

ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ МИКРОСХЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

СТАРОСТЕНКО В.В., ГРИБСКИЙ М.П.,
ПОЛЕТАЕВ Д.А., ТАРАН Е.П., ЧУРЮМОВ Г.И.

Строится численная модель развития электротепловых процессов в проводящих и диэлектрических микроструктурных элементах микросхем при воздействии СВЧ электромагнитных полей с учетом тепловых потерь в диэлектрических структурах. Описываются выражения для удельной мощности тепловых потерь в диэлектрических структурах микросхем. Выявляется динамика изменения температурного поля кристалла микросхемы с учетом неравномерного разогрева металлизации и диэлектрических участков.

Введение

Воздействие электромагнитных полей на интегральные микросхемы (ИМС) вызывает развитие деградиционных процессов и деструкцию (как правило, тепловую) микроструктурных элементов: пленочных проводящих и диэлектрических структур и полупроводниковых (активных) элементов. Необратимые структурные изменения возможны при воздействии электромагнитных полей, превышающих пороговые значения, которые определяются параметрами поля (амплитудой, формой и длительностью импульса, скважностью, частотой несущего колебания), параметрами микросхем (толщиной металлизации, степенью интеграции и т.д.), а также взаимной характеристикой поля и ИМС – поляризационным фактором [1-7]. Об этом свидетельствуют экспериментальные исследования, а также теоретические расчеты [1-7]. При этом было установлено, что наиболее уязвимым микроструктурным элементом по отношению к данному виду воздействия является металлизация [1, 3, 4].

Актуальными остаются вопросы, связанные с динамикой развития деградиционных процессов в таких микроструктурных элементах, как диэлектрические слои, контактирующие и разделяющие другие микроструктурные элементы микросхем. Экспериментально исследовать динамику пробоя и характер развития тепловых процессов в диэлектрических структурах ИМС при воздействии электромагнитных полей чрезвычайно сложно. В частности, проявление тепловых деградиционных явлений в диэлектрических структурах наблюдается при температурах, значительно больших температур деградации проводящих и активных элементов микросхем. Температура плавления оксида кремния, который является базовым диэлектрическим элементом для интегральных микросхем, значительно выше температуры плавления алюминия, меди и кремния [7]. В то же время электротепловые

процессы, имеющие место в диэлектрических структурах при воздействии импульсных электромагнитных полей, могут влиять не только на электрофизические параметры диэлектрика, но также и на температуру проводящих и полупроводниковых пленочных элементов микросхем.

В работах [4-6] рассмотрена динамика электротепловых процессов в проводящих микроструктурах микросхем при воздействии импульсных электромагнитных полей (ИЭМП) без учета тепловых потерь в диэлектрике. Разогрев диэлектрика в этом случае имеет место только в результате контакта с проводящими структурами. Представляет интерес рассмотреть влияние активной составляющей тока смещения в диэлектрических структурах на электротепловые процессы в разрядной цепи, возникающей при воздействии импульсных электромагнитных полей на ИМС.

Целью данной работы является численное моделирование динамики электротепловых процессов в диэлектрических структурах микросхем при воздействии электромагнитных полей СВЧ-диапазона, исследование влияния тепловых потерь тока смещения в диэлектрике на развитие процессов в проводящих структурах кристалла микросхем.

Электротепловая модель для диэлектрических структур

При воздействии импульсных электромагнитных полей СВЧ-диапазона на микроструктурные элементы интегральных микросхем в кристалле появляются цепи разряда (токовые каналы), обусловленные протеканием токов проводимости в проводящих пленочных элементах, которые замыкаются через токи смещения в диэлектрических разделительных структурах кристалла [4,5]. При этом разрядных цепей может быть несколько, в зависимости от ориентации кристалла микросхемы относительно напряженности поля падающей электромагнитной волны и входного сопротивления разрядных цепей (рис. 1).

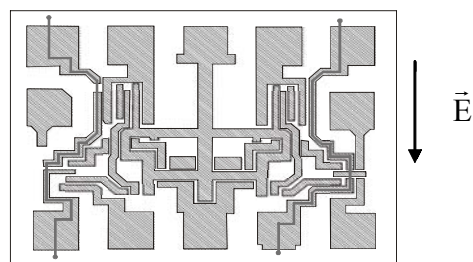


Рис. 1. Топология кристалла ИМС и образование разрядных цепей при воздействии электромагнитных полей

В общем случае разрядная цепь образуется при последовательном и параллельном соединении проводящих и диэлектрических структур и активных элементов микросхем. С учетом статистических данных стойкости микроструктурных элементов микросхем при воздействии ИЭМП [3] упрощенную эквивалентную схему разрядной цепи можно представить в виде

последовательного соединения проводящих и диэлектрических элементов (рис. 2).

В модели эквивалентной разрядной цепи неоднородные проводящие микроструктурные элементы представлены в виде активных сопротивлений R_k и индуктивностей L_k , а диэлектрические микроструктурные элементы представлены в виде емкостей C_k и сопротивлений диэлектрика R_{dk} (см. рис. 2).

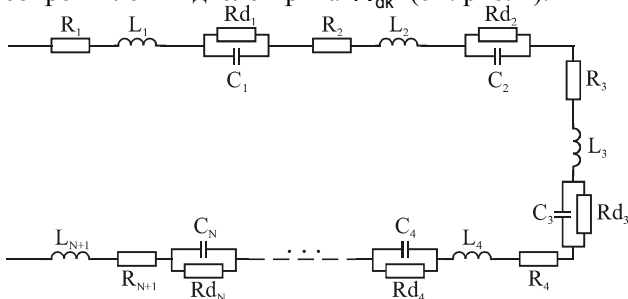


Рис. 2. Эквивалентная разрядная цепь

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

$$I_a = I_c \cdot \text{tg}(\delta), \quad (1)$$

где I_c – ток, проходящий через конденсатор.

Для эквивалентной цепи разряда (рис. 2) активная составляющая сопротивления диэлектрика определяется выражением:

$$R_{dk} = \frac{1}{\omega \cdot C_k \cdot \text{tg}(\delta_k)}, \quad (2)$$

здесь C_k – емкость k -го диэлектрического участка; $\text{tg}(\delta_k)$ – тангенс угла диэлектрических потерь для k -го диэлектрического участка; ω – циклическая частота воздействующего электромагнитного поля.

Сопротивление цепи с учетом диэлектрических потерь имеет вид

$$|\dot{Z}_0| = \left[\left(\sum_{k=1}^{N+1} R_k + \sum_{k=1}^N \frac{\text{tg}(\delta_k)}{\omega \cdot C_k \cdot (1 + \text{tg}^2(\delta_k))} \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^{N+1} \omega \cdot L_k - \sum_{k=1}^N \frac{1}{\omega \cdot C_k \cdot (1 + \text{tg}^2(\delta_k))} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где $N+1$ – количество проводящих элементов в разрядной цепи; N – количество диэлектрических микроструктурных элементов в разрядной цепи.

Проводящие микроструктурные элементы, входящие в эквивалентную разрядную цепь, представляют собой неоднородные пленочные структуры, которые моделируются в виде последовательно-параллельной

сетки сопротивлений (рис.3). Выражение для сопротивления неоднородной проводящей пленочной структуры (k -й проводящий микроструктурный элемент в токовом канале) имеет вид [5,6]:

$$R_k = \frac{h_x}{S} \cdot \sum_{i=1}^{N_{xk}} \frac{1}{\sum_{j=1}^{N_y} \sigma_k(i, j)}, \quad (4)$$

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 проводящей пленки.

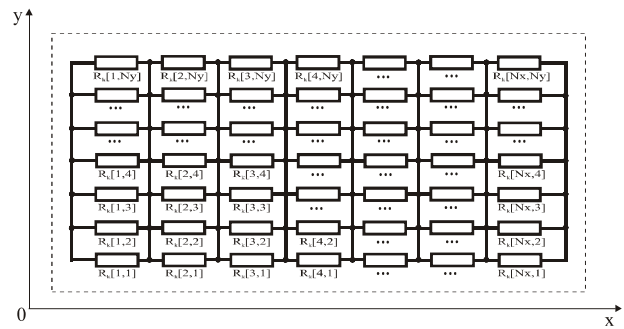


Рис. 3. Эквивалентная схема k -го проводящего микроструктурного элемента

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

$$|\dot{Z}_0| = \left[\frac{h_x^2}{S^2} \left(\sum_{k=1}^{N+1} \sum_{i=1}^{N_{xk}} \frac{1}{\sum_{j=1}^{N_y} \sigma_k(i, j)} + \frac{S}{h_x} \sum_{k=1}^N \frac{\text{tg}(\delta_k)}{\omega \cdot C_k \cdot (1 + \text{tg}^2(\delta_k))} \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^{N+1} \omega \cdot L_k - \sum_{k=1}^N \frac{1}{\omega \cdot C_k \cdot (1 + \text{tg}^2(\delta_k))} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

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

$$|i| = \frac{\vec{E}_m \cdot \vec{d}}{\sqrt{2} \cdot |\dot{Z}_0|}, \quad (6)$$

где \vec{E}_m – амплитуда вектора напряженности электрической компоненты воздействующего электромагнитного поля; $|\vec{d}|$ – длина разрядной цепи вдоль вектора напряженности поля (см. рис. 1).

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

$$|i_{ak}| = |i| \cdot \frac{\operatorname{tg}(\delta_k)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\delta_k)}} \quad (7)$$

Мощность тепловых потерь и удельная мощность для k -го диэлектрического участка имеют вид:

$$P_k = |i_{ak}|^2 \cdot R_{dk} = |i|^2 \cdot \frac{\operatorname{tg}(\delta_k)}{\omega \cdot C_k \cdot (1 + \operatorname{tg}^2(\delta_k))} \quad (8)$$

$$q_k = \frac{P_k}{V_{dk}} = \frac{|i|^2 \cdot \operatorname{tg}(\delta_k)}{\omega \cdot C_k \cdot (1 + \operatorname{tg}^2(\delta_k))} \cdot \frac{1}{h_{axk} \cdot h_{ayk} \cdot h_{azk}} \quad (9)$$

где V_{dk} , h_{axk} , h_{ayk} , h_{azk} – объем и геометрические размеры k -го диэлектрического участка по осям x , y и z , соответственно.

Расчет мощности тепловых потерь на диэлектрических участках, как следует из полученных выражений (5), (6), (8), (9), во многом определяется емкостью диэлектрического участка C_k . Оценка значений емкости диэлектрических участков осуществляется по формуле [8]:

$$C_k = 0,0442 \cdot C'_k \cdot l \cdot (\epsilon_1 + \epsilon_2) \quad [\text{пФ}], \quad (10)$$

где C'_k – емкостный коэффициент, зависящий от взаимного расположения (конфигурации) проводящих элементов; l – размеры тонкой металлической пленки (мм); ϵ_1 – диэлектрическая проницаемость окружающей среды; ϵ_2 – диэлектрическая проницаемость оксида кремния.

Емкостный коэффициент C'_k в (10) зависит от взаимной конфигурации тонких металлических пленок. При образовании разрядных цепей, представленных на рис.1, емкостный коэффициент C'_k для данной конфигурации проводящих пленок (рис.4) определяется выражениями:

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

где $2a$ – ширина емкостного диэлектрического зазора; $2t$ – толщина диэлектрического слоя.

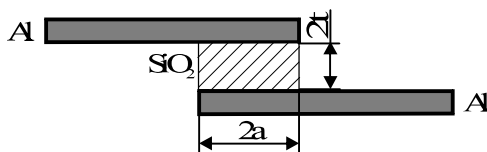


Рис. 4. Взаимное расположение тонких проводящих пленок

Произведенная оценка значений емкости диэлектрических участков показала, что в зависимости от ориентации ИМС относительно падающей волны (см. рис.1), геометрических размеров проводящих участков и диэлектрических структур микросхем средней степени интеграции величина емкости находится в пределах $C=1 \div 10$ пФ.

Электротепловые процессы в диэлектрических структурах неразрывно связаны с геометрическими и электрофизическими параметрами кристалла микросхе-

мы, упрощенная модель которого приведена на рис. 5 [4]. В данной модели учитываются типовые микроструктурные элементы: кремниевая подложка (Si), диэлектрический слой оксида кремния (SiO_2), тонкая алюминиевая проводящая пленка (Al), защитный слой - слой оксида кремния (SiO_2). В упрощенной модели кристалла тонкая металлическая пленка разделена диэлектрическими включениями, количество и геометрические параметры которых определяются разрядными цепями.

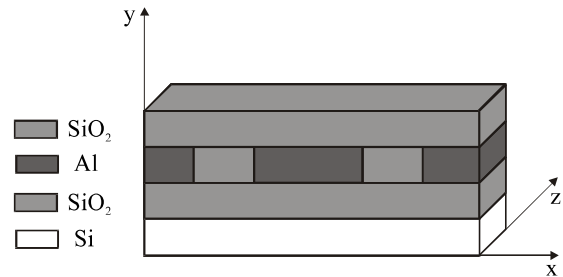


Рис. 5. Упрощенная модель кристалла

Для решения тепловой задачи (определения температуры модели кристалла ИМС) используется уравнение теплопроводности следующего вида [9]:

$$c_l \cdot \rho_l \cdot \frac{\partial T_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_l(T, t) \cdot \frac{\partial T_l}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_l(T, t) \cdot \frac{\partial T_l}{\partial y} \right] + q_l(x, y, t), \quad (11)$$

где T_l – температурное поле на l -м слое (l – обозначение слоя на чипе (Si, SiO_2 , Al)); c_l – удельная теплоемкость l -слоя; ρ_l – плотность материала l -слоя; $K_l(T, t)$ – коэффициент теплопроводности; $q_l(x, y, z, t)$ – удельная мощность тепловых потерь, которая для диэлектрических участков определяется выражением (9), а для неоднородных проводящих структур соответствующее выражение приведено в работе [5].

Уравнение (11) представляет собой систему уравнений для многослойной микроструктуры. Для решения этой системы используется система граничных условий [4, 5].

Численный анализ проводился с помощью разработанного авторами пакета программ, включающего в себя решение дифракционной задачи для микросхемы в волноводе и решения электротепловой задачи для микросхемы с упрощенной моделью кристалла.

Динамика электротепловых процессов в микроструктурных элементах с учетом потерь в диэлектрике

Численный расчет динамики электротепловых процессов в микроструктурных элементах кристалла ИМС при воздействии высокоинтенсивных электромагнитных полей проводился с использованием упрощенной модели кристалла (см. рис. 5) с неоднородной металлизацией и одним диэлектрическим включением в металлизации вдоль пути прохождения тока. Сечение упрощенной модели кристалла в плоскости

ется в неоднородной металлизации. На рис. 8 представлена динамика изменения температуры диэлектрического участка (кривая 1) и наиболее уязвимого локального участка (5, 6, рис. 7) металлизации (кривая 2).

Из полученной зависимости следует, что в данном временном диапазоне для диэлектрического участка имеет место выход на режим, близкий к стационарному.

Другую картину можно наблюдать для локального участка металлизации (кривая 2, рис. 8). 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 локальному участку металлизации, электропроводностью данного участка, общим сопротивлением разрядной цепи увеличивается скорость повышения температуры локального участка, что вызывает его деструкцию (рис. 8).

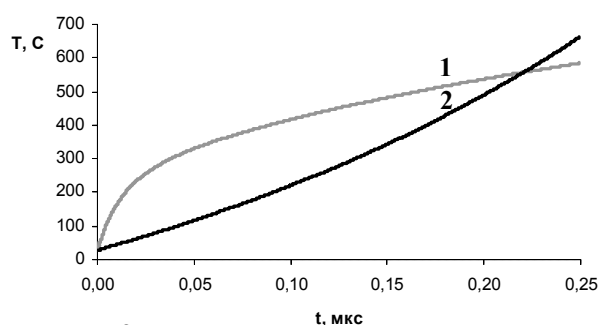


Рис. 8. Динамика изменения температуры диэлектрического участка (кривая 1) и локального участка металлизации (кривая 2)

В случае расположения неоднородного участка на границе с диэлектриком время деструкции этого участка наступает быстрее при учете потерь в диэлектрике по сравнению со случаем, когда потери не учитываются.

Заключение

Произведен численный расчет динамики развития электротепловых процессов в проводящих и диэлектрических микроструктурных элементах микросхем при воздействии электромагнитных полей СВЧ-диапазона с учетом тепловых потерь в диэлектрических структурах. Получены выражения для удельной мощности тепловых потерь в диэлектрических структурах микросхем. Рассмотрена динамика изменения температурного поля кристалла микросхемы с учетом неравномерного разогрева металлизации и диэлектрического участка. Проведенные расчеты показали, что учет потерь в диэлектрике существенно влияет на динамику электротепловых процессов в проводящих микроструктурных элементах. Следует отметить, что при исследовании процессов в диэлектрических микроструктурных элементах предполагалось, что $\operatorname{tg}(\delta)$ остается неизменным с повышением температуры (отсутствуют данные по данному параметру). Однако и при таком приближении влияние потерь в диэлектрике сильно сказывается на развитии электротепловых процессов в микроструктурных элементах микросхем.

Литература: 1. Магда И.И., Блудов С.Б. Исследование физических механизмов деградации изделий электронной техники в мощных электромагнитных полях // *Материалы 3-й*

Крымской конференции «СВЧ-техника и спутниковый прием. Севастополь. 1993. Т. 5. С. 523-526. 2. Everett W.W., Everett J.W. Microprocessor Susceptibility to RF Signals-Experimental Results // *Proc. Of the 1984 Southeastcon*. 1084. P. 512-516. 3. Старостенко В.В., Таран Е.П., Григорьев Е.В., Борисов А.А. Воздействие электромагнитных полей на интегральные микросхемы // *Измерительная техника*. М., 1998. № 4. С. 65-67. 4. Старостенко В.В., Григорьев Е.В., Малишевский С.В., Таран Е.П. Механизмы воздействия электромагнитных полей на интегральные микросхемы // *Радиоэлектроника и информатика*. 2002. Вып. 129. С. 107-110. 5. Таран Е.П., Старостенко В.В., Глумова М.В., Рукавишников А.В. Динамика развития необратимых деградационных процессов в проводящих микроструктурах интегральных микросхем при воздействии импульсных электромагнитных полей // *Харьков: Вестник ХНУ*. 2002. Вып. 1, № 544. С. 167-172. 6. Taran Ye.P., Starostenko V.V. and Grigor'ev Ye.V. Effect of Heterogeneity Parameters of Conducting Microstructures of Integrated Circuits on the Wunsch-Bell Curve // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2002. 57 (8-9). P. 105-112. 7. Старостенко В.В. Токовые характеристики неоднородных проводящих микроструктур интегральных микросхем при воздействии электромагнитных полей // *Радиоэлектроника и информатика*. 2002. Вып. 22, №1. С. 15-17. 8. Корзо В.Ф., Черняев В.Н. Диэлектрические пленки в микроэлектронике. М.: Энергия, 1977. 368 с. 9. Штерн Л. Основы проектирования интегральных схем. М.: Энергия, 1973. 234 с. 10. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.

Поступила в редколлегию 12.06.2007

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Гордиенко Ю.Е.

Старостенко Владимир Викторович, д-р физ.-мат. наук, зав. каф. радиофизики и электроники 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, раб. тел.: (8-0652) 23-03-60.

Грибский Максим Павлович, аспирант каф. радиофизики и электроники ТНУ. Научные интересы: экспериментальные исследования деградационных процессов в микроструктурных элементах интегральных микросхем при воздействии электромагнитных полей. Адрес: Украина, 95053, Симферополь, ул. Бетховена, 113, кв. 88.

Полетаев Дмитрий Александрович, аспирант кафедры радиофизики и электроники Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Научные интересы: СВЧ-диагностика материалов, численное моделирование взаимодействия резонансных датчиков с объектами. Адрес: Украина, 95007, Симферополь, пр. Вернадского, 4, тел. (0652) 608260.

Таран Евгений Павлович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиофизики и электроники Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Научные интересы: численное моделирование процессов взаимодействия электромагнитных волн с пленочными микроструктурными элементами. Адрес: Украина, 95007, Симферополь, пр. Вернадского, 4, тел. (0652) 608260.

Чурюмов Геннадий Иванович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физических основ электронной техники ХНУ-РЭ. Научные интересы: моделирование нелинейных электронно-волновых процессов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 702-10-57.