

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.396.6.011.7:621.391.823/825

МАКАРЕВИЧ СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ

**СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОВЫШЕННОЙ
УСТОЙЧИВОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ К ИМПУЛЬСНЫМ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ МЕГАГЕРЦОВОГО
ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ**

Специальность 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 2006

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель

кандидат технических наук, профессор
Образцов Николай Сергеевич
(Учреждение образования
«Белорусский государственный
университет информатики и
радиоэлектроники», кафедра
радиоэлектронных средств)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Лыньков Леонид Михайлович
(Учреждение образования
«Белорусский государственный
университет информатики и
радиоэлектроники», кафедра защиты
информации)

кандидат технических наук, с. н. с.
Мельников Виктор Павлович
(Государственное научное учреждение
«Институт электроники НАН Беларуси»,
лаборатория электрических и магнитных
измерений)

Оппонирующая организация:

Научно-производственное объединение
«Интеграл», научно-технический центр
«Белмикросистемы» УП «Завод
полупроводниковых приборов»

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Эксплуатация современных радиоэлектронных средств (РЭС) происходит в условиях многочисленных внешних дестабилизирующих факторов, среди которых большую угрозу для сохранения работоспособности РЭС представляют наводки, вызываемые импульсными электромагнитными помехами (ЭМП). В отличие от радиопомех и шумов, воздействие импульсных ЭМП мегагерцового диапазона частот на РЭС приводит к нарушению их функционирования в результате возникновения во внешних и внутренних цепях РЭС наведенных напряжений и токов, которые могут привести к локальному выделению за достаточно короткий промежуток времени на ряде элементов РЭС значительного количества теплоты и, как следствие, к их параметрическим и катастрофическим отказам.

Задача обеспечения помехоустойчивости интегральных микросхем (ИМС), как основной элементной базы РЭС, стала одной из наиболее важных. Использование ИМС, особенно средней и большой степени интеграции (СИС и БИС), приводит к значительному изменению методов конструирования цифровых устройств, резко увеличению плотности элементов. При этом возрастают требования к помехоустойчивости интегральных микросхем, особенно по отношению к импульсным помехам мегагерцового диапазона частот, а также к конструкциям линий связи. Задача обеспечения импульсной помехоустойчивости цифровых устройств усложняется при использовании ИМС с высоким быстродействием. В этом случае время переключения схем соизмеримо со временем распространения сигнала в линиях связи и длительностью помех, возникающих в них. Кроме того, проблема импульсной помехоустойчивости имеет большое значение для устройств, в которых применяются МДП ИМС, обычно имеющих низкую статическую помехоустойчивость. При этом основной задачей является поиск схемотехнических решений защиты, оказывающих минимальное влияние на работу изделий электронной техники (ИЭТ), в частности не снижающих быстродействие ИМС.

В связи с вышеизложенным исследование и разработка эффективных схемотехнических методов обеспечения повышенной устойчивости ИМС к импульсным электромагнитным воздействиям мегагерцового диапазона частот является актуальной научной задачей и представляет значительный научный и практический интерес, который также возрастает вследствие уменьшения геометрических размеров элементов, входящих в их состав, по мере их масштабирования.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Работа выполнена в рамках задания 38 ГПОФИ «Электроника» «Синтез металлосодержащих волокнистых композитов для гибких электромагнитных экранов» (2001 – 2005 гг.), (№ госрегистрации 2001751), а также в рамках заданий Министерства образования Республики Беларусь: «Разработать методы моделирования и отжига технологических и эксплуатационных дефектов в полупроводниковых приборах и ИМС импульсным электрическим воздействием» (2001 – 2005 гг.), (№ госрегистрации 2004858) и

«Разработать методы оценки работоспособности и обеспечения надежности полупроводниковых приборов и ИМС при воздействии деградационных факторов» (1996 – 2000 гг.).

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является оценка помехоустойчивости различных типов ИМС и разработка схемотехнических решений защиты их входных цепей от воздействия импульсных электрических сигналов, формируемых в условиях эксплуатации при повышенных уровнях электромагнитных полей.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Анализ эффективности схемотехнических способов защиты с использованием полупроводниковых элементов защиты, варисторов, интегральных микросборок, функционирующих в условиях ограничения амплитуды и мощности импульсных наводок.

2. Разработка критериев оценки влияния импульсных электромагнитных воздействий на ИМС.

3. Разработка и конструирование испытательного оборудования, обеспечивающего следующие характеристики импульсного воздействия: амплитуда импульса до 4 кВ, длительность до 700 мкс и длительность переднего фронта от 10 нс.

4. Исследование импульсной помехоустойчивости различных типов цифровых ИМС.

5. Создание методики моделирования импульсного воздействия на схему защиты на этапе проектирования для оценки ее импульсопоглощающей способности.

6. Разработка эффективных схемотехнических решений интегрированных устройств защиты ИМС от импульсных наводок.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются цифровые ТТЛ, ТТЛШ, КМДП, МДП, ЭСЛ интегральные микросхемы, элементы активной защиты на полупроводниковых диодах, стабилитронах, сапрессорах и варисторах, а также защитные полупроводниковые транзисторные МДП-структуры.

Предметом исследования являются закономерности распространения импульсных электромагнитных наводок в элементах ИМС.

Гипотеза. Использование полупроводниковых элементов (диодов, стабилитронов и МДП-транзисторов) в нестандартных режимах работы в составе схем импульсной защиты для ограничения импульсных электрических сигналов мегагерцового диапазона частот позволит повысить помехозащищенность и устойчивость функционирования ИМС.

Методология и методы проведения исследований. В работе использован кондуктивный метод приложения импульсных сигналов при испытаниях ИМС и схем защиты на деградационное воздействие высоковольтных импульсов, имитирующих импульсные помехи.

Для моделирования транзисторных защитных МДП-структур и защитных схем на их основе использованы программы SPICE, Schematics, входящие в программный пакет OrCAD. Для синтеза моделей защитных структур использованы встроенные в OrCAD средства моделирования на уровне описания эквивалентных схем на внутреннем языке

программы. Также использовались программы ALPAC FlexIm, Micro-Cap, Multisim, B2 SPICE AD, Mathcad. Достоверность полученных результатов подтверждена совпадением между теоретически рассчитанными результатами и данными экспериментов и моделирования.

Научная новизна и значимость полученных результатов.

1. Разработана методика определения устойчивости ИМС к импульсным помехам мегагерцового диапазона частот, основанная на использовании импульсного электрического тестирующего воздействия, что позволило установить уровни значений отказоустойчивости 90 – 400 В в рабочем состоянии и 400 – 900 В в нерабочем, при амплитуде импульса до 1000 В, длительности менее 200 нс и длительности переднего фронта до 10 нс.

2. Предложена и разработана модель импульсного электрического воздействия на элементы ИМС для оценки их реакции на прохождение тестового импульса помехи экспоненциальной формы, основанная на принципах построения импульсных тиристорных схем генераторов, что позволило учитывать емкостной характер формирования тестового импульса.

3. Предложена и разработана имитационная модель МДП-транзистора, учитывающая его геометрические схемотехнические параметры в условиях воздействия импульсных сигналов. Показано, что с одновременным уменьшением длины и увеличением ширины канала МДП-транзистора повышается их устойчивость к импульсному электрическому воздействию мегагерцового диапазона частот.

4. Предложены принципы построения защиты сигнальных выводов ИМС с вносимой емкостью менее 3 пФ, основанные на использовании МДП-транзисторов в электрическом режиме низкоомной области «защелки», обеспечивающие ограничение значения амплитуды электрического импульса напряжения до уровня не более 10 В без изменения быстродействия.

Практическая значимость полученных результатов.

1. Определены предельные амплитуды импульсного электрического воздействия, вызывающие отказ ИМС как в рабочем (ТТЛ: К155, SN74, DM54, HD74, MC74 – 100 В; ТТЛШ: MN74ALS, KP1533, KM555, SN74ALS – 90 В; КМДП: НСС40, К176, К1561, К564, GD40 – 200 В; МДП: KP1554, SN74АС – 400 В), так и в нерабочем (ТТЛ – 200 В, ТТЛШ – 600 В; КМДП – 400 В, МДП – 900 В) режиме.

2. Разработана методика моделирования функционирования МДП-транзисторов в качестве элемента защиты от импульсного электрического воздействия, основанная на возможностях программного пакета SPICE, позволяющая изучать защитные свойства МДП-транзисторов в зависимости от их топологических параметров: длины и ширины канала.

3. Разработан способ защиты ИМС от импульсных воздействий мегагерцового диапазона частот, основанный на применении МДП-транзисторов в составе ограничивающей схемы, что позволяет повысить отказоустойчивость ИМС.

4. Разработано оборудование (генератор высоковольтных импульсов мегагерцового диапазона частот), позволяющее формировать электрические импульсы с параметрами: амплитуда импульса до 4 кВ, длительность до 700 мкс и длительность переднего фронта от 10 нс и выше.

5. Предложены и разработаны схемотехнические решения, в основу которых положен принцип подавления электрического импульса при помощи дискретных полупроводниковых приборов (выпрямительных диодов, стабилитронов, сапрессоров) и варисторов: многоступенчатая схема, содержащая сапрессор, диод и варистор, включенные параллельно входу ИМС, позволяющая ограничить импульс наводки амплитудой 1 кВ, длительностью 150 нс и длительностью переднего фронта 10 нс до 5 В с максимальным пиком 20 В в первые 50 нс.

Предлагаемые схемы защиты внедрены в изделия измерительной техники ОАО «Минский приборостроительный завод», что позволило повысить их надежность и улучшить эксплуатационные характеристики. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс БГУИР и Минского государственного радиотехнического колледжа.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Разработанная модель импульсного электрического воздействия на элементы ИМС для оценки их реакции на прохождение тестового импульса помехи, основанная на принципах построения импульсных тиристорных схем генераторов, что позволило учитывать емкостной характер формирования тестового импульса.

2. Имитационная модель МДП-транзистора, учитывающая геометрические схемотехнические параметры (длину и ширину канала), что позволяет оценить его импульсопоглощающую способность в условиях воздействия импульсных наводок.

3. Разработанные схемотехнические решения, в основу которых положен принцип подавления электрического импульса при помощи полупроводниковых элементов (выпрямительных диодов, стабилитронов, сапрессоров) и варисторов: многоступенчатая схема, содержащая сапрессор, диод и варистор, включенные параллельно входу ИМС, позволяющая ограничить импульс наводки амплитудой 1 кВ, длительностью 150 нс и длительностью переднего фронта 10 нс до 5 В с максимальным пиком 20 В в первые 50 нс.

4. Оборудование и методика испытаний, обеспечивающие возможность определения потенциальной помехоустойчивости ИМС, а также результаты влияния импульсных наводок с амплитудой импульса до 1000 В, длительностью менее 200 нс и длительностью переднего фронта 10 нс на различные типы цифровых ИМС (ТТЛ: К155, SN74, DM54, HD74, MC74 – 100 В; ТТЛШ: MN74ALS, KP1533, KM555, SN74ALS – 90 В; КМДП: HCC40, K176, K1561, K564, GD40 – 200 В; МДП: KP1554, SN74AC – 400 В), так и в нерабочем (ТТЛ – 200 В, ТТЛШ – 600 В, КМДП – 400 В, МДП – 900 В) режиме. Практические рекомендации по выбору критерия оценки устойчивости ИМС к электрическим импульсным сигналам, основанного на применении интегрального триггера в качестве регистрирующего элемента, что позволяет исключить ошибку измерения момента отказа, обусловленную субъективной оценкой оператора.

5. Принципы построения защиты выводов ИМС с вносимой емкостью менее 3 пФ, основанные на использовании МДП-транзисторов в электрическом режиме низкоомной области «зашелки», обеспечивающие ограничение значения амплитуды электрического импульса напряжения до уровня не более 10 В, без изменения быстродействия.

Личный вклад соискателя. Все результаты, приведенные в диссертации, получены либо соискателем, либо при его непосредственном участии. В совместно опубликованных работах автором осуществлялась обоснование направлений решения поставленных задач, разработкой методик проведения экспериментов, непосредственное проведение исследований, анализ результатов и формулировка выводов. Автором лично предложены: модель импульсного электрического воздействия на элементы ИМС для оценки их реакции на прохождение тестового импульса помехи экспоненциальной формы; имитационная модель транзисторной МДП-структуры, учитывающая ее геометрические схемотехнические параметры в условиях воздействия импульсных сигналов; способ защиты ИМС от импульсных воздействий, основанный на применении МДП-транзисторов в составе ограничивающей схемы. Вклад научного руководителя к.т.н., проф. Образцова Н.С. связан с постановкой цели и задач исследования, анализом методик проведения экспериментов, совместным обсуждением полученных результатов, анализом моделей защитных транзисторных МДП-структур. Вклад в работу доцента кафедры РЭС Пинаева А.И. связан с разработкой экспериментального оборудования, разработкой и постановкой эксперимента при изучении защитных свойств элементов защиты РЭС от импульсных помех, анализом экспериментальных данных.

Апробация результатов диссертации. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях: V и VI Международных научно-технических конференциях «Современные средства связи» (Нарочь, Беларусь, 2000, 2001 гг.); II Международной научно-технической конференции «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств» (Новополоцк, Беларусь, 2002 г.); II и III Международных научно-технических конференциях «Технические средства защиты информации» (Минск-Нарочь, Беларусь, 2004, 2005 гг.).

Опубликованность результатов. По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 5 статей в научных журналах, 1 статья в научно-техническом сборнике и 4 статьи в сборниках материалов научных конференций. Общее количество страниц опубликованных по теме диссертации материалов – 31.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из общей характеристики работы, четырех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников, списка публикаций автора, содержащих основные научные результаты диссертации и пяти приложений. Полный объем диссертации составляет 127 страниц, из которых 68 страниц машинописного текста. Она включает 69 рисунков на 45 страницах, 12 таблиц на 7 страницах, список использованных источников из 127 наименований на 9 страницах, список публикаций автора, содержащих основные научные результаты диссертации, на 1 странице и 5 приложений на 5 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В общей характеристике работы обоснованы актуальность и новизна темы диссертации, сформулированы цели и основные задачи исследования, научная

новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

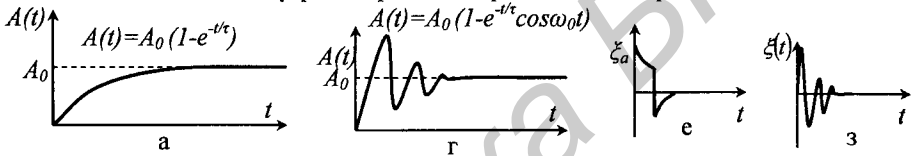
В первой главе дается оценка современных методов и средств защиты элементов интегральных микросхем в условиях воздействия электромагнитных помех. Приведена классификация помех по ряду признаков: природе источников, частоте, энергетическому спектру, отношению рецептора к помехе.

В большинстве случаев переходные процессы в электрических цепях можно представить с помощью экспоненциальных и гармонических функций. На рис. 1 а, г приведены типичные формы переходных процессов.

Если импульсная помеха проникает в схему через третью (промежуточную) цепь, то форма помехи $\xi(t)$ будет определяться двукратным дифференцированием исходного сигнала $A(t)$:

$$\xi(t) = d^2 A(t) / d^2 t. \quad (1)$$

Типичные формы переходных процессов в электрических цепях



Форма импульсной помехи в электрической цепи

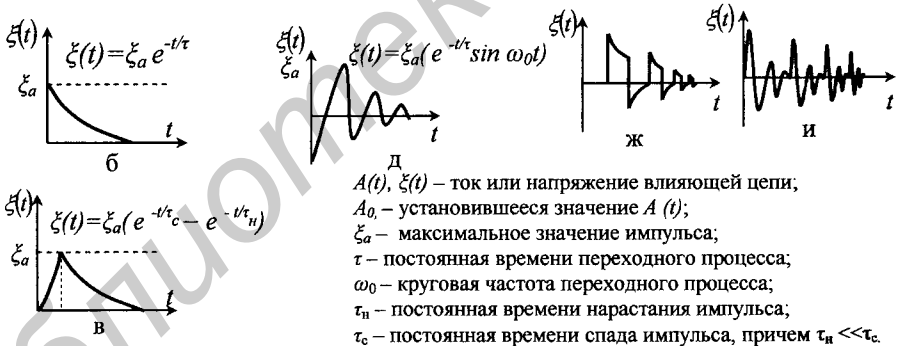


Рис 1. Типичные формы импульсных помех

Формы таких помех представлены на рис. 1 ж, и, и соответствуют промежуточным сигналам, изображенным на рис. 1 е, з.

Анализ переходных процессов показал, что для объективной оценки импульсной помехозащищенности ИМС необходимо выбрать в качестве тестового сигнал экспоненциальной формы $U(t) = U_0 e^{-at}$, что согласуется со стандартами СТБ 959-94, СТБ ГОСТ Р 51317.4.2-2001 (МЭК 61000-4-2:1995), СТБ ГОСТ Р 51317.4.4-2001 (МЭК 61000-4-4:1995), СТБ ГОСТ Р 51317.4.5-2001 (МЭК 61000-4-5:1995).

Рассмотрены типы повреждений, вызванных импульсными наводками: тепловой пробой $p-n$ -перехода; возникновение в окисле пустот, испарение окисла; расплавление и испарение металлизации и контактов, что приводит к замыканиям и неправильной работе ИМС.

Анализ мер защиты от воздействия импульсных наводок показал, что наиболее приемлемой и рациональной является встроенная защита ИМС, которая, в отличие от защиты навесными элементами, способствует снижению дополнительных материальных затрат и упрощает конструкторско-технологические работы по проектированию и изготовлению ИЭТ. Одной из основных проблем, связанных с применением схем защиты на кристалле ИМС, является обеспечение низкой вносимой емкости, с одной стороны, и большие габаритные размеры защитных структур, необходимые для обеспечения требуемого уровня защиты, с другой стороны.

Рассмотрены существующие схемотехнические способы навесной и внутренней защиты ИЭТ и ИМС от импульсных электрических воздействий.

Во второй главе рассмотрены подходы к разработке методики проведения эксперимента.

В качестве базового метода оценки стойкости ИМС к импульсному электромагнитному воздействию мегагерцового диапазона частот выбран метод с кондуктивным способом подачи испытательного электрического импульса наводки. При этом на этапе предварительной экспериментальной оценки стойкости ИМС к воздействию наводок ЭМП ограничились инъекцией тока или приложением напряжения соответствующей формы от генераторов сигналов к критическим точкам аппаратуры (в данном случае чувствительных к помехам выходам ИМС), что не требует создания мощных электромагнитных полей в больших объемах.

В качестве критериев, позволяющих оценить стойкость ИМС к воздействию ЭМП, использовался “искусственный критерий” — наличие или отсутствие сбоев в работе ИМС. Искусственный критерий позволяет определить посредством решения обратной задачи — от знания реакции аппаратуры к определению уровней помех в цепях РЭС — допустимые значения опасных токов и напряжений в цепях и в конечном счете допустимые уровни наводок ЭМП для рассматриваемых ИЭТ.

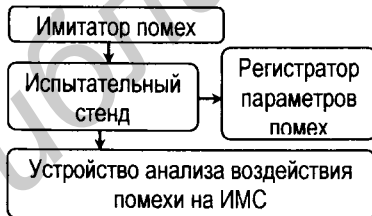


Рис. 2. Структурная схема испытательного стенда для исследования устойчивости интегральных микросхем к воздействию ЭМП

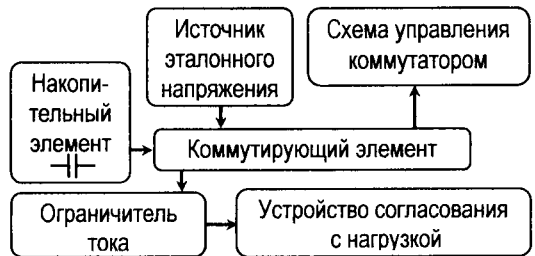


Рис. 3. Структурная схема генератора с конденсаторным принципом формирования импульсов

Здесь же рассматривается концепция построения испытательного оборудования (рис. 2). За основу имитатора помех взята конденсаторная схема формирования тестового импульса (рис. 3).

Для экспериментальных исследований были спроектированы два генератора высоковольтных импульсов. За основу одного взята схема многокаскадного тиристорного формирователя с бегущей волной перенапряжения (рис. 4). Основное отличие данной схемы от классического генератора Аркадьева – Маркса заключается в отсутствии форсирующих конденсаторов C_Φ , что значительно уменьшало уровень второстепенных импульсных выбросов, фиксируемых на осциллограмме в области среза формируемого импульса.

Данный факт можно объяснить, приняв во внимание, что R и C_Φ здесь могут выступать как паразитная RC цепь.

При использовании 10 каскадов на тиристорах КУ221А, $C1 - Cn = 6600$ пФ, VT – КТ312Б и указанных на схеме номиналах на нагрузке R_n формируется экспоненциальный импульс положительной полярности амплитудой до 4 кВ, длительностью до $\tau_{0,5} = 175$ нс, $t_\Phi = 10$ нс (рис.4).

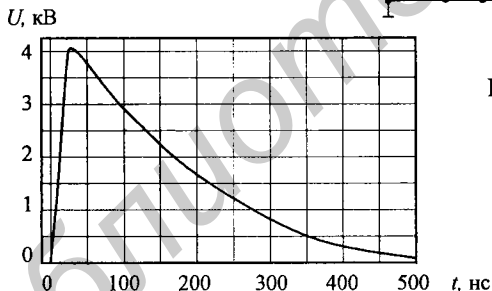
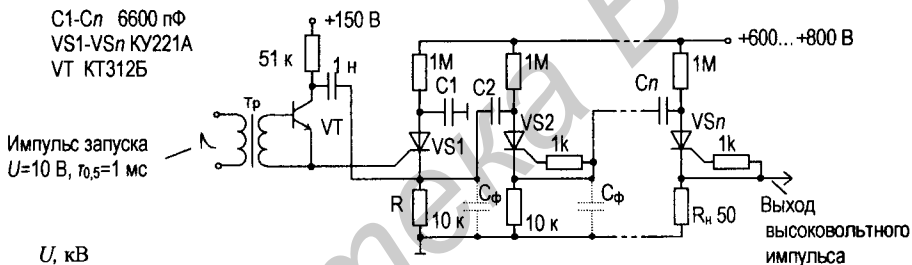


Рис. 4. Генератор импульсов с последовательным запуском тиристоров по цепи анода

Рис. 5. Испытательный экспоненциальный импульс

Далее отмечено, что данная схема не позволяет изменять амплитуду и длительность выходного импульса. Для каждой комбинации вышеуказанных параметров требуется отдельный тиристорный формирователь, что невыгодно с экономической точки зрения.

В связи с этим, а также благодаря совершенствованию элементной базы был спроектирован генератор на разрядниках (рис. 6). Он формирует экспоненциальные импульсы с параметрами $U_n = 400...4000$ В и длительностью до 700 мкс длительностью переднего фронта от 10 нс и выше.

Третья глава посвящена вопросам оценки восприимчивости входов ИМС к воздействию импульсных электрических сигналов мегагерцового диапазона частот, выбора критериев устойчивости ИМС и оценке импульсопоглащающей способности полупроводниковых элементов защиты (диодов, стабилитронов, сапрессоров) и варисторов, а также схем на их основе.

В качестве критерия оценки устойчивости ИМС к электрическим импульсным сигналам (оценки ложного срабатывания) выбрано условие изменения выходного напряжения исследуемой схемы на величину логического перепада.



Рис.6. Структурная схема генератора мощных импульсных помех «ГМИП – 1»

Фиксирование логического перепада с помощью измерительных приборов осложняется проникновением испытательного импульса в измерительный тракт. В связи с этим к выходу испытываемой схемы подключался чувствительный индикатор помехоустойчивости – интегральный триггер.

В качестве опытных образцов ИМС использовались цифровые интегральные микросхемы различных типов. Наибольший интерес, представляли МДП ИМС, технологически совместимые с разрабатываемыми схемами защиты.

Анализ проводился в два этапа. Вначале исследовалась восприимчивость входов ИМС к воздействию импульса наводки при отсутствии напряжения питания. Для этого на вход ИМС подавался импульс ($t_{\phi}=10$ нс, $\tau=100$ нс), от высоковольтного генератора импульсов. При этом амплитуда изменялась от 40 В вплоть до напряжения отказа ИМС. Исследования показали, что вход ИМС в большинстве случаев выступает как ограничитель напряжения. В некоторых случаях наблюдается изменение формы импульса, обусловленное внутренними переходными процессами и рассеиванием энергии на паразитных емкостях кристалла. Результаты эксперимента приведены в табл.1.

Полученные данные показывают, что наибольшей устойчивостью к импульсным электрическим воздействиям обладают типы микросхем, в базовые структуры которых входят диоды Шоттки (ТТЛШ: SN74F, SN74ALS, KP1533).

Повторная проверка ИМС после воздействия импульса помехи показала, что амплитуда помехи, при которой происходят необратимые изменения, лежит в пределах 200 – 900 В в зависимости от типа ИМС (табл. 2).

В реальных условиях наиболее вероятным является возникновение импульсной наводки на входах ИМС в рабочем состоянии. Поэтому на втором этапе ставилась задача определить параметры наводки, при которой не возникало отказа или ложного срабатывания ИМС в рабочем режиме. Результаты показали, что амплитуда импульса наводки при неизменных остальных параметрах, вызывающая нарушение функционирования ИМС, значительно ниже, чем в первом случае.

Определены две ступени ухудшения параметров ИМС (табл. 2). Вначале возникает ложное срабатывание логического элемента с сохранением его рабочих характеристик ($U_{сбоя}$). При амплитуде помехи $U_n > 80 - 100$ В наблюдается изменение формы импульса полезного сигнала на выходе ИМС (ТТЛШ: SN74ALS), а также отсутствует переключение элемента при подаче прямоугольных импульсов частотой выше 1 кГц ($U_{частичн. отказа}$). Имевшие место отказы ИМС обусловлены образованием локальных дефектов, вызванных импульсным разогревом структуры, что приводит к непредсказуемым изменениям ее сопротивления и емкости, влияющих на задержку прохождения импульсов через ИМС, а также к изменению топологии структуры. По совокупности параметров наиболее устойчивыми к импульсным воздействиям являются МДП ИМС.

Таблица 1

Ослабление импульса наводки на входах ИМС различного типа логики

Тип	Амплитуда испытательного импульса наводки, $t_{\phi}=10$ нс, $\tau=100$ нс, В						
	40	60	120	250	400	700	1000
ТТЛ	17	25	50	-	200	-	300
ТТЛШ	10	20	20	-	45	-	450
МДП	25	-	45	100	150	-	250
КМДП	25	30	80	-	300	-	300
ЭСЛ	30	-	70	120	-	340	200
Амплитуда остаточного импульса на выводах ИМС, В							

Таблица 2

Амплитуда импульса наводки, $t_{\phi}=10$ нс, $\tau=100$ нс, приводящая к отказу, сбою и изменению свойств ИМС различного типа в рабочем состоянии

Тип	$U_{отказа}$, В	$U_{сбоя}$, В	$U_{частичн. отказа}$, В
ТТЛ	200	40	100
ТТЛШ	600	55	90
КМДП	400	50-60	150 -200
МДП	900	60	400
ЭСЛ	700	-	-

Рассмотрены способы повышения устойчивости ИМС к импульсным электрическим воздействиям. Одним из вариантов снижения уровня и мощности наведенных электрических импульсов может служить активная защита критических цепей схемы. Основными элементами схем активной защиты являются разрядники, металлооксидные варисторы, TVS (transient voltage suppressor)-тиристоры, диоды, TVS-диоды.

Эффективность активной защиты была проверена экспериментально на примере схем, в состав которых входили в различных комбинациях

полупроводниковые элементы защиты, диоды, стабилитроны, варисторы и позисторы (рис. 7, 8).

Рассмотрены достоинства и недостатки каждого типа приборов защиты. Предложено для обеспечения эффективной защиты от перенапряжения в случае импульсного электрического воздействия использовать многоступенчатые параллельные схемы защиты (рис. 8).

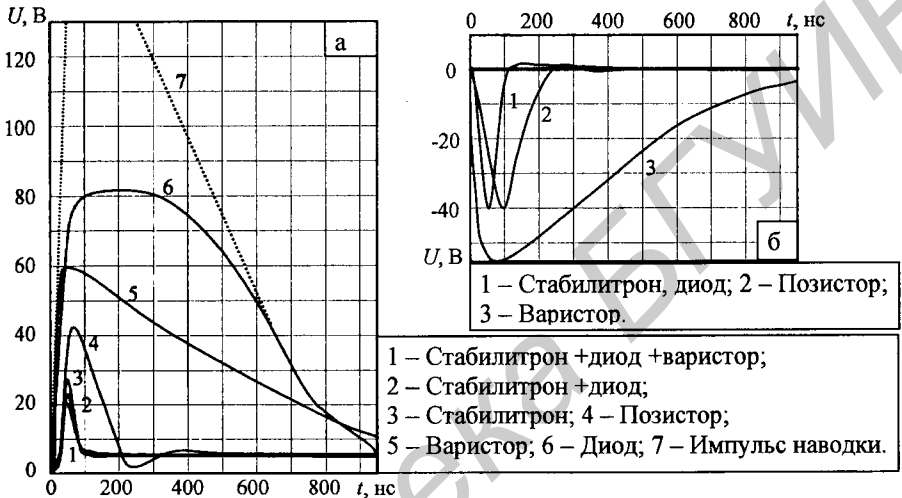


Рис. 7. Ограничение электрического импульса кондуктивной наводки с параметрами $t_{\phi}=10$ нс, $\tau=100$ нс, $U_n=1$ кВ полупроводниковыми приборами и варисторами: а) – положительный импульс наводки, б) – отрицательный импульс наводки

Предложена эффективная многоступенчатая схема подавления импульсного электрического воздействия, содержащая сапессор, диод и варистор, включенные параллельно входу ИМС, позволяющая ограничить импульс амплитудой 1 кВ до 5 В с максимальным пиком 20 В в первые 50 нс.

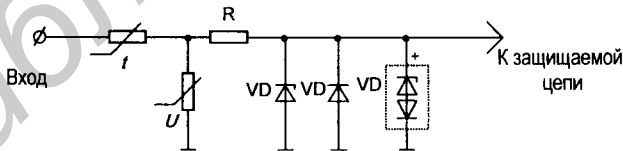


Рис. 8. Комбинированная многоступенчатая схема защиты

Далее рассмотрены физические механизмы, обуславливающие применение МДП-транзисторов в качестве элементов импульсной защиты. Дано обоснование

применения физического явления в МДП-транзисторах, называемого эффектом «зашелки» в качестве защитного механизма при перенапряжениях.

В четвертой главе рассматриваются вопросы разработки методики моделирования схемы защиты на МДП-транзисторах.

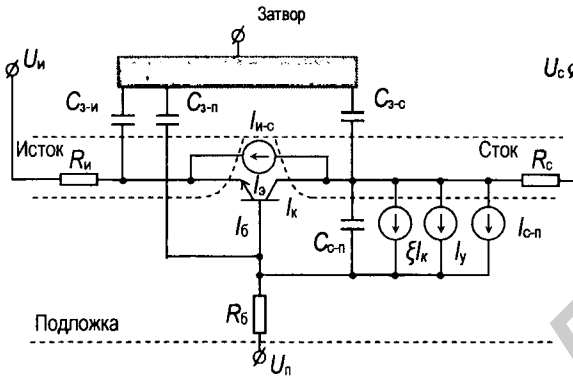


Рис. 9. Эквивалентная схема транзисторной МДП-структуры, выполняющей защитные функции в составе ИМС

помехи пойдет через прямосмещенный $p-n$ - переход диода стока и потечет на $VT1_n$.

Модель импульсного электрического воздействия представляла собой виртуальную схему емкостного импульсного генератора (рис 11, а). В основу данной схемы положены принципы построения импульсных тиристорных схем генераторов.

Одной из целей моделирования процесса воздействия электрического импульса на схему защиты является нахождение таких значений конструктивных параметров МДП-транзистора, при которых поглощаемая энергия и уровень ограничения импульсов являются максимально возможными. В процессе предварительного моделирования было

определено, что длина (L) и ширина (W) канала МДП-транзистора оказывают наибольшее влияние на ее импульсопоглощающую способность. Программный пакет SPICE был доработан для проведения моделирования зависимости амплитуды подавленной импульсной наводки от линейных размеров канала МДП-транзистора.

На основании анализа переходных процессов в МДП-транзисторе, и с учетом особенностей работы в режиме «зашелки», предложена эквивалентная схема транзисторной МДП-структуры защиты (рис. 9). Предложена схема защиты от импульсного электрического воздействия. Пунктиром показан путь тока при положительном импульсе наводки (рис. 10).

Транзистор $VT3_p$ при положительном импульсе наводки находится в закрытом состоянии, ток

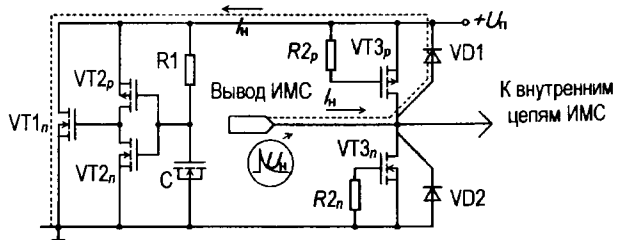


Рис. 10. Предлагаемая схема защиты ИМС от импульсных помех

Для этого исследуемая схема защиты (рис. 10) подвергалась импульсному воздействию, количественные параметры которого показаны на (рис. 12, кривая 1).

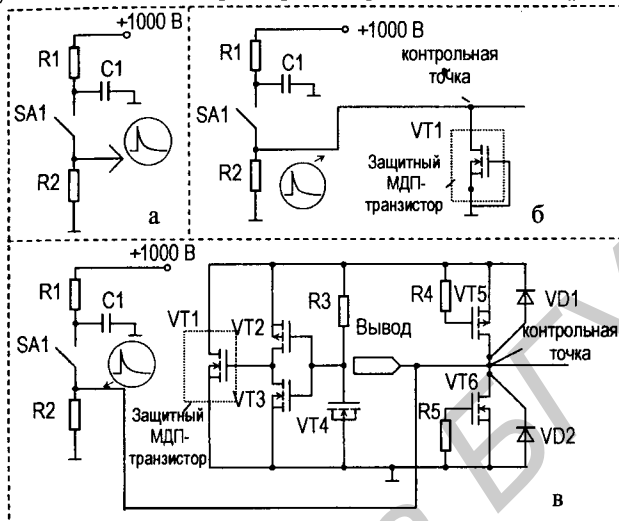


Рис. 11. Модель имитационного воздействия (генератора импульсов) (а) и варианты схемы защиты ИМС с применением МДП-транзисторов (б, в)

Результаты моделирования показаны на совмещенных графиках (рис. 13, а, б). Показано, что с одновременным уменьшением длины и увеличением ширины канала МДП-транзистра уменьшается амплитуда остаточного выходного импульса и, соответственно, повышается ее устойчивость к импульсному электрическому воздействию. Этот эффект заметен уже при $L < 10$ мкм.

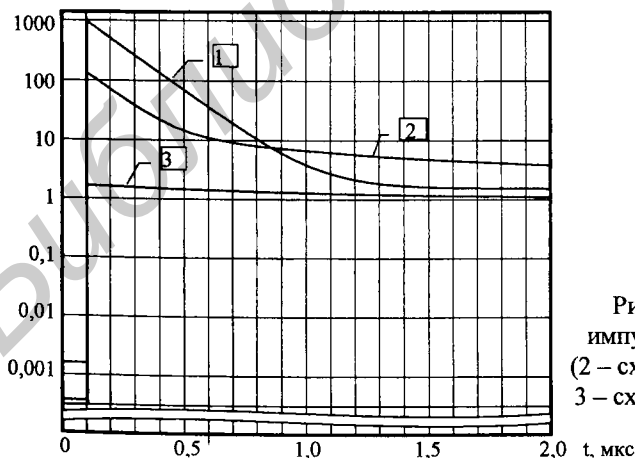


Рис. 12. Импульс наводки 1 и импульсы на выходе схем защиты (2 – схема, приведенная на рис. 11, б; 3 – схема, приведенная на рис. 11, в)

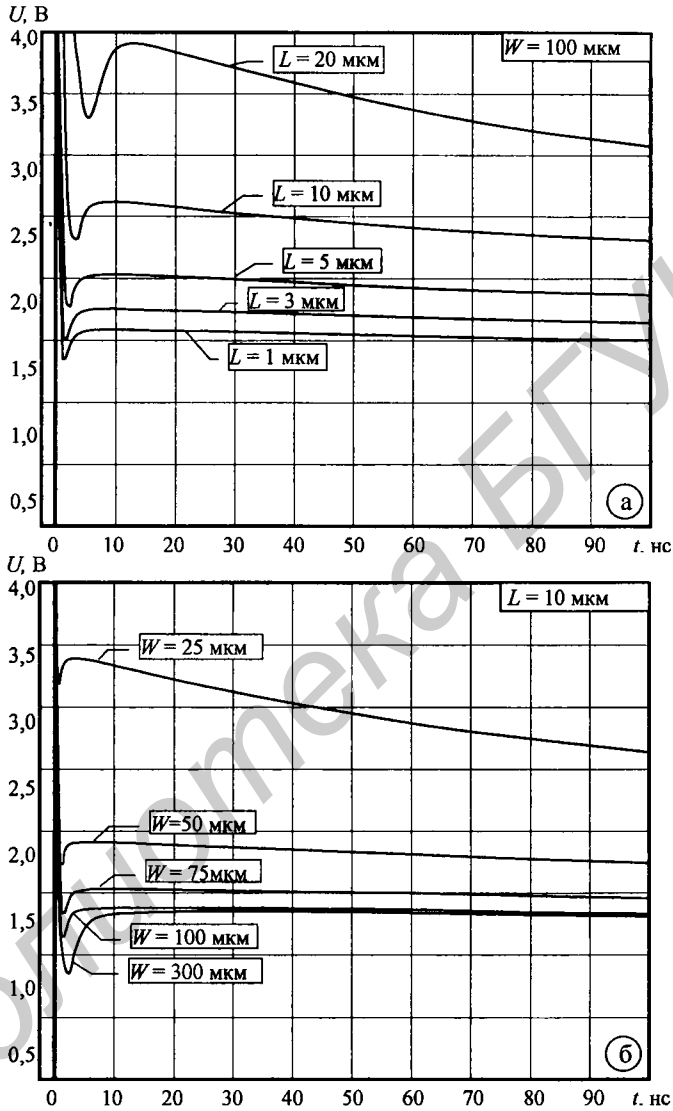


Рис. 13. Влияние длины L , мкм (а) и ширины W , мкм (б) канала на защитные свойства МДП-транзистора (ограничение импульса, показанного на рис. 12 (кривая 1))

В приложениях представлены материалы по разработанному оборудованию, а также акты использования результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе, посвященной решению задач, связанных с обеспечением повышенной устойчивости ИМС к импульсным электромагнитным воздействиям мегагерцового диапазона частот получены следующие теоретические и практические результаты:

1. Проведен анализ механизмов взаимодействия электромагнитных помех с элементами РЭС. Показано, что переходные процессы в электрических цепях могут быть представлены с помощью экспоненциальных и гармонических функций. Установлено, что действие помех на входе рецептора описывается экспоненциальной функцией $U_i = Ee^{-t/\tau}$. Рассмотрен механизм образования индуцированных помех. В качестве тестового электрического импульса помехи выбран сигнал экспоненциальной формы $U(t) = U_0 e^{-\alpha t}$ [2, 6].

2. Предложена методика оценки динамической помехоустойчивости, позволяющая исключить ошибку измерения момента отказа ИМС, обусловленную субъективной оценкой оператора. Это достигается применением в схеме контроля быстродействующего триггера, срабатывающего в момент отказа. Преимуществом является возможность использования в качестве триггера логических элементов однотипной ИМС. Разработана методика определения устойчивости ИМС к импульсным помехам, основанная на использовании электрического тестирующего воздействия, что позволило установить уровни значений их отказоустойчивости в процессе эксплуатации при амплитуде воздействующего импульса до 1000 В, длительности менее 200 нс и длительности фронта до 10 нс. Определены предельные амплитуды импульсного электрического воздействия, вызывающего отказ ИМС как в рабочем (ТТЛ: К155, SN74, DM54, HD74, MC74 – 100 В; ТТЛШ: MN74ALS, KP1533, KM555, SN74ALS – 90 В; КМДП: НСС40, К176, К1561, К564, GD40 – 200 В; МДП: KP1554, SN74AC – 400 В), так и в нерабочем (ТТЛ – 200 В, ТТЛШ – 600 В; КМДП – 400 В, МДП – 900 В) режиме. [3].

3. Определены уровни стойкости ИМС под воздействием импульсных электрических сигналов мегагерцового диапазона частот. Определены две ступени изменения параметров ИМС. На первом этапе при амплитуде наводки $U_n < 80 - 100$ В возникает ложное срабатывание логического элемента с сохранением его рабочих характеристик. При амплитуде наводки $U_n > 80 - 100$ В наблюдается изменение формы импульса полезного сигнала на выходе ИМС (ТТЛШ), а также отсутствует переключение элемента при подаче прямоугольных импульсов частотой выше 1 кГц из-за возникновения локальных дефектов, вызванных импульсным разогревом структуры, что приводит к непредсказуемым изменениям ее сопротивления и емкости, влияющих на задержку прохождения импульсов через ИМС [3, 4, 8, 9].

4. Разработан способ защиты ИМС от импульсных воздействий мегагерцового диапазона частот, основанный на применении МДП-транзистора в качестве ограничивающей цепи, что позволяет повысить отказоустойчивость микросхем. Разработана методика моделирования работы МДП-транзистора в качестве элемента защиты, основанная на возможностях программного пакета

SPICE. Методика позволяет изучать защитные свойства структуры в зависимости от топологических параметров (длины и ширины) канала МДП-транзистора. Разработана модель импульсного электрического воздействия на элементы ИМС для оценки их реакции на прохождение тестового импульса помехи основана на принципах построения импульсных тиристорных схем генераторов, что позволило учитывать емкостной характер формирования тестового импульса [5, 10].

5. Предложена и разработана имитационная модель МДП-транзистора, учитывающая его геометрические схемотехнические параметры в условиях воздействия импульсных наводок. Показано, что с одновременным уменьшением длины и увеличением ширины канала МДП-транзистора повышается его устойчивость к импульсному электрическому воздействию мегагерцового диапазона частот. Предложены принципы построения защиты сигнальных выводов ИМС с вносимой емкостью менее 3 пФ, основанные на использовании МДП-транзистора в электрическом режиме низкоомной области «зашелки», обеспечивающие ограничение значения амплитуды электрического импульса напряжения до уровня не более 10 В, без изменения быстродействия [5, 10].

6. Предложены и разработаны схемотехнические решения, в основу которых положен принцип подавления электрического импульса при помощи полупроводниковых элементов (диодов, стабилитронов, сапрессоров) и варисторов: многоступенчатая схема, содержащая сапрессор, диод и варистор, включенные параллельно входу ИМС, позволившие ограничить импульс наводки амплитудой 1 кВ до 5 В с максимальным пиком 20 В в первые 50 нс. Разработанные схемы защиты внедрены в изделия измерительной техники ОАО «Минский приборостроительный завод», что позволило повысить их надежность и улучшить эксплуатационные характеристики [1, 6, 7].

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

БИС – интегральная микросхема большой степени интеграции; ИМС – интегральная микросхема; ИЭТ – изделия электронной техники; РЭС – радиоэлектронные средства; КМДП – интегральная микросхема на комплементарных полевых транзисторах со структурой металл – диэлектрик – полупроводник; МДП – структура металл – диэлектрик – полупроводник; СИС – интегральная микросхема средней степени интеграции; ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика; ТТЛШ – транзисторно-транзисторная логика со структурами Шоттки; ЭМП – электромагнитные помехи; ЭСЛ – эмиттерно-связанная логика; TVS – transient voltage suppressor, сапрессор, полупроводниковый ограничитель напряжения; $C_{з-н}$ – емкость затвор – исток; $C_{з-п}$ – емкость затвор – подложка; $C_{з-с}$ – емкость затвор – сток; $C_{с-п}$ – емкость сток – подложка; $I_б$ – ток базы; $I_к$ – ток коллектора $I_{с-п}$ – ток сток – подложка; $I_у$ – ток утечки; $I_э$ – ток эмиттера; L – длина канала; $R_б$ – сопротивление базы (подложки); $U_н$ – напряжение истока; $U_с$ – напряжение стока; W – ширина канала; $\xi I_к$ – ток ударной ионизации.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**Статьи в научных журналах**

1. Пинаев А.И., Макаревич С.Ю., Образцов Н.С. Элементы защиты входных цепей РЭС от импульсных воздействий // Известия Белорусской инженерной академии. – 2000. – №1(9)/2. – С. 149-150.
2. Пинаев А.И., Макаревич С.Ю., Образцов Н.С. Формирование высоковольтных импульсов с помощью быстродействующих силовых приборов // Известия Белорусской инженерной академии. – 2000. – №1(9)/2. – С. 150-151.
3. Образцов Н.С., Макаревич С.Ю. Влияние высоковольтных импульсных помех на ИМС различных серий // Известия Белорусской инженерной академии. – 2001. – №1(11)/3. – С. 247-248.
4. Образцов Н.С., Макаревич С.Ю. Исследование термостойкости микрополосковых линий при действии термоциклов и термоудара // Доклады БГУИР. – 2003. – Т.1, №2. – С.107-112.
5. Образцов Н.С., Макаревич С.Ю. Применение МОП структур в качестве элементов импульсной защиты // Доклады БГУИР. – 2004. – №5 – С. 85-88.

Статьи в научно-технических сборниках

6. Пинаев А.И., Макаревич С.Ю., Образцов Н.С. Особенности работы защитных цепей РЭС при воздействии электромагнитных помех // Радиотехника и электроника: Сб. науч. тр. – 2000. – № 25. – С. 141-152.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

7. Пинаев А.И., Макаревич С.Ю., Образцов Н.С. Варисторы, как элементы защиты входных цепей РЭС от воздействия электромагнитных помех // Современные средства связи: Материалы международной науч. – техн. конф., Нарочь, 25–29 сентября 2000 г. / Белорусская инженерная академия. – Минск, 2000. – №1(9)/2. – С. 161.
8. Образцов Н.С., Макаревич С.Ю. Проведение исследований теплостойкости микрополосковых линий при длительном воздействии повышенной температуры // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Материалы II международной науч. – техн. конф., Новополоцк, 15 – 17 мая 2002 г. / ПГУ. – Новополоцк, 2002. – Т.2. – С.95-100.
9. Образцов Н.С., Макаревич С.Ю. Исследование влияния температурных факторов на проводимость микрополосковых линий // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Материалы II международной науч.-техн. конф. Новополоцк, 15 – 17 мая 2002 г./ ПГУ. – Новополоцк, 2002. – Т.2. – С.91-95.
10. Образцов Н.С., Макаревич С.Ю. Пинаев А.И. Схемотехнические решения импульсной защиты на МОП – транзисторах // Технические средства защиты информации: Материалы III международной науч. - техн. конф., Минск – Нарочь, 23 – 27 мая 2005 г. / БГУИР. – Минск, 2005. – №5. – С. 81.

РЭЗІЮМЭ

Макарэвіч Сяргей Юр'евіч

Схематэхнічныя метады забеспячэння павышанай ўстойлівасці
інтэгральных мікрасхем да імпульсных электрамагнітных
уздзеянняў мегагерцовага дыяпазона частот

Ключавыя словы: імпульснае электрычнае ўздзеянне, паўправадніковыя элементы аховы, тырыстарны фарміравацель, эффект «snapback», мадэляванне ахоўных МДП-транзістараў, памехаўстойлівасць ІМС.

Аб'ект даследавання - лічбавыя ТТЛ, ТТЛШ, КМДП, МДП, ЭЗЛ інтэгральныя мікрасхемы, элементы актыўнай аховы на паўправадніковых дыёдах, стабілітронах, сапрэсарах і варыстарах, ахоўныя паўправадніковыя транзістарныя МДП-структуры. **Прадмет даследавання** - заканамернасці распаўсюджвання імпульсных электрамагнітных наводак у элементах ІМС.

Мэта працы - ацэнка памехаўстойлівасці розных тыпаў ІМС і распрацоўка схематэхнічных рашэнняў аховы іх уваходных ланцугоў ад уздзеяння імпульсных электрычных сігналаў, якія фарміруюцца ва ўмовах эксплуатацыі, пры павышаных узроўнях электрамагнітных палёў.

Усталяваны заканамернасці працэсаў, якія маюць месца ў ІМС, пры ўздзеянні імпульсных наводак. Усталяваны ўзроўні значэнняў адмоваўстойлівасці лічбавых ІМС розных тыпаў у працоўным і непрацоўным рэжымах. Прапанаваны і распрацаваны схематэхнічныя рашэнні, у аснову якіх пакладзены прынцып падаўлення электрычнага імпульсу пры дапамозе паўправадніковых элементаў і варыстараў.

Распрацавана метадыка мадэлявання імпульснага ўздзеяння на элементы інтэгральных мікрасхем для прадказання змянення іх характарыстык.

Распрацаваны спосаб аховы ІМС ад імпульсных уздзеянняў, які заснаваны на прымяненні транзістарных МДП-структур у якасці абмежавальнага элемента, што дазваляе павысіць адмоваўстойлівасць ІМС. Прапанавана і распрацавана мадэль імпульснага электрычнага ўздзеяння на элементы ІМС для ацэнкі іх рэакцыі на праходжанне тэставага імпульсу памехі экспанентнай формы. Прапанавана і распрацавана імітацыйная мадэль МДП-транзістара, якая ўлічвае яе геаметрычныя схематэхнічныя параметры ва ўмовах уздзеяння імпульсных сігналаў.

Вынікі дысертацыйнай працы ўкаранены ў навучальны працэс БДУІР і Мінскага дзяржаўнага радыётэхнічнага каледжа. Прапанаваныя схематэхнічныя метады аховы ІМС выкарыстоўваюцца ў вырабах радыёвымяральной тэхнікі ААТ “Мінскі прыборабудавальны завод”.

РЕЗЮМЕ

Макаревич Сергей Юрьевич

Схемотехнические методы обеспечения повышенной устойчивости интегральных микросхем к импульсным электромагнитным воздействиям мегагерцового диапазона частот

Ключевые слова: импульсное электрическое воздействие, полупроводниковые элементы защиты, тиристорный формирователь, эффект «зашелки», моделирование МДП-транзистров, помехоустойчивость ИМС.

Объект исследования – цифровые ТТЛ, ТТЛШ, КМДП, МДП, ЭСЛ интегральные микросхемы, элементы активной защиты на полупроводниковых диодах, стабилитронах, сапрессорах и варисторах, защитные полупроводниковые транзисторные МДП-структуры. **Предмет исследования** – закономерности распространения импульсных электромагнитных наводок в элементах ИМС.

Цель работы – оценка помехоустойчивости различных типов ИМС и разработка схемотехнических решений защиты их входных цепей от воздействия импульсных электрических сигналов, формируемых в условиях эксплуатации при повышенных уровнях электромагнитных полей.

Установлены закономерности процессов, протекающих в ИМС, при воздействии импульсных наводок. Установлены уровни значений отказоустойчивости цифровых ИМС различных типов в рабочем и нерабочем режимах. Предложены и разработаны схемотехнические решения, в основу которых положен принцип подавления электрического импульса при помощи полупроводниковых элементов и варисторов.

Разработана методика моделирования импульсного электрического воздействия на элементы интегральных микросхем для предсказания изменения их характеристик.

Разработан способ защиты ИМС от импульсных воздействий, основанный на применении МДП-транзисторов в качестве ограничивающего элемента, что позволяет повысить отказоустойчивость ИМС. Предложена и разработана модель импульсного электрического воздействия на элементы ИМС для оценки их реакции на прохождение тестового импульса помехи экспоненциальной формы. Предложена и разработана имитационная модель МДП-транзистора, учитывающая ее геометрические схемотехнические параметры в условиях воздействия импульсных сигналов.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс БГУИР и Минского государственного радиотехнического колледжа. Предложенные схемотехнические методы защиты ИМС используются в изделиях радиоизмерительной техники ОАО «Минский приборостроительный завод».

ABSTRACT
Makarevich Siarhei

Circuits methods of increased stabilization of IC to pulse electromagnetic effect of a megahertz frequency band

Keywords: EMI effect, semiconductor protection elements, thyristor pulse former, protection MOS-structure, “snapback” effect, protection circuit’s simulation, IC noise immunity.

Object of the research is IC based on TTL, TTL with Shottky diode, SMOS, MOS, emitter-coupled logic, active protection elements on semiconductor MOS structures. **Subject of the research** is the mechanism of propagation of impulse electrical induced signals in the elements of IC.

The aim of the research is the noise immunity evaluation of the different types of IC and development of schematic’s protection solutions of their input circuits, from the effect of an impulse electrical signals, formed under operating conditions at the increased levels of electromagnetic fields.

The regularities of processes in IC under EMI effect are established. The levels of values of fault tolerance of digital IC of different types in operating and non-operatin modes are established. The circuitry solutions, based on the principle of electrical pulse blanking using semiconductor elements and varistors are suggested and worked out.

The simulation procedure of impulse effect on IC elements for their characteristics change prediction is designed. The method of IC protection from the electrical impulse actions, based on MOS structures, used as a clipper, that allows to increase the IC noise immunity is designed. The model of impulse electrical effect on IC elements for evaluation of their reactions to transmission of an exponential noises test pulse is designed.

The simulation model of the MOS-structures, considering the geometrical circuit’s parameters under the conditions of effect of pulse signals is suggested and worked out.

The results of the dissertation work were introduced into training process of BSUIR and Minsk State higher radioengineering college. Offered circuitry methods of IC protection are used in products of radiomeasuring engineering P.C. «Minsk instrument-making plant».

МАКАРЕВИЧ СЕРГЕЙ ИОРЬЕВИЧ

**СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ПОВЫШЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ
К ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ
МЕГАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ**

Специальность 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 03.05.2006.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1, 4.
Уч.-изд. л. 1,2.	Тираж 60 экз.	Заказ 317.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131518 от 30.04.2004.

220013, Минск, П. Бровки, 6.