

# Ионизирующие излучения и их воздействие на полупроводниковые материалы (по данным литературных источников).

## Часть 2

**к.т.н. Сергей Кравчук, д.т.н. Владимир Соколов, к.т.н. Михаил Марченко, к.т.н. Оксана Вовк**  
 МОКБ «Марс» – филиал ФГУП «ВНИИА», государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»

В связи с возрастающими требованиями к точности прогнозирования работоспособности космических аппаратов, срокам их функционирования и бесперебойной работе целесообразно ещё раз рассмотреть современную точку зрения на воздействие дестабилизирующих факторов космического пространства на радиоэлектронную аппаратуру.

Для правильного понимания существа проблемы необходимо учитывать следующие факты.

Во-первых, в реальных условиях эксплуатации космические аппараты функционируют продолжительное время, подвергаясь воздействию ионизирующих излучений космического пространства [1], иногда при сопутствующем влиянии пониженных или повышенных температур. То есть доза ионизирующих излучений, соответствующая группам стойкости, регламентируемым государственными стандартами, в реальных условиях функционирования аппаратуры набирается в течение всего срока функционирования космического аппарата. А на моделирующих установ-

ках эти дозы набираются за непродолжительное время.

Плотность галактического излучения (1–2 част/см<sup>2</sup>×с) при энергии частиц 10<sup>8</sup>...10<sup>20</sup> эВ, плотность потока частиц солнечного излучения составляет до 10<sup>6</sup> част/(см<sup>2</sup>×с) при их энергии до 10<sup>7</sup> эВ [1].

Так как вся совокупность ионизирующих излучений космического пространства (ИИ КП) не может быть воспроизведена в земных условиях, при исследовании радиационной стойкости приборов используется метод моделирования, состоящий в замене всего спектра космических излучений излучениями с плотностью потока 10<sup>6</sup>...10<sup>9</sup> част/(см<sup>2</sup>×с) [2].

Протекающие на орбите в реальных условиях процессы постепенного набора дозы радиоэлектронной аппаратурой при различных температурных условиях до сих пор однозначно не систематизированы. Процессы, протекающие при этом в аппаратуре, проанализированы лишь в некоторых литературных источниках.

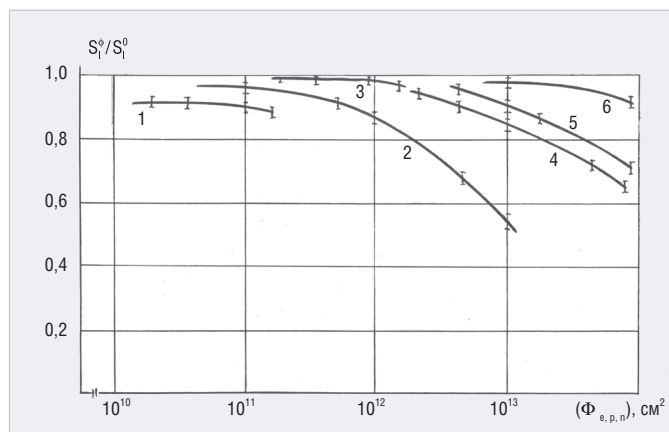
В реальных условиях материалы и приборы космических аппаратов под-

вергаются, как правило, воздействию нескольких типов излучений, содержащих частицы различных энергий. Поэтому для прогнозирования радиационных изменений параметров приборов необходимо изучение этих изменений в зависимости от энергии частиц определённого типа.

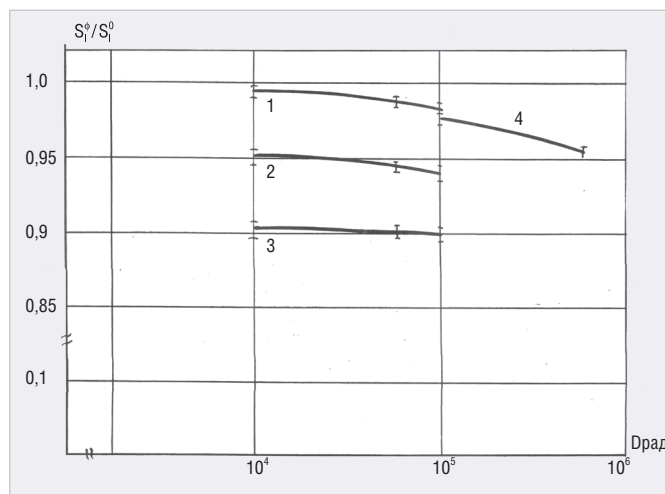
В нормативных документах эти факты не отражены.

Во-вторых, в настоящее время основная часть радиоэлектронной аппаратуры космического пространства состоит из полупроводников. Как известно, полупроводники более чувствительны к воздействию дестабилизирующих факторов, чем остальные компоненты РЭА (стёкла и другие диэлектрики, металл) [2].

Если проанализировать основополагающие принципы воздействия ионизирующих излучений на РЭА, то эти вопросы достаточно подробно изучены. Однако некоторые аспекты воздействия дестабилизирующих факторов космического пространства на РЭА в настоящее время заслуживают более внимательного рассмотрения для обеспечения правильной практики применения результатов испытаний и прогнозирования стойкости и вероятности отказов аппаратуры.



**Рис. 1.** Изменение относительной интегральной чувствительности фотодиодов ( $S_i^0/S_i^0$ ) после облучения различными флюенсами  $\Phi$ : протонов ( $E_p = 6$  МэВ – кр. 1,  $E_p = 21$  МэВ – кр. 2,  $E_p = 64$  МэВ – кр. 3), электронов ( $E_e = 4,2$  МэВ – кр. 6), реакторных нейтронов (кр. 5), протонами и электронами ( $E_p = 21$  МэВ +  $E_e = 4,2$  МэВ – кр. 4)



**Рис. 2.** Изменение относительной интегральной чувствительности фотодиодов от дозы протонов ( $E_p = 6$  МэВ – кр. 1,  $E_p = 21$  МэВ – кр. 2,  $E_p = 64$  МэВ – кр. 3), электронов ( $E_e = 4,2$  МэВ – кр. 4)

Таблица деградации параметров полупроводниковых приборов

| Классы изделий                | Классы изделий                         | Электрические параметры и причины их изменений при воздействии   |   |   |  |
|-------------------------------|--|--|---|---|--|
|                               |  | потоков протонов, электронов, нейтронов и гамма-квантов  |   | импульса электронов гамма-излучения   |  |
|                               |  | Характер остаточных изменений параметров   | Причина изменения параметров  | Характер изменения в момент воздействия импульса                            | Причина изменения параметров   |
| Полупроводниковые приборы     | Импульсные и выпрямительные диоды      | Увеличение обратного тока у германиевых диодов и связанное с этим изменение обратной ветви вольтамперной характеристики. Увеличение приёмного падения напряжения на переходе и связанная с этим трансформация прямой ветви у кремниевых диодов | Уменьшение времени жизни неосновных носителей заряда и концентрации в зоне проводимости основных носителей  | Рост тока через обратно смещённые переходы                                  | Генерация носителей заряда в областях кристалла, прилегающих к р-п-переходу, приводит к росту тока от п-области к р-области за счёт сбора неосновных носителей |
| Полупроводниковые приборы     | Стабилитроны                           | Увеличение напряжения стабилизации и динамического сопротивления   | Изменение формы обратной ветви вольтамперной характеристики в связи с ростом сопротивления материала кристалла  | Уменьшение напряжения стабилизации и увеличение динамического сопротивления | Увеличение обратного тока диода за счёт генерации дополнительных неосновных носителей заряда   |
| Полупроводниковые приборы     | Туннельные диоды                       | Изменение формы вольтамперной характеристики (увеличение тока минимума и модуля отрицательного сопротивления)  | Увеличение количества ловушек в запрещённой зоне приводит к увеличению туннельных переходов и росту тока в области минимума, изменению высоты барьера в связи с изменением уровня Ферми | Увеличение прямого тока   | Увеличение количества носителей заряда, способных преодолеть потенциальный барьер  |
| Полупроводниковые приборы     | Тиристоры                              | Увеличение начального падения напряжения на области объёмного заряда, изменение токов утечки, увеличение напряжения включения, изменение импульсного напряжения запуска  | Уменьшение времени жизни носителей заряда   | Ложное срабатывание (переключение тиристоры в открытое состояние)           | Накопление зарядов в базах тиристора за счёт инерции неосновных носителей  |
| Полупроводниковые приборы     | Фотодиоды и фототранзисторы            | Снижение световой чувствительности, увеличение темнового тока  | Накопление центров окраски входного окна, уменьшение времени жизни носителей в активной области кристалла полупроводника, уменьшение коэффициента передачи транзисторов                 | Увеличение тока в обратно смещённых переходах фотодиодов и фототранзисторов | Генерация носителей заряда в объёме кристалла  |
| Полупроводниковые приборы     | Транзисторы                            | Уменьшение статического и динамического коэффициентов передачи тока, увеличение обратных токов коллекторного и эмиттерного переходов, увеличение начального тока коллектора, уменьшение входного сопротивления транзистора в схеме с ОЭ        | Накопление структурных дефектов в кристаллической решетке полупроводника приводит к изменению положения уровня Ферми и уменьшению времени жизни неосновных носителей заряда             | Увеличение токов через обратно смещённые переходы                           | Ионизация кристалла полупроводника и связанный с этим рост концентрации носителей заряда   |
| Радиокомпоненты и радиодетали | Резисторы                              | Изменение сопротивления  | Структурные изменения резистивного слоя   | Уменьшение сопротивления резистора  | Образование шунтирующих каналов утечки, вызываемое ионизацией среды, окружающей резистивный слой   |
| Радиокомпоненты и радиодетали | Конденсаторы                           | Изменение ёмкости, уменьшение напряжения пробоя, увеличение проводимости   | Изменение структуры диэлектрика   | Увеличение тока утечки  | Ионизация диэлектрика и окружающей среды   |
| Радиокомпоненты и радиодетали | Трансформаторы индуктивности, дроссели | Уменьшение сопротивления изоляции  | Накопление структурных повреждений в изоляционных материалах  | Уменьшение сопротивления изоляции   | Ионизация материала изоляции и наполнителей  |
| Радиокомпоненты и радиодетали | Электрические соединители              | Уменьшение сопротивления изоляции между контактами и корпусом, механическое повреждение опоры штырей у гнезд держателей  | Структурные изменения в изоляционных материалах, радиационно-химические изменения органических материалов   | Уменьшение сопротивления изоляции   | Формирование каналов проводимости в результате ионизации окружающей среды и диэлектриков   |

## Воздействие ионизирующих излучений на параметры полупроводниковых приборов

Чувствительность полупроводниковых приборов к воздействию различных типов радиационных воздействий зависит от того, по какому принципу работает прибор.

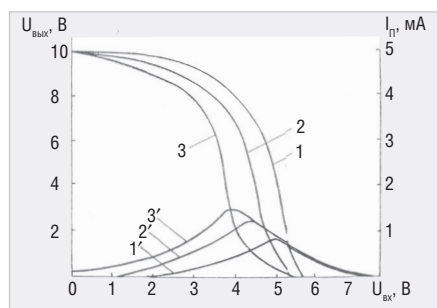
Приборы, которые работают на основе объёмных эффектов, такие как биполярные транзисторы, фотодиоды и дру-

гие, главным образом деградируют за счёт объёмных радиационных дефектов, создаваемых при смещении атомов из кристаллической решётки. Эти приборы испытывают значительную деградацию при облучении высокими уровнями потоков нейтронов (более  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>) и протонов (более  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>), что наглядно показано на рис. 1. Излучения, вызывающие в основном ионизационные эффекты, не приводят к значительной дегра-

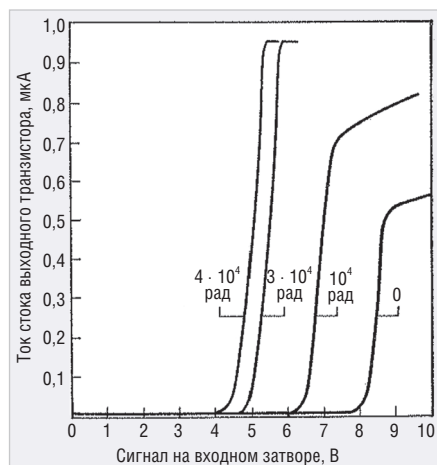
дации параметров этих приборов. На рис. 2 показано, что уменьшение чувствительности фотодиодов при облучении ионизирующими излучениями дозой  $10^4 \dots 10^6$  рад – всего около 10% [3].

В таблице описана деградация параметров полупроводниковых приборов при воздействии ионизирующих излучений и причины их возникновения [4].

На работу приборов с зарядовой связью (ПЗС) и КМОП влияют как объём-



**Рис. 3.** Влияние излучения на передаточные характеристики (1–3) и ток потребления (1’–3’) КМОП-инверторов: кр. 1, 1’ – до облучения, кр. 2, 2’ – после облучения  $10^5$  рад, кр. 3, 3’ – после облучения  $10^6$  рад



**Рис. 4.** Передаточные характеристики ПЗС при различных дозах облучения

ные, так и поверхностные дефекты. Работу этих приборов в значительной степени определяют поверхностные эффекты. В деградации этих приборов, характеристики которых определяются свойствами границы раздела полупроводник-диэлектрик, существенную роль играют процессы ионизации, изменяющие величину встроенного заряда в диэлектрике и увеличивающие плотность поверхностных дефектов, что продемонстрировано на рис. 3 и 4, а также 5а и 5б.

В [5] обосновывается, что, поскольку ПЗС представляют собой приборы со структурой МОП, на их характеристики оказывают существенное влияние, обусловленное ионизирующей радиацией, «встраивание» положительного заряда в затворный окисел и увеличение плотности поверхностных состояний, захватывающих подвижный заряд.

Обусловленный радиацией отрицательный сдвиг напряжения плоских зон изменяет режим работы ПЗС, а увеличение плотности поверхностных состояний ухудшает эффективность переноса заряда в приборах с поверхностным каналом и увеличивает темновые токи в при-

борах со встроенным каналом. Поэтому обычные ПЗС нельзя использовать в тех случаях, когда требуется радиационная стойкость, превышающая  $5 \times 10^4$  рад (Si).

В [6] исследовано облучение электронами 11 МэВ кремниевых окислов Si/SiO<sub>2</sub> и установлено, что образование радиационных дефектов на границе раздела Si/SiO<sub>2</sub> зависит от толщины окисла. Для образцов с толщиной окисла 8 нм установлено образование дефектов вакансия-кислород, или дивакансия. Для образцов с толщиной окисла 23 нм установлено образование большого количества различных видов дефектов и их большая концентрация. То же электронное облучение образцов с более толстым окислом, помимо обоих видов дефектов, создаёт два дополнительных более глубоких энергетических уровня в запрещённой зоне. То есть общая концентрация дефектов на границе раздела Si/SiO<sub>2</sub> образцов сильно зависит от толщины их окисла. Согласно [6], помимо меньшего числа дефектов в тонком окисле, в нём не наблюдалось образования положительного заряда в окисле после облучения.

Надо отметить, что более высокая радиационная стойкость тонких окислов, дополнительно легированных алюминием, использовалась при создании радиационно-стойких полупроводниковых приборов задолго до публикации [6]. Таким образом, необходимо иметь в виду, что основным способом обеспечения радиационной стойкости изделий является применение комплектующих, изготовленных по специальным технологиям. Такие технологии достаточно давно разработаны и апробированы.

Для описания полной картины радиационных воздействий на современные приборы необходимо отметить следующее.

В связи с тенденцией к повышению степени интеграции электронных приборов, сопровождаемой миниатюризацией активного объёма отдельных компонентов интегральных схем, возможно произвольное искажение информации и появление ошибок при её обработке без устойчивого повреждения интегральных схем, которые возникают под действием ионизирующих излучений с чрезвычайно низкими интегральными потоками, вплоть до воздействия отдельных частиц [1]. Как оказалось, перемежающиеся отказы могут быть вызваны фоном естественной радиации, например, радиоактивными изотопами урана и тория, содержащимися в ничтожных концентрациях в корпусах приборов.

В [7] представлены результаты анализа причин сбоев в работе бортовой аппаратуры (БА) космических аппаратов при функционировании на геостационарной орбите за период с 2011 по 2018 год. В [7] также показано, что одной из причин наблюдаемых сбоев являются эффекты одиночных событий при действии тяжёлых заряженных частиц космического пространства. Кроме того, в [7] проанализировано влияние на частоту сбоев импульсных электрических наводок, вызываемых электростатическими разрядами при объёмном заряджении диэлектрических материалов.

### Способы повышения радиационной стойкости полупроводниковых приборов

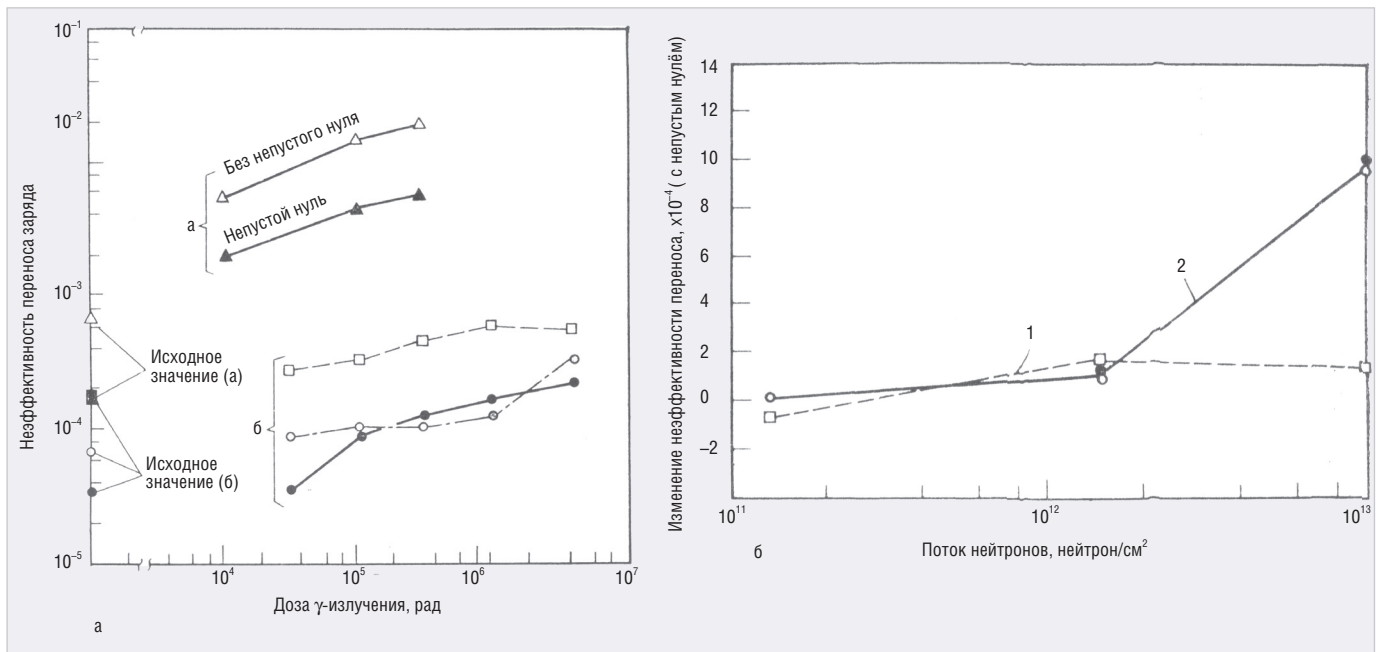
Из вышеизложенного следует, что основной и весьма хорошо апробированный способ повышения радиационной стойкости полупроводниковых приборов – технологический. То есть производится, в частности, легирование соответствующими примесями. Для создания рабочих областей приборов используются эпитаксиальные слои с удельным сопротивлением и толщиной, обеспечивающей оптимальное функционирование в полях ионизирующих излучений и пр. Для повышения уровня радиационной стойкости полупроводниковых приборов производится оптимизация конструкции и технологического процесса его изготовления с учётом режима работы прибора, его рабочих областей [8]. Эти вопросы подробно исследованы и внедрены в производство.

Следует обратить внимание, что речь идёт не о полной устойчивости к воздействию ионизирующих излучений, а только о повышении радиационной стойкости.

Согласно классическому определению [9], полупроводники – это такие материалы, которые при комнатной температуре имеют удельную проводимость в интервале от  $10^{-10}$  до  $10^4$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>, зависящую в сильной степени от структуры вещества, вида и количества примеси и от внешних условий: температуры, освещения, облучения ядерными частицами, электрического и магнитных полей.

Поэтому создать прибор на основе полупроводниковых материалов, не чувствительных к воздействию ядерных частиц, значило бы пытаться создать что-то, противоречащее определению полупроводника.

Но повысить устойчивость полупроводникового прибора к воздействию



**Рис. 5. Зависимость неэффektivности переноса заряда для ПЗС с поверхностным каналом (а) и встроенным каналом (б) от интегрального потока нейтронов с энергией 1 МэВ**

ионизирующих излучений указанными способами вполне возможно. При этом необходимо провести комплекс испытаний, подтверждающих достигнутый результат. Поэтому полупроводниковые приборы с гарантированным уровнем радиационной стойкости являются весьма дорогостоящими.

Кроме того, в настоящее время подробно исследован вопрос влияния малых доз ионизирующих излучений на стабилизацию полупроводниковых структур и, как следствие, повышение их стойкости и надёжности.

Например, в [10] описана методика режимов радиационных технологических процессов (РПТ) для повышения стойкости и срока службы в космических условиях.

Исследование [11] посвящено влиянию малых доз излучения на различные материалы. Помимо упорядочения структуры кристаллов при облучении малыми дозами γ-квантов, электронами, приводящего к увеличению времени жизни и подвижности носителей заряда в кремнии, арсениде галлия, антимониде индия, детально проанализирован процесс влияния этих излучений на дефектные структуры. Предложена модель своеобразной цепной реакции перестройки дефектов.

Если вопросы технологического изготовления радиационно-стойких изделий были разработаны и внедрены в своё время в производство, то применение малых доз облучения на производственной стадии пока не получило широкого использования.

В [12] сделана очень интересная и многообещающая попытка на основе обобщения результатов экспериментальных и теоретических исследований воздействия различных видов концентрированных потоков энергии (электронной, лазерной, ионной, плазменной, ультразвуковой) на процессы, происходящие в твёрдом теле, разработать технологические процессы улучшения характеристик изделий. В работе обосновано, что перечисленные воздействия малых уровней приводят к упорядочению структуры твёрдых тел, что обуславливает улучшение эксплуатационных свойств изделий на их основе.

Помимо технологического процесса повышения радиационной стойкости приборов к воздействию ионизирующих излучений, на практике применяется аппаратный метод повышения радиационной стойкости. Этот метод позволяет дезавуировать последствия влияния ионизирующих излучений на аппаратуру. Например, в [13] представлен способ повышения надёжности, защиты от сбоев и отказов электронного блока космического аппарата, функционирующего в полях ионизирующих излучений. Суть его заключается в том, что производят сбор информации о состоянии каналов трёхканального резервированного блока, определяют максимально возможный ток, который может потреблять каждый канал, а также допустимое количество повторных включений электронного блока, при котором он сохраняет работоспособность, задают пороговое значение

тока одного канала, измеряют токи потребления каждым каналом, отключают канал, ток потребления которого превышает пороговое значение тока.

### Методы испытаний стойкости электронной аппаратуры к ионизирующим воздействиям

В настоящее время достаточно полно разработаны методы оценки стойкости ЭРИ и РЭА к воздействию ионизирующих излучений космического пространства, которые заключаются в проведении ускоренных испытаний на моделирующих установках протонного и электронного излучений при высоких интенсивностях.

Правомерность такого подхода подтверждена в [6]. В этой работе исследовано облучение электронами 11 МэВ кремниевых окислов Si/SiO<sub>2</sub> в течение 30 с, 45 с, 60 с и 120 с и установлено, что количество радиационных дефектов возрастает с увеличением времени облучения, т.е. с увеличением дозы облучения.

Однако в процессе функционирования космической аппаратуры приборы не только эксплуатируются постоянно или периодически в течение определённого времени, но и могут находиться в условиях воздействия повышенных или пониженных температур, глубокого вакуума и т.д.

Кроме того, в любой момент функционирования космические аппараты могут подвергнуться воздействию поражающих факторов ядерного взрыва.

Для современных космических аппаратов при отсутствии средств защиты радиус зоны функционального поражения ядерным боеприпасом мегатонного класса может превышать несколько тысяч километров. При этом подрыв одного ядерного боеприпаса в космосе может вызвать одновременное поражение нескольких космических аппаратов [14].

В [15] конкретно рассчитано, что после взрыва боеприпаса мощностью 1 Мт на высоте 200 км мощность дозы осколочного гамма-излучения составляет 0,1 Р/с, а на расстоянии 8,1 км в течение нескольких минут будет превышать фон наведённой активности типовых конструкций. Также указано, что на таком расстоянии от центра взрыва реализуется  $P\gamma = 10^{11}$  Р/с и  $\Phi n = 10^{13}$  н/см<sup>2</sup>.

Поэтому в проблеме проектирования космических аппаратов актуальным вопросом является обеспечение стойкости бортовой аппаратуры к действию поражающих факторов ядерного взрыва с учётом факторов естественного и искусственного радиационных поясов Земли (ЕРПЗ и ИРПЗ).

В литературных источниках немного данных о проведении подобных комплексных испытаний. В литературе чаще встречаются данные о комплексном воздействии одного какого-либо поражающего фактора и повышенных температур или о комплексном воздействии нескольких поражающих факторов.

В [16] показано, что при эксплуатации приборы (исследования проводились на биполярных транзисторах), подвергнутые радиационным воздействиям, проявляют тенденцию к восстановлению параметров.

Для структур, облучённых дозой  $D = 5 \times 10^6$  рад, тепловой отжиг осуществляется за короткий промежуток ( $t = 20$  мин), после чего эффект достигает насыщения. Последующий эксплуатационный отжиг в течение 48 ч полностью восстанавливает усилительные свойства транзисторов. Первый этап отжига обусловлен релаксацией облучённой системы в более равновесное состояние, когда квазистабильные комплексы, существующие в кристалле при температуре облучения, переходят в более равновесные конфигурации.

В [17, 18] описан механизм захвата горячих дырок, генерированных ионизацией, напряжёнными связями, что, по мнению авторов, должно приводить к

разрыву этих связей и образованию новой равновесной структуры.

В [19] приведены результаты эксперимента по исследованию изделий электронной техники, работающих в течение 1,5 лет на внешней поверхности КА. Здесь учтено, что, помимо ИИ ЕРПЗ, на объекты испытаний действуют ещё и повышенные температуры и глубокий вакуум. Коэффициент передачи тока оптронов возрос с 4 до 8% после 105 суток полета ( $5,2 \times 10^3$  рад), после чего постепенно уменьшился. После набора дозы  $3 \cdot 10^4$  рад (625 суток) это изменение стало существенным.

Результаты исследования температурных эффектов в процессе как кратковременного, так и долговременного отжига радиационных дефектов в кремниевых pin-детекторах приведены в [20].

Облучение проводилось протонами с  $E_p = 650$  МэВ потоком  $10^{14}$  частиц/см<sup>2</sup>. Постоянная времени быстрой и медленной стадий отжига дефектов соответственно 1–5 дней и более 68 дней.

Кремниевые pin-детекторы, облучённые быстрыми нейтронами реактора, отожджены циклами в течение 24 ч при температурах плюс 50; 60; 70 и 80°C. Отжиг при комнатной температуре незначителен. Отожджённая при повышенных температурах составляющая тока утечки достигает 2/3 начального значения [21].

Изменение времени жизни и холловской подвижности в облучённых электронами с  $E_e = 8$  МэВ монокристаллах кремния типа КДБ12, легированных гафнием и без него, рассмотрено в [22]. После выдержки облучённых образцов, легированных гафнием, при комнатной температуре в течение 30 месяцев время жизни, значительно снизившееся после облучения, восстанавливается, достигая уровня, наблюдаемого в необлучённых образцах. Этот эффект объясняется перестройкой введённых в кристаллы при облучении активных центров, приводящих к уменьшению рекомбинационных свойств.

После облучения потоками электронов ( $E_e = 1,5$  МэВ) уровня  $2,8 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup> кремниевых диодов, изготовленных на основе структур  $p^+np^+$  с удельным сопротивлением n-области 35 Ом·см, дефект с уровнем  $E_c - 0,41$  эВ определяет время жизни при комнатной температуре. Однако после отжига этого дефекта вторичный дефект с уровнем  $E_c - 0,36$  эВ становится преоб-

ладающим рекомбинационным центром [23].

В облучённом электронами или ионно-имплантированным кремнии на первом этапе образуются группы точечных дефектов в незаконченные конфигурации. Они становятся энергетически нестабильными. Затем они преобразуются во вторичное, законченное состояние. Эта концепция двухшагового формирования может объяснить временной отжиг дефектов [24].

Отмечено в [25], что применение обработки  $\gamma$ -излучением в технологии изготовления ряда серийных кремниевых диодов привело к возможности регулирования времени восстановления обратного сопротивления диодов. При этом изохронный отжиг радиационных дефектов в рассматриваемых структурах происходит в интервале температур 60...65°C. Нехарактерным является отсутствие низкотемпературных стадий отжига, обусловленных перестройкой конфигурации дефектов. Энергия активации процесса высокотемпературного отжига составляет  $11,6 \pm 0,2$  эВ. Оценка срока службы облучённых приборов, проведённая в [25] на основании расчёта энергии активации при изменении параметров на 20%, даёт примерно  $10^5$  ч при  $T = 150^\circ\text{C}$ , что на порядок превышает срок службы, гарантированный техническими условиями.

В качестве конкретного механизма, объясняющего подобные явления, можно предположить известные эффекты «внутреннего» геттерирования поверхностями кислородных преципитатов и дислокациями. Эти эффекты проявляются наиболее ярко при термообработках [25]. Такие явления используются для разработки метода повышения радиационной стойкости полупроводниковых приборов, который заключается, в частности, в том, что исходный материал подвергают воздействию ионизирующими излучениями дозами, достаточными для формирования равновесных вакансий [26].

В [27] представлена кривая восстановления прямого падения напряжения при изохронном отжиге диодной структуры, подвергшейся нейтронному облучению. Кривая восстановления падения прямого напряжения в полулогарифмическом масштабе состоит из прямолинейных участков с различным наклоном. То есть кинетика восстановления падения прямого напряжения на этих участ-

ках следует экспоненциальной зависимости вида:

$$U_D(T)/U_D(\Phi) = K_1 \times \exp(-E_a/(kT)),$$

где  $U_D(T)$  – прямое падение напряжения диода после отжига при температуре  $T$ ,

$U_D(\Phi)$  – прямое падение напряжения диода после облучения,

$K_1$  – константа кинетики,

$E_a$  – энергия активации отжига дефектов в диапазоне температур.

С ростом температуры отжига энергия активации возрастает, что свидетельствует об отжиге более крупных дефектов.

Однако ломаный ход кривой восстановления свидетельствует о том, что в процессе отжига дефекты перестраиваются.

Активационный характер зависимости изменения параметров униполярных и биполярных ИМС, выдержанных при повышенных температурах, обеспечивающих ускорение выработки изделиями параметрического ресурса, отмечен в [28].

В [29] подчёркивается, что тепловое старение ИЭТ не отражает всего многообразия картины физической деградации. Деградация изделий является постоянным процессом, который доминирует над другими процессами, сопровождающими длительную эксплуатацию изделий. Особую роль играет процесс теплового старения в случаях эксплуатации ИЭТ на борту КА, например, в атмосфере сухого азота или вакууме, когда процессы гидратации и коррозии практически исключены.

В качестве критерия совместной количественной оценки надёжности и радиационной стойкости изделий принимается величина вероятности параметрических отказов из-за необратимости дрейфа исследуемого параметра критерия – годности изделия, найденная как результат теплового старения и при экспериментальной оценке их радиационной стойкости [29]. При этом используется известный принцип аддитивности расхода параметрического ресурса ИЭТ, т.е. считается, что совместное и раздельное воздействие повышенных температур и ИИ в разной их последовательности приводят к сокращению величины параметрического ресурса, но значение оставшегося ресурса не зависит от предыстории воздействия температуры и ИИ.

В [30] утверждается, что к дефектам и несовершенствам, внесённым в прибор

при их изготовлении, добавились радиационные дефекты, вследствие чего термодинамическая неустойчивость прибора возросла. Радиационные дефекты, взаимодействуя между собой и имеющимися в приборах несовершенствами, способствуют возникновению неблагоприятных ситуаций, приводящих к отказам.

Однако такой подход при испытаниях любых полупроводниковых приборов, разумеется, является спорным.

Подобная ситуация возможна, например, при эксплуатации приборов, изготовленных на МОП-структурах после облучения дозой, при которой прибор является исправным. Так, в интегральных микросхемах памяти большой ёмкости было обнаружено явление, названное «мягкой ошибкой», или сбоем, которое заключается в изменении элементов памяти без образования устойчивых дефектов в структуре [31, 32].

Флюктуации в режимах применения именно таких структур могут вызвать перестройку дефектов и наступление отказов значительно раньше, чем это могло быть в приборах, не подвергавшихся облучению.

Однако применение ряда конструктивно-технологических решений, благодаря которым происходит быстрое уменьшение ионизационных токов, приводит к резкому снижению вероятности возникновения мягкой ошибки [33].

С другой стороны, в [34] говорится о том, что при облучении полупроводников возможно образование нестабильных пар вакансия – междоузельный атом, которые могут либо аннигилировать и участвовать в геттерировании, либо образовывать стабильные дефекты. Все эти процессы, которые конкурируют между собой в деструкции пары Френкеля, имеют различные энергии активации.

Преобладание одного из этих процессов при последующей эксплуатации приборов может приводить либо к стабилизации структуры, либо к эффекту «скрытого старения».

Обратимся к математической модели [35], предполагающей расчёт коэффициента стойкости к воздействию дестабилизирующих факторов:

$$L_i = (q_0 - (q_0 - q_i))/q_0,$$

где  $i$  – воздействующий дестабилизирующий фактор;

$L_i$  – коэффициент стойкости к дестабилизирующему фактору;

$q_i$  – критерий стойкости после воздействия дестабилизирующего фактора;

$q_0$  – критерий стойкости при отсутствии воздействия дестабилизирующего фактора.

Таким образом, в многочисленных моделях прогнозирования стойкости к воздействию факторов космического пространства нет единого подхода, они противоречивы и не дают однозначных результатов.

Принцип оценки стойкости по отдельному воздействию разных излучений на разные партии изделий не всегда позволяет учесть ряд весьма важных эффектов, свойственных их комплексному воздействию, таких как взаимное влияние факторов на их повреждающую способность, так называемые «отжиговые» эффекты. Решить эту проблему чисто экспериментальным путем предложено в [36], где описана испытательная установка, которая обеспечивает одновременное (комплексное) воздействие шести факторов: повышенной (пониженной) температуры среды, давления, линейного ускорения, вибрации, ударов и агрессивных сред.

Однако эта установка не введена в действие на уровне нормативных документов.

Общность в закономерностях явлений, происходящих в полупроводниковых приборах при воздействии ряда внешних факторов, позволила в [37] сформулировать методологический подход для отбора имитационных нерадиационных методов, помогающих осуществить оценку соответствия изделий требованиям по радиационной стойкости.

В литературе отмечается [38] аналогия между критерием безотказности, определяющим надёжность работы изделия, и критерием радиационной стойкости. Оба эти понятия подразумевают отсутствие отказов при работе аппаратуры. Поэтому для описания работы КА целесообразно анализировать эти задачи в комплексе.

При этом следует заметить, что радиационная стойкость и надёжность не только описываются в терминологии «отказ / безотказная работа», но и обусловлены идентичными физико-химическими процессами.

Это даёт основание для распространения на описание процессов, обусловленных воздействием ионизирующих излучений, подробно и широко опи-

Перечень принятых сокращений

|       |  |
|-------|--|
| БА    | бортовая аппаратура                                      |
| ВВФ   | внешние воздействующие факторы                           |
| ГКИ   | галактическое космическое излучение                      |
| ЕРПЗ  | естественные радиационные пояса Земли                    |
| ИИ    | ионизирующее излучение                                   |
| ИРПЗ  | искусственные радиационные пояса Земли                   |
| ИМС   | интегральные микросхемы                                  |
| ИЭТ   | изделия электронной техники                              |
| КА    | космический аппарат                                      |
| КД    | конструкторская документация                             |
| КИ    | комплектующее изделие                                    |
| КМОП  | комплемментарные структуры металл-окисел-полупроводник   |
| КП    | космическое пространство                                 |
| МКС   | международная космическая станция                        |
| МОП   | структуры металл-окисел-полупроводник                    |
| МУ    | моделирующая установка                                   |
| НИОКР | научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы |
| НТД   | нормативно-технический документ                          |
| ОЗУ   | оперативное запоминающее устройство                      |
| ОКР   | опытно-конструкторская работа                            |
| ПЗС   | прибор с зарядовой связью                                |
| ПФ    | поражающие факторы                                       |
| РД    | радиационные дефекты                                     |
| РКД   | рабочая конструкторская документация                     |
| РЭА   | радиоэлектронная аппаратура                              |
| СКИ   | солнечное космическое излучение                          |
| ФКП   | фактор космического пространства                         |
| ЭРИ   | электрорадиоизделия                                      |
| ЯВ    | ядерный взрыв  |

санного математического аппарата теории надёжности.

В одном из немногих источников [39] подробно проанализированы и всесторонне описаны процессы естественного старения и вынужденной деградации электронных приборов, рассмотрено использование ионизирующих излучений с целью моделирования естественного старения приборов. Основной тезис, разработанный в [39], состоит в том, что подпороговые механизмы радиационного дефектообразования в полупроводниках представляют собой класс структурных изменений, которые вызываются электронными возбуждениями. Общность этих механизмов и механизмов естественного старения открывает возможность радиационного моделирования естественного старения.

Как отмечалось ранее,  $E_d$  – пороговая энергия смещения (энергия, необходимая для необратимого смещения атома из узла кристаллической решетки). Как подробно систематизировано в [12], под действием ионизирующих излучений первично смещённый атом вызывает смещение соседних атомов по атомной цепочке. Если ионизи-

Термины и определения

|  |   |
|--|---|
| Время жизни неосновных носителей заряда        | среднее время, которое требуется избыточному неосновному носителю для рекомбинации  |
| Диффузионная длина неосновных носителей заряда | расстояние, на котором диффузионный (в отсутствии электрического поля) поток неосновных носителей заряда уменьшается в $e$ раз  |
| Экспозиционная доза излучения                  | заряд вторичных частиц, образующихся в массе вещества при полном торможении всех заряженных частиц; единица измерения Р (рентген)   |
| Поглощённая доза излучения                     | величина энергии ионизирующего излучения, поглощённой в элементарном объёме вещества, отнесённая к массе вещества в этом объёме (поглощённая доза); единица поглощённой дозы грэй (Гр). Поглощённая доза равна 1 Гр, если в результате поглощения ионизирующего излучения вещество получило 1 Дж энергии на 1 кг массы. 1 Гр = 100 рад. |
| Запрещённая зона                               | область значений энергии, которыми не может обладать электрон в идеальном (бездефектном) кристалле  |
| Область пространственного заряда               | электрически заряженный слой, который находится на границе $n$ и $p$ – областей полупроводника (область истощения)  |
| Реакторные нейтроны                            | нейтроны, образующиеся в реакторе в результате деления урана-235 и плутония-239 со средним спектром энергий 1 МэВ и максимумом при 0,1 МэВ  |
| Рекомбинация                                   | исчезновение пары свободных носителей противоположного заряда в среде с выделением энергии  |
| Токи утечки                                    | ток, протекающий через область истощения в диоде с обратным смещением   |
| Точечные дефекты                               | атомы посторонней примеси, расположенные в узлах или в междоузлиях решётки (матрицы) кристалла полупроводника; вакансии, то есть пустые узлы матрицы; междоузельные собственные атомы матрицы; посторонние атомы, адсорбированные на поверхности кристалла  |
| Темновой ток фотодиода                         | электрический ток, который протекает через фоточувствительный детектор при отсутствии поглощённых фотонов   |
| Шумы полупроводниковых приборов                | тепловой шум, дробовой шум и низкочастотный шум   |
| Уровень Ферми                                  | уровень, определяющий среднюю энергию электронов (или носителей вообще), способных принять участие в проводимости   |
| Флюенс частиц                                  | отношение числа частиц $dN$ , пересёкших перпендикулярную пучку элементарную площадку $dS$ за данный промежуток времени, к площади этой площадки. Единицы измерения – $m^{-2}$ (СИ), $cm^{-2}$ (СГС). 1 $m^{-2}$ – такой флюенс, при котором в объём сферы с площадью поперечного сечения 1 $m^2$ попадает одна частица                 |
| Френкелевские пары (дефект Френкеля)           | дефект кристаллической структуры, состоящий из собственно междоузельного атома и вакансии. Возникают в кристалле при нагреве или облучении потоком ядерных частиц   |
| Полупроводник $n$ -типа                        | полупроводник, в котором основные носители заряда – электроны проводимости  |
| Полупроводник $p$ -типа                        | полупроводник, в котором основные носители заряда – «дырки»   |
| $P_{in}$ -структура                            | структура, состоящая из сильнолегированных $p^+$ и $n^+$ областей и разделяющего их слаболегированного $i$ слоя собственной проводимости  |

рующие частицы не передают атому энергию, достаточную для смещения, то происходит неупругое рассеяние, приводящее к возбуждению электронной подсистемы твёрдого тела. В [39] этот процесс назван «электронным возбуждением», приводящим к изменению в электронной подсистеме и деформации потенциального рельефа для атомных переходов. При наличии в отдельных областях кристаллов градиентов механических напряжений возникают направленные потоки точечных дефектов, вызывающие перераспределение легирующей примеси и перемещение дислокаций. Одновременно происходят различные процессы трансформирования точечных дефектов: возникновение и распад комплексов из междоузельных атомов и вакансий, образование и распад мелких преципитатов. Эти процессы являются основанием для отжига дефектов или естественного старения.

Согласно [39] использование жёстких электромагнитных и реакторных

излучений в ускоренных испытаниях является методом, пригодным для обнаружения технологических дефектов и слабых звеньев в полупроводниковой структуре, требующих конструкторско-технологических доработок. Но такие процессы не воспроизводят реальные процессы естественной деградации. Высокоэнергичное ионизирующее излучение приводит к возникновению больших скоплений дефектов, образующих дислокации, области пространственного заряда, что вызывает существенную деградацию приборов.

Несмотря на классические научные факты, изложенные в [11] и [12], и строгие выводы и обширный экспериментальный материал, приведённый в [39] с классической академической трактовкой полученных результатов, ни в одном из этих источников не приведены конкретные рекомендации по характеристикам, уровням радиационных воздействий, способным имитировать естественное старение в течение определённого времени.

Поэтому применение аппарата теории надёжности к описанию процессов и прогнозированию радиационной стойкости не разработано и не зафиксировано в нормативных документах.

Таким образом, вопросы комплексного воздействия дестабилизирующих факторов космического пространства в настоящее время в нормативных документах отражаются весьма схематично, что требует от разработчиков аппаратуры учитывать наличие этих проблем самостоятельно.

## Литература

1. *Заитов Ф.А., Литвинова Н.Н., Савицкий В.Г. и др.* Радиационная стойкость в оптоэлектронике. М.: Воениздат, 1987. 166 с.
2. *Артемьев А.Д., Данилин Ю.И., Курьяшев А.В. и др.* Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2019, вып. 4. С. 50–56.
3. *Вовк О.В.* Комплексное воздействие различных частиц и длительных повышенных температур на параметры кремневых фотодиодов // Вопросы оборонной техники, серия 11. М.: НТЦ «Информтехника», 1993, вып. 4 (139), 52 с.
4. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. Т. 1, 2. М.: Мир, 1984.
5. *Killiany J.M., Baker W.D.* Limitations of a Threshold-Insensitive CCD Input Technique in a Total Dose Radiation Environment, in 1995 Intern. Conf. Applic. CCDs Proc. P. 369–374.
6. *Kaschieva S.* Materials Science and Engineering B100 (2003) 23/26. Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Sciences. An advantage of MOS structures with ultra thin oxide during irradiation.
7. *Булгаков Н.Н., Зинченко В.Ф.* Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2020, вып. 1. С. 39–44.
8. *Кобтонок Н.Ф., Сальников Е.Н.* Фоточувствительные МДП-приборы для преобразования изображений. М.: Радио и связь, 1990. 160 с.
9. *Шалимова К.В.* Физика полупроводников: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 392 с.
10. *Ладыгин Е.А.* Радиационная технология твердотельных электронных приборов // I отраслевая технологическая конференция, 2007.
11. *Мамонтов А.П., Чернов И.П.* Эффект малых доз ионизирующих излучений. Томск: Дельтаплан, 2009. 288 с.
12. *Клименов В.А., Лидер А.М., Мамонтов А.М. и др.* Физические основы современных технологических процессов. Томск: Дельтаплан, 2012, 176 с.
13. *Сыров А.С., Смирнов В.В., Гордийко С.В. и др.* RU 2693296. Способ от сбоев и отказов электронного блока космического аппарата, вызываемых внешними воздействующими факторами и устройство для его осуществления, приоритет 28.11.2018. ФГУП МОКБ «Марс».
14. *Лукьяненко В.И., Литвак А.К., Мураховский Е.В. и др.* Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2019, вып. 2. С. 80–84.
15. *Верхотуров В.И., Денисенко В.А., Литвак А.К.* Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 1991, вып. 3. С. 56–63.
16. *Вавилов В.С., Горин Б.М., Данилин Н.С. и др.* Радиационные методы в твердотельной электронике. М.: Радио и связь, 1990.
17. *Weber H.W., Bock H., Unfried E., Gnscenwood O.P.* Neutron disimerry and damage calculations for the TRIGA MARK-ID reactor in Vienna. J. of nucl. mater. 1986, № 37. P. 236–240.
18. *Итальянцев А.Г., Мордкович В.Н., Темпер Е.М.* О роли атермических процессов в импульсном отжиге ионно-легированных слоев кремния // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 19, вып. 5. P. 928–930.
19. *Коваленко А.К., Королева Е.А., Галеев А.П. и др.* Вопросы атомной науки и техники, 2015, вып. 9. С. 11–13.
20. *Ziob H.J. and all.* Temperature dependence of radiation damage and its annealing in silicon detectors // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2021, vol. 68, № 8, pt. 1. P. 1694–1700.
21. *Stein H.J.* Thermodynamic and morphological analysis of large silicon self-interstitial clusters using atomic simulations. J. of Applied Phys., 117 (2015), issued 3, April 07.
22. *Гарнык В.С.* Влияние характера рассеяния на время жизни неосновных носителей заряда в кремнии, легированном гафнием // Физика и техника полупроводников. 1994. Т. 28, вып. 2. С. 228–231.
23. *Yang K.H., Kappert H.F., Schwulko G.H.* Physical and Electrochemical characterization of crystalline silicon surfaces modulated by aluminum. Phys. St. Sol.(a), № 2 (8st.), vol. 215(2018), 1700543.
24. *Watkins G.D.* In Lattice Defect in Semicond. Conf. Ser. № 231, Inst. Of Phys. London-Bristol, 2019.
25. *Коришунов Ф.П., Богатырев Ю.В., Носов Ю.П.* Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2019. Вып. 3. С. 5–8.
26. *Абрамочкин А.И., Карпов И.М., Окунь П.И. и др.* Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2018. Вып. 3. С. 19–21.
27. *Сирота Н.Н., Чернышев А.А., Коришунов Ф.П.* Отжиг радиационных дефектов в кремниевых диодах, облучённых быстрыми нейтронами // Труды института тв. тела и полупроводников. 2012. С. 33–39.
28. *Ширшев Л.Г.* Ионизирующие излучения и электроника. М.: Советское радио, 1979, 191 с.
29. *Wik M.W.* Hardening of telecommunication Networks against Electromagnetic Pulses. Ericsson Reviev, 1984, vol. 61, № 4. Pp. 59–68.
30. *Чернышев А.А.* Основы надёжности полупроводниковых приборов и интегральных схем. М.: Радио и связь, 1988.
31. *May T.C., Woods M.H.* Alpha-Particle Induced Soft Errors in Dynamic Memories // IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, vol. 68, № 4. P. 1454–1460.
32. *Tojable T., Shinoda T., Aoki M. and all.* A Soft Ensor Rate Model for MOS Dynamic RAMs // IEEE Trans. on Electron Devices, 2020, vol. 67, № 4. P. 1680–1685.
33. *Iwai H., Otsuka H., Matsumoto Y. and all.* Comparisons of Intrinsic Guttering and Epitaxial Wafer in Terms of Soft Error Endurance and Other Characteristics of 64K Bit Dynamic RaM // IEEE Transductions on Electron Devices, 2021, vol. 68, № 4. P. 1649–1653.
34. *Мамонтов А.П., Еремينا А.А.* Влияние интенсивности электронного облучения на характеристики GaAs-приборов // Электронная техника. 1987, сер. (вып.) 6 (191). P. 6–11.
35. *Miller P.R.* Engineering to counter the EMP theat // Radio and Electron Eng., 1993, vol. 53, № 11, № 12. P. 387–392.
36. *Борковский Я.И., Постников В.Н., Таранцев В.А. и др.* Вопросы атомной науки и техники, 2001, вып. 1. С. 9–12.
37. *Борисов Ю.А., Герасимов В.Ф., Никифоров Н.Ю. и др.* Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2013, вып. 1–3. С. 174–176.
38. *Мырова Л.О., Четиженко А.З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. М.: Радио и связь. 297 с.
39. *Вавилов В.С., Горин Б.М., Данилин Н.С. и др.* Радиационные методы в твердотельной электронике. М.: Радио и связь, 1990. 184 с.

