

УДК 621.396.677

А.В. Ирха, Г.В. Ермаков, А.В. Ченыкаев

<sup>1</sup> Харьковський університет Воздушних Сил ім. І. Кожедуба, Харків<sup>2</sup> Национальный технический университет «ХПИ», Харків<sup>3</sup> Военная служба правопорядка, Харків**ВЛИЯНИЕ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ВЕРОЯТНОСТЬ ДЕГРАДАЦИИ РАДИОЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ИЗЛУЧЕНИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ**

Предложена методика расчета вероятности деградации полупроводниковых элементов для равномерного закона распределения тепловой энергии при использовании сверхширокополосных сигналов, отраженных от подстилающей поверхности. В методике учитывается форма отраженного сигнала, его пиковая мощность, количество импульсов в пачке. Отмечается, что при увеличении угла скольжения вероятность деградации уменьшается, что вызывает необходимость увеличивать количество импульсов последовательности.

**Ключевые слова:** вероятность деградации, сверхширокополосный сигнал, подстилающая поверхность, коэффициент отражения, энергия активации

**Введение**

Анализ большого числа экспериментов показывает [1 – 5], что значительную роль при оценке уровней повреждения полупроводниковых элементов играют параметры воздействия импульсов и пиковая мощность поражающего сигнала. При отражении сигнала от подстилающей поверхности изменяется его временная структура и снижается пиковая мощность, что приводит к изменению механизмов деградации полупроводниковых элементов. Предполагается, что в данном случае будет преобладать механизм накопления повреждений [1] в отличие от теплового механизма Вунша-Белла [6]. При обоих механизмах повреждения носят вероятностный характер. *Целью статьи* является определение вероятности повреждений радиоэлементов пачкой сверхширокополосных (СШП) сигналов, отраженных от подстилающей поверхности, при нормальном законе распределения тепловой энергии.

**Основная часть**

Для расчета вероятности деградации радиоэлементной базы пачкой СШП сигналов необходимо определить его форму или спектр и пиковую мощность сигналов в пределах главного лепестка диаграммы направленности (ДН) антенны.

Для анализа спектральной структуры СШП сигнала, отраженного от земной поверхности, необходим расчет коэффициента отражения в широком частотном диапазоне, дисперсия которого существенным образом зависит от электрических параметров грунта.

В работе [7] исследованы электрические параметры песчаного и глинистого грунтов методом короткого замыкания. Отмечается, что дисперсия ра-

диоволн наиболее сильно проявляется в диапазоне метровых – миллиметровых радиоволн. Практическая разница в измерениях параметров песчаного и глинистого грунтов связана с тем, что пластичность влажного песчаного грунта весьма мала, а у глинисто-грунта имеет место значительная пластичность, которая сильно зависит от влажности.

Известно [8], что коэффициент отражения от земной поверхности зависит от электрических параметров грунта. В случае, когда относительная комплексная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon'(\omega)$  зависит от частоты, коэффициент отражения  $R(\omega)$  становится также частотно-зависимым:

$$R(\omega, \theta) = \frac{\varepsilon'(\omega) \sin \theta - \sqrt{\varepsilon'(\omega) - \cos^2 \theta}}{\varepsilon'(\omega) \sin \theta + \sqrt{\varepsilon'(\omega) - \cos^2 \theta}}, \quad (1)$$

$$\text{где} \quad \varepsilon'(\omega) = \varepsilon(\omega) - j60\lambda\sigma(\omega); \quad (2)$$

$\varepsilon(\omega)$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\theta$  – угол скольжения;  $\omega$  – циклическая частота;  $\lambda$  – длина волны;  $\sigma$  – удельная проводимость.

Как видно из (2), коэффициент отражения зависит от угла скольжения и соотношения тока смещения к току проводимости  $\varepsilon(\omega) / 60\lambda\sigma(\omega)$ . В случае, когда почва является диэлектриком  $60\lambda\sigma(\omega) \ll \varepsilon(\omega)$  или полупроводником  $60\lambda\sigma(\omega) \approx \varepsilon(\omega)$  коэффициент отражения (1) становится вещественным и зависит от относительной диэлектрической проницаемости; в случае, когда почва является проводником  $60\lambda\sigma(\omega) \gg \varepsilon(\omega)$   $R(\omega) \approx 1$ .

Следовательно, пользуясь результатами [7], для анализа выражения (1) необходимо определить действительную и мнимую части (2).

Из [7] следует, что для глинистого грунта при влажности 15% в диапазоне 4,5 – 5,5 ГГц относительная диэлектрическая проницаемость практически постоянна и составляет величину  $\epsilon(\omega) = 15$ .

В работе представлена также зависимость коэффициента затухания Q глинистого грунта для влажности 15% в рассматриваемом частотном диапазоне (рис.1).

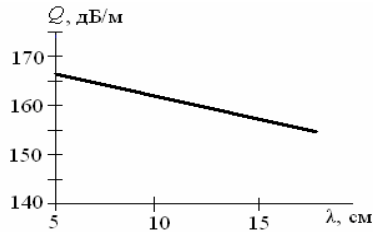


Рис. 1. Зависимость коэффициента затухания от длины волн

Пользуясь выражением [7]:

$$q = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \sqrt{\epsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2} - \epsilon^2 \right]}, \quad (3)$$

где  $q = Q / 8,7$ , и данными рис. 1, был проведен расчет проводимости для глинистого грунта в соответствии с зависимостью:

$$\sigma(\omega) = \frac{\omega}{60\pi c} \sqrt{\left( \frac{Q(\omega)c}{8,7\omega} \right)^4 + \epsilon(\omega) \left( \frac{Q(\omega)c}{8,7\omega} \right)^2},$$

где  $c$  – скорость света.

Результаты расчетов показали, что в спектральном диапазоне 4,5 – 5,5 ГГц глинистый грунт при влажности 15% является диэлектриком.

При уменьшении влажности относительная диэлектрическая проницаемость глинистого грунта уменьшается. При влажности менее 15% затухание радиоволн пропорционально влажности.

Амплитудный пространственно-частотный спектр  $E_R(\omega, \Theta)$  отраженного от земной поверхности СШП сигнала имеет вид:

$$\dot{E}_R(\omega, \Theta) = \dot{E}_\theta(\omega, \Theta) \cdot \dot{R}(\omega, \Theta), \quad (4)$$

где  $\dot{E}_\theta(\omega, \Theta) = \dot{E}(\omega) \dot{V}(\omega, \Theta)$ ;

$$\dot{V}(\omega, \Theta) = \frac{1}{r\sqrt{\pi}} \sqrt{D_{\max}(\omega)} F(\omega, \Theta) \exp(-jkr)$$

пространственно-частотная характеристика зеркальной антенны;  $D_{\max}(\omega)$  – коэффициент направленного действия для спектральной составляющей;  $F(\omega, \Theta)$  – нормированная амплитудная диаграмма направленности.

Временную структуру СШП сигнала, отраженного от грунта, можно определить с помощью преобразования Фурье:

$$E_R(t, \omega) = \text{Re} \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{E}(\omega) \dot{V}(\omega) \dot{R}(\omega, \Theta) \exp(-j\omega t) d\omega \right].$$

При возбуждении зеркальной антенны гауссоидой тока наносекундной длительности была получена временная структура отраженного от подстилающей поверхности (глинистого грунта) СШП сигнала в направлении главного максимума для разных углов скольжения (рис. 2).

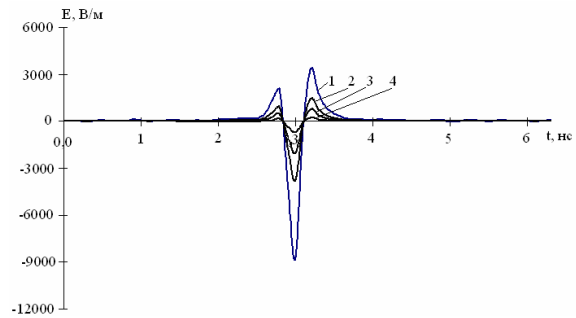


Рис. 2. Форма отраженного от земли СШП сигнала в направлении главного максимума для разных углов скольжения  $\theta$

На рисунке введены следующие обозначения: кривая 1 соответствует излученному импульсу в направлении главного максимума, кривая 2 –  $\theta=1^\circ$ , кривая 3 –  $\theta=5^\circ$ , кривая 4 –  $\theta=10^\circ$ . Анализ результатов расчетов показывает, что амплитуда отраженного сигнала для угла скольжения  $5^\circ$  уменьшается в 3 раза, для угла  $10^\circ$  – в 6 раз по отношению к прямому сигналу. Кроме этого, из представленных графиков видно, что длительность отраженного сигнала не изменяется, а угол скольжения оказывает существенное влияние на форму отраженного сигнала. С увеличением угла уменьшается величина коэффициента отражения, что приводит к уменьшению максимального значения отраженного сигнала и уменьшению крутизны фронтов.

Полученные результаты позволяют рассчитать вероятность деградации радиоэлементной базы для равномерного закона распределения тепловой энергии.

Предположим, что под действием радиоимпульса достаточно большой интенсивности происходит образование дефектов структуры выпрямляющего контакта полупроводникового элемента, например, диода, что приводит к изменению его характеристик. Такой характеристикой может быть дифференциальная проводимость  $r(t)$  выпрямляющего контакта. При достижении некоторого критического значения  $r(t)=r_{кр}$ , будет происходить деградация полупроводникового элемента. Очевидно, что размеры дефекта зависят от энергии импульса, а их число определяется структурой полупроводника, его однородностью. Уменьшение мощности импульсов, вызывающих повреждение диода, с увеличением частоты повторения (уменьшением периода следования  $T_{СШП}$ ) обусловлено тем, что деградация полупроводникового элемента может происходить путем создания большого числа дефектов. Энергия образования каждого из них сравнительно невелика. Из-

менение параметра  $\delta p$  под действием одного мощного СШП сигнала длительностью  $\tau_n$  будет пропорционально скорости процесса повреждения  $V$  [3]:

$$\delta p = \int_0^{\infty} V(t) dt. \quad (5)$$

Процесс увеличения деградации до полного вывода элемента из строя будет происходить в результате воздействия последовательности СШП сигналов. Для оценки скорости изменения параметра  $p$  целесообразно использовать активационную теорию Аррениуса, в соответствии с которой [4]:

$$V(t) = V_0 \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_a}{k_B T}\right), \quad (6)$$

где  $\mathcal{E}_a$  – энергия последовательности СШП сигналов;  $V_0$  – постоянная, зависящая от типа дефектов;  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура выпрямляющего контакта, которая изменяется под действием последовательности СШП сигналов.

Если изменение параметра  $p$  происходит под действием нескольких импульсов, то и энергия активации и постоянная  $V_0$  могут быть разными для разных импульсов. Будем полагать, что изменения этих параметров от импульса к импульсу невелики и этими изменениями можно пренебречь. В этом случае можно получить уравнение, описывающее изменение параметра  $p(t)$ :

$$\frac{dp(t)}{dt} + \gamma p(t) = V_0 \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_a}{k_B T(t)}\right), \quad (7)$$

где  $\gamma p(t)$  – релаксационный параметр, описывающий процесс восстановления полупроводниковой структуры. Решение уравнения (7) имеет вид [3]:

$$p(t) = V_0 \exp(-\gamma t) \int_0^t \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_a}{k_B T(t')}\right) dt'. \quad (8)$$

Для получения количественных оценок значений дифференциальной проводимости выпрямляющего контакта при воздействии пачки МЧ ПВС рассмотрим режим тепловыделения с длительностью импульсов  $\tau_n$ , периодом последовательности  $T_{\text{СШП}}$  таким, что между воздействиями импульсов температура перехода успевает восстановиться до первоначального значения.

Изменение параметра  $p(t)$  под действием пачки из  $N$  импульсов принимает вид [4]:

$$p_N = V_0 \eta(N, T_{\text{СШП}}, \gamma) \exp(-\gamma T_{\text{СШП}}) \times \int_0^{T_{\text{СШП}}} \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_a}{k_B T(t)} + \gamma t\right) dt, \quad (9)$$

$$\eta(N, T_{\text{СШП}}, \gamma) = \frac{1 - \exp(-\gamma N T_{\text{СШП}})}{\exp(-\gamma T_{\text{СШП}})} \exp(-\gamma T_{\text{СШП}} + \gamma \tau_n).$$

Очевидно, что статистические флуктуации дифференциальной проводимости выпрямляющего контакта  $p(t)$  связаны со случайной величиной энер-

гии  $\mathcal{E}_a$ , и именно ее флуктуации определяют статистику деградации (так как дефекты, образующиеся под действием серии импульсов перегрузки, могут возникать на различных центрах, кроме того, меняться условия образования дефектов).

Вероятность деградации полупроводникового элемента можно оценить как вероятность превышения параметром  $p$  критического значения  $p_{\text{кр}}$ :

$$P = \int_{p_{\text{кр}}}^{\infty} g(p) dp,$$

где  $g(p)$  – плотность вероятности случайной величины  $p$ . Если для случайной непрерывной величины  $\mathcal{E}_a$ , известна плотность распределения вероятности  $f(\mathcal{E}_a)$ , то вероятность деградации полупроводникового элемента  $P$  можно оценить как вероятность превышения параметром  $p$  (после воздействия  $N$  импульсов последовательности СШП сигналов) критического значения  $p_{\text{кр}}$  [3]:

$$P = \int_{\mathcal{E}_0}^{\mathcal{E}(T, T_{\text{СШП}}, \gamma, \eta, \delta)} f(\mathcal{E}_a) d\mathcal{E}_a, \quad (10)$$

$$\mathcal{E}(T, T_{\text{СШП}}, \gamma, \eta, \delta) = k_B T \left\{ \ln(\delta) + \ln[\eta(N, T_{\text{СШП}}, \gamma)] \right\}.$$

Для оценки вероятности деградации полупроводникового элемента предположим, что энергия  $\mathcal{E}_a$  имеет равномерный закон распределения в диапазоне  $\mathcal{E}_0 \leq \mathcal{E}_a \leq \mathcal{E}_0 + \Delta\mathcal{E}$ , то вероятность деградации будет иметь вид [5]:

$$P = \begin{cases} P = 0 & \text{при } k_B T [\delta + \ln(\eta)] \leq \mathcal{E}_0, \\ P = \frac{k_B T [\delta + \ln(\eta)] - \mathcal{E}_0}{\Delta\mathcal{E}} & \text{в других случаях,} \\ P = 1 & \text{при } k_B T [\delta + \ln(\eta)] > \mathcal{E}_0 + \Delta\mathcal{E}. \end{cases} \quad (11)$$

Выражение (11) является основным расчетным и дает возможность получить численные оценки вероятности деградации  $P$  от числа импульсов  $N$ , от периода следования импульсов последовательности  $T_{\text{СШП}}$ , от мощности  $P$  одного импульса.

Величину  $\mathcal{E}_0$  можно оценить как  $k_B T_{\text{кр}}$ , где  $T_{\text{кр}} = (T_0 + \Delta T_{\text{кр}})$  – критическое значение температуры, используемое в модели Вунша-Белла, при достижении которого происходит повреждение p-n перехода. Величину  $\Delta T_{\text{кр}}$  для разных p-n переходов, например кремниевых, можно определить по эмпирическому выражению, приведенным в работе [5]. Так, для p-n переходов с напряжением лавинного пробоя  $-7 \dots -9$  В,  $\Delta T_{\text{кр}} = 350 \dots 500^\circ$ .

На рис. 3 представлена зависимость вероятности деградации полупроводникового элемента при равномерном законе распределения от числа воздействующих радиоимпульсов  $N$  для  $\delta=3$ ;  $\gamma=10^{-4}$ ;  $\Delta\mathcal{E}/\mathcal{E}_0=1$ ,  $T_{\text{СШП}}=100$  нс,  $\mathcal{E}_0/k_B T=10$  для разных углов скольжения в направлении главного максимума ДН. Обозначения те же, что и на рис. 2.

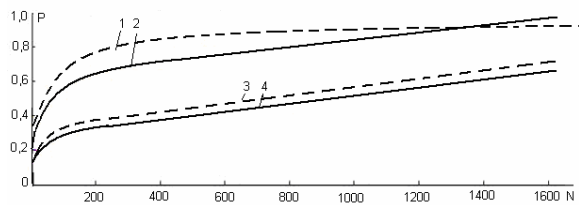


Рис. 3. Зависимость вероятности деградации р-п перехода от количества импульсов в пачке N для равномерного закона распределения

Параметр  $\Delta\epsilon/k_B T$  обратно пропорционален максимальной температуре, которая достигается в р-п переходе и показывает во сколько раз энергия сигнала меньше тепловой энергии, достаточной для ФП элемента. Параметр  $\Delta\epsilon/\epsilon_0$  характеризует разброс энергии сигнала на разных дефектах р-п перехода и в общем случае он может быть порядка единицы.

Проведенный анализ также показал, что при увеличении количества импульсов вероятность деградации р-п перехода стремится к своему предельному значению. При использовании СШП сигналов при периоде следования  $T_{\text{СШП}}$  меньше времени релаксации деградация элементов может наступить уже при 800÷1000 импульсах в пачке в направлении главного максимума. В случае снижения мощности зондирующего сигнала за счет увеличения угла скольжения уменьшается температура T разогрева р-п перехода, что приводит к уменьшению снижения энергии начала активации; деградация наступает при  $N=1600\div 2000$  импульсов при определенных выше значениях энергии сигнала. Отметим, что для модели накопления повреждений зависимость вероятности деградации от длительности импульса гораздо менее существенная.

## Выводы

Обобщая полученные результаты, можно сделать следующие важные для практического применения данной методики выводы: для повышения вероятности деградации радиоэлементной базы целесообразно использовать пачку СШП сигналов, каждый из которых приводит к локальному дефекту р-п перехо-

да. Количество сигналов будет тем больше, чем меньше период повторения и меньше мощность одиночных сигналов. При увеличении угла скольжения вероятность деградации уменьшается, что вызывает необходимость увеличивать количество импульсов в пачке. Очевидно, что воздушное базирование специальной РТС в энергетическом плане может рассматриваться как более предпочтительное.

## Список литературы

1. Васильев К.Б. Статистика отказов цифровых ИМС, вызванных импульсным радиоизлучением / К.Б. Васильев, А.В. Ключник, А.В. Солодов // 9-я Междунар. Крымская конфер. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 1999. – С. 329-330.
2. Физические основы надежности интегральных схем / В.Ф. Сынов, Р.П. Пивоваров, Б.К. Петров, Т.В. Долматов. Под ред. Ю.Г. Миллера. – М.: Сов. радио, 1976. – 320 с.
3. Ключник А.В. Моделирование вероятности повреждения СВЧ диодов импульсным радиоизлучением / А.В. Ключник, Ю.А. Пирогов, А.В. Солодов // IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». М.: ИРЭ РАН, 2010. – С. 255–261.
4. Ключник А.В. Статистика повреждения СВЧ диодов импульсным радиоизлучением / А.В. Ключник, Ю.А. Пирогов, А.В. Солодов // Радиоэлектроника. – 2010. – №12. – С.22 – 29.
5. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы / В.В. Антипин и др. // Зарубежная радиоэлектроника. – 1995. – №1. – С. 37-52.
6. Панов В.В. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ средств функционального поражения / В.В. Панов, А.А. Саркисян // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. – № 10 – С. 22-24.
7. Лецанский Ю.И. Электрические параметры песчаного и глинистого грунтов в диапазоне сантиметровых, дециметровых и метровых волн / Ю.И. Лецанский, Г.Н. Лебедева, В.Д. Шумилин // Известия Вузов. Серия Радиофизика. – 1971. – Том 14, №4. – С. 562 – 569.
8. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн / Ф.Б. Черный. – М.: Сов. радио, 1972. – 464 с.

Поступила в редколлегию 1.08.2013

Рецензент: д-р техн. наук проф. И.И.Обод, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков..

## ВПЛИВ ПІДСТИЛАЮЧОЇ ПОВЕРХНІ НА ІМОВІРНІСТЬ ДЕГРАДАЦІЇ РАДІОЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ВИПРОМІНЮВАННІ НАДШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

А.В. Ірха, Г.В. Єрмаков, О.В. Ченикаєв

Запропонована методика розрахунку імовірності деградації напівпровідникових елементів для рівномірного закону розподілення теплової енергії при використанні надширокосмугових сигналів, відбитих від підстилаючої поверхні. В методиці враховується форма відбитого сигналу, його пікова потужність, кількість імпульсів в пачці. Відмічається, що при збільшенні кута ковзання імовірність деградації зменшується, що викликає необхідність збільшувати кількість імпульсів послідовності.

**Ключові слова:** імовірність деградації, надширокосмуговий сигнал, підстилаюча поверхня, відбиття, енергія активації.

## INFLUENCE OF THE SPREADING SURFACE ON PROBABILITY OF RADIOELEMENTS DEGRADATION AT THE RADIATION OF ULTRAWIDEBAND SIGNALS

A.V. Irkha, G.V. Yermakov, A.V. Chenykaev

The method of semiconductor elements degradation probability calculation for the uniform law of thermal energy distribution is offered when using the ultrawideband signals reflected from a spreading surface. The form of the reflected signal, its peak capacity, quantity of impulses in a pack is considered in a method. It is noted that at increase in a corner of sliding the probability of degradation decreases that causes to increase quantity of sequence impulses.

**Keywords:** probability of degradation, the ultrawideband signal, spreading surface, reflection coefficient, energy of activation.