую поверхность ФЭП.

На основе результатов испытаний построены ВАХ для каждого из случаев, которые представлены на рисунке 1.

Основными выходными показателями для ФЭП является выходная мощность. Максимальная выходная мощность  $N_{max}$  для исследуемых образцов ФЭП можно определить по формуле:

$$N_{max} = I_{opt} \times U_{opt}, \quad (1)$$

где  $I_{opt}$  – оптимальная сила тока;

$U_{opt}$  – оптимальное напряжения.

Анализируя полученные ВАХ и значения максимальных мощностей ФЭП при различных способах нанесения на ФЭП эвтектики, не трудно заметить, что происходит существенное уменьшение выходных характеристик ФЭП (рисунок 2), а именно:

- при нанесении эвтектики на полупроводник и на внутренние токосъемные полосы происходит снижение мощности примерно на 13% и 18% соответственно;
- при нанесении эвтектики на внешние токосъемные полосы – около 23%;

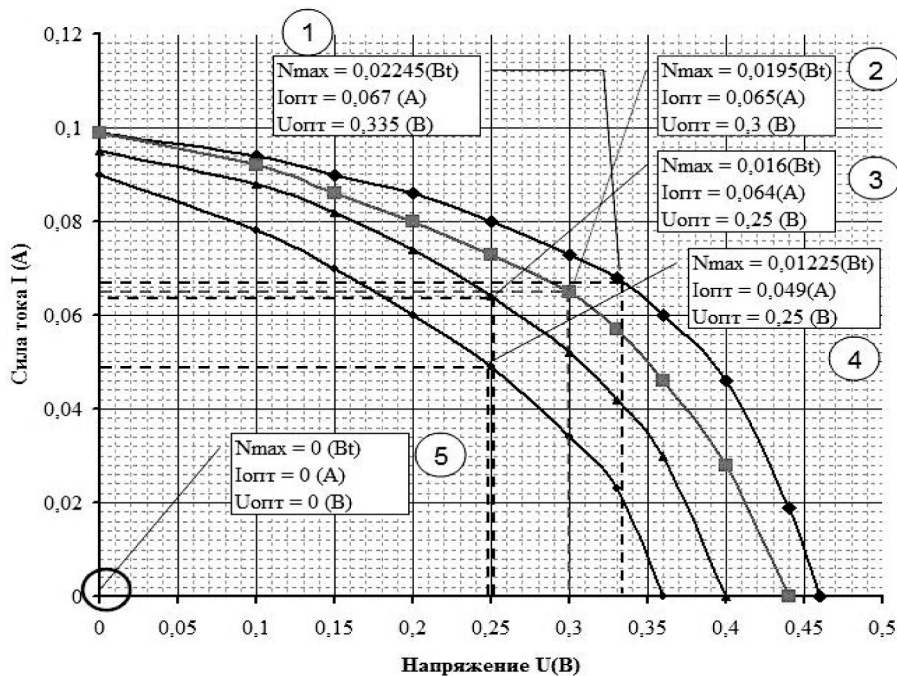


Рис. 1. ВАХ ФЭП площадью 216 мм<sup>2</sup>, при температуре 25°C:  
 1 – без нанесения; 2 – с нанесением на легированный слой ФЭП;  
 3 – с нанесением на внутренние токосъемный полосы; 4 – с нанесением на внешние токосъемные полосы; 5 – с нанесением на торцевую поверхность

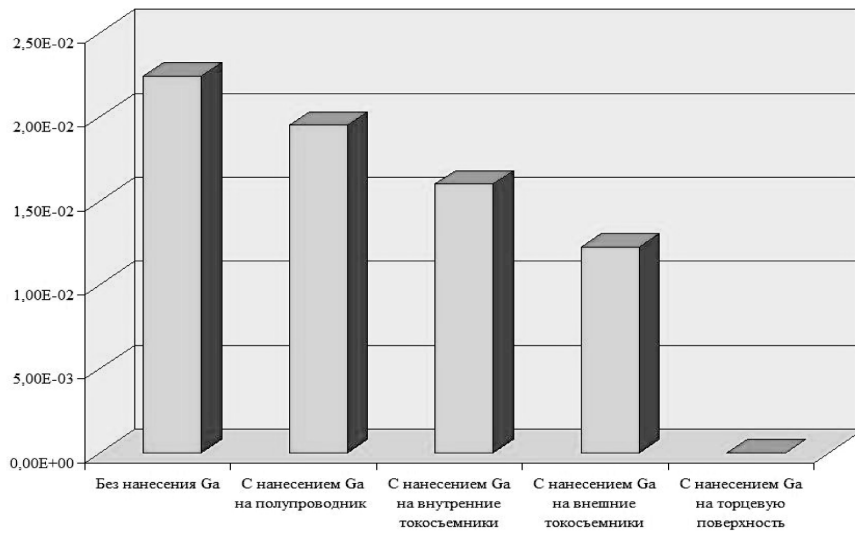


Рис. 2. Сравнительная диаграмма мощности ФЭП площадью 216 мм<sup>2</sup> при температуре 25°С

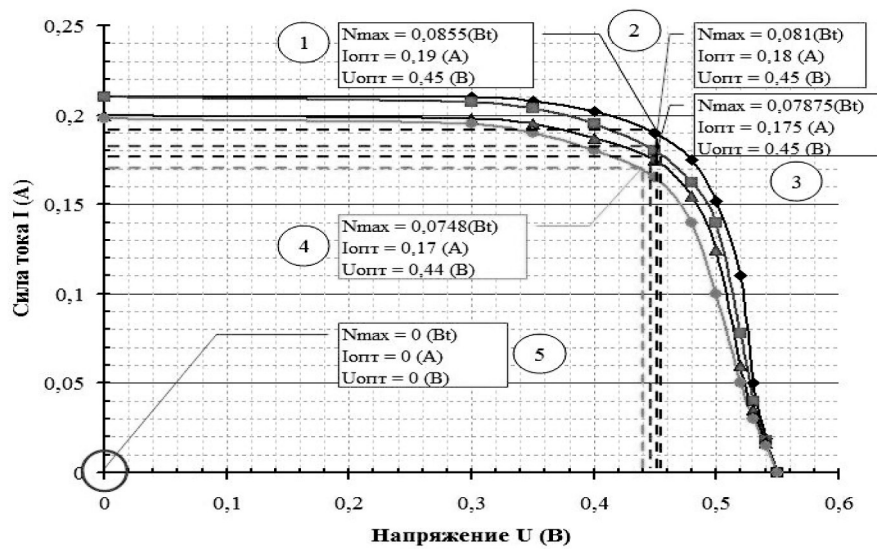


Рис. 3. ВАХ ФЭП площадью 600 мм<sup>2</sup> и температуре 25°С  
 1 – без нанесения; 2 – с нанесением на легированный слой ФЭП;  
 3 – с нанесением на легированный слой массой в 4 раза большей;  
 4 – с нанесением на внешние токоъемные полосы;  
 5 – с нанесением на торцевую поверхность

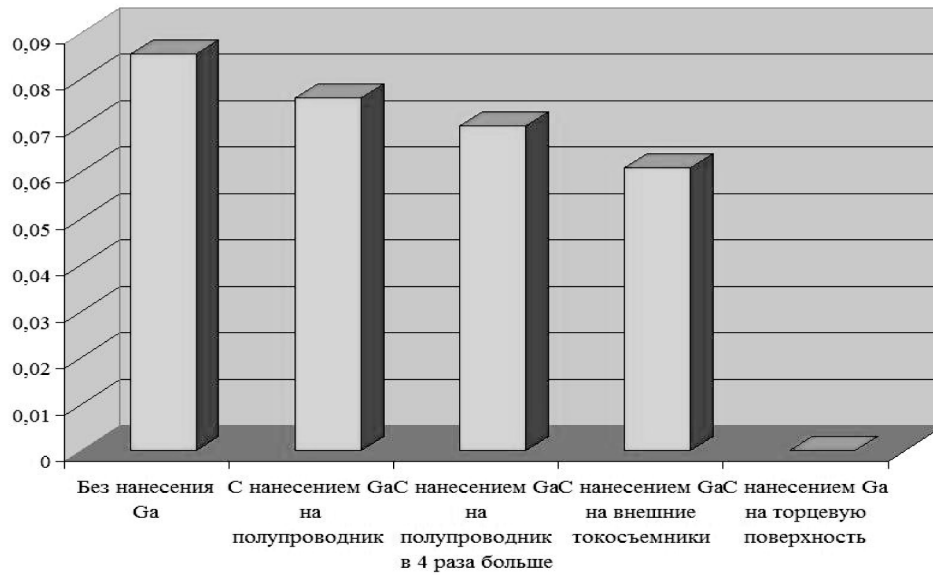


Рис. 4. Сравнительная диаграмма мощности ФЭП площадью 600 мм<sup>2</sup> при температуре 25° С

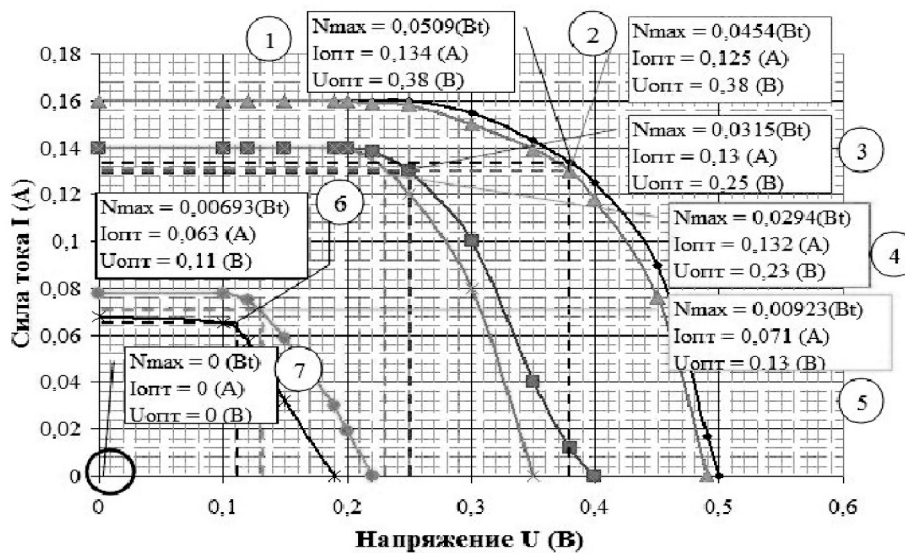


Рис. 5. ВАХ ФЭП площадью 216 мм<sup>2</sup> при различных температурах:

- 1 – без нанесения  $t = 28^{\circ}\text{C}$ ; 2 – без нанесения  $t = 60-70^{\circ}\text{C}$ ;
- 3 – с нанесением на легированный слой ФЭП  $t = 28^{\circ}\text{C}$ ;
- 4 – с нанесением на легированный слой ФЭП  $t = 60-70^{\circ}\text{C}$ ;
- 5 – с нанесением на внешние токоъемные полосы  $t = 28^{\circ}\text{C}$ ;
- 6 – с нанесением на внешние токоъемные полосы  $t = 60-70^{\circ}\text{C}$ ;
- 7 – нанесение на торцевую поверхность ФЭП

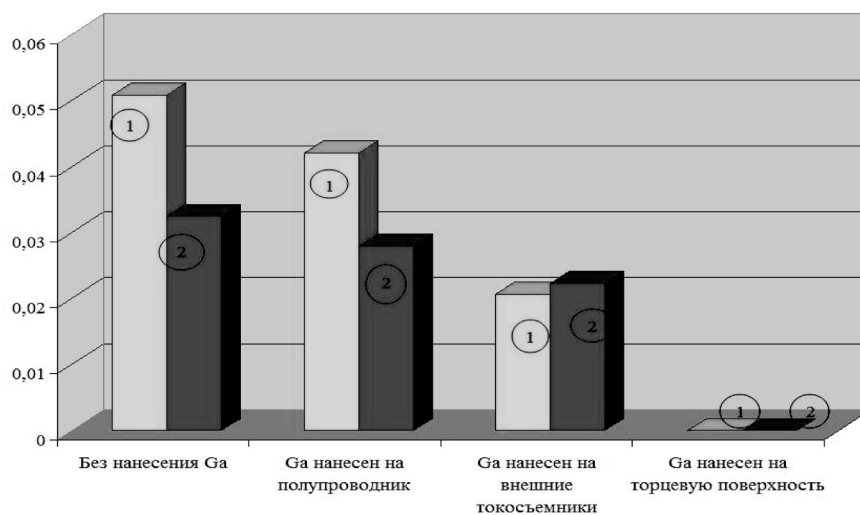


Рис. 6. Сравнительная диаграмма мощности ФЭП площадью 216 мм<sup>2</sup> при различных температурах:  
 1 – температура ФЭП – 28°С;  
 2 – температура ФЭП – 60–70°С

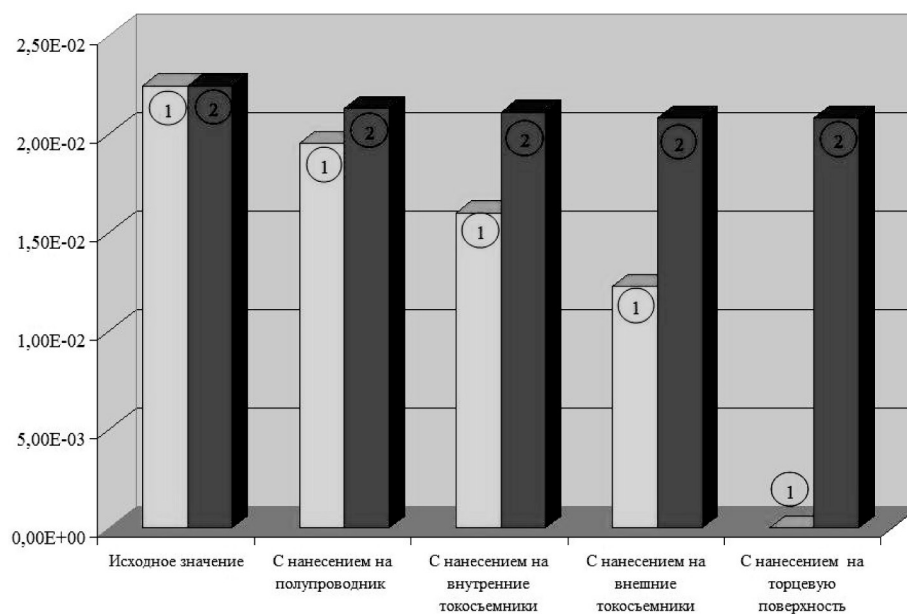


Рис. 7. Сравнительная диаграмма мощности двух одинаковых ФЭП с одинаковой степенью затенения рабочей поверхности (примерно 3–5%)  
 1 – нанесение эвтектики легкоплавкого металла;  
 2 – нанесение неактивного неметаллического вещества

– в случае нанесения эвтектики на торцевые поверхности сила тока, напряжение и мощность, соответственно, уменьшаются до нуля.

Аналогичная закономерность наблюдается при нанесении эвтектики на иные образцы ФЭП (иного конструкционного исполнения и иной площади – 600 мм<sup>2</sup>). Численные отличия в снижении характеристик могут объясняться погрешностями эксперимента и отличием в конструкции ФЭП (рисунки 3, 4).

Были проведены также тестовые исследования зависимости деградации выходных характеристик ФЭП от температуры при локальном поверхностном контакте с эвтектикой легкоплавких металлов. Результаты экспериментальных данных приведены на рисунках 5 и 6.

Было показано, что повышение температуры способствует снижению характеристик ФЭП в условии контакта с эвтектикой, за исключением случая нанесения ее на внешние токосъемники и торцевую поверхность ФЭП.

Можно предположить, что причиной снижения характеристик ФЭП является затенение эвтектикой некоторой площади ФЭП. Для понимания данного вопроса проведены дополнительные испытания, в которых элементы ФЭП затенялись эвтектикой легкоплавких металлов и инактивным веществом. Результаты данного эксперимента представлены на рисунке 7.

Согласно полученным результатам, затенение на 3–5% элемента инактивным веществом практически не влияет на характеристики ФЭП (в отличие от предыдущих испытаний).

Таким образом, можно сделать вывод, что затенение не является основной причиной наблюдаемых явлений.

Необходимо отметить, что не наблюдается каких-либо химических взаимодействий эвтектики с элементами

ФЭП. Поэтому, для объяснения полученных результатов можно сделать предположение, что в условиях поверхностного контакта, легкоплавкий металл активно диффундирует в поверхностный слой ФЭП [3]. Схема данного проникновения и протекающих при этом процессов представлена на рисунке 8.

Предполагаем, что металл проникает в полупроводник, при контакте с последним, и нарушает работу *p-n* перехода (*n*-слой составляет несколько единиц или десятых долей микрометра). В условиях диффузионного проникновения жидкометаллических расплавов возможно частичное замыкание *n*- и *p*-слоев ФЭП. В данном случае будут образовываться паразитирующие микроток короткого замыкания, что приведет к уменьшению шунтирующего сопротивления, увеличению тока обратного насыщения.

Если рассмотреть уравнения работы ФЭП (2), нетрудно заметить, что уменьшение шунтирующего сопротивления приведет к уменьшению тока на основных токосъемных контактах ФЭП  $I_{ФЭП}$ .

$$I_{ФЭП} = I_{\Phi} - I_0 \cdot \left( e^{\frac{e(U_{ФЭП} + I_{II}R_{II})}{AkT}} - 1 \right) - \frac{U_{ФЭП}}{R_{III}}, \quad (2)$$

где  $I_{ФЭП}$  – сила тока на нагрузке ФЭП;  
 $U_{ФЭП}$  – напряжение нагрузки ФЭП;  
 $I_0$  – обратный ток насыщения;  
 $I_{\Phi}$  – фототок ФЭП;  
 $A$  – параметр ВАХ (принимает значения от 1 до 5);  
 $k$  – постоянная Больцмана;  
 $e$  – заряд электрона;  
 $T$  – абсолютная температура ФЭП;  
 $R_{II}$  – последовательное сопротивление ФЭП;

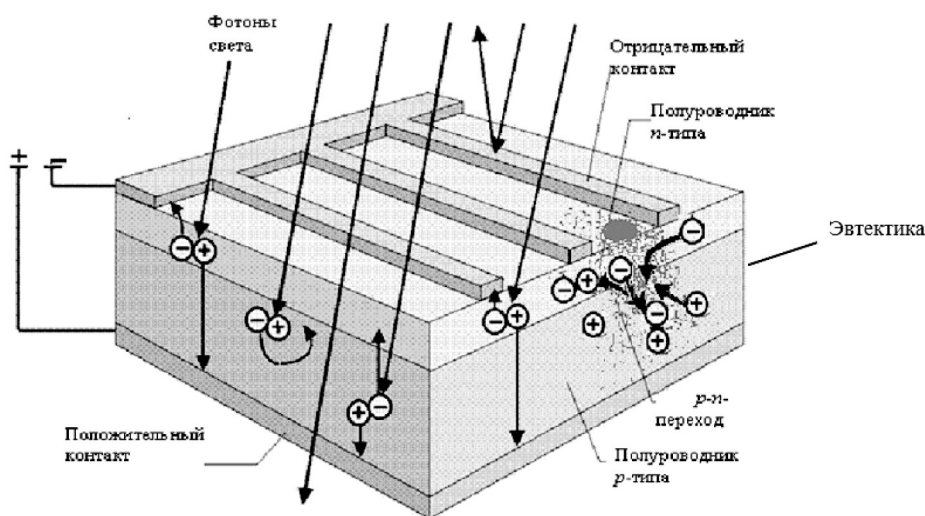


Рис. 8. Модель электрофизических процессов, происходящих в ФЭП при контакте с легкоплавким металлом

$R_{III}$  – шунтирующее сопротивление ФЭП.

Кроме этого, частичное локальное замыкание р–п перехода, вызванное диффузией легкоплавкого металла вглубь полупроводника, должно привести к увеличению обратного тока насыщения  $I_0$ , т.е. тока основных носителей между п- и р-слоями. В соответствии с [4, 5] выражение для плотности тока насыщения  $J_0$  имеет вид

$$J_0 = e \cdot D_p \cdot p_{p0} / L_p + e \cdot D_n \cdot p_{p0} / L_n, \quad (3)$$

где  $D_p, D_n$  – коэффициенты диффузии дырок – р и электронов – п;

$p_{p0}$  – концентрация электронов в р-слое полупроводника, находящихся в состоянии теплового равновесия;

$p_{n0}$  – концентрация дырок в п-слое полупроводника, находящихся в состоянии теплового равновесия;

$L_n$  – длина свободного пробега дырки в п-слое (диффузионная длина);

$L_p$  – длина свободного пробега электрона в р-слое (диффузионная длина).

Из выражения видно, что плотность тока обратного насыщения увеличивается при увеличении концентрации неосновных носителей и коэффициентов диффузии. Наличие паразитирующих микротоков между п- и р-слоями приводит к увеличению концентрации неосновных носителей, и кроме того, наличие проводящих элементов в р–п переходе будет способствовать увеличению коэффициентов диффузии. С другой стороны, уменьшение концентрации основных носителей в п- и р- слое, в соответствии с уравнением (4), может стать причиной падения контактного напряжения на р–п переходе  $U_k$  и, как следствие – падения напряжения на контактах ФЭП  $U_{ФЭП}$ .

$$U_k = \Phi_{\Delta} \ln(n_{no} n_{po} / n_{ni} n_{pi}), \quad (4)$$

где  $\Phi_{\Delta}$  – разность уровней Ферми п- и р- слоя;

$n_{no}$  – концентрация основных носителей в п-слое;

$n_{po}$  – концентрация основных носителей в р-слое;

$n_{ni}$  – концентрация неосновных носителей в п-слое;

$n_{pi}$  – концентрация неосновных носителей в р-слое.

Выводы:

1. Проведенные эксперименты показали, что локальный контакт легкоплавкого металла вполне может быть причиной снижения выходной мощности ФЭП СЭС КА, и как следствие, ухудшения качества функционирования КА.

2. Данное явление объясняется частичным локальным диффундированием легкоплавких металлов вглубь полупроводника и образованием паразитирующих микротоков короткого замыкания через р–п переход.

### Литература

1. Алексеев, М.В. Мертвый спутник ожил на орбите. Советский "Космос-1818" с ядерным реактором на борту напомнил о себе самым странным образом / М. В. Алексеев // газета "Коммерсантъ". – 2009. – № 10. – С. 5.

2. Лебедев, Е. Л. Закономерность трещинообразования в пластинах из сплавов АМг6 и Д16 в присутствии локально нанесенной капли галлия. Оценка масштабного фактора / Е.Л. Лебедев // Вопросы материаловедения. – 2010. – № 1 (61). – С. 99–107.

3. Лебедев, Е. Л. Комплексное исследование трещинообразования в алюминиевых сплавах в присутствии галлия. Обоснование условий контактного разупрочнения твердых металлов жидкими / Е.Л. Лебедев // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 3 (67). – С. 134–140.

4. Раушенбах, Г. Б. Справочник по проектированию солнечных батарей : [пер. с англ.] / Г. Б. Раушенбах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с/

5. Ефимов, В. П. Фотопреобразователи энергии солнечного излучения нового поколения / В.П. Ефимов // Тр. Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт». – 2010. – Т. 8. – № 2. – С. 18–23.