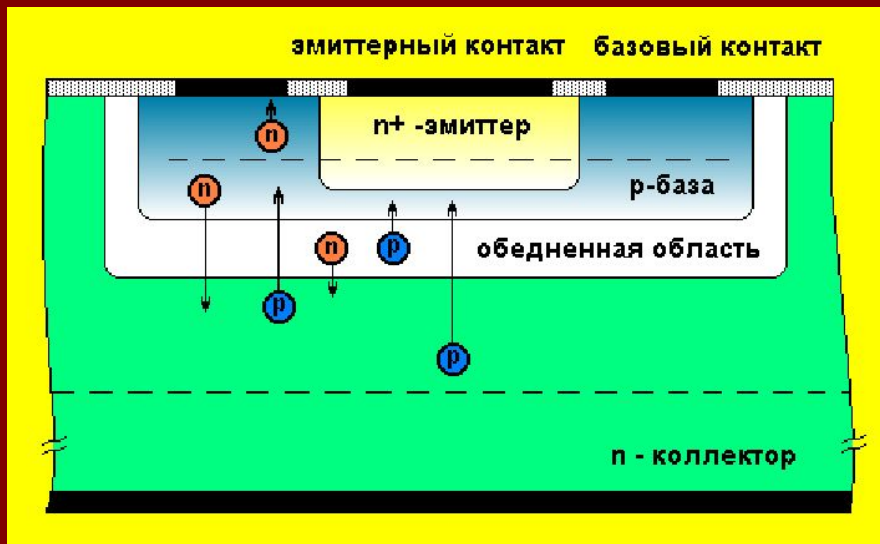


Паразитные эффекты в ИС при
воздействии ИИ. Физика и особенности
проявления тиристорных эффектов в
КМОП ИС.

Первичные эффекты при воздействии ИИ

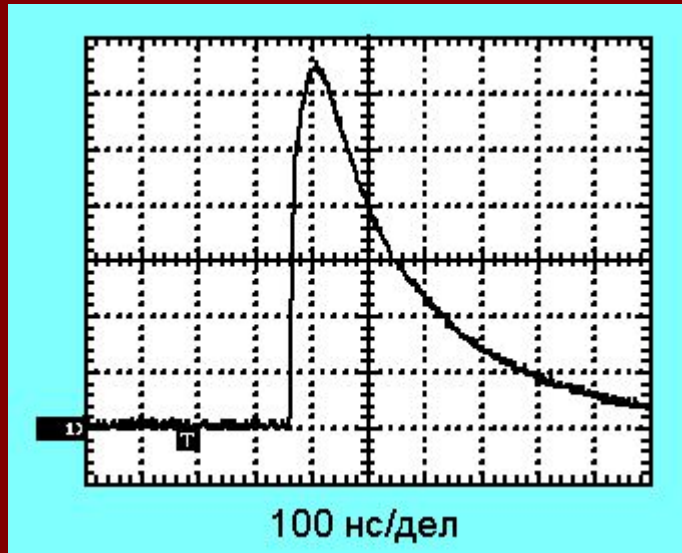


↑ Формирование фототоков в биполярном транзисторе

Переходные ионизационные эффекты в ИС обусловлены кратковременной ионизацией объемов элементов импульсными ИИ и проявляются в форме ионизационной реакции.

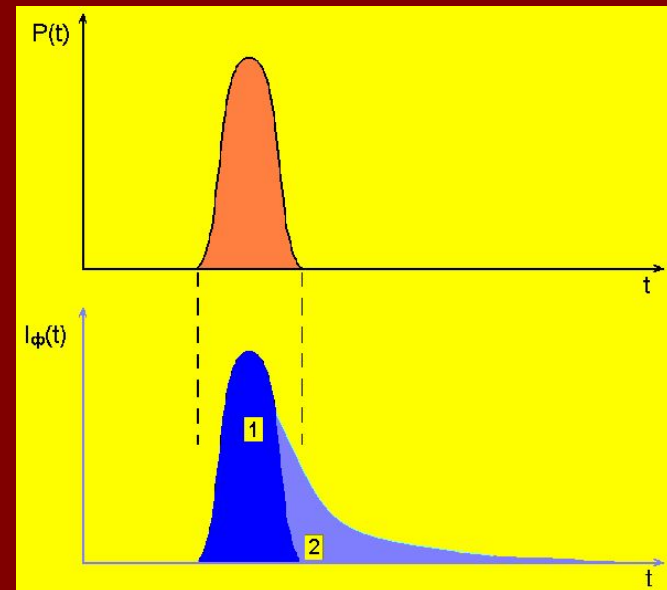
По причине возникновения переходные ионизационные эффекты разделяют на первичные – обусловленные непосредственно энергией излучения и паразитные (вторичные) – обязанные своим происхождением инициированному излучением перераспределению энергии внутренних и сторонних источников.

Первичные эффекты при воздействии ИИ

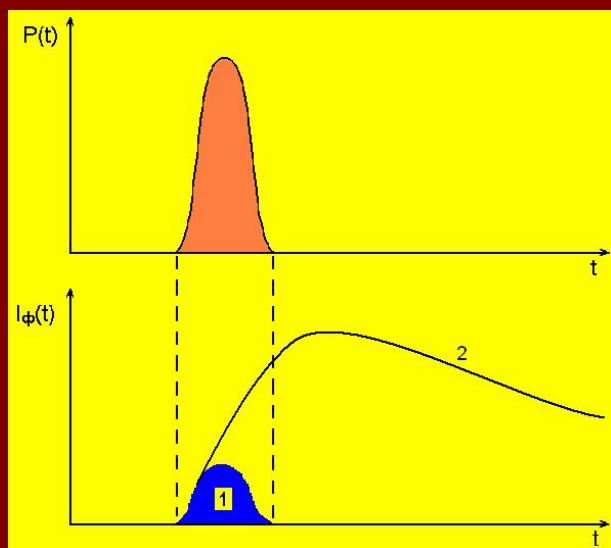
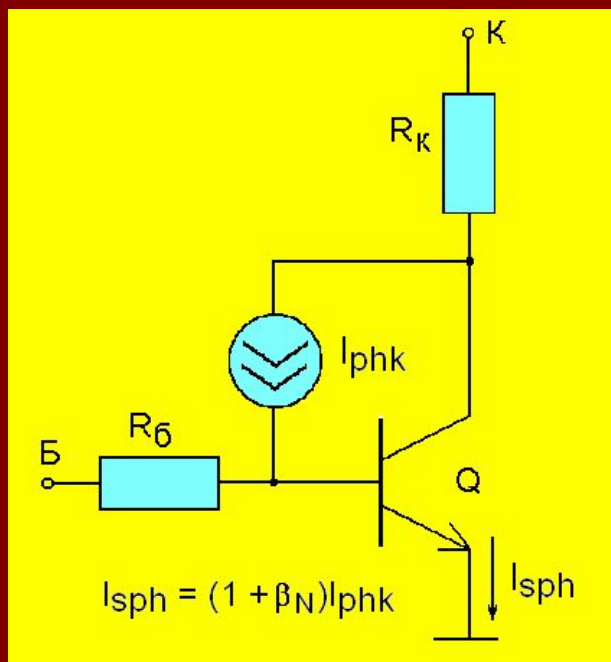


↑ Пример типичного первичного ионизационного эффекта – ионизационного тока коллекторного перехода биполярного транзистора

Мгновенная (1) и запаздывающая (2) составляющие фототока р-п перехода при воздействии колоколообразного импульса ИИ ↓

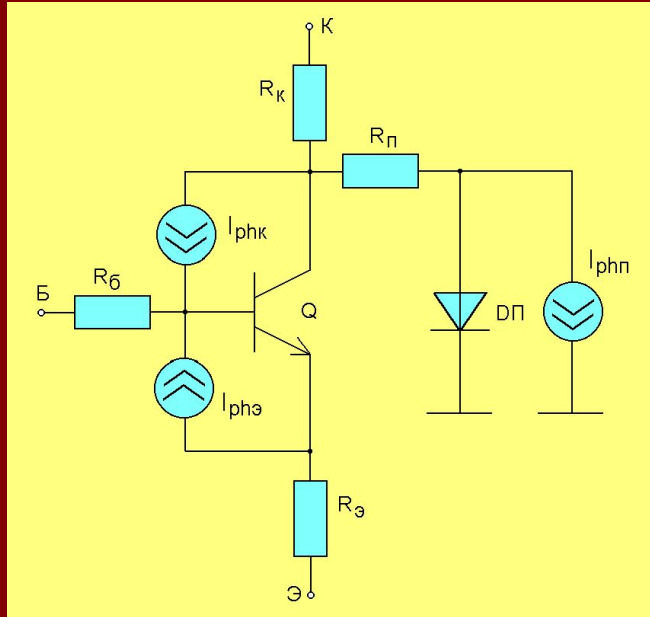


Паразитные эффекты в ПП и ИС при воздействии ИИ

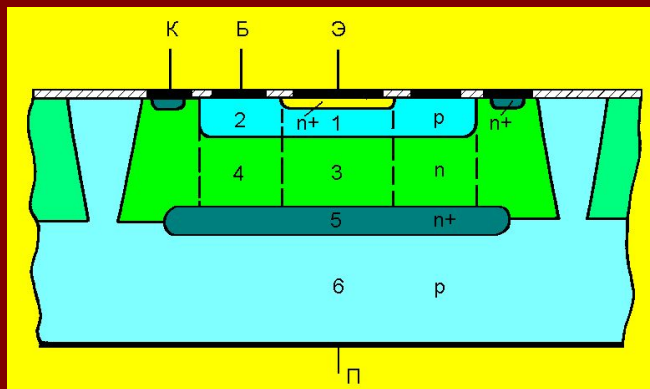


В классе биполярных ИС наиболее заметное влияние на параметры ионизационной реакции оказывает эффект формирования вторичных ионизационных токов. Он связан с усилением первичного ионизационного коллекторного перехода, втекающего в область базы. При работе в ключевом режиме имеет место отпирание перехода база-эмиттер при условии, когда падение напряжения на базовом сопротивлении от первичного ионизационного тока превышает напряжение отпирания транзистора. Именно этот эффект определяет уровень бессбойной работы цифровых биполярных ИС. Эффект вторичного ионизационного тока проявляет себя даже при нулевом сопротивлении в базовой цепи за счет падения напряжения на внутреннем сопротивлении базовой области транзистора. Но имеет это место при более высоких мощностях поглощенной дозы ИИ.

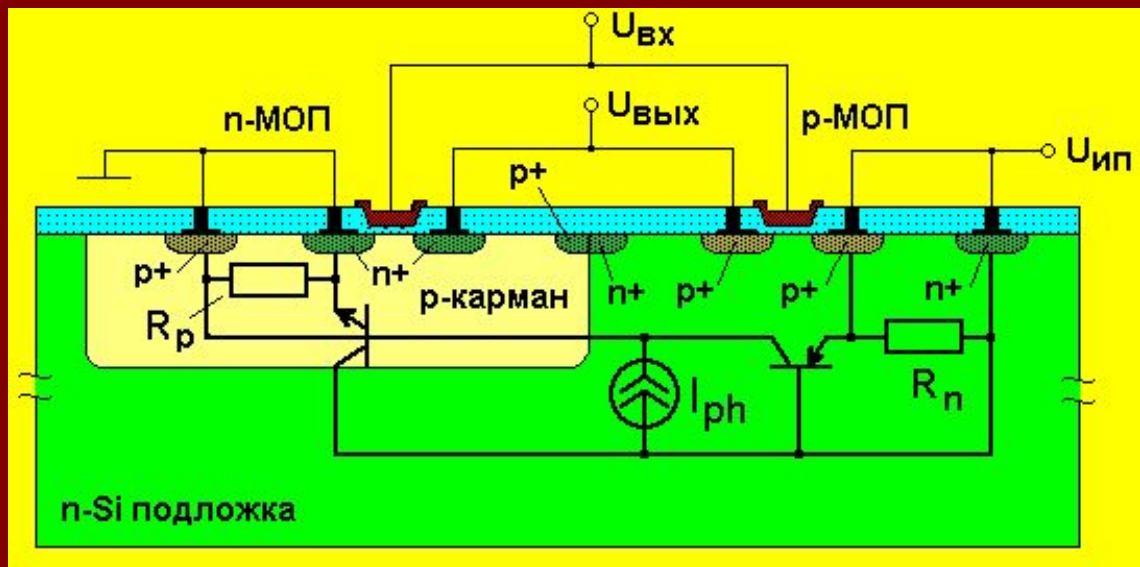
Паразитные эффекты в ПП и ИС при воздействии ИИ



При больших величинах ионизационных токов элементов ИС возможно также перегорание областей ИС. Особенно это относится к большому по величине ионизационному току изолирующего перехода коллектор-подложка. Время спада такого ионизационного тока, связанная с временем рекомбинации неравновесных носителей в толстой подложке ИС, может достигать единиц микросекунд и приводить к выделению больших энергий. В аналоговых ИС встречаются времена релаксации ионизационной реакции до десятков и сотен микросекунд. Пороговая энергия повреждения при импульсном воздействии определяется тепловой моделью Вунша-Белла.



Паразитные эффекты в КМОП ИС при воздействии ИИ



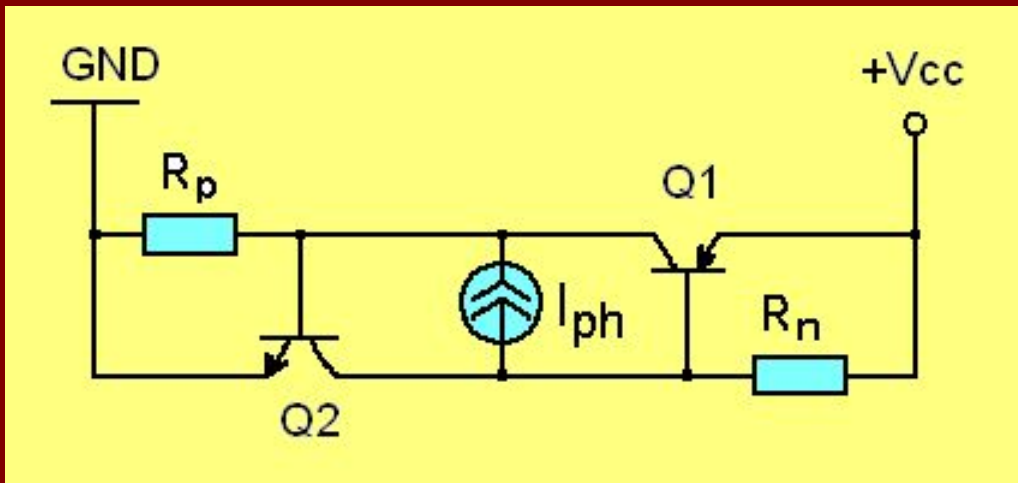
← Паразитные тиристорные структуры в КМОП ИС

В нормальном рабочем режиме паразитные тиристорные структуры КМОП ИС не оказывают влияния на работу схем. Однако при нарушении рабочего и температурного режимов, а также при различных дестабилизирующих воздействиях (импульс ИИ, импульсные перенапряжения, воздействие тяжелой заряженной частицы) паразитные структуры могут переходить в активное состояние. При этом происходит отказ КМОП ИС, сопровождающийся протеканием значительных токов в цепи питания или входов ИС в зависимости от типа паразитной структуры.

Паразитные эффекты в КМОП ИС при воздействии ИИ

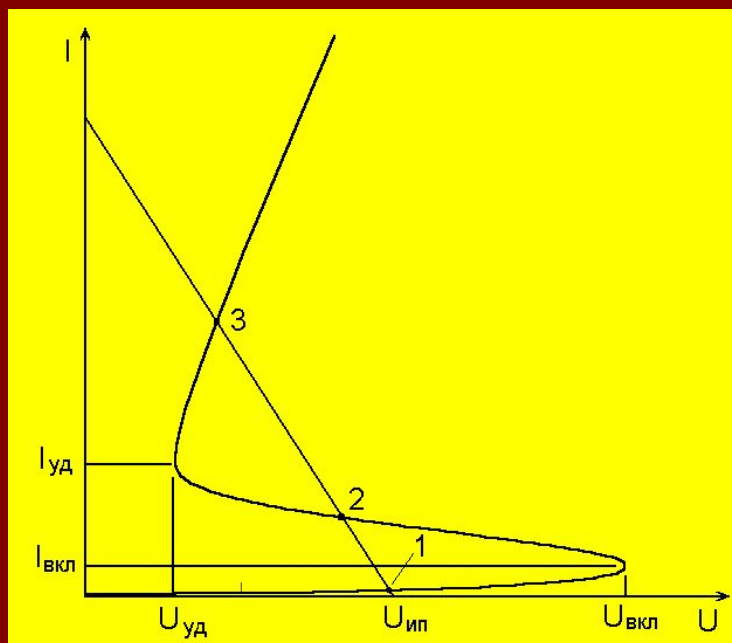
Условия включения тиристорной структуры:

- падение напряжения от ионизационного тока на эмиттерно-базовых резисторах R_n и R_p превышает напряжение отпираания соответствующих переходов паразитных транзисторов;
- произведение коэффициентов усиления тока транзисторов превосходит единицу (регенеративное усиление);
- напряжение на структуре и ток через нее превышают удерживающие значения.



← Двухтранзисторная эквивалентная схема тиристорной структуры

Паразитные эффекты в КМОП ИС при воздействии ИИ



← Включение тиристорной структуры происходит при одновременном выполнении перечисленных ранее условий и описывается перемещением рабочей точки из 1 в 3 по нагрузочной прямой.

Основными параметрами, характеризующими ТЭ паразитной структуры являются:

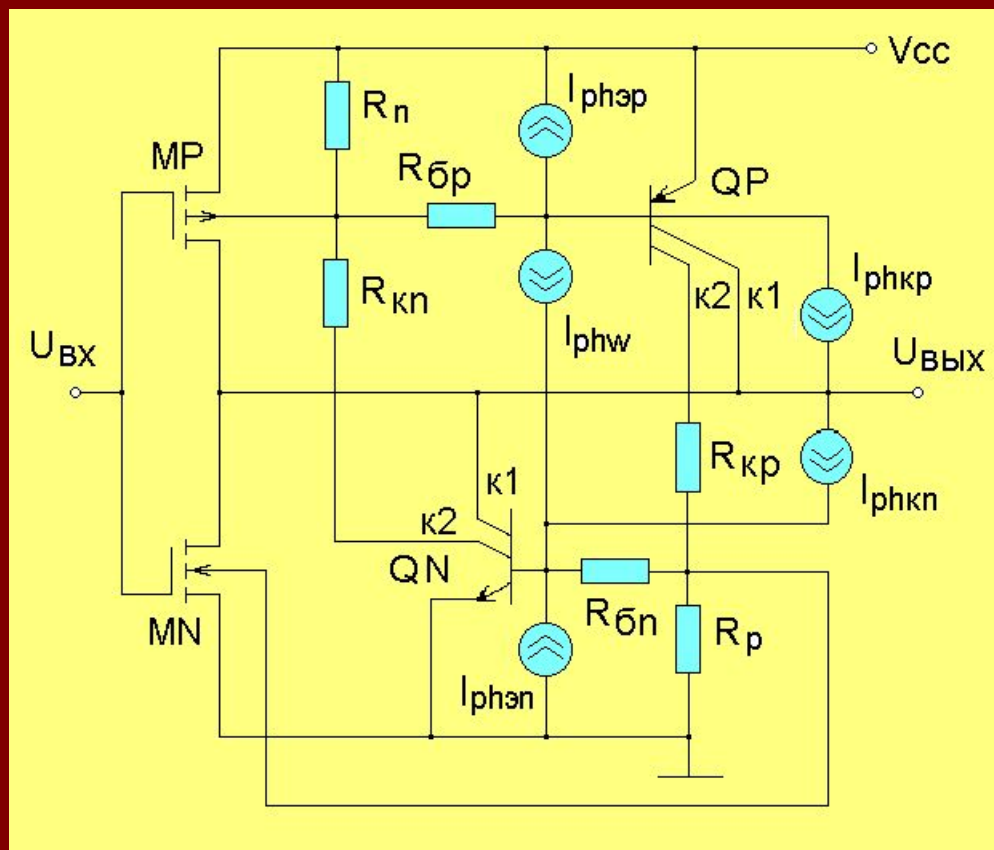
$I_{пэ}$ – ток потребления структуры во включенном состоянии;

$I_{уд}$ – удерживающий ток – минимальный ток, при котором она еще может находиться во включенном состоянии;

$U_{уд}$ – удерживающее напряжение – минимальное напряжение, при котором она еще может находиться во включенном состоянии.

Паразитные эффекты в КМОП ИС при воздействии ИИ

Для проведения качественного анализа особенностей тиристорного эффекта (ТЭ) обычно используют более сложные схемы замещения.



Характерной особенностью тиристорных структур является немонотонный характер вольт-амперных характеристик, приводящий к наличию нескольких (чаще двух) устойчивых состояний, из которых лишь одной является рабочим для КМОП ИС. Процесс изменения состояния тиристорной структуры под действием различных факторов описывается аппаратом теории тиристоров.

Паразитные эффекты в КМОП ИС при воздействии ИИ

Моделирование эффекта «защелкивания» посредством двухтранзисторных электрических эквивалентных схем обладает существенными недостатками, связанными с трудностями выявления аналитической связи между характером реальных физических процессов в структуре и параметрами сосредоточенных элементов эквивалентных схем. Для повышения точности можно использовать метод секционирования, который позволяет учесть неоднородный и распределенный характер процессов. При этом увеличивается число транзисторных секций и резистивных областей.

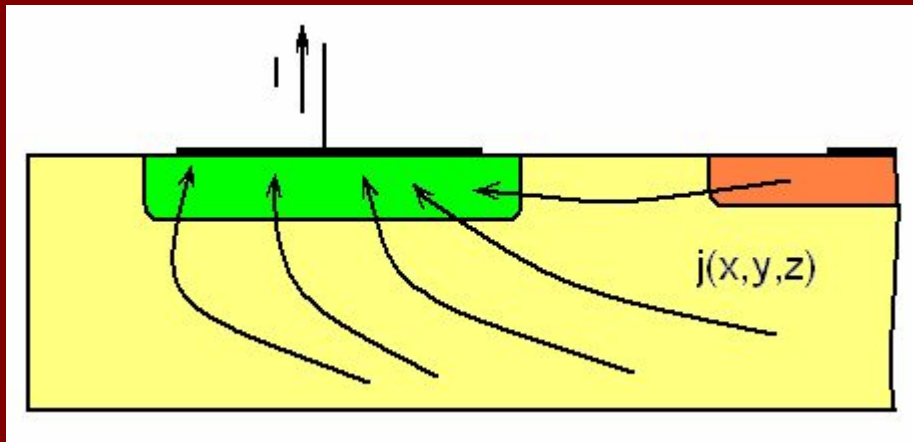
В то же время нелинейные эффекты высокого уровня ИИ, взаимосвязь концентрации носителей и электростатических потенциалов с учетом их распределенного характера, нестационарный характер процессов включения и др. не позволяют однозначно измерять параметры элементов электрических эквивалентных схем.

Все это ограничивает применение электрических схем для прогнозирования «защелкивания» и вызывает необходимость использования численных средств моделирования физического уровня.

Паразитные эффекты в КМОП ИС при воздействии ИИ

Моделирование ТЭ представляет собой достаточно сложную задачу. В общем случае необходимо учитывать реальную картину распределения линий тока по структуре и неоднородность пространственного распределения удельных сопротивлений соответствующих слоев. Расчет параметров таких структур является весьма трудоемкой задачей, требующей привлечения двух-, а в ряде случаев и трехмерных моделей и использования машинных методов анализа.

Эффективное средство определения параметров элементов моделей - использование специальных тестовых структур, обладающих сходными с анализируемыми областями ИС электрофизическими и топологическими характеристиками. Средства моделирования ТЭ требуют использования как минимум двумерного численного анализа.



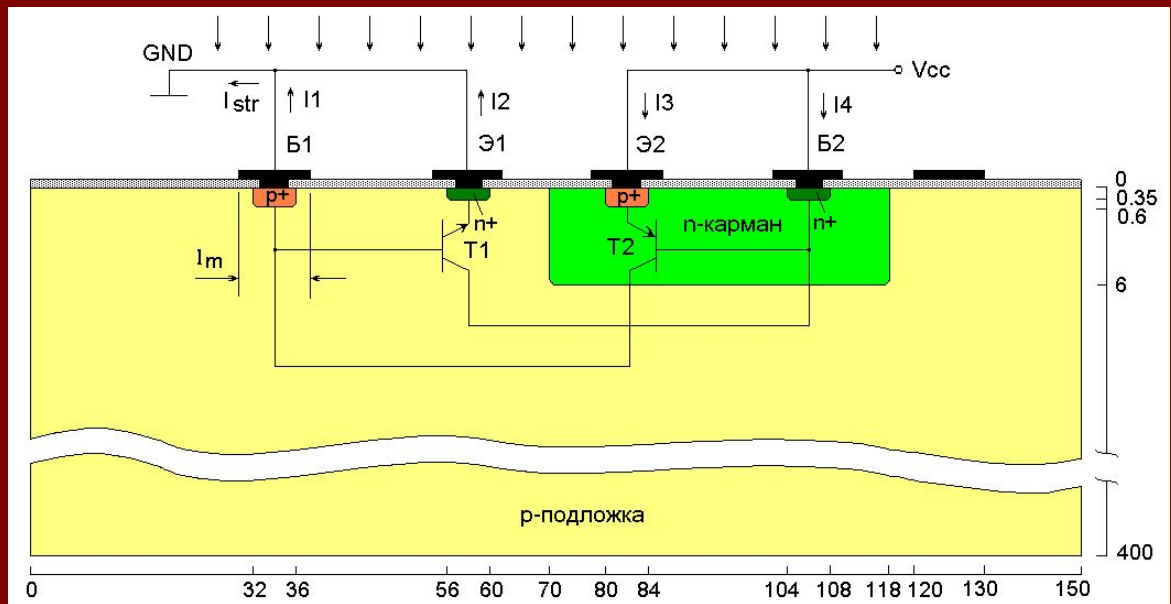
Паразитные эффекты в КМОП ИС при воздействии ИИ

"DIODE-2D" представляет собой двумерную программу физико - топологического моделирования, основанную на использовании жестко-устойчивых методов Гира для решения ФСУ в кремнии с учетом влияния ионизирующих излучений. Моделирование физических процессов в полупроводниковых приборах производится на основе диффузионно-дрейфовой модели, описываемой уравнениями вида

$$\begin{aligned}dn/dt &= (1/q)\Delta J_n + G_n - R_n; \\ dp/dt &= -(1/q)\Delta J_p + G_p - R_p; \\ J_n &= q(\mu_n nE + D_n \Delta n); \\ J_p &= q(\mu_p pE + D_p \Delta p); \\ J &= J_p + J_n + J_{cm}; \\ \Delta^2 \psi &= \Delta E = (q/\varepsilon_n e_o)(p + N_d - n - N_a),\end{aligned}$$

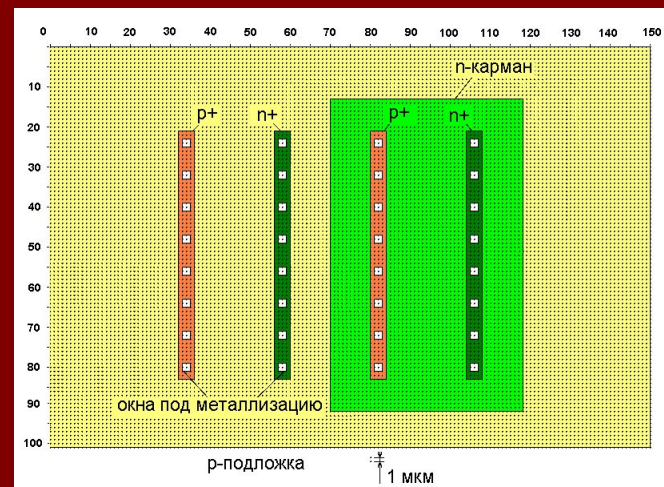
где q - заряд электрона; n, p - концентрации электронов и дырок; ψ - электростатический потенциал; E - напряженность электрического поля; D_n, D_p - коэффициенты диффузии электронов и дырок; μ_n, μ_p - подвижности электронов и дырок; ε_n - относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; G_n, G_p - скорости генерации электронов и дырок; R_n, R_p - скорости рекомбинации электронов и дырок; J - плотность полного тока; J_n, J_p - плотности токов электронов и дырок; $J_{cm} = -\varepsilon_o (d/dt)\Delta\psi$ - плотность тока смещения; N_d, N_a - концентрации ионизированных донорной и акцепторной примесей.

Паразитные эффекты в КМОП ИС при воздействии ИИ



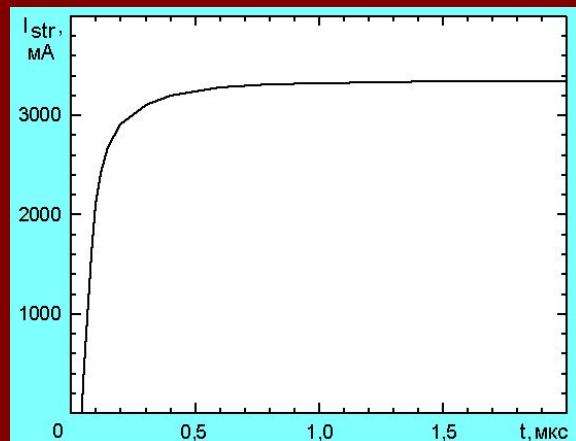
Вид сверху тестовой КМОП-структуры →

← Поперечное сечение тестовой КМОП-структуры



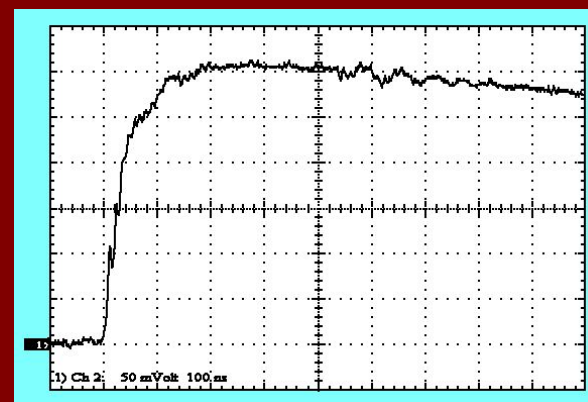
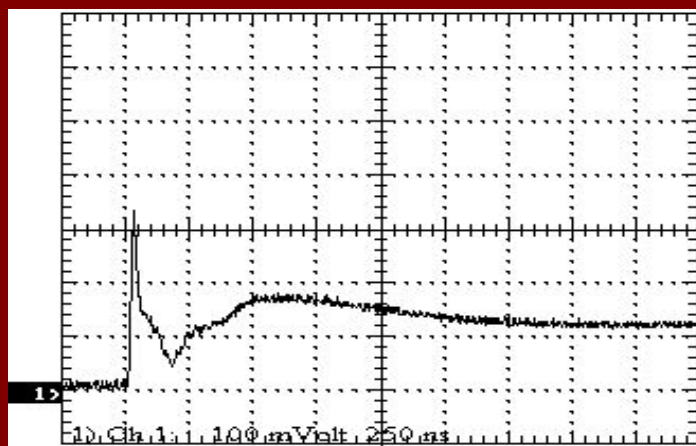
С целью анализа особенностей "радиационного защелкивания" тиристорных структур в КМОП ИС были изготовлены специализированные тестовые структуры TSCLUXX и выполнено их расчетно-экспериментальное моделирование. Тестовые структуры серии TSCLUXX представляют собой выполненные по 2-х микронной КМОП технологии четырехслойные структуры производства ОАО «Ангстрем».

Паразитные эффекты в КМОП ИС при воздействии ИИ



← Динамика изменения тока структуры в области больших времен (расчет)

Эксперимент ↓



В процессе "защелкивания" ток структуры достигает установившегося значения в течение нескольких микросекунд. Динамика изменения тока структуры во времени в области больших времен практически не зависит от длительности инициирующего импульса.

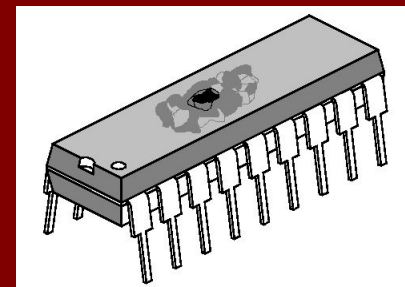
Паразитные эффекты в КМОП ИС при воздействии ИИ

Возможность реализации условий «радиационного защелкивания» определяется особенностями конструктивно-технологического изготовления конкретного типа структуры. Основной особенностью ТЭ является остаточный характер: после окончания импульса ИИ работоспособность не восстанавливается. Восстановить работоспособность можно путем кратковременного отключения напряжения питания при условии, что за время ТЭ не произошло необратимого изменения параметров ИС (перегорание металлизации, вторичный пробой).

ТЭ в ИС идентифицируется по одновременному выполнению следующих условий:

- резкое возрастание тока цепи питания (входного, выходного токов) до значений 10мА...10А (1мА... 100ма), существенно (на порядок и более) превосходящих режимные значения;
- сохранение сверхнормативных значений токов после окончания воздействия;
- потеря функционирования ИС.

Показателями стойкости ИС к ТЭ являются максимальные значения уровня дестабилизирующего воздействия, при котором ТЭ не происходит.



Паразитные эффекты в КМОП ИС при воздействии ИИ

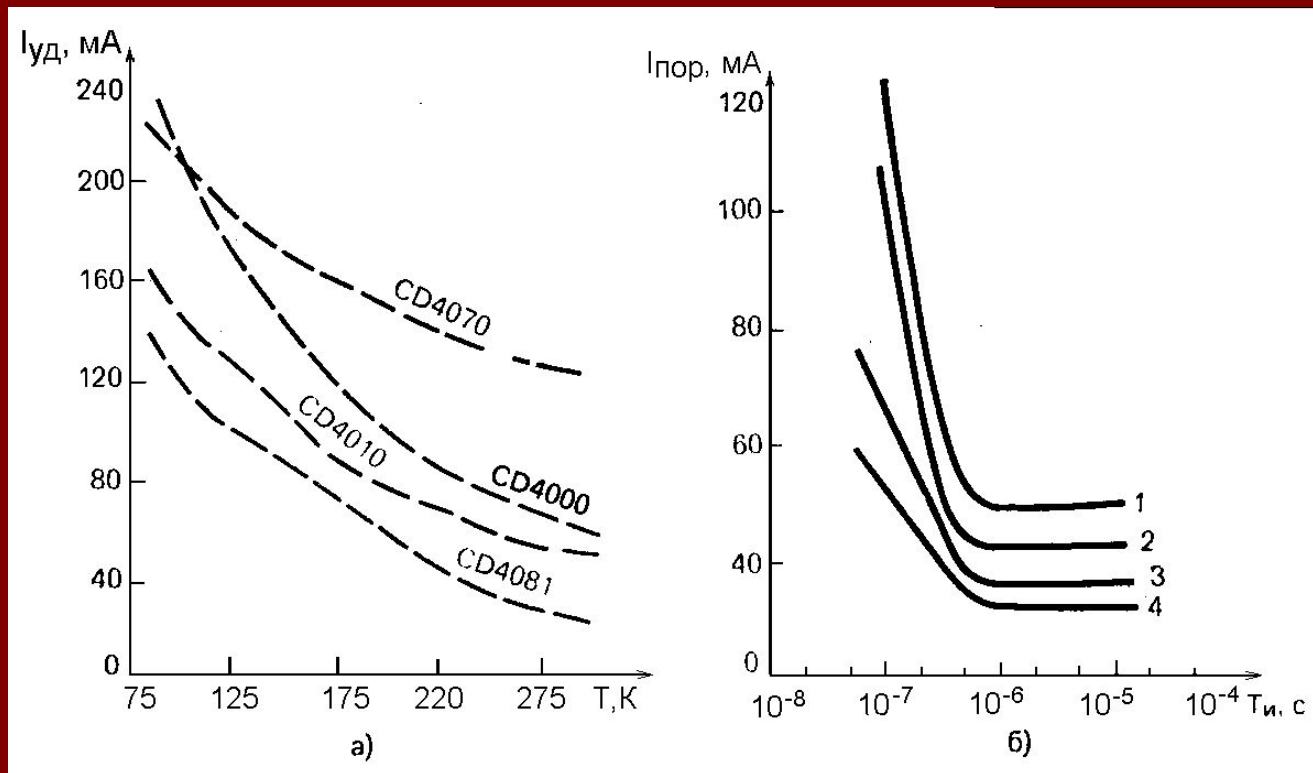
Типовые значения пороговых уровней «радиационного защелкивания» серийных КМОП ИС при воздействии импульсного ИИ находятся в диапазоне $10^7 \dots 10^{10}$ рад(Si)/с и приведены в таблице.

Тип ИС	Рпор, рад/с	Uуд, В	Iуд, мА	Iпз, мА
564РУ2	$10^7 \dots 10^8$	2,6...4,4	55...120	170...600
564ТР2	$3 \cdot 10^8 \dots 10^9$	4,0...4,6	85...100	155...210
564ЛН1	$2 \cdot 10^8 \dots 2 \cdot 10^{10}$	3,75	130...150	270...300
56ЛН2	$6 \cdot 10^9 \dots 4 \cdot 10^{10}$	5..6	15...65	170...180
537РУ6	$2,5 \cdot 10^7 \dots 5 \cdot 10^7$	1,4	40	400
564ЛЕ6 564ЛА7	Нет защелкивания	до 10^{12} рад/с и	напряжении питания 15 В	

В большинстве случаев, если до $10^{11} \dots 10^{12}$ рад/с ТЭ не произошел, его и не будет из-за насыщения ионизационного тока при предельных уровнях.

Паразитные эффекты в КМОП ИС при воздействии ИИ

Параметры «радиационного защелкивания» КМОП ИС существенно зависят от температуры окружающей среды и длительности импульса ИИ.



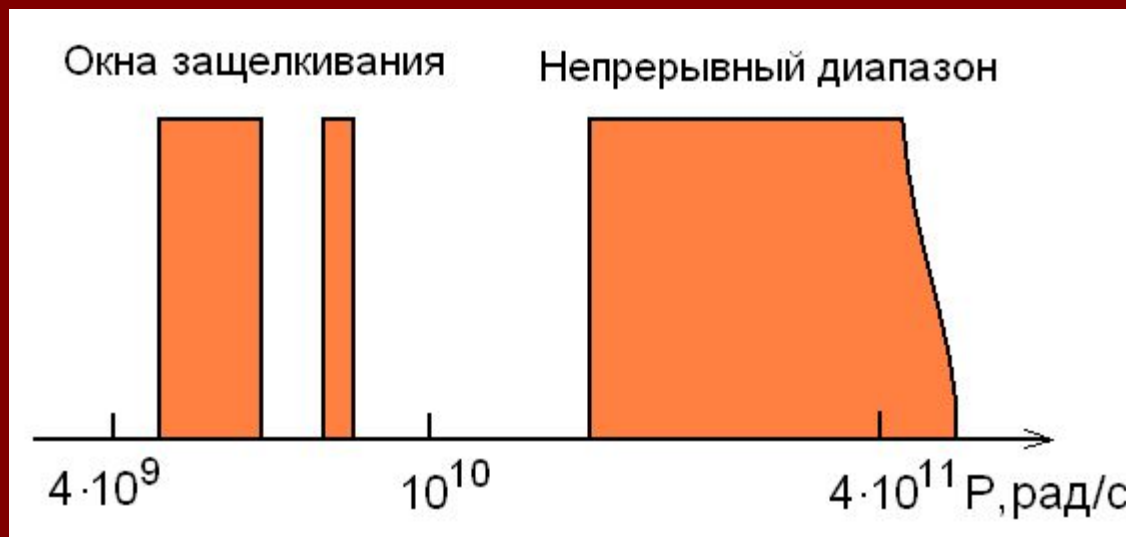
↑ Зависимости удерживающего напряжения ИС серии CD4000 от температуры (а) и порогового тока от длительности импульса ИИ при различных температурах (б):

1 - 25°C; 2 - 60°C; 3 - 100°C; 4 - 140°C

Паразитные эффекты в КМОП ИС при воздействии ИИ

Значительные сопротивления металлизации КМОП ИС (единицы Ом) приводят к существенным внутренним падениям напряжения при протекании ионизационных токов, что влияет на электрический режим паразитных структур. Подобное снижение напряжения приводит к возникновению «окон защелкивания», которые наблюдались в ИС CD4947, CD4061 и других. Особенно при работе вблизи напряжений удержания.

Наличие в ИС нескольких «окон» объясняется защелкиванием различных паразитных структур.

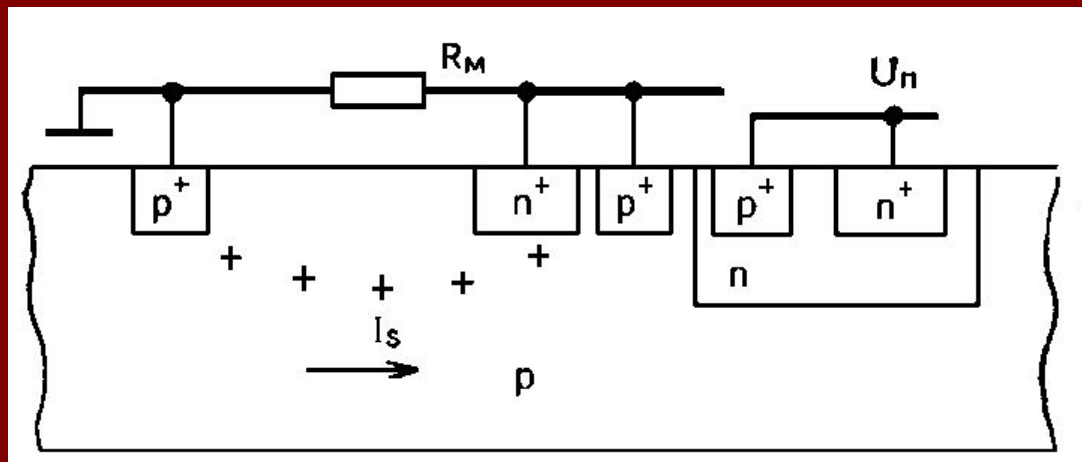


← Окна защелкивания в КМОП ИС

Паразитные эффекты в КМОП ИС при воздействии ИИ

Падение напряжения на шинах металлизации может приводить не только к подавлению «защелкивания», но и инициировать включение паразитных структур, которые не защелкнулись непосредственно от ИИ. Так разность потенциалов между контактами вдоль шин питания и общей вызывает протекание тока в подложке, который действует аналогично току дестабилизирующего воздействия.

Поэтому при наличии в ИС нескольких паразитных структур «защелкивание» одной из них может распространиться на соседние вдоль шины питания.

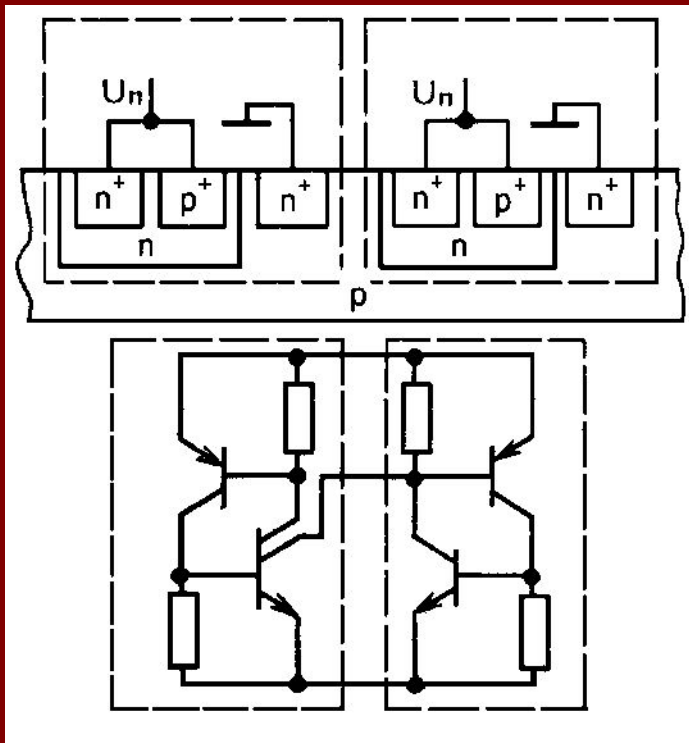


← Взаимное влияние паразитных структур при протекании больших токов в общих шинах металлизации.

Паразитные эффекты в КМОП ИС при воздействии ИИ

Косвенное (вторичное) включение паразитной структуры может произойти также вследствие инжекции носителей при «защелкивании» соседней структуры.

Распространение «защелкивания» по кристаллу в КМОП ИС экспериментально наблюдалось с помощью импульсного инфракрасного микроскопа.



← Взаимное влияние паразитных структур из-за инжекции носителей из смежных структур

Таким образом, анализ эффекта «защелкивания» в КМОП ИС в общем случае нельзя свести к традиционному изучению только локальных паразитных структур – он требует рассмотрения ИС в целом.

Испытания КМОП ИС на стойкость к защелкиванию

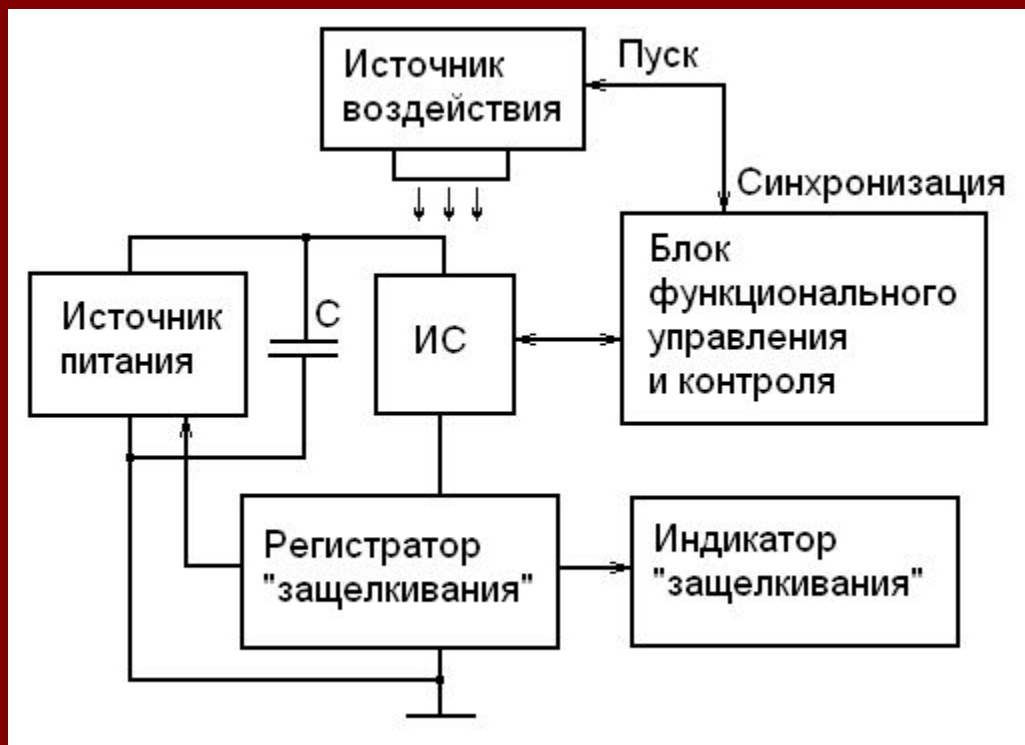
Для испытаний КМОП ИС на стойкость к «защелкиванию» в качестве источника воздействия используются аттестованные МУ. Однако сложность и многообразие проявления паразитных эффектов затрудняют получение всего набора экспериментальных данных в условиях ограниченных ресурсов МУ.

Наиболее оптимальный вариант – сочетание имитаторов и МУ.

Экспериментальный комплекс для проведения испытаний на стойкость к радиационному «защелкиванию» должен обеспечивать:

- Возможность задания любых допустимых электрических и функциональных режимов работы КМОП ИС;
- Регистрацию факта «защелкивания» как по питанию, так и по входам/выходам ИС;
- Возможность измерения параметров «защелкивания» для каждой из структур;
- Исключение возможности развития необратимых эффектов повреждения ИС вследствие радиационного «защелкивания».

Испытания КМОП ИС на стойкость к защелкиванию



Блок функционального управления и контроля должен обеспечивать возможность задания и контроля логического и электрического состояния по любому из выводов ИС. Регистратор «защелкивания» определяет значение тока потребления в состоянии «защелкивания» и фиксирует превышение некоторого порогового уровня тока.

Через определенную задержку времени, зависящую от параметров «защелкивания», подает управляющий сигнал на коммутатор цепи питания для исключения необратимых повреждений ИС.

Возникновение «защелкивания» по выводам ИС контролируется блоком управления и контроля. Индикатор «защелкивания» извещает оператора о наличии факта «защелкивания» по цепи питания или выводам.

Испытания КМОП ИС на стойкость к защелкиванию

Испытания ИС на «защелкивание» проводятся как в номинальном, так и в критичном режимах работы и условиях применения. Критичный для «защелкивания» электрический режим реализуется при максимальном напряжении питания, а также при наличии помех питания во время воздействия импульса ИИ.

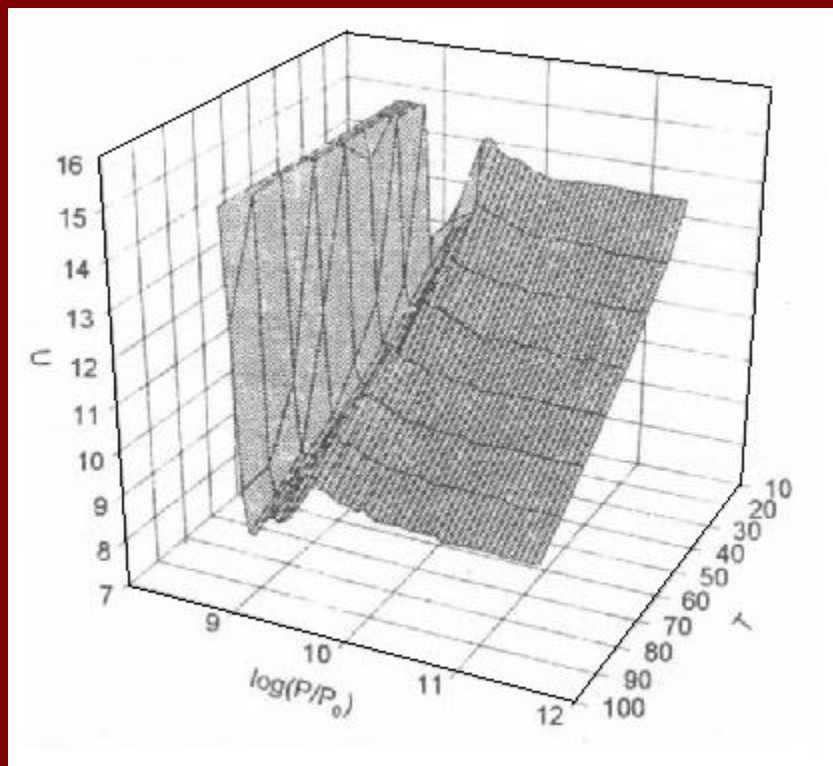
Выбор наиболее уязвимых к «защелкиванию» функциональных тестов проводится предварительно расчетно-экспериментальными методами.

Из внешних факторов наибольшее влияние на эффект «защелкивания» оказывает температура в верхнем значении ее диапазона.

Схемы подключения ИС при испытаниях должны соответствовать требованиям ТУ и оговариваться в частных программах и методиках.

Испытания ИС начинают проводить при значениях мощностей доз ИИ, близких или равных предельным уровням, установленным в ТУ. Если «защелкивание» регистрируется, то работоспособность ИС восстанавливается после каждого импульса ИИ путем кратковременного отключения питания. Далее проводятся последовательные испытания с уменьшением воздействующих уровней ИИ. С целью регистрации «окон защелкивания» шаг изменения мощности дозы выбирается минимальным.

Испытания КМОП ИС на стойкость к защелкиванию



Использование высокопроизводительных лазерных имитаторов в составе специализированных установок позволило провести детальное исследование влияния температуры и напряжения питания на проявление ТЭ в КМОП ИС 564ЛН2 при воздействии импульсного ИИ.

Было необходимо определить границы U(P) области проявления ТЭ в координатах U-P. Значения границ определялись при нескольких температурах.

Совокупность U-P диаграмм для различных температур позволяет построить трехмерную диаграмму U-P-T диаграмму ТЭ (см. рис.). Построение U-P-T диаграммы потребовало проведения ≈ 3000 информативных импульсов ЛИ в сочетании с калибровочными измерениями на МУ.

Использование ИС,
потенциально уязвимых к тиристорному
эффекту, в аппаратуре.

Обеспечение стойкости КМОП ИС к тиристорному эффекту

Основные технологические методы повышения стойкости КМОП ИС к ТЭ заключаются в следующем:

- уменьшение коэффициентов усиления паразитных биполярных транзисторов за счет использования дополнительного легирования базовых областей транзисторов или путем использования радиационно-технологической обработки (облучение нейтронами, электронами):
- уменьшение объемного сопротивления областей эмиттер-база паразитных транзисторов путем повышений уровня легирования подложки или использования эпитаксиальных подложек;
- оптимизация топологии структур в том числе путем увеличения числа контактов к диффузионным областям.

Наиболее радикальным технологическим методом устранения ТЭ является использование технологии КНС или КНИ при производстве радиационно-стойких ИС.

Использование ИС, потенциально уязвимых к тиристорному эффекту, в аппаратуре

Условия включения тиристорной структуры:

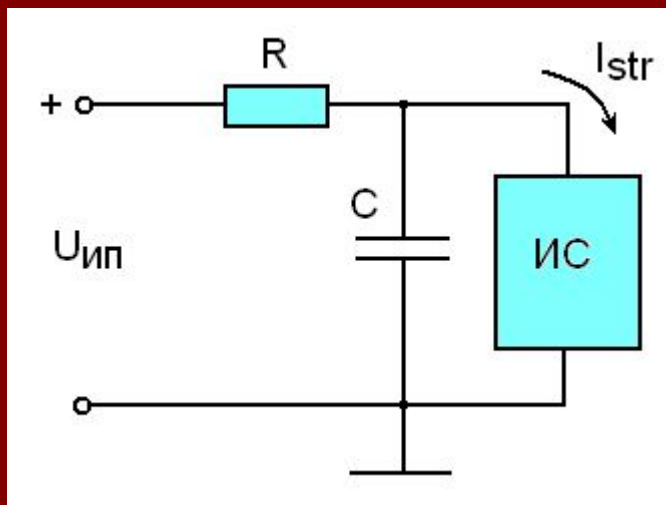
- падение напряжения от ионизационного тока на эмиттерно-базовых резисторах R_n и R_p превышает напряжение отпирающих соответствующих переходов паразитных транзисторов;
- произведение коэффициентов усиления тока транзисторов превосходит единицу (регенеративное усиление);
- напряжение на структуре и ток через нее превышают удерживающие значения.

Повлиять на первые два условия включения ТЭ, не вмешиваясь в технологию и схемотехнику ИС, невозможно. В нашем распоряжении только две возможности:

- уменьшить напряжение на структуре ниже напряжения удержания;
- уменьшить ток через структуру ниже значения удержания.

Существенно повлиять на напряжение питания ИС сложно, так как оно задается режимными условиями.

Использование ИС, потенциально уязвимых к тиристорному эффекту, в аппаратуре



Резистор должен быть такой величины, которая предотвращает протекание в цепи питания КМОП ИС значительных токов.

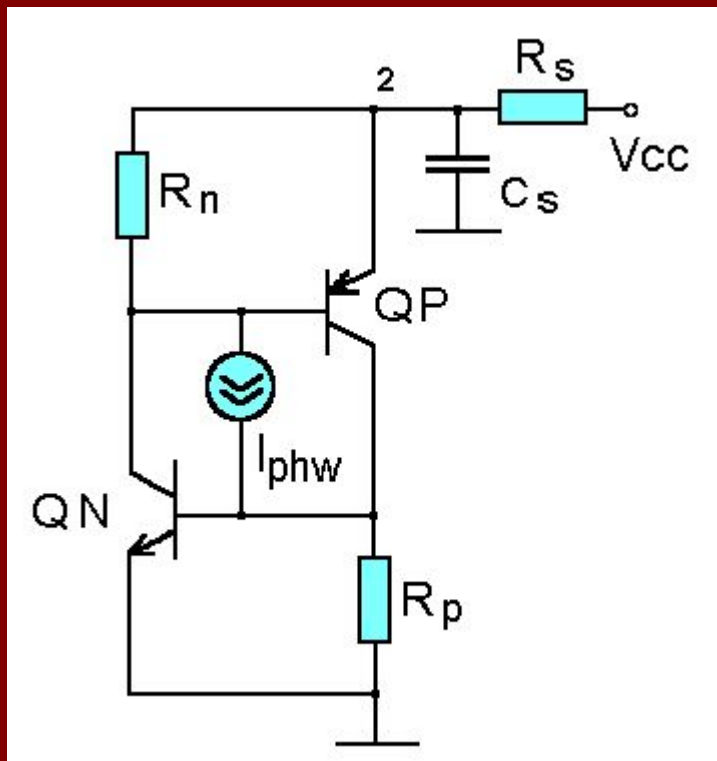
Для КМОП ИС среднего уровня интеграции требуемая величина ограничивающего резистора лежит в районе сотен Ом.

Применение простейшей токоограничивающей схемы возможно только при работе ИС в статическом (ждущем) режиме или на низких рабочих частотах. При работе на высоких частотах падение напряжения от рабочего тока на резисторе станет очень заметным и нарушит работу КМОП ИС.

А если ИС подвергается еще и воздействию поглощенной дозы, то рост тока потребления станет еще более значительным.

Использование ИС, потенциально уязвимых к тиристорному эффекту, в аппаратуре

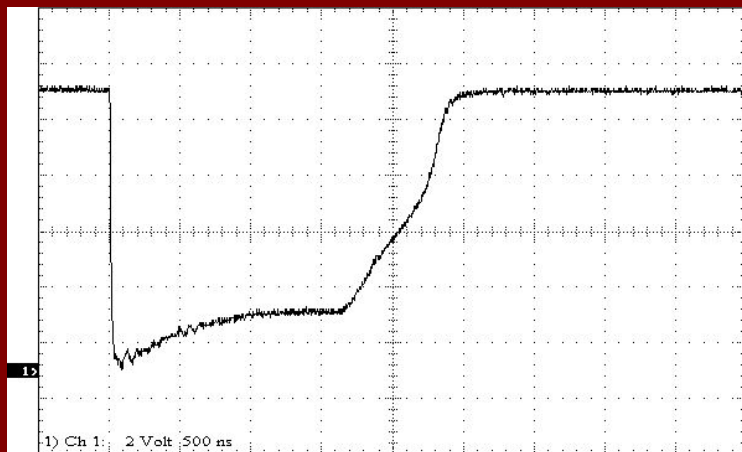
С целью определения возможностей этой простейшей схемы подавления ТЭ был выполнен анализ эквивалентной электрической схемы.



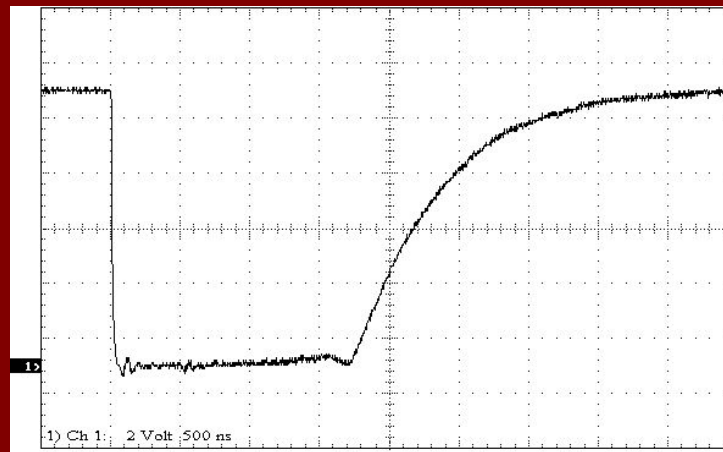
Но на условия формирования регенеративной обратной связи внешний резистор не влияет. Также начинает развиваться ТЭ, отпираются и насыщаются транзисторы. Это сопровождается ростом тока потребления и ограничением напряжения на выводах питания КМОП ИС.

← Эквивалентная схема ионизационной реакции КМОП ИС по цепи питания

Использование ИС, потенциально уязвимых к тиристорному эффекту, в аппаратуре



а)



б)

↑ Осциллограммы выходного напряжения КМОП ИС 564ЛА8 при воздействии ИИ с интенсивностью, эквивалентной $5 \cdot 10^9$ рад(Si)/с, и различных значениях токоограничивающего резистора в цепи питания: 200 Ом (а) и 2000 Ом (б)

Приведенные осциллограммы подтверждают предположение о механизме роста ВПР с ростом величины резистора.

Таким образом, существует оптимальное значение токоограничивающего резистора, обеспечивающее отсутствие ТЭ и минимальное ВПР КМОП ИС. В большинстве практических случаев оно лежит в диапазоне десятков и сотен Ом.

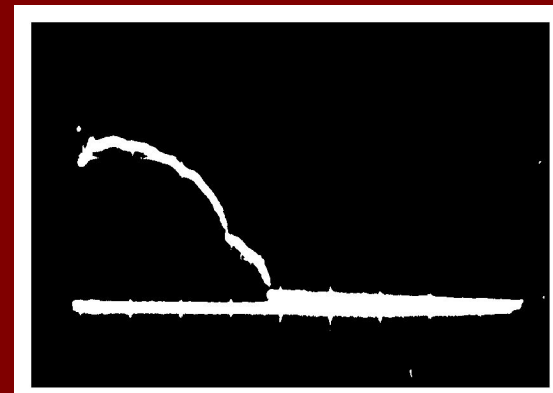
Использование ИС, потенциально уязвимых к тиристорному эффекту, в аппаратуре

При испытаниях КМОП ИС 564ЛА7 на установке "РИУС-5" НИИП было установлено, что зависимость тока потребления ИС I_{cc} от интенсивности ИИ имеет два характерных участка:

- линейная область, в которой форма $I_{cc}(t)$ не зависит от мощности дозы и время потери работоспособности (по заданному уровню I_{cc}) растет пропорционально R_{γ} за счет возрастания запаздывающей составляющей;
- область расширения формы $I_{cc}(t)$, в которой существенно искажается форма тока и резко возрастает время потери работоспособности.



а)



б)

Осциллограммы тока питания ИС 564ЛА7 при максимальной мощности дозы $2,0 \cdot 10^{10}$ (а) и $3,1 \cdot 10^{10}$ (б) рад(Си)/с: $K_x = 2\text{В/дел}$; $K_y = 0,5\text{ мкс/дел}$

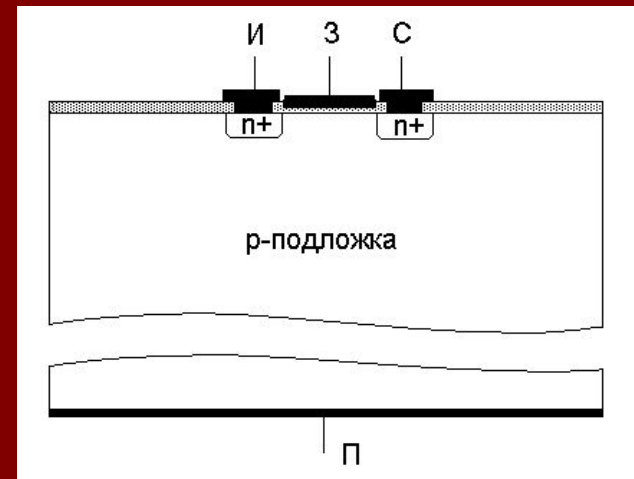
Использование ИС, потенциально уязвимых к тиристорному эффекту, в аппаратуре

Причем этот эффект не сопровождался срабатыванием паразитных тиристорных структур (защелкивание).

Несмотря на отсутствие "защелкивания", подобное расширение формы ионизационного тока цепи питания нежелательно по двум основным причинам:

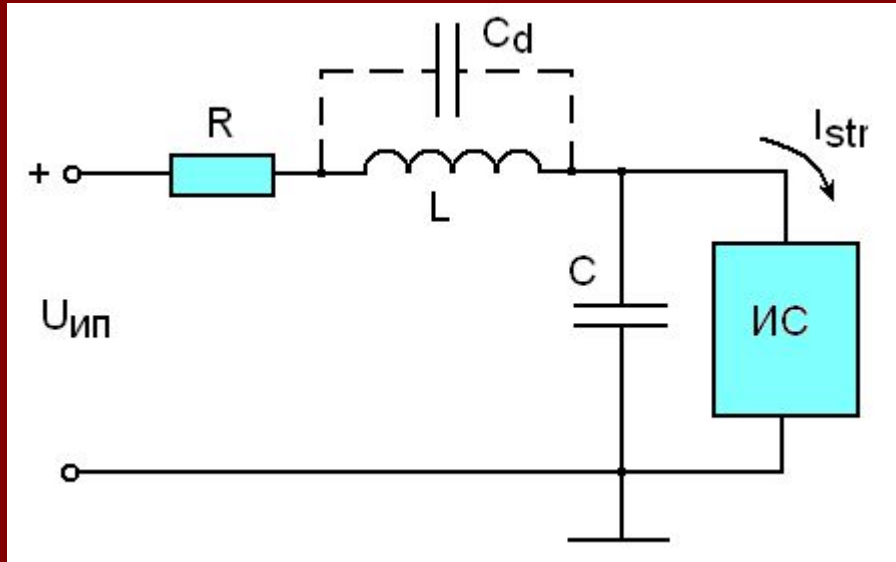
- резкое увеличение времени потери работоспособности ИС по времени восстановления тока потребления;
- существенное возрастание тепловых нагрузок на металлизацию ИС, которые могут привести к ее пережиганию.

Было высказано предположение о том, что подобное затягивание ионизационной реакции может быть связано с отпиранием паразитных биполярных транзисторов не приводящим к защелкиванию.



↑ Поперечное сечение n-MOS транзистора

Использование ИС, потенциально уязвимых к тиристорному эффекту, в аппаратуре



В поисках более эффективных схем выбор пал на RLC-фильтры. Резистор используется для демпфирования цепи и создает лишь минимальное падение напряжения при работе КМОП ИС на высокой частоте. Элемент C_d учитывает паразитную емкость, распределенную по индуктивности.

Величина резистора R выбирается исходя из допустимого падения напряжения в цепи питания при максимальной рабочей частоте ИС.

Использование ИС, потенциально уязвимых к тиристорному эффекту, в аппаратуре

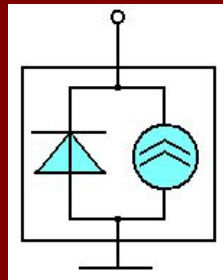
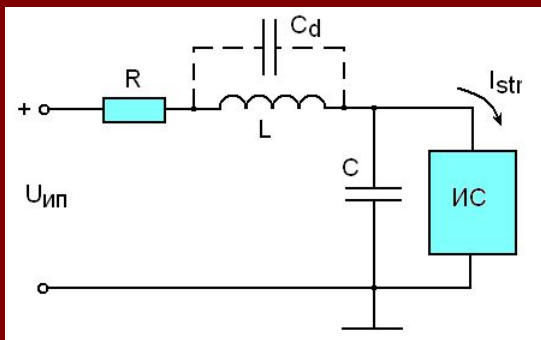
Преобразование Лапласа для передаточной функции RLC-цепи дает

$$D(s) = s^2 + (R/L)s + 1/LC$$

Для предотвращения резонансных явлений необходимо чтобы

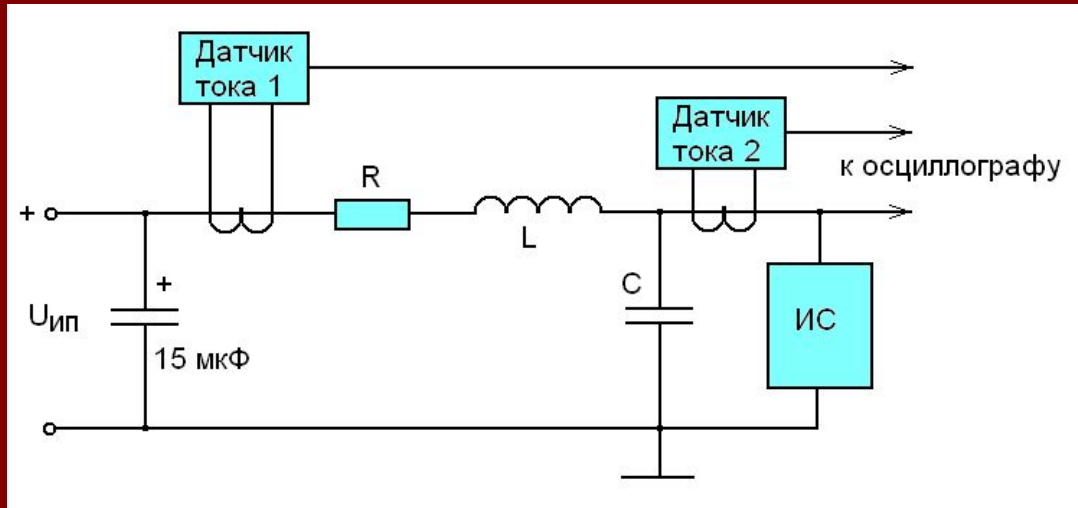
$$L \leq R^2C/4$$

При типичных значениях $R = 20 \text{ Ом}$ и $C = 0,1 \text{ мкФ}$ критичное значение индуктивности составляет 10 мкГн .

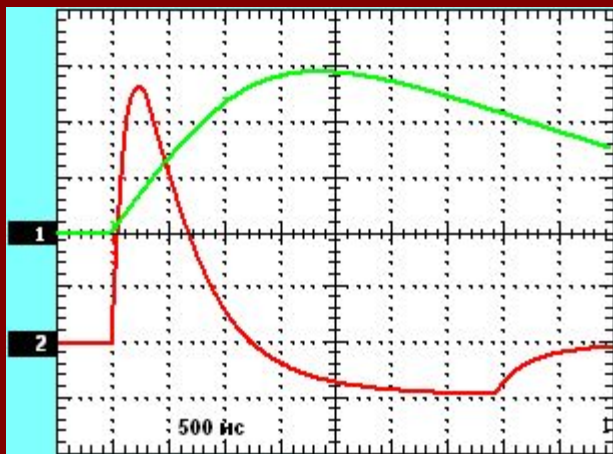


Анализ таких относительно несложных схем можно выполнить с использованием программ схемотехнического моделирования типа SPICE. В качестве схемы замещения КМОП ИС можно использовать диод с параллельно подключенным генератором ионизационного тока.

Использование ИС, потенциально уязвимых к тиристорному эффекту, в аппаратуре

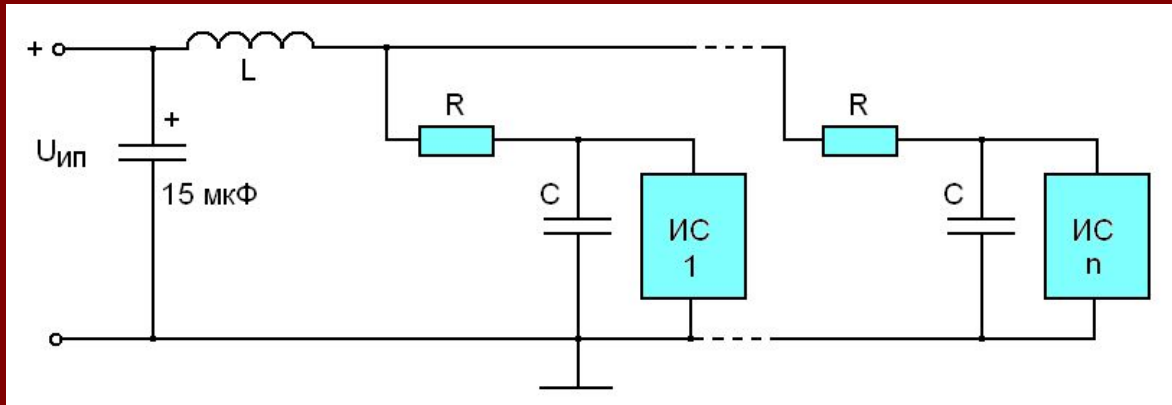


КМОП ИС SCL-4508 (сдвоенный 4-бит фиксатор) в составе приведенной выше схемы была подвергнута воздействию импульса ИИ длительностью 20 нс и максимальной мощностью дозы 10^{10} рад(Si)/с на МУ.



При использовании $L = 22$ мГн наблюдалась просадка напряжения питания на ИС до уровня 2,5 В.

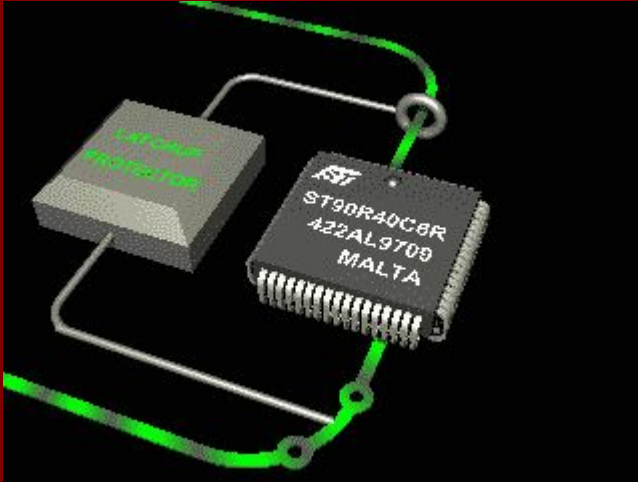
Использование ИС, потенциально уязвимых к тиристорному эффекту, в аппаратуре



Число КМОП ИС, в данном случае ОЗУ НМ-6551 (в данном случае 10), включаемых на одну индуктивность, выбирается так, чтобы обеспечить допустимое падение напряжения на резистивном компоненте фильтра при рабочем токе КМОП ИС.

Требуется очень тщательный подбор характеристик элементов фильтра, учет параметров ионизационной реакции ИС и характеристик тиристора, образующегося при воздействии импульса ИИ.

Использование ИС, потенциально уязвимых к тиристорному эффекту, в аппаратуре



Использование токовых ограничителей.

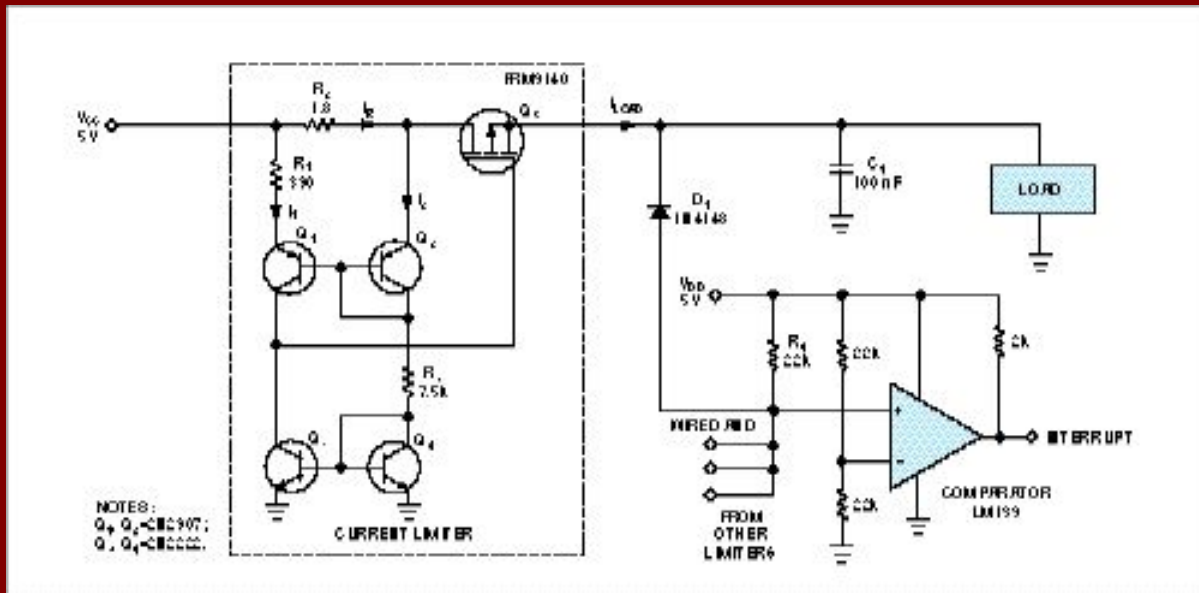
Они делятся на две основных группы:

- ограничители по факту ненормативного нарастания тока цепи питания;
- ограничители с использованием датчиков импульса ионизации.

В первом случае причина возникновения ТЭ не имеет значения и подавляются «защелкивания» любой физической природы.

Во втором случае подавляются только «радиационные защелкивания». Однако при подобном способе подавления ТЭ устраняются последствия всех «защелкиваний» включая и функциональные (по входам и выходам ИС).

Использование ИС, потенциально уязвимых к тиристорному эффекту, в аппаратуре



← Токовый ограничитель для защиты от ТЭ

В качестве датчика ТЭ используется резистор R₂, падение напряжения на котором при нормальной работе мало.

Напряжение б-э Q₁ мало и ток его коллектора недостаточен для обеспечения тока токового зеркала на Q₃. Следовательно V_{се} транзистора Q₃ мало и р-МОП транзистор Q₅ полностью открыт.

Когда ток I_г увеличивается до значения I_гR₂=I₁R₁ б-э напряжения Q₁ и Q₂ становятся равными и I₁≈ I₂. Растет напряжение коллектор-эмиттер Q₃ запирая транзистор Q₅. Уровень ограничения тока составляет примерно I₂R₁/R₂ ≈ 104 мА в данном случае.

Использование ИС, потенциально уязвимых к тиристорному эффекту, в аппаратуре

Преимуществом этого ограничителя является малое падение напряжения в номинальном режиме (менее 190 мВ на резистивном датчике R2). Термическая связь транзисторов Q1-Q2 и Q3-Q4 обеспечивает температурную стабильность уровня ограничения тока. Этот ограничитель можно использовать отдельно с каждой КМОП ИС или с группой микросхем.

Компаратор обеспечивает детектирование ожидаемых условий ТЭ. Он фиксирует момент, когда напряжение на нагрузке опускается ниже заданного порога и может сформировать сигнал прерывания в систему. Эту схему можно использовать для определения факта ТЭ на уровне модуля с последующим перезапуском источника питания.

Испытания на коммерческой ИС HCF4093BE показали, что мгновенное восстановление после ТЭ происходит при уровне тока менее 120 мА. Требуемый для этой ИС поддерживающий уровень тока лежит выше.

Использование ИС, потенциально уязвимых к тиристорному эффекту, в аппаратуре

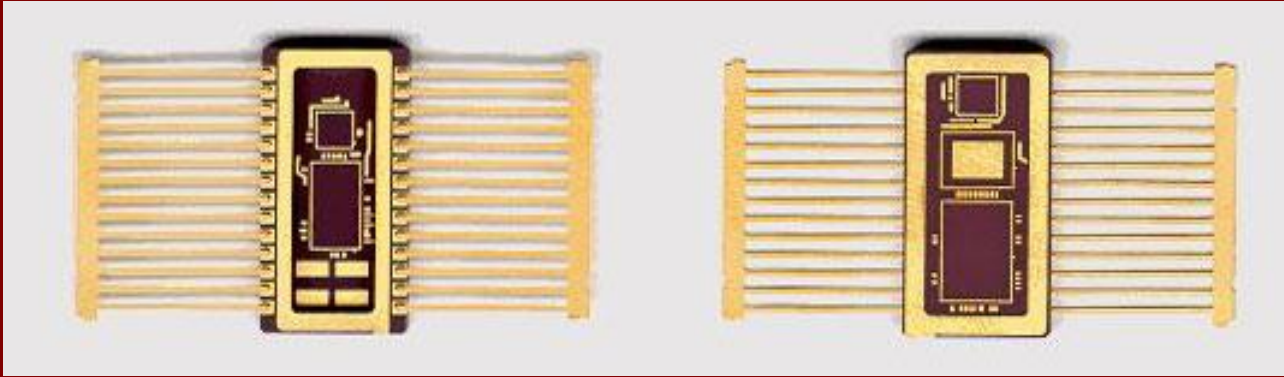
Space Electronics Inc. разработала несколько схем для защиты и восстановления ИС, уязвимых к ТЭ. Хотя они ориентированы на защиту от Single-event-induced latchup, они представляют интерес.

Эти схемы интегрируются в те же корпуса, что и уязвимые ИС с использованием технологии мультикристалльных модулей, обеспечивая законченные изделия малых габаритов.

Эта технология получила название Latchup Protection Technology (LPT™), обеспечивает обнаружение увеличения тока выше установленного уровня при ТЭ, обеспечивает выключение работы ИС при превышении порога в течение предустановленного интервала времени и последующее восстановление рабочего уровня питающего напряжения. LPT технология позволяет перевести ТЭ в восстанавливаемое событие.

По технологии LPT выпускается ряд изделий, в частности, 16-разрядный АЦП ADS7805 и Gatefield GR10009 – программируемая матричная ИС на 9000 вентилях.

Использование ИС, потенциально уязвимых к тиристорному эффекту, в аппаратуре



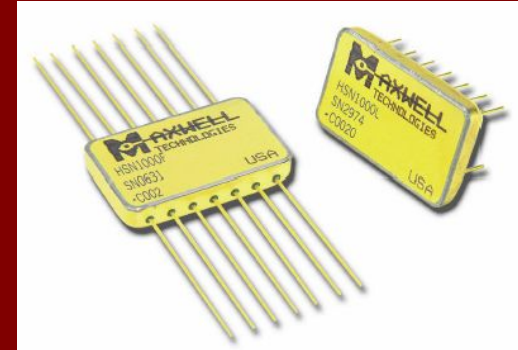
Свободная от ТЭ версия АЦП, 7805LPRP, выполнена по многокристальной технологии и размещена в 28-выводном корпусе FP.

Maxwell принимает заказы на изготовление заказных защищенных от ТЭ ИС по технологии LPT.

The LPT circuit must sense the current into the supply pins, and, when the latchup current threshold is exceeded, remove the supply voltage from the latched device. During the time that the supply voltage is removed from the device, the supply current draw will come exclusively from the LPT circuit. After a set time interval required for the latchup to clear, the LPT circuit reapplies the supply voltage to the device and normal operation is restored.

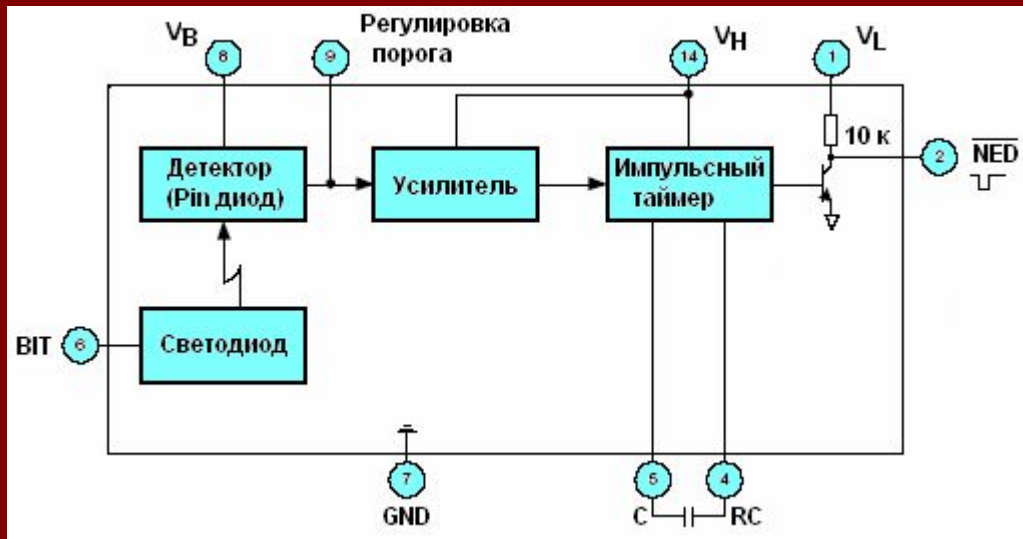
The figure shows the supply current with and without a protection circuit during a single-event latchup. The LPT circuit will have a latchup current threshold, $I_{\text{threshold}}$, an activation delay time, t_D , and recovery time t_{REC} . The LPT circuit is activated when the supply current exceeds the $I_{\text{threshold}}$ value; the supply current is turned off (grounded) within time t_D after $I_{\text{threshold}}$ is reached. The device is off for time period t_{REC} . This can be compared with the unprotected latchup supply current response shown in the figure, where the normal operating current rises to the latchup current in response to a single-event latchup.

Использование ИС, потенциально уязвимых к тиристорному эффекту, в аппаратуре



Maxwell Technologies' HSN-1000 radiation-hardened Hybrid Nuclear Event Detector (NED) senses ionizing radiation pulses generated by a nuclear event, such as the detonation of a nuclear weapon, and rapidly switches its output from the normal high state to a low state with a propagation delay time of less than 20ns. The active low Nuclear Event Detection signal (NED) is used to initiate a wide variety of circumvention functions, thus preventing upset and burnout of electronic components. The NED output is also used to initiate both hardware and software recovery. This high-speed, 14-pin hybrid detector is used in electronic systems as a general-purpose circumvention device to protect memory, stop data processing, and drive power supply switches as well as signal clamps.

Использование ИС, потенциально уязвимых к тиристорному эффекту, в аппаратуре



The HSN-1000 is guaranteed to operate through three critical environments: ionizing dose rate [10^{12} rad(Si)/s], gamma total dose [10^6 rad(Si)], and neutron fluence [5×10^{13} n/cm²]. In addition, the device is designed to function throughout the transient neutron pulse. The hybrid's discrete design ensures a controlled response in these radiation environments as well as immunity to latchup. Each HSN-1000's detection level and functionality are tested in an ionizing dose rate environment. A certificate is provided with each serialized hybrid, reporting the radiation test results and guaranteeing its performance. The device is also lot qualified in the total dose and neutron environments to ensure performance. The detection threshold of the HSN-1000 is adjustable within the range of 2×10^5 rad(Si)/s to 2×10^7 rad(Si)/s. This detection level can be preset by Maxwell or adjusted by the user. Less than a 30% variation in detection threshold can be expected over the entire operating temperature range.

