

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА СТОЙКОСТЬ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.328

ДОЗОВАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОСХЕМ ПАМЯТИ*

© 2012 г. А. Б. Боруздина¹, А. В. Уланова^{1, 2}, Н. Г. Григорьев², А. Ю. Никифоров^{1, 2}

¹ ОАО “ЭНПО Специализированные электронные системы”

² Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

E-mail: abbor@spels.ru; avulan@spels.ru; mngng@mail.ru; aynik@spels.ru

Поступила в редакцию 16.12.2011 г.

Представлены методика и результаты исследований КМОП-микросхем памяти при дозовом воздействии ионизирующего излучения, проанализированы возможные механизмы деградации и подходы к повышению стойкости микросхем по критерию времени выборки. Экспериментально обнаружен и исследован эффект неравномерности деградации времени выборки по адресам.

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиационная деградация временных параметров микросхем может приводить к сбоям и отказам аппаратуры в процессе ее эксплуатации при дозовых воздействиях ионизирующих излучений. Для КМОП-микросхем эта деградация связана (1) с изменением пороговых напряжений n -канальных транзисторов, обусловленных накоплением заряда в подзатворном диэлектрике (этот эффект наиболее сильно проявляется в изделиях, изготовленных по проектным нормам более 0.25 мкм), и (2) с уменьшением подвижности носителей заряда (слабо зависит от проектных норм и от типа транзисторов, проявляется при уровне дозового воздействия более 5×10^5 ед.). Основной дозовый эффект в КМОП-микросхемах — рост тока утечки по цепи питания — оказывает слабое влияние на деградацию временных параметров [1, 2].

Методы функционального контроля запоминающих устройств в процессе проведения радиационного эксперимента с оценкой деградации токов потребления широко представлены в литературе [3–6], тогда как результаты исследований динамических параметров как запоминающих устройств, так и других функциональных классов микросхем, отражены недостаточно полно. Таким образом, задача контроля и оценки радиационной стойкости микросхем по временным параметрам является актуальной [7].

Решение данной задачи требует применения в ходе радиационного эксперимента аппаратно-программных средств измерения временных ин-

тервалов в диапазоне от единиц наносекунд до миллисекунд с точностью не менее 10%.

Использование осциллографа с визуализацией временных диаграмм не обеспечивает достаточного числа (десятков) информационных каналов с сохранением полученных результатов для последующих анализа и обработки.

В работе предложена методика определения и контроля временных параметров микросхем памяти в ходе радиационного эксперимента, проведен анализ характера деградации времени выборки микросхем памяти, сделаны предположения по выявлению наименее стойких блоков в кристалле на основе анализа полученных данных.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика определения и контроля временных параметров микросхем памяти основана на измерении интервала времени от момента изменения входного набора данных до момента появления установившихся значений сигналов на выходах. В условиях радиационного эксперимента наиболее информативным является относительное изменение параметра, а не его абсолютное значение. На практике, необходимо обеспечить процедуру регистрации выходного состояния микросхемы с заданной задержкой относительно момента изменения данных на входе и его сравнения с эталоном.

Данная методика была реализована на базе разработанного блока контроля времени выборки запоминающих устройств. Разработанный блок позволяет проводить контроль данного параметра по всему накопителю: по всем адресам и всем разрядам данных одновременно. Блок реализует следующий алгоритм контроля: после момента установки сигнала выборки (Chip Select) прово-

* Работа выполнена в ОАО “ЭНПО СПЭЛС” и Институте экстремальной прикладной электроники (ИЭПЭ) НИЯУ МИФИ на основании Госконтракта с Минобрнауки России от 22.10.2010 г. № 13.G36.31.007.

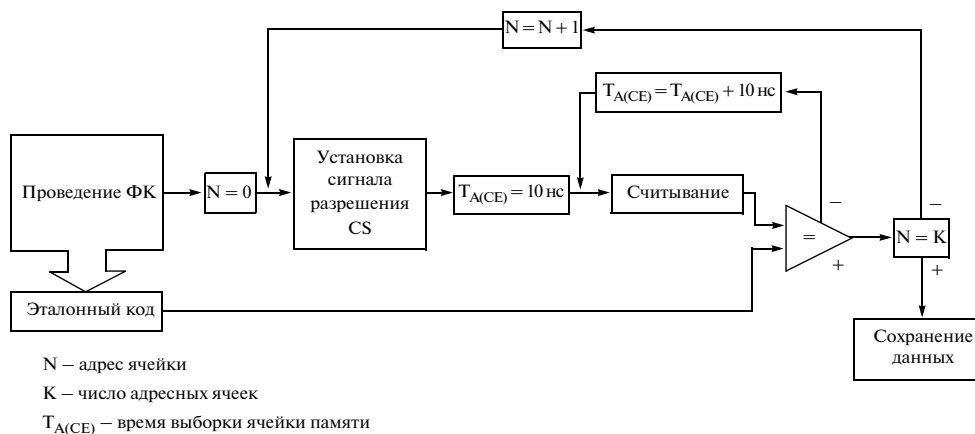


Рис. 1. Алгоритм работы блока контроля времени выборки.

дится циклическое считывание информации с вывода данных и сравнение ее с эталонной начиная от 10 нс (время считывания информации, относительно установки сигнала CS) и постепенно увеличивая интервал с дискретом 10 нс. Цикл повторяется до момента совпадения считанной информации с эталонной. Контроль проводится при максимальной частоте 100 МГц, что обеспечивает дискрет измерений 10 нс. Измеренный временной интервал равен $N \times 10$ нс, где N – число циклов считывания. Описанный алгоритм представлен в виде блок-схемы на рис. 1.

В качестве возможных платформ для реализации блока измерения времени выборки были рассмотрены: тестер HP82000 (ф. Agilent Technologies), тестер FORMULA HF2 (ф. “ФОРМ”) [8] и модульная платформа PXI-1033 (ф. National Instruments) [9]. Итоговая реализация аппаратной части блока выполнена на тестирующем оборудовании ф. National Instruments, которое среди других тестеров обладает рядом преимуществ: (1) малые габариты измерительного модуля позволяют использовать его в ходе радиационного эксперимента на моделирующих установках; (2) имеется возможность установки модуля на расстоянии 2 м от исследуемого объекта без потери точности измерений; (3) модульная организация позволяет конфигурировать набор модулей для построения конкретных измерительных блоков; (4) относительно низкая стоимость модулей; (5) некоторые submodule входят в Государственный реестр средств измерений.

Основу аппаратной части составляет измерительная модульная платформа PXI-1033 в составе FPGA модуля PXI-7953R и адаптера NI 6581. Управление осуществляется посредством виртуального прибора, разработанного с использованием программного обеспечения LabView. Возможности PXI-7953R позволяют проводить измерение временных параметров и функциональный

контроль устройств с суммарным числом линий ввода/вывода до 56 при максимальной частоте 100 МГц с логическими уровнями сигналов от 1.5 до 5.5 В. Объем внутренней памяти модуля PXI-7953R составляет 128 Мбайт, что позволяет уменьшить суммарное время тестирования всего накопителя.

3. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Апробация разработанного блока проводилась в ходе радиационного эксперимента на ускорителе электронов У-31/33 и рентгеновском имитаторе “РЕИМ”. Объектами исследований являлись микросхемы масочного ПЗУ емкостью 16 кбит с организацией 2Кх8, выполненного по КМОП-технологии “кремний-на-сапфире” с проектными нормами 3 мкм и микросхемы перепрограммируемого ПЗУ (ППЗУ) информационной емкостью 64 кбит с организацией 8Кх8 бит с последовательным вводом/выводом информации по интерфейсу I²C, выполненные по КМОП-технологии с проектными нормами 0.8 мкм.

Целью экспериментальных исследований было определение характера деградации времени выборки микросхем при дозовых воздействиях ионизирующего излучения. При проведении эксперимента перед контролем времени выборки проводился функциональный контроль (считывание информации из накопителя и сравнение с эталонными данными). Нормы на параметр время выборки (не более 500 нс для ППЗУ 64 кбит и не более 200 нс для ПЗУ 16 кбит) позволяют проводить измерения с выбранным дискретом (10 нс).

Уменьшение размера шага 10 нс может быть обеспечено применением более высокочастотных модулей фирмы National Instruments, например, модульной платформы NI PXI-7851R с ча-

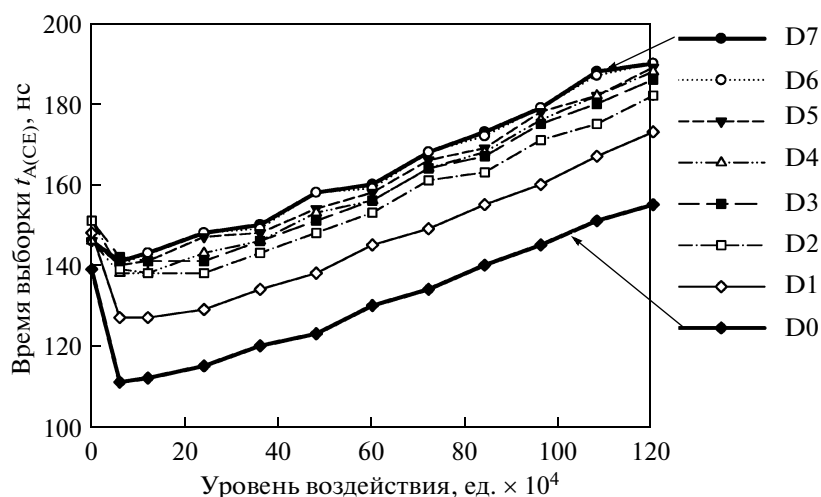


Рис. 2. Зависимость времени выборки для разрядов данных ПЗУ 16 кбит от уровня дозового воздействия.

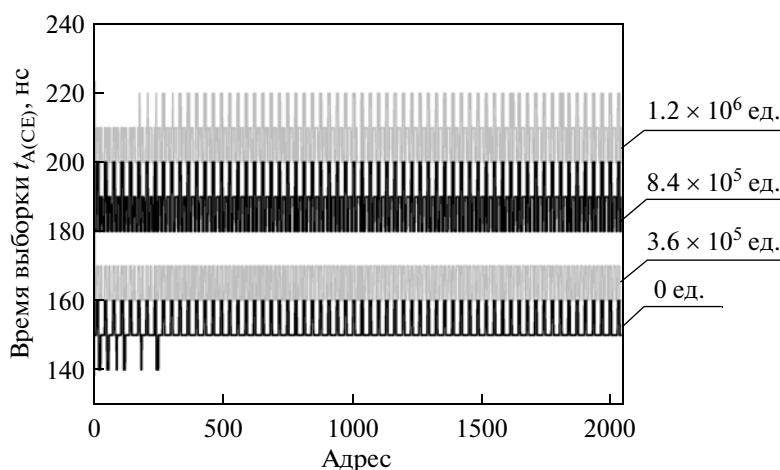


Рис. 3. Распределение времени выборки ПЗУ 16 кбит по адресам при разных уровнях дозового воздействия.

стотой до 200 МГц, что снизит дискрет измерения до 5 нс.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе исследований ПЗУ 16 кбит облучались в режиме хранения при напряжении питания 7.5 В. Зависимость времени выборки разрешения для разрядов данных ПЗУ от уровня дозового воздействия приведена на рис. 2. Диаграммы распределения времени выборки разрешения по адресам для разных уровней воздействия приведены на рис. 3.

Зависимости, представленные на рис. 2, свидетельствуют о неравномерности вклада разрядов данных в формирование значения времени выборки разрешения после воздействия. В начальный момент времени расхождения по значению времени выборки для разных разрядов были

практически одинаковы (укладывались в 10 нс), дальнейшее облучение приводит к неравномерной деградации времени выборки по разрядам (различие достигает более 20 нс).

Максимально достигнутый уровень дозового воздействия в ходе исследований образцов ПЗУ 16 кбит составил 1.2×10^6 ед. Отказа по параметру время выборки разрешения (200 нс) не наблюдалось вплоть до уровня воздействия 8.4×10^5 ед., уровень отказа составил 1.0×10^6 ед. (см. рис. 3). Отказов по функционированию и току потребления (норма 900 мкА) не наблюдалось до уровня воздействия 1.2×10^6 ед.

В процессе исследований образцы ПЗУ 64 кбит облучались в двух режимах: хранение и динамическое считывание при напряжении питания 5.5 В. Максимально достигнутый уровень дозового воздействия в ходе исследований ПЗУ

64 кбит составил 1.6×10^4 ед. — вплоть до этого уровня отказа по параметру время выборки разрешения (норма 500 нс) не наблюдалось. Дальнейшее облучение не проводилось вследствие отказа микросхем по току потребления (норма 5 мкА) при уровне 7.8×10^3 ед. и по функционированию при уровне 9.0×10^3 ед.

Зависимость времени выборки ППЗУ от уровня дозового воздействия приведена на рис. 4. Исследованные образцы продемонстрировали характерную немонотонную дозовую зависимость времени выборки — сначала некоторое снижение, а затем интенсивный рост, что может быть связано с немонотонным характером дозовой деградации характеристик *n*-канальных транзисторов [1, 2] в ячейках памяти ППЗУ. Радиационное поведение времени выборки чувствительно к электрическому режиму при облучении. Для образцов, облучавшихся в режиме хранения, кривая деградации времени выборки носит более крутой характер и функциональный отказ наступает раньше, чем для образцов, которые во время облучения находились в режиме динамического считывания [1, 2].

Диаграммы типичного распределения времени выборки по адресам для разных уровней воздействия приведены на рис. 5.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Конструктивно-топологической особенностью ПЗУ 16 кбит является размещение дешифратора строк вблизи периферии кристалла (см. рис. 6). При этом блоки ячеек старших разрядов накопителя оказываются наиболее удаленными от дешифратора строк, что приводит к существенным задержкам обращения к этим ячейкам из-за значительного поверхностного сопротивления поликремниевых адресных шин и, следовательно, время выборки старших разрядов больше (см. рис. 2). Схемотехнической особенностью ПЗУ 16 кбит является использование синхронных усилителей считывания со сквозным прохождением считываемого сигнала на выходы усилителя (см. рис. 7). Это приводит к значительному влиянию входного сигнала на быстродействие усилителя считывания в отличие от синхронных усилителей считывания с полной развязкой входов от выходов. Это влияние проявляется как в зависимости на рис. 2, когда выбираемые первыми ячейки младших разрядов создают наибольший считываемый сигнал на входе усилителя считывания и соответственно обеспечивают меньшее время выборки, так и в зависимости времени выборки от адреса (см. рис. 3). Поскольку *n*-канальные транзисторы Т1-Т2 в усилителях считывания и в инверторах, непосредственно подключенных к выходам усилителя считывания, имеют в не-

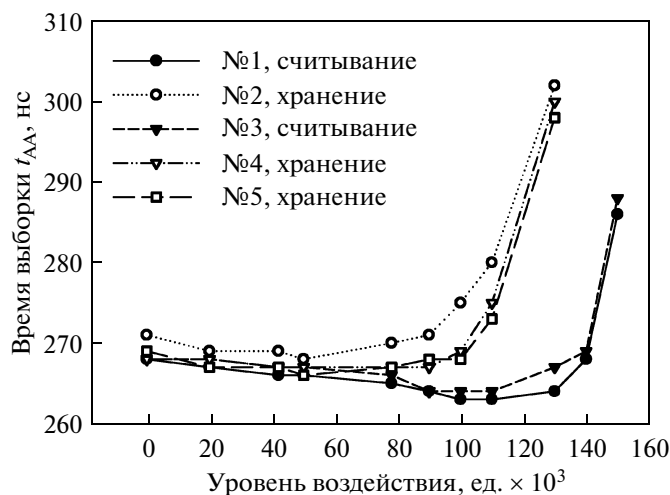


Рис. 4. Зависимость времени выборки ППЗУ 64 кбит от уровня дозового воздействия в различных режимах работы при облучении (хранение и динамическое считывание).

сколько раз большую ширину канала по сравнению с транзисторами *p*-типа, то время переключения усилителя считывания оказывается очень чувствительным к изменению порогового напряжения транзисторов *n*-типа. Это проявляется в резком уменьшении времени выборки на начальном участке дозовой зависимости на рис. 2 несмотря на увеличение длительности переходных процессов на разрядных шинах накопителя из-за увеличения порогового напряжения *p*-канальных транзисторов ячеек памяти. При значительных дозах облучения пороговое напряжение *n*-канальных транзисторов начинает увеличиваться и зависимость на рис. 2 становится монотонной.

Согласно анализу физической адресации блоков ячеек микросхемы ППЗУ 64 кбит дешифратор строк разделяет адресное пространство накопителя на 16 блоков по 512 адресов в каждом. Из диаграмм, представленных на рис. 5, видно, что для данной микросхемы в первых 512 адресах время выборки меньше, чем для всего накопителя. Предположительно это может быть связано с неравномерным расположением выделенных 16 блоков относительно усилителя считывания.

В ППЗУ 64 кбит используется синхронный усилитель считывания, работа которого зависит от схемотехники цепей синхронизации. Одним из путей повышения стойкости микросхем является применение методов усовершенствования цепей синхронизации, наиболее эффективным из которых является метод “фиктивных” адресных шин, основанный на использовании конструктивно-топологического аналога (эмулятора) адресных шин (см. рис. 8). Повышение уровня стойкости достигается за счет исключения структур с большим числом параллельно соединенных транзи-

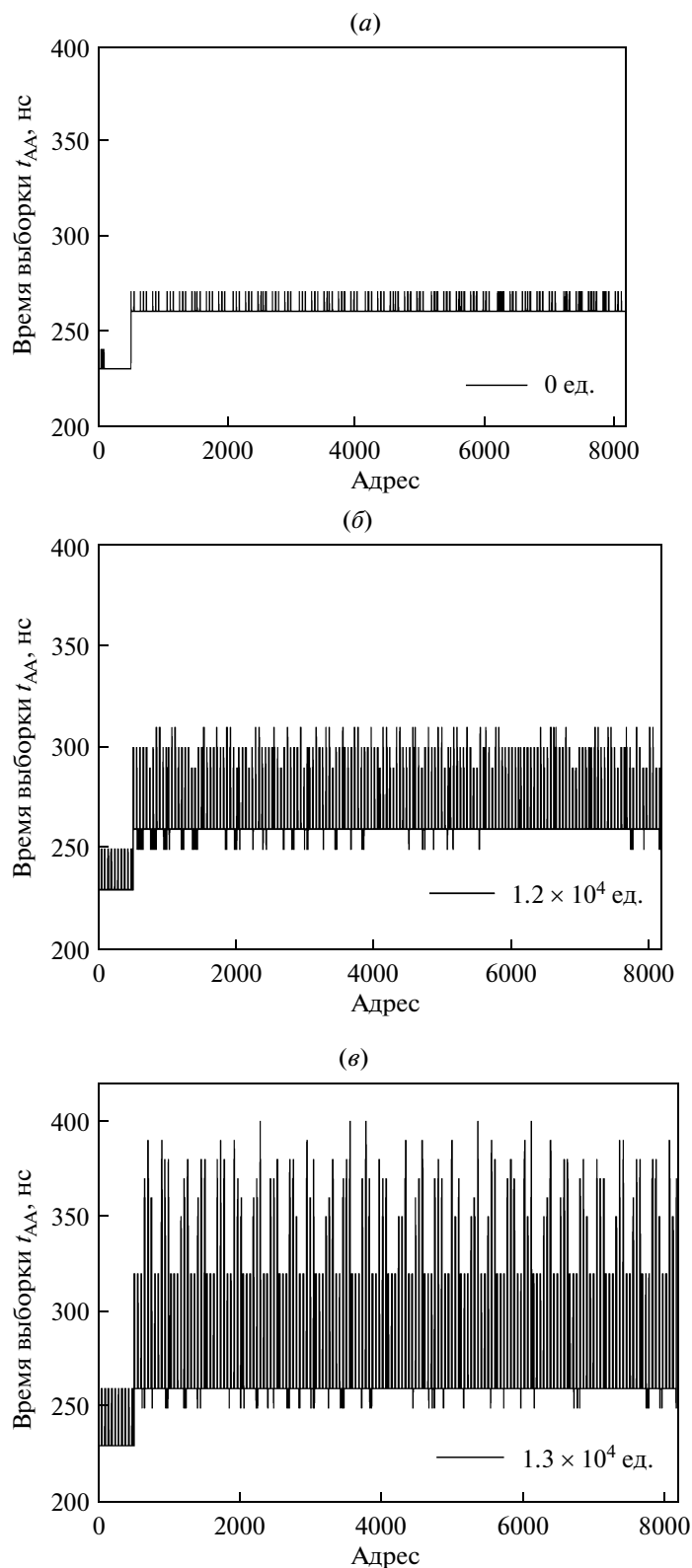


Рис. 5. Распределение времени выборки ППЗУ 64 кбит по адресам для образца 2 при разных уровнях дозового воздействия. (а) – до воздействия, (б) – уровень дозы 1.2×10^4 ед., (в) – уровень дозы 1.3×10^4 ед.

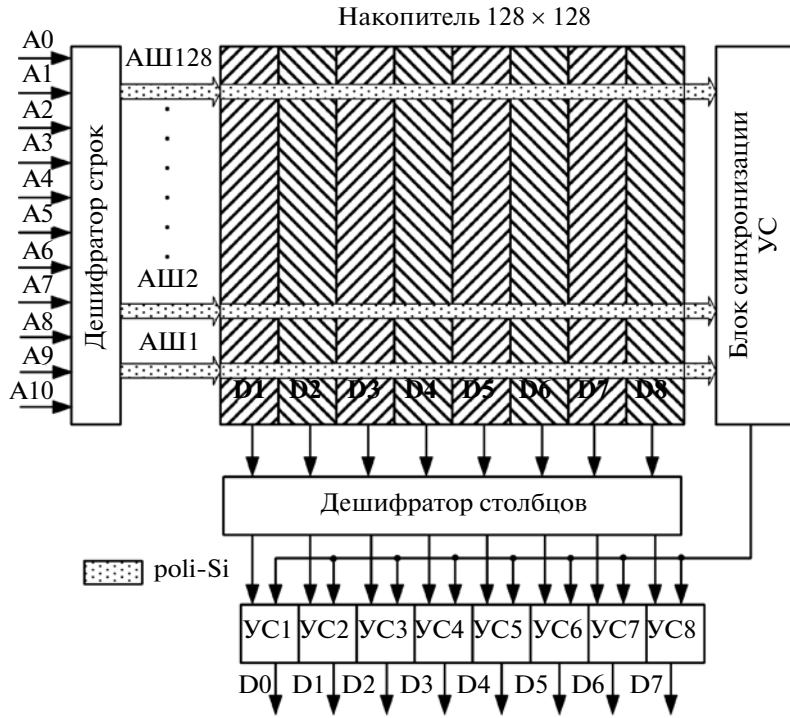


Рис. 6. Схема цепей физической адресации ПЗУ 16 кбит.

сторов. Другой способ повышения стойкости — использование асинхронного усилителя считывания. Типовая схема асинхронного усилителя считывания, построенная на принципе токового зеркала, показана на рис. 9. Несмотря на значительный дрейбзг в процессе переключения и значительное потребление мощности (не только из-за дрейбзга переключения, но и из-за сквозного тока), асинхронные усилители считывания обладают одним неоспоримым преимуществом по сравнению с синхронными — они не требуют сложной синхронизации и значительно менее чувствительны к разбросу и уходу параметров транзисторов после облучения.

Предложенные рекомендации могут способствовать повышению стойкости микросхем в целом, в том числе по функционированию.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены методика и результаты исследований КМОП-микросхем памяти при дозовом воздействии ионизирующего излучения, проанализированы механизмы деградации и подходы к повышению стойкости микросхем по критерию времени выборки.

Экспериментально обнаружен и исследован эффект неравномерности деградации времени выборки по адресам и разрядам, что позволяет выявить наиболее критичные области в структуре

кристаллов. Тем самым подтверждена необходимость контроля временных параметров по всем адресам и разрядам данных микросхем памяти.

В представленной работе основной акцент сделан на исследования микросхем памяти, однако, все предложенные методы и подходы с небольшой доработкой применимы для исследования параметров практически любых цифровых и аналоговых микросхем.

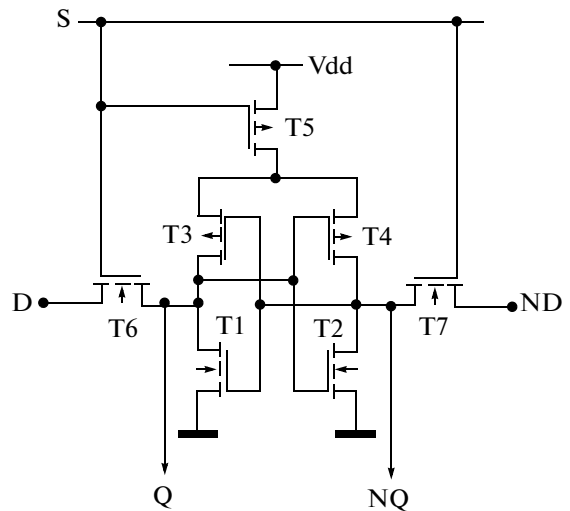


Рис. 7. Синхронный усилитель считывания со сквозной передачей считываемого сигнала на выход.

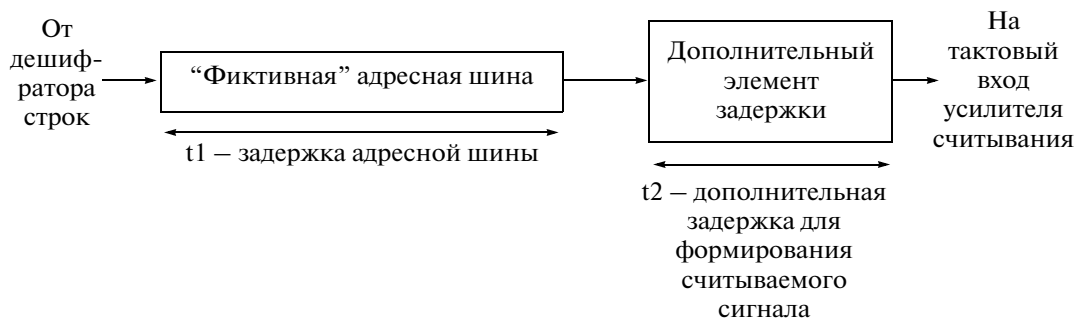


Рис. 8. Цепь синхронизации на основе “фиктивной” адресной шины.

Авторы выражают признательность коллегам из ФГУП ФНПЦ “НИИИС им. Ю.Е. Седакова” (Н. Новгород) и ОАО “Интеграл” (Минск, Беларусь) за предоставленные образцы и полезные обсуждения.

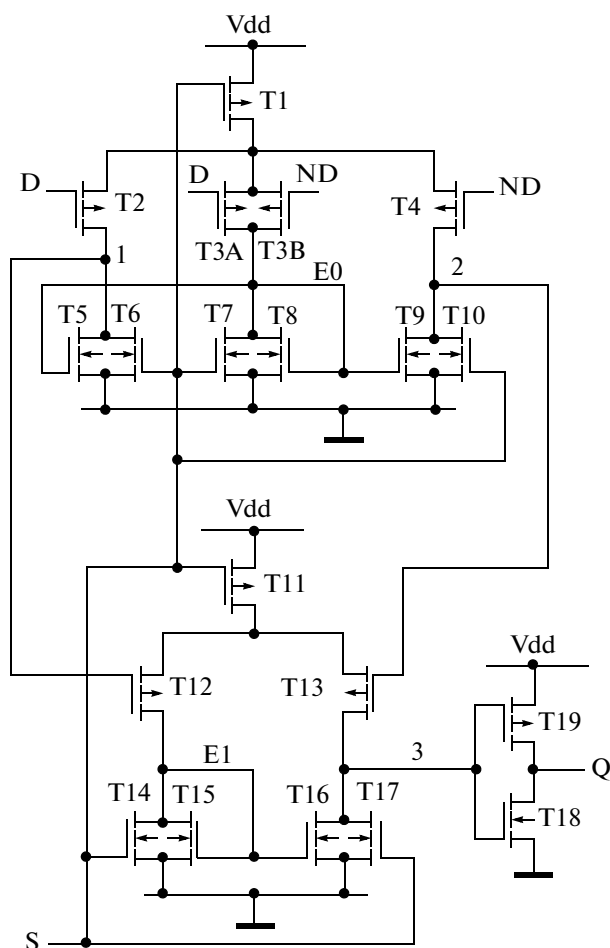


Рис. 9. Типовая схема асинхронного усилителя считывания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты в КМОП ИС. М.: Радио и связь, 1994. 164 с.
2. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. 320 с.
3. Киргизова А.В., Никифоров А.Ю., Григорьев Н.Г. и др. Доминирующие механизмы информационных сбоев КМОП КНИ БИС оперативных запоминающих устройств при воздействии импульсного ионизирующего излучения // Микроэлектроника. 2006. Т. 35. № 3. С. 191–208.
4. Яшанин И.Б., Скобелев А.В., Маслов В.В., Давыдов Г.Г. Влияние технологии изготовления на дозовую деградацию тока потребления КМОП/КНД БИС // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. М.: ФГУП “НИИП”, 2009. Вып. 4. С. 33–35.
5. Никифоров А.Ю., Полевич С.А., Чумаков А.И., Шереметев А.И. Функциональный контроль ИС методом сравнения с эталоном при имитационных испытаниях // Радиационные процессы в электронике: Тез. докл. VI межотрасл. сем. М., 1994. С. 159–160.
6. Никифоров А.Ю., Чумаков А.И., Яненко А.В. и др. // Методы испытаний на стойкость к воздействию радиационных факторов космического пространства и импульсную электрическую прочность. В сб.: Модель космоса: Научно-информ. изд.: В 2 т. / Под ред. Панасюка М.И., Новикова Л.С.. Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ, 2007. С. 815–833.
7. Яненко А.В., Киргизова А.В., Петров А.Г., Демидов А.А. и др. Исследование радиационного поведения времени выборки КМОП БИС ПЗУ. Научная сессия МИФИ–2005. Сб. научн. трудов. Т. 1. М.: МИФИ, 2005. С. 233–234.
8. <http://form.ru/mf2kandfhf/formula-hf2/78-2010-02-25-11-51-03.html>
9. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/202984>