

## МЕХАНИЗМЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕСТАБИЛЬНЫХ ТИРИСТОРНЫХ ЭФФЕКТОВ В КМОП ИС

© 2019 г. А. И. Чумаков<sup>1</sup>, \*, Д. В. Бобровский<sup>1</sup>, А. А. Печенкин<sup>1</sup>,  
Д. В. Савченков<sup>1</sup>, Г. С. Сорокоумов<sup>1</sup>, И. И. Швецов-Шиловский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, АО “ЭНПО СПЭЛС”  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31

\*E-mail: aichum@spels.ru

Поступила в редакцию 06.02.2019 г.

После доработки 06.02.2019 г.

Принята к публикации 06.02.2019 г.

Представлены результаты исследований нестационарных тиристорных эффектов при воздействии тяжелых заряженных частиц и импульсов ионизирующего излучения, которые самопроизвольно парируются в зависимости от условий эксплуатации. Подобное поведение объясняется эффектами просадки питания внутри КМОП СБИС. Экспериментальные исследования проводились как на ускорителе ионов, так и на лазерных установках.

DOI: 10.1134/S0544126919040033

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Высокая чувствительность БИС и СБИС к воздействию ионизирующего излучения обуславливает необходимость оценки параметров их чувствительности к радиационным эффектам [1–3]. Особенно актуальной является оценка чувствительности КМОП СБИС по тиристорным эффектам (ТЭ), которые могут привести к катастрофическим отказам как самой микросхемы, так и источников питания и всей электронной аппаратуры в целом.

Общепринятая практика оценки стойкости СБИС по ТЭ при радиационном воздействии основана на контроле усредненного тока, протекающего в цепи питания, стандартными измерительными средствами, которые могут обеспечить отслеживание динамики изменения тока в диапазоне единиц и десятков мс [2, 4]. При обнаружении ТЭ этими средствами происходит его парирование путем кратковременного отключения питания СБИС. В рамках такого подхода к регистрации ТЭ достаточно сложно отследить возможные нестационарные ТЭ, длительность которых может составлять единицы мкс. Нестационарным (нестабильным) тиристорным эффектом считается эффект кратковременного включения паразитной  $n-p-n-p$ -структуры с последующим самопроизвольным (без отключения питания микросхемы) отключением. Возможная причина возникновения подобных нестационарных ТЭ может быть связана с эффектами “просадки” питания, т.е. с падением напряжения на внутренних эле-

ментах СБИС и внешних элементах оснастки [5, 6]. При этом следует отметить, что величина “просадки” питания в сильной степени зависит как от характеристик самой паразитной  $n-p-n-p$ -структуры, так и от условий проведения эксперимента, в частности, от напряжения питания, температуры окружающей среды, режима функционирования СБИС и ряда других факторов.

В настоящей работе представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований нестационарных ТЭ в КМОП СБИС.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные исследования проводились на лазерной установке наносекундной длительности, ускорителях протонов и ионов, а для более полной локализации ТЭ на кристалле — на лазерной установке со сфокусированным излучением пикосекундной длительности [7]. На рис. 1, 2 в качестве примера представлены типовые осциллограммы развития стационарного и нестационарного ТЭ при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) [8]. В качестве объектов экспериментальных исследований возникновения ТЭ при воздействии ТЗЧ использовались два типа КМОП СБИС: ОЗУ AS7C1026 и ПЛИС EPF10K30, имеющие высокую чувствительность по ТЭ. Объектом исследований на лазерной установке 10-наносекундной длительности была тестовая 90 нм КМОП СБИС.

При проведении исследований оценивалось влияние напряжения питания и собственного тока

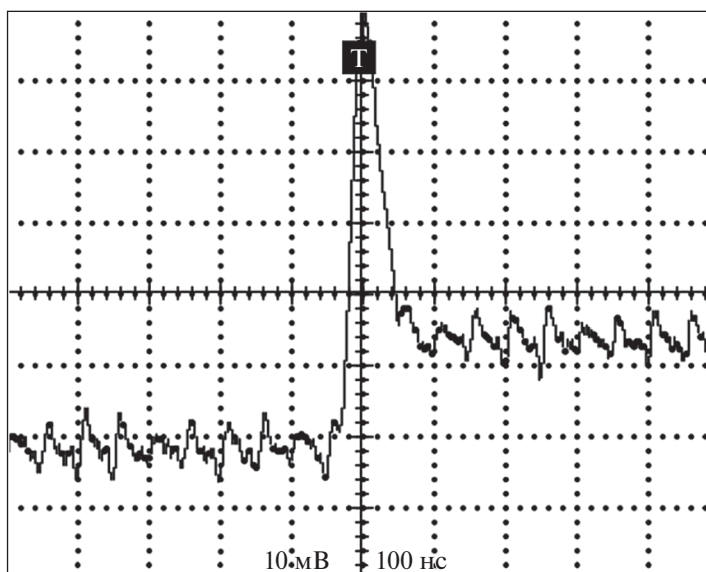


Рис. 1. Типовая осциллограмма тока в цепи питания при возникновении стационарного тиристорного эффекта.

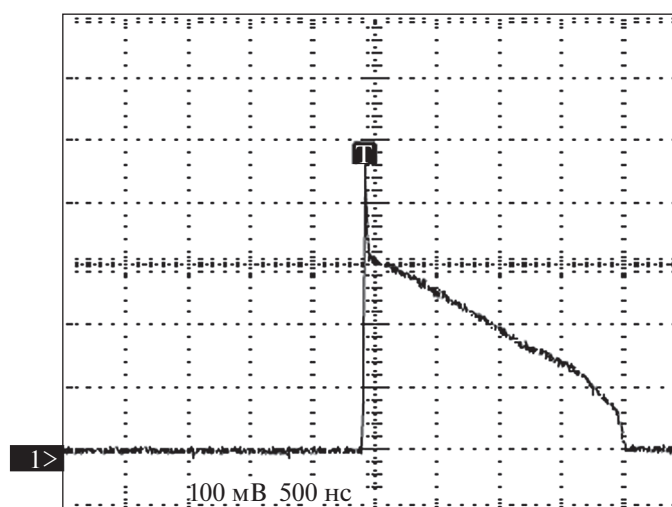


Рис. 2. Типовая осциллограмма тока в цепи питания при возникновении нестационарного ТЭ.

потребления микросхемы на возникновение тиристорного эффекта. Варьирование собственного тока потребления достигалось в ПЛИС ERF10K30 изменением режима функционирования (статический и динамический). В ОЗУ AS7C1026 в качестве варьированного параметра использовалось напряжение питания. Характер изменения тока в цепи питания при однородном лазерном облучении изучался в 90 нм КМОП СБИС.

Наиболее неожиданные экспериментальные результаты были получены для ПЛИС. Оказалось, что чувствительность микросхемы по тиристорному эффекту в динамическом режиме с загруженной конфигурацией значительно ниже, чем в статическом режиме без загрузки конфигурации.

Более подробные исследования ПЛИС на лазерной установке со сфокусированным излучением выявили, что в статическом режиме в ПЛИС включается множество тиристорных структур с различными значениями токов в установившемся состоянии. При проведении исследований в динамическом режиме с загруженной микропрограммой ряд тиристорных структур не включались. Дополнительные исследования показали, что тиристорные структуры в микросхеме разделяются на две группы по критерию напряжения удержания (2.4 и 1.6 В в статическом режиме). Отсутствие ТЭ в динамическом режиме характерно для тиристорных структур с напряжением удержания около 2.4 В, что очень близко к напряже-

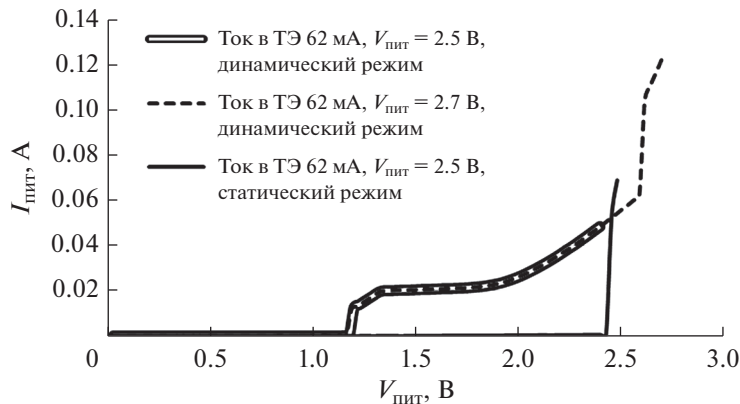


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики нестабильной тиристорной структуры в ПЛИС.

нию питания микросхемы (номинальное напряжение 2.5 В). В качестве примера на рис. 3 приведены вольт-амперные характеристики для нестационарной тиристорной структуры.

Видно, что в динамическом режиме при напряжении питания 2.5 В тиристорный эффект не развивается, однако при повышении напряжения до 2.7 В регистрируется тиристорный эффект с напряжением удержания 2.6 В. В статическом режиме напряжение удержания составляет около 2.4 В, что позволяет зарегистрировать ТЭ в процессе облучения. Такое поведение может быть обусловлено значительной величиной тока потребления ПЛИС в динамическом режиме, который, в данном случае, составляет величину около 60 мА при 1 мА в статическом режиме. Если перевести ПЛИС в статический режим работы, ток потребления в котором составляет около 1 мА, то этого тока оказывается недостаточно для срыва ТЭ.

В микросхеме ОЗУ имеет место как стационарный (рис. 1), так и нестационарные одиночные ТЭ. На рис. 4 в качестве примера представлены осциллограммы для двух типовых случаев возникновения нестационарных ТЭ при облучении 1 ГэВ протонами. Переход от нестационарного ТЭ к стационарному ТЭ происходит при уменьшении напряжения питания. На первом этапе можно наблюдать периодические возникновения и срывы одиночных ТЭ (рис. 4а). При уменьшении питания регистрируется одиночный нестационарный ТЭ, который срывается за единицы мкс (рис. 4б).

Совместное проявление колебательных процессов наряду с тенденцией срыва имело место при импульсном лазерном облучении всего кристалла 90 нм КМОП СБИС (рис. 5). При этом следует обратить внимание, что значения токов в данном примере могут составлять единицы ампер, а длительность нестационарного тиристорного эффекта составлять десятки мкс. Важно от-

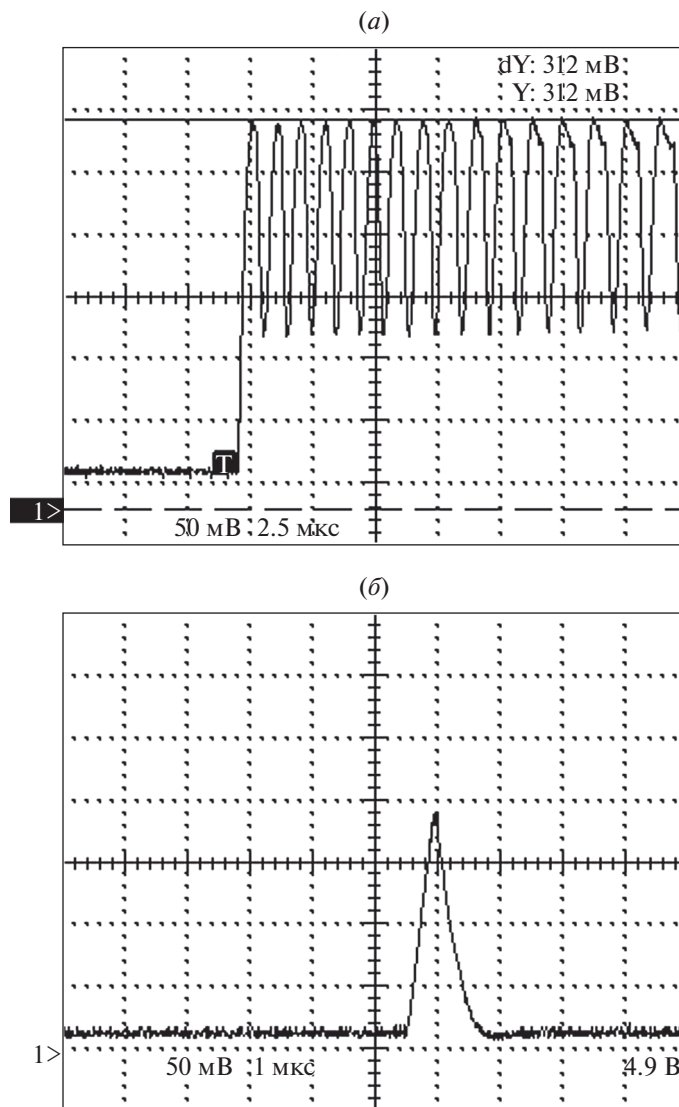
метить, что в течение этого времени СБИС не функционирует. Более того, за счет броска питания возможна и потеря информации. Поэтому одним из возможных критериев проявления нестационарного ТЭ является потеря функционирования СБИС в результате воздействия.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Схемотехническое моделирование тиристорного эффекта осуществляется, как правило, с помощью относительно простой двух-транзисторной эквивалентной схемы [2, 3, 8]. По сравнению с классической, в эту схему добавлен резистор  $R_{из}$  (рис. 6), отражающей влияние омического падения напряжения при протекании ионизационного или динамического тока на элементах внешней оснастки. Дополнительно в эквивалентную схему введена емкость всей СБИС ( $C_{ис}$ ), которая может влиять на динамические характеристики включения/выключения ТЭ, а также резистор  $R_{ис}$ , отражающий эквивалентное значение внутреннего активного сопротивления самой СБИС. Величина емкости  $C_{ис}$  относительно большая и в современных СБИС может составлять 1–10 нФ, а внутренне сопротивление  $R_{ис}$  может составлять доли единицы Ом.

Введение резисторов  $R_{из}$  и  $R_{ис}$  в эквивалентную схему позволяет, в первом приближении, учесть эффект “просадки” питания по аналогии с эффектом возникновения окон “зашелкивания” [9]. Очевидно, что в реальной СБИС резистор  $R_{ис}$  распределен по всей площади кристалла и оказывает разное влияние для различных паразитных  $n-p-n-p$ -структур. Тем не менее, во многих случаях он позволяет учесть влияние эффекта “просадки” питания на чувствительность к ТЭ.

В момент возникновения ТЭ, как правило, возникает значительный скачок импульса тока в цепи питания, который потом уменьшается до своего стационарного значения (рис. 1). Выброс



**Рис. 4.** Осциллограммы токов в цепи питания при возникновении нестационарного ТЭ в ОЗУ для различных питаний: а)  $V_{cc} = 5$  В, б)  $V_{cc} = 4.9$  В.

тока в начальный момент времени обусловлен как влиянием емкости, так и возможным разогревом кристалла ИС при протекании значительного тока, приводящего к росту эквивалентного резистора  $R_{ис}$ . Очевидно, что при определенных условиях это падение напряжения на резисторах  $R_{ис}$  и  $R_{из}$  может привести к тому, что напряжение на самой локальной тиристорной структуре окажется меньше напряжения удержания, и ТЭ сорвется с типовой осциллограммой, приведенной на рис. 2.

По мере уменьшения напряжения питания за счет первоначального большего значения тока в ТЭ, происходит его срыв. Однако он не успевает полностью сорваться, так как ток ТЭ падает, и паразитная структура может вновь включаться. Процесс повторяется. Обращает на себя внима-

ние, что в КМОП СБИС ОЗУ, чем дальше находится очередной срыв от своего начального значения, тем больше оказывается длительность нахождения в состоянии неустойчивого ТЭ. На наш взгляд, такое поведение обусловлено внутренним разогревом кристалла СБИС, за счет чего несколько увеличивается его чувствительность к ТЭ.

Дальнейшее снижение напряжения питания в КМОП СБИС ОЗУ приводит к однократному неустойчивому ТЭ (рис. 4б).

Представленные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что контроль ТЭ в рамках классической процедуры измерения стационарного тока потребления оказывается не всегда корректным. Другими словами, возможна ситуация, когда может быть пропущен нестационарный ТЭ. Казалось, что в этом случае схема са-

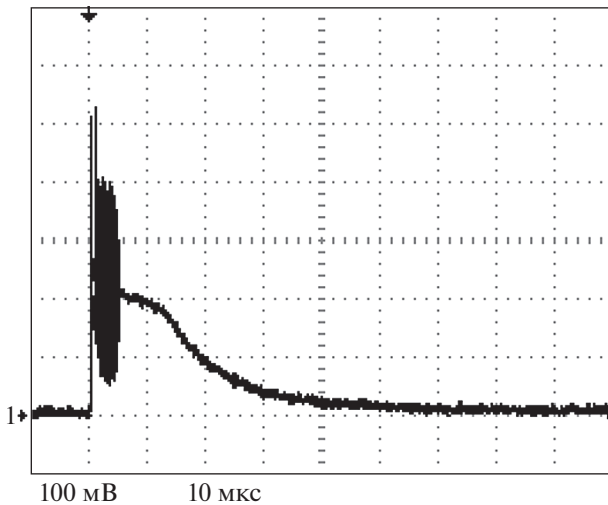


Рис. 5. Нестационарной ТЭ в 90 нм КМОП СБИС при облучении 10 нс импульсом лазерного облучения всего кристалла.

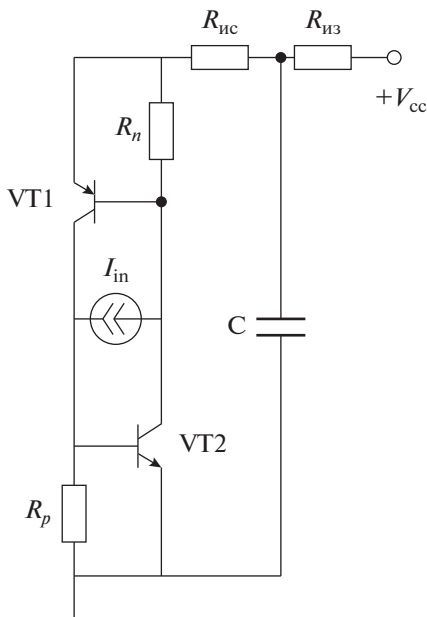


Рис. 6. Упрощенная эквивалентная схема для моделирования ТЭ.

ма себя парировала от ТЭ. Но может оказаться, что при ее нахождении в состоянии ТЭ возможна потеря информации в ряде регистров и ячейках памяти, причем она может быть массовой. А это означает, что никакая схема коррекции информации в памяти, предусмотренная разработчиком для случая возникновения однократных сбоев, не сможет восстановить потерянную информацию. Такой эффект экспериментально наблюдался в ПЛИС при ее испытаниях в динамическом режиме. Вместо регистрации одиночного ТЭ при облучении ионами имела место потеря функционирования ПЛИС из-за изменения информации в

конфигурационной памяти. Однако разделить эти эффекты от обычных одиночных сбоев в ячейках конфигурационной памяти затруднительно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты расчетно-экспериментального моделирования, которые свидетельствуют о возможности возникновения в КМОП СБИС нестабильных тиристорных эффектов при воздействии ТЗЧ и импульсов ионизирующего излучения. Основная причина возникновения нестационарных ТЭ связана с динамическим эффектом “просадки” питания, из-за чего возможен как полный, так и частичный срыв ТЭ.

Классические методики регистрации ТЭ по установившемуся току в цепи питания в ряде случаев не гарантируют его регистрации. Вместе с тем, возникновение нестабильного ТЭ способно привести к большим изменениям хранящейся информации в регистрах, триггерах и ячейках памяти.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС. 2004. М.: Радио и Связь, 320 с.
2. Радиационная стойкость изделий ЭКБ: Научное издание // Под ред. Чумакова А.И. 2015. М.: НИЯУ МИФИ, 512 с.
3. Ionizing radiation affects in MOS devices and circuits / Ed. by T.P. Ma, P.V. Dressendorfer. 1989. N.Y.: John Wiley and Sons. 588 p.
4. Чумаков А.И., Печенкин А.А., Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Баранов С.В., Васильев А.Л., Яненко А.В. Методика оценки параметров чувствительности ИС к тиристорному эффекту при воздействии отдельных ядерных частиц // Микроэлектроника. 2008. Т. 37. № 1. С. 45–51.
5. Massengil T.L., Diehl-Nagle S.E. Transient Radiation Upset Simulation of CMOS Memory Circuits. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1984. V. 31. № 6. P. 1337–1343.
6. Чумаков А.И. Моделирование эффекта “просадки” питания в ИС при воздействии импульса ионизирующего излучения // Микроэлектроника. 2006. Т. 35. № 3. С. 184–190.
7. Печенкин А.А., Савченков Д.В., Маврицкий О.Б., Чумаков А.И., Бобровский Д.В. Оценка параметров чувствительности КМОП БИС по одиночным тиристорным эффектам при лазерном воздействии со стороны подложки // Микроэлектроника. 2015. Т. 44. № 1. С. 41–48.
8. Чумаков А.И., Бобровский Д.В., Печенкин А.А., Савченков Д.В., Сорокоумов Г.С. Нестабильные одиночные тиристорные эффекты в КМОП ИС // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем: Сб. науч. трудов под общ. ред. Стемпковского А.Л. 2018. М.: ИППМ РАН. Вып. 4. С. 177–181.
9. Nikiforov A.Y., Bykov V.V., Chumakov A.I., Figurov V.S., Skorobogatov P.K., Telets V.A. Latch-up Windows Tests in High Temperature Range // Proc. RADECS. 1997. P. 366–370.