

УДК 621.3.049.77

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТОКОВЕДУЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

Г.А. ПИСКУН, В.Ф. АЛЕКСЕЕВ, В.Л. ЛАНИН, В.Г. ЛЕВИН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 2 декабря 2013

Экспериментально исследован принцип распространения тепловых полей в интегральных микросхемах в результате воздействия электростатических разрядов. Предложена численная модель распределения температуры в токоведущих элементах интегральных микросхем вследствие контактного воздействия разряда статического электричества, основанная на электропроводности и Фурье-анализе их теплопроводности. Разработанная модель позволяет выявить зависимость температуры от напряжения разряда и определить наиболее уязвимую токопроводящую область за счет обнаружения локальных зон расплавления.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, электростатический разряд, численная модель.

Введение

Развитие и совершенствование диагностических методик, направленных на определение работоспособности интегральных микросхем (ИМС) в тех или иных условиях эксплуатации, требует достаточно больших материальных затрат. В большинстве случаев это обусловлено относительно высокой стоимостью используемого экспериментального и диагностического оборудования.

В настоящее время наиболее оптимальное решение минимизации затрат при получении данных по устойчивости ИМС к воздействию электростатических разрядов (ЭСР) достигается внедрением имитационных моделей (ИМ) [1]. Построение ИМ во многом зависит от правильного выбора физических параметров, влияющих на достоверность полученных результатов, а также математического аппарата, позволяющего максимально адекватно описать и оценить полученный результат [2, 3].

На сегодняшний день в научно-технической литературе достаточно сложно встретить результаты исследований в области моделирования распределения температуры в ИМС вследствие контактного воздействия разряда статического электричества. Авторами разработана модель, позволяющая определить особенности протекания физических процессов в токоведущих элементах интегральных микросхем, выявить динамику распределения температуры, а также определить допустимые значения напряжения воздействующего разряда, что является актуальной задачей для современной полупроводниковой промышленности.

Методика эксперимента

Процессы возникновения и распространения температуры в токоведущих элементах ИМС, вызванные действием квазиточечных источников энергии, в частности – ЭСР, наиболее оптимально описывать численной (математической) моделью, которая строится на решении осесимметрических задач переноса энергии, массы и импульса [4].

В программном пакете COMSOL Multiphysics была разработана имитационная модель

интегральной микросхемы, состоящая из пяти основных (без учета узлов пайки) токоведущих областей, в каждой из которых решались уравнения электропроводности и теплопроводности с учетом граничных условий.

1. Исходные данные для построения модели.

В результате анализа работ [5, 6], при разработке модели использовались следующие обозначения для пяти токоведущих областей ИМС:

– «наружный вывод», на который осуществляется воздействие статического электричества по методу контактного разряда, представлен участком из материала «Медь». Габаритные размеры: длина – 0,2 мм., ширина – 0,2 мм., высота – 0,1 мм;

– «внутренний вывод», соединяющий наружный вывод ИМС с контактной площадкой, представлен участком «Золото». Цилиндрическая форма данной области была задана следующими размерами: длина – 1,5 мм., диаметр – 0,025 мм;

– «контактная площадка», сформированная на кристалле и соединяющая внутренний вывод с областью «металлизирующая дорожка», представлена участком «Золото» с габаритными размерами: длина – 0,12 мм., ширина – 0,12 мм., высота – 0,01 мм;

– «металлизирующая дорожка» на полупроводниковом кристалле ИМС представлена участком «Алюминий» с габаритными размерами: длина – 0,3 мм., ширина – 0,12 мм., высота – 0,03 мм.;

– «полупроводниковый кристалл» представлен участком «Кремний». Габаритные размеры: длина – 0,4 мм., ширина – 0,14 мм., высота – 0,1 мм.

Выбор материалов для каждой токоведущей области основан на наиболее частом использовании представленных материалов в производстве современных ИМС.

2. Построение расчетной области.

Расчетная область представляет собой сегменты прямоугольной и цилиндрической формы, что обусловлено технологией изготовления ИМС (рис 1, а). Области пайки в разработанной модели не учитывались, так как описать процесс формирования температуры в композитных сплавах достаточно сложно. Также это привело бы к громоздким построениям математического аппарата за счет специфики теплопроводности в сплавах и длительным вычислениям. В связи с этим, в рамках используемого программного продукта использовалась упрощенная расчетная область (рис. 1, б).

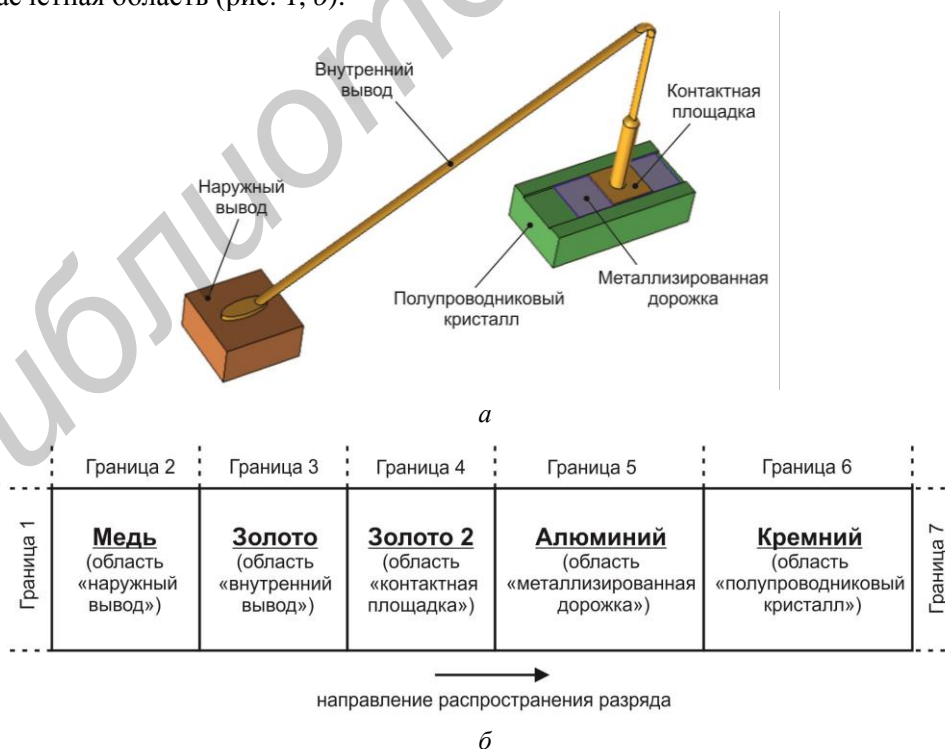


Рис. 1. Модель системы токоведущих элементов интегральных микросхем:
а – общий вид; б – расчетная область с обозначением границ

3. Постановка, формализация и решение задач по описанию процессов тепло- и электропроводности в токоведущих элементах ИМС.

При воздействии электростатического разряда на наружный вывод ИМС, причиной отказа являются две наиболее распространенные составляющие: резкое повышение температуры и поток заряженных частиц [7]. Таким образом, при моделировании распределения теплового поля в системе токоведущих элементах ИМС были использованы следующие два наиболее значимых уравнения.

1. Уравнение теплопроводности, которое описывает перенос теплоты микроскопическими структурными частицами вещества в процессе их теплового движения в телах с неоднородным распределением температуры.

Основной закон, управляющий всей теплопередачей, – первый закон термодинамики, обычно упоминаемый как принцип сохранения энергии. Однако внутренняя энергия является довольно неудобной величиной для измерения и использования в моделировании. Поэтому основной закон обычно записывается на основе температуры, T . Учитывая тот фактор, что при протекании тока структура слоев ИМС частично расплавляется, в работе будет рассмотрено уравнение теплопроводности, которое описано в модуле General Heat Transfer программного пакета COMSOL Multiphysics, как [8]:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right) = -(\nabla \cdot \mathbf{q}) + \tau : S - \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) p \right) + Q, \quad (1)$$

где ρ – плотность вещества, кг/м³; C_p – удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К); T – абсолютная температура, К; \mathbf{u} – вектор скорости, м/с; \mathbf{q} – плотность потока тепла, Вт/м²; p – давление, Па; τ – тензор вязкостного напряжения, Па [8]: $\tau = \eta \left(2S - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{u})I \right)$, где η – вязкость,

Па·с; I – единичный тензор; S – тензор скорости деформации, 1/с [8]: $S = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$, где Q – наличие других источников теплоты кроме теплоты внутреннего трения, Вт/м³; $\nabla \cdot \mathbf{q}$ – дивергенция вектора \mathbf{q} ; $(\mathbf{u} \cdot \nabla) T$ – скалярное произведение вектора скорости и градиента температуры; $(\mathbf{u} \cdot \nabla) f$ – оператор над функцией f .

В уравнении (1) использовалось множество термодинамических соотношений, в которых предполагается, что масса всегда постоянна, что означает, что плотность и скорость должны быть связаны уравнением [4, 8]: $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{v}) = 0$.

Согласно закону Фурье, плотность потока тепла \mathbf{q} пропорциональна температурному градиенту: $q_i = -k \frac{\partial T}{\partial x_i}$, где k – коэффициент теплопроводности в твердых телах, Вт/(м·К).

Учитывая, что данный коэффициент может быть разным по разным направлениям (анизотропным), тогда k становится тензором, который можно записать как [8]:

$$k = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix},$$

а плотность потока тепла становится равной [8]:

$$q_i = -\sum_j k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}.$$

Второе слагаемое в правой части уравнения (1) представляет вязкое (за счет внутреннего трения) нагревание материала. Это слагаемое возникает в результате внутреннего

вязкого торможения тела. Оператор «:» является сокращением, и может быть записан в следующей форме [8]: $a:b = \sum_n \sum_m a_{nm} b_{nm}$, т.е. $\tau:S \equiv \sum_{i,j} \tau_{ij} S_{ij}$.

Третье слагаемое в правой части уравнения (1) представляет работу давления и отвечает за нагревание материала при адиабатическом сжатии и за термоакустические эффекты. Оно в основном достаточно мало и не вносит значительных корректив.

Проведя преобразования и игнорируя вязкое нагревание и работу давления, преобразуем уравнение теплопроводности в более знакомую форму [8]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q - \rho C_p u \cdot \nabla T. \quad (2)$$

Учитывая то, что скорость установлена равной нулю, получим основное уравнение чистой теплопроводности для каждого сегмента системы ИМС при воздействии статического электричества по методу контактного разряда [8, 9]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q. \quad (3)$$

2. Уравнение объемной мощности тепловых потерь, с помощью которого определяется величина, равная количеству выделившегося тепла в единицу времени.

В системе токоведущих элементов ИМС объемная мощность тепловых потерь (P) определяется скалярным произведением вектора плотности тока и вектора напряженности электрического поля в данной точке [10]:

$$P = \left(\vec{j} \cdot \vec{E} \right) = \sigma \cdot E^2 = \frac{j^2}{\sigma}, \quad (4)$$

где j – плотность электрического тока; E – напряженность электрического поля; σ – удельная электропроводность среды.

Основываясь на работах [9, 10], электросопротивление реального металла, в котором в той или иной степени присутствуют все виды рассеяния электронов проводимости, приближенно представляют в виде двух слагаемых:

$$\rho_n = \rho_0 + \rho(T), \quad (5)$$

где ρ_0 – часть удельного электросопротивления, обусловленная рассеянием электронов на статических дефектах при $t_0 = 0$ °C; $\rho(T)$ – часть удельного электросопротивления, обусловленная рассеянием на фононах.

Учитывая то, что испытания интегральных микросхем на устойчивость к воздействию статического электричества по методу контактного разряда в соответствии с требованиями ОСТ 11 073.013–2008 [11] осуществляется в лабораторных условиях, взаимодействие электронов с решеточными фононами (электрон-фононное рассеяние) происходит при комнатной температуре. Этим механизмом рассеяния обусловлена хорошо известная линейная зависимость удельного электросопротивления металлов от температуры [10]:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T), \quad (6)$$

где α – температурный коэффициент удельного сопротивления; $\Delta T = T - T_0$ – температура.

В результате проведения преобразований с учетом формул (4)–(6), объемную плотность мощности тепловыделения (P) можно представить в следующем виде [8]:

$$P = \rho_0 \cdot j^2 [1 + \alpha(T - T_0)]. \quad (7)$$

Основываясь на том, что система последовательно соединенных токоведущих областей ИМС строилась из пяти слоев, а совокупность тел с различными теплофизическими параметрами и явно выраженными границами раздела называют системой тел, каждая часть которой является однородным телом, решение уравнений (3) и (7) осуществлялось для каждой области разработанной модели (см. рис. 1, а). Все необходимые значения физических параметров для

каждой области, заданной определенным материалом, были заданы численными значениями, которые эквивалентны справочным.

4. Граничные условия.

При описании физических процессов, протекающих в токоведущих элементах ИМС в результате воздействия ЭСР, для решения уравнений тепло- и электропроводности задавался ряд граничных условий (ГУ).

Для уравнения теплопроводности ГУ для всех приведенных границ расчетной области (см. рис. 1, а) заданы как тепловой поток, в котором соответствующие значения коэффициентов теплопроводности (λ) эквивалентны значениям, приведенным в табл. 1.

Таблица 1. Граничные условия для уравнений теплопроводности

Параметр	Граница	Значение
Коэффициенты теплопроводности – k	1	400
	2	380
	3	317
	4	317
	5	202
	6	160
	7	160

Для уравнения электропроводности граничные условия задавались для каждой границы следующим образом:

- для границы 1 – как испытательное напряжение (табл. 2);
- для границ 2, 3, 4, 5 и 6 – как электрическая изоляция;
- для границы 7 – как электрический потенциал, равный нулю.

Таблица 2. Параметры импульса разрядного тока [11]

Степень жесткости	Испытательное напряжение, кВ	Ток первого максимума $\pm 10\%$, А	Время нарастания, t_n , нс	Ток разряда ($\pm 30\%$) при 30 нс, А	Ток разряда ($\pm 30\%$) при 60 нс, А
1	2	7,5	от 0,7 до 1	4	2
2	4	15	от 0,7 до 1	8	4
3	6	22,5	от 0,7 до 1	12	6
4	8	30	от 0,7 до 1	16	8

При указанных значениях напряжения разряда статического электричества получены распределения температуры в системе токоведущих элементов ИМС.

В процессе построения сетки пространственной дискретизации системы токоведущих элементов ИМС, область «внутренний вывод» имеет в 3 раза большую дискретизацию, т.е. зерно сетки в 3 раза меньше, чем дискретизация сетки других областей модели. Это обусловлено тем, что данная область достаточно тонкая (25 мкм), и в тоже время имеет наибольшую длину по сравнению с остальными областями. Введение и учет данной особенности позволило более точно произвести все необходимые математические расчеты и получить максимально приближенные значения температуры.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенного эксперимента получено распределение теплового поля в токоведущих элементах ИМС с выявлением максимального значения температуры в каждой области. Установлено, что зависимость распределения температуры от напряжения воздействующего статического электричества по методу контактного разряда имеет идентичную форму. Это позволяет сделать вывод, что при изменении напряжения ЭСР наиболее вероятные области локального нагрева остаются одинаковыми («внутренний вывод» и «металлизированная дорожка») (см. рис. 2).

Установлено, что значение градиента температуры в многослойной (пять областей) системе токоведущих элементов в результате воздействия электромагнитных импульсов длительностью 0,7...1 нс может изменяться в пределах 1...67% для соседних слоев и сильно зависит от теплопроводности каждого элемента. Получаемое значение температуры для рассматриваемого элемента является усредненным, их целесообразно использовать для предварительного

определения средней температуры рассматриваемого элемента, а затем находить локальный перегрев в конкретном токоведущем элементе с учетом рассчитанной температуры.

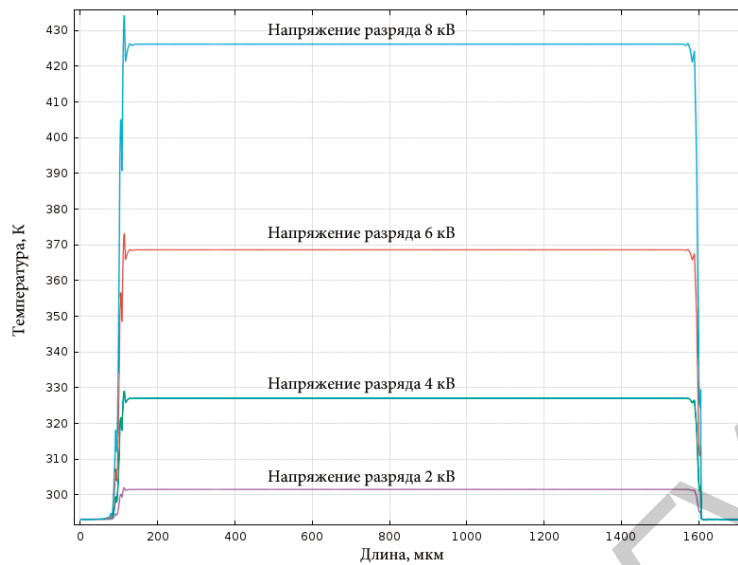


Рис. 2. Распределение температуры в системе токоведущих элементов ИМС при различных напряжениях разряда статического электричества

На основании проведенного эксперимента установлено, что при контактном воздействии разряда статического электричества напряжением от 4 до 8 кВ, максимальная температура токопроводящих областей ИМС находится в диапазоне 302...433 К. Использование в процессе моделирования температурной зависимости с учетом теплопроводности системы токопроводящих элементов ИМС позволяет получить более точные значения температуры в их объеме и форму ее распределения.

В результате проведенного эксперимента выявлено, что изменение температуры в каждой области носит линейный характер. Наибольшие перепады температуры наблюдаются между такими соседними областями, как: «наружный вывод» / «внутренний вывод» и «внутренний вывод» / «металлизированная дорожка». Перепады температуры на данных участках составляют от 10 К (при напряжении разряда 2 кВ) до 142 К (при напряжении разряда 8 кВ).

Учитывая результаты исследований, приведенных в работах [12–14], можно предположить, что резкое изменение температуры в токоведущих элементах интегральных микросхем памяти вследствие воздействия разряда статического электричества может привести не только к локальному расплавлению материала, но и к изменению инсталлированного массива данных. Анализ произошедших изменений в инсталлированном во встроенную флеш-память программном обеспечении оптимально осуществлять с помощью специализированных хеш-функций.

Заключение

В работе впервые показано, что распространение температуры в системе токоведущих элементов интегральных микросхем вследствие воздействия контактного разряда статического электричества оптимально осуществлять с помощью построения модели, в которой задаются расчетные области и их количество, исходные данные и граничные условия, а также выполняется решение уравнений тепло- и электропроводности. С помощью разработанной модели установлено, что в каждой токоведущей области интегральных микросхем зависимость формирующейся температуры от напряжения разряда описывается линейным законом.

Полученные результаты позволяют оптимизировать процесс производства современных полупроводниковых приборов и минимизировать как материальные, так и временные затраты, направленные на определение наиболее уязвимой токоведущей области за счет обнаружения локальных зон расплавления.

MODELING TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE DRIVING ELEMENTS INTEGRATED CIRCUITS RESULTING ELECTROSTATIC DISCHARGE

G.A. PISKUN, V.F. ALEXEEV, V.L. LANIN, V.G. LEVIN

Abstract

Investigated experimentally the principle of propagation of thermal fields in integrated circuits as a result of electrostatic discharge. A numerical model of the temperature distribution in the current-carrying elements of integrated circuits due to contact effects of static electricity, and electrical conductivity based on the Fourier analysis of the thermal conductivity is proposed. The developed model predicts the temperature dependence of the discharge voltage and identify the most vulnerable conductive region by identifying local areas of melting.

Список литературы

1. Рыжиков Ю.И. Имитационное моделирование: теория и технологии. М., 2004.
2. Абрамов И.И. // Нано- и микросистемная техника. 2006. Ч. I, № 8. С. 34–37.
3. Абрамов И.И. // Нано- и микросистемная техника. 2007. Ч. III, № 1. С. 36–37.
4. Козлов В.П. Двумерные осесимметричные нестационарные задачи теплопроводности. Минск, 1986.
5. Онегин Е.Е., Зенькович В.А., Битно Л.Г. Автоматическая сборка ИС. Минск, 1990.
6. Ланин В.Л., Достанко А.П., Телеш Е.В. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники. Минск, 2007.
7. Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. М., 2005.
8. Heat Transfer Module User's Guide // COMSOL Software [Electronic resource]. 2012.
9. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М., 1967.
10. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена. М.-Л., 1961.
11. ГОСТ 11 073.013–2008. Микросхемы интегральные. Методы испытаний. Методы электрических испытаний. 2009.
12. Алексеев В.Ф., Силков Н.И., Пискун Г.А. и др. // Докл. БГУИР. 2011. № 5 (59). С. 5–12.
13. Пискун Г.А., Алексеев В.Ф. // Вестник РГРТУ. 2012. № 2 (40). С. 34–40.
14. Алексеев В.Ф., Пискун Г.А. // Радиоэлектроника и информатика. 2012. № 3 (58). С. 8–12.