

Проблемы методологии процессов САПР при проектировании электронной компонентной базы специального назначения для оценки радиационной стойкости

В.В. Лавлинский¹, А.Л. Савченко²

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет

имени Г.Ф.Морозова», lavlinsk@rambler.ru

²ОАО НИИМА «Прогресс», mri@mri-progress.ru

Аннотация — В данной статье рассматриваются общеметодологические аспекты и проблемы при проектировании электронной компонентной базы специального назначения для оценки радиационной стойкости, а также возможности их решения на основе методов 3D моделирования и методов синтеза виртуальной реальности.

Ключевые слова — методология, система автоматизированного проектирования, электронная компонентная база, радиационная стойкость.

I. ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с приложением 2 по развитию технологий проектирования радиоэлектронных систем и комплексов в Федеральной целевой программе (ФЦП) «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» необходимо разрабатывать технологии создания САПР для разработки радиоэлектронных систем (РЭС) и комплексов (РЭК). Это позволяет развить технологии отечественного программно-аппаратного обеспечения и средства разработки для автоматизированного проектирования субмикронных микросхем с использованием различных технологических процессов, повышающих качество и сокращающих сроки разработки радиоэлектронной продукции, реализовать полный технологический цикл проектирования, испытаний и производства унифицированной высокоэффективной, импортозамещающей, конкурентоспособной аппаратуры. Кроме того, в ФЦП определяется необходимость разработки технологий полунатурных и стендовых испытаний сложных информационно-управляющих систем, позволяющих:

создавать метрологически аттестованную унифицированную стендовую испытательную базу для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР);

снижать сроки разработки и стоимость испытаний РЭС и РЭК;

существенно повышать достоверность полунатурного моделирования РЭС и РЭК;

обеспечивать максимальную сходимость результатов с результатами натуральных испытаний.

II. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТОДОЛОГИИ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В САПР

Основные проблемы методологии процессов САПР при проектировании электронной компонентной базы (ЭКБ) специального назначения (СН) для оценки радиационной стойкости заключаются в следующем:

сложность 3D моделирования в САПР компонентов (модулей) ЭКБ СН с учётом воспроизведения физических и химических процессов на уровне кристаллических решёток материалов для отдельных элементов изделия;

сложность 3D моделирования в САПР компонентов (модулей) ЭКБ СН из-за многомерности решаемых задач, что требует методов снижения такой размерности при решении задач оценки радиационной стойкости изделий;

сложность воспроизведения физических явлений в виде воздействий космических лучей, в том числе и тяжёлых ядерных частиц, на совокупность элементов ЭКБ СН из-за необходимости объединения существующих теоретических предпосылок из различных предметных областей знаний;

сложность выбора оптимальных средств 3D моделирования с целью сопрягаемости с существующими САПР;

сложность решения задач оценки радиационной стойкости изделий из-за различного уровня используемой в них топологии, различий применяемых при их изготовлении технологий, особенностей использования существующих и новых материалов изготовления изделий, зачастую с новыми параметрами, которые также оказывают своё влияние на конечный результат, а также сложность 3D моделирования с электрическими параметрами изделий ЭКБ СН.

Кроме того, теоретическими предпосылками для решения проблемы формирования методов 3D моделирования проектируемых объектов электронной компонентной базы на основе синтеза виртуальной реальности являются анализ возможностей современных информационных 3D технологий, а также анализ существующих методов, алгоритмов и моделей проектирования на основе физических процессов, происходящих при воздействиях тяжёлых ядерных частиц.

По результатам проведённого анализа появляется возможность решения проблемы по формированию научных основ для синтеза виртуальной реальности проектируемой радиационно-стойкой электронной компонентной базы специального назначения.

При этом также возникает необходимость формирования методов и алгоритмов разработки компонентов САПР, позволяющих синтезировать различные среды проектирования в виде воздействий космических лучей на элементы ЭКБ СН и их оценки в виде статистических зависимостей, аналогичные проводимым натурным испытаниям.

Причинами формирования методологии автоматизированного проектирования на основе синтеза виртуальной реальности, определяющей проблему формирования методов и алгоритмов для научных основ проектирования устойчивых к воздействиям тяжёлых ядерных частиц ЭКБ СН, являются:

1. Сложность и дороговизна проведения натуральных экспериментов по сбору статистических данных и выявлению релевантных характеристик воздействий тяжёлых ядерных частиц, оказывающих влияние на функционирование элементов ЭКБ СН:

требуются значительные денежные затраты, которые могут занимать более 50% от всей стоимости НИОКР;

значительные временные затраты по сравнению с остальными этапами НИОКР (также сами измерения и обработка результатов экспериментов могут занимать до 70% общего времени НИОКР);

ограничено количество проведения натуральных экспериментов (несколькими единицами);

проверка схем осуществляется отдельно для каждого вида радиационного воздействия и

осуществляется (как правило) без изменения в пространстве положения проверяемой СБИС специального назначения;

ограничение реальных установок до 10^{16} эВ (вместо реально существующих энергий космических лучей до 10^{20} эВ).

2. Сложность математических моделей, описывающих процессы воздействий тяжёлых ядерных частиц, оказывающих влияние на функционирование изделий ЭКБ СН применительно к методам синтеза виртуальной реальности.

3. Множественность структур ЭКБ и их элементов.

4. Необходимость учёта структуры материалов изделий ЭКБ СН на уровне кристаллических решёток.

5. Необходимость учёта физико-технологических процессов для формирования результатов влияния процессов воздействий различной природы на элементы структур ЭКБ СН.

6. Необходимость учёта физических процессов воздействий для различных видов тяжёлых ядерных частиц на элементы структуры ЭКБ СН.

7. Необходимость прогнозирования поведения разрабатываемых СБИС нового поколения при различных видах воздействий тяжёлых ядерных частиц уже на ранних стадиях проектирования радиационно-стойкой электронной компонентной базы специального назначения.

8. Необходимость представления процессов воздействий тяжёлых ядерных частиц на основе синтеза виртуальной реальности в виде 3D моделей.

9. Необходимость учёта структурных повреждений при воздействиях тяжёлых ядерных частиц.

10. Необходимость использования информационных 3D технологий и анализа существующих методов, алгоритмов и моделей проектирования на основе физических процессов, происходящих при воздействиях тяжёлых ядерных частиц.

Таким образом, упрощённое представление этапов проектирования радиационно-стойкой ЭКБ СН может быть представлено на рис. 1.

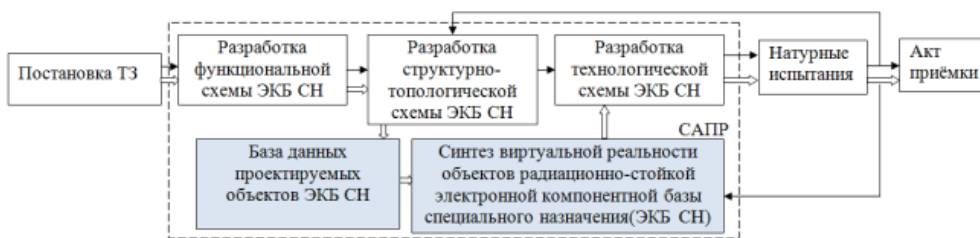


Рис. 1. Упрощённое представление этапов проектирования радиационно-стойкой электронной компонентной базы специального назначения

Следовательно, рассматриваемую проблему и схему исследований данной работы можно схематично представить в виде рисунка 2.

Исходя из этапов проектирования электронной компонентной базы (рис. 1), для разработки структурно-топологической схемы необходимо определять размеры элементов, их основные материалы. Особенностью моделей, предлагаемых для

синтеза и анализа ЭКБ СН, является возможность формирования 3D структур тех материалов, из которых состоят отдельные элементы с учётом видов кристаллических решёток, радиусов атомов химических элементов, периода решётки, основных атрибутов элемента периодической таблицы Менделеева: атомного номера, атомной массы, периода, группы, радиуса ядра, состояния.

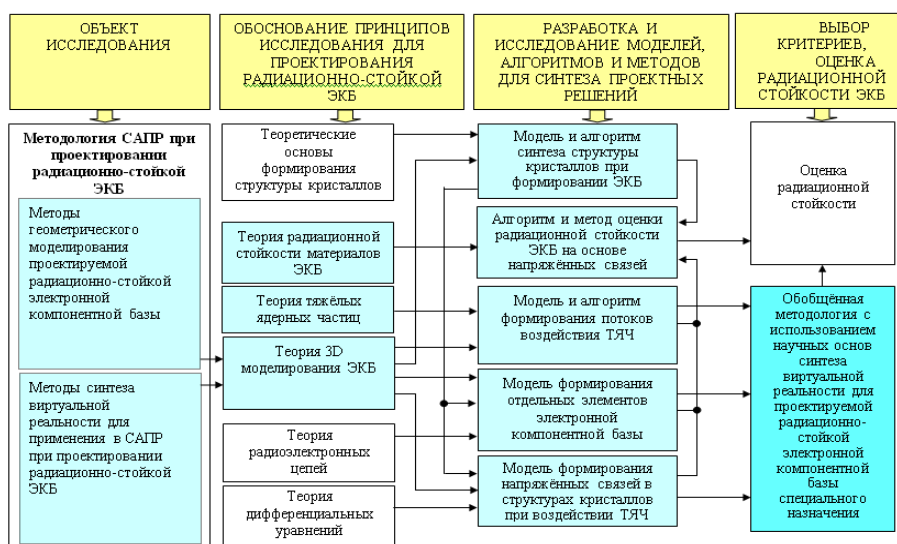


Рис. 2. Схематичное представление исследуемой проблемы и схема её взаимосвязей

Предложенные характеристики являются основой при взаимодействии их с тяжёлыми ядерными частицами в виде ядерных реакций, что в конечном итоге влияет на радиационную стойкость ЭКБ СН и электрические параметры готового изделия.

Так как основными элементами современных субмикронных интегральных схем являются транзисторы, то необходимо определить их составные

элементы. К ним относятся: металлы, полупроводники (р и n типов), а также диэлектрики. Следовательно, это необходимо учитывать при проектировании субмикронных интегральных схем на уровне кристаллических решёток. Обобщенный алгоритм формирования синтеза виртуальной реальности для объектов проектирования радиационно-стойкой ЭКБ СН представлен на рис. 3.

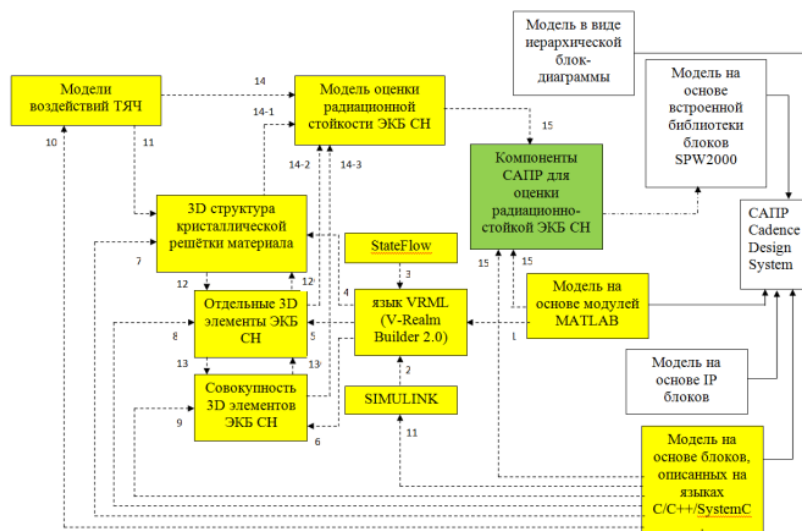


Рис. 3. Обобщённый алгоритм формирования синтеза виртуальной реальности для объектов проектирования радиационно-стойкой электронной компонентной базы специального назначения

Как видно на рис. 3 САПР Cadence Design System имеет возможность сопряжения с помощью моделей на основе модулей MATLAB и на основе блоков, описанных на языках C/C++/SystemC, формировать компоненты САПР для оценки радиационно-стойкой ЭКБ СН. Поэтому первым шагом алгоритма формирования синтеза виртуальной реальности для объектов проектирования радиационно-стойкой электронной компонентной базы специального назначения является возможность использования языка VRML и согласования созданных в нём 3D объектов с моделями SIMULINK (шаг 2) и StateFlow (шаг 3). Исходя из того, что уровень детализации проектируемых 3D объектов различен, целесообразно использовать объектно-ориентированный подход для формирования 3D структур кристаллических решёток материалов полупроводниковых элементов, на их основе переходить к укрупнённым моделям отдельных 3D элементов ЭКБ СН, а затем объединять отдельные 3D элементы в их совокупность для моделирования субмикронных интегральных микросхем (шаги 4, 5, 6, соответственно). Так как возможности языка VRML не достаточно широки, то разработанные модели целесообразно расширить с помощью возможностей языков C/C++/SystemC, связав их между собой с использованием дополнительных компонентов MATLAB (шаги 7, 8, 9, соответственно, для каждого уровня детализации). Также, используя возможности языков C/C++/SystemC, необходимо создать модели процессов распространения тяжёлых ядерных частиц в космическом пространстве с учётом их вероятностей появления и возможных энергий (шаг 10). После этого необходимо связать эти модели распространения с параметрами моделей различной детализации как в одном направлении, так и в другом (шаги 11, 12, 13 и 13', 12', соответственно). На основе взаимодействий всех разрабатываемых моделей формируется модель оценки радиационной стойкости ЭКБ СН (шаги 14, 14-1, 14-2, 14-3), которая будет являться компонентом САПР для оценки радиационно-стойкой электронной

компонентной базы специального назначения (шаг 15) для дальнейшего включения его во встроённую библиотеку блоков SPW2000 системы автоматизированного проектирования Cadence Design System. На рис. 3 жёлтым цветом отмечены блоки, формирующие промежуточные модели, зелёным цветом отмечен блок формирования компонента САПР для оценки радиационно-стойкой ЭКБ СН. Кроме того, пунктирными линиями показаны этапы формирования синтеза виртуальной реальности для объектов проектирования радиационно-стойкой электронной компонентной базы специального назначения, а штрих-пунктирной линией показан этап встраивания компонентов в библиотеку блоков SPW2000 системы автоматизированного проектирования Cadence Design System.

Рассмотрим процесс формирования моделей 3D кристаллических структур материалов для формирования электронной компонентной базы специального назначения.

Прежде чем начать формирование моделей синтеза структуры кристаллической решётки материалов для проектирования ЭКБ СН, целесообразно обосновать выбор подходов при решении задач разработки компонентов для систем автоматизированного проектирования ЭКБ с учетом существующей оценки радиационной стойкости электронной компонентной базы.

Согласно обобщённому алгоритму формирования синтеза виртуальной реальности для объектов проектирования радиационно-стойкой электронной компонентной базы специального назначения, представленному на рис. 3, достижение последнего этапа (шага 15) возможно при условии выполнения всех описанных шагов (шаги 1-14). Однако, перед тем как приступить к выполнению последовательности шагов по созданию компонентов САПР для оценки радиационно-стойкой ЭКБ СН, необходимо

определить релевантные параметры физических процессов, происходящих на уровне радиационного воздействия, и технологии формирования компонентов субмикронных интегральных схем. Так, например, в работах [1, 2] были структурированы виды излучений, взаимодействий, присущие им эффекты, существующие моделирующие установки и имитаторы (рис. 4).



Рис. 4. Структурная схема взаимосвязей видов излучений, взаимодействий, присущих им эффектов, существующих моделирующих установок, имитаторов [1]

Применительно к данной работе следует сделать вывод о необходимости определения:

видов излучений и физических процессов воздействия, происходящих при этих излучениях (для формирования шагов 10, 11 и 14) [3];

видов взаимодействия в зависимости от условий использования ЭКБ СН (для формирования шагов 7, 8, 9, а также 11, 12, 13);

эффектов, присущих устройствам, основанным на полупроводниках (для формирования шагов 14, 14-1, 14-2, 14-3) и указанным на рис. 4.

Особенности методов синтеза виртуальной реальности также определяют необходимость в учёте технологии изготовления субмикронных интегральных микросхем, теоретических подходов в описании процессов взаимодействия на различном уровне детализации компонентов САПР для оценки радиационно-стойкой ЭКБ СН, которые должны базироваться на существующих методах и подходах этой оценки (для формирования шага 15).

Предложенный алгоритм является анализом для дальнейшего синтеза компонентов САПР, включая этапы 1, 2, 3, 4, 5 и 6. Таким образом, целесообразно определить элементы 3D моделирования объектов виртуальной реальности применительно к оценке радиационной стойкости ЭКБ СН.

Применительно к данным исследованиям рис. 4 целесообразно представить в следующем виде (рис. 5).

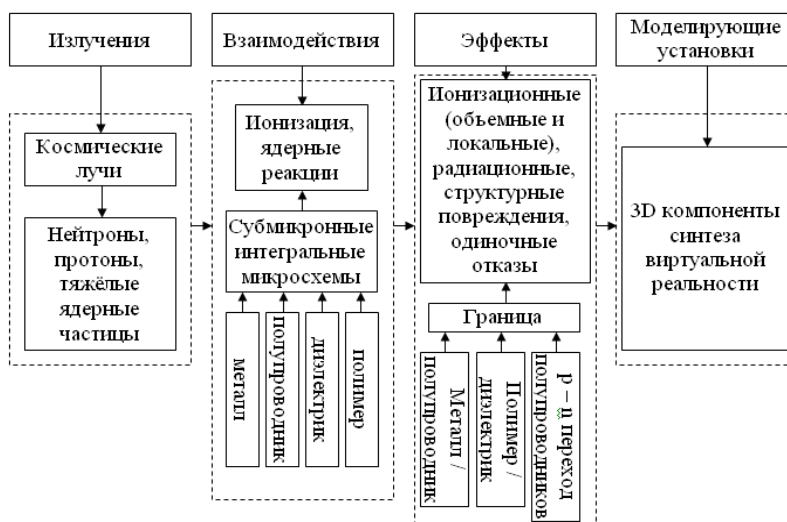


Рис. 5. Структурная схема взаимосвязей применительно к методам синтеза виртуальной реальности

III. Выводы

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

для синтеза виртуальной реальности (шаги 10, 11 на рис. 3) с целью формирования процессов излучения необходим уровень протонов, нейтронов и тяжёлых ядерных частиц (с учетом их свойств в соответствии с параметрами химических элементов периодической системы Менделеева Д.И.);

исходя из основных материалов структур субмикронных интегральных микросхем и их основных элементов, для дальнейшего описания взаимодействий целесообразно создать модели на уровне синтеза структур кристаллических решёток материалов для проектирования электронной компонентной базы (шаги 4, 7 на рис. 3) [4-7, 11];

в дальнейшем взаимодействии между отдельными типами решёток в виде 3D моделей для элементов ЭКБ СН (различные виды транзисторов и т.п.) при синтезе

виртуальной реальности необходимо сочетать принцип для формирования кристаллических решёток элементов транзисторов субмикронных интегральных микросхем с их масштабируемыми моделями на уровне технологических материалов [9, 10], поэтому на этих этапах следует уделять внимание технологическим требованиям в соответствии с ОСТ «Обеспечение качества в процессе разработки» и ОСТ «Технические требования к технологическому процессу», где можно определить параметры отдельных элементов ЭКБ СН (шаги 5, 8 на рис. 3);

дальнейшее взаимодействие между элементами при объединении их на основе сопряжения в 3D модели ЭКБ (шаги 6, 9 на рис. 3) [13, 14];

моделирование эффектов для различных уровней масштабирования 3D элементов с учётом факторов по объёмным и локальным ионизационным эффектам (мощности дозы), по поверхностным (дозовым) радиационным эффектам, по эффектам смещения (структурных повреждений) согласно работе [1] (шаги 11, 12, 13, 13', 12') [12-14];

для формирования модели оценки радиационной стойкости ЭКБ СН следует учитывать ГОСТ «Требования стойкости к радиационным воздействиям», ГОСТ «Методы оценки соответствия радиационных воздействий», ОСТ «Методы испытаний микросхем на радиационную стойкость» (шаги 14, 14-1, 14-2, 14-3 на рис. 3) [8, 12, 15].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Никифоров А.Ю., Скоробогатов П.К., Стриханов М.Н., Чумаков А.И., Борисов Ю.И., Синегубко Л.А., Яшанин И.Б., Борисов А.А., Телец В.А., Улимов В.Н. Базовая технология прогнозирования, оценки и контроля радиационной стойкости изделий микроэлектроники. <http://www.yandex.ru/clck/jsredir>. (доступ 15.10.2014)
- [2] Никифоров А.Ю., Скоробогатов П.К., Стриханов М.Н., Чумаков А.И., Телец В.А. Развитие базовой технологии прогнозирования, оценки и контроля радиационной стойкости изделий микроэлектроники. М. : Известия высших учебных заведений. Электроника. 2012. №97. С. 18-23.
- [3] Лавлинский В.В., Зольников В.К., Таперо К.И. Научные основы синтеза виртуальной реальности для проектируемой электронной компонентной базы специального назначения при воздействии тяжёлых ядерных частиц. Монография // Воронеж : ВГЛТУ. 2016. 256 с.
- [4] Лавлинский В.В., Жвад А.Х., Савченко А.Л. Проектирование МОП-транзисторов на основе построения 3D моделей синтеза виртуальной реальности // Фундаментальные исследования. 2016. №1-1. С. 38-42.
- [5] Лавлинский В.В., Жвад А.Х., Савченко А.Л. Формализация методов моделирования для разработки компонентов САПР с элементами синтеза виртуальной реальности // Современные проблемы науки и образования. 2015. №2-2. С. 171.
- [6] Лавлинский В.В., Жвад А.Х., Савченко А.Л. Метод синтеза виртуальной реальности для формирования 3D модели МОП-транзистора // Моделирование систем и процессов. 2015. Т.8. №3. С. 56-59.
- [7] Лавлинский В.В., Жвад А.Х., Савченко А.Л. Основы формирования 3D моделей для проектирования современных МОП-транзисторов с использованием синтеза виртуальной реальности // Моделирование систем и процессов. 2015. Т.8. №3. С. 59-64.
- [8] Зольников В.К., Уткин Д.М., Лавлинский В.В. Оценка показателей надёжности технических систем при воздействии радиации // Экономика. Инновации. Управление качеством. 2015. №1(10). С. 46-48.
- [9] Лавлинский В.В. Теоретические основы моделирования проектируемых объектов электронной компонентной базы для синтеза виртуальной реальности в виде воздействий тяжёлыми заряженными частицами // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на электронную аппаратуру. 2014. №4. С. 24-32.
- [10] Лавлинский В.В. Теоретические исследования моделирования проектируемых объектов электронной компонентной базы для синтеза виртуальной реальности при воздействии тяжёлыми заряженными частицами // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на электронную аппаратуру. 2014. №4. С. 33-35.
- [11] Лавлинский В.В., Лыков С.И., Аушра А.С. Проектирование различных слоёв кристаллической решётки элементов с использованием методов объектно-ориентированного программирования // Моделирование систем и процессов. 2014. №2. С. 16-19.
- [12] Зольников В.К., Лавлинский В.В., Чевычелов Ю.А., Сербулов Ю.С., Андиферова В.И., Ачкасов В.Н., Табаков Ю.Г. Моделирование ионизационных эффектов и эффектов смещения в цифровых микросхемах для САПР // Лесотехнический журнал. 2014. №4(16). С. 280-291.
- [13] Лавлинский В.В. Теоретические основы моделирования компонентов для систем автоматизации проектирования электронной компонентной базы на основе синтеза виртуальной реальности // Моделирование систем и процессов. 2013. №3. С. 16-20.
- [14] Лавлинский В.В. Теоретические основы моделирования проектируемых объектов электронной компонентной базы для синтеза виртуальной реальности в виде воздействий тяжёлыми заряженными частицами // Моделирование систем и процессов. 2013. №3. С. 20-25.
- [15] Уткин Д.М., Лавлинский В.В., Складар В.А. Математическая модель сложных функциональных блоков, функционирующих в условиях воздействий радиации // Моделирование систем и процессов. 2013. №3. С. 55-58.

Problems of CAD Process Methodology Is Used for the Special Purpose Electronics Components Design for the Evaluation of Radiation Resistance

V.V. Lavlinskiy¹, A.L. Savchenko²

¹Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies by named G.F. Morozov», lavlinsk@rambler.ru

²Joint Stock Company "Progress Microelectronic Research Institute" (JSC Progress MRI), mri@mri-progress.ru

Keywords — methodology, system CAD, electronic component basis, radiation resistance.

ABSTRACT

This article presents the general methodological aspects and problems of the electronic components design for special purpose to assess the radiation resistance, as well as the possible solutions based on 3D simulation methods and synthesis techniques of virtual reality.

The main problems of the CAD methodology are the following:

- the complexity of 3D CAD simulation of the components taking into account the reproduction of physical and chemical processes at lattice level of the material for the separate element;
- the complexity of 3D CAD simulation of the components because of the multidimensionality of the solving tasks that require methods for reduction of such dimension to resolve the radiation resistance problems duly;
- the difficulty of the reproducing the physical phenomenas in the manner of influence cosmic rays, including heavy nucleus particles. There is a need to join theoretical factors from different branches of knowledges;
- the difficulty choice of the 3D model optimum facilities for the reason interfacing with existing CAD;
- employment different level of electronic component basis topologies;
- employment different technology for fabrication of the microchips;
- employment new material with new parameters which influence upon final result.
- Theoretical factors for designed object electronic component basis based on syntheses to virtual reality are an analysis of the methods information 3D technology as well its are based on the methods, algorithms and models to simulate effects of the physical processes of the heavy nuclear particles.

There are many reasons of the creation to methodologies. For example:

- Natural experiment is over specified and expensive;
- Natural experiment has significant expenses of time.
- The number of natural experiment is limited.

Checking the schemes is realized apart for each type of the radiation exposure.

Natural installations have a smaller power than power cosmic rays.

Mathematical models, describing processes influence heavy nucleus particles, are difficult.

Electronic component basis and its elements have multiplicity of the structures.

There is needed to take into account structure at lattice level of the material.

Physical and technological processes must be taken into account.

Different types of the heavy nucleus particles must be taken into account in physical process to influence on elements of the structure.

Radiation resistance of the microchips must be forecasted for different type influence on early stages of the designing electronic component basis of the special purpose.

Influence processes of the heavy nucleus particles must be introduced on base of the syntheses to virtual reality in the manner of 3D models.

Structural damages from influence of the heavy nucleus particles must be taken into account.

Information 3D technologies must be used in methods, algorithms and models of the designing with account external influences.

Thus sizes element and their main material are defined to develop structured-topological schemes. Structured-topological schemes form crystal lattices with account atomic radius of chemical elements, lattice spacing, atomic number, atomic mass, period, cell structure, nuclear radius, state.

In relation to this work we must conclude that we need a definition:

types of radiation and physical processes of the impacts that occur when these radiations;

types of interaction depending on the conditions of use of electronic components;

effects, inherent to the devices based on semiconductors;

Features methods for the synthesis of virtual reality also determine the need in taking into account the manufacture technology of submicron integrated circuits,

theoretical approaches in the description of interaction processes at different levels of detail of the CAD components for assessment of radiation-resistant electronic component basis, which should be based on existing methods and approaches of this assessment.

The proposed algorithm is the analysis for further synthesis of CAD components.

Thus, it is advisable to determine the elements of 3D modeling virtual reality objects with reference to evaluation of radiation resistance of electronic component basis.

Thus, we can conclude the following:

for the synthesis of virtual reality for the purpose of formation processes of radiation required level of protons, neutrons and heavier nuclear particles (including their properties in accordance with the parameters of the chemical elements of the periodic system D. I. Mendeleev);

based on the basic structures of submicron integrated circuits and their main elements, for further description of interactions, it is advisable to create a model at the level of synthesis of structures of the crystal lattices of the materials for the design of electronic components;

further the interaction between different lattice types in the form of 3D models for items of electronic components (various kinds of transistors, etc.) during the synthesis of virtual reality it is necessary to combine the principle for the crystal lattices formation of submicron elements MOSFETs integrated circuits with scalable models at the level of process materials.

Therefore, these stages should pay attention to the technological requirements of «Quality Assurance in the development process» and «Technical requirements for technological process», where you can define the parameters of the individual elements of electronic component basis;

further interaction between the elements when combining them based on the pairing in the 3D models;

modeling the effects of different zoom levels with 3D elements based on the factors for volumetric and local ionization effects (dose rate), for surface (dose) of radiation effects, the effects of displacement (structural damage);

to build the model of estimation of radiation resistance of electronic components for special purposes should be considered «Requirements resistance to radiation impacts», «Methods of conformity assessment of radiation impacts», «Methods of testing circuits for radiation resistance».

REFERENCES

- [1] Nikiforov A.Ju., Skorobogatov P.K., Strihanov M.N., Chumakov A.I., Borisov Ju.I., Sinegubenko L.A., Yashanin I.B., Borisov A.A., Telec V.A., Ulimov V.N. Basic technology of the forecast, evaluation and monitoring radiation resistance of the product microelectronics. (in Russian). Available at: <http://www.yandex.ru/clck/jsredir> (accessed 15.10.2014)
- [2] Nikiforov A.Ju., Skorobogatov P.K., Strihanov M.N., Chumakov A.I., Telec V.A. Development basic technology of the forecast, evaluation and monitoring radiation resistance of the product microelectronics. M. : Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Jelektronik, 2012, no. 97, pp. 18-23 (in Russian).
- [3] Lavlinskiy V.V., Zolnikov V.K., Tapero K.I. Scientific bases of virtual reality synthesis for design of electronic components for special purposes when the effects of heavy nuclear particles. Monography Voronezh : VGLTU., 2016, 256 p. (in Russian).
- [4] Lavlinskiy V.V., Jvad A.H., Savchenko A.L. Design of MOS transistors based on the construction of 3D models of virtual reality synthesis. Fundamental'nye issledovanija, 2016, no. 1-1, pp. 38-42 (in Russian).
- [5] Lavlinskiy V.V., Jvad A.H., Savchenko A.L. Formalization of modeling techniques for the development of CAD components with the elements of the syntheses to virtual reality. Sovremennye problemy nauki i obrazovanija, 2015, no. 2-2, pp. 171 (in Russian).
- [6] Lavlinskiy V.V., Jvad A.H., Savchenko A.L. Method for the synthesis of virtual reality to create 3D models of MOS transistor. Modelirovanie sistem i processov, 2015, V.8, no. 3, pp. 56-59 (in Russian).
- [7] Lavlinskiy V.V., Jvad A.H., Savchenko A.L. The basis for the formation of 3D models for the design of modern MOS transistors with the use of virtual reality synthesis. Modelirovanie sistem i processov, 2015, V.8, no. 3, pp. 59-64 (in Russian).
- [8] Zolnikov V.K., Utkin D.M., Lavlinskiy V.V. The assessment of the reliability of technical systems when exposed to radiation. Jekonomika. Innovacii. Upravlenie kachestvom., 2015, no. 1(10), pp. 46-48 (in Russian).
- [9] Lavlinskiy V.V. Theoretical foundations of simulation of designed objects of electronic component basis for virtual reality synthesis in the form of heavy charged particles influence. Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija: Fizika radiacionnogo vozdejstvija na jelektronnuju apparaturu, 2014, no. 4, pp. 24-32 (in Russian).
- [10] Lavlinskiy V.V. Theoretical foundations of designed objects simulation of electronic component basis for virtual reality synthesis in the form of heavy charged particles influence. Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija: Fizika radiacionnogo vozdejstvija na jelektronnuju apparaturu, 2014, no. 4, pp. 33-35 (in Russian).
- [11] Lavlinskiy V.V., Lykov S.I., Aushra A.S. The design of various layers of lattice elements using the methods of object-oriented programming. Modelirovanie sistem i processov, 2014, no. 2, pp. 16-19 (in Russian).
- [12] Zolnikov V.K., Lavlinskiy V.V., Chevychelov Ju.A., Serbulov Ju.S., Anciferova V.I., Achkasov V.N., Tabakov Ju.G. Modeling ionization effects and displacement effects in digital circuits for CAD. Lesotehnicheskij zhurnal, 2014, no. 4(16), pp. 280-291 (in Russian).
- [13] Lavlinskiy V.V. Theoretical basis of modeling of components for systems of automation of designing of electronic components on the basis of a synthesis of virtual reality. Modelirovanie sistem i processov, 2013, no. 3, pp. 16-20 (in Russian).
- [14] Lavlinskiy V.V. Theoretical foundations of simulation of designed objects of electronic component basis for virtual reality synthesis in the form of heavy charged particles influence. Modelirovanie sistem i processov, 2013, no. 3, pp. 20-25 (in Russian).
- [15] Utkin D.M., Lavlinskiy V.V., Skljjar V.A. Mathematical model of complex functional units, operating in conditions of radiation effects. Modelirovanie sistem i processov, 2013, no. 3, pp. 55-58 (in Russian).