

06

Поле в ближней зоне микросхемы при воздействии на нее электромагнитной волной в волноводе

© В.В. Старостенко, С.В. Малишевский, Е.П. Таран, Г.И. Чурюмов

Таврический национальный университет, Симферополь, Украина

E-mail: taran@tnu.crimea.ua

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина

E-mail: g.churyumov@ieee.org

Поступило в Редакцию 10 июля 2002 г.

Приведены результаты расчета электромагнитных полей вблизи интегральных микросхем на основе численного решения дифракционной задачи рассеяния электромагнитных волн на металлodieлектрических структурах в волноводном тракте. Полученные распределения полей позволяют рассчитать токи в микроструктурных элементах интегральных микросхем и построить электротепловую модель развития деградационных процессов в интегральных микросхемах при воздействии импульсных электромагнитных полей.

В работе [1] приводятся основные результаты экспериментальных исследований по воздействию импульсных электромагнитных полей на интегральные микросхемы 155, 174, 555, 561 серий, с количеством элементов на кристалле $10^3 \dots 10^4$, с 14 или 16 выводами, с размерами граней кристаллов, на которых размещаются микроструктуры микросхем, от 1×1 до 2.5×2.5 mm. Данные экспериментальные исследования по определению пороговых значений напряженностей воздействующих импульсных электромагнитных полей, при которых начинается развитие деградационных явлений в микроструктурных элементах (элементах на основе $p-n$ -перехода, металлизации и т.д.) и происходит катастрофический отказ микросхем, проводились в волноводном тракте. Связано это с тем, что определение соотношений между падающей, отраженной, поглощенной и прошедшей волнами по экспериментально найденным значениям коэффициента стоячей волны ($K_{s.w}$) и ослабления (A) в волноводном тракте обусловлены простотой по сравнению с подобными исследованиями в свободном пространстве. Найденные

зависимости $K_{s.w.}(f)$ и ослабления $A(f)$ в диапазоне частот панорамного измерителя, а следовательно и найденные соотношения между волнами, по существу, экспериментально решают задачу дифракции импульсных электромагнитных полей в волноводном тракте в дальней зоне от микросхемы. Полученные результаты по определению соотношений между волнами и их анализ позволяют понять механизм такого воздействия, однако не объясняют особенности воздействия, связанные с локализацией тепла в микроструктурных элементах микросхем. Для выявления причин локализации тепла в микроструктурных элементах необходимо построить модель электротепловых процессов, что, в свою очередь, требует определения структуры электромагнитного поля вблизи микросхемы.

В настоящей работе приводятся результаты расчетов полей вблизи микросхемы при решении задачи дифракции на модели микросхемы для наиболее характерных случаев ее ориентации в волноводе.

Метод решения дифракционной задачи и модель микросхемы.

Решение дифракционной задачи осуществлялось с помощью декомпозиционного метода [2,3], выбор и использование которого были обусловлены сложностью модели микросхемы. При использовании декомпозиционного метода область волновода вблизи микросхемы и ее модель разбивались на совокупность минимальных автономных блоков, в качестве которых выбирались кубические структурные элементы (рис. 1). Поле внутри автономного блока удовлетворяет уравнениям Максвелла и граничным условиям на гранях. Для учета диэлектрических особенностей структур вводятся понятия однородных блоков, блоков „короткого замыкания“ (для проводящих областей) и блоков перехода [2,3]. На основании представления поля внутри минимального автономного блока и граничных условий находятся матрицы рассеяния автономных блоков. Затем с помощью операции рекомпозиции находится матрица рассеяния для всей области, ограниченной плоскостями S_1 и S_2 .

Микросхема представляет собой сложную металлодиэлектрическую структуру, включающую в себя корпус, выводы и кристалл. Задать топологию микроструктур для конкретной микросхемы при решении дифракционной задачи не представляется возможным. Поэтому в модели микросхемы корпус, выводы и кристалл в достаточной мере соответствовали указанным выше типовым микросхемам, а микроструктуры на кристалле задавались однородными слоями кремния, оксида кремния и алюминиевой металлизацией.

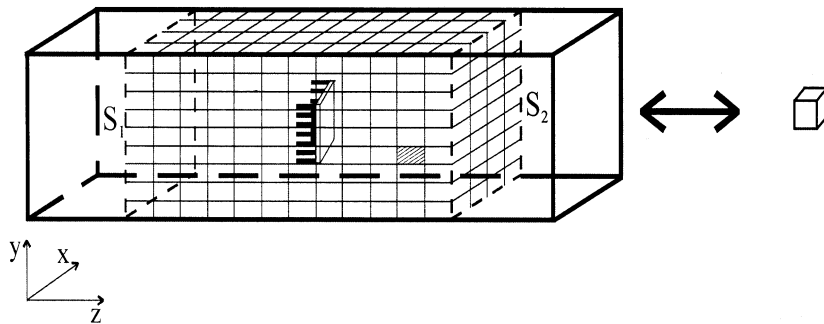


Рис. 1. Представление области вблизи микросхемы совокупностью минимальных автономных блоков.

Модель кристалла микросхемы представляет собой четырехслойную структуру: подложка из кремния — диэлектрический слой (оксид кремния) — металлизация (алюминий) — защитный слой (оксид кремния) [4]. Декомпозиционная схема модели кристалла микросхемы включает в себя однородные автономные блоки (автономные блоки кремния, автономные блоки оксида кремния), блоки „короткого замыкания“, которые описывают реакцию проводящих элементов (алюминиевой металлизации) на падающую электромагнитную волну, и блоки перехода между минимальными автономными блоками с различными электрофизическими свойствами.

Алгоритм нахождения дифференциальных и интегральных характеристик (поля в различных сечениях области S_1S_2 и элементов матрицы рассеяния) задачи дифракции импульсных электромагнитных полей на микросхеме соответствует алгоритму, который можно представить в следующем виде [2,3]:

1. Определение матриц рассеяния, блоков „короткого замыкания“ и блоков перехода для всех автономных блоков.
2. Построение общей матрицы рассеяния поля на модели микросхемы.
3. Задание типа падающей волны.
4. Построение входных и выходных фильтров.
5. Расчет амплитуд и фаз всех типов волн вблизи микросхемы и построение общей картины распределения электромагнитного поля.

б. Расчет коэффициентов стоячей волны $K_{s,w}$, ослабления A и определение токов, которые наводятся на микроструктурных элементах.

Фильтры осуществляют прямое и обратное преобразование Фурье и используются для расчета амплитуд волн, которые возникают на открытых каналах каждого граничного автономного блока (плоскости S_1 и S_2). При численных расчетах используются фильтры, объединяющие в себе стандартные фильтры и коммутаторы [2,3]. Это позволяет ускорить численное решение дифракционной задачи и расчет структуры электромагнитного поля вблизи модели микросхемы с учетом высших типов волн.

Поле в ближней зоне интегральной микросхемы в волноводе.

При численном решении дифракционной задачи в модели микросхемы задавались следующие геометрические и электрофизические параметры: размеры выводов $5.25 \times 0.5 \times 0.3$ mm; расстояние между выводами 2 mm; размеры корпуса микросхемы $17 \times 6.6 \times 3.1$ mm; параметры кристалла: кремний — $\varepsilon = 7$, размеры $1 \times 1 \times 0.1$ mm; оксидный слой — $\varepsilon = 13$, размеры $1 \times 1 \times 0.0006$ mm; металлическая алюминиевая пленка: размеры $1 \times 1 \times 0.0012$ mm; защитный слой имел те же характеристики, что и диэлектрический слой (оксид кремния). Проводимость слоя металлизации и выводов считалась бесконечной.

Адекватность модели микросхемы и правильность решения задачи дифракции электромагнитной волны на микросхеме в волноводе проверялись путем сравнения экспериментальных зависимостей $K_{s,w}(f)$ и $A(f)$, снятых на панорамном измерителе Р2-56, с подобными зависимостями, рассчитанными декомпозиционным методом. Экспериментальные исследования по измерению $K_{s,w}(f)$ и $A(f)$ проводились в полосе частот $f = 2400 \dots 4100$ MHz в волноводе с поперечным сечением 34×72 mm. При экспериментальных исследованиях выполнялось условие $\lambda \gg l$, где l — наибольший геометрический размер микросхемы. В этом случае отсутствуют резонансы, обусловленные соизмеримостью геометрических размеров микросхемы и составляющих ее элементов с длиной воздействующей волны. Можно выделить 6 наиболее характерных положений микросхемы в волноводе или, что то же самое, ориентаций микросхемы относительно вектора напряженности электрического поля основного типа волны в прямоугольном волноводе H_{10} [1]. Для 4 положений микросхемы в волноводе значение $K_{s,w}$ изменяется в диапазоне 1.3...1.6, а для 2 положений (длинная грань корпуса микросхемы располагалась параллельно вектору напряженности электрического поля волны H_{10})

$K_{s,w}$ принимает значения 2.6 . . . 2.8. Различие в значениях интегральных параметров ($K_{s,w}$ и A), полученных экспериментально и рассчитанных с помощью декомпозиционного метода, в указанном диапазоне частот для 6 характерных положений микросхемы в волноводе, не превышает 15%.

Кроме того, адекватность разработанного программного пакета проверялась на тестовой структуре, представляющей собой совокупность 7 . . . 10 металлических стержней (геометрические размеры соответствовали выводам микросхемы), расположенных на широкой стенке волновода. При расчетах поля учитывалось до 60 типов волн в волноводе. Расчеты показывают, что начиная с 20 . . . 25 типа волны (по диаграмме критических длин волн) амплитуды этих волн составляют не более 0.5% амплитуды волны H_{10} . При этом тангенциальная составляющая поля на стержнях обращается в нуль.

При дифракции электромагнитной волны на микросхеме в волноводе поля в дальней и ближней зонах формируют корпус, выводы и кристалл. Размеры кристалла для данного класса микросхем и диапазона частот таковы, что даже в положении микросхемы, когда грань кристалла с микроструктурными элементами лежит в поперечной плоскости волновода, каких-либо отличий в поле вблизи кристалла не наблюдается. Этого и следовало ожидать, поскольку отношение длины волны к наибольшему геометрическому размеру кристалла порядка 10^3 . В других положениях микросхемы в волноводе кристалл вносит еще меньшее возмущение в структуру поля в волноводе.

В зависимости от положения микросхемы в волноводе возмущение поля непосредственно около нее, в большей мере, могут вносить корпус и выводы микросхемы. На рис. 2 приведены распределения электромагнитных полей вблизи микросхемы для двух характерных ее ориентаций в волноводе.

В случае, когда выводы микросхемы расположены вдоль напряженности электрического поля волны H_{10} (a), корпус практически не влияет на величину напряженности поля и на структуру поля в волноводе, в то время как выводы микросхемы в этой ориентации в значительной степени (до 15% в сравнении с амплитудой волны H_{10} без микросхемы) изменяют распределение поля и его величину.

Если микросхема ориентирована таким образом, что максимальный геометрический размер ее корпуса направлен вдоль напряженности электрического поля волны типа H_{10} (b), то наибольший вклад в

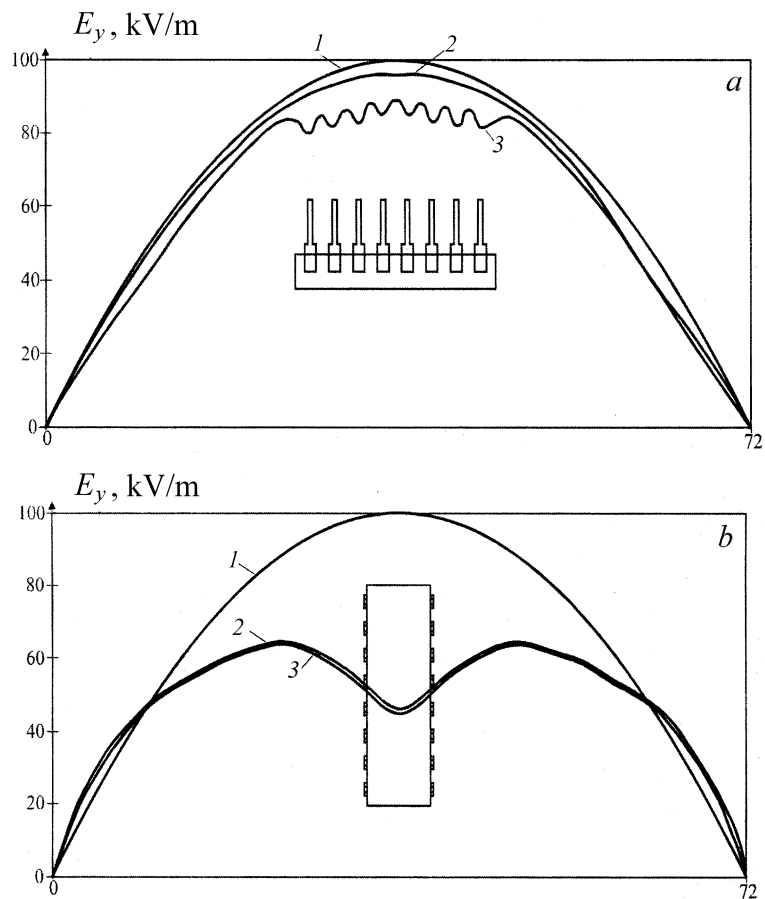


Рис. 2. Распределение электромагнитного поля в поперечном сечении волновода вблизи микросхемы для двух ее ориентаций: 1 — падающая волна; 2 — поле с учетом корпуса микросхемы; 3 — поле с учетом корпуса и выводов.

распределение поля вносит корпус микросхемы, в то время как выводы практически не меняют структуру поля. Значение напряженности поля вблизи микросхемы более чем на 20% отличается от напряженности поля в волноводе без микросхемы.

Таким образом, полученные результаты соответствуют экспериментальным данным в дальней зоне. Полученные значения полей в ближней зоне микросхемы в волноводе можно использовать для определения токов проводимости в металлизации и токов смещения в диэлектрических и полупроводниковых структурах микросхемы при моделировании электротепловых процессов в микроструктурных элементах. Кроме того, апробация декомпозиционного метода для длинноволнового приближения задачи дифракции электромагнитной волны на микросхеме позволяет в дальнейшем распространить данный метод и разработанное специализированное программное обеспечение для решения задачи дифракции в свободном пространстве при произвольном соотношении геометрических размеров и длины волны воздействующего электромагнитного поля [5].

Список литературы

- [1] *Старостенко В.В., Таран Е.П., Григорьев Е.В.* и др. // Измерительная техника. 1998. № 4. С. 65–67.
- [2] *Никольский В.В., Никольская Т.И.* Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. М.: Наука, 1983. 304 с.
- [3] *Никольский В.В., Никольская Т.И.* Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1989. 544 с.
- [4] *Таран Е.П., Старостенко В.В., Григорьев Е.В.* // Радиофизика и электроника. 1998. Т. 3. № 1. С. 123–126.
- [5] *Фок В.А.* Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. М.: Сов. радио, 1970.