

УДК 621.396.6

## ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ ТИПОВ ВОЛН НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВБЛИЗИ НЕОДНОРОДНОСТИ

Таран Е. П.<sup>1</sup>

*Предлагается численная модель расчета электромагнитных полей в волноводах, содержащих неоднородные включения. Проведены исследования по влиянию высших типов волн на структуру электромагнитного поля вблизи неоднородностей.*

Ключевые слова: минимальные автономные блоки, рекомпозиция, неоднородность.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время проведено большое количество исследований по воздействию электромагнитных полей (ЭМП) на электронную технику и ее компоненты [1-3], а также на полупроводниковые материалы с целью получения новых свойств [4]. Первые исследования по воздействию импульсных электромагнитных полей на микросхемы в открытом пространстве были проведены в Национальном Научном Центре «Харьковский физико-технический институт» (ХФТИ) [3]. Однако для выяснения механизмов деградации и катастрофических отказов интегральных микросхем (ИМС) необходимо было знать соотношения между падающей, отраженной, прошедшей и поглощенной мощностями, что весьма затруднительно сделать в открытом пространстве. В дальнейшем, в координации с сотрудниками ХФТИ, на кафедре радиофизики Симферопольского государственного университета был проведен комплекс исследований по воздействию ЭМП на ИМС в волноводном тракте. Использование волноводного тракта позволяет экспериментально достаточно просто определить соотношения между падающей, поглощенной, отраженной и прошедшей волнами для основной волны  $H_{10}$  и найти соотношение мощностей, а следовательно, определить механизмы деградационных явлений. Экспериментальные данные по порогам стойкости ИМС и деградационным порогам по напряженности поля падающей волны для определенного класса микросхем приведены в [2].

Анализ влияния ЭМП на элементы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) показывает, что существует два основных механизма воздействия ЭМП - тепловой и полевой механизм [1,2]. Эти механизмы определяются разными временными параметрами - полевой механизм преобладает при длительности импульса менее 1 мкс, в то время как тепловой механизм начинает играть существенную роль при длительностях импульса 1-10 мс [5]. При воздействии мощных ЭМП СВЧ-диапазона на элементы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) основную роль играет полевой механизм деградационных процессов в ИМС, который в итоге может привести к отказу устройства в целом [2,3]. Для более глубокого исследования процессов, имеющих

---

<sup>1</sup> Кафедра радиофизики, E-mail taran@ccssu.crimea.ua

место в ИМС при полевом механизме воздействия, в частности, вопросов локализации тепла в металлизации микросхем, необходимы данные о поле вблизи микросхемы с учетом высших типов волн. ИМС в волноводном тракте играет роль неоднородного включения, которое вызывает существенное изменение картины распределения ЭМП. Исходя из этого, в работе приводятся результаты численного расчета ЭМП вблизи неоднородных включений в волноводный тракт.

### **ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЕКОМПОЗИЦИОННОГО МЕТОДА**

Расчет картины ЭМП на неоднородных структурах, помещенных в волноводный тракт, строился на основе метода декомпозиции [6]. Волноводный тракт вместе с неоднородными включениями был разбит на минимальные автономные блоки (МАОБ), которые имели минимальный базис собственных волн. Каждый МАОБ описывался своим дескриптором, в качестве которого использовалась матрицы рассеяния 12 порядка. Для учета скачков волновых сопротивлений, имеющих место на неоднородных включениях, использовались блоки перехода. Отличительной особенностью использования данного метода являлось то, что учет металлических включений происходил с помощью введения элементов короткого замыкания. После определения матриц рассеяния всех МАОБов проводилась рекомпозиция структуры – объединение всех дескрипторов в один, описывающий рассеяние электромагнитных волн на всей неоднородной структуре.

При определении поля вблизи неоднородных включений в волноводном тракте рассматривалась структура поля в ближней зоне. В отличие от ранних исследований [2], в которых амплитуды отраженной и прошедшей волн находились в приближении основной волны, в данной работе проведен расчет поля вблизи неоднородности с учетом высших типов волн. При этом количество высших типов волн определялось разбиением исследуемого пространства на МАОБы и в оптимальном варианте составляло 20-30 в зависимости от структуры неоднородного включения. Для учета высших типов волн в методе МАОБ используются коммутаторы и фильтры, которые осуществляют прямое и обратное преобразование Фурье [6]. В отличие от стандартных подходов, в данной работе была проведена оптимизация метода МАОБ, на основе которой впервые были получены фильтры волн без учета коммутаторов. Исключение коммутаторов дало существенный выигрыш во времени – скорость расчета возросла на порядок. Сам метод стал более гибким к заданию неоднородных включений различной геометрической формы.

На основе данного метода разработана численная модель исследования структуры ЭМП на неоднородных включениях разной геометрической формы, помещенных в волноводный тракт. Разработанная модель была апробирована на стандартных тестовых структурах. Полученные в результате расчета тестовой задачи зависимости достаточно точно ведут себя по отношению к рассчитанным классическим методом [7].

## СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА НЕОДНОРОДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЯХ В ВОЛНОВОДЕ

Для проведения численного эксперимента использовался прямоугольный волновод 72x34 мм. Анализ экспериментальных данных показывает [2], что деградиционные явления и катастрофические отказы наступали раньше (на порядок-полтора по напряженности ЭМП) для тех ориентаций ИМС и поля, в которых плоскость чипа была параллельна вектору напряженности электрического поля волны  $H_{10}$ . Это обусловлено прежде всего тем, что по металлизации ИМС течет большой ток проводимости ( $\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$ , где  $\vec{j}$  - плотность тока проводимости,  $\sigma$  - электропроводность,  $\vec{E}$  - напряженность электрического поля), что и приводит к деградиционным явлениям.

В этой связи в качестве объекта исследований в настоящей работе выбрано диэлектрическое тело, приведенное на рис.1. Универсальность его состоит в том, что при  $d_1 \rightarrow 0$  получается пластина, расположенная вдоль волновода. Подобная структура используется в аттенюаторах и фазовращателях. При уменьшении размера  $d_2$  ( $d_2 \rightarrow 0$ ) получается диэлектрическая пластинка, которая обычно используется в пондеромоторных измерителях мощности. Для обоих предельных случаев имеются экспериментальные результаты и расчеты, полученные различными методами. С точки зрения воздействия ЭМП на ИМС данная неоднородность учитывает все три типа наиболее характерных ориентаций ИМС относительно поля [2], в которых плоскость чипа параллельна вектору напряженности ЭМП.

Для численного эксперимента в качестве падающей волны использовалась волна основного типа  $H_{10}$  с напряженностью 10В/м. Диэлектрическая проницаемость неоднородности равна 5.

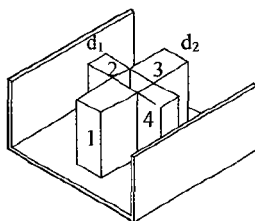


Рис.1. Разрез волноводного тракта с неоднородным включением:

$d_1=10$  мм,  $d_2=14$  мм – геометрические параметры неоднородности.

На рис.2 приведены структуры ЭМП в поперечном сечении неоднородного включения, приведенного на рис.1, в зависимости от количества учитываемых гармоник. Анализ показывает, что учет высших типов волн приводит к качественному и количественному изменению структуры поля на неоднородности.

Проведенный численный расчет показал, что для данного расположения неоднородного включения в волноводном тракте при учете больше 9 типов волн не наблюдалось изменений картин поля в поперечном сечении [рис.2]. На краях неоднородного включения напряженность ЭМП превосходит амплитуду напряженности в одномодовом режиме. Структура ЭМП зависит от расположения неоднородности

относительно падающей волны: в конфигурации, приведенной на рис. 1, присутствовали только нечетные гармоники.

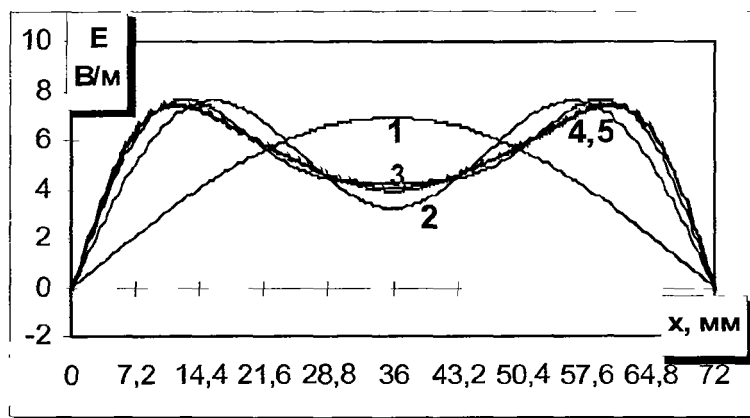


Рис.2. Структура ЭМП в поперечном сечении неоднородности в зависимости от учитываемых гармоник: 1 –  $H_{10}$ ; 2 –  $H_{10}, H_{30}$ ; 3 –  $H_{10}, H_{30}, H_{50}$ ; 4 –  $H_{10}, H_{30}, H_{50}, H_{70}$ ; 5 –  $H_{10}, H_{30}, H_{50}, H_{70}, H_{90}$ .

Проведенные тестовые исследования показали, что для неоднородного включения, представленного на рис.1, полную картину распределения ЭМП можно получить с учетом 9 гармоник. На основе этого была проведена оценка влияния диэлектрической проницаемости неоднородного включения на структуру поля с учетом 9 типов волн в волноводном тракте. Полученные распределения ЭМП (рис.3) позволяют судить о характере краевых эффектов, которые особенно ярко проявляются при исследовании деградационных явлений в ИМС. С другой стороны существуют определенное значение диэлектрической проницаемости, при которых изменяется характер краевых искажений. Это вызвано тем, что на определенных гармониках наблюдаются резонансные явления, и эти гармоники не дают вклад в структуру поля на неоднородности.

Зависимость распределения ЭМП поля от диэлектрических свойств материалов позволяет говорить о том, что именно на границе раздела слоев в ИМС могут возникать перенапряжения, которые в итоге приводят к деградационным процессам и дальнейшим отказам ИМС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения численных расчетов были получены распределения ЭМП на неоднородных структурах, помещенных в волноводный тракт, с учетом высших типов волн. Решение поставленной задачи открывает возможность расчета электромагнитных полей в структурах, в большей степени моделирующих реальные микросхемы, с учетом их геометрических и электрофизических свойств. Оригинальность разработанного программного обеспечения состоит в том, что оно позво-

ляет исследовать структуру ЭМП на неоднородных включениях как стандартного, так и произвольного типа.

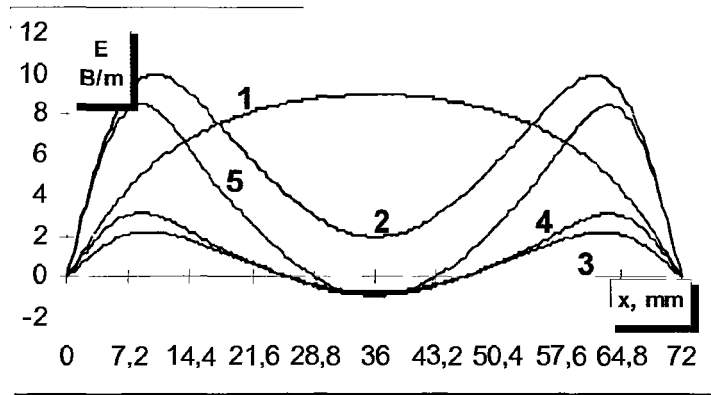


Рис 3. Структура электромагнитного поля на неоднородности: 1 -  $\epsilon=2$ ; 2 -  $\epsilon=7$ ; 3 -  $\epsilon=10$ ; 4 -  $\epsilon=15$ ; 5 -  $\epsilon=17$ .

#### Список литературы

1. R. Antinone A Review of the Phenomenology of High Power Microwave Effects on Electronic Components // International Symposium on Electromagnetic Environments and Consequence, Bordeaux, France, May-June. 1994.
2. Старостенко В.В., Таран Е.П., Григорьев Е.В., Борисов А.А. Воздействие электромагнитных полей на интегральные микросхемы // Измерительная техника, №4, 1998 г. - с.65-67.
3. Гадецкий Н.П., Кравцов К.А., Магда И.И. «Исследования воздействия электромагнитных излучений ультракороткой длительности на РЭА СВЧ-диапазона». - В кн.: 6-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конференции. [Севастополь, 16-19 сент. 1996 г.]. Севастополь: Вебер, 1997, с. 441-446.
4. Беляев А.А., Беляев А.Е., Ермолович И.Б. и др. Влияние сверхвысокочастотной обработки на электрофизические характеристики технически важных полупроводников и поверхностно-барьерных структур // Журнал технической физики, т.98, №12, 1998 г. - с.49-54.
5. Wunsch D.C. The application of Electrical Overstress Models to State Protective Network. 16-th Annual Proceeding Reliability Physics, 1978 (IEEE Electron Devices Society IEEE Reliability Group, San Diego, CA, 1978, p. 47-55.
6. Никольский В.В., Никольская Т.И. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. - М.: Наука, 1983. - 204 с.
7. Старостенко В.В., Таран Е.П., Шадрин А.А., Воистинов А.В., Григорьев Е.В. Расчет электромагнитных полей в волноведущих структурах со сложной геометрией // Материалы докладов 8-ой Международной Крымской Конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 1998, с.273-274.

#### Анотація

*Таран Є.П. Вплив вищих типів хвиль на розподіл електромагнітних полів поблизу неоднорідності*

*Запропонована чисельна модель розрахунку електромагнітних полів у хвиляводах, які містять неоднорідні включення. Проведені дослідження по впливу вищих типів хвиль на структуру електромагнітного поля поблизу неоднорідності.*

Ключові слова: мінімальні автономні блоки, рекомпозиція, неоднорідність.

### **Summary**

*Taran Ye.P. The influence of higher types of waves on electromagnetic field distribution near to heterogeneity.*

*The numerical model of calculation of electromagnetic fields in waveguides structures containing non-uniform inclusions is offered. The researches on influence of higher types of waves on structure of an electromagnetic field near to heterogeneity are carried out.*

Keywords: minimal independent blocks, recomposition, to heterogeneity.