

УДК 621.382



О. І. Фик



О. Л. Назаренко



Н. Б. Смиринська



М. О. Глущенко

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОШКОДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Проведено моделювання процесу пошкодження напівпровідникових структур при проходженні імпульсів струму різної форми. Отримані вирази оцінювання кількості виділеної потужності за певних умов впливу імпульсу струму на складних напівпровідникових структурах телекомунікаційних систем.

Ключові слова: імпульс струму, напівпровідникові структури, телекомунікаційні системи.

Постановка проблеми. Під час агресивних дій проти України ворог активно застосовує системи радіоелектронної боротьби, як-от: «Красуха», «Леер», «Репелент» та інші. Один із принципів роботи вказаних комплексів радіоелектронної боротьби полягає у використанні теплових ефектів, що виникають через постійний електромагнітний вплив, який може спричинити нагрів компонентів телекомунікаційного обладнання та їх деградацію.

Застосування росією електромагнітного впливу (засоби РЕБ, глушіння супутникових каналів, атаки з використанням високопотужного випромінювання тощо) створюють серйозну загрозу телекомунікаційним системам (ТКС) України. Це обумовлює необхідність дослідження моделей теплового механізму деградації компонентів для підвищення стійкості системи зв'язку в екстремальних умовах. Найбільш складними режимами роботи елементів ТКС є ті, у яких виникають деградаційні ефекти, пов'язані зі струмовими електроперевантаженнями, які призводять до теплового ураження напівпровідникових структур, тобто виникають режими з незворотними відмовами елементів ТКС.

Таким чином, постає завдання вивчення фізичних моделей, які найбільш вірогідно описують тепловий механізм деградації напівпровідникових структур елементів ТКС у випадку їх електромагнітного опромінення. Використання противником електромагнітного впливу для деструктивного опромінення елементів ТКС та інших системи зв'язку Сил безпеки і оборони України спонукає до необхідності дослідження моделей теплового механізму деградації їх напівпровідникових структур.

Отже, дослідження моделей теплового механізму деградації радіоелементів, напівпровідникових компонентів ТКС і систем військового та цивільного зв'язку в даний час є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [1] подані результати великої експериментальної програми визначення рівнів імпульсного збою живлення напівпровідникових переходів. Запропонована формула, за допомогою якої можна оцінити рівень відмови функції тривалості імпульсу для багатьох кремнієвих діодів або транзисторів, площа переходу яких відома.

Заходи захисту електричних схем від пошкодження під час перенапруги та інших несприятливих впливів, які можуть призвести до виходу з ладу компонентів, визначені у статті [2]. У ній пояснюються основні принципи роботи захисних схем і розглядаються технічні методи запобігання пошкодженням.

Автори праці [3] надають рекомендації стосовно оптимальних умов роботи або способів захисту транзисторів, щоб уникнути їх пошкодження в умовах інтенсивних імпульсів.

У праці [4] наведена порівняльна характеристика енергоефективності використання (енергетичного потенціалу) радіочастотної зброї та традиційної зброї, що завдає механічні пошкодження.

Результати дослідження умов використання експериментальних методів для контролю якості та оцінювання стабільності роботи радіоелектронних пристроїв під впливом руйнівної дії електромагнітної хвилі подані у статті [5].

Однак у дослідженнях [1 – 5] не приділено уваги питанням побудови вірогідної моделі теплового процесу електромагнітного пошкодження напівпровідникових структур радіоелектронної апаратури ТКС.

Метою статті є покращення вірогідності прогнозування пошкоджень телекомунікаційних систем при проходженні імпульсів струму різної форми.

Для досягнення поставленої мети вирішені такі часткові задачі: проведено моделювання процесу пошкодження напівпровідникових структур при проходженні імпульсів струму різної форми; отримані вирази оцінювання кількості виділеної потужності за певних умов впливу імпульсу струму на складних напівпровідникових структурах ТКС; оцінений вплив імпульсних і квазістаціонарних навантажень на функціонування ТКС.

Виклад основного матеріалу. Виникнення теплових навантажень зазвичай пов'язане з порушенням електричних режимів функціонування напівпровідникових елементів та компонентів ТКС, найбільш сприйнятливих до впливу зовнішніх факторів, що дестабілізують. При цьому ефекти деградації можуть проявлятися в результаті короткочасних імпульсних електричних навантажень.

Останнім часом підвищення вимог до забезпечення теплового режиму напівпровідникових приладів викликано [1 – 5]:

- підвищенням рівня мініатюризації та високим ступенем інтеграції елементів, особливо цифрових інтегральних схем;
- переходом на субмікронні технології у системах цифрового зв'язку;
- підвищенням рівня розвитку широкосмугових технологій і засобів передачі даних;
- швидкодією ТКС та ін.

В основі лінійної теплової моделі деградації напівпровідникових приладів є рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_T(\nabla T)) + \frac{q_v(t)}{C_p \rho}, \quad (1)$$

де T – температура в точці з координатою r на момент часу t ;

∇ – лінійний диференціальний оператор;

k_T, C_p, ρ – питома теплопровідність, теплоємність та щільність напівпровідника;

$q_v(t)$ – об'ємна щільність потужності джерел (стоків) тепла у структурі напівпровідника.

Граничні та початкові умови задаються структурою об'єкта та умовами його експлуатації. Лінійність моделі обумовлена виключенням температурної залежності теплофізичних характеристик напівпровідника, що спрощує аналіз.

Класична тепла модель (модель W-B) деградації дискретних напівпровідникових приладів (діодів та транзисторів) внаслідок електричних навантажень наведена у статті [1]. Розглядається модель плоского p - n переходу, в якому плоске миттєве джерело тепла потужністю Q створює тепловий потік у напрямку нормалі до площини переходу. З результатів аналізу однорідного рівняння теплопровідності для плоского одновимірного p - n переходу виходить, що залежність порогової потужності P_n імпульсного електричного навантаження, за якої виникають деградації у p - n переході, від тривалості імпульсу електричного навантаження описується виразом

$$P_n/S = B_1 (T_m - T_h) t^{0,5}, \quad (2)$$

де S – площа переходу;

$B_1 = \sqrt{\pi k_T \rho C_p}$ – постійна величина, яка визначається теплофізичними константами матеріалу;

T_m – кінцева температура матеріалу (температура плавлення);

T_h – початкова температура матеріалу.

Деградаційний ефект зазвичай виникає при розплавленні напівпровідника, тому величина T_h відповідає температурі плавлення [1, 5]. Параметром, який характеризує сприйнятливність напівпровідникових приладів різних типів до теплових навантажень, є величина

$$w_B = B_3(T_m - T_h), \quad (3)$$

так звана стала ушкоджень (стала W-B). За результатами наведених у статті [1] експериментів з'ясовано, що залежність (2) виконується в діапазоні тривалостей електричного навантаження від 10^{-7} с до $2 \cdot 10^{-5}$ с.

Фізичні процеси, що зумовлюють залежність (2), пов'язані з нерівномірним розподілом щільності струму, який протікає через *p-n* перехід у діапазоні досліджуваних тривалостей імпульсу, локалізацією його в окремих каналах, що еквівалентно зменшенню ефективної площі переходу, тобто зменшенню зони енерговиділення. При цьому температура локальних областей зростає швидше, ніж відбувається теплообмін з прилеглими областями напівпровідника. Після досягнення температури плавлення T_m виникає теплове пошкодження. Крім того, швидкість поширення тепла в середовищі лінійної теплової моделі вважається нескінченною.

При скороченні тривалості і збільшенні потужності електричного навантаження область енерговиділення об'ємом напівпровідника практично обмежується об'ємом струмових каналів, і передавання енергії у прилеглі області не відбувається. У цьому випадку першим доданком у правій частині виразу (1), який описує розсіювання потужності в структурі напівпровідникового приладу в результаті теплопровідності, можна знехтувати. Тоді залежність потужності P_n від тривалості імпульсу електричного навантаження матиме такий вигляд:

$$P_n/S = B_2(T_m - T_h) t^{-1}, \quad (4)$$

де B_2 також визначається характеристиками напівпровідника.

У режимі тривалих імпульсних електричних навантажень відбувається відносно повільний розігрів усього об'єму напівпровідника в результаті теплообміну між окремими областями, і спостерігається режим, близький до стаціонарного. При цьому в рівнянні (1) можна знехтувати виразом у лівій частині. Тоді залежність для P_n матиме такий вигляд:

$$P_n/S = B_3(T_m - T_h) t^0, \quad (5)$$

тобто потужність ушкоджень залежить від тривалості імпульсу. Константа B_3 у виразі (5) є щільністю потоку потужності, необхідною для розігріву структури на 10°C . На рисунку 1 наведено якісну залежність порогової потужності електричного навантаження, за якої виникають деградації, від тривалості імпульсу. Залежність побудована на підставі виразів (2), (4) та (5) [2].

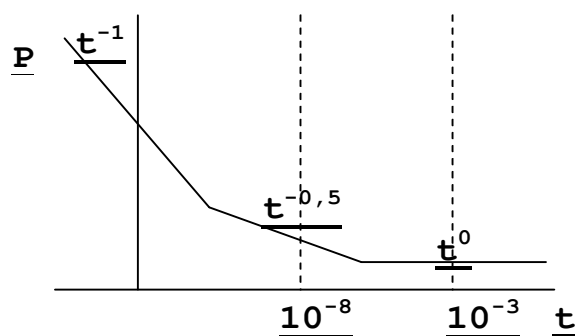


Рисунок 1 – Залежність порогової потужності електричного навантаження, за якої виникають деградації, від тривалості імпульсу

На рисунку 2 наведено типову структуру дифузійного $p-n$ переходу. Області $[X_1, x_p]$ та $[x_n, X_2]$ відповідають квазінейтральним областям напівпровідникового кристала, область $[x_p, x_n]$ – збіднена область напівпровідника. Еквівалентна електрична схема такої структури також подана на рисунку 2, де R_b – опір квазінейтральної області, R_j – опір області збіднення.

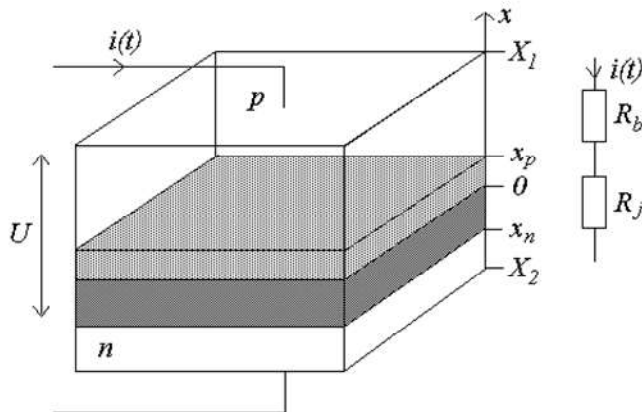


Рисунок 2 – Складна напівпровідникова структура

При додаванні імпульсу електричного навантаження позитивної полярності відносно області p перехід зміщується у прямому напрямку і співвідношення між величинами опору має вигляд $R_b \gg R_j$, тому дисипація енергії відбувається в квазінейтральній області.

У разі негативної полярності електричного навантаження відносно області p перехід зміщується у зворотному напрямку (закривається), і виконується нерівність $R_b \ll R_j$. Через перехід протікає малий зворотний струм, величина якого не залежить від прикладеної напруги і залежить від температури напівпровідника. Під час цього процесу відсутні тепловідведення та теплообмін з навколишнім середовищем через що відбувається відносно повільний розігрів напівпровідника до температури T_m . Режим максимальних температур (при $x = 0$) характерний для діапазону довгоімпульсних навантажень (рис. 1), в якому порогова потужність, що призводить до деградації, не залежить від часу та описується співвідношенням (5).

При значних напругах зворотної полярності на переході відбувається лавинний пробій внаслідок ударної іонізації у збідненій ділянці, опір якої різко спадає, що призводить до різкого збільшення струму через перехід, і процес енерговиділення відбувається як у прямо зміщеному $p-n$ переході.

У режимі двополярного електричного навантаження відбувається детектування вхідного струму [6]. Результируючий струм є послідовністю уніполярних імпульсів, відповідних інтервалам часу, протягом яких перехід зміщений у прямому напрямку.

У загальному випадку вираз для миттєвої потужності, поглиненої напівпровідниковим кристалом, матиме такий вигляд:

$$P(t) = i(t)U_j + i^2(t)R_b, \quad (6)$$

де U_j – напруга на збідненій ділянці.

У моделі W-B облік температурної залежності теплопровідності напівпровідника полягає у введенні отриманих виразів усередненої величини теплопровідності. При цьому стала ушкодження виявляється залежною тільки від різниці температур $T_m - T_h$.

Лінійна модель для тривимірного випадку розвинена у працях [7, 8]. Приріст температури у напівпровідниковому кристалі з характерними розмірами a, b, c описується із застосуванням функції Гріна G_0 , яка для тривимірного рівняння теплопровідності (1) має такий вигляд:

$$G_0(r, r', t, \tau) = \frac{1}{[4\pi a(t-\tau)]^{3/2}} \exp\left[-\frac{(r-r')^2}{4a(t-\tau)}\right], \quad (7)$$

де r' – координати миттєвого точкового джерела тепла виду $\delta(t, r)$, яке діє на момент часу τ ;
 r, t – відповідно координати точки та час визначення температури;
 $a = k_T / C_p \rho$ – коефіцієнт теплопровідності напівпровідника.

Розрахунок критичної температури, за якої виникають деградації, у разі довільної часової залежності вхідної потужності $P(t)$ здійснюється з використанням інтеграла Дюамеля

$$T(t) = T_h + \frac{1}{C_p \rho} \int_0^t P(\tau) \frac{d}{d(t-\tau)} [H(t-\tau)] d\tau. \quad (8)$$

Функція $H(x)$ має сенс перехідної характеристики. Таким чином, функції G_0 та H пов'язані співвідношенням

$$H(t) = \int_0^t G_0(r, v) dv. \quad (9)$$

Для навантаження у вигляді прямокутного імпульсу потужності тривалістю τ отримуємо часову залежність температури

$$T(t) = T_h + P_0 [H(r, t) - H(r, t - \tau)]. \quad (10)$$

Тривалість електричного навантаження t_f , за якого виникають деградації (наприклад, розплавлення напівпровідника при досягненні температури T_m), можна визначити такими критеріями.

У першому випадку з виразу (10) маємо

$$T(t_f) = T_\bullet = T_h + P_0 H(r, t_f) \quad (11)$$

Якщо підставити вираз (11) у рівність (8), приходимо до виразу для визначення нормалізованої температури в довільний момент часу t :

$$f(t) = \frac{T(t) - T_\bullet}{T_\bullet - T_h} = \int_0^t P(\tau) \frac{d}{d(t-\tau)} \left[\frac{1}{P_0(t-\tau)} \right] d\tau, \quad (12)$$

де $P_0(x)$ – часова залежність граничної потужності деградації при дії електричного навантаження у вигляді прямокутного імпульсу.

Зокрема, використовуючи вирази (2) та (3) моделі W-B, отримаємо

$$f(t) = \int_0^{t_f} P(\tau) \frac{d}{d(t_f - \tau)} \left[\frac{1}{P_0(t_f - \tau)} \right] d\tau = \frac{1}{2S_{wB}} \int_0^{t_f} P(\tau) \frac{1}{\sqrt{t_f - \tau}} d\tau. \quad (13)$$

Підставляючи у вираз (13) критичну температуру, визначимо критерій W-B оцінювання часу t_f , необхідного для визначення теплового навантаження:

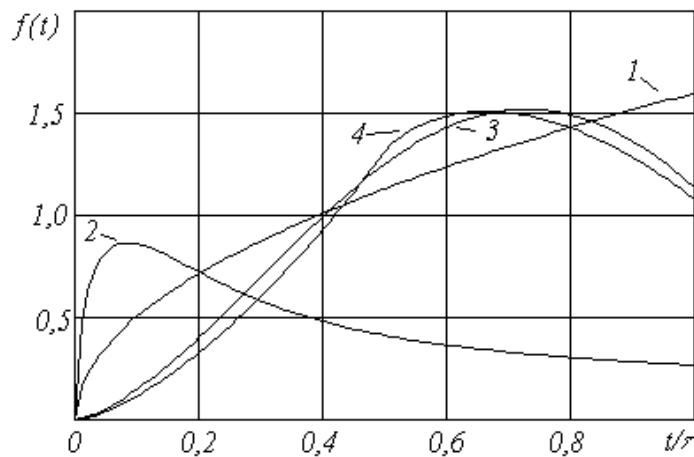
$$\frac{1}{2Sw_B} \int_0^{t_f} P(\tau) \frac{1}{\sqrt{t_f - \tau}} d\tau = 1. \quad (14)$$

Інший критерій визначення величини t_f походить з виразу

$$\frac{df(t_f)}{dt} = 0. \quad (15)$$

При цьому потрібне виконання умови $\max\{f(t)\} \geq 1$. Підставляючи значення t_f у вираз (15), отримуємо вираз для максимального струму електричного навантаження.

Типові залежності нормалізованої температури $f(t)$ для імпульсів струму електричного навантаження енергії $E_u = \int_0^{\tau_u} i^2(t) dt$ наведено на рисунку 3.



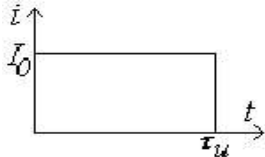
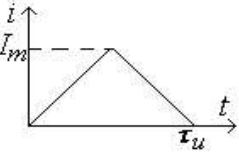
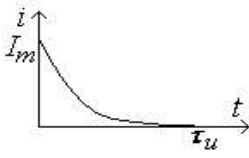
1 – прямокутна; 2 – експоненціальна; 3 – синусоїдальна; 4 – трикутна

Рисунок 3 – Типові залежності нормалізованої температури $f(t)$ для імпульсів струму електричного навантаження енергії

Вирази нормалізованої температури для імпульсів різної форми наведено у таблиці 1.

Миттєва потужність розрахована за виразом (6) при $U_j = 100 \cdot I_0 R_b$ (рис. 4), що відповідає режиму зворотно зміщеного $p-n$ переходу, та при $U_j = I_0 R_b$, що характеризує перехід, зміщений у прямому напрямку. Для прямокутного імпульсу функція $f(t)$ є монотонною і максимальна температура досягається в кінці імпульсу, водночас як при неоднорідному розігріві імпульсами складної форми максимум температури може бути на його початку або в середині.

Таблиця 1 – Нормалізована температура для імпульсів різної форми

Форма імпульсу	Висота імпульсу	$f(t)$
Прямокутний $I_m(1(t) - 1(t - \tau_u))$ 	I_0	$\frac{1}{2Sw_B} [i(t)U_j + i^2(t)R_B] \sqrt{t}$
Трикутний $I_m \left(\frac{2t}{\tau_u} - \frac{4(t - \tau_u/2)}{\tau_u} (1(t - \tau_u/2)) \right) (1(t) - 1(\tau_u/2 - t))$ 	$2I_m$	$\frac{A_0 t^{3/2} + B_0 t^{5/2}}{Sw_B} \quad A_0, B_0 = const$
Експоненціальний $I_m \exp(-5t/\tau_u)$ 	$5I_0$	$\frac{i(t)U_j \sqrt{\tau} D(\sqrt{t/\tau})}{Sw_B} + \frac{i^2(t)R_B \sqrt{\tau/2} D(\sqrt{2t/\tau})}{Sw_B}$ <p>де $D(x) = e^{-x^2} \int_0^x e^{v^2} dv$ – інтеграл Доусона</p>

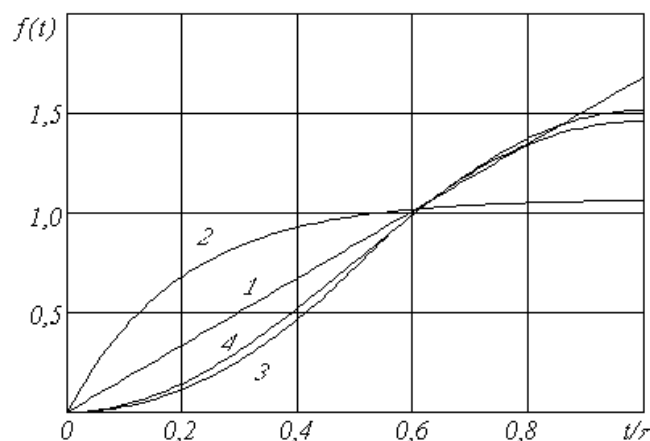


Рисунок 4 – Адіабатичний процес розігріву для режиму зворотного зміщення $p-n$ переходу

Для експоненціального імпульсу, основна енергія якого зосереджена поблизу переднього фронту, темп розігріву на його початку значно вищий, ніж для інших форм імпульсу, проте, досягнення

високих температур обмежується швидким спадом імпульсної потужності з часом. У режимі прямого зміщення досягаються вищі температури. Максимум температури досягається раніше, і темп розігріву та охолодження схожий з розглянутим режимом (рис. 4; криві 2, 3, 4).

Для області короткоімпульсних електричних навантажень $\tau \leq 10^{-8}$ ядро у виразі для нормалізованої температури (12) розраховується за виразом (4). При цьому для узагальненої температури отримуємо

$$f(t) = A \int_0^t P(\tau) d\tau, \quad (16)$$

де $A = \frac{1}{SB_2(T_* - T)}$ – стала величина.

Температура еквівалентна енергії імпульсу електричного навантаження. Зазначимо, що при короткоімпульсних перевантаженнях (16) максимальна температура завжди досягається на задньому фронті імпульсу, що є результатом адіабатичного процесу, який виникає при зворотньому зміщенні p - n переходу напівпровідника (рис. 5).

Залежність потужності, необхідної для виникнення теплового пошкодження під час дії послідовності імпульсів, можна отримати за допомогою виразу (10).

Як видно з наступного виразу (17), якщо величина паузи між імпульсами достатньо велика, тоді процес теплопровідності призводить до встановлення рівномірного температурного розподілу в матеріалі, а потужність одного імпульсу призводить до незначного розігріву. Отже, в середовищі встановлюється стаціонарний процес, і теплові деградації не виникають. Якщо кожен наступний імпульс призводить до підвищення температурного фону, то з часом внаслідок дії серії імпульсів матеріал розігривається до температури плавлення.

$$P_n = \frac{w_B S}{(T_m - T_h) \sum_{i=1}^N [H(r, (i-1)\theta + \tau_u) - H(r, (i-1)\theta)]}, \quad (17)$$

де θ – період слідування імпульсів;
 N – rskmrscnm імпульсів у послідовності.

Для оцінювання часових характеристик теплового процесу у напівпровіднику вводиться величина $\tau_T = \frac{C_p \rho}{k_T} L^2$, яка називається постійним часом теплової релаксації, де L – характерний розмір об'єкта.

Стала τ_T пов'язана зі сталою W-B співвідношенням

$$w_B = \frac{k_T}{L} (T_k - T_h) \sqrt{\pi \tau_T}. \quad (18)$$

Для лінійної моделі справедливий принцип суперпозиції, а саме: кожен наступний імпульс призводить до додаткового розігріву елемента, і кінцева температура складається з окремих порцій енергії, що доставляють окремі імпульси, які складаються. На рисунку 5 наведено часові діаграми процесу розігріву послідовністю прямокутних імпульсів потужності. Кожен імпульс висотою P_0 можна подати як різницю функцій включення. «Негативна потужність» відповідає процесу охолодження напівпровідника в паузі між імпульсами внаслідок теплопровідності.

Якщо температура в момент закінчення імпульсу досягає значення f_1 , то до наступного імпульсу залишкова температура відповідає значенню $f(\theta)$. При цьому для досягнення температури плавлення в результаті дії імпульсів N необхідно, щоб виконувалося співвідношення $N \Delta f = 1$, де Δf – приріст температури за період. Якщо температура розігріву відповідає значенню f_2 , у паузі між

імпульсами відбувається остигання до вихідної температури, внаслідок чого встановлюється стаціонарний процес.

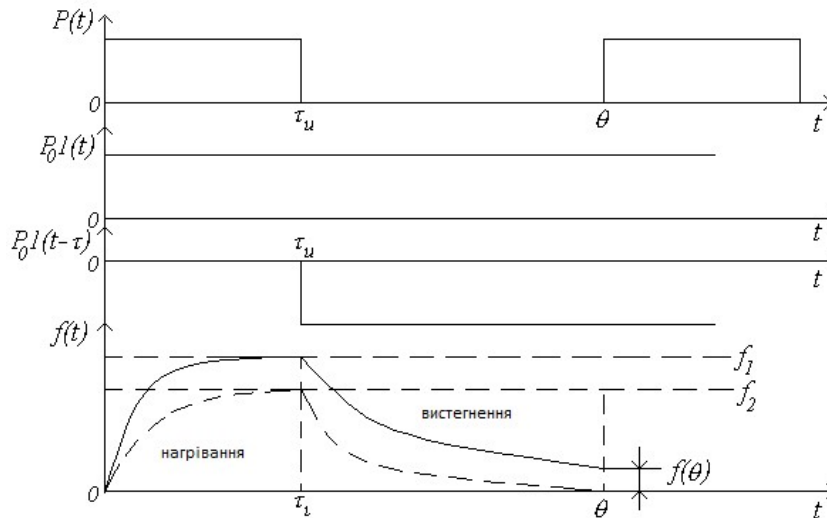


Рисунок 5 – Часові діаграми процесу розігріву послідовністю прямокутних імпульсів потужності

Вирази, що описують процес теплопровідності, аналогічні виразам для процесу поширення хвилі напруги у RC довгої лінії (рис. 6) [9, 10].

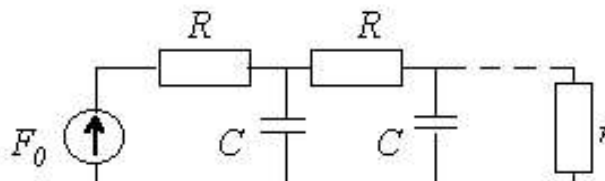


Рисунок 6 – Процес поширення хвилі напруги у RC довгої лінії

В ідеальному випадку передбачається, що швидкість поширення хвилі в лінії та швидкість поширення тепла в середовищі дорівнюють ∞ . Рівняння для напруги в лінії має такий вигляд:

$$\frac{\partial U(x,t)}{\partial t} = \frac{1}{RC} \frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial x^2} + F_0 \quad (19)$$

Рівняння (19) аналогічне одновимірному рівнянню теплопровідності, яке можна отримати з виразу (1).

Між величинами, що входять у рівняння (19) та (1), має місце така відповідність: напруга $U \leftrightarrow$ температура T ; погонний опір $R \leftrightarrow$ тепловий опір $R_T = \frac{1}{k_T} \frac{l}{S}$, дорівнює величині зворотної щільності

теплового потоку, що створюється у середовищі перепадом температури K ; погонна ємність $C \leftrightarrow$ тепла ємність $C_T = C_P \frac{m}{l^2}$, дорівнює теплоємності зразка масою m , що має характерний лінійний

розмір l ; стала часу $RC \leftrightarrow$ температуропровідність середовища a .

Отже, процес описується аналогічним виразом (17). Негативна функція включення на рисунку 5 відповідає передаванню потужності від середовища у джерело.

Висновки

Таким чином, лінійна теплова модель достатньо точно описує часові залежності температури та потужності пошкоджень.

Критеріальними параметрами є стала W-B та час теплової релаксації напівпровідникового кристала τ_T , які залежать від макроскопічних характеристик напівпровідника (теплоємність, теплопровідність, щільність).

При скороченні тривалості впливу характер часової залежності потужності $P_n(t)$ визначається зменшенням ефективних розмірів області енерговиділення, що призводить до зменшення граничної енергії ушкоджень, при цьому при адіабатичному розігріві зростання температури спостерігається за будь-якої форми імпульсу.

Показано, що за однакових рівнів енергії імпульсні навантаження більш небезпечні для функціонування ТКС, ніж квазістаціонарні.

Фізична картина процесів дефектоутворення у напівпровідникових приладах під дією імпульсів переважання ультракороткої тривалості може бути з'ясована в рамках теорії електричних процесів у напівпровідниках, характерний час яких значно менший від часу теплової релаксації τ_T .

Подальше уточнення сценарію теплового процесу дефектоутворення полягає у аналізі нелінійного рівняння теплопровідності, аналогічного виразу (1), з урахуванням температурних залежностей тепло- та електрофізичних параметрів напівпровідника [11 – 13].

Перелік джерел посилання

1. Wunsch D. S., Bell R. R. Determination of threshold failure level of semiconductors diodes and transistors due to pulse voltage. *IEEE Trans. on Nuclear Sci.* 1968. Vol. 15. N 6. Pp. 244 – 259.
2. Antinone R. J. How to prevent circuit zapping. *IEEE Spectrum.* 1987. Vol. 4. N 24. Pp. 34 – 38.
3. Whalen J. J. A comparison of DC and RF pulse susceptibilities of UHF transistors. *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility.* 1977. Vol. 19. N 9. Pp. 49 – 56.
4. Фик О. І., Кучер Д. Б. Порівняльна характеристика енергетичного потенціалу вражаючих факторів радіочастотної та традиційної зброї, що завдає механічні пошкодження. *Актуальні проблеми діяльності складових сектору безпеки і оборони України в умовах особливих правових режимів: поточний стан та шляхи вирішення:* тез. доп. Всеукраїнської наук.-прак. конф. м. Харків, 28 бер. 2024. р. Харків, 2024. С. 281 – 283.
5. Фук О. І. Research of the conditions of use of experimental method for qualification control and quantitative estimate the stability functioning of the radioelectronic device under the influence of the destructive effect of the electromagnetic wave. *Technology audit and production reserves.* 2018. № 5/2 (43). Pp.17 – 25.
6. Shurenkov V. V., Pershenkov V. S. Electromagnetic Pulse Effects and Damage Mechanism on Semiconductor Electronics. *Facta Universitatis. Electronics and Energetics.* 2016. Vol. 24. Pp. 621 – 629.
7. Paul T., Zwierlein H. Electromagnetic Pulse (EMP) Impact on Modern Electronics : A Review of Testing Methods. *Journal of Electrical Engineering and Technology.* 2015. Vol. 10 (2). Pp. 123 – 135.
8. Dwyer V. M., Franklin A. J., Campbell D. S. Electromagnetic discharge thermal failure in semiconductor devices. *IEEE Trans. on Electr. Dev.* 1990. Vol. 37. N 11. Pp. 2381 – 2387.
9. Shousha A. H. M. Negative differential conductivity due to electrothermal instabilities in thin amorphous films. *J. Appl. Phys.* 1971. Vol. 42. N 12. Pp. 5131 – 5236.
10. Lange T. J., Hjellen G. A. A comparison of test and model-predicted RF-pulse susceptibilities of UHF transistors. *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility.* 1978. Vol. 20. N. 4. Pp.513, 514.
11. Баранюк Р. А. Теплове моделювання силових напівпровідникових пристроїв. *ElectronComm.* 2016. Vol. 21. № 3 (92). С. 10 – 16.
12. Chen S. H. & Yu D. M. Global existence and blowup solutions for quasilinear parabolic equations. *Journal of Mathematical Analysis and Applications.* 2007. Pp. 151–167.
13. Invention and Technological Progresses of Integrated Circuits / Wang, Y., Chi M.H., Lou J. Jc., Chen Cz. *Handbook of Integrated Circuit Industry.* Springer, Singapore, 2024.

Стаття надійшла до редакції 15.10.2024 р.

UDC 621.382

O. Fik, O. Nazarenko, N. Smyrynska, M. Hlushchenko

MODELING OF THE PROCESS OF ELECTROMAGNETIC DAMAGE OF SEMICONDUCTING STRUCTURES OF RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT OF TELECOMMUNICATION SYSTEMS

In the war between Ukraine and Russia, electromagnetic means of influence on telecommunication systems and military and civilian communication systems are used. The most severe operating conditions of telecommunication system elements are thermal conditions, when degradation effects associated with exceeding thermal tolerances already occur. That is, modes when irreversible or catastrophic failures of telecommunication systems occur in semiconductor structures. Today, one of the most urgent tasks in the design of fault tolerance of telecommunication systems, including military ones, is to study models of the thermal mechanism of degradation of radio elements and components. In this article, we model the process of damage to semiconductor structures when current pulses of various shapes pass through. The occurrence of thermal loads is usually associated with a violation of the electrical modes of operation of semiconductor elements and components of telecommunication systems that are most susceptible to external destabilizing factors. At the same time, degradation effects can occur as a result of short-term pulsed electrical loads. In recent years, the tightening of the requirements for ensuring the thermal conditions of semiconductor devices has been caused by miniaturization and a high degree of integration of elements (especially digital ones), the transition to submicron technologies, the growth of broadband and computer technology, the speed of telecommunications systems, etc.

The paper derives expressions for estimating the amount of allocated power under certain conditions of current pulse impact on complex semiconductor structures of telecommunication systems. Thus, the linear thermal model describes the time dependence of temperature and damage power quite accurately. The criterion parameters are the W - B constant and the thermal relaxation time of the semiconductor crystal τ_T , which depend on the macroscopic characteristics of the semiconductor (heat capacity, thermal conductivity, density). With a reduction in the duration of exposure, the nature of the time dependence of the power $P_n(t)$ is determined by a decrease in the effective size of the energy release region, which leads to a decrease in the limiting damage energy, while, during adiabatic heating, the temperature increase is observed at any pulse shape. It is shown that at the same energy levels, impulsive loads are more dangerous for the functioning of telecommunication systems than quasi-stationary ones.

The physical picture of the defect formation processes in semiconductor devices under the influence of ultrashort duration overload pulses can be clarified within the framework of the theory of electrical processes in semiconductors, the characteristic times of which are much shorter than the thermal relaxation time τ_T . Further refinement of the scenario of the thermal process of defect formation is based on the analysis of the nonlinear thermal conductivity equation, taking into account the temperature dependence of the thermal and electrophysical parameters of the semiconductor.

K e y w o r d s: current pulse, semiconductor structures, telecommunication systems.

Фик Олександр Ілліч – доктор технічних наук, професор, професор кафедри військового зв'язку та інформатизації Національної академії Національної гвардії України.
<http://orcid.org/0000-0001-6735-6229>

Назаренко Олег Леонідович – кандидат військових наук, старший викладач кафедри тактики Національної академії Національної гвардії України.
<http://orcid.org/0000-0001-7579-0658>

Смиринська Наталія Борисівна – начальник науково-дослідного відділу науково-дослідного центру Збройних Сил України «Державний океанаріум» Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія».
<https://orcid.org/0000-0001-5373-2625>

Глущенко Микола Олександрович – старший викладач кафедри військового зв'язку та інформатизації Національної академії Національної гвардії України.
<https://orcid.org/0000-0003-3448-0965>