

Список литературы: 1 Техническое задание на разработку и создание Эталона РЭМП от 18.05.2003 г. 2. Исходный Эталон Украины единиц импульсных электрического и магнитного полей. Руководство по эксплуатации. Эталон РЭМП-000.000.000 РЭ. 3. *Ковалев И.С.* Конструирование и расчет полосковых устройств. – М., 1974. – 296 с. 4. ГОСТ 17512–82. Электрооборудование и электроустановки на напряжение 3 кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением.

Поступила в редколлегию 04.06.2007.

УДК 621.318

В.И.КРАВЧЕНКО, докт.техн.наук; **В.Н.ДНЫЩЕНКО; Ю.Н.ГИРКА;**
Ф.В.ЛОСЕВ; И.В.ЯКОВЕНКО, докт.физ.-мат.наук; НТУУ «ХПИ»

ВЛИЯНИЕ СТОРОННЕГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Експериментально доведено, що дія імпульсного електромагнітного випромінювання (ЕМВ) на напівпровідникові прилади (кремнієві діоди) супроводжується відхиленням їх вольт-амперних характеристик (появою зворотних відказів). Показано що такого роду зміни робочих характеристик приладів пов'язано з генерацією власних електромагнітних коливань напівпровідникових комплектуючих приладів при їх взаємодії з токами, наведеними зовнішнім випромінюванням.

It has been experimentally proved that pulse electromagnetic radiation effect (EMC) on semiconductor devices (silicon diodes) is accompanied by deviation of their volt-ampere characteristics (appearance of reverse refusals). It was shown that such a type of change of working characteristics of the devices is connected with generator of natural electromagnetic oscillators of semiconductors components with currents induced by external radiation.

Введение. Все многообразие отказов, возникающих в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА), как результат воздействия сторонних факторов, принято разделять на обратимые и необратимые [1]. Необратимые отказы характеризуются полной утратой работоспособности РЭА. Они наступают в случае, когда изменение внутренних параметров аппаратуры превышает допустимые пределы (при воздействии внешнего электромагнитного излучения (ЭМИ), необратимые отказы обычно возникают как следствие теплового пробоя комплектующих). Для обратимых отказов характерна временная утрата работоспособности, приводящая к искажению выходных характеристик.

Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния ЭМИ на радиоизделия относятся к области необратимых отказов. Моделирование механизмов взаимодействия наведенных ЭМИ токов и напряжений с процессами, характеризующими функциональ-

ное назначение изделий, обычно проводится в рамках теории цепей с распределенными параметрами. Этот подход позволяет оценить критерии работоспособности в целом (например, оценить критическую энергию, характеризующую тепловой пробой), однако, вопросы связанные с определением различного рода электромагнитных взаимодействий, протекающих непосредственно в комплектующих изделия при воздействии ЭМИ, относящиеся к области обратимых отказов, остаются открытыми.

Вместе с тем, расширение областей применения и возрастание быстродействия РЭА приводит к необходимости все большего использования элементной базы, содержащей изделия полупроводниковой электроники [2]. Это увеличивает степень влияния внешнего электромагнитного излучения (ЭМИ) на работоспособность РЭА, к воздействию которого полупроводниковые комплектующие обладают повышенной чувствительностью.

Настоящая работа в определенной степени компенсирует существующий пробел в этой области исследований обратимых отказов. В ней экспериментально исследуется влияние импульсного электромагнитного излучения на рабочие характеристики полупроводниковых диодов.

Основные результаты.

В работах [3], [4] предложена модель взаимодействия наведенных внешним ЭМИ токов с электромагнитными колебаниями твердотельных структур входящих в состав полупроводниковых приборов (в частности, диоды). Было показано, что взаимодействие волн и заряженных частиц приводит к возможности генерации электромагнитных колебаний данной структуры. Были получены расчетные соотношения, связывающие величину энергетических потерь наведенных токов на возбуждение колебаний с параметрами структур: концентрацией свободных носителей, их дрейфовой скоростью, диэлектрической проницаемостью и размерами структуры.

Приведенные в данных работах количественные оценки показывают, что величина энергии излучения при длительности внешнего импульса напряженности порядка 100-500 нс, амплитуде импульса напряженности электрического поля порядка 10 – 50 кВ/м для большинства полупроводниковых структур, используемых в современной СВЧ-электронике находится в пределах чувствительности современных приемников излучения субмиллиметрового диапазона. Величина энергии излучения для указанных параметров находится в пределах $10^{-7} - 10^{-9}$ Дж.

Очевидно, что режим генерации в полупроводниковых приборах приводит к появлению участков с отрицательным дифференциальным сопротивлением на вольтамперной характеристике (ВАХ) прибора, поскольку отрицательное сопротивление характеризует потери энергии электронной системы твердотельной структуры ($dR = -\frac{dU}{dI} < 0$, $dU < 0$; $dI > 0$ участок А – В на

рис. 1). Наличие области с отрицательным сопротивлением на вольт-амперной характеристике является следствием трансформации энергии наведенного тока в энергию колебаний, которые излучаются в окружающее пространство. В результате электронная система диода теряет свою энергию и эта дополнительная энергия является отрицательной величиной.

$$\Delta W = \Delta U \Delta I < 0.$$

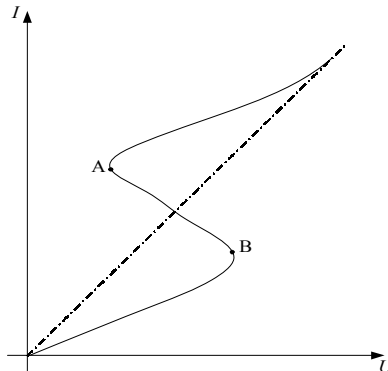


Рисунок 1 – ВАХ диода:
 - · - · - · - ВАХ диода без воздействия ЭМИ;
 ————— в условиях воздействия ЭМИ

Целью настоящей работы было экспериментальное определение степени искажения вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов в условиях воздействия ЭМИ, установление наличия участков с отрицательным сопротивлением ВАХ для параметров воздействующего импульса напряжения и полупроводниковых структур, рассмотренных в работах [3], [4].

Кроме того, целью данной работы было проведение сравнительного анализа расчетных данных, полученных с использованием физических моделей [3], [4] и величин энергии излучения, полученных экспериментально.

Объектом исследования являются вольтамперные характеристики следующих полупроводниковых приборов в условиях воздействия стороннего импульсного электромагнитного напряжения: диод кремниевый, планарный с барьером Шотки 2Д922В, диод кремниевый эпитаксиальный КД409А. Эти приборы используются в быстродействующих импульсных устройствах для преобразования переменного напряжения. Их электрические параметры и эксплуатационные данные приведены в табл. 1.

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) расположенного в

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

Источник ВИП генерирует однократные импульсы высокого напряжения, параметры которых приведены в табл. 2.

Таблица 1

Характеристики		2Д922В	КД409А	
Электрические параметры	Постоянный обратный ток, мкА	$T_1 = 25^\circ\text{C}$	0,5 ($U_{\text{обр}} = 10\text{В}$)	то же при $U_{\text{обр}} = 24\text{В}$
		$T_2 = 100^\circ\text{C}$	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 $t_{\text{и}} \leq 10\text{мкс}$, $Q \geq 10$	$T_1 = 25^\circ\text{C}$	20	500
		$T_2 = 100^\circ\text{C}$		250
Температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$		от -60°C до $+100^\circ\text{C}$		

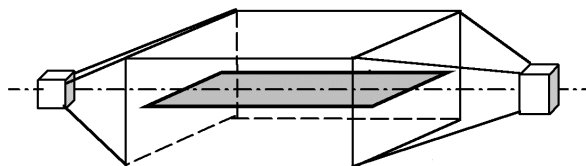


Рисунок 2 – Симметричная замкнутая ПЛ

Таблица 2 – Требования к параметрам Эталона РЭМП

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, нс, не более	1
4. Длительность импульса на уровне 0,5, мкс, не более	100
5. Размеры рабочего объема, мм, не менее:	
▪ в плане	500×500
▪ по высоте	150

ПЛ – это два достаточно длинных ленточных проводника шириной b и длиной ℓ , расположенных параллельно на расстоянии h друг от друга и у ко-

торых выполняется требования:

$$b, \ell > h; \quad (1)$$

$$d \ll b, \ell, h; \quad (2)$$

$$\lambda < h, b, \ell, \quad (3)$$

где λ – эквивалентная длина волны.

ПЛ хорошо изучены [5], [6] и, что самое главное, вдоль них распространяется плоская электромагнитная волна ТЕМ-типа, которая в любом поперечном сечении ПЛ имеет однозначное направление векторов \vec{E} и \vec{H} - полей (рис. 3), а их соотношение определяется формулами:

$$E / H = 120\pi; \quad (4)$$

$$E = \frac{U}{H}. \quad (5)$$

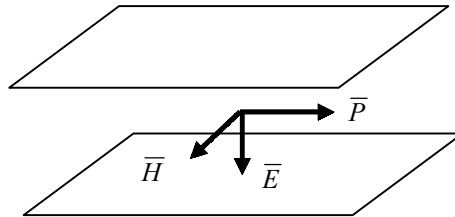


Рисунок 3 – Направление векторов электромагнитного поля в ПЛ

При проведении экспериментальных исследований нами использовалась полосковая линия, используемая для формирования наносекундных импульсов, поскольку исследованные в работе механизмы влияния внешнего электромагнитного поля на характеристики полупроводниковых диодов реализуются в данном временном диапазоне.

При проведении экспериментальных исследований один из указанных диодов последовательно соединялся с источником постоянного тока и двумя сопротивлениями, одно из которых ($R1$) позволяло менять силу тока диода I , другое ($R1$) – обеспечивало режим согласования с кабелем, ведущим к осциллографу (рис. 4).

Схема, за исключением диода, помещалась в экранированный объем и была вынесена за систему полеобразования. Диод располагался между электродами полосковой линии. В ходе эксперимента было исследовано влияние импульсного электромагнитного поля на вольтамперную характеристику диода.

На участке прямого тока было рассмотрено два способа расположения воздействующего поля (а значит и наведенного тока) относительно постоянного тока диода I :

1) вектор напряженности внешнего электрического поля направлен па-

раллельно постоянному току диода (этот случай соответствует механизму переходного излучения [3]);

2) вектор напряженности внешнего электрического поля направлен перпендикулярно постоянному току диода (механизм черенковского излучения [4]).

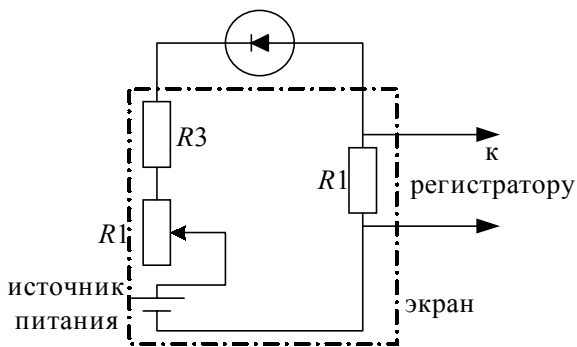


Рисунок 4 – Схема эксперимента

Постоянный ток на диоде I увеличивался от 2 до 30 мА. Каждый шаг увеличения тока диода I сопровождался воздействием импульса напряжения. Результирующее напряжение на диоде регистрировалось осциллографом.

Временные параметры воздействующего импульса напряжения

- длительность фронта – 0,5 нс;
- длительность импульса напряженности – 500 нс.

Было рассмотрено воздействие импульсного электромагнитного поля с амплитудами напряженности $E = 10$ кВ/м, 20 кВ/м, 30 кВ/м.

Вольтамперные характеристики прямого тока диодов для данных уровней напряженности воздействующего импульса для различных конфигураций напряженности внешнего поля и тока диода (параллельного и нормального) представлены на рис. 5 и 6.

Анализ экспериментально полученных вольтамперных характеристик указывает на наличие участков с отрицательной дифференциальной проводимостью, поскольку увеличение тока сопровождалось уменьшением суммарного (с учетом внешнего воздействия) напряжения на диоде. При этом характер отклонения вольтамперной характеристики не зависел от амплитуды импульса воздействующего напряжения. Этот режим роста энергии излучения электромагнитных колебаний полупроводниковых приборов за счет энергии наведенных токов определялся механизмами пучковых неустойчивостей, рассмотренных в работах [3], [4].

Количественные оценки энергии излучения сделанные, исходя из экспериментальных данных настоящей работы и полученных расчетным путем

исходя из физических моделей [3], [4], определяются одним порядком величины и лежат в интервале $10^{-9} - 10^{-7}$ Дж.

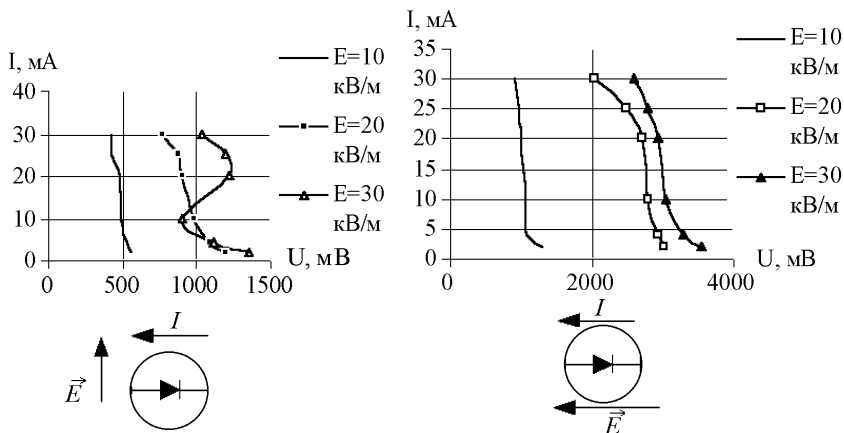


Рисунок 5 – ВАХ диода кремниевое, планарного с барьером Шотки 2Д922В

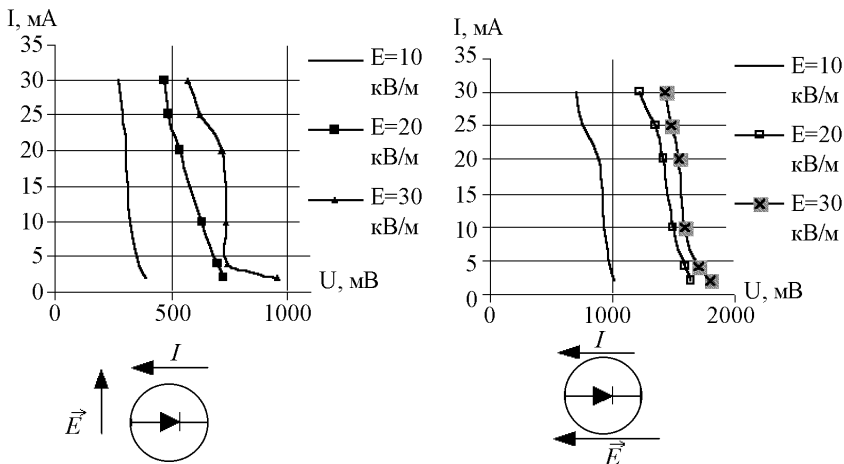


Рисунок 6 – ВАХ диода кремниевое эпитаксиального КД409А

Основной результат проведенных исследований определяется тем, что на качественном уровне был предсказан характер изменения ВАХ полупроводниковых диодов в условиях воздействия импульсного электромагнитного излучения и расчетные оценки физических моделей [3], [4] получили экспериментальное подтверждение.

Кроме того, проведенные в данной работе экспериментальные исследо-

вания показали, что величина мощности излучения в случае, когда воздействующее поле параллельно току диода, в пределах порядка превышает мощность в условиях, когда оно перпендикулярно диодному току. Это на качественном уровне также соответствует предложенным в [3], [4] расчетным моделям, согласно которым мощность излучения прямо пропорционально времени взаимодействия наведенного тока с колебаниями структуры, а это время, в свою очередь, прямо пропорционально размерам образца (диода), поперечные размеры которого на порядок меньше продольных.

И, наконец, достоверность физических моделей [3], [4] подтверждается также тем, что энергия излучения собственных электромагнитных колебаний твердотельных структур, комплектованных рассмотренные полупроводниковые приборы, прямо пропорционально амплитуде воздействующего импульсного напряжения.

Список литературы: 1. Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Электромагнитные влияния на сооружения связи. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 2. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 3. Кравченко В.И., Лосев Ф.В., Яковенко И.В. Возбуждение электромагнитных колебаний в полупроводниковых структурах ЭРИ потоком заряженных частиц, наведенных ЭМИ // Вісник НТУ «ХП». – Харків «НТУ» ХП. – 2004. – № 35. – С.161-168. 4. Кравченко В.И., Лосев Ф.В., Яковенко И.В. Электростатические колебания структуры металл-диэлектрик-полупроводник в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения // Вісник НТУ «ХП». – Харків НТУ «ХП». – 2004. – № 35. – С. 154-161. 5. Дж. А. Стрэттон. Теория электромагнетизма. – Москва, ОГИЗ-ГИТТЛ. 1948. 6. Конструирование и расчет полосковых устройств. Под ред. И.С.Ковалева. – Москва, Сов. Радио, 1974.

Поступила в редколлегию 11.06.2007.

УДК 621.373.5

М.И.БАРАНОВ, докт.техн.наук; **В.А.БОЧАРОВ**;
В.М.ЗИНЬКОВСКИЙ; **Ю.П.ЗЯБКО**; **Н.Н.ИГНАТЕНКО**; НТУ «ХПИ»

ОМИЧЕСКИЙ ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ГРОВОВЫХ И КОММУТАЦИОННЫХ ИМПУЛЬСОВ АМПЛИТУДОЙ ДО 1 МВ

Описано конструкцію і технічні характеристики створеного пересувного високовольтного омичного дільника для виміру імпульсів напруги мікро- і мілісекундного часового діапазону амплітудою до 1 МВ і дані рекомендації з його практичного застосування в області техніки і електрофізики високих напруг.

The design and performance data of the movable high-voltage ohmic divider which was created for measurement of voltage pulses of micro- and millisecond time range with amplitudes up to 1 MV are