

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Лосєв Федір Володимирович

УДК 621.314.224

**ВПЛИВ СИЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ НА  
ВОЛЬТ-АМПЕРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ**

Спеціальність 05.09.13 – техніка сильних  
електричних та магнітних полів

Автореферат  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2011

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Вплив сильних електричних та магнітних полів на працездатність електрорадіовиробів стає вагомим у випадку, коли електричні та магнітні поля проникають у середину виробів крізь неоднорідності екранів, наводячі додаткові струми та напруги на елементах виробів, які змінюють їх робочі характеристики. Дослідження процесів такого роду обумовлені все більшим застосуванням напівпровідникової елементної бази, яка має високу чутливість до дії стороннього електромагнітного випромінювання.

Всі існуючі відмови працездатності, що виникають в електрорадіовиробах внаслідок дії сторонніх факторів, поділяються на оборотні та необоротні. Необоротні відмови визначаються повною втратою працездатності. Оборотні відмови виникають в умовах, коли дія сторонніх факторів (електромагнітного випромінювання) не призводить до повної втрати працездатності радіоелектронних виробів, але є причиною відхилення їх робочих характеристик від норми. Більшість існуючих експериментальних та теоретичних результатів досліджень впливу електромагнітного випромінювання на працездатність електрорадіовиробів відносяться до галузей необоротних відмов (тепловий пробій). В той же час залишаються відкритими питання, пов'язані з визначенням механізмів впливу струмів, наведених електромагнітним випромінюванням, на фізичні процеси, що визначають ступень відхилення робочих характеристик приладів від норми та можливості відновлення їх нормального функціонування.

Таким чином, необхідність дослідження механізмів появи оборотних відмов напівпровідникових приладів під впливом імпульсного електромагнітного випромінювання та утворення розрахункових методик визначення їх характеристик визначає актуальність теми дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами темами.** Дисертаційна робота містить результати досліджень, отриманих здобувачем у Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті “Молнія” НТУ “ХП”, у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України: “Дослідження взаємодії електромагнітних коливань та заряджених частинок у напівпровідникових структурах” (ДР№0101U003807); “Розробка та дослідження нових методів визначення критеріїв оборотних відмов напівпровідникових структур” (ДР№0101U008737); “Дослідження процесів взаємодії електромагнітних коливань з наведеними струмами у багатошарових структурах при наявності зовнішнього випромінювання” (ДР№0108U001893).

**Мета і завдання дослідження.** Метою даного дослідження є обґрунтування розрахункових та експериментальних методів визначення критеріїв появи та кількісних характеристик оборотних відмов напівпровідникової елементної бази електрорадіовиробів в умовах дії зовнішнього електромагнітного випромінювання.

Поставлена в роботі мета обумовила вирішення завдань:

– визначення механізмів появи та розвитку оборотних відмов напівпровідникових приладів та розробка фізичних моделей функціонування

технічних засобів в умовах дії потужного електромагнітного випромінювання ;

- отримання розрахункових співвідношень, що дозволяють визначати ступінь впливу струмів, наведених електромагнітним випромінюванням, на працездатність напівпровідникових приладів в умовах черенковського випромінювання;

- отримання розрахункових співвідношень, що визначають величину оборотних відмов напівпровідникових приладів, обумовлених взаємодією поверхневих коливань та струмів, наведених зовнішнім електромагнітним випромінюванням, в умовах перехідного випромінювання;

- проведення експериментальних досліджень вольт-амперних характеристик напівпровідникових діодів в умовах дії зовнішнього імпульсного електромагнітного випромінювання;

- проведення порівняльного аналізу вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів, отриманих експериментально, і розрахункових даних оборотних відмов в межах розробленої в дисертації фізичної моделі впливу електромагнітного випромінювання на працездатність електрорадіовиробів.

*Об'єктом дослідження* є фізичні процеси появи та розвитку оборотних відмов напівпровідникових приладів, обумовлених впливом струмів, наведених зовнішнім електромагнітним випромінюванням.

*Предметом дослідження* є вольт-амперні характеристики напівпровідникових приладів (діодів) в умовах дії зовнішнього імпульсного електромагнітного випромінювання у галузі оборотних відмов.

*Методи дослідження.* При визначенні фізичних механізмів оборотних відмов напівпровідникових приладів та отриманні розрахункових співвідношень для їх кількісних характеристик у роботі застосовувались аналітичні методи розв'язання системи рівнянь Максвелла для обмежених твердотільних структур у рамках гідродинамічного та кінетичного наближень. Рішення дисперсійних рівнянь систем «наведений струм – напівпровідникова структура» були отримані методом зв'язаних мод. Вирази для часових характеристик оборотних відмов (інкрементів нестійкостей) були отримані методом послідовних наближень за малим параметром. Квантовомеханічний опис взаємодії наведених струмів та коливань напівпровідникових структур застосовувався при визначенні ефекту перехідного випромінювання на межі структури при наявності потенційного бар'єру. Експериментальні характеристики оборотних відмов напівпровідникових приладів були отримані на базі повірної схеми, встановленої міждержавним стандартом “Государственная поверочная схема для средств измерения максимальных значений напряженностей импульсных электрических и магнитных полей ГОСТ 8.540-93 ”, побудованого у НДПКІ “Молнія” НТУ “ХПІ” (високовольтна імпульсна установка Еталон – РЕМП).

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- в межах гідродинамічного та кінетичного підходів вперше побудовано фізичні механізми появи оборотних відмов напівпровідникових приладів, які виникають внаслідок трансформації енергії струмів, наведених зовнішнім випромінюванням, в енергію власних коливань напівпровідникової структури в

умовах впливу сильних електромагнітних полів;

- в аналітичному вигляді вперше отримано розрахункові співвідношення, що визначають ступінь відхилення вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів в залежності від фізичних властивостей матеріалів, що комплектують прилад та параметрів зовнішнього електромагнітного впливу;

- отримали подальший розвиток експериментальні дослідження залежностей між параметрами зовнішнього електромагнітного випромінювання (амплітудою та довжиною імпульса напруги електричного поля) та ступенем відхилення вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів від норми в межах оборотних відмов (негативний опір на ділянках прямого струму);

- отримали подальший розвиток методи визначення нових критеріїв оборотних відмов напівпровідникових діодів (кількісні параметри наведених струмів та напруг), що зв'язані з появою режиму генерації (нестійкості) власних електромагнітних коливань приладів під дією зовнішніх електромагнітних полів;

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані розрахункові співвідношення для втрат енергії струмів, наведених електромагнітним випромінюванням на збудження власних коливань напівпровідникових приладів (величини їх оборотних відмов), дозволяють визначати ступінь та діапазон відхилення вольт-амперних характеристик від норми в залежності від параметрів зовнішнього електромагнітного поля та фізичних якостей комплектуючих прилад матеріалів, що можливо вікористовувати при проєктуванні електрорадіовиробів.

Порівняльний аналіз кількісних характеристик оборотних відмов в залежності від просторової орієнтації діючого імпульсного електромагнітного поля відносно напівпровідникового приладу (наведений струм направлений вздовж або по нормалі до межі), дозволяє вирішувати задачі оптимізації можливого ступеню відхилення робочих характеристик напівпровідникових приладів.

Результати роботи впроваджені в Інституті Радіофізики та електроніки НАН України у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України: “Дослідження лінійних та нелінійних твердотільних структур з застосуванням електромагнітних хвиль НВЧ діапазону та заряджених частинок” (ДР № 01061U011978) та в навчальному процесі на кафедрі “Системи інформації” НТУ «ХП».

**Особистий внесок здобувача.** Всі наукові положення і результати, приведені в дисертаційній роботі, одержані здобувачем особисто, серед них:

- обґрунтування експериментальних та розрахункових методів визначення критеріїв виникнення та кількісних характеристик оборотних відмов напівпровідникових приладів в умовах дії імпульсного електромагнітного випромінювання;

- отримання розрахункових співвідношень, що дозволяють визначати ступінь відхилення вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів від норми в залежності від параметрів зовнішнього електромагнітного

випромінювання та фізичних властивостей матеріалів, комплектуючих прилади;

- проведення експериментальних досліджень впливу імпульсного електромагнітного випромінювання на вольт-амперні характеристики напівпровідникових приладів при оборотних відмовах;

- проведення порівняльного аналізу вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів, отриманих експериментально, і кількісних даних оборотних відмов такого роду, отриманих розрахунковими методами в межах розробленої в дисертації фізичної моделі впливу електромагнітного випромінювання на працездатність електрорадіовиробів.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертації були представлені та обговорені на: Науково-практичній конференції, присвяченій 50-річчю Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту “Молнія” НТУ «ХП» (Харків, 2004); Міжнародному симпозиумі “Проблеми вдосконалення електричних машин та апаратів. Теорія й практика. SIEMA” (Харків, 2006); XIII Міжнародній науковій школі – семінарі “Фізика імпульсних розрядів в конденсованих середовищах” (Миколаїв, 2007); XVI, XVII Міжнародних науково – практичних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я." (Харків, 2008, 2009).

**Публікації.** Основний зміст дисертаційної роботи викладено в 11 публікації, серед них – 10 статей у наукових фахових виданнях ВАК України.

**Структура і об'єм роботи.** Дисертація складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації становить 151 сторінку, у тому числі 17 рисунків та 8 таблиць по тексту, 5 рисунків та 1 таблиця на 6 окремих сторінках, список використаних джерел з 116 найменувань на 13 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність проблеми, визначені мета роботи, методи досліджень, а також наукова новизна та практичне значення одержаних результатів.

У **першому розділі** розглянуті особливості функціонування технічних засобів, що містять електрорадіовироби, в умовах дії стороннього електромагнітного випромінювання.

Проведено аналіз основних типів порушень працездатності електрорадіовиробів в умовах дії електромагнітного випромінювання – оборотних та необоротних відмов. Доведено, що найбільшу чутливість до впливу сторонніх факторів такого роду має напівпровідникова елементна база електрорадіовиробів. Визначені кількісні параметри сторонніх електромагнітних полів, що є причиною появи необоротних відмов напівпровідникових приладів, та приведені існуючі методики визначення кількісних характеристик електричної стійкості напівпровідникових приладів – критичної енергії пошкодження, що визначає межу їх працездатності. Доведено, що більшість існуючих методик визначення критеріїв необоротних відмов не враховують ефекти відхилення робочих характеристик напівпровідникових приладів під дією стороннього

випромінювання в умовах, коли межа критичної енергії не досягнута.

Для вирішення задач такого роду запропонована фізична модель появи оборотних відмов напівпровідникових приладів в умовах, коли дія стороннього випромінювання призводить до відхилення їх вольт-амперних характеристик (ВАХ) від норми. Причиною появи таких ефектів є процеси трансформації енергії струмів, наведених зовнішнім випромінюванням, в енергію власних коливань напівпровідникових приладів (встановлення режиму генерації коливань).

Режим генерації у напівпровідникових приладах (діодах) виникає на ділянках прямого струму вольт-амперних характеристик, що мають негативний опір  $R = \frac{\Delta U}{\Delta I} < 0$ . У цьому випадку зростання струму  $\Delta I$  супроводжується падінням напруги  $\Delta U$  (ділянка  $AB$  на рис. 1).

У режимі генерації (нестійкості власних коливань напівпровідникового приладу) наведений струм (потік електронів, наведених зовнішнім випромінюванням) втрачає частку своєї енергії  $\Delta W_{\text{ел}}$  на збудження електромагнітних коливань напівпровідникових структур з енергією випромінювання  $\Delta W_{\text{випр}}$  ( $\Delta W_{\text{ел}} < 0$ ;  $\Delta W_{\text{випр}} = \Delta W_{\text{ел}}$ ). В якості енергетичного критерію оцінки електричної стійкості напівпровідникових приладів для оборотних відмов застосовується величина енергії випромінювання електромагнітних коливань напівпровідникових приладів  $\Delta W_{\text{випр}}$

$$\Delta W_{\text{випр}} = I_{\text{н}} U_{\text{н}} \Delta t_{\text{вз}},$$

де:  $I_{\text{н}}, U_{\text{н}}$  – величини наведених струму та напруги,  $\Delta t_{\text{вз}}$  – час ефективної взаємодії наведених струмів та електромагнітних коливань (час дії стороннього електромагнітного випромінювання). Таким чином, величина  $\Delta W_{\text{випр}}$  визначає ступінь відхилення вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів від норми в умовах дії стороннього випромінювання і застосовується в даній роботі як кількісна характеристика їх оборотних відмов.

У другому розділі описано взаємодію наведених зовнішнім випромінюванням потоку електронів з власними поверхневими коливаннями напівпровідникових структури  $\varepsilon_1$ , коли вектор напруги зовнішнього електричного поля  $\vec{E}$  (наведений полем струм  $J_{\text{н}}$ ) спрямовані вздовж межі структури  $y = \pm d$ , а сама структура оточена напівобмеженими діелектричними середовищами  $\varepsilon_2; \varepsilon_3$  (рис. 2).



Рис.1. ВАХ діода при наявності зворотніх відмов

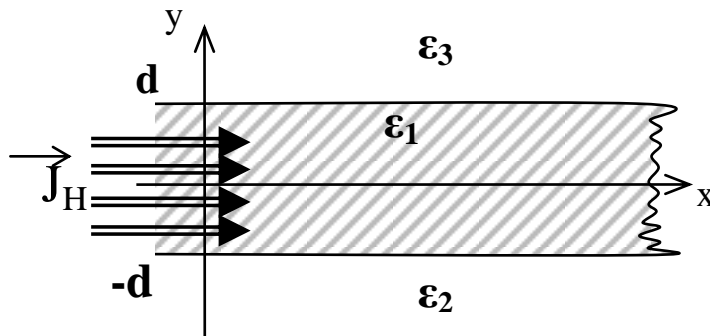


Рис. 2. Орієнтація наведеного струму та напівпровідникової структури в умовах випромінювання Вавілова – Черенкова

Рішення цієї задачі дозволяє визначити розрахункові співвідношення для кількісних характеристик оборотних відмов (ступеню відхилення ВАХ від норми) напівпровідникових приладів в залежності від параметрів зовнішнього електромагнітного випромінювання та фізичних якостей матеріалів, комплектуючих прилади.

В умовах, коли фазова швидкість заряджених частинок наведеного струму дорівнює фазовій швидкості електромагнітних коливань напівпровідникової структури (умови випромінювання Вавілова – Черенкова), реалізується механізм трансформації енергії наведеного струму в енергію коливань.

Внаслідок резонансної взаємодії такого роду, при проходженні потоку заряджених частинок уздовж напівпровідникової структури, проходить процес перетворення енергії зарядів в енергію власних (поверхневих) коливань. Таким чином, амплітуда коливань  $A$  експоненційно зростає з часом  $t$ , ( $A \approx \exp(\gamma t)$ ) та встановлюється режим нестійкості (генерації) ( $\gamma$  – інкремент нестійкості).

Вибір поверхневих коливань в якості каналу трансформації енергії струмів не є випадковим – цей тип коливань локалізований поблизу межі напівпровідникового приладу, що визначає ефективність їх взаємодії зі струмами, наведеними зовнішнім випромінюванням.

При отриманні спектральних характеристик поверхневих коливань застосовувалась повна система рівнянь електродинаміки – рівняння Максвела, рівняння середовища та умови на межі середовищ.

Отримані аналітичні рішення задач взаємодії наведених зовнішнім випромінюванням струмів з поверхневими коливаннями напівпровідникових приладів, що дозволяють визначати кількісні характеристики їх оборотних відмов. Визначені дисперсійні характеристики електростатичних коливань напівпровідникових структур в умовах відсутності зовнішніх полів, конфігурація яких застосовується в приладах напівпровідникової електроніки – коливання з симетричним та антисиметричним розподілом тангенційної складової електричного поля.

Досліджено нестійкості коливань такого роду, коли наведений струм рухається вздовж межі структури, та отримано вирази для інкрементів

нестійкості в умовах резонансу, коли збігаються фазова швидкість коливань  $\frac{\omega}{q}$  та дрейфова швидкість  $v_0$  електронів наведеного струму:  $\omega = qv_0$ , де  $q = \frac{2\pi}{\lambda}$  – хвильовий вектор;  $\lambda$  – довжина хвилі.

Для симетричної моди частота  $\omega_1$  та інкремент нестійкості  $\gamma_1$  мають вигляд

$$\gamma_1 \approx \sqrt[3]{\omega_b^2 \omega_1}; \quad \omega_1 = \frac{\omega_0}{\sqrt{\varepsilon_0 + \varepsilon_d \operatorname{th}(qd)}}, \quad (1)$$

де  $2d$  – товщина напівпровідникової структури;  $\varepsilon_0$  – діелектрична стала ґратки;  $\omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_0}{m}}$  – плазмова частота електронів напівпровідникового шару;  $e, m$  – заряд та маса електрону;  $n_0$  – концентрація електронів напівпровідникової структури;  $\omega_b = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_{0b}}{m}}$  – плазмова частота електронів наведеного струму;  $n_{0b}$  – концентрація електронів наведеного струму.

Аналогічний вигляд мають інкремент  $\gamma_2$  та частота  $\omega_2$  антисиметричної моди, які відрізняються від формули зміною  $\operatorname{th}(qd)$  на  $\operatorname{cth}(qd)$  у формулі (1). В умовах, коли товщина напівпровідникової структури значно менше від довжини хвилі, інкремент антисиметричної моди домінує. Це пов'язано з тим, що для антисиметричної моди густина збурених носіїв локалізована на межах напівпровідникових приладів.

Вираз для інкременту нестійкості дозволяє отримати розрахункові співвідношення для визначення кількісних характеристик оборотних відмов – величину випромінювання поверхневих коливань  $\Delta W_{\text{випр}}$  (ступеню відхилення вольт-амперних характеристик від норми) в умовах дії зовнішнього імпульсного поля.

$$\Delta W_{\text{випр}} = \Delta P_{\text{випр}} \Delta t_{\text{імп}},$$

де  $\Delta P_{\text{випр}}$  – потужність випромінювання поверхневих коливань напівпровідникового приладу в умовах дії імпульсного випромінювання;  $\Delta t_{\text{імп}}$  – тривалість імпульсу напруги електричного поля.

Потужність випромінювання  $\Delta P_{\text{випр}}$  визначається як втрати кінетичної енергії електронів струму, наведеного стороннім випромінюванням, в одиницю часу:  $\Delta P_{\text{випр}} = \frac{\Delta E_{\text{кін}}}{\Delta t}$ , де  $E_{\text{кін}} = \frac{mv^2}{2}(n_{ob}V)$  – кінетична енергія електронів наведеного струму,  $V$  – об'єм, що займає наведений струм (напівпровідникова структура).

У режимі пучкової нестійкості (генерації) коливань величина дрейфової швидкості експоненціально зростає з часом –  $v \approx v_0 \exp(\gamma t)$ , тому



$\Delta P_{\text{випр}} = m\nu(n_{ob}V)\gamma$ , а розрахункове співвідношення для визначення величини оборотних відмов напівпровідникових в умовах дії імпульсної напруги має вигляд

$$\Delta W_{\text{випр}} = \Delta P_{\text{випр}} \Delta t_{\text{імп}} = m\nu(n_{ob}V) \gamma_{1,2} \Delta t_{\text{імп}}. \quad (2).$$

Величина інкременту залежить від параметрів наведеного струму (концентрації носіїв  $n_{ob}$  та їх швидкості  $v_0$ ) та параметрів напівпровідникової структури (концентрації носіїв електронів  $n_0$  та діелектричної проникності ґратки  $\varepsilon_0$ ):  $\gamma_{1,2} = \gamma(n_{ob}; n_0; v; \varepsilon_0)$ . Залежності цих параметрів від зовнішніх електромагнітних полів на діючий час для більшості напівпровідникових приладів сучасної електроніки визначені експериментально.

Таким чином, формула (2) дозволяє отримати кількісні характеристики оборотних відмов напівпровідникових приладів для заданих параметрів зовнішнього електричного поля (амплітуди і тривалості імпульсу) та типу структур, що комплектують прилад. Були проведені кількісні оцінки втрат енергії наведених струмів на збудження поверхневих коливань структур метал – діелектрик – напівпровідник ( $\Delta W_{\text{випр}}$ ) в умовах дії імпульсу електричної напруги

(амплітуда  $E \approx 15 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ ; тривалість імпульсу  $\Delta t_{\text{імп}} \approx 500 \text{ нс}$ ). Величина оборотних відмов  $\Delta W_{\text{випр}}$  складає  $10^{-7} - 10^{-8}$  Дж та знаходиться в межах сучасних приймачів випромінювання.

**У третьому розділі** розглядаються фізичні механізми взаємодії наведених зовнішнім випромінюванням потоку електронів з власними поверхневими коливаннями напівпровідникової структури  $\varepsilon_1$ , коли вектор напруги зовнішнього електричного поля  $\vec{E}$  (наведений полем струм  $\vec{J}_H$ ) спрямовані по нормалі до межі структури  $y = \pm d$ , а сама структура оточена напівобмеженими діелектричними середовищами  $\varepsilon_2, \varepsilon_3$  (рис. 3).

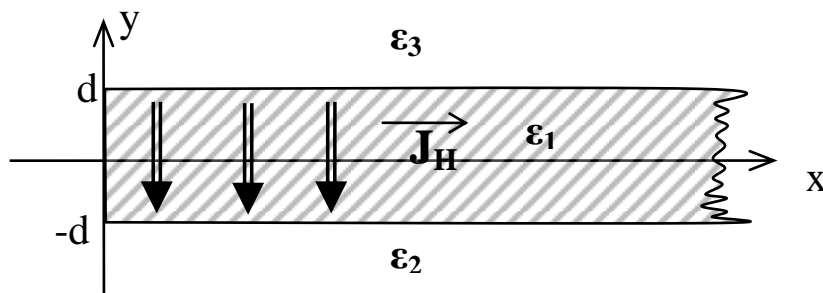


Рис. 3. Орієнтація наведеного струму та напівпровідникової структури в умовах перехідного випромінювання

Рішення даної задачі дозволяє визначати ступінь відхилення вольт-амперних характеристик напівпровідникового приладу (величину оборотної відмови) в залежності від параметрів стороннього випромінювання.

Дана взаємодія наведених струмів та поверхневих коливань базується на ефекті перехідного випромінювання. Цей ефект полягає в тому, що

електромагнітне поле зарядженої частинки, яка рухається в матеріальному середовищі, визначається не тільки її швидкістю та кількістю заряду, але і електромагнітними властивостями середовища. Коли при проходженні зарядом межі напівпровідникової структури діелектрична проникність  $\varepsilon$  змінюється, змінюється також електричне поле заряду, і частина енергії цього поля перетворюється в енергію електромагнітних коливань.

Таким чином, при проходженні заряджених частинок наведеного струму крізь межу, відбувається безперервний процес перетворення енергії і виникає режим нестійкості (генерації) поверхневих коливань, та амплітуда коливань  $A$  експоненційно зростає з часом  $t$ :  $A \approx \exp(\gamma t)$ .

Визначені дисперсійні характеристики електростатичних коливань напівпровідникових структур (симетрична та антисиметрична моди) при наявності струму, наведеного зовнішнім випромінюванням: структури діелектрик – напівпровідник – діелектрик та метал – діелектрик – напівпровідник. Досліджено нестійкості коливань такого роду, коли наведений струм рухається по нормалі до межі структури та отримано вирази для інкрементів.

Для структури діелектрик – напівпровідник – діелектрик інкременти нестійкості  $\gamma_{1,2}$  симетричної  $\omega_1$  та антисиметричної  $\omega_2$  мод мають вигляд

$$\gamma_{1,2} \approx \frac{\omega_b^2}{\omega_0^2} [1 \pm 2qd], \quad (3)$$

де  $\tau = \frac{2d}{v_0}$  – час прольоту зарядом напівпровідникової структури,

$$\omega_{1,2}\tau = \pi l; \quad l = 0, 1, 2, \dots, N.$$

Для структури метал – діелектрик – напівпровідник інкременти нестійкості  $\gamma_{1,2}$  симетричної  $\omega_1$  та антисиметричної  $\omega_2$  мод мають вигляд

$$\gamma_{1,2} \approx \frac{\omega_b^2 q v_0}{\omega_0^2} [1 + \text{cth}(2qd)], \quad (4)$$

де  $\omega_{1,2}\tau = \frac{\pi(2l+1)}{2}$ ;  $l = 0, 1, 2, \dots, N$ .

Вирази для інкрементів нестійкості власних коливань (3), (4) дозволяють отримати розрахункові співвідношення для визначення кількісних характеристик оборотних відмов в залежності від типу структури – величини випромінювання поверхневих коливань  $\Delta W_{\text{випр}}$  (ступеню відхилення вольт-амперних характеристик) в умовах дії зовнішнього імпульсного поля. Вираз для величини  $\Delta W_{\text{випр}}$  має вигляд

$$\Delta W_{\text{випр}} = \Delta P_{\text{випр}} \Delta t_{\text{імп}} = m\nu(n_{ob}V) \gamma_{1,2} \Delta t_{\text{імп}}. \quad (5)$$

Завдяки (5), були проведені кількісні оцінки втрат енергії наведених струмів на збудження поверхневих коливань структур метал – діелектрик – напівпровідник  $\Delta W_{\text{випр}}$  в умовах дії імпульсу електричної напруги та отримані

кількісні характеристики оборотних відмов напівпровідникових приладів для заданих параметрів зовнішнього електричного поля (амплітуди і тривалості імпульсу) – амплітуда  $E \approx 15 \frac{\text{kV}}{\text{м}}$  тривалість імпульсу  $\Delta t_{\text{имп}} \approx 500 \text{ нс}$ . Величина випромінювання  $\Delta W_{\text{випр}}$  складає  $10^{-7} - 10^{-8} \text{ Дж}$  та знаходиться в межах сучасних приймачів випромінювання.

У **четвертому розділі** роботи представлені експериментальні дослідження впливу імпульсного електромагнітного випромінювання на працездатність напівпровідникових діодів при наяві оборотних відмов. Результати розділу дозволяють обґрунтувати розроблену фізичну модель виникнення відмов такого роду та отримати на її основі критерії виникнення та кількісні характеристики працездатності напівпровідникових приладів в умовах експерименту.

Постановка експериментальних досліджень дозволяє реалізуватись фізичним механізмам утворення наведених зовнішнім електромагнітним випромінюванням струмів та можливості їх ефективної взаємодії з власними коливаннями напівпровідникових приладів (ефектам перехідного та черенковського випромінювання власних коливань напівпровідникових структур). Експериментальні результати дають можливість визначити достовірність отриманих у другому та третьому розділі розрахункових співвідношень між енергетичними втратами наведених струмів на їх збудження (кількісними характеристиками оборотних відмов), параметрами впливу імпульсного випромінювання (амплітудою та тривалістю імпульсу напруги електричного поля) та фізичними параметрами об'єкту впливу – напівпровідникового приладу.

Проведено порівняльний аналіз існуючих фізичних моделей появи оборотних та необоротних відмов напівпровідникових приладів в умовах дії зовнішніх електромагнітних полів і побудованих на їх підставі експериментальних та розрахункових методик визначення кількісних характеристик відказів. Визначені межі застосування даних методик (критерій критичної енергії) та доведена необхідність урахування залежностей між ступенем відхилення робочих характеристик від параметрів зовнішніх електромагнітних полів та фізичними параметрами напівпровідникових приладів у галузі оборотних відмов. На основі існуючих даних обґрунтована необхідність побудови нової фізичної моделі оборотних відмов напівпровідникових приладів в умовах дії імпульсних електромагнітних полів, яка застосовувалась в даній дисертації, та визначені кількісні межі її застосування.

Дано опис експериментального обладнання, на якому досліджувався вплив імпульсного електромагнітного поля на працездатність напівпровідникових приладів – Еталон РЕМП, розробленого та побудованого у НДПКІ “Молнія” НТУ “ХПІ”. Установа складається з високовольтного імпульсного джерела, яке розряджається на полеутворюючу систему у вигляді симетричної замкненої полоскової лінії (рис.4).

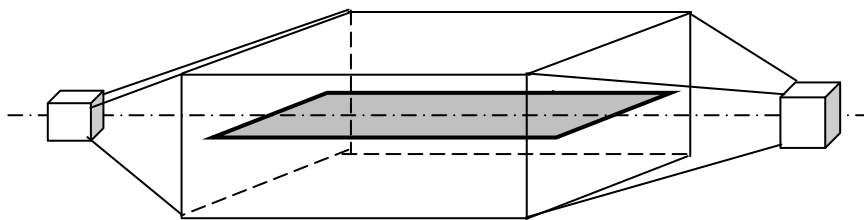


Рис. 4. Симетрична полоскова лінія

Джерело генерує однократні імпульси високої напруги, часові параметри та амплітуди яких забезпечують необхідний рівень електромагнітних полів для проведення експериментальних досліджень оборотних відмов напівпровідникових приладів. Об'єктом досліджень є вольт-амперні характеристики напівпровідникових приладів в умовах дії імпульсного випромінювання: діода кремнієвого, планарного з бар'єром Шотки 2Д 922 В, діода кремнієвого, епітаксiального КД 409 А .

При проведенні експериментальних досліджень, один із вказаних діодів послідовно з'єднувався з джерелом постійного струму та двома опорами, один з яких  $R_1$  дозволяв змінювати силу струму діоду  $I$ , а другий –  $R_2$  забезпечував режим узгодження з кабелем, що веде до реєстратора (осцилографа) (рис.5).

Схема, за виключенням діоду, розташовувалась у екранованому об'ємі, та була винесена поза межі системи полеутворення. Об'єкт дії імпульсного поля (діод) був розташований між пластин полоскової лінії (рис. 6).

Експериментально досліджено вплив імпульсного електромагнітного поля на вольт-амперні характеристики вказаних типів діодів на ділянці прямого струму. Розглядалось два способи розташування діючого поля відносно постійного струму діоду для випадків черенковського (рис. 7,а) та перехідного (рис. 7,б) випромінювання.

Постійний прямий струм на діодах зростав в межах  $\Delta I = 5 - 30$  мА з інтервалом  $\Delta I = 5$  мА. Кожний крок зростання струму супроводжувався дією імпульсу напруги. Виникаюча амплітуда імпульсу напруги на діоді реєструвалась осцилографом.

Експериментально досліджено вплив імпульсного поля з амплітудами напруги –  $E_0 = 10 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ ;  $20 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ ;  $30 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$  та довжиною імпульсу  $\Delta t_{\text{имп}} \approx 500$  нс .

Вольт-амперні характеристики на ділянці прямого струму діодів 2Д 922 В та КД 409 А для вказаних рівнів напруги та двох типів конфігурацій напруги зовнішнього поля та струму діодів паралельного (черенковське випромінювання) та нормального (перехідне випромінювання) показані на рис. 8, 9.

Зростання прямого струму діодів супроводжувалось падінням напруги:  
 для діоду 2Д922В –  $\Delta U \approx 1500 - 480$  мВ (черенковське випромінювання),  
 $\Delta U \approx 3800 - 1600$  мВ (перехідне випромінювання);  
 для діоду КД409А –  $\Delta U \approx 1000 - 450$  мВ (черенковське випромінювання),  
 $\Delta U \approx 2000 - 900$  мВ (перехідне випромінювання).

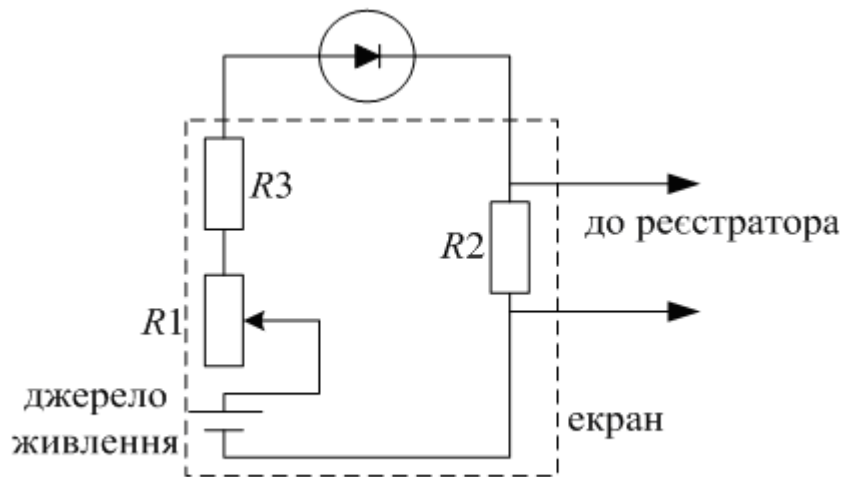


Рис.5. Об'єкт експериментальних досліджень

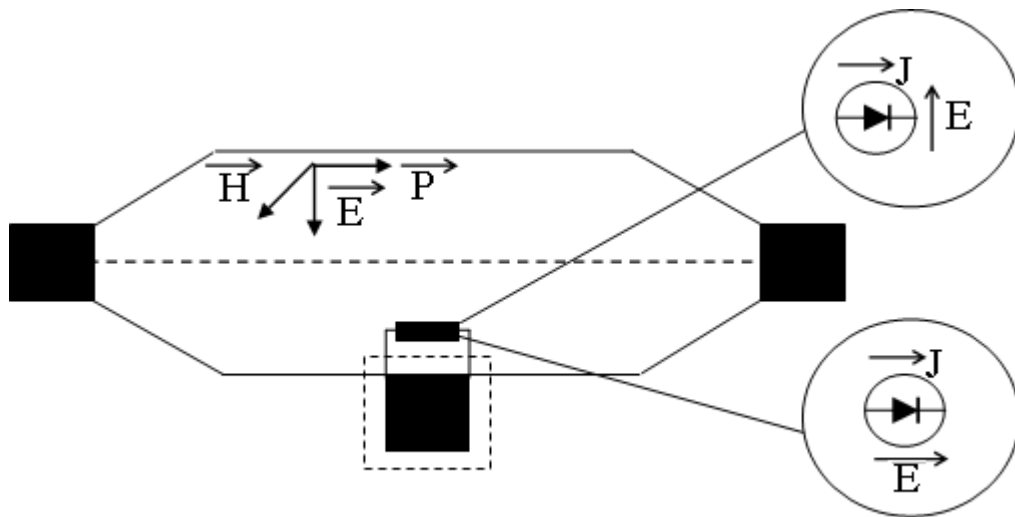
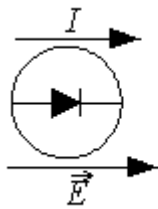
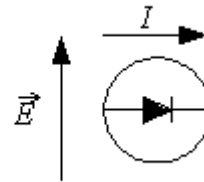


Рис. 6. Розташування об'єкту досліджень в полосковій лінії



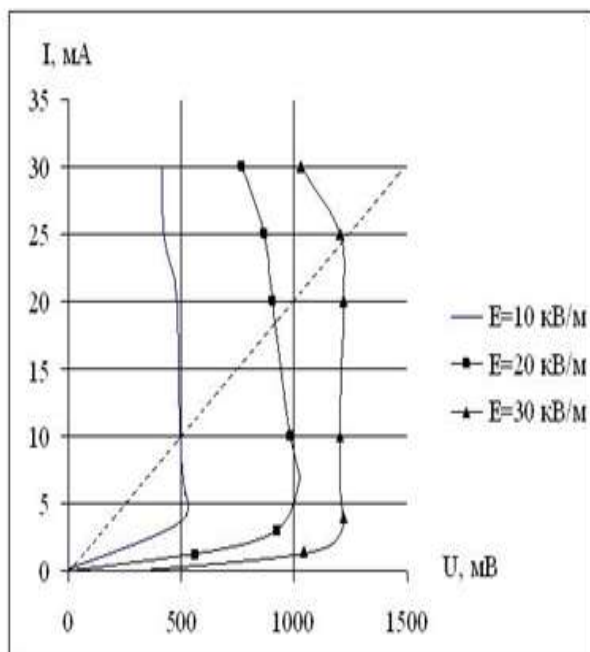
а) черенковське випромінювання



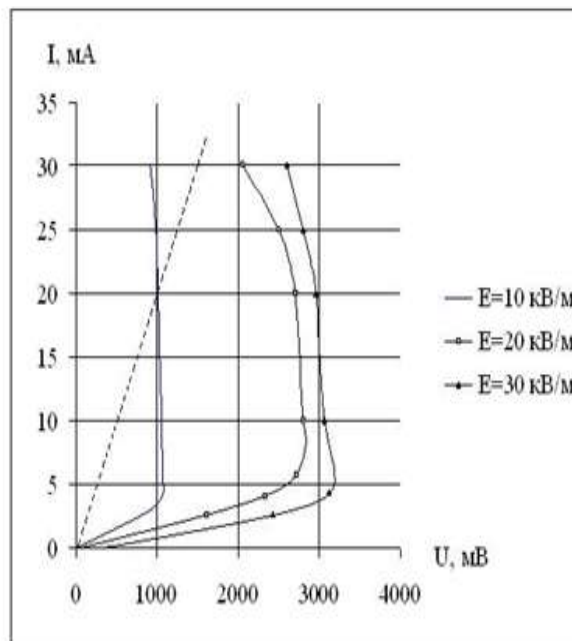
б) перехідне випромінювання

Рис. 7. Розташування діючого поля відносно постійного струму діоду

Отримані експериментальні результати вказують на наяву ділянок вольт-амперних характеристик діодів з негативним опірором (ділянки генерації коливаний). Цей режим випромінювання електромагнітних коливаний за рахунок енергії струмів, наведених зовнішнім імпульсним полем, визначається механізмами пучкових нестійкостей, розглянутих у другому та третьому розділах.



а)



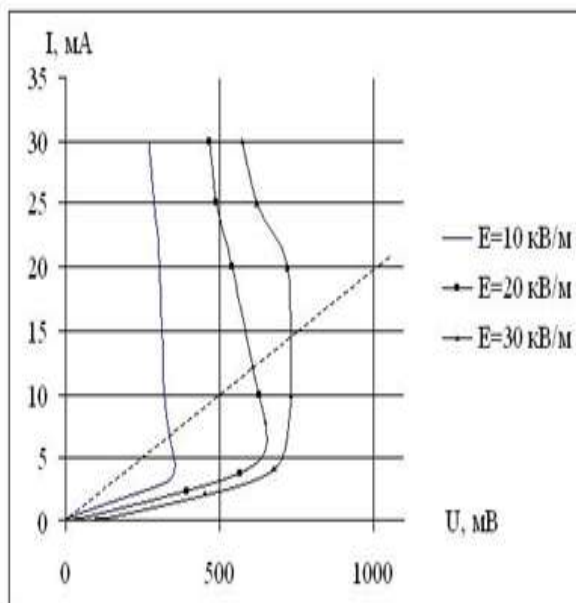
б)

Рис. 8. ВАХ об'єкту досліджень:

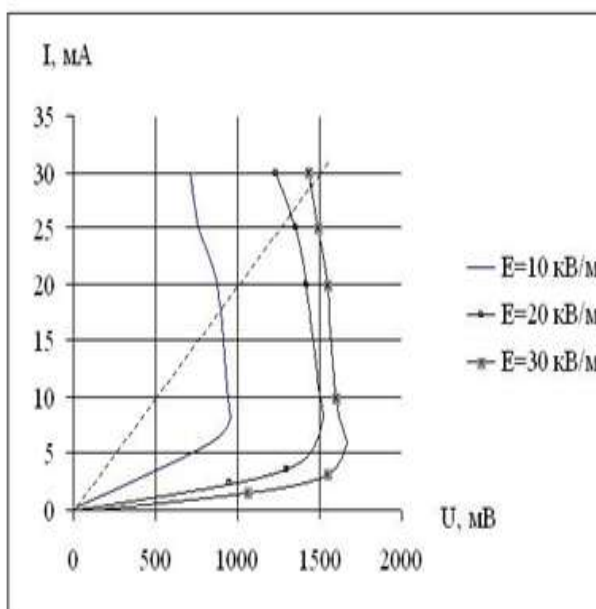
діод кремнієвий, планарний с бар'єром Шотки 2Д 922 В;

( а - черенковське, б – перехідне випромінювання);

----- ВАХ у відсутності зовнішнього електромагнітного імпульсу



а)



б)

Рис. 9. ВАХ об'єкту досліджень:

діод кремнієвий, епітаксіальний КД 409 А ;

( а - черенковське, б – перехідне випромінювання);

---- ВАХ у відсутності зовнішнього електромагнітного імпульсу

Порівняльний аналіз величини енергії випромінювання власних коливань напівпровідникових діодів, отриманих експериментально, з кількісними оцінками енергії випромінювання, отриманих розрахунковим шляхом на основі фізичної моделі, виявив спільні тенденції обох методів виявлення поведінки характеристик оборотних відмов напівпровідникових діодів в залежності від фізичних параметрів приладів та діючого імпульсу напруги:

– величини оборотних відмов діодів (енергія випромінювання  $\Delta W_{\text{випр}}$ ) отримані експериментально та шляхом розрахунків для імпульсного поля з амплітудами напруги  $E_0 = 10 - 30 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$  та довжиною імпульсу  $\Delta t_{\text{імп}} \approx 500 \text{ нс}$ , локалізовані в межах  $10^{-8} - 10^{-9} \text{ Дж}$ ,

– характер зростання величини оборотних відмов  $\Delta W_{\text{випр}}$  від амплітуди зовнішнього імпульсного поля, виявлений експериментально, відповідає розрахунковим залежностям потужності випромінювання від струмів, наведених імпульсним полем, отриманих в межах фізичної моделі, запропонованої у дисертації,

– результати експерименту по визначенню залежностей енергії випромінювання від взаємної орієнтації струму діода та зовнішнього імпульсного поля відповідають запропонованій фізичній моделі втрат енергії наведених струмів на збудження коливань напівпровідникових приладів для випадків перехідного та черенковського випромінювання (енергія випромінювання обернено пропорційна часу прольоту заряджених частинок наведеного струму крізь напівпровідникову структуру).

Таким чином, порівняльний аналіз отриманих експериментальних та розрахункових результатів показав адекватність запропонованої в дисертації фізичної моделі процесам виникнення та розвитку оборотних відмов напівпровідникових приладів в умовах дії зовнішніх електромагнітних полів (появи ділянок вольт-амперних характеристик з негативним опірором). Це дозволяє на якісному рівні отримати розрахункові співвідношення для визначення параметрів оборотних відмов напівпровідникових приладів в умовах дії імпульсного випромінювання.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу розробки фізичної моделі появи та розвитку оборотних відмов напівпровідникових приладів (відхилень вольт-амперних характеристик), обумовлених трансформацією енергії струмів, наведених електромагнітним випромінюванням, в енергію електромагнітних коливань напівпровідникових приладів, та отримання розрахункових співвідношень, що визначають ступінь відхилень вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів в залежності від величини зовнішнього електромагнітного випромінювання та фізичних параметрів матеріалів, що комплектують дані вироби.

Основні результати дисертації сформульовано у таких висновках.

1. Проведено дослідження технічних засобів в умовах дії потужного електромагнітного випромінювання. Досліджено характер змін працездатності напівпровідникових комплектуючих елементної бази технічних засобів.

Розроблена фізична модель появи одного з типів оборотних відмов напівпровідникової елементної бази електрорадіовиробів, яка заснована на взаємодії струмів, наведених зовнішнім імпульсним електромагнітним випромінюванням, з власними коливаннями напівпровідникових структур, комплектуючих електрорадіовироби.

Показано, що дана взаємодія приводить до енергетичних втрат наведених струмів на збудження власних електромагнітних коливань напівпровідникової структури (режиму генерації коливань) та характеризується змінами вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів (появі оборотних відмов).

2. Досліджено вплив струмів, наведених зовнішнім електромагнітним випромінюванням, на працездатність напівпровідникових приладів в умовах черенковського випромінювання.

Отримані розрахункові співвідношення для визначення кількісних характеристик оборотних відмов в умовах, коли вектор струму, наведеного електромагнітним випромінюванням, паралельний межі напівпровідникової структури. Ці співвідношення зв'язують величину втрат енергії наведених струмів з параметрами напівпровідникових структур в умовах дії імпульсного електромагнітного поля, що дозволяє визначати характер та ступінь змін вольт-амперних характеристик.

3. Досліджено механізми оборотних відмов напівпровідникових приладів, обумовлених взаємодією поверхневих коливань твердотільних структур зі струмами, наведеними електромагнітним випромінюванням, в умовах перехідного випромінювання.

Отримані розрахункові співвідношення для визначення кількісних характеристик оборотних відмов в умовах, коли вектор струму, наведеного електромагнітним випромінюванням, спрямован по нормалі до межі напівпровідникової структури. Ці співвідношення зв'язують величину втрат енергії наведених струмів з фізичними параметрами напівпровідникових приладів в умовах дії імпульсного електромагнітного поля, що дозволяє визначати характер та ступінь відхилень вольт-амперних характеристик.

4. Проведені експериментальні дослідження впливу імпульсного електромагнітного випромінювання на вольт-амперні характеристики планарного кремнієвого діоду з бар'єром Шотки 2Д 922 В та епітаксiального кремнієвого діоду КД 409 А у діапазоні напруг та струмів, що характеризують зворотні відмови (відсутність теплового пробою).

Доведено, що дія зовнішнього імпульсного електромагнітного поля (амплітуди напруги електричного поля –  $E_0 = 10 - 30 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ , тривалість імпульсу

$\Delta t_{\text{имп}} \approx 500$  нс) характеризується появою ділянок вольт-амперних характеристик з негативним опором. На цих ділянках зростання прямого струму у діапазоні:  $\Delta I = 5 - 30$  мА супроводжується падінням напруги у діапазоні:



$\Delta U = (500 - 2000 \text{ мВ})$  (області генерації коливачів).

5. Порівняльний аналіз експериментальних досліджень оборотних відмов та їх кількісних оцінок, отриманих розрахунковим шляхом, показали адекватність запропонованої в дисертації фізичної моделі появи та розвитку оборотних відмов напівпровідникових приладів в умовах електромагнітного впливу.

Отримані експериментальні та розрахункові величини випромінювання електромагнітних коливачів  $\Delta W_{\text{випр}}$  знаходяться в спільних межах  $10^{-7} - 10^{-9}$  Дж, та мають спільні тенденції до змін в залежності від параметрів зовнішнього електромагнітного впливу. Тому отримані в дисертації розрахункові співвідношення дозволяють достовірно визначати кількісні характеристики оборотних відмов – відхилення вольт-амперних характеристик в залежності від параметрів електромагнітного випромінювання та фізичних властивостей матеріалів, що комплектують прилад.

6. Результати роботи впроваджені в Інституті Радіофізики та електроніки НАН України у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України: “Дослідження лінійних та нелінійних твердотільних структур з застосуванням електромагнітних хвиль НВЧ діапазону та заряджених частинок” (ДР № 01061U011978) та в навчальному процесі на кафедрі “Системи інформації” НТУ «ХП».

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лосев Ф. В. Электростатические колебания структуры металл – диэлектрик – полупроводник в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В. И. Кравченко, А. И. Коробко, Ф. В. Лосев, И. В. Яковенко // Вісник НТУ “ХП”. – Харків: НТУ “ХП”. – 2004. – № 35. – С. 154 – 161.

*Здобувачем розроблено фізичні механізми появи оборотних відмов напівпровідникових приладів, які виникають внаслідок впливу електромагнітного випромінювання.*

2. Лосев Ф. В. Возбуждение электромагнитных колебаний в полупроводниковых структурах ЭРИ потоком частиц, наведенных ЭМИ. / В. И. Кравченко, Ф. В. Лосев, И. В. Яковенко // Вісник НТУ “ХП”. – Харків: НТУ “ХП”. – 2004. – № 35. – С. 161 – 169.

*Здобувачем отримано розрахункові співвідношення, що визначають ступень відхилення вольт-амперних характеристик діодів в залежності від фізичних властивостей матеріалів та параметрів зовнішнього електромагнітного впливу.*

3. Лосев Ф. В. Неустойчивость собственных электромагнитных колебаний полупроводниковой сверхрешетки в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения // Вісник НТУ “ХП”. – Харків: НТУ “ХП”. – 2005. – № 49. – С. 155 – 160.

*Здобувачем отримані співвідношення, що визначають кількісні характеристики оборотних відмов в умовах дії сторонніх факторів електромагнітного*

походження.

4. Лосев Ф.В. Излучение потока заряженных частиц в полупроводниковых комплектующих электрорадиоизделий при воздействии электромагнитного поля / В. И. Кравченко, Ф. В. Лосев, И. В. Яковенко // Вісник НТУ "ХПІ" . – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – № 38. – С. 7 – 17.

*Здобувачем визначені нові критерії виникнення оборотних відмов, що пов'язані з появою режиму генерації (нестійкості) власних електромагнітних коливань комплектуючих прилади структур.*

5. Лосев Ф.В. Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения. / В. И. Кравченко, Ф. В. Лосев, И. В. Яковенко // Вісник НТУ"ХПІ" . – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – № 37. – С. 29 – 36.

*Здобувач розробив достовірні методи визначення критеріїв появи оборотних відмов в умовах дії імпульсного електромагнітного випромінювання.*

6. Лосев Ф.В. Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В. И. Кравченко, Ф. В. Лосев, И. В. Яковенко // Вісник НТУ "ХПІ" . – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – № 37. – С. 36 – 44.

*Здобувач побудовав математичні моделі появи оборотних відмов, обумовлених трансформацією енергії струмів в енергію електромагнітних коливань комплектуючих приладів.*

7. Лосев Ф. В. Влияние потока заряженных частиц, наведенного электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплектующих электрорадиоизделий. // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ".- 2006. – № 17. – С. 86 – 92.

*Здобувач отримав розрахункові співвідношення, що визначають відхилення вольт-амперних характеристик діодів від норми в залежності від параметрів випромінювання та властивостей матеріалів, що комплектують прилади.*

8. Лосев Ф.В. Взаимодействие потоков заряженных частиц, наведенных ЭМИ, с электромагнитными колебаниями полупроводниковых комплектующих электрорадиоизделий / В. И. Кравченко, Ф. В. Лосев, И. В. Яковенко // Электротехника и электромеханика . – 2006. – № 4. – С. 69 – 72.

*Здобувач отримав вирази для потужності випромінювання електромагнітних коливань напівпровідникових структур при наяві наведених струмів, що рухаються по нормалі до межі поділу середовищ.*

9. Лосев Ф.В. Неустойчивость поверхностных волн при их взаимодействии с потоком заряженных частиц в полупроводниковых структурах / В. И. Кравченко, Ф. В. Лосев, И. В. Яковенко // Электротехника и электромеханика . – 2006. – № 5. – С. 64 – 67.

*Здобувач отримав вирази для потужності випромінювання електромагнітних коливань напівпровідникових структур при наяві наведених струмів, що рухаються вздовж межі середовищ.*

10. Лосев Ф.В. Влияние стороннего импульсного электромагнитного излучения на рабочие характеристики полупроводниковых приборов / В. И. Кравченко, В. Н. Дныщенко, Ю. Н. Гирка, Ф. В. Лосев, И. В. Яковенко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2007. – № 20. – С. 13 – 20.

*Здобувач отримав експериментальні залежності між параметрами зовнішнього електромагнітного випромінювання та ступенем відхилення вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів в межах оборотних відмов (галузі негативного опору на ділянках прямого струму).*

11. Лосев Ф.В. Влияние стороннего электромагнитного излучения на работоспособность полупроводниковых комплектующих электрорадиоизделий / В. И. Кравченко, Ф. В. Лосев, И. В. Яковенко // Материалы XIII Международной научной школы – семинара. – Николаїв: “Миколаївська обласна друкарня.” – 2007. – С. 128 – 130.

*Здобувач отримав вирази для спектральних характеристик коливань напівпровідникових структур при наяві наведених струмів, що рухаються вздовж межі середовищ.*

## АНОТАЦІЇ

**Лосев Ф.В. Вплив сильних електричних полів на вольт-амперні характеристики напівпровідникових приладів.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів. Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2011.

Дисертація присвячена розробці достовірних експериментальних та розрахункових методів визначення критеріїв появи та кількісних характеристик оборотних відмов (відхилення вольт-амперних характеристик) напівпровідникової елементної бази електрорадіовиробів (діодів) в умовах дії імпульсного електромагнітного випромінювання. Побудована фізична модель появи та розвитку оборотних відмов напівпровідникових діодів, обумовлених трансформацією енергії струмів, наведених імпульсним електромагнітним випромінюванням, в енергію власних електромагнітних коливань напівпровідникових приладів. Отримані розрахункові співвідношення для визначення кількісних характеристик оборотних відмов напівпровідникових діодів (енергії випромінювання) в умовах перехідного та черенковського випромінювання. Проведені експериментальні дослідження впливу імпульсного електромагнітного випромінювання на вольт-амперні характеристики діодів у діапазоні робочих напруг та струмів приладів такого типу. Проведен порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень та розрахункових оцінок оборотних відмов, доведена адекватність запропонованої в роботі фізичної моделі появи відмов напівпровідникових приладів в умовах дії імпульсного випромінювання та можливість її застосування для отримання кількісних характеристик відмов такого роду.

*Ключові слова:* електротехнічні пристрої, методи моделювання

електромагнітних процесів, моделювання сильних електричних полів, вольт-амперна характеристика, енергія заряджених частинок, випромінювання, струм впливу.

**Лосев Ф.В. Влияние сильных электрических полей на вольт-амперные характеристики полупроводниковых приборов.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2011.

Диссертация посвящена разработке достоверных экспериментальных и расчетных методов определения критериев возникновения и количественных характеристик обратимых отказов (отклонения вольт-амперных характеристик) полупроводниковой элементной базы электрорадиоизделий (диодов) в условиях воздействия импульсного электромагнитного излучения.

Проведены исследования характера изменений работоспособности полупроводниковых комплектующих элементной базы технических средств в условиях воздействия сильных электромагнитных полей.

Построены физические модели возникновения и развития обратимых отказов полупроводниковых диодов, обусловленных трансформацией энергии токов, наведенных импульсным электромагнитным излучением, в энергию собственных электромагнитных колебаний полупроводниковых приборов. Показано, что взаимодействие наведенных токов и электромагнитных колебаний приводит к установлению режима генерации колебаний и появлению участков вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов с отрицательным дифференциальным сопротивлением, т.е. обратимым отказам.

Исследовано влияние токов, наведенных электромагнитным излучением на работоспособность полупроводниковых приборов в условиях, когда ток направлен вдоль поверхности полупроводниковой структуры (условия черенковского излучения). Получены расчетные соотношения, позволяющие определять характер и степень отклонения вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов – параметры обратимых отказов. Эти соотношения связывают величину потерь энергии наведенных токов на возбуждение электромагнитных колебаний с величиной воздействующего электромагнитного импульсного поля и физическими параметрами материалов, комплектующих данные приборы.

Исследовано влияние токов, наведенных электромагнитным излучением, на работоспособность полупроводниковых приборов в условиях, когда ток направлен по нормали к поверхности полупроводниковой структуры (условия переходного излучения). Получены расчетные соотношения, позволяющие определять характер и степень отклонения вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов в условиях переходного излучения. Эти соотношения связывают величину обратимых отказов (энергию излучения) с параметрами воздействующего электромагнитного импульсного поля и характеристиками материалов, комплектующих полупроводниковые приборы.

Проведены экспериментальные исследования влияния импульсного электромагнитного излучения на вольт-амперные характеристики полупроводниковых приборов: планарного кремниевого диода с барьером Шотки 2Д 922 В и эпитаксиального кремниевого диода КД 409 А в диапазоне токов и напряжений, характеризующих обратимые отказы (отсутствие теплового пробоя).

Экспериментально установлено, что воздействие внешнего импульсного электромагнитного поля (амплитуда напряженности электрического поля –  $E_0 = 10 - 30 \frac{\text{kV}}{\text{м}}$ , длительность импульса  $\Delta t_{\text{имп}} \approx 500$  нс) приводит к появлению участков вольт-амперных характеристик диодов с отрицательным сопротивлением. На этих участках увеличение прямого тока в диапазоне:  $\Delta I = 5 - 30$  мА сопровождается падением напряжения в диапазоне:  $\Delta U = (500 - 2000$  мВ) (области генерации колебаний).

Сравнительный анализ экспериментальных исследований обратимых отказов и их численных оценок, полученных расчетным путем, показали адекватность предложенной в диссертации физической модели возникновения и развития обратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях импульсного электромагнитного излучения:

Полученные экспериментальные и расчетные величины обратимых отказов диодов (энергия излучения собственных электромагнитных колебаний) определяются одним порядком величины –  $10^{-7} - 10^{-9}$  Дж, и имеют общие тенденции изменений в зависимости от параметров внешнего электромагнитного поля. Результаты экспериментальных исследований по определению зависимости энергии излучения от взаимной ориентации прямого тока диодов и напряженности внешнего электрического поля соответствуют физической модели потерь энергии наведенного тока на возбуждение электромагнитных колебаний для случаев переходного и черенковского излучения (энергия излучения обратно пропорциональна времени пролета заряженных частиц через полупроводниковую структуру).

Полученные в диссертации расчетные соотношения позволяют достоверно определять количественные характеристики обратимых отказов полупроводниковых приборов – отклонение вольт-амперных характеристик в зависимости от параметров электромагнитного излучения и физических свойств материалов, комплектующих прибор.

*Ключевые слова:* электротехнические приборы, методы моделирования электромагнитных процессов, моделирование сильных электрических полей, вольт-амперная характеристика, энергия заряженных частиц, излучение, ток влияния.

**Losev F.V. Influence of Strong Electric Fields on a Volt-Ampere Description of Semiconductor Devices. – Manuscript.**

The thesis is presented for Pr. D. degree receiving in the speciality 05.09.13 – high electric and magnetic fields technique, National Technical University “Kharkov

Politechnic Institute”, Kharkov, 2011.

Dissertation is devoted to development of reliable experimental and calculation methods of determination criteria of origin and quantitative descriptions of convertible refuses (rejections of volt–ampere descriptions) of semiconductor element base of electric and radio products (diodes) in the conditions of influence the impulsive electromagnetic radiation. The physical models of origin and development of convertible refuses of semiconductor diodes are built by condition on transformation of energy of currents, pointed by an impulsive electromagnetic radiation, in energy of electromagnetic variation of semiconductor devices. Calculation correlations are received, allowing to determine the degree of rejection of workers volt-ampere descriptions of semiconductor diodes from a norm, depending on the size of the influencing impulsive field and physical parameters of materials, for this devices. Experimental researches of influence of impulsive electromagnetic radiation are conducted on volt-ampere descriptions of semiconductor diodes in area of convertible refuses. The comparative analysis of received experimental and calculation sizes of convertible refuses is conducted in dissertation and explained the adequacy of the offered physical model and calculation correlations reseived on its basis is grounded for determination of quantitative descriptions of convertible refuses of semiconductor diodes in the conditions of influence of the external electromagnetic fields.

*Key words:* electrotechnic devices, methods of models of electromagnetic interaction, models of hight electric field, volt-ampere description, energy of charged particles, radiation, effect current.