

# Метод оценки защитных свойств конструкционных материалов модулей СВЧ и стойкость модулей к воздействию ионизирующих излучений космического пространства

Анатолий ПЕТРОВ  
petrov-istok@yandex.ru  
Сергей ГАГАРИН

**В статье излагается метод расчета ослабления поглощенной дозы протонов из космического пространства конструкционными материалами модулей СВЧ и результаты экспериментальных исследований стойкости модулей СВЧ на арсенидгаллиевых полевых транзисторах с затворами на барьере Шоттки к воздействию ионизирующих излучений космического пространства. Показана высокая стойкость этих изделий, позволяющая использовать их при минимальной защите.**

Развитие техники космической связи, в частности, системы «Интернет», невозможно без использования в качестве среды передачи информации сверхвысоких частот (СВЧ). Поэтому с практической точки зрения важно исследование стойкости к воздействию ионизирующих излучений космического пространства (ИИКП) полупроводниковых модулей (ППМ), поскольку они выгодно отличаются от электровакуумных приборов массогабаритными и энергетическими характеристиками.

Кроме того, для решения задачи обеспечения работоспособности практический интерес имеет разработка методов оценки защитных свойств по отношению к воздействию ИИКП конструкционных материалов ППМ, так как для обеспечения функциональных характеристик разрабатываемых изделий в ряде случаев приходится применять комплектующие, стойкость которых к воздействию ИИКП меньше заданных в ТЗ на ОКР требований (например, транзисторы и микросхемы, изготавливаемые по МОП-технологии).

Естественные радиационные пояса Земли (ЕРПЗ) охватывают высоты от 300 до 20 000 км, то есть практически все орбиты искусственных спутников Земли. ИИКП ЕРПЗ состоит главным образом из двух составляющих: электронов с энергией до 3 МэВ и протонов с энергией до 900 МэВ. Обе эти составляющие обладают достаточно большой проникающей способностью, чтобы оказывать раз-

рушающее воздействие на полупроводниковые элементы аппаратуры спутников. В соответствии с принятыми международными стандартами уровни воздействия ИИКП характеризуются поглощенной дозой по кремнию (рад). Для разных орбит уровни воздействия будут различными.

Действующие НТД ограничивают область применения метода оценки поглощенных доз за защитой массовой толщиной, равной 0,8 г/см<sup>2</sup>, что для наиболее широко применяемого конструкционного материала корпусов модулей СВЧ — сплава Д16 — равняется 2,7 мм.

Для многофункциональных и конструктивно сложных модулей СВЧ в ряде случаев эти методы неприменимы, поскольку:

- массовые толщины защиты для внутренних элементов конструкций превышают верхнюю границу применимости рекомендуемого метода (типичные толщины корпусов ППМ СВЧ 4–5 мм);
- экстраполяция функциональных графических зависимостей коэффициентов ослабления уровней воздействия компонентов ИИ КП на массовые толщины, превышающие 0,8 г/см<sup>2</sup>, невозможна по причине нелинейности механизма потерь энергии одним из основных компонентов ИИ КП — протонами — при прохождении ими конструкционных материалов.

Типичные толщины корпусов модулей СВЧ обеспечивают эффективную защиту внутренних элементов от воздействия дозы электро-

нов. Поэтому практический интерес имеет разработка методов оценки поглощенной дозы протонов при массовой толщине защиты, превышающей 0,8 г/см<sup>2</sup>. В ряде случаев использование расчетных методов оценки защитных свойств конструкционных материалов является единственным способом подтверждения соответствия разработанного изделия требованиям ТЗ, так как испытания на моделирующих установках невозможны по техническим или финансовым причинам.

Воздействие протонов ИИКП в соответствии с НТД характеризуется такими параметрами, как поток протонов, воздействующий на внешнюю поверхность изделия за все время его активной эксплуатации в космосе,  $\Phi_p$ , протон/см<sup>2</sup>, спектр энергий протонов  $\Psi(E_p)$ , 1/МэВ, и поглощенная доза энергии протонов,  $D_p$ , рад, определяемая как:

$$D_p = \Phi_p \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \mu_{Si}(E_p) \Psi(E_p) dE_p, \quad (1)$$

где  $E_{\max}$  — верхняя граница спектра энергии протонов, МэВ;  $E_{\min}$  — нижняя граница спектра энергий протонов, МэВ;  $\mu_{Si}(E_p)$  — удельная поглощенная доза энергии протонов в кремнии, рад·см<sup>2</sup>/протон.

После прохождения потоком протонов  $\Phi_p$  слоя материала толщиной  $h$ , мм, за счет потерь ими энергии изменится его энергетический спектр (максимум и границы сдвинут-

ся в сторону меньших энергий). В результате поглощенная доза за защитой толщиной  $h$  станет равной  $D'_p$ :

$$D'_p = \Phi_p \int_{E'_{\min}}^{E'_{\max}} \mu_{Si}(E_p) \Psi(E'_p) dE_p, \quad (2)$$

где  $E'_{\max}$  и  $E'_{\min}$  — верхняя и нижняя границы спектра протонов за защитой, МэВ;  $E'$  — энергия протонов за защитой, которые на внешней поверхности защиты имели энергию, равную  $E$ , МэВ;  $\Psi(E'_p) = \Psi(E_p)$ .

Механизм потери энергии протонами ИИ КП в веществе — это упругое соударение с ядрами атомов вещества на фоне электрического взаимодействия протонов с этими ядрами [1, 2]. Поэтому потери энергии на единицу длины пробега пропорциональны плотности упаковки атомов рассматриваемого материала:

$$n_a = \rho \times N_A / M, \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность материала, г/см<sup>3</sup>;  $M$  — грамм-моль материала;  $N_A = 6,02 \times 10^{23}$  — число Авогадро, а также и потерям энергии протоном с данной энергией  $E_p$  в единичном акте упругого соударения:

$$\Delta E_p = 4ME_p / (M+1)^2, \quad (4)$$

где в данном случае  $M$  — масса ядра атома материала в атомных единицах массы (а.е.м.), а также функции зарядового взаимодействия:

$$f_z \sim Z^{\alpha(E_p)}, \quad (5)$$

где  $Z$  — заряд ядра материала;  $\alpha(E_p)$  — показатель степенной зависимости зарядового взаимодействия от энергии протонов. Регрессионная обработка приведенных НТД функциональных зависимостей удельных поглощенных доз для кремния и германия позволила определить вид  $\alpha(E_p)$  в диапазоне энергий от 0,1 до 1000 МэВ:

$$\alpha(E_p) = -0,036[\lg(E_p)]^2 + 0,229\lg(E_p) - 0,403. \quad (6)$$

Следовательно, энергия протонов  $E'_p$ , имевших энергию  $E_p$ , после прохождения ими слоя материала  $h$ , если воспользоваться приведенной в НТД зависимостью  $\mu_{Si}(E_p)$ , определяется путем решения числовыми методами следующего уравнения:

$$E'_p = E_p - 6,25 \times 10^7 \times \rho / \rho_{Si} \times [(M_{Si} + 1) / (M + 1)]^2 \times \int_0^h \mu_{Si}(E'_p) (Z/Z_{Si})^{\alpha(E)} dh, \quad (7)$$

где  $6,25 \times 10^7$  МэВ/(г·рад) — коэффициент перевода дозы в количество поглощенной энергии 1 г материала.

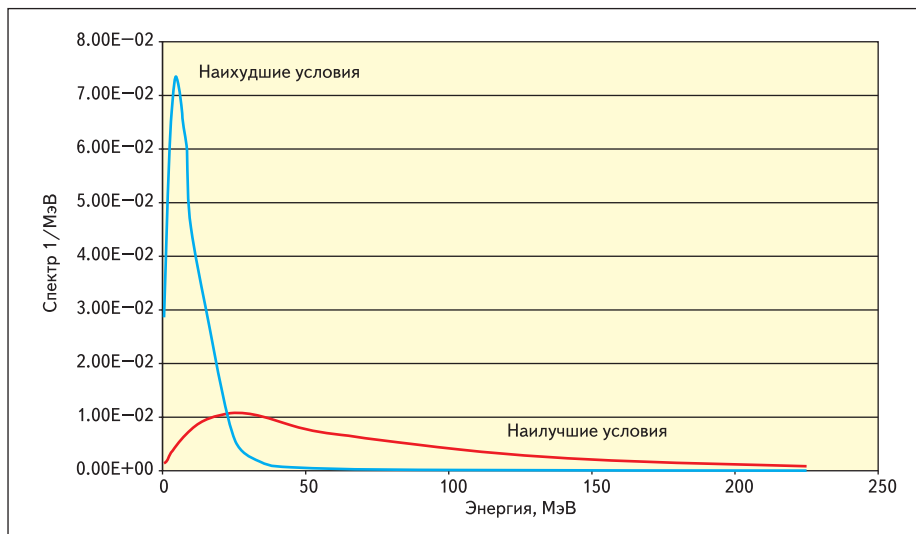


Рис. 1. Дифференциальные спектры протонов ЕРПЗ для различных условий эксплуатации

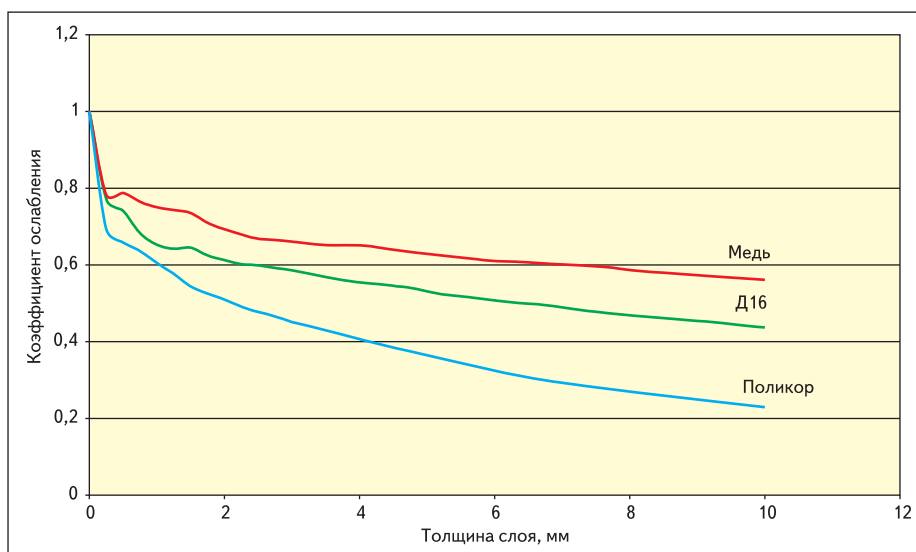


Рис. 2. Ослабление дозы протонов в наилучших условиях эксплуатации

Зависимости коэффициентов ослабления поглощенной дозы протонов ИИ КП от толщины защиты для некоторых типичных энергетических спектров, приведенных на рис. 1, рассчитанные по формуле:

$$k = D'_p / D_p \quad (8)$$

для ряда материалов, применяемых в конструкциях модулей СВЧ, приведены на рис. 2 и 3.

В настоящее время наиболее распространенными являются полупроводниковые модули СВЧ на основе арсенидгалиевых полевых транзисторов с затворами на барьерах Шоттки (ПТШ), охватывающих частотный диапазон от 1 до 20 ГГц. Экспериментально была исследована стойкость к воздействию ИИ КП модулей 3 типов:

1. усилитель мощности, имеющий коэффициент усиления в диапазоне частот от 1 до 2 ГГц не менее 40 дБ и выходную мощность не менее 0,7 Вт;

2. бескорпусная микросхема — усилитель бегущей волны, имеющая рабочий диапазон частот от 1 до 14 ГГц;

3. бескорпусная генераторная микросхема, используемая в генераторах X-диапазона частот.

Транзисторы усилителя мощности и микросхем изготовлены на основе идентичных эпитаксиальных арсенидгалиевых структур типа САГ-МК-60-0,15-0,2(5-17).

Модули облучались в пассивном режиме последовательно электронами с энергией 7 МэВ на установке «Электроника У-003» НИИ приборов, затем протонами с энергией 21 МэВ на установке И-2 Института теоретической и экспериментальной физики. После каждого этапа облучения проводился замер их выходных параметров, испытания на воздействия механических нагрузок и климатических факторов с последующим замером выходных параметров. Приведем результаты исследований.

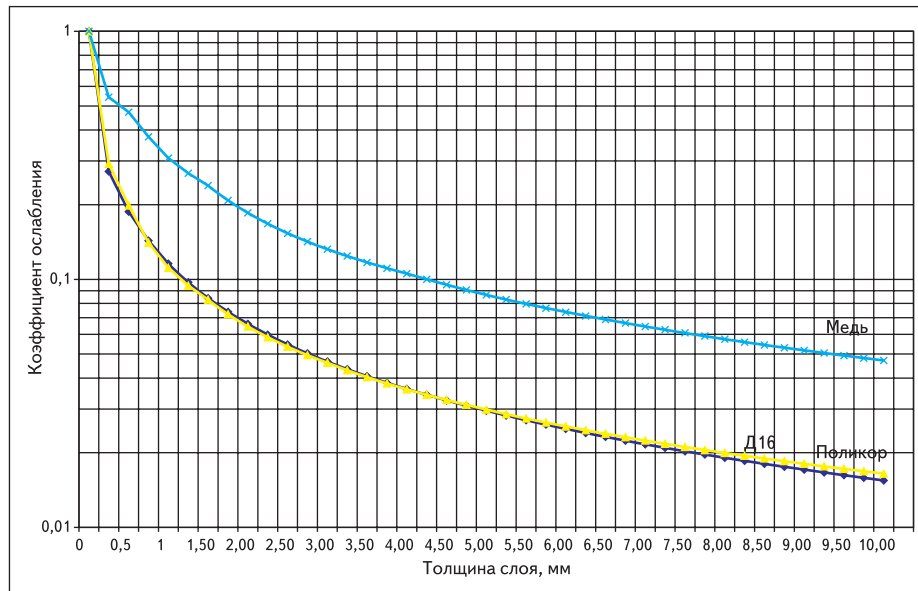


Рис. 3. Ослабление дозы протонов в наихудших условиях эксплуатации

Таблица 1. Электрические параметры модуля — усилителя мощности

Поглощенная доза, Мрад	После облучения			После воздействия механических нагрузок и климатических факторов		
	$P_{\text{вых}}$ Вт	$K_{\text{уст}}$ дБ	$I_{\text{потр}}$ А	$P_{\text{вых}}$ Вт	$K_{\text{уст}}$ дБ	$I_{\text{потр}}$ А
2	1,55	41,0–42,3	0,9	1,55	41,0–42,1	0,9
7	1,65	41,0–42,0	0,9	1,65	41,0–42,0	0,9
67	1,50	42,0–43,0	0,9	1,55	42,2–43,1	0,9
117	1,50	42,0–43,4	0,9	1,50	42,0–43,4	0,9

### 1. Модуль — усилитель мощности

Измерялись следующие параметры:

- выходная мощность при входной мощности 300 мкВт;
  - коэффициент усиления в рабочем диапазоне частот;
  - потребляемый ток.
- Механические нагрузки со следующими характеристиками:
- одиночный удар с ускорением 20 g, длительностью 0,5–2 мс, по 3 удара в каждом из двух положений;
  - многократные удары с ускорением 15 g, длительностью 2–5 мс, по 1000 ударов в каждом из двух положений;
  - широкополосная случайная вибрация в диапазоне частот 10–2000 Гц в двух положениях, по 6 часов в каждом.
- Климатические воздействия:
- циклическая смена температур среды в режиме –60 °С в течение 30 мин, +85 °С в течение 30 мин, 5 циклов;

- влагоустойчивость в режиме: температура среды +35 °С, относительная влажность 98%, выдержка 7 суток.

Результаты замера параметров приведены в таблице 1.

Усилитель мощности имеет дюралевый корпус с минимальной толщиной 2,5 мм, который является эффективной защитой для расположенных внутри транзисторов от воздействия ИИ КП: он полностью поглощает электроны ЕРПЗ и примерно в 10 раз снижает уровень воздействия протонов ЕРПЗ (как показывают расчеты по выше приведенной методике для наихудшего варианта воздействия), что и обеспечивает стойкость модуля на уровне 100 Мрад.

### 2. Модуль — усилитель бегущей волны

Измерялись следующие параметры:

- выходная мощность при входной мощности 80 мВт на частоте 7,2 ГГц;
- потребляемый ток.

Таблица 2. Электрические параметры модуля — усилителя бегущей волны

Поглощенная доза, Мрад	После облучения		После воздействия механических нагрузок и климатических факторов	
	$P_{\text{вых}}$ мВт $55 \leq P_{\text{вых}} \leq 80$	$I_{\text{потр}}$ мА $I_{\text{потр}} \leq 220$	$P_{\text{вых}}$ мВт $55 \leq P_{\text{вых}} \leq 80$	$I_{\text{потр}}$ мА $I_{\text{потр}} \leq 220$
2	59–65	120–155	59–64	115–150
7	52–61	115–150	57–62	115–150
67	25–39	90–110	24–38	90–110
72	25–38	90–110	24–39	85–110

Таблица 3. Электрические параметры модуля — генераторной микросхемы

Поглощенная доза, Мрад	После облучения		После воздействия механических нагрузок и климатических факторов	
	$P_{\text{вых}}$ мВт $P_{\text{вых}} > 25$	$I_{\text{потр}}$ мА $I_{\text{потр}} < 70$	$P_{\text{вых}}$ мВт $P_{\text{вых}} > 25$	$I_{\text{потр}}$ мА $I_{\text{потр}} < 70$
2,4	36,8–41,7	36–40	34,9–41,1	36–40
7,4	29	33–38	29–33	33–38
9,4	26,6–35,3	32–37	25,6–30,6	31,5–36
14,4	18,6–20,8	25–29	–	–

Механические нагрузки и климатические воздействия были следующие:

- одиночные удары с ускорением 400 g, длительностью 0,1–2 мс, по 3 удара в каждом из двух положений;
  - смена температур от –60 до +85 °С с выдержкой при каждой температуре в течение 30 мин, количество циклов 5.
- Результаты замера параметров приведены в таблице 2.

### 3. Модуль — генераторная микросхема

Измерялись следующие параметры:

- выходная мощность в диапазоне частот 9–10 ГГц;
  - потребляемый ток.
- Механические нагрузки и климатические воздействия были следующие:
- одиночные удары с ускорением 400 g, длительностью 0,1–2 мс, по 3 удара в каждом из двух положений;
  - смена температур от –60 до +85 °С с выдержкой при каждой температуре в течение 30 мин, количество циклов 5.
- Результаты замера параметров приведены в таблице 3.

Испытания бескорпусных микросхем позволили определить предельно допустимый уровень воздействия ИИ КП для этих структур, равный примерно 10 Мрад. Превышение этого уровня приводит к необратимым параметрическим отказам модулей.

### Заключение

Предложенный метод расчета ослабления поглощенной дозы протонов ИИ КП могут использоваться разработчиками модулей СВЧ на этапе эскизного проектирования ОКР как для выбора полупроводниковых комплектующих элементов, так и при конструкторской разработке изделий, предназначенных для применения в космической аппаратуре. Определена фактическая стойкость ППМ СВЧ к воздействию ИИ КП. ■

### Литература

1. Радиационная стойкость материалов радиотехнических конструкций. Справочник / Под ред. Н. А. Сидорова и В. К. Князева. М.: Советское радио. 1976.
2. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. академика И. К. Кикоина. М.: Атомиздат. 1976.