

ВИКОРИСТАННЯ ТОНКИХ ПЛІВОК ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ НАДПРОВІДНИКІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ВІД ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО РУЙНУВАННЯ ПРИ ВПЛИВІ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

к.т.н. В.О. Колпаков, д.х.н., проф. В.Д. Калугін, к.т.н. Д.Б. Кучер, к.т.н. О.І. Фик

Розглянуті питання щодо забезпечення постійної роботи радіоелектронної апаратури (РЕА) в умовах впливу потужних електромагнітних випромінювань шляхом використання тонких плівок високотемпературних надпровідників з метою захисту від електроерозійного руйнування.

Вступ. Досвід розробки й експлуатації радіоелектронної апаратури показує, що однією з найбільш складних задач є забезпечення її постійної роботи в умовах впливу потужних електромагнітних випромінювань (ПЕМВ) природного і штучного походження.

На відміну від радіоперешкод і шумів вплив ПЕМВ на радіоелектронну апаратуру неминує викликає порушення її функціонування в результаті виникнення в зовнішніх і внутрішніх колах наведеної напруги і струмів, що можуть призвести до локального виділення за досить короткий проміжок часу на деяких елементах великої кількості теплоти, і, як наслідок, їхнього ерозійного (електрохімічного) руйнування [1 – 3]. У цьому випадку стійкість елементів радіоелектронної апаратури до впливу ПЕМВ звичайно характеризують за допомогою критичної енергії ушкодження, при виділенні якої в приладі за час дії імпульсу електричного перенавантаження хоча б один з параметрів приладу виходить за норми (табл. 1).

Таблиця 1

Рівні критичної енергії і характер електроерозійного руйнування елементів радіоелектронної апаратури

Тип компонента	Критична енергія, Дж	Характер ушкодження
Малопотужні перемикальні діоди	$10^{-6} \dots 10^{-2}$	Різні види пробую і структурних ушкоджень р-n переходів, які супроводжуються необоротними електрохімічними процесами
Випрямляючі і стабілізуючі діоди	$8 \cdot 10^{-5} \dots 6 \cdot 10^{-1}$	
Мікрохвильові діоди	$10^{-7} \dots 10^{-4}$	

Інтегральні мікросхеми	$10^{-7} \dots 10^{-3}$	Деградація параметрів діодів і транзисторів у складі ІМС, пробій тонкоплівочних конденсаторів, плавлення і вигорання металізації, руйнування контактних доріжок, обриви сполучних дротиків, руйнування резисторів
------------------------	-------------------------	---

Для забезпечення нормального функціонування РЕА шляхом зниження несприятливого впливу ПЕМВ на її елементи до рівнів, обумовлених умовами збереження її працездатності, застосовують захисні пристрої, основними елементами яких є газорозрядні та напівпровідникові прилади.

Однією з основних характеристик захисних пристроїв є залежність їхніх вихідних напруг від часу. Визначення цієї характеристики пов'язано з узгодженням спрацьовування і дозволяє судити про те, наскільки сигнал ПЕМВ після проходження ним захисного пристрою небезпечний для нормального функціонування елементів РЕА, що входять до складу захисної системи. Тому ефективність захисту РЕА в основному визначається порівнянням часу спрацьовування захисних пристроїв і тривалістю ПЕМВ [2 – 5].

Порівняльний аналіз залежності вихідних напруг існуючих захисних пристроїв від часу, приведений у роботах [2 – 4], показав їхню низьку ефективність захисту, обумовлену порівняно повільними фізичними процесами, що характеризують тривалість переключення.

Набагато більшу швидкість і більш високу чутливість до зовнішніх впливів можуть мати захисні пристрої, побудовані на основі тонких високотемпературних надпровідних плівок [6 – 8].

Конструктивно такі захисні пристрої можуть бути виконані у вигляді полоскової лінії передачі (мікрополоскової чи компланарної), основою яких є тонкі плівки високотемпературних надпровідників (ВТНП), розташовані на діелектричній підкладці [2, 6 – 9].

При прийомі корисних сигналів тонка ВТНП плівка знаходиться в надпровідному (S) стані і захисний пристрій забезпечує безперешкодний прохід корисних сигналів. У випадку впливу ПЕМВ струм, що протікає в лінії, руйнує надпровідність тонкої плівки і переводить її в нормальний (N) стан (фазовий S-N перехід). Тривалість переходу тонкої ВТНП плівки з (S) у (N) стан визначає швидкість надпровідного захисного пристрою. Досягти максимальної швидкості надпровідних захисних пристроїв можна за допомогою реалізації механізму швидкого струмового переключення, що заснований на ефекті електронного розігріву.

Таким чином, метою роботи є визначення тривалості фазового S-N переходу тонкої ВТНП плівки при реалізації ефекту електронного розігріву під впливом ПЕМВ.

Методи і результати досліджень. Відповідно до досліджень, проведених у роботах [6 – 9], існує швидкість введення струму, при якій надпровідник втрачає стабільний надпровідний стан і переходить у нормальний практично без прояву теплових процесів.

При цьому під впливом імпульсного сигналу на краях тонкої ВТНП

плівки виникають нормальні області, які потім розповсюджуються на весь зразок з аномально великою швидкістю, що на кілька порядків перевищує теплову швидкість. Суттєве значення швидкості поширення нормальних областей може бути відповідальне за процеси аномального швидкого переходу тонкої ВТНП плівки в нормальний стан при великих швидкостях введення струму [9]. Тому для визначення тривалості фазового S-N переходу необхідно досліджувати формування і зміну нормальних областей у надпровідній тонкій плівці під впливом потужного імпульсного сигналу.

У роботах [7 – 8] було показано, що під впливом потужного імпульсного сигналу у початковий момент часу через тонку ВТНП плівку протікає без спотворень транспортний струм, поки його величина не досягне I_{c1} . При цьому магнітне поле транспортного струму, яке проникає в надпровідник, викликає руйнування надпровідності на краях плівки в області шириною приблизно рівній глибині проникнення магнітного поля, тобто формуються області нормальної провідності [7, 8]. При цьому на краях тонкої плівки в області шириною λ_N збільшується температура електронів без нагрівання кристалічної решітки, і опір зразка зростає (ВТНП переходить у змішаний стан). Енергія вхідного сигналу ефективно перерозподіляється по електронній підсистемі за рахунок міжелектронних зіткнень, нерівноважні квазічастинки народжують нові з конденсату – у результаті області нормальної провідності розповсюджуються на всю тонку плівку.

Для опису змішаного стану надпровідника запишемо перше рівняння Лондонів і перше рівняння Максвелла в наступному вигляді:

$$\frac{1}{\sigma_N} \operatorname{rot} \bar{\mathbf{H}} = \Lambda \frac{\partial \bar{\mathbf{j}}_c}{\partial t} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_N}{\sigma_N} \frac{\partial \bar{\mathbf{E}}}{\partial t}, \quad (1)$$

де $\bar{\mathbf{j}}_c$ – критична щільність струму, що руйнує надпровідний стан тонкої ВТНП плівки; $\bar{\mathbf{E}}, \bar{\mathbf{H}}$ – напруженості електричного та магнітного полів; ϵ_N , σ_N – діелектрична проникність і питома провідність надпровідника, що знаходиться в нормальному стані; $\Lambda = m_S / (n_S e^2)$; m_S і n_S – ефективні маса і концентрація надпровідних носіїв заряду; ϵ_0 – електрична стала.

Аналіз досліджень, проведених у роботах [6 – 9] показав, що щільність критичного струму, що протікає через надпровідну плівку, змінюється в основному щодо довжини смужки (вісь y). При цьому критичне магнітне поле проникає в тонку ВТНП плівку на деяку глибину, яка утворює нормальнопровідні області (рис. 1). За умови, що товщина тонкої ВТНП плівки (h) не перевищує $0,2 \cdot 10^{-6}$ м, проникнення магнітного поля вглиб тонкої плівки здійснюється в напрямку x рівномірно по всій довжині надпровідника [7, 8]. Тому вираз (1) для прямокутної системи координат (рис. 1) можна переписати у такому вигляді:

$$-\frac{\partial H_z}{\partial x} = \sigma_N \Lambda \frac{\partial j_{cy}}{\partial t} + \epsilon_0 \epsilon_N \frac{\partial E_y}{\partial t}. \quad (2)$$

Таким чином, збільшення нормальної області походить від краю тонкої півки до її середини в напрямку $-x$ (рис. 1) і визначається швидкістю наростання щільності критичного струму, що протікає в напрямку y за інтервал часу від t_{c1} до t_{c2} ($j_c(t_{c1}) = J_{c1}$, $j_c(t_{c2}) = J_{c2}$). При цьому фазовий перехід починається при $j_c(t_{c1}) = J_{c1}$ проникненням критичного магнітного поля вглиб тонкої ВТНП півки на глибину, що характеризує формування областей нормальної провідності на краях надпровідника (рис. 1). Збільшення цих областей закінчується при $j_c(t_{c2}) = J_{c2}$, що характеризує закінчення фазового S-N переходу.



Рис. 1. Формування нормальних областей у тонкій ВТНП півки

Очевидно, що магнітне поле, що проникає в тонку ВТНП півку, практично однорідне всередині надпровідника щодо осей z і y [7, 8], а щільність критичного струму змінюється в напрямку x за інтервал часу від t_{c1} до t_{c2} . Тоді, зневажаючи струмами зсуву, вираз (2) можна переписати як

$$-\frac{dH}{dx} = \frac{\sigma_N \mu_0 I_{c2}}{W} \frac{d\lambda_N}{dt}, \quad (3)$$

де $\frac{d\lambda_N}{dt} = \frac{\lambda_1^2}{h I_{c2}} \frac{di}{dt}$ – швидкість збільшення області нормальної провідності;

h , W – товщина та ширина тонкої ВТНП півки; I_{c2} – друге значення критичного струму. Грунтуючись на (3), можна визначити вираз, що характеризує зміну ширини нормальної області в тонкій ВТНП півки та її активний опір:

$$\lambda_N(t) = \frac{\lambda_1^2}{h I_{c2}} i(t); \quad R_{S-N}(t) = \frac{l p_N}{S I_{c2}} i(t),$$

де S і l – площа перетину і довжина тонкої надпровідної плівки; λ_1 – глибина проникнення магнітного полючи в надпровідник; ρ_N – питомий електричний опір надпровідної смужки в нормальному стані.

Визначимо тривалість існування змішаного стану: $t_{S-N} = t_{c2} - t_{c1}$.

Згідно [1 – 3] тимчасову залежність імпульсної напруги, що наводиться ПЕМВ, можна апроксимувати досить простою аналітичною функцією

$$u_1(t) = U_m \omega \left(t - (1 - a_2) t^2 / 2 \right), \quad (4)$$

де U_m – амплітуда ПЕМВ; $a_2 = 3,25/t_\phi$ – частотна характеристика імпульсу, що пов'язана з тривалістю фронту імпульсу t_ϕ ; ω – несуча частота корисного сигналу. Тоді, з огляду на зміни критичного струму за інтервал часу від t_{c1} до t_{c2} , тривалість фазового переходу можна записати у такому вигляді:

$$t_{S-N} = \frac{\sqrt{4U_m\omega - 2I_{c2}^2 A(1 - a_2)} - \sqrt{4U_m\omega - 2I_{c1}R_H(1 - a_2)}}{(1 - a_2)\sqrt{U_m\omega}}, \quad (5)$$

де R_H – опір навантаження (50 Ом), $A = \rho_N l / S I_{c2}$.

Залежності часу початку, закінчення і тривалості фазового S-N переходу від амплітуди напруги вхідного сигналу показані на рис. 2.

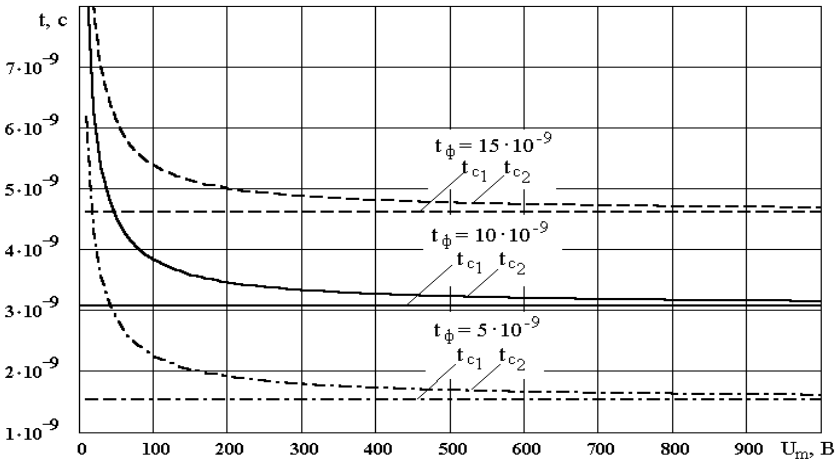


Рис. 2. Залежність часу початку (t_{c1}), закінчення (t_{c2}) фазового S-N переходу від амплітуди напруги вхідного сигналу для різних значень тривалості фронту ПЕМВ

Висновки. Таким чином, при реалізації механізму електронного розігріву в тонкій ВТНП плівці під впливом ПЕМВ початок фазового переходу практично не залежить від амплітуди вхідного сигналу і визначається в основному тривалістю фронту ПЕМВ (рис. 2) та конструктивними параметрами тонкої ВТНП плівки. Це у свою чергу дозволяє заздалегідь вибира-

ти необхідну чутливість надпровідних захисних пристроїв, шляхом зміни площі перетину тонкої високотемпературної надпровідної плівки.

Однак однією з основних умов виникнення ефекту електронного розігріву є рівномірне проникнення магнітного поля вглиб тонкої ВТНП плівки, що здійснюється за умови $h \leq 0,2 \cdot 10^{-6}$ м. Тому вибір порогу спрацьовування захисних пристроїв в основному можливий за рахунок зміни ширини тонкої високотемпературної надпровідної плівки.

Закінчення фазового S-N переходу в більшій мірі визначається тривалістю фронту й амплітудою ПЕМВ, ніж конструктивними параметрами тонкої високотемпературної надпровідної плівки (рис. 2).

Таким чином, тривалість фазового S-N переходу не є постійною величиною, а визначається конструктивними параметрами тонкої ВТНП плівки і тривалістю фронту й амплітудою ПЕМВ. При цьому початок руйнування надпровідності для тонких ВТНП плівок, що мають однако-ві конструктивні параметри (W, h), в основному визначається амплітудними і частотними характеристиками ПЕМВ. Тому вибір конструктивних параметрів тонкої ВТНП плівки необхідно здійснювати з розрахунку забезпечення найбільшої ефективності захисту РЕА, що у даному випадку визначається порівнянням тривалості фазового S-N переходу і тривалістю впливу ПЕМВ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Риккетс Л.У., Бриджес Дж., Майлетта Дж. *Электромагнитный импульс и методы защиты*. – М.: Атомиздат, 1979. – 328 с.
2. Кучер Д.Б. *Мощные электромагнитные излучения и сверхпроводящие защитные устройства*. – Севастополь: Ахтиар, 1997. – 188 с.
3. Мырова Т.О., Чепиженко А.З. *Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям*. – М.: Радио и связь, 1988. – 296 с.
4. Кравченко В.И. *Грозозащита радиоэлектронных средств*. – М.: Радио и связь, 1991. – 262 с.
5. Кучер Д.Б. *О воздействии мощных электромагнитных излучений на радиоэлектронную аппаратуру через антенно-фидерные устройства* // Вестник СевГТУ. – 2000. – №26. – С. 83 – 87.
6. Аксаев Э.Е., Гершензон Е.М., Гольцман Г.Н. и др. *Механизмы детектирования электромагнитного излучения в пленках $YBa_2Cu_3O_7$* // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. – 1990. – Т. 3.- №8 (ч. 2). – С. 1928 – 1942.
7. Кучер Д.Б. *Быстродействие защитного устройства на основе тонкой сверхпроводящей пленки* // Технология приборостроения. – 1998. – №2. – С. 56 – 59.
8. Кучер Д.Б., Фык А.И. *Исследование формирования нормальных областей в тонкой сверхпроводящей пленке* // Радиотехника. – 1999. – Вып. 109. – С. 38 – 41.
9. Березинец В.М., Кучер Д.Б., Фык А.И. *Экспериментальные исследования фазового S-N перехода сверхпроводящего защитного устройства* // Радиоэлектроника и информатика. – Х.: ХТУРЕ. – 1999. – №3 (8). – С. 8 – 10.

Надійшла 3.07.2002

КОЛПАКОВ Володимир Онисимович, канд. техн. наук, нач. Севастопольського Війсь-

ково-морського інституту ім. П.С. Нахімова. Область наукових інтересів – експлуатація озброєння, що будується на нових фізичних принципах.

КАЛУГІН Володимир Дмитрович, доктор хім. наук, професор, професор кафедри ХВУ. В 1961 році закінчив Уральський політехнічний інститут. Область наукових інтересів – розробка та застосування напів- та надпровідникових вимірювальних перетворювачів.

КУЧЕР Дмитро Борисович, канд. техн. наук, доцент кафедри ХВУ. Закінчив ХВВКІУ РВ у 1992 році. Область наукових інтересів – технічне застосування високотемпературних надпровідників.

ФИК Олександр Ілліч, канд. техн. наук, викладач кафедри ХВУ. Закінчив ХВУ у 1994 році. Область наукових інтересів – технічне застосування високотемпературних надпровідників.
