

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ ОГРАНИЧЕННЫХ ВЫБОРОК

М.М.Венедитов¹, Е.С.Оболенская², В.К. Киселев¹, С.В.Оболенский²

¹ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова, Нижний Новгород 603137, ул. Тропинина, 47

²ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород 603022, просп. Гагарина, 23

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2016 г.

Аннотация. Проведено исследование стойкости электронных компонентов к воздействию ионизирующих излучений (ИИ) по результатам испытаний ограниченной выборки электронной компонентной базы (ЭКБ). Особое внимание обращено на коэффициент шума – основной критериальный параметр малошумящих усилителей. Проблема состоит в том, что на частотах свыше 12 ГГц коэффициент шума невозможно измерить на сигнальных линиях длиной около 25 метров, применяемых при проведении испытаний полупроводниковой ЭКБ на моделирующих установках – импульсных ядерных реакторах. В связи с указанным на основе физико-топологического моделирования и сопоставления его результатов с экспериментальными данными предложен простой аналитический подход к расчетно-экспериментальному определению коэффициента шума в момент и после радиационного воздействия. Это позволяет использовать указанный критериальный параметр наравне с другими параметрами при проведении испытаний малошумящих усилителей.

Ключевые слова: стойкость электронных компонентов, ионизирующее излучение, коэффициент шума, малошумящие усилители, импульсный ядерный реактор.

Abstract. The resistance of electronic components to the ionizing radiation (IR), the results of tests of limited electronic components of the sample (ECB) were investigated. Particular attention is drawn to the noise factor - the main criterial option of low-noise amplifiers. The problem is that at frequencies above 12 GHz

noise figure cannot be measured on the signal lines of up to 25 meters long, used in testing semiconductor ECB on modelling devices - pulsed nuclear reactors. Based on physical and topological modelling and comparison with experimental data we suggest a simple analytical approach to the settlement and the experimental determination of the noise factor during and after radiation exposure. This allows to use the specified criterial parameter along with other parameters when testing low-noise amplifiers.

Key words: resistance of electronic components, ionizing radiation, noise figure, low noise amplifiers, pulsed nuclear reactor.

Введение

При испытаниях узлов, блоков, приборов, а тем более, целых систем, проблема испытаний на радиационную стойкость не имеет в настоящее время типовых решений. Это связано с некоторыми объективными и принципиально не устранимыми физическими ограничениями. Основные причины такой ситуации заключаются в следующем: а) ограниченные возможности моделирующих установок (невозможность обеспечения равномерного и однородного облучения при экстремальных уровнях нагружения); б) влияние объекта испытаний на поля нагружения моделирующих установок; в) значительные перерывы во времени между воздействиями различных факторов ионизирующего излучения при по-факторном их моделировании; г) локальная неоднородность и не синхронность во времени энерговыделения от различных видов излучений; д) малая статистика из-за ограниченных выборок тестируемых образцов; е) непреодолимые сложности при проведении измерений некоторых параметров СВЧ аппаратуры и электронной компонентной базы (ЭКБ) на длинных линиях, используемых при испытаниях на моделирующих установках.

Известны вероятностные методы [1-4] оценки радиационной стойкости РЭА и составляющей её ЭКБ, основанные на статистической обработке результатов экспериментальных исследований стойкости ограниченных

выборки облучавшихся объектов. Однако, выбор определяющего радиационно-критического параметра в качестве критерия радиационной стойкости не всегда является физически обоснованным, т.е. в качестве объекта анализа используют различные радиотехнические параметры, которые неоднозначно отражают взаимодействие излучения с ЭКБ и не учитывают вклад сложных физико-химических процессов на гетерограницах материалов электронной техники, имеющих различные свойства. Наоборот, использование физико-топологического моделирования позволяет учесть комплекс радиационно-стимулированных эффектов в полупроводниковых структурах ЭКБ, но при обработке известных из литературы экспериментальных данных возникают непреодолимые сложности, связанные с отсутствием информации о конструкции гетероструктур и контактов полупроводниковой ЭКБ.

В этой работе для оценки уровня стойкости использован комплексный подход, основанный на статистическом методе, предложенном в [5], и методике моделирования параметров ЭКБ на основе физико-топологического метода. Благодаря сочетанию указанных подходов к проведению оценки радиационной стойкости, указанные выше трудности преодолеваются, а также обосновывается возможность использования таких критериальных параметров ЭКБ, как коэффициента шума СВЧ транзисторов (усилителей), которые не могут быть определены экспериментально в момент воздействия ИИ. Последнее важно, так как указанный параметр является основным при контроле функционирования малозумящих усилителей СВЧ диапазона.

Согласно [5], оценка уровня стойкости ЭКБ осуществляется с помощью определения параметров функции распределения Вейбулла и вычисления зависимости параметрической или функциональной работоспособности от уровня воздействия ИИ. Способ выявления наиболее значимого вида ИИ и наиболее чувствительного к ним параметра с точки зрения наиболее сильного поражения испытываемого объекта в методе [5] основан на обработке экспериментальных данных и определении специальных интервалов по уровню спецвоздействия. Границы интервалов задают из общих физических

представлений, определяющими из которых являются уровень отсутствия наблюдаемых изменений характеристик испытуемого объекта и уровень значительных изменений параметров объекта. В выбранных границах вводят экспериментально полученную интегральную функцию распределения допустимых уровней стойкости к различным видам ИИ в форме $F(U, x) = \frac{\exp(\lambda x) - \exp(\lambda U)}{2sh(\lambda a)}$, определяют скорость изменения вероятности параметрических или функциональных отказов путём решения уравнения $cth(\lambda a) = \frac{\bar{x}}{a} + \frac{1}{\lambda a}$, где: a - полуширина интервала $[U, V]$; \bar{x} - среднее арифметическое значение уровней стойкости объектов в выборке; $\lambda = 1/\eta$ - интенсивность параметрических отказов; η - параметр масштаба распределения Вейбулла. Затем на основе сравнения функций распределения $F(U, x)$ для различных видов ионизирующих излучений определяют тип и уровень ИИ, при котором максимальна вероятность отказа полупроводникового элемента.

В данной работе предложено использовать для определения (уточнения) параметров испытуемого объекта дополнительные расчеты, основанные на методах физико-топологического моделирования [6-10] и результатах ранее проведенных экспериментальных исследований стойкости аналогов анализируемого объекта. Основной причиной ввода дополнительного этапа расчетов по сравнению с [5] является необходимость детализации особенностей взаимодействия ИИ с материалами электронной техники, и необходимости оценки вклада сложных процессов поглощения ИИ гетероструктурами и интерфейсами гетероструктур современных полупроводниковых приборов [11-17]. Последнее особенно важно при контроле таких параметров, как коэффициент шума, которые не могут быть измерены при проведении испытаний на моделирующих установках (МУ), так как потери в длинных сигнальных линиях (СВЧ волноводах длиной свыше 20 метров) на порядки превышают уровень шума, который требуется измерить.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования выбраны хорошо изученные нами ранее [18-20] СВЧ транзисторы различных конструкций, которые широко применяются в интегральных схемах и аппаратуре СВЧ диапазона. Большой объем накопленной ранее информации позволил сопоставить возможности подхода, предложенного в [5], и определить вклад дополнительных исследований, основанных на физико-топологическом моделировании. Проводился анализ научно-технической литературы, выделялись основные физические эффекты, протекающие в исследуемых приборах. Затем путем двумерного моделирования процессов в субмикронных GaAs полевых транзисторах выделялись доминирующие физические процессы, а результаты расчетов сопоставлялись с экспериментальными данными.

Ранее в работах [21-23] были проведены исследования влияния гамма-нейтронного облучения на характеристики n-GaAs транзисторов с длиной затвора 10 мкм; 5 мкм; 1,5 мкм; 0,75 мкм; 0,5 мкм; 0,25 мкм, 0.1 мкм. В последнем случае длина канала транзистора определяется величиной области пространственного заряда затвора и в зависимости от напряжений на затворе и стоке имеет величину 50...250 нм. Для экспериментальной оценки радиационной стойкости образцов проводились измерения тока насыщения, мощности выходного сигнала, коэффициентов усиления и шума транзисторов на рабочих частотах до и после радиационного облучения. Было показано, что наиболее существенным радиационным фактором, сказывающимся на функционировании малошумящих GaAs СВЧ транзисторов с затвором Шоттки, как с обычным каналом, так и с каналом на основе двумерного электронного газа (НЕМТ), является нейтронное облучение. Поэтому ниже речь пойдет о воздействии только этого фактора.

Анализ поведения транзисторов и малошумящих интегральных схем в момент и после радиационного воздействия проводился нами ранее в работе [24]. Измерялись статические и динамические параметры транзисторов и усилителей (коэффициент усиления) в момент радиационного воздействия. В

данной работе полученные ранее данные использовались для апробации расчетно-экспериментального метода определения коэффициента шума в момент и после радиационного воздействия.

Для моделирования радиационного воздействия на дискретные полупроводниковые приборы использовалось физико-топологическое приближение [6-10], которое позволяет моделировать перенос электронов в активных областях дискретных элементов с учетом изменения концентрации электронов из-за ионизации при радиационном воздействии, а также учитывать процессы рассеяния на радиационных дефектах.

Моделируемая с помощью квазигидродинамической модели область исследуемых приборов имела прямоугольную форму, что позволяло пользоваться декартовой системой координат. В силу большой протяженности структуры по третьей координате использовалось двумерное приближение. Для анализа переходных процессов применялась нестационарная система уравнений в квазигидродинамическом приближении [8]. Для учета заглубления затвора использовалась трехсвязная область. Распределение концентрации примеси по глубине задавалось в ячейках расчетной сетки, согласно экспериментальным данным $C-V$ измерений (см., например, [22]).

Использовались граничные условия смешанного типа – на границах контактов задавались значения потенциала, концентрации и энергии носителей. Величина концентрации задавалась равной концентрации на границе раздела канал - контактный слой. Температура электронного газа на контактах задавалась равной комнатной. На остальных поверхностях расчетной области поддерживались нулевыми градиенты концентрации, потенциала и энергии так, что нулевыми были значения плотностей тока электронов и потока энергии электронного газа.

Фурье анализ откликов токов стока и затвора на ступенчатые изменения напряжений на затворе и стоке по методу Рейзера [24] позволял вычислить зависимость реальных и мнимых частей всех четырех Y -параметров от частоты. Коэффициент шума определяется как отношение выходной мощности

шумового сигнала в заданной полосе частот к мощности на выходе идеального (не шумящего) транзистора.

Коэффициента шума транзистора, как активного четырехполюсника вычисляется согласно [25]:

$$F = 1 + \frac{\langle Id^2 \rangle \operatorname{Re}(Y_{11})}{kT_0 \Delta f |Y_{21}|^2}, \quad (1)$$

где $\langle Id^2 \rangle$ - среднеквадратическое отклонение тока стока в результате случайного изменения сопротивления исток-сток; k - постоянная Больцмана; T_0 - температура кристаллической решетки; Δf - полоса частот.

Дисперсия тока стока $\langle Id^2 \rangle$ рассчитывается по квазигидродинамической модели [26]. Формула (1) описывает шум, вносимый активной частью транзистора. Для учета шума сопротивления металлизации затвора использовалось выражение [27]:

$$K_n = 1 + kfL_g^{5/6} \left(\frac{n}{a}\right)^{1/6} \left[\frac{3,3W_g^2 \omega}{hL_g} + 0,6W_g^2 \omega \sqrt{\frac{R_g f}{hL_g}} + \frac{1,8}{n} \left(\frac{L_{gs1}}{a_1} + \frac{L_{gs2}}{a_2} \right) + \sqrt{\frac{0,18R_k}{na_2}} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где k - коэффициент качества материала, равный 0,333; f - рабочая частота в ГГц; n - концентрация носителей, 10^{16} см^{-3} ; W_g - единичная ширина затвора, мкм, h - толщина металлизационного слоя затвора, мкм; L_g - длина затвора, мкм; R_g - удельное сопротивление затвора, 10^{-6} Ом см ; R_k - удельное контактное сопротивление, 10^{-6} Ом см ; a_1 - толщина активного слоя под истоком, мкм; a_2 - толщина активного слоя между истоком и затвором, мкм; a - толщина активного слоя под затвором, мкм; L_{gs1} - расстояние от истока до канавки под затвором, мкм; L_{gs2} - зазор между стенкой канавки и металлизацией затвора, мкм.

Особое внимание уделялось определению коэффициента шума в момент воздействия ИИ, так как экспериментально такие измерения на частотах выше 12 ГГц практически не возможны. Следовательно, построение функции Вейбулла по результатам экспериментальных данных не возможно в силу их отсутствия. Особую важность данный аспект приобретает при определении уровня бессбойной работы и времени потери работоспособности малошумящих

усилителей на основе ПТШ, так как именно коэффициент шума является основным критериальным параметром для таких приборов.

Результаты исследований

а) Анализ литературы

Анализ научно-технической литературы [11-17] показал, что характерными повреждениями полевых транзисторов и диодов Шоттки, а также интегральных схем на их основе являются следующие:

- пробой и структурные повреждения барьеров Шоттки;
- деградация параметров транзисторов за счет накопления радиационных дефектов, приводящих к снижению концентрации электронов в активных областях приборов;
- снижение их подвижности и скорости насыщения электронов, приводящее к уменьшению токов приборов;
- снижение крутизны ВАХ транзисторов и уменьшение барьерной емкости контакта Шоттки;
- снижение коэффициентов усиления и шума транзисторов, а также их выходной мощности.

Эффекты в типовых интегральных схемах и возможные виды отказов в аппаратуре при воздействии радиационного излучения [1-3]:

- обратимые и необратимы изменения параметров полупроводниковых материалов, приводящие к временному и постоянному изменению параметров полупроводниковых элементов и ИС;
- в цифровых ИС наблюдается потеря информации за счет действия импульса гамма-излучения, а также ухудшение нагрузочной способности и возрастание выходного напряжения в открытом состоянии ключа за счет воздействия быстрых нейтронов;
- изменение коэффициентов усиления и шума приемо-передающих устройств;
- изменение частоты амплитуды выходных сигналов генераторов;

- воздействие ИИ на схемы преобразования и усиления промежуточной частоты приводит к изменению настройки узкополосных УПЧ, приводящих к сбоям в работе РЭА, генерации ложных импульсов и подавлению полезных сигналов;

- сбои в работе вычислительных устройств, ложные срабатывания в элементах этих устройств, нарушению нормального хода вычислительной программы, искажению и потере информации;

- сбои в работе синхронизирующих узлов РЭА, делителей частоты потеря информации в регистрах оперативной памяти;

- возникновение помех и сбоев в цепях статических преобразователей напряжения и иных цепях питания вычислительных, управляющих и телеметрических устройств;

- в аппаратуре радиоуправления – сбои телеметрических сигналов, пропуски в кодовых группах, ложные команды срабатывания, задержка выдачи ответного импульса;

Как показал анализ литературы, в ней практически полностью отсутствуют данные о зависимости коэффициентов шума от времени в момент воздействия ИИ, поэтому предлагаемый в данной работе подход является новым. В связи с тем, что требования по уровню бессбойной работы и времени потери работоспособности предъявляются к транзисторам Шоттки и интегральным схемам на их основе по всем критериальным параметрам, то разработка методики определения зависимости коэффициента шума от времени в момент воздействия ИИ весьма актуальна.

б) Результаты расчетов и их сравнение с экспериментом

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование высокочастотных шумов в ПТШ при радиационном воздействии. Для экспериментов из имевшегося набора транзисторов были выбраны приборы с оптимальной шириной затвора для каждого из частотных диапазонов: 200 мкм (входная емкость затвор-исток $C_{зи} = 150$ фФ) - для 12 ГГц, 100 - мкм ($C_{зи} = 80$ фФ) для 37 ГГц, 50 мкм ($C_{зи} = 50$ фФ) - для 60 ГГц.

Таблица 1. Экспериментально измеренные характеристики исследуемых транзисторов до и после облучения. В круглых скобках указаны рассчитанные по квазигидродинамической модели значения. В квадратных скобках указана ширина затвора транзисторов в малошумящем исполнении.

	Исследуемые образцы		
	№ 1	№ 2	№ 3
Длина канала, мкм / Ширина затвора, мкм	0,5 / 600 [100]	0,25/ 100	0,1 / 50
Флюенс нейтронов, 10^{14} н/см ²	1,4	3	5
Рабочая частота, ГГц / Предельная частот усиления, ГГц	4...12 / 29	20...40 / 70	40...60 / 100
Расчетное значение концентрации носителей заряда в канале ПТШ до и после облучения, 10^{17} см ⁻³	1,9 / 1,5	4,2 / 3,1	5,9 / 4,1
Ток насыщения до и после облучения, мА	250 (270) / 160 (200)	15 (17) / 9 (8,2)	5 (5,4) / 3,3 (3,1)
Коэффициент усиления по мощности на рабочей частоте до и после облучения, дБ	8 (8,9) / 5,4(5,5)	8 (9,1) / 4,5 (5,4)	5 (6,2) / 2,8 (3,2)
Коэффициент шума на рабочей частоте до и после облучения, дБ	2.4 (2.2) / 3.1 (2.8)	3.3 (2.9) / 4.1 (3.8)	3.8 (3.4) / 4.5 (4.2)

Изменение коэффициента шума $K_{ш}$ в момент и после радиационного воздействия оценивалось расчетно-экспериментальным путем как на основании квазигидродинамической модели, так и на основании аналитического подхода, основанного на пропорциональном соответствии изменений коэффициента усиления и шума полевых транзисторов Шоттки при изменении параметров их полупроводниковых слоев из-за радиационного облучения. Указанный подход обоснован, так как согласно данным [11-17], а также нашим исследованиям [6-10], радиационное воздействие приводит к увеличению концентрации электронов в момент импульса радиационного воздействия из-за ионизации канала транзисторов и к уменьшению указанной концентрации после радиационного воздействия за счет действия радиационных дефектов, частично захватывающих электроны. Кроме того, снижается подвижность и скорость насыщения электронов, а также изменяются времена релаксации энергии и

импульса электронов [6-10]. Это приводит к изменению как крутизны ВАХ транзисторов, так и емкости их затворов. В связи с тем, что коэффициент усиления транзисторов пропорционален отношению крутизны ВАХ транзистора к емкости его затвора, а коэффициент шума пропорционален обратной величине, возможен пересчет зависимости коэффициента усиления от времени в коэффициент шума от времени.

Таким образом, коэффициент шума в момент облучения может быть определен расчетным путем на основе экспериментальных данных об изменении коэффициента усиления транзисторов, который может быть измерен с достаточной точностью с использованием детектора мощности СВЧ сигнала и длинных сигнальных линий (волноводов и коаксиальных кабелей), передающих детектированный радиочастотный сигнал к регистрирующему осциллографу.

Для обработки экспериментальных данных использовалось соотношение:

$$K_{\text{шобл}} = \delta \cdot \lg \left(K_{\text{шдо}} \cdot \left(\frac{K_{\text{рдо}}}{K_{\text{робл}}} \right) \right), \quad (1)$$

где $K_{\text{шобл}}$ - размерный (дБ) коэффициент шума после облучения, а $K_{\text{шдо}}$ - безразмерный коэффициент шума до облучения; $K_{\text{рдо}}$ и $K_{\text{робл}}$ - безразмерные коэффициенты усиления до и после облучения соответственно, δ - поправочный коэффициент, получаемый на основании данных о значении коэффициента шума после облучения, измеренного в лабораторных условиях. Безразмерные коэффициенты усиления определялись как:

$$K_{\text{рдо}} = \frac{P_{2\text{до}}}{P_{1\text{до}}}, \quad (2)$$

$$K_{\text{робл}} = \frac{P_{2\text{обл}}}{P_{1\text{обл}}}, \quad (3)$$

где $P_{2\text{до}}$ и $P_{1\text{до}}$ мощности (мВт) выходного и входного сигналов модулей до облучения, а $P_{2\text{обл}}$ и $P_{1\text{обл}}$ мощности (мВт) выходного и входного сигналов модулей после облучения. Безразмерный коэффициент шума до облучения определялся из размерного коэффициента шума до облучения по формуле: $K_{\text{шдо}} = 10^{0.1K_{\text{шдо}}}$ (дБ). Мощности выходного и входного сигналов измерялись

экспериментально [25] с помощью детекторов на основе диодов Шоттки. Благодаря использованию детекторов по длинным сигнальным линиям к регистрирующему осциллографу передавался радиочастотный (0...1 ГГц) сигнал, так что потери в указанных линиях были не велики, а погрешность измерения позволяла определять коэффициент усиления с погрешностью около 0.1 дБ.

Таблица 2. Сопоставление результатов экспериментов и расчетов по формулам (1-3) и с помощью физико-топологической модели. Исследовался транзистор с длиной затвора 0.5 мкм при облучении импульсным потоком нейтронов флюенсом $5 \cdot 10^{14}$ см⁻². При расчетах длительность нейтронного импульса полагалась равной 500 мкс. Количество образцов, измеренных в лабораторных условиях – 12 шт., при измерениях коэффициента усиления в ходе исследований на импульсном ядерном реакторе – 2 шт.

Вид определения коэффициента	Коэффициенты усиления и шума, дБ				
	До облучения	Спустя 100 мкс после начала импульса	Спустя 1 мс после начала импульса	Спустя 10 мс после начала импульса	Спустя 1 месяц после импульса
Расчет коэффициента шума по формулам (1-3)	1.42	5.6	3.4	2.52	2.16
Расчет коэффициента шума по физико-топологической модели	1.43	6.7	3.2	2.41	2.07
Измерения коэффициента усиления в ходе исследований на импульсном реакторе	8.5	2.9	5.2	6.5	7.1
Измерения коэффициента шума в лабораторных условиях	1.41 ± 17 %	-	-	-	1.92 ± 26 %

Для проверки предложенного расчетно-экспериментального метода определения коэффициента шума использовалось физико-топологическое моделирование, результаты которого сопоставлялись с данными измерений коэффициента шума до и после импульса нейтронного облучения в лабораторных условиях (табл. 1), а также результатами измерений коэффициента усиления в момент облучения. Результаты сопоставления расчетов по формулам (1-3) и с помощью физико-топологической модели приведены в таблице 2.

На последнем этапе работы результаты расчетов коэффициента шума использовались в качестве критериальных для определения уровня стойкости малошумящих транзисторов по методу [5], как это описано во введении. Результаты расчетов показали, что наличие информации о значении коэффициента шума в момент радиационного облучения позволяет уточнить уровень стойкости транзисторов (критический флюенс нейтронного облучения) на 10...50 %. Следует отметить, что аналогичный подход может быть применен и к усилителям на основе СВЧ полевых транзисторов, так как коэффициент шума усилителя в первую очередь определяется входным каскадом, т.е. по сути одним транзистором.

Выводы

Как показали результаты расчетов и проведенного в работе обобщения большого объема экспериментальных данных, предложенный расчетно-экспериментальный метод определения коэффициента шума в момент радиационного облучения на основании аналитических зависимостей между коэффициентами усиления и шума может применяться для уточнения уровней стойкости малошумящих полевых транзисторов.

Следует отметить, что использование физико-топологического подхода для моделирования поведения транзистора в момент радиационного воздействия весьма желательно для уточнения особенностей физических процессов в гетероструктурах современных транзисторов. Однако и без указанного детального анализа простые аналитические выкладки с помощью

формулы (1-3) позволяют получить дополнительную информацию о коэффициенте шума в момент радиационного воздействия. При этом, однако, следует учитывать, что погрешность такого упрощенного расчета, в том числе и за счет ошибки в определении коэффициента δ , входящего в формулу (1) может составлять десятки процентов.

Авторы благодарят А.Н. Качемцева за ценные замечания и рекомендации, полученные в ходе обсуждения результатов работы.

Литература

1. Rickets L.W. Fundamentals of Nuclear Hardening of Electronic Equipment. – N.Y. Willey-Interscience, 1973.
2. Никифоров А.Ю., Телец В.А., Яшанин И.Б. и др. Способ разбраковки КМОП микросхем, изготовленных на КНД структурах, по стойкости к радиационному воздействию // Патент РФ №2364880 от 20.08.09 г.
3. Виноградова О.М., Копнов П.В., Фомичев В.В., Яшанин И.Б. Автоматизированная информационная система «Статистическая обработка результатов радиационной отбраковки микросхем» // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007614627 от 06.11.07 г.
4. Clement D.C. and Jonson J.W. TRW Defense and Space Group Satellite Survivability Estimates. // IEEE Transactions on Nuclear Science, Dec. 1981. Vol. NS-28, No.6, pp.4199-4203.
5. Качемцев А.Н, Киселёв В.К., Корсакова Н.Г. Способ определения стойкости электронных компонентов и блоков радиоэлектронной аппаратуры к воздействию ионизирующих излучений // Патент РФ № 2504862 от 17.07.12 г.
6. S. V. Obolensky, A. V. Murel, N. V. Vostokov and V. I. Shashkin, Simulation of the Electron Transport in a Mott Diode by the Monte Carlo Method // IEEE Transaction on Electron Devices, v. 58, N 8, 2011, pp.2507-2510.
7. E.L. Pankratov, S.V. Obolensky Dynamics of radiative point defects in gallium arsenide during relaxation of local heating // Int. Journal of Bifurcation and Chaos, v.18, N 9, (2009), 2845-2849.

8. Оболенский С.В. Физико-топологическое моделирование характеристик субмикронных полевых транзисторов на арсениде галлия с учетом радиационных эффектов: Дис. док. техн. наук // С.В. Оболенский – Москва, 2003. – 292 с.

9. Тарасова Е.А., Оболенский С.В., Дюков Д.И., Фефелов А.Г., Демидова Д.С. Моделирование мощных НЕМТ при облучении квантами высоких энергий // Физика и техника полупроводников. 12. 2012. Т. 46. № 12. 2012. С. 1587-1593.

10. V.B. Shmagin, S.V. Obolensky, D.Y. Remizov, V.P. Kuznetsov, Z.F.Krasilnik Effect of Space Charge Region Width on Er-Related Luminiscense in Reverse Biased Si:Er-Based Light Emitting Diodes // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, v.12 №6, 2006, p.1556-1560.

11. Мырова Л.О., Чепиженко А.В. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям -М.: Радио и связь, 1988, 296 с.

12. Агаханян Т.М., Аствацатурьян Е.Р., Скоробогатов П.К. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 256 с.

13. Вавилов В.С., Кекелидзе Н.П., Смирнов Л.С. Действие излучений на полупроводники. - М.: Наука, 1988. - 192 с.

14. Вавилов В.С., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. - М.: Атомиздат, 1969. - 311 с.

15. Коноплева Р.Ф., Остроумов В.Н. Взаимодействие заряженных частиц высоких энергий с германием и кремнием. - М.: Атомиздат, 1975. - 128 с.

16. Коноплева Р.Ф., Питвинов В.Л., Ухин Н.А. Особенности радиационного повреждения полупроводников частицами высоких энергий. - М.: Атомиздат, 1971. - 176 с.

17. Аствацатурьян Е.Р., Громов Д.В., Ломако В.М. Радиационные эффекты в приборах и интегральных схемах на арсениде галлия. - Минск: Университетское, 1992. - 219 с.

18. Киселева Е.В., Китаев М.А., Оболенский С.В., Трофимов В.Т., Козлов В.А. Радиационная стойкость перспективных арсенид галлиевых полевых транзисторов Шотки // ЖТФ, т.75, вып. 4, 2005, с.136-138.

19. Тарасова Е.А., Демидова Д.С., Оболенский С.В., Фефелов А.Г., Дюков Д.И. Моделирование мощных НЕМТ при облучении квантами высоких энергий // ФТП, т.46, вып.12, 2012, с.1587-1592.

20. Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. Перенос носителей заряда через тонкую базу гетеробиполярного транзистора при радиационном воздействии // ФТП, т.49, вып.1, 2015, с.71-75.

21. Демарина Н.В., Оболенский С.В. Электронный транспорт в нанометровых GaAs структурах при радиационном воздействии // ЖТФ, т.72, вып.1, 2002, с.66-71.

22. Тарасова Е.А., Хананова А.В., Оболенский С.В., Земляков В.Е., Свешников Ю.Н., Егоркин В.И., Иванов В.А., Медведев Г.В., Смотрин Д.С. Исследование распределения электронов в GaN и GaAs структурах после гамма-нейтронного облучения // ФТП, т.50, вып.3, 2016, с.331-338.

23. Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А., Волкова Е.В., Павельев Д.Г. XIX симпозиум "Нанофизика и наноэлектроника", Нижний Новгород, 10-14 марта 2015 г. Высокочастотное детектирование процессов формирования и стабилизации кластера радиационных дефектов в полупроводниковых структурах // ФТП, т.49, вып.12, 2015, с.1585-1592.

24. Кобболд Р. Теория и применение полевых транзисторов - Энергия, 1975.

25. Hatsuaki F. Optimal noise figure of microwave GaAs MESFETs // IEEE Trans., v. ED-26, N 7, 1979, pp.1032 – 1036.

26. Жалуд В., Кулешов В.Н. Шумы в полупроводниковых устройствах. – М: Сов. Радио, 1977. - 416 с.

27. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. – М.: Мир, 1991. - 632 с.

Ссылка на статью:

Оценка воздействия ионизирующих излучений на электронные компоненты по результатам испытаний ограниченных выборок. М.М.Венедиктов, Е.С.Оболенская, В.К.Киселев, С.В.Оболенский. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan17/2/text.pdf>