

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРОВОДЯЩИХ МИКРОСТРУКТУР ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ НА КРИВУЮ ВУНША-БЕЛЛА

*Таран Е.П., Старостенко В.В., Григорьев Е.В., Рукавишников А.В.*

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросам надежности элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) при воздействии на нее импульсных электромагнитных полей (ИЭМП) посвящено достаточно большое количество работ (обзор приведен в монографии [1]). В этих работах воздействие ИЭМП, а также статического электричества сводится к подаче видеоимпульса на один из выводов полупроводниковых приборов (ППП) или интегральных микросхем (ИМС). При внешних воздействиях важным является определение значений воздействующего фактора, при которых наступают необратимые явления (деградации) и катастрофический отказ прибора. Имитационная модель воздействия ИЭМП на ППП и ИМС, в которой воздействие ИЭМП сводится к подаче видеоимпульса на один из выводов ППП или ИМС, не дает возможности определить пороговые значения ИЭМП, поскольку не учитывается взаимная ориентация ИЭМП и приборов, а также возможность развития пробоя по нескольким путям. Однако в рамках имитационной модели можно проанализировать динамические процессы и определить критерии, связанные с параметрами видеоимпульса, приводящие, в конечном итоге, к отказу ППП или микроструктурного элемента ИМС.

Вуншем и Беллом [2] экспериментально получена зависимость удельной мощности отказа р-п-перехода от длительности прямоугольного импульса ( $P_{кр}/S = f(\tau)$ , где  $P_{кр}$  – пороговая мощность, связанная с амплитудой приложенного видеоимпульса;  $S$  – площадь р-п-перехода, через который проходит ток;  $\tau$  – длительность импульса). Данная зависимость в работах, посвященных воздействию ИЭМП на ППП и ИМС, носит название кривой Вунша - Белла и приведена на Рис.1. В дальнейшем подобная зависимость получена для видеоимпульсов других форм, для транзисторов, а также для металлизации – одного из микроструктурных элементов ИМС [3-5]. На определенном интервале длительностей импульса экспериментальная зависимость Вунша - Белла описывается полуэмпирической формулой [2]:

$$\frac{P_{кр}}{S} = k_d \cdot \tau^{-1/2}, \quad (1)$$

где  $k_d$  – коэффициент деградации, который определяется на основании экспериментальных данных.

Полученные зависимости представляют собой статистические данные по экспериментальным исследованиям стойкости полупроводниковых диодов и

транзисторов, а также теоретические кривые на основе полуэмпирической формулы (Рис.1).

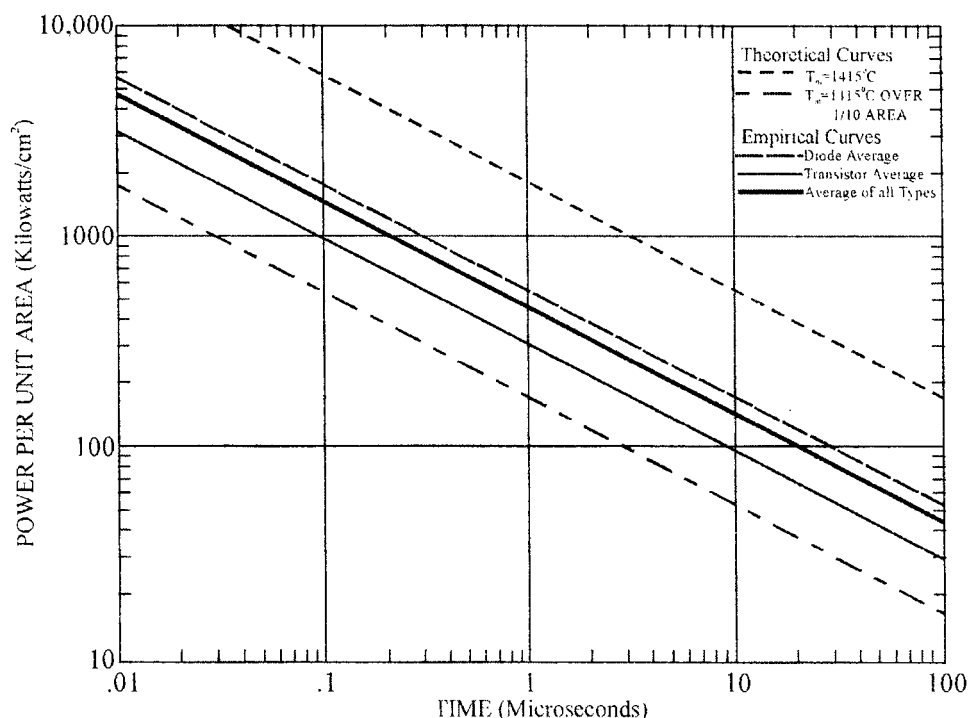


Рис.1. Зависимость удельной пороговой мощности от длительности импульса [2].

Надо отметить, что полуэмпирическая зависимость (1) достаточно хорошо выполняется только в ограниченном диапазоне времен (0,1÷20 мкс). Эта область так называемого «квазиadiaбатического» режима разогрева полупроводниковой структуры, которая приводит к необратимому отказу. Для коротких длительностей импульса ( $t_n < 0,1$  мкс) Вунш предложил полуэмпирическую формулу, в которой зависимость удельной мощности отказа р-п-перехода от длительности импульса ( $P_{кр}/S$ ) пропорциональна  $1/t$ . Эта зависимость дает лучшее согласование с экспериментальными данными, а область ( $t_n < 0,1$  мкс) представляет собой «adiaбатический» режим разогрева исследуемой структуры.

Однако даже полученные полуэмпирические зависимости удельной мощности отказа р-п-перехода от длительности импульса не позволяют количественно сопоставить теоретические результаты с экспериментальными данными. Это вызвано рядом причин:

1. полуэмпирические зависимости получены на основе одномерной модели;
2. не учтены геометрические и электрофизические свойства исследуемой структуры и, в частности, влияние неоднородности полупроводниковой структуры на значения удельной пороговой мощности;
3. при больших длительностях импульса не учтены процессы теплообмена с окружающей средой.

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРОВОДЯЩИХ МИКРОСТРУКТУР ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ НА КРИВУЮ ВУНША-БЕЛЛА

В настоящее время практически вся обработка сигнала производится с помощью ИМС. Кроме того, плотность упаковки микроструктурных элементов такова, что ИМС наиболее уязвимы при воздействии ИЭМП. В дальнейшем имеет смысл сосредоточиться на воздействии ИЭМП только на ИМС. Из микроструктурных элементов микросхем (элементы на основе р-п-перехода, металлизация и т.д.) наиболее уязвима оказывается металлизация (контактные площадки, проводящие дорожки) [5, 6].

В данной работе разработана численная математическая модель развития деградационных процессов в проводящих микроструктурах ИМС при воздействии ИЭМП и выявлено влияние параметров неоднородности металлизации на кривую Вунша-Белла.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ДЕГРАДАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОВОДЯЩИХ МИКРОСТРУКТУРАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Динамика развития деградационных процессов в проводящих микроструктурах ИМС определяется как параметрами внешнего ИЭМП (амплитудой, частотой, длительностью импульса, периодом), так и структурными особенностями элементов ИМС. В качестве объекта исследований используется фрагмент ИМС в виде 4-х слойной структуры, который включает в себя кремниевую подложку (Si), диэлектрический слой оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), проводящую микроструктуру (Al), в которую введены диэлектрические включения ( $\text{SiO}_2$ ), и защитный слой, представляющий собой слой оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) (Рис.2).

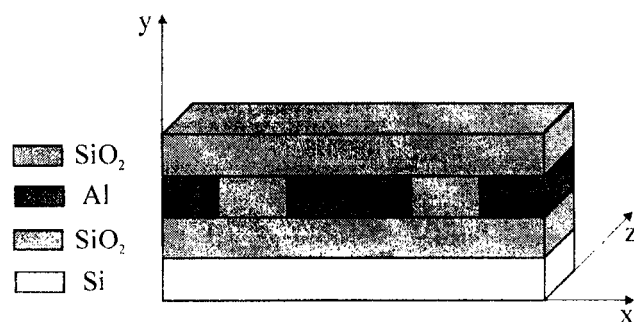


Рис.2. Модель кристалла ИМС.

Динамическая модель деградационных процессов в проводящих микроструктурах ИМС основывается на двумерном нестационарном уравнении теплопроводности для слоистой структуры [7]:

$$c_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_1(T, t) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_1(T, t) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial y} \right] + q_1(x, y, t), \quad (2)$$

где  $T_l$  – температурное поле на l-м слое (l – обозначение слоя на кристалле (Si, SiO<sub>2</sub>, Al));  $c_l$  – удельная теплоемкость l-слоя;  $\rho_l$  – плотность материала l-слоя;  $K_l(T, t)$  – коэффициент теплопроводности;  $q_l(x, y, t)$  – удельная мощность источников тепла.

Уравнение является неоднородным и нелинейным как по внешнему тепловому источнику, так и по коэффициенту теплопроводности ( $K_l(T, t)$ ), так как учитывается зависимость этих параметров от времени, температуры и электрофизических и геометрических свойств исследуемой структуры. Зависимость коэффициента теплопроводности ( $K_l(T, t)$ ) от температуры аппроксимируется на основе экспериментальных данных.

Для исследования характера распространения тепловых потоков в исследуемой структуре используется следующая система граничных условий [7]:

1. поверхность торцов считается теплоизолированной:

$$\frac{\partial T_l}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (3);$$

$$\frac{\partial T_l}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0$$

2. тепловое поле на верхней грани слоистой структуры удовлетворяет условию Ньютона:

$$K_l \cdot \frac{\partial T_l}{\partial y} \Big|_{y=l} + \alpha_s \cdot (T_l - \theta) = Q(x, t) \quad (4),$$

где  $\alpha_s$  – коэффициент теплоотдачи на верхней грани структуры,  $\theta$  – температура внешней среды,  $Q(x, t)$  – плотность плоских источников тепловыделения, l – защитный слой в модели кристалла (SiO<sub>2</sub>);

3. между слоями структуры предполагается идеальный тепловой контакт, который описывается граничным условием четвертого рода:

$$K_l \cdot \frac{\partial T_l}{\partial y} \Big|_{y=y_l} = K_{l+1} \cdot \frac{\partial T_{l+1}}{\partial y} \Big|_{y=y_l} \quad (5),$$

$$T_l(x, y_l, t) = T_{l+1}(x, y_l, t) \quad (6);$$

4. на нижней поверхности слоистой микроструктуры используется граничное условие третьего рода:

$$K_l \cdot \frac{\partial T_l}{\partial y} \Big|_{y=0} + \alpha_{кл} \cdot (T_l - \theta) = 0 \quad (7),$$

где  $\alpha_{кл}$  – коэффициент теплоотдачи,  $K_l$  – коэффициент теплопроводности подложки (Si),  $\theta$  – температура внешней среды.

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРОВОДЯЩИХ МИКРОСТРУКТУР  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ НА КРИВУЮ ВУНША-БЕЛЛА**

Удельная мощность тепловых источников определяется как характером протекания тока при воздействии ИЭМП, так и структурой металлической пленки. В качестве проводящей микроструктуры в ИМС используется алюминиевая металлизация, которая имеет зернистую структуру [8]. Зернистость структуры и неоднородность контакта металлической пленки с прилегающими слоями приводит к появлению неоднородных участков вдоль металлической пленки ( $\Delta y$  – глубина неоднородных участков проводящей микроструктуры, Рис.3).

Ток, протекающий по проводящей микроструктуре при воздействии ИЭМП,

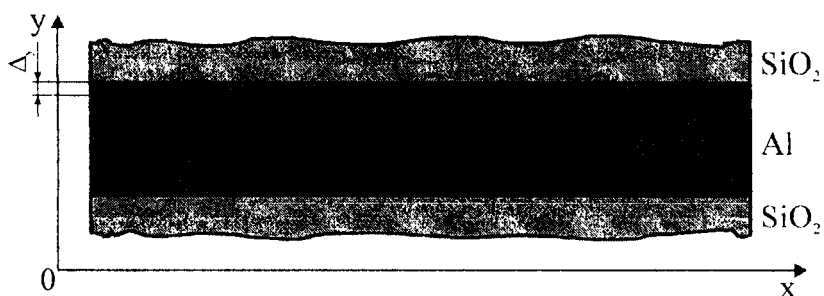


Рис.3. Распределение неоднородных участков в проводящей микроструктуре.

определяется из решения дифракционной задачи – рассеяния падающей электромагнитной волны на ИМС с учетом ее основных макрокомпонент (кристалла, корпуса и выводов) [9].

Удельная мощность источников тепла определяется как параметрами внешнего ИЭМП (частотой, напряженностью, ориентацией ИМС относительно падающей электромагнитной волны), так и структурой металлизации. При численном расчете деградационных процессов в кристалле ИМС неоднородные металлические пленки моделируются в виде двумерной сетки сопротивлений [11]. Каждое сопротивление представляет собой сопротивление микроучастков металлизации ИМС.

При воздействии ИЭМП ток проводимости, протекающий по металлизации, переходит на диэлектрических участках в ток смещения (x-направление, Рис.2). Расчет разрядной цепи включает в себя учет активных сопротивлений (электропроводностей) микроучастков металлизации, эквивалентных индуктивностей металлических пленок, емкостей диэлектрических включений. Модель проводящей микроструктуры представляет собой последовательно-параллельную сетку сопротивлений [10]. Получено выражение для удельной мощности, которая выделяется на каждом сопротивлении (микроучастке) модели металлической пленки при воздействии ИЭМП:

$$q_k(i, j) = \frac{U^2 \cdot \sigma_k(i, j)}{S^2 \left[ \frac{h_x^2}{S^2} \left( \sum_{k=1}^{n+1} \left( \sum_{i=1}^{N_{x_k}} \frac{1}{\sum_{j=1}^{N_y} \sigma_k(i, j)} \right) \right)^2 + \left( \sum_{k=1}^{n+1} \omega L_k - \sum_{k=1}^n \frac{1}{\omega C_k} \right)^2 \right] \left[ \sum_{j=1}^{N_x} \sigma_k(i, j) \right]^2} \quad (8)$$

где  $U$  – действующее напряжение, приложенное к проводящей микроструктуре (определяется из решения дифракционной задачи);  $\omega$  – циклическая частота внешнего ИЭМП;  $n$  – количество диэлектрических включений вдоль длины проводящей микроструктуры ( $x$ -направление, Рис.2);  $C_k$  – эквивалентная емкость  $k$ -го диэлектрического включения;  $L_k$  – эквивалентная индуктивность  $k$ -го участка металлизации;  $\sigma_k(i, j)$  – электропроводность микроучастка, расположенного на  $k$ -ом участке металлической пленки;  $h_x$  – длина микроучастка;  $S$  – площадь поперечного сечения микроучастка;  $N_{xk}, N_y$  – количество микроучастков вдоль  $x$ - и  $y$ -направлений соответственно;  $i, j$  – номера сопротивлений (микроучастков) проводящей структуры вдоль  $x$ - и  $y$ -направлений соответственно;  $k$  – участок металлизации, для которого проводится расчет удельной мощности. При расчете удельной мощности учитывается зависимость электропроводности микроучастков металлической пленки от температуры.

Математическая модель развития деградационных процессов в проводящих микроструктурных элементах ИМС позволяет определить зависимость удельной пороговой мощности от длительности импульса для различной степени неоднородности металлической пленки путем численного решения уравнение теплопроводности.

#### **КРИВАЯ ВУНША-БЕЛЛА ДЛЯ НЕОДНОРОДНЫХ ПРОВОДЯЩИХ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

При воздействии ИЭМП в качестве меры воздействия используется напряженность электрического поля падающей электромагнитной волны. Пороговые значения напряженности, вызывающие локальное выгорание металлической пленки, зависят как от взаимной ориентации ИЭМП и ИМС, так и от структуры металлизации. Численные расчеты были проведены для случая, когда вектор электрической компоненты падающей электромагнитной волны параллелен плоскости кристалла микросхемы [6].

Появление неоднородных участков в проводящих микроструктурных элементах ИМС приводит к уменьшению пороговых значений напряженности ИЭМП (Рис.4).

Увеличение неоднородности проводящей микроструктуры приводит к сужению токового канала, что вызывает уменьшение длительности импульса, в результате которого происходит локальное выгорание микроучастка металлической пленки. В зависимости от величины напряженности ИЭМП и геометрических размеров неоднородных участков время локальной деградации металлической пленки уменьшается более чем на порядок.

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРОВОДЯЩИХ МИКРОСТРУКТУР  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ НА КРИВУЮ ВУНША-БЕЛЛА**

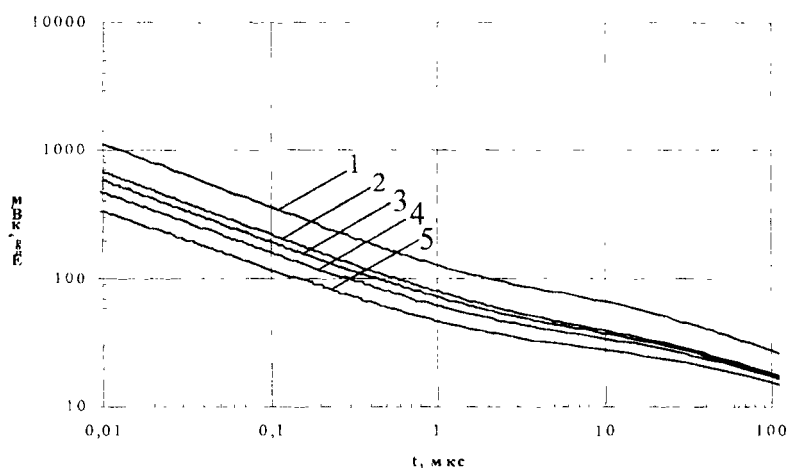


Рис.4. Зависимость пороговой напряженности поля от длительности импульса для различной глубины неоднородных микроучастков: 1 - однородная проводящая структура (толщина структуры 1,2 мкм); 2 -  $\Delta y=0,12$  мкм; 3 -  $\Delta y=0,24$  мкм; 4 -  $\Delta y=0,36$  мкм; 5 -  $\Delta y=0,48$

При малых длительностях импульсов ( $t_{и} < 1$  мкс) неоднородность металлической пленки значительно больше оказывает влияние на величину пороговой напряженности ИЭМП, чем при больших длительностях ( $t_{и} > 40$  мкс). Это связано с тем, что при  $t_{и} < 1$  мкс характер развития тепловых процессов в основном определяется электрофизическими параметрами проводящей структуры (электропроводностью микроучастков, их месторасположением).

При  $t_{и} > 40$  мкс существенную роль на динамику тепловых процессов и, естественно, на значения пороговой напряженности поля, оказывают уже не столько неоднородные микроучастки металлической пленки, сколько процессы теплообмена кристалла ИМС с окружающей средой.

Характер полученной зависимости пороговой напряженности ИЭМП качественно достаточно хорошо согласуется с кривой Вунша-Белла.

Для микроучастка неоднородной структуры металлической пленки, входящей в качестве микроструктурного элемента в кристалл ИМС, получена зависимость пороговой мощности, приходящейся на единицу поверхности микроучастка, от длительности импульса (Рис.5).

Полученные зависимости имеют три характерных области, которые могут быть аппроксимированы следующими аналитическими выражениями (Рис.5): 1.  $t_{и} < 1$  мкс –  $P_{пор}/S \sim f(t^1)$ ; 2.  $1 < t_{и} < 40$  мкс –  $P_{пор}/S \sim f(t^{1/2})$ ; 3.  $t_{и} > 40$  мкс –  $P_{пор}/S \sim f(t^{-1/2})$ .

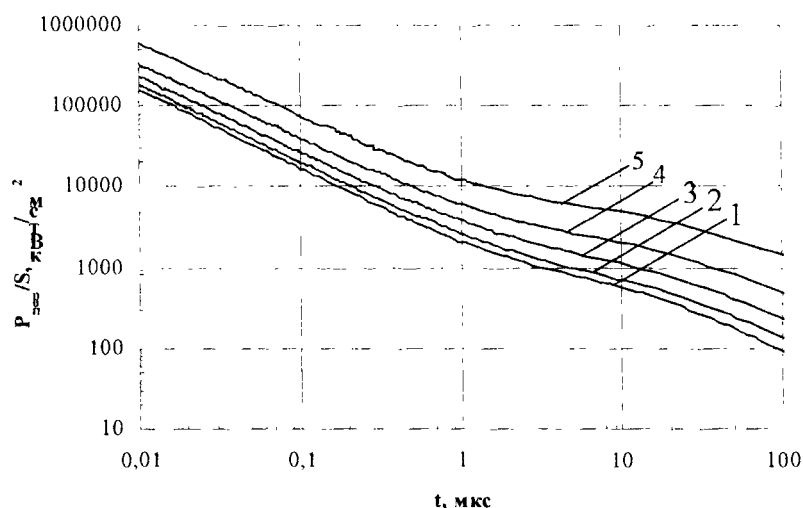


Рис.5. Зависимость пороговой мощности, приходящейся на единицу площади локального участка металлической пленки, от длительности воздействующего импульса для различных значений неоднородности: 1 - однородная проводящая структура; 2 -  $\Delta y=0,12$  мкм; 3 -  $\Delta y=0,24$  мкм; 4 -  $\Delta y=0,36$  мкм; 5 -  $\Delta y=0,48$  мкм.

Область 2 представляет собой аналогичную зависимость, полученную Вуншем для однородной проводящей структуры. Однако, в отличие от кривой Вунша-Белла, верхняя временная граница данной области в 2 раза больше. Это связано с наличием различных микроструктурных элементов в кристалле ИМС, а также с тем, что, в отличие от полуэмпирической зависимости Вунша-Белла, учтены особенности теплообмена кристалла ИМС с окружающей средой.

### ВЫВОДЫ

Полученная зависимость удельной пороговой мощности от длительности импульса для микроучастков металлизации при воздействии ИЭМП качественно хорошо согласуется с кривой Вунша-Белла для однородной проводящей структуры. Для неоднородной структуры кривая Вунша-Белла имеет временные области, которые отличаются от подобного рода областей для однородной структуры. Это связано с наличием микроструктурных элементов в кристалле ИМС с различными электрофизическими свойствами. Установлено влияние параметров неоднородности металлизации на пороговые значения напряженности ИЭМП.

### Список литературы

1. Antinone J. Electrical Overstress Protection for Electronic Devices. 1986, New York. - p.387.
2. D. C. Wunsch, R. R. Bell. Determination Of Threshold Failure Of Semiconductor Diodes And Transistors Due To Pulse Voltages // IEEE Trans., 1968, v. NS-15, № 6, p.244-259.



**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРОВОДЯЩИХ МИКРОСТРУКТУР  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ НА КРИВУЮ ВУНША-БЕЛЛА**

---

3. Wunsch D.C. The application of Electrical Overstress Models to State Protective Network // 16-th Annual Proceeding Reliability Physics, San Diego, 1978. - P. 47-55.
4. 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.
5. Antinone A Review of the Phenomenology of High Power Microwave Effects on Electronic Components // International Symposium on Electromagnetic Environments and Consequence, May-June 1994, Bordeaux, France, p.344-350.
6. 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.
7. Автоматизация теплового проектирования микроэлектронных устройств средствами САПР. - Львов, Выща школа, 1988. - 356 с.
8. Чернышев А.А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Радио и связь, 1988. – 256 с.
9. Старостенко В.В., Малишевский С.В., Таран Е.П., Шадрин А.А. Влияние высших типов волн на распределение ЭМП вблизи неоднородности // Материалы докладов 9-ой Международной Крымской Конференции “СВЧ-техника и телесвязь”, Севастополь, 1999, с.331-332.
10. Е.П.Таран, В.В.Старостенко, Е.В.Григорьев Локальная деградация металлизации в интегральных микросхемах при воздействии электромагнитных полей // Радиофизика и электроника, том 3, №1, 1998, с.123-126.

*Поступила в редакцию 02.10.2002 г.*