

УДК 621.318

В.В. КНЯЗЕВ, В.И. КРАВЧЕНКО, И.В. ЯКОВЕНКО**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ
ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНЕГО
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

В работе предложена физическая модель возникновения обратимых отказов полупроводниковых диодов (влияния наведенных электромагнитным излучением (ЭМИ) токов на вольт-амперные характеристики приборов). Данная модель базируется на механизме преобразования энергии, наведенной внешним ЭМИ токов в энергию собственных электромагнитных колебаний твердотельных комплектующих радиоизделий (эффекте переходного излучения). Обоснована постановка экспериментальных исследований на базе предложенной физической модели обратимых отказов (появления областей вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов с отрицательным сопротивлением). Определены области параметров внешнего электромагнитного излучения и полупроводниковых приборов, при которых реализуется данная физическая модель. Проведены экспериментальные исследования влияния импульсного электромагнитного излучения на вольт – амперные характеристики участков прямого тока диодов. Они показали наличие участков с отрицательным дифференциальным сопротивлением, характеризующие режим генерации собственных колебаний (увеличение прямого тока при падении напряжения). Результаты сравнительного анализа, полученных в настоящей работе экспериментальных и расчетных данных, позволяют использовать предложенную физическую модель обратимых отказов, а полученные на ее основе расчетные соотношения могут служить основой для определения критериев возникновения и количественных характеристик обратимых отказов полупроводниковых диодов в условиях воздействия на них импульсного электромагнитного излучения.

Ключевые слова электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, неустойчивость, генерация, излучение, заряженные частицы, поверхностные волны

В.В. КНЯЗЕВ, В.И. КРАВЧЕНКО, И.В. ЯКОВЕНКО**ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИБОРІВ ТЕХНІЧНИХ
ЗАСОБІВ В УМОВАХ ДІЇ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

В роботі запропонована фізична модель виникнення оборотних відмов напівпровідникових діодів (впливу наведених електромагнітним випромінюванням (ЕМВ) струмів на вольт-амперні характеристики приладів). Дана модель базується на механізмі перетворення енергії, наведеної зовнішнім ЕМІ струмів в енергію власних електромагнітних коливань твердотільних комплектуючих радіовиробів (ефекті перехідного випромінювання). Обґрунтовано постановку експериментальних досліджень на базі запропонованої фізичної моделі оборотних відмов (появи областей вольт - амперних характеристик напівпровідникових діодів з негативним опором). Визначено області параметрів зовнішнього електромагнітного випромінювання і напівпровідникових приладів, при яких реалізується дана фізична модель. Проведено експериментальні дослідження впливу імпульсного електромагнітного випромінювання на вольт - амперні характеристики ділянок прямого струму діодів. Вони показали наявність ділянок з негативним диференціальним опором, що характеризують режим генерації власних коливань (збільшення прямого струму при падінні напруги). Результати порівняльного аналізу, отриманих в даній роботі експериментальних і розрахункових даних, дозволяють використовувати запропоновану фізичну модель оборотних відмов, а отримані на її основі розрахункові співвідношення можуть служити основою для визначення критеріїв виникнення і кількісних характеристик оборотних відмов напівпровідникових діодів в умовах впливу на них імпульсного електромагнітного випромінювання.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, нестійкість, генерування, випромінювання, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

V.V. KNYAZEV, V.I. KRAVCHENKO, I.V. YAKOVENKO**ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF SEMICONDUCTOR DEVICES OF TECHNICAL
MEANS IN CONDITIONS OF ACTION OF EXTERNAL ELECTROMAGNETIC RADIATION**

In the work is proposed a physical model of advent of reversible failures of semiconductor diodes (of influence of currents induced by electromagnetic radiation (EMR) on volt-ampere characteristics of devices). This model is based on the mechanism of transformation of energy induced by external EMR currents into energy of natural electromagnetic oscillations of solid-state component radio articles (effect of transient radiation). Statement of experimental investigations on the basis of the proposed physical model of reversible processes (advent of areas of volt-ampere characteristics of semiconductor diodes with negative resistance) was substantiated. Areas of parameters of external electromagnetic radiation and semiconductor devices, for those this physical model is realized, are determined. Experimental investigations of influence of pulsed electromagnetic radiation on volt-ampere characteristics of sections of forward current of diodes were conducted. They showed presence of sections with negative differential resistance characterizing the mode of generation of natural oscillations (increase of forward current with decrease of voltage). The results of comparative analysis of experimental and calculated data obtained in this work allow using this the proposed physical model of reversible failures, and

© В.В. Князев, В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, 2019

calculation relations obtained on its basis can serve as a basis for determination of criteria of advent and quantitative characteristics of reversible failures of semiconductor diodes in conditions when they are under action of pulsed electromagnetic radiation.

Keywords: electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor, instability, generation, radiation, charged particles, surface waves

Введение. В настоящее время большинство проблем, связанных с определением степени влияния на рабочие характеристики электрорадиоизделий (ЭРИ) наведенных токов, вызванных процессами взаимодействия внешних электромагнитных излучений (ЭМИ) с собственными электромагнитными колебаниями, возникающими непосредственно в комплектующих ЭРИ, остаются открытыми [1-5].

Между тем, именно взаимодействия такого рода определяют степень отклонения выходных характеристик от нормы, определяемой техническими требованиями на ЭРИ и возможности восстановления их нормального функционирования, т.е. критерии обратимых отказов (временной утраты их работоспособности).

В работе приведена физическая модель возникновения обратимых отказов полупроводниковых диодов (влияния наведенных электромагнитным излучением токов на вольт-амперные характеристики этих приборов). Модель базируется на механизме преобразования энергии наведенных внешним ЭМИ токов в энергию собственных электромагнитных колебаний твердотельных комплектующих радиоизделий (эффекте переходного излучения). Проведен комплекс экспериментальных исследований влияния импульсного электромагнитного излучения на вольт – амперные характеристики начальных участков прямого тока полупроводниковых р-п переходов. Результаты сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных позволяют использовать разработанную физическую модель обратимых отказов и применимость полученных расчетных соотношений для определения критериев возникновения и определения количественных характеристик уровня обратимых отказов.

Цель работы

1. Теоретические исследования влияния внешних ЭМИ на вольт-амперные характеристики полупроводниковых структур.

2. Экспериментальная оценка степени искажения вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов в условиях воздействия стороннего ЭМИ путем определение наличия участков прямого тока с отрицательным сопротивлением в зависимости от эксплуатационных характеристик диодов и параметров внешнего ЭМИ.

3. Проведение сравнительного анализа расчетных данных, полученных на основе предложенной физической модели и данных, полученных в ходе эксперимента.

Теоретические исследования. В работах [6,7] предложена модель преобразования энергии наведенных внешним ЭМИ токов в энергию собственных электромагнитных колебаний твердотельных комплектующих ЭРИ, что и приводит к появлению обратимых отказов последних (временными изменениями

их рабочих характеристик).

Возможность данного преобразования энергии определяется эффектом переходного излучения. Этот эффект реализуется, когда наведенный ток (направление вектора напряженности электрического поля, действующего ЭМИ) перпендикулярен границам полупроводникового прибора (в частности диода) и состоит в следующем [6].

При движении заряда в материальной среде, создаваемое им электромагнитное поле определяется не только величиной заряда и его скорости, но и диэлектрическими свойствами среды распространения. Если эти свойства меняются, когда заряд с постоянной скоростью пересекает границу раздела сред (полупроводниковой структуры), то создаваемое зарядом поле меняется, часть поля отрывается от частицы и может излучаться в пространство. Возникающее при этом излучение получило название как переходное. В результате, при прохождении потока частиц, наведенных ЭМИ, через полупроводниковую структуру происходит непрерывный процесс преобразования энергии зарядов в энергию собственных колебаний поля, т.е. в структуре устанавливается режим генерации колебаний.

Таким образом, электронная система теряет часть своей энергии, т.е. рост тока сопровождается падением напряжения, что и приводит к появлению участков ВАХ с отрицательным сопротивлением. Режим (генерации) (неустойчивости колебаний) характеризуется экспоненциальным ростом амплитуды собственных колебаний структуры вида ($\approx \exp(+\gamma t)$), где γ – инкремент неустойчивости.

Результаты исследований пучковых неустойчивостей (определение величины инкремента неустойчивости γ), полученные в работе [8], позволяют оценить величину энергии излучения собственных колебаний и получить расчетные соотношения между параметрами воздействующего импульсного поля, параметрами полупроводникового прибора и степенью отклонения их вольт-амперных характеристик (ВАХ) на участке прямого тока.

Мощность излучения $\Delta P_{\text{изл}}$ собственных колебаний полупроводникового прибора в условиях воздействия внешнего поля (наличия наведенного тока) можно определить как потери энергии поступательного движения потока частиц (кинетической энергии) за время прохождения потоком частиц области локализации поля поверхностной волны.

$$\Delta P_{\text{изл}} = \frac{\Delta W_{\text{кин}}}{\Delta t}, \quad (1)$$

где $\Delta W_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2} (n_{\text{об}} V)$;

$\frac{mv^2}{2}$ – кинетическая энергия частицы пучка, на-

веденного внешним импульсом;

n_{ob} , v , e , m – соответственно концентрация, дрейфовая скорость, заряд и масса электронов пучка;

V – объем, занимаемый наведенным током (объем твердотельной структуры). В режиме пучковой неустойчивости дрейфовая скорость $v \approx v_0 \exp(+\gamma t)$, поэтому:

$$\Delta P_{изл} \approx m v_0^2 \gamma (n_{ob} V), \quad (2)$$

где $\gamma \approx \left(\frac{\omega_b^2}{\omega_1^2} \right) \frac{1}{\tau}$ – инкремент пучковой неустойчивости

поверхностных колебаний структуры с собственной частотой ω_1 , комплекующей полупроводниковый прибор (поверхностных поляритонов) [6];

$$\omega_b = \left(\frac{4\pi e^2 n_{ob}}{m} \right)^{1/2} - \text{плазменная частота электронов}$$

потока, наведенного внешним ЭМИ;

τ – время пролета заряда области локализации колебаний.

Таким образом, энергия излучения $\Delta W_{изл}$ за время воздействия импульса напряжения $\Delta t_{имп}$ внешнего ЭМИ определяется выражением

$$\Delta W_{изл} = \Delta P_{изл} \Delta t_{имп} = m v_0^2 \gamma \left(\frac{\omega_b^2}{\omega_1^2} \right) \frac{1}{\tau} (n_{ob} V) \Delta t_{имп}. \quad (3)$$

Параметры определяющие величину $\Delta W_{изл}$ можно оценить используя существующие экспериментальные зависимости величины наведенных токов исследуемых структур [7-10] (т.е. величины концентрации n_b , дрейфовой скорости v_0 , ленгмюровской частоты электронов наведенного тока ω_b) от параметров внешнего импульсного электрического поля (амплитуды E_0 и длительности $\Delta t_{имп}$). Собственные частоты ω_1 определяются параметрами структуры, комплекующей исследуемый полупроводниковый прибор (концентрацией носителей тока, диэлектрической проницаемостью и размерами). Для высокочастотных и импульсных полупроводниковых диодов, исследуемых в настоящей работе, частоты ω_1 лежат в субмиллиметровом диапазоне [11].

Воспользовавшись соотношением (3), можно оценить потери энергии наведенных внешним ЭМИ токов на возбуждение собственных колебаний структур металл – полупроводник – диэлектрик, свойственных полупроводниковым диодам.

Очевидно, что режим генерации в полупроводниковых приборах приводит к появлению S-образных участков прямого тока с отрицательным дифференциальным сопротивлением на вольт-амперной характеристике (ВАХ) прибора [11] (рис. 1), поскольку отрицательное сопротивление характеризует потери энергии электронной системы твердотельной структуры на излучение – участок А–В, т.е.

$$dR = \frac{dU}{dI} < 0; \quad dU < 0; \quad dI > 0.$$

Таким образом, результате воздействия стороннего ЭМИ, увеличение прямого тока сопровождается уменьшением напряжения на диоде.

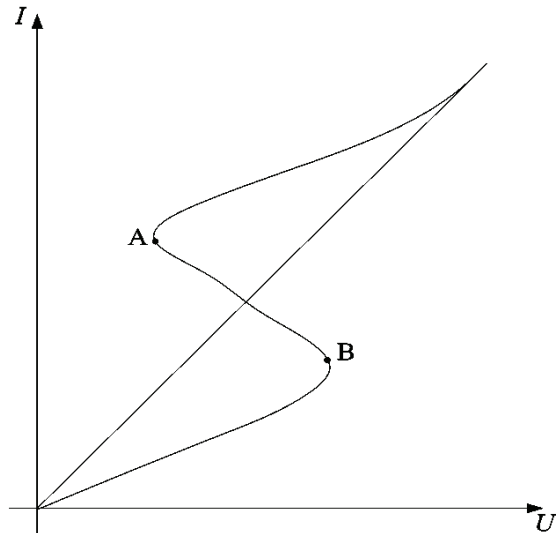


Рисунок 1 – Вольт-амперная характеристика диода (прямой ток) (А-В – искажение ВАХ в условиях воздействия ЭМИ)

Наличие области с отрицательным сопротивлением на вольт-амперной характеристике характеризует возможность появления одного из типов обратимых отказов (временного изменения ВАХ) как следствие трансформации энергии наведенного тока в энергию колебаний, которая излучается в окружающее пространство.

В результате потери энергии наведенного тока за время воздействия импульса напряжения $\Delta t_{имп}$ в процессе эксперимента можно оценить следующим соотношением:

$$\Delta W_{изл} = \Delta P_{изл} \Delta t_{имп} = I_{изл} U_{изл} \Delta t_{имп}, \quad (4)$$

где $I_{изл}$ – величина прямого тока диода на участке ВАХ (А–В, см. рис. 1);

$U_{изл}$ – напряжение на участке ВАХ (А–В, см. рис. 1) в условиях воздействия внешнего ЭМИ.

Экспериментальные исследования. Объектом исследования являются вольт-амперные характеристики следующих полупроводниковых приборов в условиях воздействия импульсного электромагнитного излучения:

– диод кремниевый, планарный с барьером Шоттки 2Д 922 2В,

– диод кремниевый эпитаксиальный КД 409 А.

Выбор в качестве объекта экспериментальных исследований указанных типов диодов обусловлен тем что диапазон их рабочих характеристик (силы тока и напряжения на участке прямого смещения) при длительности воздействующего импульса напряженности электрического поля с длительностью порядка нескольких сотен нс, и амплитуде импульса порядка 10–30 кВ/м определяют диапазон энергии излучения собственных электромагнитных колебаний полупроводниковых структур комплекующих эти приборы – $10^{-7} - 10^{-9}$ Дж. В этом же диапазоне лежит энергия излучения, определяемая, исходя из предложенной в настоящей работе физической модели.

При этом характер отклонения вольт-амперной

характеристики, полученной в ходе эксперимента (наличие участков с отрицательным сопротивлением) не зависел от амплитуды импульса воздействующего напряжения.

Эти приборы используются в быстродействующих импульсных устройствах для преобразования переменного напряжения. Электрические характеристики и параметры диодов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Электрические параметры диодов и требования к параметрам эталона РЭМП

Характеристики		2Д922В	ЕД409А	
Электрические параметры	Постоянный обратный ток, мкА	$T_1 = 25^\circ\text{C}$	$0,5(U_{\text{обр}}=10\text{В})$	
		$T_2 = 100^\circ\text{C}$	$10(U_{\text{обр}}=10\text{В})$	
	Общая емкость, пФ		$1,0(U_{\text{обр}}=0)$	$2,0(U_{\text{обр}}=15\text{В})$
	Индуктивность, нГн		1,0	4,0
Предельные эксплуатационные данные	Постоянное обратное напряжение, В		10	24
	Постоянный прямой ток, мА	$T_1 = 35^\circ\text{C}$	10	15
		$T_2 = 100^\circ\text{C}$		25
	Импульсный прямой ток, мА, $t_u < 10$ мкс, $Q \geq 10$	$T_1 = 25^\circ\text{C}$	20	500
		$T_2 = 100^\circ\text{C}$		250
Температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$		от -60°C до $+100^\circ\text{C}$		

Таблица 2 – Параметры воздействующего импульса

Параметр	Величина
1. Напряженность электрического поля, кВ/м	от 10^{-3} до 200
2. Напряженность магнитного поля, А/м	от 0,1 до 530
3. Длительность фронта импульса, не более, нс	1
4. Длительность импульса на уровне 0,5, не более, мкс	100
5. Размеры рабочего объема, не менее, мм: • в плане • по высоте	500x500 150

Экспериментальные исследования процессов влияния импульсного электромагнитного поля на работоспособность полупроводниковых приборов проводились с помощью Исходного Эталона Украины импульсных электрических и магнитных полей (далее – Эталон РЭМП) разработанного и созданного в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» [6].

Установка состоит из высоковольтного импульсного источника питания (ВИП), разряжаемого на полеобразующую систему (ПС) в виде симметричной замкнутой полосковой линии (ПЛ) (рис. 2).

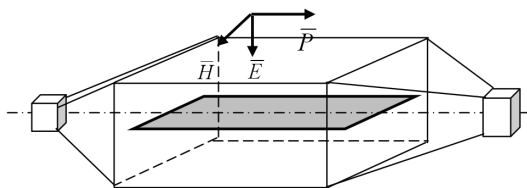


Рисунок 2 – Симметричная замкнутая полосковая линия

Источник ВИП генерирует однократные импульсы высокого напряжения, временные параметры которых приведены в табл. 1, а амплитуды этих импульсов должны обеспечивать создание необходимых уровней и H полей с учетом преобразования ПС.

Основные требования к ПС – это создание E и H полей с равномерной структурой, определенными направлениями векторов полей и легко рассчитываемыми амплитудами полей по геометрическим размерам ПЛС. Наиболее удовлетворяют указанным требовани-

ям к ПС направляющие системы типа полосковых линий (ПЛ).

Вдоль ПЛ распространяется плоская электромагнитная волна ТЕМ-типа, которая в любом поперечном сечении ПЛ имеет однозначное направление векторов E и H -полей. Габариты ПЛ определяют габариты рабочего объема, в котором располагался испытуемый объект (схема включения полупроводникового диода). При этом габариты ПЛ выбраны таким образом, чтобы волновое сопротивление ПЛ составляло 50 Ом.

При проведении экспериментальных исследований влияния ЭМИ на рабочие характеристики полупроводниковых диодов использовалась полосковая линия ПЛ-24 высотой 24 см, формирующая наносекундные импульсы, поскольку исследованные в работе механизмы влияния внешнего электромагнитного поля реализуются в данном временном диапазоне.

При проведении экспериментальных исследований один из указанных диодов последовательно соединялся с источником постоянного тока и сопротивлениями, одно из которых (R_1) позволяло менять силу тока диода (I), другое ($R_2 = 50$ Ом) – обеспечивало режим согласования с кабелем, ведущим к осциллографу (регистратору) (рис. 3).

Схема, за исключением диода, помещалась в экранированный объем и была вынесена за систему полеобразования. Сам объект, воздействия импульсного электромагнитного поля (диод) располагался между пластин полосковой линии. На рис. 3 показаны варианты расположения диода относительно воздействующего внешнего поля.

Постоянный прямой ток диода (I) увеличивался от 5 до 30 мА.

Временные параметры воздействующего импульса напряженности создаваемого в системе ПЛ:

- длительность фронта – 0,5 нс;
- длительность импульса напряженности ($\Delta t_{\text{имп}}$) – 500 нс.

В ходе эксперимента было исследовано влияние импульсного электромагнитного поля с амплитудами напряженности $E = 10$ кВ/м; 20 кВ/м; 30 кВ/м на величину результирующего импульса напряжения (U) на испытуемом объекте (диоде) (см. табл. 2).

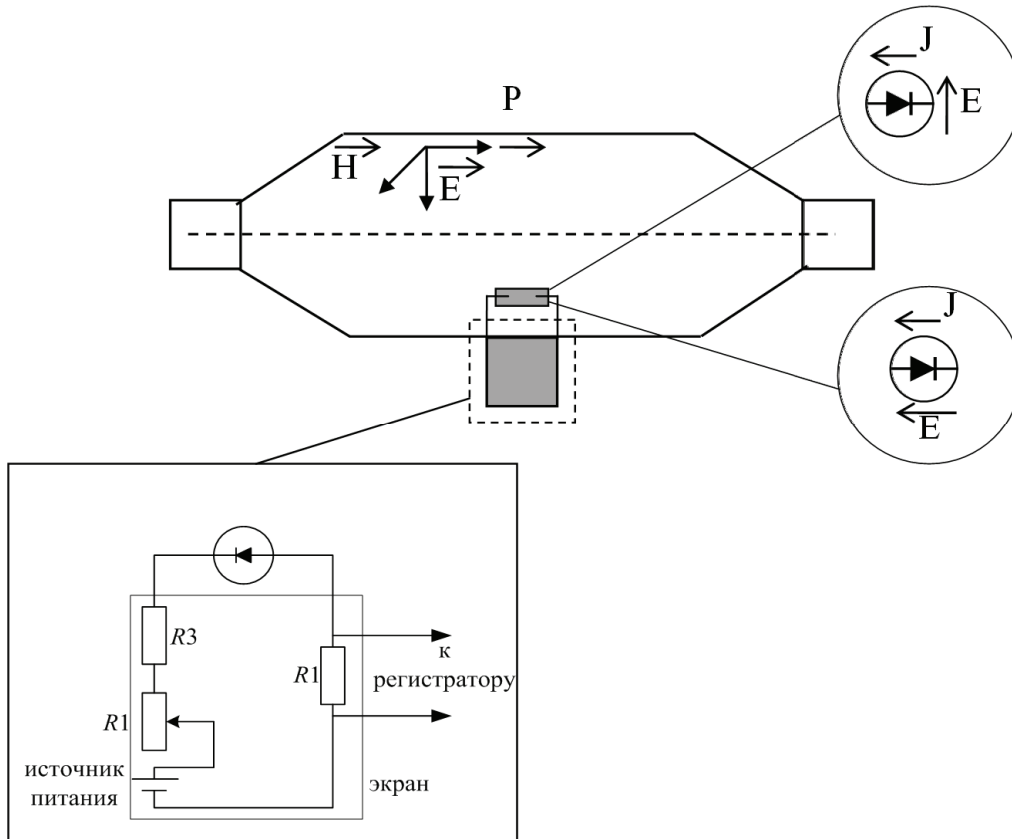


Рисунок 3 – Варианты расположения объекта испытаний в системе полеобразования.

Каждый шаг увеличения тока диода с интервалом $\Delta I = 5$ мА сопровождался воздействием импульса ЭМИ в системе полеобразования.

Эволюция амплитуды импульса напряжения (U) на диодах в зависимости от пошагового изменения прямого тока (I) при одновременном воздействии внешнего ЭМИ регистрировалась осциллографом.

Таким образом, были получены зависимости амплитуды импульса напряжения (U) от величины прямого тока диода (I) для каждого из указанных уровней воздействующего ЭМИ ($E = 10$ кВ/м; 20 кВ/м; 30 кВ/м) и определялся соответствующий участок вольт – амперной характеристики.

Зависимости амплитуд импульса напряжения от прямого тока диодов приведены соответственно в табл. 3. Полученные данные показывают, что с ростом тока наблюдается уменьшение амплитуды импульса напряжения, что соответствует участку ВАХ с отрицательным сопротивлением (участок А-В на рис. 1) – области генерации колебаний.

Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований и расчетных данных

Приведем сравнительный анализ величин энергии излучения собственных колебаний полупроводниковых диодов 2 D922 В; KD409А, полученных экспериментально, с количественными оценками величины энергии излучения, полученных расчетным путем на основе физической модели обратимых отказов полупроводниковых приборов в предложенной работе.

Таблица 3 – Эволюция амплитуды импульса напряжения U (мВ) диод кремниевого эпитаксиального КД 409 А и кремниевого планарного с барьером Шоттки 2Д922В в зависимости от прямого тока диода I (мА)

KD409A Прямой ток диода I (мА)	Амплитуда импульса напряжения 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
2D922B Прямой ток диода I (мА)	Амплитуда импульса напряжения 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

В результате эксперимента было установлено, что увеличение прямого тока диода 2 D922 В в диапазоне $\Delta I \approx 5-30$ мА (амплитуда импульса воздействующего напряжения лежит в пределах $E_0 \approx 10-30$ кВ/м) приводит к падению амплитуды импульса напряжения на диоде в пределах $\Delta U \approx 1550-2800$ мВ. Это означает, что на вольт – амперной характеристике диода появляется участок с отрицательным сопротивлением (участок А-В рис. 1).

При длительности импульса $\Delta t_{\text{имп}} \approx 500$ нс, диапазон энергии излучения, определяемый с помощью соотношения (4), составляет $\Delta W_{\text{изл}} \approx 0,6 \cdot 10^{-9} - 1,2 \cdot 10^{-8}$ Дж.

Для диода КД409А, при аналогичных параметрах воздействующего импульса и в тех-же диапазонах прямого тока падение амплитуды импульса напряжения на диоде находится в пределах $\Delta U \approx 950 - 1400$ мВ, а энергия излучения составляет $\Delta W_{\text{изл}} \approx 0,3 \cdot 10^{-9} - 0,8 \cdot 10^{-8}$ Дж.

Определим теперь энергетические потери потоков заряженных частиц, наведенных внешним импульсным излучением на возбуждение собственных колебаний твердотельных структур, используя предложенную в работе физическую модель обратимых отказов (соотношение (3)).

Величины параметров, определяющих величину $\Delta W_{\text{изл}}$, можно оценить, используя существующие экспериментальные зависимости величины наведенных токов в кремниевых структурах, комплектующих исследуемые объекты – диоды [4] от напряженностей внешнего электрического поля E_0 (т.е. величины концентрации электронов наведенного тока n_b (ленгмюровской частоты электронов наведенного тока

$$\omega_b^2 = \frac{4\pi e^2 n_b}{m})$$
 и дрейфовой скорости v_0 .

При изменении параметров воздействующего импульса, аналогичных использованному в эксперименте ($E_0 \approx 10 - 30$ кВ/м, $\Delta t_{\text{имп}} \approx 500$ нс) для исследуемых кремниевых диодов 2Д 922 В и КД 409 А они лежат в диапазоне: $n_b \approx 10^{10} - 10^{12}$ см $^{-3}$; $v_0 \approx 10^6 - 10^7$ см/с; $\omega_b \approx 10^9$ с $^{-1}$.

Собственные частоты (поверхностные поляритоны) структур ω_1 , комплектующих диоды, определяются величиной ленгмюровских колебаний

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_0}{m}},$$
 т.е. концентрацией n_0 электронов полупроводника, комплектующих диоды – $\omega_1 \approx \omega_0 \approx 10^{10} - 10^{11}$ с $^{-1}$ [11].

Величина $\Delta W_{\text{изл}}$ при этом, согласно (3), составляет $10^{-7} - 10^{-9}$ Дж.

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных показывает, что величина энергии переходного излучения для исследованных полупроводниковых приборов (диодов) определяется одним порядком величины $\Delta W_{\text{изл}} \approx 10^{-7} - 10^{-9}$ Дж и имеет общие тенденции роста величины энергии излучения в зависимости от физических параметров комплектующих материалов и характеристик (увеличения амплитуды) воздействующего импульса напряжения.

Выводы

1. Обоснована постановка экспериментальных исследований предложенной в работе [6] физической модели возникновения обратимых отказов (влияния наведенных электромагнитным излучением токов на вольт-амперные характеристики полупроводниковых приборов). Определены области параметров внешнего электромагнитного излучения при которых реализуется

данная физическая модель (амплитуда напряженности электрического поля $E < 100$ кВ/м, длительность импульса $\Delta t_{\text{имп}} \approx 10^2 - 10^3$ нс).

2. Проведены экспериментальные исследования влияния импульсного электромагнитного излучения (амплитуда напряженности электрического поля $E \approx 10 - 30$ кВ/м, длительность импульса $\Delta t_{\text{имп}} \approx 500$ нс) на вольт – амперные характеристики участков прямого тока диодов (кремниевого планарного с барьером Шоттки 2Д922В, кремниевого эпитаксиального КД409А). Они показали наличие участков с отрицательным дифференциальным сопротивлением, характеризующие режим генерации собственных колебаний данных приборов (увеличение прямого тока при падении напряжения).

3. Результаты сравнительного анализа полученных в настоящей работе экспериментальных и расчетных данных позволяют использовать предложенную физическую модель обратимых отказов и полученные на ее основе расчетные соотношения для определения критериев возникновения и количественных характеристик обратимых отказов полупроводниковых диодов в условиях воздействия импульсного электромагнитного излучения. (появлению S-образных участков прямого тока).

Список литературы

1. Белецкий Н.Н., Светличный В.М., Халамейда Д.Д., Яковенко В.М. Электромагнитные явления СВЧ-диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах. Киев: Наукова думка, 1991. 216 с.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Москва: Мир, 1984. 456 с.
3. Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Электромагнитные влияния на сооружения связи. Москва: Радио и связь, 1979. 225 с.
4. Стил М., Вюраль Б. Взаимодействие волн в плазме твердого тела. Москва: Атомиздат, 1973. 312 с.
5. Мырова Л.О., Четиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. Москва: Радио и связь, 1988. 235 с.
6. Кравченко В.И., Яковенко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковых комплектующих электрорадиоизделий. Вестник НТУ «ХПИ». 2009. № 11. С. 62-69.
7. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Возбуждение электромагнитных колебаний в 2-Д электронных структурах токами, наведенными внешним излучением. Вестник НТУ «ХПИ». 2012. № 21. С. 154-161.
8. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Генерация электромагнитных колебаний полупроводниковой структуры в условиях стороннего электромагнитного воздействия. Вестник НТУ «ХПИ». 2012. № 21. С. 161-169.
9. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплектующих электрорадиоизделий. Вестник НТУ «ХПИ». 2013. № 27. С. 83-89.
10. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения. Вестник НТУ «ХПИ». 2013. № 27. С. 96-103.

11. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения. Вестник НТУ «ХПИ». 2013. № 27. С. 103-111.

References (transliterated)

1. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M. Jelektromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah [Electromagnetic phenomena of the microwave range in inhomogeneous semiconductor structures]. Kyiv: Naukova dumka. 1991. 216 p.

2. Zi C. Fizika poluprovodnikovyh priborov [Physics of semiconductor devices]. Moscow: Mir. 1984. 456 p.

3. Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. Jelektromagnitnye vlijaniya na sooruzhenija svjazi. Moscow: Radio i svjaz'. 1979. 225 p.

4. Stil M., Vjural' B. Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela [Electromagnetic influences on communications structures]. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 p.

5. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim jelektromagnitnym izluchenijam [Ensuring the durability of communication equipment to ionizing electromagnetic radiation]. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235 p.

6. Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhij jelektroradioizdelij [Influence of external electromagnetic radiation on the waveguide characteristics of semiconductor components of electronic products]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2009. No 11. P. 62-69.

7. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vozbuzhdenie jelektromagnitnyh kolebanij v 2-D jelektronnyh strukturah tokami, navedennymi vneshnim izlucheniem. Vestnik

NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2012. № 21. P.154-161.

8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Generacija jelektromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnego jelektromagnitnogo vozdejstviya [Generation of electromagnetic oscillations of a semiconductor structure under conditions of external electromagnetic influence]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2012. No 21. P. 161-169.

9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhenykh chastic. Navedennogo vneshnim jelektromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhij jelektroradioizdelij [Influence of the flow of charged particles. Induced by external electromagnetic radiation, on the waveguide characteristics of semiconductor components of electronic products]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2013. No 27. P. 83-89.

10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyh stuktur jelektroradioizdelij v uslovijah vozdejstviya storonnego jelektromagnitnogo izluchenija [Attenuation of surface oscillations of semiconductor structures of electronic products under conditions of exposure to external electromagnetic radiation]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2013. No 27. P. 96-103.

11. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstviya poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovyh struktur v uslovijah vozdejstviya storonnego jelektromagnitnogo izluchenija [Kinetic mechanisms of interaction of surface oscillations with conduction electrons of semiconductor structures under the influence of external electromagnetic radiation]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2013. No 27. P. 103-111.

Поступила (received) 27.09.2019.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Князев Володимир Володимирович (Князев Владимир Владимирович, Kniaziev Volodymyr) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник; м. Харків, Україна; ORCID 0000-0002-7119-7790; e-mail: knyaz2@i.ua.

Кравченко Володимир Іванович (Кравченко Владимир Иванович, Kravchenko Volodymyr Ivanovych) – доктор технічних наук, професор, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», головний науковий співробітник; м. Харків, Україна; e-mail: tc22@i.ua.

Яковенко Ігор Володимирович (Яковенко Игорь Владимирович, Yakovenko Igor Vladimirovich) – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри Системи інформації Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», головний науковий співробітник; м. Харків, Україна; тел. (057) 707 66 18; e-mail: yakovenko60IV@ukr.net