

*Н.И. СЛИПЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук, Е.П. ТАРАН, канд. физ.-мат. наук,
В.В. СТАРОСТЕНКО, д-р физ.-мат. наук, Д.А. ПОЛЕТАЕВ, канд. физ.-мат. наук,
С.П. АРСЕНИЧЕВ, М.В. ГЛУМОВА, канд. физ.-мат. наук*

ДИФРАКЦИЯ НА МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ В ВОЛНОВОДЕ

Введение

Воздействие мощных импульсных электромагнитных полей (МИЭМП) на современные интегральные микросхемы (ИМС) (процессоры, микроконтроллеры, микросхемы памяти, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи и др.) приводит к сбоям в их работе и катастрофическим отказам. Исследования показывают, что одной из основных причин выхода из строя ИМС является прожог проводящих микроструктурных элементов (МСЭ) – контактных площадок и проводников, соединяющих активные МСЭ кристалла микросхем [1]. Основным механизмом взаимодействия полей с МСЭ кристалла и выхода ИМС из строя при воздействии МИЭМП связывают с разрядными цепями, обусловленными дополнительными напряжениями на подводящих проводниках ИМС, контактных площадках или участках кристалла микросхем («антенный механизм») [2].

Наряду с «антенным механизмом» в деградиционных процессах в пленочных проводящих элементах кристалла ИМС может проявляться механизм, связанный с непосредственным взаимодействием электромагнитных полей с проводниками конечной проводимости, т.е. обусловленный скин-эффектом. С учетом скин-эффекта в работе [3] сделана оценка времени развития электротепловых процессов в проводящих пленках вплоть до их плавления при воздействии МИЭМП. Время развития деградиционных процессов в проводящих пленках зависит от параметров пленок и воздействующих полей и может достигать порядка миллисекунд при толщине пленки в десятки нанометров [3]. Это означает, что совместно с «антенным механизмом», а также самостоятельно, в деградиционных процессах в проводящих структурах кристалла ИМС участвует и механизм непосредственного воздействия полей на соответствующие структуры.

Для более глубокого исследования роли и участия этого механизма в электротепловых процессах проводящих МСЭ целесообразно кристалл ИМС аппроксимировать более простой моделью – металлодиэлектрической структурой (МДС). При этом необходимо совместно решать дифракционную и электротепловую задачи для МДС. Авторами разработана волноводная методика исследования воздействия МИЭМП на ИМС, которую целесообразно перенести на случай воздействия МИЭМП на МДС, в частности для проверки адекватности численной модели.

Цель работы – решение дифракционной задачи для МДС в волноводе и экспериментальная проверка ее численной реализации.

Основные положения численной модели

Развитие электротепловых обратимых (до плавления проводящей пленки) и необратимых (после плавления пленки) процессов в МДС с учетом конечной проводимости пленки при воздействии мощного электромагнитного излучения СВЧ диапазона определяется характеристиками МДС и поля, а в итоге – поглощенной мощностью. Базовой МДС является структура, представляющая собой проводящую пленку (1) на диэлектрической подложке (2) (рис.1). На соотношение волн при дифракции на МДС в волноводе большое влияние оказывает поляризационный фактор – взаимная ориентация поля и МДС [4]. Относительно вектора напряженности электрической компоненты \vec{E}_y волны H_{10} в прямоугольном волноводе можно выделить несколько характерных ориентаций объекта исследований (рис.2). Введенное обозначение ориентаций связывает расположение плоскости МДС (геометрические размеры

а и б, рис. 1) и направление компонент векторов поля для волны H_{10} (в середине волновода - максимум электрического поля). Таким образом, ориентация XY_E соответствует плоскости МДС в середине поперечного сечения волновода (рис. 2).

На рис. 2 показаны три характерные ориентации МДС в волноводе: а – ориентация XY_E ; б – ориентация YZ_E ; в – ориентация XZ_E . При численной реализации можно учесть произвольное расположение МДС в волноводе.

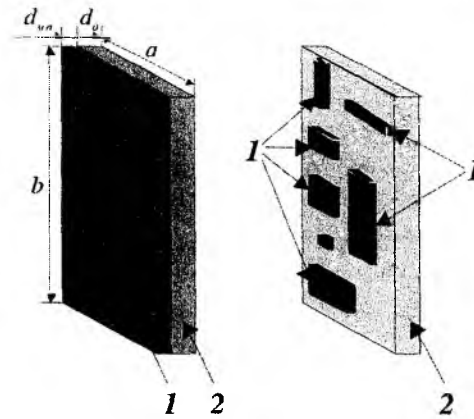


Рис. 1

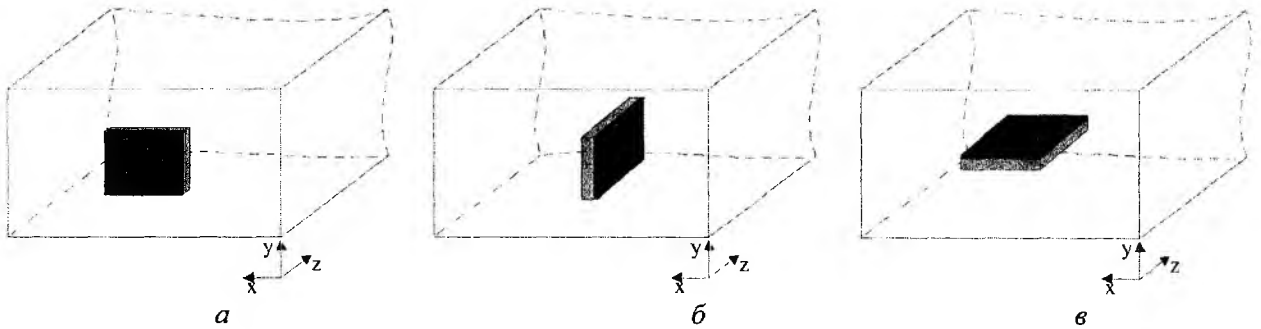


Рис. 2

Дифракционная задача для МДС в волноводе решалась с помощью декомпозиционного метода [5]. Моделируемая область с пленочным (в общем случае омически неоднородным) металлодиэлектрическим включением расположена между поперечными сечениями прямоугольного волновода S_1 и S_2 и была представлена в виде совокупности кубических автономных блоков, которые соединялись виртуальными волноводными каналами (рис.3). Для каждого кубического автономного блока на любой его грани тангенциальное поле \vec{E} представлялось в виде двух поперечных компонент T -волн соответствующих виртуальных волноводных каналов (рис.4):

$$\vec{E} \approx a_1 \cdot \vec{e}_1 + a_2 \cdot \vec{e}_2, \quad (1)$$

где a_1 и a_2 – коэффициенты разложения.

Каждый кубический автономный блок описывался двухмодовой комплексной шестиканальной матрицей рассеяния, которая представляла собой реакцию автономного блока на падающую электромагнитную волну заданной поляризации, распространяющуюся по соответствующему виртуальному волноводному каналу ($S_{kn}^{\alpha\beta}$, где $k, n = 1, 2$ – тип поляризации волны в соответствующем виртуальном канале; $\alpha, \beta = 1, \dots, 6$ – номер грани автономного блока). Коэффициенты матрицы рассеяния определялись геометрическими и электрофизическими параметрами каждого автономного блока [6].

При построении декомпозиционной схемы нерегулярное включение в волноводный тракт моделировалось однородными автономными блоками, блоками «короткого замыкания», описывающими реакцию проводящей пленки на падающую электромагнитную волну, а также блоками перехода, служащими для согласования структур с различными электрофизическими свойствами. Декомпозиционная схема моделируемой области в продольном сечении приведена на рис.5.

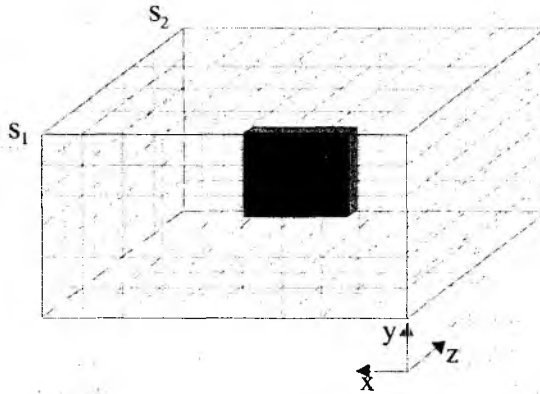


Рис. 3

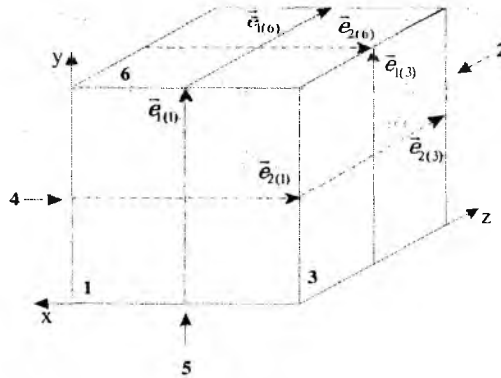


Рис. 4

Для определения общей матрицы рассеяния всей структуры использовалась операция рекомпозиции – объединения матриц всех однородных автономных блоков через виртуальные волноводные каналы. Более подробно методика построения декомпозиционной дифракционной модели описана в работе [5].

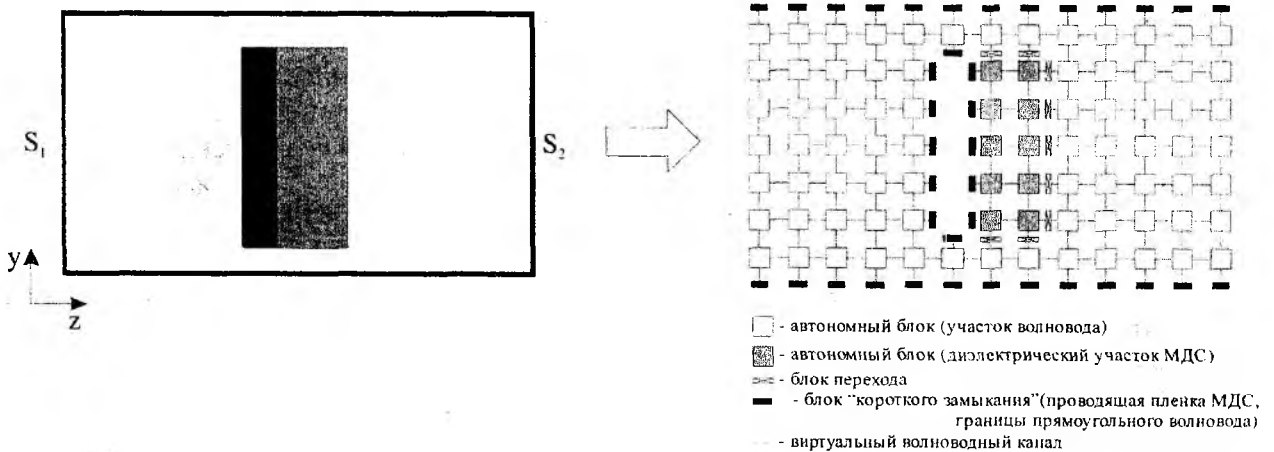


Рис. 5

При помощи декомпозиционной дифракционной модели определялись коэффициенты отражения S_{11} и прохождения S_{12} . По полученным значениям коэффициентов отражения и прохождения рассчитывались значения K_{CB} и ослабление A :

$$K_{CB} = \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}}; \quad A = 20 \cdot \lg(S_{12}). \quad (2)$$

Методика проведения экспериментальных исследований

Результаты численных расчетов интегральных характеристик дифракции волны H_{10} на МДС в волноводе сравнивались с экспериментальными данными. Экспериментальные исследования проводились на панорамном измерителе коэффициента стоячей волны K_{CB} и ослабления A – Р2-56. K_{CB} и A измерялись в диапазоне частот $f = 3,9 \dots 4,1$ ГГц в волноводе с поперечным сечением 34×72 мм. Данные, получаемые с помощью панорамного измерителя Р2-56 (K_{CB} и A), позволяют решать волноводную задачу дифракции в приближении основной волны в дальней зоне: находить соотношения между отраженной, поглощенной и прошедшей волнами в долях падающей волны.

В экспериментальных исследованиях по дифракции электромагнитных полей на МДС в волноводе МДС представляли собой подложки из оргстекла ($\epsilon=3,5$) или стеклотекстолита ($\epsilon=4,5$), на которые наклеивались фольги из алюминия или меди. Особых требований при экспериментальном решении дифракционной задачи ни к подложке, ни к фольгам не предъявлялись.

При волноводной дифракции важными являются данные о соотношении волн в дальней зоне. Измеренные значения K_{CB} и ослабления A позволяют найти относительные значения напряженности поля или мощности отраженной, прошедшей и поглощенной волн:

$$\frac{P_{отр}}{P_{пад}} = \left(\frac{K_{CB} - 1}{K_{CB} + 1} \right)^2; \quad \frac{P_{прош}}{P_{пад}} = 10^{-0,1|A|}; \quad \frac{P_{погл}}{P_{пад}} = \left(1 - \left(\frac{K_{CB} - 1}{K_{CB} + 1} \right)^2 - 10^{-0,1|A|} \right), \quad (3)$$

где $P_{пад}$, $P_{отр}$, $P_{прош}$, $P_{погл}$ – мощности падающей, отраженной, прошедшей и поглощенной волн соответственно.

Соотношения (3) используются при экспериментальном исследовании воздействия мощных импульсных электромагнитных полей (МИЭМП) на ИМС в волноводе в установке с оконечным устройством в виде ваттметра, являющимся одновременно и согласованной нагрузкой [7]. Подобного рода установку предполагается использовать и для исследования воздействия МИЭМП на МДС.

Анализ результатов численной модели и экспериментальных данных

При сравнении экспериментальных результатов с теоретическими расчетами брались данные только МДС с медной фольгой. В качестве базовой МДС использовалась двухслойная структура с поперечным сечением 20×20 мм (рис.1): подложка – оргстекло толщиной – $d_0=1$ мм; проводящая пленка – медь (удельная электропроводность – $\sigma=5,88 \cdot 10^7$ См/м; толщина – $d_{мт}=10$ мкм). Толщина проводящей пленки превышает глубину скин-слоя (порядка $1 \dots 2$ мкм) в диапазоне частот $f=3 \dots 4,1$ ГГц.

С помощью численной модели и проведенных экспериментальных исследований получены интегральные зависимости, характеризующие дифракционные явления ($K_{CB} = K_{CB}(f)$ и ослабление $|A|=|A|(f)$) в указанном диапазоне частот для характерных ориентаций МДС в волноводе (рис.6 и 7; непрерывная кривая – численный расчет, точечная кривая – экспериментальные данные). Анализ полученных зависимостей показывает, что наибольшие значения K_{CB} и ослабления A имеют МДС в ориентациях XU_E и YZ_E , для которых максимальный размер поверхности проводящей пленки направлен вдоль оси Y – по направлению напряженности электрического поля волны H_{10} (рис.2). При этом K_{CB} в данных ориентациях в 2-2,5

раза больше, чем в ориентации XZ_E , а ослабление – практически на порядок больше. В соответствии с физическими представлениями МДС в ориентации XZ_E не нарушает структуру волны и не возмущает ее.

Сравнение результатов решения дифракционной задачи для МДС в волноводе с экспериментальными данными (рис.6,7) показывает, что имеет место количественная корреляция экспериментальных данных с расчетами по численной модели для интегральных характеристик при дифракции на МДС в волноводе: в зависимости от частоты и ориентации МДС, отличие в данных находится в диапазоне 3 – 8 %.

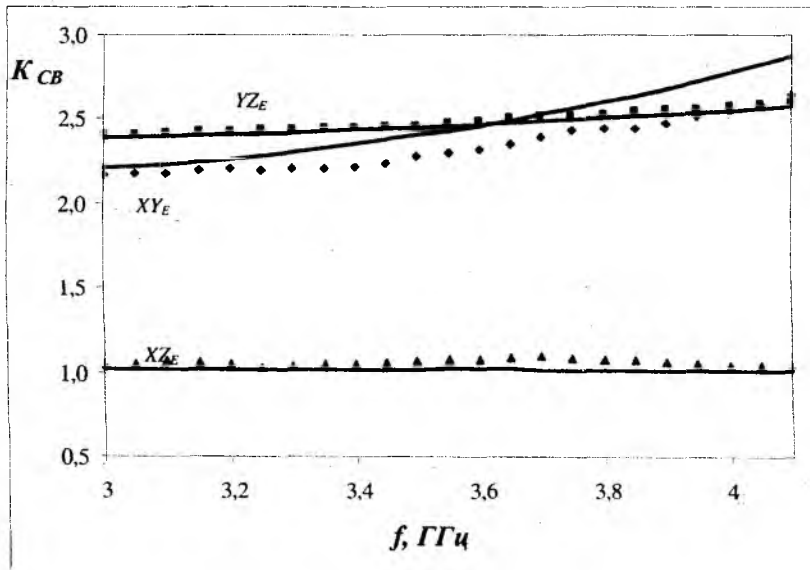


Рис. 6

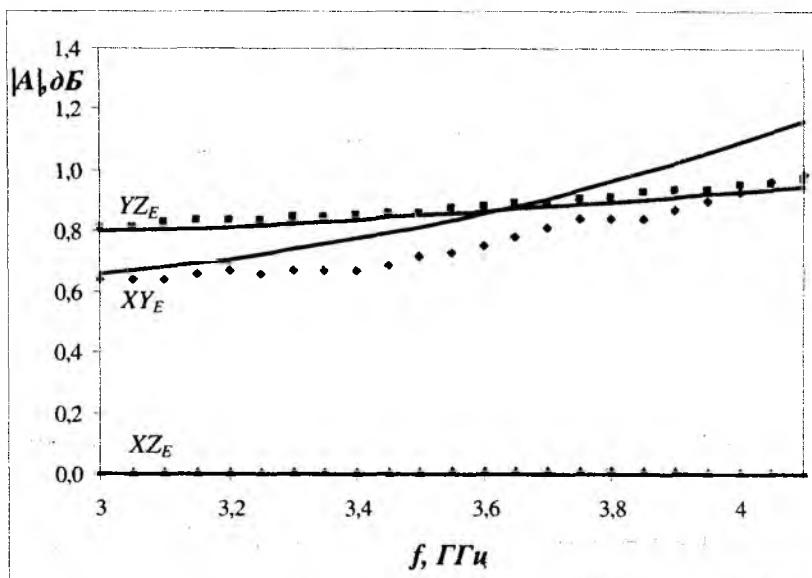


Рис. 7

На основании численных расчетов с использованием соотношений (2) и экспериментальных результатов (соотношения (3)) рассчитаны значения относительных мощностей отраженной, поглощенной и прошедшей волн в долях падающей волны. С учетом близких значений K_{CB} и ослабления A , полученных экспериментально и численными методами, ниже приводятся зависимости для относительных мощностей волн, полученных на основании численной модели.

Поглощенная мощность в должной мере характеризует электротепловые процессы в МДС при воздействии МИЭМП. При более детальном рассмотрении тепловых процессов в

проводящей пленке необходимо учитывать ее пространственную и омическую неоднородность, возможность локализации тепла. На рис.8 приведены зависимости относительной поглощенной мощности от частоты для различных геометрических значений поверхности пленок (в мм). Зависимости $P_{\text{погл}}/P_{\text{пад}} = F(f)$ на рис.8 приведены для МДС в ориентации XU_E . Как следует из рис.8, имеет место естественная зависимость поглощенной мощности от размеров поверхности пленки: чем больше поверхность пленки, тем больше величина поглощенной мощности. Похожие (по виду и по величинам) зависимости поглощенной мощности получаются для МДС в ориентации YZ_E . В ориентации XZ_E МДС практически не поглощает падающую на нее волну.

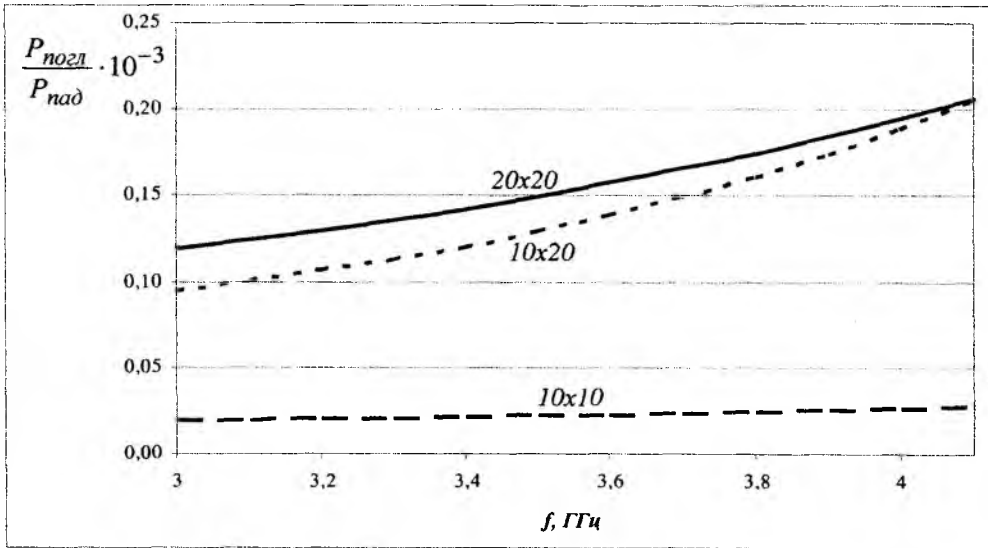


Рис. 8

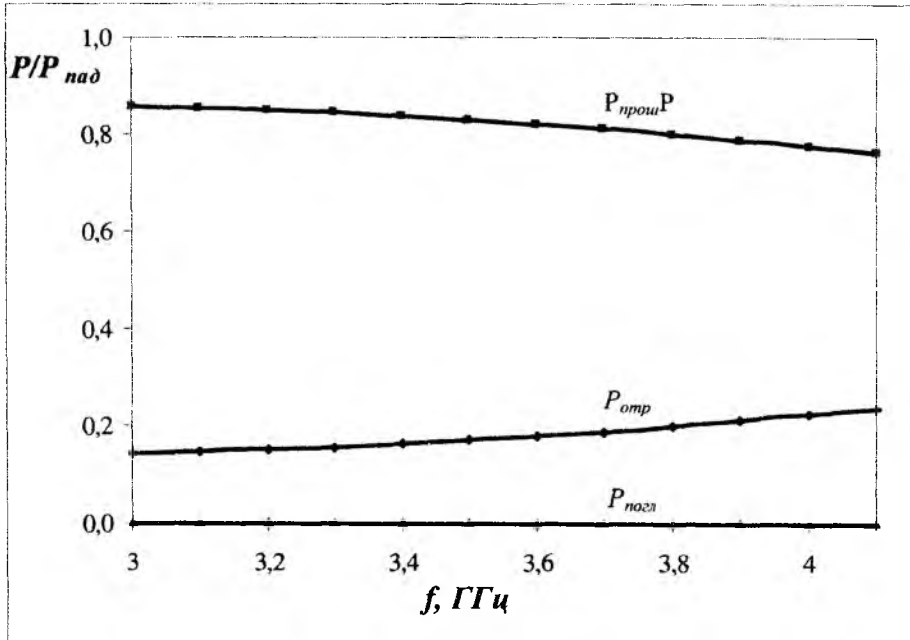


Рис. 9

При проведении экспериментальных исследований по воздействию МИЭМП на микросхемы в волноводе измерялась прошедшая мощность [7]. В то же время в качестве меры воздействующего фактора берется одна из характеристик падающей волны (значение падающей мощности или напряженности электрической компоненты поля). На рис.9 приведены зависимости относительных мощностей для МДС 20×20мм в ориентации XU_E от частоты. В основном мощность падающей волны делится между отраженной и прошедшей волнами,

поскольку мощность поглощенной волны на порядок меньше мощности отраженной или прошедшей волн ($P_{\text{пад}} = P_{\text{отр}} + P_{\text{прои}} + P_{\text{погл}}$).

Выводы

В работе рассмотрены основные положения численной модели дифракции волны H_{10} на МДС в волноводе. Адекватность численной реализации данной задачи дифракции проверялась сравнением интегральных характеристик, полученных экспериментально и с помощью численной модели. Расхождение в значениях $K_{\text{СВ}}$ и ослабления A между расчетными и экспериментальными данными не превышала 8 % в диапазоне частот 3...4,1 ГГц.

Приведены зависимости основных интегральных характеристик в рассматриваемом диапазоне частот. Анализ численных и экспериментальных результатов показал, что в наибольшей степени значение отраженной и прошедшей волн определяется размерами и расположением МДС в волноводе.

Проведенные расчеты показали адекватность численной модели и возможность ее использования для построения электротепловой модели взаимодействия мощных импульсных электромагнитных полей с проводящими пленками металлодиэлектрических структур.

Список литературы: 1. 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. 2. Магда, И. И., Блудов, Н. И., Гадецкий, Н. П. Механизм деградации ИЭТ в полях мощного СВЧ излучения // Петерб. журнал электроники. – 1995. – №3. – С. 55–59. 3. Слипченко, Н.И., Старостенко, В.В., Таран, Е.П., Глумова, М.В. Необратимые процессы в проводящих пленках металлодиэлектрических структур при воздействии мощных электромагнитных полей // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2011. – Вып. 167. – С. 209 – 216. 4. Старостенко, В.В., Григорьев, Е.В., Малишевский, С.В., Таран, Е.П. Влияние поляризации электромагнитной волны на соотношение между волнами при воздействии на интегральные микросхемы // Радиоэлектроника и информатика. – 2002. – Вып. 129. – С.107 – 110. 5. Старостенко, В.В., Таран, Е.П., Малишевский, С.В. Использование «сенсорных датчиков» для численного решения задачи дифракции электромагнитных полей на металлодиэлектрических неоднородностях в волноводе // Вестник ХНУ. Радиофизика и электроника. – 2002. – Вып.1. – № 544. – С.167-172. 6. Никольский, В.В., Никольская, Т.И. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. – М. : Наука, 1983. – 304 с. 7. 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.

Таврический национальный
университет имени В.И.Вернадского,
Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 27.01.2012