

доклад по теме диссертации

**МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА
ИСПЫТАНИЙ КМОП МИКРОСХЕМ
НА СТРУКТУРАХ «КРЕМНИЙ-НА-САПФИРЕ»
НА ИМПУЛЬСНУЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ**

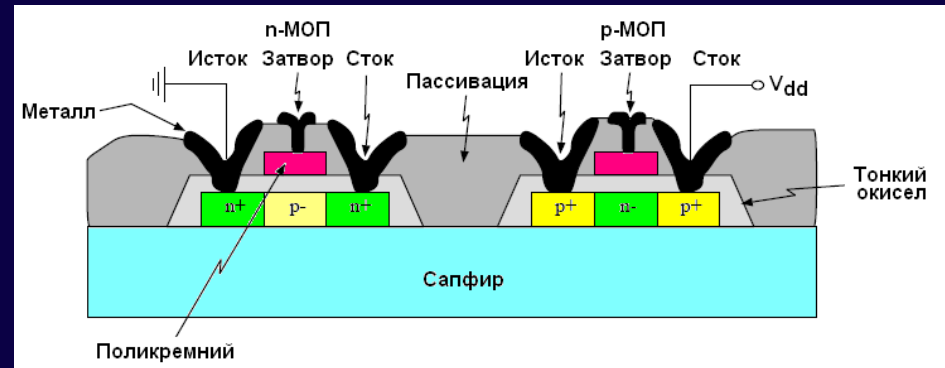
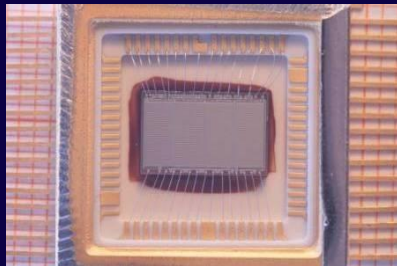
Специальность: 05.13.05 – Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления

Автор: Герасимчук О. А.

Научный руководитель
д.т.н., профессор: Скоробогатов П.К.

15 февраля 2010 г.

1. Наиболее перспективными КМОП-изделиями для комплектования объектов ВВТ являются КМОП микросхемы, выполненные по технологии «кремний-на-сапфире» (КНС), вследствие своей потенциально высокой радиационной стойкости и способности работать в широком температурном диапазоне.



2. При всех своих достоинствах КМОП/КНС микросхемы имеют ряд особенностей, связанных с тонкопленочной структурой рабочих слоев. К ним относятся, прежде всего, низкая устойчивость к воздействию электрических сигналов, вызванных воздействием ЭМИ различной природы, что может накладывать ограничения на их использование в аппаратуре вооружения и военной техники.

Связана с необходимостью определения импульсной электрической прочности КМОП/КНС микросхем с целью расширения сферы их применения в аппаратуре военного и специального назначения.

СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОБЛЕМЕ

Трудами Герасимова В.Ф., Посысаева Е.И., Яковлева Е.Н., Хрулева А.К. исследованы основы физики повреждений кремниевых полупроводниковых приборов при воздействии ОИН, разработаны методические и технические основы проведения испытаний. В работах Ванина В.И. и Макеева С.Н. развиты аппаратные средства для определения ИЭП полупроводниковых приборов. Методические основы испытаний КМОП ИС объемной технологии заложены в работах Скоробогатова П.К.

Однако обзор существующих методов и средств показал, что они не могут в полной мере быть использованы для определения показателей ИЭП современных КМОП/КНС ИС по следующим основным причинам:

- узкий диапазон используемых ОИН;
- отсутствие учета особенностей тепловых процессов в тонких слоях;
- отсутствие учета формы и длительности ОИН на ИЭП;
- отсутствие обоснования требований к техническим средствам испытаний на ИЭП и самих аттестованных средств.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ДИССЕРТАЦИИ

ЦЕЛЬ: разработка методов и средств испытаний КМОП/КНС ИС военного и специального назначения на импульсную электрическую прочность, что позволит решить важную научно-техническую задачу расширения сферы применения КМОП/КНС ИС в аппаратуре объектов ВВТ.

ЗАДАЧИ:

- анализ, моделирование и экспериментальное исследование влияния ЭМИ на КМОП/КНС ИС;
 - разработка моделей повреждения элементов КМОП/КНС ИС под действием наведенных ОИН;
 - разработка методов испытаний КМОП/КНС ИС на стойкость к воздействию ОИН;
 - разработка и изготовление технических средств испытаний КМОП/КНС ИС на стойкость к воздействию ОИН;
 - проведение экспериментальных исследований ИЭП КМОП/КНС ИС с целью апробации разработанных моделей, методов и технических средств.

НА ЗАЩИТУ ВЫНОСЯТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Модели повреждения элементов КМОП/КНС ИС под действием ОИН с учетом особенностей процессов теплопереноса в тонкопленочных структурах и с учетом особенностей воздействия ЭМИ современных и перспективных источников излучения.

2. Методика проведения испытаний КМОП/КНС ИС на ИЭП, позволившая стандартизировать процедуру испытаний и распространить ее на современные КМОП/КНС ИС, в т.ч. БИС высокой функциональной сложности.

3. Разработанные аппаратные и программные средства для проведения испытаний КМОП/КНС ИС на ИЭП.

4. Результаты экспериментальных исследований по определению ИЭП КМОП/КНС ИС подтвердившие адекватность разработанных моделей разогрева тонких структур под действием ОИН.

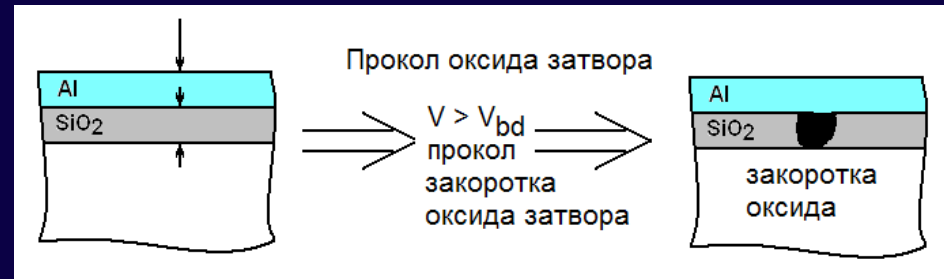
ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПОВРЕЖДЕНИЯ КМОП/КНС ИС

Обратимые (переходные) эффекты:

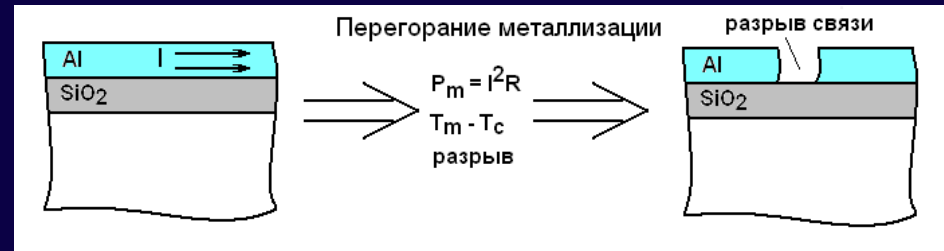
- Сбои (нарушения работоспособности);
- Потеря информации в элементах памяти.

Необратимые (остаточные) эффекты:

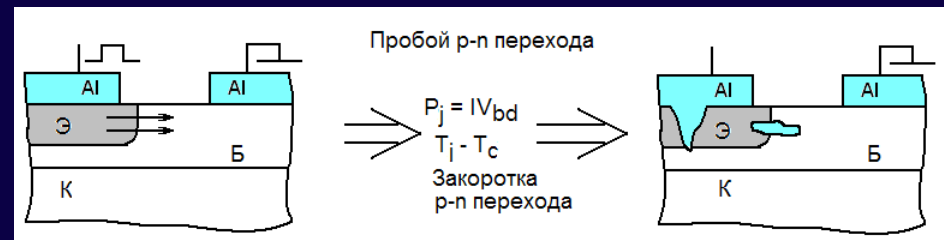
- Пробой подзатворного диэлектрика



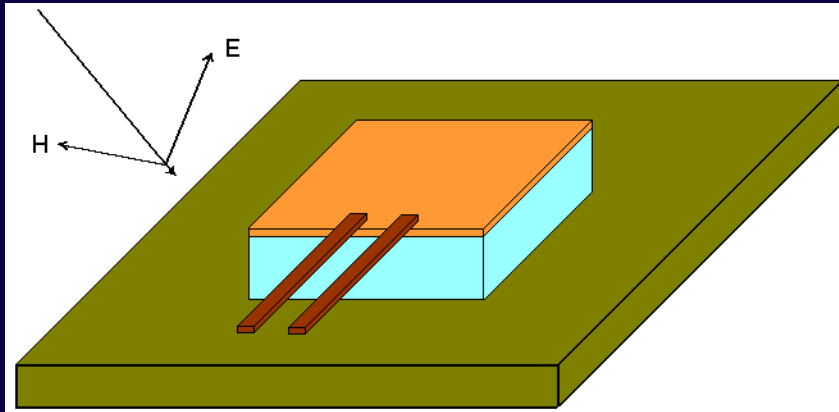
- Перегорание металлизации



- Тепловой вторичный пробой p-n переходов



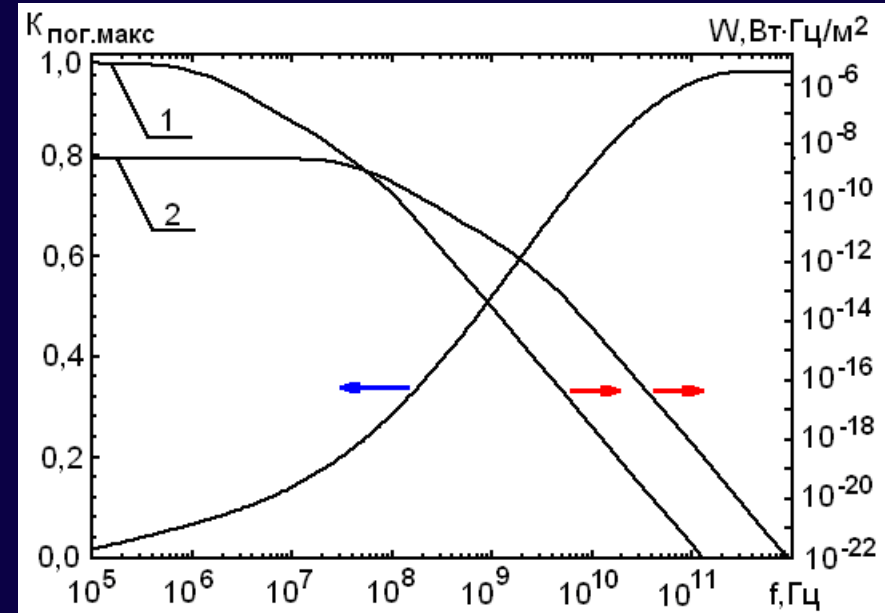
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭМИ НА КМОП/КНС ИС



↑ Кристалл КМОП/КНС ИС в поле плоской электромагнитной волны

Энерговыведение в рабочем слое ИС происходит вследствие двух основных механизмов: ↓

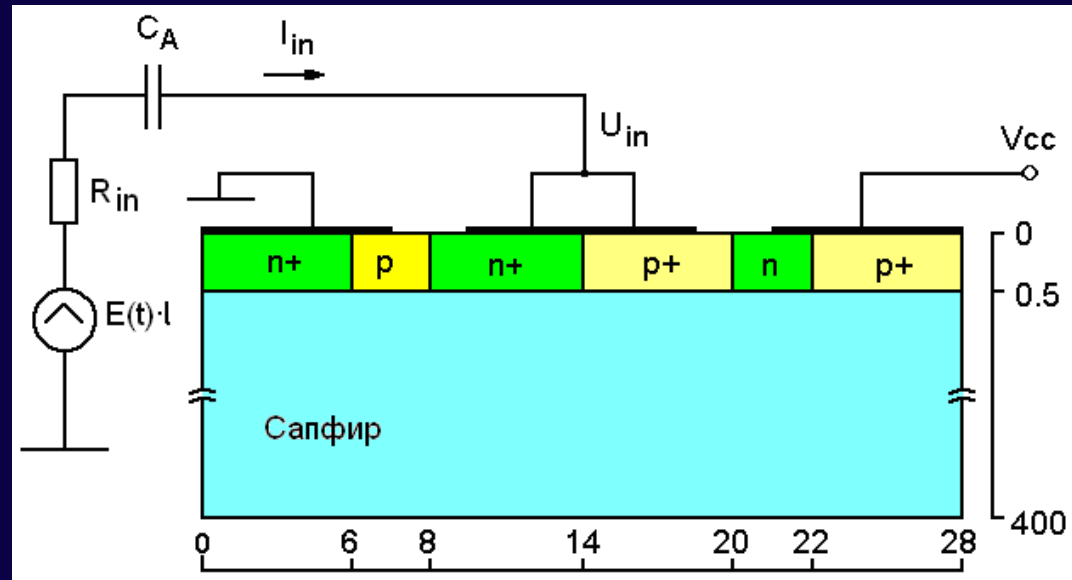
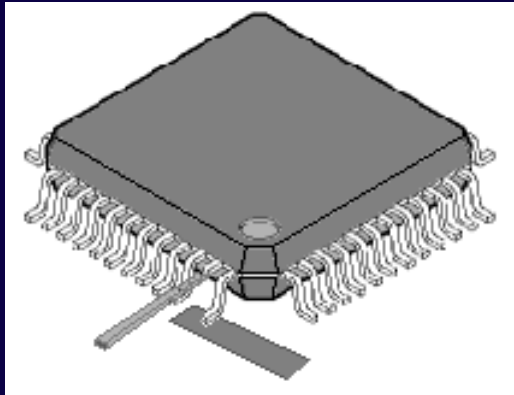
- непосредственное поглощение энергии поля в рабочем слое;
- наводка сигналов на подводящие выводы ИС и последующая передача энергии в кристалл.



↑ Графики спектральной плотности (W) двух видов ЭМИ (1 - ЭМИ ЯВ, 2 – ЭМИ ПИ) вместе с графиком максимального коэффициента поглощения энергии ЭМИ ($K_{\text{пог}}$) кристаллом КНС от частоты

ОЦЕНКА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ПРИБОРНОМ СЛОЕ КМОП/КНС ИС ОТ НАВОДКИ

8

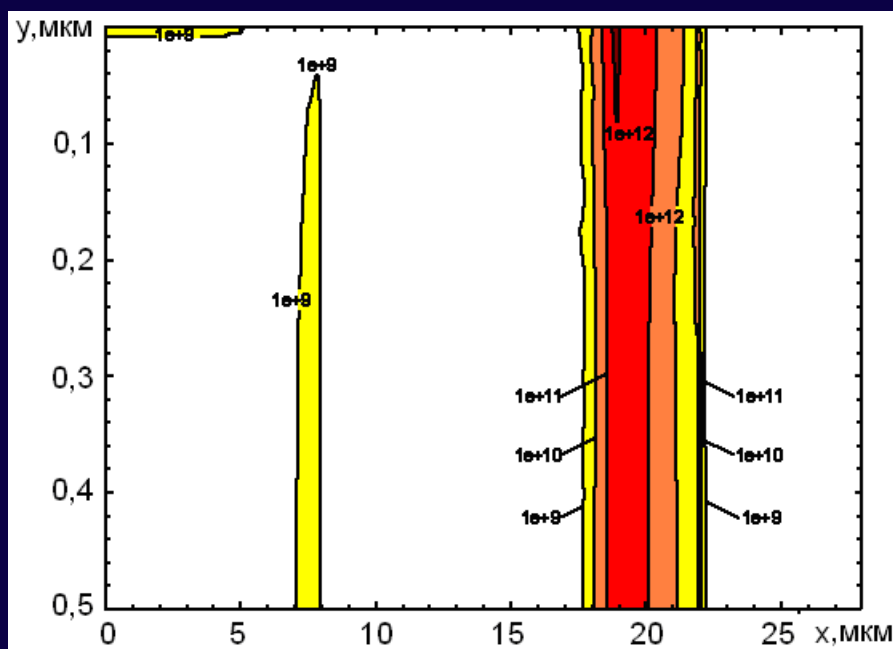


↑ Физико-топологическая модель схемы защиты на входе КМОП/КНС ИС

С целью анализа энерговыделения был использован программный комплекс физико-топологического моделирования “DIODE-2D”, позволяющий анализировать двумерные нестационарные процессы переноса носителей в полупроводниковых структурах, в том числе, и при воздействии внешних ОИИ.

ОЦЕНКА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ПРИБОРНОМ СЛОЕ КМОП/КНС ИС ОТ НАВОДКИ

9



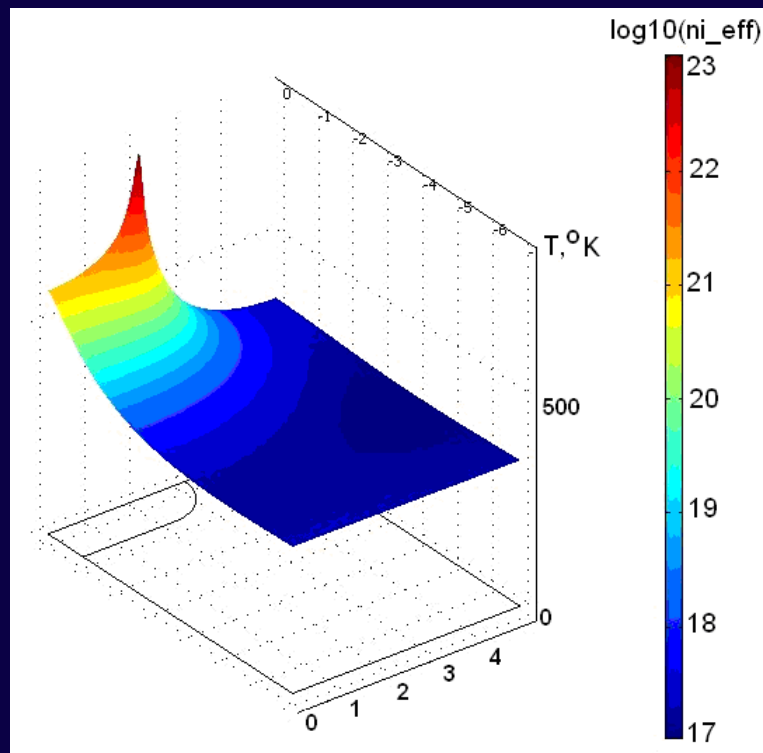
← Пространственное
распределение
энерговыведения в Вт/см³ по
сечению схемы защиты

Максимальное энерговыведение локализовано в узкой приповерхностной области под р+-областью в n-кармане, а интенсивность энерговыведения доходит до величины $6 \cdot 10^{12}$ Вт/см³.
Полная величина удельного энерговыведения составляет по расчетам около $5 \cdot 10^3$ Дж/см³, что более чем на 3 порядка превосходит величину энерговыведения от непосредственного поглощения энергии ЭМИ в приборном слое кремния (1 Дж/см³)!

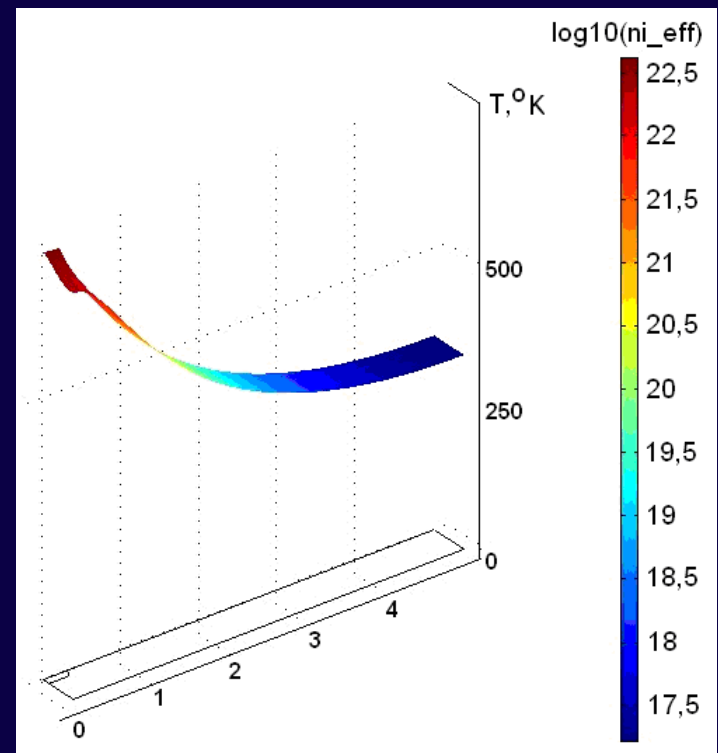
МОДЕЛИ ПОВРЕЖДЕНИЯ КМОП/КНС ИС ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОИН

10

Двумерное численное моделирование



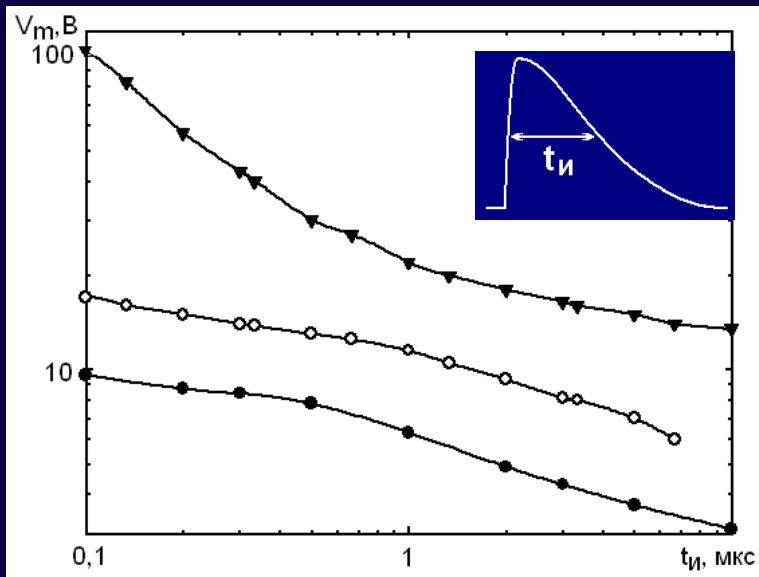
а)






б)

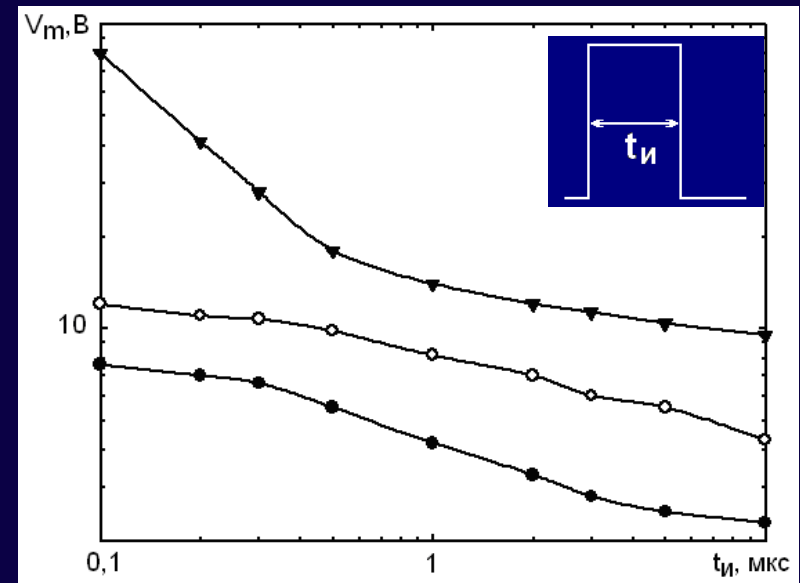
↑ Диаграммы распределения температуры и эффективной концентрации носителей в р-п переходе КМОП (а) и КМОП/КНС технологий (б)

МОДЕЛИ ПОВРЕЖДЕНИЯ КМОП/КНС ИС ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОИН



а)

↑ Зависимости максимальной амплитуды (V_m) ОИН двухэкспоненциальной (а) и прямоугольной (б) форм от длительности ОИН для р-п переходов различных технологий  - объемная технология  - эпитаксиальная  - КНС



б)

Для КНС-структур предположение о промежуточном характере нагрева (модель Вунша-Белла) не работает, и зависимость ИЭП от длительности ОИН слабее зависимости $V_m \sim t^{1/2}$. Значение этого коэффициента для КМОП/КНС ИС лежит в районе -0,3.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ КМОП/КНС ИС НА ИЭП

На основе анализа были сформулированы нижеперечисленные требования к генератору ОИН:

1. Генератор ОИН формирует на выводах КМОП/КНС ИС импульсы тока и напряжения, соответствующие импульсам тока и напряжения, наводимых при воздействии ЭМИ.

2. Форма импульса сигнала напряжения, вырабатываемая генератором, подчиняется двухэкспоненциальному приближению

$V(t) = V_m[\exp(-t/\tau_1) - \exp(-t/\tau_2)]$ с параметрами:

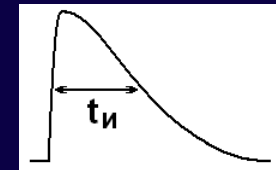
- $\tau_2 = 2 \cdot 10^{-9}$ с; $\tau_1 = 1,5 \cdot 10^{-7}$ с, $1,5 \cdot 10^{-6}$ с и $1,5 \cdot 10^{-5}$ с;

- V_m регулируется плавно в пределах от долей вольта до 4 киловольт.

3. Внутреннее сопротивление генератора 50 Ом.

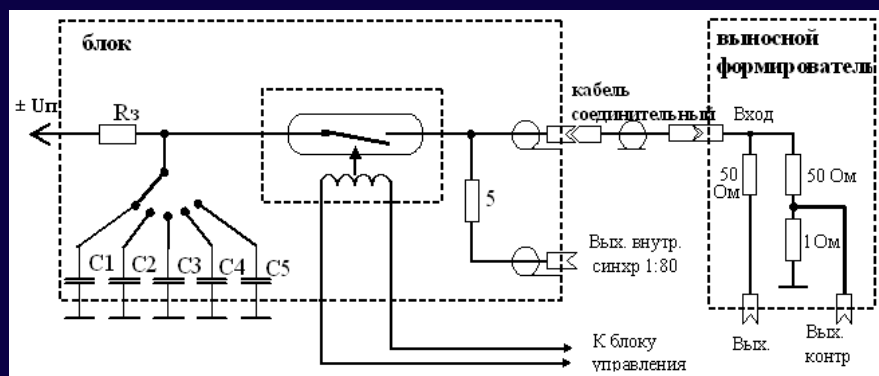
4. Ручной запуск и внешняя синхронизация ОИН.

Схема генератора должна обеспечивать возможность контроля уровня воздействия (V_m), а также параметров напряжений и токов на испытуемых выводах ИС в процессе испытаний.



МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ КМОП/КНС ИС НА ИЭП

За основу генератора ОИН ЭМИ-0501 была взята схема на ртутном герконе.

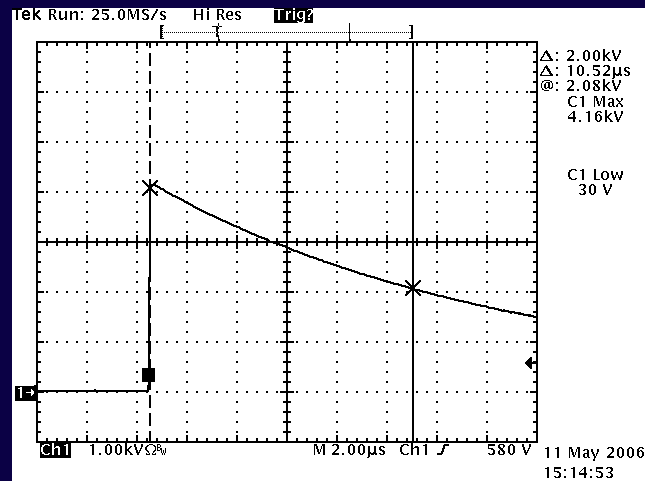
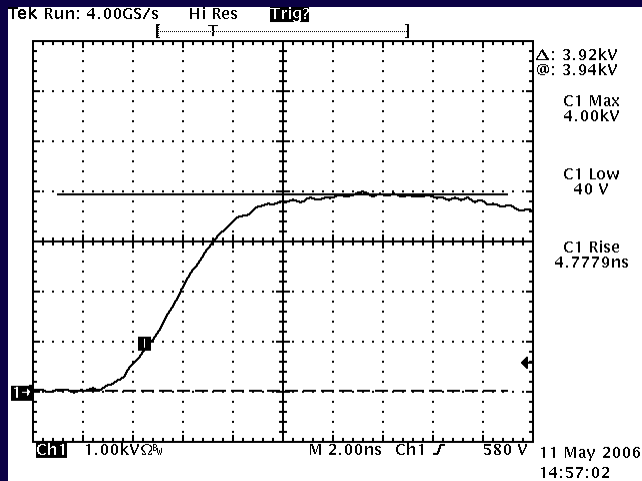


Тип генератора ОИН	Электрические параметры			
	Форма ОИН	Напряжение ОИН	Длительность ОИН	Длительность фронта ОИН
ЭМИ-601 (ЭНПО СПЭЛС)	Двухэксп.	5...1000 В	0,1... 10 мкс	10...20 нс
Ген-1 (22 ЦНИИ МО)	Двухэксп.	5...500 В	0,1... 10 мкс	< 10 нс
Ген-2 (22ЦНИИ МО)	Прямоугольный	5...5000 В	0,1... 10 мкс	< 20 нс
ГОИН (НИИИП)	Прямоугольный	5...2000 В	0,25...1 мкс	< 5 нс
ЭМИ-0501	Двухэксп.	5...4000 В	0,1... 10 мкс	< 5 нс

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ КМОП/КНС ИС НА ИЭП

14

Результаты аттестации показали соответствие измеренных параметров выходного напряжения генератора ОИН заданным требованиям.



↑ Осциллограммы выходных напряжений генератора ЭМИ-0501 при амплитуде ОИН 4 кВ и длительности импульса 10 мкс

Патент на полезную модель № 91238 →
с приоритетом от 11. 01.2009 г.
Зарегистрирован 27.01.2010 г.



МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ КМОП/КНС ИС НА ИЭП



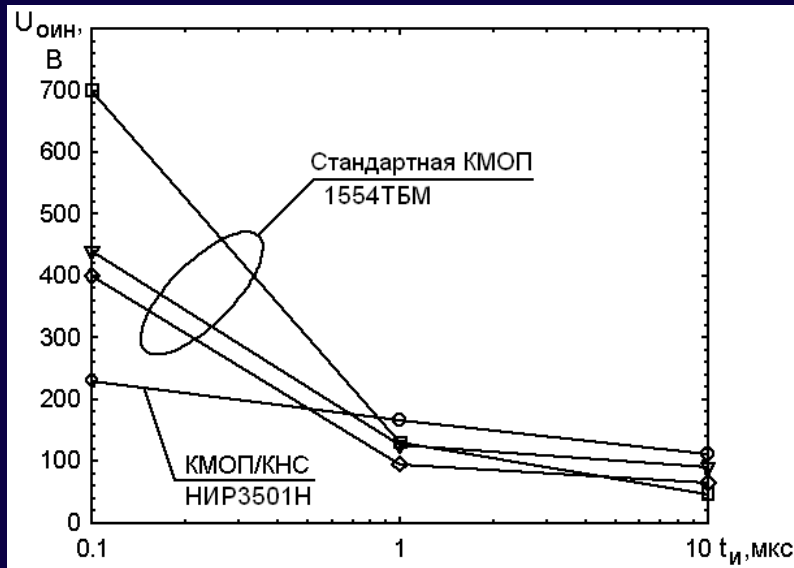
↑ Методика проведения испытаний

В соответствии с разработанной методикой были испытаны различные КМОП ИС, включая 17 типов КМОП/КНС и КМОП/КНИ микросхемы.

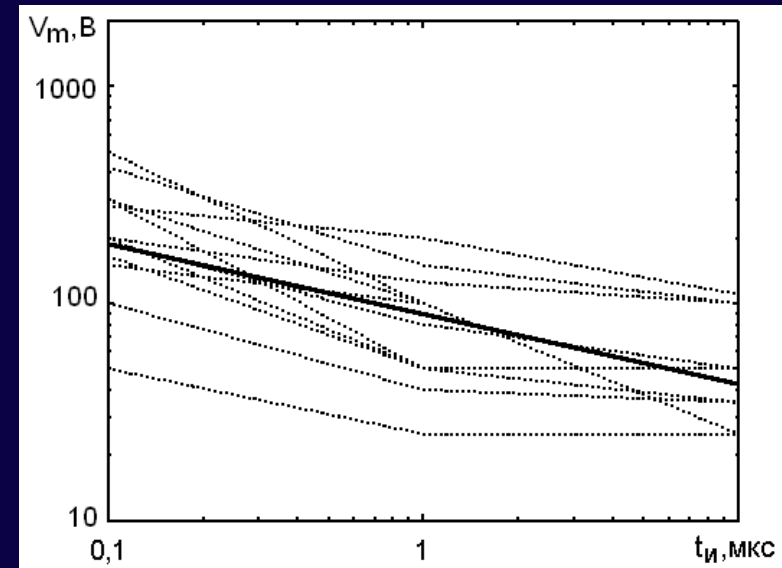
В результате проведенных испытаний были получены следующие усредненные сравнительные результаты уровней ИЭП КМОП/КНС ИС и КМОП ИС объемной технологии в зависимости от длительности ОИН:

ОИН	Уровни ИЭП
0,1 мкс	КМОП/КНС < Объемных КМОП
1 мкс	КМОП/КНС \cong Объемным КМОП
10 мкс	КМОП/КНС \geq Объемных КМОП

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ



↑ Зависимости максимальных допустимых значений ОИН от их длительности для входных цепей испытанных ИС различных технологий



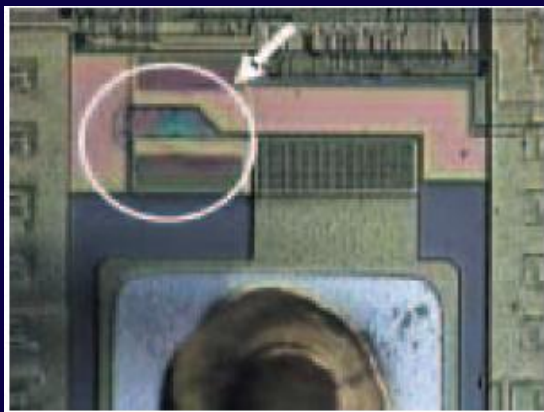
↑ Зависимости максимальных допустимых напряжений ОИН на выходах испытанных КМОП/КНС ИС от длительности ОИН. Сплошной линией выделена линейная регрессия экспериментальных данных.

Результаты экспериментов подтвердили адекватность разработанной численной модели разогрева тонких структур КМОП/КНС под действием ОИН. Зависимость показателя ИЭП от длительности ОИН в данном случае существенно слабее, чем для КМОП ИС стандартной технологий. Экспоненциальный показатель зависимости лежит в диапазоне $-0,3 \dots -0,32$.

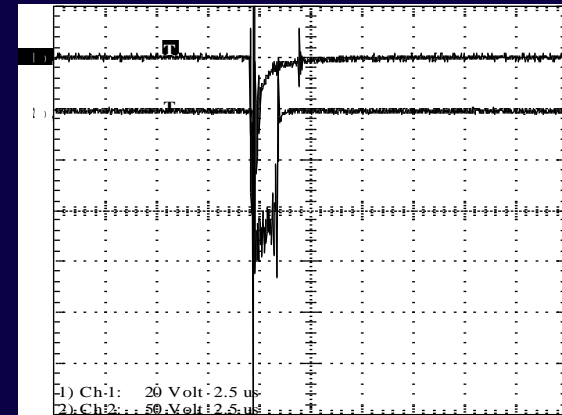
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

В ходе проведения испытаний на ИЭП проводился анализ осциллограмм напряжения и тока на исследуемом выводе ИС, позволяющий предсказать появление необратимых повреждений изделия при дальнейшем росте напряжения ОИН.

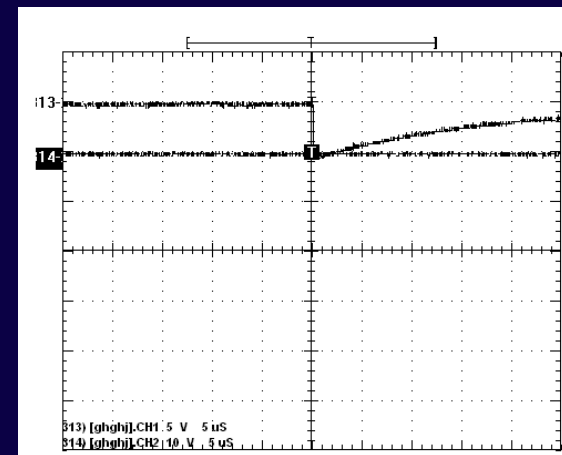
Определение такого состояния позволило уменьшить шаг амплитуды ОИН в этой области и более точно определить уровень ИЭП.



← Заморозка p-n
перехода
вследствие
теплового
пробоя



↑ Лавинный пробой



↑ Перегорание металлизации

↑ Анализ осциллограмм

Основные научные результаты диссертации:

1. На основании электромагнитного анализа взаимодействия ЭМИ с КМОП/КНС ИС, показано, что, поглощенной в кристалле ИС энергии поля ЭМИ недостаточно для заметного энерговыделения и повреждения. Поэтому действие ЭМИ может быть смоделировано воздействием на выводы ИС электрических сигналов от специализированных генераторов.
2. На основании электротеплового анализа показано, что с уменьшением толщины приборного слоя кремния увеличивается его сопротивление и плотность тока перегрузки. В результате характеристики защиты от ОИН могут ухудшаться. Показано, что только при пропорциональном уменьшении всех размеров КНС-структуры максимальная температура с ростом степени интеграции увеличивается незначительно.
3. На основании двумерного численного электротеплового моделирования показано, что рост теплообмена с окружающей средой в КНС-структурах приводит к тому, что предположение об промежуточном характере нагрева (модель Вунша-Белла) в данном случае не работает и зависимость ИЭП от длительности ОИН слабее, чем предсказывает формула Вунша-Белла.
4. По результатам анализа показано, что импульсная электрическая прочность р-п переходов КНС ИС при воздействии ОИН прямоугольной формы примерно на 20-30% ниже, чем при воздействии ОИН двухэкспоненциальной формы. Длительность фронта ОИН относительно слабо влияет на ИЭП структур.

Основные практические результаты:

1. На основании проведенных исследований и испытаний обоснованы параметры унифицированных видов ОИН, необходимые для определения ИЭП современных КМОП/КНС ИС.
2. Разработан и изготовлен генератор ОИН для определения ИЭП КМОП/КНС ИС, удовлетворяющий поставленной задаче. Проведена аттестация разработанного генератора, подтвердившая заданные электрические параметры ОИН.
3. Разработаны экспериментальная установка для проведения испытаний КМОП/КНС ИС на ИЭП. Установка позволяет проводить испытания всех типов КМОП/КНС ИС, включая сложно-функциональные.
4. Разработана методика и проведены испытания ИС на стойкость к ОИН, подтвердившие адекватность разработанных моделей разогрева КНС-структур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение:

- В ОАО «Ангстрем» и ФГУП «ФНПЦ НИИИС»
 - результаты испытаний большинства отечественных КМОП КНС БИС серий 1825, 1620, 5511 на импульсную электрическую прочность.
- В ОАО «ЭНПО СПЭЛС»
 - 1) методика проведения испытаний КМОП/КНС ИС;
 - 2) специализированный генератор ОИН;
 - 3) экспериментальная установка на его базе.

АПРОБАЦИЯ:

Основные результаты диссертации докладывались на российских научных конференциях «Радиационная стойкость электронных систем» (Лыткарино, МО, 2003, 2005 – 2009 гг); научных сессиях МИФИ (Москва, 2004, 2005 и 2008 гг.); научных конференциях «Электроника, микро– и наноэлектроника» (г. Кострома, 2003 г., г.Н.Новгород 2004 г., г. Гатчина, 2006 г.); на научно-практических семинарах «Проблемы создания специализированных радиационно-стойких СБИС на основе гетероструктур» (г. Н.Новгород, 2003 и 2004 гг.).

Основные результаты диссертации опубликованы в 18 работах (в период с 2003 по 2009 гг.). Две работы опубликованы без соавторов. Две работы опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

По результатам работы в январе 2010 года получен патент на полезную модель генератора импульсных сигналов.

Благодарю за внимание!