07

Механизм локальных повреждений фотоэлементов электронами геомагнитной плазмы

© В.М. Зыков, К.Е. Евдокимов, Д.А. Нейман, А.М. Владимиров, Г.А. Воронова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: evdokimov@tpu.ru

Поступило в Редакцию 19 июля 2024 г.
В окончательной редакции 28 декабря 2024 г.
Принято к публикации 10 марта 2025 г.

Применительно к начальному времени срока активного существования космического аппарата экспериментально исследованы процессы аномальной деградации мощности солнечных InGaP/GaAs/Ge-фотоэлементов при стендовых испытаниях на воздействие геомагнитной плазмы путем моделирования электронной компоненты плазмы с учетом периодического пересечении орбитой космического аппарата радиационного пояса Земли, включая авроральную зону. Методами видеорегистрации электролюминесценции и измерения темновых вольт-амперных характеристик в стендовых условиях, а также методами микроскопии, абсолютной спектрометрии электролюминесценции и темновых вольт-амперных характеристик после окончания стендовых испытаний установлены процессы аномальной деградации фотоэлементов, происходящие с участием технологических микродефектов поверхности и микропробоев покровных стекол К-208. Предложен феноменологический ударный механизм аномальной ускоренной деградации мощности фотоэлементов на начальном этапе существования космического аппарата. Наиболее высокая скорость аномальной деградации мощности наблюдается для фотоэлементов, имеющих технологические дефекты $p-n$-переходов.

Ключевые слова: солнечные батареи космических аппаратов, геомагнитная плазма, анодно-инициируемый поверхностный разряд, объемный микропробой диэлектрика, повреждение фотопреобразователя.

DOI: 10.61011/JTF.2025.07.60662.236-24

Введение

Как известно, деградация мощности фотоэлементов (ФЭ) солнечных батарей (БС) в условиях околоземного космического пространства зависит от типа орбиты. Так, например, на орбите глобальной навигационной системы GPS аномальное уменьшение мощности БС за срок активного существования космического аппарата (КА) может в несколько раз превышать оценки деградации тока мощности на основании современных моделей космического пространства, хорошо себя зарекомендовавших для орбит типа геостационарной [1,2]. В частности, реальная деградация мощности БС спутника GPS SVN 41 составила 30 % за 9 лет, в то время как оценка, сделанная с помощью модели AE8MAX, дала уменьшение мощности БС не более 12 % [1].

При этом скорость аномальной деградации мощности БС на орбите глобальной навигационной системы GPS максимальна в начальный период времени, уменьшается по мере увеличения интегрального потока электронов и протонов геомагнитной плазмы в процессе эксплуатации на орбите и практически не зависит от фазы солнечной активности. Такая кинетика мощности ФЭ БС указывает на то, что деградация обусловлена в основном дефектами ФЭ технологического происхождения, а не дефектами, появившимися в процессе эксплуатации. Учитывая это обстоятельство, а также различие орбит системы GPS и геостационарной орбиты, можно предположить, что основная причина появления аномальной деградации мощности БС может быть связана с особенностями дефектного состояния покровных стекол и полупроводниковых структур ФЭ, а также с тем, что орбита характеризуется периодическим пересечением радиационного пояса Земли.

По результатам многочисленных наземных испытаний образцов БС на воздействие протонов и электронов геомагнитной плазмы установлено следующее.

– Вклад протонов геомагнитной плазмы в электризацию КА играет второстепенную роль по отношению к воздействию электронов [3]. Тем не менее воздействие потока протонов может значительно влиять как на зарядовое состояние поверхности за счет инициирования эмиссии электронов, так и на структуру поверхностного слоя стекла [4], приводя в том числе к образованию газонаполненных пузырьков [5].

– Вклад радиационных дефектов в уменьшение оптической прозрачности радиационно-стойких покровных стекол ФЭ марки К-208 и CMG к концу срока активного существования КА составляет около 1 % [6,7].

– Под действием потоков электронов геомагнитной плазмы поверхность покровных стекол ФЭ модифицируется электроразрядными процессами, и если при испытаниях используются усредненные по орбите КА потоки электронов, то изменения мощности ФЭ при этом не превышают нескольких процентов [6].

– На покровных стеклах ФЭ наблюдаются отдельные локальные микропробои глубиной вплоть до полной толщины стекла [6], которые являются источниками генерации электроразрядной плазмы, а также источниками периодической генерации ударных волн, воздействующих на полупроводниковую гетероструктуру ФЭ.

– Сквозные микропробои защитного стекла характеризуются радиальными микротрещинами [7,8], а некоторые микропробои пересекаются длинными трещинами в стекле [8].

– Электростатические разряды (ЭСР) могут приводить к осаждению вещества электроразрядной плазмы на поверхность покровного стекла, последующему снижению прозрачности и падению мощности ФЭ [2].

Отметим, что упомянутые в вышеперечисленных работах факторы влияют, в первую очередь, на характеристики покровных стекол, их влияние пропорционально интегральному потоку заряженных частиц, и, следовательно, будет давать близкую к постоянной скорость деградации мощности БС. Как показано в работе [1], данная скорость деградации действительно близка к константе, но только на среднем и заключительном этапах активного существования КА. Начальный же этап характеризуется увеличенной скоростью деградации мощности, и на данный момент отсутствует общепринятая модель, это объясняющая. Так, в работе [9] для объяснения скорости деградации напряжения и тока БС на орбите GPS была использована новая трехмерная модель NASA для среднесуточного потока электронов радиационного пояса (RB-Daily-E), которая охватывает 25 дифференциальных энергий в диапазоне (33–7700 keV), 17 углов наклона и переменное количество оболочек L от 2 до 7. Смоделированная деградация напряжения БС хорошо соответствовала данным телеметрии на орбите GPS. С другой стороны, использование данной модели привело к значительной недооценке скорости деградации тока БС. Эти результаты привели авторов работы [9] к заключению, что среднесуточный поток электронов является основным фактором деградации напряжения БС, а на деградацию тока БС влияют другие факторы. По нашим предположениям одним из этих факторов может быть не среднесуточный поток электронов, а флюенс и плотность потока электронов, наблюдаемые в условиях пересечения орбитой КА радиационного пояса Земли.

В настоящей работе ставилась цель установления причин аномальной деградации мощности ФЭ БС на орбитах с периодическим пересечением радиационного пояса Земли, включая авроральную приполярную зону. Под „аномальной“ в данном случае понимается ускоренная деградация мощности на начальном этапе существования КА. Рассмотрена оценка вклада в данную деградацию повреждения фотопреобразователя ударными механическим воздействиями, возникающими при электростатических разрядах по поверхности и в каналах сквозных микропробоев покровного стекла. Исследована роль исходной дефектности покровных стекол и полупроводниковой структуры ФЭ.

1. Наземное моделирование воздействия геомагнитной плазмы на ФЭ БС

В наземных условиях механизм ускоренной начальной аномальной деградации мощности БС проявил себя на испытательном стенде „Прогноз-2“ [10] при моделировании воздействия на образец БС электронов геомагнитной плазмы (энергия электронов 40 keV, плотность тока 10 nA/cm^2) с учетом набора флюенса электронов исключительно за счет периодического пересечения приполярных авроральных зон КА, находящимся на полярной орбите высотой 800 km. При проведении ускоренных испытаний образца БС время пребывания КА в авроральной зоне было взято завышенным в 6–8 раз (2 min вместо 15–20 s), а температурный режим (−65 °C) соответствовал самому худшему сценарию, при котором ФЭ БС находятся в тени КА. Величина набранного флюенса электронов составляла $1.5 \cdot 10^{15}$ cm^{-2}. Для надежной оценки скорости деградации рабочего тока БС число моделируемых пересечений орбитой КА авроральных зон при северном и южном полюсах Земли для наиболее опасного температурного режима (−65 °C) было выбрано равным 100 (25 оборотов КА вокруг Земли). Образец БС состоял из ФЭ на основе гетероструктуры InGaP/GaAs/Ge с номинальными размерами 40 × 80 mm, сформированных в ряды (стринги) из последовательно включенных элементов, и был ориентирован перпендикулярно потоку электронов. Покровные стекла ФЭ были изготовлены из оптического стекла К-208 толщиной 130 μm.

Предприятием-изготовителем образца БС были проведены измерения характеристик 20 ФЭ из состава батареи, для которых была зарегистрирована величина тока в рабочей точке до и после испытаний. Как минимум один ФЭ показал снижение рабочего тока на 72 % с 480 до 136 mA, не менее трех образцов — на 6–10 %, не менее пяти образцов характеризовались падением 1–3 %, и не менее шести образцов не претерпели никаких изменений.

После окончания испытаний часть ФЭ из состава образца БС была исследована путем измерения темновых вольт-амперных характеристик (ВАХ) и фоторегистрации электролюминесценции (ЭЛ) при подаче прямого электрического смещения. Спектры ЭЛ некоторых ФЭ были изучены с помощью спектрофотометра Avantes Avaspec 2048. Темновые ВАХ, фотоизображения распределения ЭЛ по поверхностям образцов ФЭ, а также спектры ЭЛ приведены на рис. 1.

Спектр ЭЛ многокаскадных ФЭ характеризуется несколькими пиками интенсивности, которые возникают при межзонной излучательной рекомбинации носителей заряда, а положение пика определяется шириной запрещенной зоны соответствующего p–n-перехода [11]. В частности, для ФЭ на основе гетероструктуры InGaP/GaAs/Ge в диапазоне чувствительности матриц

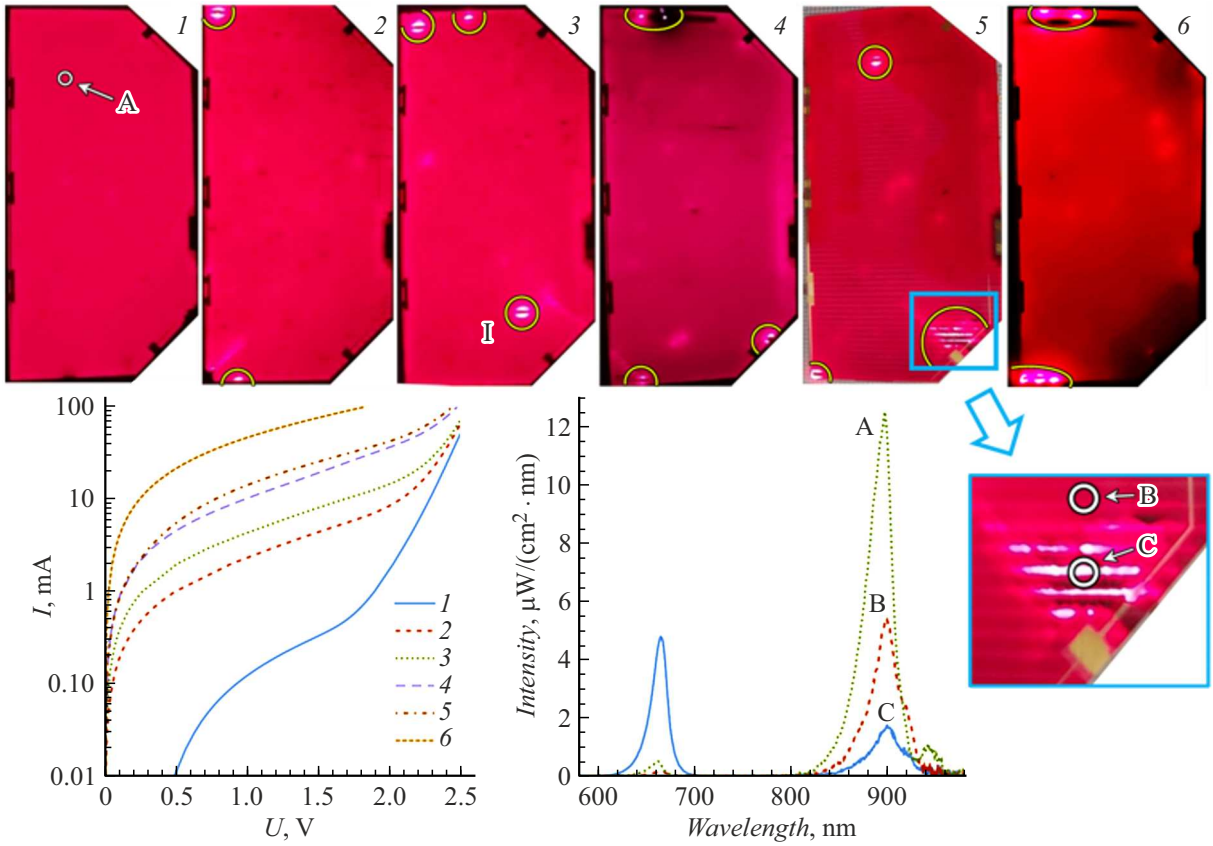

Рис. 1. Фотоизображения (вверху), темновые ВАХ (слева внизу) и спектры (внизу в центре) ЭЛ ФЭ после облучения электронным пучком. Образцы и соответствующие кривые ВАХ пронумерованы числами с *1* по *6*. Спектры ЭЛ и позиции их регистрации отмечены буквами „A“, „B“ и „C“. I — отмечает область исследования плотности тока короткого замыкания.

обычных фотокамер лежат полосы излучения $p-n$-переходов на основе InGaP и GaAs с максимумами около 660 и 900 nm соответственно. Излучение Ge $p-n$-перехода расположено дальше в ИК области и такими приборами не фиксируется. Спектральная чувствительность камеры в области 660 nm как правило выше, чем в области 900 nm [12]. Поэтому локальное увеличение пика 660 nm может выглядеть как светлое пятно даже при общем снижении светового потока ЭЛ.

Контроль методом абсолютной спектрометрии ЭЛ дефектного состояния полупроводниковой структуры тех ФЭ, которые ранее были подвергнуты испытаниям на воздействие электронной компоненты геомагнитной плазмы с моделированием периодического пересечения радиационного пояса Земли, показал, что, с одной стороны, выход ЭЛ распределен сравнительно равномерно по большей части площади каждого образца, среднее значение которого можно принять за базовый уровень ЭЛ образца. С другой стороны, некоторые ФЭ имеют локальные места аномального абсолютного выхода ЭЛ на длине волны 660 nm, который в расчете на единицу площади кратно превосходит среднее базовое значение, но при этом абсолютный выход ЭЛ на длине волны 900 nm значительно уменьшен. В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены спектры ЭЛ в точках „A“, „B“ и „C“, расположенных соответственно на минимально поврежденном ФЭ (образец № 1), в окрестности и внутри области аномальной ЭЛ поврежденного ФЭ (образец № 5). Такое соотношение интенсивностей пиков ЭЛ свидетельствует о локальном перераспределении электрического напряжения между $p-n$-переходами фотоструктуры в пользу верхнего перехода на основе InGaP из-за сильного локального повреждения среднего $p-n$-перехода на основе GaAs и уменьшения соответствующего параллельного сопротивления. Пониженный выход ЭЛ (частично) зашунтированного $p-n$-перехода и повышенный выход для остальных переходов отмечены также в работе [13].

Эти локальные замыкания обеспечивают значительный рост тока в темновых ВАХ ФЭ, и этот рост тока коррелирует с числом мест в ФЭ с аномально высоким абсолютным выходом ЭЛ на длине волны 660 nm. На рис. 1 такие места выделены желтыми эллипсами, а образцы пронумерованы в соответствии с ростом количества видимых областей локального шунтирования от 0 для образца № 1 до 5 для ФЭ № 6. Отметим также, что как минимум два образца — № 4 и № 5 — после облучения претерпели уменьшение рабочего тока на

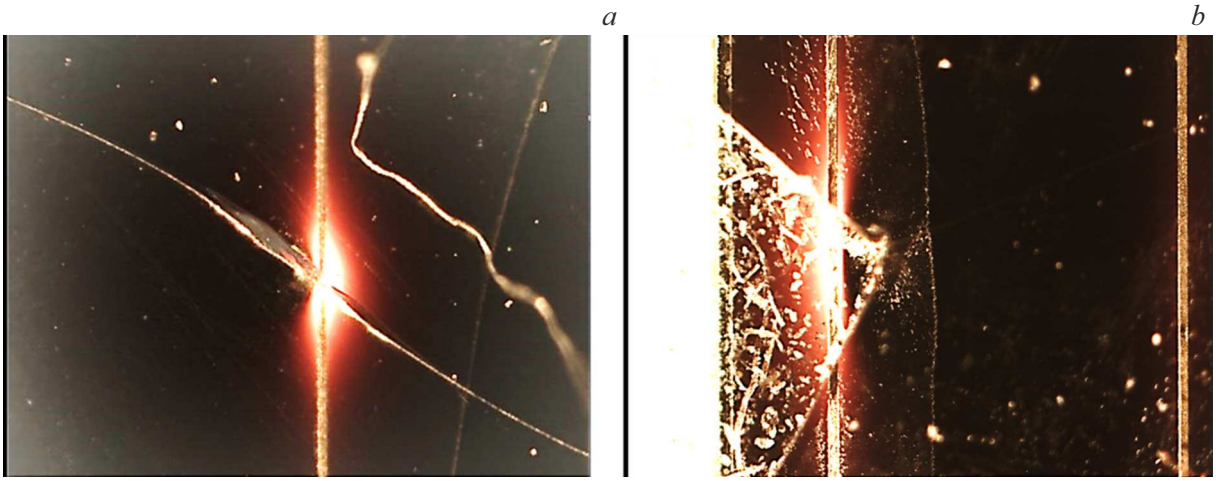

Рис. 2. Микрофотоизображения мест аномального выхода ЭЛ, сопровождаемых сквозным пробоем и одиночной трещиной (*a*), несколькими пробоями и сеткой трещин (*b*).

10 % и 6 % соответственно (данные для других образцов предприятием-изготовителем не регистрировались).

На некоторых ФЭ обнаружены особые участки, которые характеризуются повышенным выходом ЭЛ в видимом диапазоне на сравнительно большой площади. Такие участки прилегают к первичным микропробоям покровного стекла и состоят из сети трещин стекла с многочисленными микропробоями в местах пересечения трещин масочными электродами, края которых являются концентраторами электрического поля. Пример ФЭ, содержащего участок с высокой плотностью микропробоев, представлен на рис. 1 (образец № 5 и его увеличенный участок). Другой пример представлен на рис. 2, *b*, где на одном фото показано полученное с помощью микроскопа изображение места аномального выхода ЭЛ на длине волны 660 nm и выявленная дополнительной подсветкой область сети трещин стекла. Из сравнения на рис. 1 темновых ВАХ для ФЭ № 4 и № 5, содержащих одинаковое число мест аномального выхода ЭЛ на длине волны 660 nm и различающихся наличием особого участка с сеткой трещин и микропробоев, следует, что существует связь между значительным увеличением тока темновой ВАХ и образованием подобных участков.

Методом микроскопии с применением подсветки было обнаружено, что локальные места аномально высокого выхода ЭЛ на длине волны 660 nm сопровождаются сквозными микропробоями и растрескиванием стекла (рис. 2). Подобные микропробои и трещины покровного стекла, которые возникали после облучения электронным пучком, моделирующим воздействие геомагнитной плазмы, и сопровождались деградацией одного из $p-n$-переходов ФЭ, наблюдались также в работе [8].

Для прояснения механизма повреждений ФЭ было проведено дополнительное испытание другого образца БС и исследование ФЭ по описанной выше методике. В процессе данного испытания велась видеозапись ЭСР на поверхности ФЭ. Кроме того, при помощи тепловизора типа Flir A325sc проводились измерения распределения температуры по поверхности находящихся под электрическим смещением образцов ФЭ. На рис. 3 приведена последовательность фотоизображений ЭЛ, ЭСР и распределения температуры, демонстрирующая возникновение локальной шунтовой закоротки в процессе облучения электронным пучком.

Распределение выхода ЭЛ до облучения (рис. 3, *a*) является сравнительно равномерным. ЭСР на начальных этапах облучения начинаются с краев образца (рис. 3, *b*). В процессе облучения на некотором расстоянии от краев возникает источник начала ЭСР (рис. 3, *c, d*). Рис. 3, *e, f* показывают, что данный источник ЭСР также является областью с аномально высоким выходом ЭЛ и повышенной температурой. Совпадение местоположения локального микропробоя покровного стекла и аномального выхода ЭЛ с максимумом распределения температуры по поверхности ФЭ прямо указывает на то, что подобные области аномального выхода ЭЛ на длине волны 660 nm являются местами низкоомных шунтовых замыканий тока между электродами ФЭ, приводящих к дополнительному локальному нагреву.

Предварительное исследование роли технологических дефектов $p-n$-переходов ФЭ на основе InGaP/GaAs/Ge показало, что аномально высокую скорость деградации полупроводниковой фотоструктуры при испытаниях на воздействие электронной компоненты геомагнитной плазмы испытывают ФЭ, изначально имеющие существенные дефекты полупроводниковой структуры. На рис. 4 показаны фотоизображения распределения ЭЛ по площади соседних последовательно включенных ФЭ перед началом испытаний (рис. 4, *a*) и на начальном этапе испытаний после набора флюенса электронов $1.66 \cdot 10^{14}\,\mathrm{cm}^{-2}$ (рис. 4, *b*). При возбуждении ЭЛ прямой ток, проходящий через ФЭ перед началом испытаний, составлял при комнатной температуре 100 mA, а в процессе стендовых испытаний при температуре $-47\,^{\circ}\mathrm{C}$ был

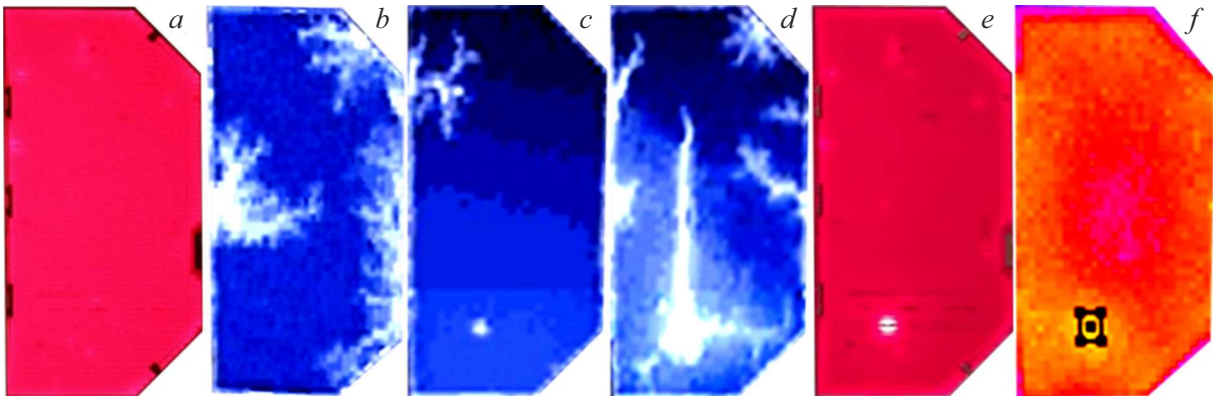

Рис. 3. Серия изображений образца ФЭ при разных условиях: a, e — выход ЭЛ до и после облучения электронным пучком, b–d — ЭСР на поверхности образца при облучении, f — распределение температуры по поверхности ФЭ (черная фигура отмечает область наибольшей температуры).

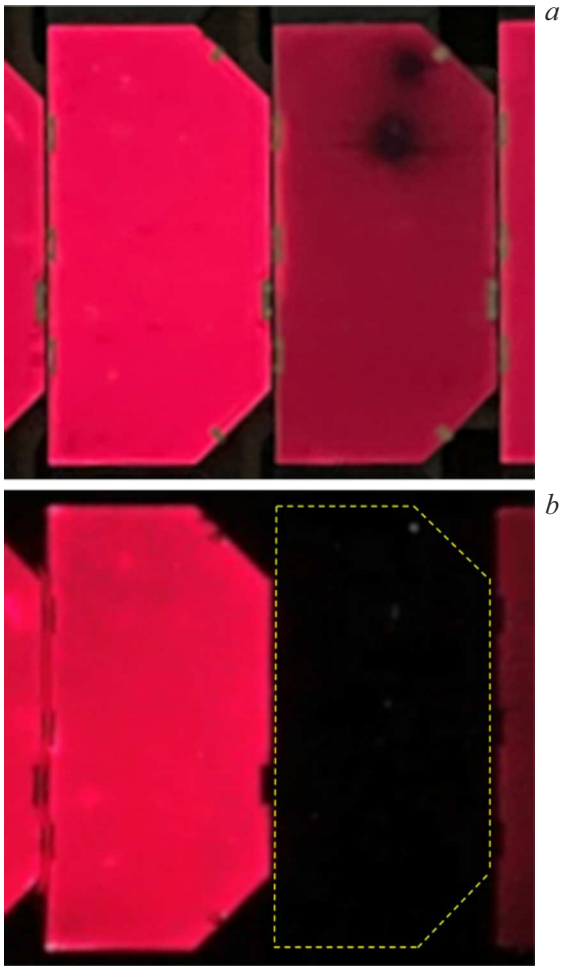

Рис. 4. Фотоизображения ЭЛ ФЭ: a — до облучения электронным пучком, b — после облучения.

равен 40 mA. Из сравнения фотоизображений данных ФЭ следует, что расположенный правее ФЭ, изначально имевший существенный технологический дефект в p–n-переходе на основе InGaP (в виде потемнения) испытал сильную деградацию уже на начальном этапе испытаний.

Отметим, что наблюдаемая по результатам эксперимента деградация рабочего тока и, следовательно, мощности ФЭ может объясняться не только шунтированием части рабочего тока. Наличие сравнительно протяженных областей сильного шунтирования свидетельствует о значительном повреждении полупроводниковой структуры ФЭ, которое может приводить к деградации и других характеристик ФЭ, например, последовательного сопротивления или тока короткого замыкания.

Последнее подтверждается результатами предварительных исследований распределения плотности тока короткого замыкания в одной из областей аномального выхода ЭЛ образца № 3 (отмечена буквой I на рис. 1). На ФЭ помещалась неподвижная маска с отверстием диаметром 1 mm и поочередно направлялось излучение фотодиодов с длинами волн 445, 740 и 940 nm, возбуждающих p–n-переходы на основе InGaP, GaAs и Ge соответственно. Ток короткого замыкания элемента регистрировался микроамперметром и пересчитывался в плотность тока с учетом геометрии эксперимента. Распределение плотности тока по поверхности изучалось путем микрометрического перемещения ФЭ вдоль направления параллельного электродам. Результаты измерений J_{sc} для GaAs-перехода приведены на рис. 5.

Зависимость J_{sc} для GaAs-перехода от положения ФЭ имеет минимум в окрестности $x = 0$, что соответствует точке, в которой наблюдался максимальный выход ЭЛ при 660 nm. Максимальное падение плотности тока короткого замыкания относительно значения в неповрежденной области составляет 19 %. Значения тока для InGaP- и Ge-переходов не изменялись при перемещении ФЭ и совпадали со значениями для неповрежденной области. Таким образом, данная область характеризуется деградацией как минимум двух параметров — шунтового сопротивления и плотности тока короткого замыкания для одного из p–n-переходов элемента. В це-

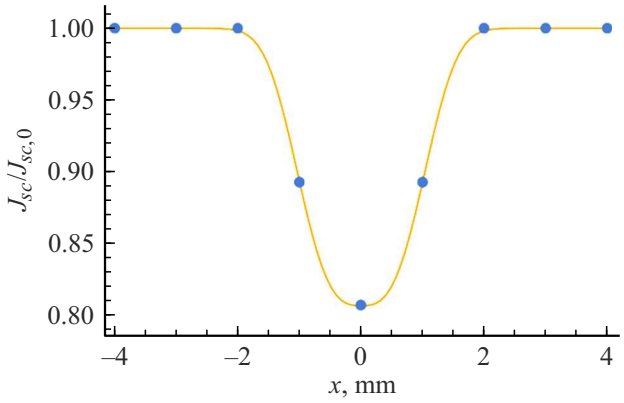

Рис. 5. Пространственное распределение плотности тока короткого замыкания J_{sc} $p-n$-перехода на основе GaAs в поврежденной области ФЭ по отношению к плотности тока $J_{sc,0}$ в неповрежденной области. Точки — экспериментальные данные, кривая — аппроксимирующая линия тренда.

лом вопрос деградации этих и прочих параметров ФЭ требует дополнительного изучения.

2. Исследование нанорельефа поверхности покровных стекол ФЭ БС методами атомно-силовой микроскопии при лабораторном моделировании воздействия электронами геомагнитной плазмы

Для прояснения причин возникновения участков микропробоев покровного стекла и сильного шунтирования ФЭ БС нами на той же установке был проведен эксперимент по облучению образцов покровных стекол марки К-208 размерами 20×20 mm. Каждый образец стекла по всей площади имел тыльное проводящее танталовое покрытие и тыльный латунный цилиндрический электрод диаметром 10 mm. Покрытие наносилось методом магнетронного напыления и имело поверхностное сопротивление не более $100\,\Omega/\square$. Тыльный электрод в процессе воздействия поддерживался при нулевом потенциале. Температурные режимы и циклограмма воздействия пучком электронов с энергией 40 keV повторяли описанный выше эксперимент на стенде „Прогноз-2“.

Топографию поверхности до и после облучения электронами изучали в контактном режиме на атомно-силовом микроскопе NT-MDT NTEGRA AURA (Зеленоград, Москва, РФ) на воздухе. В эксперименте использовали кантилевер NSG01 (NT-MDT, РФ) со средней жесткостью 5.1 N/m и типичной резонансной частотой 150 kHz. Измерения проводили без дополнительной пробоподготовки. Обработку полученных изображений проводили в программе Gwyddion. Характерные результаты приведены на рис. 6.

В целом до облучения основная часть поверхности стекла является достаточно гладкой. Тем не менее на ней присутствуют единичные сравнительно большие неоднородности с поперечными размерами в микроны и высотой в десятки нанометров, которые могут быть, например, застывшими каплями стекла. После облучения поверхность покровного стекла покрывается сетью древовидных электроразрядных каналов с остаточной глубиной 10–20 nm после затвердевания кипящего в них стекла. Очевидно, что часть вещества в разрядных поверхностных каналах выкипает и расплескивается на прилегающую поверхность стекла, создавая после затухания разряда и застывания стекла новые образования нанометрового масштаба.

Кроме того, после облучения на поверхности наблюдаются неоднородности в форме обломков с характерными размерами в единицы и десятки микрон, а также микрократеры большой глубины (предположительно сквозные), причем до облучения подобных объектов не наблюдается. Наличие подобного микрорельефа после облучения также подтверждается результатами других авторов [14,15].

3. Исследование электроразрядных явлений на поверхности покровных стекол ФЭ БС при лабораторном моделировании воздействия электронами геомагнитной плазмы методом видеонаблюдения

Как было отмечено выше, при моделировании воздействия геомагнитной плазмы на покровные стекла ФЭ БС велась фотовидеорегистрация электроразрядных процессов. На начальном этапе эксперимента каналы разрядов начинались либо на краях образцов, либо на трещинах правого верхнего образца и представляли собой древообразные структуры. Впоследствии появились другие источники начала разрядов. Анализ данного явления проведен ниже по тексту. На рис. 7 приведены пример фотографии ЭСР и сравнение при разных температурах относительной площади, занимаемой разрядом на образцах.

В начале эксперимента до процесса захолаживания облучение образцов покровных стекол ФЭ проходило при комнатной температуре ($+20\,^{\circ}$C). При этом наблюдалось несколько сильных ЭСР, охватывающих заметную долю площади образцов стекол (рис. 7, *b*, I). Среднее время между разрядами при комнатной температуре составило около 14 s. Эти разряды модифицировали поверхность стекол таким образом, что послесвечение разряда присутствовало не только в виде сетки разрядных каналов, но также в виде множества светящихся острийных микрообразований, находящихся на прилегающих к разрядным каналам участках поверхности (рис. 7, *a*). Последующие разряды на поверхности стекол

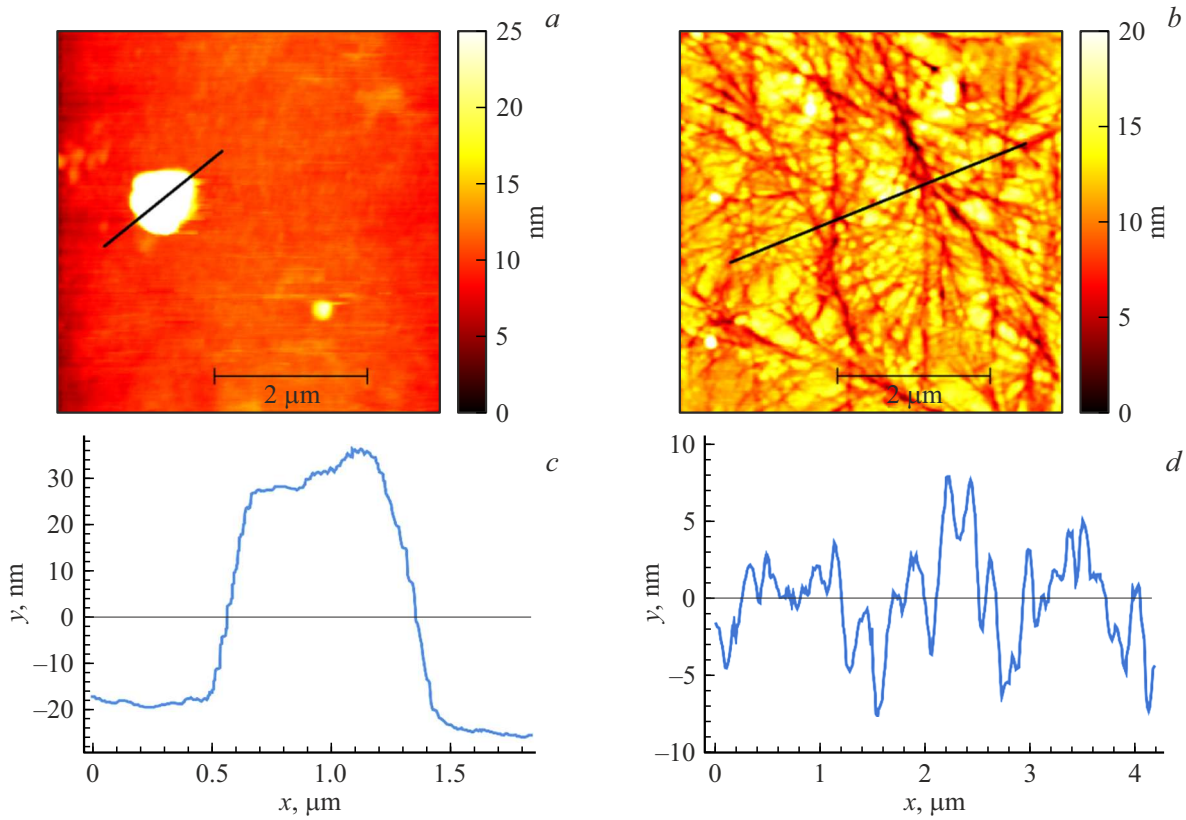

Рис. 6. Топография поверхности образца стекла до облучения (a, c) и после облучения (b, d). c — профиль поверхности вдоль линии на a; d — профиль поверхности вдоль линии на b.

при комнатной температуре охватывали значительно меньшую площадь образцов (рис. 7, b, II), частота разрядов увеличилась, среднее время между разрядами составило около 6 s. Причиной уменьшения относительной площади разрядов, вероятно, является „металлизация“ поверхности стекла начальными разрядами за счет электростатического осаждения на поверхность стекла и последующей хемосорбции положительных ионов (натрия, калия, бора и кремния) из состава электроразрядной плазмы начальных ЭСР.

Основная часть эксперимента проходила при температуре $-65\,^{\circ}$C. Сила и частота разрядов при низкой температуре стали заметно больше, чем при комнатной температуре. Среднее время между разрядами уменьшилось до 2 s. Заключительная часть эксперимента проходила при температуре $+50\,^{\circ}$C. В этом случае поверхностные ЭСР были достаточно слабыми, охватывающими малую часть площади (рис. 7, b), причем на некоторых участках разрядных каналов свечение отсутствовало.

В целом при воздействии электронного пучка возникает неравномерное свечение люминесценции всех образцов (рис. 7, a). Со временем наибольшая интенсивность люминесценции достигается на некоторых краях стекол и трещинах. Кроме того, наблюдаются точечные источники люминесценции, которые предположительно являются эмиссионными центрами избыточного заряда электронов. Вероятно, так проявляются неоднородности поверхности — производственные дефекты и обломки (застывшие капли), возникшие во время облучения. Эти неоднородности в форме микроострий усиливают электрическое поле и ток автоэлектронной эмиссии в вакуум. Свечение этих объектов можно связать с ЭЛ, интенсивность которой зависит от величины тока, текущего через микроострие [16].

4. Трансформация „квазиигольчатых“ микродефектов исходной поверхности покровных стекол в центры эмиссии электронов и затем в локальные микропробои стекол — источники периодических электрических разрядов

На левом нижнем образце стекла (рис. 7, a) наблюдается заметный эмиссионный центр, который проявляется как светящаяся точка и не является источником поверхностных разрядов. На рис. 8 приведены характерные случаи его активности или пассивности. На начальном этапе эксперимента данный центр может быть активен как при отсутствии разрядов (рис. 8, a), так и при их наличии (рис. 8, b). Кроме того, он иногда себя не

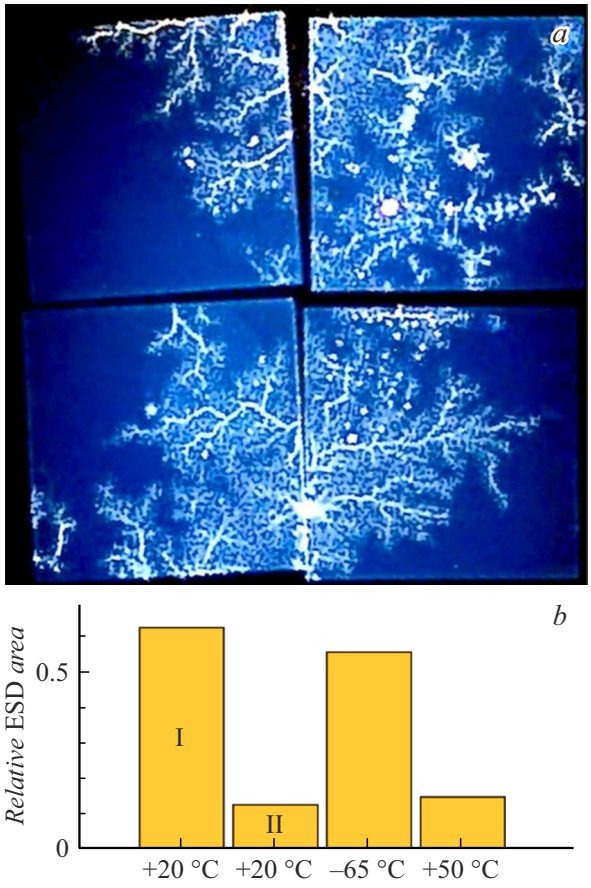

Рис. 7. *a* — пример электростатического разряда, *b* — сравнение относительной площади, занимаемой разрядами, при разных температурах. Детали сравнения приведены в тексте.

проявляет даже при прохождении каналов разрядов в его окрестности (рис. 8, *c*). Примерно через 30 min после начала облучения при −65 °C и через 10 s после сильного разряда, произошедшего в окрестностях указанного эмиссионного центра, этот центр сам оказывается источником начала ЭСР (рис. 8, *d*).

По всей видимости, эти кадры демонстрируют последствия взрыва эмиссионного центра с образованием локального пробоя стекла. Этот центр расположен в месте, соответствующем острой кромке тыльного цилиндрического латунного электрода. После трансформации (рис. 8, *d*) он представляет собой сквозной микропробой и, наряду с краями образцов, становится постоянным источником начала ЭСР из-за образования на дне микропробоя тройной точки вакуум–диэлектрик–проводник. Отмеченная в [6,7] вероятность образования кластеров микропробоев на поверхности стекла подтвердилась нашими видеонаблюдениями, когда в непосредственной близости от рассмотренного выше микропробоя произошло образование другого микропробоя — нового источника начала ЭСР (рис. 8, *e*). При температуре +50 °C рассматриваемые центры эмиссии в виде микропробоев стекла становятся малоактивны и почти теряют былую способность быть источником начала поверхностных разрядов.

5. Феноменологический механизм аномальной деградации мощности элементов БС КА на орбитах с периодическим пересечением радиационного пояса Земли

Обобщая результаты исследований, можно предположить следующие составные части механизма аномальной деградации мощности ФЭ, который с максимальной вероятностью проявляется на орбитах КА с пересечением радиационного пояса в тени Земли.

– В процессе воздействия на ФЭ электронной компоненты геомагнитной плазмы поверхностный нанослой покровного стекла, содержащий большую концентрацию структурных дефектов, накапливает значительную концентрацию избыточных электронов, а отрицательный поверхностный потенциал стекла растет по абсолютной величине по мере накопления в стекле электронов из геомагнитной плазмы.

– Технологические микродефекты поверхности покровных стекол ФЭ, например, в виде застывших капель стекла, первоначально являются квазиострийными катодами, обеспечивающими эмиссию избыточных электронов из стекла в окружающее пространство.

– При достижении поверхностным потенциалом критического значения происходят локальные электрические пробои покровного стекла по торцевой поверхности.

– Локальные электрические пробои покровного стекла по его торцевой поверхности вызывают анодно-инициируемые поверхностные разряды стекла, относящиеся к разрядам с распределенным виртуальным катодом. Анодно-инициируемые поверхностные разряды характеризуются объемными пробоями поверхностного нанослоя диэлектрика, которые генерируют плазму в надповерхностном слое вакуума [17].

– Ввиду сравнительно небольших значений напряженности электрического поля (характерная величина разности потенциалов составляет единицы kV), объемные пробои образуют заполненный кипящим стеклом разрядный канал, частично расположенный в поверхностном нанослое стекла и лимитированный границей фазового перехода твердое тело-жидкость, которая передвигается с дозвуковой скоростью в направлении виртуального катода.

– В области разрядного канала, прилегающей к движущейся границе фазового перехода, образуется газовая фаза в виде пузырьков, которые растут по мере испарения жидкой фазы и могут лопаться, приводя к набрасыванию микро- и нанокапель на прилегающую поверхность стекла.

– Другая часть анодно-инициируемого поверхностного разряда формируется в надповерхностном простран-

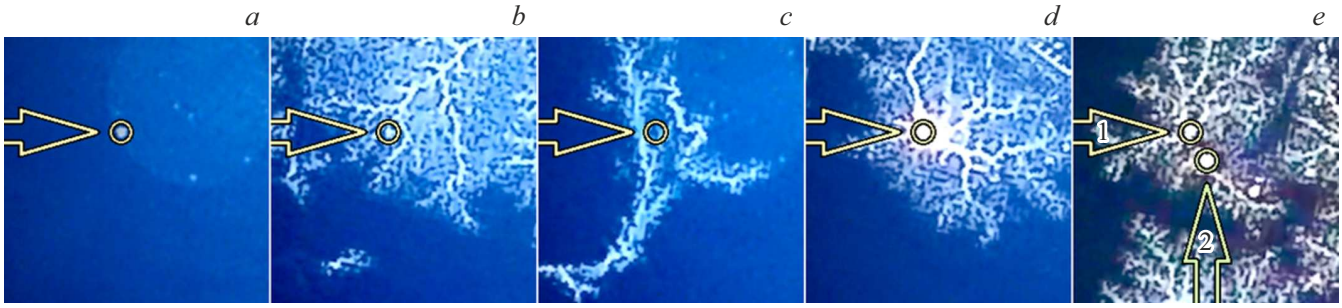

Рис. 8. *a*–*d* — эволюция активности яркого эмиссионного центра на левом нижнем образце, *e* — возникновение второго подобного центра. Положение центров выделено окружностями и указано стрелками. Анализ эволюции приведен в тексте.

стве в виде электроразрядной плазмы с химическим составом стекла, которая создает на поверхности стекла проводящий слой за счет электростатического осаждения положительных ионов плазмы, таких, как ионы кремния, бора, натрия и калия.

– С достаточно большой вероятностью в результате чередования процессов электростатического осаждения положительных ионов из электроразрядной плазмы и набрызгивания нанокапель стекла на вершину одного из технологических микродефектов поверхности покровного стекла ФЭ может образоваться структура в виде наноконденсатора проводник–диэлектрик–проводник.

– При формировании в таком конденсаторе сильного электрического поля благодаря электростатическому осаждению на нем большого количества положительных ионов из окружающей электроразрядной плазмы от близкого поверхностного разряда может произойти взрывное разрушение конденсатора. Известно, что подобные явления представляют собой один из инициаторов взрывной электронной эмиссии [18]. Кроме того, кратеры от разрушения подобных наноразмерных конденсаторов наблюдаются непосредственно [19,20].

– Процесс взрывного наносекундного разрушения наноконденсатора, находящегося на вершине технологического микродефекта, формирует в стекле узконаправленную ударную волну с частотной характеристикой на границе гиперзвука, которая нарушает электрическую прочность стекла и вызывает микропробой стекла по его толщине в направлении к ближайшему участку масочного электрода ФЭ.

– Образовавшийся сквозной микропробой стекла в условиях продолжающегося облучения электронами геомагнитной плазмы становится источником периодических электрических разрядов с выбросом плазмы, газа и частиц стекла. Данные ЭСР сбрасывают некоторую часть накопленного в стекле заряда электронов внешнего облучения в полупроводниковую структуру ФЭ и генерируют ударные волны, локально воздействующие на масочный электрод, $p-n$-переходы ФЭ и инициирующие развитие сетки трещин стекла.

– Рост участков с высокой плотностью микропробоев происходит под влиянием радиальных трещин покровного стекла в месте первичного микропробоя стекла так, что новые микропробои возникают в местах пересечения отдельной трещиной стекла соседних масочных электродов.

– Воздействие ударных волн, которые периодически генерируются электрическими разрядами в микропробоях покровного стекла, приводит к образованию мест локального разрушения $p-n$-переходов ФЭ с перераспределением электрического напряжения между переходами в зависимости от степени их повреждения, что вызывает локальное перераспределение абсолютного выхода ЭЛ для этих $p-n$-переходов.

– Процесс образования мест низкоомных шунтовых замыканий тока между электродами ФЭ за счет мест локального разрушения $p-n$-переходов ФЭ ударными волнами, периодически генерируемые разрядами в микропробоях, по-видимому, приводит также к уменьшению выходного рабочего тока ФЭ за счет образования в окрестности микропробоя области повышенного последовательного сопротивления ФЭ.

Работа описанного выше механизма в значительной мере опирается на высокую концентрацию носителей заряда в поверхностном нанослое. Для обоснования этого был проведен оценочный расчет по модели, описанной в [21], при условиях, аналогичных экспериментальным при испытаниях БС и образцов стекол (разд. 1). Из анализа результатов расчета следует, что в поверхностном слое диэлектрика толщиной порядка 10 nm, содержащем повышенную концентрацию дефектов (ловушек носителей заряда), может быть сосредоточено до 2.5% внесенного электронным пучком заряда в виде электронов, захваченных на ловушки. Как показано нами в работе [21], такая высокая концентрация электронов в данных условиях может обеспечиваться в том числе генерацией цугов оптических фононов, создаваемых каждым термализующимся электроном, возникшим в результате внешнего облучения, включая электроны первичного пучка, δ-электроны и т.д. Далее при повышении напряженности электрического поля в поверхностном нанослое ионизация ловушек вследствие эффекта Пуля–Френкеля может привести к ВАХ S-типа [22,23], перегревно-электронной неустойчивости и

развитию объемных пробоев [24], формирующих анодно-инициируемые поверхностные разряды.

Другим важным аспектом предлагаемого механизма является возможность повреждения полупроводниковой гетероструктуры тем или иным воздействием ЭСР. Наиболее интенсивно на гетероструктуру будут влиять разряды в непосредственной ее близости, т. е. сквозные микропробои и последующие ЭСР внутри уже образованных каналов таких микропробоев. Непосредственное механическое воздействие и амплитуда создаваемой при разряде ударной волны будет определяться давлением в разрядном канале, оценка которого для разных типов твердых диэлектриков дает величины порядка 2.5–11 GPa в случае микросекундных процессов и $(6-24)\cdot 10^{10}$ Pa в случае анодно-инициируемых наносекундных пробоев [25].

Сквозные микропробои, наблюдаемые в настоящей работе, могут возникать при осаждении положительных ионов на технологические дефекты стекла и, следовательно, являются анодно-инициируемыми. Поэтому первичный микропробой может характеризоваться достаточно высоким давлением в канале, сравнимым с динамическим пределом упругости как стекла, так и полупроводника. Значение данного параметра для стекла К-8, аналогичного по механическим свойствам рассматриваемому в настоящей работе К-208, составляет (8 ± 1) GPa [26], а для GaAs — (8.4 ± 0.8) GPa [27]. Ввиду близости прочих механических констант [28] можно предположить, что и предел упругости InGaP также будет близок к указанным значениям. Таким образом, сам факт прорастания сквозного канала разряда в стекле свидетельствует о возможности непосредственного повреждения полупроводниковой структуры.

Как показывает анализ видеозаписей процесса испытаний, место сквозного микропробоя, как правило, становится источником начала периодических поверхностных ЭСР. По всей видимости, данные разряды инициируются в тройной точке вакуум–диэлектрик–масочный электрод на дне канала микропробоя, распространяются внутри канала и далее по поверхности. По сравнению с первичным микропробоем, такие вторичные разряды могут характеризоваться меньшими значениями давления в канале, так как тип данных разрядов, вероятно, будет отличаться от типа первичного микропробоя. Тем не менее периодическое воздействие вторичных разрядов также может приводить к деградации полупроводниковой структуры, по аналогии с примером, описанным в работе [29]. В ней выявлено повреждение ФЭ на основе InGaP/GaAs/Ge при термоциклировании, проявляющееся в том числе в росте трещин в области примыкания масочных электродов к полупроводниковой структуре, где возникают концентраторы напряжений. Можно предположить, что первичный сквозной микропробой приводит к возникновению начальной трещины в данной области, а более слабые по воздействию вторичные ЭСР обеспечивают ее рост и дальнейшее постепенное повреждение ФЭ. Отметим, что полупроводниковая структура ФЭ может также повреждаться бомбардировкой носителей заряда из плазмы разряда, разогревом масочного электрода и полупроводника разрядными токами и другими факторами. Выяснение значимости данных факторов, а также подтверждения всего предложенного механизма аномальной деградации мощности ФЭ является предметом дальнейших исследований.

Заключение

1. При стендовых испытаниях образцов БС на воздействие геомагнитной плазмы установлено, что высокая начальная скорость деградации рабочего тока БС (сопоставимая с начальной скоростью деградации на орбитах навигационных систем ГЛОНАСС и GPS) может быть получена моделированием воздействия электронной компоненты геомагнитной плазмы с учетом периодического пересечения орбитой КА радиационного пояса Земли без использования усредненного по орбите значения плотности потока электронов. В этих условиях параметрами, инициирующими начальный процесс аномальной деградации мощности БС, являются не интегральные потоки (флюенсы) электронов и протонов, а частота и мощность электроразрядных процессов на поверхности покровных стекол ФЭ БС, которые могут быть обеспечены облучением внешним источником электронов.

2. Выполненные предприятием-изготовителем БС измерения ВАХ части ФЭ образца БС после завершения стендовых испытаний с моделированием пересечения радиационного пояса Земли показали, что некоторые ФЭ характеризуются значительным уменьшением рабочего тока (для одного из ФЭ рабочий ток уменьшился на 72% при набранном флюенсе электронов $1.5\cdot 10^{15}$ cm^{-2} с облучением в температурном диапазоне (от -60 до $+50\,^{\circ}$C)).

3. Изучение темновых ВАХ и ЭЛ (при прямом электрическом смещении) поврежденных испытаниями ФЭ показало, что значительные сдвиги ВАХ в рабочей области сопровождаются появлением локальных мест аномально высокого выхода ЭЛ в красной области спектра, а также образованием в покровном стекле участков в виде сетки трещин стекла и связанных с ними микропробоев.

4. Методом микроскопии с боковой подсветкой для контроля образованных дефектов стекла и методом абсолютной спектрометрии люминесценции установлено, что локальные места аномально высокого на длине волны 660 nm и аномально низкого на длине волны 900 nm выхода ЭЛ располагаются у масочного электрода по его обеим сторонам, и что рядом с местом аномального выхода ЭЛ обязательно находится микропробой покровного стекла по его толщине. На основе измерения локальной плотности тока короткого замыкания в

окрестности мест аномально высокого на длине волны 660 nm и аномально низкого на длине волны 900 nm выхода ЭЛ установлено, что такая локальная область, помимо шунтовой закоротки, имеет существенно пониженную плотность тока короткого замыкания. Измеренные аномальные абсолютные значения выхода ЭЛ на длинах волн 660 и 900 nm однозначно свидетельствуют о сильном локальном повреждении $p-n$-перехода на основе GaAs с перераспределением напряжения между каскадами в пользу $p-n$-перехода на основе InGaP.

5. Специальным исследованием на испытательном стенде электроразрядных процессов на образцах покровных стекол К-208, имеющих в качестве тыльного заземленного электрода полупроводящую структуру и металлический масочный электрод, установлено, что с большой вероятностью микропробои стекла по толщине при облучении электронами с энергией 30–40 keV и плотностью тока 10 nA/cm^2 происходят при электрическом взрыве исходных технологических микродефектов на поверхности стекла, если эти микродефекты расположены напротив края масочного электрода, который, по-видимому, служит концентратором электрического поля.

6. Дополнительным испытанием на воздействие электронной компоненты геомагнитной плазмы с моделированием периодического пересечения радиационного пояса Земли установлено, что аномально высокая скорость деградации наблюдается только у тех ФЭ, которые первоначально имели значительные технологические дефекты полупроводниковой структуры, например, в виде участков пониженного выхода ЭЛ в красной области спектра.

7. В работе предложен феноменологический механизм аномальной деградации мощности БС на орбитах с периодическим пересечением радиационного пояса Земли, который требует подтверждения натурными экспериментами. Механизм основан на предположении о том, что аномальная деградация мощности БС обусловлена разрушением полупроводниковой фотоструктуры возле тех участков масочных электродов, которые соседствуют с микропробоями покровного стекла, и при движении КА по орбите испытывают механическое воздействие ударными волнами, которые периодически генерируются электрическими разрядами в соседствующих с ними микропробоях стекла. Локальное разрушение полупроводниковой структуры приводит к локальному шунтированию $p-n$-переходов ФЭ и к локальному уменьшению плотности тока короткого замыкания, вероятно, за счет локального увеличения последовательного сопротивления ФЭ.

Благодарности

Авторы выражают благодарность профессору В.И. Корепанову за помощь при измерении спектров электролюминесценции, микрофотосъемке и регистрации тока короткого замыкания.

Финансирование работы

В работе применялось оборудование ЦКП НОИЦ НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] S.R. Messenger, E.M. Jackson, J.H. Warner, R.J. Walters, T.E. Cayton, Y. Chen, R.W. Friedel, R.M. Kippen, B. Reed. IEEE Trans. Nucl. Sci., **58** (6), 3118 (2011). DOI: 10.1109/TNS.2011.2172957

[2] D. Ferguson, P. Crabtree, S. White, B. Vayner. J. Spacecraft Rockets, **53** (3), 464 (2016). DOI: 10.2514/1.A33438

[3] М.И. Панасюк, Л.С. Новиков (ред.). *Модель космоса* (КДУ, М., 2007), т. 2.

[4] Р.Х. Хасаншин, Л.С. Новиков, С.Б. Коровин. Поверхность. Рентген. синхротр. и нейтрон. исслед., **9**, 28 (2017). DOI: 10.7868/S0207352817090049 [R.H. Khasanshin, L.S. Novikov, S.B. Korovin. J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech., **11**, 917 (2017). DOI: 10.1134/S102745101705007X]

[5] Р.Х. Хасаншин, Л.С. Новиков. Перспективные материалы, **11**, 5 (2020). DOI: 10.30791/1028-978X-2020-11-5-14 [R.H. Khasanshin, L.S. Novikov. Inorg. Mater. Appl. Res., **12**, 313 (2021). DOI: 10.1134/S2075113321020234]

[6] Л.С. Гаценко, Н.Е. Маслякова, М.Б. Каган, Л.С. Новиков, М.С. Самохина. Автономная энергетика: технический прогресс и экономика, **29**, 24 (2011).

[7] Н.Е. Маслякова, Л.С. Гаценко, Л.С. Новиков, М.С. Самохина, В.В. Ханкин. Тр. Межвузовской научной школы молодых специалистов „*Концентрированные потоки энергии в космической технике электронике, экологии и медицине*“ (М., Россия, 2011), с. 105.

[8] V.E. Skurat, L.S. Gatsenko, A.N. Zhigach, M.B. Kagan, I.O. Leipunsky, L.S. Novikov, P.A. Pshechenkov, V.V. Artemov, N.G. Berezkina. Proc. 12th Int. *Symp. On Materials in Space Environment* (Noordwijk, Netherlands, 2012)

[9] C. Gabrielse, J.H. Lee, S. Claudepierre, D. Walker, P. O'Brien, J. Roeder, Y. Lao, J. Grovogui, D.L. Turner, A. Runov, A. Boyd, J. Fennell, J.B. Blake, K. Lopez, Y. Miyoshi, K. Keika, N. Higashio, I. Shinohara, S. Imajo, S. Kurita, T. Mitani. Space Weather, **20**, e2022SW003183 (2022). DOI: 10.1029/2022SW003183

[10] A.M. Vladimirov, A.Yu. Bezhayev, V.M. Zykov, V.I. Isaychenko, A.A. Lukashchuk, S.E. Lukonin. IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng., **168**, 012037 (2017). DOI: 10.1088/1757-899X/168/1/012037

[11] R. Hoheisel, D. Scheiman, S. Messenger, P. Jenkins, R. Walters. IEEE Trans. Nucl. Sci., **62** (6), 2894 (2015). DOI: 10.1109/TNS.2015.2498838

[12] J. Janesick, G. Putnam. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., **53**, 263 (2003). DOI: 10.1146/annurev.nucl.53.041002.110431

[13] I. Lombardero, C. Algora. Solar Energy Mater. Solar Cells, **204**, 110236 (2020). DOI: 10.1016/j.solmat.2019.110236

[14] Р.Х. Хасаншин, Л.С. Новиков, С.Б. Коровин. Поверхность. Рентген. синхротр. и нейтрон. исслед., **1**, 88 (2015). DOI: 10.7868/S0207352815010114 [R.H. Khasanshin, L.S. Novikov, S.B. Korovin. J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech., **9**, 81 (2015). DOI: 10.1134/S1027451015010115]
[15] Р.Х. Хасаншин, Л.С. Новиков, Л.С. Гаценко, Я.Б. Волкова. Перспективные материалы, **1**, 22 (2015).
[16] В.В. Сердюк, Ю.Ф. Ваксман. *Люминесценция полупроводников* (Выща шк., Киев-Одесса, 1988)
[17] W.A. Stygar, J.A. Lott, T.C. Wagoner, V. Anaya, H.C. Harjes, H.C. Ives, Z.R. Wallace, G.R. Mowrer, R.W. Shoup, J.P. Corley, R.A. Anderson, G.E. Vogtlin, M.E. Savage, J.M. Elizondo, B.S. Stoltzfus, D.M. Andercyk, D.L. Fehl, T.F. Jaramillo, D.L. Johnson, D.H. McDaniel, D.A. Muirhead, J.M. Radman, J.J. Ramirez, L.E. Ramirez, R.B. Spielman, K.W. Struve, D.E. Walsh, E.D. Walsh, M.D. Walsh. Phys. Rev. ST Accel. Beams, **8**, 050401 (2005). DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.8.050401
[18] Г.А. Месяц. ПМТФ, **5**, 138 (1980).
[19] H. Kliem, K. Faliya. IEEE Trans. Diel. El. Ins., **27** (4), 1080 (2020). DOI: 10.1109/TDEI.2020.008526
[20] J. Muñoz-Gorriz, D. Blachier, G. Reimbold, F. Campabadal, J. Suñé, S. Monaghan, K. Cherkaoui, P.K. Hurley, E. Miranda. IEEE Trans. Dev. Mat. Reliab., **19** (2), 452 (2019). DOI: 10.1109/TDMR.2019.2917138
[21] В.М. Зыков, Д.А. Нейман. ЖТФ, **93** (6), 740 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.06.55598.21-23 [V.M. Zykov, D.A. Neyman. Tech. Phys., **68** (6), 690 (2023). DOI: 10.61011/TP.2023.06.56522.21-23]
[22] S. Li, X. Liu, S.K. Nandi, S.K. Nath, R.G. Elliman. Adv. Funct. Mater., **29**, 1905060 (2019). DOI: 10.1002/adfm.201905060
[23] A. Pergament, G. Stefanovich, V. Malinenko, A. Velichko. Adv. Cond. Matt. Phys., **2015** (1), 654840 (2015). DOI: 10.1155/2015/654840
[24] Ю.Н. Вершинин. *Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков* (УрО РАН, Екатеринбург, 2000)
[25] И.Ф. Пунанов, И.С. Жидков, С.О. Чолах. *Высоковольтный наносекундный пробой конденсированных сред* (Изд-во Уральского ун-та, Екатеринбург, 2018)
[26] А.С. Савиных, Г.И. Канель, И.А. Черепанов, С.В. Разоренов. ЖТФ, **86** (3), 70 (2016). [A.S. Savinykh, G.I. Kanel, I.A. Cherepanov, S.V. Razorenov. Tech. Phys., **61** (3), 388 (2016). DOI: 10.1134/S1063784216030178]
[27] T. Goto, Y. Syono, J. Nakai, Y. Nakagawa. Solid State Commun., **18** (11–12), 1607 (1976). DOI: 10.1016/0038-1098(76)90404-X
[28] L. Qi, Y. Xie, Y. Liu, H. Jing, R. Zhang. Optik, **198**, 163284 (2019). DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.163284
[29] R.E. Brock, P. Hebert, J. Ermer, R.H. Dauskardt. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **179**, 178 (2018). DOI: 10.1016/j.solmat.2017.11.009