

УДК 537.86

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ КОМПОНЕНТЫ ВОЗДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ НА ПРОЦЕССЫ В МИКРОСТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Е.В. ГРИГОРЬЕВ, В.В. СТАРОСТЕНКО, Е.П. ТАРАН, Г.И. ЧУРЮМОВ

В работе рассмотрено влияние магнитной компоненты падающей электромагнитной волны на процессы в микроструктурных элементах интегральных микросхем. Произведен подтвержденный экспериментальными данными оценочный теоретический расчет отношения токов в микроструктурных элементах микросхем, обусловленных магнитной и электрической компонентами. Показано, что магнитная компонента падающей электромагнитной волны не оказывает влияние на процессы в проводящих микроструктурных элементах микросхем.

The paper considers the effect of a magnetic components of an incident electromagnetic wave on the processes in microstructural elements of integrated circuits. An estimation theoretical calculation, verified by experimental data, of the relation of currents in the microstructural elements of microcircuits influenced by magnetic and electric components is made. It is shown that magnetic component does not have an impact on processes in conducting microstructural microcircuit elements.

При исследовании постановки проблемы воздействия импульсных электромагнитных полей (ИЭМП) на микросхемы предполагается, что проводящие микроструктурные элементы (МСЭ) выходят из строя за счет больших токов, наведенных электрической компонентой волны, а разрушение других МСЭ связано с большим приложенным напряжением, которое также обусловлено электрической компонентой ИЭМП [1, 2]. Обычно полагают, что током, наведенным магнитной компонентой поля, можно пренебречь в сравнении с током, наведенным электрической компонентой. Однако оценочных расчетов нигде не приводится, а, тем более, отсутствуют экспериментальные исследования по воздействию магнитной компоненты ИЭМП на микроструктурные элементы микросхем. Следует отметить, что в микросхемах могут быть замкнутые проводящие контуры или проводящие участки, которые замыкаются через краевые емкости. В таких контурах наводится ЭДС, обусловленная меняющимся во времени магнитным потоком (в соответствии с законом Фарадея-Ленца), что приводит к появлению тока в контуре. Оценки величин этих токов ранее также не производились.

Имитация воздействия ИЭМП на полупроводниковые приборы и другие дискретные элементы ИМС путем подачи на них напряжения [3, 4] не в состоянии исследовать возможность воздействия магнитной компоненты поля на электротепловые процессы.

Целью настоящей работы является оценка токов в микроструктурных элементах, обусловленных магнитной компонентой ИЭМП, воздействующих на микросхемы, и проведение экспериментальных исследований по влиянию магнитной компоненты падающей

электромагнитной волны на процессы в микроструктурных элементах ИМС.

Оценка токов в проводящих микроструктурных элементах микросхем

Экспериментальные исследования по воздействию ИЭМП на микросхемы в работах [2, 5] были проведены в волноводном тракте. Оценочные расчеты по влиянию магнитной компоненты ИЭМП на микроструктурные элементы также целесообразно провести для ИМС, помещенной в волноводный тракт. Для волновода компоненты E_y и H_z имеют следующий вид [6]:

$$\dot{E}_y = \dot{E}_m \sin \frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z}, \quad \dot{H}_z = \dot{H}_m \cos \frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z}, \quad (1)$$

где $|\dot{H}_m| = (\pi/kW_0 a) \cdot |\dot{E}_m|$ — связь магнитной и электрической компонент поля; k — волновое число свободного пространства; W_0 — волновое сопротивление свободного пространства ($W_0 = 120\pi \text{ Ом} = 377 \text{ Ом}$); β — постоянная распространения в волноводе; a — длина широкой стенки волновода.

Плотность (объемная) тока, наведенного электрической компонентой волны H_{10} $\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$ или $|\vec{j}| = \sigma \cdot |\vec{E}|$. Соответствующий поверхностный ток $|\vec{j}_E| = \sigma \cdot \Delta \cdot |\vec{E}|$, где Δ — толщина металлизации, σ — удельная проводимость металлизации ($\sigma = 3,5 \cdot 10^7 \text{ см/м}$ для алюминия).

Поверхностный ток, наведенный магнитной компонентой волны, $|\vec{j}_H| = |\dot{H}_z|$. Причем для волны с $\lambda = 10 \text{ см}$ $|\dot{E}_m| = 543 |\dot{H}_m|$ (при $a = 3,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$). Сравнивая эти токи, получаем $|\vec{j}_E|/|\vec{j}_H| = 1,85 \cdot 10^5$

Отношение поверхностных токов, наведенных электрической и магнитной компонентами волны H_{10} , несколько выше, чем в свободном пространстве. Это объясняется различием в структурах волны в волноводе и плоской волны в свободном пространстве. Суть остается, однако, одинаковой – ток в металлизации, наводимый электрической компонентой волны, намного превышает ток, наводимый магнитной компонентой.

Кроме сравнения токов, наведенных электрической и магнитной составляющими волны H_{10} , можно сравнить ток, наведенный электрической компонентой волны ($\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$), с током в контуре, образованном контактными площадками по периферии кристалла (рис. 1), т. е. с током, связанным с ЭДС, наведенной изменяющимся во времени магнитным потоком, понижающим контур.

При наличии контура, находящегося в магнитном поле, в контуре наводится ЭДС в соответствии с законом Фарадея – Ленца, $e = -\partial\Phi/\partial t$, где Φ – поток поля вектора магнитной индукции через контур.

Наибольший магнитный поток через контур (рис. 1) будет, если размещать микросхемы в волноводе вблизи узкой стенки в ориентациях, показанных на рис. 2. В этих случаях $\Phi = \mu\mu_0 H_z S_k$, где μ – относительная магнитная проницаемость, μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость, S_k – площадь контура, образованного контактными площадками.

Значение ЭДС в этом случае

$$|e| = \mu_0 S_k \omega (\dot{E}_{my}) / 543, \quad (2)$$

где ω – круговая частота ($\omega = 2\pi \cdot 3 \cdot 10^9$ рад/с – для рассматриваемого случая).

Максимальный ток в контуре находится из соотношения $I = |e|/z$, где z – модуль комплексного сопротивления контура, образованного контактными площадками и краевыми емкостями (рис. 1,а). При аппроксимации контура непрерывной полоской металли-

зации ток в контуре $I = |e|/R$, где R – эквивалентное сопротивление полоски металлизации (рис. 1,б).

Для контура, представленного на рис. 1,б, сопротивление вычисляется по формуле $R = \rho l/S$, где $\rho = 2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м – удельное сопротивление алюминия; S – площадь поперечного сечения полоски металлизации: для кристалла с наибольшими геометрическими размерами $2,5 \times 2,5$ мм, $l = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м – геометрический размер стороны контура (рис. 1), $\Delta = 1$ мкм – характерная толщина металлизации

$$S = 4 \cdot l \cdot d = 4 \cdot 2,5 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 10^{-2} \text{ мм}^2 = 10^{-8} \text{ м}^2.$$

Эти данные взяты для класса микросхем, исследованных на стойкость при воздействии ИЭМП в работах [2, 5].

Задавая параметры электромагнитного поля и ориентации микросхем в волноводе, можно определить ЭДС и токи, наведенные в контуре. Если вычислить значения плотностей токов, а затем найти отношение плотности тока, наведенной электрической компонентой волны H_{10} ($j = |\vec{j}_E| \cdot \Delta$), к плотности тока, обусловленного ЭДС в контуре (рис. 1), тогда можно не задаваться значением E_{my} . Плотность тока, обусловленного ЭДС в контуре, вычисляется по соотношению $j_{\Phi-L} = I/S$. Отношение плотностей токов $|\vec{j}| = \sigma \cdot |\vec{E}|$ и $j_{\Phi-L}$ при соответствующей аппроксимации контура (рис. 1, б):

$$|\vec{j}| / j_{\Phi-L} = \frac{543 \cdot \sigma \cdot E_m \cdot R \cdot S}{\mu_0 \cdot S_k \cdot \omega \cdot E_m} = \frac{543 \cdot l}{\mu_0 \cdot \omega \cdot S_k} \approx 40. \quad (3)$$

Достаточно высокие по отношению к значениям $|\vec{j}|$ величины $j_{\Phi-L}$ обусловлены, в первую очередь, значениями сопротивления R ($R = 0,45 \cdot 10^{-4}$ Ом).

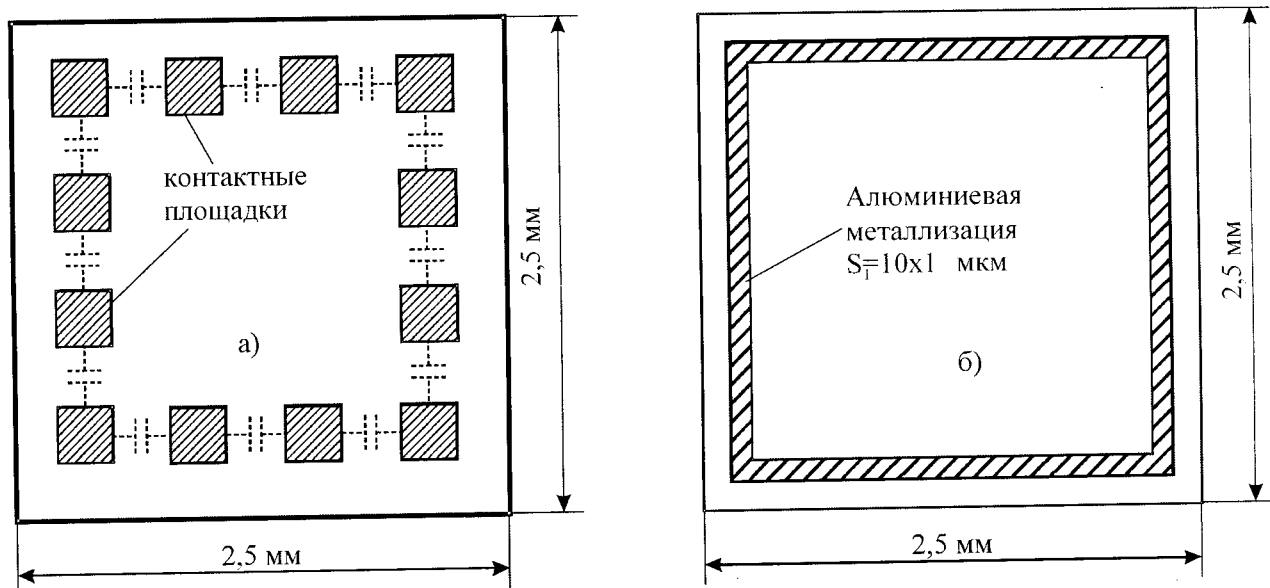


Рис. 1

Для контура, образованного контактными площадками и краевыми емкостями (рис. 1, а), сопротивление вычисляется следующим образом:

$$\dot{z} = R - \frac{j}{\omega \cdot C}, \quad (4)$$

причем краевая емкость находится из соотношения [7]

$$C = 0,044 \cdot C' \cdot d \cdot \varepsilon \text{ [пФ]}, \quad (5)$$

где $C' = \frac{th(\pi d / 2t)}{th\pi[(d+b)/2t] \cdot \sqrt{1 + \left[\frac{th\pi d / 2t}{th\pi[(d+b)/2t]} \right]^2}}$

— краевая емкость на единицу длины; b — расстояние между контактными площадками; d — длина контактной площадки (предполагается, что она квадратная); t — толщина подложки; ε — диэлектрическая проницаемость подложки.

Значения C' в (5) не превосходят 1 (в оценочных расчетах полагали $C' = 1$); значение емкости $C \approx 0,9 \cdot 10^{-18}$ Ф, при этом $X = 1/\omega C \approx 10^8$ Ом. Величиной R в выражении для комплексного сопротивления $\dot{z}$ можно пренебречь. Тогда $|\dot{z}| \approx 10^8$ Ом. В этом случае отношение плотностей токов, наведенных электрической и магнитной компонентами волны H_{10} , оценивается следующим выражением:

$$\left| \frac{\vec{j}}{j_{\Phi-L}} \right| = \frac{543 \cdot \sigma \cdot E_m \cdot 10^8}{\mu_0 \cdot \omega \cdot E_m} = 8 \cdot 10^{13}. \quad (6)$$

В (6) приведены оценочные результаты отношения тока смещения между двумя контактными площадками. Для контура, образованного всеми контактными площадками, отношение $|\vec{j}_E|/j_{\Phi-L}$ может несколько измениться, однако в любом случае ток j_E намного больше тока $j_{\Phi-L}$.

Наибольшую опасность деструктивного проявления магнитной составляющей при воздействии ИЭМП на микросхемы следует ожидать от сплошных проводящих контуров на кристалле, которые практически не встречаются в ИМС. В соответствии с найденными пороговыми значениями деградаций и катастрофических отказов в ИМС [5], токовые проявления магнитной составляющей в металлизации при воздействии ИЭМП могут иметь место для ИМС с толщиной металлизации $\Delta = 1$ мкм при напряженности электрической компоненты $E_{my} \geq 10^9$ В/м, что превышает значение напряженности поля в свободном пространстве, при котором происходит разряд. Для ИМС с меньшей толщиной металлизации проявление воздействия магнитной компоненты поля на МСЭ может снизиться на несколько порядков.

Экспериментальные исследования воздействия магнитной составляющей падающей электромагнитной волны на интегральные микросхемы

Проведенные оценочные расчеты показали, что магнитное поле волны H_{10} в волноводе не должно оказывать влияния на работу микросхем. Для подтверждения данных теоретических оценок были проведены

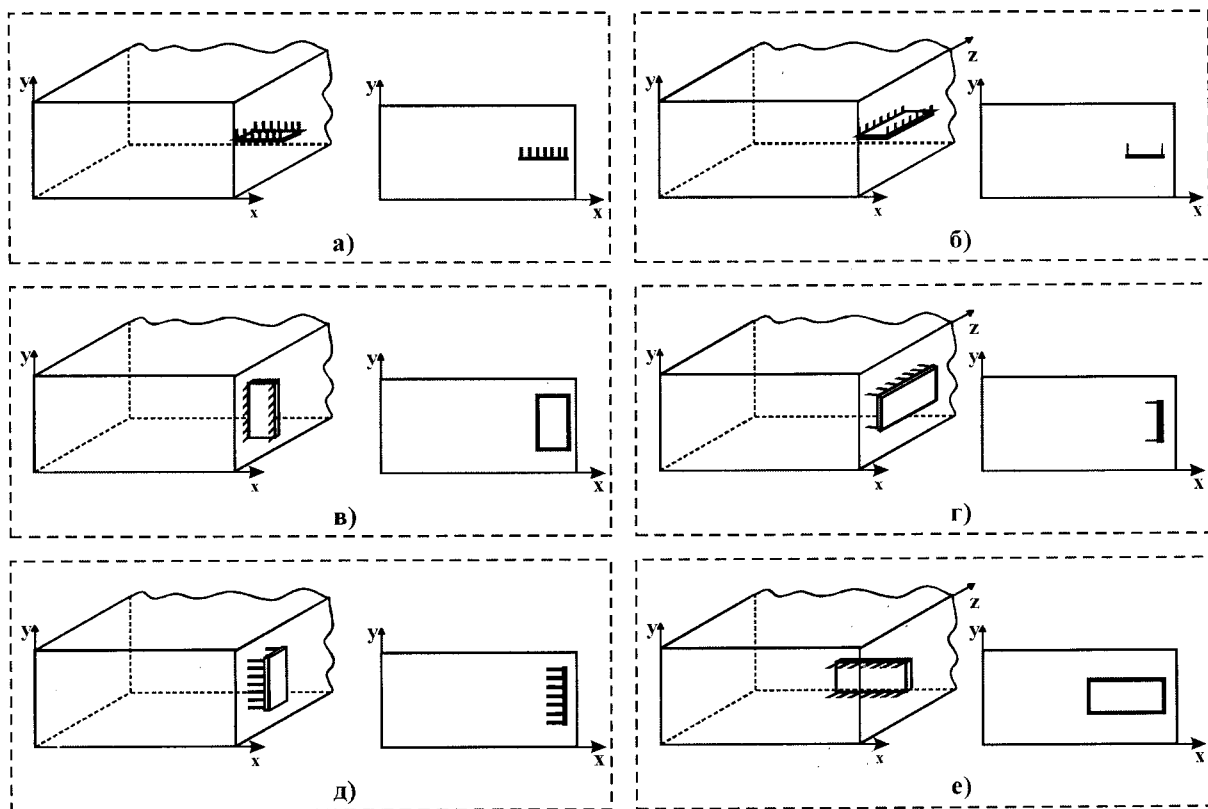


Рис. 2

соответствующие экспериментальные исследования воздействия ИЭМП на микросхемы с импульсной мощностью $P_u = 23$ кВт ($E_{\text{ты}} = 135$ кВ/м). Исследования производились на установке по методике, подробно описанной в [2, 5]. На микросхемах с помощью внешних элементов собирались генераторы и усилители. Соединение ИМС с внешними элементами и источником питания осуществлялось через отверстие в узкой стенке волновода.

Во всех ориентациях ИМС относительно поля волны H_{10} , кроме ориентации e (рис. 2), не наблюдалось каких-либо изменений в работе усилителей и генераторов, собранных на соответствующих микросхемах, при воздействии ИЭМП в течение 30 и более минут. В ориентации e наблюдалось небольшое дрожание фронтов и вершины импульсов, что можно объяснить не столько воздействием магнитной составляющей поля, сколько воздействием электрической составляющей поля волны H_{10} . Действительно, в этом положении ИМС в наибольшей мере продвинуты к центру волновода. Последующее травление микросхем, которые подвергались воздействию ИЭМП, не выявило каких-либо деструктивных проявлений в МСЭ для всех ориентаций. При проведении исследований по влиянию магнитной составляющей электромагнитной волны было задействовано 12 микросхем.

Заключение

Оценка величины тока, наведенного в проводящих микроструктурных элементах микросхем магнитной составляющей при воздействии на ИМС ИЭМП, а также сравнение тока в контуре, образованного контактными площадками и обусловленного меняющимся во времени магнитным потоком, с током, наведенным электрической компонентой воздействующего поля, показали, что токами, связанными с проявлениями действия H -компоненты (магнитной компоненты) поля, можно пренебречь. Токовое действие на МСЭ ИМС магнитной составляющей поля на 4...5 порядков меньше, чем электрической составляющей. Экспериментальные исследования подтвердили правильность проведенных оценочных расчетов.

Литература: 1. Блудов С.П., Гадецкий Н.П., Кравцов К.А. Генерация мощного импульсного СВЧ излучения и его воздействие на электронные приборы // Физика плазмы. – 1994. – Т. 20. № 7, 8. – С. 643–647. 2. Старостенко В.В., Таран Е.П., Григорьев Е.В., Борисов А.А. Воздействие электромагнитных полей на интегральные микросхемы // Измерительная тех-

ника. – 1998. – № 4. – С. 65–67. 3. D. C. Wunsch, R. R. Bell Determination Of Threshold Failure In Metallization Due To Pulse Voltages // IEEE Trans. 1970. V. NS-18. № 4. P. 212–220. 4. Antinone J. Electrical Overstress Protection for Electronic Devices. 1986, New York. – p. 387. 5. Старостенко В.В., Григорьев Е.В., Малишевский С.В., Таран Е.П. Механизмы воздействия электромагнитных полей на интегральные микросхемы // Радиоэлектроника и информатика, X.: 2002. Вып. 129. С. 107–110. 6. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. – М.: Радио и связь, 1988. – С. 334. 7. Штерн Л. Основы проектирования интегральных схем. – М.: Энергия, 1973. – С. 210.

Поступила в редакцию 10.11.03 г.



Григорьев Евгений Владимирович, старший преподаватель кафедры радиофизики Таврического национального университета. Область научных интересов: экспериментальные исследования деградационных процессов в микроструктурных элементах интегральных микросхем при воздействии электромагнитных полей.



Старостенко Владимир Викторович, канд. физ.-мат. наук, зав. кафедрой радиофизики Таврического национального университета. Область научных интересов: моделирование физических процессов в вакуумных и твердотельных приборах, исследование воздействия импульсных электромагнитных полей на элементную базу, биологические объекты и среды.



Таран Евгений Павлович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиофизики Таврического национального университета. Область научных интересов: моделирование процессов в микроструктурах при воздействии электромагнитных полей.



Чурюмов Геннадий Иванович, доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры физических основ электронной техники Харьковского национального университета радиоэлектроники. Область научных интересов: методы математического моделирования нелинейных процессов, СВЧ электроника и электродинамика, электронные и оптоэлектронные приборы.