

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОВОДЯЩИХ СТРУКТУРАХ МИКРОСХЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С УЧЕТОМ СКИН-ЭФФЕКТА

ГРИГОРЬЕВ Е.В., СТАРОСТЕНКО В.В.,
ТАРАН Е.П., ЧУРЮМОВ Г.И.

Рассматриваются особенности динамических процессов в проводящих структурах микросхем при воздействии импульсных электромагнитных полей с учетом скин-эффекта. Разрабатывается численная модель, учитывающая влияние скин-эффекта и неоднородности металлизации на динамику развития электротепловых процессов в микросхемах. Выводится зависимость ослабления поля от толщины проводящих структур микросхем. Устанавливаются количественные соотношения пороговых значений напряженности электрического поля падающей электромагнитной волны от длительности импульса.

Введение

Экспериментальные исследования непосредственного воздействия импульсных электромагнитных полей (ИЭМП) на интегральные микросхемы (ИМС) выявили наименее стойкий к данному виду воздействия микроструктурный элемент (МСЭ) – металлизацию, позволили установить пороговые значения напряженностей электрической компоненты ИЭМП, при которых начинаются деградиационные явления в МСЭ и отказы микросхем, обнаружили однозначную связь этих пороговых значений напряженностей полей со взаимной ориентацией ИЭМП и ИМС [1]. Дальнейшее исследование данного вида воздействия на микросхемы осуществлялось с помощью численной модели взаимодействия электромагнитной волны с ИМС, которая включала в себя решение дифракционной и электротепловой задач [2,3]. Адекватность этой модели следовала из сравнения с данными экспериментов времени развития локальных прожогов, геометрических размеров участков с прожогами, а также времени прожога металлизации, соответствующего катастрофическому отказу микросхемы.

Причиной выхода проводящих МСЭ из строя при воздействии ИЭМП на ИМС являются токи проводимости, наведенные электрической компонентой воздействующего поля. При моделировании динамических процессов в целях выявления причин локализации тепла в металлизации проводящие МСЭ дискретизировались и представлялись в виде конечной совокупности сопротивлений (заменились сеткой сопротивлений) [2,3]. Такое представление позволяет, в частности, учесть распределение наведенного тока в проводящих МСЭ с учетом скин-эффекта и исследовать влияние подобного рода распределения тока на развитие дег-

радиационных процессов в данных микроструктурных элементах микросхем при воздействии на них ИЭМП.

Целью данной работы является исследование динамических электротепловых процессов в металлизации микросхем при воздействии на них ИЭМП с учетом скин-эффекта.

Дискретизация металлизации при учете скин-эффекта

При решении электротепловой задачи для модели микросхемы напряжение, найденное из решения дифракционной задачи, прикладывалось к модели кристалла, состоящей из подложки (Si), двух слоев окиси кремния (SiO_2) и слоя, имитирующего проводящие микроструктурные элементы кристалла (Al) (рис. 1). Учесть реальную топологию элементов на кристалле для различных типов микросхем достаточно сложно. Однако с учетом того, что наиболее уязвимым МСЭ при воздействии ИЭМП на ИМС является металлизация, данный слой кристалла включал в себя последовательное соединение проводящих участков, разделенных участками из диэлектрика [2] (см. рис. 1). Электрическая цепь в этом случае включала в себя напряжение, приложенное к кристаллу (вдоль направления ОХ, рис. 1), проводящие участки с соответствующими токами проводимости, замыкающиеся через токи смещения участков в диэлектрике. Для учета специфики прожога металлизации при воздействии ИЭМП на ИМС, связанную с неоднородностью структуры (омической неоднородностью), модель металлизации была представлена в виде дискретных участков (микроучастков) с заданной электропроводностью (рис. 2). Электротепловая задача решалась для двумерной модели кристалла и двумерной сетки сопротивлений.

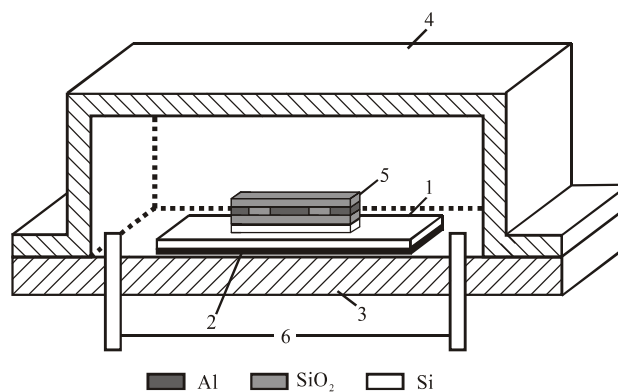


Рис. 1. Модель микросхемы и кристалла: 1 – подложка; 2 – слой клея; 3 – основание корпуса; 4 – крышка корпуса; 5 – кристалл; 6 – выводы

Экспериментальные исследования непосредственного воздействия ИЭМП на ИМС осуществлялись для ИМС КР155, 174, 315, 555, 559, 561 и 564 серий, с биполярными и КМОП структурами, с размерами чипов от 1x1 до 2,5x2,5 мм, с количеством элементов на чипе $10^3 \dots 10^4$, с 14 или 16 выводами, в пластмассовом корпусе; исследования проводились на длине волны 10 см [1]. Для характерных размеров рассматриваемого класса микросхем решались

дифракционная и электротепловая задачи [2]. При решении электротепловой задачи толщина металлизации бралась характерной для рассматриваемого класса микросхем (1 мкм).

При воздействии ИЭМП на ИМС в проводящих МСЭ напряженность поля, а следовательно, и плотность тока ($\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} - \vec{j}$ – вектор плотности тока, σ – удельная проводимость металлизации, \vec{E} – вектор напряженности электрической компоненты ИЭМП) распределяется по толщине проводящей пленки (направление $0y$, рис. 2) в соответствии с соотношением [4]:

$$E(y)/E(0) = \exp(-\delta \cdot y), \quad (1)$$

где $\delta = \sqrt{\omega \cdot \sigma \cdot \mu_0 / 2}$ – постоянная затухания; ω – несущая частота воздействующего ИЭМП; σ_0 – удельная проводимость алюминия (в расчетах $\sigma_0 = 3,5 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$); μ_0 – магнитная постоянная.

Следует отметить, что соотношение (1), а также приведенные выше соображения и последующие численные расчеты приводятся для случая, когда вектор электрической компоненты падающей электромагнитной волны параллелен плоскости кристалла микросхемы (рис.3). При такой взаимной ориентации ИЭМП и ИМС скин-эффект будет проявляться по толщине металлизации (направление $0y$). В случае, когда вектор электрической компоненты воздействующего поля нормален к плоскости кристалла, ток, наведенный электрической компонентой ИЭМП в проводящих МСЭ, практически будет отсутствовать, а скин-эффект будет проявляться в проводящих структурах в плоскости XOZ .

На рис. 4 приведены зависимости ослабления поля ($E(y)/E(0)$) в зависимости от толщины металлизации для длин волн $\lambda = 10, 7$ и 3 см. Как следует из рис. 4, уже на длине волн $\lambda = 10$ см напряженность электрического поля ослабляется в 2 раза на глубине металлизации 1 мкм, что приводит соответственно и к уменьшению плотности тока также в 2 раза. При воздействии ИЭМП на ИМС с длиной волн $\lambda = 3$ см плотность тока на глубине метал-

лизации 1 мкм уменьшается более чем в 3 раза в сравнении с плотностью тока на поверхности металлизации.

В современных микросхемах с большим количеством дискретных элементов на кристалле толщина металлизации может быть на порядок меньше, чем для рассматриваемого класса микросхем, и скин-эффект для них практически не влияет на распределение плотности тока по толщине металлизации на длинах волн, для которых приведены расчеты (рис.3). Однако и стойкость таких микросхем по отношению к воздействию ИЭМП намного ниже, чем стойкость рассматриваемого класса ИМС.

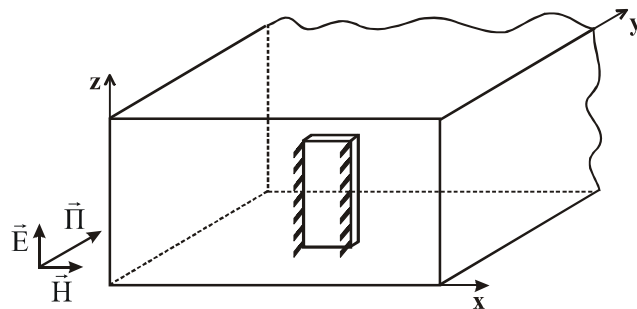


Рис. 3. Ориентация микросхемы в волноводном тракте относительно падающей электромагнитной волны

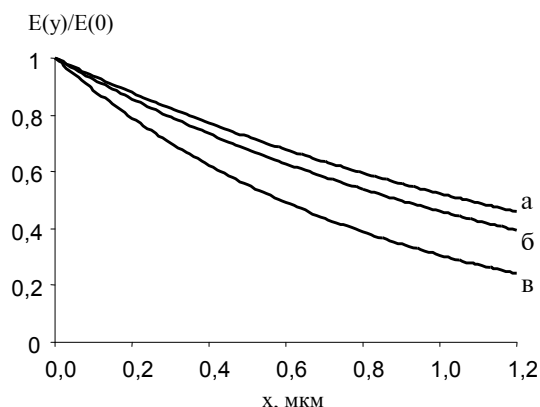


Рис. 4. Зависимость ослабления поля от толщины металлизации: а – $\lambda = 10$ см; б – $\lambda = 7$ см; в – $\lambda = 3$ см

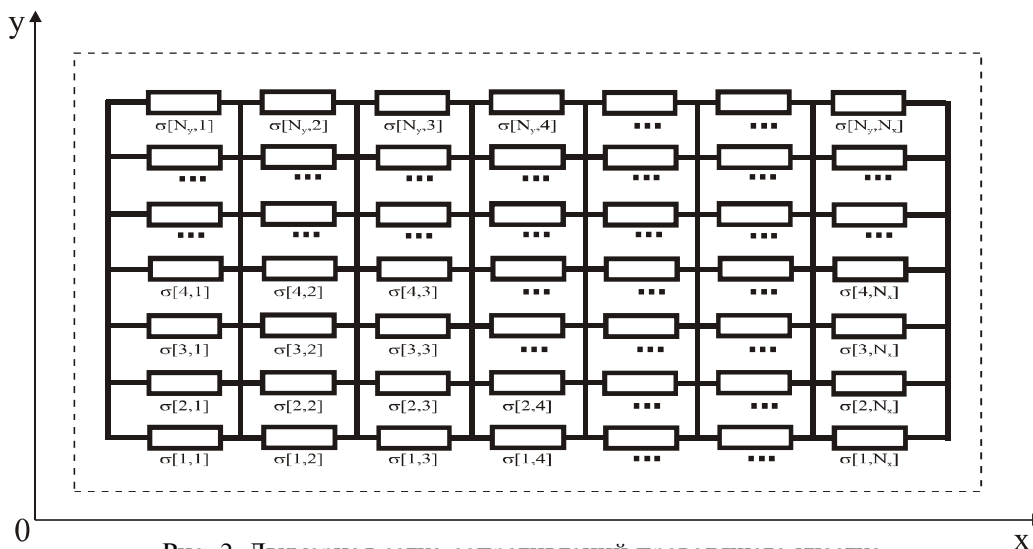


Рис. 2. Двумерная сетка сопротивлений проводящего участка

Для учета распределения тока по толщине металлизации при воздействии ИЭМП на ИМС достаточно в модели проводящих микроструктурных элементов учесть два типа неоднородностей: первый, связанный с неоднородностью металлизации, и второй – учитывающий распределение тока вследствие скин-эффекта. Эти два типа неоднородностей являются независимыми и накладываются друг на друга. Следует отметить, что в реальных проводящих структурах при воздействии ИЭМП на ИМС сопротивление не меняется по толщине, а ослабление поля и тока обусловлено скин-эффектом. Введение дополнительного распределения сопротивления металлизации по толщине приведет к увеличению эквивалентного сопротивления, следовательно, и к уменьшению среднего тока, протекающего по металлизации. При сравнении тепловых процессов в металлизации с учетом и без учета скин-эффекта в численных расчетах необходимо, чтобы в металлизации рассеивалась одинаковая тепловая мощность.

Мощность, которая рассеивается на металлизации, без учета скин-эффекта (однородная металлизация):

$$P_1 = \sigma_0 E_{\text{пад}}^2 V, \quad (2)$$

где $E_{\text{пад}}$ – напряженность электрической компоненты падающей электромагнитной волны; V – объем металлизации.

Средняя мощность, рассеиваемая на металлизации, с учетом скин-эффекта:

$$P_2 = \int_V \sigma E^2(y) dV, \quad (3)$$

здесь $E(y)$ – напряженность электрического поля в металлизации.

С учетом (2) имеем:

$$P_2 = \int_V \sigma_0 E^2(0) e^{-2\delta \cdot y} dV = E^2(0) \int_V \sigma_0 e^{-2\delta y} dV = E^2(0) \int_V \sigma(y) dV, \quad (4)$$

где $\sigma(y) = \sigma_0 e^{-2\delta y}$ – распределение электропроводности по глубине металлизации; $E(0)$ – эквивалентная напряженность поля на поверхности металлизации.

Из сравнения мощностей (P_1 и P_2) получим выражение для напряженности поля $E(0)$:

$$E(0) = \sqrt{\frac{\Delta}{\int_0^{\Delta} e^{-2\delta y} dy}} E_{\text{пад}} = \sqrt{\frac{2\delta\Delta}{1 - e^{-2\delta\Delta}}} E_{\text{пад}}, \quad (5)$$

где Δ – толщина металлизации.

Для длины волны $\lambda = 10$ см воздействующего электромагнитного поля и толщины металлизации $\Delta = 1$ мкм относительное изменение напряженности составляет 1,4 ($E(0)/E_{\text{пад}} = 1,4$). Таким образом, при учете скин-эффекта путем введения дополни-

тельного сопротивления в металлизации по толщине ее удельная электропроводность должна меняться согласно закону $\sigma'(y) = \sigma e^{-2\delta y}$, а значения напряженности поля на поверхности металлизации – $E(0) = 1,4 E_{\text{пад}}$.

Характер развития электротепловых процессов в металлизации микросхем при воздействии электромагнитных полей с учетом скин-эффекта

Численный расчет динамики развития электротепловых процессов в микроструктурных элементах ИМС при воздействии ЭМП показал, что на начальной стадии развития электротепловых процессов наблюдается локализация тепла в приповерхностном слое металлизации. Это влияет на время развития деградационных процессов: «выгорание» однородной металлизации с учетом скин-эффекта начинается в приповерхностном слое (рис. 5) через $t = 0,3$ мкс после воздействия электромагнитного поля с напряженностью $E_m = 100$ кВ/м, в то время как без учета скин-эффекта время начала выгорания металлизации $t = 2,04$ мкс.

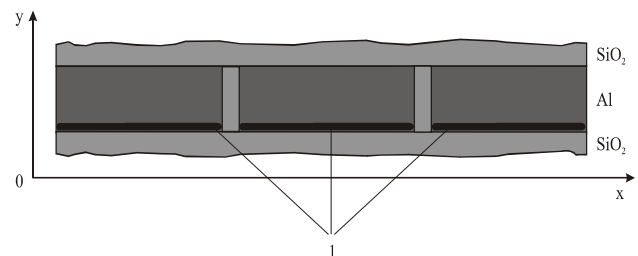


Рис. 5. Структура металлизации после воздействия ЭМП с напряженностью $E_m = 100$ кВ/м через $t = 0,3$ мкс (1 – участки «выгорания» металлизации)

Неоднородная структура металлизации существенно влияет на характер и динамику развития деградационных процессов [2]. Учет скин-эффекта уменьшает время выгорания микроучастков в металлизации вблизи поверхностного слоя, так как там сосредоточена основная часть рассеиваемого поля и происходит перераспределение тока по толщине металлизации. Характер развития электротепловых процессов в металлизации с учетом и без учета скин-эффекта отличается на начальной стадии воздействия ИЭМП. В то же время для заданной толщины металлизации (порядка 1 мкм) при временах $t = 10^{-9} \div 10^{-8}$ с результаты развития электротепловых процессов с учетом и без учета скин-эффекта практически совпадают [2]. Это связано с тем, что для данного временного интервала на распределение температурного поля вдоль толщины начинает оказывать наибольшее влияние тепловой поток (температурный градиент).

С помощью численной модели получена зависимость пороговой напряженности падающей электромагнитной волны, при которой происходит выгорание микроучастка металлизации, от длительности импульса (длина волны $\lambda = 10$ см) с учетом скин-эффекта (аналог кривой Вунша-Белла [5], рис. 6, кривая а).

Данная зависимость достаточно качественно повторяет кривую для неоднородной металлизации без учета скин-эффекта (кривая б, рис.6). В то же время имеет место уменьшение времени развития деградационных процессов в среднем на 75 % для заданной величины напряженности воздействующего электромагнитного поля.

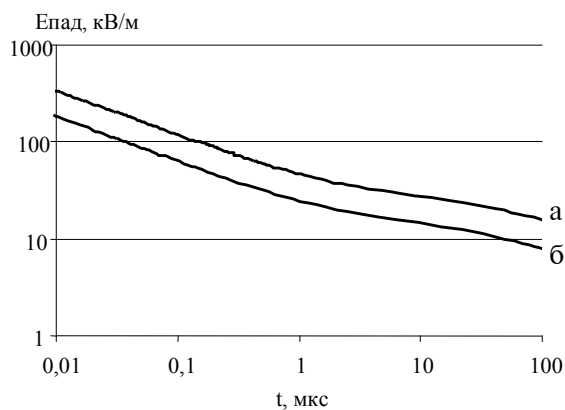


Рис. 6. Зависимость пороговой напряженности падающей электромагнитной волны от длительности импульса для неоднородной структуры металлизации: а — без учета скин-эффекта; б — с учетом скин-эффекта

Заключение

На основе численной модели воздействия ИЭМП на микросхемы установлено, что скин-эффект влияет на характер электротепловых процессов на начальной стадии развития деградационных процессов (наблюдается локализация тепла в приповерхностном слое металлизации). Дальнейшее развитие электротепловых процессов определяется, в основном, неоднородностью металлизации и тепловыми потоками по ее толщине. В то же время имеет место снижение пороговых значений напряженностей электрического поля, при которых происходит локальная деградация и выгорание металлизации.

Литература: 1. Старостенко В.В., Таран Е.П., Григорьев Е.В., Борисов А.А. Воздействие электромагнитных полей на интегральные микросхемы // Измерительная техника. 1998. № 4. С.65-67. 2. Таран Е.П., Старостенко В.В., Глушова М.В., Рукавишников А.В. Динамика развития необратимых деградационных процессов в проводящих микроструктурах интегральных микросхем при воздействии импульсных электромагнитных полей // Вестник Харьковского национального университета. 2002. № 544. Вып. 1. С.167-172. 3. Старостенко В.В. Токовые характеристики неоднородных проводящих микроструктур интегральных микросхем при воздействии электромагнитных полей // Радиоэлектроника и информатика. 2002. №1 (22). С.15-17. 4. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1976. 614с. 5. Wunsch D.C., Bell R.R. Determination Of Threshold Failure In Metallization Due To Pulse Voltages // IEEE Trans., 1970. Vol. NS-18, № 4. P.212-220.

Поступила в редколлегию 12.12.2003

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

Григорьев Евгений Владимирович, старший преподаватель кафедры радиофизики Таврического национального университета (ТНУ). Научные интересы: экспериментальные исследования деградационных процессов в микроструктурных элементах интегральных микросхем при воздействии электромагнитных полей. Адрес: Украина, 95007, Симферополь, ул. Ялтинская, 4.

Старостенко Владимир Викторович, канд. физ.-мат. наук, зав. кафедрой радиофизики 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, старший преподаватель кафедры радиофизики ТНУ. Научные интересы: моделирование процессов в микроструктурах при воздействии электромагнитных полей. Адрес: Украина, 95004, Симферополь, ул. Лермонтова, 11, кв.79, тел.: раб. (0652)230360, дом. (0652)251466. E-mail: tatan@tnu.crimea.ua.

Чурюмов Геннадий Иванович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: моделирование процессов в микроструктурах при воздействии электромагнитных полей. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тал. 702-10-57.