
**ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ
ПРОЦЕССОВ В ПРОВОДЯЩИХ СТРУКТУРАХ СОВРЕМЕННЫХ
МИКРОСХЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ПОЛЕЙ**

Численно-аналитическим методом решается задача динамики развития электротепловых процессов в неоднородных медных микроструктурных элементах интегральных микросхем при воздействии мощных электромагнитных полей. Приводятся пороговые значения напряженности электромагнитного поля, характеризующие процессы «локальной деградации» в неоднородных проводящих структурах современных микросхем.

1. Введение

Развитие технологии производства современных интегральных микросхем (ИМС), микропроцессоров и микросборок позволяет значительно увеличить степень интеграции этих устройств. Это приводит к уменьшению геометрических размеров пленочных полупроводниковых и проводящих структур, размеров диэлектрических элементов, взаимных расстояний между базовыми элементами кристаллов микросхем. Уменьшение геометрии элементов и взаимных расстояний между ними может вызывать повышенные напряженности полей в микроструктурных элементах (МСЭ) микросхем при воздействии на них мощных электромагнитных полей.

Начиная с 1997 г., в микроэлектронной промышленности в качестве пленочных проводников начали применять медные микроструктурные элементы, у которых, в отличие от алюминиевых МСЭ, практически отсутствует зернистость [1, 2]. Кроме того, проводимость и тепловая стойкость меди намного превосходят подобные величины у алюминия. Развитие технологии создания активных, диэлектрических и проводящих МСЭ позволило значительно повысить степень интеграции элементов в микросхемах, увеличить их функциональные возможности, уменьшить размеры кристаллов и микросхем.

При воздействии импульсных электромагнитных полей (ИЭМП) или статического электричества на микросхемы основной причиной их выхода из строя является тепловой пробой проводящих микроструктурных элементов (контактных площадок и дорожек). В работах [3, 4] приводятся результаты исследований развития электротепловых процессов в микросхемах с алюминиевыми микроструктурными элементами. В настоящее время отсутствуют результаты исследований, связанные с особенностями развития электротепловых процессов в кристаллах микросхем с использованием медных проводящих пленок при воздействии мощных импульсных электромагнитных полей. Кроме того, отсутствуют данные для порогов стойкости современных микросхем, микропроцессоров и микроконтроллеров к воздействию электромагнитных полей, обусловленных прожогом проводящих микроструктурных элементов.

Целью работы является численно-аналитический расчет динамики развития электротепловых и деградационных процессов в проводящих структурах современных микросхем при воздействии мощных импульсных электромагнитных полей и определение пороговых значений стойкости микросхем на основе тепловой стойкости медных микроструктурных элементов.

2. Модель воздействия электромагнитных полей на современные микросхемы

При радиационном воздействии на радиоэлектронную аппаратуру непосредственно изменяются характеристики и свойства полупроводниковых и диэлектрических МСЭ микросхем. При воздействии импульсных электромагнитных полей на радиоэлектронную аппаратуру процессы в МСЭ микросхем определяются наведенными токами и приложенными

напряжениями, значения которых зависят от геометрических размеров и ориентации микросхемы относительно поля (поляризованный фактор, «антенный механизм» [5]). Существенное влияние на наведенные токи и приложенные напряжения оказывает также «обвязка» (внешние элементы) микросхем, обеспечивающая их работоспособность.

Ввиду большого многообразия радиоэлектронных устройств целесообразно рассмотреть процессы только в элементной базе, а именно в микросхемах при воздействии ИЭМП. При этом пороговые значения стойкости радиоэлектронной аппаратуры, определяемые стойкостью микросхем, будут предельно минимальными при условии отсутствия защитных корпусов у радиоаппаратуры. При таком подходе модель взаимодействия полей с микроструктурными элементами микросхем сводится к решению дифракционной задачи для определения полей вблизи кристалла микросхем, определения наведенных токов и приложенных напряжений к контактным площадкам или выводам микросхем и решения электротепловой задачи для модели кристалла микросхемы.

Современные микросхемы являются достаточно сложными структурами, как правило, с большой степенью интеграции элементов на кристалле [6]. Описать и полностью промоделировать процессы в кристаллах микросхем при воздействии на них электромагнитных полей не представляется возможным. В работе [7] предложена методика численно-аналитического исследования процессов, происходящих в проводящих микроструктурах интегральных микросхемах при воздействии мощных электромагнитных полей. Она была апробирована на цифровых и аналоговых микросхемах средней степени интеграции. Полученные согласно этой методике результаты достаточно хорошо коррелируют с экспериментальными данными [8]. Разработанную численно-аналитическую модель [7] можно использовать и для исследования динамических процессов в проводящих микроструктурных элементах современных микросхем.

Для построения адекватной модели воздействия электромагнитных полей на современные микросхемы необходимо учесть геометрические и электрофизические особенности модели микросхемы, включающей корпус, кристалл и вывод [9]. В качестве импульсных электромагнитных полей, воздействующих на микросхемы, предполагается использование радиотехнических импульсов прямоугольной формы с СВЧ заполнением, с соблюдением условия длинноволнового приближения для кристалла микросхемы. В этом случае при решении дифракционной задачи существенным будут геометрические особенности корпуса и выводов, так как кристалл не влияет на распределение полей вблизи микросхемы и на структурных элементах [9]. В то же время, размеры и геометрия пленочных проводящих элементов на кристалле, их взаимное расположение существенно влияют на величину токов, которые проходят через МСЭ.

При воздействии электромагнитных полей на микросхемы возникают разрядные цепи (токовые каналы), электрические параметры которых определяются как топологическими особенностями микросхем, так и ориентацией микросхем относительно падающей волны. Для иллюстрации этого на рис. 1 приведена топология кристалла типовой микросхемы и возможные разрядные цепи.

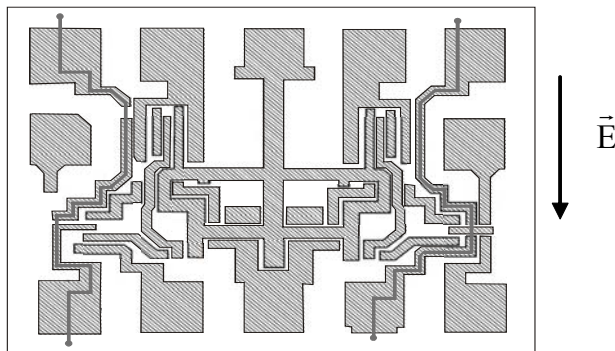


Рис. 1. Топология кристалла ИМС и образование разрядных цепей при воздействии электромагнитных полей

Кристалл микросхемы представляет собой сложную неоднородную структуру с большим количеством различных МСЭ: активных полупроводниковых приборов, диэлектрических и проводящих включений. При построении модели кристалла учитываются основные микроструктурные элементы (рис.2): кремниевая подложка (Si), диэлектрический слой оксида кремния (SiO_2), медные проводящие пленочные элементы (Cu), защитный слой - слой оксида кремния (SiO_2). В модели кристалла тонкая металлическая пленка разделена диэлектрическими включениями (см. рис.1), количество и геометрические параметры которых определяются токовыми каналами.

Особенностью структуры проводящей пленки является ее неоднородность, которая моделируется путем соответствующего распределения электропроводности вдоль пути прохождения тока. В отличие от алюминиевой металлизации, где явно выражена неоднородность проводящей пленки по толщине, при использовании медной проводящей пленки ее неоднородность задавалась по ширине (рис.3).

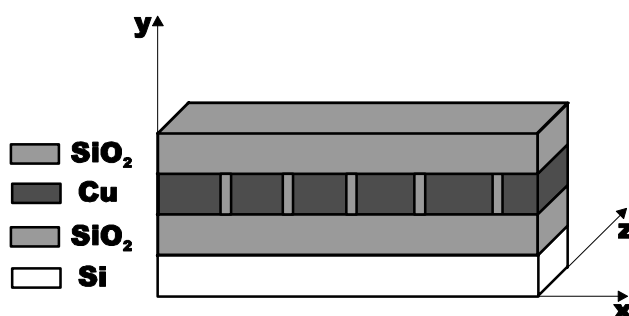


Рис. 2. Модель кристалла с медными пленочными проводящими элементами

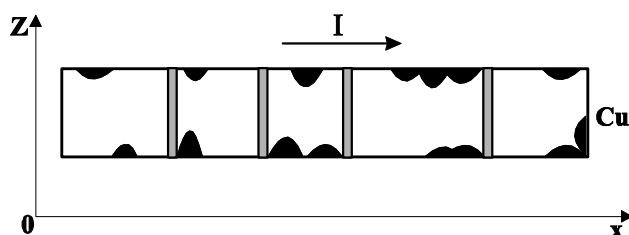


Рис. 3. Модель неоднородного проводящего пленочного элемента вдоль разрядной цепи (горизонтальное сечение)

Методика численно-аналитического моделирования воздействия электромагнитных волн на современные микросхемы включает в себя следующие этапы:

- 1) Построение модели микросхемы (геометрия корпуса, кристалла, выводов).
- 2) Задание ориентации модели микросхемы относительно электрической компоненты напряженности поля электромагнитной волны.
- 3) Численное решение дифракционной задачи и определение полей вблизи микросхемы;
- 4) Выявление разрядных цепей и расчет токов и напряжений на МСЭ.
- 5) Численно-аналитический расчет распределения удельной мощности тепловых источников вдоль пути прохождения тока с учетом электрофизических свойств медных проводящих пленок в данный момент времени.
- 6) Расчет температурного поля слоистой структуры кристалла на данном временном шаге путем численного решения нестационарного уравнения теплопроводности [8] с учетом распределения удельной мощности тепловых источников в тонких металлических пленках.
- 7) Графическая обработка параметров электротепловой модели для анализа характера развития электротепловых процессов в слоистой структуре кристалла.
- 8) Расчет электрофизических параметров слоистой структуры кристалла на данном временном шаге.

9) Обработка результатов расчета и определение временных и пространственных характеристик деградационных процессов в тонких металлических пленках при воздействии электромагнитных полей.

Расчет динамики деградационных процессов в тонких металлических пленках осуществляется на каждом временном шаге (t) до тех пор, пока не произойдет выгорание тонкой металлической пленки или не установится стационарный температурный режим в слоистой микроструктуре при воздействии электромагнитных полей.

3. Динамика электротепловых и деградационных процессов в медных проводящих структурах

Проводящая медная пленка представляет собой пространственно-неоднородную структуру, значения электропроводности неоднородных участков которой (участки 1-15, рис.4) составляют 10% от значений электропроводности однородных участков. Неоднородные участки металлической дорожки распределены, в общем случае, случайным образом, однако они обязательно присутствуют в местах контакта с диэлектрическим участком (участки 7-10, рис.4) и на краях металлизации (участки 1, 2, 14, 15).

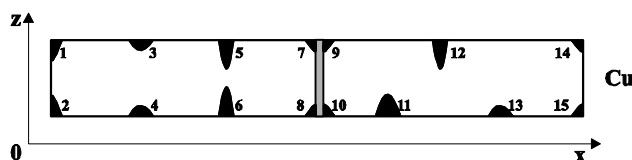


Рис.4. Неоднородная структура медной проводящей дорожки по ширине металлизации

Неоднородность металлизации приводит к тому, что наблюдается неравномерный разогрев проводящей пленки вдоль пути прохождения тока (рис.5). В местах сужения токового канала увеличивается выделяемая мощность, что приводит к повышению температуры и формированию неоднородного температурного поля.

На начальной стадии наблюдается локальное повышение температуры на неоднородных участках, на которое не влияет пространственное температурное поле. Неоднородность структуры металлической пленки и учет влияния температуры на электрофизические параметры пленки приводит к перераспределению тока и мощности по всей структуре медной проводящей пленки. Этот процесс вызывает интенсивное повышение температуры в местах большой неоднородности (участки 5,6, рис.5), что особенно ярко начинает проявляться с момента времени $t=10^{-8}$ с. При этом наблюдается «растекание теплоты» по толщине дорожки (вдоль оси y), что связано с размерами поперечного сечения металлизации.

Надо отметить, что в данных временных рамках (до момента времени $t=10^{-8}$ с) практически на повышение температуры не влияют граничные условия. При этом 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), так и на ее краях (участки 14,15) 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. При этих значениях времени тепловой процесс перестает быть квазиадиабатическим и характер тепловых потоков определяется, в основном, граничными условиями на всей модели кристалла.

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 работе были определены пороговые значения по напряженности поля в медных неоднородных проводящих дорожках и проведен сравнительный анализ с алюминиевыми дорожками. Модель с медными проводящими пленками представлена в двух вариантах –

дорожка из чистой меди и медная дорожка, расположенная в танталовой канавке. При этом надо отметить, что при расчете пороговых значений использовалось понятие «локальная деградация» - считалось, что наступил порог деградации, когда на локальном участке была достигнута температура плавления данного участка.

На рис.6 приведены графики стойкости проводящих микроструктурных элементов микросхем - зависимости пороговых значений напряженности электромагнитного поля от длительности воздействующего СВЧ-импульса.

Полученные зависимости показывают, что локальная стойкость медной металлизации по напряженности электрической компоненты падающей электромагнитной волны в 3-5 раз больше аналогичной величины для алюминиевой металлизации при одинаковых поперечных сечениях проводников. Это связано как с разными значениями электрофизических параметров данных материалов, так и с температурными характеристиками. В частности, температура плавления меди более чем на 400°C превышает температуру плавления алюминия. В то же время, особенно в области коротких длительностей импульса, нет качественных отличий между двумя зависимостями.

Использование танталовой канавки повышает стойкость металлизации к воздействию полю. Это связано, прежде всего с тем, что температура плавления тантала 2996°C , что на 1900°C больше, чем у меди. Поэтому танталовая канавка как бы «удерживает» расплавленную медь, пока сама не расплавится.

4. Заключение

Численно-аналитическая модель воздействия мощных электромагнитных полей на современные микросхемы позволила исследовать динамику развития электротепловых процессов в неоднородных медных проводящих микроструктурных элементах. Получены временные и пространственные характеристики деградационных процессов в МСЭ. Сравнительный анализ пороговых значений напряженности электромагнитного поля позволил определить процентное увеличение стойкости неоднородных проводящих МСЭ при использовании медных пленочных элементов по сравнению с алюминиевыми при одинаковых поперечных сечениях проводников.

Список литературы: 1. *Ning T.H.* CMOS in the New Millennium. Semiconductor Fabtech. -13th Edition, ICG Publishing Ltd., London, UK, 2001. P. 287-295. 2. *Wolf S.* Silicon Processing for the VLSI Era. Vol. 2. Process Integration. Lattice Press: Sunset Beach, CA, USA, 1990. 752 p. 3. *Старостенко В.В., Таран Е.И., Глумова*

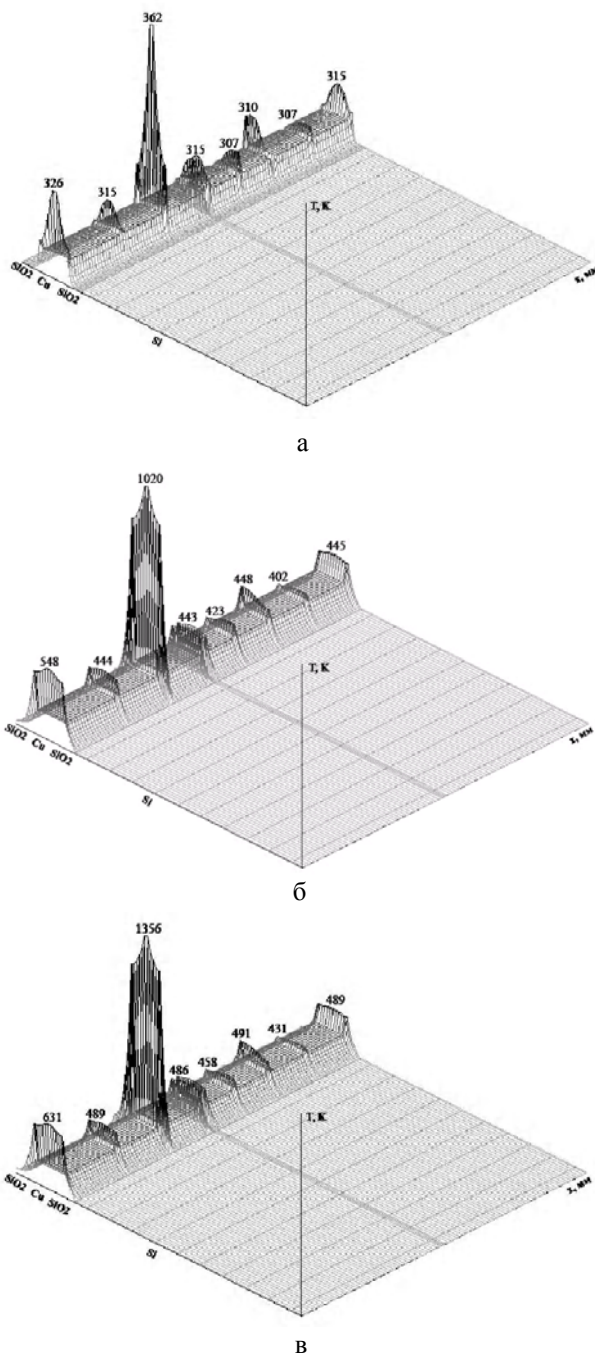


Рис. 5. Распределение температуры в модели кристалла микросхемы в динамике: а – $t=10^{-9}$ с; б – $t=10^{-8}$ с; в – локальное выгорание ($t=1,257 \cdot 10^{-8}$ с)

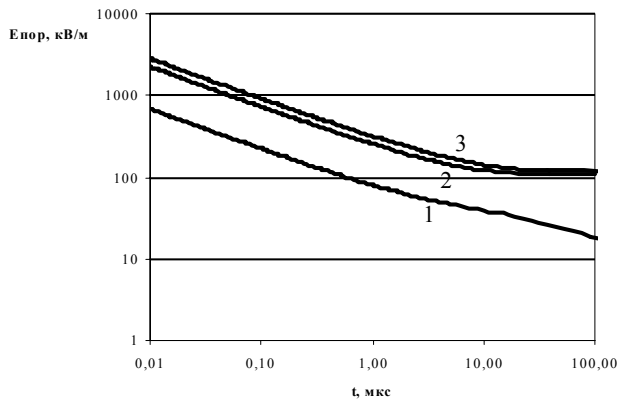


Рис.6. Зависимость пороговых значений напряженности электромагнитного поля от длительности импульса: 1 – алюминиевая дорожка; 2 – медная дорожка; 3 – медная дорожка в танталовой канавке

М.В., Рукавишников А.В. Динамика развития необратимых деградационных процессов в проводящих микроструктурах интегральных микросхем при воздействии импульсных электромагнитных полей // Вестник ХНУ. Радиофизика и электроника. 2002. Вып.1, № 544. С.167-172. **4.** *Starostenko V.V.* Current Characteristics of Heterogeneous Conducting Microstructures of Integrated Circuits on Exposure to Electromagnetic Fields // Telecommunications and Radio Engineering. 2002. V.57(8-9). P. 93-98. **5.** *Гадецкий Н.П., Кравцов К.А., Магда И.И.* Взаимодействие мощного СВЧ излучения УКДИ с приемно-усилительным трактом СВЧ диапазона // Материалы IV Междунар. конф. «СВЧ-техника и спутниковый прием». Том 2. Севастополь: «Вебер». 1994. С. 536-538. **6.** Евстифеев А. Микроконтроллеры AVR семейства Mega. М: Издательство: Додэка, 2007. 592 с. **7.** *Старостенко В.В., Таран Е.П., Григорьев Е.В.* Локальная деградация металлизации в интегральных микросхемах при воздействии электромагнитных полей // Радиофизика и электроника. 1998. Т. 3, №1. С.123-126. **8.** *Старостенко В.В., Таран Е.П., Григорьев Е.В., Борисов А.А.* Воздействие электромагнитных полей на интегральные микросхемы // Измерительная техника. Москва, 1998. № 4. С.65-67. **9.** *Starostenko V.V., Taran E.P., Malishevski S.V., Churyumov G.I.* Near Field Zone of an Integrate Circuit Exposed to an Electromagnetic Wave in a Waveguide // Technical Physics Letters. V.29, №1. P.29-31.

Старостенко В.В., Таран Е.П., Григорьев Е.В. Локальная деградация металлизации в интегральных микросхемах при воздействии электромагнитных полей // Радиофизика и электроника. 1998. Т. 3, №1. С.123-126. **8.** *Старостенко В.В., Таран Е.П., Григорьев Е.В., Борисов А.А.* Воздействие электромагнитных полей на интегральные микросхемы // Измерительная техника. Москва, 1998. № 4. С.65-67. **9.** *Starostenko V.V., Taran E.P., Malishevski S.V., Churyumov G.I.* Near Field Zone of an Integrate Circuit Exposed to an Electromagnetic Wave in a Waveguide // Technical Physics Letters. V.29, №1. P.29-31.

Поступила в редколлегию 17.06.2007

Старостенко Владимир Викторович, д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой радиофизики Таврического национального университета (ТНУ). Научные интересы: моделирование вакуумных и твердотельных устройств СВЧ, исследование деградационных процессов в различных объектах и средах при воздействии электромагнитных полей. Адрес: Украина, 95022, Симферополь, ул. Б.Куна, 31, кв.13, тел.: раб. (0652)230360, дом. (0652)575401.

Таран Евгений Павлович, канд. физ.-мат. наук, доцент радиофизики ТНУ. Научные интересы: численное моделирование процессов взаимодействия электромагнитных волн с пленочными микроструктурными элементами. Адрес: Украина, 95004, г.Симферополь, ул. Лермонтова, 11, кв.79, тел.: раб. (0652)230360, дом. (0652)601017. E-mail: taran@tnu.crimea.ua

Грибский Максим Петрович, аспирант кафедры радиофизики ТНУ. Научные интересы: экспериментальные исследования деградационных процессов в микро-структурных элементах интегральных микросхем при воздействии электромагнитных полей. Адрес: Украина, 95053, Симферополь, ул. Бетховена, 113, кв.88.

Чурюмов Геннадий Иванович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физических основ электронной техники ХНУРЭ. Научные интересы: методы математического моделирования нелинейных процессов, СВЧ-электроника и электродинамика, электронные и оптоэлектронные приборы. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина, 14, тел. 702-10-57

Трибрат Михаил Игоревич, студент 6-го курса радиофизического факультета Киевского национального университета имени Тараса Шевченко. Научные интересы: численное моделирование процессов распространения электромагнитных волн в слоистых неоднородных структурах.