

ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ПОГЛОЩЕННЫХ ДОЗ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ ALGAN/GAN И INALN/GAN ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ПОТОКОВ РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ ЗЕМЛИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАНОСПУТНИКА

С.В. Цаплин, С.А. Большев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

tsaplin56@yandex.ru, bolichev.sa@ssau.ru

Малые космические аппараты (МКА) функционируют в условиях воздействия потоков электронов и ионов в широком диапазоне энергий (0.001 – 10⁵ МэВ) солнечной, космической радиации входящих в состав радиационных поясов Земли (РПЗ), солнечных космических лучей (СКЛ) и галактических космических лучей (ГКЛ), которые относят к основным составляющим ионизирующего излучения (ИИ) космического пространства (КП), или космической радиации, которая является одной из главных причин возникновения отказов в работе блоков радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) КА и уменьшения сроков активного существования аппаратов [1, 2].

Безотказность элементной базы, радиоэлектронной бортовой аппаратуры, определяет гарантийный срок службы КА [1-5]. Известно, что в околоземном пространстве МКА подвергается воздействию ионизирующего излучения (ИИ) на бортовую радиоэлектронную аппаратуру вследствие ионизационных и ядерных потерь энергии первичных и вторичных частиц в чувствительных элементах наблюдаются различные сбои и отказы. Радиационная стойкость бортовой аппаратуры оценивается по величине поглощенной дозы.

В работах [6-8] проведено физико-математическое моделирование для исследования влияния ионизирующего, тормозного излучений на функционирование бортовой аппаратуры наноспутника SamSat – ION. Приводится сравнительный анализ результатов расчета удельных ионизационных, радиационных потерь энергии протонов (от 0.1 до 400 МэВ) и электронов (от 0.04 до 7 МэВ), а также их длины пробега в алюминии, полученные по формулам различных авторов, а также из базы данных материалов Национального института стандартов и технологий. По результатам анализа вычисляется годовая доза в алюминиевой конструкции наноспутника находящейся на круговой солнечно-синхронной орбите (ССО). В основе всех расчетов используются данные энергетических спектров протонов и электронов ССО приведенные в информационной системе Spenvis (Европейское космическое агентство). Получены результаты расчета интегральных потоков в алюминии при воздействии протонов и электронов ССО на орбите 510 км, с наклоном 97.447°, периодом обращения – 94.74 мин и апоцентром – 516.2 км для различных толщин (0,5–1,5 мм) и показана доля прошедших частиц в приближении однослойной стопы [6]. Проведена оценка радиационной стойкости с помощью физико-математического моделирования в модельном приближении: однослойной стопы защитного стекла К–208 фотоэлектрического преобразователя и SiO₂ толщиной 100–500 мкм с учетом их химического состава в соответствии с ОСТ 3-3677-82 [8]; двухслойной стопы радиоэлектронных элементов ISL70321SEN, ISL73321SEN и Virtex - 4QV, Virtex -5QV за алюминиевой защитой для изучения влияния орбитального ионизирующего излучения круговой ССО на радиационную стойкость в составе бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) наноспутника в условиях эксплуатации [7].

В настоящей работе продолжены исследования по изучению влияния орбитального ионизирующего излучения круговой ССО на радиационную стойкость в гетероструктурах AlGaIn/GaN и InAlIn/GaN (рисунок 1 – модель гетероструктур) в модельном приближении «Стопа».

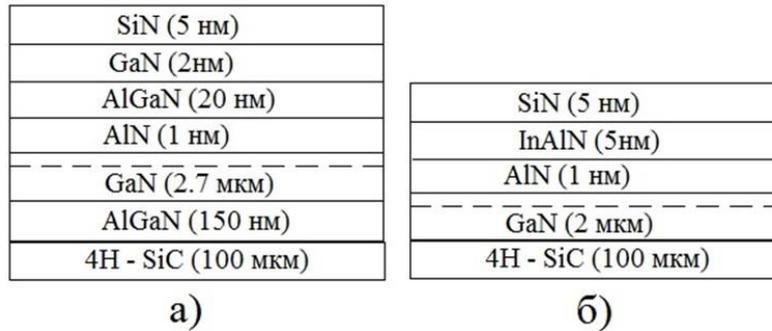


Рисунок 1 – Модель гетероструктур: а) AlGaIn/GaN; б) InAlIn/GaN

Для определения и расчета поглощенной дозы в каждом n слое в модельном приближении «Стопа» запишем интегральные потоки протонов и электронов [6]:

В первом слое

$$\Phi_1(z, E_i) = \Phi_0(z, E_i) \exp\left[-\frac{z}{R_1(E_i)}\right], \quad z \in (0, h_1) \text{ для } \forall E_i, \quad (1)$$

где E_i – энергия, $\Phi_0(0, E_i)$ – поток протонов и электронов на ССО соответственно, $R_1(E_i)$ – длина пробега протонов и электронов в первом слое; h_1 – толщина первого слоя; i – p (протон), e (электрон) соответственно.

Во втором слое

$$\Phi(z, E_i) = \Phi(E_i) \cdot \exp\left[-\frac{h_1}{R_1(E_i)}\right] \cdot \exp\left[-\frac{z}{R_2(E_i)}\right], \quad z \in (h_1, h_2), \text{ для } \forall E_i, \quad (2)$$

где $R_2(E_i)$ – длина пробега протонов и электронов во втором слое, h_2 – толщина второго слоя.

В k-ом слое

$$\Phi(z, E_i) = \Phi(E_i) \cdot \prod_{k=1}^n \exp\left[-\frac{z}{R_k(E_i)}\right], \quad z \in (h_k, h_{k+1}), \text{ для } \forall E_i. \quad (3)$$

где $R_{Al}(E_e)$ – длина пробега протонов и электронов в k-ом слое, h_{Al} – толщина k слоя.

Для определения поглощенной дозы в каждом k-ом слое в соответствии с фундаментальными законами взаимодействия ионизационных потоков (протонов, электронов) с веществом определим в виде [6-8].

$$D(E_i, \delta) = B \int_{E_{min}}^{E_i} \frac{dN}{dE} \cdot \frac{dE'}{dx} dE', \quad \text{Гр}, \quad (4)$$

где δ – толщина слоя материала; D – величина поглощенной дозы, Гр; dN/dE_p и dN/dE_e – дифференциальные энергетические спектры, протонов и электронов соответственно; dE'/dx – ионизационные потери протонов в веществе защиты, $\text{МэВ} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{см}^2$; B – коэффициент перехода от поглощенной энергии к дозе, равный $B = 1.6 \cdot 10^{-10}$ Гр МэВ^{-1} г; E' – энергия протонов на глубине

материала δ , связанная с энергией протонов, падающих на поверхность материала с энергией E , соотношением «пробег-энергия»

$$R(E') = R(E) + \delta$$

где $R(E')$ и $R(E)$ — пробеги протонов с энергиями E' и E , соответственно, в веществе защиты.

Задача определения поглощенной дозы в k -ом слое (3) многослойной системы свелась к определению: дифференциального, интегрального потоков, ионизационных потерь, длины пробега протонов и электронов, соответственно, за защитой из алюминия (толщина 1,5 мм и 3 мм) в гетероструктурах AlGaIn/GaN, InAlIn/GaN, соответственно. Получены результаты решения задачи по определению поглощенных доз в графическом и табличном виде.

Таблица 1. Максимальная поглощенная доза в алюминии толщиной 1,5 мм, гетероструктуре AlGaIn/GaN и подложке карбида кремния.

Параметры	Максимальная поглощенная доза: протонов, рад; электронов 10^{-3} рад							
	<i>Al</i>	<i>SiN</i>	<i>GaN</i>	<i>AlGaIn</i>	<i>AlN</i>	<i>GaN_2</i>	<i>AlGaIn_2</i>	<i>4H-SiC</i>
ИИ (поток протонов)	95,62	71,03	57,51	59,52	52,22	57,54	59,45	71,15
ИИ (поток электронов)	2,953	2,349	2,327	2,253	2,212	2,327	2,242	1,418
Суммарная поглощенная доза	3,049	2,42	2,385	2,313	2,264	2,385	2,301	1,489

Таблица 2. Максимальная поглощенная доза в алюминии толщиной 3 мм, гетероструктуре InAlIn/GaN и подложке карбида кремния.

Параметры	Максимальная поглощенная доза: протонов; электронов, рад					
	<i>Al</i>	<i>SiN</i>	<i>InAlIn</i>	<i>AlN</i>	<i>GaN</i>	<i>4H-SiC</i>
ИИ (поток протонов)	77,72	54,87	48,94	40,4	44,78	54,65
ИИ (поток электронов)	758,34	881,49	841,58	830,0	873,39	533,92
Суммарная поглощенная доза	836,06	936,36	890,52	870,4	918,17	588,57

Был проведен сравнительный анализ полученных результатов в модельном приближении «Стопа» с результатами поглощенных доз p /электронных элементов (МОП, КМОП и ИМС) выполненных по различным технологиям [5]. Установлено, что максимальная суммарная поглощенная доза гетероструктуры (2420 рад) не входят в область начальной и сильной стадии деградации. Задача оценки p /стойкости (поглощенная доза) проводилась без расчета: – предельно допустимой накопленной дозы и расчета коэффициента запаса (КЗ); – вероятности возникновения одиночных сбоев и катастрофических отказов за время работы БРЭА. Для защиты от одиночных сбоев в гетероструктурах AlGaIn/GaN, InAlIn/GaN от высокоэнергетического ионизирующего излучения необходимо использовать стандартные методы, основанные на локальном способе защиты с учетом различных эффектов в полупроводниковых структурах.

Работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России.

Список литературы:

1. Кузнецов Н.В., Панасюк М.И. Космическая радиация и прогнозирование сбое- и отказоустойчивость интегральных микросхем в бортовой аппаратуре космического аппаратов. Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2001. Вып. 1 - 2. С. 3-8.
2. Исследование свойств радиоэлектронных элементов при воздействии ионизационного потока: учеб. пособие / С.В. Цаплин, С.В. Тюлевин, М.Н. Пиганов [и др.] Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. 180 с.
3. Гулько О.Е. Механизмы отказов КМОП ИС при воздействии ионизирующих частиц космического излучения. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2005. Вып. 1 –2. С. 80-83.
4. Ионизирующее излучение космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / В.С. Анашин, И.И. Алексеев, В.В. Бодин [и др.]. Изд-во Физматлит, 2013. 358 с.
5. Зебрев Г.И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. Москва, МИФИ. 2010. 148 с.
6. Цаплин С.В., Большев С.А. «Оценка и анализ влияния ионизирующего излучения на функционирование бортовой радиоэлектронной аппаратуры наноспутника» // Вестник Самарского университета Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 3. С. 77-96. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-3-77-96.
7. Цаплин С.В., Большев С.А. Оценка и анализ радиационной стойкости радиоэлектронных элементов на кремниевой основе бортовой аппаратуры наноспутника при воздействии ионизирующего излучения солнечно-синхронной орбиты. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №7. DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.3>.
8. Цаплин С.В., Большев С.А. Оценка поглощаемой дозы в защитном стекле при воздействии потоков ионизирующего излучения. Химия высоких энергий, 2022, Т. 56, № 1, С. 50-58. DOI: 10.31857/S0023119322010132.