

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.8>

УДК: 538.97; 621.382

ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ПОГЛОЩЁННОЙ ДОЗЫ В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ AlGaN/GaN ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ПОТОКОВ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЗЕМЛИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАНОСПУТНИКА

С.В. Цаплин, С.А. Большев

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева
443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

Статья поступила в редакцию 17 октября 2023 г.

Аннотация. В рамках подготовки проведения натурного эксперимента проводятся исследования с помощью физико-математического моделирования в модельном приближении «Стопа» для изучения влияния ионизирующего излучения в энергетическом диапазоне протонов (от 0,1 до 400 МэВ) и электронов (от 0,04 до 7 МэВ) круговой солнечно-синхронной орбиты на радиационную стойкость гетероструктуры AlGaN/GaN в составе бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) наноспутника в условиях эксплуатации. В основе всех расчётов используются данные энергетических спектров протонов и электронов солнечно-синхронной орбите (ССО) приведённые в информационной системе Spenvis (Европейское космическое агентство). Получены результаты расчёта интегральных потоков, поглощённых доз в алюминии, гетероструктуре. Проведена оценка и анализ радиационной стойкости гетероструктуры при воздействии низко- и высокоэнергетических ионизирующих частиц ССО и их возможность функционирования в течение года.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, поглощённая доза, радиационные пояса Земли, радиационная защита, радиоэлектронные элементы, гетероструктуры, бортовая аппаратура, малые космические аппараты.

Финансирование: Работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Министерству науки и высшего образования РФ.

Автор для переписки: Цаплин Сергей Васильевич, tsaplin56@yandex.ru

Введение

Известно, что в околоземном пространстве малые космические аппараты (МКА) функционируют в условиях воздействия ионизирующего излучения (ИИ) радиационных поясов Земли (РПЗ). Поток электронов, протонов и ионов в широком диапазоне энергий (0,001 – 400 МэВ) является основной причиной сбоев и отказов бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА), что приводит к сокращению сроков активного существования аппаратов [1-4]. Безотказность элементной базы определяет гарантийный срок службы МКА на околоземной орбите [2, 5] и зависит от выбора условий эксплуатации, применения радиационно-стойких электронных компонентов в составе БРЭА и методики испытания, прогнозирования радиационной стойкости [5, 6].

На этапе проектирования и разработки БРЭА важно оценить возможности радиационной защиты для обеспечения гарантированного функционирования МКА. Возможность радиационной защиты определяется величиной поглощённой дозы ИИ, которая определяется с помощью: физико-математического моделирования; экспериментальных исследований (лабораторные, ресурсные испытания) на основе фундаментальных знаний о взаимодействии ИП с радиоэлектронными элементами БРЭА в соответствии с условиями эксплуатации наноспутника SamSat-ION.

В настоящее время проводятся работы по созданию БРЭА для изучения ионосферы Земли при условиях эксплуатации на круговой ССО на высоте

510 км, с наклоном $97,447^\circ$, периодом обращения – 94,74 мин и апоцентром – 516,2 км. Этот спутник относится к научно-образовательным космическим аппаратам нанокласса и предназначен для изучения ионосферы Земли.

В работах [7-9] приводятся результаты физико-математического моделирования по исследованию влияния ионизирующего, тормозного излучений на функционирование БРЭА SamSat-ION. Приводится сравнительный анализ результатов расчёта 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 алюминиевой защите, полученные по формулам различных авторов, а также из базы данных материалов Национального института стандартов и технологий [10]. В качестве защиты от ИИ используется алюминий, который является конструктивным материалом SamSat-ION. В основе всех расчётов используются данные энергетических спектров протонов и электронов ССО приведённые в информационной системе Spenvis (Европейское космическое агентство) [11].

Для дальнейшего изложения введём понятие «Стопа» – многослойная система с произвольным числом слоёв, для которой известны: толщина, плотность, ионизационный потенциал, физико-химические свойства для каждого слоя. Слой по химическому составу может быть однокомпонентным или многокомпонентным. В каждом слое взаимодействие потоков протонов, ионов, электронов с материалом слоя описывается классическими фундаментальными законами физики.

В работах [7-9] получены:

– результаты расчетов длины пробега; доля прошедших ИИ потоков протонов, электронов, поглощённая доза в алюминии различной толщины (0,5; 1; 1,5 мм) в модельном приближении однослойной стопы; в радиационно-стойком стекле К-208 (ОСТ 3-3677-82) в приближении двухслойной стопы. Также были вычислены ионизационные и радиационные потери для защитного стекла К-208 и SiO_2 , вычислялась годовая поглощаемая доза по эмпирическим формулам. Проведён сравнительный анализ результатов расчёта для защитного стекла К-

208 и SiO_2 . Показано, что длина пробега, поглощаемая доза протонов, электронов в стекле К-208 и SiO_2 отличаются на менее чем 1 %;

– результаты расчётов удельных ионизационных потерь (УИП) и длина пробега протонов в области энергий 0,1–1 МэВ в алюминии сравнивались с данными, рассчитанными с помощью программы Shieldose [13]. Установлено, что есть различие: УИП (max отклонение 47 % при энергии протонов 0,1 МэВ, далее по логарифмической зависимости уменьшаются до энергии 1 МэВ); длины свободного пробега (max отклонение 64 % при энергии протонов 0,1 МэВ, далее аналогичным образом различие уменьшается. По-видимому, это различие связано с ограниченностью применения формулы Бете-Блоха для тяжёлых частиц в области малых энергий, в этой области энергий применяются эмпирические выражения, приведённые в работе [12]. Среднеквадратичное отклонение (СКО) длины пробега протонов в алюминии для диапазона энергий 1 - 400 МэВ составляет 0,017.

– результаты расчёта УИП электронов в алюминии и сравнение с расчётами и экспериментальными данными других авторов приведено в работе [7]. Наилучшее совпадение с экспериментальными данными показывает расчёт по данным в [14], СКО в данном случае составляет 0,01. Для [12] СКО составляет 0,174, а для [15] – 0,05.

– результаты расчёта радиационных потерь электронов в алюминии и сравнение с расчётами по формулам других авторов и экспериментальными данными приведено в работе [7]. Наилучшее совпадение с экспериментальными данными [16], СКО здесь составляет 0.003, для [15] СКО – 0.008. В [7] показано сравнение результатов расчёта длины пробега электронов в алюминии с экспериментальными данными, СКО в этом случае составило 0,1. Приводится сравнительный анализ результатов расчётов и данных базы NIST. Для ионизационных, радиационных потерь, длины пробега частиц наблюдается хорошее совпадение в области энергий для протонов больше 1 МэВ, для электронов – 0,04 МэВ, соответственно. В области малых энергий (протоны меньше 1 МэВ, электроны – 0,04 МэВ, соответственно) наблюдаются

отклонения, что связано с упомянутой выше ограниченностью применения формулы Бете-Блоха в области малых энергий. Вычислялась годовая суммарная поглощённая доза в алюминии для различных толщин (0,5; 1; 1,5 мм) при воздействии ИИ потоков протонов, электронов и тормозного излучения в приближении однослойной стопы. Показано, что вклад тормозного излучения в суммарную дозу мал. Суммарная поглощённая доза в основном создаётся потоком электронов ИИ ССО.

– В работах [7, 9] вычислялись доли прошедших ИИ потоков протонов, электронов круговой ССО, поглощённая доза в алюминиевой конструкции наноспутника SamSat-ION для различных толщин (0,5; 1; 1,5 мм) в приближении однослойной стопы. Несмотря на различие в области малых энергий протонов для расчёта УИП, длин свободного пробега, поглощённых были использованы эмпирические формулы работы [12] в работах [7-9];

– проведена оценка радиационной стойкости радиоэлектронных элементов ISL70321SEH, ISL73321SEH и Virtex-4QV, Virtex-5QV, входящих в состав блоков БРЭА SamSat-ION и возможности её функционирования в течение года [9]. В области больших энергий результаты расчёта годовой дозы, длины пробега совпадают с результатами расчёта программы Shieldose и не превышают 1,8% для протонов и менее 1% для электронов. Алюминий толщиной $1 \div 1,5$ мм может быть использован в качестве конструкционного материала для защиты БРЭА от воздействия ИИ орбитальных потоков протонов и электронов круговой ССО в области малых энергий;

– рекомендации для защиты радиоэлектронных элементов БРЭА от высокоэнергетического ионизирующего излучения заключаются в том, что необходимо использовать стандартные методы, основанные на локальной защите для обеспечения гарантированных режимов эксплуатации наноспутника на круговой ССО в течение года.

Известно, что основным физическим процессом при воздействии протонного, электронного и гамма-излучения на классические полевые транзисторы с диэлектрической изоляцией затвора является накопление заряда в

слоях диэлектрика. На транзисторы с затвором Шоттки (ПТШ) сильнее влияет изменение концентрации и подвижности электронов, происходящее из-за возникновения радиационных дефектов [17, 18].

Структурные изменения в основном связаны с образованием дефектов в кристаллической решетке, служащих центром захвата, рассеяния и рекомбинации носителей заряда, и являются критическими для приборов, управляемых током, таких как биполярные транзисторы. Ионизационные эффекты заключаются в генерации избыточных носителей заряда, приводящих к смещению электрических потенциалов в полупроводниках, и к ним чувствительны полевые транзисторы, МДП- и МОП-структуры. В настоящее время технологии изготовления интегральных (ИМС), монокристаллических микроволновых интегральных схем (ММИС), МДП- и МОП-структур постоянно развивается и совершенствуется для обеспечения надёжной работы БРЭА в условиях длительной эксплуатации на околоземных орбитах и полётах в межпланетном пространстве.

Классическими полупроводниковыми структурами для мощных СВЧ на основе НЕМТ технологии являются структуры GaAlAs/GaInAs и InAlAs/InGaAs. В указанных структурах часто используют дельта-легированные слои – внедрение тонкого легированного слоя в полупроводниковые кристаллы, выращенные эпитаксиальными методами, т.е. сверхтонкие (~ 1 нм) слои с концентрацией доноров более 10^{12} см⁻², а также слои узкозонных материалов, в которых формируется квантовая яма, содержащая двумерный электронный газ с высокой подвижностью электронов [19]. В технологии НЕМТ высокая подвижность электронов в структуре НЕМТ обеспечивается результатом комбинации легированного широкозонного полупроводника и нелегированного полупроводника с узкой запрещенной зоной. Структура двух материалов с разной шириной запрещенной зоны образует гетеропереход с легированной зоной канала. В этой же работе проводится сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования InAlAs/InGaAs-транзистора с каналом толщиной 15 нм и затвором длиной

100 нм, а также AlGaAs/InGaAs-транзистора с каналом толщиной 14 нм и затвором длиной 250 нм [19]. В первом случае в структуре транзистора использовался δ -слой, во втором – градиентное легирование в слое AlGaAs. Вычислялись вольтамперные и вольт-фарадные характеристики тестовых элементов. Экспериментальная часть работы проводилась с целью определения вольтамперных и вольт-фарадных характеристик специальных тестовых диодов Шоттки большой площади и транзисторов с затвором Шоттки КВЧ-диапазона. Радиационное воздействие моделировалось с помощью введения зависимостей концентрации легирующей примеси и подвижности электронов от флюенса облучения [20]. Известно, что для тонких образцов в условиях однородного энергоснабжения поглощённая доза электронного или протонного излучения определяется по формуле $D_{p(e)} = 1,6 \cdot 10^{-13} (dE/dx) \cdot \Phi_{flu p(e)}$, где $D_{p(e)}$ – поглощённая доза протонного (электронного) излучения; dE/dx – ионизационные потери энергии электрона или протона; z – толщина образца; $\Phi_{flu p(e)}$ – флюенс потока протонов или электронов [21].

В рамках подготовки проведения натурального эксперимента на околоземной орбите в настоящей работе проводятся исследования с помощью физико-математического моделирования в модельном приближении «Стопа» изучение влияния ионизирующего излучения ССО на радиационную стойкость гетероструктур AlGaN/GaN и InAlN/GaN в составе бортовой аппаратуры наноспутника в условиях эксплуатации.

Выбор круговой ССО обусловлен тем, что наноспутник при движении по орбите в основном будет находиться под естественным радиационным поясом Земли (ЕРПЗ) и хорошо защищён от солнечных космических лучей (СКЛ) геомагнитным полем.

1. Постановка задачи

Конструкция наноспутника массогабаритными размерами соответствующему стандарту CubeSat 3U выполнена из алюминиевого материала толщиной 1,5 мм. Известно, что для определения и расчёта

поглощённой дозы в материале используются данные ионизационных потерь, которые рассчитываются с помощью формулы Бете-Блоха – формула для удельной ионизационной потери энергии при прохождении заряженных частиц: протонов, электронов через вещество [14, 15] и её модификации [12] для однородного, многокомпонентного по химическому составу слоя [22].

За алюминиевой защитой конструкционного материала наноспутника расположена в гетероструктура AlGaIn/GaN (рис. 1). Для определения радиационной стойкости гетероструктуры определим: ионизационные потери, длину пробега, интегральный поток, годовую поглощаемую дозу в каждом слое гетероструктуры в модельном приближении «Стопа» в условиях эксплуатации наноспутника на круговой ССО: на высоте 510 км, с наклоном 97,447°, периодом обращения – 94,74 мин и апоцентром – 516,2 км при воздействии ИИ потоков протонов, электронов. В качестве исходных данных орбитальных потоков ИИ в энергетическом диапазоне протонов (от 0,1 до 400 МэВ) и электронов (от 0,04 до 7 МэВ) будут использованы данные информационной системы Spenvis (Европейское космическое агентство) [11]. В нашем представлении гетероструктура AlGaIn/GaN – многослойная система, содержащая различные структурные элементы [23], в которой известны: толщина, плотность, ионизационный потенциал, физико-химические свойства для каждого слоя. Слой по химическому составу может быть однокомпонентный (Al) или многокомпонентный (AlGaIn/GaN).

SiN (5 нм)
GaN (2нм)
AlGaIn (20 нм)
AlN (1 нм)

GaN (2.7 мкм)
AlGaIn (150 нм)
4H - SiC (100 мкм)

Рис. 1. Модель гетероструктуры AlGaIn/GaN [23] (пунктир – область двумерного электронного газа с высокой подвижностью электронов).

В каждом слое взаимодействие потоков протонов, ионов, электронов с материалом слоя описывается классическими фундаментальными законами

физики. Задача определения поглощённой дозы в гетероструктуре за алюминиевой защитой толщиной 1,5 мм свелась к её решению в модельном приближении «Стопа».

2. Модель «Стопа»

Рассмотрим многослойную систему содержащую произвольное число n слоёв с известными физико-химическими свойствами (рис. 1). Пусть на внешнюю алюминиевую (толщина 1,5 мм) конструкцию наноспутника воздействуют ионизационные потоки частиц с известными энергетическими спектрами круговой ССО, которые определялись с помощью информационной системы Spenvis Европейского космического агентства (ЕКА) [13]. Энергетические спектры протонов и электронов на ССО приведены на рис. 2.

При этом годовой флюенс протонов находится в интервале от 10^7 до $2,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, а электронов – от $6 \cdot 10^5$ до $5,3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Соответствующие распределения потоков частиц по энергиям представлены на рис. 3.

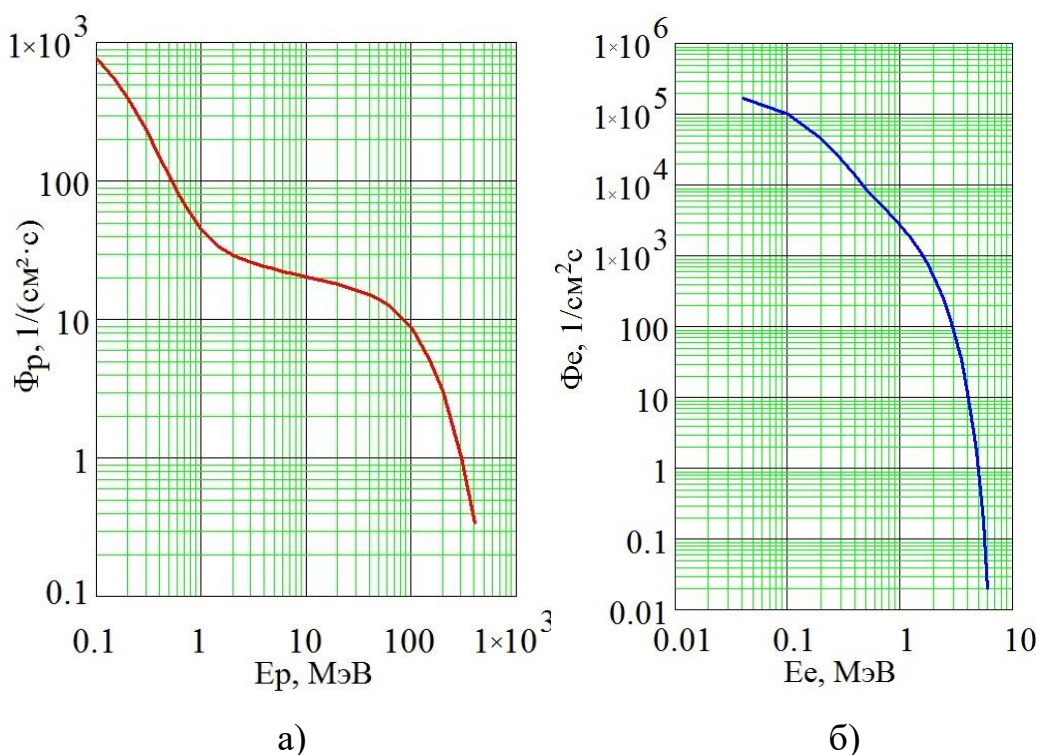


Рис. 2. Интегральные потоки ССО: а) протонов и б) электронов.

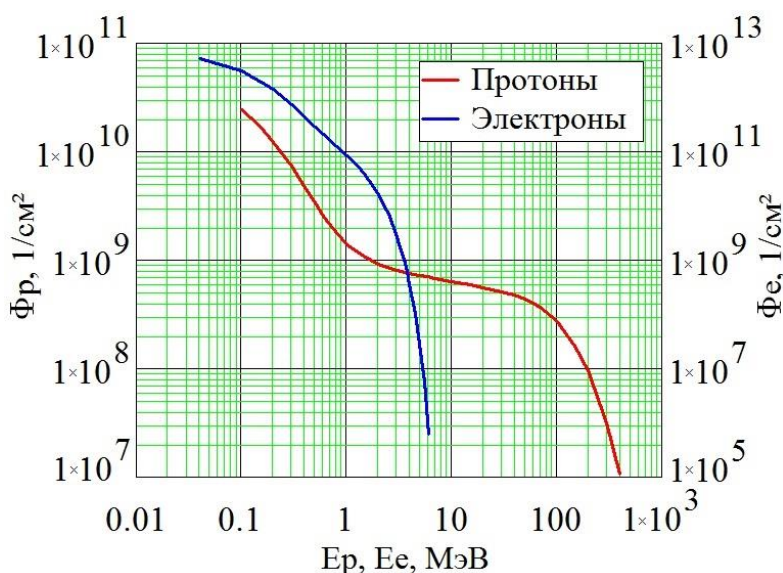


Рис. 3. Годовые флюенсы ССО: 1 – протоны; 2 – электроны.

Для определения и расчёта поглощённой дозы в каждом слое в модельном приближении «Стопа» запишем интегральные потоки протонов и электронов [10]:

В первом слое

$$\Phi_1(x, E_i) = \Phi_0(E_i) \cdot \exp[-x/R_1(E_i)], \quad x \in (0, h_1) \text{ для } \forall E_i, \quad (1)$$

где E_i – энергия, $\Phi_0(x, E_i)$ – поток протонов и электронов на ССО соответственно (рис. 2), $R_1(E_i)$ – длина пробега протонов и электронов в первом слое; h_1 – толщина первого слоя; $i - p$ (протон), e (электрон) соответственно.

Во втором слое

$$\Phi_2(x, E_i) = \Phi_1(x, E_i) \cdot \exp[-x/R_2(E_i)], \quad x \in (h_1, h_2), \text{ для } \forall E_i, \quad (2)$$

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

В k -ом слое

$$\Phi(x, E_i) = \Phi_0(E_i) \cdot \prod_{k=1}^n \exp[-x/R_k(E_i)], \quad x \in (h_k, h_{k+1}), \text{ для } \forall E_i, \quad (3)$$

где $R_k(E_i)$ – длина пробега протонов и электронов в k – ом слое соответственно, h_k – толщина k слоя.

Для определения поглощённой дозы в каждом k -ом слое в соответствии с фундаментальными законами взаимодействия ионизирующих потоков (протонов, электронов) с веществом запишем в виде [21]

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

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 – удельные ионизационные потери (УИП) протонов в веществе защиты, МэВ·г⁻¹·см²; 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 поглощённой дозы в k -ом слое (3) многослойной системы свелась к определению УИП, длины свободного пробега, интегрального потока, поглощённой дозы в гетероструктурах при воздействии ИП протонов и электронов соответственно в модельном приближении «Стопа» (рис. 1). Результаты расчётов представлены на рис. 5-8.

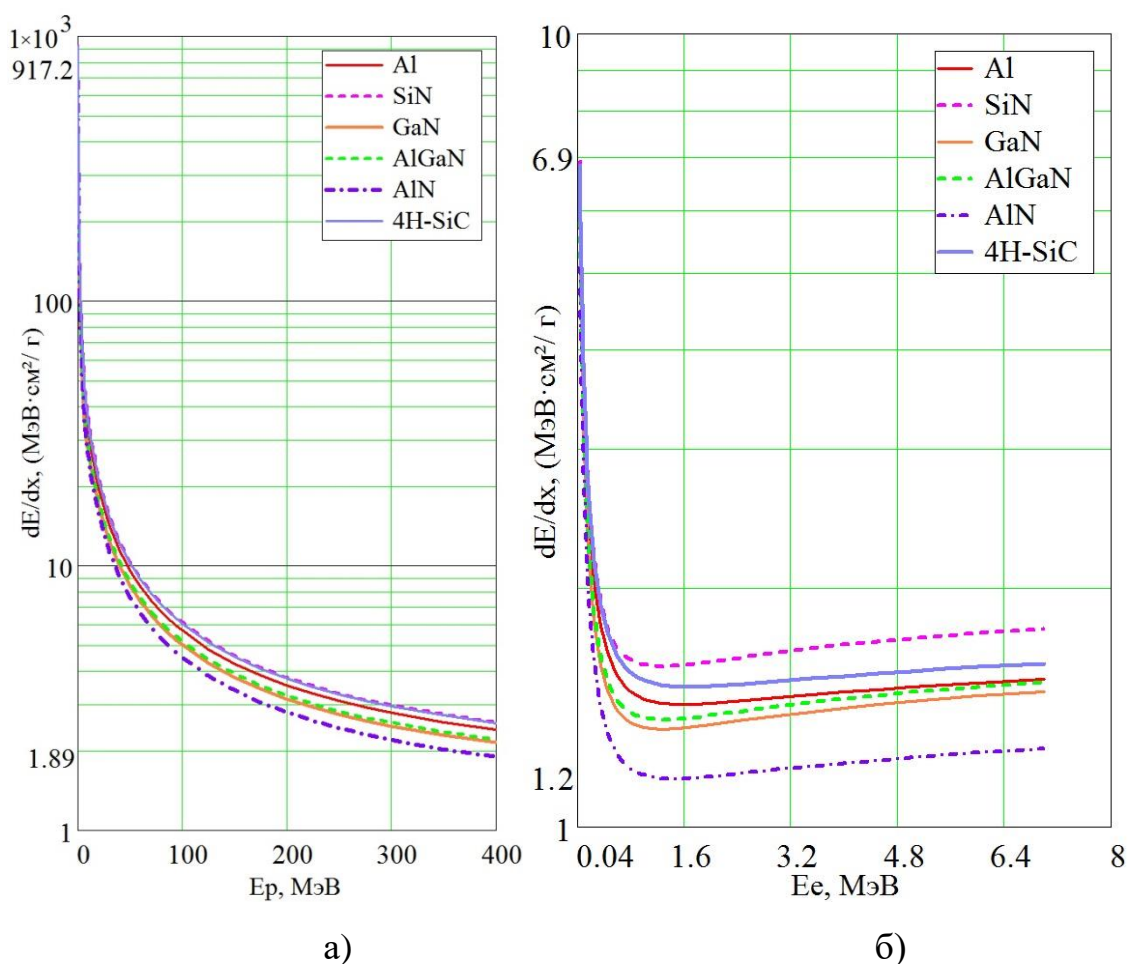


Рис. 4. Ионизационные потери: а) протонов; б) электронов в гетероструктуре AlGaN/GaN.

Из анализа результатов расчёта рис. 4а и 4б видно, что УИП протонов и электронов убывают в относительно малых областях энергий в алюминии и структурных элементах гетероструктуры в соответствии с формулой Бете-Блоха с учётом эффекта плотности и связанности К- и L- электронов с учётом аппроксимированных поправок в [12]. С увеличением энергии протонов (> 10 МэВ) и электронов (> 1 МэВ) возрастают потери энергии на тормозное излучение, которая пропорциональна квадрату ядер, плотности электронов в алюминии и гетероструктуре, при этом тормозное излучение электронов незначительно увеличивается, а УИП уменьшаются (рис. 4б).

Поскольку орбитальная дифференциальная и интегральная плотность протонов (от 0,1 до 1 МэВ) и электронов (от 0,04 до 1 МэВ) по характерному спаду почти совпадают, несмотря на различие их порядковой плотности, то эта зависимость отражается на изменениях ИП.

В соответствии с формулами в [8-10] определим длину пробега в структурах, представленных на рисунке 4. Результаты расчёта представлены на рисунках 5а-5г.

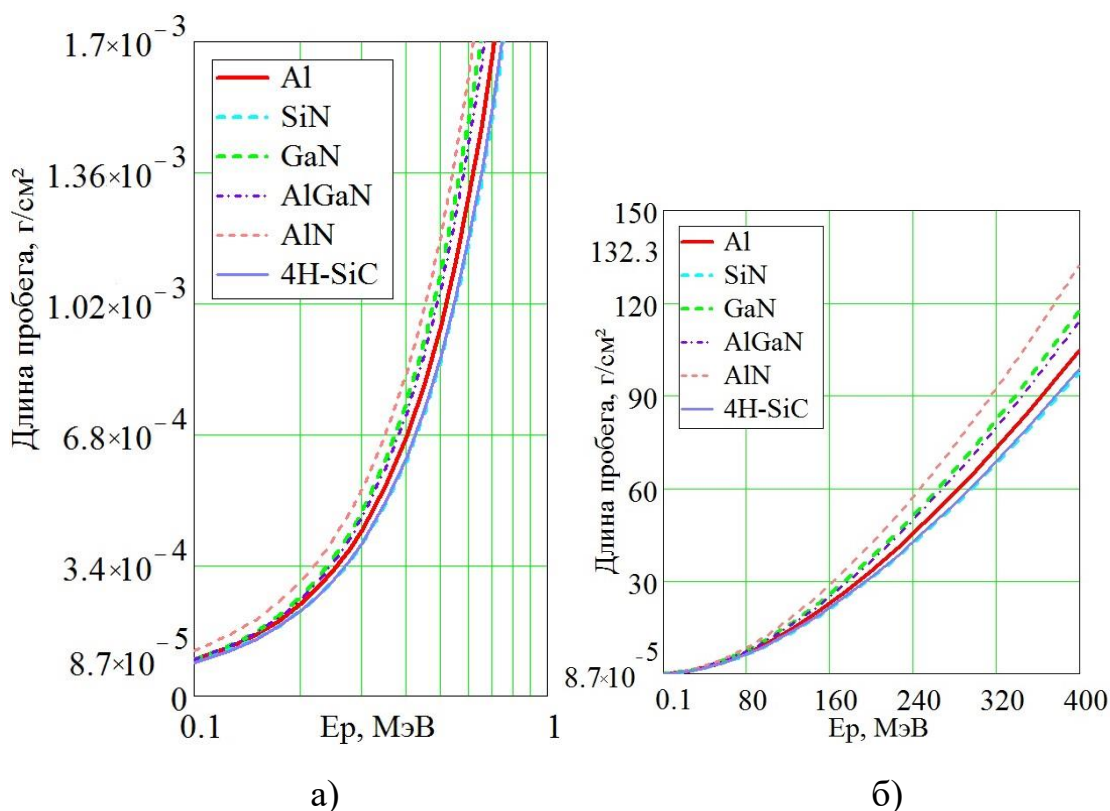


Рис. 5. Длина пробега протонов в интервалах энергий:
а) [0,1 – 1] МэВ; б) [1 – 400] МэВ.

Из анализа данных рис. 5а, 5б следует, что низкоэнергетические протоны с энергий от 0,1 до 5,4 МэВ проникают на толщину (алюминиевая защита, гетероструктура с подложкой из карбида кремния) 0,1603 см. Длина пробега – $R_p=0,0598$ г/см². Протоны с энергией $> 5,4$ МэВ проникают за пределы толщины гетероструктуры 0,1603 см.

Аналогичным образом вычислим длину пробега для электронов в гетероструктуре. Результаты расчётов представлены на рис. 6а, 6б.

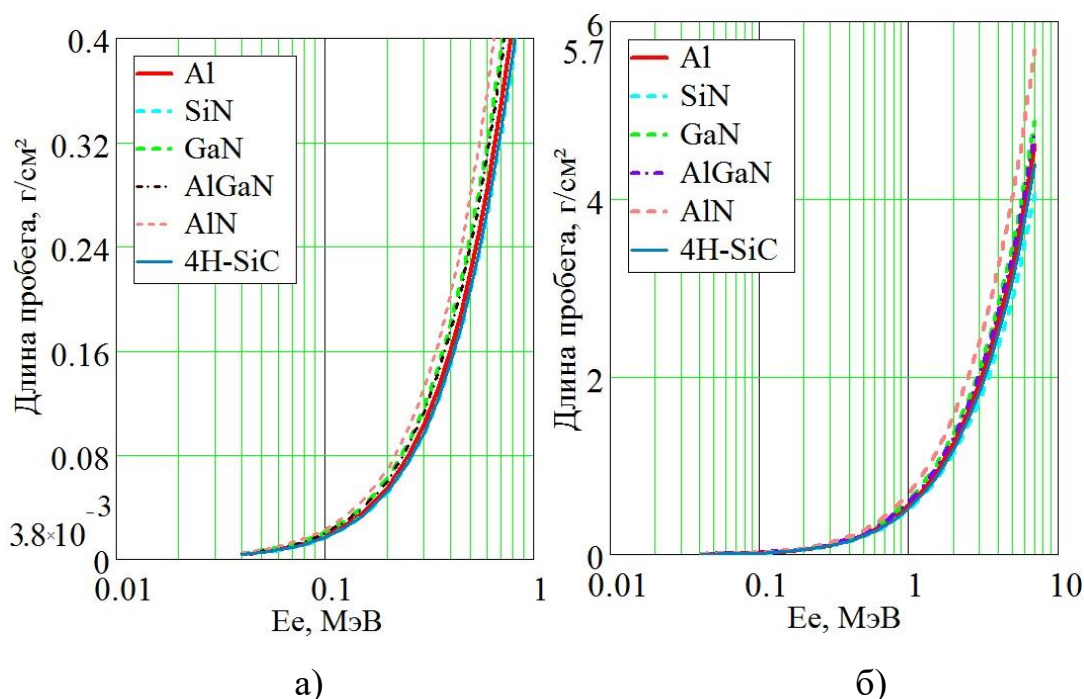


Рис. 6. Длина пробега электронов в интервалах энергий:
 а) [0,01 – 1] МэВ; б) [1 – 400] МэВ.

Анализ результатов зависимостей длин пробега от энергии электронов (рис. 6а, 6б) будет аналогичным в одинаковых структурных элементах, а различие есть в структурах AlGaN, InAlN. Зависимость длины пробега электронов для области энергий от 1 до 7 МэВ в гетероструктурах продолжится с учётом их структурного различия.

Вычислим ИП по формулам (1 – 3) и поглощённые дозы в соответствии с (4) в модельном приближении «Стопа» с учётом полученных результатов длины свободного пробега протонов и электронов за защитой из алюминия толщиной 1,5 мм в гетероструктуре. Результаты вычислений представлены на рисунках 7а-8б.

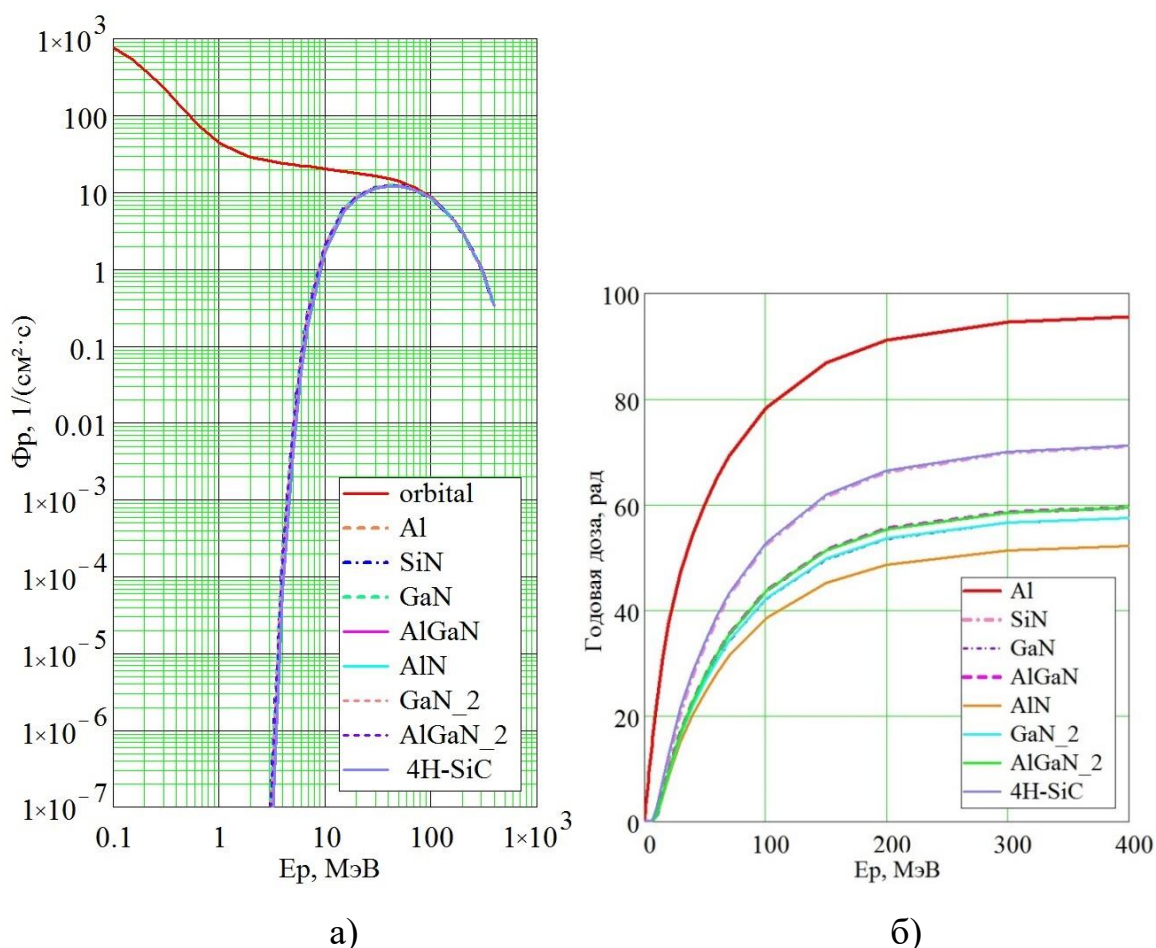


Рис. 7. Зависимость: а) интегрального потока; б) поглощённой дозы от энергии протонов в Al и гетероструктуре.

Из анализа результатов расчёта, приведенных на рис. 7а. следует: один протон проникает с энергией 8,67 МэВ за одну секунду. С увеличением энергии протонов поток частиц возрастает и достигает максимального значения $\Phi_p = 12,18 \text{ 1/см}^2\text{с}$ для энергии 39,5 МэВ. При дальнейшем увеличении энергии протонов до 297,1 МэВ поток уменьшается. Частицы с энергией более 297,1 МэВ поглощаются. С увеличением времени эксплуатации наноспутника (год $\approx 3,157 \cdot 10^7 \text{ с}$) поток одиночных протонов увеличивается на семь порядков. Очевидно количество низкоэнергетических протонов с энергией 8,67 МэВ увеличится за время эксплуатации (год) до $3,157 \cdot 10^7 \text{ 1/см}^2$, при этом для максимальной энергии поток протонов равен $3,84 \cdot 10^8 \text{ 1/см}^2$. Число протонов с высокой энергией возрастает. При этом увеличивается вероятность образования дефектов в гетероструктурах. Годовой флюенс в каждом слое гетероструктуры можно оценить по данным ИП (рис. 7а) умноженного на время эксплуатации

одного года. Полученные данные были использованы для расчёта поглощённой дозы.

Поглощённая доза является интегральной характеристикой радиационной стойкости гетероструктуры AlGaN/GaN. Из анализа данных (рис. 7б) следует: поглощённая доза многослойной системы увеличивается по экспоненциальному закону в каждом слое; поглощённая доза за алюминиевой защитой толщиной 1,5 мм уменьшается на 24,84 рад по сравнению с SiN, карбидом кремния 4H – SiC; поглощённая доза в SiN, 4H – SiC почти одинакова. Характер зависимости, по-видимому, связан с содержанием кремния; совпадение поглощённых доз с одинаковым химическим соединением AlGaN и GaN аналогичным образом можно объяснить. Дифференциальный характер роста в структуре SiN можно оценить по изменениям dD/dE_p в основном определяется протонами малой энергии в диапазоне от 0,1 до 14,95 МэВ достигая максимального значения при энергии 14,95 МэВ, при этом $dD/dE_p=6,598 \cdot 10^9$ рад/МэВ. В дальнейшем характер зависимости dD/dE_p от энергии протонов убывает по экспоненте и достигает $dD/dE_p=3,34 \cdot 10^8$ рад/МэВ при энергии 200 МэВ, спад продолжается до $1,796 \cdot 10^6$ рад/МэВ при энергии 400 МэВ. Следовательно, область малых энергий протонов определяет характер роста поглощённой дозы. Область больших энергий из-за малого количества протонов не приводит к быстрому росту поглощённой дозы, которое было в области малых энергий. Годовая поглощённая доза протонов стремится к «насыщению». Максимальная поглощённая доза при воздействии протонов на гетероструктуру равна 71,03 рад для энергии 400 МэВ. В остальных структурных элементах гетероструктуры изменения dD/dE_p меньше, а её характер зависимости от энергии стремится аналогичным образом по экспоненциальному закону и достигает $\sim 10^6$ рад/МэВ.

Аналогичным образом определим ИП и поглощённую дозу при воздействии потока электронов СОО на гетероструктуру AlGaN/GaN

Результаты расчётов представлены на рис. 8а, 8б.

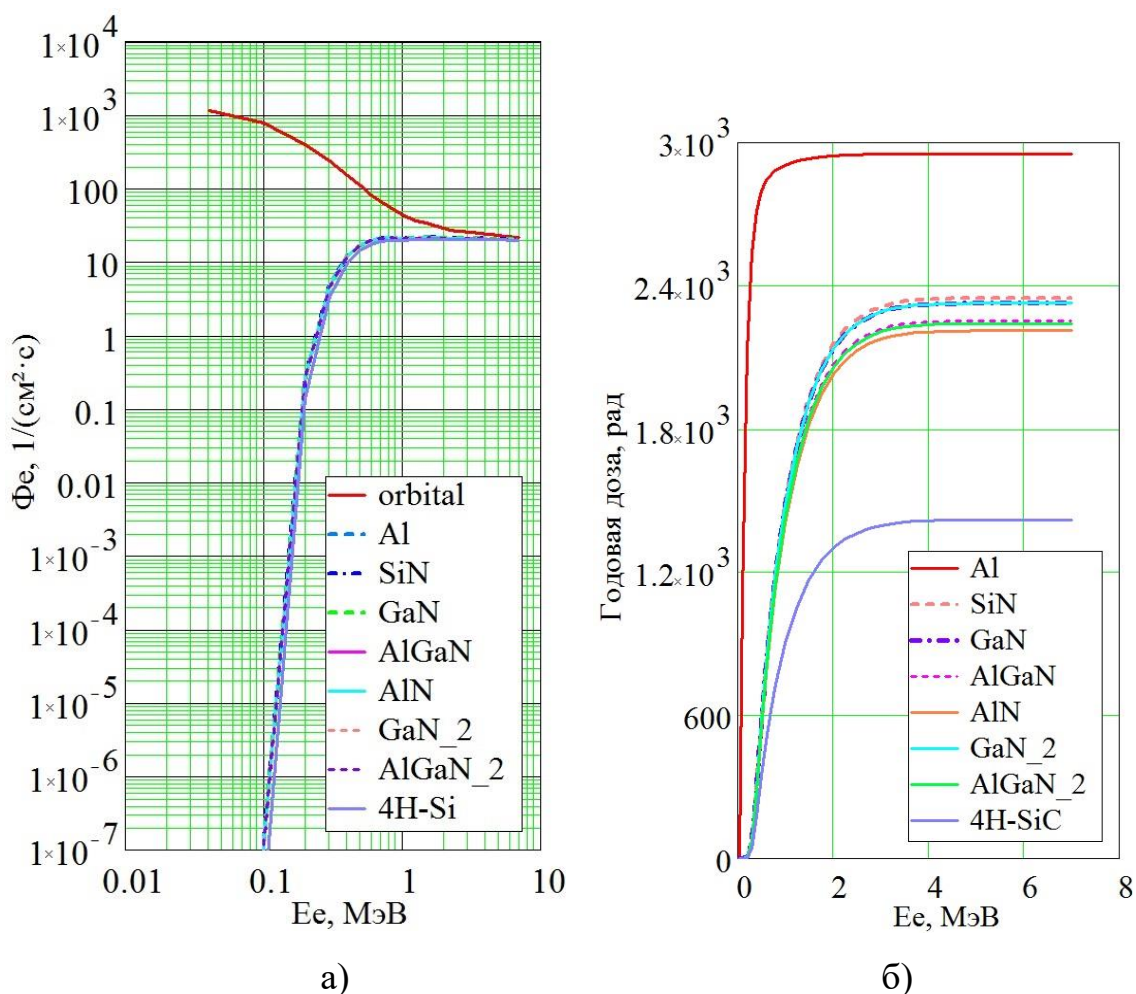


Рис. 8. Зависимость: а) интегрального потока; б) поглощённой дозы от энергии электронов в Al и гетероструктуре.

Из анализа результатов расчёта (рис. 8а) следует, что низкоэнергетические электроны с энергий от 0,04 до 0,853 МэВ проникают на толщину (алюминиевая защита, гетероструктура с подложкой из карбида кремния) 0,1603 см, при этом длина пробега $R_e=0,433 \text{ г/см}^2$. Электроны с энергией $> 0,853 \text{ МэВ}$ проникают за пределы размера гетероструктуры AlGaN/GaN и 4H-SiC. Подробно рассмотрим изменение интегрального потока электронов за алюминиевой защитой конструкционного материала наноспутника: один электрон проникает с энергией 0,244 МэВ за одну секунду через площадку один см^2 . С увеличением энергии протонов интегральный поток частиц возрастает и достигает максимального значения $\Phi_e = 21,53 \text{ 1/см}^2\text{с}$ для энергии 0,734 МэВ. При дальнейшем увеличении энергии электронов интегральный поток не изменяется. Зависимость интегрального потока от энергии («насыщение») обеспечивается конструкционным материалом алюминия, максимальный годовой флюенс

электронов равен $6,797 \cdot 10^8$ 1/см². Эта зависимость одинаковая для всех структурных элементов гетероструктуры. Полученные результаты были использованы для расчёта поглощённой дозы в гетероструктуре за защитой из алюминия.

Из анализа данных рис. 8б. следует: поглощённая доза в гетероструктуре увеличивается по экспоненциальному закону в каждом слое; поглощённая доза за алюминиевой защитой толщиной 1,5 мм уменьшается на 604 рад по сравнению с SiN. Характер зависимости, по-видимому, связан с содержанием кремния; совпадение поглощённых доз с одинаковым химическим соединением AlGaN и GaN аналогичным образом можно объяснить. Дифференциальный характер роста dD/dE_e в основном определяется электронами малой энергии в диапазоне от 0,04 до 0,424 МэВ достигая максимального значения при энергии 0,4864 МэВ, при этом $dD/dE_e = 1,79 \cdot 10^{13}$ рад/МэВ. В дальнейшем характер зависимости dD/dE_e от энергии электронов убывает по экспоненте, спад продолжается до 4 МэВ.

Следовательно, область малых энергий электронов определяет характер роста поглощённой дозы. В отличие от протонов скорость роста поглощённой дозы электронов на четыре порядка выше. Этот рост можно объяснить зависимостью интегрального орбитального потока электронов от энергии (рис. 2): во-первых, из-за разницы величин потоков электронов и протонов; во-вторых, скорость изменения зависимости интегрального потока электрона от энергии $d\Phi_e(E_e) \gg d\Phi_p(E_p)$.

Область больших энергий из-за их малого количество электронов не приводит к быстрому росту поглощённой дозы, которое было в области малых энергий. Годовая поглощённая доза электронов стремится к «насыщению». Максимальная поглощённая доза при воздействии электронов на гетероструктуру равна 2349 рад для энергии 7 МэВ.

Из анализов результатов исследований следует, что зависимость поглощённых доз ИИ потоков протонов и электронов от их энергии хорошо

описывается с помощью формулы $D_{p(e)} = 1.6 \cdot 10^{-13} (dE/dx) \cdot \Phi_{flup(e)}$, или (4).

На основании результатов расчёта поглощённых доз в гетероструктуре за алюминиевой защитой определим суммарную поглощаемую дозу. Результаты представлены в таблице 1.

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

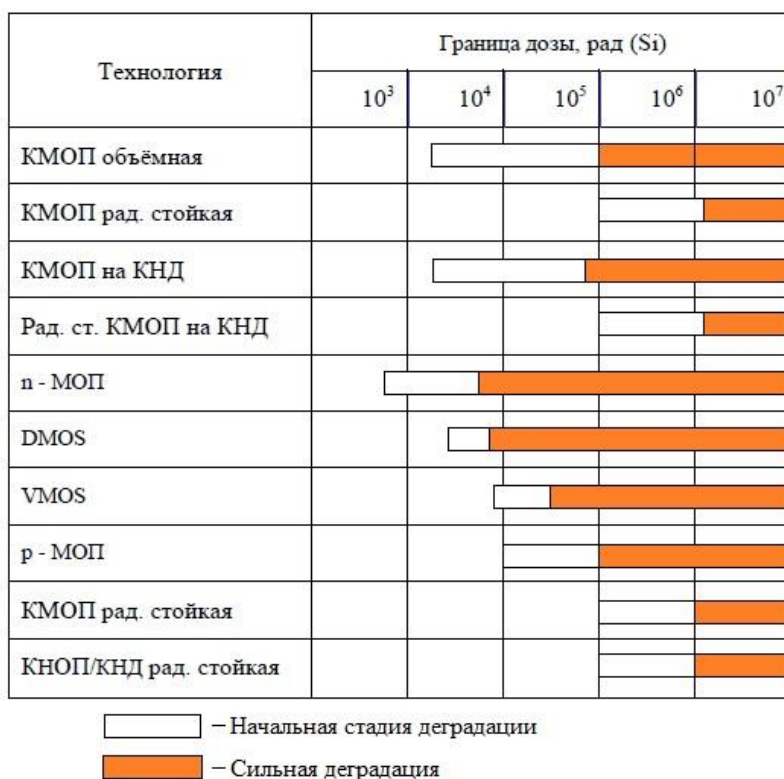
Параметры	Максимальная поглощённая доза: протонов, рад; электронов 10^{-3} рад							
	<i>Al</i>	<i>SiN</i>	<i>GaN</i>	<i>AlGaN</i>	<i>AlN</i>	<i>GaN_2</i>	<i>AlGaN_2</i>	<i>4H-SiC</i>
Структурные элементы								
ИИ (поток протонов)	95,62	71,03	57,51	59,52	52,22	57,54	59,45	71,15
ИИ (поток электронов)	2953	2349	2327	2,253	2212	2327	2242	1418
Суммарная поглощённая доза	3049	2420	2385	2313	2264	2385	2301	1489

Из таблицы 1 видна корреляция максимальной поглощённой дозы ИИ (поток протонов, электронов) между одинаковыми по химическому составу элементами в многослойной системе. Кроме того, отсутствует зависимость поглощённых доз от толщины слоя одинаковых по химическому составу. Поглощённая доза ИИ (поток протонов) в слое SiN и 4H-SiC почти совпадают, такое совпадение есть в слоях: GaN и GaN_2; AlGaN и AlGaN_2. Поглощённая доза ИИ (поток электронов) такого совпадения нет из-за различия ионизационных потерь приводит к изменениям длин пробега (рис. 9а, 9б) в слоях гетероструктуры. Суммарная поглощённая доза определяется в основном поглощённой дозой электронов в гетероструктуре за алюминиевой защитой.

Сравнительный анализ поглощённых доз протонов и электронов показывает, что есть различие не только по величине, но и по перераспределению последовательности влияния на структурные элементы слоёв гетероструктуры. Суммарная максимальная поглощённая доза в гетероструктуре SiN равна 2420 рад.

Сравним суммарную поглощённую дозу (СПД) в гетероструктуре с результатами, приведёнными в таблице 2 и 3.

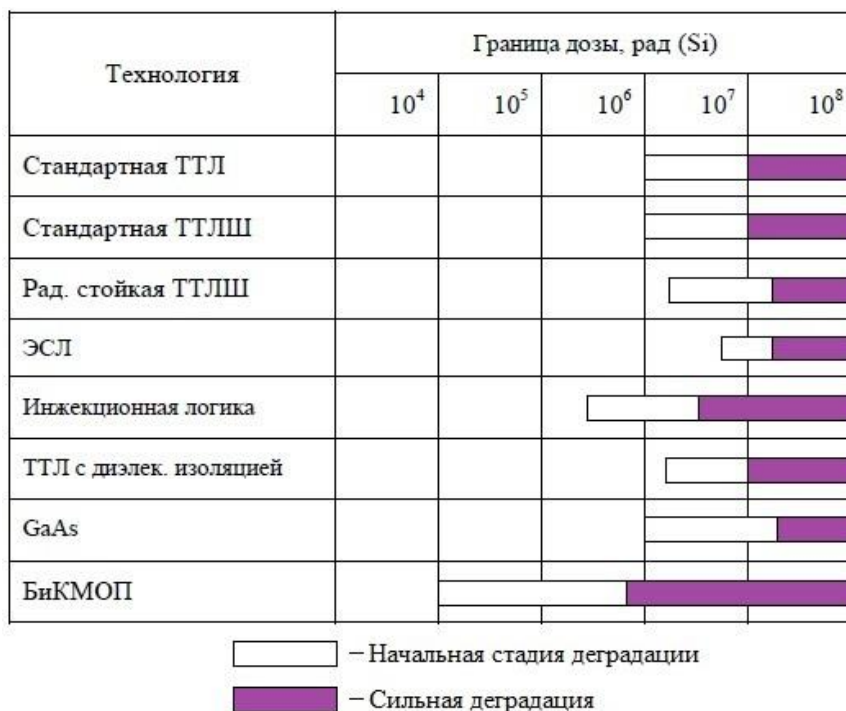
Таблица 2. Радиационная стойкость ИМС МОП технологий [13].



Из табл. 2 видно, что у большинства p/элементов поглощённая доза не превышает 10³ рад, за исключением использования технологии n – МОП. В гетероструктуре первый слой содержит SiN у которой СПД равна 2420 рад, которая определяется суммой поглощённых доз протонов D_p=70,961 рад (энергия 400 МэВ) и электронов D_e=2349 рад (энергия 7 МэВ), в остальных слоях: GaN, AlGaN радиационная стойкость выше по сравнению с SiN.

Сравним результаты поглощаемых доз (рис. 7б, 8б) с данными таблицы 1. Из сравнения следует, защита обеспечивает p/стойкость в течение одного года эксплуатации БРЭА наноспутника (СПД равна 2420 рад), что превышает границу (10³ рад) поглощённой дозы в 2,42 раза. СПД в гетероструктуре не является критической.

Таблица 3. Радиационная стойкость ИМС биполярных технологий [13].



Анализ результатов биполярной технологии (табл. 3) показывает, что граница начальной стадии деградации р/электронных элементов на основе кремния смещается в область 10⁵ рад, что вполне соответствует возможности применения гетероструктуры AlGaIn/GaN за алюминиевой защитой (толщина алюминия 1,5 мкм) конструкционного материала наноспутника (табл. 1).

Из сравнительного анализа результатов приведённых в табл. 1 и табл. 3 следует, что применение биполярной технологии предпочтительно.

Задача оценки р/стойкости (поглощённая доза) проводилась без расчёта: – предельно допустимой накопленной дозы и расчёта коэффициента запаса (КЗ); – вероятности возникновения одиночных сбоев и катастрофических отказов за время работы БРЭА. Для выполнения оценки необходимы данные р/электронных элементов производителя и результатов лабораторных испытаний для подтверждения качества р/стойкости [14].

Заключение

В модельном приближении «Стопа» получены результаты расчёта интегральных потоков протонов и электронов в гетероструктуре за алюминиевой

защитой конструкционного материала наноспутника и показана доля прошедших частиц в структурных элементах.

Определена суммарная годовая поглощённая доза в гетероструктуре AlGa_N/Ga_{NN} при воздействии ИИ (потоков протонов и электронов) ССО в соответствии с условиями эксплуатации. Скорость изменения поглощённых доз ИИ определяется орбитальными низкоэнергетическими потоками протонов и электронов.

Из результата анализа интегральных орбитальных потоков (ИОП) представленных на рис. 7а, 8а следует:

1) Поток ИИ (поток протонов) полностью поглощаются в материале защиты в области энергий E_p [0,1; 3] МэВ, а начиная, с энергии 3 МэВ увеличивается и достигает максимального значения $= 12,18$ 1/см² для энергии 39,5 МэВ. Далее ИОП ИИ (поток протонов) уменьшается до энергии 400 МэВ.

2) Поток ИИ (поток электронов) полностью поглощаются в материале защиты в области энергий E_e [0,04; 0,259] МэВ, а начиная, с энергии 0,259 МэВ увеличивается и достигает максимального значения $21,53$ 1/см² для энергии 0,734 МэВ. Далее ИОП ИИ (поток электронов) почти не изменяется до энергии 7 МэВ.

Для защиты гетероструктуры AlGa_N/Ga_N от высокоэнергетического ионизирующего излучения необходимо использовать стандартные методы, основанные на локальной защите с учётом различных эффектов в полупроводниковых структурах.

Модель «Стопа» может быть использована для разработки ГОСТа по оценке радиационной стойкости многослойных: материалов; радиоэлектронных элементов с различным многокомпонентным содержанием химических элементов, применяемых в составе БРЭА космических аппаратов любого класса.

Финансирование: Работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Министерству науки и высшего образования РФ.

Литература

1. Кузнецов Н. В., Панасюк М. И. Космическая радиация и прогнозирование сбое-и отказоустойчивости интегральных микросхем в бортовой аппаратуре космических аппаратов //Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ), Серия «Радиационное воздействие на радиоэлектронную аппаратуру».-М.: Атомиздат. – 2001. – №. 1-2. – С. 3-8.
2. Цаплин С. В. и др. Исследование свойств радиоэлектронных элементов при воздействии ионизационного потока. – 2018.
3. Гулько О. Е. Механизмы отказов КМОП ИС при воздействии ионизирующих частиц космического излучения //Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2005. – №. 1-2. – С. 80-83.
4. Анашин В. С. и др. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов //М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2013.
5. ОСТ 134-1034-2003. Отраслевой стандарт. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам. – Москва: ЦНИИ машиностроения, 2003.
6. Лукьященко В. И. и др. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с длительными сроками активного существования к воздействию ионизирующих излучений космического пространства //Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2001. – №. 3-4. – С. 81.
7. 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. Russian Science Citation Index Web of Science.
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.
 9. 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. – 2021. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.3>.
 10. NIST Standard Reference Database 124. URL: <https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions> (дата обращения 01.09.2023).
 11. The Space Environment Information System (SPENVIS). URL: www.spennis.oma.be (дата обращения 01.09.2023).
 12. Беспалов В. И. Лекции по радиационной защите. – 2017.
 13. The PSTAR program. National Institute of Standards and Technology. URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html> (дата обращения 01.09.2023).
 14. Бекман И. Н. Атомная и ядерная физика: радиоактивность и ионизирующие излучения. – 2017.
 15. Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика. Т. 1. Физика атомного ядра //Москва. – 1993.
 16. Безродных И. П., Казанцев С. Г., Семенов В. Т. Радиационные условия на солнечно-синхронных орбитах в период максимума солнечной активности //Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2010. – Т. 116. – №. 3. – С. 23-26.
 17. Белоус А., Солодуха В., Шведов С. Космическая электроника. В 2-х книгах. Книга 1. – Техносфера, 2015.

18. Зебрев Г. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции //М.: НИЯУ МИФИ. – 2010. – С. 148.
19. Тарасова Е. А. Моделирование радиационной стойкости НЕМТ (обзор) //Вестник Нижегородского университета им. НИ Лобачевского. – 2014. – №. 1-2. – С. 100-115.
20. Тарасова Е. А. и др. InAlAs/InGaAs НЕМТ при облучении квантами высоких энергий //Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46. – №. 12. – С. 1587-1592.
21. РД 50-25645.216-90. Методические указания. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Метод расчета распределения поглощенной и эквивалентной доз космических излучений по толщине материалов на внешней поверхности космического аппарата на орбитах, проходящих через ЕРПЗ. – Москва: Изд-во Стандартов, 1990.
22. Павленко В. И. и др. Суммарные потери энергии релятивистского электрона при прохождении через полимерный композиционный материал //Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2014. – №. 4. – С. 101-106.
23. Брудный П. А., Великовский Л. Э., Сим П. Е. InAlN/GaN НЕМТ-транзистор гигагерцового диапазона //Актуальные проблемы радиофизики (АПР 2019). – 2019. – С. 272-274.

Для цитирования:

Цаплин С.В., Большев С.А. Оценка и анализ поглощённой дозы в гетероструктуре AlGaIn/GaN при воздействии ионизирующих потоков радиационных полей Земли в условиях эксплуатации наноспутника // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.8>