

МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕМЕНТНУЮ БАЗУ РЭА

Исследования физики процессов, возникающих в структуре элементов и компонентов РЭА в условиях воздействия электромагнитного излучения показывают, что импульсные электромагнитные поля способны инициировать в элементах деградационные эффекты даже при относительно низких энергетических характеристиках излучения.

Электромагнитное излучение существенно влияет на функционирование радиоэлектронных средств, являясь в ряде случаев основным фактором, определяющим работоспособность РЭА и средств вычислительной техники. Анализу эффектов в РЭА и средствах вычислительной техники посвящена значительная библиография [1—7], в которой рассмотрены процессы дефектообразования в радиоэлектронных средствах при воздействии как непрерывных, так и импульсных излучений. Наименее освещенными остаются эффекты при импульсных воздействиях ультракороткой длительности узкополосного СВЧ-излучения и квазивидеоимпульсного сверхширокополосного излучения.

В проблеме анализа деградационных эффектов в РЭА, ее элементах и компонентах можно выделить два аспекта.

Согласно первому из них — электродинамическому — рассматривается взаимодействие объекта с электромагнитным полем, которое характеризуется определенными амплитудно-временными параметрами: мощностью, напряженностью электрического и магнитного полей, длиной волны, длительностью в случае импульсного излучения, спектральным распределением мощности либо интенсивности излучения и т.п. При этом объект характеризуется геометрическими параметрами (размеры, конфигурация, ориентация относительно векторов электрического и магнитного полей) и электродинамическими (диэлектрическая и магнитная проницаемости и проводимость материалов, из которых изготовлен объект).

Второй аспект — материаловедческий — заключается в получении ответа на вопрос: какова будет реакция объекта на воздействие определенных сил токов и напряжений? Так, при тепловом механизме деградации, который положен в основу большинства моделей деградационных эффектов в элементах РЭА, анализ процесса диссипации энергии в объекте проводится с помощью решения уравнения теплопроводности [1; 2; 6]. Краевые и начальные условия задаются структурой объекта, теплофизическими характеристиками материалов, из которых он изготовлен, и условиями его эксплуатации.

Критериальными параметрами воздействия являются величины напряженности электрического поля либо плотность потока мощности падающей электромагнитной волны в точке расположения объекта. В результате электромагнитного воздействия в объектах индуцируются токи и напряжения и выделяется энергия; ее уровень может превышать критические значения $I_{кр}$, $U_{кр}$, $W_{кр}$, при которых нарушается функционирование РЭА. Значениям $I_{кр}$, $U_{кр}$, $W_{кр}$ ставятся в соответствие критические значения напряженности поля $E_{кр}$ и плотности потока мощности $P_{кр}$. Теоретический анализ реакции элементов РЭА на воздействие электромагнитного поля заключается в установлении зависимости между величинами $I_{кр}$, $U_{кр}$, $W_{кр}$ и $E_{кр}$, $P_{кр}$.

Рассмотрим ситуацию, когда объектом служит элементная база РЭА (полупроводниковая ИС), характеризующаяся наибольшей восприимчивостью к воздействию электромагнитных полей [2—4]. Схема падения электромагнитной волны с произвольно ориентированными компонентами векторов E и H относительно выводов ИС в планарном корпусе показана на рис. 1. Процесс взаимодействия поля с объектом описывается с помощью дипольного приближения, в соответствии с которым геометрические элементы объекта представляются элементарными антеннами, нагруженными на элементы его внутренней структуры. Длина элементарных антенн — выводов ИС равна l .

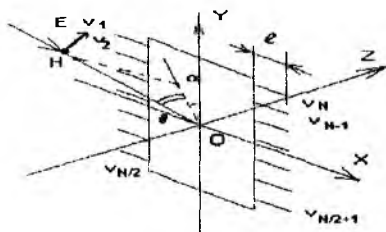


Рис. 1

Эквивалентная схема внутренней структуры ИС дана на рис. 2. Токи I_{ij} в элементах схемы рис. 2 можно определить одним из обобщенных методов (например, методом узловых напряжений):

$$I_{ij} = U_{ij} Y_{ij} . \quad (1)$$

Здесь U_{ij} — напряжение между узлами i и j ; Y_{ij} — проводимость элементов электрической цепи, связывающей эти узлы. Напряжение рассчитывается по формуле

$$U_{ij} = \frac{1}{\Delta} \sum_{k=1}^N \Delta_{ik} I_{ik}, \quad (2)$$

где Δ — определитель приведенной ниже матрицы (3), составленной из проводимостей элементов схемы ИС. При составлении определителя следует учесть, что $Y_{ij} \neq Y_{ji}$, т.е. элементы схемы не являются обратимыми.

Величины Δ_{ik} представляют собой алгебраические дополнения элементов Y_{ik} . Задающие силы токов в элементарных диполях-выводах ИС образуют матрицу-столбец (4). Используемые матрицы имеют следующий вид:

$$\|Y\| = \begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{N1} & 0 & \dots & Y_{NN} \end{vmatrix} \quad (3); \quad \|I\| = \begin{vmatrix} I_1 \\ \dots \\ I_N \end{vmatrix} \quad (4).$$

Временная зависимость ЭДС на зажимах элементарного диполя при $\theta = \pi/2$, $\alpha = 0$ находится как $e(t) = I_d E$, где I_d — действующая длина диполя, E — мгновенное значение напряженности электрического поля.

Расчет параметров определителя для ИС средней и большой степени интеграции, содержащих $10^3 \dots 10^5$ элементов на кристалле, представляет собой сложную задачу, поскольку цепь, соединяющая i -й и j -й выводы, может содержать большое число элементов.

Для построения адекватной упрощенной эквивалентной схемы ИС воспользуемся результатами экспериментальных исследований воздействия импульсного СВЧ-излучения на элементную базу РЭА [4]. В соответствии с закономерностью локализации деградационных эффектов по периферии поверхности кристаллов полупроводниковых ИС [4; 5] эквивалентную схему ИС можно представить в виде рис. 3.

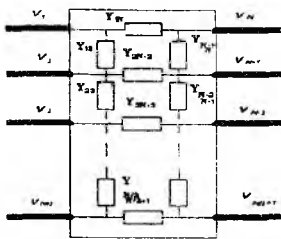


Рис. 2

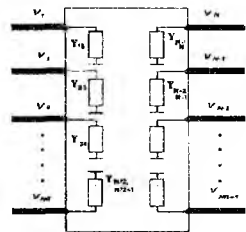


Рис. 3

Матрица проводимостей теперь превращается в диагональную:

$$\|Y\| = \begin{vmatrix} Y_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Y_{22}^0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & Y_{NN} \end{vmatrix} \quad (5)$$

Она содержит только параметры элементов, расположенных по периферии кристалла ИС, в зоне III, причем каждый из элементов соединен с соответствующим выводом ИС.

Отметим, что характерным значением для проводимостей Y_{ii} являются параметры электропрочности соответствующих элементов (например, межслойной изоляции либо p — n -перехода). Символом Y_{kk}^0 в матрице (5) обозначена проводимость элемента, характеризующегося минимальным порогом деградации при воздействии электромагнитного излучения.

Таким образом, сравнив рис. 2 и 3 и матрицы (4) и (5), можно утверждать, что анализ деградационных эффектов в полупроводниковых ИС значительно упрощается, даже в случае использования БИС. Упрощение обусловлено тем, что в выражениях для критических значений напряженности электрического поля и мощности повреждений учитываются только параметры периферийных элементов т.е. число элементов при расчете $E_{кр}$ становится равным числу выводов корпуса ИС.

Список литературы: 1. Рикетс Л.У., Бриджес Д.Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1979. 328 с. 2. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. М.: Радио и связь, 1988. 296 с. 3. Воздействие электромагнитных СВЧ-импульсов на структуру примесных неоднородностей в кристаллах кремния и характеристики полупроводниковых приборов / Д.Е. Абдурахимов, П.Н. Бочикашвили, В.Л. Верещагин и др. // Микроэлектроника. 1992. Т. 21, вып. 1. С. 82 — 89. 4. Генерирование мощных СВЧ-импульсов ультракороткой длительности и их воздействие на изделия электронной техники / С.Б. Блудов, Н.П. Гадецкий, К.А. Кравцов и др. // Физика плазмы. 1994. Т. 20, № 7—8. С. 712 — 717. 5. Исследование физических механизмов деградации изделий электронной техники в мощных электромагнитных полях / И.И. Магда, Н.П. Гадецкий, К.А. Кравцов и др. // Материалы 3-й Крым. конф. «СВЧ-техника и спутниковый прием». Севастополь, 1993. С. 523 — 526. 6. Wunsch D.S., Bell R.R. Determination of threshold failure level of semiconductors diodes and transistors due to pulse voltage // IEEE Trans. on Nuclear Sci. 1968. Vol. NS-15, N 6. P. 244 — 259. 7. Antinone R.J. How to prevent circuit zapping // IEEE Spectrum. 1987. Vol. 4, N 24. P. 34 — 38.

Харьковский государственный технический
университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 15.06.98