

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.2.7>

УДК 621.3.049.774.029.64

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СВЧ

М. В. Кулиев, С. В. Щербаков

АО «НПП «Исток» им. Шокина»,  
141190, Фрязино Моск. обл., ул. Вокзальная, 2а

Статья поступила в редакцию 5 февраля 2021 г.

**Аннотация.** Рассматриваются базовые технологические процессы производства монолитных интегральных схем СВЧ-диапазона (МИС СВЧ) в АО «НПП «Исток» им. Шокина. Представлены результаты испытаний типовых изделий на стойкость к воздействию спецфакторов. Выработаны основные направления совершенствования методов прогнозирования и оценки стойкости к данным видам воздействий.

**Ключевые слова:** интегральные схемы СВЧ-диапазона, радиационная стойкость, надёжность.

**Abstract.** The basic technological processes of production of monolithic integrated circuits of the microwave range in JSC "NPP Istok" named after Shokin are in the focus of the paper. The results of tests of standard products for resistance to the effects of special factors are presented. The main directions of improving the methods of forecasting and assessing resistance to these types of impacts have been developed.

**Key words:** integrated circuits of the microwave range, radiation resistance, reliability.

### Введение

К настоящему времени достижения в области проектирования и технологии производства МИС СВЧ привели к созданию РЭА, допускающей по своим массогабаритным и функциональным характеристикам использование в различных системах воздушного и космического базирования. Одним из

наиболее перспективных направлений является разработка радиоэлектронных систем с использованием АФАР, в состав которой могут входить свыше 1000 приёмопередающих СВЧ-модулей. В гражданских секторах экономики применение этих систем связано с такими направлениями, как дистанционное зондирование Земли с использованием радиолокаторов с синтезированной апертурой, беспроводная передача данных, телевидение высокой четкости и т.п. В военной технике данная аппаратура может быть использована в системах предупреждения ракетно-ядерного нападения, радиоэлектронной борьбы, высокоточного оружия, контроля космического пространства.

Классификация изделий ТСВЧЭ производства АО «НПП «Исток» им. Шокина» представлена в таблице 1.

Таблица 1

| <b>Классификационный признак</b> | <b>Наименование</b>   | <b>Обозначение</b>  |
|----------------------------------|---|---|
| Полупроводниковая структура      | – арсенид галлия<br>– нитрид галлия<br>– алмаз  | – GaAs<br>– GaN<br>– C  |
| Технология изготовления МИС СВЧ  | – малошумящие усилители (норма 0,1 мкм)<br>– усилители мощности (норма 0,25 мкм)<br>– преобразовательные и многофункциональные схемы (норма 0,2 мкм)<br>– защитные устройства (норма 1 мкм) | – СВЧ МШУ МИС<br>– СВЧ УМ МИС<br>– СВЧ МФ МИС<br>– СВЧ ЗУ МИС |

## 1. Сравнение характеристик GaAs- и GaN-транзисторов и МИС СВЧ

### 1.1. Сравнение по электрическим параметрам

#### 1.1.1. Параметры материала

| Параметр                            | GaAs             | GaN              |
|-------------------------------------|------------------|------------------|
| Ширина запрещенной зоны, эВ         | 1,42             | 3,4              |
| Скорость насыщения носителей, м/с   | $1,0 \cdot 10^5$ | $1,5 \cdot 10^5$ |
| Удельная теплопроводность, Вт/(м·К) | 0,5              | 1,3              |
| Пробивная напряженность, кВ/см      | 65               | 3500             |

#### 1.1.2. Параметры изделий

| Свойство (параметр)   | Si  | GaAs | GaN | C (алмаз) |
|---|-----|------|-----|-----------|
| $P_{\text{вых}} (\lambda \approx 3 \text{ мм}) \geq 1 \text{ Вт}$ | Нет | Нет  | Да  | Да        |
| $\lambda_{\text{раб}} \leq 3 \text{ мм}$                          | Нет | Да   | Да  | Да        |
| Технология НЕМТ   | Нет | Да   | Да  | Да        |
| Низкая стоимость подложек   | Да  | Нет  | Да  | Нет       |

Сравнение приведенных параметров показывает, что изделия на основе GaN и C обладают более высокими предельными рабочими температурами и, следовательно, более высокими показателями надёжности по сравнению с арсенидгаллиевыми и кремниевыми изделиями. Основная проблема отечественной электроники – разработка промышленной технологии для серийного производства ТСВЧЭ на GaN.

### 1.2. Исследование радиационной стойкости

1.2.1. Анализ экспериментальных результатов по опубликованным источникам показывает, что радиационная стойкость GaN МИС СВЧ сравнима со стойкостью GaAs МИС аналогичного функционального назначения.

1.2.2. В рамках ОКР «Дискрет-26» в 2015 г. в АО «НПП «Исток» им. Шокина» завершена разработка переключателя 1×2 диапазона частот 4...18 ГГц, изготовленного на GaN-структуре. В таблице 2 приведены результаты

испытаний опытных образцов переключателя на моделирующих установках ФГУП «НИИП» (Протокол испытаний Рег. № 57-07/574-70/15).

Таблица 2

| Характеристика фактора 7.И (ГОСТ РВ 20.39.415-98) | 7.И <sub>1</sub>      | 7.И <sub>6</sub>      | 7.И <sub>7</sub> | 7.И <sub>8</sub> | ВПР, мс     |
|---|-----------------------|-----------------------|------------------|------------------|-------------|
| Требуемое значение по ТЗ на ОКР                   | 3Ус                   | 3Ус                   | 3Ус              | 0,2×1Ус          | Не более 10 |
| Фактическое значение                              | Более (2,0...3,2)×3Ус | Более (1,7...4,1)×3Ус | Более 2,2×3Ус    | 0,35×1Ус         | 0,19        |

Как следует из представленных данных, фактическая стойкость переключателя к воздействию спецфакторов полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям.

## 2. Результаты испытаний изделий ТСВЧЭ на стойкость к воздействию спецфакторов

В 2013 – 2015 гг. в рамках СЧ НИР «Высота-И» проведено экспериментальное исследование изделий ТСВЧЭ производства АО «НПП «Исток» им. Шокина» [1]. Испытания проводились на установках ФГУП НИИП (г. Лыткарино) и ОИЯИ (г. Дубна).

В качестве типовых представителей выбраны изделия, представленные в таблице 3.

Результаты испытаний представлены в таблице 4.

Кроме того, испытания на стойкость к воздействию спецфакторов проведены в рамках ОКР «Одноцветник-26», «Высотка-17», «Софора», «Светлогорск», «Созвездие-Д». Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 3

| Изделие | № ТУ                | Функциональное назначение          | Технология  |
|---------|---------------------|------------------------------------|-------------|
| М421347 | АПНТ.434810.128 ТУ  | Малошумящий усилитель              | СВЧ МШУ МИС |
| М42242  | АПНТ.434.810.074 ТУ | Предварительный усилитель мощности | СВЧ УМ МИС  |
| М44224  | АПНТ.434830.026 ТУ  | Переключатель 1×2                  | СВЧ МФ МИС  |
| М44149  | АПНТ.434830.019 ТУ  | Фазовращатель                      | СВЧ МФ МИС  |
| М44720  | АПНТ.434820.007 ТУ  | 5-разрядный аттенюатор             | СВЧ МФ МИС  |
| М44417  | АПНТ.434820.003 ТУ  | Защитное устройство                | СВЧ ЗУ МИС  |
| ЗП976   | АЕЯР.432140.207 ТУ  | СВЧ-транзистор                     | СВЧ УМ МИС  |
| ТСV-IS  | –                   | Тестовая структура                 | СВЧ УМ МИС  |

Таблица 4

| Характеристики<br>спецфакторов | М421347<br>(МШУ)            | М42242<br>(ПУМ)             | М44149<br>(ФВ)              | М44417<br>(ЗУ)              | М44224-2<br>(переключатель) | М44712<br>(аттенюатор)      | ЗП976<br>(транзистор)       | ТСV<br>(тестовая структура) |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Номер протокола                | МЛКТ.<br>ИЛ0902.<br>01.0001 | МЛКТ.<br>ИЛ0902.<br>02.0003 | МЛКТ.<br>ИЛ0902.<br>02.0002 | МЛКТ.<br>ИЛ0902.<br>02.0001 | МЛКТ.<br>ИЛ0902.<br>03.0003 | МЛКТ.<br>ИЛ0902.<br>03.0002 | МЛКТ.<br>ИЛ0902.<br>03.0001 | МЛКТ.<br>ИЛ0902.<br>03.0006 |
| 7.И1                           | $>3,2 \cdot 4Ус$            | $2,2 \times 6Ус$            | $1,6 \times 6Ус$            | $0,2 \cdot 4Ус$             | $3,2 \times 6Ус$            | $3,2 \times 6Ус$            | $1,6 \times 6Ус$            | –                           |
| 7.И7                           | $>11 \cdot 4Ус$             | $>24 \cdot 4Ус$             | $>27 \cdot 4Ус$             | $>20 \cdot 4Ус$             | $>100 \times 4Ус$           | $>76 \times 4Ус$            | $>7,8 \times 5Ус$           | $>20 \cdot 4Ус$             |
| 7.И6                           | $>2,6 \cdot 4Ус$            | $>6 \cdot 4Ус$              | $>12 \cdot 4Ус$             | $>1,6 \cdot 4Ус$            | $>0,8 \times 4Ус$           | $>0,8 \times 4Ус$           | $>1,2 \times 4Ус$           | $>1,6 \cdot 4Ус$            |
| 7.И8                           | $0,04 \cdot 1Ус$            | $0,05 \cdot 1Ус$            | $0,02 \cdot 1Ус$            | $0,18 \cdot 1Ус$            | $0,07 \times 1Ус$           | $0,02 \times 1Ус$           | $0,04 \times 1Ус$           | $0,18 \cdot 1Ус$            |
| ВПР, мс                        | 0,002                       | 0,002                       | 0,007                       | 0,003                       | 0,0009                      | 0,008                       | 0,001                       | 0,003                       |
| 7.С4                           | $>5,5 \cdot 4Ус$            | $>120 \cdot 4Ус$            | $>135 \cdot 4Ус$            | $>100 \cdot 4Ус$            | $>54 \times 4Ус$            | $>38 \times 4Ус$            | $>39 \times 5Ус$            | $>100 \cdot 4Ус$            |
| 7.К11 (7.К12)                  | 69                          | 69                          | 69                          | 69                          | 68                          | 68                          | 69                          | 68                          |

Таблица 5

| Характеристики спецфакторов | Одноцветник-26   | КРПГ.432151        | Высотка-17              | Светлогорск                  | Созвездие-Д         | Софора                       |
|-----------------------------|--|--------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|
| Функциональное назначение   | Сверхширокополосный МШУ (УМ)                             | ПТШ                | МШУ                     | Сверхширокополосный МШУ (УМ) | УМ                  | Сверхширокополосный МШУ (УМ) |
| Номер протокола             | ЖКНЮ.<br>ИЦ1274.02.0001;<br>ЖКНЮ.<br>ИЦ1274.02.0001-ЗРИ1 | –                  | МЛКТ.<br>ИЛ1004.02.0001 | Рег. 62-09/271               | –                   | –                            |
| 7.И1                        | $4,1 \times 3У_c$  | $8 \times 3У_c$    | $2,8 \times 5У_c$       | $>4 \times 5У_c$             | $2 \times 3У_c$     | $3У_c$                       |
| 7.И2                        | $584 \times 4У_c$  | –                  | –                       | –                            | –                   | –                            |
| 7.И3                        | $5849 \times 4У_c$                                       | –                  | –                       | –                            | –                   | –                            |
| 7.И6                        | $3,1 \times 4У_c$  | $0,7 \times 2У_c$  | $0,1 \times 6У_c$       | $1,2 \times 4У_c$            | $2 \times 2У_c$     | $1У_c$                       |
| 7.И7                        | $3,7 \times 6У_c$  | $1,6 \times 6У_c$  | $2 \times 5У_c$         | $>1,2 \times 4У_c$           | $1,7 \times 2У_c$   | –                            |
| 7.И8                        | $0,2 \times 1У_c$  | –                  | $>10 \times 2У_c$       | $0,3 \times 2У_c$            | $0,009 \times 2У_c$ | –                            |
| ВПР, мс                     | 0,004  | 0,0025             | 0                       | 0,005                        | 0,025               | –                            |
| 7.И12                       | 2Р   | –                  | $8 \times 2Р$           | –                            | –                   | –                            |
| 7.С4                        | $>5,5 \times 4У_c$                                       | $>135 \times 4У_c$ | $10 \times 5У_c$        | $>54 \times 4У_c$            | $>38 \times 4У_c$   | –                            |
| 7.К1                        | $6,2 \times 2К$  | –                  | $5 \times 2К$           | 3К                           | 3К                  | –                            |
| 7.К2                        | $1,4 \cdot 10^{14} \times 2К$                            | –                  | –                       | –                            | –                   | –                            |
| 7.К4                        | $>2К$  | –                  | $5 \times 1К$           | 3К                           | 3К                  | –                            |
| 7.К1+7.К4                   | –  | –                  | $5 \times 1К$           | –                            | –                   | –                            |
| 7.К5                        | $>2,9 \cdot 10^{13} \times 2К$                           | –                  | –                       | –                            | –                   | –                            |

Испытанные изделия являются типовыми представителями практически всех технологических процессов, используемых в АО «НПП «Исток» им. Шокина». Обобщая результаты испытаний, можно сделать следующие выводы:

- Стойкость к воздействию спецфакторов с характеристиками  $7.I_1...7.I_7$ ,  $7.C_1...7.C_4$  соответствует группам  $3У_C...6У_C$ .
- Стойкость к воздействию спецфакторов с характеристиками  $7.I_{12}...7.I_{13}$  соответствует группе 2Р.
- Стойкость к воздействию спецфакторов с характеристиками  $7.K_1...7.K_7$  соответствует группам 1К...2К.
- Стойкость к воздействию спецфакторов с характеристиками  $7.K_9...7.K_{12}$  по катастрофическим отказам превышает  $60 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$ .

### 3. Оценка актуальности применения СТП 07622667.001-96

Данный стандарт регламентирует использование методик расчетно-экспериментальных оценок стойкости изделий к воздействию специальных факторов на этапах выполнения ОКР. Вместе с тем, результаты испытаний на стойкость к воздействию спецфакторов изделий производства АО «НПП «Исток» им. Шокина», проведенных в 2005 – 2015 гг., показывают, что подтвержденные экспериментально уровни стойкости соответствуют предъявляемым требованиям. Поэтому применение указанных методик к вновь разрабатываемым изделиям ТСВЧЭ, изготавливаемым по стандартным технологическим процессам, с учетом положительных результатов испытаний позволяет оптимизировать затраты на оценку соответствия этих изделий требованиям ОКР по спецстойкости.

Развитие подхода, основанного на расчётно-экспериментальных методах оценки стойкости, должно быть связано с модернизацией технологий производства изделий ТСВЧЭ, а также с изменениями соответствующей нормативно-технической документации (новые редакции ГОСТов, ОСТов и т.п.).

#### **4. Общая оценка проблем спецстойкости изделий ТСВЧЭ**

Как показано выше, в целом изделия ТСВЧЭ производства АО «НПП «Исток» им. Шокина» удовлетворяют предъявляемым требованиям по стойкости к воздействию спецфакторов. На сегодняшний день наиболее актуальным является развитие следующих направлений:

- экспериментальная оценка предельно допустимых уровней воздействия спецфакторов;
- разработка методической базы (НТД) для расчетно-экспериментальной оценки стойкости вновь разрабатываемых изделий с учетом накопленных экспериментальных данных;
- выбор оптимального состава испытаний с учетом требований нормативной документации [2];
- переход на испытания тестовых схем типовых представителей действующих технологических процессов.

#### **5. Перспективы разработки, производства и применения изделий ТСВЧЭ на GaAs и GaN в составе КА в связи с их спецстойкостью и надежностью**

##### ***5.1. Анализ требований по спецстойкости***

Требования к ЭКБ, применяемой в бортовой аппаратуре КА, представлены в таблице 6. Как следует из результатов испытаний изделий АО «НПП «Исток» им. Шокина», представленных в таблицах 4 и 5, подтвержденная стойкость по дозовым эффектам, как минимум, в несколько раз превышает требуемые уровни. Стойкость к одиночным эффектам также полностью удовлетворяет требованиям. При этом следует отметить, что представленные экспериментальные данные отражают результаты испытаний на соответствие требованиям, заданным в ТЗ (ТУ). Предельная же стойкость испытанных изделий будет выше.

Таблица 6

| Виды эффектов                  |   | Уровень стойкости <sup>1)</sup>                         |
|--------------------------------|---|---|
| Стойкость к дозовым эффектам   | Полная накопленная доза (с учетом эффекта низкой ( $\leq 0,01...0,001$ рад/с) интенсивности), структурные повреждения   | Не менее $2 \times 4 \text{Ус}$                         |
| Стойкость к одиночным эффектам | Отказы (для технологических процессов на основе GaAs см. п.7 стр.5): <ul style="list-style-type: none"> <li>• SEL – радиационное зацелкивание, вызванное включением паразитных тиристорных структур</li> <li>• SEHE – микродозовый эффект (локальное выделение энергии в чувствительном объеме с последующим "дозовым" отказом)</li> <li>• SEB – эффект выгорания в мощных МДП-транзисторах, связанный с открыванием паразитного биполярного транзистора</li> <li>• SEDR / SEGR – эффект пробоя диэлектрика / эффект пробоя подзатворного диэлектрика в МДП-структурах</li> <li>• SESB – возникновение паразитного <i>n-p-n</i>-транзистора в <i>n</i>-канале (эффект вторичного пробоя)</li> </ul> | Не менее $60 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2 / \text{мг}$ |
|                                | Сбои: <ul style="list-style-type: none"> <li>• SEU – сбои в регулярной логике в виде потери информации в бистабильных структурах</li> <li>• SET – ионизационная реакция (импульсы тока в выходных цепях)</li> <li>• SEFI – эффект функционального прерывания</li> </ul>   | Не менее $20 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2 / \text{мг}$ |

<sup>1)</sup> Значение, при котором отсутствует проявление эффекта.

## 5.2. Анализ требований по надежности

Требования по надежности ЭКБ, применяемой в бортовой аппаратуре КА: ЭКБ, предназначенная для космических применений, должна иметь наработку на отказ не менее 150 000 ч, подтверждаемую при сдаче ОКР на уровне не менее 25 % по результатам форсированных ресурсных испытаний и на уровне 100 % – расчетным способом.

Характерные значения показателей надежности (заданные в ТУ) выпускаемых в настоящее время изделий представлены в таблице 7.

Таблица 7

| Тип     | Изделие    | Вероятность безотказной работы, % | Наработка до отказа, ч | Срок службы, лет |
|---------|------------|-----------------------------------|------------------------|------------------|
| M421381 | МИС УМ     | 95                                | 55 000                 | 25               |
| M421347 | МШУ        | 95                                | 50 000                 | 25               |
| M421368 | ГМИС УМ    | 95                                | 50 000                 | 25               |
| M44735  | Аттенюатор | 95                                | 80 000                 | 25               |
| ЗП976   | Транзистор | 97,5                              | 30 000                 | 25               |

Для определения фактических показателей надежности и их соответствия заданным требованиям необходима разработка расчетно-экспериментальных методов, основанных на измерении температуры канала транзисторных структур, и их аппаратная поддержка.

## 6. Необходимость и возможность испытаний изделий ТСВЧЭ на стойкость к воздействию ТЗЧ и ВЭП

Приведенные выше результаты показывают, что ЭКБ производства АО «НПП «Исток» им. Шокина» являются стойкими к воздействию ТЗЧ и ВЭП с заданными характеристиками (см. таблицу 6). Данный вывод обусловлен следующими причинами:

– в СВЧ-транзисторах и МИС на основе GaAs и GaN отсутствуют условия

для образования паразитных структур, инициируемых воздействием ТЗЧ и ВЭП;

– в технологии изготовления СВЧ-транзисторов и МИС не используется подзатворный окисел, подверженный локальному разрушению («проколу») вследствие тепловых эффектов при прохождении ТЗЧ, и нет накопления заряда, приводящего к сдвигу порогового напряжения;

– возможная ионизационная реакция тока стока при попадании заряженной частицы в активную область транзисторной структуры не превышает 1 нс (при допустимом времени потери работоспособности 2 мс);

– функциональные сбои в транзисторных устройствах (усилительных, преобразовательных), как правило, не проявляются из-за затухания на реактивных элементах схемы;

– при существующих технологических нормах отсутствуют сбои в переключательных элементах, т. к. энергии частицы не хватает для срабатывания ключевого элемента.

Проведение испытаний изделий ТСВЧЭ на стойкость к воздействию ТЗЧ и ВЭП связано со значительными техническими проблемами и финансовыми затратами. Дистанционное измерение СВЧ-параметров при данных воздействиях приводит к недопустимым погрешностям из-за затухания сигнала во входных и выходных трактах, а длительность воздействия не позволяет проводить измерения в полосе частот. Кроме того, испытание одного типоминерала ЭКБ СВЧ стоит от 1-2 млн руб. и выше.

Вместе с тем, в соответствии с «Требованиями к характеристикам ЭКБ...» (Распоряжение № 313 от 22.10.2015), допускается в технически обоснованных случаях нечувствительность к воздействию факторов  $K_9...K_{12}$  подтверждать аналитической оценкой.

## **Выводы**

1. Изделия твердотельной СВЧ-электроники производства АО «НПП «Исток» им. Шокина», изготовленные по современным технологиям, в целом удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ЭКБ специального назначения

(в соответствии с комплексом государственных военных стандартов «Климат-7»).

2. Оценка фактической стойкости (предельной) требует проведения дополнительных определительных испытаний (если в этом есть необходимость).

3. Необходимо выработать подход, позволяющий сократить объём испытаний при проведении ОКР. С этой целью необходимо осуществить:

- выбор оптимального состава испытаний;
- развитие расчетно-экспериментальных методов оценки стойкости вновь разрабатываемых изделий с учетом накопленных экспериментальных данных;
- разработка методической базы. В настоящее время готовятся новые редакции СТО ТСО.04.05 СК-2016 «Система менеджмента качества. Методики расчетно-экспериментальных оценок стойкости изделий к воздействию специальных факторов на этапах выполнения ОКР» (взамен СТП 07622667.001-96) и «Расчетно-экспериментальные методы оценки стойкости монолитных интегральных схем к воздействию специальных факторов по ГОСТ РВ 20.39.414.2-98 (в дополнение к ГОСТ РВ 20.57.415 и ОСТ В 11 0627-88);
- переход на испытания тестовых схем типовых представителей действующих технологических процессов.

### Литература

1. Богданов Ю.М., Дудинов К.В., Крутов А.В., Полевич С.А. Радиационная стойкость МИС СВЧ производства «АО НПП «Исток» им. Шокина». *Тезисы докладов научно-технической конференции «СВЧ-электроника–2016»*, г. Фрязино, 18-19.05.2016 г. С.88.

2. РД В 319.03.31-99. Рациональный состав и последовательность испытаний на соответствие заданным требованиям по радиационной стойкости.

#### Для цитирования:

Кулиев М.В., Щербаков С.В. Исследование радиационных свойств монолитных интегральных схем СВЧ. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.2.7>