

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОЙКОСТИ МИКРОСХЕМ ПРИ ИХ РАБОТЕ В НАПРЯЖЕННЫХ ТОКОВЫХ РЕЖИМАХ

**М.П. Грибский, В.В. Старостенко, Е.В. Григорьев, Е.П. Таран,
С.А. Зувев, Д.А. Унжаков**

*Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского,
пр. Вернадского, 4, г. Симферополь, 95007, Украина,
e-mail: taran@tnu.crimea.ua*

В работе получены данные по стойкости микросхем при воздействии мощных импульсных электромагнитных полей. получены численные значения пороговых полей катастрофических отказов к рассматриваемому виду воздействия вплоть до микросхем с 30 нанометровой технологией и размерами кристаллов до 20x20мм.

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые приборы и микросхемы рассчитаны и эксплуатируются в радиоэлектронной аппаратуре, как правило, в номинальных режимах. Существующие многоуровневые системы автоматизированного проектирования приборов также используют численно-аналитические модели для номинальных режимов их работы. Физика процессов в приборах, работающих при напряженных токовых и тепловых режимах, практически не исследована. Такие режимы могут быть, в частности, при воздействии на аппаратуру мощных импульсных электромагнитных полей (ИЭМП), сбоях в цепях питания, в ряде других случаев [1].

В настоящее время практически вся обработка информации сосредоточена в микросхемах, поэтому их работе в напряженных токовых режимах следует уделять особое внимание. Современные микросхемы имеют очень большое количество микроструктурных элементов на монокристалле (подложке) – проводящих, диэлектрических и активных. Для их электрических связей используется многослойная металлизация в кристалле микросхемы. При воздействии мощных ИЭМП образуются цепи разряда, состоящие из последовательного соединения различных микроструктурных элементов. Экспериментальные исследования по непосредственному воздействию мощных ИЭМП на современные микросхемы [2,3] позволяют определить вид и характеристики разрядных цепей, что, в свою очередь, дает возможность прогнозировать стойкость микросхем к рассматриваемому виду излучения.

Целью данной работы является прогнозирование стойкости современных микросхем при воздействии мощных импульсных электромагнитных полей с использованием экспериментальных данных [4,5] и численно-аналитических моделей [6].

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В работах [4,5] приведены результаты экспериментальных исследований по непосредственному воздействию импульсных электромагнитных полей на современные микросхемы. При исследованиях были выбраны типовые микросхемы; например микроконтроллеры - ATtiny15 и PIC16F628-20I/P, микросхемы памяти – 24LC16 и 27C256-20FA, микросхемы АЦП и ЦАП, микросборки приемников, передатчиков и др. (всего 180 микросхем). Непосредственное воздействие мощных ИЭМП осуществлялось в волноводном тракте. Волноводные методы проведения исследований в сравнении с подобными исследованиями в свободном пространстве имеют преимущества и недостатки. Недостатком волноводных исследований является

необходимость выполнения условия $l \ll a, b$, где l – наибольший геометрический размер микросхемы, a и b – размеры сечения прямоугольного волновода. Исследования проводились на длине волны 10 см, в волноводных трактах 34x72 мм или 45x90 мм. Для тестирования функционального состояния микросхем использовался компьютер.

При воздействии мощных ИЭМП на микросхемы катастрофические отказы наступают вследствие прожога контактных площадок (30%), прожога проводящих дорожек (30%), одновременного теплового разрушения проводящих дорожек и полупроводниковых приборов (40%). Пороговые значения поля, при которых начинаются сбои и катастрофические отказы, зависят от ориентации микросхем относительно поля и размеров кристалла. Для микросхем с кристаллами 4x4мм катастрофические отказы наступают при воздействии полей с напряженностью электрической компоненты в 75–85 кВ/м (плоскость кристалла параллельна вектору напряженности электрической компоненты поля). Сбои в работе микросхемы относительно поля этой же ориентации начинаются при воздействии импульсов с напряженностью 5–7 кВ/м. Функциональное назначение микросхем не влияет на пороговые значения сбоев и катастрофических отказов при воздействии электромагнитного излучения.

Исходными для прогнозирования стойкости микросхем являются статистические данные выхода из строя микроструктурных элементов и пороговые значения полей.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОЙКОСТИ МИКРОСХЕМ

При воздействии мощных ИЭМП в кристалле микросхем образуются разрядные цепи. Несмотря на большое разнообразие микроструктурных элементов (МСЭ) кристалла, достаточно рассмотреть два основных вида разрядных цепей с пассивными и активными элементами (рис.1, 2).

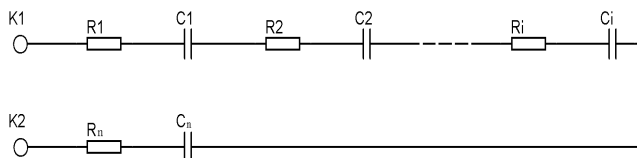


Рисунок 1 – Эквивалентная схема цепей разряда из проводящих микроструктурных элементов

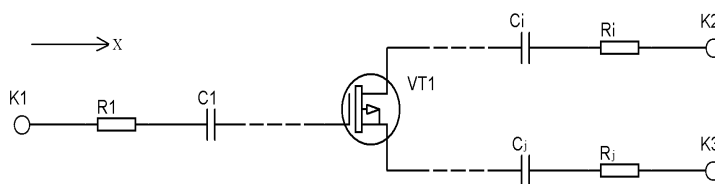


Рисунок 2 – Эквивалентная схема цепи разряда для активных и проводящих микроструктурных элементов

Катастрофический отказ микросхем при воздействии мощных ИЭМП происходит в основном при прожоге металлизации на подложке кристалла. Верхние слои металлизации имеют геометрические размеры намного больше (их сопротивление намного меньше), чем у проводников на подложке. Ниже будет рассмотрена только разрядная цепь, показанная на рис.1.

При моделировании электротепловых процессов напряжение, прикладываемое к цепям разряда, находится из решения дифракционной задачи для микросхемы в волноводе [7]. На следующем этапе моделирования процессов взаимодействия мощных ИЭМП с МСЭ кристалла одним из основных является вопрос нахождения эквивалентной емкости цепи разряда. Для цепи разряда с реальными значениями геометрических параметров микроструктурных элементов (рис.1,2) всегда выполняется соотношение

$$R_{\Sigma} \ll 1 / \omega C_{\text{экв}}, \quad (1)$$

где R_{Σ} – эквивалентное сопротивление проводящих микроструктурных элементов; $C_{\text{экв}}$ – эквивалентная емкость разделительных диэлектрических пленок. Ток смещения определяет ток в цепи разряда. Физически это объясняется следующим образом. При падении волны на проводящие структуры происходит «закоротка» пространства. Разность потенциалов и объемный ток через проводник определяются его сопротивлением. Малое сопротивление проводника приводит к малой разности потенциалов и наоборот. В случае металлодиэлектрической структуры и выполнении условия (1) ток смещения в диэлектрике определяет ток проводимости в проводнике.

Величину эквивалентной разрядной емкости найдем из экспериментальных данных. Привязка к экспериментальным данным была сделана для микросхем с площадью кристалла 4x4 мм, с дорожками на подложке кристалла шириной 120 нм, со значением порогового поля, при котором наступают катастрофические отказы - 80 кВ/м. Частота заполнения воздействующих радиоимпульсов - $f = 3$ ГГц. Пороговые значения стойкости микросхем взяты для случая, когда грань кристалла с МСЭ расположена параллельно вектору \vec{E} волны H_{10} в волноводе. Для этих положений МСЭ относительно поля были проведены все последующие расчеты.

На рис.3 приведены зависимости тока от емкости, построенные для оговоренных выше данных. Расчет соответствующих зависимостей сделан для кристаллов с размерами от 4x4мм, до 20x20 мм. Ток в разрядной цепи связан с эквивалентной емкостью линейной зависимостью. При расчетах предполагалось, что на микросхемы с кристаллами различных размеров действует ИЭМП с одинаковым значением напряженности поля.

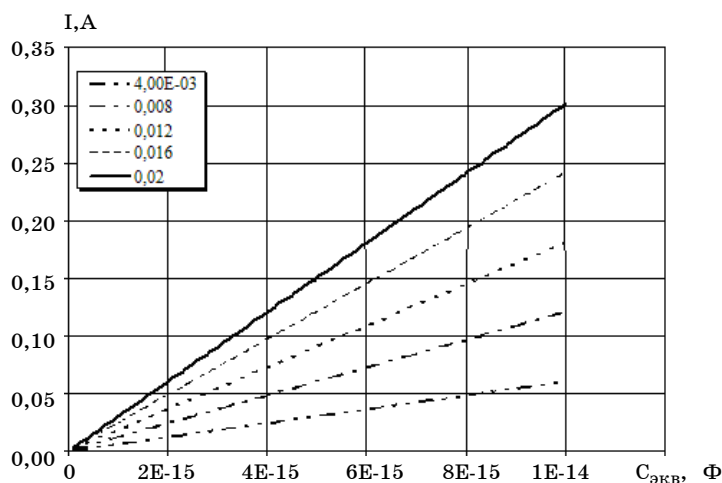


Рисунок 3 – Зависимость тока в цепи пробоя от эквивалентной емкости

Для нахождения значения эквивалентной емкости требуется найти энергию, необходимую для расплавления типичного медного микроструктурного элемента с подслоем из тантала на подложке кристалла. Расчеты проводились для следующих параметров дорожки на подложке: ширина – 120 нм, толщина медной пленки варьировалась от 30 до 120 нм, длина дорожки принималась равной 1 мкм, толщина танталовой пленки – 10 нм. Из этих значений находились массы медной и танталовой пленок. Значения плотностей меди и тантала, их теплоемкостей и т.д. определялись из справочной литературы.

Расчеты показали, что для расплавления за 1 мкс дорожки из меди с подслоем из титана сечением 120x60 нм ток должен быть 4 мА, а значение эквивалентной емкости $C_{\text{ЭКВ}} = 6,8 \cdot 10^{-16}$ Ф. В том случае, когда медная пленка имеет сечение 120x120 нм, значение эквивалентной емкости $C_{\text{ЭКВ}} = 1,4 \cdot 10^{-15}$ Ф, а ток пробоя – 8,2 мА. Неизменной характеристикой теплового пробоя за 1 мкс медных с подслоем из титана микроструктурных элементов является значение плотности тока $j \approx 0,5 \cdot 10^{12}$ А/м² = 5кА/мм². Это значение плотности тока для медной пленки с подслоем из тантала соответствует точке на критериальной рассматриваемой слоистой проводящей структуры.

Из зависимости Вунша-Белла [9] при длительности импульса в 1 мкс для полученных значений эквивалентной емкости и тока пробоя были рассчитаны зависимости пороговых значений полей, при которых микросхемы выходят из строя, для различных значений ширины дорожек (различных технологий) и для различных размеров кристаллов. На рис.4 приведена зависимость пороговых значений напряженности электрической компоненты ИЭМП от ширины дорожки h на подложке для кристаллов с размерами 4x4 мм. В окошке на рис.4 указаны толщины Δ пленок в нанометрах.

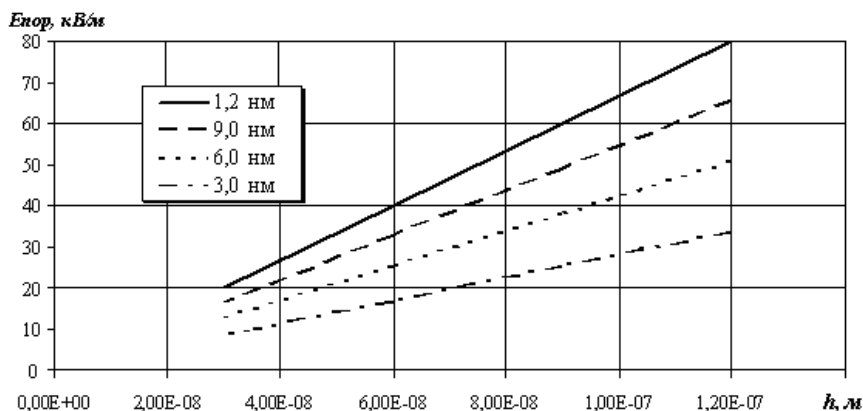


Рисунок 4 – Зависимость порогового напряжения от ширины проводящей дорожки (кристалл 4x4мм)

Расчеты производились для случая, когда плоскость с микроструктурными элементами кристалла микросхем параллельна вектору напряженности электрической компоненты воздействующего поля. В этом случае напряжение, приложенное к разрядной цепи, $U = E \cdot l$, где l – длина разрядной цепи. При расчетах l принималось равным расстоянию между контактными площадками.

На рис.5 приведены зависимости порогового напряжения от размеров кристалла D.

Для различных типов микросхем значение эквивалентной емкости и

разрядного тока может быть различным, но экспериментальные данные показывают, что для микросхем с одинаковыми размерами кристаллов значения пробойного напряжения практически одинаковы. Следовательно, $S_{\text{ЭКВ}}$ и пробойный ток практически совпадают.

Из графиков, приведенных на рис.4, видно, что уменьшение толщины проводящих дорожек приводит к снижению стойкости микросхем. Так, для кристалла 4x4 мм уменьшение толщины пленки Δ от 120 нм до 30 нм снижает стойкость микросхем с 80 кВ/м до 37 кВ/м. На стойкость микросхем сильно влияют размеры кристалла, они однозначно определяют величину напряжения разрядной цепи. Увеличение размеров кристалла D с 4x4 мм до 20x20 мм (сечение дорожки 120x120 нм) приводит к снижению стойкости микросхем в 4 раза, с 80кВ/м до 20кВ/м (рис.5).

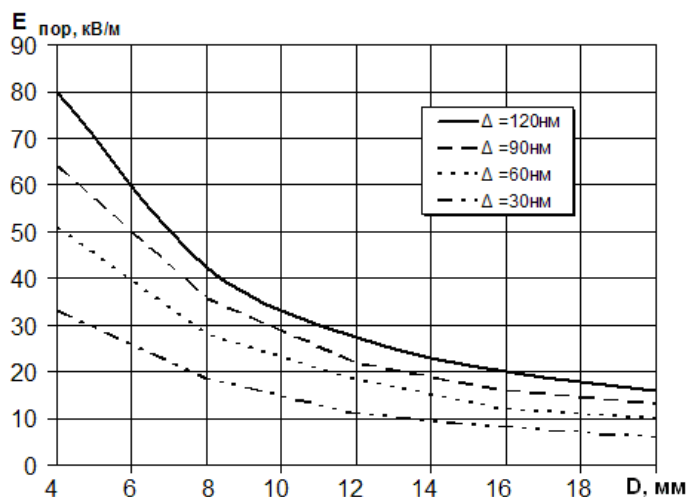


Рисунок 5 – Зависимость порогового напряжения от размеров кристалла D (в окошке дан вид линий для разной толщины дорожки)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены данные по стойкости микросхем при воздействии мощных импульсных электромагнитных полей. Обоснована физика развития электротепловых и деградационных процессов и получены численные значения пороговых полей катастрофических отказов. Приведенные данные позволяют прогнозировать стойкость микросхем к рассматриваемому виду воздействия вплоть до микросхем с 30 нанометровой технологией и размерами кристаллов до 20x20мм. Одной из рекомендаций повышения стойкости радиоэлектронной аппаратуры к воздействию электромагнитных полей является использование микросхем с кристаллами небольших размеров.

SUMMARY

FORECASTING OF STABILITY OF MICROCIRCUITS AT THEIR WORK IN INTENSE CURRENT MODES

M.P.Gribskiy, V.V.Starostenko, Ye.V.Grygoriev, Ye.P.Taran, S.A.Zuev, D.A.Unzhakov
 Taurida national university V.I.Vernadsky, Vernadsky avenue 4, Simferopol - 95007, Ukraine,
 e-mail: taran@tnu.crimea.ua

In work the data on stability of microcircuits influence of powerful pulse electromagnetic fields are received. Numerical values of threshold fields of catastrophic refusals to a considered

kind of influence down to microcircuits with 30 nanometers technology and in the sizes of crystals up to 20x20 millimeters are received.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Кравченко В.И. Электромагнитное оружие. - Харьков: ННТУ «ХПИ», 2008. – 185с.
2. Gribskii M.P., Grigor'ev E.V., Voitovich A.K., Zuev S.A., Starostenko V.V. and Churyumov G.I. Influence of Pulse Electromagnetic Fields on Current-Technology Microcontrollers // Telecommunications and Radio Engineering. – 2007. – Vol.66 (19). – P. 1791-1797.
3. Akhramovich L.N., Gribskii M.P., Grigor'ev E.V., Zuev S.A., Starostenko V.V. and Churyumov G.I. Influence of Pulse Electromagnetic Fields on Integrated Memory Chips // Telecommunications and Radio Engineering.- 2007. – Vol. 66 (19). – P. 1799-1804.
4. Грибский М.П., Григорьев Е.В., Старостенко В.В., Унжаков Д.А. Воздействие импульсных электромагнитных полей на микросхемы АЦП и ЦАП // Радиоэлектроника и информатика. – 2007. – №4. – С.24-26.
5. Грибский М.П., Григорьев Е.В., Зуев С.А., Старостенко В.В., Чурюмов Г.И., Унжаков Д.А. Воздействие импульсных электромагнитных полей на экранированные микросхемы // Прикладная радиоэлектроника.-Харьков.-2007.- Т.6, № 4. – С.590-593.
6. Грибский М.П., Старостенко В.В., Таран Е.П., Полетаев Д.А., Чурюмов Г.И. Динамика электротепловых процессов в диэлектрических структурах микросхем при воздействии электромагнитных полей //Радиоэлектроника и информатика. –2007. – №2. – С. 45–49.
7. Грибский М.П., Григорьев Е.В., Слипченко Н.И., Старостенко В.В., Таран Е.П., Унжаков Д.А. Модель кристалла микросхем для исследования напряженных токовых и тепловых режимов // Радиотехника: Всеукраинский межведом. н.-техн. сборник. – Харьков. – 2008. – Вып.153.-С.158-161.
8. Грибский М.П., Старостенко В.В., Таран Е.П., Трибрат М.И. Численный расчет динамики электротепловых процессов в проводящих структурах современных микросхем при воздействии электромагнитных полей // АСУ и ПА. – 2007. – Вып.139. – С.13-18.
9. Wunsch D.C. and Bell R.R. Determination Of Threshold Failure Of Semiconductor Diodes And Transistors Due To Pullse Voltages // IEEE Trans. – 1968. – Vol. NS-15, № 6. – P. 244-259.

Грибский М.П., аспирант кафедры радиофизики;
Старостенко В.В., доктор физ.-мат. наук;
Григорьев Е.В., кандидат техн. наук, доцент
кафедры радиофизики;
Таран Е.П., кандидат физ.-мат. наук, доцент
кафедры радиофизики;
Зуев С.А., кандидат техн. наук, доцент;
Унжаков Д.А., аспирант кафедры радиофизики

Поступила в редакцию 12 декабря 2008 г.