

УДК 623.4.015.4

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.3\(39\).89-96](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.3(39).89-96)

П. М. ФЕДОРОВ, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
<https://orcid.org/0000-0003-1359-2757>

В. В. БОГУЧАРСЬКИЙ, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
<https://orcid.org/0000-0001-5514-1642>

Н. В. ГАМАЛІЙ
<https://orcid.org/0000-0003-01505-854X>
(Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки Збройних Сил
України, м. Київ)

ОСОБЛИВОСТІ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПОГЛИНАННЯ ПОТУЖНОГО ІМПУЛЬСНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В РАДІОЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТАХ

Розглянуто основні закономірності процесів впливу потужного імпульсного електромагнітного випромінювання на електронні компоненти. Установлені основні механізми ураження радіoeлектронних компонентів потужним електромагнітним імпульсом. Основну увагу зосереджено на дослідженні процесів впливу потужного імпульсного електромагнітного випромінювання на найбільш уразливі до такого впливу напівпровідникові прилади – на інтегральні мікросхеми. Установлені орієнтовні межі інтервалу значень поглинутої енергії та потужності, в якому відбувається функціональне ураження більшості сучасних напівпровідникових приладів.

Ключові слова: електромагнітний імпульс, радіoeлектронні компоненти, функціональне ураження, інтегральні мікросхеми.

ВСТУП

Дослідження стійкості радіoeлектронної та електротехнічної апаратури до впливу потужного імпульсного електромагнітного випромінювання мають давню історію. Вони розпочалися ще в період 50-х – першої половини 60-х років минулого століття після того, як у ході випробувань ядерної зброї в США та СРСР було встановлено, що одним з її уражальних факторів є електромагнітний імпульс ядерного вибуху, здатний ушкоджувати чутливе до електромагнітного поля обладнання на значних територіях. Інтерес до цієї проблеми ще більше зріс з 80-х років ХХ ст., коли виник новий напрямок – розвиток неядерних засобів функціонального ураження радіoeлектронних засобів (РЕЗ) на напівпровідниковій елементній базі за допомогою генераторів потужного

(порядку кількох гігават) імпульсного мікрохвильового випромінювання, відомих під назвами електромагнітної зброї або зброї електромагнітного імпульсу (ЕМІ).

Дослідження різних аспектів цієї проблеми проводилися практично в усіх країнах світу з розвинутим оборонно-промисловим комплексом. Автори мають непрямі свідчення про те, що в Україні відповідні дослідження, проведені в минулі роки, а також певні напрацювання з цього напрямку можуть мати такі науково-дослідні установи, як НДПКи «Молнія» Харківського політехнічного інституту, ННЦ «ХФП», м. Харків, КП «СП «Арсенал»», м. Київ, Інститут фізики напівпровідників Національної академії наук України та, імовірно, деякі інші науково-дослідні установи України.

Загалом слід відзначити, що незважаючи на значну кількість досліджень і безліч відкритих публікацій у науково-технічних виданнях на тематику, дотичну до проблеми стійкості РЕЗ до впливу потужного імпульсного радіочастотного випромінювання, ця проблема, враховуючи її складність і багатогранність, не втратила своєї актуальності й сьогодні.

Основними об'єктами ураження зброєю ЕМІ при її застосуванні є РЕЗ озброєння та військової техніки (ОВТ). Процеси, що відбуваються в РЕЗ ОВТ при дії ЕМІ, залежать від застосованих схемних рішень, особливостей систем електроживлення й заземлення та інших конструктивних особливостей апаратури. Але насамперед результат впливу ЕМІ на конкретний зразок РЕЗ визначає стійкість застосованих у ньому радіoeлектронних компонентів до впливу потужного імпульсного радіочастотного випромінювання.

Метою статті є узагальнений огляд основних закономірностей процесів впливу потужного імпульсного електромагнітного випромінювання на електронні компоненти, насамперед на найбільш уразливі до такого впливу напівпровідникові прилади і встановлення орієнтовних меж інтервалу значень поглинутої енергії та потужності, в якому відбувається функціональне ураження (необоротне ушкодження) більшості сучасних напівпровідникових приладів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основні механізми ураження радіoeлектронних компонентів потужним електромагнітним імпульсом

Узагальнено за принципом дії можна виділити такі групи радіoeлектронних компонентів [1]:

- напівпровідникові прилади (діоди, транзистори, цифрові та аналогові інтегральні мікросхеми (ІМС));
- електровакуумні прилади (радіолампи, магнетрони, клістри, розрядники);
- електротехнічні пристрої (трансформатори, дроселі та інші пристрої, що мають реактивний опір);
- світлочутливі прилади та елементи (фоторезистори, світлодіоди тощо);
- електромеханічні (реле, електричні двигуни, генератори тощо);
- термоелементи (термореле, термодатчики);
- електрохімічні прилади (конденсатори, акумулятори);

– прилади комутації та монтажу (міжблочні кабелі, шлейфи, джгути, друковані плати, рознімачі).

Уражальна дія зброї ЕМІ на технічні засоби зводиться до впливу потужного зовнішнього ЕМІ на РЕЗ. Принцип уражальної дії полягає у використанні потужного електромагнітного імпульсу короткої тривалості для створення наведених електричних перевантажень (великих струмів та напруг) у елементах РЕЗ та зміни структури матеріалів. Це призводить до [1] фізичного руйнування елементів РЕЗ (функціональне ураження – необоротне ушкодження за рахунок електричного та теплового пробіїв, механічних відривів доріжок плат та виводів у місцях з'єднання різномірних матеріалів) або тимчасового «осліплення» чи функціонального подавлення РЕЗ (подавлення через перевантаження чутливих елементів та порушення динамічного режиму їхнього функціонування) з подальшим відновленням функцій.

При функціональному ураженні необхідна заміна окремих елементів РЕЗ. Функціональне подавлення призведе лише до появи в РЕЗ хибних сигналів та блокування нормального функціонування радіотехнічного пристрою. «Осліплення» або утруднення функціонування напівпровідникових приладів можуть тривати від кількох секунд до кількох годин.

Потужний електромагнітний імпульс здійснює вплив на компоненти РЕЗ завдяки уражальним факторам, що мають такий характер: електричний, електронний, електромеханічний, термофізичний, хімічний [1]. Електричний вплив проявляється як тимчасовий (оборотний) польовий пробій діелектричних та напівпровідникових матеріалів компонентів РЕЗ у сильних електричних полях ЕМІ. Електронний вплив здійснюється за рахунок стрибків напруги джерел живлення (як первинних, так і вторинних) під час дії ЕМІ. Цей фактор обумовлює спрацювання запобіжників, трансформаторів, індуктивних дроселів та інших елементів, які мають реактивний опір.

Електромеханічний вплив характеризується появою механічних сил за рахунок магнітного поля навколо провідників, а також механічних розривів через різну теплоємність елементів з'єднань. Термофізичний вплив полягає у виникненні теплового (необоротного) пробою

електронних компонентів різних типів і з'єднань у усіх системах, плавленні й вигоранні металізації (контактних доріжок). Хімічний вплив полягає в зміні та порушенні хімічного складу речовин, які використовуються в елементах радіотехніки (електролітичні конденсатори, масляні потенціометри, системи стабілізації та гальмування, гідросистеми тощо).

Якісна характеристика дії потужного ЕМІ на елементну базу РЕЗ наведена в табл. 1 [2, 3].

У табл. 2 [2, 3] для порівняння наведено узагальнені параметри чутливості компонентів РЕЗ до впливу потужного ЕМІ.

Як можна бачити з таблиці, стійкість компонентів різного типу до впливу потужного ЕМІ змінюється в дуже широких межах і може відрізнятися до десяти порядків. Такі компоненти РЕЗ, як різноманітне електротехнічне обладнання (генератори, електродвигуни, трансформатори), котушки, резистори, реле можна вважати практично неушкоджуваними зброєю ЕМІ. Необхідні для їхнього ураження поля можна створити хіба що при безпосередньому контакті з високовольними джерелами або в результаті дії ЕМІ близького наземного ядерного вибуху.

Пристрої, виконані на електровакуумних приладах, значно стійкіші до впливу зброї ЕМІ в порівнянні із сучасними твердотільними приладами (діоди, транзистори, інтегральні мікросхеми). Як результат, зброя ЕМІ, що може вивести з ладу напівпровідникові комп'ютери й приймачі, може викликати лише незначне порушення функціонування або взагалі не вплинути на роботу РЕЗ з електровакуумними приладами. Це підкреслює труднощі оцінки уражальної дії зброї ЕМІ. Цілі, що випромінюють (РЛС чи засоби зв'язку), можуть продовжувати випромінювати й після атаки, навіть якщо їхні приймачі й системи обробки даних подавлені або знищені.

Найбільш чутливими до впливу потужного ЕМІ є напівпровідникові прилади (діоди, транзистори, інтегральні мікросхеми). Це обумовлено такими основними причинами:

- 1) параметри напівпровідників сильно залежать від зовнішніх чинників (температури, електричних та магнітних полів тощо);

Таблиця 1. Характер впливу імпульсного електромагнітного поля на елементну базу радіоелектронних засобів

Тип виробів	Характер пошкоджень
Напівпровідникові прилади	Різнорізані види пробією й структурних пошкоджень <i>p-n</i> -переходів
Інтегральні мікросхеми	Зміна параметрів діодів і транзисторів у складі ІМС, пробіїв тонкоплівкових конденсаторів, плавлення й випалення металізації, руйнування контактних доріжок резисторів
Відбивні клістроли, лампи зворотної хвилі, лампи біжної хвилі	Пробіїв електродних проміжків: відбивач-корпус, катод-корпус, керувальний електрод-корпус
Генераторні й модуляторні лампи	Релаксаційні коливання в анодному колі при впливі високої імпульсної напруги на анодний вивід, виводи екранувальної сітки й катода. Зникнення анодного струму при впливі імпульсу на вивід керувальної сітки
Приймально-підсилювальні лампи	Пробіїв проміжку катод-підігрівач через ізоляцію
Газорозрядні прилади	Хибне спрацювання
Резистори	Іскріння (внутрішній пробій), тепловий пробій між виводами високовольних резисторів
Конденсатори	Пробіїв діелектриків, повітряних проміжків

Таблиця 2. Чутливість елементної бази радіоелектронних засобів до впливу потужного імпульсного електромагнітного поля

Клас виробу	Енергія, Дж	
	Деградація параметрів більше 10 %	Структурні ушкодження
Генератори, електродвигуни, потужні силові трансформатори	$10^4 \dots 10^6$	$>10^7$
Котушки індуктивності	$10^{-2} \dots 10^{-1}$	>1
Реле, вимірні прилади, електродвигуни малої потужності, малопотужні трансформатори	$10^{-3} \dots 1$	>10
Електровакуумні й газорозрядні прилади	$10^{-2} \dots 10$	$>10^2$
Вакуумні електронні лампи, електронно-променеві трубки	$10^{-3} \dots 10$	$>10^2$
Резистори: – дрітні; – плівкові (металоплівкові); – композитні	$10^{-4} \dots 10^2$ $10^{-4} \dots 10^{-2}$ $10^{-4} \dots 1$	$>10^3$ $>10^{-1}$ >10
Конденсатори: – плівкові; – танталові	$10^{-4} \dots 10^{-3}$ $10^{-6} \dots 1$	$>10^{-2}$ >10
Діоди напівпровідникові: – випрямні й стабілізаторні; – сигнальні, перемикальні, лавинні й тунельні; – мікрохвильові	$10^{-4} \dots 1$ $10^{-6} \dots 10^{-2}$ $10^{-8} \dots 10^{-4}$	>10 $>10^{-1}$ $>10^{-3}$
Тиристори	$10^{-5} \dots 10^{-1}$	>1
Транзистори: – великої та середньої потужності; – малої потужності	$10^{-5} \dots 10^{-2}$ $10^{-7} \dots 10^{-4}$	$>10^{-1}$ $>10^{-3}$
Інтегральні мікросхеми	$10^{-8} \dots 10^{-4}$	$>10^{-3}$

- їхні опори мають від'ємні температурні коефіцієнти (при зростанні температури питомий опір напівпровідника зменшується);
- дуже великий розкид електронної провідності навіть за кімнатної температури;
- товщина плівок, що утворюють провідні й леговані напівпровідні області напівпровідникових приладів, дуже мала (порядку декілька мікронів і менше).

Саме напівпровідникові прилади складають основу елементної бази сучасних комп'ютеризованих і цифровізованих РЕЗ. За оцінками [1], питома вага напівпровідникових приладів (основу яких складають аналогові та цифрові ІМС) у сучасних РЕЗ перевищує 80 %. Більше того, вимога збільшення швидкодії цифрових пристроїв обробки інформації призводить до того, що елементна база сучасних РЕЗ стає все більш мініатюрною, зменшуються розміри й збільшується щільність розташування елементів інтегральних мікросхем. Усе це неминує супроводжується зменшенням рівнів інтенсивності електромагнітного випромінювання, при яких відбувається функціональне ураження РЕЗ.

Ураховуючи той очевидний факт, що найбільш сильний вплив (при найменшій енергії або потужності ураження) потужний ЕМІ здійснює при проникненні через антену РЕЗ у смузі пропускання його приймача, найбільш уразливими структурними елементами сучасного ОБТ до впливу зброї ЕМІ є:

- підсилювачі високої частоти та змішувачі приймачів радіолокаційних станцій;
- системи управління та навігації безпілотних літальних апаратів;

- системи наведення й підриву ракет і боєприпасів;
- приймачі радіо-, радіорелейних, тропосферних та супутникових засобів зв'язку;
- комп'ютери та мережеве обладнання автоматизованих систем управління військами та зброєю.

Вплив потужного імпульсного електромагнітного випромінювання на інтегральні мікросхеми

Оскільки найбільш уразливими до впливу потужного ЕМІ є численні ІМС сучасних РЕЗ, розглянемо процеси поглинання електромагнітного випромінювання в мікросхемах більш докладно.

У реальних умовах мікросхеми розташовуються на платах, де й відбувається безпосередній вплив імпульсних електромагнітних полів на ІМС. Електромагнітне поле радіочастотного діапазону, що потрапляє на мікросхему, створює наведення (струми й напруги високої частоти) на її численних виводах. Амплітуди наведень суттєво залежать від розмірів, форми, орієнтації виводів ІМС та параметрів ЕМІ [4]. Високочастотні коливання, наведені на виводах, у свою чергу, надходять на елементи ІМС, сформовані на її кристалі (резистори, конденсатори, діоди, транзистори). Частина енергії цих коливань поглинається елементами мікросхеми, спричиняючи їхнє нагрівання, інша частина відбивається або детектується нелінійними елементами ІМС.

Залежно від поглиненої елементами мікросхеми потужності надвисокочастотного (НВЧ) випромінювання спостерігаються такі порушення функціонування ІМС [5–7]:

- завади й оборотні відмови з відновленням нормальних характеристик і параметрів після припинення впливу НВЧ випромінювання;

- деградаційні зміни параметрів і характеристик з повільним погіршенням технічних характеристик мікросхем у процесі експлуатації й можливим виходом робочих параметрів за межі встановлених допусків;
- швидкі «катастрофічні» відмови з необоротним порушенням нормального функціонування.

Завади й оборотні відмови виникають при порівняно низьких рівнях потужності радіосигналів. Вони, зокрема, можуть бути пов'язані з детектуванням радіовипромінювання в діодах і транзисторах мікросхем [8]. Деградаційні зміни спостерігаються при проміжних значеннях потужності радіовипромінювання й енергії імпульсів.

Катастрофічні відмови, обумовлені впливом потужного випромінювання, пов'язані з виділенням тепла в локальній області мікросхеми, проплавленням напівпровідника, вигоранням контактних елементів, металізації, пробоями затворних діелектриків. На критичні рівні потужності радіовипромінювання, що викликає катастрофічні відмови, істотно впливають «приховані дефекти» матеріалів і конструктивно-технологічні особливості мікросхем (технологія виготовлення, топологія ІМС, тип корпусу, виводів тощо). Ушкодження активних елементів (у тому числі й мікросхем) значною мірою визначають імовірність ушкодження РЕЗ у цілому.

Деградаційні зміни параметрів і характеристик напівпровідникових елементів

Більшість деградаційних явищ в активних елементах мікроелектроніки пов'язують із дифузією – процесом масопереносу в об'ємі напівпровідника, на його поверхні, по границях розділу фаз і в контактах. Саме цей процес, який може прискорюватися залежно від наявності дислокацій, внутрішніх механічних напруг і таких зовнішніх факторів, як тиск, температура, електричне поле, радіація тощо, обумовлює деградацію електричних характеристик приладу, старіння, корозію матеріалів напівпровідникової структури й контактів [4].

Специфіка механізмів деградації найбільш чітко проявляється залежно від способу створення контакту, що випрямляє. Так, наприклад, експериментальні дослідження діодів з бар'єром Шотткі на основі арсеніду галію й кремнію в різних режимах роботи довели [9], що основним фізичним процесом, що обумовлює деградацію параметрів, є взаємна дифузія на границях розділу метал-напівпровідник і метал-метал. Для діодів з бар'єром Шотткі нарівні з взаємною дифузією компонентів важливим механізмом деградації є релаксація внутрішніх механічних напруг.

Для сучасних ІМС із високим ступенем інтеграції одним з головних механізмів відмови є процес деградації й руйнування мікропровідників багаторівневої металізації внаслідок електроміграції [10]. Електроміграцією (електродифузією) називають перенос маси в металах і напівпровідниках при проходженні постійного й змінного електричного струму великої густини. Він є основною формою прояву іонної провідності, внаслідок чого цей процес називають електропереносом. Механізм переміщення іонів є дифузійним, наприклад, дифузія іонів по поверхні, границях зернят, дислокаціях (існують також інші механізми переносу, такі як вакансійний і теплової дифузії міжвузлових атомів [11]).

Вплив потужного радіовипромінювання приводить до того, що в напівпровідникових приладах та ІМС виникають великі струми й високі напруги. Провідники й нелінійні елементи мікросхем у таких умовах максимально навантажені, тому доводиться зважати на високу густину струму й небезпеку електроміграції.

Слід зазначити, що будь-яка недосконалість (дефект) краю металізації приводить до збільшення напруженості поля в локальній області приладу або до локального підвищення густини струму. Це стимулює електроміграцію матеріалу, зміну провідності, наприклад, каналу польових транзисторів з бар'єром Шотткі в мікрооб'ємі і наступний лавинний розвиток мікропробою, наслідком чого стає замикання електродів приладу або відключення частини приладу.

Таким чином, великі напруженості електричних полів, густини струмів і їхніх градієнтів сприяють таким процесам, як перегрів і електроміграція іонів та виникненню й перебудові структурних дефектів у напівпровідниковому матеріалі. Зазначені процеси прискорюють зміни вихідних властивостей матеріалу й параметрів $p-n$ переходів, як правило, погіршуючи їхні характеристики.

Механізми ушкодження інтегральних мікросхем

Найпоширенішими механізмами ушкодження ІМС вважаються [4] вторинний пробій, плавлення металізації, пробій діелектрика. Розглянемо їх деякі особливості.

Вплив потужного ЕМІ супроводжується пробоем дірково-електронного переходу ($p-n$ переходу) або переходу «метал – напівпровідник» (перехід Шотткі). Найбільш поширені пошкодження напівпровідникових приладів стаються внаслідок: поверхневого пробоя, об'ємного пробоя, пробоя діелектрика і наскрізного пробоя в транзисторах з декількома послідовними переходами [12].

Розрізняють електричний (польовий) пробій і тепловий пробій переходів напівпровідникових приладів. Можливі два типи електричного пробоя $p-n$ переходів – лавинний і тунельний. Лавинний пробій спричиняється швидким розмноженням носіїв заряду під впливом сильного електричного поля. Проходячи крізь $p-n$ перехід при зворотній напрузі, носії заряду на довжині вільного пробігу в сильному електричному полі набувають енергії, достатньої для утворення нових електронно-діркових пар за рахунок ударної іонізації атомів напівпровідника.

Тунельним пробоем $p-n$ переходу називають електричний пробій, причиною якого є квантово-механічний ефект тунелювання носіїв заряду крізь заборонену зону напівпровідника без зміни їхньої енергії. Умови для тунелювання носіїв заряду в $p-n$ переходах настають при перевищенні ЕМІ критичної напруженості електричного поля, яка, наприклад, для кремнієвих переходів дорівнює 800 кВ/см, а для германієвих – 300 кВ/см [12].

Тепловий (вторинний) пробій відбувається з утворенням каналу високої провідності – так званого «шнура». Температура в «шнурі» значно перевищує середню температуру основної частини $p-n$ переходу. У свою чергу, поява «шнура» обумовлена завжди наявними дефектами переходу або флуктуацією густини зворотного струму на площі переходу.

Тепловий пробій у режимі коротких височастотних імпульсів пов'язаний із потраплянням робочої точ-

ки в область електричного пробоя (на зворотній гілці вольт-амперної характеристики), різким збільшенням струму через прилад, значним тепловиділенням в області p - n переходу й наступним тепловим ушкодженням структури. Найчастіше спостерігається плавлення локальних ділянок емітера вхідних транзисторів і p - n переходів захисних діодів.

Електричні (польові) пробой пов'язані, як правило, з тимчасовими (відновлюваними) відмовами, а теплові (вторинні) пробой – з катастрофічними невідновлюваними відмовами. Можливі також так звані параметричні відмови, прикладом яких є погіршення вольт-амперних характеристик діодів після опромінення їх потужним ЕМІ.

Фізика ушкодження металізації не така складна, як для напівпровідників. Температурний коефіцієнт провідності позитивний, тому струмова нестабільність відсутня. Металізація в більшості випадків теплоізолювана шаром окису, що утруднює процеси тепловідведення й сприяє швидшому плавленню провідників.

Через неоднорідності струмової лінії (вони часто спостерігаються в кутах повороту, вигину, в області контактних майданчиків тощо) критичні значення густини струму початку плавлення виявляються майже на порядок меншими, тому прогорання часто відбувається саме в цих місцях.

У мікросхемах, виготовлених за технологією КМОН (комплементарна структура метал-окис-напівпровідник), ще однією причиною ушкодження може бути пробій тонкої окисної плівки під затвором [13]. Характерне поле пробоя плівки окису кремнію становить 5 МВ/см, що при типовій товщині плівки 0,05–0,1 мкм дає напругу пробоя 25–50 В.

Відзначимо, що характер процесів і механізмів ушкодження інтегральних мікросхем істотно залежить як від параметрів мікросхем (розмірів активних елементів, чипа, корпусу ІМС, довжини її виводів, їхнього взаємного розташування, орієнтації щодо вектора напруженості електричного поля), так і від амплітудно-часових характеристик випромінювання (інтенсивності випромінювання, його частоти, тривалості й частоти повторення імпульсів, часу опромінення). Це є однією із причин істотного розкиду в результатах, що наводять різні автори.

Ушкодження мікросхем при опроміненні НВЧ полем може відбуватися в результаті комбінації ушкоджень p - n переходів і металізації. Як правило, з ладу виходять вхідні й вихідні елементи. У результаті аналізу зразків ІМС, підданих впливу НВЧ випромінювання, встановлено [4], що 90 % біполярних і 63 % КМОН ІМС виходять із ладу через ушкодження металізації. Плавлення найчастіше спостерігаються в області контактних майданчиків і поворотів струмопровідних ліній. В області плавлення, як правило, є підвищена концентрація джерел тепловиділення. Ушкодження металізації проявляються в місцях найбільшої механічної напруги в структурі: на сходах окисла й навколо контактних майданчиків.

У мікросхемах транзисторно-транзисторної логіки (ТТЛ), побудованих на основі біполярних транзисторів з кількома емітерами, спостерігаються ушкодження захисних діодів, тому що вони мають мінімальні розміри.

Інші ушкодження біполярних ІМС обумовлені дефектами металізації й ізоляції між шарами. Ушкодження ТТЛ ІМС, виконаних за сучасною технологією, спричинені руйнуванням тонкоплівкових резисторів у колекторних колах вихідних транзисторів і пробоем переходів емітер-база фазоінверсних каскадів [4].

Критеріальні рівні ураження ІМС пачками імпульсів менші, ніж у разі впливу поодиноким імпульсів, і залежать від частоти повторення імпульсів. Зі збільшенням частоти повторення НВЧ імпульсів рівень інтенсивності поля, необхідний для ушкодження мікросхем, зменшується. Це обумовлено як збільшенням кількості дефектів у результаті дії деградаційних процесів, так і накопиченням тепла, якщо пауза між імпульсами стає меншою теплової сталої контакту, що випрямляє.

Слід зазначити, що в усіх експериментах [4, 6, 8], навіть на ідентичних мікросхемах вихід з ладу реєструвався за різних параметрів НВЧ випромінювання (відрізнялися інтенсивність або час виходу з ладу). Це пов'язано, зокрема, з відмінністю в таких слабо контрольованих параметрах ІМС, як кількість і розподіл дефектів усередині p - n переходів та в інших елементах мікросхем.

Рівні поглинутої енергії та потужності, за яких уражаються напівпровідникові прилади

Як бачимо, фізичні механізми функціонального ураження сучасної елементної бази потужним імпульсним електромагнітним полем радіочастотного діапазону досить різноманітні, наслідком чого є велике розмаїття порушень нормальної роботи РЕЗ ОБТ. Найбільш чутливими до впливу потужного ЕМІ є напівпровідникові прилади, насамперед, сучасні аналогові та цифрові інтегральні мікросхеми високого ступеню інтеграції. Саме вони є тими критичними елементами РЕЗ, які під впливом поглинутої енергії електромагнітного випромінювання, створеного зразком зброї ЕМІ, ушкоджуються першими, спричиняючи тим самим функціональне ураження всього радіотехнічного пристрою.

Слід підкреслити, що точні значення рівнів енергії та (або) потужності зовнішнього ЕМІ, поглинутої критичними напівпровідниковими компонентами РЕЗ, за яких відбувається їхнє функціональне ураження, залежать від безлічі різноманітних факторів. Основні групи цих факторів: конструктивні особливості компонента (тип напівпровідника, технологія створення приладу, вид корпусу, виводів тощо); зовнішні умови застосування (температура, тиск, напруга живлення, схемотехнічні особливості підключення); часові та частотні параметри ЕМІ; і, зрештою, тип і рівень ушкоджень компонента при його функціональному ураженні під впливом потужного ЕМІ.

Саме тому точні значення уражальних рівнів енергії та потужності для напівпровідникових приладів можуть значно варіюватися і є, певною мірою, випадковими величинами. Тим не менше, цілком можливо встановити приблизні межі інтервалу значень поглинутої енергії та потужності, в якому відбувається функціональне ураження (необоротне ушкодження) більшості сучасних напівпровідникових приладів.

Як відомо [1, 14], найбільш сильний вплив (при найменшій енергії або потужності ураження) зброя ЕМІ здійснює при проникненні радіочастотного випроміню-

вання через антену РЕЗ. При цьому найуразливішими до впливу ЕМІ є чутливі напівпровідникові прилади приймальних радіотехнічних систем, наприклад, змішувачі та детектори НВЧ імпульсів радіолокаційних станцій. Для пошкодження цих компонентів необхідна найменша енергія, якщо тривалість імпульсів τ не перевищує 10 нс [12].

У цьому випадку на ураження елемента РЕЗ витрачається вся енергія імпульсу через те, що процес нагріву можна вважати квазіадіабатичним, тобто таким, що проходить практично без теплообміну з навколишнім середовищем. Установлено [12], що при тривалості електромагнітного імпульсу $\tau \leq 10$ нс напівпровідникові прилади діапазону 1–10 ГГц пошкоджуються при поглинанні енергії імпульсу, більшої за рівень 0,1–1,0 мкДж. Для ураження більш високочастотних приладів достатньо поглинання енергії 0,01–0,1 мкДж. Отже, ступінь ураження елементів РЕЗ короткими імпульсами ($\tau \leq 10$ нс), коли процеси нагріву адіабатичні, визначається не потужністю, а енергією імпульсів.

При застосуванні довгих імпульсів ($\tau > 10$ нс) для функціонального ураження напівпровідникового приладу необхідна більша енергія (оскільки енергія електромагнітного імпульсу витрачається не тільки на нагрів напівпровіднику, але також і на теплообмін). У разі встановлення стану термодинамічної рівноваги збільшення енергії імпульсу може нічого не дати, тому що весь приріст енергії витрачатиметься на компенсацію теплових втрат на теплообмін з навколишнім середовищем.

Критичним для ураження в такій ситуації може стати тільки зростання швидкості надходження енергії ураження, тобто збільшення потужності імпульсів. Таким чином, ступінь ураження елементів РЕЗ довгими імпульсами ($\tau > 10$ нс), на відміну від випадку застосування коротких імпульсів, визначається не енергією, а потужністю імпульсів.

Під впливом поодиноких імпульсів тривалістю $\tau > 10$ нс напівпровідникові прилади діапазону 1–10 ГГц уражаються в разі поглинання ними імпульсної потужності понад 5–10 Вт. Для ураження більш високочастотних приладів достатньо потужності 0,5–1,0 Вт [12]. Потужність ураження пачкою імпульсів звичайно на 15–20 % менша.

ВИСНОВКИ

1. Результат впливу ЕМІ на конкретний зразок РЕЗ визначається стійкістю застосованих у ньому радіоелектронних компонентів до впливу потужного імпульсного радіочастотного випромінювання.

2. Потужний електромагнітний імпульс здійснює вплив на компоненти РЕЗ завдяки уражальним факторам, що мають такий характер: електричний; електронний; електромеханічний; термофізичний; хімічний.

3. Найбільш уразливими структурними елементами сучасного ОБТ до впливу зброї ЕМІ є:

- підсилювачі високої частоти та змішувачі приймачів радіолокаційних станцій;
- системи управління та навігації безпілотних літальних апаратів;
- системи наведення й підриву ракет і боєприпасів;

- приймачі радіо-, радіорелейних, тропосферних та супутникових засобів зв'язку;
- комп'ютери та мережеве обладнання автоматизованих систем управління військами та зброєю.

4. Найбільш чутливими до впливу потужного ЕМІ є напівпровідникові прилади, насамперед, сучасні аналогові та цифрові інтегральні мікросхеми високого ступеню інтеграції. Саме вони є тими критичними елементами РЕЗ, які під впливом поглинутої енергії електромагнітного випромінювання, створеного зразком зброї ЕМІ, ушкоджуються першими, спричиняючи тим самим функціональне ураження всього радіотехнічного пристрою.

5. Значення рівнів енергії та (або) потужності зовнішнього ЕМІ, поглинутої критичними напівпровідниковими компонентами РЕЗ, за яких відбувається їхнє функціональне ураження, залежать від безлічі різноманітних факторів. Основні групи цих факторів: конструктивні особливості компонента (тип напівпровідника, технологія створення приладу, вид корпусу, виводів тощо); зовнішні умови застосування (температура, тиск, напруга живлення, схемотехнічні особливості підключення); часові та частотні параметри ЕМІ; і, зрештою, тип і рівень ушкоджень компонента при його функціональному ураженні під впливом потужного ЕМІ.

6. Під впливом поодиноких імпульсів тривалістю $\tau > 10$ нс напівпровідникові прилади діапазону 1–10 ГГц уражаються в разі поглинання ними імпульсної потужності понад 5–10 Вт. Для ураження більш високочастотних приладів достатньо потужності 0,5–1,0 Вт.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Ковтуненко О.П., Богучарський В.В., Слюсар В.І., Федоров П.М. Зброя на нетрадиційних принципах дії (стан, тенденції, принцип дії та захист від неї). Полтава: ПВІЗ. 2006. 247 с.
2. Магда И.И. Разработка мощных импульсных СВЧ генераторов на базе сильноточных релятивистских ускорителей электронов. СВЧ-техника и спутниковая связь: матер. конф. Севастополь. 1993.
3. Диденко А.П., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности. М.: Энергоатомиздат. 1984. 112 с.
4. Пирогов Ю.А., Солодов А.В. Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения. Ж-л радиоэлектроники. 2013. № 6. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.jre.cplire.ru/jre/jun13/text.pdf>.
5. Бригинин А.М., Титович Н.А., Кириллов В.М. Влияние электромагнитных помех на работоспособность полупроводниковых приборов и интегральных схем. Электронная техника. Сер. Упр. качеством, стандартизация, метрология, испытания. 1992. Вып. 1(148). С. 3–12.
6. Антипин В.В., Годовицын В.А., Громов Д.В., Кожевников А.О., Раваев А.А. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы. Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 1. С. 37–52.
7. Баранов И.А., Обрезан О.И., Ропий А.М. Стойкость твердотельных модулей СВЧ к кратковременным

- электроперегрузкам. Обзоры по электронной технике. Сер. 1. СВЧ-техника. 1997. 111 с.
8. Ключник А.В., Пирогов Ю.А., Солодов А.В. Обратимые отказы интегральных микросхем в полях радиоизлучения. Ж-л Радиоэлектроники. 2013. № 1. С. 1–24.
 9. Конакова Р.В., Кордош П., Тхорик Ю.А. Прогнозирование надежности полупроводниковых лавинных диодов. Киев: Наукова думка. 1986. 168 с.
 10. Sasagawa, K., Kazushi, N., Masumi, S. & Hiroyuki, A. (1999). A method to predict electromigration failure of metal lines. J. Appl. Phys. Vol. 86. № 11. Pp. 6043–6051.
 11. Абдуллаев Г.В., Джафаров Т.Д. Атомная диффузия в полупроводниковых структурах. М.: Атомиздат. 1980. 280 с.
 12. Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарев В.Г., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем. М.: Вузовская книга. 2007. 463 с.
 13. Синоров В.Ф., Пивоваров Р.П., Петров Б.К., Долматов Т.В. Физические основы надежности интегральных схем; под ред. Ю.Г. Миллер. М.: Сов. Радио. 1976. 320 с.
 14. Кравченко В.И. Электромагнитное оружие. Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ». 2008. 185 с.

REFERENCES

1. Kovtunenکو, O.P., Bohucharskyi, V.V., Sliusar, V.I. & Fedorov, P.M. (2006). “Zbroia na netradytsiinykh pryntsyakh dii (stan, tendentsii, pryntsyakh dii ta zakhyst vid nei)” [Weapon on nontraditional principles of action (state, trends, principles of the action and protection from it)]. Poltava: PVIZ. 248 p.
2. Magda, Y.Y. (1993) “Razrabotka moshchnykh impulsnykh SVCH generatorov na baze synotochnykh relativistskikh uskoritelei elektronov// SVCH-tekhnika i sputnikovaia sviaz: Materialy konferentsii” [Development of powerful pulsed microwave generators on the base of high-current relativistic electrons accelerators]. Sevastopol.
3. Didenko, A.P. & Iushkov, Iu. G. (1984). “Moshchnye SVCH-impul'sy nanosekundnoi dlitel'nosti” [Powerful microwave pulses of nanosecond duration], Energoatomizdat. M. 112 p.
4. Pirogov, A.P. & Solodov, A.V. (2013) “Povrezhdeniia integralnykh mikroskhem v poliakh radioizlucheniia” [Damages of the integrated circuits in the fields of radio waves radiation], Zh-l radioelektroniki. № 6. Available at: <http://www.jre.cplire.ru/jre/jun13/text.pdf>.
5. Brigidin, A.M., Titovich, N.A. & Kirillov, V.M. (1992) “Vliianie elektromagnitnykh pomekh na rabotosposobnost poluprovodnikovyykh priborov i integralnykh skhem” [Effects of electromagnetic interferences on operability of semiconductor devices and integrated circuits], Elektronnaia tekhnika. Vyp. 1(148). Pp. 3–12.
6. Antipin, V.V., Godovitsyn, V.A., Gromov, D.V., Kozhevnikov, A.O. & Ravaev, A.A. (1995). “Vliianie moshnykh impulsnykh mikrovolnovykh pomekh na poluprovodnikovye pribory i integralnye mikroskhemy” [Effects of powerful pulsed microwave interferences on semiconductor devices and integrated circuits], Zarubezhnaia radioelektronika. № 1. Pp. 37–52.
7. Baranov, I.A., Obrezan, O.I. & Ropii, A.M. (1997). “Stoikost tverdotelnykh modulei SVCH k kratkovremennym elektroperegruzkam” [Firmness of solid-state microwave modules to overloads of short duration], Obzory po elektronnoi tekhnike. 111 p.
8. Kliuchnik, A.V., Pirogov, Iu.A. & Solodov, A.V. (2013). “Obratimye otkazy integralnykh mikroskhem v poliakh radioizlucheniia” [Reversible failures of integrated circuits in the fields of radio waves radiation], Radioelektronika. № 1. Pp. 1–24.
9. Konakova, R.V., Kordosh, P. & Tkhorik, Iu.A. (1986). “Prognozirovanie nadezhnosti poluprovodnikovyykh lavinykh diodov” [Reliability forecastings of semiconductor avalanche diodes], Naukova dumka. K. 168 p.
10. Sasagawa, K., Kazushi, N., Masumi, S. & Hiroyuki, A. (1999). A method to predict electromigration failure of metal lines. J. Appl. Phys. Vol. 86. № 11. Pp. 6043–6051.
11. Abdullaev, G.V. & Dzharov, T.D. (1980). “Atomnaia diffuziia v poluprovodnikovyykh strukturakh” [Atomic diffusion in semiconductor structures], Atomizdat. M. 280 p.
12. Dobykin, V.D., Kupriianov, A.I., Ponomarev, V.G. & Shustov, L.N. (2007). “Radioelektronnaia borba. Silovoe porazhenie radioelektronnykh sistem” [Electromagnetic warfare. Electromagnetic attack on radioelectronic systems], Vyzovskaia kniga. M. 463 p.
13. Sinorov, V.F., Pivovarov, R.P., Petrov, B.K. & Dolmatov, T.V. (1976). “Fizicheskie osnovy nadezhnosti integralnykh skhem” [Basic physics to reliability of integrated circuits]; ed. by Miller, Iu. M.: Sov. Radio. 320 p.
14. Kravchenko, V.I. (2008) “Elektromagnitnoe oruzhie” [Electromagnetic weapons], Kharkiv: NTU KHPI. 185 p.

Fedorov P., Bohucharskyi V., Hamalii N.

SPECIAL FEATURES OF PHYSICAL PROCESSES OF POWERFUL PULSED ELECTROMAGNETIC RADIATION ABSORPTION IN ELECTRONIC COMPONENTS

The main rules of powerful pulsed electromagnetic radiation influence on electronic components are considered. The main mechanisms of electronic components damage by powerful electromagnetic pulse are established. The main attention is concentrated on investigation of influence processes of powerful pulsed electromagnetic radiation on the most vulnerable to such influence semiconductor components – on integrated circuits. It is the most critical elements of electronics. Being influenced by absorbed electromagnetic energy created by high-power microwave weapon, they are previously damaged thus causing functional damage of entire electronic installation.

The approximate borders of the interval of absorbed energy and power values in which functional damage of a majority of modern semiconductor components occurs are established. The levels of absorbed energy or power of external high-power microwave causing the functional damage of semiconductor components depends on various factors. The main groups of these factors are component's structural peculiarities (type of semiconductor, used technology, type of chips etc); environmental conditions (temperature, pressure); power supply voltage and

circuitry pівнів енергії; time and frequency parameters of electromagnetic pulse.

It is found out that semiconductor components of microwave band 1–10 GGz are damaged by single electromagnetic pulses of more than 10 ns duration if the absorbed power exceeds the 5–10 W level.

Absorbed power level 0.5–1.0 W is sufficient for functional damage of components working in the higher frequency bands.

Keywords: electromagnetic pulse, electronic components, functional damage, integrated circuits.

Відомості про авторів:

Федоров Павло Миколайович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу розвитку озброєння та військової техніки на нетрадиційних принципах дії науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки Спеціальних військ Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1359-2757>
e-mail: pamyf@i.ua

Богучарський Вячеслав Вікторович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
начальник науково-дослідного відділу розвитку озброєння та військової техніки на нетрадиційних принципах дії науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки Спеціальних військ Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5514-1642>
e-mail: bogww@ukr.net

Гамалій Наталія Вікторівна

старший науковий співробітник науково-дослідного відділу розвитку озброєння та військової техніки на нетрадиційних принципах дії науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки Спеціальних військ Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1505-854X>
e-mail: 1974gamalii@ukr.net

Information about the authors:

Pavlo Fedorov

Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Leading Researcher, Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1359-2757>
e-mail: pamyf@i.ua

Viacheslav Bohucharskyi

Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Head of research department, Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5514-1642>
e-mail: bogww@ukr.net

Natalia Hamalii

Senior Researcher, Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1505-854X>
e-mail: 1974gamalii@ukr.net

Стаття надійшла до редколегії 11.07.2023.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

Шановні читачі!!!

Доводимо до Вашого відома, що в нашому видавництві відбулися суттєві зміни щодо оформлення та подання статей до нашого видання. По-перше, відкрито сайт журналу, на якому більш детально викладені вимоги до наших публікацій. Ознайомитися можна за посиланням

[https:// journal.cndiovt.com.ua](https://journal.cndiovt.com.ua)

По-друге, звертайтеся до редакції журналу за телефоном:
+38 (044) 520-12-84, +38 (044) 271-13-66, +38 (067) 110-74-43

Глазкова Світлана Валентинівна

E-mail: cndi_ovt@ukr.net.

Надруковано в ТОВ «Видавничий дім “Бук-Друк”»
Україна, м. Житомир, вул. Мала Бердичівська, 17А
Тел.: +38063 101 22 33
Свідоцтво серія ДК №7412 від 27.07.2021 р.