

УДК 533.9

О.М. Єгоров<sup>1</sup>, Б.М. Гавриленко<sup>2</sup>, М.В. Грушенко<sup>2</sup>, В.В. Жук<sup>1</sup>, О.В. Заліван<sup>2</sup>,  
В.І. Карась<sup>1</sup>, Ю.Ф. Лонін<sup>1</sup>, В.І. Чумаков<sup>1</sup><sup>1</sup>Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»  
Національної академії наук України<sup>2</sup>Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба**ВПЛИВ ІМПУЛЬСНОГО НАДШИРОКОСМУГОВОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО  
ВИПРОМІНЮВАННЯ НА РАДІОЕЛЕКТРОННУ АПАРАТУРУ (РЕА)**

В роботі, на відміну від класичної лінійної моделі Вунча-Белла, яка описує тепловий механізм впливу ЕМ-випромінювання на РЕА, пропонується модель, що враховує часовий характер локалізації та розповсюдження тепла в напівпровідникових пристроях. Особливістю дії електромагнітного НВЧ-випромінювання з крутим переднім фронтом та малою тривалістю є польовий механізм деградації, котрий проявляється, на відміну від традиційного теплового, при швидкості ударної дії поля більшої, ніж швидкість теплових релаксаційних процесів у структурах.

*надширокопasmове електромагнітне випромінювання, радіоелектронна апаратура, тепловий механізм, польовий механізм деградації, релаксаційні процеси*

**Вступ**

Експериментальні дослідження електромагнітної стійкості РЕА мають справу з методами деструктивної дії, при яких в об'єктах можуть відбуватись незворотні зміни, що зроблять неможливим їх подальше використання. В деяких випадках результати таких досліджень дуже дорого коштують. Одним із можливих шляхів запобігти таким великим витратам є математичне моделювання процесів деструкції в елементах РЕА та компонентах і конструкції експериментальних пристроїв під дією електромагнітних імпульсів. Моделювання дозволяє суттєво зменшити кількість необхідних експериментів [1 – 3]. Далі розглядаються основні аспекти моделювання теплового механізму, що мають місце при дії на радіоелектронні компоненти електромагнітних полів короткої тривалості.

**Основна частина**

Процеси у РЕА подібні процесам, що відбуваються при пружній деформації: пружна – порушення у РЕА тривають протягом дії імпульсу; залишкова – порушення у роботі РЕА тривають набагато довше, ніж час дії імпульсу  $t_p$ ; катастрофічні – виникає загоряння елементів РЕА. Класична лінійна модель Вунча-Белла дозволяє розрахувати пороги порушення роботи РЕА у напівпровідникових пристроях під дією електромагнітних полів при імпульсах довжиною  $t \geq 10^{-8}$  с. Розширення часового інтервалу, для якого лінійна тепла модель має місце, дозволяє отримати загальний вираз для порогу у вигляді

$$P_n = P_0 / (1 - e^{-t/t_c}), \quad (1)$$

де  $P_0$  – мінімальна порогова потужність для порушення функціонування;  $t_c$  – критична тривалість імпульсу порушення.

Параметри моделі  $P_0$  та  $t_c$  мають визначений фізичний зміст. Так, з (1) витікає, що  $P_n \rightarrow P_0$ , тобто порогова потужність наближається до мінімальної порогової потужності, коли тривалість дії зростає. Значення  $t_c$  має сенс часової сталої тривалості теплового процесу і є характеристикою об'єкта, на який впливають, тобто показує час інерції теплового процесу. В часовому діапазоні  $t > t_c$  відбувається однорідний об'ємний нагрів всього об'єкта, а для  $t < t_c$  нагрівання локалізоване в області виділення енергії. Величини  $P_0$  та  $t_c$  розраховані в межах моделі Сестрорецького [4] та виражені через теплофізичні параметри напівпровідника:

$$P_0 = \frac{\pi^3}{8} \frac{\kappa_T S T_{\max}}{d}; \quad (2)$$

$$t_c = \frac{C_p \rho}{\kappa_T} L^2 = \frac{L^2}{D_{th}}, \quad (3)$$

де  $C_p$ ,  $\rho$ ,  $\kappa_T$  – теплоємність, густина, коефіцієнт теплопровідності напівпровідникового матеріалу, відповідно;  $T_{\max}$  – максимальна температура напівпровідника, при якій він втрачає свої фізичні властивості. Зазвичай як  $T_{\max}$  вибирають температуру плавлення матеріалу (для кремнію  $T_{\max} = 1415^\circ\text{C}$ ).  $L$  – характерна довжина області;  $D_{th}$  – коефіцієнт температуропровідності,  $S$  та  $d$  – переріз та довжина напівпровідникового зразка.

Результати розрахунків для кремнію приводять до  $P_0 = 2,67 T_{\max} S/d$  [Вт].

Відомі результати [3 – 7] розрахунків характеристик порушень (константа порушень у напівпровідникових пристроях  $B_1 = \sqrt{\pi \kappa_T \rho C_p}$ ) та результати тестування стабільності компонентів РЕА надані у табл. 1. Часова залежність порогових потужностей наведена на рис. 1, де стрілками показані величини  $t = t_c$ .

Таблиця 1

Відомі результати та результати розрахунків

Тип напівпровідникового пристрою	Величина $V_1$ [кВт·мкс <sup>0,5</sup> ·см <sup>2</sup> ]		
	Мінімальне значення	Максимальне значення	Типове значення
Діоди:			
детекторні діоди	0,5	20	3
комутаційні діоди	0,01	1,0	0,1
стабілітрони та точкові діоди	0,1	10	10
височастотні діоди	$5 \cdot 10^{-4}$	0,1	0,01
Транзистори	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Високотужні транз-ри	0,2	0,5	1
Низькопотужні транз-ри	$3 \cdot 10^{-3}$	2	0,1
перемикачі	0,02	0,3	0,1
Германієві тр-и	0,02	1,0	0,2
Вхідний випадковий сигнал	$3 \cdot 10^{-4}$	0,2	0,1

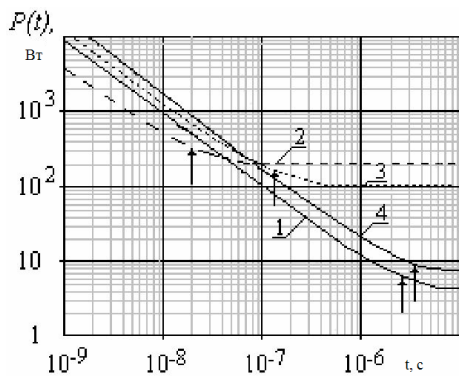


Рис. 1. Порогові потужності в залежності від терміну дії: 1 –  $P_0 = 1,5$  Вт,  $t_c = 2,5$  мкс; 2 –  $P_0 = 0,8$  Вт,  $t_c = 0,125$  мс; 3 –  $P_0 = 10$  Вт,  $t_c = 20$  нс; 4 –  $P_0 = 40$  Вт,  $t_c = 3,33$  мкс

При розрахунку порогової енергії порушення внаслідок дії імпульсного електромагнітного поля треба звернути увагу на те, що рівняння (1) описує не миттєве значення, а величину порогової потужності при різних тривалостях дії для реалізації ефекта дії. Тому енергія записується як добуток, а не інтеграл, тобто:

$$W_n = P_0 t / (1 - e^{-t/t_c}), \quad (4)$$

Залежність порогової енергії порушень (ПЕП) від часу дії імпульсного електромагнітного поля наведена на рис. 2. Видно, що у області малих тривалостей ПЕП має тенденцію до  $W_n = P_0 \cdot t_c$ , що є нижньою пороговою енергією теплової моделі порушень. Але, ця величина не є абсолютним порогом за енергією, тому що, як відомо [1], при субнаносекундних тривалостях дії починає діяти нетепловий механізм порушень з характерними часовими проміжками, що суттєво коротші, ніж час термічної релаксації напівпровідників (наприклад, характерний час нетермічних процесів може бути зміна діелектричної проникності або питомої провідності матеріалу [7]).

Тому що, тривалість дії  $t = t_c$  є критичною точкою вибору мінімальної тривалості дії для проявлення термічного механізму ураження. Коли час тривалості дії збільшується, характер залежності визначається величиною  $t_c$ .

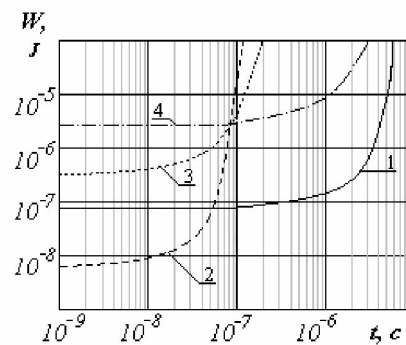


Рис. 2. Залежності порогової енергії порушень (параметри відповідають приведеним для рис. 1)

Таким чином, для кривих 1 та 4 порогова енергія ураження залишається майже сталою при зміні  $t$  на три порядки величини. Але, потужність ураження також збільшується при зменшенні часу на три порядки (рис. 1, криві 1, 4). З цього важливого висновку витікає, що скорочення тривалості дії з одночасним збільшенням потужності не приводить до суттєвого збільшення порогової енергії ураження. Разом з тим відомо, що реалізація наносекундних джерел електромагнітного випромінювання ультрависокої потужності є досить складною інженерною проблемою. Тому як оцінку необхідного часу тривалості електромагнітної дії можна розглядати величину  $t_c$ . Перевищення цієї величини приводить до зони сталої потужності враження. Перехрещення кривих порогових енергій поля 1 та 2 дозволяє зробити визначальні висновки відносно електромагнітної стійкості складної системи.

Тому що, залежності на рис. 2 характеризують порогові енергії ураження елементів та компонентів системи, то точка їх перехрещення визначає критичну величину тривалості дії та порогову енергію, при якій ураження деяких елементів має місце, а значить ураження системи в цілому є більш вірогідним. Відмітимо також, що у випадку переходу часової області зліва від точки перехрещення кривих порогових енергій поля співвідношення між ПЕП елементів змінюється (порівнюємо криві 2 та 3). Це обумовлено механізмом теплопровідності структур-

них елементів 2 та 3 в областях більших і менших тривалостей та величинами початкових ПЕП при  $t \approx 0$ . Зліва від точки перехрещення теплопровідність ще не має часу для компенсації початкової різниці величин  $W_0$ , навіть не дивлячись на деяке збільшення тривалості дії з відповідним зменшенням порогової потужності поля на рис. 1. При переході крізь точку перехрещення теплопровідність стає визначальною величиною механізму розподілу енергії у структурі елементів і для ураження елемента 3, який характеризується вищим значенням коефіцієнта теплової дифузії  $D_{th}$  більша величина енергії потрібна за той же час  $t$ .

НВЧ-генератори забезпечують у робочих зонах рівні напруженості електричного поля  $E = 0,1 - 10$  кВ/см. Особлива увага була приділена забезпеченню можливості генерації імпульсів ультракороткої довжини (ІУКД)  $\tau = 10^{-8} - 10^{-7}$  с у зв'язку зі спостереженням специфічних реакцій та зниженням порогових рівнів напруженості електричного поля, котрі приводять до деградацій у досліджуваних об'єктах, в цьому діапазоні довжин імпульсів. Зокрема, випробувальний стенд для моделювання дії полів електромагнітного імпульсу надкороткої довжини забезпечує у випробувальній камері напруженість електричного поля  $E = 0,2 - 2,5$  МВ/м та магнітного  $H = 0,6 - 7,5$  кА/м при часових тривалостях імпульсу  $\tau = 10 - 20$  нс, що мають фронт наростання  $\tau_f \leq 1$  нс.

Для виключення зовнішнього впливу використовуються безлунні камери (БЛК), стіни яких обшиті радіопоглинальним матеріалом.

Випробувальні стенди пристосовані для дослідження процесів деградації виробів електронної техніки (ВЕТ) та інших елементів РЕА при дії потужних імпульсних електромагнітних полів та розв'язання проблем електромагнітної сумісності РЕА.

Були експериментально визначені порогові рівні напруженості електричного поля, що приводять до деградації різної ступені для широкої номенклатури об'єктів радіоелектроніки, їх залежності від амплітудно-часових характеристик діючого випромінювання, досліджені особливості механізму деградації при дії випромінювання ІУКД.

Результати проведених досліджень показали, що найбільш чутливим до дії електромагнітного випромінювання є напівпровідникові елементи, для яких у ряді випадків порогові рівні напруженості електричного поля склали величину  $\sim 100$  В/см.

В основу інтерпретації отриманих результатів покладено уявлення про антенний механізм дії електромагнітного випромінювання зі складним об'єктом, у відповідності до якого зовнішні ділянки являють собою антени, котрі навантажені на елементи внутрішньої структури. Такий підхід дозволяє зв'язати залежність ступені деградації об'єкту з параметрами електромагнітного випромінювання та електродинамічними характеристиками об'єкта.

Особливістю дії електромагнітного НВЧ-випромінювання з кругим переднім фронтом та малою тривалістю є польовий механізм деградації, котрий проявляється, на відміну від традиційного теплового, при швидкості ударної дії електромагнітного поля більшій, ніж швидкість теплових релаксаційних процесів у структурах ВЕТ. Його основними властивостями є: пороговий характер виникнення деградації, багаточисельні пошкодження навіть протягом однієї експозиції та зонний характер розподілу деградацій на поверхні складних ВЕТ. В умовах дії довгоімпульсного випромінювання деградаційні ефекти виникають в областях, для яких характерним є тепловий механізм енерговиділення (тобто у ділянках максимального поглинання та розсіювання електромагнітної енергії). Пороговий характер дії випромінювання ІУКД обумовлений електричним пробоем у ділянках з максимальною концентрацією електричного поля (в області  $p-n$ -переходів, неоднорідностей структури і т.ін.). Виникнення одночасних багаточисельних деградацій пов'язано зі скінченністю часу розвитку локальних пошкоджень при дії ІУКД. Експерименти показали, що деградаційні ефекти у структурах з високою ступінню інтеграції локалізуються основним чином по периферії ВЕТ, де амплітуда поля ІУКД максимальна.

## Висновки

В роботі, на відміну від класичної лінійної моделі Вунча-Белла, яка описує тепловий механізм впливу ЕМ-випромінювання на РЕА, пропонується модель, що враховує часовий характер локалізації та розповсюдження тепла в напівпровідникових пристроях. Дається класифікація рівнів впливу. Приводиться нелінійна модель, яка дозволяє враховувати часову межу розподілення тепла в напівпровідникових пристроях. В масштабі часу  $t > t_c$  має місце однорідний об'ємний розігрів об'єкту, а при  $t < t_c$  має місце локалізація тепла внаслідок запізнення процесу тепловідводу від процесу енерговводу в області енерговиділення. Виходячи з цього визначається енергія, що приводить до незворотних наслідків дії. Особливістю дії електромагнітного НВЧ-випромінювання з кругим переднім фронтом та малою тривалістю є польовий механізм деградації, котрий проявляється, на відміну від традиційного теплового, при швидкості ударної дії електромагнітного поля більшій, ніж швидкість теплових релаксаційних процесів у структурах ВЕТ.

## Список літератури

1. Tasca D.M. Pulse power failure modes in semiconductors. //IEEE Trans. on Nucl. Sci. – 1970. – V. NS-17. – P. 364-372.
2. 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., 1968. V. NS-15, N6. – P. 244-259.

3. Chumakov V.I. *Methods of modeling the thermal failures in semiconductor devices.* // *Radio electronics and informatics*, 1999. № 2. – P. 31-37.

4. Микроволновые устройства с полупроводниковыми диодами. Проектирование и расчет / Под ред. В. Мальского и Б.В. Сестрорецкого. – М.: Советское радио, 1969. – 580 с.

5. Antinone R.J. *How to prevent circuit zapping* // *IEEE Spectrum*, V.4, N24, 1987. – P. 34-38.

6. Мурова Л.О., Чепиженко А.З. *Сохранение стабильности оборудования связи при действии ионизирующего и электромагнитного излучений.* – М.: Радио и связь, 1988. – 296 с.

7. *Action of electromagnetic rf pulses on the structure of impurity heterogeneity in silicon crystals and characteristics of semiconductor devices* / D.E. Abdurakhimov, P.N. Bochkashvili, V.L. Vereshchagin et al. // *Microelectronics*, 1992, v. 21, No. 21. – P. 82-89.

Надійшла до редколегії 9.03.2007

**Рецензент:** д-р фіз.-мат. наук, проф. Є.О. Корнілов, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Харків.