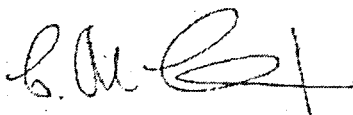


На правах рукописи

Левченко Виктор Николаевич



**ВЛИЯНИЕ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ПАРАМЕТРЫ БИПОЛЯРНЫХ И ПОЛЕВЫХ СТРУКТУР**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2008

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Воронежский государственный университет».

Научный руководитель – доктор физико – математических наук,
профессор ТЕРЕХОВ Владимир Андреевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Акулипин Стапислав Алексеевич

доктор технических наук,
профессор Сарычев Валентин Александрович

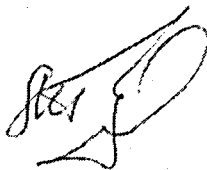
Ведущая организация – Московский Энергетический Институт
(Технический университет) г. Москва.

Защита состоится 23 сентября 2008 г. в 14⁰⁰ в конференц-зале на заседании
диссертационного совета Д 212.037.06 Воронежского государственного
технического университета по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский
просп., 14.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского
государственного технического университета.

Автореферат разослан «22» августа 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



ГОРЛОВ М.И.

2008А
17035

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

РОС. НАЦИОНАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА
С.-Петербург
ОЗ 2008 акт 682

♦ **Актуальность темы.** Риски, связанные с эффектами нарушения работоспособности электронных схем, простираются от простейших эффектов пробоя в бытовых устройствах до опасных отказов и аварий электрошного оборудования. Они проявляются в виде сбоев различного характера в работе электронного оборудования в системах контроля движения, системах связи и системах обороны и могут привести к фатальным последствиям для указанных областей и всей экономики в целом.

В настоящее время подавляющая часть электронных систем, применяемых как в военных и разведывательных целях, так и в устройствах гражданского назначения – системы связи и коммуникации, средства навигации, и т.п. – работает в условиях, в которых она подвержена в той или иной мере воздействию естественного или искусственного излучения. Эти системы при облучении должны в течение определенного заданного промежутка времени сохранять неизменными свои параметры и поддерживать работоспособность.

Однако, при облучении материалов и приборов, составляющих основу элементной базы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), в них могут протекать различные процессы, приводящие к временному или постоянному изменению их оптических, электрофизических свойств, включая такие, как генерация электронно-дырочных пар при облучении импульсами микроволнового излучения или фотонов, комптоновское рассеяние, фотоэлектрические процессы, образование Оже-электронов и т.д. Под действием нейтронов могут происходить ядерные превращения, а нейтронно-стимулируемые реакции могут приводить к появлению вторичных фотонов и заряженных частиц. Эти процессы приводят к изменению параметров элементной базы и характера функционирования блоков и узлов в РЭА. Кроме того, современное развитие микроэлектронной базы направлено на повышение быстродействия и экономичности электронных устройств, следствием чего является уменьшение размеров активных элементов и толщин слоев в планарных структурах. В результате существенно возрастает роль состояния поверхности и границ раздела разнородных материалов, таких как металл-полупроводник, диэлектрик-

полупроводник и полупроводник-полупроводник (разного состава или уровня легирования). При прохождении электромагнитного излучения (ЭМИ) через микроэлектронное устройство значительная часть энергии будет рассеиваться и поглощаться на таких структурных неоднородностях и вызывать изменения их оптических и электрофизических характеристик. В результате это может привести к кратковременному или долговременному изменению в функционировании активного элемента и схемы, параметры которого зависят от физического состояния структурной неоднородности.

Развитие техники генерации электромагнитного излучения привело к созданию источников излучения, позволяющих формировать на выходе очень короткие ($\leq 10^{-9}$ с) биполярные и однополярные (видео) импульсы достаточно большой амплитуды $\sim 10^3$ В, период следования которых велик ($10^{-2} + 10^{-6}$ с) по сравнению с длительностью импульса. Взаимодействие таких мощных сверхкоротких импульсов (СКИ) электромагнитного излучения (ЭМИ) с твердотельными структурами, когда времена нарастания и спада фронтов импульса сопоставимы или даже меньше характерных времен релаксационных процессов в диэлектриках и полупроводниках, могут вызывать изменения различных параметров облучаемых объектов, которые могут носить как временный характер (во время и после облучения), так и катастрофический.

Экспериментальные исследования процессов нестационарного нелинейного преобразования энергии СКИ ЭМИ в энергию отклика твердых тел и активных элементов и схем на их основе представляются актуальными.

Сложность построения математического аппарата для адекватного описания процессов взаимодействия сверхкоротких импульсов с различными материалами и структурами приводит к тому, что на данном этапе развития этого научного направления приоритетными являются экспериментальные исследования.

Тема диссертации соответствует «Перечню приоритетных направлений фундаментальных исследований», утвержденных президентом РФ («Противодействие терроризму»). Диссертационная работа является частью комплексных исследова-

ний, проводимых на кафедре твердого тела и наноструктур Воронежского государственного университета по госконтракту № 4587.

♦ **Цель работы.** Экспериментальное исследование воздействия мощных наносекундных импульсов электромагнитного излучения на параметры и вольтамперные характеристики биполярных и полевых структур и простейших цифровых и аналоговых микросхем, построенных на их основе.

В соответствии с целью работы были сформулированы следующие задачи:

1. Разработка и создание экспериментального стенда для исследования вольтамперных характеристик биполярных диодов и транзисторов, полевых транзисторов, функционирования аналоговых и логических микросхем при воздействии мощных сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения (СКИ ЭМИ) с обеспечением требований к высокой защищенности внешних измерительных приборов от воздействия СКИ ЭМИ.

2. Исследование электрофизических характеристик биполярных структур при воздействии СКИ ЭМИ и анализ возможных механизмов их изменений.

3. Исследование и анализ перестройки вольтамперных характеристик (ВАХ) полевых транзисторов на структуре металл – диэлектрик – полупроводник (МДП) и определение возможных причин их деградации.

4. Анализ поведения простейших цифровых и аналоговых микросхем, изготовленных по биполярной и МДП – технологиям, при воздействии СКИ ЭМИ с различной энергией в импульсах.

♦ **Объекты и методы исследования.** В экспериментах по исследованию влияния мощных СКИ ЭМИ на биполярные структуры исследовались стандартные р-п-диоды типа Д 106А, Д 223А и Д 509А, а также маломощные транзисторы различного частотного диапазона КТ 630Б, КТ 3107А, КТ 343Б и КТ 347В. Характер и степень воздействия оценивались по величине обратного тока диодов, обратного коллекторного тока транзисторов и значению коэффициента переноса носителей через базу.

Эксперименты по исследованию влияния СКИ ЭМИ на полевые МДП – транзисторы проводились с серийными 2П 305Б, КП 305Д, КП 305Е. Характер и степень воздействия оценивались по входным и выходным ВАХ транзисторов. Для уточнения роли границы раздела диэлектрик – полупроводник в изменении характеристик транзисторов проводились измерения вольт-фарядных характеристик (ВФХ) при воздействии СКИ ЭМИ.

В экспериментах в качестве источников внешнего воздействия использовались генераторы СКИ ЭМИ, задающие биполярные и однополярные импульсы с частотой следования до 100 кГц. Энергия импульсов на выходе генераторов – $2,4 \times 10^{-4}$ Дж, $3,5 \times 10^{-5}$ Дж. Длительности импульсов и фронтов имели значения 11,5 нс и 1,4 – 3,2 нс; 10 нс и 0,8 – 1,4 нс соответственно.

♦ **Научная новизна.**

1. Резкое возрастание обратного тока р-п переходов при воздействии мощных СКИ ЭМИ на биполярные структуры.

2. Смещение входных вольт-амперных характеристик полевых транзисторов в результате увеличения плотности поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик-полупроводник при воздействии мощных наносекундных импульсов.

3. Длительный характер восстановления параметров аналоговых МДП – интегральных схем, зависящих от энергии воздействующего наносекундного импульса.

4. Нелинейная зависимость появления функциональных нарушений в работе цифровых и аналоговых микросхем от частоты следования и энергии наносекундного импульса.

♦ **Научные положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие результаты, впервые полученные в настоящей работе:

1. Возникновение обратного пробоя р-п переходов при воздействии мощных СКИ ЭМИ на биполярные структуры.

2. Перестройка вольтамперных характеристик полевых транзисторов в результате увеличения плотности поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик-полупроводник при воздействии мощных наносекундных импульсов.

3. Достаточно длительное время ($10^{-4}+10^{-5}$ с) восстановления ВАХ МДП – транзисторов после воздействия, приводящее к увеличению сдвига ВАХ с частотой следования СКИ в диапазоне 10^2+10^5 Гц.

4. Длительный характер восстановления параметров аналоговых МДП – интегральных схем, зависящих от энергии воздействующего наносекундного импульса.

♦ **Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы были представлены в виде докладов и обсуждались на:

- XII, XIII Международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 2006г, 2007г. соответственно;

- I Международной конференции «Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике», Суздаль, 2005г.

♦ **Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 1 - в издании рекомендованном ВАК РФ. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично соискателю принадлежат: [1-6] – подготовка к эксперименту, [1-6] – получение экспериментальных данных, [1-6] – анализ экспериментальных данных, [7-10] – предложения по использованию.

♦ **Объем и структура диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 132 страницах машинописного текста, включая 104 рисунка, 3 таблицы и список литературы из 33 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

♦ Во введении к диссертации обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, ее научная новизна, практическая значимость полученных результатов и научные положения, выносимые на защиту.

♦ В первой главе на основе литературных данных дается обзор по влиянию импульсного электромагнитного излучения на полупроводниковые электронные устройства и показан характер отклика некоторых изучаемых объектов при воздействии импульсного микроволнового излучения.

В главе рассмотрен материал о нарушениях и выходе из строя элементов полупроводниковой электроники. Показано, что эти нарушения связаны с пробоем р-п-перехода или диэлектрического слоя при воздействии мощной импульсной электромагнитной помехи. Рассмотренные материалы показывают, что устойчивые нарушения в работе наблюдаются при воздействии импульсной помехи с напряженностью выше 200 кВ/м для устройств, изготовленных по КМОП – технологии и выше 500кВ/м для устройств, изготовленных по биполярной технологии. Необратимые нарушения в работе полупроводниковых электронных устройств наблюдаются в полях, превышающих 600 кВ/м.

В тоже время, современная полупроводниковая элементная база позволяет создавать генераторы формирующие сверхкороткие импульсы электромагнитного излучения (СКИ ЭМИ), представляющие собой последовательности импульсов с амплитудой $\geq 10^3$ В, длительностью фронтов $\leq 10^{-9}$ с в диапазоне частот следования от 1 Гц до 1 МГц. Электромагнитное излучение с такими параметрами при взаимодействии с твердым телом проявляет целый ряд специфических свойств, позволяющих его использовать для решения новых задач, недоступных для традиционной радиотехники, как в областях стратегического, так и гражданского назначения. Однако, вопрос о взаимодействии СКИ ЭМИ с полупроводниковой элементной базой практически не изучен, что обуславливает актуальность данных исследований.

♦ Во второй главе описывается разработанный лабораторный измерительный стенд для изучения воздействия СКИ ЭМИ на полупроводниковые структуры с использованием широкополосной коаксиальной нагрузки (ШКН), которая

предназначена для исключения воздействия СКИ ЭМИ на измерительную аппаратуру. Конструктивно ШКН представляет собой волновод, состоящий из двух проводящих цилиндров, помещенных один в другой и соединенных друг с другом посредством нагрузки (50 Ом) с одной стороны и разъемом СР-50 (для соединения с генератором наносекундных импульсов (ГНИ)) с другой (рис.1).

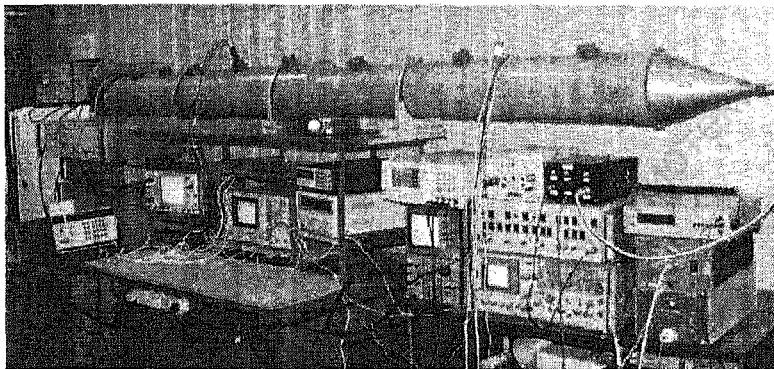


Рис.1 Изображение измерительного стенда с широкополосной коаксиальной нагрузкой

Во внешнем цилиндре вдоль всей его длины расположено 5 отверстий, закрытых заглушками, которые выполняют роль позиционных окон для размещения тестовых структур. Полость между цилиндрами заполнена материалом, способным поглощать электромагнитное излучение (поглотителем) таким образом, чтобы по мере удаления от источника излучения энергия воздействующего излучения в окнах уменьшалась (Таблица 1).

Таблица 1

Номер окна	1м	2м	3м	1	2	3	4
Коэф. Ослабления, дБ	11,7	10	9,4	9,9	13,1	18,2	21,9

Также в главе приведены схемные решения лабораторных генераторов СКИ ЭМИ, осциллограммы и характеристики сигналов на выходах генераторов и в окнах ШКН. Приведен перечень исследуемых диодов, транзисторов и микросхем (аналоговых и цифровых), сформированных по биполярной и МДП

– технологии, их конструктивные параметры и рабочие характеристики. Описаны схемы и методики проводимых экспериментов с исследуемыми полупроводниковыми объектами при воздействии СКИ ЭМИ.

♦ В третьей главе представлены экспериментальные результаты влияния СКИ ЭМИ на статические характеристики биполярных диодов и транзисторов.

Результаты исследования показали, что независимо от методики измерения вольтамперных характеристик биполярных диодов и транзисторов (с помощью измерителя параметров Л2-76 или при помощи цифровых вольтметров) при воздействии СКИ ЭМИ наблюдается заметный рост обратных токов через р-п-переход, который зависит как от параметров СКИ ЭМИ (энергия в импульсе), так и от предельных рабочих параметров диодов и транзисторов.

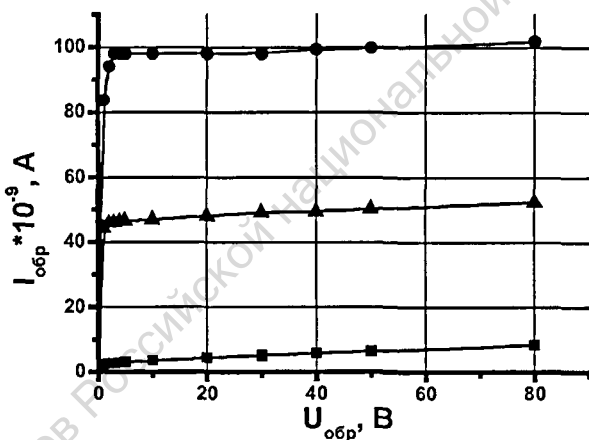


Рис.2. Обратные ВАХ диода Д 223А

■ - без воздействия СКИ,

▲ - при воздействии СКИ с энергией в импульсе $E = 26,1 \cdot 10^{-7} Дж$,

● - при воздействии СКИ с энергией в импульсе $E = 29,6 \cdot 10^{-7} Дж$.

Частота следования СКИ 100 кГц.

Из рис.2 видно, что воздействие СКИ ЭМИ с энергией до $E = 29,6 \cdot 10^{-7} Дж$ приводит к росту обратного тока через р-п-переход почти на два порядка. Т.к. цикл измерения постоянного напряжения или тока составляет порядка $10^{-1} с$, а расстояние между воздействующими импульсами порядка $10^{-5} с$, то наблюдаемое изменение ВАХ представляет собой усредненное значение тока через р-п-переход при воздействии СКИ ЭМИ.

При воздействии СКИ ЭМИ на диоды с меньшим пробивным напряжением и с большей рабочей частотой эффективность воздействия растет. Например, для диода КД 509А при воздействии с энергией $E = 29,6 \times 10^{-7}$ Дж обратный ток увеличивается более чем в 2000 раз.

Аналогичный рост обратного тока (коллекторного перехода - I_{cbo}) при воздействии СКИ ЭМИ наблюдается и у биполярных транзисторов. Особенно заметно увеличение обратного тока коллекторного перехода при воздействии СКИ ЭМИ у маломощных СВЧ транзисторов. На рис.3 приведено изменение I_{cbo} для транзистора КТ 347В при воздействии СКИ ЭМИ с энергией $E = 29,6 \times 10^{-7}$ Дж.

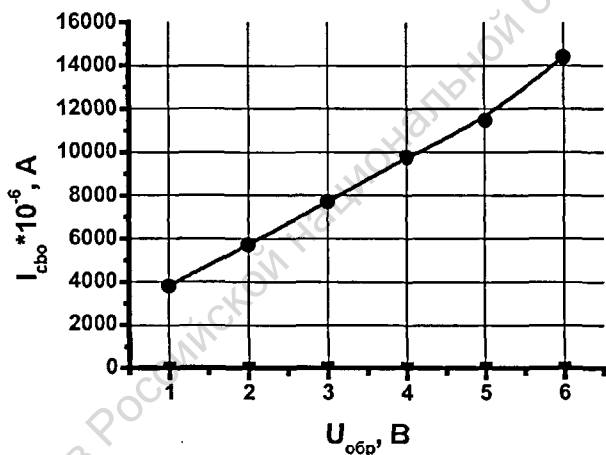


Рис.3. Обратный ток коллектор-база транзистора КТ 347В.

■ - без воздействия СКИ ЭМИ;

● - при воздействии СКИ ЭМИ $E = 29,6 \times 10^{-7}$ Дж и частотой следования 100 кГц.

Как видно из рисунка в этом случае рост тока при воздействии СКИ ЭМИ может превышать исходное значение более чем на четыре порядка без выхода транзистора из строя. Зависимость роста I_{cbo} от энергии воздействующего импульса ЭМИ представлена на рис. 4.

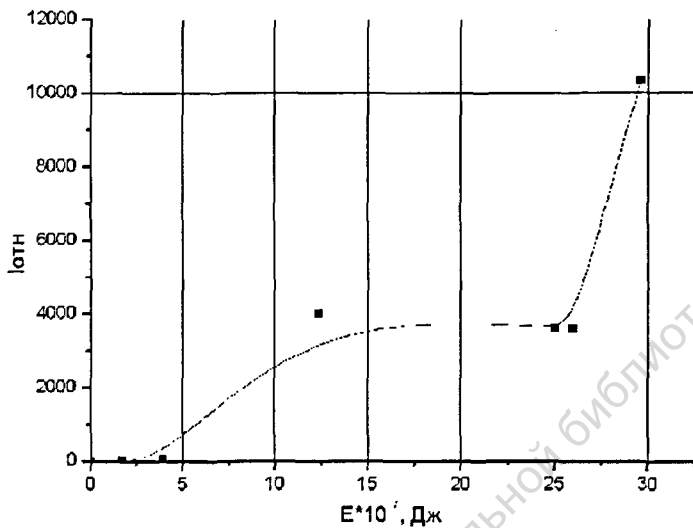


Рис.4. Зависимость относительного изменения обратного тока коллектора транзистора КТ347В от энергии СКИ. $U_{КБ} = 5В$.

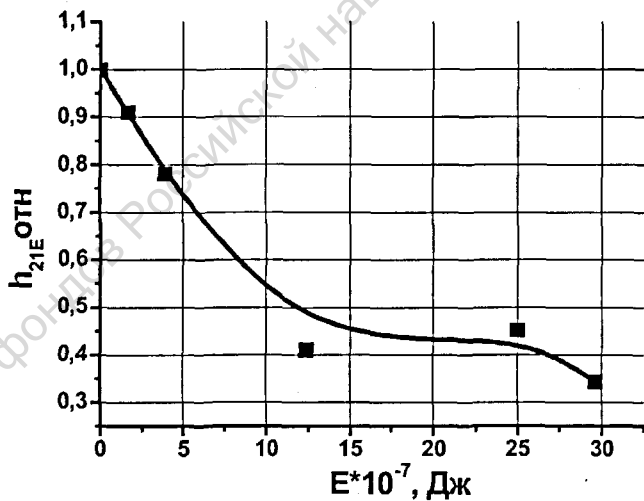


Рис.5 Зависимости относительного коэффициента передачи тока транзистора КТ347В от энергии СКИ. $U_{КЭ} = 5В$

Одновременно с ростом обратного коллекторного тока в биполярных транзисторах при воздействии СКИ ЭМИ наблюдается спад коэффициента передачи h_{21E} . Например, для транзистора КТ347В при воздействии СКИ ЭМИ с $E = 29,6 \times 10^7$ Дж этот спад составляет около 70 % (рис.5).

Анализ изменений ВАХ биполярных диодов и транзисторов при воздействии СКИ ЭМИ показывает, что наиболее вероятным механизмом увеличения обратного тока р-п-перехода является лавинный пробой, т.к. при очень быстром нарастании внешнего поля ($t < 10^{-9}$ с) происходит эффективное увеличение энергии носителей (без потерь на тепловое рассеяние) и последующее лавинное размножение, характеризующееся коэффициентом умножения тока $M = I/I_0 = [1 - (V/V_{проб})^c]^{-1}$.

Устаовленные изменения в работе биполярных диодов и транзисторов приводят к нарушению функционирования логических элементов цифровых интегральных микросхем, сформированных по биполярной технологии. При воздействии СКИ ЭМИ наблюдаются ложные срабатывания логики, обусловленные пробоем запертых р-п-переходов.

При воздействии СКИ ЭМИ на аналоговые биполярные микросхемы на выходе этих микросхем наблюдается уменьшение амплитуды полезного сигнала с искажением его формы, что обусловлено уменьшением активной области транзисторов и уменьшением их коэффициента усиления.

♦ В четвертой главе представлены экспериментальные результаты влияния СКИ ЭМИ на кремниевые МДП – транзисторы и сформированные на их основе цифровые и аналоговые интегральные микросхемы.

Показано, что при воздействии СКИ ЭМИ наблюдается рост выходного тока полевых транзисторов типа КП 305 (Б, Д, Е). При этом входная сток-затворная характеристика также смещается в сторону больших токов и значение напряжения отсечки значительно сдвигается в область отрицательных напряжений, и при используемой шкале напряжений отсечки не наблюдается (рис.6).

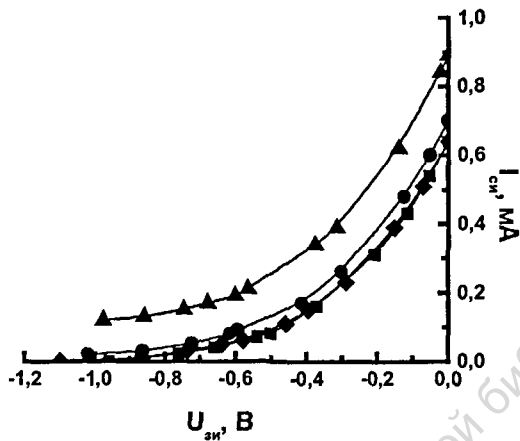


Рисунок 6. Зависимости тока стока $I_{СИ}(U_{ЗИ})$ транзистора 2П 305Д при воздействии СКИ ЭМИ с $E = 1,7 \times 10^{-7}$ Дж и $E = 29,6 \times 10^{-7}$ Дж и частотой следования импульсов $f_{СКИ} = 100$ кГц. $U_{СИ} = 5$ В:

- ■ - до воздействия; - ● - во время воздействия с $E = 1,7 \times 10^{-7}$ Дж; - ▲ - во время воздействия с $E = 29,6 \times 10^{-7}$ Дж; - ◆ - после воздействия.

Из рис.6 видно, что при увеличении энергии воздействующего импульса ЭМИ наблюдается рост выходного тока транзистора.

Такое поведение ВАХ МДП – транзисторов обусловлено перестройкой границы раздела диэлектрик – полупроводник в МДП – структуре. При воздействии СКИ ЭМИ наблюдается затягивание вольтфарадной характеристики и смещение точки инверсии МДП – структуры по оси напряжений, вызванные ростом плотности поверхностных состояний на границе раздела.

При воздействии СКИ ЭМИ на цифровые МДП – схемы наблюдаются ложные срабатывания логических элементов, частота проявления которых зависит от энергии воздействующего импульса и параметров схемы включения логических элементов. Для примера на рис.7 приведены осциллограммы сигналов мультивибратора на микросхеме 74НС04Н в отсутствие воздействия и при воздействии СКИ с энергией $12,4 \times 10^{-7}$ Дж.

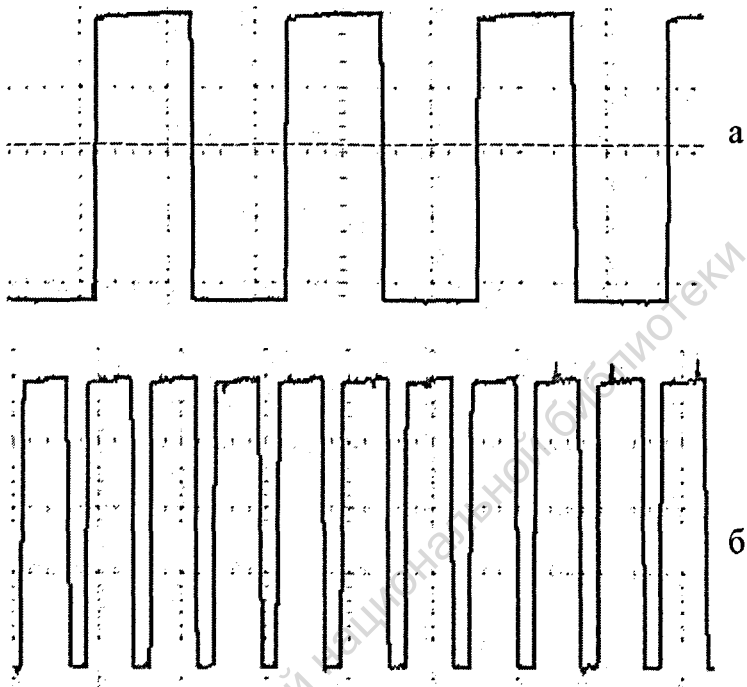


Рис.7. Осциллограммы сигнала мультивибратора на микросхеме 74НС04N; $x=1\text{мс/дел}$, $y=1\text{В/дел}$. а – исходный сигнал; б – при воздействии СКИ с энергией $12,4 \times 10^{-7}$ Дж.

Воздействие СКИ ЭМИ на аналоговые микросхемы может приводить к частичной или полной потерей их работоспособности. На рис.8 представлены зависимости амплитуды выходного сигнала малошумящего усилителя на микросхеме К 504 УН2А (сформированной на полевых транзисторах) от энергии воздействующих импульсов.

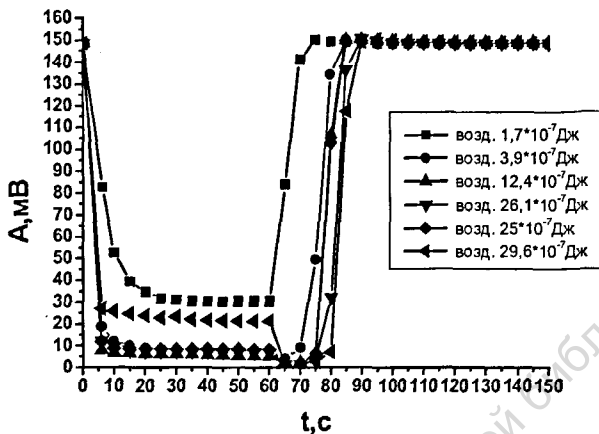


Рис.8. Зависимость амплитуды сигнала на выходе усилителя К504УП2А от времени при включении и выключении воздействия СКИ ЭМИ различных энергий, $t_{\text{возд}}=1$ мин, частота воздействия 100 кГц.

Из рис.8 видно, что воздействие СКИ ЭМИ с $E \geq 3,9 \times 10^{-7}$ Дж приводит к прекращению функционирования усилителя, которое сохраняется и после снятия воздействия в течение некоторого времени (задержки). Величина времени задержки зависит от энергии воздействия.

♦ В заключении и выводах подведены итоги по диссертационной работе в целом и сформулированы основные результаты, которые сводятся к следующему:

1. При воздействии СКИ ЭМИ на биполярные структуры наблюдается резкий рост обратного тока через р-п-переход. Одновременно в транзисторе падает коэффициент переноса носителей через базу.

2. Смещение входных и выходных характеристик кремниевых МДП – транзисторов по оси напряжений и токов.

3. Искажения по форме и уменьшение по амплитуде сигнала на выходе аналогового усилителя, сформированного по биполярной технологии, во время воздействия СКИ ЭМИ.

4. Уменьшение амплитуды, вплоть до выключения, сигнала на выходе аналогового усилителя на полевых транзисторах.

5. Ложные переключения биполярных и полевых логических элементов, вероятность появления которых определяется энергией и частотой следования СКИ ЭМИ

♦ Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Терехов В. А. Влияние сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения на параметры структур металл – диэлектрик – полупроводник / В.А. Терехов, В.Н. Левченко, [и др.] // ФТП, -2004, -Т 38, №12, -С. 1435-1438.

Труды и материалы конференций

2. Терехов В. А. Перестройка статических ВАХ полевых транзисторов под воздействием сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения / В. А. Терехов, В.Н. Левченко [и др.] // Труды XII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», -2006, -Т 2, -С. 1244-1248.

3. Терехов В. А. Релаксационные явления в кристаллах ТГС в результате воздействия СКИ ЭМИ / В. А. Терехов, В.Н. Левченко, [и др.] // Труды XII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», -2006, -Т 2, -С. 1373-1378.

4. Терехов В. А. Влияние сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения на параметры структур МДП/ В. А. Терехов, В. Н. Левченко, [и др.]// Материалы V международной конференции электромеханики, электротехники и электроматериалов. – 2003, С. 105-108.

5. Анцев Г. В., Левченко В. Н. Антенна эллиптической поляризации для излучения и приема сверхкоротких импульсов/ Г. В Анцев., В. Н. Левченко // Материалы I международной конференции по сверхширокополосным сигналам

лам и сверхкоротким импульсам в радиолокации, связи и акустике. -2005, С. 113-116.

6. Требунских С.Ю. Эффекты пробоя при воздействии СКИ ЭМИ в биполярных структурах / С.Ю. Требунских, В. Н. Левченко [и др.] // Радиолокация, навигация, связь : XIII Международ. науч.-техн. конф., - 2007 г. — Воронеж, 2007. — Т. 2. - С. 1582-1586.

7. Многофункциональная оптиколокационная система: Патент РФ №2292566 от 27.01.2007. Прилипко А. В., Павлов Н. И., Левченко В. Н.

8 А. С. 158159 СССР. Гуменюк Г. А., Метелкин В. Н., Левченко В. Н. 7.04.1981.

9. А. С. 190006 СССР. Малахов А. И., Егоров А. Н., Левченко В. Н., Раев А. А., Рыжиков О. Д., Саламахин А. Д. 4.07.1983.

10. А. С. 201677 СССР. Малахов А. И., Егоров А. Н., Левченко В. Н., Раев А. А., Рыжиков О. Д., Саламахин А. Д. 29.03.1984.

Из фондов Российской национальной библиотеки

Подписано в печать 11.07.08. Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,2.
Тираж 100 экз. Заказ 1383.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Издательско-полиграфического центра
Воронежского государственного университета.
394000, г. Воронеж, ул. Пушкинская, 3

2008A
17035

Из фондов Российской национальной библиотеки
08-17035