

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КЛЮЧЕЙ

В.Н. Устюжанинов

Рассмотрены особенности проблемы обеспечения радиационной стойкости полупроводниковых приборов для устройств силовой микроэлектроники. Представлена классификация типовых задач разработки расчетно-теоретических моделей для оценки радиационной стойкости приборов различных типов. Обосновываются алгоритмы и методики решения прикладных задач оценки и повышения радиационной стойкости силовых полупроводниковых ключей.

Ключевые слова: силовые полупроводниковые ключи, радиационная стойкость, системные признаки.

Высокие уровни электрической мощности (десятки Ватт – сотни киловатт), коммутируемой приборами и устройствами силовой электроники, обуславливают специфику структурно-топологических, технологических и схемотехнических решений, обеспечивающих выполнение требований к электрическим параметрам [1]. Интеграция в объеме кристалла силового ключа слаботочных и силовых транзисторов биполярного и МОП – типов с различными схемотехническими и топологическими вариантами соединения и взаимодействия между собой позволяет рассматривать силовые приборы как «системы на кристалле» или «системы в корпусе» с полным функциональным набором системных признаков.

В общем случае такие системы подразделяются на подсистемы:

- формирования импульсов управления силовыми ключами;
- защиты от перегрузочных электрических и тепловых режимов;
- источники питания вспомогательных устройств.

Структура формирователей импульсов содержит: управляющую логику, силовые драйверы мощных ключей, схемы потенциальной развязки логических и силовых каналов управления мощным полупроводниковым ключом. Силовые драйверы состоят из усилителей мощности, преобразователей уровней, логических устройств, элементов задержки, защиты и формирования импульсов на управляющих входах силового ключа. Структура подсистемы защиты включает средства пассивной защиты («снабберные диоды»), простые или интеллектуальные (с управляющим микроконтроллером) датчики перегрузочных электрических и тепловых режимов.

В зависимости от электрических параметров и функционального назначения силового ключа, архитектура системы управления может быть построена с полным набором подсистем и функциональных элементов, однако для относительно маломощных ключей применяется минимальный набор вспомогательных элементов инфраструктуры, интегрированных в кристалле силового ключа. Это означает, что в условиях действия радиационных факторов для силовых полупроводниковых ключей (СПК) можно прогнозировать возможность развития всех классифицируемых видов отказов для регламентируемых воздействующих факторов [2]. Системной особенностью такой компонентной базы является относительно низкие уровни показателей радиационной стойкости, что обусловлено интеграцией в одном кристалле взаимодействующих слаботочных и силовых элементов. Нарушение алгоритмов взаимодействия сильно – и слаботочных фрагментов архитектуры силовых ключей в условиях действия радиационных факторов является еще одной причиной расширения перечня механизмов для отказов различных видов.

Топологическая структура кристалла СПК отличается от структуры биполярного или МОП – транзистора преобладающим числом границ раздела различных сред, преимущественно типа полупроводник-полупроводник, металл-полупроводник, диэлектрик – полупроводник, металл-диэлектрик. Неизбежное разнообразие вариантов сочетания таких границ для типовых режимов функционирования создает предпосылки для формирования паразитных транзисторных или тиристорных структур, которые могут активизироваться при выходе рабочей точки за границы области допустимых режимов работы [1]. В условиях действия внешних радиационных факторов любой физической природы вероятность подобного развития событий, с учетом напряженных электрических и тепловых режимов, может только возрастать, что расширяет множество возможных видов отказов. Соответственно возрастает минимальный объем теоретических и экспериментальных исследований, которые необходимо выполнить для оценки показателей радиационной стойкости в различных режимах функционирования силовых ключей.

Следствием усложнения физико-топологической структуры базовых элементов силовых ключей различных типов является увеличение по закону 2^n , где n - число силовых транзисторов с различными вариантами соединения в составе силового ключа, числа различных состояний силовых приборов. В частности для распространенных приборов типа *IGBT* для характеристики текущего состояния используются два признака: прямое или инверсное включение силового биполярного транзистора, включенное или выключенное состояние управляющего МОП - транзистора [3]. Каждому из четырех

возможных состояний силового прибора соответствует определенный набор состояний активируемых $p - n$ – переходов, определяющий амплитудно-временные характеристики ионизационных токов. Такая особенность расширяет возможности оптимизации схемотехнических решений устройств силовой электроники. При этом пропорционально растут объемы необходимых исследований радиационной стойкости.

Расширение числа различных состояний силовых ключей сопровождается значительным, по закону 2^{2^n} , увеличением числа способов смены состояний для элементов функциональной структуры и, в ряде случаев, двоичного состояния выхода силового ключа под воздействием сигналов системы управления. Это позволяет оптимизировать алгоритмы управления СПК, в частности для повышения достижимого быстродействия, но неизбежно влечет повышение разнообразия радиационных реакций элементов функциональной структуры, включая формирование латентных отказов.

Инвертирование состояний управляющих и силовых элементов структуры силовых ключей сопряжено с коммутацией больших переходных токов и напряжений, что, в ряде случаев, сопровождается рассеянием больших электрических и тепловых мощностей на кристалле и элементах конструкции корпуса, способствующих перемещению рабочей точки прибора на границы области безопасной работы. Часто переходные процессы имеют вид затухающих колебаний, когда нестационарные амплитуды напряжений и токов достигают критических значений. Возможная интенсификация таких процессов в полях ионизирующих излучений требует специальных исследований особенностей радиационной деградации электрических параметров для приборов силовой электроники при воздействии излучений низкой и высокой интенсивности.

Системной особенностью СПК является сильная зависимость параметров коммутируемых импульсов токов и напряжений не только от внутренних параметров ключа, но и от характеристик внешней нагрузки. По этому критерию различают режимы работы силового ключа на резистивную, индуктивную и емкостную нагрузку [1]. Такая особенность обуславливает зависимость ионизационных реакций силового ключа не только от электрических режимов, состояний и конструктивно-топологических параметров, но и от комплексных параметров нагрузочного импеданса. Это означает, что физико-топологическая структура силовых ключей разрабатывается с учетом относительно узкой области специализированного применения для типовых нагрузок. В этих условиях влияние радиационных факторов может усиливать или ослаблять опасные эффекты режимного функционирования, что и вызывает необходимость полномасштабных теоретических и экспериментальных исследований каждой потенциально опасной ситуации. Результатами исследований можно рассматривать определение критериальных параметров, их численных значений и предельных отклонений для каждого типа силового ключа и воздействующих факторов.

Отмеченные особенности типовых режимов функционирования силовых ключей необходимо учитывать при разработке концепции исследования и нормирования показателей радиационной стойкости силовых полупроводниковых ключей. Представляется очевидным, что, вследствие высокой размерности задачи, практически реализуемые теоретические и экспериментальные исследования всегда будут проблемно ориентированными, т.е. имеющими целью получение количественных оценок параметров радиационных эффектов в структуре конкретного силового прибора в составе определенного устройства с известными электрическими режимами функционирования при воздействии различных внешних факторов. Большое разнообразие вариантов постановки задач в рамках подобных исследований повышает актуальность проблемы разработки концептуальных основ и алгоритмов анализа и расчета радиационной стойкости приборов и устройств силовой электроники.

Эффективная концепция анализа и расчета показателей радиационной стойкости различных структурных и технологических вариантов силовых ключей может быть создана на основе учета общих закономерностей функционирования и частных структурно-режимных особенностей для силовых ключей каждого типа. Анализ структуры СПК [1] позволяет определить системные признаки и особенности обобщенной структурной модели силовой части:

1. Параметры коммутируемых импульсов тока и напряжения в нагрузке определяются особенностями режимов переключения и топологией силовой части прибора, объем которой составляет 80 – 90% от общего объема структуры силового ключа.
2. Число вариантов переключения эмиттерного перехода биполярного силового транзистора или канала
 - переключение из режима прямого тока в нейтральное состояние;
 - переключение из режима прямого тока в режим обратного напряжения;
 - переключение из нейтрального состояния в режим прямого тока;
 - переключение из режима обратного напряжения в режим прямого тока.

Перечисленные варианты смены состояний силовых элементов следует рассматривать как наиболее типичные. В реальных условиях перечень может быть дополнен нештатными ситуациями, в том числе обусловленными действием радиационных факторов:

- переключение из режима прямого падения напряжения в режим обратного смещения;

- переключение из режима обратного смещения в режим прямого смещения и др.

Различные варианты переключения силового элемента в составе структуры силового ключа могут быть обусловлены алгоритмом функционирования, реализуемым системой управления. Они могут быть следствием нарушения синхронизации сигналов управления, вызываемого действием режимных или радиационных факторов. Инвертирование полярности питающих напряжений также сопровождается переходными процессами переключения силовых транзисторов.

3. Переходные процессы переключения силовых элементов всегда сопровождаются рассеянием тепловой мощности на кристалле. Одним из условий обеспечения надежности функционирования силовых ключей является минимизация длительности, а также мгновенных значений амплитуд переходных токов и напряжений, что обуславливает необходимость разработки теоретических моделей амплитудно-временных характеристик переходных процессов смены состояний в условиях действия стационарных и нестационарных радиационных факторов. Анализ показывает возможность постановки и решения с различной степенью приближения типового перечня задач нестационарной электропроводности для силовых элементов методами аппарата математической физики. Получаемые в результате теоретические модели переходных токов и напряжений инвариантны относительно особенностей функциональной структуры силовых ключей. Такой подход позволит создать базу типовых теоретических моделей электрических реакций для силовых ключей различных конструктивно-топологических и технологических вариантов на радиационные воздействия различной физической природы с различными спектрально-энергетическими характеристиками.

Функции управления, контроля, защиты от перегрузок, преобразования уровней напряжений и согласования электрических параметров с окружающей средой выполняет относительно слаботочная часть инфраструктуры силового ключа, определяемая как система управления. Относительно большое разнообразие видов функциональных преобразований, выполняемых различными элементами системы управления, обуславливают возможность развития всех классифицируемых типов отказов [2]. Для интегрированных в структуре кристалла силового ключа систем управления возможности экспериментальных исследований радиационной стойкости практически отсутствуют, как и для ключа в целом. Это является следствием несовместимости требований к электрическим режимам функционирования изделий с условиями радиационных испытаний и с характеристиками испытательного оборудования. Реализация фрагментов систем управления (управляющая логика, формирователи импульсов управления, драйверы, ускоряющие и защитные диоды, датчики температуры перегрева и др.) в виде кристаллов или специализированных микросхем создает предпосылки для получения относительных оценок показателей стойкости их методами имитационных или радиационных испытаний. Не формализуемое разнообразие структурных вариантов реализации систем управления даже для силовых ключей одного типа или одного уровня мощности исключает возможность анализа и теоретических оценок радиационной стойкости в рамках единой обобщенной модели.

Отмеченные особенности, наиболее значимой из которых является, по-видимому, интеграция в структуре кристалла сильноточных и относительно слаботочных взаимодействующих элементов, определяют специфику проблемы определения радиационной стойкости приборов и устройств силовой электроники различных типов. Практическая нереализуемость методик и алгоритмов типовых радиационных испытаний [2] применительно к силовым ключам обуславливает необходимость разработки альтернативных подходов к решению подобных задач. Анализ возможных компромиссных вариантов приводит к выводу о целесообразности максимально широкого использования расчетных методик и алгоритмов, дополняемых, при наличии возможности, результатами радиационных испытаний фрагментов функциональной структуры силового ключа. Состав и структура таких фрагментов в каждом конкретном случае определяется возможностями обеспечения электрического контакта с элементами функциональной структуры через внешние выводы микросхемы. При этом силовой ключ может находиться в пассивном режиме, без электрического контакта с элементами типовой инфраструктуры, или в режиме ограниченного функционирования, когда внешние управляющие или питающие напряжения подаются лишь на выделенные для конкретных испытаний выводы микросхемы. Полученные в результате локальных испытаний данные могут использоваться для уточнения расчетных характеристик или в качестве параметров расчетных моделей.

Физическим обоснованием информативности результатов пассивных или полуактивных испытаний является практическое отсутствие зависимости фототока обратносмещенного полупроводникового диода от напряжения обратного смещения. Такая особенность обеспечивает постоянство генерируемых обратносмещенными $p - n$ – переходами ионизационных токов в активном и пассивном режимах. Использование возможных парных комбинаций внешних выводов силовых ключей в пассивном или полуактивном режиме для регистрации импульсов фототоков при воздействии гамма – импульсного облучения или стационарного фототока при непрерывном облучении позволяет, в ряде случаев, определить относительные или абсолютные характеристики генераторов фототоков – обратносмещенных $p - n$ – переходов. Такие возможности обусловлены особенностями силовых

приборов – большими относительными и абсолютными значениями площадей переходов и, соответственно, объемов собирания носителей заряда, что создает предпосылки для надежной регистрации импульсных или стационарных фототоков при использовании типовых испытательных средств.

Рассматриваемая концепция предусматривает проведение серии радиационных испытаний силовых ключей в пассивном или полупассивном режимах, как альтернативный вариант технически неосуществимым типовым испытаниям. Число таких испытаний определяется в каждом конкретном случае числом сочетаний C_N^2 , где N – число внешних выводов кристалла силового ключа. Из общего множества вариантов выбираются информативные, т.е. такие пары внешних выводов, которые обеспечивают доступ к источникам ионизационных токов в виде соответствующих $p - n$ – переходов. Известные зависимости ионизационных токов от электрофизических и топологических характеристик элементов структуры [4] в сочетании с известными параметрами ионизационных воздействий и электрическими параметрами СПК создают предпосылки для синтеза расчетно-экспериментальной модели радиационной стойкости силового ключа.

Структура такой модели содержит подсистему уравнений для ионизационных токов, величины которых определяются в результате радиационных испытаний в пассивном режиме, подсистему уравнений электрических параметров приборов в структуре силового ключа и взаимосвязей между ними, подсистему уравнений, устанавливающую зависимости между электрическими параметрами силового ключа и внутренними электрическими параметрами элементов в составе его структуры. Совокупность таких подсистем образует прогностическую модель радиационной стойкости для определенного вида воздействий внешних факторов. Очевидно, что число уравнений в составе каждой из подсистем определяет меру адекватности и сложности прогностической расчетно-экспериментальной модели. Это означает, что состав каждой подсистемы уравнений определяется сложностью функциональной структуры, числом, типом и способами эквивалентных электрических соединений активных элементов структуры между собой.

Математические модели электрических параметров биполярных и МОП – транзисторов известны, что минимизирует вариативность соответствующей подсистемы в составе модели. Ограниченное число активных элементов и способов взаимодействия их между собой в структуре собственно силового ключа позволяет представить математические модели входных и выходных токов и напряжений таких композиций в табличной форме. В результате, проблема оценки показателей радиационной стойкости для силового ключа сводится к задаче разрешимости системы алгебраических уравнений. Формальный признак решения подобных задач сводится к условию равенства числа переменных числу уравнений. Одним из способов повышения разрешимости является расширение подсистемы уравнений для ионизационных токов, что достигается увеличением объема радиационных испытаний в пассивном или полупассивном режимах. Таким способом расширяется объем начальной информации о свойствах структуры силового ключа, что формально отображается в виде сокращения разрыва между числом неизвестных и числом уравнений в составе системы, являющейся способом формального отображения свойств физической и функциональной структуры исследуемого объекта.

Рассматриваемый подход может быть применен и в случаях, когда отдельные подсистемы функциональной структуры СПК реализованы в виде специализированных микросхем, т.е. для «систем в корпусе». Подобная дезинтеграция сложной функциональной структуры расширяет возможности комплексирования сложных структур силовых ключей на основе базовых элементов с целью оптимальной адаптации к совокупности требований и условиям функционирования. Подобные технические решения упрощают задачи исследований радиационной стойкости, как на основе рассматриваемого концептуального подхода, так и в вариантах, предусматриваемых нормативными документами [2].

Формальная разрешимость системы уравнений, отображающих свойства приборов силовой электроники в полях радиационных воздействий, чаще является скорее исключением, нежели правилом. Причинами могут служить неадекватность отдельных уравнений в составе подсистем, неполный состав уравнений, что может быть обусловлено проблемами схмотехнического анализа, совокупность проблем радиационных испытаний т.п. Подобные ситуации требуют специального анализа с целью оценки количества полезной информации, относительно показателей радиационной стойкости объектов, которую можно получить в условиях отсутствия необходимого объема исходной информации.

Одним из возможных вариантов расширения объема исходной информации является использование дополнительных источников внешнего смещения, подаваемого на соответствующие выводы СПК, с целью перевода в режим обратного смещения нормально прямосмещенных $p - n$ – переходов в составе измерительной цепи в виде двухполосника, используемой для регистрации ионизационных токов через выделенную пару внешних выводов. Некоторые типы СПК допускают возможность инвертирования полярности напряжений питания, что также расширяет возможности экспериментального определения характеристических и критериальных параметров элементов

функциональной структуры. Проведение тестовых радиационных испытаний подобного рода особенно эффективно на базе малогабаритных ускорителей типа ARSA .

Использование расчетно-экспериментальной модели радиационного поведения СПК в виде системы алгебраических уравнений, в случае формальной неразрешимости ее, создает предпосылки для получения практически значимой информации. Она может быть представлена в виде абсолютных оценок для части критериальных параметров, или в виде отношений вида $>$, $<$, $=$ для оставшейся части параметров. Определение соотношений между критериальными параметрами СПК в обычных режимных и радиационных условиях позволяет определить «слабое звено» в структуре силового ключа, что создает предпосылки для оптимизации теоретических и экспериментальных исследований.

В частности, сопоставление, нормированных относительно режимных значений, ионизационных токов для различных цепей при воздействии стационарных или импульсных излучений позволяет определить элементы функциональной структуры СПК с повышенной чувствительностью к радиационному облучению. Это приводит к упрощению эквивалентной функциональной модели силового ключа путем удаления из нее источников ионизационных токов в виде потенциально стойких элементов. Соответствующим образом упрощается математическая модель в виде системы уравнений путем исключения переменных, фрагментов и уравнений с малыми весовыми коэффициентами. В результате повышается степень разрешимости системы или понижается степень неопределенности при установлении отношений вида «больше», «меньше», «равно» между ионизационными характеристиками различных элементов структуры. Дополнительное введение количественных характеристик неравенств позволяет путем последовательной реализации такого алгоритма определить элемент (или элементы) функциональной структуры СПК, определяющие значение показателей радиационной стойкости в различных режимах функционирования при воздействиях внешних факторов различной физической природы.

Установление элементов функциональной структуры, определяющих показатели стойкости СПК к воздействию конкретных факторов КП, позволяет повторить цикл рассмотренных выше процедур, в объектно-ориентированном варианте. При этом задействуются только такие пары внешних выводов СПК, которые обеспечивают, по возможности, прямой электрический контакт или наиболее короткий путь доступа к элементу структуры, определяющему стойкость силового ключа в целом. Проведение тестовых радиационных испытаний на воздействие стационарных или импульсных излучений с различными, зависящими от решаемой проблемы, спектрально-энергетическими характеристиками, позволит уточнить параметры системы уравнений, понизить размерность математической модели путем сокращения числа и упрощения уравнений в составе модели. Ожидаемым результатом может быть понижение степени неопределенности вплоть до уровня формальной разрешимости математической модели.

В ряде случаев надежность получаемой в рамках рассматриваемой концепции информации может быть повышена в результате выполнения радиационных испытаний, с различными интенсивностями воздействий, СПК или его фрагментов, функционирующих в условиях ограничения напряженности электрических режимов. Признаками адекватности разработанной математической модели в этом случае следует рассматривать закономерную зависимость параметров электрического отклика исследуемого элемента структуры от уровня радиационных воздействий, а также слабую или линейную зависимость параметров электрической реакции от уровней напряженности ограниченных электрических режимов.

Концептуальные основы рассматриваемой методики предусматривают возможность гибкого сочетания возможностей экспериментальных методов с преимуществами применения теоретических оценок в условиях адаптации к особенностям электрических и конструктивно-технологических параметров. Такой подход создает предпосылки для получения информации о радиационной стойкости приборов и устройств силовой электроники путем замены уникальных по составу и требованиям к оборудованию испытаний множеством относительно простых экспериментов, в ряде случаев осуществимых в лабораторных условиях.

Литература

1. **Воронин П.А.** Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Издательский дом «Додэка XXI», 2005. – 384 с.
2. ОСТ 134 – 1044 – 2007.
3. **Устюжанинов В.Н., Фролова Т.Н.** Параметры силовых биполярных транзисторов в составе NPT IGBT в условиях воздействия ионизирующих излучений // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2007. Вып. 1-2. С. 24 – 28.
4. **Устюжанинов В.Н., Чепиженко А.З.** Радиационные эффекты в биполярных интегральных микросхемах. М.: Радио и связь, 1989.

