

Вплив електромагнітного випромінювання на працездатність напівпровідникових приладів

С.Г. Буряковський¹, В.С. Бреславець², Ю.В. Бреславець²,
І.В. Яковенко², А.А. Тищенко², О.М. Васильєва³

¹ Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут "Молнія" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", вул. Шевченка, 47, 61013, Харків, Україна
sergbyr@i.ua

² Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна
bres123@ukr.net; julietta941@gmail.com; yakovenko60iv@ukr.net

³ Національний науковий центр "Інститут метрології", вул. Мироносицька, 42, 61002, Харків, Україна
koropets@ukr.net

Анотація

Наявність сильних електромагнітних полів суттєво впливає на працездатність систем керування та зв'язку, особливо в умовах наявності неоднорідностей у захисних екранах, коли поля проникають усередину радіоелектронного виробу. Наразі надзвичайно актуальним є експериментальне підтвердження можливості штатної роботи комутаційних пристроїв високого рівня струму під впливом високих рівнів електромагнітних полів. Використання Вихідного еталона України імпульсних електричних та магнітних полів (далі – еталон РЕМП), розробленого і створеного у Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті "Молнія" НТУ "ХПІ" (НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ"), дозволяє не тільки відтворити можливі діючі електромагнітні поля, що впливають на апаратуру, але й надати практичні рекомендації режимів найбільш надійної роботи комутаційної апаратури на напівпровідниковій елементній базі.

Розроблено й апробовано фізичну модель механізмів зворотних відмов напівпровідникових діодів (виникнення S-подібної ділянки вольт-амперної характеристики під дією електромагнітного випромінювання).

Порівняльний аналіз результатів експериментів та розрахункових даних дозволяє використовувати запропоновану фізичну модель зворотних відмов та розрахункові співвідношення для визначення кількісних характеристик зворотних відмов і критеріїв їх виникнення. Проведені експериментальні дослідження впливу імпульсного електромагнітного випромінювання на вольт-амперні характеристики ділянок прямого струму діодів. Результати показали наявність ділянок режиму генерації власних коливань цих приладів під впливом дії електромагнітного поля.

Ключові слова: електромагнітне випромінювання; напівпровідникові структури; поверхневі коливання; заряджені частинки; декремент коливань.

Отримано: 27.08.2025

Відредаговано: 18.09.2025

Схвалено до друку: 22.09.2025

Вступ

Наявність потужних електромагнітних полів суттєво позначається на функціонуванні систем керування та зв'язку. Особливо відчутним цей вплив стає за наявності неоднорідностей у захисних екранах, крізь які електромагнітні поля проникають усередину радіоелектронного обладнання, спричиняючи появу додаткових струмів і напруг та змінюючи його робочі характеристики. Усі відмови радіоелектронної апаратури, що виникають у результаті впливу сторонніх чинників, прийнято поділяти на зворотні та незворотні [1–3]. Незворотні відмови характеризуються повною втратою працездатності виробу під впливом зовнішнього

електромагнітного випромінювання (ЕМВ) та зазвичай виникають унаслідок теплового пробою компонентів. Для зворотних відмов характерна тимчасова втрата працездатності, що призводить до спотворення вихідних характеристик.

Більшість результатів теоретичних і експериментальних досліджень впливу ЕМВ на напівпровідникову елементну базу систем керування та зв'язку стосуються сфери незворотних відмов [2]. Водночас питання впливу на робочі характеристики приладів та процеси взаємодії наведених ЕМВ струмів із власними електромагнітними коливаннями напівпровідникових компонентів приладів залишаються відкритими. Однак взаємодії такого

типу визначають ступінь відхилення вихідних вольт-амперних характеристик (ВАХ) від норми та можливість відновлення їх нормального функціонування, тобто критерії зворотних відмов.

Розроблено й апробовано фізичну модель механізмів зворотних відмов напівпровідникових діодів. Запропонована модель базується на процесах перетворення енергії, наведеної зовнішнім електромагнітним випромінюванням струмів, в енергію власних електромагнітних коливань напівпровідникових компонентів приладів (ефект Вавілова-Черенкова) [2]. Проведено експериментальні дослідження впливу імпульсного ЕМВ на ВАХ ділянок прямого струму діодів. Порівняльний аналіз результатів експериментів, отриманих у цій роботі, та розрахункових даних дозволяє використовувати запропоновану фізичну модель зворотних відмов і отримані на її основі розрахункові співвідношення для визначення кількісних характеристик зворотних відмов і критеріїв їх виникнення.

Основні результати

Постановка задачі. У роботі [3] запропоновано модель перетворення енергії струмів, наведених зовнішнім ЕМВ, в енергію власних електромагнітних коливань напівпровідникових структур радіоелектронних виробів, що й призводить до виникнення їхніх зворотних відмов (тимчасових змін робочих характеристик).

Можливість такого перетворення енергії визначається ефектом випромінювання Вавілова-Черенкова. Цей ефект реалізується у випадку, коли наведений струм (напрямок вектора напруженості електричного поля зовнішнього ЕМВ) спрямований уздовж меж напівпровідникового приладу і полягає в наступному [4]. Під час руху заряджених частинок у матеріальному середовищі їхня дрейфова швидкість може збігатися з фазовою швидкістю поверхневої хвилі. Такий резонанс забезпечує можливість перетворення енергії потоку частинок в енергію коливань середовища.

Під час проходження потоку частинок, наведених ЕМВ, через напівпровідникову структуру відбувається безперервний процес перетворення енергії зарядів в енергію власних коливань поля, тобто в структурі встановлюється режим генерації коливань. Режим генерації коливань у напівпровідникових приладах зазвичай проявляється на ділянці їх ВАХ, яка має від'ємний диференціальний опір (ВДО), що відповідає ділянці А-В на рис. 1 (зростання струму від $I(B)$ до $I(A)$ супроводжується падінням напруги від $U(B)$ до $U(A)$ – S-подібна ділянка вольт-амперної характеристики приладу).

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} < 0. \quad (1)$$

У цьому випадку наведений струм (електронний потік, наведений ЕМВ у напівпровідниковому

приладі) втрачає частину своєї енергії ($W_{\text{ел}} < 0$); при цьому зростання струму ΔI супроводжується падінням напруги ΔU . Режим генерації характеризується експоненціальним зростанням амплітуди власних коливань структури ($E \approx \exp(+\gamma t)$, де γ – інкремент нестійкості).

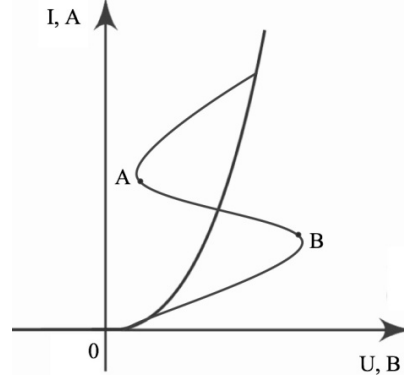


Рис. 1. ВАХ діода (прямий струм): А-В – спотворення ВАХ за умов впливу ЕМВ

Результати досліджень пучкових нестабільностей (визначення величини γ), отримані в роботі [4], дозволяють оцінити величину енергії випромінювання власних коливань та отримати розрахункові співвідношення між параметрами впливового імпульсного поля, параметрами напівпровідникового приладу і ступенем відхилення їх ВАХ на ділянці прямого струму.

Потужність випромінювання $\Delta P_{\text{вип}}$ власних коливань напівпровідникового приладу в умовах впливу зовнішнього поля можна визначити як втрати енергії поступального руху потоку частинок за час проходження потоком частинок області локалізації поля поверхневої хвилі.

$$\Delta P_{\text{вип}} = \frac{\Delta W_{\text{кін}}}{\Delta t}, \quad (2)$$

де $\Delta W_{\text{кін}} = \frac{mv^2}{2}(n_{\text{об}}V)$; $\frac{mv^2}{2}$ – кінетична енергія

частки пучка, наведеного зовнішнім імпульсом; $n_{\text{об}}$, v , m – концентрація, дрейфова швидкість та маса електронів пучка, відповідно; V – об'єм, зайнятий наведеним струмом (об'єм твердотільної структури).

У режимі пучкової нестійкості дрейфова швидкість $v \approx v_0 \exp(+\gamma t)$, тому:

$$\Delta P_{\text{вип}} = mv_0^2 \gamma t (n_{\text{об}}V), \quad (3)$$

де $\gamma \approx \left(\frac{\omega_b^2}{\omega_1^2} \right) \frac{1}{\tau}$ – інкремент пучкової нестійкості

поверхневих коливань структури з власною частотою ω_1 , що входить до складу напівпровідникового приладу (поверхневих поляритонів) [4];

$\omega_b \approx \left(\frac{4\pi e^2 n_{\text{об}}}{m} \right)^{1/2}$ – плазмова частота електронів

потоку, наведеного зовнішнім ЕМВ; e – заряд

електронів пучка; τ — час прольоту заряду області локалізації коливаль.

Таким чином, енергія випромінювання $\Delta W_{\text{вип}}$ за час впливу імпульсу напруги $\Delta t_{\text{імп}}$ зовнішнього ЕМВ визначається розрахунковим співвідношенням:

$$\Delta W_{\text{вип}} = \Delta P_{\text{вип}} \Delta t_{\text{імп}} = m v_0^2 \left(\frac{\omega_b^2}{\omega_1^2} \right) \frac{1}{\tau} (n_{ob} V) \Delta t_{\text{імп}}. \quad (4)$$

Параметри, що визначають величину $\Delta W_{\text{вип}}$, можна оцінити, використовуючи наявні експериментальні залежності величини наведених струмів у досліджуваних структурах [5–8], (тобто величин n_b , v_0 та ω_b) від параметрів зовнішнього імпульсного електричного поля (амплітуди E_0 та тривалості $\Delta t_{\text{імп}}$). Власні частоти ω_1 визначаються параметрами структури, що входить до складу досліджуваного напівпровідникового приладу (концентрацією носіїв струму, діелектричною проникністю та розмірами). Для високочастотних та імпульсних напівпровідникових діодів, що досліджуються в цій роботі, частоти ω_1 лежать у субміліметровому діапазоні.

Скориставшись співвідношенням (4), можна оцінити втрати енергії струмів, наведених зовнішнім ЕМВ, на збудження власних коливаль структур типу метал-напівпровідник-діелектрик, що входять до складу напівпровідникових діодів.

Наявність області з від’ємним опором на ВАХ характеризує можливість виникнення одного з типів зворотних відмов (тимчасової зміни ВАХ) як наслідок трансформації енергії наведеного струму в енергію коливаль, що випромінюється в навколишній простір.

Таким чином, у процесі експерименту втрати енергії наведеного струму за час дії імпульсу напруги $\Delta t_{\text{імп}}$ можна оцінити за таким співвідношенням:

$$\Delta W_{\text{вип}} = \Delta P_{\text{вип}} \Delta t_{\text{імп}} = I_{\text{вип}} U_{\text{вип}} \Delta t_{\text{імп}}, \quad (5)$$

де $I_{\text{вип}}$ — величина прямого струму діода на ділянці ВАХ (А-В на рис. 1); $U_{\text{вип}}$ — напруга на ділянці

ВАХ (А-В на рис. 1) в умовах дії зовнішнього ЕМВ.

Мета роботи:

1. Експериментальна оцінка ступеня спотворення вольт-амперних характеристик напівпровідникових діодів в умовах дії стороннього ЕМВ та визначення величини втрат енергії наведеного струму $\Delta W_{\text{вип}}$ (формула (5)).

2. Визначення розрахункових значень втрат енергії наведеного струму $\Delta W_{\text{вип}}$ (формула (4)), отриманих на основі фізичної моделі.

3. Проведення порівняльного аналізу розрахункових даних, отриманих на основі фізичної моделі (формула (4)), та даних, отриманих під час експерименту (формула (5)).

Об’єктом дослідження є ВАХ таких напівпровідникових приладів за умов впливу імпульсного електромагнітного випромінювання: кремнієвий діод, планарний з бар’єром Шотткі 2Д922В, кремнієвий епітаксціальний діод КД409А. Ці прилади використовуються у швидкодіючих імпульсних пристроях для перетворення змінної напруги (табл. 1).

Схема та результати експерименту

Експериментальні дослідження процесів впливу імпульсного електромагнітного поля на працездатність напівпровідникових приладів проводились за допомогою Вихідного еталона України імпульсних електричних та магнітних полів (далі — еталон РЕМП), розробленого і створеного у НДПКІ “Молнія” НТУ “ХПІ” [4].

Установка складається з високовольтного імпульсного джерела живлення (ВІДЖ), що розряджається на полеутворюючу систему (ПС) у вигляді симетричної замкненої полоскової лінії (ПЛ) (рис. 2).

Джерело ВІЖ генерує одноразові імпульси високої напруги, часові параметри яких наведені в табл. 2, а амплітуди цих імпульсів мають забезпечувати створення необхідних рівнів E та H полів з урахуванням перетворення ПС.

Таблиця 1

Електричні параметри діодів

Характеристики			2Д922В	КД409А
Електричні параметри	Постійний зворотний струм, мкА	$T_1=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,5 ($U_{\text{зв}}=10\text{ В}$)	те саме за $U_{\text{зв}}=24\text{ В}$
		$T_2=100\text{ }^{\circ}\text{C}$	10 ($U_{\text{зв}}=10\text{ В}$)	
	Загальна ємність, пФ		1,0 ($U_{\text{зв}}=0$)	2,0 ($U_{\text{зв}}=15\text{ В}$)
	Індуктивність, нГн		1,0	4,0
Граничні експлуатаційні дані	Постійна зворотна напруга, В		10	24
	Постійний прямий струм, мА	$T_1=35\text{ }^{\circ}\text{C}$	10	15
		$T_2=100\text{ }^{\circ}\text{C}$		25
	Імпульсний прямий струм, мА $t_{\text{імп}} \leq 10\text{ мкс}$, $Q \geq 10$	$T_1=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	20	500
		$T_2=100\text{ }^{\circ}\text{C}$		250
	Температура навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$		віл $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$	

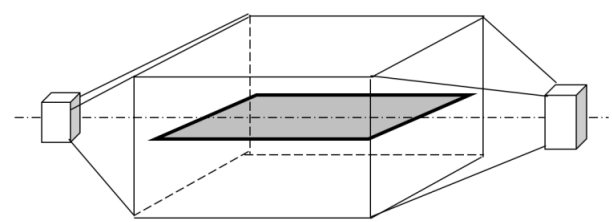


Рис. 2. Симетрична замкнена ПЛ

Таблиця 2
Вимоги до параметрів еталона РЕМП

Параметр	Величина
1. Напруженість електричного поля, кВ/м	від 10^{-3} до 200
2. Напруженість магнітного поля, А/м	від 0,1 до 530
3. Тривалість фронту імпульсу, нс, не більше	1
4. Тривалість імпульсу на рівні 0,5 мкс, не більше	100
5. Розміри робочого об'єму, мм, не менше: • в плані • по висоті	500×500 150

Основні вимоги до ПС – це створення E та H полів із рівномірною структурою, визначеними напрямками векторів полів та амплітудами, які легко розраховуються за геометричними розмірами ПС. Найповнішою мірою цим вимогам відповідають направляючі системи типу ПЛ.

Вздовж ПЛ поширюється плоска електромагнітна хвиля, яка в будь-якому поперечному перерізі ПЛ має однозначний напрям векторів E та H полів (рис. 3). Габарити ПЛ визначають габарити робочого об'єму, в якому розміщувався випробуваний об'єкт. При цьому габарити ПЛ підібрані таким чином, щоб хвильовий опір ПЛ становив 50 Ом.

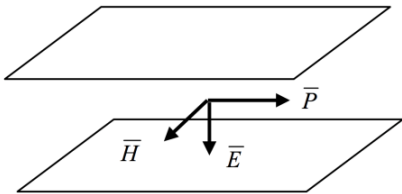


Рис. 3. Напрям векторів електромагнітного поля в ПЛ

Під час проведення експериментальних досліджень впливу ЕМВ на робочі характеристики напівпровідникових діодів використовувалась плоскова лінія ПЛ-24 висотою 24 см, що працює з наносекундними імпульсами, оскільки досліджувані в роботі механізми впливу зовнішнього електромагнітного поля реалізуються саме в цьому часовому діапазоні.

Під час проведення експериментальних досліджень один із зазначених діодів послідовно з'єднувався з джерелом постійного струму та резисторами, один з яких (R_1) дозволяв змінювати силу струму діода (I), а інший ($R_2 = 50$ Ом) – забезпечував режим узгодження з кабелем, що веде до осцилографа (рис. 4).

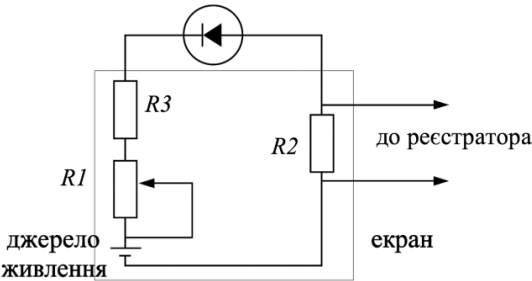


Рис. 4. Схема експерименту

Схема, за винятком діода, розміщувалася в екранованому об'ємі та виводилася за межі ПС. Сам об'єкт впливу імпульсного електромагнітного поля (діод) розташовувався між пластинами плоскової лінії (рис. 5).

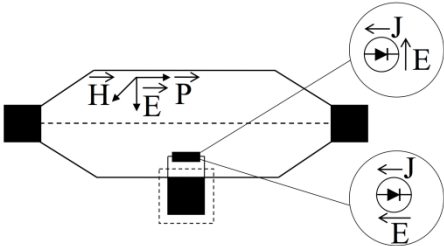


Рис. 5. Варіанти розташування об'єкта випробувань у системі полеутворення

Під час експерименту було досліджено вплив імпульсного електромагнітного поля на ВАХ діода, коли вектор напруженості зовнішнього електричного поля направлений паралельно постійному струму діода (цей випадок відповідає механізму випромінювання Вавілова-Черенкова) (рис. 6).

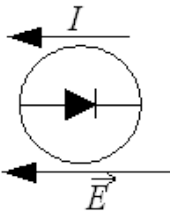


Рис. 6. Розташування векторів прямого струму діода та зовнішнього поля в умовах черенківського випромінювання

Постійний прямий струм діода (I) збільшувався від 5 до 30 мА.

Часові параметри імпульсу напруженості, що створюється в системі ПЛ:

- тривалість фронту – 0,5 нс;
- тривалість імпульсу напруженості ($\Delta t_{\text{имп}}$) – 500 нс.

Під час експерименту було досліджено вплив імпульсного електромагнітного поля з амплітудами напруженості $E = 10$ кВ/м; 20 кВ/м; 30 кВ/м на величину результуючого імпульсу напруги (U) на випробовуваному об'єкті (діоді). Кожен крок збільшення струму діода з певним інтервалом $\Delta I = 5$ мА супроводжувався впливом імпульсу ЕМВ у системі полеутворення. Еволюція амплітуди імпульсу напруги (U) на діодах залежно від поетапної зміни прямого струму (I) за одночасного впливу зовнішнього ЕМВ реєструвалася осцилографом.

Таким чином, були отримані залежності амплітуди імпульсу напруги (U) від величини прямого струму діода (I) для кожного з указаних рівнів впливу ЕМВ ($E = 10$ кВ/м; 20 кВ/м; 30 кВ/м), а також визначено відповідну ділянку ВАХ.

Залежності амплітуд імпульсу напруги від прямого струму діодів наведені відповідно в табл. 3. Отримані дані показують, що зі зростанням струму спостерігається зменшення амплітуди імпульсу напруги, що відповідає ділянці ВАХ з від'ємним опором (ділянка А-В на рис. 1) – області генерації коливань.

Вибір зазначених типів діодів як об'єктів експериментальних досліджень зумовлений тим, що діапазон їхніх робочих характеристик (сила струму та напруга на ділянці прямого зміщення) при тривалості імпульсу напруженості електричного поля порядку кількох сотень наносекунд та амплітуді імпульсу на рівні 10–30 кВ/м визначає діапазон енергії випромінювання власних електромагнітних коливань напівпровідникових структур, з яких складаються ці прилади – 10^{-7} – 10^{-9} Дж. У цьому ж діапазоні знаходиться й енергія випромінювання, що визначається на основі запропонованої в цій роботі фізичної моделі зворотних відмов напівпровідникових приладів.

Аналіз експериментально отриманих ВАХ вказує на наявність ділянок з від'ємним диференціальним опором, аналогічних розрахунковій ділянці прямого струму фізичної моделі зворотних відмов напівпровідникового приладу (ділянка А-В на рис. 1), оскільки в умовах експерименту збільшення прямого струму супроводжувалося зменшенням сумарної напруги на діоді.

При цьому характер відхилення ВАХ, отриманої в ході експерименту, не залежав від амплітуди імпульсу напруги, що впливає. Цей режим зростання енергії випромінювання електромагнітних коливань напівпровідникових приладів за рахунок енергії наведених струмів, на нашу думку, визначається механізмами пучкових нестійкостей.

Порівняльний аналіз експериментальних та розрахункових даних

Наведемо порівняльний аналіз величин енергії випромінювання власних коливань напівпровідникових діодів 2Д922В та КД409А, отриманих експериментально, з кількісними оцінками величини енергії випромінювання, отриманими розрахунковим шляхом на основі фізичної моделі зворотних відмов напівпровідникових приладів, запропонованої в цій роботі.

У результаті експерименту було встановлено, що збільшення прямого струму діода 2Д922В у діапазоні $\Delta I \approx 5$ –30 мА (від $I(B)$ до $I(A)$, див. рис. 1; амплітуда імпульсу напруги знаходиться в межах $E_0 \approx 10$ –30 кВ/м) призводить до падіння амплітуди імпульсу напруги на діоді в межах $\Delta U \approx 1550$ –2800 мВ (від $U(B)$ до $U(A)$, див. рис. 1). Це свідчить про появу на вольт-амперній характеристиці діода ділянки з від'ємним опором (ділянка А-В на рис. 1).

Таблиця 3

Еволюція амплітуди імпульсу напруги U (мВ) кремнієвого епітаксіального діода КД409А та кремнієвого планарного діода з бар'єром Шотткі 2Д922В залежно від прямого струму діода I (мА)

КД409А Прямий струм діода I (мА)	Амплітуда імпульсу напруги U (мВ)		
	$E = 10$ кВ/м	$E = 20$ кВ/м	$E = 30$ кВ/м
5	950	1450	1650
10	930	1430	1620
15	910	1400	1600
20	840	1390	1580
25	800	1350	1450
30	740	1290	1410
2Д922В Прямий струм діода I (мА)	Амплітуда імпульсу напруги U (мВ)		
	$E = 10$ кВ/м	$E = 20$ кВ/м	$E = 30$ кВ/м
5	1550	2950	3200
10	1520	2910	3150
15	1490	2870	3090
20	1450	2800	2950
25	1440	2760	2940
30	1410	2700	2820

При тривалості імпульсу $\Delta t_{\text{имп}} \approx 500$ нс діапазон енергії випромінювання, визначений за співвідношенням (5), становить $\Delta W_{\text{вип}} \approx 0,6 \times 10^{-9} - 1,2 \times 10^{-8}$ Дж.

Для діода КД409А, за аналогічних параметрів імпульсу та в тих самих діапазонах прямого струму, падіння амплітуди імпульсу напруги на діоді знаходиться в межах $\Delta U \approx 950 - 1400$ мВ, а енергія випромінювання становить $\Delta W_{\text{вип}} \approx 0,3 \times 10^{-9} - 0,8 \times 10^{-8}$ Дж.

Визначимо енергетичні втрати потоків заряджених частинок, наведені зовнішнім імпульсним випромінюванням на збудження власних коливань твердотільних структур, використовуючи запропоновану в роботі фізичну модель зворотних відмов (формула (4)).

Величини параметрів, що визначають величину $\Delta W_{\text{вип}}$, можна оцінити, використовуючи існуючі експериментальні залежності величини наведених струмів у кремнієвих структурах, які складають досліджувані об'єкти — діоди [7], від напруженості зовнішнього електричного поля E_0 (тобто величини концентрації електронів наведеного струму n_b , ленгмюрівської частоти електронів наведеного струму ω_b та дрейфової швидкості v_0).

При зміні параметрів імпульсу, аналогічних використаним в експерименті ($E_0 \approx 10 - 30$ кВ/м, $\Delta t_{\text{имп}} \approx 500$ нс), для досліджуваних діодів 2Д922В та КД409А вони знаходяться в діапазоні: $n_b \approx 10^{10} - 10^{12}$ см⁻³; $v_0 \approx 10^6 - 10^7$ см/с; $\omega_b \approx 10^9$ см⁻¹.

Власні частоти (поверхневі поляритони) структур ω_1 , що становлять діоди, визначаються величи-

ною ленгмюрівських коливань $\omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_b}{m}}$, тобто

концентрацією n_0 електронів напівпровідника, що входять до складу діодів — $\omega_1 \approx \omega_0 \approx 10^{10} - 10^{11}$ см⁻¹ [9, 10]. Величина $\Delta W_{\text{вип}}$ при цьому, згідно зі співвідношенням (4), становить $10^{-7} - 10^{-9}$ Дж.

Порівняльний аналіз експериментальних та розрахункових даних показує, що величина енергії перехідного випромінювання для досліджених напівпровідникових приладів (діодів) визначається одним порядком величини $\Delta W_{\text{вип}} \approx 10^{-7} - 10^{-9}$ Дж та має загальні тенденції зростання величини енергії випромінювання залежно від фізичних параметрів комплектуючих матеріалів і характеристик (збільшення амплітуди) імпульсу напруги.

Висновки

1. Запропоновано та обґрунтовано проведення експериментальних досліджень фізичної моделі, наведеної в роботі [5], яка описує механізм виникнення зворотних відмов у напівпровідникових приладах під впливом струмів, індукованих ЕМВ. Встановлено діапазони параметрів зовнішнього ЕМВ, за яких спостерігається реалізація цієї моделі (амплітуда напруженості електричного поля $E < 100$ кВ/м, тривалість імпульсу $\Delta t_{\text{имп}} \approx 10^2 - 10^3$ нс).

2. Проведено експериментальні дослідження впливу імпульсного електромагнітного випромінювання (амплітуда напруженості електричного поля $E \equiv 10 - 30$ кВ/м, тривалість імпульсу $\Delta t_{\text{имп}} \approx 500$ нс) на ВАХ ділянок прямого струму діодів (кремнієвого планарного з бар'єром Шотткі 2Д922В, кремнієвого епітаксialного КД409А). У результаті досліджень було виявлено ділянки з від'ємним диференціальним опором, що характеризують режим генерації власних коливань цих приладів (зростання прямого струму при зменшенні напруги).

Порівняння експериментальних та теоретичних даних, отриманих у цій роботі, підтверджує можливість застосування запропонованої фізичної моделі зворотних відмов. На її основі сформовано розрахункові залежності, які дають змогу визначати умови виникнення та кількісні параметри зворотних відмов напівпровідникових діодів під дією імпульсного ЕМВ.

The effect of electromagnetic radiation on the performance of semiconductor devices

S. Buriakovskiy¹, V. Breslavets², Ju. Breslavets², I. Yakovenko²,
A. Tyshchenko², O. Vasylieva³

¹Research and Design Institute "Molniya" of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Shevchenko Str., 47, 61013, Kharkiv, Ukraine
sergbyr@i.ua

²National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kyrpychova Str., 2, 61002, Kharkiv, Ukraine
bres123@ukr.net; juliettar941@gmail.com; yakovenko60iv@ukr.net

³National Scientific Centre "Institute of Metrology", Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine
koropetc@ukr.net

Abstract

Strong electromagnetic fields significantly affect the performance of control and communication systems, in particular given the inhomogeneity of protective screens, when the fields penetrate inside radio-electronic devices. Such processes are studied due to the increasingly widespread use of semiconductor elements, which have a high sensitivity to the effects of electromagnetic radiation. It is extremely relevant to confirm the possibility of operation of switching devices under the influence of high levels of electromagnetic fields. The Reference Measurement Standard of Ukraine for pulsed electric and magnetic fields (hereinafter referred to as the REMF-standard), developed at the Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute "Molniya" of NTU "KhPI", allows not only to reproduce possible operating electromagnetic fields affecting the equipment, but also to provide practical recommendations for the most reliable operation modes of switching equipment based on semiconductor elements.

A physical model of reverse failure mechanisms of semiconductor diodes was developed and tested. A comparative analysis of the results of the experiments and of the calculated data allows using the proposed model to determine the quantitative characteristics of reverse failures and the criteria for their occurrence.

The effect of pulsed electromagnetic radiation on the current-voltage characteristics of direct current sections of diodes was experimentally studied. The results showed the presence of sections that characterize the presence of the mode of generation of natural oscillations of these devices under the influence of the electromagnetic field. The obtained theoretical results of the study allow for practical recommendations as for selecting the most reliable operation modes of switching equipment based on semiconductor elements under the influence of high-level electromagnetic fields.

Keywords: electromagnetic radiation; semiconductor structures; surface oscillations; charged particles; logarithmic decrement.

Список літератури

1. Serkov A., Breslavets V., Breslavets Ju., Yakovenko I. Excitation of own oscillations in semiconductor components of radio products under the exposure of third-party electromagnetic radiation. *Advanced Information Systems*, 2022, vol. 6, no. 1, pp. 124–128. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.1.20>
2. Серков О.А., Бреславец В.С., Бреславец Ю.В., Яковенко І.В. Механізми впливу зовнішнього електромагнітного випромінювання на працездатність апаратури зв'язку. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. Т. 2. № 68. С. 129–133. doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.2.129>
3. Serkov A., Breslavets V., Fomenko A., Yakovenko I. Excitation of magnetoplasma oscillations in semiconductor structures by fluxes of charged particles. *Advanced Information Systems*, 2021, vol. 5, no. 3, pp. 18–21. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.03>
4. Serkov A., Breslavets V., Yakovenko I., Dziabenko O. Excitation of surface vibrations of semiconductor structures exposed to external electromagnetic radiation. *Advanced Information Systems*, 2018, vol. 2, no. 3, pp. 142–146. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.25>
5. Potylitsyn A.P. Transition radiation and diffraction radiation. Similarities and differences. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1998, vol. 145, issues 1–2, pp. 169–179. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(98\)00384-X](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(98)00384-X)
6. Rule D.W., Fiorito R.B., Kimura W.D. Noninterceptive beam diagnostics based on diffraction radiation. *Beam instrumentation. Proceedings of 7th Workshop*, Argonne, USA, 1996, pp. 510–517. doi: <https://doi.org/10.1063/1.52327>
7. Fiorito R.B., Rule D.W. Diffraction radiation diagnostics for moderate to high energy charged particle beams. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2001, vol. 173, pp. 67–82. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(00\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(00)00066-5)

8. Mkrtchyan A.R. et al. Coherent diffraction radiation from an electron bunch. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1998, vol. 145, issues 1–2, pp. 67–72. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(98\)00254-7](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(98)00254-7)
9. Shilliday T.S., Vaccaro J. (Eds). *Physics of Failure in Electronics*. Volume 5. RADS Series in Reliability. Rome Air Development Center, 2021.
10. Queisser H.J. Failure mechanisms in silicon semiconductors. Final Report Contract AF 30 (602)-2556. Report No. RADC-TDR-62-533. Rome Air Development Center, 1963. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0297033.pdf>
1. Serkov A., Breslavets V., Breslavets Ju., Yakovenko I. Excitation of own oscillations in semiconductor components of radio products under the exposure of third-party electromagnetic radiation. *Advanced Information Systems*, 2022, vol. 6, no. 1, pp. 124–128. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.1.20>
2. Serkov A., Breslavets V., Breslavets Yu., Yakovenko I. Mekhanizmy vplyvu zovnishnoho elektromahnitnoho vyprominiuvannia na pratsezdatsnist aparatury zviazku [Mechanisms of influence of external electromagnetic radiation on the performance of communication equipment]. *Control, Navigation and Communication Systems*, 2022, vol. 2, no. 68, pp. 129–133 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.2.129>
3. Serkov A., Breslavets V., Fomenko A., Yakovenko I. Excitation of magnetoplasma oscillations in semiconductor structures by fluxes of charged particles. *Advanced Information Systems*, 2021, vol. 5, no. 3, pp. 18–21. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.03>
4. Serkov A., Breslavets V., Yakovenko I., Dziabenko O. Excitation of surface vibrations of semiconductor structures exposed to external electromagnetic radiation. *Advanced Information Systems*, 2018, vol. 2, no. 3, pp. 142–146. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.25>
5. Potylitsyn A.P. Transition radiation and diffraction radiation. Similarities and differences. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1998, vol. 145, issues 1–2, pp. 169–179. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(98\)00384-X](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(98)00384-X)
6. Rule D.W., Fiorito R.B., Kimura W.D. Noninterceptive beam diagnostics based on diffraction radiation. *Beam instrumentation. Proceedings of 7th Workshop*, Argonne, USA, 1996, pp. 510–517. doi: <https://doi.org/10.1063/1.52327>
7. Fiorito R.B., Rule D.W. Diffraction radiation diagnostics for moderate to high energy charged particle beams. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2001, vol. 173, pp. 67–82. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(00\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(00)00066-5)
8. Mkrtchyan A.R. et al. Coherent diffraction radiation from an electron bunch. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1998, vol. 145, issues 1–2, pp. 67–72. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(98\)00254-7](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(98)00254-7)
9. Shilliday T.S., Vaccaro J. (Eds). *Physics of Failure in Electronics*. Volume 5. RADS Series in Reliability. Rome Air Development Center, 2021.
10. Queisser H.J. Failure mechanisms in silicon semiconductors. Final Report Contract AF 30 (602)-2556. Report No. RADC-TDR-62-533. Rome Air Development Center, 1963. Available at: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0297033.pdf>

References