
Алексеев Виктор Федорович 

канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем
Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь»

Пискун Геннадий Адамович

канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем
Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь»

Сыс Анна Дмитриевна

магистр техн. наук,
аспирант кафедры проектирования информационно-компьютерных систем
Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь»

ОБЗОР МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

К современной электронной аппаратуре, как общего, так и специального назначения, предъявляются все более жесткие требования по повышению быстродействия и надежности при снижении габаритных размеров и энергопотребления. Особый интерес представляют силовые микросхемы (ИМС). В связи с малыми топологическими размерами элементов достаточно сложно осуществить эффективную защиту этих микросхем от воздействия электростатического разряда (ЭСР).

Существует достаточно большое число работ в области определения влияния разрядов статического электричества на функционально сложные изделия твердотельной электроники. Наиболее значимые результаты были получены российскими и белорусскими учеными, которые проводили исследования в таких областях, как воздействие разрядов статического электричества на полупроводниковые изделия (Горлов М.И., Белоус А.И., Емельянов В.А., Ануфриев Л.П., Алексеев В.Ф., Пискун Г.А.); методы защиты устройств от электромагнитных помех (Кечиев Л.Н.); средства защиты интегральных схем от воздействия деструктивных импульсов разрядного тока (Каверзнев В.А., Грошева Г.Д.). Среди зарубежных авторов особый интерес вызывают работы Джоввета Ч., Хабигера Э., Шваба А., Amerasekera A., Semenov O. и Voldman Steven H., в которых представлено описание отдельных механизмов влияния и упрощенные аналитические подходы для решения задач, связанных с воздействием разрядов статического электричества на приборы [1–7].

Однако проблема исследования влияния ЭСР на ИМС при воздействии контактного разряда статического электричества разработана не в полной мере. В частности, научный и практический интерес представляет разработка численной модели по исследованию тепловой нестационарности в системе токоведущих элементов микросхем при воздействии контактного разряда статического электричества.

Для стабильности работы электронных средств необходимо знать пределы условий и конструктивных возможностей силовых ИМС при производстве и различных условиях эксплуатации.

Одним из направлений исследования при проектировании ИМС и всего устройства, является влияние температуры как последствия электростатического разряда.

Следует отметить, что сложность и дороговизна оборудования для экспериментов, а также большая разновидность типов силовых ИМС и их конструкторских особенностей ведет к определенным значительным затруднениям при проведении исследований опытным путем.

Все эти факторы позволяют сделать вывод, что необходимо разрабатывать числовые модели по имитации физических процессов в силовых ИМС.

Рассмотрим некоторые вычислительные системы, позволяющие в той или иной степени выполнить численное моделирование воздействия ЭСР на электронные компоненты:

- *ANSYS* – универсальная система конечных элементов (КЭ) анализа с встроенным пре-/постпроцессором;
- *MSC.Nastran* – универсальная система КЭ анализа с пре-/постпроцессором *MSC.Patran*;
- *Impact* – универсальная система КЭ анализа с встроенным пре-/постпроцессором;
- *NXNastran* – универсальная система КЭ анализа с пре-/постпроцессором *FEMAP*;
- *COMSOL Multiphysics* – универсальная система КЭ анализа с пре-/постпроцессором;
- *NX Nastran* – универсальная система МКЭ анализа;
- *Zebulon* – универсальная система МКЭ анализа с расширенной библиотекой нелинейных моделей материалов.

Из перечня выделенных программ, можно сделать основной вывод: наиболее общим и достаточно эффективным методом численного моделирования сложных систем, к каким относится и система электростатического разряда, является метод конечных элементов (МКЭ) [8]. Основная идея метода конечных элементов состоит в минимизация функционала вариационной задачи на множестве кусочно-непрерывных функций, каждая из которых определена на конечном числе подобластей. Кусочно-непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемой области.

В общем случае непрерывная величина заранее неизвестна, и нужно определить значения этой величины в некоторых внутренних точках области. Однако дискретную модель можно построить, если предположить, что числовые значения этой величины в каждой внутренней точке области известны. Для непрерывной величины поступают следующим образом [8]:

- в рассматриваемой области фиксируется конечное число точек. Эти точки называются узловыми точками, или узлами;
- значение непрерывной величины в каждой узловой точке считается переменной, которая должна быть определена;
- область определения непрерывной величины разбивается на конечное число подобластей, называемых элементами. Эти элементы имеют общие узловые точки и в совокупности аппроксимируют форму области;
- непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе полиномом, который определяется с помощью узловых значений этой величины. Для каждого элемента определяется свой полином, но полиномы подбираются таким образом, чтобы сохранялась непрерывность величины вдоль границ элемента.

К недостаткам метода конечных элементов относят: искусственное ограничение области расчета, дискретизацию окружающего пространства, выполнение новой дискретизации при изменении положения элементов. Хотя ресурсы совершенствования МКЭ практически исчерпаны, однако ведется разработка численных методов, а также реализующих их программных комплексов, позволяющих более экономично использовать

вычислительные ресурсы и гарантировать эффективное решение многовариантных задач анализа и проектирования.

Разбиение области на подобласти носит феноменологический характер, следовательно, зависит от имеющихся навыков. Некачественное разбиение приводит к ошибочным результатам, если даже остальные этапы метода осуществляются с достаточной точностью. Процедура дискретизации области состоит из задания числа, размеров и формы подобластей, которые используются для построения дискретной модели реального объекта. Элементы необходимо выбирать с достаточной точностью, т.е. размер элемента должен зависеть от сходимости задачи, поэтому нужно иметь некоторые общие соображения об окончательных значениях, с тем чтобы можно было уменьшить размеры элементов в тех областях, где значение градиентов велико, и увеличить их там, где значение градиентов близко к нулю. Отметим, что в программных комплексах типа дискретизация области проводится пользователем. Это обусловлено тем, что общего метода разбиения на элементы в настоящее время не существует, и наиболее эффективный метод разбиения – это навык пользователя, знающего природу описываемого процесса.

Продвижение в область субмикронных размеров сопровождается существенным ростом сложности проектирования и изготовления силовых микросхем: технологический процесс насчитывает несколько сотен операций; используется уникальное технологическое и измерительное оборудование, материалы и оснастка; предъявляются сверхжесткие требования к чистоте и климату производственных помещений; становится обязательным учет малоразмерных физических эффектов при проектировании схем, аналитический расчет которых на основе инженерных формул в принципе невозможен. Применение субмикронных технологий требует обязательного учета трехмерных эффектов при проектировании конструкций элементов силовых микросхем, что также существенно усложняет их разработку. Особые трудности вызывает защита от воздействий ЭСР.

Для выявления и различных исследований процессов при воздействии ЭСР используют различные структурные электрические модели (СЭМ), в которых тело человека и его отдельные части вместе с этой аппаратурой задаются в виде эквивалентных сопротивлений, емкостей и индуктивностей. Затем моделируется электрический разряд с тела на аппаратуру и рассматривается протекающий при этом переходный процесс [1–7].

При описаниях моделей учитываются способы возникновения ЭСР. Так электрические заряды в материалах могут возникать при разрыве контакта между ними, при деформации материалов, при их трении друг о друга. Кроме того, они могут появляться при получении этих материалов, их переработке и эксплуатации.

На базе справочных данных о свойствах материалов, задействованных при воздействии ЭСР, и физических характеристиках протекающих процессов, строится математическая модель для каждого случая и на базе ее производится компьютерное моделирование.

Структурные электрические модели заряжения и разрядов в электронной аппаратуре базируются, прежде всего, на понятии системы, как взаимодействующих объектов, в которой возникает ЭСР. Для рассмотрения и моделирования воздействия электростатических разрядов на силовые ИМС это прежде всего система «оператор-аппаратура», характеризующаяся разрядами статического электричества с заряженного тела оператора на аппаратуру. Еще одним примером такого рода системы является компонент электронной схемы, заряжающийся в процессе движения по конвейеру, и затем разряжающийся на близко расположенный и заземленный проводящий предмет. В этом случае система носит название модели «заряженного компонента».

Модели воздействия электростатических разрядов на микросхемы достаточно хорошо описаны в [1].

Список использованных источников:

1. The Impact of ESD on Microcontrollers / G.A. Piskun, V.F. Alexeev, S.M. Avakov, V.E. Matyushkov, D.S. Titko; edited by PhD, Associate professor V.F. Alexeev. – Minsk: Kolorgrad, 2018. – 184 p.
2. Алексеев, В.Ф. Испытание электронных средств по моделям воздействия электростатического разряда / В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун, Н.А. Панасюк // Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: міжгалузеві диспути: матеріали XV міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, Київ, 29 квітня 2021 р. / Наукова платформа Open Science Laboratory. – Київ, 2021. – С.284–293.
3. Алексеев, В.Ф. Моделирование тепловых полей электронных систем в среде ANSYS / В.Ф. Алексеев, Д.В. Лихачевский, Г.А. Пискун // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 20-21 мая 2020 года: в 3 ч. Ч. 3 / редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск: Бестпринт, 2020. – С. 282 – 286.
4. Моделирование джоулевого нагрева в среде COMSOL Multiphysics / В.Ф. Алексеев и др. // Доклады БГУИР. – 2018. – № 7 (117). – С. 90 - 91.
5. Программное обеспечение инженерного моделирования физических процессов. Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч.1: Тепловые режимы работы и защиты конструкций РЭС от механических воздействий: пособие / В.Ф. Алексеев, И.Н. Богатко, Г.А. Пискун. – Минск: БГУИР, 2017. – 124 с.
6. Алексеев, В.Ф. Методика численного моделирования тепловых процессов в микроэлектронных структурах / В.Ф. Алексеев, Д.В. Лихачевский, Г.А. Пискун // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 20-21 мая 2020 года: в 3 ч. Ч.3 / редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск: Бестпринт, 2020. – С. 34 – 37.
7. Алексеев, В.Ф. Воздействие разрядов статического электричества на полупроводниковые структуры и интегральные схемы / В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун, А.А. Лисовский // Danish Scientific Journal. – 2018. – Vol.1, № 19. – Pp. 31–41.
8. Лаборатория информатики и параллельных вычислений // COMSOL graal.ens-lyon.fr [Electronic resource]. – 2010. – Mode of access: <http://graal.ens-lyon.fr/MUMPS> – Date of access: 17.09.2021.
9. Глушко, А.А. Моделирование технологии изготовления субмикронных КМОП СБИС с помощью систем TCAD / А.А. Глушко, И.А. Родионов, В.В. Макаручук // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2007. – №4. – С.32-34.