

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ТАВРИЧЕСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. В.И. ВЕРНАДСКОГО**

На правах рукописи

**Грибский Максим Петрович**

*УДК 537.86*

**ФИЗИКА ПРОЦЕССОВ НАПРЯЖЕННЫХ ТОКОВЫХ И ТЕПЛОВЫХ  
РЕЖИМОВ МИКРОСХЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ  
СВЧ-ПОЛЕЙ**

01.04.01 - Физика приборов, элементов и систем

**Диссертация на соискание научной степени  
кандидата физико-математических наук**

Научный руководитель  
**Старостенко Владимир Викторович**  
доктор ф.-м. наук, доцент кафедры  
радиофизики и электроники

**СИМФЕРОПОЛЬ – 2009**

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	6
РАЗДЕЛ 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ЭЛЕМЕНТНУЮ БАЗУ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ	14
1.1. Общие положения.....	14
1.2. Имитация воздействия электромагнитных полей на полупроводниковые приборы и микросхемы .....	17
1.3. Обзор работ по непосредственному воздействию импульсных электромагнитных полей на микросхемы .....	21
1.3.1. Воздействие на микросхемы с низким уровнем интеграции	23
1.3.2. Модель взаимодействия импульсных электромагнитных СВЧ полей с микросхемами низкого и среднего уровня интеграции.....	30
1.4. Современные микросхемы, их отличия от микросхем с низким и средним уровнями интеграции .....	31
1.5. Выводы по разделу .....	34
РАЗДЕЛ 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ ИМПУЛЬСНЫХ СВЧ ПОЛЕЙ НА СОВРЕМЕННЫЕ МИКРОСХЕМЫ .....	35
2.1. Соотношение между волнами при дифракции на микросхеме в волноводе.....	37
2.1.1. Связь характеристик волноводных режимов с волнами в волноводе.....	38
2.2. Определение соотношений между волнами при дифракции полей на современных микросхемах и электронных модулях в волноводе.....	44
2.3. Тестирование работоспособности современных микросхем при воздействии импульсных электромагнитных полей.....	50

2.3.1. Тестирование работоспособности микропроцессоров и микроконтроллеров.....	51
2.3.2. Тестирование работоспособности микросборок приемников и передатчиков, экранированных СВЧ микросхем...	53
2.4. Результаты исследований по воздействию импульсных электромагнитных полей на современные интегральные микросхемы.....	58
2.4.1. Воздействие ВИИЭМП на частично экранированные микросхемы.....	64
2.4.2. Воздействие импульсных электромагнитных полей на электронные модули.....	65
2.5. Обобщение экспериментальных результатов.....	69
2.6. Выводы по разделу.....	73
<b>РАЗДЕЛ 3. МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ СВЧ ПОЛЕЙ С МИКРОСТРУКТУРНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ КРИСТАЛЛА СОВРЕМЕННЫХ МИКРОСХЕМ.....</b>	<b>74</b>
3.1. Основные составляющие модели взаимодействия импульсных СВЧ полей с микроструктурными элементами кристалла микросхем.....	76
3.1.1. Решение дифракционной задачи для современной микросхемы в волноводе.....	77
3.2. Модель кристалла и разрядные цепи современных микросхем....	81
3.2.1. Моделирование электротепловых процессов в цепях разряда с проводящими и диэлектрическими микроструктурными элементами.....	87
3.3. Моделирование электротепловых процессов в активных микроструктурных элементах современных микросхем.....	96
3.3.1. Модель ПТШ для исследования напряженных токовых и тепловых режимов.....	97
3.4. Выводы по разделу.....	102

РАЗДЕЛ 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННЫХ ТОКОВЫХ И ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ В МИКРОСТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ КРИСТАЛЛА СОВРЕМЕННЫХ МИКРОСХЕМ.....	103
4.1. Электротепловые процессы в металлизации микросхем с учетом потерь токов смещения в диэлектрике.....	105
4.1.1. Физические процессы в неоднородных медных пленках кристалла микросхем в напряженных токовых и тепловых режимах.....	111
4.2. Моделирование электротепловых процессов в кристалле микросхем с разрядной цепью из пассивных микроструктурных элементов при воздействии ВИИЭМП.....	116
4.3. Физические процессы в ПТШ при напряженных токовых и тепловых режимах.....	123
4.3.1. Моделирование физических процессов в ПТШ при воздействии ВИИЭМП.....	125
4.3.2. Влияние ширины канала и затвора на развитии электротепловых процессов в ПТШ при напряженных токовых режимах.....	131
4.4. Выводы по разделу.....	138
ВЫВОДЫ.....	139
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	157
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	166

## СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- АЦП – аналого-цифровой преобразователь
- ВИИЭМП – высокоинтенсивное импульсное электромагнитное поле
- ИМС – интегральная микросхема
- ИЭМП – импульсное электромагнитное поле
- МП – микропроцессор
- МДС – металлodieлектрическая структура
- МСЭ – микроструктурный элемент
- ППП – полупроводниковые приборы
- ППС – полупроводниковая структура
- ПТ – полевой транзистор
- ПТШ – полевой транзистор с затвором Шоттки
- РЭА – радиоэлектронная аппаратура
- СВЧ – сверхвысокие частоты
- ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь
- ЭА – электронная аппаратура
- ЭМ – электронный модуль
- ЭМС – электромагнитная совместимость
- ЭМИ – электромагнитный импульс (излучение)
- ЭМП – электромагнитное поле
- ЭСР – электростатический разряд

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Информационные технологии в настоящее время определяют развитие всех отраслей народного хозяйства государств. В свою очередь уровень информационных технологий определяется состоянием и тенденциями развития элементной базы электронной аппаратуры, в основном интегральных микросхем (ИМС). С их помощью производится практически вся обработка информации в современной электронной аппаратуре (ЭА).

В электронной аппаратуре микросхемы могут подвергаться воздействию различных внешних факторов, влияющих на их функциональное состояние, вплоть до катастрофических отказов. При этом работоспособность ЭА будет определяться функциональным состоянием микросхем, их режимами работы. Микросхемы и полупроводниковые приборы проектируются для работы в номинальных режимах. Физика процессов в этих приборах при работе в напряженных токовом и тепловом режимах, которые могут развиваться при воздействии электромагнитного излучения на ЭА, практически не исследована.

Одним из наиболее распространенных видов внешних воздействий на ЭА являются импульсные электромагнитные поля (ИЭМП) естественного и искусственного происхождения. Исследованиям воздействия импульсных электромагнитных полей на полупроводниковые приборы и микросхемы посвящено большое количество работ [1 - 24]. В США и странах Западной Европы специалисты, занимающиеся вопросами воздействия электромагнитных полей на элементную базу ЭА, подобного рода воздействие свели к подаче на выводы полупроводниковых приборов видеоимпульса напряжения, а к выводам микросхем радиоимпульса. Однако такой имитационный подход не дает связи параметров воздействующего фактора с результатом воздействия, в частности: 1) невозможно учесть влияние поляризационного фактора, определяющего величину напряжения,

воздействующего на микроструктурные элементы кристалла микросхем; 2) достаточно трудно найти соответствие между параметрами имитационного видеоимпульса и воздействующего на ЭА радиоимпульса; 3) при воздействии на ЭА ИЭМП большую роль на развитие физических процессов в микроструктурных элементах играют токи смещения, в частности, та их составляющая, которая обусловлена СВЧ заполнением импульса; 4) в имитационном подходе при воздействии на микросхемы цепь разряда фиксируется, а в случае воздействия мощных ИЭМП на ИМС, разрядных цепей может быть несколько.

Исследования по непосредственному воздействию импульсных электромагнитных полей в свободном пространстве впервые были проведены в ХФТИ (г. Харьков) под руководством проф. Магды И.И. [43 - 49]. Проведенные исследования позволили выявить основные закономерности преобразования электромагнитных полей в электротепловые процессы в микроструктурных элементах кристалла микросхем. Такие же работы проводились в ТНУ (г. Симферополь) с использованием волноводных методов [57 - 71]. Наряду с исследованиями по непосредственному воздействию импульсных электромагнитных полей на микросхемы в волноводе, направленными на углубленное изучение процессов и результатов преобразования полей в микроструктурных элементах, в ТНУ была разработана численно-аналитическая модель взаимодействия, включающая в себя решение дифракционной задачи для микросхемы в волноводе и решение электротепловой задачи для модели кристалла. Однако данные исследования, как экспериментальные, так и теоретические, были проведены для микросхем, разработанных более 40 лет назад. Современные микросхемы сильно отличаются от микросхем с низким и средним уровнями интеграции прошлых десятилетий, что требует нового подхода к изучению физических процессов в их микроструктурных элементах, работающих в ненормальных режимах. Научной разработке этих вопросов посвящена данная диссертационная работа.

Актуальными в научном, и практическом аспектах являются:

- исследования процессов преобразования энергии импульсных электромагнитных полей, воздействующих на приборы и микросхемы, в электрическую и тепловую в микроструктурных элементах современных ИМС;
- исследования физических процессов в приборах, работающих в напряженных токовых и тепловых режимах; изучение пробойных явлений в активных и пассивных микроструктурных элементах кристалла микросхем;
- разработка рекомендаций по мерам повышения стойкости приборов к воздействиям импульсных электромагнитных СВЧ полей.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.**

Основные результаты работы вошли в отчет госбюджетной темы кафедры радиофизики и электроники Таврического национального университета им. В. И. Вернадского, номер госрегистрации №0101U005650 «Исследования воздействия импульсных электромагнитных полей на микроструктуры и моделирование электронных приборов». Соискателем как одним из исполнителей данной темы выполнен комплекс экспериментальных и теоретических исследований по воздействию импульсных электромагнитных полей на современные микросхемы.

**Цель и задачи исследований.** Цель работы состоит в установлении физических закономерностей процессов в микроструктурных элементах кристалла современных микросхем высокого уровня интеграции во время их работы в напряженных токовых и тепловых режимах.

Для достижения цели необходимо было решить такие задачи:

- разработать методики проведения экспериментальных исследований по воздействию импульсных электромагнитных полей на современные микросхемы и электронные модули;
- провести экспериментальные исследования и проанализировать полученные результаты;



- на основании экспериментальных исследований и результатов моделирования микросхем с низким и средним уровнями интеграции разработать модель взаимодействия импульсных электромагнитных полей с микроструктурными элементами кристалла современных ИМС с большим уровнем интеграции;

- определить основные электрические цепи разряда в кристалле во время действия импульсного электромагнитного излучения и разработать электротепловую модель кристалла современных микросхем, что позволит прогнозировать работоспособность ИМС в напряженных токовых и тепловых режимах;

- на примере модели полевого транзистора установить степень воздействия геометрических размеров канала и затвора прибора, а также режимов работы на физические процессы во время его работы в номинальном режиме.

**Объект исследования** – физические процессы в кристаллах современных микросхем при преобразовании энергии действующих СВЧ полей.

**Предмет исследования** – напряженные токовые и тепловые режимы в кристаллах современных микросхем при воздействии мощных импульсных СВЧ полей.

**Методы исследования.** Результаты, полученные в диссертационной работе, основываются на: экспериментальных волноводных методах определения работоспособности микросхем при непосредственном воздействии на них мощных импульсных электромагнитных полей; статистических методах обработки результатов экспериментальных исследований; моделировании процессов и приборов с помощью аналитических выражений, что описывают их свойства и характеристики с

последующим использованием численных методов, в частности, декомпозиционного, прогонки, больших частиц.

**Научная новизна полученных результатов,** заключается в следующем:

1. Получил последующее развитие волноводный метод экспериментального исследования воздействия импульсных электромагнитных полей на микроструктурные элементы кристалла современных микросхем с большим уровнем интеграции.
2. Разработаны численно-аналитические модели взаимодействия импульсных электромагнитных полей с микроструктурными элементами кристалла современных микросхем и тепловая модель кристалла, что впервые позволило прогнозировать стойкость ИМС к воздействию импульсного электромагнитного излучения, которое определяется в основном размерами кристалла, поляризационным фактором и не зависит от их функционального назначения.
3. Впервые рассмотрены электрические цепи разряда с активными микроструктурными элементами кристалла современных микросхем.
4. На примере модели ПТШ впервые показано, что поверхностная плотность мощности, которая рассеивается в полупроводниковом приборе при пробое, не учитываются в полной мере его конструктивные особенности, потому как функцию в критерии Вунша-Белла необходимо выбрать значение удельной объемной мощности во время электротеплового пробоя транзистора.

**Практическая значимость результатов,** полученных в процессе выполнения работы, состоит в следующем

1. Установлены ограниченные значения полей, при которых начинаются сбои в работе и катастрофические отказы современных микроконтроллеров с микропроцессорами, микросхем памяти, микросхем аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, микросборок приемников и

передатчиков. Это может быть положено в основу отраслевых стандартов, что определяют стойкость ИМС.

2. Стойкость экранированных микросхем к электромагнитному излучению в основном определяется внешними электрическими цепями и радиоэлементами. Это обстоятельство необходимо учитывать при компоновке плат, что функционирует вблизи источников электромагнитных излучений.

3. Получены статистические данные по выходу из строя микроструктурных элементов кристалла, которые могут быть использованы производителями ИМС при разработке новых технологий их изготовления или при выборе новых материалов микросхем.

4. Предложено устанавливать ИМС, которые могут подвергаться воздействию электромагнитного излучения, в специальные панели с разрядниками, или проектировать и изготавливать микросхемы с разрядниками.

5. Разработана численно-аналитическая модель преобразования энергии электромагнитных полей в электротепловые процессы современных микросхем, которые позволяют прогнозировать их стойкость при уменьшении базовых элементов кристалла и увеличении его размеров во время работы в напряженных режимах, в частности при воздействии ИЭМП.

6. Определена оптимальная длина канала ПТШ и значение эквивалентной емкости разрядной цепи, которые могут быть использованы разработчиками для создания микросхем, которые работают в условиях воздействия мощных СВЧ полей.

7. Разработана компьютерная методика тестирования функционального состояния ИМС, что работает в напряженных токовых и тепловых режимах, используется в научно-исследовательской работе ТНУ и лабораторных практикумах во время обучения студентов специальности 6.070201 – прикладная физика и 7.070201 – радиофизика.

**Личный вклад соискателя.** Все экспериментальные исследования выполнены автором самостоятельно. Теоретические исследования проводились с помощью пакетов программ совместно с их разработчиками. В научных работах с соавторами соискателем лично выполнено и получено следующее: в работах [94 - 103] автором самостоятельно проведены экспериментальные исследования по воздействию импульсных электромагнитных полей на современные микросхемы, сделан анализ результатов; в работах [123, 125] предложены и обоснованы цепи разряда и модель кристалла современных микросхем, выполнены расчеты, проведен их анализ; в работах [119 - 122, 124, 126, 128] сформулированы задачи, сделан анализ результатов численного моделирования.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты диссертационной работы докладывались на 8 международных конференциях (12 докладов опубликованы в соответствующих материалах конференций): 16-й, 17-й, 18-й и 19-й Крымских конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Крымико, Севастополь, 2006, 2007, 2008, 2009); «Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (Севастополь, РТ-2006, РТ-2007); 3-м международном форуме «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ, Харьков, 2008).

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 12 статей в национальных и зарубежных научных журналах и сборниках. Из 12 статей 2 продублированы в журнале Telecommunications and Radio Engineering [94,a и 95,a], 3 статьи [94, 99, 121] опубликованы в изданиях Перечня ВАК Украины по техническим наукам, 8 статей опубликовано в научно-технических изданиях Перечня ВАК Украины по физико-математическим наукам, 12 тезисов докладов опубликованы в трудах международных конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация включает в себя введение, четыре раздела, выводы, перечень ссылок, 3 приложения. Работа

изложена на 155 страницах, содержит 6 таблиц и 65 рисунков. Перечень ссылок содержит 128 наименований на 14 страницах. Приложения на 14 страницах, общий объем работы, с приложениями – 170 страниц.

# РАЗДЕЛ 1

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ЭЛЕМЕНТНУЮ БАЗУ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

### 1.1. Общие положения

Надежная работа электронной аппаратуры (ЭА) может быть гарантирована только при функционировании ее радиоэлементов, в частности микросхем, в номинальных режимах. Выход за рамки номинальных электрических режимов приводит к сбоям в работе полупроводниковых приборов, микросхем и электронной аппаратуры в целом, к их отказам. Одним из основных факторов нарушения электрических режимов полупроводниковых приборов и микросхем является воздействие импульсных электромагнитных полей (ИЭМП) на ЭА. Воздействие этого фактора на электронную аппаратуру рассматривается в различных разделах прикладных наук: в физике полупроводниковых приборов и твердотельной электронике [1 - 4], электромагнитной совместимости радиотехнических систем (ЭМС) [5 - 11], физической теории надежности полупроводниковых приборов и микросхем [12 - 14].

При воздействии импульсных электромагнитных полей на полупроводниковые приборы к ним прикладываются дополнительные напряжения, что может приводить к напряженным токовым и тепловым режимам этих приборов. Процессы в полупроводниковых приборах и микросхемах при выходе за номинальные электрические и тепловые режимы являются объектом для исследования в физике полупроводниковых приборов и твердотельной электронике. Дополнительные напряжения могут быть обусловлены как внешним видеоимпульсом напряжения, так и радиоимпульсом. Видеоимпульс напряжения может быть электростатическим, разрядные явления при этом классифицируют как электростатический разряд (ЭСР) [15, 16].

Воздействующий фактор – электромагнитный импульс, характеризуется следующими величинами: формой, длительностью, крутизной фронтов, амплитудой, спектром, периодом следования для периодической последовательности или пачки импульсов, частотой заполнения для радиоимпульса. Эти характеристики определяют роль токов смещения и накопительных процессов, а, следовательно, развитие лавинных и тепловых процессов в полупроводниковых приборах. В физике полупроводниковых приборов и твердотельной электронике рассматриваются, как правило, физические процессы в дискретных приборах (диодах, транзисторах и т.д.). Подобные физические процессы имеют место и в случае, когда эти приборы входят в состав микросхем, т.е. являются их активными микроструктурными элементами (МСЭ) кристалла. Одним из важнейших понятий для микросхем, работающих в напряженных токовых и тепловых режимах, являются понятия разрядной цепи и цепи пробоя.

В физической теории надежности полупроводниковых приборов и микросхем наряду с факторами, определяющими долговечность и безотказность работы этих приборов на стадии проектирования, в процессе изготовления и эксплуатации, рассматриваются вопросы, связанные с воздействием внешних факторов, в частности, с воздействием различных видов излучений [11, 12]. Степень воздействия импульсных электромагнитных полей на элементную базу ЭА зависит от большого количества факторов. В иерархии «электронная система – блок – модуль – элементная база», приложенное дополнительное напряжение определяется внешними по отношению к элементной базе устройствами. В то же время работа электронной системы зависит от поведения элементной базы в напряженных токовых и тепловых режимах при воздействии электромагнитного излучения.

В настоящее время практически вся обработка информации осуществляется с помощью интегральных микросхем (ИМС) – микропроцессоров, микроконтроллеров, микросхем памяти, микросборок, а

также модулей с микросхемами. Значения характеристик полей, которые определяют пороговые значения сбоев в работе микросхем и микросборок или их катастрофических отказов, будут в значительной степени определять поведение и стойкость электронных систем.

Одним из факторов, влияющих на работоспособность электронной аппаратуры при воздействии ИЭМП, являются характеристики полей. В последние несколько десятилетий созданы генераторы электромагнитного излучения (ЭМИ), позволяющие имитировать воздействие ЭМИ грозовых разрядов и взрыва атомной бомбы на аппаратуру. Это магнитные генераторы на взрывной волне, лазеры на свободных электронах, различные виды релятивистских приборов О- и М-типов, приборы с винтовыми электронными пучками и т. д. [16 - 24]. Воздействие электромагнитного излучения на ЭА предполагает их преднамеренность, что является предметом исследований оборонных ведомств. По вопросам генерации и распространения ЭМИ, воздействия на различные элементы электронных систем имеется большое количество публикаций, которые частично отображены в обзоре К. Баума [25], в работах В.И. Кравченко [5,10,53-56].

Из большого количества различных видов импульсных электромагнитных полей в наибольшей степени на ЭА могут воздействовать радиотехнические сигналы в виде конечной или периодической последовательности импульсов с СВЧ заполнением. ИЭМП с прямоугольной огибающей широко используются в радиолокации, для передачи информации с использованием различных видов импульсной модуляции, поэтому целесообразно исследования проводить с сигналами такого вида.

При классификации воздействующих на ЭА или ее элементную базу импульсных электромагнитных полей по амплитуде (мощности) они ограничены сверху пробойным значением напряженности электрической компоненты поля в  $E_m \leq 30$  кВ/см, при которой происходит пробой в атмосфере, а снизу значениями напряженностей полей, при которых начинаются сбои в работе микросхем. Такие поля будем называть



высокоинтенсивными импульсными электромагнитными полями – ВИИЭМП.

Ниже приводится краткий обзор научной литературы по методам проведения и результатам исследований воздействия ИЭМП на полупроводниковые приборы, микросхемы по определению их работоспособности и стойкости в напряженных токовых и тепловых режимах.

## **1.2. Имитация воздействия электромагнитных полей на полупроводниковые приборы и микросхемы**

Начиная с 60-х годов прошлого столетия, в США появилось большое количество работ, посвященных воздействию импульсных электромагнитных полей сначала на полупроводниковые приборы, затем на микросхемы и их микроструктурные элементы, что было связано с применением в большей части ЭА микросхем. При этом возникла проблема их стойкости, в частности, по отношению к воздействию внешних электромагнитных полей. основополагающей, среди специалистов, работающих в этом направлении, является работа Вунша (Wunsch D.C.) и Белла (Bell R.R.) по имитации воздействия на полупроводниковые приборы, опубликованная в 1968 году [26]. Эта работа явилась отправной для всех последующих работ специалистов, имитирующих воздействие ВИИЭМП на элементную базу ЭА [1 - 4, 26 - 40]. В США вопрос воздействия ВИИЭМП и статического электричества на элементную базу ЭА не разделяют и сводят к подаче видеоимпульса на выводы рассматриваемых приборов. При воздействии статического электричества имитационный подход близок к реальности. В помещениях с различными видами полов (паркет, линолеум и т.д.) оператор может иметь потенциал относительно «земли» до 25 кВ [12, 15, 16].

Имитация воздействия ВИИЭМП на полупроводниковые приборы заключается в том, что к их выводам прикладывается видеоимпульс

напряжения. Выход прибора из строя (его тепловое разрушение) определяется импульсной мощностью (амплитудой) и длительностью импульса. В отличие от непосредственного воздействия импульсных электромагнитных полей на полупроводниковые приборы и микросхемы при имитации такого воздействия не учитывается взаимное расположение объекта и волны (поляризационный фактор), определяющее величину дополнительного напряжения, прикладываемаемого к МСЭ. Кроме того, не учитываются токи смещения высокочастотного заполнения и возможность развития разрядных процессов по нескольким путям.

При имитации воздействия характеристики воздействующего импульса не связаны с параметрами ВИИЭМП. Однако имитационный подход позволяет проследить динамику теплового разрушения определенных микроструктурных элементов приборов при реализации напряженных токовых и тепловых режимов, что в какой-то мере имеет место при воздействии на эти приборы ВИИЭМП.

Критериальная зависимость стойкости диодов и транзисторов при подаче на них видеоимпульса напряжения была экспериментально получена Вуншем и Беллом [26]. Она представляет собой зависимость удельной (поверхностной) пробойной мощности тока, проходящего через р-п-переход, от длительности импульса  $P_{кр}/S = f(\tau)$ , где  $P_{кр}$  - мощность тока, проходящего через поперечное сечение  $S$  р-п-перехода, при которой происходит катастрофический отказ;  $\tau$  – длительность прямоугольного импульса. Данная зависимость широко используется в литературе по воздействию ИЭМП на полупроводниковые приборы и носит название критериальной зависимости (кривой) Вунша – Белла [4, 26].

Зависимость удельной мощности  $P_{кр}/S$  пропорциональна  $t^{-1/2}$  или близка к экспоненциальной. Аналитическое описание экспериментальных данных соответствующей критериальной зависимости, в соответствии с [4, 26], представляется полуэмпирической формулой:

$$P_{кр} / S = \frac{k_d}{\sqrt{t}} = A \cdot e^{-\alpha t}, \quad (1.1)$$

где  $P_{кр}/S$  – удельная (поверхностная) пороговая мощность, рассеиваемая в р-п-переходе (кВт/см<sup>2</sup>);

$t$ -длительность прямоугольного видеоимпульса (мкс);

$k_d$ , коэффициенты  $A$  и  $\alpha$  определяются на основании экспериментальных данных.

Вуншем и Беллом критериальная зависимость была получена для случая подачи на диод или транзистор прямоугольного видеоимпульса напряжения. В работах [4, 26 - 40] приводятся экспериментальные и теоретические (рассчитанные на основании полуэмпирических формул) результаты исследований стойкости диодов при подаче на них напряжений, отличных по форме от прямоугольных импульсов. Приведенные экспериментальные данные в целом удовлетворяют критерию Вунша-Белла.

Критериальная зависимость Вунша-Белла является в достаточной степени приближенной. Для двух диодов с одинаковыми рабочими областями, но разными системами теплоотвода, пробойные значения напряжений будут отличаться друг от друга [4, 26 - 40]. Вуншем и Беллом были проведены экспериментальные исследования полупроводниковых приборов в напряженных токовых и тепловых режимах вплоть до их выхода из строя (до катастрофического отказа приборов) на микроскопическом уровне. Эти исследования показали, что прожогу р-п-перехода предшествует локализация тепла на неоднородностях полупроводниковых материалов [4, 26].

В этот же период (70-е годы прошлого столетия) в ЭА в достаточной мере использовались микросхемы. Были предприняты попытки перенести подобного рода имитацию воздействия ИЭМП и на микросхемы [4, 27 - 40]. Как и для дискретных полупроводниковых диодов и транзисторов воздействие внешнего импульсного поля имитировалось путем подачи

видео- или радиоимпульса на выводы ИМС. Авторы данных исследований уже не упоминают критерий Вунша-Белла, поскольку он не выполняется в целом для микросхем. Они используют понятие энергии в импульсе, поданной на ее выводы, и связывают значение этой энергии с катастрофическим отказом типовых ИМС [4, 28, 31, 35]. Анализ причин выхода микросхем из строя при таком воздействии показал, что 90% отказов ИМС с биполярными структурами и 63% отказов с МОП структурами связано с прожогом проводящих МСЭ (токопроводящие дорожки, контактные площадки) [4, 31, 35]. Детальный анализ характера отказов показал, что при подаче на выводы микросхем радиоимпульсов, в наибольшей степени происходит выгорание контактных площадок и проводящих дорожек. Их прожогу предшествуют процессы локализации тепла и точечные прожоги металлизации. В [4, 31, 35] приводятся результаты пороговых значений энергии радиоимпульса длительностью  $\tau = 1$  мкс, который вызывает развитие необратимых деградиационных процессов в микроструктурах.

В монографии Антинона (Antinone J.), вышедшей в 1986 году, обобщены результаты экспериментальных и теоретических исследований по имитации воздействия импульсных электромагнитных полей на полупроводниковые приборы и микросхемы [4]. Значения пороговых значений импульсных мощностей отказов полупроводниковых приборов и микросхем приведены в табл.1.1 [4, 35].

Соответствующие данные получены для случая воздействия радиоимпульсов длительностью 1 мкс и частотой заполнения несколько ГГц. В работах [4, 35] констатируется, что энергия импульса, необходимая для отказа цифровых микросхем, больше энергии, необходимой для отказов аналоговых [5, 24 - 56] ИМС. Было установлено, что частота заполнения радиоимпульсов в пределах 1...10ГГц практически не влияет на стойкость микросхем [4, 35].

**Мощности радиоимпульсов, соответствующие отказам  
полупроводниковых приборов и интегральных микросхем [4, 35]**

Вид прибора	Мощность (кВт)
Мощный транзистор	0.2-50
Германиевый транзистор	0.02-5
Переключающий транзистор	0.02-0.3
Маломощный транзистор	0.007-2
Выпрямительный диод	0.5-30
Опорный диод	0.2-8
Переключающий диод	0.015-1
Точечный диод	0.0008-0.03
СВЧ диод	0.0005-0.03
Интегральная схема	0.0008-0.25

Целенаправленных экспериментальных исследований за рубежом по непосредственному воздействию ИЭМП на микросхемы и микроструктурные элементы кристалла, практически не проводилось, а многочисленные публикации за рубежом относятся в основном к исследованию непосредственного воздействия ВИИЭМП на электронные модули или на радиоаппаратуру.

В России имитационный подход к воздействию электромагнитных полей на полупроводниковые приборы и микросхемы на GaAs отражен в работах Громова Д.В., Мальцева П.П., Елесина В.В. [1 - 3, 41 - 43].

### **1.3. Обзор работ по непосредственному воздействию импульсных электромагнитных полей на микросхемы**

Большинство работ, как за рубежом, так и в Украине, в настоящее время посвящено исследованию воздействия ВИЭМП на современную ЭА (высокочастотные блоки спутниковых антенн, компьютеры, телевизоры, мобильные телефоны, бортовую аппаратуру, электронику автомобилей, и т.д.). Подобные исследования проводятся в США: в Air Force Weapons Laboratory, U.S. Army Engineering Research and Development Laboratories,

Stanford Research Institute, Northrop Corporate Laboratories, Sandia Corp, Bell Telephone Laboratories, Kaman Nuclear, Mississippi State University and Sandia Laboratory, U.S. Army Mobility Equipment Research and Development Center, Harry Diamond Laboratories, Boeing Company, Naval Ordnance Laboratory, Sperry Research Center, Mission Research Corp и других научных центрах в США. В государствах Западной Европы подобные исследования проводятся во Франции, Италии, Греции, Германии, Великобритании, Швейцарии. Кроме того, исследования по воздействию ИЭМП на радиоэлектронную аппаратуру проводятся в Израиле, Австралии, Южной Корее, Китае, Японии. В наибольшей степени работы по данному направлению освещены в обзоре К. Баума [25], сделанном в 2001-2002 годах. Этот обзор сделан более чем по 4000 работ, в основном исследователей из США. Большинство этих работ посвящено генерации ЭМИ, но достаточно большое количество работ содержат результаты исследований по воздействию на радиоэлектронную аппаратуру и линии связи. Разрозненные и несистематизированные сведения о воздействии ИЭМП на различные узлы ЭА и ЭА содержатся в [5, 41, 50, 51, 52].

Особо следует отметить исследования по воздействию ЭМИ на ЭА, проводимые в КБ «Молния» (г. Харьков) под руководством профессора Кравченко В.И. [5, 10, 53 - 56].

В России исследования по воздействию ЭМИ на элементную базу и радиоэлектронные компоненты проводятся в Москве (МРТИ, академия Жуковского), С.-Петербурге, Фрязино, Воронеже, Нижнем Новгороде, Новосибирске, Ростове [1 - 3, 7, 11, 41, 42]. Не уменьшая вклада российских ученых, ниже остановимся в основном на подходах к проведению исследований и результатах работы исследовательских групп в Харькове и Симферополе.

В Украине, исследования по непосредственному воздействию ВИИЭМП на различные узлы и устройства ЭА с анализом воздействия на элементную базу, производились в Национальном научном центре (ННЦ) «Харьковский

физико-технический институт» (ХФТИ) под руководством профессора Магды И.И. [17, 43 - 49]. Данные исследования осуществлялись в свободном пространстве. Было отмечено влияние поляризационного фактора (расположения микросхем относительно вектора напряженности падающей электромагнитной волны) на стойкость ИМС и развитие деградационных процессов в микроструктурах кристалла. Влияние поляризационного фактора на стойкость микросхем и развитие деградационных процессов авторы обозначили как «антенный механизм» воздействия ВИИЭМП на ИМС [17, 43 - 49]. Было также отмечено, что в наибольшей степени при воздействии мощных полей выгорает металлизация, в особенности контактные площадки. Импульсная мощность, которая подавалась на микросхемы, была столь велика, что металлизация буквально взрывалась после воздействия, с разбрызгиванием проводящего материала на другие микроструктурные элементы. Прожоги металлизации наблюдались в нескольких местах кристалла, т.е. пробой развивался по нескольким путям, в отличие от случая имитации воздействия. Воздействующим фактором было электромагнитное излучение со спектром, сдвинутым в высокочастотную область. Исследования показали, что воздействие мощных импульсных полей на элементную базу ЭА приводит к катастрофическим отказам полупроводниковых приборов, а, следовательно, и к выходу аппаратуры из строя. Исследования, проведенные в ХФТИ по воздействию ЭМИ на элементную базу и ЭА, легли в основу комплекса стандартов по стойкости ЭА к электромагнитным полям. Исследования по непосредственному воздействию мощных ИЭМП были проведены для микросхем со средним уровнем интеграции (с однослойной металлизацией).

### **1.3.1. Воздействие на микросхемы с низким уровнем интеграции**

В Таврическом национальном университете им. В.И. Вернадского (ТНУ, г. Симферополь), на кафедре радиофизики, исследованиями по

воздействию импульсных электромагнитных полей на микросхемы занимают более 20 лет.

Объектом исследований являются физические процессы в микроструктурных элементах интегральных микросхем при воздействии на них импульсных электромагнитных полей. Эксперименты по непосредственному воздействию мощных импульсных электромагнитных полей, в основном проводились с интегральными микросхемами отечественного производства 140, 155, 174, 315, 555, 559, 561 и 564 серий, биполярной и КМОП-структур, с размерами кристаллов (чипов) от  $1 \times 1$  мм до  $2,5 \times 2,5$  мм, количеством элементов на чипе  $10^3 \dots 10^4$ , с 14 или 16 выводами, с пластмассовым корпусом [57 - 67].

Воздействие электромагнитного излучения на ИМС является результатом взаимодействия дифракционного поля с микроструктурными элементами кристалла. Первым этапом экспериментальных и теоретических исследований является решение дифракционной задачи для определения полей вне и внутри микросхемы. Этот этап необходим для определения значений полей, воздействующих на кристалл микросхемы. Вторым этапом являются исследования электротепловых процессов в разрядных цепях кристалла микросхем, состоящих из проводящих, диэлектрических и активных микроструктур. Оба этапа взаимосвязаны и позволяют исследовать динамику физических процессов в МСЭ кристалла микросхем.

Отправным моментом для построения численно-аналитической модели являются экспериментальные исследования, которые можно осуществлять как в открытом пространстве, так и в закрытых трактах (волноводах). В случае открытого пространства сложно учесть отражения от окружения стенда, а также от элементов схемы, позволяющей тестировать работоспособность ИМС. Для исследования воздействия электромагнитных полей на микросхемы с низким и средним уровнями интеграции в работе [57] предложен волноводный метод. При волноводных экспериментах, достаточно просто исследовать воздействие электромагнитного излучения на



ИМС, а, кроме того, решить дифракционную задачу для микросхемы в волноводе. Ограничивает возможности волноводного метода только одно требование – геометрические размеры микросхемы должны быть много меньше размеров волновода. Для большинства микросхем в 10-сантиметровом диапазоне длин волн данное требование выполняется.

Исследованиям по непосредственному воздействию электромагнитного излучения на микросхемы предшествовали измерения коэффициента стоячей волны ( $K_{СВ}$ ) и ослабления ( $A$ ), позволившие определить соотношение между падающей, отраженной, поглощенной и прошедшей волнами при падении волны на микросхему [57 - 67].

Исследования показали, что результат воздействия не связан с поглощенной микросхемой мощностью, так как на деструкцию микроструктурных элементов на кристалле микросхемы идет незначительная часть мощности в сравнении с мощностью потерь в корпусе микросхемы [57 - 67]. Было установлено, что в отличие от поглощенной мощности, являющейся одной из характерных величин в критерии Вунша-Белла и работах по имитации воздействия полей на микросхемы, при непосредственном воздействии ИЭМП на них, в качестве характеристики воздействующего фактора необходимо брать значение напряженности электрической компоненты поля или плотности потока мощности падающей волны. Как показано в работах [57 - 67], предпочтительней в качестве характеристики воздействующего фактора брать значение напряженности электрической компоненты падающей волны, однозначно связанной с механизмом воздействия. При воздействии ИЭМП к разрядным цепям, включающим микроструктурные элементы кристалла, прикладывается напряжение, приводящее к протеканию через них значительных токов.

На рис.1.1 показан кристалл микросхемы с низким уровнем интеграции и возможные разрядные цепи пробоя микроструктурных элементов. Величина приложенного напряжения при воздействии ИЭМП на ИМС связана с взаимным расположением вектора электрической компоненты поля

и микросхемы, т.е. обусловлена поляризационным фактором (антенный эффект [43, 44]). Это обстоятельство является решающим для выбора характеристики воздействующего фактора – напряженности электрической компоненты падающей волны, а не плотности потока мощности.

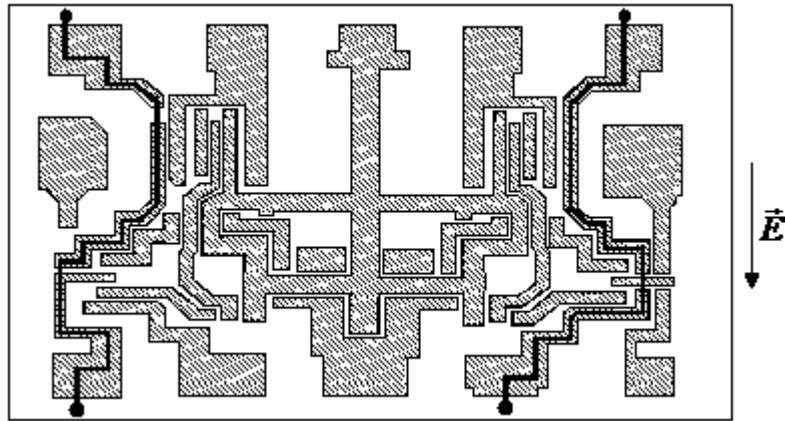


Рис. 1.1. Топология кристалла ИМС и образование разрядных цепей при воздействии электромагнитных полей

В общем случае микросхема и поле могут быть ориентированы произвольно друг относительно друга, что усложняет решение задачи по исследованию воздействия ВИИЭМП на микросхемы. Авторы работ [57] выделили 6 основных ориентаций ИМС относительно вектора напряженности электрического поля волны  $H_{10}$  в волноводном тракте (рис.1.2). Результаты исследований для этих 6 ориентаций позволяют судить о последствиях воздействия электромагнитного излучения на микросхемы и в произвольных ориентациях.

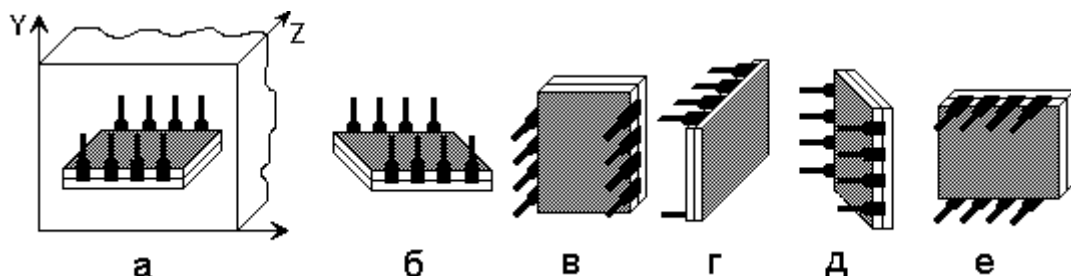


Рис. 1.2. Характерные ориентации ИМС в волноводном тракте [57]

Для тестирования функционального состояния микросхем при воздействии электромагнитных полей на этих ИМС собирались генераторы

импульсов или усилители с использованием внешних элементов. Провода, которыми ИМС подключалась к внешним элементам и цепям питания, объединялись в жгут и экранировались. Генераторы прямоугольных импульсов собирались на логических элементах интегральной микросхемы. Частоты импульсов собранных генераторов были в пределах  $10^3 \dots 10^5$  Гц, т.е. как минимум на порядок выше частоты следования радиоимпульсов магнетронного генератора (100 Гц).

Тестирование работоспособности цифровых микросхем (сбои, катастрофические отказы) при воздействии импульсных полей осуществлялось с помощью осциллографа, подключённого к выходу генератора, а тестирование работоспособности аналоговых микросхем осуществлялось по изменению коэффициента усиления и изменению формы прямоугольного импульса при прохождении его через усилитель. После воздействия импульсных электромагнитных полей ИМС подвергались послойному травлению для анализа их кристаллов.

На рис. 1.3 приведена диаграмма статистического распределения микроструктурных элементов, разрушение которых приводит к катастрофическим отказам микросхем. Из диаграммы на рис.1.3 следует, что основной причиной выхода их из строя является прожог токопроводящих дорожек и контактных площадок (рис. 1.3) [57, 61, 62].



Рис. 1.3. Статистическое распределение функционально значимых МСЭ, выход которых из строя привел к отказам ИМС при воздействии ИЭМП

Согласно статистическим данным (рис. 1.5) 91% микросхем биполярной и 69% с КМОП - структурами выходят из строя при воздействии импульсных электромагнитных полей вследствие прожога проводящих микроструктурных элементов. В свою очередь из проводящих структур более половины отказов приходится на контактные площадки.

Большой выход из строя проводящих элементов, в сравнении с другими микроструктурными элементами, обусловлен протеканием токов большой плотности через проводящие дорожки и контактные площадки, а также их пространственной и омической неоднородностью.

Результаты экспериментальных исследований [56 - 66] показали следующее:

- полученные статистические данные причин выхода микросхем со средним уровнем интеграции из строя при воздействии ВИИЭМП достаточно близки к подобным при имитации воздействия [4, 35];

- в отличие от имитационного подхода при непосредственном воздействии полей деградационные явления в МСЭ развиваются практически по всей поверхности кристалла, наблюдаются центры накопления деградаций, прожоги микроструктурных элементов могут происходить в нескольких цепях разряда;

- на фотографиях кристаллов микросхем, вышедших из строя, можно наблюдать все этапы развития электротепловых процессов от зарождения деградаций до прожога металлизации;

- количество деградационных центров в кристалле и стойкость микросхем определяются ориентацией микросхем относительно ВИИЭМП.

Результатом воздействия электромагнитного излучения на микросхемы являются сбои в работе, деградации в микроструктурных элементах и катастрофический отказ. Пороговые значения полей данных проявлений в значительной степени определяются поляризационным фактором [57, 58]. В положениях «в», «г», «д», «е» (рис. 1.2) грань кристалла с микроструктурными элементами параллельна вектору напряженности

электрического поля и к МСЭ прикладывается наибольшее дополнительное напряжение за счет воздействия ВИИЭМП. Стойкость микросхем в этих положениях наименьшая. Для вывода из строя микросхем с биполярными структурами достаточно одного импульса с напряженностью электрического поля в 60...70 кВ/м, а для микросхем с КМОП-структурами – 80...90 кВ/м. В положениях микросхем «а» и «б» (рис. 1.2), для которых грань кристалла с МСЭ перпендикулярна вектору напряженности электрического поля, пороговые значения напряженности электрического поля на порядок выше, чем для ориентаций «в», «г», «д», «е».

Деграционные явления в микроструктурных элементах ИМС при воздействии ВИИЭМП начинаются со значений напряженности поля, когда наблюдаются первые отклонения от нормальной работы генераторов или усилителей, собранных на этих микросхемах. Проявляются эти деграционные явления в микроструктурных элементах в виде точечных (локальных) прожогов металлизации. В положениях микросхем, когда грань кристалла с МСЭ параллельна вектору напряженности электрического поля волны  $H_{10}$  (положения «в», «г», «д», «е», рис. 1.2), деграционные явления начинаются при значениях напряженности поля в 2...7 кВ/м для ИМС биполярных, и при 5...10 кВ/м для микросхем КМОП - структур. Для этих ориентаций ИМС относительно ВИИЭМП можно констатировать, что деграционные явления в микроструктурных элементах начинаются при значениях напряженности поля на порядок меньших, чем пороговые значения поля, соответствующие катастрофическому отказу. В ориентациях «а» и «б» (рис. 1.2) деграционные явления в МСЭ при воздействии ВИИЭМП проявляются при напряженностях полей 60...70 кВ/м.

Проведенные исследования [57 - 67] показали, что можно выделять не шесть ориентаций микросхем относительно вектора электрической компоненты воздействующего поля, а всего лишь две группы ориентаций: 1) плоскость кристалла с микроструктурными элементами параллельна вектору электрической компоненты воздействующего поля - ориентации «в», «г»,

«д», «е» (рис. 1.2); 2) плоскость кристалла с микроструктурными элементами перпендикулярна вектору электрической компоненты действующего поля - ориентации «а» и «б» (рис. 1.2).

### 1.3.2. Модель взаимодействия импульсных электромагнитных СВЧ полей с микросхемами низкого и среднего уровня интеграции

Для исследования роли параметров поля и характеристик микросхем на результат воздействия в работах [61, 63, 64] предложена численно-аналитическая модель взаимодействия электромагнитных полей с микроструктурными элементами. Она включает в себя решение дифракционной задачи для микросхемы в волноводе путем нахождения поля вблизи кристалла микросхем и решение электротепловой задачи для модели кристалла микросхем. Данная модель кристалла ориентирована на исследование электротепловых процессов в микросхемах с низким и средним уровнями интеграции (микросхем с однослойной металлизацией) и представлена на рис. 1.4.

При воздействии ИЭМП (напряжение прикладывается вдоль направления ОХ, рис. 1.4) токи проводимости и смещения проходят по слою с Al и SiO<sub>2</sub> (цепь разряда), вызывая их нагревание вплоть до теплового разрушения. При этом элементы цепи разряда обмениваются теплом с прилегающими слоями и корпусом микросхемы [61, 63, 64].

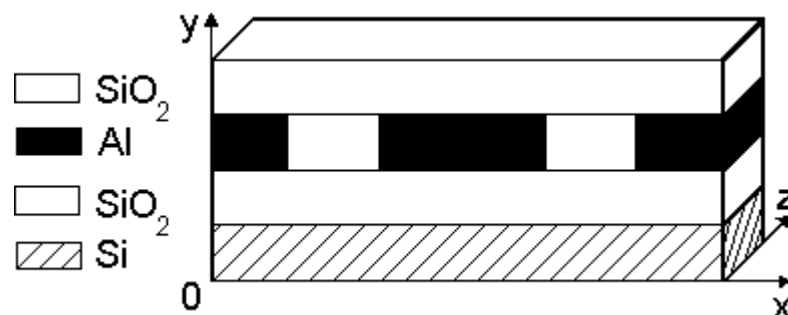


Рис. 1.4. Модель кристалла микросхемы с однослойной металлизацией [61]

Разработанная модель взаимодействия импульсных электромагнитных полей с микроструктурными элементами позволила исследовать влияние формы импульса, его длительности, скажности на стойкость микросхем [60, 63], показать влияние неоднородности проводящих МСЭ на работоспособность ИМС при воздействии ИЭМП [63 - 67].

Предложенная теория достаточно хорошо зарекомендовала себя для микросхем с низким и средним уровнями интеграции, позволяя прогнозировать их стойкость, что подтверждается экспериментальными данными. С помощью данной модели было установлено, что для проводящих микроструктурных элементов выполняется критерий Вунша-Белла [26].

Для активных микроструктурных элементов в работах [68 - 71] предложены модели транзисторов: полевых Si - и GaAs - транзисторов с затвором Шоттки (ПТШ). В качестве исходного в модели используется кинетическое уравнение, решение которого осуществляется методом крупных частиц. Модель ПТШ разработана специально для исследования физических процессов в напряженных токовых и тепловых режимах, сопровождаемых лавинными процессами с переходом в тепловой пробой.

#### **1.4. Современные микросхемы, их отличия от микросхем с низким и средним уровнями интеграции**

Переход в микросхемах от алюминиевых проводящих структур к медным, был обусловлен двумя основными причинами: во-первых, сильной пространственной и омической неоднородностью алюминиевых линий, а во-вторых, низкой проводимостью и теплопроводностью, что особенно важно для повышения быстродействия ИМС.

В то же время при использовании медных линий в ИМС имеются свои трудности: медь, особенно при нагревании, сильно диффундирует в кремний. В современных микросхемах для создания барьера, препятствующего

диффузии меди в кремний, используют защитные танталовые пленки, разделяющие медные линии с кремнием и оксидом кремния.

Во многих современных интегральных микросхемах применяется защита от электростатического разряда (ЭСР). Но и более высокие у меди тепло- и электропроводность, а также наличие в ИМС защиты от ЭСР не могут спасти микросхемы от статического электричества. На рис. 1.5 приведены фотографии прожога медных линий при воздействии статического электричества [16]. Медные в танталовой оболочке линии разрушались при воздействии одиночного видеоимпульса напряжения с амплитудой порядка 7,5 кВ (5 кВ – напряжение, на которые рассчитаны защитные цепи ЭСР ИМС [16]).

Приведенный выше краткий обзор показывает, что современные микросхемы сильно отличаются от ИМС, для которых ранее были проведены исследования по воздействию импульсных электромагнитных полей и разработана численно-аналитическая модель, позволяющая прогнозировать результат при таком воздействии.



Рис. 1.5. Тепловое разрушение медных линий при воздействии статического электричества [16]

Основные отличия современных микросхем от тех, для которых ранее были проведены исследования по воздействию электромагнитного излучения, состоят в следующем:



- Уменьшились размеры базовой ячейки на кристалле, а, следовательно, и размеры микроструктурных элементов. Размеры активных микроструктурных элементов (транзисторов) уменьшились более чем в 3 раза, а толщина проводящих пленок уменьшилась более чем в 10 раз. Степень интеграции (количество активных микроструктурных элементов на единицу площади) увеличилась на 3 – 5 порядков.
- Вместо алюминия в качестве материала для проводящих микроструктурных элементов в основном используется медные проводники в танталовой оболочке.
- В отличие от трехслойных структур в кристалле с однослойной металлизацией, в современных микросхемах используется металлизация, содержащая десять и более слоев.
- Практически все современные микросхемы имеют защиту от электростатического электричества. Ранее рассмотренные микросхемы такой защиты не имели.
- В настоящее время имеет место тенденция к экранированию микросхем, в первую очередь микропроцессоров, микроконтроллеров, микросхем памяти, микросхем приемников и передатчиков, а также микросборок из микросхем с подложками на Si и GaAS (системы SiP). Проведенные ранее исследования вообще не затрагивали вопросов по воздействию электромагнитного излучения на экранированные микросхемы.

### 1.5. Выводы по разделу

Обзор по воздействию ВИИЭМП на полупроводниковые приборы, а также обзор современного состояния и тенденций развития микроэлектроники позволяет сделать следующие выводы:

1. Имитационный подход позволяет исследовать поведение дискретных полупроводниковых приборов, микроструктурных элементов ИМС в напряженных токовых и тепловых режимах, однако он не связывает характеристики воздействующего фактора и объекта с результатом воздействия.
2. Для исследования воздействия ВИИЭМП на современные микросхемы целесообразно использовать волноводные методы с непосредственным воздействием электромагнитного излучения на них. Методики, разработанные в ТНУ, позволили связать характеристики воздействующего фактора, характеристики микросхем с результатом воздействия, определить пороговые значения воздействующего излучения, при которых начинаются сбои в работе ИМС, деградиационные явления и происходят катастрофические отказы. Экспериментальные исследования способствовали созданию численно-аналитической модели взаимодействия ИЭМП с микроструктурными элементами рассматриваемого класса микросхем.
3. Волноводные исследования по непосредственному воздействию ВИИЭМП были проведены для микросхем, разработанных более 40 лет назад. Современные ИМС значительно отличаются по степени интеграции, технологии, используемым материалам, по своему функциональному назначению [72 - 89]. Исследований по воздействию ВИИЭМП на современные микросхемы не проводилось.

## РАЗДЕЛ 2

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ ИМПУЛЬСНЫХ СВЧ ПОЛЕЙ НА СОВРЕМЕННЫЕ МИКРОСХЕМЫ

Обзор работ по воздействию ВИИЭМП на микросхемы и анализ результатов, приведенных в этих работах, позволяет конкретизировать основные задачи диссертационной работы. Для исследования физики процессов напряженных токовых и тепловых режимов МСЭ при воздействии ВИИЭМП на современные микросхемы целесообразно использовать волноводные методы и решить следующие задачи:

- выделить основные типы микросхем, которые являются базовыми для построения электронной аппаратуры и которые в настоящее время применяются в наибольшей степени;
- разработать схемы тестирования функционального состояния микросхем;
- провести цикл измерений по определению соотношений между волнами при падении электромагнитного излучения на микросхемы;
- провести эксперименты по непосредственному воздействию ВИИЭМП на современные микросхемы и проанализировать результаты;
- разработать электротепловую модель кристалла современных микросхем;
- численно-аналитическими методами исследовать физические процессы в цепях разряда кристалла микросхем;
- на основании проделанных экспериментальных и теоретических исследований предложить методы прогноза стойкости современных микросхем, функционирующих в напряженных токовых и тепловых режимах;
- выдать рекомендации по повышению стойкости микросхем к воздействию мощного импульсного электромагнитного излучения.

Основным критерием адекватности любой теоретической модели являются экспериментальные данные. В особенности это относится к модели взаимодействия импульсных электромагнитных полей с микроструктурными элементами кристаллов современных микросхем. Невозможность учета всей совокупности микроструктурных элементов кристалла требует разработки такой модели, которая, с одной стороны учитывает основные закономерности физических процессов при воздействии импульсных электромагнитных полей, а с другой – позволяет прогнозировать стойкость микросхем при таком воздействии. Естественно, в этом случае без экспериментальных исследований обойтись просто невозможно.

Исследования по воздействию мощных ЭМИ на различные устройства с ЭА (самолеты, автомобили, космические модули и т.д.), на бытовую ЭА осуществляются, как правило, коллективами ученых: ННТЦ «ХФТИ» (г. Харьков), руководитель – проф. Магда И.И.; КБ «Молния», руководитель – проф. Кравченко В.И., (Харьковский национальный технический университет «ХПИ»). Для исследования воздействия мощных ЭМИ созданы стационарные стенды для испытания и сертификации различных устройств с ЭА [5, 47, 49].

Исследования по непосредственному воздействию импульсных электромагнитных СВЧ полей на микросхемы с целью определения их функционального состояния и стойкости сами по себе представляют сложную и важную для физики приборов, элементов и систем задачу. Целесообразно использовать для исследования воздействия ВИИЭМП на современные микросхемы установку и методики, которые применялись для исследования на микросхемы со средним уровнем интеграции, соответственно адаптировав их к современным ИМС.

При непосредственном воздействии импульсных электромагнитных СВЧ полей на микросхемы в волноводе измеряется прошедшая мощность, а в качестве характеристики воздействующего фактора в критерии стойкости микросхем используется значение напряженности электрической

компоненты падающей волны. Экспериментам по воздействию ВИИЭМП на ИМС должны предшествовать исследования дифракции волн на микросхеме в волноводе, что необходимо для определения соотношений между прошедшей, падающей, отражённой и поглощенной волнами.

С учетом этого в данном разделе решаются следующие задачи:

- в дальней зоне экспериментально решается дифракционная задача для микросхемы в волноводе (находится связь между амплитудами падающей, отраженной, поглощенной и прошедшей волнами);
- обосновываются и разрабатываются схемы тестирования работоспособности для основных классов современных микросхем: микроконтроллеров с микропроцессорами, микросхем памяти, аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, микросборок приемников и передатчиков, модулей микросхем с АЦП и ЦАП, модулей с микросборками приемников и передатчиков;
- обобщаются и анализируются результаты исследований по воздействию мощных импульсных электромагнитных полей на современные микросхемы, микросборки и электронные модули;
- определяются параметры полей и микросхем, необходимые для разработки модели взаимодействия ВИИЭМП с микроструктурными элементами современных ИМС.

### **2.1. Соотношение между волнами при дифракции на микросхеме в волноводе**

При падении электромагнитной волны на объект в волноводе падающая волна делится на отраженную, поглощенную и прошедшую волны. Решение дифракционной задачи в волноводе предполагает нахождение амплитудных и фазовых соотношений между волнами, как в ближней, так и в промежуточной и дальней зонах дифракции. В дальней зоне незатухающей является только волна  $H_{10}$ . Соотношение между амплитудами падающей,

отраженной и прошедшей волн можно найти экспериментально по известным значениям коэффициента стоячей волны ( $K_{СВ}$ ) и ослабления ( $A$ ), характеризующих режим работы волноводного тракта.

### **2.1.1. Связь характеристик волноводных режимов с волнами в волноводе**

Измерения  $K_{СВ}$  и ослабления  $A$  для современных микросхем и электронных модулей в волноводе проводились на стандартном панорамном измерителе Р2-56 в полосе частот  $\Delta f = 2,59...3,94$  МГц в волноводной измерительной секции с поперечным сечением  $34 \times 72$  мм или  $45 \times 90$  мм. Микросхемы фиксировались в пенопластовой вставке и устанавливались в измерительной секции в одном из характерных положений (рис. 2.1).

Исследования, ранее проведенные для микросхем с низким и средним уровнями интеграции [57], позволили выделить две группы положений ИМС в волноводе: 1) плоскость кристалла параллельна вектору электрической компоненты поля, 2) плоскость перпендикулярна вектору электрической компоненты (рис. 2.2). Если грань кристалла с микроструктурными элементами не квадрат, а прямоугольник и, кроме того, выводы микросхемы расположены неравномерно по периметру корпуса, тогда наряду с ориентацией «б», необходимо вводить ориентацию «в» (рис. 2.2). В ориентациях «б» и «в» дополнительные напряжения, прикладываемые к кристаллу ИМС при воздействии ВИИЭМП, могут сильно отличаться друг от друга. Аналогично и для экранированных микросхем необходимо вводить дополнительную ориентацию экраном или выводами к падающей волне.

Схемы измерения  $K_{СВ}$  и ослабления  $A$  панорамным измерителем Р2-56 стандартные и приводятся в инструкции к данному прибору. Диапазон измерений  $K_{СВ}$  Р2-56 составляет  $1,05...5$ , диапазон измерения ослабления  $0...35$  дБ. Допустимая погрешность измерений зависит от значений измеряемых параметров и составляет:

- при измерении  $K_{СВ} \leq 2$  погрешность измерений не превышает  $\pm 10\%$ , при  $K_{СВ}$  от 2 до 3 погрешность не превышает  $16,8\%$ ;
- при измерении ослабления  $A$  до 2дБ погрешность не превышает  $\pm 0,6$  дБ, при ослаблении до 4 дБ погрешность измерения  $\pm 0,7$  дБ.

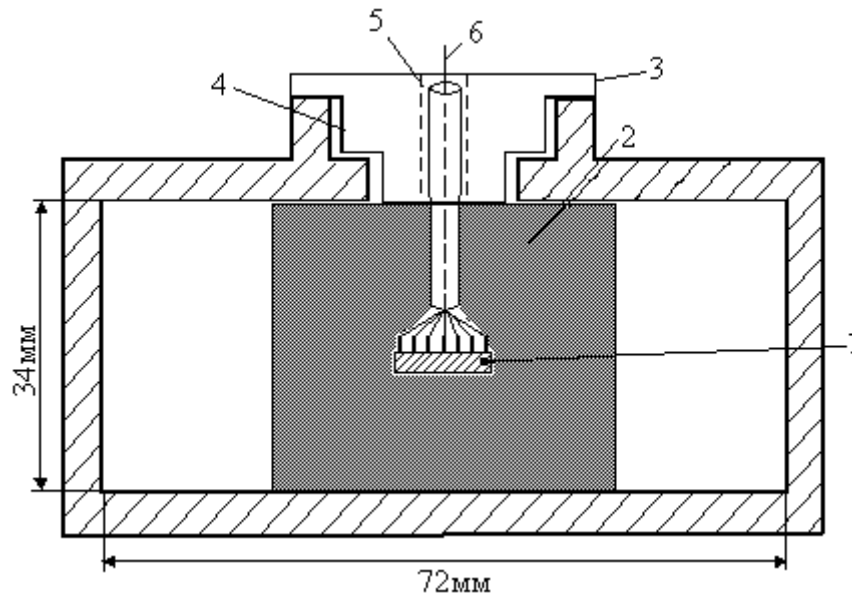


Рис. 2.1. Поперечное сечение измерительной секции для исследований воздействия ЭМП на ИМС: 1 – ИМС; 2 – пенопластовая вставка; 3 – заглушка; 4 – устройство микроволнового согласования (короткозамыкатель  $\lambda/4$ ); 5 – отверстие (диаметр -  $\varnothing = 2$  мм); 6 – жгут проводов [94 - 104].

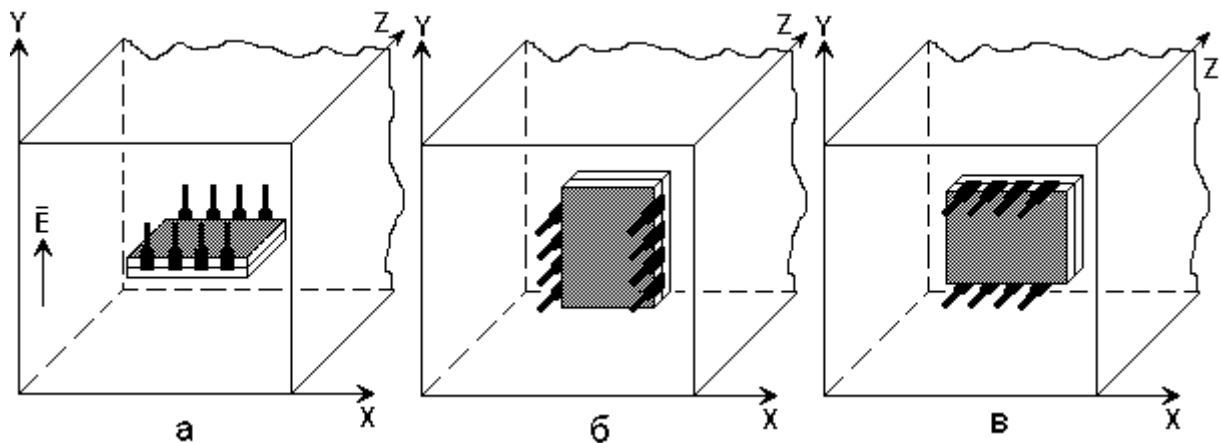


Рис. 2.2. Характерные положения микросхемы в волноводе

В широкой стенке измерительной секции было небольшое отверстие для подводящих проводов, связывающих микросхему с внешними элементами, компьютером и источником питания, кроме того, в волноводе размещалась пенопластовая вставка. В этой связи необходимо было определить влияние этих факторов на  $K_{СВ}$  и ослабление при отсутствии микросхемы. Экспериментальные исследования показали, что отверстие в измерительной секции и пенопластовая вставка не вносят каких-либо заметных изменений в волноводный тракт. Значения  $K_{СВ}$  в волноводе с отверстиями и вставкой не превышали 1,07 (без них -  $K_{СВ} \leq 1,05$ ), а при установке измерительной секции с сечением 45×90мм значения  $K_{СВ}$  не были выше 1,08.

Значения  $K_{СВ}$  при измерениях определились по соотношению [91, 92]:

$$K_{СВ} = \frac{1 + |\dot{\Gamma}|}{1 - |\dot{\Gamma}|}, \quad (2.1)$$

где  $\dot{\Gamma} = \dot{E}_{ОТР} / \dot{E}_{ПАД}$  – комплексный коэффициент отражения;

$\dot{E}_{ПАД}$  и  $\dot{E}_{ОТР}$  – комплексные значения напряженности электрического поля падающей и отраженной волн.

Поглощающие свойства неоднородностей в волноводе характеризуются с помощью ослабления [91, 92]:

$$A = 10 \lg ( P_{ПАД} / P_{ПРОШ} ), \quad (2.2)$$

где  $P_{ПАД}$  – мощность падающей волны;

$P_{ПРОШ}$  – мощность прошедшей волны.

Мощности падающей и отраженной волн пропорциональны напряженностям электрических полей падающей и отраженной волн, как  $P_{ПАД} \sim E_{ПАД}^2$ ,  $P_{ОТР} \sim E_{ОТР}^2$ . С учетом этого соотношение для  $K_{СВ}$  (2.1) можно записать в следующем виде [91, 92]:



$$K_{CB} = \frac{1 + \sqrt{P_{OTR}} / \sqrt{P_{ПАД}}}{1 - \sqrt{P_{OTR}} / \sqrt{P_{ПАД}}} . \quad (2.3)$$

Из соотношения (2.3) можно выразить отношение мощностей  $P_{OTR} / P_{ПАД}$  через  $K_{CB}$ :

$$\frac{P_{OTR}}{P_{ПАД}} = \frac{(K_{CB} - 1)^2}{(K_{CB} + 1)^2} . \quad (2.4)$$

Из формулы для ослабления (2.2) следует отношение мощностей прошедшей и падающей волн:

$$\frac{P_{ПРОШ}}{P_{ПАД}} = 10^{0,1A} . \quad (2.5)$$

Баланс мощностей при воздействии электромагнитных полей на ИМС записывается в виде [91, 92]:

$$P_{ПАД} = P_{OTR} + P_{ПОГЛ} + P_{ПРОШ} , \quad (2.6)$$

или

$$P_{OTR} / P_{ПАД} = 1 - P_{ПОГЛ} / P_{ПАД} - P_{ПРОШ} / P_{ПАД} , \quad (2.7)$$

откуда

$$P_{ПОГЛ} / P_{ПАД} = 1 - P_{OTR} / P_{ПАД} - P_{ПРОШ} / P_{ПАД} . \quad (2.8)$$

Используя (2.4), (2.5), (2.8) выразим отношение  $P_{ПОГЛ} / P_{ПАД}$  через  $K_{CB}$  и ослабление:

$$\frac{P_{ПОГЛ}}{P_{ПАД}} = \left[ 1 - 10^{0,1A} - \frac{(K_{CB} - 1)^2}{(K_{CB} + 1)^2} \right] . \quad (2.9)$$

Таким образом, считая падающую мощность известной, можно найти значения мощностей отраженной, поглощенной и прошедшей волн.

В панорамном измерителе коэффициент стоячей волны  $K_{СВ}$  и ослабление  $A$  находятся по значениям отраженной и прошедшей волн в дальней зоне, т.е. с помощью панорамного измерителя Р2-56 по существу решается дифракционная задача для дальней зоны в длинноволновом приближении (в приближении одной волны и без фазовых соотношений между волнами). Панорамный измеритель Р2-56 имеет уровневую погрешность, зависящую от значений  $K_{СВ}$ : при  $2 < K_{СВ} < 5$  она не превышает 16,8 %. Несмотря на погрешность измерения величин  $K_{СВ}$  и ослабления основные закономерности по влиянию различных компонент микросхем на соотношение между волнами, а самое главное – ориентации ИМС относительно ИЭМП, можно оценить исходя из проведенных исследований.

Наиболее распространенная схема волноводных исследований при воздействии мощных ИЭМП на объекты содержит конечным элементом тракта установки калориметрическую секцию ваттметра, которая одновременно является согласованной нагрузкой. Такая компоновка волноводного тракта использовалась в специальной установке по непосредственному воздействию мощных ИЭМП на микросхемы. Значения падающей, отраженной и поглощенной мощностей находятся по измеренным ваттметром значениям прошедшей мощности [91, 92]:

$$P_{\text{ПАД}} = 10^{-0,1A} \cdot P_{\text{ПРОШ}}, \quad (2.10)$$

$$P_{\text{ОТР}} = 10^{-0,1A} \frac{(K_{СВ} - 1)^2}{(K_{СВ} + 1)^2} P_{\text{ПРОШ}}, \quad (2.11)$$

$$P_{\text{ПОГЛ}} = \left( 10^{-0,1A} - \frac{(K_{СВ} - 1)^2}{(K_{СВ} + 1)^2} - 1 \right) P_{\text{ПРОШ}}. \quad (2.12)$$

Напряженность электрического поля в прямоугольном волноводе в приближении одной волны определялась по следующему соотношению [87]:

$$E_m = \frac{\sqrt{T/\tau_{II}} \cdot \sqrt{P_{ПАД}/ab} \cdot \sqrt[4]{\mu_0/\varepsilon_0}}{\sqrt[4]{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}} = 920 \sqrt{(T/\tau_{II}) \cdot P_{ПАД}} \text{ (В/м)}, \quad (2.13)$$

где  $a, b$  – поперечные размеры волновода;

$T$  – период огибающей радиоимпульса;

$\tau_{II}$  – длительность радиоимпульса;

$\lambda$  – длина волны радиочастоты;

$\lambda_{кр}$  – критическая длина волновода;

$\varepsilon_0, \mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные;

$P_{ПАД}$  – средняя мощность падающей волны.

Значения напряженности электрической компоненты поля падающей волны, при известных значениях ослабления  $A$  и значениях мощности прошедшей волны (измеренной ваттметром) определяются из следующего соотношения:

$$E_m = 920 \sqrt{(T/\tau) \cdot 10^{-0,1A} \cdot P_{ПРОШ}}. \quad (2.14)$$

В качестве меры воздействия ВИИЭМП на микросхемы берутся значения напряженности электрической компоненты поля, вычисляемые по соотношению (2.14). С учетом погрешности измерения ослабления (2.13), погрешность измерений электрической компоненты поля составляет:

- не более 5%, при значениях ослабления до 2 дБ;
- не более 7%, при значениях ослабления до 4 дБ.

С учетом погрешностей измерений ослабления и прошедшей мощности (2.14), погрешность измерения электрической компоненты падающей волны составляет:

- в ориентациях микросхем, когда плоскость кристалла с микроструктурными элементами параллельна вектору электрической

компоненты поля - значения ослабления ( $2\text{дБ} < A < 4\text{дБ}$ ), погрешность измерения пороговых значений напряженности электрической компоненты поля при катастрофических отказах ИМС не превышает 12% ( $2\text{Вт} < P_{\text{CP}} < 4\text{Вт}$ ); погрешность измерения пороговых значений полей, при которых начинаются сбои в работе ИМС или электронных модулей, не превышает 18%;

- в ориентациях, когда плоскость кристалла с микроструктурными элементами перпендикулярна вектору электрической компоненты поля (значения ослабления ( $A < 2\text{дБ}$ ), погрешность измерения пороговых значений напряженности электрической компоненты поля при катастрофических отказах ИМС не превышает 10% ( $2\text{Вт} < P_{\text{CP}} < 4\text{Вт}$ ); погрешность измерения пороговых значений полей, при которых начинаются сбои в работе микросхем или электронных модулей, не превышает 16%.

## **2.2. Определение соотношений между волнами при дифракции полей на современных микросхемах и электронных модулях в волноводе**

Объем продаж микросхем памяти, микропроцессоров, микроконтроллеров, приемников, передатчиков, АЦП и ЦАП составляет в настоящее время более 90% объема продаж всех видов ИМС [72 - 85], поэтому они взяты для последующих исследований.

Соотношение между падающей, отраженной, поглощенной и прошедшей волнами находились для микросхем ATtiny15, PIC16F628-20I/P (микроконтроллеры, включающие в себя микропроцессоры), 24LC16, 27C256-20FA (микросхемы памяти), TLC549IP и AD7243 (аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи), микросборок RX600x/TX600x (экранированные СВЧ микросборки приемников и передатчиков) и электронных модулей, содержащих микросхемы АЦП - ЦАП и микросборки приемников, передатчиков.

Значения  $K_{CB}$  и ослабления,  $a$ , следовательно, и соотношение между волнами, в основном определяются материалом корпуса (пластмассовый либо металлический) и его размерами [72 - 85]. Стойкость микросхем к воздействию ВИИЭМП определяется размерами кристалла и ориентацией микросхем относительно поля. В табл. 2.1 представлены геометрические размеры микросхем и количество ИМС, подвергавшихся воздействию. Для микросборок приемников, передатчиков указаны как размеры всей подложки, так и размеры собственно кристалла.

В соответствие с данными, приведенными в табл. 2.1, можно выделить в исследуемых классах микросхем три группы с близкими значениями геометрических размеров и материала корпусов.

Таблица 2.1

### Геометрические характеристики микросхем

ИМС	Функциональное назначение	Размеры корпуса, мм	Площадь кристалла, мм	Кол - во выводов	Размеры модуля, Мм
ATtiny15, 20 шт.	Микроконтроллер	9,2×6×3,3	3,5×3	8	
PIC16F628, 40 шт.	Микроконтроллер	22,8×6,3×3	4,5×3,5	18	
24LC16, 20 шт	Память	9,2× 6× 3,3	1,8×1,8	8	
27C256-20FA, 20 шт.	Память	27,6×13,3×1	4,5×4,8	28	
TLC549IP, 20 шт.	АЦП	9,2×6×3,3	1,8×1,8	8	16×14×12
AD7243, 20 шт.	ЦАП	22×6,4×4,5	4,5×4×1	16	24×14×12
RX600x, 20 шт.	Приемник	10×6,8×1.9	5 ×8 (1,6 ×1,5)	20	16×16×7
TX600x, 20 шт.	Передатчик	10×6,8×1.9	5 ×8 (1,6 ×1,5)	20	16×16×7

К первой группе относятся микросхемы ATtiny15, 24LC16, TLC549IP с наибольшими размерами пластмассовых корпусов не более 10мм. Ко второй группе относятся микросхемы PIC16F628-20I/P, 27C256-20FA и AD7243 с наибольшими размерами корпусов порядка 20мм. К третьей группе - экранированные ИМС приемников и передатчиков RX600x/TX600x с размерами корпусов не более 10мм. Отдельной группой в исследованиях по

воздействию ВИИЭМП были представлены электронные модули, в состав которых входят перечисленные микросхемы.

Измерения  $K_{CB}$  и ослабления для микросхем 1-й и 3-й групп производились в измерительной секции с сечением  $34 \times 72$  мм, для второй группы и электронных модулей – в секции сечением  $45 \times 90$  мм.

Работы, связанные с экспериментальным решением волноводной дифракционной задачи, предшествовали непосредственному воздействию ВИИЭМП на микросхемы. Ниже представлены зависимости  $K_{CB} = K_{CB}(f)$ ,  $A = A(f)$ , а также соотношения между волнами для ATtiny15 и PIC16F628-20I/P. Подобные исследования были проведены для всех типов микросхем и электронных модулей, перечисленных выше. В Приложении А приведены зависимости  $K_{CB}$  и ослабления от частоты для микросборок приемников, передатчиков и электронных модулей с микросборками, снятые с помощью панорамного измерителя.

На рис. 2.3 приведены зависимости  $K_{CB}$  для ATtiny15 и PIC16F628-20I/P. Поскольку геометрические размеры микросхем сильно отличаются, поэтому и значения  $K_{CB}$  значительно отличаются друг от друга. Значение коэффициента стоячей волны определяет долю отраженной от падающей, а уровень отраженной волны зависит от соотношения площадей микросхем и поперечного сечения волновода. В ориентациях «б» и «в» (рис. 2.2) это отношение наибольшее, поэтому величины  $K_{CB}$  получаются, намного большими, чем в ориентации «а». Геометрические размеры ATtiny15 почти в два раза меньше, чем у микросхем PIC16F628-20I/P, поэтому в одинаковых ориентациях  $K_{CB}$  у PIC16F628-20I/P больше, чем у ATtiny15 (рис. 2.3).

Коэффициент ослабления  $A$  связывает между собой значения амплитуд падающей и прошедшей волн. На рис. 2.4 представлены графики зависимостей коэффициента ослабления для различных ориентаций ATtiny15 и PIC16F628-20I/P в волноводе.

Как и для отраженной волны, амплитуда прошедшей волны, определяется геометрическими размерами микросхемы и её различными ориентациями по отношению к падающей волне. Наиболее, прошедшая волна ослабляется в

ориентациях «б» и «в», в наименьшей степени в «а» (рис. 2.4). В одинаковых ориентациях ослабление волны тем больше, чем больше размеры корпуса ИМС.

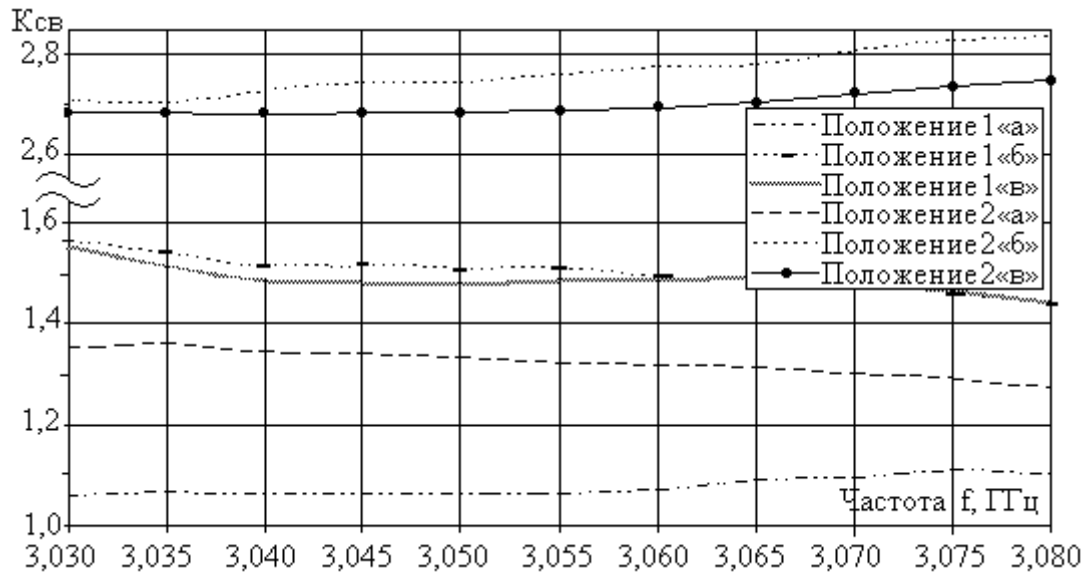


Рис. 2.3. Зависимости  $K_{CB}$  от частоты для микросхем при их различных положениях в волноводе (рис. 2.2): 1 – ИМС ATtiny15, 2 – PIC16F628-20I/P

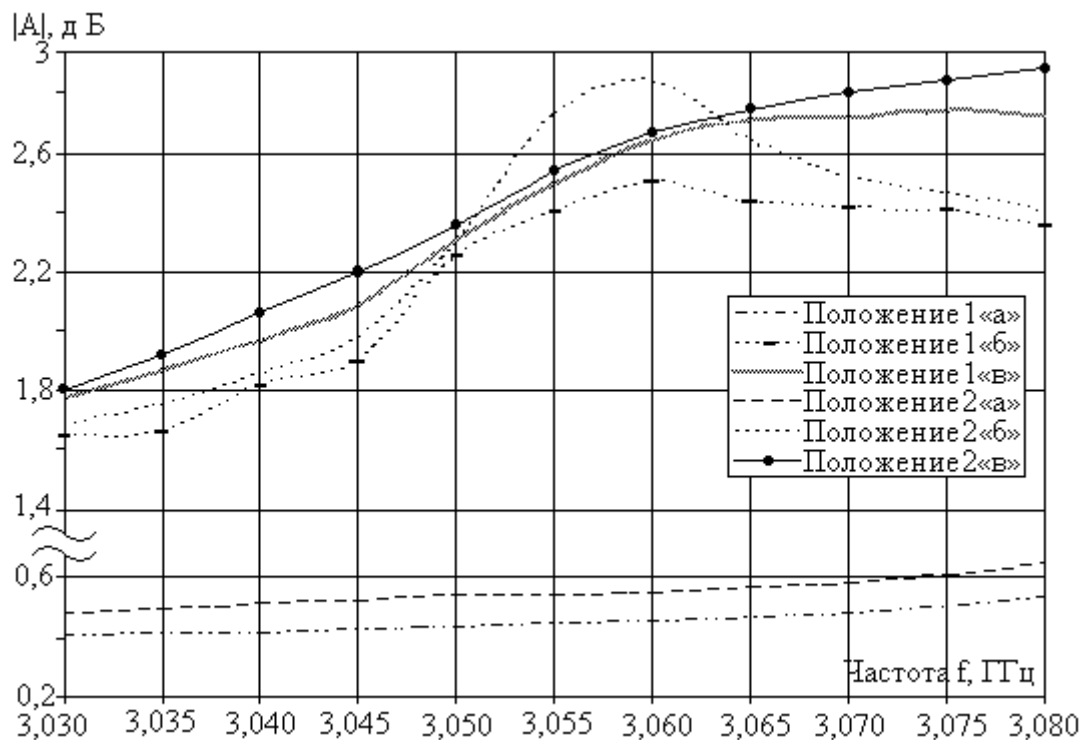


Рис. 2.4. Зависимости коэффициента ослабления от частоты для микросхем при их различных положениях в волноводе (рис. 2.2):

1 – ИМС ATtiny15; 2 – PIC16F628

Значения  $K_{СВ} = K_{СВ}(f)$  и ослабления  $A=A(f)$  являются исходными для получения зависимостей относительных мощностей  $P_{ОТР} / P_{ПАД}$ ,  $P_{ПРОШ} / P_{ПАД}$ ,  $P_{ПОГЛ} / P_{ПАД}$  от частоты по соотношениям (2.5), (2.6), (2.10). На рис. 2.5 – 2.7 приведены графики соответствующих зависимостей относительных мощностей от частоты для ATtiny15 и PIC16F628-20I/P.

Значения  $P_{ОТР}/P_{ПАД}$  однозначно связаны со значениями  $K_{СВ}$  (2.5) и они тем больше, чем больше площадь микросхемы по отношению к падающей волне  $H_{10}$ . Значения  $P_{ПОГЛ}/P_{ПАД}$  находились из баланса мощностей (2.8) и выражений для относительных мощностей  $P_{ОТР}/P_{ПАД}$  и  $P_{ПРОШ}/P_{ПАД}$ , выраженных через  $K_{СВ}$  и ослабление (2.5 и 2.6).

Аналогично были получены данные по  $K_{СВ}$  и ослаблению, относительных мощностей волн для электронных модулей с микросхемами АЦП, ЦАП и микросборками приемников и передатчиков (Приложение Б).

Одним из возможных способов повышения стойкости ИМС при воздействии ВИИЭМП является их экранирование. С целью проверки эффективности этого метода защиты от электромагнитного излучения были проведены исследования влияния частичного экранирования микросхем в пластмассовом корпусе с помощью наклейки фольги на него. Соответствующие зависимости  $K_{СВ}$  и ослабления были измерены и использовались в экспериментах по воздействию ВИИЭМП на частично экранированные микроконтроллеры и микросхемы памяти.

Следует отметить, что, как и в случае микросхем с низким уровнем интеграции, экспериментально были найдены значения  $K_{СВ}$  и ослабления для ИМС в пластмассовом корпусе без кристалла (корпус вскрывался, кристалл вынимался, затем корпус вновь склеивался). Было установлено, что кристалл практически не влияет на соотношения между волнами, даже для ATtiny15, у которых с кристаллом площадью  $3 \times 3,5$  мм, корпус имеет размеры  $6 \times 9 \times 3,2$  мм. Поглощение СВЧ мощности в основном обусловлено пластмассовым материалом корпуса. Это в очередной раз подтверждает неприменимость критерия Вунша-Белла к микросхемам при воздействии на них ВИИЭМП.



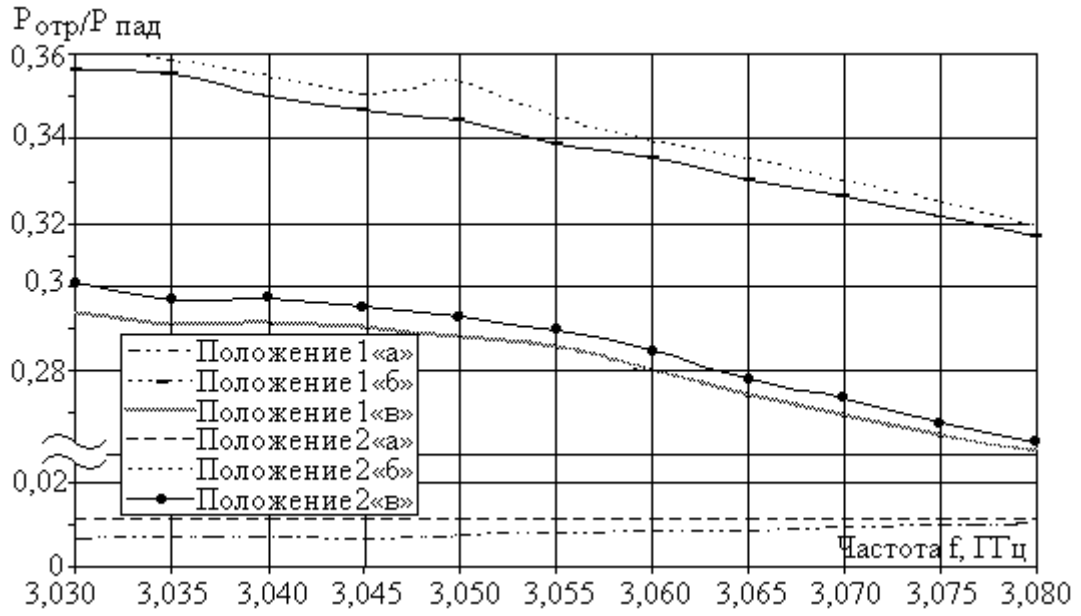


Рис. 2.5. Зависимость  $R_{отр}/R_{пад}$  от частоты: 1 – ATtiny15; 2 – PIC16F628

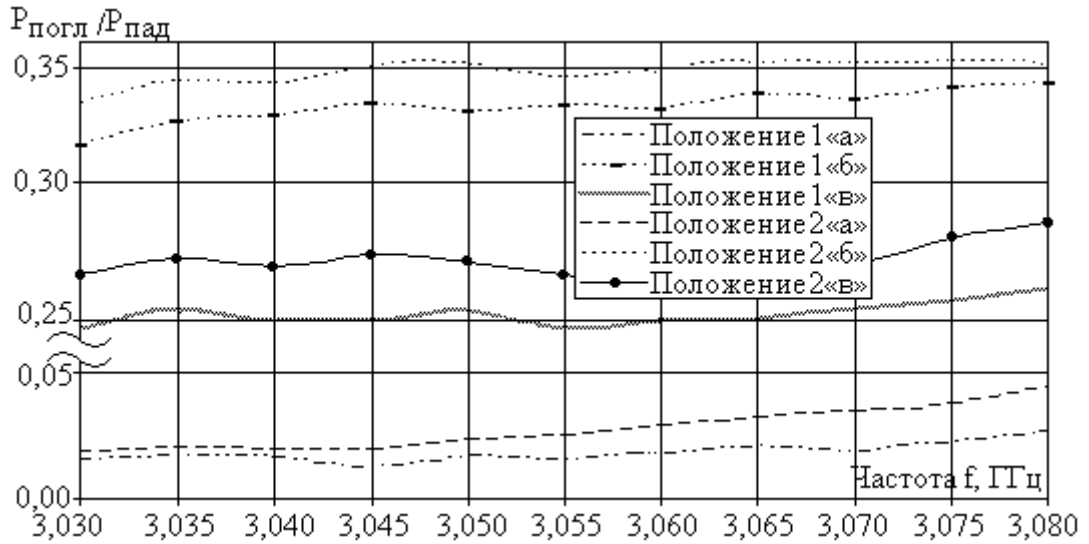


Рис. 2.6. Зависимость  $R_{погл}/R_{пад}$  от частоты: 1 – ATtiny15; 2 – PIC16F628

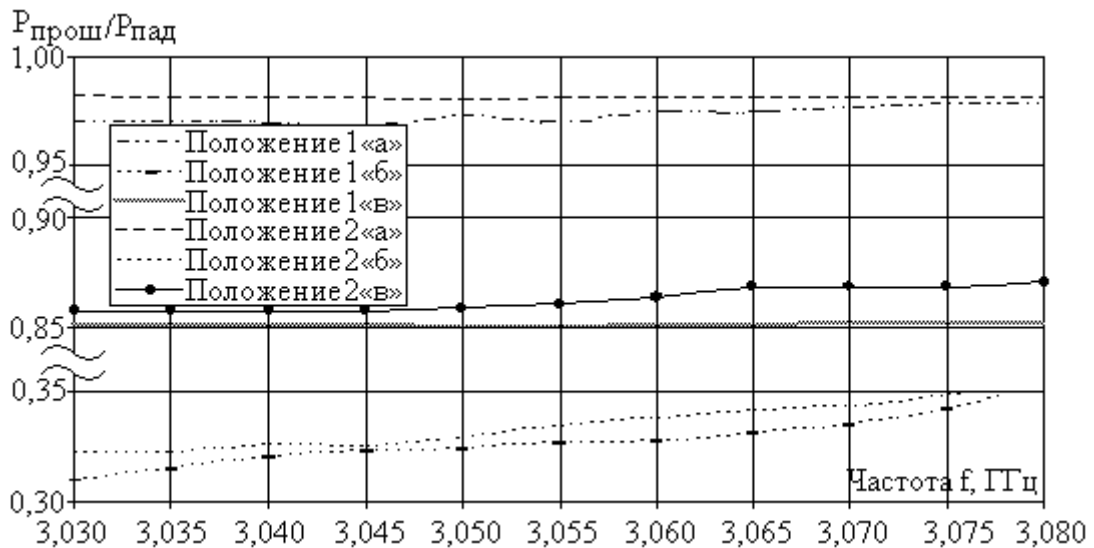


Рис. 2.7. Зависимость  $R_{прош}/R_{пад}$  от частоты: 1 – ATtiny15; 2 – PIC16F628

### **2.3. Тестирование работоспособности современных микросхем при воздействии импульсных электромагнитных полей**

При проведении волноводных исследований по непосредственному воздействию ВИИЭМП на микросхемы, как со средним уровнем интеграции, так и на современные, основным является регистрация изменений их функционального состояния. Эти изменения проявляется в виде: 1) сбоев в работе без необратимых явлений в микроструктурных элементах, 2) сбоев в работе с необратимыми последствиями в микроструктурных элементах (деградационные явления) и 3) катастрофических отказов. При проведении исследований по воздействию ВИИЭМП на микросхемы с низким и средним уровнями интеграции на них собирались генераторы или усилители с помощью внешних устройств, а по изменениям выходного сигнала регистрировались изменения функционального состояния ИМС.

Отличительной особенностью исследования функционального состояния современных микросхем является необходимость использования компьютера. Схемы тестирования зависят от типа микросхем, их назначения и отличаются друг от друга. Разработка схем тестирования является важным и неотъемлемым этапом при проведении экспериментальных исследований воздействия ВИИЭМП на современные микросхемы. Импульсные электромагнитные поля обеспечивала созданная в ТНУ базовая установка [57], магнетронный генератор который позволял получать радиоимпульсы с длительностью 1 мкс, импульсной мощностью  $P_{и} < 30 \text{кВт}$ , скважностью  $10^4$  на частоте 3050 МГц. Количество импульсов от 1 до  $10^4$  или время работы магнетронного генератора до 30 мин. обеспечивалось модулятором. Ниже приводятся схемы тестирования работоспособности и структурные схемы установок по воздействию ВИИЭМП на микроконтроллеры и микросборки приемников и передатчиков. Схемы тестирования и структурные схемы установок по воздействию ВИИЭМП на микросхемы памяти, АЦП и ЦАП приведены в Приложении Б.

### **2.3.1. Тестирование работоспособности микропроцессоров и микроконтроллеров**

Как и все микроконтроллеры AVR, микроконтроллеры семейства ATtiny являются 8-разрядными, предназначенными для встраиваемых приложений. Они изготавливаются по КМОП-технологии, которая в сочетании с усовершенствованной RISC-архитектурой позволяет достичь наилучшего соотношения быстродействие/энергопотребление [72 - 84].

Чтобы следить за функциональным состоянием микроконтроллеров во время воздействия на них электромагнитных полей, были разработаны схемы тестирования работоспособности ATtiny15L и PIC16F628-20I/P (рис. 2.8).

Для их тестирования была написана и запрограммирована в контроллеры специальная программа, которая позволяла определять не только работоспособность устройства во время эксперимента в реальном времени, но также отслеживать ошибки в вычислениях (сбои), которые могут возникать при воздействии на микросхему импульсных электромагнитных полей. Алгоритм тестовой программы приведен на рис. 2.9.

По заданному алгоритму программы микроконтроллер осуществлял самотестирование с выводом результатов в виде определённой последовательности импульсов, которые отображались на мониторе персонального компьютера.

По выходному сигналу делался вывод о том, в каком состоянии находится тестируемый контроллер. Для наблюдения и записи тестовых сигналов, использовался программатор с персональным компьютером. Экспериментальные исследования по воздействию мощных импульсных электромагнитных полей осуществлялись на установке, структура которой приведена на 2.10.

При проведении экспериментальных исследований по непосредственному воздействию электромагнитного излучения ATtiny15 и PIC16F628 располагались в измерительной секции в одном из трех положений (рис. 2.2) и соединялись с программатором, персональным

компьютером с помощью многожильного экранированного провода диаметром 1,6 мм.

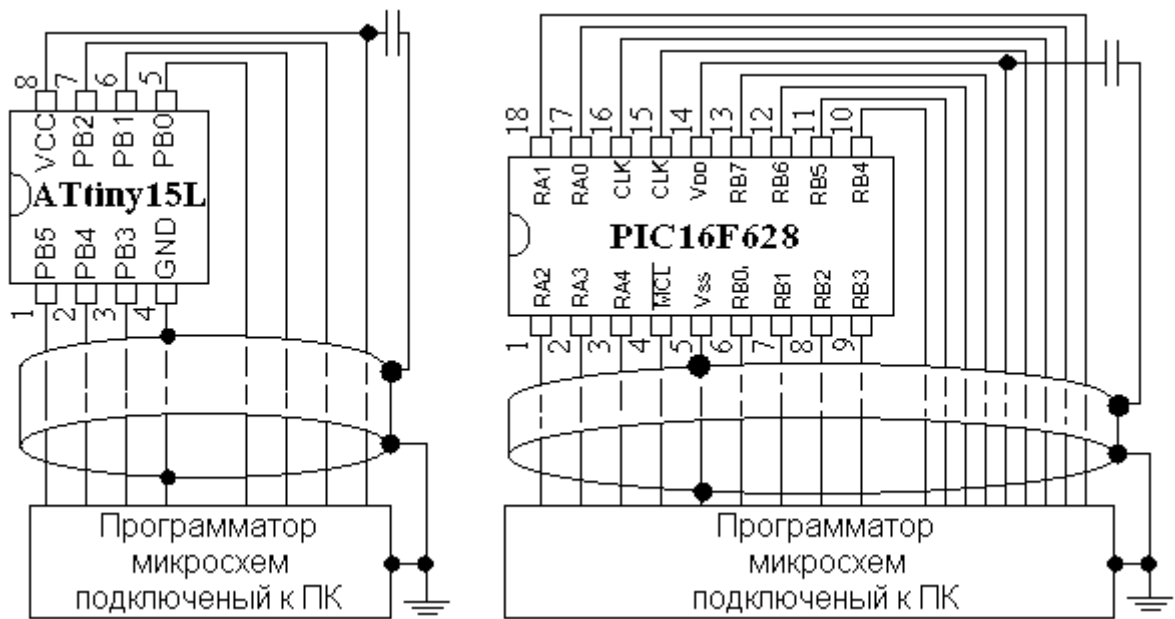


Рис. 2.8. Схемы тестирования работоспособности ATtiny15L и PIC16F628

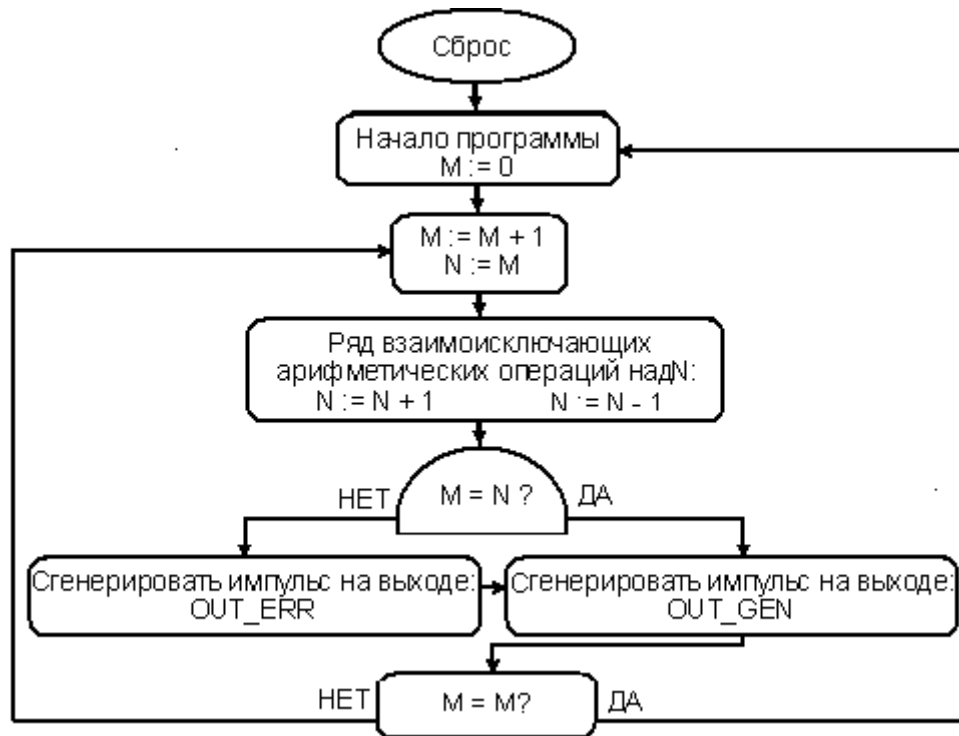


Рис. 2.9. Алгоритм тестирующей программы микроконтроллеров

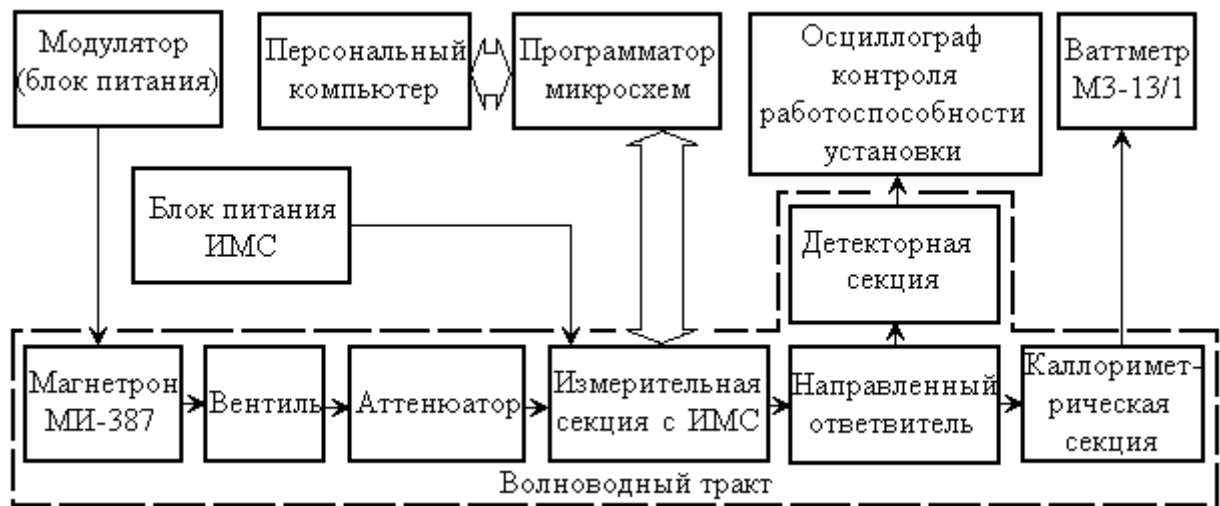


Рис. 2.10. Структура установки по воздействию импульсных электромагнитных полей на ATtiny15L и PIC16F628

### 2.3.2. Тестирование работоспособности микросборок приемников и передатчиков, экранированных СВЧ микросхем

В качестве полностью экранированных микросхем использовались микросборки фирмы RF Monolithics Inc, которая является одним из мировых лидеров интегральной ПАВ (поверхностно-акустические волны) технологии. Она производит микросборки радиопередатчиков, приемников, приемопередатчиков, узкополосных фильтров и ПАВ резонаторов на частоты от 70 МГц до 1,2 ГГц. В частности, продукция данной фирмы широко используется в мобильной связи [85].

Микросборки приемников и передатчиков выпускаются в миниатюрных корпусах (геометрические размеры корпуса  $10 \times 6,8 \times 1,9$  мм) для поверхностного монтажа (рис. 2.11). Данные микросборки относятся к СВЧ экранированным микросхемам и ранее исследований по воздействию ВИИЭМП на подобные ИМС не проводилось.

Микросхемы приемников и передатчиков собраны в корпусах SM-20H с керамическим основанием, с выводами для поверхностного монтажа и защитной металлической экранирующей крышкой, соединенной с общей «землей» («←»).



Рис. 2.11. Корпуса приемников/передатчиков микросхем фирмы RF Monolithics Inc серии – RX6xxx/TX6xxx

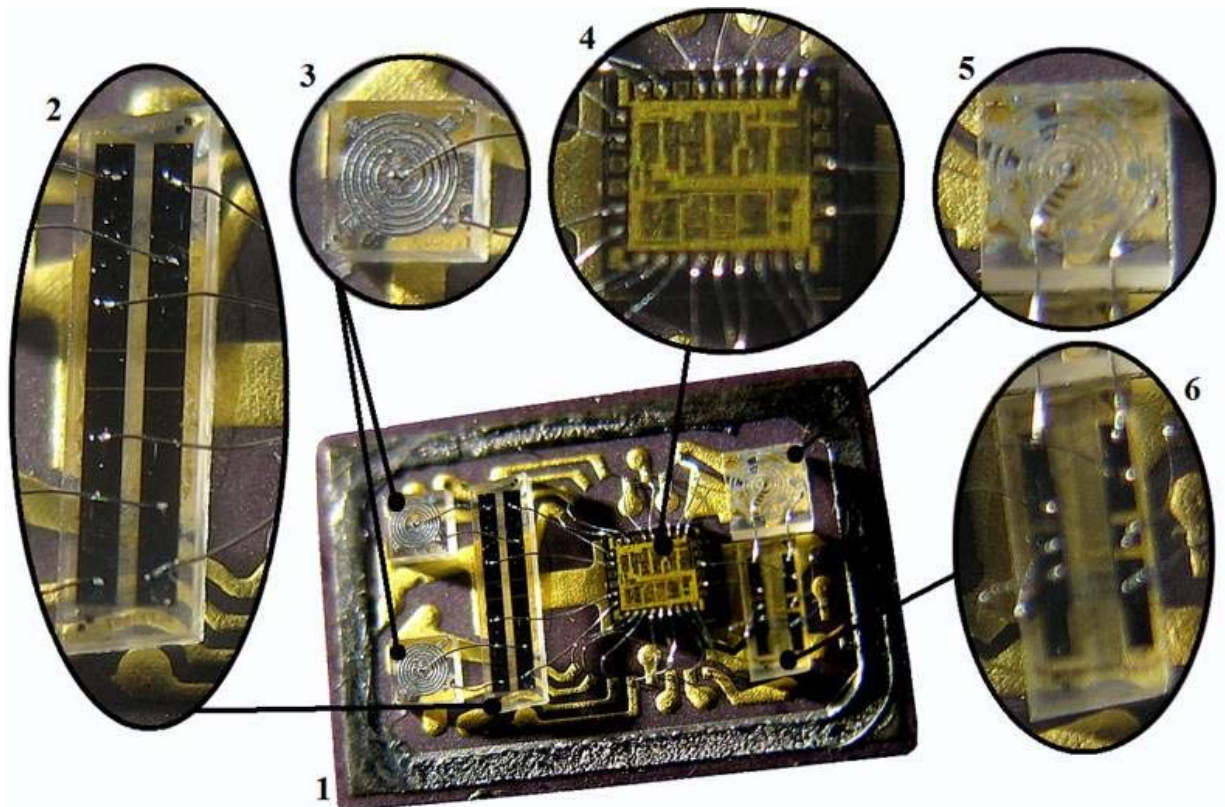


Рис. 2.12. Расположение элементов на керамической подложке приемника:  
 1 – подложка (размер  $5 \times 8$  мм); 2 – линия задержки ПАВ (размер  $4 \times 0,8$  мм);  
 3 – промежуточные индуктивности (размер  $0,9 \times 0,9$  мм); 4 – приемник (размер  $1,6 \times 1,5$  мм); 5 – входная индуктивность (размер  $1,2 \times 1,2$  мм);  
 6 – входной ПАВ фильтр (размер  $2 \times 0,8$  мм)

Под защитной экранирующей крышкой приёмника находится керамическая подложка (рис. 2.12): на которой закреплены кристалл приемника, линия задержки на поверхностно-акустических волнах, промежуточные индуктивности, входные индуктивности и входной фильтр ПАВ. Подробное описание характеристик микросборок приемников и передатчиков содержится в [85].

Для проведения экспериментальных исследований по воздействию импульсных электромагнитных полей на микросборки приемников и передатчиков, были разработаны и изготовлены схемы приемных и передающих электронных модулей, электрические схемы которых представлены на рис. 2.13,а и 2.13,б, соответственно. Микросборки с внешними элементами (конденсаторы, резисторы, индуктивности, ПАВ фильтры) располагались на стеклотекстолитовой печатной плате с поверхностным монтажом. Принимаемые и передаваемые данные подвергались кодированию и декодированию с коррекцией ошибок через персональный компьютер, что повысило помехоустойчивость приемопередающего канала. Печатная плата модуля приемника имела габаритный размер  $16 \times 16$  мм, а модуля передатчика –  $16 \times 13$  мм.

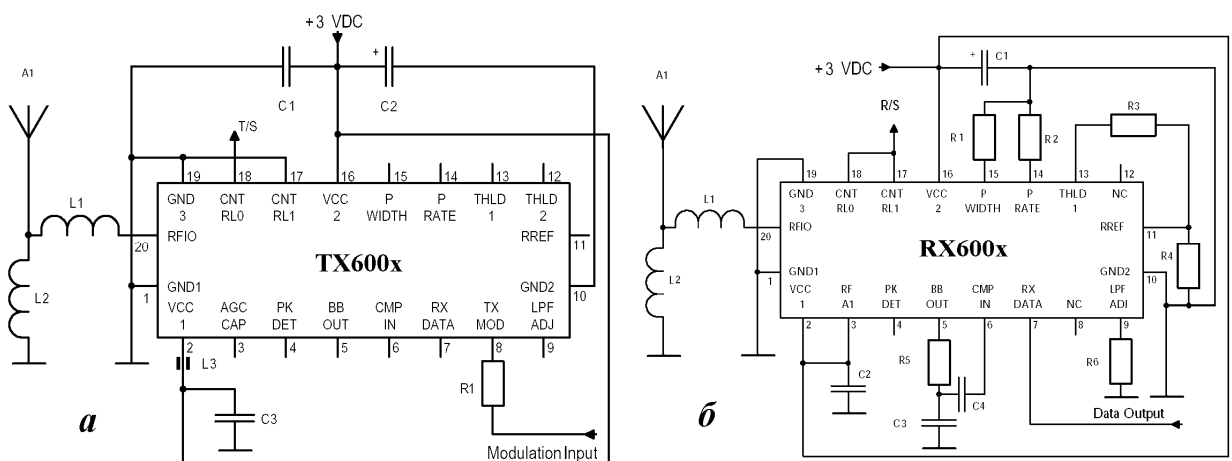


Рис. 2.13. Принципиальные схемы модулей передатчика (а) и приемника (б), работающих на частоте 916МГц

Общий вид модулей приемника и передатчика, которые подвергались воздействию высокоинтенсивного электромагнитного излучения, представлены на рис. 2.14. Для этих модулей, были сняты зависимости  $K_{СВ}$  и ослабления, найдены соотношения между волнами в диапазоне частот панорамного измерителя Р2-56 (Приложение Б).

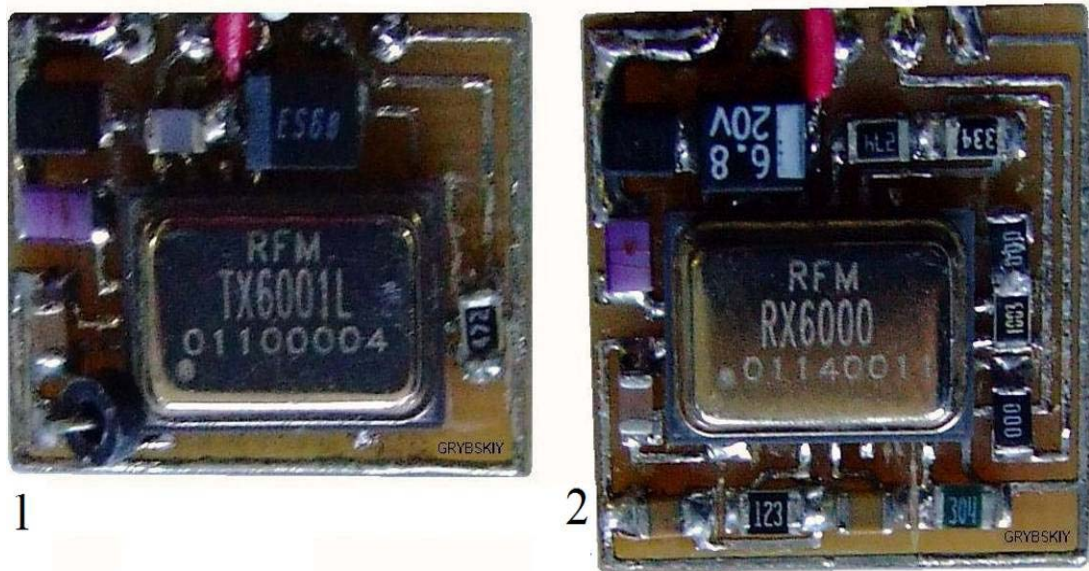


Рис. 2.14. Общий вид модулей приемника и передатчика:

1 – передатчик; 2 – приемник

Экспериментальные исследования по воздействию мощных импульсных электромагнитных полей осуществлялись на установке, структура которой приведена на 2.15. Измерительная секция, в которой размещались модули приемника или передатчика, имела сечение 45×90мм и связывались с остальным волноводным трактом линейными переходами.

Для тестирования функционального состояния приемника и передатчика использовался персональный компьютер, являющийся источником-кодером или окончательным приемником-декодером передаваемых или принимаемых цифровых данных, визуализируемых на дисплее компьютера в виде последовательности импульсов «1» и «0».

Для соединения электронных модулей приёмника/передатчика (рис. 2.15) с персональным компьютером и блоком питания, был использован



многожильный короткий экранированный кабель с 4-х контактной соединительной вилкой.



Рис. 2.15. Структура установки для исследования воздействия ВИИЭМП на модули приемников и передатчиков

Для передачи/приема данных по радиоканалу на частоте 916 МГц были применены антенны длиной  $\lambda_{\text{АНТ}} \approx 1/4$  длины передаваемой/принимаемой волны. Воздействие осуществлялось на электронные модули приемника и передатчика, которые помещались в волноводный тракт. Одним из вопросов, который возникал при воздействии электромагнитного излучения на них – это насколько сильно влияют внешние радиоэлементы на значения полей, при которых происходит катастрофический отказ модулей. Для этого:

- определялись пороговые значения полей выхода из строя микросборок в составе электронного модуля;
- затем при значениях полей вблизи пороговых для электронного модуля осуществлялось воздействие отдельно на микросборки;
- после воздействия определялась работоспособность микросборки вне волноводного тракта и, таким образом, находились собственно их пороговые значения катастрофических отказов.

Для того чтобы выявить влияние экрана на функциональное состояние микросборок при воздействии электромагнитного излучения были выбраны

три ориентации ИМС относительно электрической компоненты поля волны  $H_{10}$ , показанные на рис. 2.16. В ориентации «в» дополнительное напряжение, прикладываемое к элементам микросборки, наводится на выводах падающей волной, а в ориентации «б» – прошедшей волной.

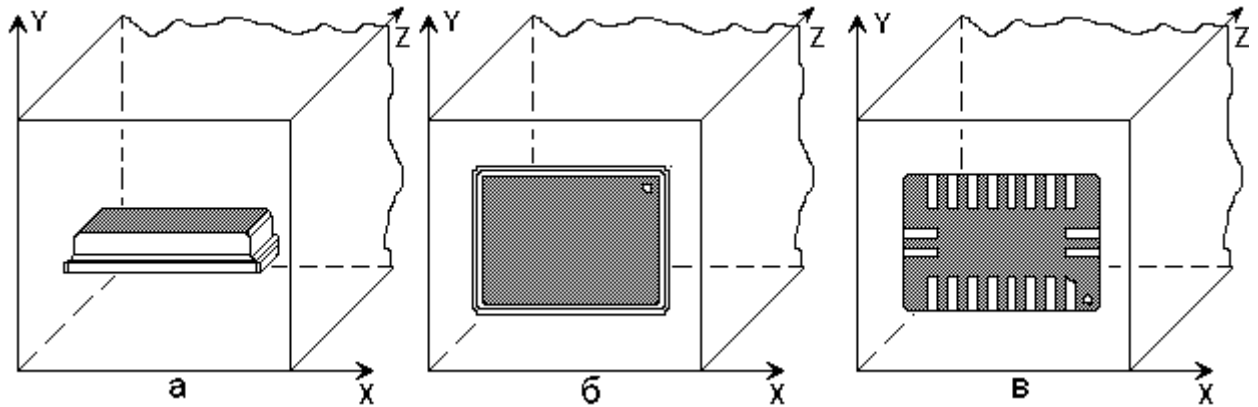


Рис. 2.16. Ориентации микросборок приемников и передатчиков в волноводе

#### 2.4. Результаты исследований по воздействию импульсных электромагнитных полей на современные интегральные микросхемы

Основными задачами, подлежащими решению при экспериментальных исследованиях по непосредственному воздействию ИЭМП на современные микросхемы, были следующие:

- исследование физических процессов в микроструктурных элементах кристаллов современных микросхемах при воздействии мощных импульсных СВЧ полей;
- определение микроструктурных элементов, выход из строя которых определяет функциональное состояние микросхем;
- определение пороговых значений полей, при которых начинаются сбои в работе микросхем, деградации в МСЭ и катастрофические отказы ИМС;
- набор статистических данных выхода из строя микроструктурных элементов, являющихся причиной катастрофических отказов современных микросхем при воздействии мощных импульсных СВЧ полей;

- выявление отличий развития деградационных явлений в микроструктурных элементах современных микросхемах при воздействии электромагнитного излучения в сравнении с ИМС низкого и среднего уровней интеграции;

- исследования влияния экранирования на функциональное состояние микросхем при воздействии мощных импульсных электромагнитных полей.

Всего подвергалось воздействию 140 микросхем, 20 микросборок и 20 электронных модулей (табл. 2.1). Результаты воздействия ВИИЭМП на ATtiny15 и PIC16F628-20I/P представлены в табл. 2.2 и табл. 2.3. Исследуемые микроконтроллеры имеют защиту от электростатического заряда, содержащую схемы коммутации импульсных напряжений на достаточно массивную (в сравнении с проводящими дорожками на кристалле) проводящую шину. Защита от ЭСР рассчитана на одиночный видеоимпульс статического электричества с пиковым напряжением, как правило, не более 5кВ [16], что, как показали экспериментальные исследования, предохраняет кристалл микросхемы от воздействия одиночных СВЧ радиоимпульсов. В результате экспериментальных исследований было установлено, что значения полей, при которых нарушается работоспособность микросхем, имеющих защиту от ЭСР, значительно снижаются при воздействии пачки импульсов в сравнении с воздействием одиночного импульса. Это является одним из отличий реакции современных микросхем к воздействию ВИИЭМП в сравнении с ИМС с низким и средним уровнями интеграции.

В процессе исследований было установлено, что микроконтроллеры ATtiny15 в ориентациях «б» и «в» выходят из строя при воздействии ВИИЭМП с  $E_m > 90...95\text{кВ/м}$ . Сбои в их работе, происходят при  $E_m > 1\text{кВ/м}$ . При  $E_m > 10\text{кВ/м}$  начинаются деградационные явления в микроструктурных элементах микросхем: в основном локальные прожоги контактных площадок (рис. 2.17). В ориентации «а», сбои в работе микроконтроллеров ATtiny15 начинаются с  $E_m > 15\text{кВ/м}$ .

При воздействии на эти микроконтроллеры наблюдаются явления, которые в исследованиях по воздействию на ИМС с низким и средним уровнями интеграции, не встречались – это эффекты «защелкивания» [1 - 3].

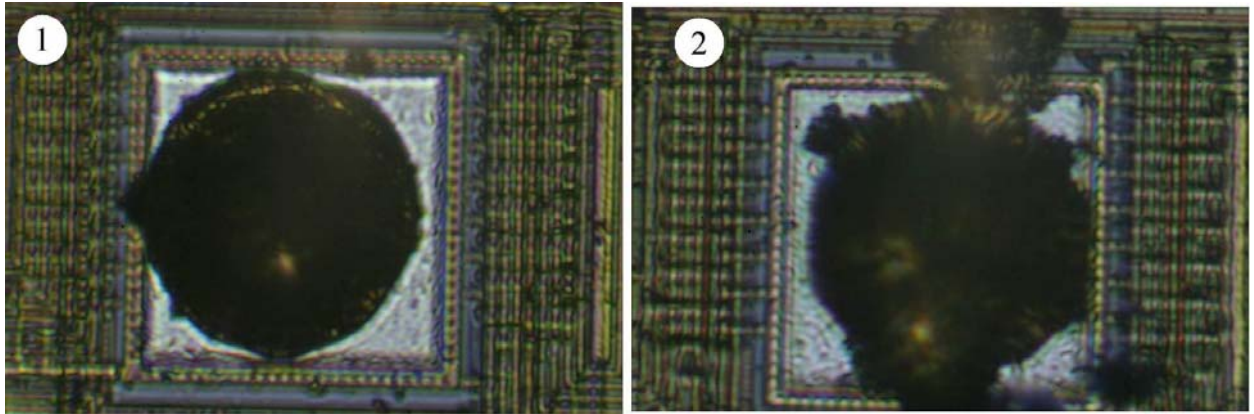


Рис. 2.17. Фрагмент контактной площадки ИМС АТtiny15: 1 – контактная площадка до воздействия ВИИЭМП; 2 – площадка с деградацией контактного соединения

Таблица 2.2

### Реакция микроконтроллеров АТtiny15 при воздействии ВИИЭМП

Кол-во Импульсов	Реакция микроконтроллеров/ориентация в волноводе			E <sub>m</sub> , кВ/м в импульсе
	а	б	в	
10	нет сбоев	нет сбоев	нет сбоев	0,005
100	нет сбоев	нет сбоев	нет сбоев	0,15
100	нет сбоев	сбои	сбои	1,5
100	сбои	сбои	сбои	15
100	сбои	сбои	сбои	40
10	сбои	сбои	сбои	80
10	сбои	вышел из строя	вышел из строя	90
10	сбои	вышел из строя	вышел из строя	100
10000	сбои	вышел из строя	вышел из строя	130

Эффект «защелкивания» при воздействии электромагнитного излучения приводит к тому, что в работе современных микросхем появляются сбои

выходных параметров или временная потеря работоспособности и в это время электронная аппаратура не выполняет своего функционального назначения. После прекращения воздействия и перекоммутации работоспособность микроконтроллеров и аппаратуры восстанавливается. Это связано с тем, что ВИИЭМП наводит на электродах транзисторов кристалла дополнительные напряжения, приводящие к изменению режимов их работы: переводам транзисторов из режима отсечки в режим насыщения и наоборот, к работе в режимах отличных от номинальных.

Таблица 2.3

**Реакция микроконтроллеров с ИМС PIC16F628-20I/P при воздействии ВИИЭМП**

Кол-во Импульсов	Реакция микроконтроллера/ориентация в волноводе			$E_m$ , кВ/м в импульсе
	а	б	в	
10	нет сбоев	нет сбоев	нет сбоев	0,005
10000	нет сбоев	сбои	сбои	0,005
100	сбои	сбои	сбои	0,15
100	сбои	сбои	сбои	1,5
100	сбои	сбои	сбои	15
100	сбои	сбои	сбои	40
10	сбои	сбои, отказы	сбои, отказы	80
10	сбои	вышел из строя	вышел из строя	90
10	сбои	вышел из строя	вышел из строя	100
10000	сбои	вышел из строя	вышел из строя	130

Микроконтроллеры PIC16F628-20I/P в ориентациях «б» и «в» выходят из строя при  $E_m \geq 85$  кВ/м, деградационные явления в них происходят, в основном, в проводящих микроструктурах и начинаются при  $E_m \geq 5$  кВ/м, а сбои в работе при  $E_m \geq 0,05$  кВ/м.

В ориентациях «а» все проявления воздействия ВИИЭМП на микросхемы PIC16F628-20I/P начинаются при значениях напряженности полей на порядок выше, чем в ориентациях «б» и «в» (табл. 2.3). Более низкие, в сравнении с ATtiny15 пороговые значения полей, при которых происходят сбои и катастрофические отказы микроконтроллеров PIC16F628-20I/P, объясняются различиями в размерах их кристаллов (табл. 2.1).

Анализ кристаллов, вышедших из строя вследствие воздействия ВИИЭМП, позволил выявить виды отказов современных микроконтроллеров [94, 98, 99, 102]. Основной причиной их отказов является прожог металлизации - 60%. В свою очередь из этих 60% половина отказов произошла вследствие прожога контактных площадок (рис. 2.17), а другая половина - вследствие прожога токопроводящих дорожек (рис. 2.18).

Для 30% процентов вышедших из строя микросхем трудно однозначно определить первопричину выхода их из строя при воздействии ВИИЭМП вследствие как прожога металлизации, так и полупроводниковых структур. Причиной выхода из строя, оставшихся 10% микросхем при воздействии ВИИЭМП является разрушение активных микроструктурных элементов.

Отличительной особенностью выхода микросхем с защитой от ЭСР из строя является их разогрев при воздействии пачки импульсов. В ИМС с низким уровнем интеграции масса микроструктурных элементов была очень мала в сравнении с массой кристалла, а тем более микросхемы. Поэтому их разогрев и последующий выход из строя вследствие выгорания не сказывался на температуре микросхемы. Внутренняя шина «земли» у микросхем с защитой от ЭСР достаточно большая по поверхности и ее разогрев приводит к увеличению температуры кристалла и всей микросхемы в целом (в ряде случаев ИМС разогревались до температуры порядка 70...80°C).

При воздействии ВИИЭМП на микросхемы с защитой от ЭСР шина «земли» не выгорает, но температура кристалла в целом намного выше, чем у

ИМС без защиты, а это ускоряет процесс разогрева МСЭ и их выход из строя [94 - 103].

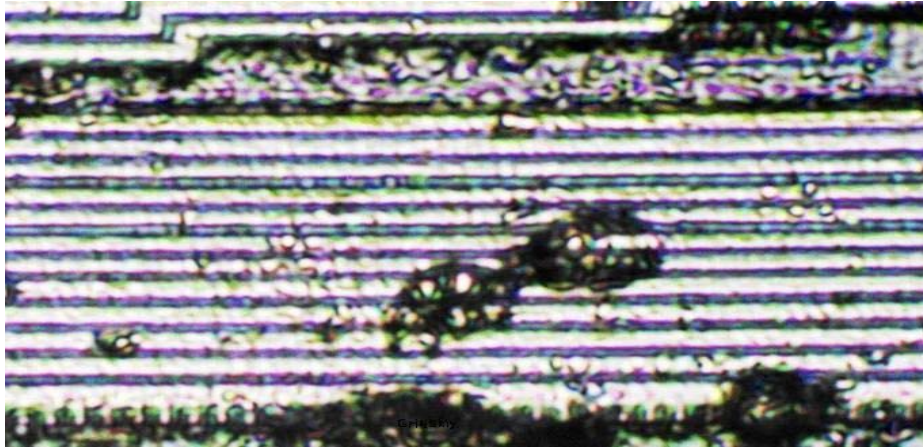


Рис. 2.18. Прожоги проводящих дорожек ИМС 27С256-20FA после воздействия ВИИЭМП

В микросхемах с низким и средним уровнями интеграции проводящие дорожки выполнялись из алюминия, пленки которого имеют зернистую структуру. Это приводило к множественным локальным прожогам при воздействии ВИИЭМП вследствие, как пространственной, так и омической неоднородности. В современных микросхемах контактные площадки и проводящие дорожки выполнены из меди, пленки из которой не имеют зернистости, однако неоднородны по толщине и ширине. Это приводит к их прожогу, однако в сравнении с пленками из алюминия, динамика развития прожога металлизации медных дорожек в достаточной мере отличается: значительно меньше локальных прожогов вдоль проводящих пленок из меди.

Подобные исследования были проведены для микросхем памяти, АЦП и ЦАП (схемы тестирования в Приложении В). В частности, для ИМС памяти 27С256-20FA (площадь кристалла  $4,8 \times 4,5$  мм) установлено, что в ориентациях «б» и «в», сбои при записи и считывании происходили при значениях напряжённости электрической компоненты  $E_m > 0,05$  кВ/м, а в ориентациях «а» – при  $E_m > 0,5$  кВ/м. Катастрофические отказы 27С256-20FA в ориентациях «б» и «в» фиксировались при воздействии поля с

напряженностью  $E_m > 80...85\text{кВ/м}$ . В ориентации «а» имели место явления «защелкивания» с последующим восстановлением работоспособности после перекоммутации. Следует отметить, что на внутренней поверхности корпуса микросхемы 27C256-20FA над управляющими памятью функциональными микроструктурами находится экран в виде медной пленки, однако какого-либо заметного влияния на стойкость ИМС он не вносит. Это следует из экспериментальных данных при исследовании микросхем без экрана (корпус ИМС демонтировался и экран снимался).

Для микросхем памяти 24LC16 с кристаллом площадью  $1,8 \times 1,8$  мм реакции в виде отказов в работе на внешнее воздействие при максимальной мощности генератора установки не было установлено. Деградационных явлений в микроструктурных элементах при воздействии на 24LC16 ВИИЭМП с  $E_m = 130\text{кВ/м}$  в течение 30 минут при анализе кристалла не выявлено (Приложение В).

Площади кристаллов микросхем АЦП и ЦАП (TLC549IP и AD7243) приблизительно совпадают с площадями кристаллов ИМС памяти 24LC16, 27C256-20FA. Этим объясняется то, что данные по пороговым значениям полей, при которых начинаются сбои и происходят катастрофические отказы, TLC549IP и 24LC15 близки между собой для 27C256-20FA и AD7243 (схемы тестирования и результаты воздействия представлены в Приложении В).

Статистические данные отказов микросхем ЦАП, АЦП вследствие теплового разрушения микроструктурных элементов при воздействии ВИИЭМП совпадают с данными выше рассмотренных микросхем.

#### **2.4.1. Воздействие ВИИЭМП на частично экранированные микросхемы**

В качестве основы для исследований частично экранированных микросхем были выбраны микросхемы 27C256-20FA с кристаллом  $4,5 \times 4,8\text{мм}$  в



количестве 20 штук. При исследованиях по воздействию ВИИЭМП на их корпус наклеивалась фольга к верхней или нижней поверхности.

Сравнение экспериментальных данных для экранированных и неэкранированных микросхем показывает, что частичное экранирование практически не сказывается на их стойкости к импульсным электромагнитным СВЧ полям, так как дополнительные напряжения, прикладываемые к микроструктурным элементам, в основном формируются выводами. Незначительно отличаются данные по порогам стойкости при воздействии ВИИЭМП для микросхем без экрана, с одним экраном и с двумя экранами (не более чем на 5% в сторону увеличения пороговых значений для частично экранированных ИМС).

При экранировании между экраном и кристаллом, а также в случае двойного экрана непосредственно в микросхеме образуется емкостной зазор, который, как показали экспериментальные исследования, незначительно влияет на их функциональное состояние.

Статистические данные выхода микроструктурных элементов при воздействии ВИИЭМП для микросхем с одинарным или двойным экраном такие же, как и без экрана [94 - 103]. Все это свидетельствует о том, что частичное экранирование практически не влияет на стойкость ИМС, так как граничные значения полей, определяющие работоспособность микросхем практически совпадают с подобными у неэкранированных микросхем (при одинаковой ориентации относительно воздействующего поля).

#### **2.4.2. Воздействие импульсных электромагнитных полей на электронные модули**

Были проведены экспериментальные исследования по воздействию ВИИЭМП на электронные модули с микросхемами АЦП TLC549 (рис. 2.19) и ЦАП AD7243 и на модули с микросборками приемных и передающих устройств (рис. 2.15).

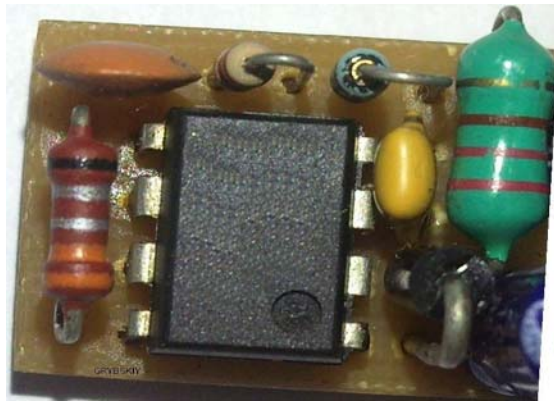


Рис. 2.19. Электронный модуль с микросхемой АЦП TLC549IP

При воздействии ВИИЭМП на электронные модули с микросхемами, имеющими защиту от ЭСР, основными вопросами были следующие:

- насколько внешние радиоэлементы и монтажная плата влияют на стойкость микросхем к воздействию ВИИЭМП;
- как влияет поляризационный фактор на работоспособность электронного модуля при воздействии ВИИЭМП.

В соответствии с физическими представлениями экспериментальные исследования показали, что поляризационный фактор в значительной мере определяет стойкость электронного модуля к воздействию импульсных полей. При воздействии ВИИЭМП на электронные модули можно выделить две основные ориентации их относительно поля соответствующие положениям «а» и «б» микросхем в волноводе (рис. 2.2). Пороговые значения отказов электронного модуля с микросхемами AD7243, имеющими защиту от ЭСР, практически совпадают со значениями отказов полученными непосредственно для этих микросхем. Сбои в работе ЭМ при воздействии ВИИЭМП начинаются при меньших значениях напряженности электрической компоненты воздействующего поля. Так в ориентации «а» сбои наблюдались при  $E_m \geq 0,1 \text{ кВ/м}$  (непосредственно для микросхем при  $E_m > 0,5 \text{ кВ/м}$ ), в ориентации «б» при  $E_m > 0,01 \text{ кВ/м}$  (непосредственно для микросхем при  $E_m > 0,05 \text{ кВ/м}$ ).

В отличие от электронных модулей с ИМС AD7243, имеющими защиту от ЭСР, микросборки приемников и передатчиков не имеют подобной защиты. Существенным отличием микросборок приемников и передатчиков от микросхем АЦП и ЦАП является наличие экрана у микросборок, а также то, что они относятся к СВЧ микросхемам. Кроме того, геометрические размеры кристаллов приемника и передатчика малы (размер их кристалла  $1,6 \times 1,6$  мм). Микросхемы с такими размерами кристаллов с защитой от ЭСР практически не реагировали на воздействие ВИИЭМП при максимальной мощности магнетронного генератора установки.

В табл. 2.4 представлены экспериментальные данные по воздействию ВИИЭМП на электронный модуль передатчика, а в табл. 2.5 – приемника. Сравнение результатов воздействия ВИИЭМП на электронные модули, приведенных в табл. 2.4 и 2.5, показывает, что пороговые значения полей, при которых начинаются сбои в работе и наступают катастрофические отказы, у приемных электронных модулей намного ниже, чем у передающих. Электронные модули приемников выходят из строя при воздействии электромагнитного излучения с  $E_m > 40$  кВ/м.

Существенным для стойкости электронных модулей приемников при воздействии ВИИЭМП является поляризационный фактор. В ориентациях микросборок «б» и «в» электронные модули за счет отказа ИМС выходят из строя при воздействии полей с  $E_m > 40$  кВ/м, а в ориентации «а» остаются работоспособными при  $E_m = 130$  кВ/м в течение 30 минут.

Следует отметить, что положения микросборок в электронных модулях в волноводе и результаты, приведенные в табл. 2.4 и табл. 2.5, соответствовали рис. 2.16. При воздействии ВИИЭМП на ЭМ микросборка, по существу была экранирована со всех сторон: сверху экраном, а снизу – в значительной степени печатной платой. Дополнительные напряжения при воздействии ВИИЭМП к структурам микросборки прикладывались через внешние радиоэлементы, находящиеся на печатной плате.

Значения напряженностей полей, при которых микросборки приемников выходили из строя в ориентации «б» -  $E_m > 40$  кВ/м, в ориентации «в» -  $E_m > 40$  кВ/м [92, 94] (табл. 2.5).

Таблица 2.4

**Реакция электронного модуля передатчика с ИМС R(T)X при  
воздействии ВИИЭМП ( $f_{пер} = 916$  МГц)**

Кол-во импульсов	Реакция модуля, ориентация в волноводе			$E_m$ , кВ/м в импульсе
	а	б	в	
10000	нет сбоев	нет сбоев	нет сбоев	0,1
100	нет сбоев	сбои	сбои	1
10	сбои	сбои	сбои	10
10	сбои	сбои	сбои	40
10	сбои	сбои	сбои	80
10	сбои	сбои	сбои	90
100	сбои	сбои	сбои	100
10000	сбои	сбои	сбои	130

Таблица 2.5

**Реакция электронного модуля приемника с ИМС R(T)X при воздействии  
ВИИЭМП ( $f_{пер} = 916$  МГц)**

Кол-во Импульсов (N)	Реакция модуля, ориентация в волноводе			$E_m$ , кВ/м в импульсе
	а	Б	В	
10000	нет сбоев	нет сбоев	нет сбоев	0,05
100	сбои	Сбои	Сбои	0.1
10	сбои	Сбои	Сбои	1
10	сбои	Сбои	Сбои	10
10	сбои	Сбои	Сбои	20
10	сбои	Сбои	Сбои	30
10	сбои	Сбои	Сбои	40
100	сбои	вышел из строя	вышел из строя	40

Достаточно низкие значения напряженности электрической компоненты воздействующего ВИИЭМП, при котором микросборки выходят из строя, объясняются тем обстоятельством, что при относительно небольших размерах кристалла выводы ИМС разнесены на достаточно большое расстояние. Кроме того, к кристаллу микросборки прикладывается дополнительное напряжение от внешних элементов на плате электронного модуля и в полной мере проявляется «антенный эффект» [43 - 49].

Статистические данные по причинам отказов микросборок вследствие прожога микроструктурных элементов кристалла ИМС (рис. 2.17) практически совпадают с теми, которые получены для микроконтроллеров, микросхем памяти, АЦП и ЦАП [94 - 103].

## **2.5. Обобщение экспериментальных результатов**

Всего подвергались воздействию ВИИЭМП 180 микросхем, микросборок и модулей с базовой ячейкой кристалла не более 120 нм, с не менее чем пятью слоями металлизации. Исследования показали, что основной причиной выхода из строя электронных модулей при воздействии мощного электромагнитного излучения является только катастрофический отказ микросхем. Анализ показал:

- 60% микросхем выходят из строя вследствие прожога металлизации, из которых 30% – это прожог контактных площадок, 30% – прожог токопроводящих дорожек;

- 30% микросхем выходят из строя при совместном прожоге активных полупроводниковых микроструктурных элементов и токопроводящих дорожек;

- 10% микросхем выходят из строя вследствие выгорания активных полупроводниковых микроструктурных элементов.

Эти статистические данные представлены в виде диаграммы на рис. 2. 21.

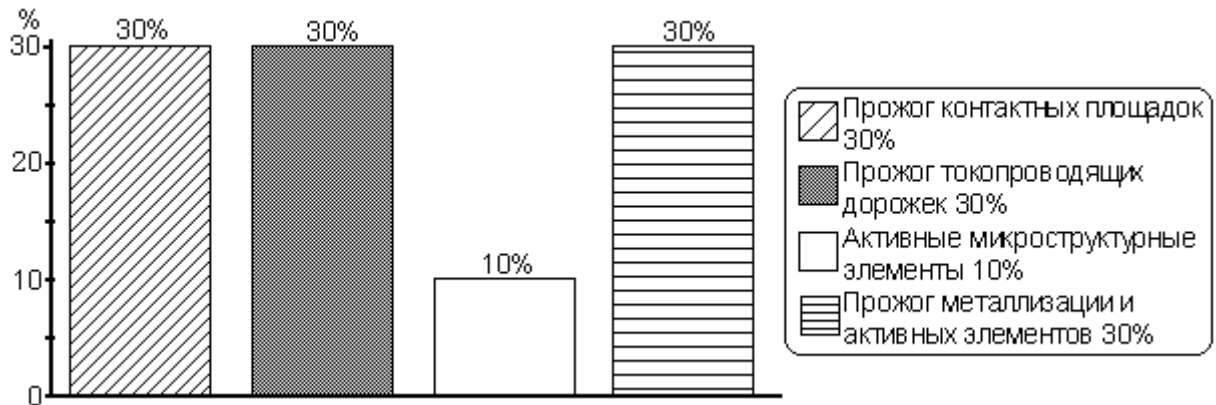


Рис. 2.21. Статистические данные по выходу микроструктурных элементов при отказах современных микросхем

Экспериментальные исследования по воздействию ВИИЭМП показали, что, как и для ИМС с низким и средним уровнями интеграции, сбои в работе современных микросхем в значительной мере определяются поляризационным фактором – взаимным расположением микросхемы и поля («антенный эффект» [44 - 49]). Этот фактор определяет величины дополнительных напряжений, прикладываемых к микроструктурным элементам [94 - 103].

Экранирование микросхем не защищает их от воздействия ВИИЭМП, поскольку дополнительные напряжения, вызывающие деградации в микроструктурных элементах прикладываются к выводам ИМС от внешних радиоэлементов и цепей. Одним из способов повышения стойкости микросхем при воздействии ВИИЭМП является разработка специальных панелей крепления ИМС с разрядниками, соединенными с общей «землей». Разработка подобных устройств – это наиболее перспективное направление защиты микросхем от воздействия ЭМИ и ВИИЭМП СВЧ. Такого рода защита, естественно, необходима только для микросхем, которые будут работать в условиях мощного электромагнитного излучения. Для микросхем, которые заведомо подвергаются воздействию импульсных

электромагнитных полей, возможна разработка специальных схем защиты на кристалле, как это делается в случае схем защиты от ЭСР.

Защита от ЭСР повышает пороговые значения стойкости микросхем при воздействии одиночного радиоимпульса, однако не является эффективным способом защиты при воздействии пачки импульсов. При наличии защиты от ЭСР размеры кристалла также влияют на стойкость микросхем. Это следует из результатов экспериментальных исследований, приведенных в табл. 2.1 – табл. 2.5. Поэтому можно рекомендовать разработчикам электронной аппаратуры для повышения ее стойкости при воздействии ВИИЭМП – использовать узкофункциональные ИМС с небольшими геометрическими размерами кристаллов.

Пороговые значения полей, характеризующие стойкость как непосредственно ИМС, так и тех же микросхем в составе ЭМ практически одинаковы при наличии цепей защиты от ЭСР. Объясняется тем, что в составе ЭМ увеличиваются размеры цепей, которые формируют дополнительные напряжения, прикладываемые к кристаллу, но в составе ЭМ улучшаются условия рассеяния тепла от микросхемы за счет теплового контакта с платой. Эти два обстоятельства компенсируют друг друга с точки зрения стойкости ИМС в составе ЭМ при воздействии ВИИЭМП.

В сравнении непосредственно с микросхемами, у электронных модулей снижены пороговые значения полей, при которых начинаются сбои в работе, что объясняется увеличением длины цепей, с которых напряжения при воздействии ВИИЭМП, прикладываются к кристаллу.

Стойкость микросхем к воздействию ВИИЭМП определяется размерами кристалла и поляризационным фактором. Функциональное назначение микросхем не влияет на пороговые величины воздействующих полей, при которых наступают катастрофические отказы микросхем.

Полученные в результате экспериментальных исследований пороговые значения ВИИЭМП, при которых наступают катастрофические отказы микросхем, сбои в работе, являются важными для практического

использования. Важными, как для понимания физики процессов, так и практики, являются статистические данные по выходу из строя микроструктурных элементов при воздействии ВИИЭМП.

Процессы, связанные с прожогом проводящих МСЭ в современных микросхемах, сильно отличаются от подобных процессов в микросхемах с низким и средним уровнями интеграции. В первую очередь это связано с использованием меди в качестве проводящих пленок. Алюминиевые пленки имели большую зернистость, локализация тепла проходила на стоках зерен. В современных микросхемах медные пленки практически однородны по толщине, прожоги наблюдаются в медных пленках в местах с наибольшей неоднородностью по ширине. Существенны также различия по статистике вышедших из строя микроструктурных элементов микросхем, с высоким и низким уровнями интеграции при воздействии ВИИЭМП.



## 2.6. Выводы по разделу

1. Проведена модернизация установки для непосредственного воздействия мощных импульсных электромагнитных СВЧ полей на современные микросхемы и электронные модули, разработаны методики проведения экспериментальных исследований, схемы тестирования функционального состояния современных микросхем, приведен анализ физических явлений в микроструктурных элементах микросхем после воздействия ВИИЭМП. Экспериментальные исследования позволили найти причинные связи между основными параметрами воздействующего поля, характеристиками микросхем и результатом воздействия.

2. По результатам экспериментальных исследований можно сделать следующие основные выводы [94 - 103]:

- при воздействии ВИИЭМП происходит преобразование энергии электромагнитного поля в электротепловую энергию макро- и микроструктурных элементов ИМС;

- выход из строя микроструктурных элементов кристалла обусловлен тем, что они работают в напряженных токовых и тепловых режимах за счет дополнительных наведенных напряжений;

- функциональное назначение ИМС не влияет на пороговые значения сбоя и катастрофических отказов при воздействии электромагнитного излучения.

3. По результатам экспериментальных исследований сделаны рекомендации по повышению стойкости электронной аппаратуры к воздействию мощных импульсных электромагнитных полей.

Полученные статистические данные пороговых значений полей катастрофических отказов микросхем и выхода из строя микроструктурных элементов кристалла микросхем [94 - 103] являются основанием для построения численно-аналитической модели взаимодействия электромагнитных полей с МСЭ микросхем.

### РАЗДЕЛ 3

## МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ СВЧ ПОЛЕЙ С МИКРОСТРУКТУРНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ КРИСТАЛЛА СОВРЕМЕННЫХ МИКРОСХЕМ

Построение обобщенной модели взаимодействия электромагнитных полей с микроструктурными элементами кристалла является сложной задачей в силу многочисленности типов микросхем, разнообразия их функционального назначения, топологии, большого количества характеристик электромагнитного излучения. Кроме того, в этом нет крайней необходимости, поскольку в составе различной электронной аппаратуры при воздействии электромагнитных полей реакция микросхем может сильно отличаться от непосредственного воздействия на них ВИИЭМП. Знать предельные возможности стойкости непосредственно микросхем к электромагнитному излучению необходимо, так как построить общую модель воздействия ВИИЭМП на ЭА еще более сложно. Поэтому разработка приемлемой численно-аналитической модели взаимодействия ВИИЭМП с микроструктурными элементами кристалла современных микросхем, позволяющей оценить стойкость ИМС, является актуальной и необходимой задачей. Разработка такой модели позволяет установить предельные возможности микросхем, а следовательно, и электронной аппаратуры, к воздействию импульсных полей. Подобная модель дает возможность исследовать по отдельности влияние различных характеристик импульсных СВЧ полей (длительности радиоимпульса, частоты заполнения, скважности, амплитуды, формы огибающей радиоимпульса), характеристик микросхем (размеров кристалла, защиты от ЭСР, толщины проводящих и диэлектрических слоев, размеров активных микроструктурных элементов, их пространственной и структурной неоднородности) на развитие электротепловых процессов.

Основой для построения рабочей модели взаимодействия импульсного электромагнитного СВЧ излучения с микроструктурными элементами кристалла являются результаты экспериментальных исследований в волноводе, а также, ранее разработанная для микросхем с низким и средним уровнями интеграции численно-аналитическая модель взаимодействия электромагнитных СВЧ полей с микроструктурными элементами. Данная модель включает в себя решение дифракционной задачи для микросхемы в волноводе и решение электротепловой задачи для модели кристалла [58 - 67]. Решение дифракционной задачи для микросхемы в волноводе дает возможность найти значения полей вблизи кристалла [59, 62]. В электротепловой задаче эти значения полей являются исходными для нахождения напряжений, прикладываемых к разрядным цепям в кристалле [58 - 67].

Для современных микросхем, имеющих существенные отличия от, разработанных несколько десятилетий назад, разрабатываемая модель взаимодействия, и в первую очередь модель кристалла, требует существенной переработки. Необходимо, чтобы данные теоретических расчетов с использованием предлагаемой модели кристалла количественно соответствовали результатам экспериментальных исследований по воздействию ВИИЭМП на микросхемы.

Одним из наименее разработанных разделов физики приборов – это физические процессы и поведение приборов (микросхем, дискретных полупроводниковых приборов и приборов в составе микросхем) в напряженных токовых и тепловых режимах (неноминальный режим).

С учетом вышеизложенного в данном разделе рассматриваются основные положения модели взаимодействия высокоинтенсивных импульсных электромагнитных полей с микроструктурными элементами кристалла современных микросхем. Рассмотрены основные положения математического аппарата используемого в решении дифракционной задачи для микросхемы в волноводе и моделей ПТШ на GaAs и Si, позволяющие

исследовать работу приборов в напряженных токовых и тепловых режимах. Особое внимание уделяется анализу разрядных цепей и разработке электротепловой многослойной модели кристалла микросхем.

### **3.1. Основные составляющие модели взаимодействия импульсных СВЧ полей с микроструктурными элементами кристалла микросхем**

При воздействии ВИИЭМП на микросхемы, изменение электродинамических характеристик микросхем, например, при прожоге металлизации, может приводить к изменению внешнего поля, определяющего воздействие на микроструктурные элементы. В этом случае имеет место нелинейная дифракция волн в СВЧ - диапазоне. Для микросхем явление нелинейной дифракции сложно регистрировать, как экспериментально, так и теоретически. Это связано с тем, что масса и геометрические размеры микроструктурных элементов незначительны в сравнении с массой и размерами кристалла, выводов и корпуса. Погрешность экспериментальных измерений и теоретических расчетов не позволяет выявить изменений в структуре полей при выгорании микроструктурных элементов. В этой связи достаточно один раз найти поле для характерного положения микросхемы в волноводе вблизи кристалла, чтобы анализировать лавинные и пробойные явления в цепи разряда, т.е. решить линейную дифракционную задачу.

В электродинамическом плане характеристики макрокомпонент современных микросхем (корпус, выводы, подложка кристалла) практически не отличаются от микросхем с низким и средним уровнями интеграции. Следовательно, имеющийся пакет программ, разработанный для решения дифракционной задачи для микросхем с низким уровнем интеграции, можно использовать для нахождения распределения полей вблизи кристалла современных ИМС. Этот пакет программ разработан сотрудниками кафедры

радиофизики Таврического национального университета им. В.И. Вернадского [58 - 67].

Ниже рассмотрены основные положения, касающиеся решения дифракционной задачи для современной микросхемы в волноводе.

### **3.1.1. Решение дифракционной задачи для современной микросхемы в волноводе**

Исходными для численного решения дифракционной задачи являются уравнения Максвелла:

$$\operatorname{rot} \dot{\vec{H}}_m = i\omega\varepsilon_0 \varepsilon \dot{\vec{E}}_m + \dot{\vec{j}}_m^{cm}; \quad \operatorname{rot} \dot{\vec{E}}_m = -i\omega\mu_0 \mu \dot{\vec{H}}_m, \quad (3.1)$$

где  $\dot{\vec{E}}_m$ ,  $\dot{\vec{H}}_m$  – комплексные амплитуды напряженностей электрического и магнитного поля;

$\varepsilon_0$ ,  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные;

$\varepsilon$ ,  $\mu$  – относительные диэлектрическая и магнитная постоянные;

$\dot{\vec{j}}_m^{cm}$  – комплексная амплитуда плотности стороннего тока.

Анализ численных методов, проведенный в работах [58, 59, 62] показал, что для рассматриваемых объектов (микросхемы в волноводе) наиболее рационально применить декомпозиционный метод с использованием минимальных автономных блоков (МАОБ) [104 - 110]. Микросхема и область вблизи нее разбиваются на автономные кубические блоки (рис. 3.1). Матрицы рассеяния автономных блоков и поля в них находятся с помощью декомпозиции области, заключенной между плоскостями  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 3.1), отделяющими дальнюю зону дифракции от промежуточной и ближней зон дифракции. Разбиение всей области между плоскостями  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 3.1) и пространства внутри микросхемы может быть неравномерным (адаптивная сетка), что позволяет учесть особенности конструкции микросхем.

Для учета граничных условий между автономными блоками (стенки волновода, конструктивные особенности микросхемы) используются так называемые блоки перехода, учитывающие диэлектрические и проводящие свойства сред [106, 107].

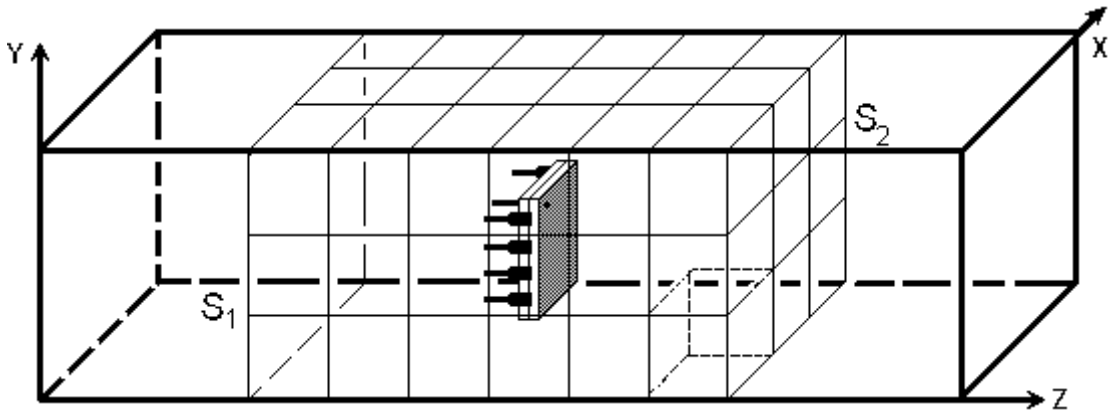


Рис. 3.1. Представление исследуемой области в виде системы кубических автономных блоков

Интегральные характеристики полей в волноводе в дальней зоне (за плоскостями  $S_1$  и  $S_2$ ), такие как коэффициент отражения, коэффициент стоячей волны, ослабление, находятся с использованием процедуры рекомпозиции [107], с помощью которой производится переход от характеристик автономных блоков к характеристикам всей рассматриваемой области. Декомпозиционный метод предполагает нахождение только интегральных характеристик волноводного тракта. В то же время построение модели взаимодействия ВИИЭМП с микроструктурными элементами кристалла микросхем требует знания компонент поля в любой точке пространства с микросхемой, в частности вблизи кристалла. Для нахождения распределения полей в той или иной плоскости рассматриваемой области используются, предложенные в работе [111] специальные программные фильтры.

Программный пакет для решения волноводной дифракционной задачи позволяет вводить значения произвольных геометрических параметров металлодиэлектрических структур, в частности микросхем, вплоть до их

ввода с чертежа. Естественно, что при этом фигурируют только макрокомпоненты – корпус, выводы и кристалл. С учетом этого на рис. 3.2 представлено типичное поперечное сечение микросхемы.

В работе производился расчет полей для микросхем в волноводе в пластмассовом и металлическом корпусах. В расчетах интегральных параметров (коэффициент отражения,  $K_{СВ}$  и ослабление) и напряженности компонент поля задавались соответствующие значения геометрических параметров корпуса, выводов, подложки и кристалла.

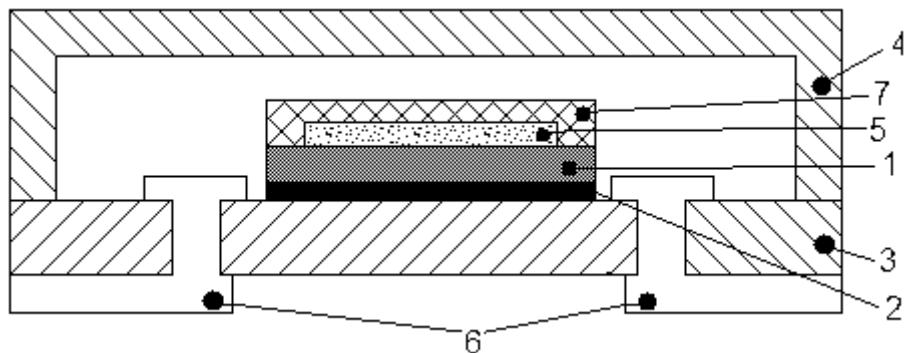


Рис. 3.2. Сечение микросхемы: 1 – подложка; 2 – слой клея; 3 – основание корпуса; 4 – крышка ИМС; 5 – кристалл; 6 – выводы; 7 – защита

При решении дифракционной волноводной задачи для микросхем в пластмассовом корпусе брались следующие значения диэлектрических проницаемостей: корпуса ИМС –  $\epsilon_{КОР} = 10$ , подложки –  $\epsilon_{П} = 7$ , кристалла –  $\epsilon_{К} = 7$ , клеевого слоя –  $\epsilon_{КЛ} = 10$ . В расчетах для микросхем с экраном значение проводимости корпуса бралось таким как у латуни –  $\sigma = 1,4 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . Проводимость стенок волновода предполагалась бесконечной. Решение дифракционной задачи производилось в волноводе сечением  $34 \times 72 \text{ мм}$  для микросхем с наибольшим размером корпуса микросхем  $l < 12 \text{ мм}$  и в волноводе сечением  $45 \times 90 \text{ мм}$  для микросхем с  $l > 12 \text{ мм}$ .

Адекватность решения численной дифракционной задачи для модели микросхемы в волноводном тракте проверялась как на стандартных тестовых

задачах, так и посредством сравнения с результатами, полученными с использованием современных автоматизированных пакетов по численному расчету СВЧ-структур (пакеты HFSS, Microwave Office). В качестве тестовых задач решались следующие классические задачи: прохождение волн через волноводный тракт со стандартными диэлектрическими неоднородностями и без них; волновод с емкостными и индуктивными диафрагмами; волноводный тракт с металлическими включениями. При проведении численных экспериментов осуществлялась также проверка баланса мощностей. Полученные данные показывают, что в зависимости от количества учитываемых гармоник (разработанная модель и программный пакет позволяли учитывать до 60 высших типов волн) погрешность в сравнении с теоретическими расчетами для тестовых структур находилась в пределах 2-5 % [58, 59].

Следующим этапом проверки достоверности решения волноводной дифракционной задачи является сравнение интегральных характеристик режима в волноводе с микросхемой ( $K_{СВ}$  и ослабление), найденных численным методом и полученных экспериментально для современных ИМС.

Как было показано в работах [58], в исследованиях по непосредственному воздействию ВИИЭМП достаточно знать предельные возможности микросхем в двух ориентациях (рис. 2.2), чтобы иметь представление о том, как они ведут себя в произвольных положениях. Методика решения численной дифракционной задачи рассеяния электромагнитных полей на модели ИМС и расчет полей вблизи микросхемы в волноводном тракте с учетом высших типов включает следующую последовательность действий [58 - 67]:

- построение модели исследуемой структуры (волноводный тракт и модель микросхемы) с учетом основных положений метода МАБ (декомпозиционная модель);



- определение матриц рассеяния, блоков «короткого замыкания» и блоков перехода для всех автономных блоков декомпозиционной модели;
- построение общей матрицы рассеяния исследуемой структуры ( $S_{\text{общ}}$ ) (операция рекомпозиции);
- задание параметров падающей электромагнитной волны;
- расчет амплитуд и фаз высших типов волн вблизи микросхемы в волноводном тракте;
- расчет структуры электромагнитных полей вблизи микросхемы;
- определение коэффициентов стоячей волны  $K_{\text{СВ}}$ , ослабления  $A$  и определение напряжений, которые прикладываются к кристаллу микросхем.

На рис. 3.3 и рис. 3.4 представлены результаты расчетов и экспериментальных исследований зависимостей  $K_{\text{СВ}}$  и ослабления от частоты для ATtiny15L (габаритные размеры корпуса 9,2×6×3,3мм) при двух положениях микросхемы в волноводе (рис. 2.2). Рассчитанные кривые отличаются от экспериментальных данных не более чем на 10%.

Расчеты показывают, что кристалл практически не оказывает влияния на значения интегральных и дифференциальных характеристик полей при дифракции на микросхеме в волноводе. Основное влияние на распределение полей в волноводе и микросхеме обусловлено корпусом и выводами микросхемы, т.е. макрокомпонентами ИМС.

Совпадение рассчитанных интегральных характеристик с экспериментальными данными свидетельствует о возможности количественного описания дифракционных явлений на микросхеме в волноводе с помощью соответствующего пакета программ и возможности его использования для нахождения полей вблизи кристалла.

### **3.2. Модель кристалла и разрядные цепи современных микросхем**

При моделировании электротепловых процессов в проводящих микроструктурных элементах кристаллов микросхем с низким уровнем

интеграции упрощенная модель кристалла представлялась в виде четырехслойной структуры (рис. 1.4): 1-й слой – подложка (Si), 2-й слой – диэлектрик ( $\text{SiO}_2$ ), 3-й слой – проводящие участки (Al), разделенные диэлектрическими вставками ( $\text{SiO}_2$ ), 4-й слой – диэлектрик ( $\text{SiO}_2$ ) [58, 62, 64].

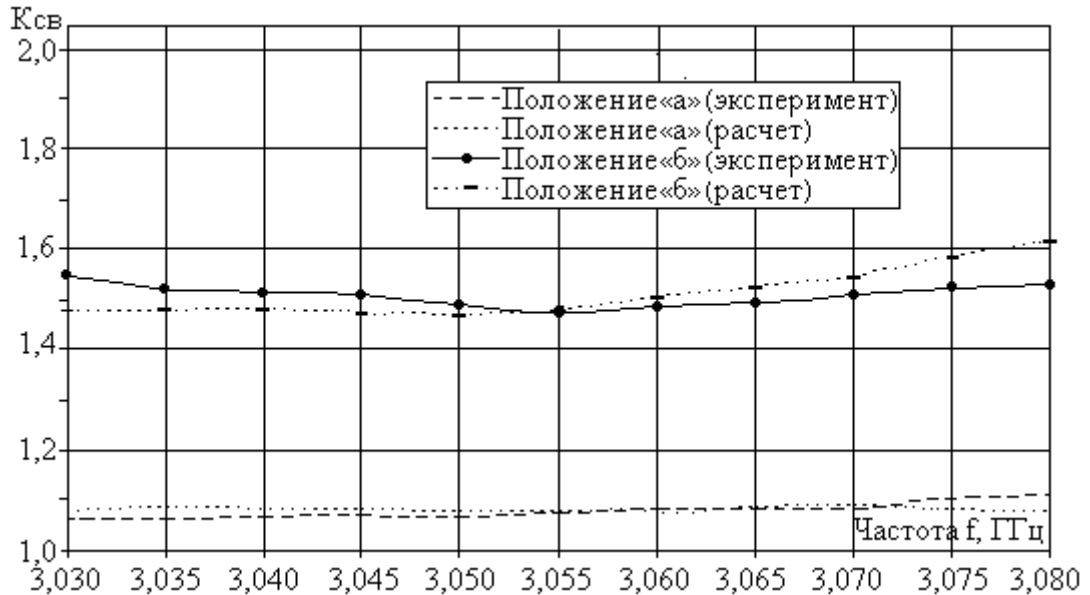


Рис. 3.3. Расчетные и экспериментальные зависимости  $K_{\text{св}}$  от частоты для микросхем ATtiny15L в волноводе

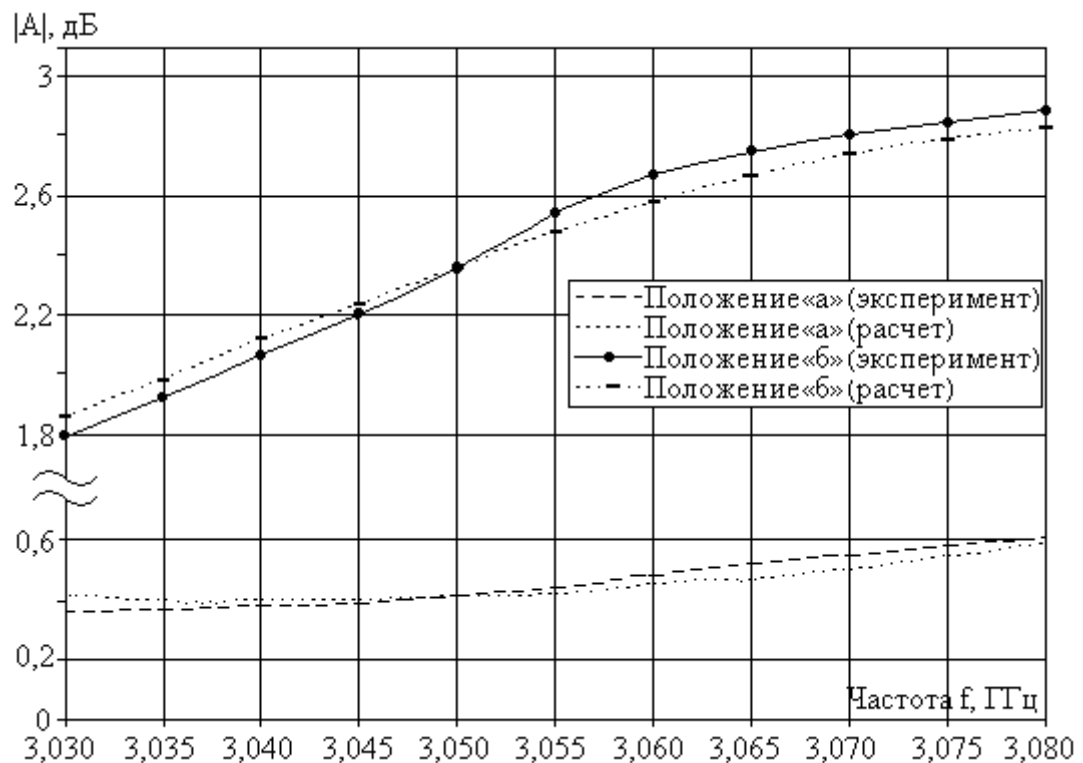


Рис. 3.4. Расчетные и экспериментальные зависимости ослабления от частоты для микросхем ATtiny15L в волноводе

Современные же микросхемы имеют многоуровневую металлизацию и несколько слоев полупроводниковых структур. На рис. 3.5 представлено возможное расположение микроструктурных элементов на кристалле ИМС [72, 74, 75]. На рис. 3.5,а цифрами обозначены: 1 – исходная монокристаллическая пластина – подложка; 2 – скрытый слой; 3 – эпитаксиальный слой (он же коллекторный); 4 – разделительный слой; 5 – базовый слой; 6 – эмиттерный слой; 7 – изолирующий слой с контактными окнами; 8 – слой металлизации; 9 – защитный слой (обычно  $\text{SiO}_2$ ) [74]. На рис. 3.5,б приведен фрагмент с топологией активных элементов на кристалле [74].

На рис. 3.6 представлен фрагмент внешнего вида микроструктурных элементов кристалла современной микросхемы с многоуровневой металлизацией [74, 75].

При разработке электротепловой модели кристалла учесть реальную топологию даже фрагмента современной микросхемы не представляется возможным. Для анализа электротепловых процессов в микроструктурных элементах при воздействии ВИИЭМП необходимо разработать модель кристалла, учитывающую специфику локализации и рассеяния тепла в микроструктурных элементах с многоуровневой металлизацией (рис. 3.7).

Реализация напряженных токовых и тепловых процессов в МСЭ кристалла микросхем при воздействии ВИИЭМП определяется величиной напряжений, наводимых между различными участками кристалла, в основном, между контактными площадками («антенный эффект» [17]). Основным становится вопрос определения цепей разряда с участием различных микроструктурных элементов. На рис. 3.8 показаны разрядные цепи, в одной из которых возможен выход из строя только проводящих или разделительных (диэлектрических) микроструктурных элементов (1, рис. 3.8).

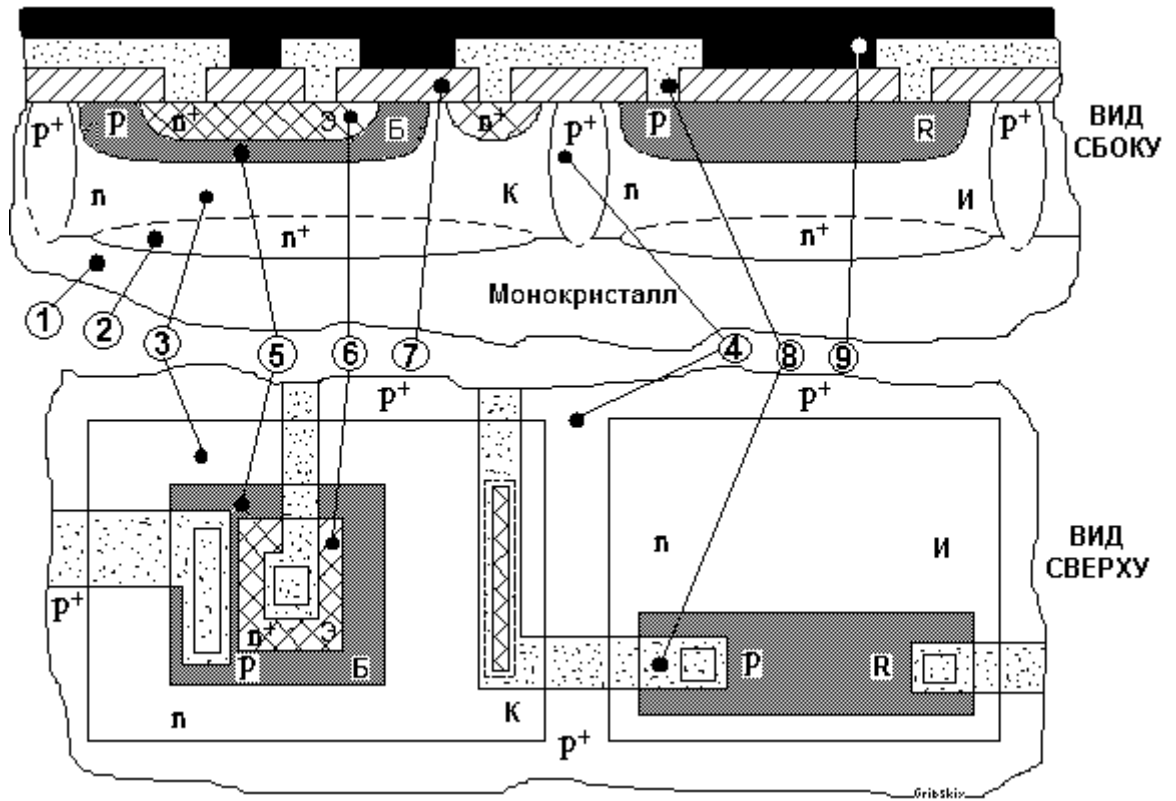


Рис. 3.5. Фрагмент топологии кристалла микросхемы [74]

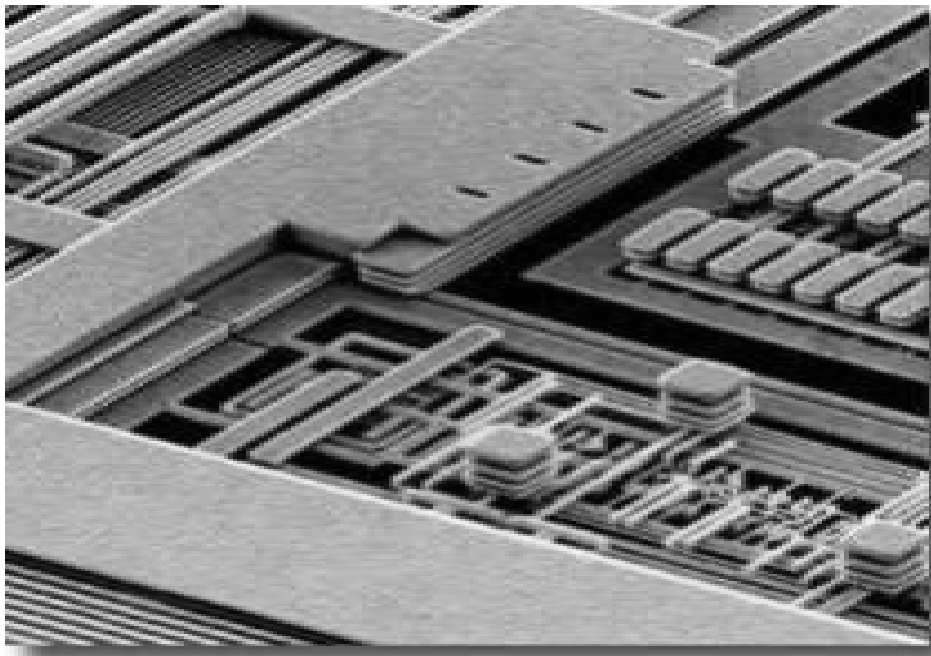


Рис. 3.6. Внешний вид микроструктурных элементов современной микросхемы [74]

В другой цепи возможен выход из строя как активных, так и проводящих и диэлектрических микроструктурных элементов при воздействии импульсных электромагнитных полей (2, рис. 3.8).

Соответствующие эквивалентные схемы цепей разряда представлены на рис. 3.9 и рис. 3.10. В электротепловой модели кристалла современных микросхем слои подложки с различными характеристиками полупроводниковых материалов можно не выделять, поскольку они по теплопроводящим и электродинамическим свойствам практически не отличаются друг от друга, а объединить их в один слой подложки (рис. 3.11).

Модель металлизации кристалла современных микросхем (рис. 3.11) значительно отличается от однослойной модели (рис. 1.4), что требует особого подхода в определении значений емкостей в разрядной цепи (рис. 3.8), а также при решении уравнения теплопроводности и учета теплообменных процессов между различными слоями, примыкающими к разрядной цепи.

При исследовании физических процессов в кристаллах современных микросхем будем использовать двумерную модель кристалла, поэтому предполагается, что на рис. 3.7 – рис. 3.11 дополнительное напряжение при воздействии ВИИЭМП прикладывается вдоль направления  $OX$ , в направлении  $OY$  учитывается многослойность структуры кристалла, вдоль направления  $OZ$  структура кристалла считается однородной.

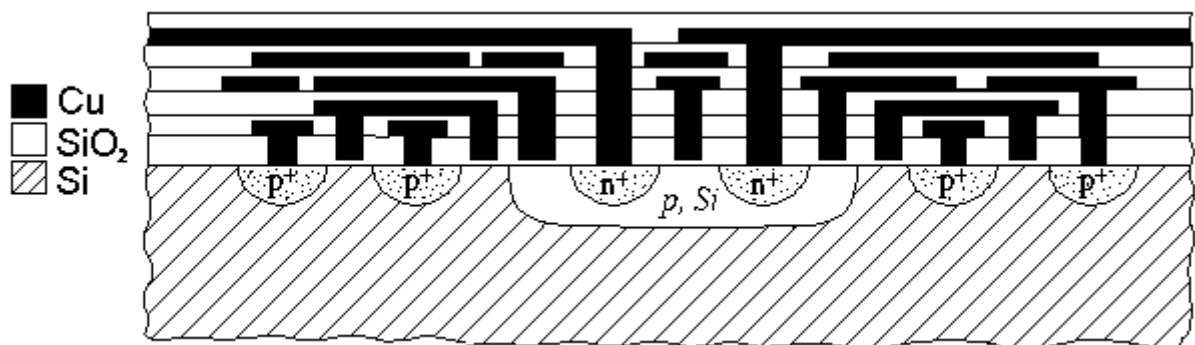


Рис. 3.7. Фрагмент топологии кристалла с многоуровневой металлизацией

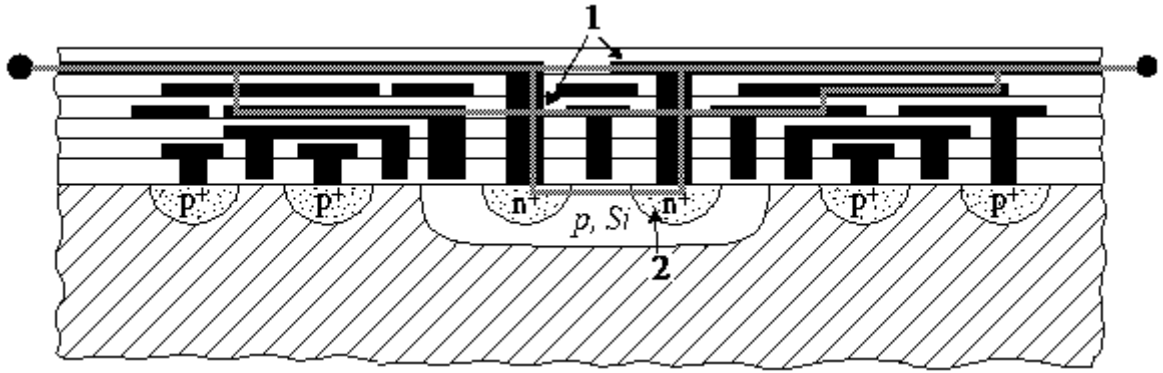


Рис. 3.8. Возможные цепи разряда на фрагменте кристалла (рис. 3.7)

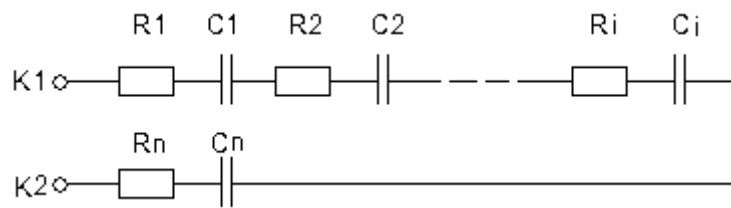


Рис. 3.9. Эквивалентная схема цепи разряда для проводящих и диэлектрических микроструктурных элементов

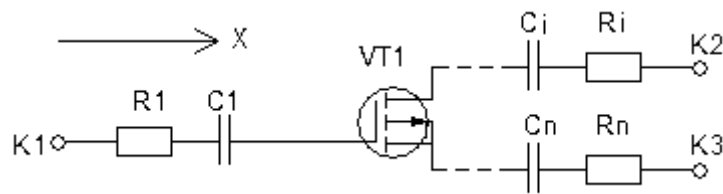


Рис. 3.10. Эквивалентная схема цепи разряда для активных, проводящих и диэлектрических микроструктурных элементов

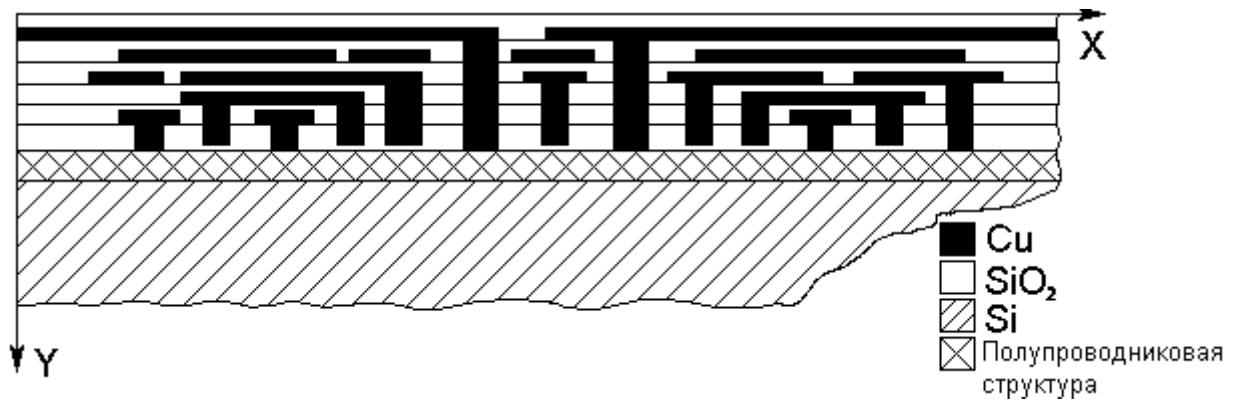


Рис. 3.11. Электротепловая модель кристалла современных микросхем

### 3.2.1. Моделирование электротепловых процессов в цепях разряда с проводящими и диэлектрическими микроструктурными элементами

Второй составляющей численно-аналитической модели взаимодействия ВИИЭМП с микроструктурными элементами микросхем является электротепловая модель кристалла микросхем, которая численно реализуется с помощью нелинейного неоднородного уравнения теплопроводности [104]:

$$c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_s(T, t) \cdot \frac{\partial T_s}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_s(T, t) \cdot \frac{\partial T_s}{\partial y} \right] + q_s(x, y, t), \quad (3.2)$$

где  $T_s$  – температурное поле на  $s$ -м слое ( $s$  – обозначение слоя чипа (Si, SiO<sub>2</sub>, Cu и т.д.);

$c_s$  – удельная теплоемкость  $s$ -слоя;

$\rho_s$  – плотность материала слоя;

$K_s(T, t)$  – коэффициент теплопроводности;

$q_s(x, y, t)$  – удельная мощность источников тепла  $s$ -слоя.

Удельная мощность источников тепловыделения в уравнении (3.2) находится из решения дифракционной задачи и характеристик разрядной цепи [58, 61, 63]. Уравнение (3.2) нелинейно как по коэффициенту теплопроводности  $K_s(T, t)$ , так и источникам тепловыделения.

При решении уравнения теплопроводности для  $n$  (1, 2, ...,  $s$ , ...,  $n$ ) слоев решалась система уравнений из  $n$  уравнений. Для решения этой системы использовались следующие граничные условия [104, 105]:

Поверхность торцов кристалла считается теплоизолированной:

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial T_s}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = 0 \quad (3.3)$$

Тепловое поле на верхней грани слоистой структуры удовлетворяет условию Ньютона:

$$K_{SiO_2} \cdot \frac{\partial T_{SiO_2}}{\partial y} \Big|_{y=L_y} + \alpha_s \cdot (T_{SiO_2} - \theta) = Q(x, t), \quad (3.4)$$

где  $\alpha_s$  – коэффициент теплоотдачи на верхней грани структуры;

$\theta$  – температура внешней среды;

$Q(x, t)$  – плотность плоских источников тепловыделения;

Между слоями структуры предполагается идеальный тепловой контакт, который описывается граничным условием четвертого рода:

$$K_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial y} \Big|_{y=y_l} = K_{s+1} \cdot \frac{\partial T_{s+1}}{\partial y} \Big|_{y=y_l}, \quad (3.5)$$

$$T_s(x, y_s, t) = T_{l+1}(x, y_l, t). \quad (3.6)$$

На нижней поверхности слоистой микроструктуры используется граничное условие третьего рода:

$$K_{Si} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=0} + \alpha_{кл} \cdot (T_1 - \theta) = 0. \quad (3.7)$$

где  $\alpha_{кл}$  – коэффициент теплоотдачи клея,  $K_{Si}$  – коэффициент теплопроводности кремния,  $\theta$  – температура окружающего пространства.

Частным случаем граничного условия на нижней поверхности кристалла является предположение о бесконечном тепловом потоке:

$$T_{Si}(x, 0, t) = T_n(x, t). \quad (3.8)$$

где  $T_n(x, t)$  – температура подложки.



В приведенных системах уравнений величины  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_z$  – геометрические размеры исследуемой модели:  $L_x$  – длина структуры,  $L_y$  – ширина,  $L_z$  – толщина моделируемой структуры.

Методика численного решения электротепловой задачи для случая цепи разряда с проводящими микроструктурными элементами включает следующие этапы:

- выбор ориентации модели микросхемы в волноводном тракте;
- решение дифракционной задачи с помощью пакета программ для определения напряжения, прикладываемого к разрядным цепям;
- конкретизация разрядной цепи (количество проводящих и непроводящих участков, количество задействованных слоев);
- определение эквивалентной емкости разрядной цепи;
- выбор и задание параметров металлизации и ее неоднородности;
- расчет токов проводимости, протекающих по неоднородной металлизации;
- определение удельной мощности, которая выделяется при прохождении тока на всех участках проводящих микроструктурных элементов;
- численное решение нестационарного уравнения теплопроводности для слоистой структуры модели кристалла с учетом меняющихся электрофизических свойств МСЭ при увеличении температуры;
- определение локальных участков металлизации, подверженных деградиационными явлениями с учетом динамики развития электротепловых процессов;
- численный расчет пороговых значений напряженности электрического поля ВИИЭМП, приводящих к локальной деградации и выходу из строя проводящих микроструктурных элементов микросхем.

Плотность источников тепловыделения определялась из законов Ома и Джоуля-Ленца. Найденное из решения дифракционной задачи значение напряжения между жазимами разрядной цепи использовалось для нахождения тока в этой цепи. Неоднородность проводящих

микроструктурных элементов учитывалась путем их дискретизации (МСЭ представлялись в виде сетки сопротивлений) [61, 63, 65], значения эквивалентной емкости разрядной цепи находилось из экспериментальных результатов. По найденным значениям тока определялись плотности тока в элементах проводников, а следовательно, и плотности источников тепловыделения в уравнении теплопроводности (3.2) [104].

Основной причиной выхода микросхем из строя при воздействии мощных импульсных электромагнитных полей является тепловой пробой (прожог) проводящих микроструктурных элементов – контактных площадок и проводящих пленок (дорожек). В динамике такой прожог начинается с повышения температуры и локального прожога в одном или нескольких местах проводящей пленки, их объединения с последующим выходом из строя дорожки или контактной площадки. Локальный прожог проводящих МСЭ и последующая динамика электротепловых процессов объясняется омической и пространственной неоднородностью проводящих пленок [61, 63, 65].

При численно-аналитическом моделировании электротепловых процессов проводящие микроструктурные элементы представлялись в виде сетки сопротивлений (рис. 3.12) [61, 65].

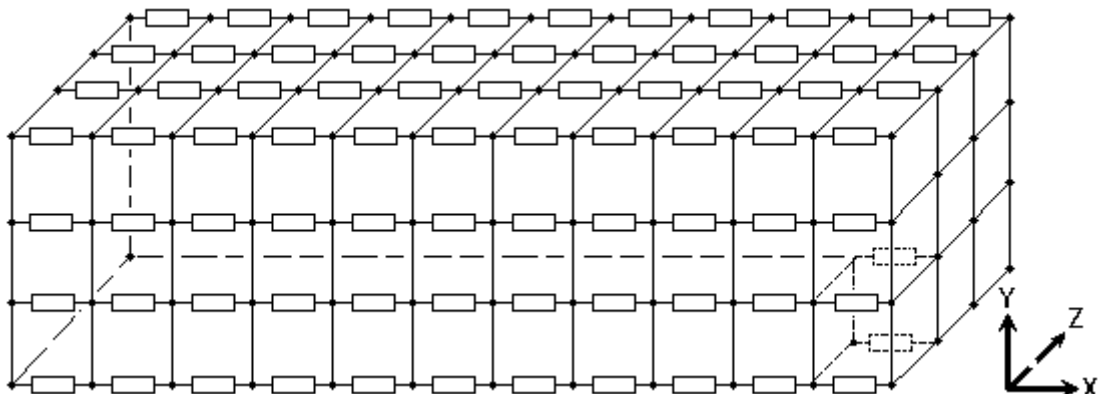


Рис. 3.12. Эквивалентная схема проводящего микроструктурного элемента

Данный подход позволяет исследовать влияние неоднородности проводящих микроструктурных элементов на динамику развития электротепловых процессов.

При исследовании взаимодействия ВИИЭМП с микроструктурными элементами микросхем с низким уровнем интеграции предполагалось, что в разрядной цепи ток смещения в диэлектрических МСЭ замыкается через ток проводимости в металлизации. Ток смещения учитывался в значениях емкостей между проводящими участками разрядной цепи. При этом считалось, что он чисто реактивный, т. е. потери, обусловленные активной составляющей тока, отсутствуют. Для анализа физических процессов в кристаллах современных микросхем необходимо учесть потери тока смещения в диэлектрических микроструктурных элементах, влияющих на развитие электротепловых процессов в цепях разряда при воздействии ВИИЭМП.

При решении электротепловой задачи для модели кристалла микросхем с низким уровнем интеграции разогрев диэлектрических структур осуществлялся за счет теплового потока от проводящих микроструктурных элементов [61, 63]. При учете потерь токов смещения разогрев диэлектрических структур будет осуществляться как за счет теплового потока от проводящих микроструктур, так и от их разогрева активной составляющей тока смещения.

В эквивалентной разрядной цепи (рис. 3.9) диэлектрические микроструктурные элементы замещаются конденсаторами. Реальная диэлектрическая структура имеет потери, которые вызваны протеканием активной составляющей тока смещения  $I_a$ . В этом случае электрические и тепловые процессы в диэлектрических структурах можно учесть при использовании коэффициента диэлектрических потерь ( $tg(\delta)$ ):

$$I_a = I_c \cdot tg(\delta) , \quad (3.9)$$

где  $I_c$  – ток, проходящий через конденсатор.

Для эквивалентной цепи разряда (рис. 3.9) активная составляющая сопротивления диэлектрика определяется выражением [92]:

$$R_{dk} = \frac{1}{\omega \cdot C_k \cdot \operatorname{tg}(\delta_k)}. \quad (3.10)$$

где  $C_k$  – емкость  $k$ -го диэлектрического участка,

$\operatorname{tg}(\delta_k)$  – тангенс угла диэлектрических потерь для  $k$ -го диэлектрического участка;

$\omega$  – циклическая частота воздействующего электромагнитного поля.

Сопротивление разрядной цепи с учетом диэлектрических потерь и соотношений (3.9) и (3.10) имеет вид:

$$|\dot{Z}_0| = \sqrt{\left( \sum_{k=1}^{N+1} R_k + \sum_{k=1}^N \frac{\operatorname{tg}(\delta_k)}{\omega \cdot C_k \cdot (1 + \operatorname{tg}^2(\delta_k))} \right)^2 + \left( \sum_{k=1}^{N+1} \omega \cdot L_k - \sum_{k=1}^N \frac{1}{\omega \cdot C_k \cdot (1 + \operatorname{tg}^2(\delta_k))} \right)^2}, \quad (3.11)$$

где  $N+1$  – количество проводящих элементов в разрядной цепи,  $N$  – количество диэлектрических микроструктур.

Проводящие элементы, входящие в эквивалентную разрядную цепь, представляют собой неоднородные пленочные структуры, которые моделируются в виде последовательно-параллельной сетки сопротивлений (рис. 3.12). Выражение для сопротивления неоднородной проводящей пленочной структуры ( $k$ -й проводящий микроструктурный элемент в токовом канале) имеет вид [61, 63]:

$$R_k = \frac{h_x}{S} \cdot \sum_{i=1}^{N_{xk}} \frac{1}{\sum_{j=1}^{N_{yk}} \sigma_k(i, j)}, \quad (3.12)$$

где  $\sigma_k(i, j)$  – удельная электропроводность локального участка проводящей пленки;

$h_x$  – длина локального участка (вдоль оси  $x$ );

$S$  – площадь поперечного сечения локального участка;

$N_{xk}$  – количество локальных участков вдоль длины проводящей пленки;

$N_y$  – количество локальных участков по толщине (ширине) проводящей пленки.

Общее сопротивление разрядной цепи с учетом потерь в диэлектрике имеет следующий вид:

$$|\dot{Z}_0| = \sqrt{\left[ \frac{h_x^2}{S^2} \left( \sum_{k=1}^{N+1} \cdot \sum_{i=1}^{N_{xk}} \frac{1}{\sum_{j=1}^{N_y} \sigma_k(i, j)} + \frac{S}{h_x} \sum_{k=1}^N \frac{\operatorname{tg}(\delta_k)}{\omega C_k (1 + \operatorname{tg}^2(\delta_k))} \right) \right]^2 + \left( \sum_{k=1}^{N+1} \omega L_k - \sum_{k=1}^N \frac{1}{\omega C_k (1 + \operatorname{tg}^2(\delta_k))} \right)^2}. \quad (3.13)$$

Электротепловая модель позволяет определить амплитуду тока, протекающего по разрядной цепи:

$$|\dot{I}| = \frac{\vec{E}_m \cdot \vec{d}}{\sqrt{2} \cdot |\dot{Z}_0|}, \quad (3.14)$$

где  $\vec{E}_m$  – амплитуда вектора напряженности электрической компоненты воздействующего электромагнитного поля;

$|\vec{d}| \cos \alpha$  – длина разрядной цепи вдоль вектора напряженности поля;

$\alpha$  – угол между векторами  $\vec{E}$  и  $\vec{d}$  (рис. 3.10).

Выражение для амплитуды активной составляющей тока, протекающего через  $k$ -й диэлектрический участок, имеет вид:

$$|\dot{I}_{ak}| = |\dot{I}| \cdot \frac{\operatorname{tg}(\delta_k)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\delta_k)}}. \quad (3.15)$$

Мощность тепловых потерь и удельная мощность источника выделения тепла для  $k$ -го диэлектрического участка равны:

$$P_k = |\dot{I}_{ak}|^2 \cdot R_{dk} = |\dot{I}|^2 \cdot \frac{\operatorname{tg}(\delta_k)}{\omega \cdot C_k \cdot (1 + \operatorname{tg}^2(\delta_k))}, \quad (3.16)$$

$$q_k = \frac{P_k}{Vd_k} = \frac{|\dot{I}|^2 \cdot \operatorname{tg}(\delta_k)}{\omega \cdot C_k \cdot (1 + \operatorname{tg}^2(\delta_k))} \cdot \frac{1}{h_{\partial xk} \cdot h_{\partial yk} \cdot h_{\partial zk}}, \quad (3.17)$$

где  $V_{dk}$ ,  $h_{\partial xk}$ ,  $h_{\partial yk}$ ,  $h_{\partial zk}$  – объем и геометрические размеры  $k$ -го диэлектрического участка по осям  $x, y$  и  $z$ , соответственно.

Соотношения (3.10) – (3.16) используются для нахождения плотности тепловых источников в разрядной цепи с проводящими микроструктурными элементами кристалла микросхем при воздействии мощных импульсных электромагнитных полей. Расчет мощности тепловых потерь на диэлектрических участках, как следует из полученных выражений (3.14) – (3.17), во многом определяется емкостью диэлектрического участка  $C_k$  (рис. 3.13). Оценка значений емкости диэлектрических участков, лежащих в одной плоскости, осуществляется по формуле [112 - 114]:

$$C_k = 0,0442 \cdot C'_k \cdot l \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \text{ [пФ]}, \quad (3.18)$$

где  $C'_k$  – емкостный коэффициент, зависящий от взаимного расположения (конфигурации) проводящих элементов;

$l$  – размеры тонкой металлической пленки (мм);

$\varepsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость окружающей среды;

$\varepsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость оксида кремния.

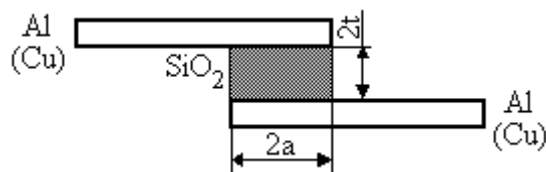


Рис. 3.13. Емкостной зазор между проводящими структурами

Емкостный коэффициент  $C'_k$  в (3.18) зависит от взаимной конфигурации тонких металлических пленок. При образовании разрядных цепей МСЭ, лежащих в одной плоскости, емкостный коэффициент  $C'_k$  для конфигурации проводящих пленок (рис. 3.13) определяется выражениями [112 - 114]:

$$C'_k = \frac{K}{K'}, \quad K = th \frac{\pi \cdot a}{2 \cdot t}, \quad K' = \sqrt{1 - K^2},$$

где  $2a$  – ширина емкостного диэлектрического зазора;

$2t$  – геометрический размер диэлектрического промежутка между проводящими пленками.

В том случае, когда проводящие пленки расположены в разных слоях, значение емкости вычисляется по формуле плоского конденсатора:

$$C = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 S}{t},$$

где  $S$  – общая площадь между проводящими пленками в разных слоях;

$t$  – расстояние между пленками.

Произведенная оценка значений емкости диэлектрических участков показала, что в зависимости от геометрических размеров проводящих участков и диэлектрических структур микросхем средней степени интеграции, величина емкости находится в пределах  $C = 1 \div 10$  пФ, а в современных микросхемах между проводящими дорожками в одном слое  $C = 0.01 \div 1$  пФ, между соседними слоями  $C = 0.01 \div 50$  пФ, емкость между проводником на монокристалле (подложке) и проводящим слоем над ним –  $C = 10^{-17} \dots 10^{-16}$  Ф. В многослойной структуре при наличии различных связей, осуществляемых с помощью проводников емкости могут соединяться самым различным способом и необходимо оперировать с понятием эквивалентной емкости  $C_{\text{экв}}$ , которую можно определить исходя из экспериментальных исследований по непосредственному воздействию мощных импульсных электромагнитных полей на современные микросхемы.

### **3.3. Моделирование электротепловых процессов в активных микроструктурных элементах современных микросхем**

В соответствие со статистическими данными в современных микросхемах активные полупроводниковые структуры выходят из строя реже, чем проводящие микроструктурные элементы при воздействии ВИИЭМП. Есть основания предполагать, что в случае выхода из строя микросхем при совместном тепловом разрушении активных и проводящих микроструктур первопричиной этого являются полупроводниковые приборы кристалла. Поэтому исследования физических процессов, в полупроводниковых приборах, входящих в состав микросхем и работающих в напряженных токовых и тепловых режимах являются актуальными.

Выше были предложены возможные варианты цепей сформировавшегося разряда (рис. 3.9, 3.10) в кристалле микросхем. Однако, при формировании разряда значительную роль могут играть процессы в полупроводниковых приборах кристалла. Этот аспект воздействия импульсных полей на микроструктурные элементы микросхем, связанный с нестационарными явлениями разряда пока недостаточно разработан как в теоретическом, так и в экспериментальном планах.

На рис. 3.10 предложен вариант разрядной цепи, содержащий последовательное соединение активных, проводящих и диэлектрических микроструктурных элементов. Исследований электротепловых процессов в таких цепях с учетом их реального вида на кристалле микросхемы ранее не проводилось. В работах [68 - 72] исследовались только электротепловые процессы в отдельном самостоятельном транзисторе. В транзисторах, входящих в состав кристалла микросхем и работающих в напряженных токовых и тепловых режимах, рассматривать физические процессы необходимо с учетом окружающих МСЭ. В современных ИМС быстродействие транзисторов, в частности полевых транзисторов с барьером Шоттки, достигается за счет уменьшения размеров активной области,



поэтому необходимо исследовать, как влияют размеры активной области ПТШ на вольт-амперные характеристики, на лавинные и тепловые процессы в напряженных токовых режимах [74]. Кроме того, необходимо сравнить динамику и времена развития тепловых процессов в ПТШ и в цепях разряда с проводящими микроструктурными элементами при воздействии ВИИЭМП.

### **3.3.1. Модель ПТШ для исследования напряженных токовых и тепловых режимов**

Одним из базовых микроструктурных элементов при производстве микросхем является полевой транзистор Шоттки. В связи с этим исследования напряженных, токовых и тепловых режимов не могут быть законченными без исследований физических процессов протекающих в ПТШ при воздействии мощных СВЧ-полей. Поскольку провести подобные исследования экспериментальным путем невозможно, подобные исследования проводятся путем моделирования.

Геометрические размеры электродов полевых транзисторов с затвором Шоттки в дискретном исполнении или в качестве активного микроструктурного элемента микросхем, как правило, выбираются в зависимости от назначения на основании обоснованных численно-аналитических моделей, экспериментальных исследований и возможностей технологии их изготовления.

Длина затвора в ПТШ выбирается исходя из назначения и частотного диапазона прибора и определяет геометрию активной области, в частности, длину канала. Соотношение длины затвора и расстояния исток-сток является определяющим как для быстродействия и частотных характеристик прибора, так и для электрической и тепловой стойкости ПТШ. Обычно при исследовании характеристик прибора ограничиваются номинальными электрическими и тепловыми режимами работы. При воздействии статического электричества, электромагнитного излучения, при сбоях в

работе питающих устройств полупроводниковые приборы функционируют в напряженных токовых и тепловых режимах, которые могут приводить к их отказу.

На кафедре радиофизики и электроники Таврического национального университета им. В. И. Вернадского [68 - 71] разработана численно-аналитическая модель ПТШ субмикронных размеров на GaAs и Si с использованием метода крупных частиц, позволяющая учесть свойства полупроводниковых материалов, в том числе при повышении температуры. Эта модель может быть использована для исследования напряженных, токовых и тепловых режимов.

Рассмотрим основные положения численно-аналитических моделей ПТШ на GaAs и Si, которые позволяют проанализировать результаты влияния размеров активной области на интегральные и дифференциальные характеристики, в первую очередь, при работе ПТШ в напряженных токовых режимах. Геометрия и уровни легирования активной области ПТШ представлены на рис. 3.14.

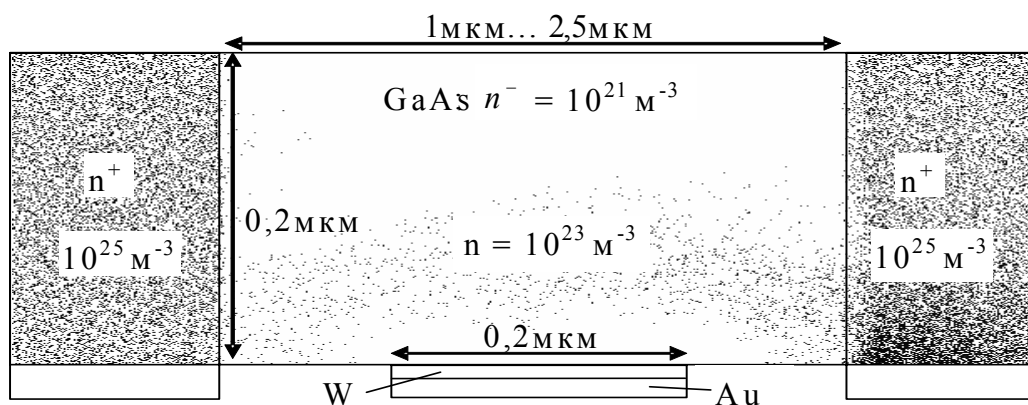


Рис. 3.14. Геометрия ПТШ и распределение примесей

В основу модели ПТШ положено кинетическое уравнение Больцмана [115 - 116]. В качестве исходной в численно-аналитической модели была использована следующая система уравнений:

кинетическое уравнение Больцмана

$$\frac{\partial f}{\partial t} + (\vec{v} \vec{\nabla}_r f) + \frac{1}{\hbar} (\vec{F}_i \vec{\nabla}_k f) = \left( \frac{\partial f}{\partial t} \right)_i, \quad (3.19)$$

уравнение Пуассона

$$\Delta \varphi = -\frac{1}{\varepsilon} (\rho(\vec{r}) - \sum_i e_i \int f_i d\vec{v}_i), \quad (3.20)$$

и уравнение теплопроводности

$$cd \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] + q(x, y, t), \quad (3.21)$$

где  $f$  – функция распределения носителей по энергии и импульсам;

$\vec{v}_i$  – скорость носителей заряда  $e_i$ ;

$\vec{F}_i$  – сила, действующая на заряд со стороны внешнего электромагнитного поля и остальных носителей заряда;

$\left( \frac{\partial f}{\partial t} \right)_i$  – интеграл столкновений;

$\rho$  – плотность объемного заряда; создаваемого ионами кристаллической решетки;

$\sum_i e_i \int f_i d\vec{v}_i$  – плотность объемного заряда, создаваемого свободными носителями тока;

$c$  – удельная теплоемкость кристалла;

$T$  – температура кристалла;

$d$  – плотность кристалла;

$K(T)$  – коэффициент теплопроводности;

$q(x, y, t)$  – плотность источников тепловыделения, которая связана с интегралами рассеяния.

Более подробно модель ПТШ на GaAs, рассмотрена в работах [68 - 71]. В напряженных режимах работы транзистора необходимо учесть процессы распределения тепла в различных частях активной области ПТШ и процессы генерации избыточных пар электрон-дырка, способные приводить к лавинному пробую. Предложенная модель дополнена уравнением

теплопроводности для анализа процессов локализации и распространения тепла в активной области, что дает возможность исследовать работу ПТШ в напряженных режимах. Для учета генерации избыточных пар электрон-дырка введен дополнительный механизм рассеяния. В результате акта ионизации при достижении электроном достаточной энергии происходит рассеяние первичного электрона с образованием неравновесной пары электрон-дырка. Соответственно, при моделировании физики процессов лавинообразования в ПТШ учтена динамика ансамбля неравновесных дырок. При учете движения дырок использовалась дрейфовая модель переноса дырок с учетом зависимости дрейфовой скорости от напряженности поля и температуры кристалла. Решение кинетического уравнения сводилось к заданию функции распределения, граничных условий и решению уравнений движения для носителей заряда в кристалле с учетом механизмов рассеяния [68 - 71]:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{1}{\hbar} \frac{d\varepsilon_k}{dk} \quad \text{и} \quad \frac{d\vec{k}}{dt} = \frac{1}{\hbar} \frac{\vec{F}}{m^*}, \quad (3.22)$$

где  $\varepsilon_k$  – энергия носителя;

$\vec{F}$  – действующая на него внешняя сила;

$m^*$  – эффективная масса носителя заряда.

Поскольку магнитное взаимодействие слабо, можно считать, что внешняя электрическая сила  $\vec{F} = \vec{\nabla}_r \varphi(\vec{r}, t)$ , где  $\varphi$  - потенциал электрического поля, определяемый при решении уравнения Пуассона:

$$\Delta \varphi = -\frac{1}{\varepsilon} (\rho(\vec{r}) - \sum_i e_i \int f_i d\vec{v}_i), \quad (3.23)$$

где  $\rho$  – объемный заряд примесей,

$\sum e_i \int f_i d\vec{v}_i$  – объемный заряд, создаваемый свободными носителями тока в

активной области прибора.

При использовании метода крупных частиц для моделирования процессов в ПТШ рабочим являются уравнения (3.22), (3.23).

При исследовании напряженных токовых и тепловых режимов учитывались наиболее значимые механизмы рассеяния носителей заряда.

Для приборов на кремнии наиболее характерными являются следующие механизмы рассеяния [117, 118]:

- рассеяние на деформационном потенциале продольных LA-фононов (DLA-рассеяние);
- деформационное рассеяние на поперечных TA-фононах (DTA-рассеяние);
- электрон-электронное рассеяние;
- рассеяние на ионах примеси;
- рассеяние на нейтральных примесях.

Для приборов на GaAs наиболее характерными являются следующие механизмы рассеяния [117, 118]:

- рассеяние на акустических фононах решетки с продольным и поперечным типом взаимодействия носителей с акустической волной решетки.
- рассеяние на оптических фононах;
- междолинное рассеяние электронов;
- рассеяние на ионах примеси (для несобственного полупроводника);
- рассеяние на нейтральных примесях;
- электрон-электронное рассеяние;
- рассеяние на дефектах кристаллической решетки типа «дислокация».

В работах [68 - 71, 120] приводятся и анализируются соответствующие выражения для механизмов рассеяния в GaAs, приводится схема численной реализации системы уравнений (3.19) – (3.21), в частности – решения уравнения Больцмана. Решение уравнения Пуассона осуществлялось с помощью метода FACR, решение уравнения теплопроводности (3.21) проводилось с помощью неявного метода прогонки [105, 109, 110], для решения уравнений движения использовался модифицированный метод Эйлера [105, 109, 110]. Пакет программ моделирования физических процессов в ПТШ разработан сотрудниками кафедры радиофизики ТНУ им. Вернадского под руководством Зуева С.А. [68 - 71, 120].

### 3.4. Выводы по разделу

Модель взаимодействия импульсных СВЧ полей с ИМС низкого и среднего уровней интеграции хорошо себя зарекомендовала при исследовании физических процессов в МСЭ кристалла, однако оказалась малоприменимой для современных микросхем. Связано это в основном с существенными различиями в топологии кристаллов, уровне интеграции, наличием многослойной металлизации. С учетом этого в данном разделе рассмотрены вопросы обоснования модели кристалла современных микросхем и возможных цепей разряда, включающие основные микроструктурные элементы [123 - 125].

По данному разделу можно сделать следующие выводы:

1. Пакет программ для решения дифракционной задачи в волноводе количественно описывает распределение полей в современных микросхемах в волноводе при воздействии мощных ИЭМП. Это следует из сравнения расчетных значений  $K_{СВ}$  и ослабления с экспериментальными результатами. Пакет программ можно использовать для нахождения полей в кристалле микросхем и источников тепла в разрядных цепях.
2. Проведенный анализ цепей разряда в кристалле микросхем позволил сформировать физическую и математическую электротепловую модель кристалла современных микросхем.
3. Адаптирован пакет программ численно-аналитической модели ПТШ для моделирования физических процессов в напряженных токовых и тепловых режимах вплоть до теплового разрушения транзистора.

## РАЗДЕЛ 4

### МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННЫХ ТОКОВЫХ И ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ В МИКРОСТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ КРИСТАЛЛА СОВРЕМЕННЫХ МИКРОСХЕМ

Результаты экспериментальных исследований по непосредственному воздействию мощных ИЭМП на современные микросхемы и опыт моделирования физических процессов в ИМС с низким и средним уровнями интеграции являются основой для построения модели взаимодействия импульсных электромагнитных полей с микроструктурными элементами кристалла современных ИМС. Анализ причин различий теоретических данных для современных микросхем, полученных при использовании модели взаимодействия ВИИЭМП с микроструктурными элементами кристаллов с низким и средним уровнями интеграции, с результатами экспериментов, показал, что основными причинами расхождений являются: 1) геометрические размеры микроструктурных элементов на подложке кристалла (степень интеграции); 2) многослойность металлизации; 3) использование медных проводящих пленок в кристалле (или алюминиевых в оболочке из титана).

В модели микросхем с низким и средним уровнями интеграции не учитывались потери тока смещения в диэлектрике и их влияние на электротепловые процессы в кристалле. В современных ИМС с большим количеством слоев металлизации и разделяющих диэлектрических пленок (емкостных зазоров), влияние  $tg\delta$  на разогрев этих пленок может существенно влиять на электротепловые процессы в кристалле.

Проводящие пленки верхних слоев кристалла имеют площадь намного больше, чем дорожки на подложке, их сопротивление на несколько порядков меньше сопротивления проводников на подложке кристалла. Емкость между верхними слоями на порядок больше емкости между проводящими дорожками на подложке, однако вид соединений между слоями может

приводить к различным значениям эквивалентной емкости цепей разряда в многослойных структурах в сравнении с однослойными структурами. Роль и влияние этих факторов на стойкость ИМС к воздействию мощных импульсных электромагнитных полей ранее не исследовались.

При воздействии ВИИЭМП на микросхемы образование цепей разряда возможно с участием активных микроструктурных элементов, их межэлектродных емкостей и емкостных зазоров между проводящими элементами. Для прогнозирования стойкости ИМС необходимо рассмотреть физические процессы в цепях разряда, состоящих из пассивных и активных микроструктурных элементов кристалла при их работе в напряженных токовых и тепловых режимах.

С учетом этого в данном разделе решаются следующие задачи:

- моделируются электротепловые процессы в проводящих микроструктурных элементах кристалла выполненных из алюминия, алюминия в оболочке из титана, с учетом разогрева прилегающих диэлектрических слоев от потерь токов смещения;
- рассматривается развитие электротепловых процессов в медных с подслоем из тантала пленочных микроструктурных элементах кристалла, исследуется динамика процессов, с учетом пространственной и омической неоднородностей проводящих пленок;
- на основании экспериментальных данных находятся параметры цепи разряда, состоящей из последовательного соединения проводящих и диэлектрических микроструктурных элементов для электротепловой модели кристалла современных микросхем;
- исследуются физические процессы в полевом транзисторе с затвором Шоттки в напряженном токовом и тепловом режимах; исследуется влияние размеров затвора и рабочей области полевого транзистора на его стойкость;
- обобщаются результаты теоретических и экспериментальных исследований для модели современных микросхем, позволяющей прогнозировать их стойкость при работе в напряженных токовых и тепловых



режимах, реализующихся при воздействии мощных импульсных электромагнитных полей.

#### **4.1. Электротепловые процессы в металлизации микросхем с учетом потерь токов смещения в диэлектрике**

В современных микросхемах в качестве материала проводящих пленок на подложке кристалла используется медь в танталовых канавках или алюминий в оболочке из титановой пленки [87 - 89]. Для исследования влияния потерь тока смещения в разделительных диэлектрических слоях на электротепловые процессы в проводящих микроструктурных элементах вначале рассмотрим одномерную (планарную) цепь разряда с металлизацией из алюминия, затем из алюминия в оболочке из титана, а затем – электротепловые процессы в кристалле с многослойной металлизацией из меди. Рассматриваемая ниже цепь разряда с алюминиевыми пленками аналогична цепи разряда кристаллов микросхем с низким и средним уровнями интеграции (однослойная металлизация). Учет потерь токов смещения в такой простой цепи позволяет исследовать динамику электротепловых процессов и сравнить результаты расчетов с подобными, но без учета токов смещения, а также с экспериментальными данными. Ранее подобных исследований для ИМС с низким и средним уровнями интеграции не производилось.

При воздействии ВИИЭМП динамика электротепловых процессов в разрядной цепи во многом определяется неоднородностью металлизации. Сечение модели кристалла в плоскости XY с основными геометрическими размерами приведено на рис. 4.1. Проводящая пленка (Al) в расчетной модели кристалла имела 11 заданных неоднородных участков (1-11, рис. 4.1), электропроводность которых была на порядок меньше, чем у однородной структуры. Размеры неоднородных участков в проводящей пленке были выбраны следующими ( $x \times y$ , мкм):  $10 \times 2,4$  (участки 3,4);  $10 \times 3,6$  (участки 1,2,7,8,9);  $10 \times 4,8$  (участки 5,6,10,11). Емкость диэлектрического включения

между проводниками составляла  $0,1 \dots 1 \mu\Phi$ , а размер диэлектрика вдоль пути прохождения тока (вдоль оси  $x$ )  $l_0 = 10 \mu\text{м}$ .

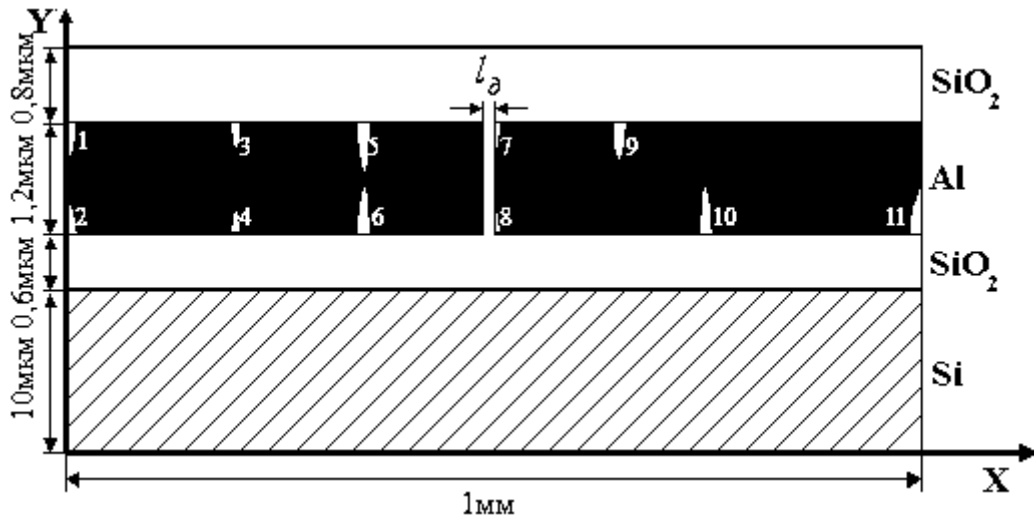


Рис. 4.1. Сечение модели кристалла с неоднородной металлизацией

При численном моделировании воздействия ВИИЭМП на микросхему предполагалось, что она ориентирована таким образом, когда грань с микроструктурными элементами параллельна вектору напряженности электрической компоненты воздействующего поля (ориентации «б» и «в», рис. 2.2). При этом на нее воздействовало импульсное электромагнитное поле с частотой заполнения  $f = 3 \text{ ГГц}$ , с амплитудным значением напряженности электрической компоненты  $E_m = 75 \text{ кВ/м}$ , с длительностью радиоимпульса  $1 \text{ мкс}$ , скважностью  $10^4$ . С использованием пакета программ [58, 119] было определено напряжение, которое прикладывается к контактные площадки эквивалентной разрядной цепи, и проведен численный расчет динамики электротепловых процессов с учетом потерь в диэлектрике.

На рис. 4.2 представлено распределение температуры в модели кристалла во времени при воздействии ВИИЭМП. Динамика электротепловых процессов и распределение температурного поля кристалла микросхемы в процессе воздействия электромагнитного поля с учетом потерь в диэлектрике отличается от распределения тепла без учета потерь. На начальной стадии воздействия ( $t = 1 \text{ нс}$ ) в основном происходит разогрев диэлектрика (рис. 4.2, а), в дальнейшем более быстро происходит разогрев

участков металлизации (рис. 4.2 «б», «в») в местах сужения токового канала (участки 5,6, рис. 4.1), а также на краях металлизации, (участки 1, 2, 7, 8, 11, рис. 4.1). Наибольший рост температуры наблюдается на самом тонком участке металлизации (между неоднородностями 5 и 6, рис. 4.1), что приводит к его последующей деструкции (температура данного участка достигает значения температуры плавления алюминия, рис. 4.2,г). При этом температура данного участка становится выше температуры диэлектрического включения.

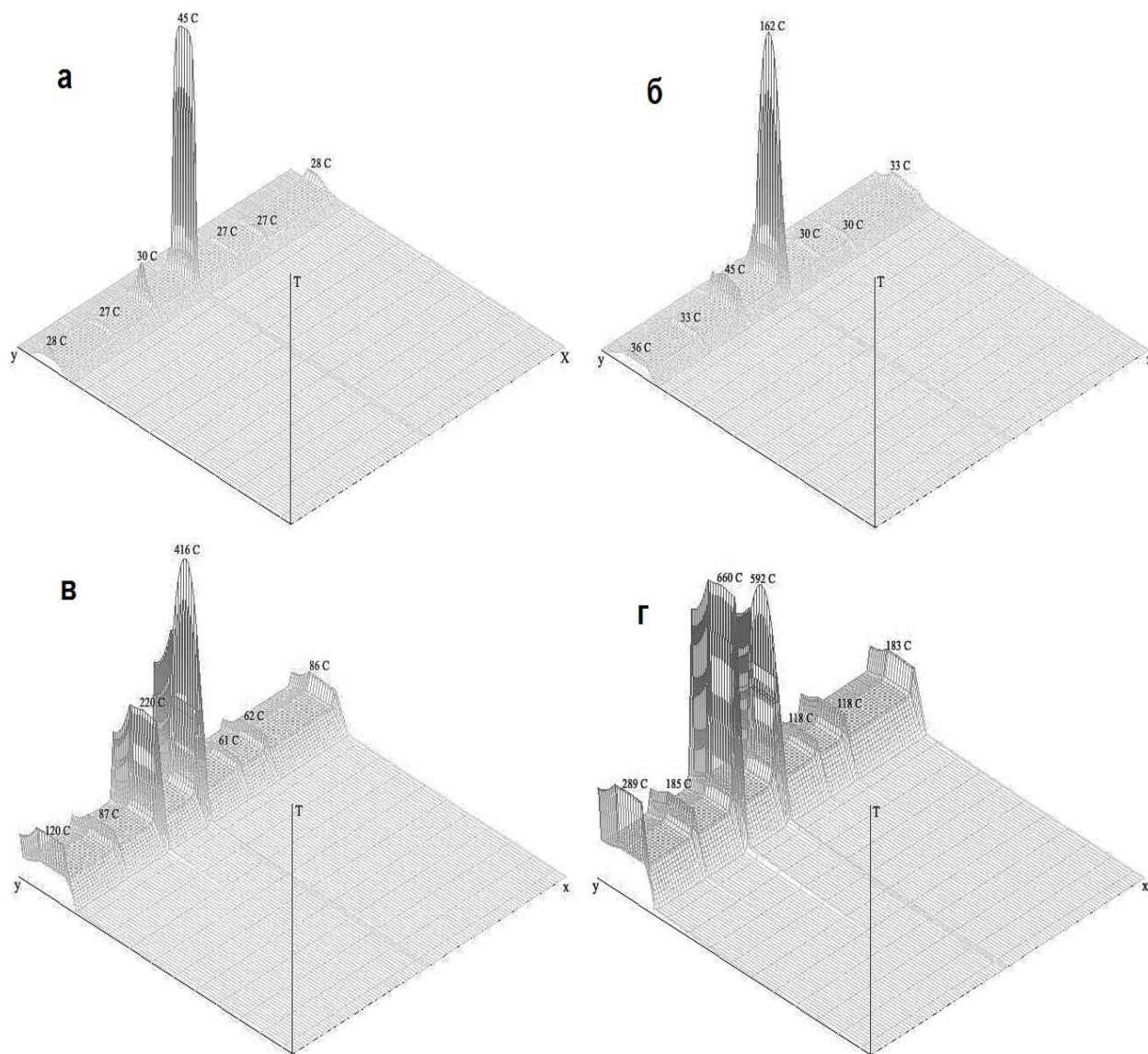


Рис. 4.2. Температурное поле в цепи разряда кристалла микросхемы в различные моменты времени при воздействии ВИИЭМП при:

а –  $t = 1$  нс; б -  $t = 10$  нс; в –  $t = 100$  нс; г –  $t = 250$  нс

Изменение характера температурного поля связано как с электротепловыми процессами во всем кристалле, так и с процессами в микроструктурных элементах. В частности, при увеличении температуры металлизации изменяется ее электропроводность, как в целом, так и отдельных локальных участков. Это приводит к перераспределению удельной мощности, которая выделяется в неоднородной металлизации.

На рис. 4.3 представлена динамика изменения температуры диэлектрического участка (кривая 1, рис. 4.3) и наиболее уязвимого локального участка (5,6, рис. 4.1) металлизации (кривая 2, рис. 4.3). Из полученной зависимости следует, что в данном временном диапазоне для диэлектрического участка имеет место выход на режим, близкий к стационарному. Это связано с тем, что, с одной стороны, уменьшается ток, протекающий по диэлектрику за счет увеличения общего сопротивления цепи при разогреве металлизации, а с другой - начинают играть важную роль температурные градиенты в кристалле, которые приводят в итоге к установлению этого режима. Удельная мощность, рассеиваемая на локальном участке металлизации является нелинейной функцией, так как зависит от параметров металлизации, а они изменяются со временем. Поэтому, при определенных соотношениях между током, проходящим по рассматриваемому участку металлизации, его электропроводностью и общим сопротивлением разрядной цепи, увеличивается скорость роста температуры локального участка, что вызывает его деструкцию (рис. 4.2 и рис. 4.3). В случае расположения неоднородного участка на границе с диэлектриком время теплового разрушения этого участка наступает быстрее за счет потерь в диэлектрике по сравнению со случаем, когда потери не учитываются [119].

При расчетах стойкости микросхем с низким и средним уровнями интеграции различия в пороговых значениях напряженности воздействующего поля между экспериментальными и теоретическими

данными не превышали 20% [119, 121]. Учет потерь тока смещения в диэлектрике позволяет объяснить уменьшение этого расхождения до 10%.

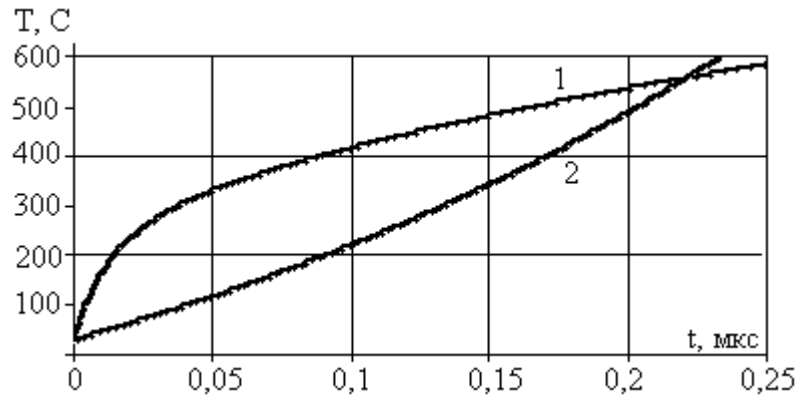


Рис. 4.3. Динамика изменения температуры в разрядной цепи:

1 – диэлектрического участка; 2 – локального участка металлизации

Аналогичная ситуация имеет место для проводящих микроструктурных элементов из алюминия в титановой оболочке (рис. 4.4) при учете потерь, обусловленных током смещения в диэлектрике. На рис. 4.5 представлены зависимости пороговых значений напряженности электрической компоненты воздействующего поля, при которых происходит прожог проводящих микроструктурных элементов, от длительности импульса (аналог критериальной зависимости Вунша-Белла) для металлодиэлектрических структур, показанных на рис. 4.1 и рис. 4.4. Расчеты критериальных зависимостей проведены с учетом потерь токов смещения для пространственно и омически неоднородных микроструктурных элементов из алюминия, алюминия в титановой пленочной оболочке, а также для однородной алюминиевой дорожки.

Как следует из зависимостей, приведенных на рис. 4.5, пространственная и омическая неоднородности в значительной степени снижают тепловую стойкость алюминиевой дорожки. Титановая оболочка повышает стойкость разрядных цепей в кристалле в сравнении с подобными дорожками непосредственно из алюминия. При расчетах стойкости проводящих алюминиевых микроструктурных элементов в оболочке из титана их окончательный выход предполагался при температуре плавления титана.

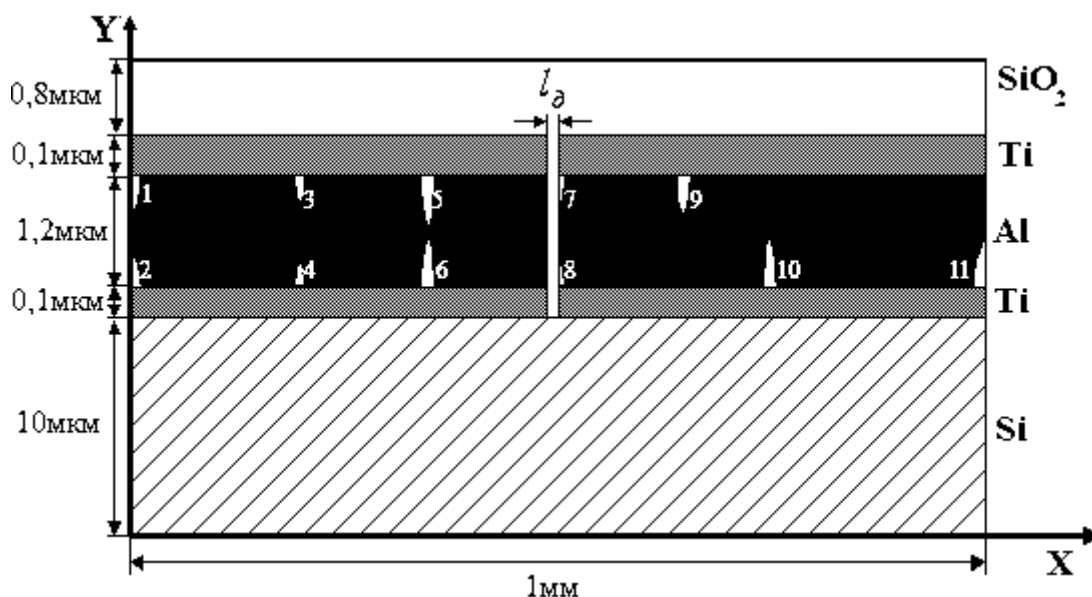


Рис. 4.4. Металлодиэлектрическая структура кристалла с дорожками из алюминия в титановой оболочке

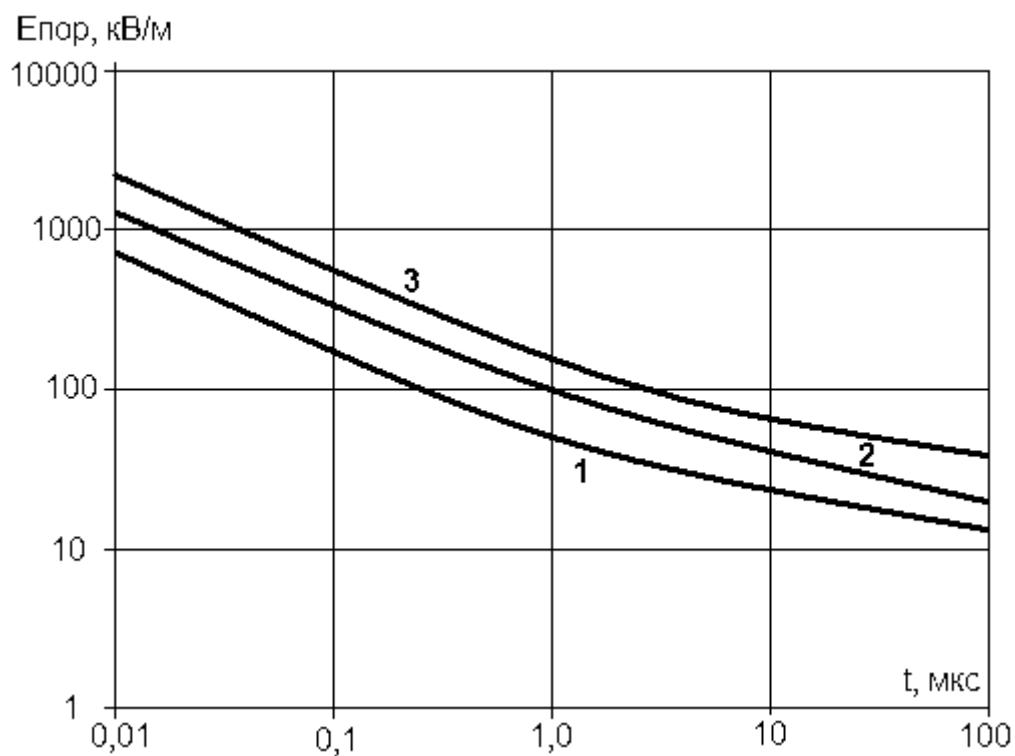


Рис. 4.5. Зависимость пороговых значений напряженности электромагнитного поля разрушающего металлизацию от длительности импульса: 1 – неоднородная алюминиевая дорожка; 2 – однородная алюминиевая дорожка; 3 – неоднородная алюминиевая дорожка в титановой оболочке.

#### 4.1.1. Физические процессы в неоднородных медных пленках кристалла микросхем в напряженных токовых и тепловых режимах

Для сравнения стойкости проводящих микроструктурных элементов из алюминия, алюминия в титановой оболочке и меди в танталовой канавке (подслой из тантала, рис. 4.6), рассмотрим электротепловые процессы в одинаковых по геометрии одномерных вариантах цепей разряда (однослойные проводящие структуры). На рис.4.6 нижний слой подложка - Si, следующий слой оксида кремния –  $\text{SiO}_2$ , следующий слой тантала – Ta, затем следует неоднородная пленка меди – Cu, верхний слой оксида кремния –  $\text{SiO}_2$ .

Температура плавления алюминия –  $660^\circ\text{C}$ , меди –  $1083^\circ\text{C}$ , титана –  $1675^\circ\text{C}$ , тантала –  $3880^\circ\text{C}$ ; проводимость титана в 30, а тантала в 5 раз меньше, чем у меди. На рис. 4.7 представлены графики критериальных зависимостей стойкости проводящих микроструктурных элементов из алюминия, алюминия в титановой оболочке и меди с подслоем из тантала при одинаковых толщинах проводящих пленок и одинаковой пространственной и омической неоднородностях без учета тока смещения.

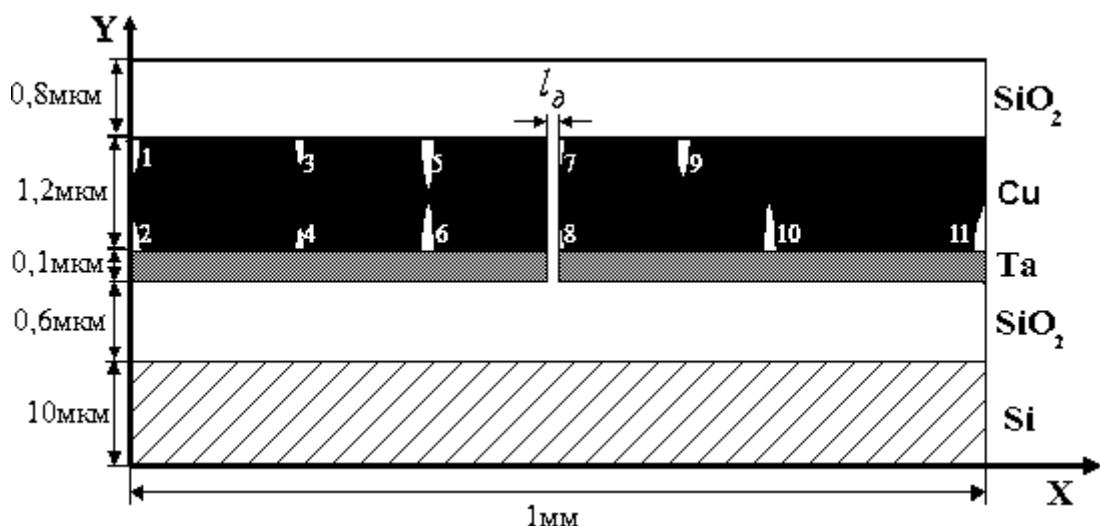


Рис. 4.6. Металлodieлектрическая структура кристалла с проводящими элементами из меди

Расчеты производились для однородной медной дорожки. Как и следовало ожидать (рис. 4.7) наибольшую электротепловую стойкость имеет цепь разряда для дорожки из меди с подслоем из титана. Стойкость металлизации, в первую очередь, определяется более высокой температурой плавления меди в сравнение с алюминием, а также лучшей тепло- и электропроводностью. Следует отметить, что в отличие от алюминиевых пленок неоднородных по толщине вследствие зернистости, медные пленки практически однородны в этом направлении, но неоднородны по ширине (рис. 1.5).

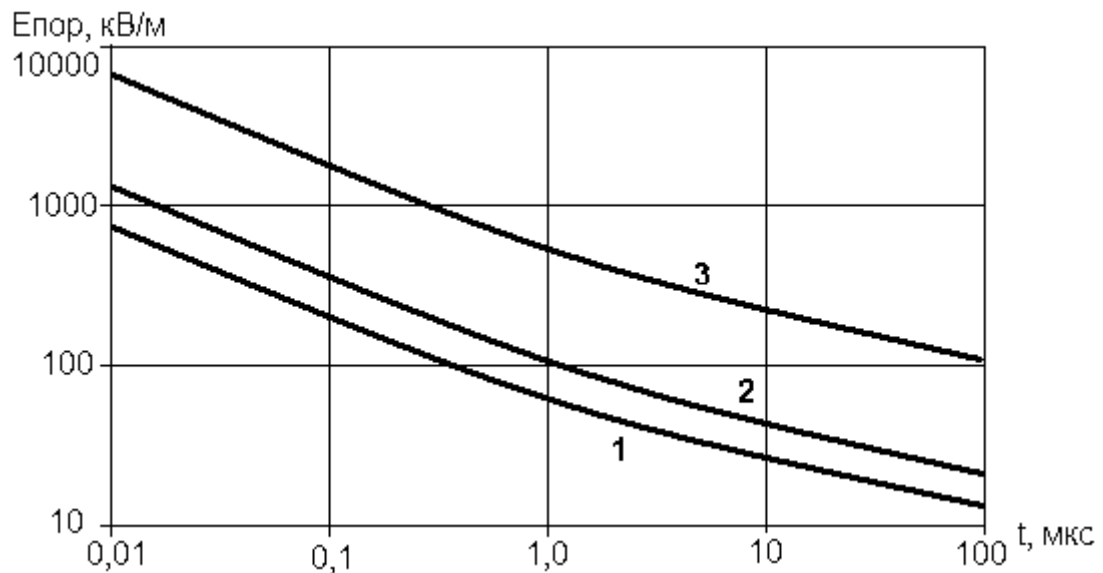


Рис. 4.7. Сравнительная зависимость пороговых значений напряженности электромагнитного поля от длительности воздействующего ВИИЭМП:

1 – неоднородная алюминиевая дорожка; 2 – алюминиевая дорожка в титановой оболочке; 3 – медная дорожка с подслоем из тантала

Рассмотрим, как влияет омическая и пространственная неоднородность медной пленки на стойкость микросхем. При протекании тока через проводник решающим для распределения тока является площадь поперечного сечения проводника и его омическая неоднородность. Электротепловая модель кристалла является двумерной, поэтому тепловые потоки учитывались по длине структуры (вдоль оси  $X$ ) и по толщине (вдоль



оси  $Y$ ). Вдоль структуры проходит ток (направление  $X$ ), а по толщине структуры имеет место основной тепловой поток. На рис. 4.8, показана разрядная цепь в кристалле с неоднородной медной металлизацией (направление  $OZ$ ) многослойной по  $OY$  направлению. С математической точки зрения при расчетах безразлично, вдоль какого из направлений учитывать пространственную неоднородность пленки – по направлению  $OZ$  или  $OY$ . Это обстоятельство не отражается на физике электротепловых процессов. Разрядная цепь, показанная на рис. 4.8, представляет собой фрагмент кристалла, недостающие части, которого заполнялись в общем случае произвольно.

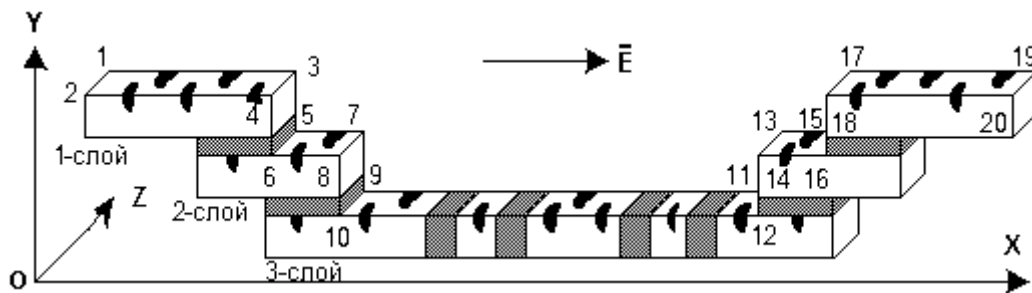


Рис. 4.8. Модель неоднородной многослойной структуры вдоль разрядной цепи (серым цветом обозначены диэлектрические пленки, белым – проводящие, черным – неоднородности в проводниках)

Расчет динамики деградиционных процессов в медных пленках осуществляется на каждом временном шаге  $\tau$  до тех пор, пока не произойдет ее плавление или не установится стационарный температурный режим в слоистой микроструктуре при воздействии электромагнитных полей. В расчетах для разрядных цепей с дорожками из алюминия в титановой оболочке и меди с подслоем из тантала предполагалось, что толщина слоев из титана и тантала на порядок меньше, чем у основных проводящих слоев (Al или Cu), а их полное разрушение наступает после достижения температуры плавления титана или тантала.

При расчетах значения электропроводности неоднородных участков металлизации (рис. 4.8, участки 1 - 20) задавались на 10% меньше чем у однородных участков. Эти участки с омической неоднородностью были пространственно распределены вдоль дорожки. Участки многослойной металлизации были распределены случайным образом с учетом того, что, неоднородность наиболее выражена на краях металлизации, в местах контакта с диэлектриком и, особенно, при переходе от одного слоя металлизации к другому (рис. 4.8, участки 3 - 6, 7 - 10, 11 - 14, 15 - 18).

Расчеты показывают, что на начальной стадии разряда наблюдается локальный рост температуры неоднородных участков, на который не влияет пространственное поле температур (рис. 4.9). Неоднородная структура металлической пленки и влияние температуры на ее электрофизические параметры приводит к перераспределению плотности тока по всему объему медной пленки. Этот процесс вызывает интенсивный рост температуры в местах наибольшей неоднородности (участки 5 и 6, рис. 4.8, рис. 4.9), что особенно ярко начинает проявляться с момента времени  $t = 10^{-8}$  с (рис. 4.9). При этом наблюдается «растекания теплоты» по толщине дорожки (вдоль оси Y), что связано с размерами поперечного сечения металлизации.

Надо отметить, что в рассматриваемых временных интервалах (до момента времени  $t = 10^{-8}$  с) на рост температуры не оказывают влияния граничные условия. До момента локального выгорания неоднородного участка ( $t = 1,257 \cdot 10^{-8}$  с) температура для одинаковых размеров неоднородных участков как внутри дорожки (участки 3,4, рис. 4.9), так и на ее краях (участки 14, 15, рис. 4.9) практически одинакова. Это связано с тем, что тепловой процесс носит в основном адиабатический и квазиадиабатический характер – отсутствует влияние граничных условий на торцах модели кристалла микросхемы на температурное поле.

Численные эксперименты, проведенные при меньших значениях напряженности внешнего электромагнитного поля, показали, что граничные условия на торцах начинают влиять на температурное поле с момента

времени  $t = 0,5 - 0,8$  мкс (рис. 4.9). При этих значениях времени тепловой процесс перестает быть квазиadiaбатическим и характер тепловых потоков определяется, в основном, граничными условиями для всех граней модели кристалла. Расчеты производились для многослойной структуры (рис.4.8) с разделительными слоями оксида кремния между проводящими слоями из меди. Танталовый подслоя брался только для нижней дорожки на подложке кристалла.

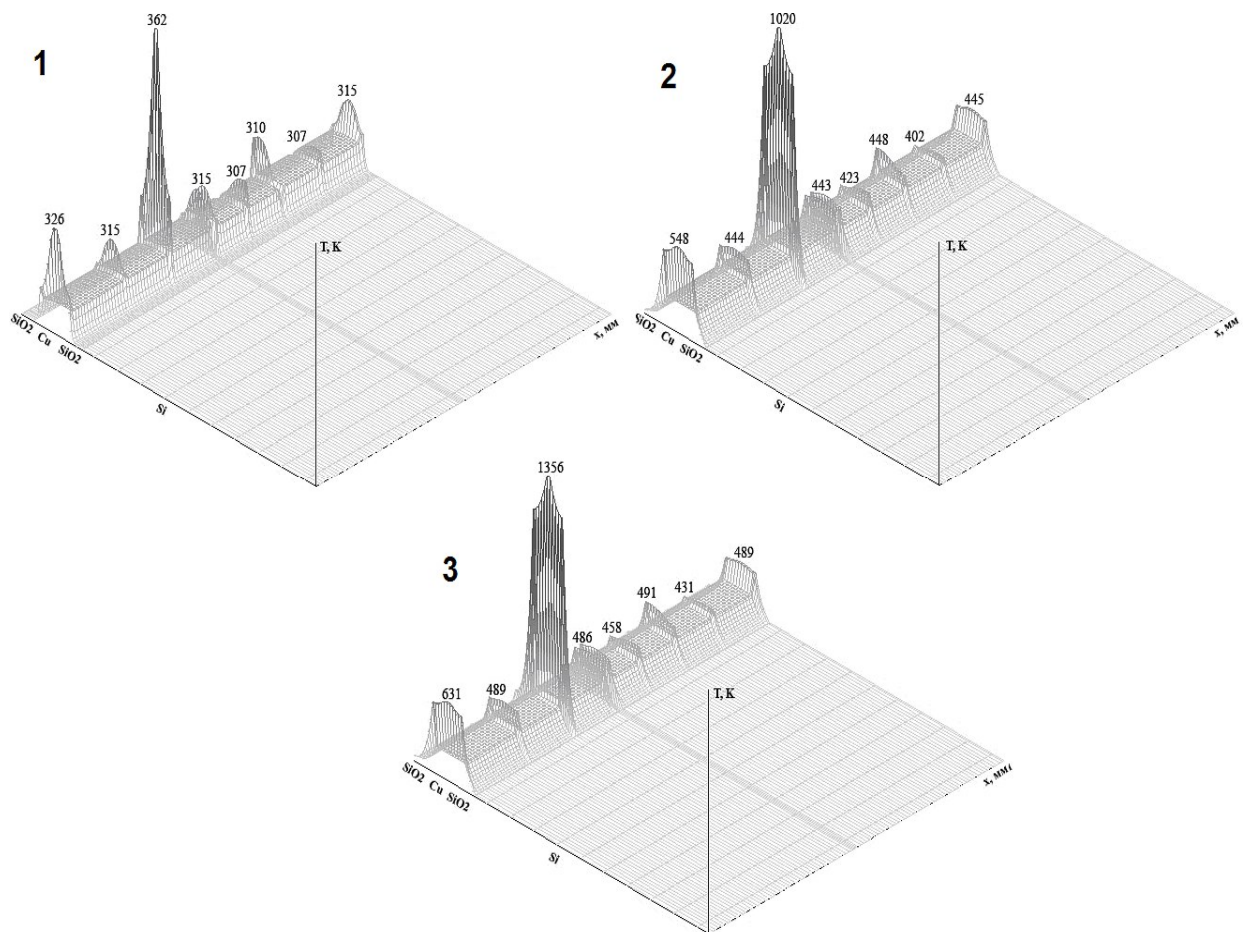


Рис. 4.9. Динамика распределения температуры в модели кристалла микросхемы: 1 –  $t=10^{-9}$  с; 2 –  $t=10^{-8}$  с; 3 – локальное выгорание ( $t=1,257 \cdot 10^{-8}$  с)

Необходимо отметить, что полученные количественные значения, как времени локальной деградации металлизации, так и динамики развития деградационных процессов зависят не только от параметров внешнего воздействия, но и от параметров разрядной цепи. В частности, от количества

диэлектрических участков в металлизации, значений емкости этих участков, степени неоднородности металлизации и т.д. Значения емкостей между слоями металлизации (рис. 4.8) на порядок выше, чем в одномерной разрядной цепи со слоями металлизации, лежащими в одной плоскости (рис. 4.1, рис. 4.4 и рис. 4.6), однако эквивалентная емкость может быть меньше, чем у однослойной проводящей структуры, вследствие последовательного соединения микроструктурных элементов в разрядной цепи [119 – 125].

Учет потерь тока смещения для цепи разряда (рис. 4.8) в оксиде кремния между верхними проводящими слоями показал, что пороговые значения поля, при которых происходит прожог слоя металлизации на монокристалле, уменьшается не более чем на 5%.

#### **4.2. Моделирование электротепловых процессов в кристалле микросхем с разрядной цепью из пассивных микроструктурных элементов при воздействии ВИИЭМП**

Моделирование физических процессов в рассмотренных выше цепях разряда позволило выявить закономерности, влияющие на развитие электротепловых процессов в кристалле и на стойкость микросхем. Омическая и пространственная неоднородности объясняют и при численном моделировании демонстрируют процессы неравномерного разогрева проводящих пленок. Локализация тепла в проводящих микроструктурных элементах видна при анализе результатов моделирования кристаллов микросхем, подвергавшихся воздействию ВИИЭМП [57].

При моделировании электротепловых процессов напряжение, прикладываемое к цепям разряда, находится из решения дифракционной задачи для микросхемы в волноводе. На следующем этапе моделирования процессов взаимодействия мощных ИЭМП с МСЭ кристалла одним из основных является вопрос нахождения эквивалентной емкости цепи разряда. Для цепи разряда с реальными значениями геометрических параметров

микроструктурных элементов (рис. 3.9, рис. 3.13) всегда выполняется соотношение

$$R_{\Sigma} \ll 1/\omega C_{\text{экв}}, \quad (4.1)$$

где  $R_{\Sigma}$  – эквивалентное сопротивление проводящих микроструктурных элементов;

$C_{\text{экв}}$  – эквивалентная емкость разделительных диэлектрических пленок;

$\omega$  – круговая частота заполнения высокочастотных импульсов.

Поэтому ток смещения определяет ток в цепи разряда. Физически это объясняется следующим образом. При падении волны на проводящие структуры происходит «закоротка» пространства. Разность потенциалов и объемный ток через проводник определяются его сопротивлением. Маленькое сопротивление проводника приводит к малой разности потенциалов и наоборот. В случае металлодиэлектрической структуры  $V_{\text{д}} \gg V_{\text{пр}}$ , где  $V_{\text{д}}$  – объем диэлектрика,  $V_{\text{пр}}$  – объем проводника, ток смещения в диэлектрике определяет ток проводимости в проводнике, что имеет место в кристалле микросхем при воздействии ВИИЭМП.

Величину эквивалентной разрядной емкости найдем из экспериментальных данных, которые получены для микросхем с площадью кристалла 4x4мм, с дорожками на подложке кристалла шириной 120 нм, со значением порогового поля катастрофического отказа – 80кВ/м. Воздействующие радиоимпульсы имели частоту заполнения  $f = 3\text{ГГц}$ . Пороговые значения стойкости микросхем взяты для случая, когда грань кристалла с МСЭ расположена параллельно вектору  $\vec{E}$  волны  $H_{10}$  в волноводе. Для этих положений ИМС относительно поля, значений пороговых полей катастрофических отказов и размеров кристалла были проведены последующие расчеты с последующим использованием результатов для микросхем с другими размерами кристаллов и толщин проводящих дорожек на подложке.

На рис. 4.10 приведена зависимость  $I = I(C)$ , построенная в соответствии с соотношением  $I = \omega CU$ , для оговоренных выше данных (в легенде на рис. 4.10 указан вид линий для кристаллов с размерами от  $4 \times 4$  мм до  $20 \times 20$  мм). Ток в разрядной цепи связан с эквивалентной емкостью линейной зависимостью. При расчетах предполагалось, что на микросхемы с кристаллами различных размеров действует ВИИЭМП с одинаковым значением напряженности поля.

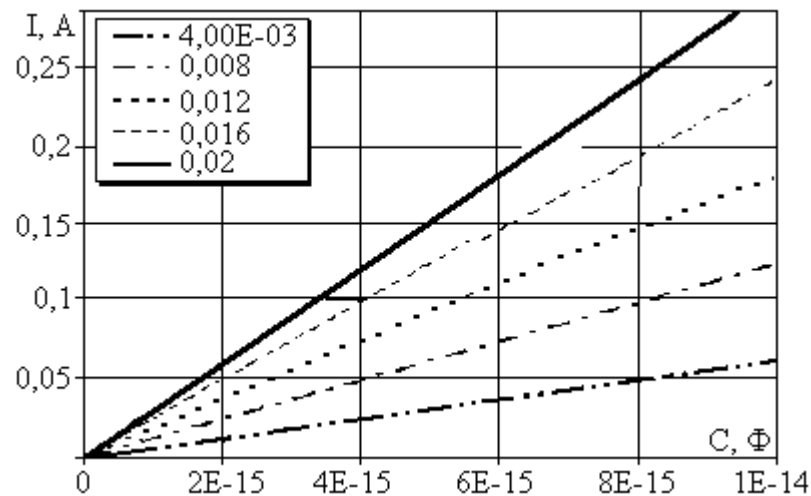


Рис. 4.10. Зависимость тока в цепи разряда от величины эквивалентной емкости

Для нахождения значения эквивалентной емкости требуется найти энергию, необходимую для расплавления типичного медного микроструктурного элемента с подслоем из тантала на подложке кристалла. Значение тока пробоя и значение эквивалентной емкости найдем из условия нагрева и дальнейшего расплавления медной дорожки с подслоем из тантала:

$$Q_{\Sigma} = m_m \cdot c_m \cdot (T_{плм} - T_0) + m_T \cdot c_T \cdot (T_{плТ} - T_0) + m_m \lambda_m + m_T \lambda_T = R_m \cdot I^2 t + R_T \cdot I^2 t, \quad (4.2)$$

где  $m_m$  – масса медной пленки;

$m_T$  – масса танталовой пленки;

$c_m$  и  $c_T$  – их удельные теплоемкости;

$T_0$  – начальная температура;

$T_{\text{плМ}}$  и  $T_{\text{плТ}}$  – температуры плавления меди и тантала, соответственно;

$\lambda_{\text{М}}$  и  $\lambda_{\text{Т}}$  – удельная теплота плавления для меди и тантала;

$R_{\text{М}}$  – сопротивление медной пленки;

$R_{\text{Т}}$  – сопротивление танталовой пленки;

$t$  – время плавления дорожки ( $t = 1 \text{ мкс}$ ).

При расчетах предполагалось, что размеры дорожки на подложке следующие: ширина – 120 нм, толщина  $\Delta$  медной пленки варьировалась от 30 до 120 нм, длина дорожки принималась равной – 1 мкм, толщина танталовой пленки – 10 нм. Из этих значений находились массы медной и танталовой пленок. Значения плотностей меди и тантала, их теплоемкостей и т.д. находились из справочной литературы.

Расчеты показали, что для расплавления за 1 мкс дорожки из меди сечением  $120 \times 60 \text{ нм}$  с подслоем из титана ток в разрядной цепи должен быть 4 мА, а значение эквивалентной емкости –  $C_{\text{эКВ}} = 6,8 \cdot 10^{-16} \text{ Ф}$ . В том случае когда медная пленка имеет сечение  $120 \times 120 \text{ нм}$ , значение эквивалентной емкости  $C_{\text{эКВ}} = 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ Ф}$ , ток пробоя составляет 8,2 мА. Неизменной характеристикой теплового пробоя за 1 мкс медных с подслоем из титана микроструктурных элементов является значение плотности тока  $j \approx 0,5 \cdot 10^{12} \text{ А/м}^2 = 5 \text{ кА/мм}^2$ . Это значение плотности тока для медной пленки с подслоем из тантала соответствует точке на критериальной зависимости Вунша-Белла при длительности импульса в 1 мкс для рассматриваемой слоистой проводящей структуры. Это значение плотности тока может быть использовано для прогнозирования стойкости микросхем.

Из полученных значений эквивалентной емкости и тока пробоя были рассчитаны зависимости пороговых значений полей, когда микросхемы выходят из строя при различных значениях ширины дорожек (различных технологий) и для различных размеров кристаллов. На рис. 4.11 и рис. 4.12 приведены зависимости пороговых значений напряженности электрической компоненты ВИИЭМП от ширины дорожки на подложке для кристаллов с

размерами 4×4мм и 20×20мм (в легендах на рис. 4.11 и рис. 4.12 указаны толщины пленок).

Расчеты производились для случая, когда плоскость с микроструктурными элементами кристалла параллельна вектору напряженности электрической компоненты воздействующего поля. В этом случае напряжение, приложенное к разрядной цепи  $U = E \cdot l$ , где  $l$  – длина разрядной цепи. При расчетах  $l$  принималось равным размерам кристаллов микросхем  $D = 4, 8, 12, 16$  и  $20$ мм.

На рис. 4.13 приведены зависимости пороговых напряженностей поля от размеров кристалла  $D$ . Для различных типов микросхем значение эквивалентной емкости и разрядного тока может быть различным, но экспериментальные данные показывают, что ИМС с одинаковыми размерами кристаллов имеют значения пороговых напряженностей поля почти одинаковые, а, следовательно,  $C_{\text{экв}}$  и пробойный ток практически совпадают.

Из графиков, приведенных на рис. 4.11 и рис. 4.12 видно, что уменьшение толщины проводящих дорожек приводит к снижению стойкости микросхем. Так для кристалла 4×4мм уменьшение толщины пленки  $\Delta$  со 120нм до 30нм снижает пороговые значения полей с 80кВ/м до 37кВ/м. На стойкость микросхем сильно влияют размеры кристалла, они однозначно определяют величину напряжения разрядной цепи. Увеличение размеров кристалла с 4×4мм до 20×20мм приводит к тому, что необходимое для вывода из строя микросхем значение напряженности электрической компоненты ВИИЭМП снижается в 4 раза, с 80кВ/м до 20кВ/м (рис. 4.13).

Длина проводника на подложке при выполнении условия (4.1), для микросхем со 120-тьюнанометровой технологией должна быть меньше 1,5 мкм. При выполнении данного условия уменьшение длины дорожки не влияет на стойкость этих микроструктурных элементов. Это обусловлено тем, что их стойкость определяется плотностью тока, т.е. поперечным сечением проводника, и при выполнении условия (4.1) не зависит от его



длины. В том случае, когда длина дорожки больше 1,5 мкм сопротивление дорожки становится значительным и нарушается условие (4.1).

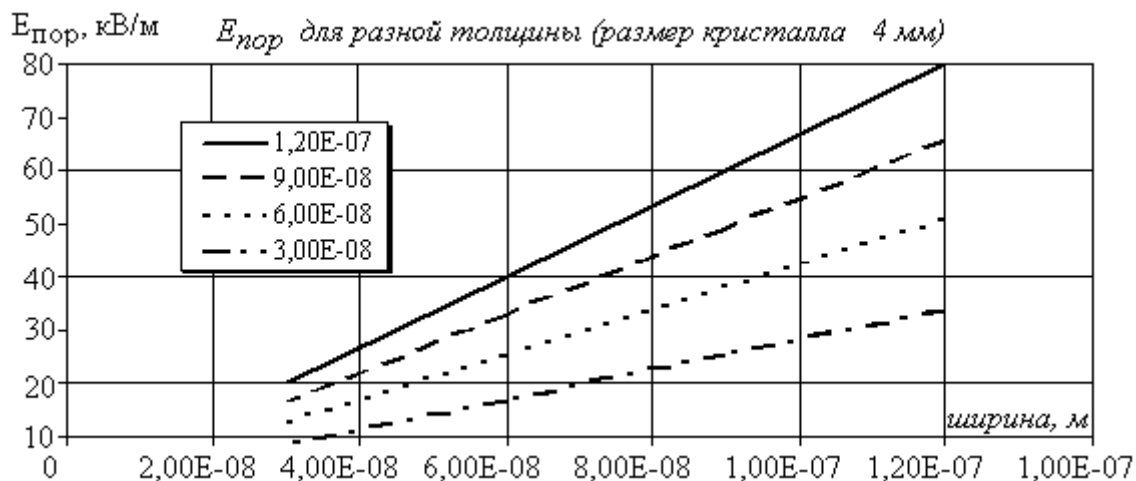


Рис. 4.11. Зависимость пороговой напряженности поля, разрушающего металлизацию, от ширины проводящей дорожки для кристалла 4×4мм



Рис. 4.12. Зависимость пороговой напряженности поля, разрушающего металлизацию, от ширины проводящей дорожки для кристалла 20×20мм

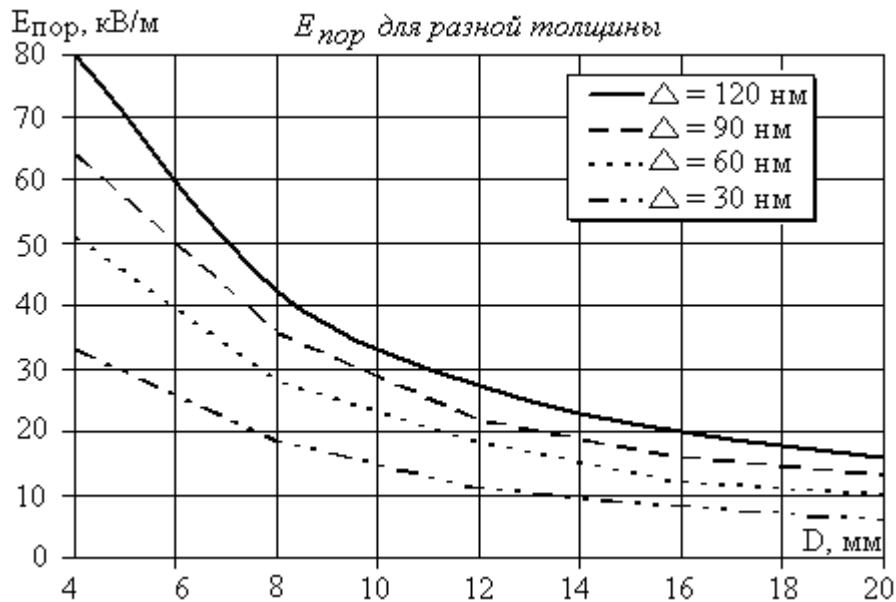


Рис. 4.13. Зависимости пороговых напряженностей поля от размеров кристалла  $D$

Сделанные выше расчеты по прогнозированию стойкости микросхем к воздействию импульсных электромагнитных полей позволяют проследить тенденции и, в достаточной мере, количественно судить о стойкости современных микросхем к данному виду воздействия. При более точном исследовании физических процессов с помощью электротепловой модели наглядно просматривается динамика процессов, но времена развития процессов остаются близкими к тем, что были получены в рассмотренном выше приближении.

Параметрами численно-аналитической модели рассматриваемой цепи пробоя, определяющими стойкость микросхем в напряженных токовых и тепловых режимах, являются [128]:

- размеры кристалла;
- количество слоев металлизации;
- расстояние между слоями металлизации;
- размеры поперечного сечения и длина проводящих дорожек на подложке кристалла;

- диэлектрическая проницаемость и теплопроводность разделительных слоев диэлектрика;
- степень неоднородности проводящих микроструктурных элементов.

Все перечисленные выше параметры можно взять из справочной литературы. В настоящее время в качестве материала, разделяющего проводящие слои, используется специальный диэлектрик low-k с низкой диэлектрической проницаемостью и хорошей теплопроводностью.

### **4.3. Физические процессы в ПТШ при напряженных токовых и тепловых режимах**

При воздействии мощных импульсных электромагнитных полей на микросхемы в кристалле образуются также цепи разряда с участием активных элементов (рис. 3.10). На рис. 4.14 представлены цепи разряда, включающие полевые транзисторы (ПТ) с затвором Шоттки и с изолированным затвором. Активная составляющая входного сопротивления полевых транзисторов в номинальном режиме имеет большое значение ( $10^6 \dots 10^{15}$  Ом) и падает практически до нуля при пробое. В образовании разрядной цепи, большую роль могут играть межэлектродные емкости, особенно на высоких и сверхвысоких частотах. На рис. 4.15 представлена разрядная цепь с эквивалентной схемой ПТШ.

Следует отметить, что даже для таких однородных сред как газы и твердые тела, математическое описание начала пробоя носит, в основном, вероятностный характер. В нашем случае трудности математического характера в значительной степени возрастают в связи с наличием в кристалле различных микроструктурных элементов, отличающихся своими электрофизическими характеристиками и связанных электрически между собой различными способами.

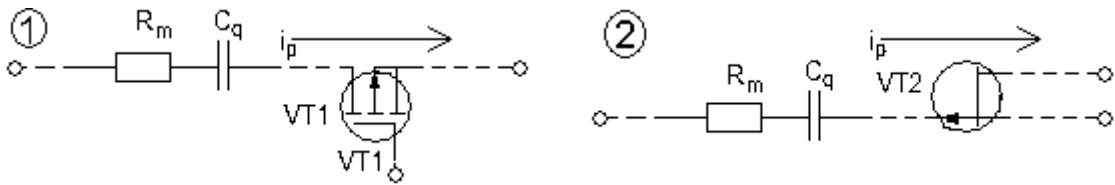


Рис. 4.14. Возможные цепи разряда с полевыми транзисторами:

1 – ПТ с изолированным затвором; 2 – ПТ с затвором Шоттки

Металлодиэлектрическая структура  $R_m C_d$  состоит из  $R_m$  – сопротивления подводящих проводников и  $C_d$  – емкости диэлектрика. Значительную трудность при описании разряда в цепи, показанной на рис. 4.15 определяет то обстоятельство, что  $R_i$  зависит от тока разряда с одной стороны, а с другой – определяет наибольшую часть тока, проходящего через  $R_i$  или  $C_3$ , т.е.,  $R_i$  является нелинейной функцией напряжения и характеристик других элементов разрядной цепи.

Возможной причиной выхода из строя пассивных, а не активных МСЭ при воздействии ВИИЭМП являются их меньшая тепловая стойкость. Значительную роль в разрядных процессах и разрушении активных структур или проводников играют межэлектродные емкости полупроводниковых приборов. Ответить однозначно и полно на вопросы, связанные с развитием пробоя в цепи разряда, содержащей активные МСЭ, достаточно сложно. Ниже рассматриваются адекватность численно-аналитической модели и физика процессов непосредственно в модели ПТШ для напряженных токовых и тепловых режимов, вплоть до теплового разрушения прибора.

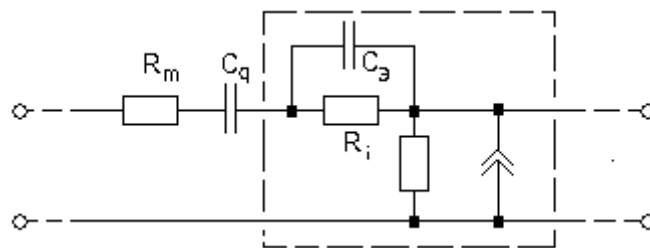


Рис. 4.15. Разрядная цепь с эквивалентной схемой ПТШ:

$R_i$  – внутреннее сопротивление ПТ,  $C_3$  – эквивалентная емкость

При эксплуатации этой модели основной упор в исследованиях сделан на выяснении роли различных параметров ПТШ в разрядных цепях при воздействии ВИИЭМП на микросхемы.

#### **4.3.1. Моделирование физических процессов в ПТШ при воздействии ВИИЭМП**

Критерием адекватности любой численно-аналитической модели, в частности модели ПТШ, является совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными. Возможные предельные переходы от систем уравнений модели к аналитическим выражениям также предполагают сравнение с экспериментальными данными. Адекватность используемой численно-аналитической модели основывается, с одной стороны, на использовании фундаментальных соотношений физики полупроводников и полупроводниковых приборов [117, 118] и использовании надежных численных методов [115, 116, 110]. С другой стороны, адекватность модели определяется количественным совпадением результатов расчетов вольт-амперных характеристик, частотных характеристик ПТШ [68 - 71], шумовых и критериальных зависимостей стойкости транзистора [68 - 71] с экспериментальными данными. Подобного рода сравнение показывает, что расхождение между теоретическими и экспериментальными данными по различным характеристикам не превышает 15% [68 - 71], что позволяет утверждать об адекватности модели.

Динамика физических процессов GaAs и Si ПТШ в напряженных токовых и тепловых режимах качественно близка между собой. Ниже приведены некоторые результаты численной реализации системы уравнений (3.21) – (3.23).

Топология и характерные размеры моделируемого ПТШ представлена на рис. 4.16. Задавались следующие параметры активной области Si ПТШ: длина затвора – 0.2 мкм, активные области истока и стока – одинаковы,

размеры остальных областей указаны на рис. 4.16,а длина канала - 1 мкм. Затвор находится посередине канала. Начальное количество макрочастиц равнялось 20000 (коэффициент укрупнения для рассматриваемой топологии составил  $7.9 \cdot 10^6$ ). Размерность сетки составляла  $128 \times 64$  ячейки (в продольном и поперечном направлениях). Начальная температура кристалла 293 К. Напряжение на затворе задавалось равным  $-0.2$  В. Уровни легирования слоев Si:  $n^-$ , буферный слой  $-10^{21} \text{ м}^{-3}$ ,  $n$ , канал  $-10^{23} \text{ м}^{-3}$ ,  $n^+$ , контактный слой  $-10^{25} \text{ м}^{-3}$ . В качестве материала затвора использовалось золото с подслоем из вольфрама.

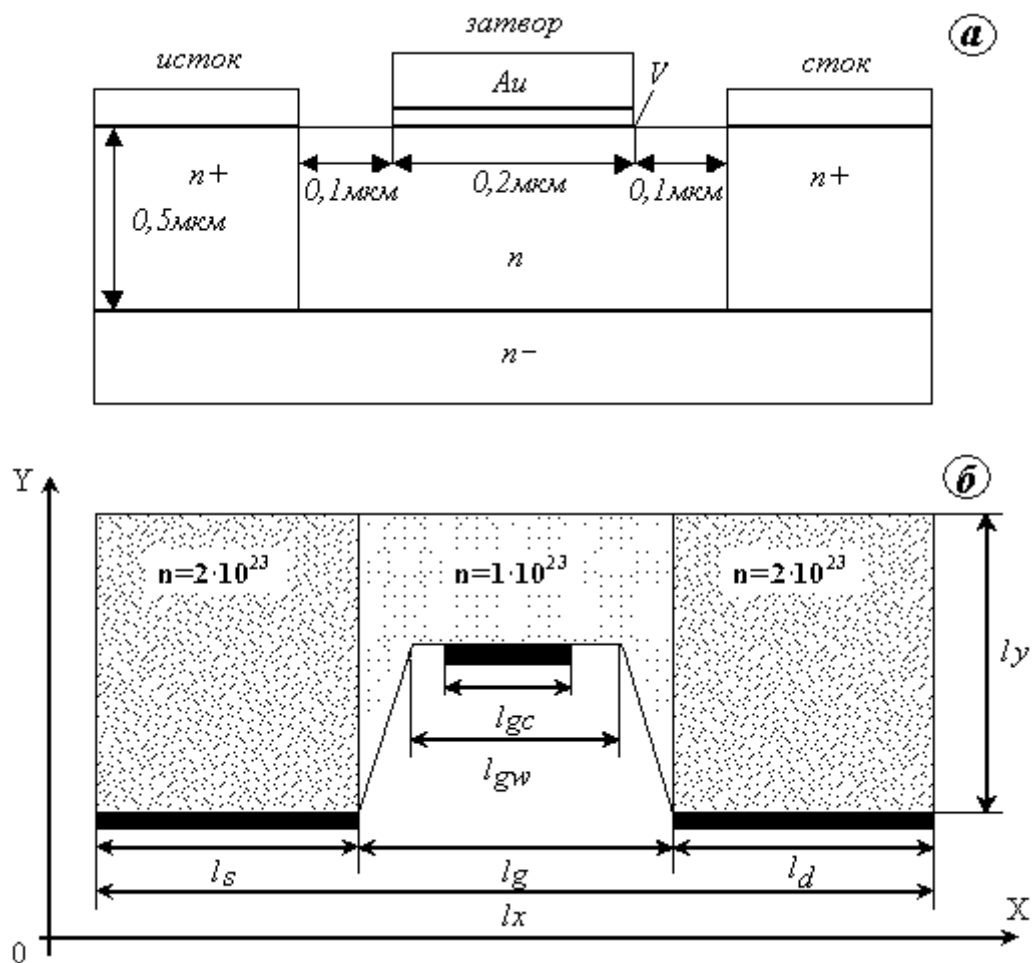


Рис. 4.16. Топология и характерные размеры моделируемого ПТШ

В качестве начальных условий задавалось равномерное распределение носителей по координатам в соответствии с уровнями легирования и максвелловское распределение по энергии. После нескольких временных

шагов, за которые формировалась функция распределения близкая к реальной, на сток подавалось питающее напряжение величиной 1,5В, что соответствовало номинальному режиму работы полевого транзистора. Затем подавался дополнительный импульс напряжения в виде функции Хевисайда, имитирующий действие ВИИЭМП, так, что напряжение между истоком и стоком равнялось 2.4В.

На рис. 4.17 – рис. 4.20 представлены функции распределения макрочастиц, неравновесных носителей и температуры кристаллической решетки, полученные при решении системы уравнений (3.21) – (3.23) с учетом ранее перечисленных видов рассеяния микрочастиц. На рис. 4.17 приведен вид распределения макрочастиц в ПТШ на начальном этапе (порядка 0.1пс), а на рис. 4.18 - распределение неравновесных носителей и температуры кристаллической решетки для этого же времени развития процесса. Оси  $x$  и  $y$  определяют геометрию области ПТШ в сеточных единицах. По оси  $z$  на рис. 4.18,а (и далее) отложена плотность неравновесных дырок (нормированная по оси  $z$  на рис. 4.18,б (и далее) – температура кристалла (нормированная на  $h\omega_0 = 735K$  - температура фонона в Si). Как видно из рис. 4.18,а в начальный момент времени сформировалась область пространственного заряда, формируется поток электронов вдоль канала. В области вблизи стока наблюдается начало формирования повышенной плотности электронов. Эти электроны образуются в результате ионизации атомов примеси, о чем свидетельствует и появление избыточных дырок в этой области (рис. 4.18,б).

Электронная лавина зарождается в пристокковой области – там, где наибольшая плотность электронного облака и наибольшая энергия макрочастиц. Данная область разогрета более всего (температура на 7 К выше чем средняя по кристаллу), количество неравновесных дырок также максимально в этой области.

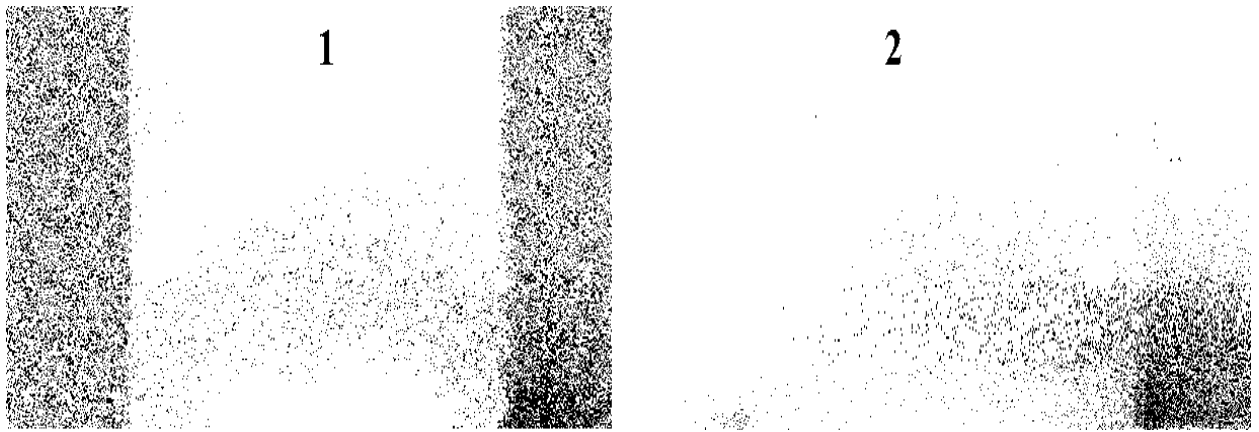


Рис. 4.18. Вид распределения макрочастиц в ПТШ:  
1 – электроны ( $N = 29000$ ), 2 – дырки ( $N = 18000$ ),  $t = 0.1$  пс.

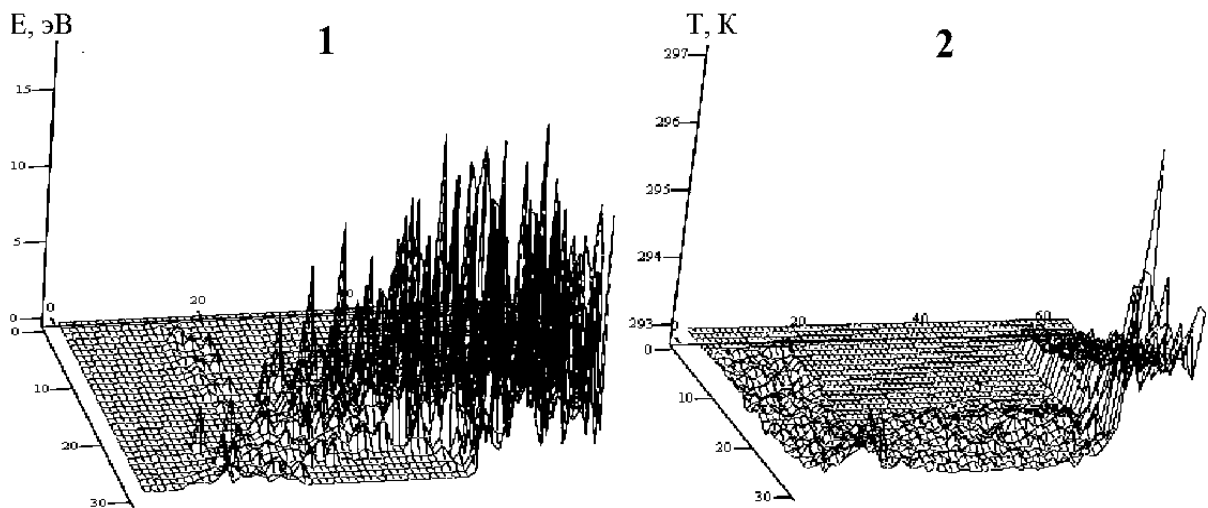


Рис. 4.19. Распределение носителей по энергии в активной области (1) и температуры кристаллической решетки (2),  $t = 0.1$  пс,  $N=29000$

В ходе развития процесса лавинного умножения углубляются процессы генерации в областях стока (наиболее ярко) и истока. Наблюдается расширение области избыточной плотности зарядов вдоль линий напряженности поля в сторону затвора и, далее, истока - начальный этап образования токового шнура. Дырки втягиваются полем в область объемного заряда под затвором. Происходит перераспределение поля, растет напряженность в области канала между подзатворной областью и истоком. Происходит постепенный разогрев кристалла вдоль всей области токового



шнура. На рис. 4.19 и рис. 4.20 показан вид функций распределения в момент времени 1.1 пс. На данном этапе наблюдается картина глубокого развития процесса. Температура в подзатворной области уже на 30 К превышает начальную.

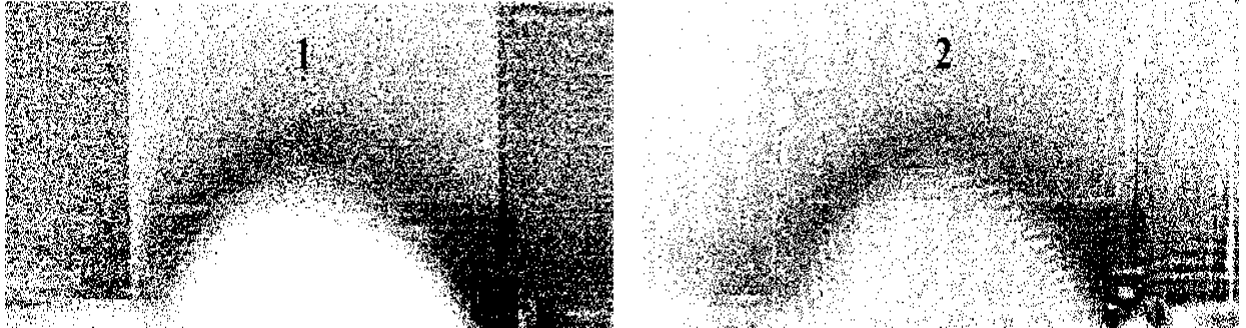


Рис. 4.19. Вид распределения макрочастиц в ПТШ:

1 – электроны ( $N = 103000$ ), 2 – дырки ( $N = 81000$ ),  $t = 1.1$  пс

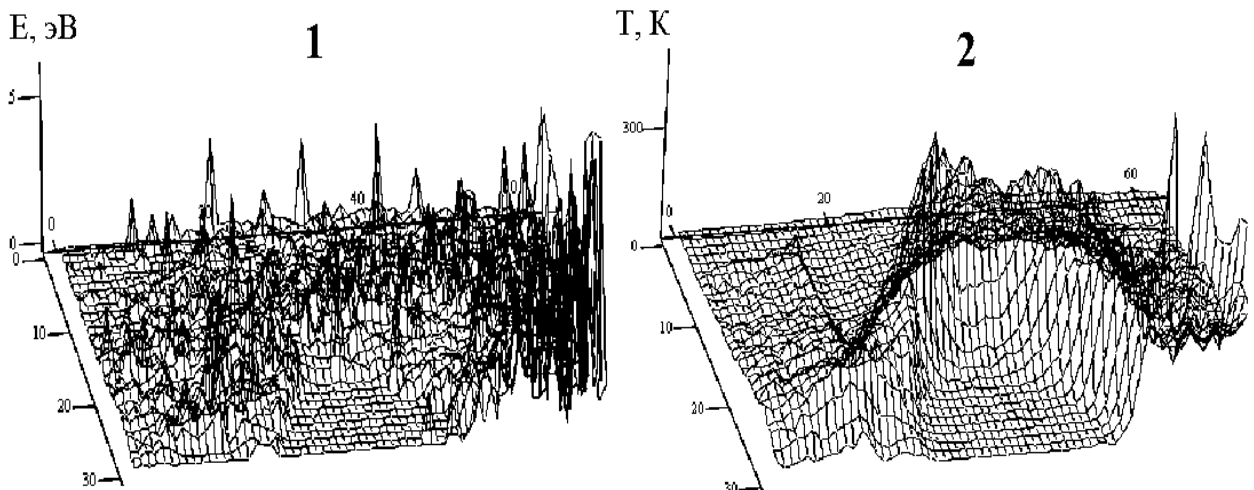


Рис. 4.20. Распределение носителей по энергии в активной области (1) и температуры кристаллической решетки (2),  $t = 1.1$  пс,  $N=103000$

Число неравновесных электронов и дырок в области стока в сотни раз выше, чем в области канала. Ярко выражен процесс шнурования тока, растет скорость разогрева в области локализации плотности тока. Из-за малой скорости дырок перераспределение их плотности происходит медленно, и возникают высокие уровни локальной напряженности между областями истока и канала. В результате область пробоя распространяется практически

по всему каналу, о чем свидетельствует образование там неравновесных пар электрон-дырка (рис. 4.20, а и б).

Приведенные на рис. 4.17 – рис. 4.20 виды распределения макрочастиц, неравновесных носителей и температуры кристаллической решетки согласуются с физическими представлениями о развитии лавинных процессов и дают более конкретные сведения об эволюции электротепловых процессов во времени при напряженных электрических режимах в ПТШ. Из рис. 4.17 – рис. 4.20 следует, что пробой в ПТШ имеет электростатический характер и зарождается в области затвор-сток. В течение рассматриваемого промежутка времени (1.1пс) температура кристалла выросла на 24 К. В ходе дальнейшего развития процесса пробоя температура рабочего канала экспоненциально возрастает до температуры плавления полупроводника. Последующее рассмотрение во времени процессов лавинообразования в ПТШ в напряженных токовых режимах при различных значениях напряжения сток-исток приводит к тепловому выходу прибора из строя.

При работе ПТШ в напряженном токовом режиме, чем больше значение дополнительного напряжения между стоком и истоком, тем быстрее прибор выходит из строя. У Вунша и Белла [26] вместо дополнительного напряжения используется более универсальная характеристика –  $P/S$ , где  $P$  – мощность, рассеиваемая током, проходящим через поперечное сечение  $S$  прибора. Критериальной является зависимость выхода из строя прибора для  $P/S = f(\tau)$ , где  $\tau$  – длительность приложенного к прибору прямоугольного импульса напряжения. Данная зависимость позволяет сравнить стойкость различных приборов в напряженных токовых и тепловых режимах. На приближенность данного критерия указывали его авторы [26]. Два одинаковых прибора, но с различными длинами рабочих каналов, при одинаковых значениях  $P/S$  будут иметь различную температуру, следовательно, различные пороговые значения стойкости. Это видно из рис. 4.21 для критериальных зависимостей в координатах  $P/S = f(\tau)$  и  $P/V = f(\tau)$  [126].

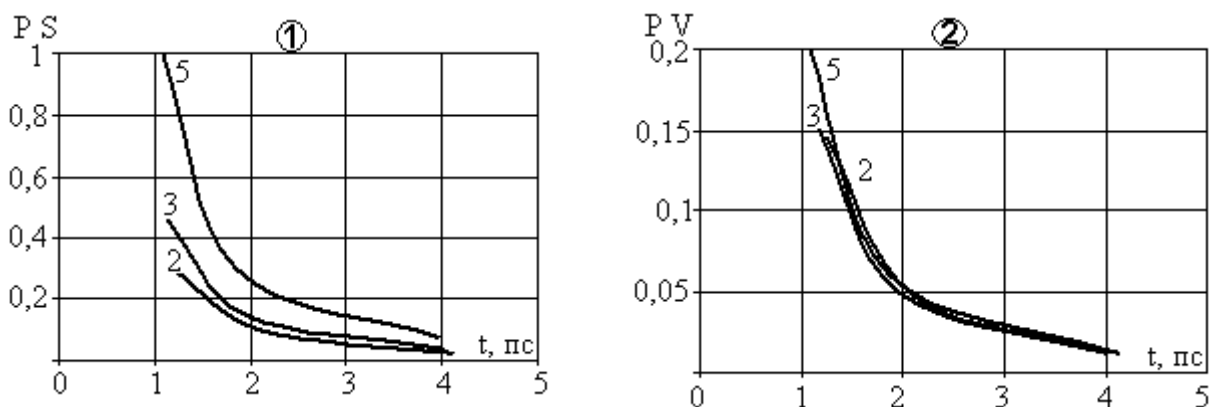


Рис. 4.22. Зависимости Вунша-Белла, для мощности тока, отнесенной к поперечному сечению (1) и удельной мощности тока (2) в ПТШ с длиной канала 2, 3 и 5 мкм соответственно

Из результатов расчетов следует, что в большей степени для сравнения стойкости приборов с различными длинами каналов подходят зависимости стойкости приборов в координатах  $P/V = f(\tau)$ , где  $P/V$  – удельная объемная плотность мощности, рассеиваемая в рабочем канале.

#### 4.3.2. Влияние ширины канала и затвора на развитии электротепловых процессов в ПТШ при напряженных токовых режимах

Характеристики микросхем и тенденции их развития [74 - 85] свидетельствуют о непрерывном уменьшении размеров базовых элементов на подложке кристалла микросхем. При уменьшении ширины канала для обеспечения нормального режима работы транзистора необходимо уменьшать рабочие напряжения, но при этом возрастает доля темнового тока в общем токе транзистора. В транзисторах субмикронных и нанометровых размеров при напряжении, превышающем номинальное, наблюдается баллистический режим. Поведение и характеристики приборов с такими геометрическими размерами, работающих в напряженных токовых и

тепловых режимах ранее не исследовались. Одним из наиболее важных вопросов при этом является электротепловая стойкость прибора и влияние на нее конструктивных особенностей.

Длина затвора в ПТШ выбирается исходя из назначения и частотного диапазона прибора и определяет геометрию активной области, в частности, длину канала. Соотношение длины затвора и расстояния исток-сток является определяющим как для быстродействия, усилительных и частотных характеристик прибора, так и для электрической и тепловой стойкости ПТШ. Исследования по влиянию длины затвора при фиксированных расстояниях исток-сток на ВАХ и стойкость ПТШ с коротким каналом ранее не проводились.

Численное моделирование физических процессов производилось в ПТШ, геометрия, обозначения характерных областей и уровни легирования активной области которого представлены на рис. 4,16, б. При расчетах задавались следующими длинами активных областей:  $l_x = 10^{-6} \text{ м}$  и  $l_x = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ . В процессе исследования сохранялись постоянными соотношения  $l_s/l_d/l_g = 1/1/1$ ,  $l_x/l_y = 2/1$ . При фиксированной длине канала и активной области  $l_x$ , соотношение  $l_{gc}/l_{gw}$  принимало значения 1, 3, 5. ВАХ транзисторов с различными соотношениями  $l_{gc}/l_{gw}$  представлены на рис. 4.22, где числами над кривыми указаны значения напряжения на затворе.

Из полученных характеристик видно, что рабочий диапазон по напряжению достигает наибольшего значения при  $l_{gc}/l_{gw} = 3$ . Уменьшение или увеличение ширины контакта в области затвора приводит к уменьшению крутизны и ухудшению характеристик. Если контакт занимает всю область затвора, то его влияние на ширину канала оказывается достаточно сильным, и малое изменение потенциала вызывает большой скачок тока. В случае, когда контакт занимает малую часть области затвора, его влияние проявляется слабо, что приводит к снижению чувствительности прибора. Из рис. 4.22 следует, что соотношения длины затвора к длине канала

необходимо выбирать в пределах 0,4 – 0,6, что обычно и делается на практике.

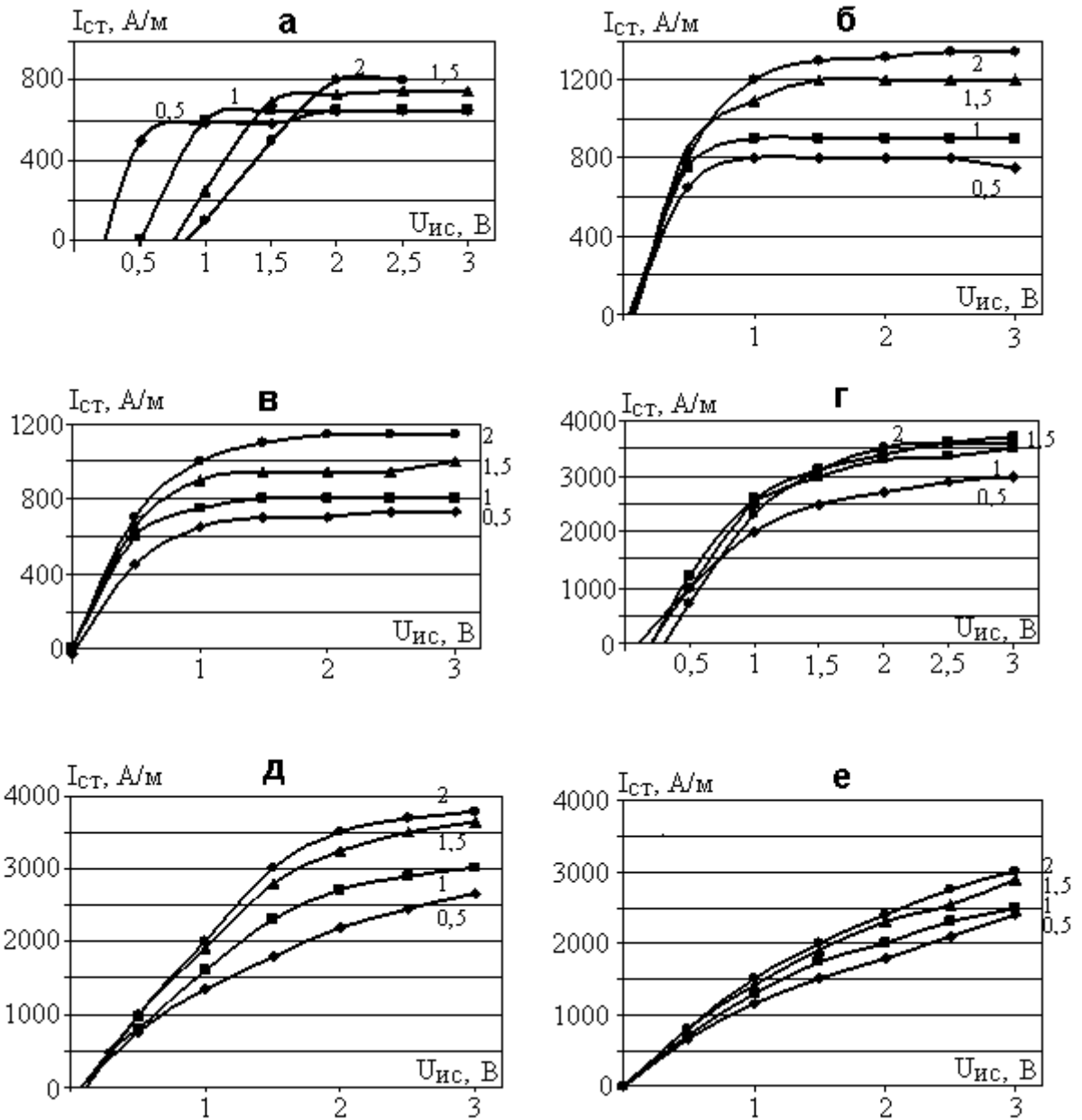


Рис. 4.22. ВАХ ПТШ с различными соотношениями  $l_{gc}/l_{gw}$ : а), б) и в) – с длиной активной области  $l_x = 10^{-6}$  м; г), д) и е) –  $l_x = 2 \cdot 10^{-6}$  м

Для нахождения критериальной зависимости Вунша-Белла проводились исследования ПТШ с длиной активной области  $l_x = 2 \cdot 10^{-6}$  м и соотношениями  $l_{gc}/l_{gw}$  1, 2 и 3, при этом эффективная длина затвора составляла 0.32, 0.13 и 0.06 мкм соответственно. В качестве критерия выхода транзистора из строя принималось условие достижения рабочей области температуры плавления.

Результаты численных расчетов показаны на рис. 4.23. Как видно из рис. 4.23, с уменьшением  $l_{gc}/l_{gw}$  время выхода транзистора из строя сокращается. Это обусловлено уменьшением расстояния между электродами стока и затвора и, следовательно, увеличением напряженности поля в области канала.

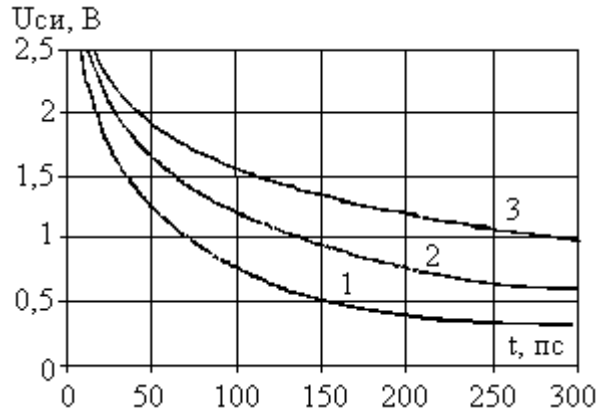


Рис. 4.23. Характеристики Вунша-Белла выхода из строя ПТШ для

$$l_{gc}/l_{gw} = 1, 2, 3$$

На участке свыше 1.5В лавинный пробой переходит в тепловой, что в конечном итоге приводит к тепловому разрушению ПТШ. В целом, можно констатировать, что стойкость ПТШ увеличивается с уменьшением длины затвора при фиксированной длине канала [120], однако при этом ухудшаются другие характеристики.

Приведенные выше исследования сделаны для ПТШ с длинами активных областей от 2 до 1 мкм. В ПТШ с субмикронными размерами активной области при работе с повышенными напряжениями реализуется баллистический режим работы. В этом случае практически отсутствуют рассеяния электронов в рабочей области и ток стока приблизительно равен току истока. Поскольку в баллистическом режиме отсутствует лавинное размножение носителей заряда в канале транзистора, то сопротивление транзистора при пробое на несколько порядков больше, чем у транзистора с геометрическими размерами и напряжениями, допускающими лавинный пробой.

Иллюстрациями к изложенному выше являются ВАХ ПТШ субмикронных размеров, приведенные на рис. 4.24, которые рассчитаны для транзистора с длиной канала 400нм. На рис. 4.25 представлены графики критериальных зависимостей для ПТШ с длиной канала в 400нм с учетом и без учета тока смещения. На рис. 4.26 представлены графики критериальных зависимостей электротепловой стойкости ПТШ с размером  $l_x = 400$ нм и 240 нм без учета тока смещения.

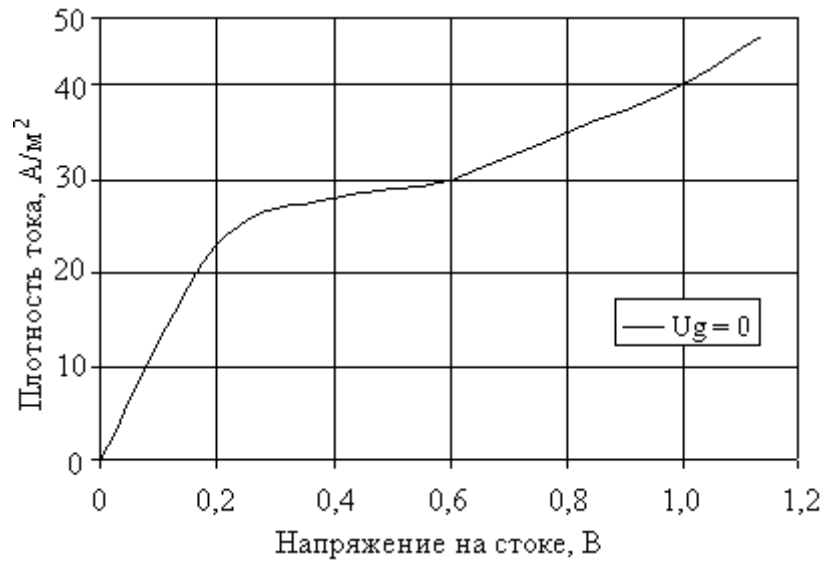


Рис. 4.24. ВАХ ПТШ с  $l_x = 400$ нм

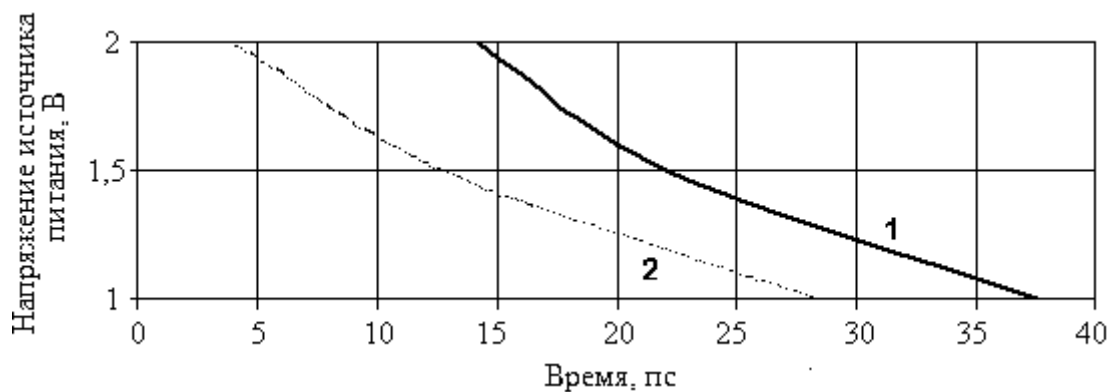


Рис. 4.25. Критериальная зависимость стойкости ПТШ ( $l_x = 400$ нм):

1 — с учетом тока смещения; 2 — без учета тока смещения

Как следует из графиков, приведенных на рис. 4.25 учет тока смещения (т.е. емкости сток-исток) значительно влияет на критериальную зависимость стойкости ПТШ по времени и плотности тока. Это объясняется тем, что при

учете тока смещения значительная часть колебательной мощности проходит через емкость сток-исток, а в нагревании участвует только та часть мощности, которая обусловлена током проводимости и потерями тока смещения.

Сравнение стойкости транзисторов с длиной канала 400 и 240 нм (рис. 4.26) показывает, что при уменьшении размеров транзисторов значительно снижается их стойкость. Время, необходимое для выхода ПТШ из строя, уменьшается на порядок и более для транзистора размером 240 нм в сравнении с транзистором с  $l_x = 400$  нм. При расчетах предполагалось, что размеры ПТШ вдоль однородного направления (вдоль  $OZ$ , рис. 3.14) на порядок больше, чем размер  $l_x$ . Это позволяет сравнить сопротивления транзистора в номинальном и напряженном токовом режиме с достаточно большими геометрическими размерами (при наличии лавины в канале) и в баллистическом режиме [123, 124, 126, 127].

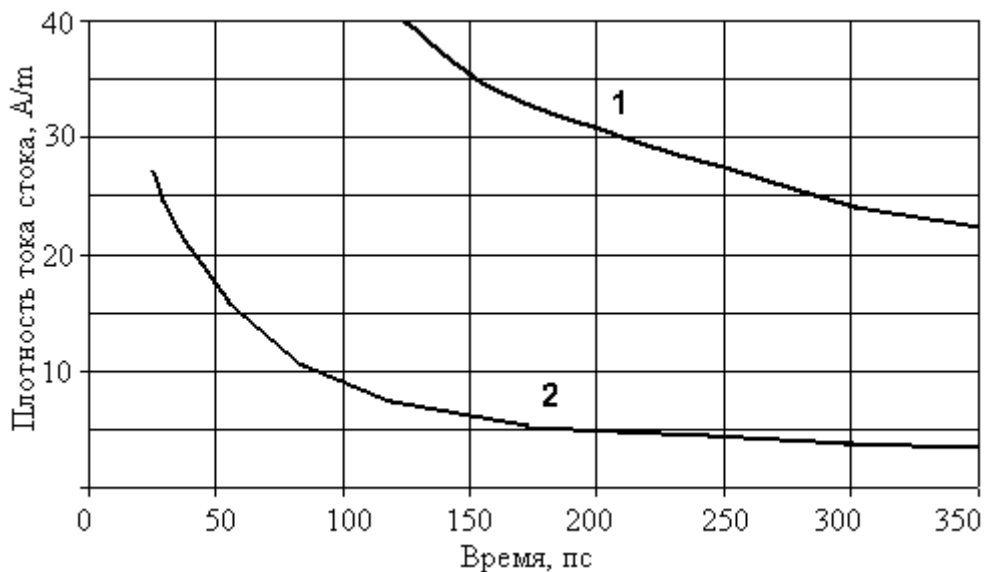


Рис. 4.26. Критериальные зависимости стойкости ПТШ без учета тока смещения: 1 –  $l_x = 400$  нм; 2 –  $l_x = 240$  нм

В номинальном режиме входное сопротивление полевого транзистора довольно большое, порядка  $10^4$  Ом. При пробое с лавинным умножением носителей заряда в рабочей области сопротивление ПТШ падает до  $10^{-5}$  Ом.



Это означает, что в разрядной цепи участок с транзистором закорачивается [128, 93]. Межэлектродная емкость модельного ПТШ порядка единиц пикофарад, что соответствует реактивному сопротивлению на частоте 3ГГц в 50...60 Ом. Сравнение сопротивлений в эквивалентной схеме ПТШ (рис. 4.15) показывает, что при пробое основной ток замыкается через ток проводимости канала (емкость сток-исток шунтируется внутренним сопротивлением транзистора). Время выхода из строя транзисторов с  $l_x = 400\text{нм}$  и  $240\text{нм}$  в напряженном токовом и тепловом режиме много меньше времени прожога металлизации микросхем со 120-тинанометровой технологией. При уменьшении размеров рабочей области или, что то же самое, при значительном увеличении напряжений питания или входного сигнала возможен баллистический режим работы транзистора. В баллистическом режиме входное сопротивление ПТШ возрастает до  $10^{-1} \dots 1$  Ом. Однако и в этом случае активное сопротивление меньше реактивного. Из этого следует, что разрядные цепи при воздействии ВИИЭМП на микросхемы в большинстве случаев не включают в себя активные элементы. Это заключение согласуется со статистическими экспериментальными данными.

#### 4.4. Выводы по разделу

В данном разделе с помощью численно-аналитических моделей исследованы физические процессы в цепях разряда кристалла микросхем, работающих в напряженных токовых и тепловых режимах, которые реализуются при воздействии мощных импульсных электромагнитных полей.

На основании численных экспериментов можно сделать следующие выводы [119, 121 - 125, 128]:

1. Учет потерь в диэлектрике объясняет уменьшение, а использование медных проводящих МСЭ повышение стойкости микросхем.
2. Для микросхем с многоуровневой металлизацией значение пробойного тока в разрядной цепи определяется поперечным сечением проводника на подложке кристалла для цепи разряда из последовательного соединения проводящих и диэлектрических МСЭ; эти значения тока позволяют найти значения эквивалентной емкости соответствующей разрядной цепи.
3. Найденные значения тока пробоя позволяют прогнозировать стойкость микросхем с различными уровнями технологий и различными размерами кристаллов;
4. Определены цепи разряда с активными МСЭ в кристалле современных микросхем при воздействии мощных ИЭМП; сравнение времен выхода из строя активных и пассивных микроструктурных элементов микросхем, при воздействии мощных ИЭМП показывает, что время выхода из строя полупроводниковых приборов меньше, чем у проводящих МСЭ и этим объясняются экспериментальные данные, в соответствии с которыми пробой в кристалле происходит через разрядные цепи, содержащие пассивные МСЭ.
5. В целом можно констатировать, что разработана численно-аналитическая модель современных микросхем, позволяющая прогнозировать стойкость микросхем при воздействии на них мощных импульсных электромагнитных полей и исследовать физические процессы в микроструктурных элементах.

## ВЫВОДЫ

В диссертационной работе новыми являются результаты экспериментальных исследований и численно-аналитического моделирования напряженных токовых и тепловых режимов в микроструктурных элементах кристалла современных микросхем и электронных модулей на их основе при воздействии мощных импульсных СВЧ полей:

1. При воздействии мощных СВЧ полей на микросхемы происходит преобразование энергии электромагнитного поля в электротепловую энергию макро- и микроструктурных элементов, при этом выход из строя микроструктурных элементов кристалла обусловлен их работой в напряженных токовых и тепловых режимах за счет дополнительных напряжений, которые наводятся электромагнитным излучением. Пороговые значения полей, при которых начинаются сбои и катастрофические отказы зависят от ориентации микросхем относительно поля и размеров кристалла, при этом функциональное назначение ИМС не влияет на эти пороговые значения. Катастрофические отказы МСЭ современных микросхем, работающих в напряженных токовых и тепловых режимах при воздействии импульсных СВЧ полей, наступают из-за прожога контактных площадок (30%), прожога проводящих дорожек (30%), вследствие совместного теплового разрушения проводящих дорожек и активных микроструктурных элементов (30%) и теплового разрушения только активных МСЭ (10%).

2. Установлено, что реакция микросхем на воздействие электромагнитного излучения в составе электронных модулей такая же, как и при воздействии, непосредственно на микросхемы, однако снижаются пороговые значения полей, при которых начинаются сбои в работе микросхем, при этом пороговые значения катастрофических отказов не изменяются.

3. Предложен метод прогноза стойкости к воздействию мощных ИЭМП для микросхем различных технологий (90нм, 60нм, 30нм) и различными размерами кристаллов (от 8×8мм до 20×20мм). Полученные данные можно использовать для нормативной технической документации, регламентирующей работоспособность ЭА в условиях воздействия на нее ИЭМП. Для повышения стойкости ЭА к воздействию ИЭМП целесообразно использовать в ней микросхемы с небольшими размерами кристаллов, а для повышения стойкости микросхем с кристаллами больших размеров необходимо разрабатывать топологию микросхем с разрядниками или применять панели крепления ИМС со встроенными разрядниками.
4. Установлено, что экранирование микросхем не является эффективным способом их защиты от электромагнитного излучения при наличии внешних радиоэлементов, подсоединенных к выводам ИМС, а схемы защиты от электростатического электричества повышают стойкость микросхем только к воздействию одиночного радиоимпульса. Установлено, что активная составляющая токов смещения снижает пороговые значения полей, разрушающих металлизацию из алюминия на кристалле ИМС на 10 – 12%, а из меди с подслоем из тантала на 5%.
5. Анализ физических процессов в разрядных цепях из проводящих и диэлектрических МСЭ показал, что омическая и пространственная неоднородности дорожек из алюминия и меди приводят к снижению стойкости микросхем к воздействию мощных ИЭМП, а прожог металлизации происходит в тех случаях, когда  $R_{\Sigma} \ll 1/\omega C_{\text{экс}}$ , т.е., при условии, что ток смещения определяет ток в цепи разряда.
6. Для разрядной цепи из пассивных МСЭ, найдены значения эквивалентной емкости и плотности тока, при которых микросхемы выходят из строя при воздействии мощных ИЭМП. Найденное значение плотности тока соответствует точке на критериальной зависимости Вунша-Белла  $P/S = f(\tau)$  для рассматриваемой разрядной цепи современных микросхем.

7. Рассмотрена разрядная цепь с активными МСЭ, исследовано влияние размеров ширины затвора на ВАХ и тепловую стойкость ПТШ; показано, что оптимальным является отношение длины затвора к длине канала 0,4 - 0,6. Полученные данные могут быть использованы разработчиками микросхем, которые могут подвергаться воздействию внешних полей СВЧ.
8. На основании численных экспериментов установлено, что для ПТШ с различными длинами каналов обобщенной критериальной зависимостью стойкости приборов является зависимость  $P/V = f(\tau)$ , а не  $P/S = f(\tau)$  (Вунш-Белл). Сравнение времени выхода из строя активных и пассивных микроструктурных элементов микросхем при воздействии мощных ИЭМП показывает, что время выхода из строя полупроводниковых приборов меньше, чем проводящих, и этим объясняется то, что в большей степени пробой происходит через разрядные цепи, содержащие пассивные МСЭ.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и микросхемы / Антипин В. В., Громов Д. В., Годовицин В. А. [и др.] // Зарубежная радиоэлектроника. – 1995. – Вып.1. – С. 37–53.
2. Исследование воздействия мощного импульсного СВЧ-излучения на GaAs цифровые интегральные схемы / Громов Д. В., Долбня С. Н., Лесин В. В. [и др.] // Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2000» : Российская научн. конф., Июнь 2000 г. : тезисы докл. – М. : СПЭЛС НИИП, 2000. – С. 105–107.
3. Громов Д. В. Деградация параметров малошумящих усилителей на GaAs полевом транзисторе с затвором Шоттки при воздействии мощного импульсного микроволнового излучения / Громов Д. В., Антипин В. В., Годовицин В. А. // 1-ая Всесоюзная конф., 25 апреля 1990 г. : тезисы докл. – Челябинск, 1990. – С.45.
4. Electrical Overstress Protection for Electronic Devices / [Antinone, R. J. ; Young, P. A. ; Wilson, D. D. et al]. – Park Ridge, NJ : Noyes Pub, 1986. – 462 p.
5. Кравченко В. И. Электромагнитное оружие / Кравченко В. И. – Харьков : ХНТУ «ХПИ», 2008. – 185 с.
6. Князев А. Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / Князев А. Д. – М. : ИПК МРП СССР, 1982. – 131 с.
7. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем / [Владимиров В. И., Докторов А. А., Елизаров Ф. В. и др.]; под ред. Н. М. Царькова. – М. : Радио и связь, 1985. – 272 с.
8. Бадалов А. Л. Нормы на параметры электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / А. Л. Бадалов, А. С. Михайлов : [справочник]. – М. : Радио и связь, 1990. – 272 с.
9. Уайт Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи / Уайт Д. ; сокр. пер. с англ. под ред.

- А. Д. Князева // Измерение электромагнитных полей и измерительная аппаратура. – [Вып. 3]. – М. : Сов. радио, 1979. – 367 с.
10. Кравченко В. И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / Кравченко В. И., Болотов Е. А., Летунова Н. И. – М. : Радио и связь, 1987. – 256 с.
11. Мырова Л. О. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям / Л. О. Мырова, А. З. Чепиженко. – М. : Радио и связь, 1988. – 296 с.
12. Чернышев А. А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / Чернышев А. А. – М. : Радио и связь, 1988. – 256 с.
13. Готра З. Ю. Контроль качества и надежности микросхем / З. Ю. Готра, И. М. Николаев – М. : Радио и связь, 1989. – 168 с.
14. Левашов И. П. Организация контроля качества микроэлектронных устройств / Левашов И. П. // Радиоэлектроника (состояние и тенденции развития). – 1983. – Тетр. I. – С. 1-10.
15. Горлов М. И. Воздействие электростатических зарядов на изделия полупроводниковой электроники и радиоэлектронную аппаратуру / Горлов М. И., Андреев А. В., Воронцов И. В. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 1997. – 158 с.
16. Вольдман С. Громоотводы для нанoeлектроники / Вольдман С. // В мире науки. Компьютеры. – 2003. – № 2. – С. 5–12.
17. Генерация мощного импульсного СВЧ излучения и его воздействие на электронные приборы / Блудов С. П. , Гадецкий Н. П. , Кравцов К. А., Магда И. И. [и др.] // Физика плазмы. – 1994. – Т. 20, № 7/8. – С. 643–647.
18. Кулиш В. В. К теории релятивистских параметрических электронно-волновых лазеров на свободных электронах / Кулиш В. В. // Укр. физ. журнал. – 1991. – Т. 36, № 5. – С. 686–693.
19. Физика сильноточных электронных пучков / [А. А. Рухадзе, Л. С. Богданкевич, С. Е. Росинский и др.] – М. : Атомиздат, 1980. – 347 с.

20. Генераторы мощных электромагнитных импульсов с субнаносекундным фронтом / [Альбетков С. В., Сахаров К. Ю., Соколов А. А., Туркин В. А.] // ПТЭ. – 1993. – №6. – С. 125–128.
21. Релятивистский карсинотрон с высокой средней мощностью / Быков Н. М., Губанов В. П., Коровин С. В. [и др.] // ЖТФ. – 1984. – Т. 59, № 5. – С. 32–36.
22. Benford J. High-Power Microwaves / J. Benford, J. Swegle. – Norwood, MA : Artech House, 1991. – 412 p.
23. Florig H. K. The Future Battlefield: a Blast of Gigawatts? / Florig H. K. – Spectrum, IEEE. – 1988. – Vol. 25, N 3. – P. 50–53.
24. Месяц Г. А. Генерирование мощных наносекундных импульсов / Г. А. Месяц. – М. : Сов. Радио, 1974. – 325 с.
25. Baum C. E. Notes on EMP And Related Subjects / C. E. Baum ; editor Dr. C.E. Baum. – Air Force Research Laboratory, Directed Energy Directorate. – 2001, 2002. – (CD-ROM) Disc 1, 2.
26. Wunsch D. C. Determination Of Threshold Failure Of Semiconductor Diodes And Transistors Due To Pulse Voltages / D. C. Wunsch, R. R. Bell // IEEE Trans. – 1968. – Vol. NS-15, N 6. – P. 244–259.
27. Dwyer V. M. Electromagnetic discharge thermal failure in semiconductor devices / Dwyer V. M., Franklin A. J., Campbell D. S. // IEEE Trans. on Electr. Dev. – 1990. – Vol. 37, N 11. – P. 2381–2387.
28. Dwyer V. M. Thermal failure in semiconductor devices / Dwyer V. M., Franklin A. J., Campbell D. S. // Solid State Electronics. – 1990. – Vol. 33. – P. 553–560.
29. Antinone R. J. HPM Testing of Electronic Components / R. J. Antinone; Technical Report UCID-21687, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 94551. – Washington, DC (USA), - 1990. p. 542-549.
30. Pierce D. G. An Overview of Electrical Overstress Effects on Semiconductor Devices, Electrical Overstress / D. G. Pierce, D. L. Durgin // Electrostatic



Discharge Symposium, 13-15 feb. 1981 : proc. – NY, 1981. – Vol. EOS-3. – P.120-131.

31. Antinone R. J. A Review of the Phenomenology of High Power Microwave Effects on Electronic Components / Antinone R. J. // International Symposium on Electromagnetic Environments and Consequence, 17-21 Jan 1994 : proc. – Bordeaux, 1994. – P. 344–350.

32. Tasca D. M. Theoretical and experimental researches degradation of semiconductor devices because of high electrical gradients / Tasca D. M., Peden J. C., Stokes S. J. – Washington : Harry Diamond Laboratory, 1973. – P. 147.

33. Antinone R. J. HPM Testing of Electronic Components / Antinone R. J. // Technical Report UCID-21687. – Livermore, CA : Lawrence Livermore National Laboratory, 1989. – 276 p.

34. G. C. Messenger. The Effects of Radiation on Electronic Systems / G. C. Messenger, M. S. Ash. – New York : Van Nonstrand Reinhold, 1986. – 264 p.

35. Everett W. W. Microprocessor Susceptibility to RF Signals-Experimental Results / W. W. Everett. Jr. // Proc. Of the 1984 – Southeaston, 1984. – P. 512–516.

36. Jenkins C. R. EMP susceptibility of integrated circuits / C. R. Jenkins, D. L. // Durgin IEEE Trans. – 1975. – Vol. NS-22, N 6. – P. 2494–2499.

37. Herrick K. J. Microtechnology in the development of three-dimensional circuits (invited paper) / Herrick K. J., Yook Jong-Gwan, Katehi Linda P. B. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1998. – Vol. 46, N 11. – P. 1832–1844.

38. Segundo El. Applied Wave Research Inc. (AWR) / Segundo El. // Microwave Journal. – 2001. – N 11. – P.1–7.

39. Wunsch D. C. Determination Of Threshold Failure In Metallization Due To Pullse Voltages / D. C. Wunsch, R. R. Bell. // IEEE Trans. – 1970. – Vol. NS-18, N 4. – P. 212-220.

40. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы / Антипин В. В., Годовицын В. А., Громов Д. В. [и др.] // Зарубежная радиоэлектроника. – 1995. – № 1. – С. 37–53.
41. Васильев К. В. Наводки в радиоэлектронных цепях в интенсивном электромагнитном поле / Васильев К. В., Ключник А. В., Солодов А. Р. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 10 - я Междунар. Крымская конф., 11-15 сентября 2000 г. : материалы докл. – Севастополь : Вебер, 2000. – С. 480–481.
42. Ключник А. В. Тепловое повреждение интегральных микросхем / Ключник А. В., Маслов Д. Е., Солодов А. В. // Электронная техника. Сер. СВЧ техника. – 1994. – Вып.1. – С. 46–48.
43. Взаимодействие мощного СВЧ излучения УКДИ с приемно-усилительным трактом СВЧ диапазона / Гадецкий Н. П., Кравцов К. А., Магда И. И. [и др.] // СВЧ-техника и спутниковый прием : 4-я Междунар. конф., 26-28 сентября 1994 г. : материалы докл. – Севастополь : Вебер, 1994. – Т. 2. – С. 536–538.
44. Генерация мощного импульсного СВЧ излучения и его воздействие на электронные приборы / Блудов С. П., Гадецкий Н. П., Кравцов К. А., Магда И. И. [и др.] // Физика плазмы. – 1994. – Т. 20, № 7/8. – С. 643–647.
45. Исследование воздействия электромагнитных излучений ультракороткой длительности импульса на радиоэлектронную аппаратуру СВЧ диапазона / Гадецкий Н. П., Кравцов К. А., Магда И. И. [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 6-я Междунар. Крымская конф., 11-15 сентября 2006 г. : материалы докл. – Севастополь : Вебер. – 1996. – С. 441–446.
46. Магда И. И. Исследование физических механизмов деградации изделий электронной техники в мощных электромагнитных полях / Магда И. И., Блудов С. Б. // СВЧ-техника и спутниковый прием : 3-я Крымская конф., 20 -

23 сентября, 1993 : материалы докл. – Севастополь : Вебер, 1993. – Т. 5. – С. 523–526.

47. Испытательный стенд для тестов на ЭМС к импульсным полям сверхкороткой длительности / [Магда И. И., Гадецкий Н. П., Блудов Н. И. и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 14-я Междунар. Крымская конф., 13-17 сентября 2004 г. : материалы докл. – Севастополь : Вебер. – 2004. – С. 586–587.

48. Механизм деградации ИЭТ в полях мощного СВЧ излучения / [Магда И. И., Блудов Н. И., Гадецкий Н. П. и др.] // Петерб. журнал электроники. – 1995. – №3. – С. 55–59.

49. Магда И. И. Стендовая база для испытаний радиоэлектронной аппаратуры на электромагнитную совместимость и стойкость к излучениям сверхкороткой длительности / Магда И. И. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 17-я Междунар. Крымская конф., 16-21 апреля 2007 г. : материалы докл. – Севастополь : Вебер, 2007. – С. 626–629.

50. Кучер Д. Б. Мощные электромагнитные излучения и сверхпроводящие защитные устройства / Кучер Д. Б. – Севастополь : Изд-во: Ахтиар, 1997. – 188 с.

51. Панов В. В. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ-средств функционального поражения / В. В. Панов, А. П. Саркисян // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. – № 10-12. – С. 40-42.

52. Протасевич Е. Т. Электромагнитное оружие / Протасевич Е. Т. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2004. – 90 с.

53. Серков А. А. Проблемы обеспечения живучести информационных систем в условиях электромагнитных влияний / Серков А. А. // Вісник НТУ «ХП». Зб. наук. пр. Тематичний випуск «Електроенергетика і перетворююча техніка». – 2002. – Т. 1, № 7. – С. 123–126.

54. Бреславец В. С. Моделирование информационных систем с априорной неопределенностью / В. С. Бреславец, А. А. Серков // Вестник ХГПУ

Системный анализ, управление и информационные технологии. Сб. научн. работ. – 2000. – Вып. 108. – С. 55–59.

55. Кравченко В. И. Анализ влияния электромагнитных помех на качество каналов связи информационных систем / В. И. Кравченко, А. А. Серков. ; Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. пр. Тематичний випуск «Електроенергетика і перетворююча техніка». – 2004. – № 4. – С. 13–22.

56. Кравченко В. И. Разработка общего подхода к оценке уровня живучести систем / Кравченко В. И., Серков А. А., Глухов Е. В. // Вестник НТУ «ХПИ». Сб. научн. тр. Темат. выпуск «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2005 – № 49 – С.145–149.

57. Воздействие электромагнитных полей на интегральные микросхемы / Григорьев Е. В., Борисов А. А. Старостенко В. В., Таран Е. П. // Измерительная техника. – 1998. – № 4. – С. 65–67.

58. Влияние поляризации электромагнитной волны на соотношение между волнами при воздействии на интегральные микросхемы / Григорьев Е. В., Малишевский С. В., Старостенко В. В., Таран Е. П. // Радиоэлектроника и информатика. – 2002. – № 2. – С.19–24.

59. Механизмы воздействия электромагнитных полей на интегральные микросхемы / Григорьев Е. В., Малишевский С. В., Старостенко В. В., Таран Е. П. // Радиоэлектроника и информатика. – 2002. – № 3. – С.29–32.

60. Влияние магнитной компоненты воздействующего на микросхемы импульсного электромагнитного поля на процессы в микроструктурных элементах / Григорьев Е. В., Старостенко В. В., Таран Е. П., Чурюмов Г. И. // Прикладная электроника. – 2004. – Т. 3, № 1. – С. 53–56.

61. Григорьев Е. В. Локальная деградация металлизации в интегральных микросхемах при воздействии электромагнитных полей / Григорьев Е. В., Старостенко В. В., Таран Е. П. // Радиофизика и электроника. – 1998. – Т. 3, №1. – С. 123–126.

62. Поле в ближней зоне микросхемы при воздействии на нее электромагнитной волной в волноводе / Малишевский С. В.,

Старостенко В. В., Таран Е. П., Чурюмов Г. И. // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т. 29, Вып. 1. – С. 62–68.

63. Старостенко В. В. Численный анализ влияния неоднородности металлизации на тепловой режим микросхем / В. В. Старостенко, Таран Е.П. // ЖТФ. – 1998. – Т. 68, № 12. – С. 90–92.

64. Чурюмов Г. И. Влияние толщины металлизации на стойкость интегральных микросхем при воздействии электромагнитных полей / Ахрамович Л. Н., Зуев С. А., Таран Е. П., Старостенко В. В. // Прикладная радиоэлектроника. – 2003. – Т. 2, № 1. – С. 88–92.

65. Starostenko V. V. Effect of Heterogeneity Parameters of Conducting Microstructures of Integrated Circuits on the Wunsch-Bell Curve / Starostenko V. V., Taran Ye. P., Grigor'ev Ye.V. // Telecommunications and Radio Engineering. – 2002. – Vol. 57, N 8/9. – P. 105–112.

66. Влияние параметров воздействующих на микросхемы электромагнитных полей на процессы в микроструктурных элементах / Григорьев Е. В., Старостенко В. В., Таран Е. П., Чурюмов Г. И. // Прикладная радиоэлектроника.– 2005. –Т. 4, № 4. – С.432–436.

67. Динамические процессы в металлизации микросхем при воздействии импульсных электромагнитных полей с учетом скин-эффекта / Григорьев Е. В., Старостенко В. В., Таран Е. П., Чурюмов Г. И. // Радиоэлектроника и информатика. – 2004. – № 1 (26). – С.40–43.

68. An Influence of Heat Processes on the Drift Characteristics of Semiconductor Structure / Zuev S. A., Starostenko V. V., Tereshchenko V. Yu., Shadrin A. A. // Telecommunications and Radio Engineering. – 2003. – Vol. 59, N 10, 11, 12. – P. 133–137.

69. Лавинный пробой в ПТШ на GaAs по результатам численного моделирования / Зуев С. А., Григорьев Е. В., Старостенко В. В. [и др.] // Прикладная радиоэлектроника. – 2005. – Т. 4, № 3. – С. 353–357.

70. Зуев С. А. Модель расчета полевых транзисторов на GaAs субмикронных размеров / Зуев С. А., Старостенко В. В., Шадрин А. А. //

Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2001. – Вып. 121. – С. 146–152.

71. Особенности лавинного пробоя в кремниевых ПТШ по результатам численного моделирования / Гордиенко Ю. Е., Зуев С. А., Терещенко В. Ю., Шадрин А. А. // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2006. – Вып. 121. – С.146–152.

72. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов / Красников Г. Я. – М. : Техносфера. – 2002. – 416 с.

73. Zeitzoff P. M. Weighing in on Logic Scalling Trends / P. M. Zeitzoff, J. E. Chung. // IEEE Circuits and Devices Magazine. – 2002. – Vol. 18, N 2. – p. 28–41.

74. Киреев В. Н. Технология и оборудование для производства интегральных микросхем. Состояние и основные тенденции развития / Киреев В. Н. // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – М., 2004. – №2. – С. 72–77.

75. Extending the Road Beyond CMOS / Hutchby J. A., Bonrnanoff G. I., Zhiron V. V. [et al.] // IEEE Circuits and Devices Magazine. – 2002. – Vol. 18, N 2. – P. 28–41.

76. Рабан Ж. М. Цифровые интегральные микросхемы. Методика проектирования / Рабан Ж. М., Чандракасан А., Боривож Н. – М. : изд-во Вильямс, 2007. – 912 с.

77. Трамперт В. AVR-RISC микроконтроллеры / Трамперт В. – М. : изд-во МК-Пресс, 2006. – 464 с.

78. Евстифеев А. В. Микроконтроллеры AVR семейства Mega / Евстифеев А. В. – М.: изд-во Додэка XXI, 2007. – 594 с.

79. Новожилов О. П. Основы микропроцессорной техники / Новожилов О. П. – М. : изд-во РадиоСофт, 2007. – 432 с.

80. Фишер-Крикс А. С. Интерфейсы измерительных систем / Фишер-Крикс А. С. – М. : Издательский Дом «Технологии», 2007. – 336 с.

81. Тоггли Р. Д., Уидлер Н. С. Цифровые системы. Теория и практика / Р. Д. Тоггли, Н. С. Уидлер. – М : изд-во Вильямс, 2004. – 1024 с.
82. Идл Ф. Сетевой и межсетевой обмен данными с микроконтроллерами / Идл Ф. ; Издательство: Додэка XXI, 2007. – 376.
83. Нефедов А. В. Зарубежные микросхемы памяти и их аналоги / А. В. Нефедов, А. М. Савченко. – М. : изд-во РадиоСофт, 2007. – 576 с.
84. Борисов Ю. И. Динамика радиоэлектроники / Борисов Ю. И. – М. : изд-во Техносфера, 2007, 400 с.
85. Букин М. Р. Все про мобильные телефоны / Букин М. Р. – М. : изд-во Майор, 2006. – 276 с.
86. Амосов В. В. Схемотехника и средства проектирования цифровых устройств / Амосов В. В. – Санкт-Петербург : изд-во БХВ-Петербург, 2007. – 560 с.
87. Размерные эффекты статической проводимости в тонких пленках тантала / Новодворский О. А., Храмова О. Д., Венцель К., Барта Й. В. // ЖТФ. – 2005. – Т. 75, Вып.6. – С. 42–45.
88. Wetzig K. Metal Based Thin Films for Electronics / K. Wetzig, C. M. Shneiker. – Weinheim : Wiley, 2003. – 378 p.
89. Thin Solid Films / Kazi I. H., Wild P. M., Moore T. N. [et al.] // International Journal on the Science and Technology of Condensed Matter Films. – 2003. – Vol. 433. – P. 337–343.
90. Прогнозирование стойкости микросхем при воздействии мощных импульсных электромагнитных полей / М. В. Глумова, М. П. Грибский, Е. В. Григорьев, В. В. Старостенко, Е. П. Таран, Д. А. Унжаков // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 19-й междунар. Крымская конф., 14-18 сент. 2009 г.: материалы. – Севастополь : Вебер, 2009. – Т. 2. – С. 736–737.
91. Винокуров В. И. Электрорадиоизмерения / Винокуров В. И., Каплин С. И., Петелин И. Г. ; – М. : Высшая школа, 1996. – 351 с.

92. Кураев А. А. Электродинамика и распространение радиоволн / Кураев А. А., Попкова Т. Л., Сеницын А. К. – Минск : Бестпринт, 2004. – 378 с.
93. Wunsch-Bell Criterial Dependence For Si and GaAs Schottky-Barrier Field-Effect Transistors / [G. I. Churyumov, M. P. Gribskii, V. V. Starostenko, V. Yr. Tereshenko, D. A. Unzhakov, S. A. Zuev] ; edited by Frank Sabath // Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 9. : Springer, 2009. – P. 395–402.
94. Воздействие импульсных электромагнитных полей на современные микроконтроллеры / Грибский М. П., Григорьев Е. В., Старостенко В. В., Войтович С. А., Зуев С. А., Чурюмов Г. И. // Прикладная радиоэлектроника. – 2006. – Т. 5, № 2. – С. 294–297.
- 94.a. Influence of Pulse Electromagnetic Fields on Current-Technology Microcontrollers / Gribskii M. P., Grigor'ev E. V., Voitovich A. K., Zuev S. A., Starostenko V. V. and Churyumov G. I. // Telecommunications and Radio Engineering. – 2007. – Vol. 66, N 19. – P. 1791–1797.
95. Воздействие импульсных электромагнитных полей на интегральные микросхемы памяти / Грибский М. П., Ахрамович Л. Н., Григорьев Е. В., Зуев С. А., Старостенко В. В., Чурюмов Г. И. // Радиоэлектроника и информатика. – 2006. – Т. 35, № 4. – С. 15–17.
- 95.a. Influence of Pulse Electromagnetic Fields on Integrated Memory Chips / Gribskii M. P., Akhramovich L. N., Grigor'ev E. V., Zuev S. A., Starostenko V. V. and Churyumov G. I. // Telecommunications and Radio Engineering. – 2007. – Vol. 66, N 19. – P.1799–1804.
96. Воздействие импульсных электромагнитных полей на микросхемы АЦП и ЦАП / Грибский М. П., Григорьев Е. В., Старостенко В. В., Унжаков Д. А. // Радиоэлектроника и информатика. – 2007. – Т. 39, № 4. – С. 24–26.
97. Воздействие импульсных электромагнитных полей на микросхемы АЦП и ЦАП / М. П. Грибский, Е. В. Григорьев, В. В. Старостенко, Д. А. Унжаков // «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» : 18-я междунар.



Крымская конф., 8-12 сент. 2008 г. : материалы. – Севастополь: Вебер, 2008. – Т. 2. – С. 676–677.

98. Воздействие импульсных электромагнитных СВЧ полей на современные микросхемы / М. П. Грибский, Е. В. Григорьев, В. В. Старостенко, Е. П. Таран, Г. И. Чурюмов // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития : 3-й междунар. форум, 22-24 окт. 2008 г. : материалы. – Харьков, 2008. – Т.6. – С. 73–74.

99. Воздействие импульсных электромагнитных полей на экранированные микросхемы / Грибский М. П., Григорьев Е. В., Зуев С. А., Старостенко В. В., Чурюмов Г. И., Унжаков Д. А. // Прикладная радиоэлектроника. – 2007. – Т. 6, № 4. – С. 590–593.

100. Воздействие импульсных электромагнитных полей на интегральные микросхемы памяти / М. П. Грибский, Л. Н. Ахрамович, Е. В. Григорьев, С. А. Зуев, В. В. Старостенко, Г. И. Чурюмов, А. А. Борисов, А. М. Петров. – СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 16-я междунар. Крымская конф., 11-15 сент. 2006 г.: материалы. – Севастополь: Вебер, 2006. – Т.2. – С. 699–700.

101. Влияние экранирования на стойкость микросхем при воздействии электромагнитных полей / В. В. Старостенко, М. П. Грибский, Е. В. Григорьев, С. А. Зуев, Е. П. Таран, В. В. Терещенко, Д. А. Унжаков. – СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 17-я междунар. Крымская конф., 10-14 сент. 2007 г.: материалы. – Севастополь : Вебер. – 2007. – Т.2. – С. 665–666.

102. Воздействие импульсных электромагнитных полей на современные микроконтроллеры и микросхемы памяти / М. П. Грибский, А. К. Войтович // Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2006 : междунар. молодёжная науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и ученых, 17-21 апр. 2006 г. : материалы. – Севастополь : изд-во СевНТУ, 2006. – С. 210.

103. Грибский М. П. Воздействие импульсных электромагнитных полей на современные приемопередающие экранированные СВЧ микросхемы / Грибский М. П. // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2007 : 3-я междунар. молодёжная науч.-техн. конф., 16-21 апр. 2007г. : материалы. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2007. – С. 232.
104. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М. : Наука, 1977. – 736 с.
105. Митра Р. Вычислительные методы в электродинамике / Р. Митра. – М. : Мир, 1977. – 431 с.
106. Никольский В. В. Вариационные методы для внутренних задач электродинамики / Никольский В. В. ; – М.: Наука, 1967. – 460 с.
107. Никольский В. В. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М. : Наука, 1983. – 304 с.
108. Лисицын Б. М. Проекционные и проекционно-сеточные методы / Лисицын Б. М. – К. : Высшая школа, 1991. – 362 с.
109. Стренг Г., Фикс Дж. Теория методов конечных элементов / Г. Стренг, Дж. Фикс. – М. : Мир, 1980. – 452 с.
110. Волков Е. А. Численные методы / Волков Е. А. – М. : Наука, 1987. – 248 с.
111. Использование «сенсорных датчиков» для численного решения задачи дифракции электромагнитных полей на металлодиэлектрических неоднородностях в волноводе / Малишевский С. В., Старостенко В. В., Таран Е. П. // Вестник ХНУ. Радиофизика и электроника. – 2002. – Вып. 570. – С. 146–149.
112. Штерн Л. Основы проектирования интегральных схем / Штерн Л. – М. : Энергия, 1973. – 354 с.
113. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование / Фуско В. – М. : Радио и связь, 1990. – 288 с.

114. Аваев Н. А. Основы микроэлектроники / Аваев Н. А., Наумов Ю. А., Фролкин В. Т. – М. : Спутник, 2004. – 288 с.
115. Хокни Р. Численное моделирование методом частиц / Р. Хокни, Д. Иствуд – М. : Мир, 1987. – 638 с.
116. Бубенников А. Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем : учеб. пособие [для спец. «Физика и технология материалов и компонентов электронной техники»] / Бубенников А. Н. – М. : Высшая школа, 1989. – 320 с.
117. Бонч-Бруевич В. Л. Физика полупроводников / В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1990. – 600 с.
118. Ридли Б. Квантовые процессы в полупроводниках / Ридли Б. – М. : Мир, 1986. – 304 с.
119. Динамика электротепловых процессов в диэлектрических структурах микросхем при воздействии электромагнитных полей / Грибский М. П., Старостенко В. В., Таран Е. П., Полетаев Д. А., Чурюмов Г. И. // Радиоэлектроника и информатика. – 2007. – Т. 37, № 2. – С. 45–49.
120. Влияние ширины затвора на вольт-амперные характеристики и электротепловую стойкость ПТШ / Грибский М. П., Зуев С. А., Слипченко Н. И., Старостенко В. В., Унжаков Д. А. // Радиоэлектроника и информатика. – 2007. – Т. 38, № 3. – С. 24–26.
121. Численный расчет динамики электротепловых процессов в проводящих структурах современных микросхем при воздействии электромагнитных полей / Грибский М. П., Старостенко В. В., Таран Е. П., Трибрат М. И. // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2007. – Вып. 139. – С. 13–18.
122. Стойкость медных пленочных элементов микросхем при воздействии мощных электромагнитных полей / В. В. Старостенко, М. П. Грибский, Е. В. Григорьев, Е. П. Таран // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 17-я междунар. Крымская конф., 10-14 сент. 2007 г. : материалы. – Севастополь : Вебер, 2007. – Т. 2. – С. 663–664.

123. Модель кристалла микросхем для исследования напряженных токовых и тепловых режимов / Грибский М. П., Григорьев Е. В., Слипченко Н. И., Старостенко В. В., Таран Е. П., Унжаков Д. А. // Радиотехника. – 2008. – Вып. 153. – С. 158–161.

124. Численно-аналитическая модель взаимодействия электромагнитных полей с микроструктурными элементами кристалла микросхем / М. П. Грибский, Е. В. Григорьев, В. В. Старостенко, Е. П. Таран, Г. И. Чурюмов // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития : 3-й междунар. форум , 22-24 окт. 2008 г. : материалы. – Х., 2008. – Т. 6. – С. 75–77.

125. Модель кристалла микросхем для исследования напряженных токовых и тепловых режимов / М. П. Грибский, Е. В. Григорьев, В. В. Старостенко, Е. П. Таран, Д. А. Унжаков // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 18-я междунар. Крымская конф., 8-12 сент. 2008 г. : материалы. – Севастополь : Вебер, 2008. – Т. 2. – С. 678–679.

126. Расчет критериальных зависимостей стойкости ПТШ при воздействии видео- и радиоимпульсов напряжения / М. П. Грибский, С. А. Зуев, В. В. Старостенко, Д. А. Унжаков, А. А. Шадрин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 18-я междунар. Крымская конф., 8-12 сент. 2008 г. : материалы. – Севастополь : Вебер, 2008. – Т. 2. – С. 674–675.

127. Прогнозирование стойкости микросхем при их работе в напряженных токовых режимах / Грибский М. П., Григорьев Е. В., Зуев С. А. , Старостенко В. В., Таран Е. П., Унжаков Д. А. // Вісник СумДУ. Серія «Фізика, математика, механіка». – 2007. – № 2. – С. 185–190.

128. Влияние межэлектродных емкостей на стойкость ПТШ при воздействии импульсных электромагнитных полей / Д. А. Унжаков, С. А. Зуев, М. П. Грибский, В. В. Старостенко, М. В. Глумова // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 19-й междунар. Крымская конф., 14-18 сент. 2009 г. : материалы. – Севастополь : Вебер, 2009. – Т. 2. – С. 734–735.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица П.А.1.

## Характеристики микросхем и тенденции их развития [74]

Характеристика	2001	2004	2007	2010	2013
Минимальная топологическая норма, нм	130	90	65	45	32
Минимальный размер элемента, нм					
ФП (первый уровень разводки)	130	90	65	45	32
МП (длина затвора)	90	53	35	25	18
Емкость, Мбит					
Выход на рынок	$2 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$16 \cdot 10^3$	$32 \cdot 10^3$	$128 \cdot 10^3$
Начало массового производства	512	$1 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$32 \cdot 10^3$
Число транзисторов на кристалле МП, млн. шт.					
ЭЭМП выход на рынок	193	386	773	$1,5 \cdot 10^3$	$3,1 \cdot 10^3$
ВСМП рост массового производства	276	553	$1,1 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$	$4,4 \cdot 10^3$
Быстродействие изделия					
время выборки ФП, нс	25	20	15	10	5
рабочая частота, МГц					
ЭЭМП	800	$1,2 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$
ВСМП	$1,7 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^3$	$4,5 \cdot 10^3$
Напряжение питания	1,2-1,5	0,9-1,2	0,7-0,9	0,6-0,7	0,5-0,6
Максимальная рассеиваемая мощность корпусированного изделия, Вт					
ФП	1,4	2,0	2,5	3,0	3,5
МП					
для сетевой настольной аппаратуры	130	160	190	218	250
для батарейной ручной аппаратуры	2,4	3,2	3,5	3,0	3,0
Число выводов корпуса, шт.					
ФП, макс/ мин	144/48	160/52	182/56	200/60	224/64
ЭЭМП, макс/ мин	1200/480	1600/500	2140/600	2782/780	3616/1014
Число слоёв металлизации, шт., ФП	4	4	4-5	5	5-6
МП	7-8	7-8	9	9-10	10
Размер губительного дефекта, нм	65	45	33	23	16
Диаметр пластины, мм	300	300	300	300	450
Средняя стоимость производства изделия с месячным запуском 25000 пластин, млрд. долл.	3	5	7	10	15

Аббревиатуры в табл.П.А.1: ЭЭМП – экономически эффективные МП, ВПМП – высокопроизводительные МП).

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Зависимости  $K_{\text{СВ}} = K_{\text{СВ}}(f)$  и  $A = A(f)$  для микросхем и электронных модулей в волноводе. Соотношение волн при дифракции волн на микроструктурах приемников, передатчиков, электронных модулях с микросхемами АЦП и ЦАП.

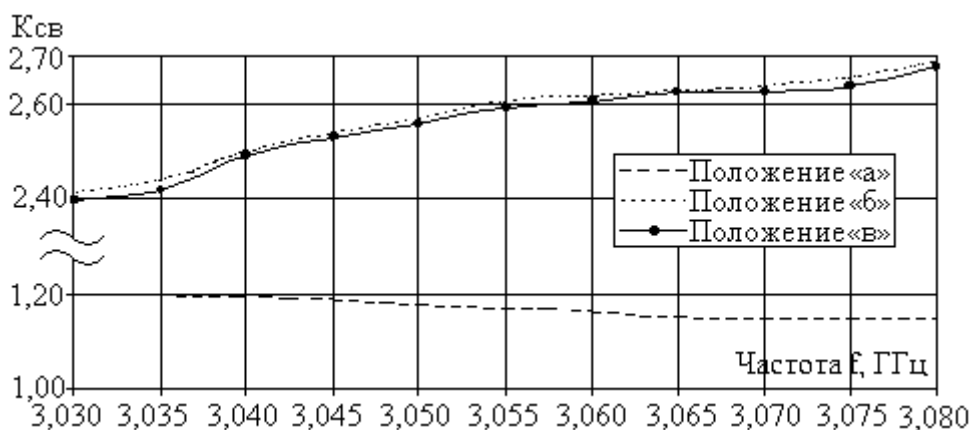


Рис. П.Б.1. Зависимость  $K_{\text{СВ}}$  от частоты для экранированных микроструктур приемников и передатчиков R(T)X

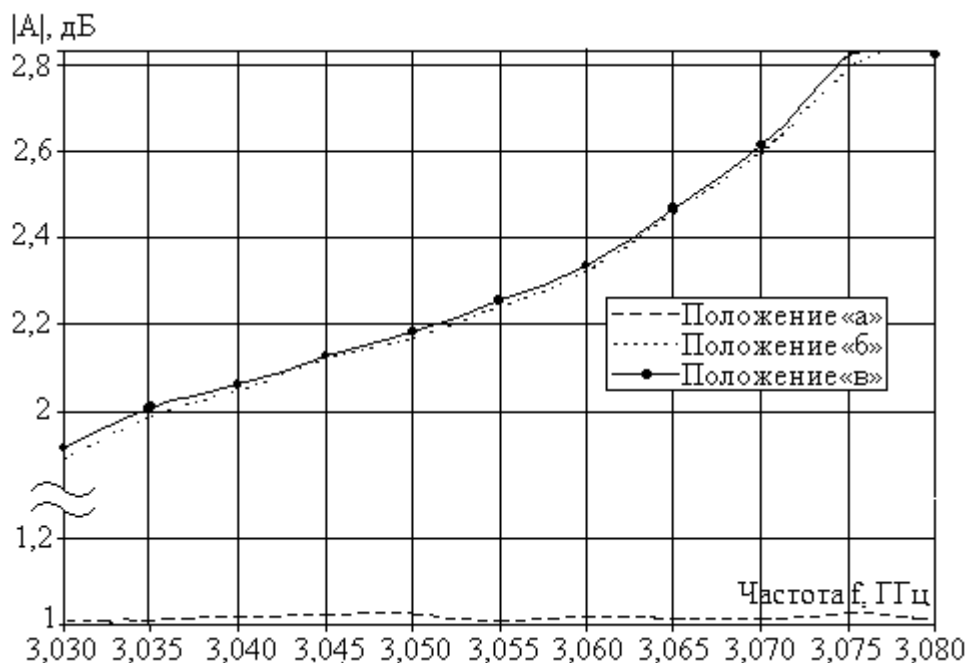


Рис. П.Б.2. Зависимость коэффициента ослабления от частоты для экранированных микроструктур приемников и передатчиков R(T)X

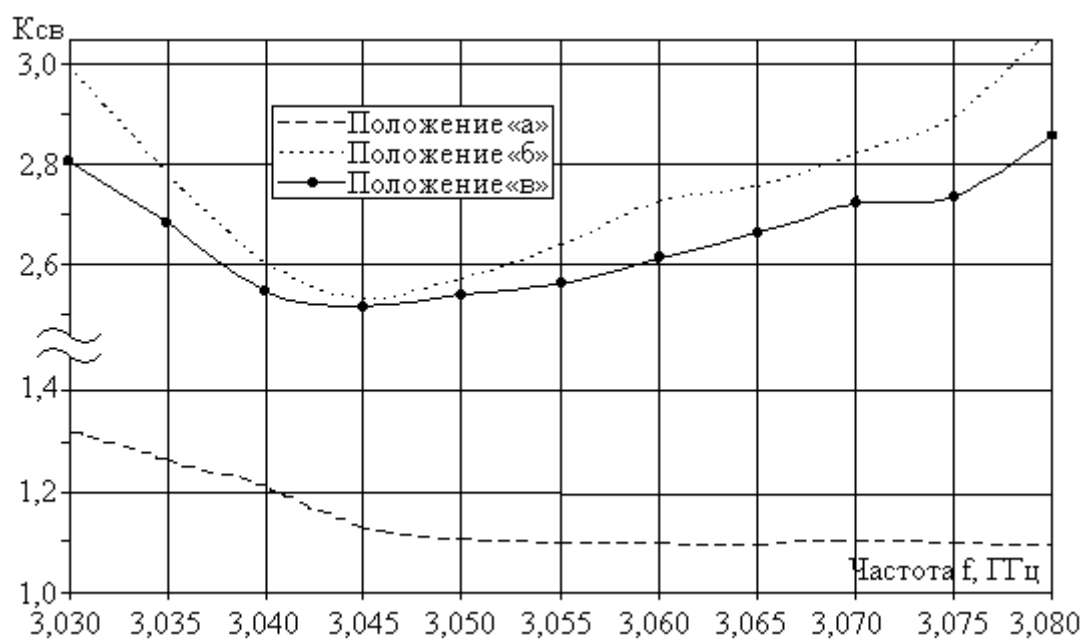


Рис. П.Б.3. Зависимость  $K_{св}$  от частоты для электронных модулей с микросборками приемников и передатчиков R(T)X

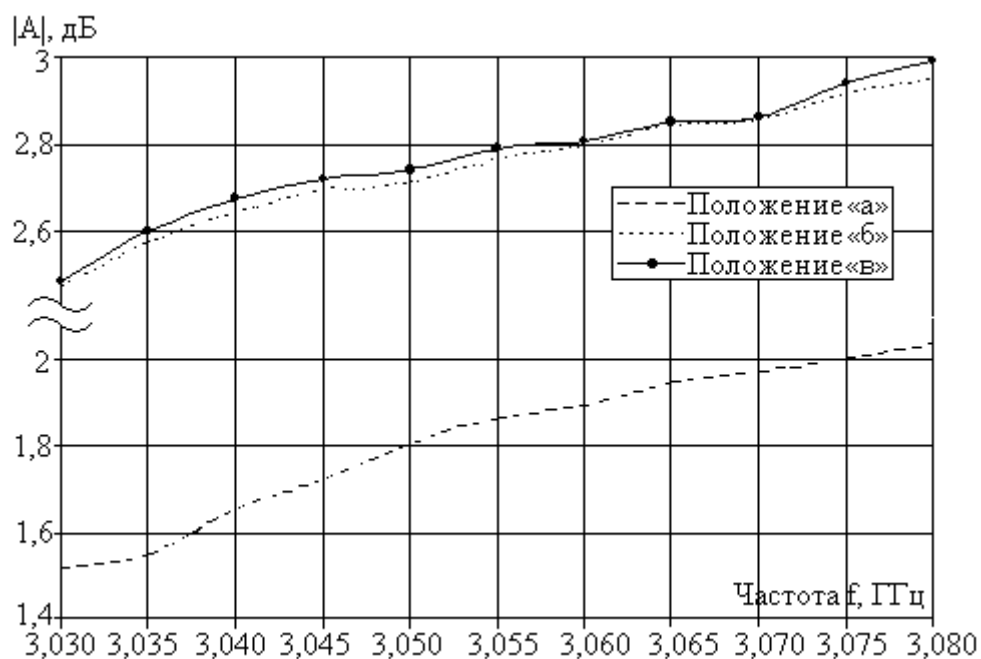


Рис. П.Б.4. Зависимость коэффициента ослабления от частоты для электронных модулей с экранированными микросхемами R(T)X

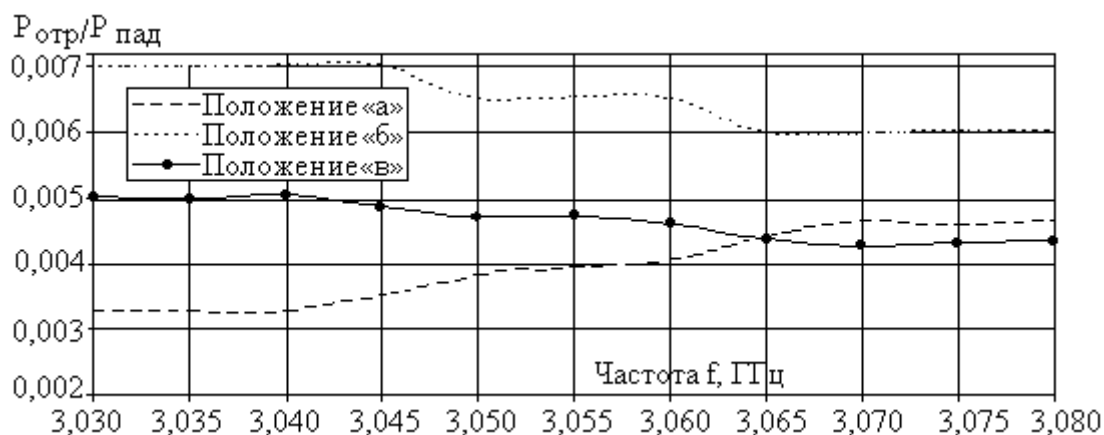


Рис. П.Б.5. Зависимость  $R_{отр}/R_{пад}$  от частоты для экранированных микросборок серий RX и TX

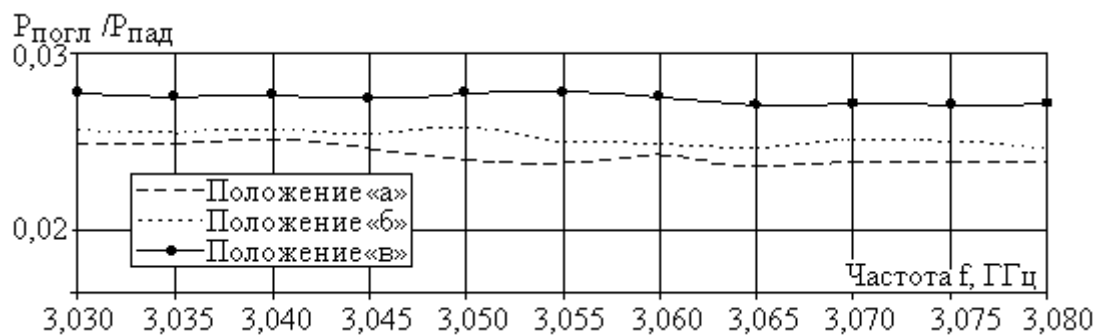


Рис. П.Б.6. Зависимость  $R_{погл}/R_{пад}$  от частоты для экранированных микросборок серий RX и TX

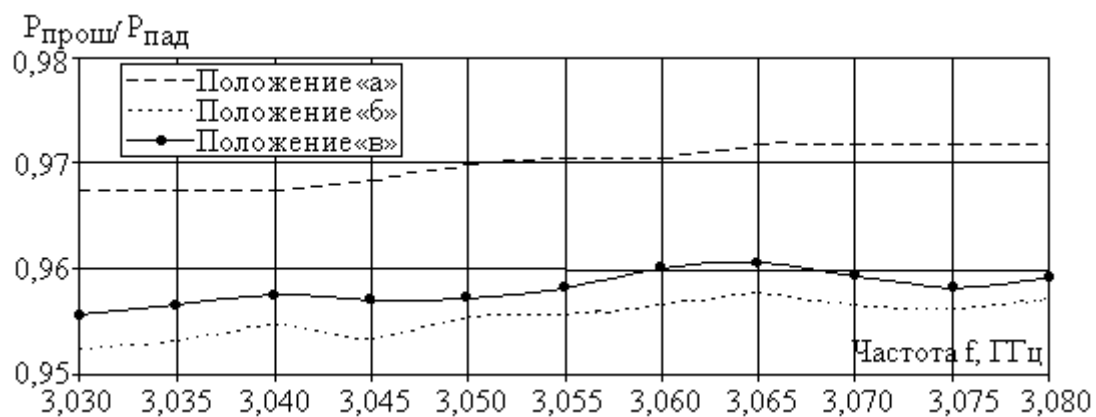


Рис. П.Б.7. Зависимость  $R_{прош}/R_{пад}$  от частоты для экранированных микросборок серий RX и TX



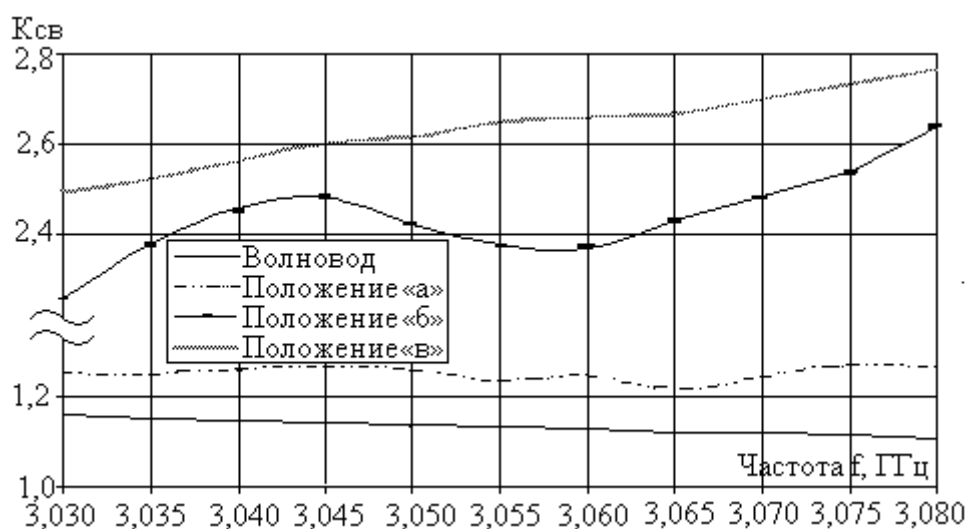


Рис. П.Б.8. Зависимость  $K_{св}$  от частоты для микросхем АЦП TLC549IP

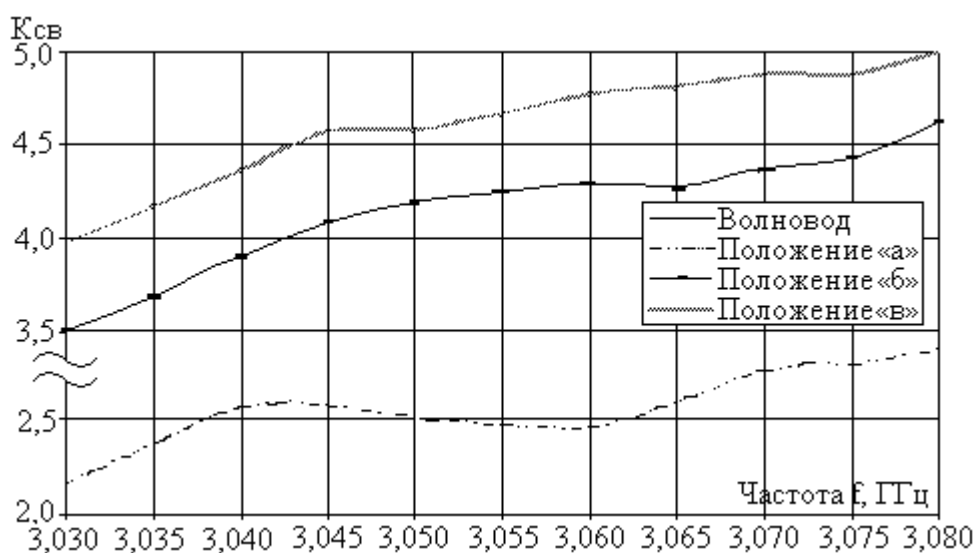


Рис. П.Б.9. Зависимость  $K_{св}$  от частоты для электронного модуля с микросхемой АЦП TLC549IP

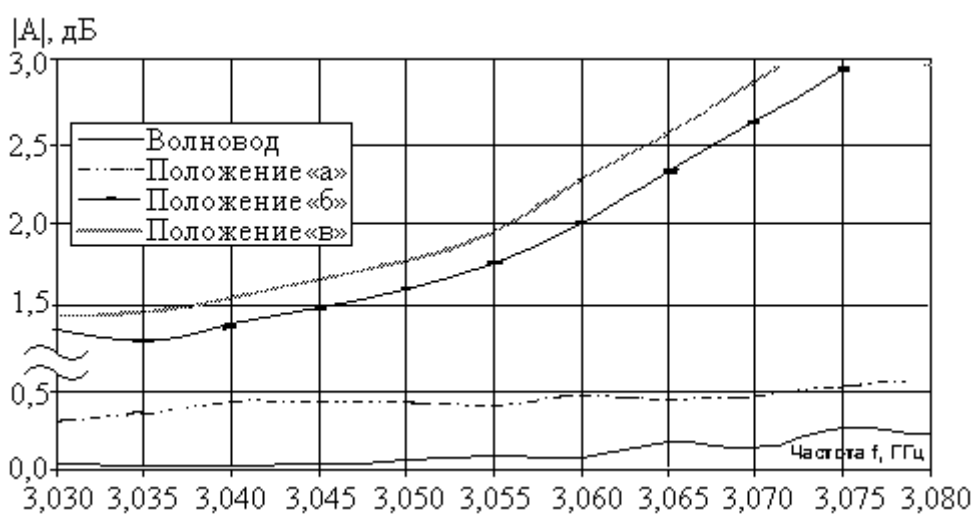


Рис. П.Б.10. Зависимость коэффициента ослабления от частоты для микросхем АЦП TLC549IP

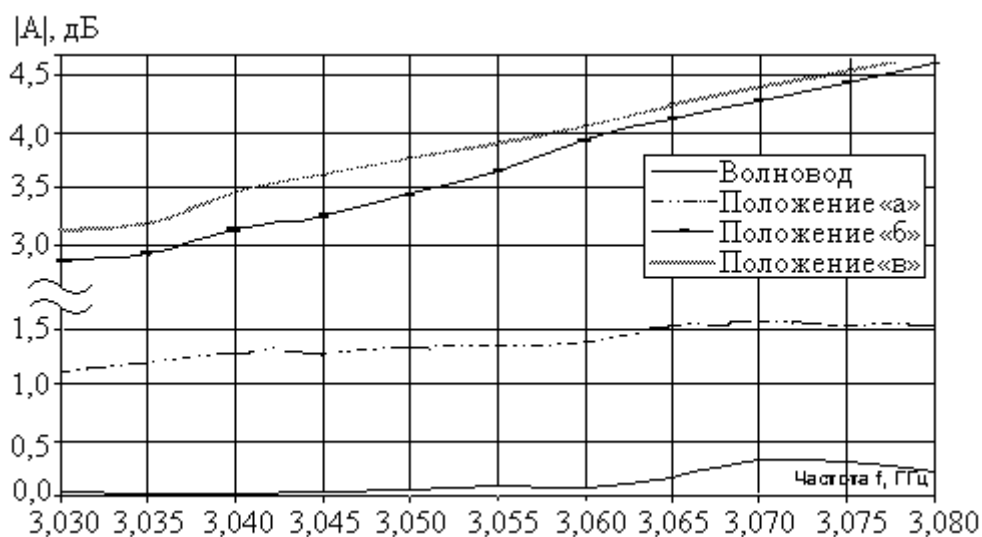


Рис. П.Б.11. Зависимость коэффициента ослабления от частоты для электронных модулей с микросхемами АЦП TLC549IP

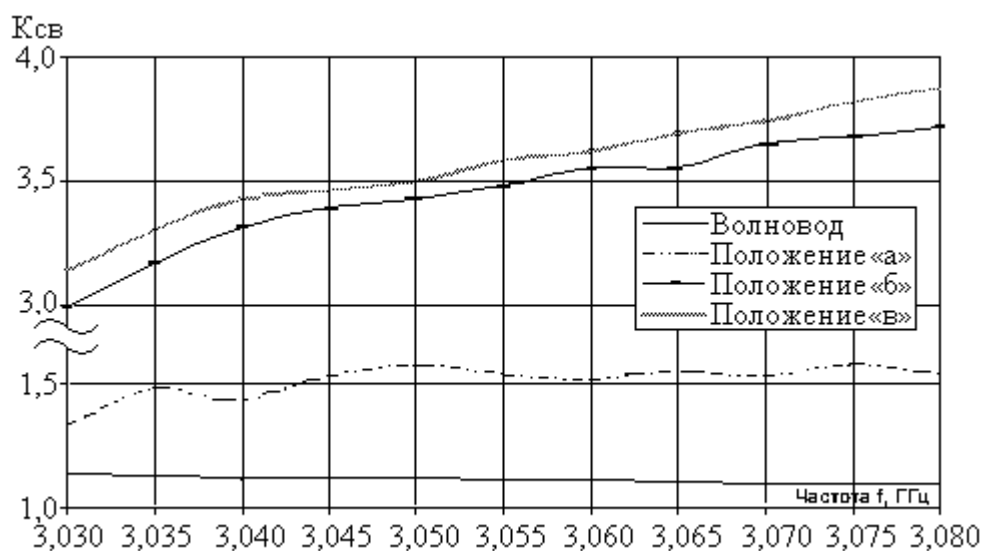


Рис. П.Б.12. Зависимость  $K_{св}$  от частоты для микросхем ЦАП AD 7243

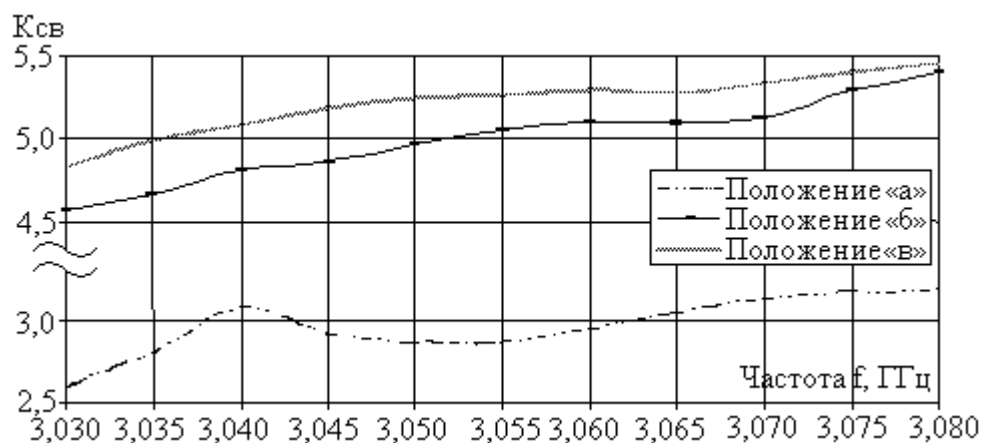


Рис. П.Б.13. Зависимость  $K_{св}$  от частоты для электронного модуля с микросхемой ЦАП AD 7243

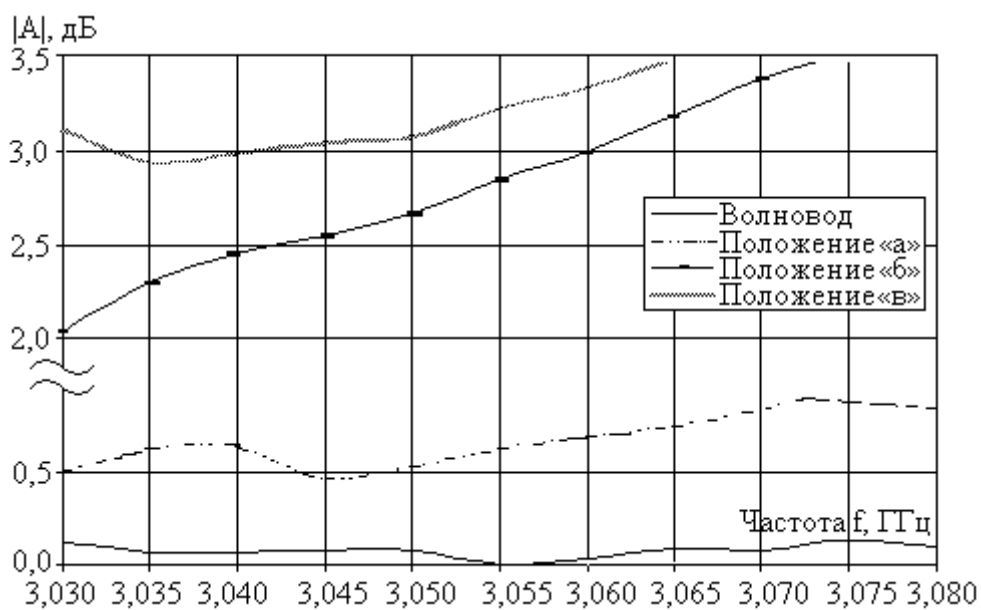


Рис. П.Б.14. Зависимость коэффициента ослабления от частоты для микросхем ЦАП AD 7243

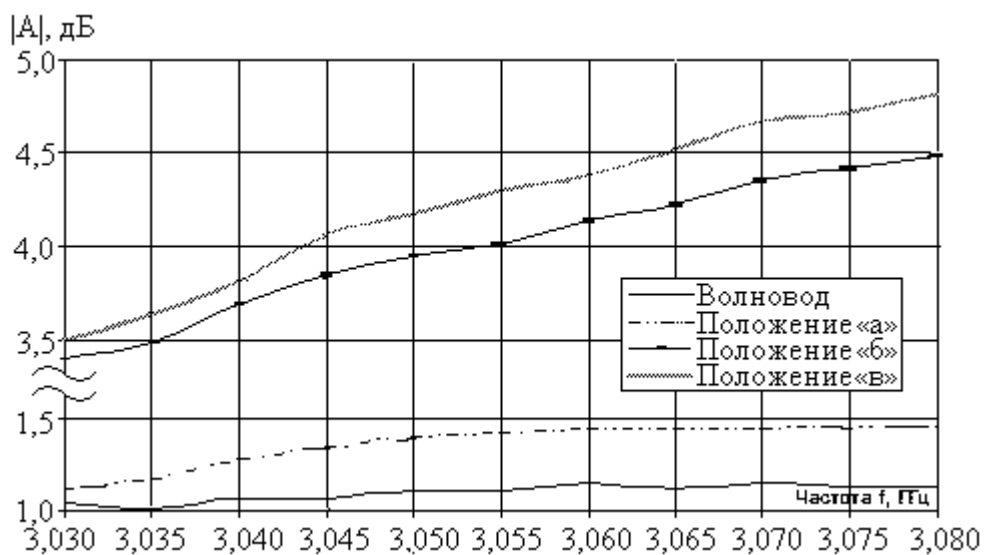


Рис. П.Б.15. Зависимость коэффициента ослабления от частоты для электронного модуля с микросхемой ЦАП AD 7243

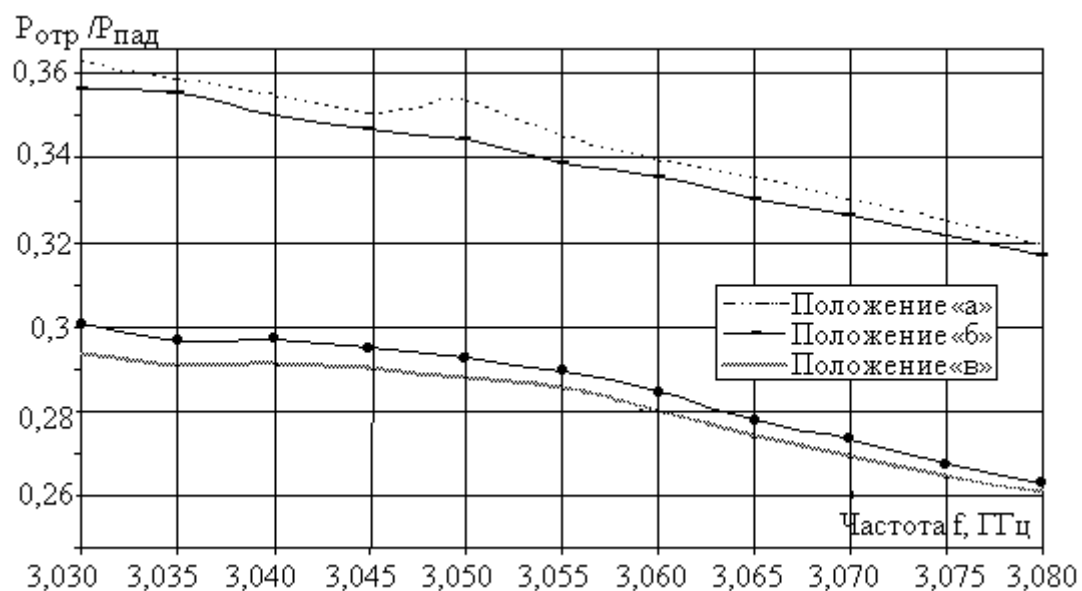


Рис. П.Б.16. Зависимость  $P_{OTR}/P_{ПАД}$  от частоты для микросхемы АЦП TLC549IP

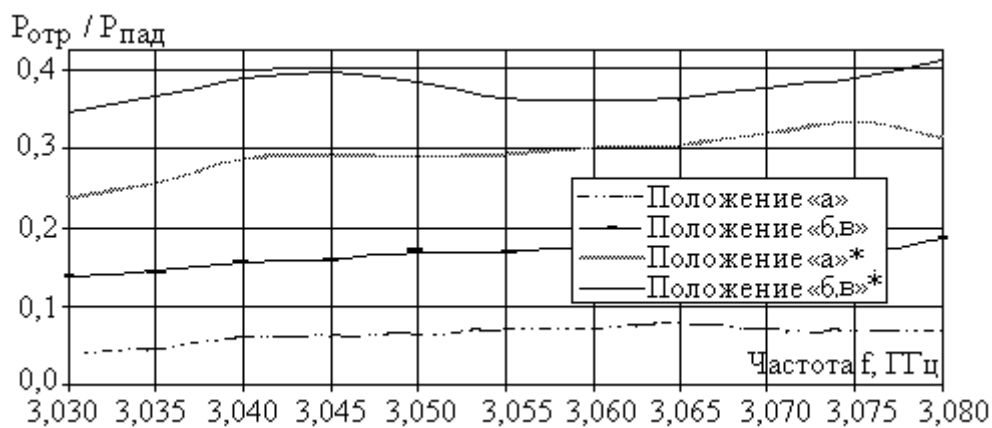


Рис. П.Б.17. Зависимость  $P_{OTR}/P_{ПАД}$  от частоты для электронного модуля с микросхемой АЦП TLC549IP

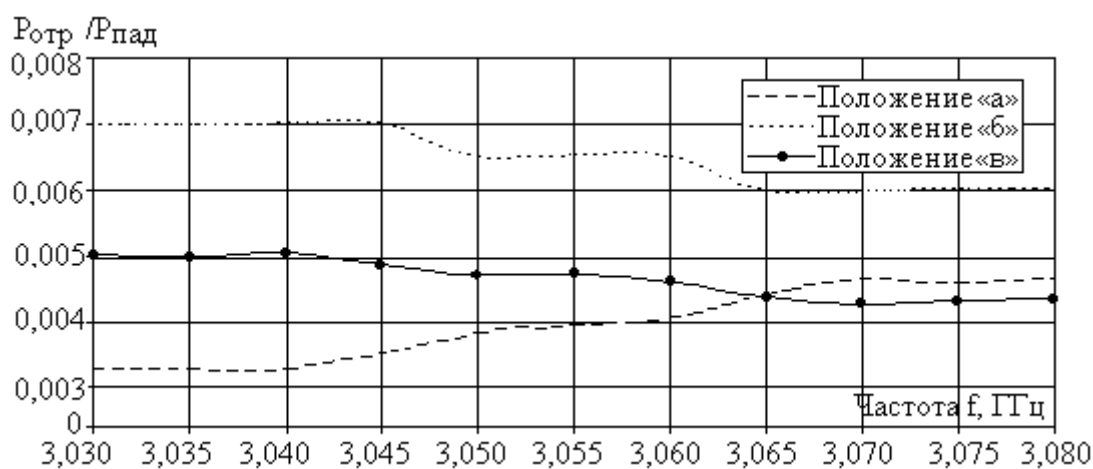


Рис. П.Б.18. Зависимость  $P_{OTR}/P_{ПАД}$  от частоты для микросхемы ЦАП AD

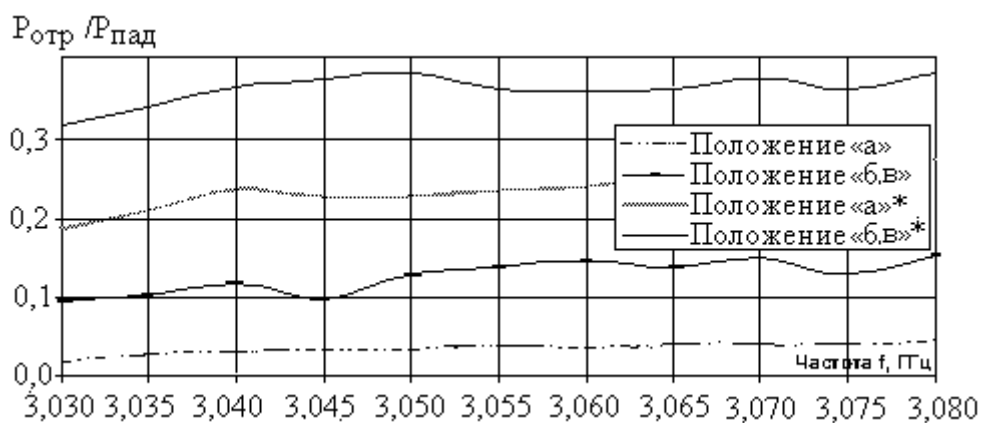


Рис. П.Б.19. Зависимость  $P_{отр}/P_{пад}$  от частоты для электронного модуля с микросхемой ЦАП AD 7243

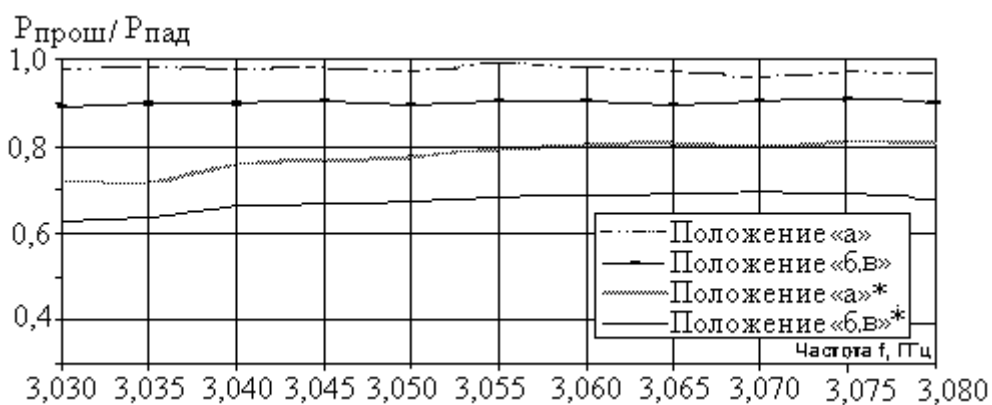


Рис. П.Б.20. Зависимости  $P_{прош}/P_{пад}$  от частоты для электронного модуля с микросхемой АЦП TLC549IP

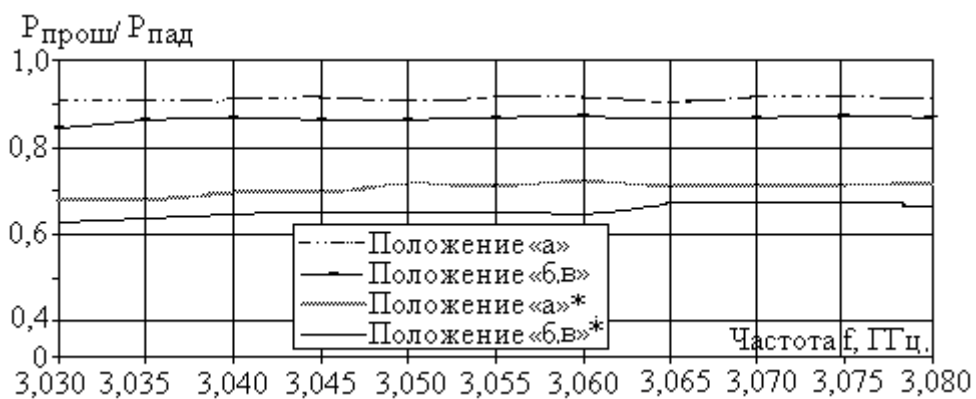


Рис. П.Б.21. Зависимости  $P_{прош}/P_{пад}$  от частоты для электронного модуля с микросхемой ЦАП AD 7243

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Схемы тестирования АЦП и ЦАП. Структурные схемы установок по непосредственному воздействию на микросхемы

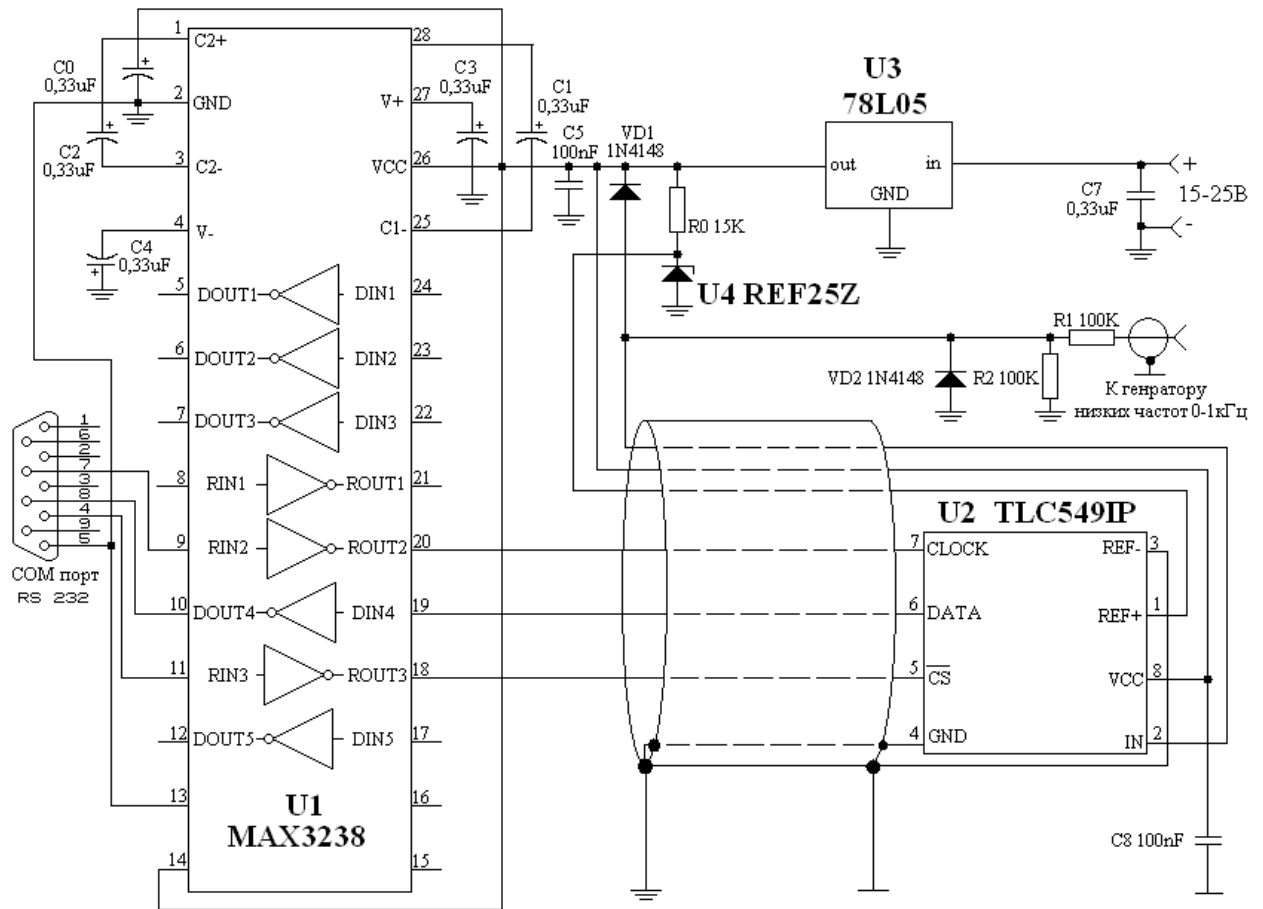


Рис. П.В.1. Схема тестирования работоспособности микросхем АЦП  
TLC549IP

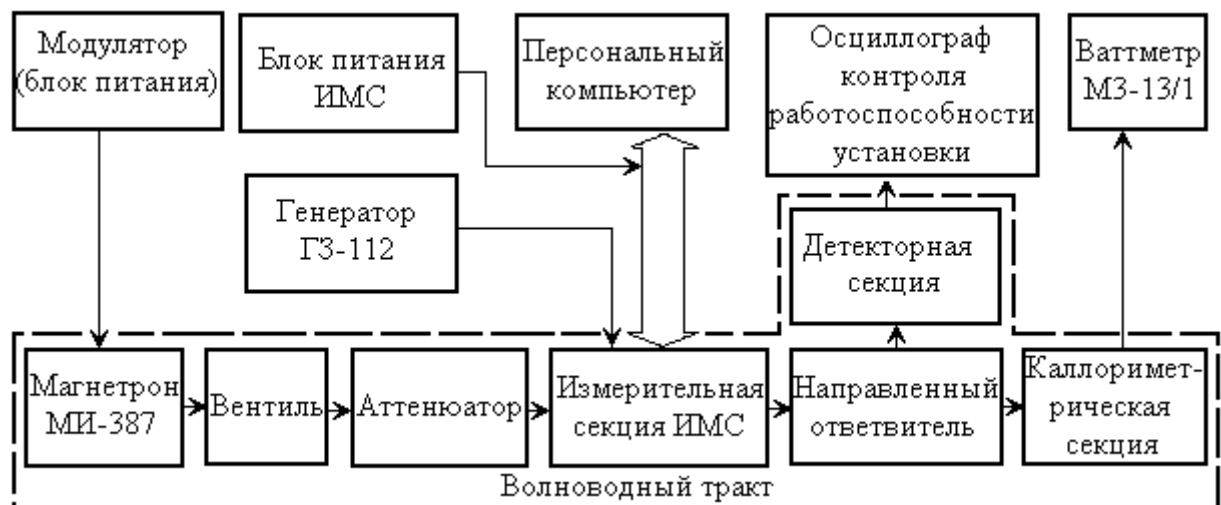


Рис. П.В.2. Структура установки по воздействию ВИИЭМП на микросхемы  
АЦП TLC549IP

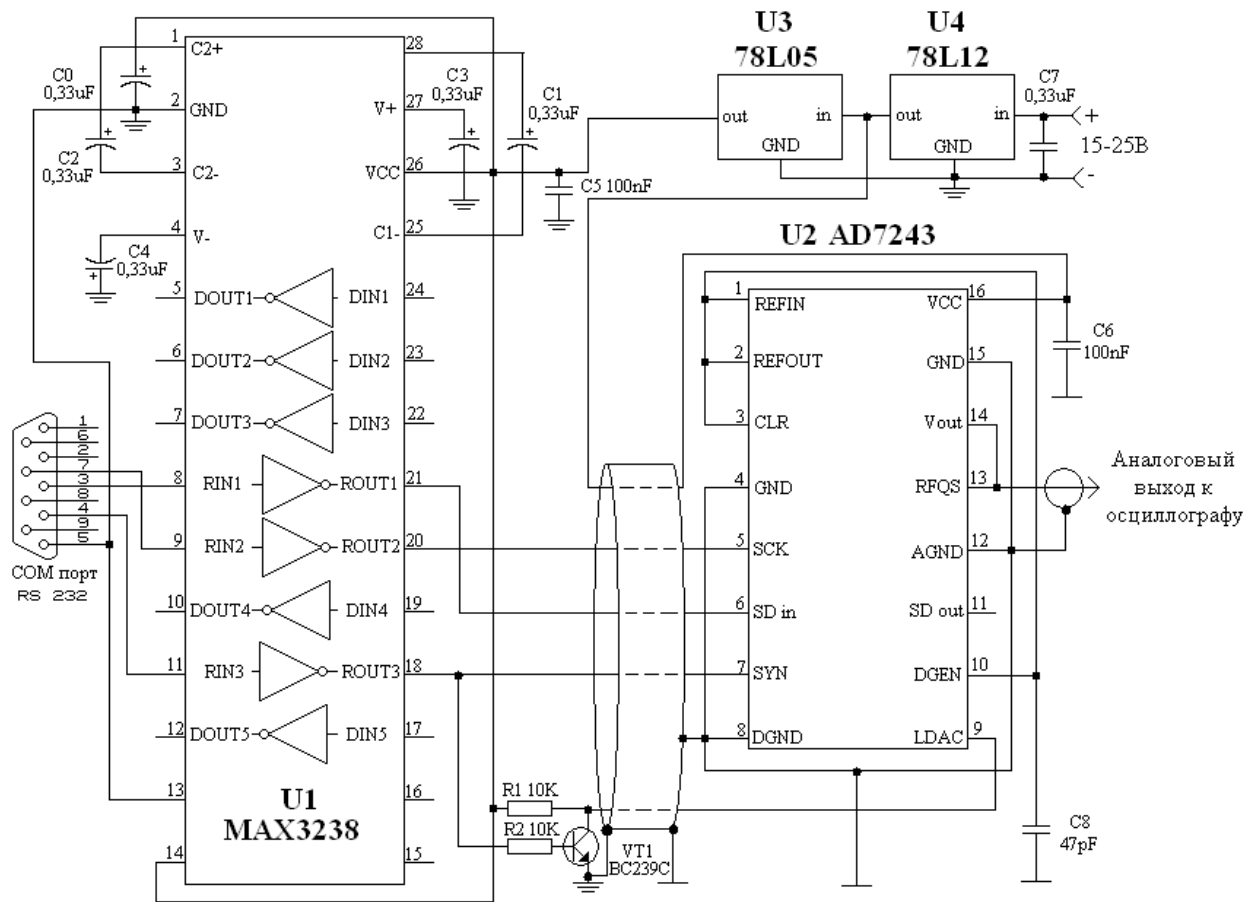


Рис. П.В.3. Электрическая схема тестирования работоспособности микросхем ЦАП AD7243

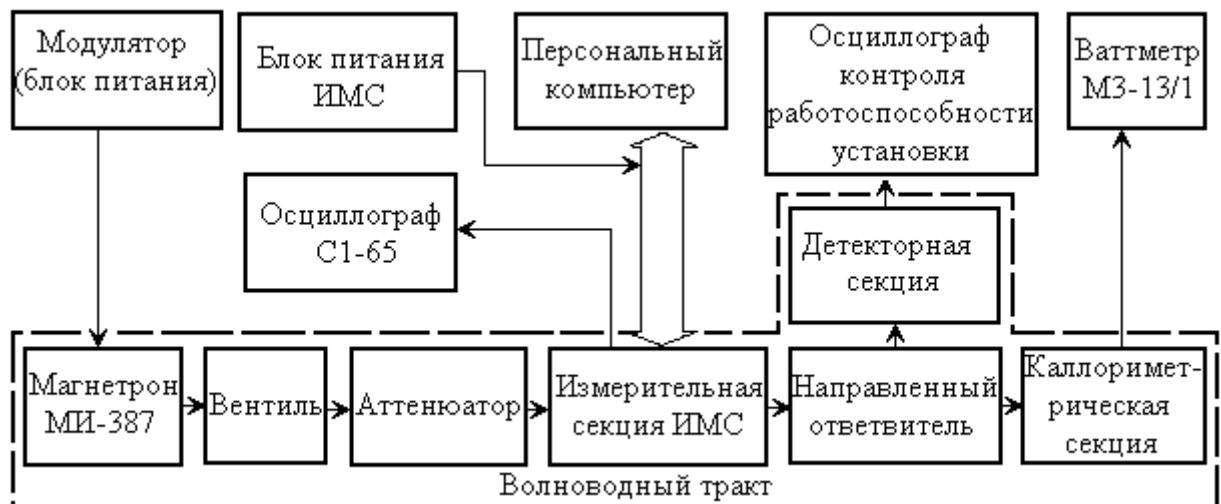


Рис. П.В.4. Структура установки тестирования функционального состояния микросхем ЦАП AD7243

**Результаты экспериментальных исследований по непосредственному воздействию ВИИЭМП на микросхемы памяти, АЦП и ЦАП**

Таблица П.В.1

**Реакция микросхемы памяти 24LC16 на воздействие ВИИЭМП**

Кол-во импульсов	Реакция ИМС/ориентация в волноводе			E <sub>m</sub> , кВ/м в импульсе
	а	б	в	
100	нет сбоев	нет сбоев	нет сбоев	0,07
10	сбои	сбои	сбои	0,15
10	сбои	сбои	сбои	1,5
10	сбои	сбои	сбои	15
10	сбои	сбои	сбои	40
10	сбои	сбои	сбои	80
10	сбои	сбои	сбои	90
10000	сбои	сбои	сбои	130

Таблица П.В.2.

**Реакция микросхемы памяти 27C256-20FA на воздействие ВИИЭМП**

Кол-во импульсов	Реакция модуля, ориентация в волноводе			E <sub>m</sub> , кВ/м в импульсе
	а	б	в	
1000	нет сбоев	нет сбоев	нет сбоев	0,05
10	нет сбоев	сбои	сбои	0,07
100	сбои	сбои	сбои	0,15
100	сбои	сбои	сбои	1,5
100	сбои	сбои	сбои	15
100	сбои	сбои	сбои	40
10	сбои	сбои, отказы	сбои, отказы	80
10	сбои	вышла из строя	вышла из строя	90
10	сбои, отказы	вышла из строя	вышла из строя	130
10000	вышла из строя	вышла из строя	вышла из строя	130



Таблица П.В.3

**Реакция частично экранированной микросхемы памяти 27C256-20FA на  
воздействие ВИИЭМП**

Кол-во импульсов (N)	Реакция микросхемы/ориентация в волноводе			E <sub>m</sub> , кВ/м в импульсе
	а	б	в	
10000	нет сбоев	сбои	сбои	0.1
10	нет сбоев	сбои	сбои	1
10	сбои	сбои	сбои	10
10	сбои	сбои	сбои	20
10	сбои	сбои	сбои	30
10	сбои	сбои	сбои	40
100	сбои	сбои	сбои	40
1000	сбои	сбои	сбои	80
100	сбои	вышел из строя	вышел из строя	95
100	сбои	вышел из строя	вышел из строя	100
10000	вышел из строя			130

Таблица П.В.4

**Реакция электронного модуля с ИМС АЦП TLC549IP на воздействие  
ВИИЭМП**

Кол-во импульсов (N)	Реакция модуля, ориентация в волноводе			E <sub>m</sub> , кВ/м в импульсе
	а	б	в	
10000	нет сбоев	нет сбоев	нет сбоев	0,1
100	нет сбоев	сбои	сбои	1
10	сбои	сбои	сбои	10
10	сбои	сбои	сбои	20
10	сбои	сбои	сбои	30
10	сбои	сбои	сбои	40
1000	сбои	сбои	сбои	80
100	сбои	сбои	сбои	100
10000	сбои	сбои	сбои	130

**Реакция электронного модуля с ИМС ЦАП AD7243 при воздействии  
ВИИЭМП**

Кол-во импульсов	Реакция модуля, ориентация в волноводе			E <sub>m</sub> , кВ/м в импульсе
	а	б	в	
10000	нет сбоев	нет сбоев	нет сбоев	0,1
100	нет сбоев	сбои	сбои	0,15
100	нет сбоев	сбои	сбои	1,5
100	сбои	сбои	сбои	15
100	сбои	сбои	сбои	40
10	сбои	сбои, отказы	сбои, отказы	80
10	сбои	вышел из строя	вышел из строя	90
100	сбои			100
1000	сбои			130
10000	сбои			130