

УДК 621.396.6

Д.Б. Кучер, Л.В. Литвиненко, Н.Б. Смиринська

Інститут Військово-Морських Сил
Національного університету “Одеська морська академія”, Одеса

МОДЕЛЬ НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ІНТЕГРАЛЬНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ПРИ ПОЛІІМПУЛЬСНОМУ ВПЛИВІ НАНОСЕКУНДНОЇ ТРИВАЛОСТІ

В статті розглядається вплив послідовності імпульсних випромінювань наносекундної тривалості на чутливі елементи приймального тракту інформаційних систем. Отримано залежність, що дозволяє визначити максимальну кількість енергії, розсіяної в напівпровідникових структурах, при впливі n -ї кількості імпульсів.

Ключові слова: потужні електромагнітні випромінювання, поліімпульсний вплив, інтегральні мікросхеми, деградаційні ефекти, модель накопичення пошкоджень.

Вступ

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку науки та техніки в системах розвідки, зв'язку, навігації та радіолокації спостерігається широке застосування інформаційних систем, що побудовані на елементній базі напівпровідникової електроніки, логічних та інтегральних мікросхем.

Вплив потужних електромагнітних випромінювань (ПЕМВ) на дані системи спроможний призвести до виводу з ладу чутливої елементної бази та, як наслідок, функціонального ураження всього зразка [1–2].

В залежності від типу ПЕМВ, що випромінюється, можливо виділити наступні види їх джерел, засновані на різних фізичних принципах:

1. Радіочастотні джерела ПЕМВ, що формують впливи у вигляді коливань визначеної частоти.
2. Моноімпульсні джерела ПЕМВ, що генерують одиночні імпульсні впливи.
3. Поліімпульсні джерела ПЕМВ, що формують послідовність імпульсних впливів.

Радіочастотні джерела ПЕМВ спроможні впливати на інформаційні системи (ІС) тільки в досить вузьких діапазонах частот. При цьому, енергетичний рівень ПЕМВ, що випромінюються, недостатній для функціонального ураження елементів ІС (до 10^{-13} Дж).

Моноімпульсні джерела ПЕМВ, у порівнянні з радіочастотними, працюють в більш широкому частотному діапазоні. Маючи достатні енергетичні можливості для функціонального ураження ІС, моноімпульсні джерела ПЕМВ мають низький ККД випромінюючої системи та, як наслідок, невеликий радіус дії.

В цьому відношенні джерела, що формують послідовність імпульсних впливів, мають більші

можливості для функціонального ураження ІС. За амплітудними параметрами формуємі імпульси не поступаються одиночним впливам моноімпульсних джерел, а тривалість випромінювання також лежить в наносекундному діапазоні [3].

Для прогнозування реакції чутливих структур ІС на вплив ПЕМВ застосовують теплові та термоелектричні моделі, найвідомішими з яких є класична теплова модель Вунша-Белла (W-B), моделі Таска, Архіпова-Аствацатуряна-Годовіцина-Руденко (ААГР), об'ємна теплова модель Двайєра-Франкліна-Кемпбелла, модель пошкодження шаруватих структур. Умови застосовності кожної з моделей визначаються характеристиками ПЕМВ та параметрами об'єкту, що зазнає впливу.

Класична теплова модель W-B призначена для визначення порогової потужності або енергії виникнення деградаційних ефектів в одномірних p-n переходах напівпровідникових приладів у разі впливу на них одиночних імпульсів ПЕМВ прямокутної форми тривалістю $10^{-7} < t < 2 \cdot 10^{-5}$ с [4]. Однак, дана модель не застосовна для прогнозування реакції об'єкту на вплив імпульсів наносекундної тривалості різноманітних форм, а також імпульсних послідовностей.

Теплові моделі Таска та ААГР, як і модель W-B, встановлюють залежність порогової потужності пошкодження від тривалості впливу ПЕМВ. Однак, дефектна область в даному випадку представляється у вигляді сфери (модель Таска) та циліндра (модель ААГР), визначення геометричних розмірів яких представляють складну задачу. При цьому, як і в класичній моделі, відсутні методики аналізу надкоротких впливів та поліімпульсних перевантажень різноманітних форм [5].

У цьому відношенні об'ємна теплова модель Двайєра-Франкліна-Кемпбелла справедлива практи-

чно для всіх діапазонів тривалостей імпульсних ПЕМВ та дозволяє визначити зміну температурних характеристик напівпровідників в результаті впливу імпульсних перевантажень із заданими параметрами [6–7]. При цьому існують методики, що представляють розвиток об’ємної теплової моделі для випадку впливу імпульсних ПЕМВ різних форм. Недоліком даної моделі є відсутність можливості визначення енергетичного впливу на елементи ІС послідовності імпульсних випромінювань.

Відомі також теплові моделі, призначені для визначення ступеню реакції напівпровідникових структур на вплив імпульсних послідовностей. Наприклад, модель пошкодження шаруватих структур дозволяє визначити максимальний перегрів напівпровідникової структури та граничну надвисокочастотну потужність, що розсіюється в пристрої під час впливу поліімпульсних ПЕМВ [5]. Основний недолік наведеної моделі полягає у відсутності можливості враховувати форму випромінювання, що діє на чутливі елементи ІС, зокрема, через антенно-фідерний тракт.

Метою даної роботи є оцінка теплового впливу поліімпульсних ПЕМВ на чутливі елементи інформаційних систем за умови їх проходження через антенно-фідерний тракт (АФТ).

Основний матеріал

Електромагнітна стійкість чутливих елементів ІС до впливу імпульсних ПЕМВ характеризується пороговою енергією пошкодження (табл. 1), при виділенні якої в пристрої за час дії імпульсу хоча б один із параметрів пристрою виходить за норми, встановлені нормативно-технічною документацією.

Таблиця 1

Значення критичної енергії пошкодження напівпровідникових пристроїв (НПП)

Тип НПП	Критична енергія пошкодження, Дж
Кремнієвий випрямлювач	$(1 \dots 3) \cdot 10^{-4}$
Тунельний діод	$(1 \dots 8) \cdot 10^{-5}$
Високочастотний діод	$(1 \dots 5) \cdot 10^{-8}$
Низькочастотний транзистор	$(2 \dots 6) \cdot 10^{-5}$
Інтегральна мікросхема	$(8 \dots 10) \cdot 10^{-7}$
Логічна мікросхема	$(1 \dots 10) \cdot 10^{-7}$

Тобто, для оцінки можливих пошкоджень сучасних ІС під впливом ПЕМВ необхідно розрахувати енергію, що розсіюється в найбільш чутливих її елементах, після чого виконати порівняння отриманих значень енергії з пороговими (критичними) для даного елемента.

Для розрахунку енергії $W_n(t)$, що розсіюється в напівпровідниковому кристалі, необхідно визначити параметри імпульсу ПЕМВ, який пройшов через антенно-фідерний тракт.

Об’єктом впливу виберемо приймальний пристрій, антена система якого представляє собою несиметричний вібратор, резонансна схема заміщення представлена на рис. 1.

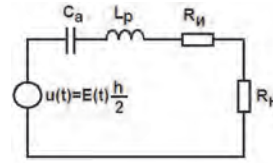


Рис. 1. Резонансна схема заміщення дипольної антени

Комплексний коефіцієнт передачі несиметричного вібратора визначається виразом (1):

$$\dot{K}(j\omega) = \frac{j \cdot \omega \cdot C_a \cdot R_n}{1 - \omega^2 \cdot L_p \cdot C_a + j \cdot \omega \cdot C_a \cdot (R_i + R_n)}, \quad (1)$$

де C_a – ємність антени відносно землі; L_p – індуктивність, що утворює з ємністю антени резонансний контур на частоті першого резонансу; R_i – опір випромінювання; R_n – опір навантаження.

Для визначення форми та параметрів імпульсного впливу, що пройшов через АФТ, можна скористатися спектральним методом

$$\dot{U}_{\text{вих}}(j\omega) = \dot{U}_{\text{вх}}(j\omega) \cdot \dot{K}(j\omega). \quad (2)$$

Враховуючи, що спектральна щільність експоненціального імпульсу рівна $\dot{U}_{\text{вх}}(j\omega) = \frac{U_{\text{max}}}{a_1 + j\omega}$, де

U_{max} – амплітуда імпульсу, $a_1 = \frac{0.7}{\tau_n}$ – коефіцієнт,

що визначається тривалістю впливу, вираз (2) набуває наступного вигляду:

$$\dot{U}_{\text{вих}}(j\omega) = \frac{U_{\text{max}}}{a_1 + j\omega} \cdot \frac{j\omega \cdot C_a \cdot R_n}{1 - \omega^2 \cdot L_p \cdot C_a + j\omega \cdot C_a \cdot (R_i + R_n)}. \quad (3)$$

Застосування зворотного перетворення Фур’є до виразу (3) дозволило отримати часову форму імпульсу ПЕМВ на навантаженні АФТ:

$$U_{\text{вих}}(t) = \frac{U_{\text{max}} \cdot R_n \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sinh(kt) \cdot (2 - C_a \cdot R_n \cdot a_1 - C_a \cdot R_i \cdot a_1)}{2 \cdot k \cdot L_p (1 + C_a \cdot L_p \cdot a_1^2 - C_a \cdot a_1 \cdot (R_i + R_n))} - \frac{U_{\text{max}} \cdot R_n \cdot C_a \cdot a_1 \cdot (e^{-a_1 t} - e^{-\alpha t} \cdot \cosh(kt))}{1 + C_a \cdot L_p \cdot a_1^2 - C_a \cdot a_1 \cdot (R_i + R_n)}, \quad (4)$$

де $k = \sqrt{\frac{C_a \cdot R_i^2 + 2 \cdot C_a \cdot R_i \cdot R_n + C_a \cdot R_n^2 - 4 \cdot L_p}{4 \cdot C_a \cdot L_p^2}}$,

$\alpha = \frac{R_n + R_i}{2 \cdot L_p}$ – коефіцієнти, що враховують параметри антени, решта позначень відповідають прийнятим в (1).

Часова залежність імпульсу ПЕМВ, що пройшов на навантаження АФТ, представлена на рис.2. Залежність побудована з урахуванням знаходження об'єкту впливу на відстані 10 м від джерела випромінювання.

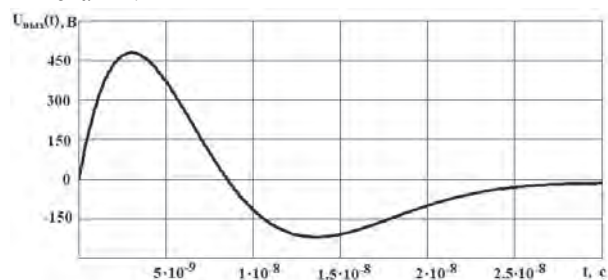


Рис. 2. Часова форма імпульсу ПЕМВ на навантаженні АФТ

Аналіз представленої залежності дозволяє зробити висновок, що, проходячи через антенно-фідерний тракт приймального пристрою, експоненціальний імпульс ПЕМВ значно змінює свою форму, набуваючи вигляду затухаючих коливань.

Це зумовлено наявністю резонансних явищ в антені та фідері (неоднорідності на поверхні антени, ексцентриситет в фідерній лінії тощо), що спричиняють коливальний процес при проходженні сигналу.

Тоді енергія, що розсіюється в р-п переході, наприклад, напівпровідникового діода, вирахована у відповідності до закону Джоуля-Ленца, описується виразом:

$$W = \left[\frac{(2Y+Z) \cdot [e^{-\tau_{и}(a_1+\alpha-k)} - 1]}{2(a_1+\alpha-k)} + \frac{(2Y-Z) \cdot [e^{-\tau_{и}(a_1+\alpha+k)} - 1]}{2(a_1+\alpha+k)} - \frac{(X+Y-Z) \cdot [e^{-2\tau_{и}(\alpha+k)} - 1]}{8(\alpha+k)} - \frac{(X+Y+Z) \cdot [e^{-2\tau_{и}(\alpha-k)} - 1]}{8(\alpha-k)} + \frac{(X-Y) \cdot [e^{-2\alpha\tau_{и}} - 1]}{4\alpha} - \frac{Y \cdot [e^{-2a_1\tau_{и}} - 1]}{2a_1} \right] \cdot R_{p-n} \quad (5)$$

де

$$X = \frac{U_{\max}^2 \cdot (2 - Ca \cdot R_n \cdot a_1 - Ca \cdot R_i \cdot a_1)^2}{\left[2 \cdot k \cdot L_p (1 + Ca \cdot L_p \cdot a_1^2 - Ca \cdot a_1 \cdot (R_i + R_n)) \right]^2},$$

$$Y = \frac{(U_{\max} \cdot Ca \cdot a_1)^2}{\left[1 + Ca \cdot L_p \cdot a_1^2 - Ca \cdot a_1 \cdot (R_i + R_n) \right]^2},$$

$$Z = \frac{U_{\max}^2 \cdot Ca \cdot a_1 \cdot (2 - Ca \cdot R_n \cdot a_1 - Ca \cdot R_i \cdot a_1)}{k \cdot L_p (1 + Ca \cdot L_p \cdot a_1^2 - Ca \cdot a_1 \cdot (R_i + R_n))^2} - \text{ко-}$$

ефіцієнти, що враховують характеристики АФТ та параметри імпульсу ПЕМВ.

Залежність енергії, що розсіюється у р-п переході НПП, від тривалості імпульсу ПЕМВ наведено на рис. 3.

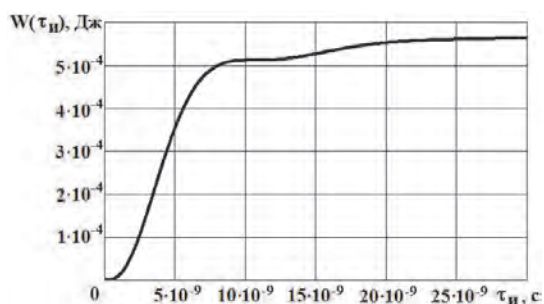


Рис. 3. Залежність енергії, що розсіюється в р-п переході НПП, від тривалості імпульсу ПЕМВ

Максимальний рівень енергії, що розсіюється в р-п переході протягом часу впливу імпульсу ПЕМВ, складає $W_{\max} = 5.6 \cdot 10^{-4}$ Дж. Порівнявши отримані результати зі значеннями критичної енергії пошкодження, необхідно відмітити, що для всіх типів НПП рівні енергії будуть достатніми для виведення їх з ладу.

У разі впливу імпульсу ПЕМВ (рис. 2) на р-п перехід електричний пробій настає практично миттєво, оскільки напруга впливу значно перевищує гранично допустимі значення, після чого в області впливу відбувається накопичення тепла.

Якщо кількість тепла, що виділяється на р-п переході, перевищує тепло, що відводиться від р-п переходу, то його температура починає рости. Відповідно зростає зворотний струм, збільшення якого визначається тепловою генерацією електронно-діркових пар атомами напівпровідників в прилеглих до р-п переходу областях на відстані довжини дифузії. Це призводить до подальшого зростання температури та струму переходу, тепловий режим втрачає стійкість, виникає тепловий пробій.

Тепловий пробій, що також має назву вторинного, викликає плавлення й деградацію напівпровідникової структури. Тобто, відбувається порушення фізико-хімічних властивостей самого матеріалу напівпровідника, що не відновлюються після закінчення теплового впливу. Тому тепловий пробій, на відміну від електричного, вважається незворотним.

Однак, зі збільшенням відстані відбувається зменшення амплітуди напруженості електричного поля ПЕМВ, що безпосередньо впливає на енергетичні характеристики імпульсного пливу.

Збільшення енергетичних характеристик ПЕМВ на більших відстанях може бути досягнуто шляхом впливу на об'єкт не одного, а послідовності імпульсів.

Виникнення незворотних відмов елементів ІС під час впливу послідовності імпульсних випромінювань на великих відстанях від точки випромінювання може бути пояснено на основі моделі накопичення пошкоджень. Для даної моделі справедливим є принцип суперпозиції, тобто кожен наступний імпульс призводить до додаткового розігріву елемента, а кількість теплоти, що передається ІС, визначається сумою всіх енергетичних впливів.

Розглянемо випадок впливу серії імпульсів тривалістю $\tau_n = 30 \cdot 10^{-9}$ с, з періодом повторення $T_n = 45 \cdot 10^{-9}$ с та формою, що наведена на рис. 2, на напівпровідникові елементи вхідного тракту ІС.

Енергія, що розсіюється в р-п переході НПП під впливом першого імпульсу ПЕМВ, може бути вирахована із застосуванням виразу (5).

Зменшення величини розсіяної енергії у напівпровідниковій структурі під час паузи між імпульсами відбувається за експоненціальним законом. З урахуванням першого імпульсного впливу процес розсіювання енергії під час паузи може бути описаний наступним чином:

$$W_{\text{рел}} = W_{\text{max}} \cdot e^{-a_2 \cdot T_n}, \quad (6)$$

де W_{max} – максимальне значення енергії, розсіяної у напівпровідниковій структурі за час першого імпульсного впливу (рис. 3); $W_{\text{рел}}$ – величина розсіяної енергії в напівпровідниковій структурі після першого імпульсного впливу з урахуванням паузи між імпульсами; T_n – тривалість паузи між імпульсами; $a_2 = \frac{3.25}{\tau_{\text{рел}}}$ – параметр, що характеризує швидкість спаду розсіяної енергії під час паузи; $\tau_{\text{рел}}$ – постійна часу теплової релаксації.

Час теплової релаксації є індивідуальним для кожного типу пристрою, оскільки залежить від фізико-хімічних властивостей та геометричних розмірів напівпровідникової структури, та може бути розраховано у відповідності до наступного виразу [5]:

$$\tau_{\text{рел}} = \left(\frac{d}{\pi}\right)^2 \cdot C_p \cdot \frac{P}{k_t}, \quad (7)$$

де d – товщина р-п переходу; C_p – питома теплоємність; P – щільність; k_t – питома теплопровідність напівпровідника.

Так, наприклад, для германієвого напівпровідникового діода ГД 107А постійна часу теплової релаксації у відповідності до виразу (7) складає $\tau_{\text{рел}} = 2.6 \cdot 10^{-4}$ с.

Тоді вираз, що дозволяє оцінити максимальний рівень енергії, яка розсіюється в напівпровідниковій структурі під впливом n імпульсів, набуде вигляду:

$$W_{\text{max}_n} = W_{\text{рел}_{n-1}} + W_n \quad (8)$$

або, з урахуванням (5) та (6):

$$W_{\text{max}_n} = W_{\text{max}_{n-1}} \cdot e^{-a_2 \cdot T_{n-1}} + \left[\begin{aligned} & \frac{(2Y + Z) \cdot \left[e^{-\tau_n(a_1 + \alpha - k)} - 1 \right]}{2(a_1 + \alpha - k)} + \\ & + \frac{(2Y - Z) \cdot \left[e^{-\tau_n(a_1 + \alpha + k)} - 1 \right]}{2(a_1 + \alpha + k)} - \\ & - \frac{(X + Y - Z) \cdot \left[e^{-2\tau_n(\alpha + k)} - 1 \right]}{8(\alpha + k)} - \\ & + \frac{(X + Y + Z) \cdot \left[e^{-2\tau_n(\alpha - k)} - 1 \right]}{8(\alpha - k)} + \\ & + \frac{(X - Y) \cdot \left[e^{-2a_1\tau_n} - 1 \right]}{4\alpha} - \\ & - \frac{Y \cdot \left[e^{-2a_1\tau_n} - 1 \right]}{2a_1} \end{aligned} \right] \cdot R_{p-n}, \quad (9)$$

де W_{max_n} – максимальний рівень енергії, що розсіюється в напівпровідниковій структурі після впливу n імпульсів (n – порядковий номер імпульсного впливу); τ_{n_n} – момент закінчення n -го імпульсного впливу; $W_{\text{рел}_n}$ – рівень енергії, розсіяної в напівпровідниковій структурі після n -го імпульсного впливу з урахуванням релаксації під час паузи; W_n – порція енергії, що розсіюється в напівпровіднику під впливом n -го імпульсу; T_{n_n} – момент закінчення паузи після n -го імпульсного впливу, решта позначок відповідають прийнятим в (5).

Графічні залежності, що відображають процеси розсіювання енергії в р-п переході НПП під час поліімпульсного впливу ПЕМВ, представлені на рис. 4.

Як видно з рис. 4, в період паузи між імпульсами, тобто при $30 \cdot 10^{-9} < t < 45 \cdot 10^{-9}$ с зменшення величини розсіяної енергії у напівпровідниковій структурі носить практично лінійний характер, оскільки постійна часу теплової релаксації складає $\tau_{\text{рел}} = 2.6 \cdot 10^{-4}$ с, а пауза між імпульсами – $T_n = 15 \cdot 10^{-9}$ с. Тобто, в період паузи напівпровідниковий кристал не встигає пройти процес релакса-

ції, і енергія, розсіяна за час першого імпульсного впливу, залишається на тому ж рівні.

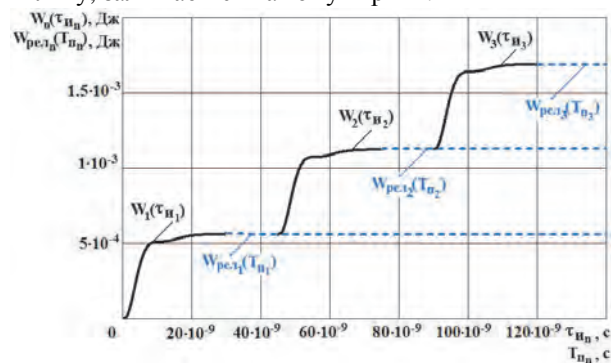


Рис. 4. Залежності енергії, що розсіюється в р-п переході НПП під час поліімпульсного впливу, з урахуванням тривалості імпульсів ПЕМВ та паузи між ними

Це означає, що наступний імпульс призведе до додаткового розігріву структури в результаті подвоєння рівня розсіяної енергії (рис. 4) та виникнення нових пошкоджень. Після цього знову настає пауза ($75 \cdot 10^{-9} < t < 90 \cdot 10^{-9}$ с), енергія не встигає розсіюватися через більшу тривалість періоду релаксації, і наступний імпульс викликає додаткові зміни в структурі напівпровідника. При цьому, коли кількість пошкоджень досягне критичного значення, виникне незворотна відмова пристрою. Саме в цьому полягає суть моделі накопичення пошкоджень.

Висновки

1. При проходженні через АФТ приймального пристрою експоненціальний імпульс ПЕМВ значно змінює свою форму, набуваючи вигляд затухаючих коливань. Це зумовлено наявністю резонансних явищ в антені та фідері, що викликають коливальний процес при проходженні сигналу.

2. Рівень енергії, що розсіюється в р-п переходах НПП за час дії одиночного імпульсу ПЕМВ, є достатнім для виводу їх з ладу на невеликих відстанях.

МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ИНТЕГРАЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ПОЛИИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Д.Б. Кучер, Л.В. Литвиненко, Н.Б. Смиринская

В статье рассматривается воздействие последовательности импульсных излучений наносекундной длительности на чувствительные элементы приемного тракта информационных систем. Получена зависимость, позволяющая определить максимальное количество энергии, рассеянной в полупроводниковых структурах, при воздействии n-го количества импульсов.

Ключевые слова: мощные электромагнитные излучения, полиимпульсное воздействие, интегральные микросхемы, деградационные эффекты, модель накопления повреждений.

DAMAGE ACCUMULATION MODEL BY INFORMATION SYSTEM INTEGRATED ELEMENTS UNDER THE IMPACT OF NANOSECOND WIDTH POLYIMPULSE

D. Kucher, L. Litvinenko, N. Smyrynska

There are studied and displayed the sequence impact of nanosecond width pulse radiations according to the sensitive elements of the information system receiving path. The received dependence gives the possibility to determine the maximum amount of energy scattered in semiconductor structures under the impact of the n-th number of pulses.

Keywords: powerful electromagnetic radiation, polyimpulse impact, integrated circuits, degradation effects, damage accumulation model.

3. Збільшення енергетичних характеристик ПЕМВ на більших відстанях може бути досягнуто шляхом впливу на об'єкт не одного, а послідовності імпульсів.

4. У разі, якщо тривалість імпульсів лежить в наносекундному діапазоні, відбувається накопичення пошкоджень напівпровідниковою структурою, оскільки період теплової релаксації значно перевищує паузу між імпульсами.

Список літератури

1. Кучер Д.Б. Мощные электромагнитные излучения и сверхпроводящие защитные устройства / Д.Б. Кучер. – Севастополь: Ахтиар, 1997. – 188с.
2. Кравченко В.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / В.И. Кравченко, Е.А. Болотов, Н.И. Летунова. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
3. Кучер Д.Б. Особенности формирования последовательности импульсных электромагнитных воздействий при реализации механизма электрического взрыва проводников / Д.Б. Кучер, Т.В. Зонтова, Л.В. Литвиненко // 4й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2011. Сборник научных трудов. Том 1.Ч.2. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2011. – С. 233-236.
4. Wunsch D.S, Bell R.R. Determination of threshold failure level of semiconductor diodes and transistors due to pulse voltage // IEEE Trans. on Nuclear Sci., Vol.15, N6, 1968. – P. 244-259.
5. Chumakov V.I. Methods of modeling the thermal failures in semiconductor devices / V.I. Chumakov // Radio electronics and informatic. – 1999. – №2. – P. 31-37.
6. Dwyer V.M., Franklin A.J., Campbell D.S. Thermal failure in semiconductor devices // Solid State Electronics.-1990.-Vol.33, p.553-560.
7. Dwyer V.M., Franklin A.J., Campbell D.S. Electromagnetic discharge thermal failure in semiconductor devices // IEEE Trans. on Electr. Dev. Vol.37, N11, 1990. – P.2381-2387.

Надійшла до редколегії 4.05.2017

Рецензент: д-р техн. наук ст. наук. співробітник Д.В. Карлов, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.