

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.382.2/3

ЖУРАВЛЁВ  
Вадим Игоревич

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР КОНДУКТИВНЫМ МЕТОДОМ  
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ  
СИГНАЛОВ**

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – «Твёрдотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Минск, 2007

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: Алексеев Виктор Фёдорович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектронных средств учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: Абрамов Игорь Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Ефименко Сергей Афанасьевич, кандидат технических наук, начальник отдела А03 НТЦ «Белмикросистемы» УП «Завод полупроводниковых приборов»

Оппонирующая организация: Белорусский государственный университет

Защита состоится 28 июня 2007 года в 16.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П.Бровки, 6, 1 учеб. корпус, ауд. 232, тел.: 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.unibel.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований согласно перечню, утверждённому Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 17 мая 2005 г. № 512, в разделе 7.4. «Методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики».

Часть результатов диссертации получена в ходе выполнения научно-исследовательских работ «Разработать физические основы создания методов обеспечения надёжности ИС и их аппаратной реализации» в БГУИР в 1994-1996 гг. (госрегистрация № 119951338) и «Разработать методы моделирования и отжига технологических и эксплуатационных дефектов в полупроводниковых приборах и ИМС импульсным электрическим воздействием» в БГУИР в 2001-2005 гг. (госрегистрация № 2004858).

## Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является анализ тепловых отказов в полупроводниковых структурах при воздействии на них наносекундных импульсных сигналов, моделирование возникающих тепловых полей с учётом особенностей теплопереноса и разработка методики прогнозирования работоспособности структур на основе тепловых моделей. Исходя из поставленной цели, основными задачами работы являются:

- систематизация и анализ характеристик электромагнитных помех, оказывающих наибольшее влияние на работу полупроводниковых структур;
- анализ теплового механизма возникновения отказов полупроводниковых структур при воздействии наносекундных импульсных сигналов;
- разработка модели описания протекающих в объёме структуры тепловых процессов с учётом параметров электромагнитного импульса (ЭМИ) и теплофизических свойств полупроводниковой структуры (ПС);
- определение компонентов теплопереноса, которые вносят основной вклад в формирование градиентов температуры в полупроводниковой структуре при воздействии наносекундного электромагнитного импульса, и их учёт в тепловой модели;
- разработка методики прогнозирования работоспособности полупроводниковых структур при их работе в условиях воздействия наносекундных импульсных сигналов.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Модель нестационарного нагрева полупроводниковых структур при импульсном нагреве, учитывающая параболическую зависимость теплопроводности полупроводникового кристалла от температуры и обеспечивающая адекватность моделирования распределения тепловых полей в объёме кристалла при воздействии наносекундных сигналов.
2. Закономерности теплопереноса в полупроводниковых структурах при воздействии наносекундных импульсных сигналов, основанные на определении вклада компонентов теплопроводности полупроводника, позволяющие повысить адекватность теплового моделирования в диапазоне температур 293...900 К, в котором значение теплопроводности может изменяться более чем в 2 раза (1,2...2,72 Вт/(см·К)), что инициирует градиенты температуры более 90 К в локальных областях структуры.
3. Методика и данные испытаний полупроводниковых структур на работоспособность при воздействии импульсных сигналов в диапазоне длительностей  $10^{-6}$ ... $10^{-9}$  с, которые в совокупности с результатами теплового моделирования позволяют определить значения мощности и длительности импульса и параметров структур, вызывающие нарушение их работоспособности.
4. Методика прогнозирования работоспособности полупроводниковых структур при воздействии наносекундных импульсных помех, позволяющая определить время сохранения работоспособности структур в зависимости от длительности и мощности импульса и особенностей теплопереноса. Методика основана на использовании адекватных тепловых моделей, задаёт в качестве показателя надёжности полупроводниковых структур время наработки до отказа и имеет эффективность прогноза на 15...20 % выше, чем ранее предложенные методики.

## **Личный вклад соискателя**

Основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Соискателем лично выполнены: анализ параметров основных видов электромагнитных помех, оказывающих наибольшее влияние на возникновение отказов в ПС; разработка модели импульсного нагрева для топологии ПС с границей раздела областей с разной теплопроводностью; моделирование вклада компонентов теплопроводности в ПС при воздействии наносекундных импульсных сигналов; обоснование критериев отказов; статистическая обработка экспериментальных данных по тепловым пробоям в ПС; разработка методики оценки работоспособности ПС с использованием оптимальных тепловых моделей. Вклад научного руководителя доцента кафедры РЭС В.Ф. Алексеева свя-

зан с постановкой цели и задач исследования, разработкой тепловых моделей с разной конфигурацией теплового источника, анализом методики проведения эксперимента, совместным обсуждением полученных результатов. Вклад В.П. Бруцкого-Стемпковского связан с получением экспериментальных данных по определению влияния наносекундных импульсных сигналов на возникновение тепловых повреждений в ПС. В публикациях с другими соавторами вклад соискателя определяется рамками излагаемых в диссертации материалов.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались соискателем на следующих научных конференциях и симпозиумах: Международной научно-технической конференции «Направления и перспективы развития микроэлектронной базы, узлов и установок для приборостроения, систем связи и информатики» (г.Минск, 1995 г.); научной конференции БГУИР «Современные проблемы радио, электроники и связи» (г.Минск, 1995г.); XXV-ой Генеральной ассамблее Международного союза по радионаукам – URSI (г.Лилль, Франция, 1996 г.); III Военно-научной конференции Военной академии Республики Беларусь (г.Минск, 1999 г.); XXVI Генеральной Ассамблее URSI (г.Торонто, Канада, 1999 г.); Международном симпозиуме по электромагнитной совместимости «2003 IEEE International Symposium on EMC» (г.Стамбул, Турция, 2003г.); XXVIII Генеральной ассамблее URSI (г.Нью-Дели, Индия, 2005 г.); Международном симпозиуме «EMC Europe 2006» (г.Барселона, Испания, 2006 г.).

### **Опубликованность результатов диссертации**

По материалам диссертации опубликовано 34 работы, включая 7 статей в научно-технических журналах и сборниках научных работ, 13 статей в материалах конференций, 2 депонированные рукописи и 10 тезисов докладов. Общих объём публикаций по теме диссертации составляет 7,6 авторских листов.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырёх глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списков использованных источников и приложений. В первой главе рассматриваются источники образования наносекундных импульсных сигналов, тепловые пробои в полупроводниковых структурах при воздействии наносекундных ЭМИ, а также анализируются существующие тепловые модели описания возможной деградации ПС при импульсном нагреве. Во второй главе описывается разработка моделей локального перегрева ПС с разной топологией импульсного ис-

точника тепла, рассмотрено влияние компонентов теплопроводности на образование градиентов температуры и выполнен анализ результатов моделирования тепловой нестационарности в ПС при действии наносекундных импульсных сигналов. В третьей главе описан кондуктивный метод анализа тепловых отказов ПС при воздействии наносекундных импульсных сигналов, обосновывается выбор критериев отказов ПС при импульсном воздействии. В четвёртой главе показано использование расчётно-аналитического метода для нахождения соотношения «мощность импульса / наработка до отказа» из полученных экспериментальных данных для построения методики прогнозирования работоспособности ПС при воздействии ЭМИ на основе разработанных моделей. В приложениях приведены результаты промежуточных расчётов параметров предложенных тепловых моделей, тексты компьютерных программ и акты внедрения результатов диссертационной работы.

Общий объём диссертации составляет 190 страниц, включая 90 страниц текста, 65 рисунков на 34 страницах, 3 таблицы на 2 страницах, библиографический список из 270 источников на 16 страницах и 34 собственных публикаций соискателя на 3 страницах, 6 приложений объёмом 45 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** определены основные направления исследований, обоснована актуальность темы диссертаций, показана необходимость разработки методов и средств прогнозирования работоспособности полупроводниковых структур при наносекундном импульсном воздействии.

**В первой главе** обобщены сведения по наиболее распространённым электромагнитным помехам (ЭМП), являющимся источниками наносекундных импульсных сигналов, проведена их систематизация и классификация, определены основные параметры. Рассматриваются возможные пути проникновения ЭМП в радиоэлектронную аппаратуру. Приведены данные о возникающих эффектах в ПС при нахождении их в электромагнитных полях разной интенсивности. Выполнен анализ функционирования ПС при их работе в неблагоприятной электромагнитной обстановке. Проведён обзор существующих тепловых моделей отказов ПС при импульсном нагреве, указаны их достоинства и недостатки.

Обзор существующих видов ЭМП показывает, что в зависимости от типа источников излучения помехи можно разделить на два больших класса: помехи естественного происхождения и помехи искусственного происхождения. Естественные ЭМП носят непреднамеренный характер, в то время как искусственные помехи могут быть как непреднамеренными, так и организованными. Отмечается, что параметры многих ЭМП (атмосферных, промышленных, искус-

ственных) варьируются в широких пределах, но их основные характеристики идентичны. Указывается, что, несмотря на различия в параметрах, спектр реальных ЭМП можно рассматривать как последовательность одиночных и многократных ЭМИ. С позиции устойчивой работы полупроводниковых структур важны такие характеристики ЭМИ, как уровень энергии, продолжительность действия, форма импульса.

Показано, что в пределах одной РЭС на формирование неблагоприятной электромагнитной обстановки вокруг ПС оказывают сильное влияние рядом находящиеся активные элементы, а также токоведущие дорожки, влияющие на образование ЭМП. Установлено, что образующаяся при этом электромагнитная обстановка также носит импульсный характер.

Экспериментальные исследования по выявлению отклика ПС на действие наносекундных сигналов большой амплитуды указывают на значительное преобладание термического механизма в нарушении работоспособности структур. Последствия действия таких ЭМИ на ПС можно условно разделить на несколько групп в зависимости от изменения выходных характеристик прибора и наличие видимых областей повреждения. Нарушения работоспособности ПС в этих условиях могут быть как кратковременными и слабовыраженными, так и необратимыми с явными физическими повреждениями. В основном ЭМИ вызывают возникновение в полупроводниковом кристалле достаточно больших перепадов температур, что приводит к скрытым пробоям  $p-n$ -переходов, выгоранию отдельных участков подложки, обрыву металлизации, пробоем тонких слоёв диэлектриков и т.д. Показано, что большие градиенты температуры обусловлены короткой продолжительностью действия ЭМИ (менее  $10^{-6}$  с) и его энергией. Относительно небольшая устойчивость ПС к воздействию мощного ЭМИ можно объяснить малыми размерами активных элементов полупроводникового кристалла по сравнению с сопутствующими структурами ПС.

Анализ используемых моделей прогнозирования тепловых пробоев ПС при воздействии ЭМИ показывает, что в их основе лежит использование упрощённых уравнений теплового потока для источников различной конфигурации, а также решение дифференциальных уравнений теплопроводности. При этом показано, что следует учитывать границы применимости тепловых моделей: одна часть из них больше ориентирована на отказы металлизации, другая – на пробоем  $p-n$ -переходов. Однако используемые модели описания тепловой нестационарности в кристалле позволяют приближённо оценить протекающие тепловые процессы и не адаптированы для учёта характеристик воздействующих ЭМП наносекундной длительности. Показано, что для адекватного моделирования реакции ПС на действие наносекундных импульсных сигналов необходимо учитывать основные параметры падающего ЭМИ, теплофизические характеристики ПС, их температурные зависимости, а также топологию ПС.

Во второй главе приведены способы оценки уровней ЭМП, воздействующих на ПС, рассматриваются методы описания возникающей тепловой нестационарности в полупроводниковом кристалле, описывается разработка тепловой модели с учётом основных характеристик ПС и параметров ЭМИ, анализируется вклад компонентов теплопроводности ПС в общий теплоперенос.

Описание электромагнитной обстановки рассматривается с позиции наихудшего случая, т.е. когда образующийся ЭМИ имеет наибольшую величину энергии. Отмечается, что ПС поглощает только некоторую часть падающей энергии ЭМИ. Расчёт этой составляющей представляет собой сложную задачу, так как доля поглощаемой энергии зависит от многих вероятностных факторов. Приводятся оценочные выражения для расчётов поглощаемой мощности, установленные опытным путём.

Установлено, что выделение поглощённой мощности от ЭМИ происходит не равномерно по всей поверхности ПС, а наиболее восприимчивыми компонентами подложки. Эти элементы в дальнейшем рассматриваются как тепловые источники. Рассматриваются возможные краевые условия для описания процесса нагрева. Процесс распространения тепла описывается решением задачи теплопроводности с граничными условиями второго рода, т.е. когда для каждой точки поверхности кристалла в любой момент времени задаётся закон изменения плотности теплового потока.

Для упрощения расчётов выдвигаются следующие условия: распространение тепла в многослойной системе определяется его распределением в слое, имеющем наибольшую площадь; при общем решении уравнения теплопроводности теплофизические параметры полупроводника считаются постоянными величинами. В частных случаях решения коэффициент теплопроводности рассматривается как функция от температуры.

Рассматриваются несколько конфигураций ПС и соответствующие им модели. Для определения локального перегрева в области  $p-n$ -перехода приводится модель с границей раздела (рисунок 1). Показано, что участок ПС с  $p-n$ -переходом целесообразно представить как систему из двух полуограниченных тел с идеальным тепловым контактом и равномерным начальным распределением температуры  $T_0$ . В начальный момент времени  $\tau = 0$  на границе контакта ( $z = 0$ ) действует импульсный источник тепла, ограниченный сферой радиуса  $r_0$  и удельной плотностью теплового потока  $q(\tau)$ . Далее определяется температура перегрева  $\theta$  в области, ограниченной цилиндром радиусом  $r_0$  с высотой по оси  $z$ , где в соответствии с законом теплопроводности вероятно наибольшее изменение избыточной температуры. Система дифференциальных уравнений для рассматриваемого процесса имеет вид



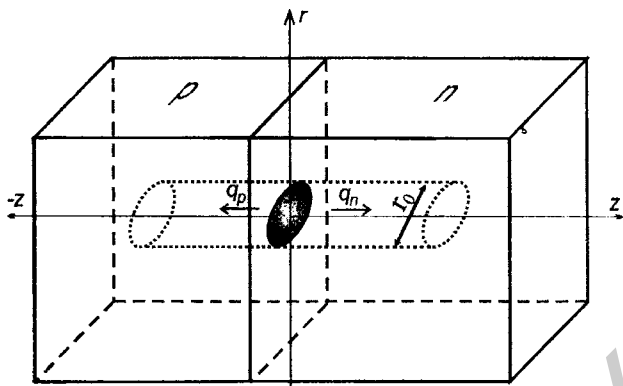


Рисунок 1 – Топологическая модель полупроводниковой структуры с границей раздела областей проводимости  $p$ - $n$ -перехода

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial \theta_n(r, z, \tau)}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 \theta_n(r, z, \tau)}{\partial z^2} &= \frac{1}{a_n} \frac{\partial \theta_n(r, z, \tau)}{\partial \tau}, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial \theta_p(r, z, \tau)}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 \theta_p(r, z, \tau)}{\partial z^2} &= \frac{1}{a_p} \frac{\partial \theta_p(r, z, \tau)}{\partial \tau}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $a_{n,p}$  – коэффициент температуропроводности соответствующих областей.

Решение системы (1) осуществляется последовательными бесконечными преобразованиями Фурье, Лапласа и Ханкеля. Показано, что для ЭМИ прямоугольной формы распределения мощности  $P$  закон изменения градиента температуры на оси  $z \geq 0$  в любой момент времени  $\tau > 0$  можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \theta(r, z, \tau) &= \left[ \frac{Pr_0}{K_n + K_p} (M_{1,0}^0(r, r_0) - 1) + \frac{P\sqrt{(a_n + a_p)\tau}}{2(K_n + K_p)} \left( \frac{1}{\sqrt{\pi}} - \text{ierfc}\left(\frac{2r_0}{\sqrt{(a_n + a_p)\tau}}\right) \right) \right. \\ &+ \left. \frac{Pr_0}{K_n + K_p} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m+1}}{(2m+1)m!} \left( \frac{r^2}{2(a_n + a_p)\tau} \right)^m \frac{2r_0}{\sqrt{(a_n + a_p)\tau}} {}_2F_2 \right] + \\ &+ \left[ \frac{Pr_0\sqrt{a_n + a_p}}{2(K_n + K_p)} (M_{1,0}^0(z, r_0) - 1) + \frac{P\sqrt{a_n + a_p}}{2\sqrt{\pi}(K_n + K_p)} \int_0^{\tau} \exp\left(-\frac{z^2}{2(a_n + a_p)\tau}\right) \times \right. \\ &\left. \times \left( 1 - \exp\left(-\frac{r_0^2}{2(a_n + a_p)\tau}\right) \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}} \right) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $K_{n,p}$  – теплопроводность соответствующих областей;

$M_{1,0}^0$  –  $2/\pi$ -ряд связанный полный эллиптический интеграл второго рода;

${}_2F_2$  – гипергеометрическая функция Гаусса;

$r_0$  – размер дефектной области.

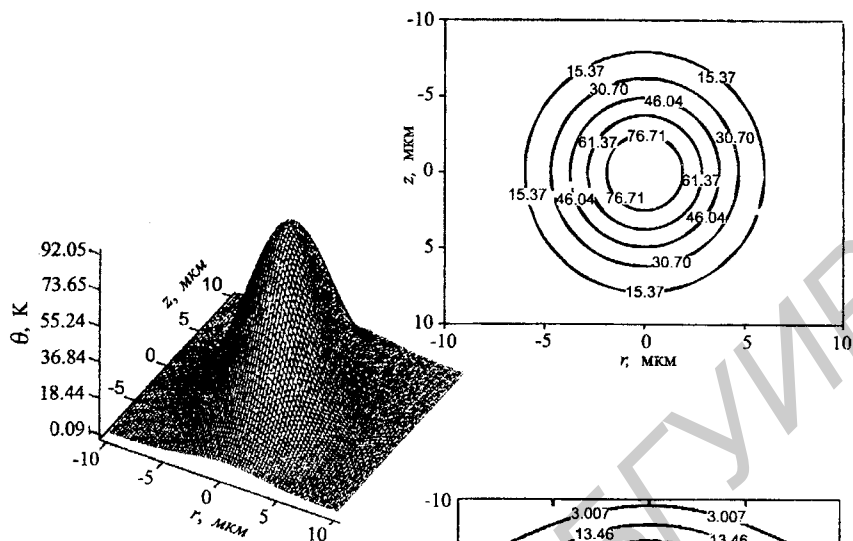
Аналогичные выражения получены также для других топологий ПС.

На основании анализа (2) показано, что даже небольшое различие в величинах теплопроводности  $p$ - и  $n$ -областей оказывает существенное влияние на формирование нестационарных температур.

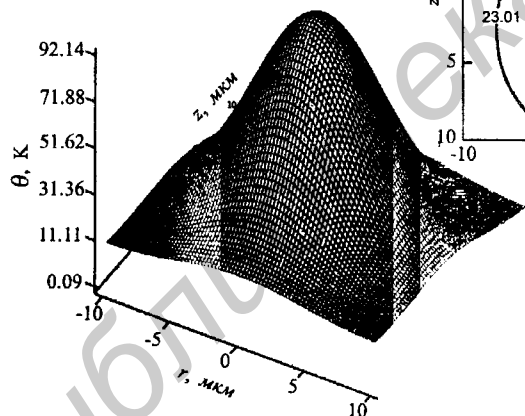
Точное определение значения коэффициента теплопроводности затрудняется наличием многих её составляющих, а также сильной зависимостью от температуры. Отмечается, что, несмотря на относительно большое количество компонентов теплопроводности, в конкретной ПС при воздействии наносекундных импульсных помех, как правило, доминирует один или два типа теплопроводности. Показано, что фотонный теплоперенос при воздействии ЭМИ наносекундной длительности становится доминирующим в области температуры Дебая и возможность проявления тепловых градиентов при дальнейшем нагреве определяется именно изменением фотонной теплопроводности в объёме кристалла ПС. Анализ результатов моделирования с учётом изменения теплопроводности полупроводника при нагреве позволил определить наиболее вероятные значения градиента температуры в заданной области ПС. Установлено, что наибольшие перепады температуры между соседними областями ПС появляются при переходе фононного теплопереноса в фотонный, т.е. когда значение теплопроводности минимально. Вследствие этого тепловая энергия не успевает рассеяться в объёме кристалла и различие в нагреве смежных областей становится максимальным. Принимая во внимание различие в теплопроводности  $p$ - и  $n$ -областей при наличии ЭМП, согласно полученным формулам, определено более точное значение теплового градиента (рисунок 2). По результатам моделирования нагрева установлено, что возникновение тепловых пробоев  $p$ - $n$ -переходов при воздействии наносекундных импульсных сигналов возможно за меньшее время, чем при моделировании, в котором не учитывается зависимость теплопроводности полупроводникового кристалла от температуры.

В третьей главе обосновывается использование кондуктивного метода испытания ПС на восприимчивость к воздействию наносекундных импульсных помех, описываются основные характеристики тестовых структур и предлагаются их критерии отказов. Выполнен анализ экспериментальных данных, определены основные параметры ЭМИ и ПС, влияющие на нарушение работоспособности ПС.

В экспериментальных исследованиях использовались ПС, размещённые на двух тестовых подложках, каждая из которых содержала 120 биполярных транзисторов одинаковой топологии. При рассмотрении выбора критерия отказа учитывалось то, что главной причиной необратимых отказов биполярных ПС в условиях воздействия мощных ЭМИ является тепловой пробой. Показано,



a)



б)

a) – без учёта  $K_n \neq K_p = f(T)$ ; б) – с учётом  $K_n \neq K_p = f(T)$

**Рисунок 2 – Расчётное распределение градиента температуры в области p-n-перехода после воздействия серии ЭМИ длительностью  $\tau = 10$  нс**

что в качестве критерия отказа ПС вследствие действия ЭМИ целесообразно использовать момент времени резкого увеличения протекающего через ПС тока, а соответственно и рассеиваемой мощности. Данный критерий соответствует стандартам IEC61000-4-4 и IEC61000-4-5.

Из 120 испытанных ПС у 109 (т.е. > 90%) выполнялся критерий отказа, у остальных существенного роста рассеиваемой мощности при воздействии импульса не фиксировалось. На структуры второй подложки подавались многократные импульсы с длительностью серии импульсов 15 мс. Критерий отказа выполнялся для 111 транзисторов. Для подтверждения факта воспроизводимости результатов эксперимента были использованы три выборки объёма данных.

Показано, что вид полученных ВАХ ПС можно разделить на две группы. ВАХ первой группы нелинейны, но сильно видоизменены и свидетельствуют о повреждении перехода и сильной потере его выпрямительных свойств. ВАХ второй группы практически линейны, протекающий через структуру ток слабо зависит от приложенного напряжения. Установлено, что это может быть обусловлено плавлением  $p-n$ -перехода или коротким замыканием между дорожками металлизации. ВАХ второй группы наблюдались в основном для ПС второй подложки при воздействии пачки импульсов, суммарная мощность которых недостаточна для полного плавления  $p-n$ -перехода. Доказано, что в данном диапазоне длительностей при однократном импульсе наиболее вероятен тепловой пробой  $p-n$ -перехода, а при серии импульсов – разрушение металлизации.

Экспериментальными данными подтверждено, что имеется два основных параметра, которые оказывают прямое влияние на возникновение отказов в ПС при действии на них наносекундных импульсных помех:

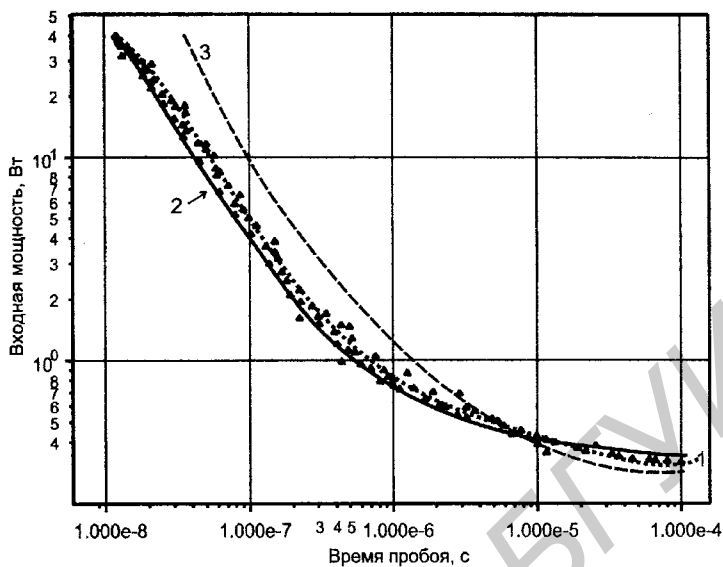
1. Энергия ЭМИ. С увеличением энергии импульса, действующего на ПС, вероятность нарушения работоспособности ПС увеличивается.

2. Длительность ЭМИ. Опасность повреждения ПС возникает уже при ЭМИ длительностью менее  $10^{-6}$  с.

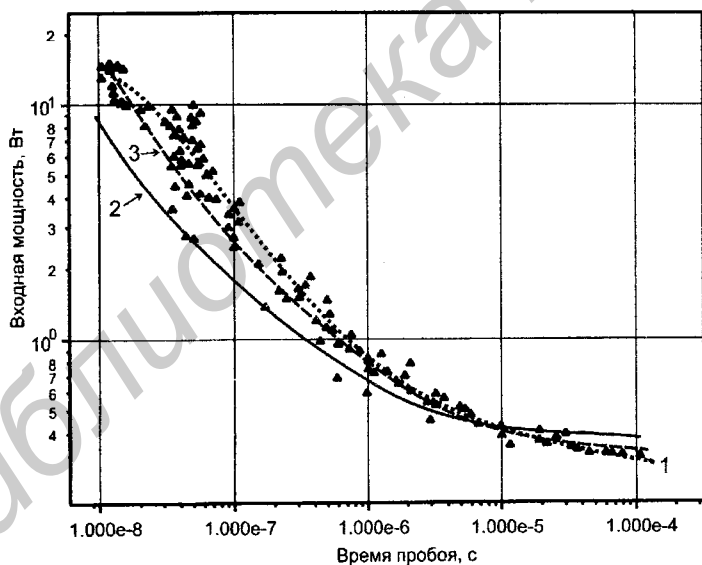
Влияние этих факторов на отказы ПС не является одинаковым и зависит от конкретных условий эксплуатации.

В качестве основной характеристики надёжности ПС при воздействии наносекундных ЭМИ предлагается использовать время сохранения работоспособности. Оно представляет собой временной интервал, начало которого совпадает с начальным моментом действия импульса, а конец является моментом времени начала пробоя. Показано, что для прогнозирования возможного отказа ПС при импульсном нагреве удобно использовать соотношение «рассеиваемая мощность / время пробоя»  $P_f/\tau$ . Это соотношение показывает предельное время сохранения работоспособности ПС при заданной поглощённой мощности. Для модели с границей раздела (см. рисунок 1) это соотношение имеет вид

$$P_f = \theta \frac{r_0 + 4\sqrt{\pi} (K_n + K_p)^2 - \operatorname{ierfc}\left(\frac{16r_0}{\sqrt{a}}\right) {}_2F_2 - 1}{2\sqrt{\pi} (K_n + K_p) \exp\left(\frac{r_0^2}{2a\tau}\right)} \quad (3)$$



а)



б)

1 – расчёт по полученной регрессионной модели; 2 – расчёт по модели с границей раздела; 3 – расчёт по модели кругового импульсного источника на поверхности ПС

**Рисунок 3 – Соответствие полученных моделей экспериментальным данным по отказам ПС для одиночного импульса (а) и для многократных импульсов (б)**

Далее определялось, какая именно топология разработанной модели наилучшим образом соответствует полученным экспериментальным данным отказов ПС при нагреве под действием ЭМИ. С этой целью были построены регрессионные модели, с которыми сравниваются результаты теплового моделирования. Для оценки соответствия результатов теплового моделирования построенной регрессии использовался коэффициент детерминации  $R^2$ . Анализ статистических данных по отказам ПС при действии одиночного импульса показал, что наибольший коэффициент детерминации имеет модель с границей раздела ( $R^2 \approx 0,89$ ), а при действии многократных импульсов – модель с поверхностным источником (рисунок 3). При этом были определены оптимальные значения параметров моделей ( $r_0$  и критической температуры  $T_{кр}$ ), при которых коэффициент детерминации максимален.

Для общего анализа работоспособности ПС при воздействии наносекундных импульсных сигналов большой мощности предложена следующая методика на основе тепловых моделей, которая включает в себя следующие этапы:

1. Определяется тип ПС и её эксплуатационные характеристики.
2. Задаются требования по электромагнитной совместимости.
3. Выбирается модель, которая наиболее соответствует возможной топологии области ПС возникновения дефекта. Определяются составляющие теплопроводности, которые могут вносить наибольший вклад в теплоперенос. Рассчитываются возникающие тепловые поля при воздействии ЭМИ с учётом возможного собственного нагрева ПС при эксплуатации и механизма теплопроводности.
4. Проводится анализ работоспособности ПС при наличии возможной тепловой нестационарности. Исходя из тепловых зависимостей характеристик ПС, оценивается возможная нестабильность параметров ПС для рассчитанных иницируемых температур.
5. Проводятся испытания кондуктивным методом ограниченной выборки ПС на восприимчивость к импульсным сигналам с заданными характеристиками.
6. Проверяется адекватность тепловой модели путём сравнения величины коэффициента детерминации с допустимым значением и анализа остатков.
7. С помощью выбранной тепловой модели с оптимизированными параметрами рассчитывается время сохранения работоспособности структуры (наработка до отказа) при максимально допустимой рассеиваемой мощности. Определяется рабочая область сохранения работоспособности ПС при заданных требованиях по электромагнитной совместимости.

**В заключении** приведены общие выводы по результатам диссертационной работы.

В приложениях приведены расчётные оценки характеристик наиболее вероятных наносекундных ЭМП, включая ЭМИ сложной формы, результаты расчётов максимальных температур и распределения тепловых полей в ПС различной топологии, полученные экспериментальные данные по отказам тестовых структур кондуктивным методом и их статистическая обработка, информация о построенных регрессионных моделях, а также сравнительный анализ адекватности разработанных тепловых моделей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Выполнен анализ экспериментальных данных по отказам полупроводниковых структур при работе в сложной электромагнитной обстановке. Рассмотрены механизмы протекающих при этом процессов отказов, особенности реакции полупроводниковых структур на действие электромагнитных импульсов. Показано, что при воздействии мощного электромагнитного импульса наносекундной длительности наиболее вероятны отказы вследствие перегрева локальных участков полупроводниковой структуры. Определено, что полупроводниковая структура поглощает только часть падающей энергии импульса, которая составляет 0,01...10 % падающей энергии внешнего импульса и зависит от длительности импульса и размеров полупроводниковой структуры [8, 9, 24, 25–27, 30–32].

2. Разработана модель распределения теплоты в полупроводниковой структуре, основанная на дифференциальном описании тепловой нестационарности с учётом параболической зависимости теплопроводности кристалла от температуры, что позволяет определить распределение градиентов температуры в объёме кристалла в зависимости от топологии структуры. Показано, что наибольшая неоднородность распределения температуры в объёме кристалла возникает в начальный момент действия импульса длительностью менее  $10^{-6}$  с [6, 13, 14, 18, 29, 33, 34].

3. Выполнен анализ теплопроводности полупроводниковой структуры в условиях воздействия наносекундных импульсных сигналов. Впервые установлено, что в зависимости от условий окружающей полупроводниковую структуру электромагнитной обстановки наибольший вклад в теплоперенос в диапазоне температур 293...900 К вносят фононный, фотонный и электронный компоненты теплопроводности. Определено, что изменение теплопроводности полупроводниковой структуры в данных условиях имеет параболический характер и может изменяться более чем в 2 раза ( $1,2...2,72$  Вт/(см·К)), что обуславливает градиенты температуры более 90 К в локальных областях структуры [11, 19, 21, 23].

4. Предложено использование кондуктивного метода испытаний для экспериментального исследования тепловых отказов полупроводниковых структур при воздействии наносекундных импульсных сигналов, позволяющее определить параметры модели для прогнозирования работоспособности полупроводниковых структур. Определено влияние мощности и длительности воздействия импульсов на возникновение отказов в полупроводниковых структурах и характер их повреждения. Показано, что при воздействии однократного импульса длительностью  $10^{-6} \dots 10^{-9}$  с наиболее вероятен тепловой пробой  $p-n$ -перехода, а при серии импульсов – плавление и разрушение металлизации. Это необходимо учитывать при выборе тепловой модели и применении методики прогнозирования работоспособности полупроводниковых структур [4, 15–17].

5. Разработана методика определения области сохранения работоспособности полупроводниковых структур при воздействии наносекундных импульсных сигналов, основанная на применении наиболее адекватной модели с оптимизированными параметрами. Показано, что проверку адекватности разработанных моделей лучше проводить на основе объединённого метода определения надёжности полупроводниковых структур, когда физическая (тепловая) модель сравнивается с расчётными (статистическими) данными обработки экспериментальных результатов. При этом в качестве показателя надёжности предложено использовать время сохранения работоспособности (наработки до отказа) структуры из соотношения «мощность импульса / время до отказа». Показано, что данная методика имеет эффективность прогноза на 15...20 % выше, чем ранее предложенные методики, и позволяет определить область сохранения работоспособности полупроводниковых структур при воздействии электромагнитных импульсов длительностью  $10^{-6} \dots 10^{-9}$  с. Выполнен также анализ комплексного подхода по снижению восприимчивости полупроводниковых структур к воздействию наносекундных импульсных сигналов путём уменьшения возможных перегревов локальных областей структуры [2, 3, 12, 20, 22, 28].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Для прогнозирования отказов полупроводниковых структур при воздействии наносекундных импульсных сигналов предложено использовать параметр времени сохранения работоспособности структуры из соотношения «мощность импульса / время до отказа», полученного из модели возникновения отказов с учётом теплового механизма деградации. Обосновано применение понятия размера дефекта как постоянной величины для упрощения нахождения соотношения «мощность импульса / время до отказа» [5, 20, 22].

2. Разработана модель импульсного нагрева с круговым источником на поверхности полуограниченного тела и сферическим источником на границе двух тел с различной теплопроводностью, что позволяет оценить локальный перегрев



для полупроводниковых структур наиболее распространённой топологии и определить значение рассеиваемой мощности при заданной длительности импульса [7, 28].

3. Разработана методика оценки теплопереноса в полупроводниковых структурах при воздействии наносекундных импульсных сигналов, которая впервые учитывает зависимость теплопроводности полупроводника от температуры, что в сравнении с расчётами при постоянном значении теплопроводности показывает наилучшее согласование результатов теплового моделирования и экспериментальных данных при длительности импульса менее  $10^{-6}$  с. При этом учёт влияния электромагнитного поля позволяет повысить адекватность используемой тепловой модели (коэффициент детерминации равен соответственно  $R^2 \approx 91,9$  и  $R^2 \approx 88,2$ ) [1, 12, 13, 22].

4. Предложено использовать полученные модели описания тепловой нестационарности для прогнозирования пробоев полупроводниковых структур при воздействии на них электромагнитных помех с длительностью импульса  $10^{-6} \dots 10^{-9}$  с на основе нахождения наиболее адекватной модели разогрева полупроводниковой структуры. Рассмотренные модели могут также найти применение для нахождения верхней границы доверительного интервала области сохранения работоспособности полупроводниковых структур при импульсном нагреве и оптимизации топологии разрабатываемых структур с целью уменьшения их восприимчивости к действию наносекундных импульсных сигналов [2, 6, 10, 20].

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### Статьи

1. Журавлёв, В.И. Импульсный нагрев полупроводниковых интегральных схем внешними электромагнитными помехами / В.И. Журавлёв, В.Ф. Алексеев // Петербургский журнал электроники. – 1999. – № 3. – С. 67–72.

2. Журавлёв, В.И. Прогнозирование электромагнитной устойчивости полупроводниковых схем на этапе проектирования / В.И. Журавлёв // Известия Белорусской инженерной академии. – 1999. – № 1(7)/2. – С. 150–152.

3. Журавлёв, В.И. Оценка устойчивости полупроводниковых приборов при воздействии мощных электромагнитных импульсов / В.И. Журавлёв, В.Ф. Алексеев, В.П. Бруцкий-Стемпковский // Радиотехника и электроника: Респ. межвед. сб. науч. тр. БГУИР. – Минск, 1999. – Вып. 24. – С. 114–117.

4. Бруцкий-Стемпковский, В.П. Анализ методов испытаний устойчивости контактов ИС к воздействию дестабилизирующих факторов / В.П. Бруцкий-Стемпковский, В.Ф. Алексеев, В.И. Журавлёв // Радиотехника и электроника: Респ. межвед. сб. науч. тр. БГУИР. – Минск, 1999. – Вып. 24. – С. 180–183.

5. Алексеев, В.Ф. Тепловые модели отказов полупроводниковых структур при воздействии мощных электромагнитных импульсов / В.Ф. Алексеев, В.И. Журавлёв // Доклады БГУИР. – 2005. – № 3-4. – С. 65–72.
6. Алексеев, В.Ф. Определение температуры р–п-перехода вследствие импульсного нагрева и его программная реализация / В.Ф. Алексеев, В.И. Журавлёв // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. – 2005. – № 4. – С. 76–80.
7. Alexeev, V.F. Modeling of non-stationary heating of semiconductor structures under HEMP actions with short pulse duration / V.F. Alexeev and V.I. Zhuravliov // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. – 2006. – Vol. 6, № 3. – P. 595–601.

### Материалы конференций

8. Zhuravliov, V.I. Integrated circuit stability against external electromagnetic actions / V.I. Zhuravliov // 18<sup>th</sup> International Scientific Symposium of students and young scientists. – Zielona Góra, Poland, 1996. – P. 88–91.
9. Zhuravliov, V.I. The semiconductor component failures of transport electronic systems under electromagnetic actions / V.I. Zhuravliov // 3-rd European Conference of Science Workers in Transport and Telecommunications. – Žilina, Slovak Republic, 1999. – Section 3. – P. 61–64.
10. Журавлёв, В.И. Повышение электромагнитной устойчивости полупроводниковых структур оптимизацией их теплового режима / В.И. Журавлёв, В.Ф. Алексеев, В.П. Бруцкий-Стемпковский // Известия Белорусской инженерной академии. – 2000. – №1(9)/2. – С. 158–160.
11. Zhuravliov, V.I. Thermal conductivity influence on failures of semiconductor ICs under powerful EMP action / V.I. Zhuravliov, V.F. Alexeev // The 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility: Symposium Record – Istanbul, Turkey, 2003. – Vol.2. – P. 1040–1042.
12. Алексеев, В.Ф. Теплоперенос в многослойной системе при импульсном нагреве / В.Ф. Алексеев, В.И. Журавлёв // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – № 1(17)/1. – С. 21–24.
13. Журавлёв, В.И. Различия 2D- и 3D-моделировании тепловой нестационарности в полупроводниковых структурах при импульсном нагреве / В.И. Журавлёв // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – № 1(17)/1. – С. 72–75.
14. Алексеев, В.Ф. Оценка импульсного локального перегрева в МОП-транзисторе / В.Ф. Алексеев, В.И. Журавлёв // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – № 1(17)/2. – С. 68–70.
15. Алексеев, В.Ф. Использование кондуктивной схемы испытаний реакции полупроводниковых приборов на внешний ЭМИ / В.Ф. Алексеев, В.И. Журавлёв, В.П. Бруцкий-Стемпковский // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – № 1(19)/1. – С. 28–31.

16. Журавлёв, В.И. Подбор имитаторов для испытаний полупроводниковых структур на восприимчивость к ЭМИ / В.И. Журавлёв // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – № 1(19)/1. – С. 48–51.

17. Журавлёв, В.И. Определение критериев отказов полупроводниковых структур при импульсном нагреве // В.И. Журавлёв // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – № 1(19)/2. – С. 56–58.

18. Журавлёв, В.И. О выборе краевых условий для решения задачи теплопроводности реакции рп-перехода на действие ЭМИ / В.И. Журавлёв // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – № 4(20)/4. – С. 44–47.

19. Zhuravliov, V.I. Thermal transfer in integrated circuits at HF-electromagnetic field presence and its influence on breakdown possibility / V.I. Zhuravliov, V.F. Alexeev // XXVIII General Assembly of the URSI. – New-Delhi, India, 2005. – EP.38. COM5-0065-2005. ISBN 81-7764-928-0. – 4 p.

20. Журавлёв, В.И. Методика оценки работоспособности ПС к воздействию электромагнитных помех на основе теплового моделирования / В.И. Журавлёв, В.Ф. Алексеев // Инженерный вестник. – 2006. – № 1(21)/4. – С. 44–48.

21. Журавлёв, В.И. Взаимное влияние электронной и фотонной теплопроводности на градиенты температуры в ИС при воздействии наносекундных импульсных помех / В.И. Журавлёв, В.Ф. Алексеев // Инженерный вестник. – 2006. – № 1(21)/5. – С. 67–73.

22. Zhuravliov, V.I. Adequacy checkout of thermal models for degradation prediction of integrated circuits at HEMP action / V.I. Zhuravliov, V.F. Alexeev // EMC Europe 2006: International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Barcelona, Spain, 2006. – P. 221–223.

### **Депонированные рукописи**

23. Журавлёв, В.И. Теплоперенос в полупроводниках при внешнем электромагнитном воздействии / В.И. Журавлёв, В.Ф. Алексеев; Белгосунiversитет информатики и радиоэлектроники. – Мн., 1999. – 15 с. – Деп. в БелИСА 13.07.1999, № 199979.

24. Журавлёв, В.И. Особенности реакции полупроводниковых структур при воздействии мощных электромагнитных помех / В.И. Журавлёв; Белгосунiversитет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2001. – 20 с. – Деп. в БелИСА 06.08.2001, № 200151.

### **Тезисы докладов научных конференций**

25. Журавлёв, В.И. Деградация полупроводниковых структур при действии ЭМИ / В.И. Журавлёв, А.А. Подгорный, Д.И. Бакунчик // Направления и перспективы развития микроэлектронной базы, узлов и установок для приборостроения, систем связи и информатики: материалы науч.-техн. конф. / Белорус. науч.-промышл. ассоциация. – Минск, 1995. – С. 33–34.

26. Журавлёв, В.И. Исследование реакции р-п-переходов ИС на действие ЭМИ / В.И. Журавлёв, В.Ф. Алексеев // Направления и перспективы развития микроэлектронной базы, узлов и установок для приборостроения, систем связи и информатики: материалы науч.-техн. конф. / Белорус. науч.-промышл. ассоциация. – Минск, 1995. – С. 64–65.

27. Журавлёв, В.И. Полупроводниковые структуры в мощных электромагнитных полях / В.И. Журавлёв // Современные проблемы радио, электроники и связи: материалы науч. конф. БГУИР. – Минск, 1995. – С. 229.

28. Zhuravliov, V.I. Influence of electromagnetic impulses on degradation of ICs / V.I. Zhuravliov and V.F. Alexeev // XXV General Assembly of the URSI – Lille, France, 1996. – P. 258.

29. Журавлёв, В.И. Тепловая нестационарность в полупроводниках, вызванная внешними электромагнитными помехами / В.И. Журавлёв // Радиозлектроника и электротехника в народном хозяйстве: тез. докл. науч.-техн. конф. МЭИ. – М., 1998. – Т. 1. – С. 156–157.

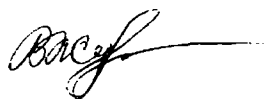
30. Журавлёв, В.И. Дegradaция полупроводниковых схем вследствие импульсных электромагнитных помех / В.И. Журавлёв // Радиозлектроника и электротехника в народном хозяйстве: тез. докл. науч.-техн. конф. МЭИ. – М., 1998. – Т. 1. – с.157–158.

31. Журавлёв, В.И. Отказы полупроводниковых компонентов вследствие направленного электромагнитного воздействия / В.И. Журавлёв, В.Ф. Алексеев // III Военно-научная конференция Военной академии Республики Беларусь, 1999. – С. 45–48.

32. Zhuravliov, V.I. Failures of integrated circuits due to external EMI action through PCB / V.I. Zhuravliov and V.F. Alexeev // XXVI General Assembly of the URSI. – Toronto, Canada, 1999. – P. 315.

33. Zhuravliov, V.I. Thermal transient in ICs due to NEMP action of nanosecond duration / V.I. Zhuravliov, V.F. Alexeev // EuroElectromagnetics: International Scientific Conference. – Edinburgh, UK, 2000. – P. 69.

34. Журавлёв, В.И. Моделирование тепловых эффектов в полупроводниковых структурах введением условного теплового источника / В.И. Журавлёв, В.Ф. Алексеев // Проблемы проектирования и производства РЭС: тез. докл. науч.-техн. конф. – Новополоцк, 2002. – Т. 2. – С. 56–59.



Жураўлёў Вадзім Ігаравіч

**Прагназаванне працаздольнасці паўправадніковых структур кандуктыўным метадам пад уздзеяннем наносекундных імпульсных сігналаў**

**Ключавыя словы:** наносекундныя імпульсныя сігналы, электрамагнітны імпульс, паўправадніковая структура, працаздольнасць, цеплавое мадэліраванне, прагназаванне.

Мэтай дысертацыйнай працы з'яўляецца аналіз цеплавых адмоў у паўправадніковых структурах пад уздзеяннем на іх наносекундных імпульсных сігналаў, мадэліраванне ўзнікаючых цеплавых палёў з улікам асаблівасцеў цеплапераносу і распрацоўка метадыкі прагназавання працаздольнасці структур на аснове цеплавых мадэлей.

Распрацавана феноменалагічная мадэль размеркавання цеплаты ў паўправадніковых структурах, заснаваная на дыферэнцыяльным апісанні цеплавой нестацыянарнасці з улікам парабалічнай залежнасці цеплаправоднасці крышталя з рознай канфігурацыяй цеплавой крыніцы. Рэзультаты мадэліравання дазваляюць вызначыць размеркаванне цеплавых палёў у аб'ёме крышталя ў залежнасці ад тапалогіі паўправадніковай структуры і параметраў дзеючага электрамагнітнага імпульсу. Устаноўлены кампаненты цеплаправоднасці паўправадніковай структуры, якія ў залежнасці ад умоў электрамагнітных абставін і параметраў структуры ўносяць найбольшы ўклад ва ўзнікненне градыентаў тэмпературы ў крышталі. Эксперыментальна даследаваны кандуктыўным метадам цеплавых адмовы паўправадніковых структур пад уздзеяннем моцных электрамагнітных імпульсаў наносекунднай працягласці, якія дазваляюць удакладніць параметры цепловых мадэлей.

Распрацавана метадыка вызначэння вобласці захавання працаздольнасці паўправадніковых структур пад уздзеяннем наносекундных імпульсных сігналаў, заснаваная на прымяненні найбольш адэкватнай цеплавой мадэлі з аптымізаванымі параметрамі. Пры гэтым у якасці паказчыка надзейнасці выкарыстоўваецца час захавання працаздольнасці (напрацоўкі да адмовы) ад суадносін «магутнасць імпульсу / час да адмовы». Прапанаваны комплексны падыход па зніжэнні ўспрымальнасці паўправадніковых структур да ўздзеяння наносекундных імпульсных сігналаў шляхам памяншэння магчымых перагрэваў ў крышталі.

Рэзультаты працы могуць быць выкарыстаны для ацэнкі вобласці захавання працаздольнасці паўправадніковых структур пад уздзеяннем на іх электрамагнітных перашкод, а таксама для зніжэння электрамагнітнай ўспрымальнасці паўправадніковых структур на этапе іх праектавання.

Журавлёв Вадим Игоревич

**Прогнозирование работоспособности полупроводниковых структур  
кондуктивным методом при воздействии наносекундных импульсных  
сигналов**

*Ключевые слова:* наносекундные импульсные сигналы, электромагнитный импульс, полупроводниковая структура, работоспособность, тепловое моделирование, прогнозирование.

Целью диссертационной работы является анализ тепловых отказов в полупроводниковых структурах при воздействии на них наносекундных импульсных сигналов, моделирование возникающих тепловых полей с учётом особенностей теплопереноса и разработка методики прогнозирования работоспособности структур на основе тепловых моделей.

Разработана феноменологическая модель распределения теплоты в полупроводниковых структурах, основанная на дифференциальном описании тепловой нестационарности с учётом параболической зависимости теплопроводности кристалла от температуры с различной конфигурацией теплового источника. Результаты моделирования позволяют определить распределение тепловых полей в объёме кристалла в зависимости от топологии полупроводниковой структуры и параметров воздействующего электромагнитного импульса. Установлены компоненты теплопроводности полупроводниковой структуры, которые в зависимости от условий электромагнитной обстановки и параметров структуры вносят наибольший вклад в возникновение градиентов температуры в кристалле. Экспериментально исследованы кондуктивным методом тепловые отказы полупроводниковых структур при воздействии электромагнитных импульсов наносекундной длительности, позволяющие уточнить параметры тепловых моделей.

Разработана методика определения области сохранения работоспособности полупроводниковых структур при воздействии наносекундных импульсных сигналов, основанная на применении наиболее адекватной модели с оптимизированными параметрами. При этом в качестве показателя надёжности используется время сохранения работоспособности (наработки до отказа) из соотношения «мощность импульса / время до отказа». Предложен комплексный подход по снижению восприимчивости полупроводниковых структур к воздействию наносекундных импульсных сигналов путём уменьшения возможных перегревов в кристалле.

Результаты работы могут быть использованы для оценки области сохранения работоспособности полупроводниковых структур при воздействии на них электромагнитных помех, а также для снижения электромагнитной восприимчивости полупроводниковых структур на этапе их проектирования.

## SUMMARY

Vadim I. Zhuravliov

### **Prediction of up state of semiconductor structures by conduction method under action of nanosecond pulse signals**

**Keywords:** nanosecond pulse signals, electromagnetic pulse, semiconductor structure, up state, thermal modeling, prediction.

The purpose of dissertation is an analysis of thermal breakdowns in semiconductor structures at action of nanosecond pulse signals, modeling of initiated thermal fields with taking into account of thermal transfer features and of prediction technique creation of up state of structures on the basis of thermal modeling.

The phenomenological model of heat distribution in semiconductor structures based on the thermal transient differential description in view of parabolic dependence of crystal thermal conductivity on temperature with various topology of a thermal source is created. Modeling results allow to define an allocation of thermal fields in volume of a crystal depending on topology of semiconductor structure and affecting electromagnetic pulse parameters. Semiconductor structure thermal conductivity components which bring the greatest contribution to crystal temperature gradient origination in depending on an electromagnetic environment conditions and structure parameters are established. Thermal failures in semiconductor structures under action of powerful electromagnetic pulses with nanosecond duration allowing to improve parameters of thermal models are observationally explored by conduction method.

The technique of definition of semiconductor structure up state maintenance area at action of nanosecond pulse signals based up on application of the most adequate model with the optimized parameters is designed. Thus the time of up state maintenance (operating time to failure) of the ratio "input power / failure time" is offered to use as reliability measure. The complex approach to decrease of semiconductor structure susceptibility against electromagnetic pulse action by decreasing of possible overheatings in a crystal is offered.

Results of the dissertation can be used to estimate an semiconductor structure up state maintenance area under action of pulse nanosecond signals and also to decrease of semiconductor structure electromagnetic susceptibility at stage of their designing.

Научное издание

ЖУРАВЛЁВ  
Вадим Игоревич

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР КОНДУКТИВНЫМ МЕТОДОМ  
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – «Твёрдотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»

---

Подписано в печать	18.05.2007.	Формат 60x84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.		Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.		Заказ 352.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.  
220013, Минск, П. Бровка, 6.