

УДК 621.318

В.И. КРАВЧЕНКО, И.В. ЯКОВЕНКО, Л.В. ВАВРИВ**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**

Исследованы существующие физические механизмы влияния внешних электромагнитных полей на работоспособность полупроводниковых приборов в области необратимых отказов. Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения

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

В.І. КРАВЧЕНКО, І.В. ЯКОВЕНКО, Л.В. ВАВРИВ**ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ВИРОБІВ**

Досліджено існуючі фізичні моделі механізмів впливу зовнішнього електромагнітного випромінювання на працездатність напівпровідникових приладів в галузі незворотніх відмов. Показано, що дія імпульсного електромагнітного випромінювання на електрорадіовироби часто супроводжується виникненням струмів у провідних елементах виробів та утворенням їх внутрішніх полів. Запропоновано механізм появи поверхневих електронних станів на нерівних межах провідних твердих середовищ. Визначено механізми виникнення нестійкостей власних коливань напівпровідникових надграток, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах дії стороннього електромагнітного випромінювання. Досліджено вплив неоднорідних властивостей поверхні у випромінюючих структурах на спектральні характеристики переходного та черенковського випромінювання.

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

V. KRAVCHENKO, I. YAKOVENKO, L. VAVRIV**THE EFFECT OF ELECTROMAGNETIC RADIATION ON OPERABILITY OF SEMICONDUCTOR DEVICES**

Existing physical models of mechanisms of influence of external electromagnetic radiation on the efficiency of semiconductor devices in the field of irreversible failures are investigated. It is shown that the effect of pulsed electromagnetic radiation on electric products is often accompanied by the emergence of currents in the leading elements of products and the formation of their internal fields. A mechanism for the appearance of surface electronic states on uneven boundaries of conducting solid media is proposed. The mechanisms of occurrence of instability of eigen oscillations of semiconductor superstructures, determined by their interaction with the flows of charged particles under conditions of external electromagnetic radiation, are determined. The influence of inhomogeneous surface properties in radiating structures on the spectral characteristics of the transition and Cherenkov radiation is investigated.

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

Введение

Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния ЭМИ на радиоизделия относятся к области необратимых отказов. Целью настоящей работы является анализ существующих результатов экспериментальных исследований влияния импульсного электромагнитного излучения на работоспособность полупроводниковых приборов в области необратимых отказов. для обоснования физических моделей их возникновения и получения на их основе расчетных соотношений, определяющих критерии возникновения и количествен-

ные характеристики данного типа отказов.

Настоящая работа в определенной степени компенсирует существующий пробел в этой области исследований необратимых отказов. В ней исследуется взаимодействие потоков заряженных частиц, наведенных ЭМИ, с волновыми процессами в полупроводниковых структурах, используемых в современной СВЧ – электронике.

Основные результаты

Как известно, основным критерием работоспособности полупроводниковых приборов в области необратимых отказов является критическая (порого-

вая) энергия, выделяемая в приборе в результате действия ЭМИ. Превышение ее величины приводит к необратимым процессам (обычно перегреву носителей тока (электронов) и, как следствие, – тепловому пробою).

Рассмотрим два наиболее вероятных механизма влияния наведенных внешним ЭМИ токов и напряжений на работоспособность полупроводниковых приборов, которые позволяют обосновать физические модели возникновения необратимых отказов и определять новые критерии оценки их работоспособности. Первый связан с разогревом носителей под действием стороннего электромагнитного поля, второй – с появлением дополнительных потоков частиц в полупроводниках [1-4].

Известно, что первый из указанных механизмов необратимых отказов связывают с эффектом вторичного теплового пробоя, появление которого является результатом локального перегрева в области Р–П переходов. Возможность преобразования энергии токов, наведенных ЭМИ в тепловую энергию обусловлено очень маленькими размерами Р–П областей. Поскольку энергия рассеиваемая в окрестностях активных областей Р–П переходов, тепло выделяется на малой площади и температура может достигать величин порядка длительности плавления материалов для напряженностей полей $E > 100$ кВ/м и длительности импульса несколько сотен наносекунд. Это приводит к вторичному тепловому пробою, который сопровождается плавлением пленок, созданных металлизацией, образованием дуги между металлизированными участками.

В настоящее время обычно используется приближенная оценка мощности повреждения полупроводникового прибора (критерий необратимого отказа) основанная на численном решении уравнения теплопроводности. Ее осуществляют с помощью полуэмпирической формулы для пороговых уровней мощности теплового повреждения полупроводника [5]:

$$P = K \cdot S \cdot \sqrt{C\lambda\gamma} \cdot (T_m - T_i) \cdot t_n^m, \quad (1)$$

где P – пороговый уровень мощности, приводящий к повреждению прибора; K – эмпирическая константа, зависящая от конструкции прибора; S – нагреваемая площадь; C – теплоемкость материала; λ – коэффициент теплопроводности; γ – плотность материала; T_m – предельная для прибора температура, превышение которой приводит к повреждению прибора; T_i – температура окружающей среды; t_n – длительность импульса напряжения; m – константа, определяемая длительностью импульса.

В области обратимых отказов формула (1) требует существенной корректировки, поскольку если ЭМИ не настолько мощный (критическая энергия в полупроводнике не достигается), возникающий из-за разогрева электронный поток не вызывает теплового пробоя, но оказывает существенное влияние на основные параметры полупроводника (проводимость, концентрацию носителей). Это существенно сказывается на выходных характеристиках изделия.

В качестве критерия электромагнитной стойко-

сти необратимых отказов может выступать также условие появления тепловой неустойчивости [6]. Механизм ее развития обусловлен тем, что наведенный ЭМИ ток в Р–П переходе при обратном смещении напряжения выделяет тепло. Увеличение обратного напряжения вызывает повышение температуры перехода. Что в свою очередь приводит к возрастанию обратного тока, т.о. на вольт-амперной характеристике возникает участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Подобный эффект позволяет установить зависимость между наведенным ЭМИ током и искажением обратного напряжения.

Участок вольт-амперной характеристики с отрицательным дифференциальным сопротивлением характеризуется величиной V_n – диапазоном напряжений развития тепловой неустойчивости. При воздействии стороннего ЭМИ прибор не выходит из строя, но вид участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением характеризует величину амплитуды и длительность импульса воздействующего поля.

В табл. 1 приведен участок обратной ветви вольт-амперной характеристики диода (Д 312 А – германиевый, мезадиффузионный, импульсный, диапазон амплитуды импульса напряжения $E \approx 160 \dots 200$ кВ/м) [8]:

- на первой стадии наблюдаются неустойчивость тока на напряжениях близких к уровню лавинного роста числа носителей,
- на второй стадии происходит переключение из области высокого в область низкого напряжения,
- на третьей стадии наблюдается резкий рост тока при малом росте напряжения,
- четвертая стадия соответствует выходу из строя прибора.

Следует отметить, что на настоящее время детально исследованы экспериментально только уровни напряжения соответствующие четвертой стадии (необратимые отказы). Однако влияние наведенных ЭМИ токов может сказываться на вольт амперных характеристиках данного типа приборов уже на первой стадии – лавинного роста носителей. Возникновение искажений вольт-амперной характеристики при этом связано с температурной неустойчивостью. Когда на транзистор поступает достаточно мощный импульс напряжения, вызывающий вторичный пробой, последний наступает с некоторой задержкой во времени. Это время называют временем включения вторичного пробоя. Именно это время – τ_{np} характеризует необратимые отказы (соответственно при $\tau < \tau_{np}$ отказы носят обратимый характер).

Таблица 1 – Обратная ветвь вольт-амперной характеристики при тепловой неустойчивости (диод Д 312 А)

Температура t , °С	Плотность обратного тока I_R , мА/см ²	Обратное напряжение V_R , В
20	0,3	12,3
30	0,4	45,5
40	0,8	68,2
50	1,2	58,4
60	3,2	43,1
70	4,5	41,3

Таблица 2 – Зависимость времени включения вторичного пробоя структуры Si – Au – Ge от мощности приложенного импульса при различной температуре

Температура t , °C	Время включения τ_{np} , с	Мощность импульса P , Вт
100	10^{-4}	6,1
	$5 \cdot 10^{-4}$	5,3
	$7 \cdot 10^{-4}$	3,2
50	10^{-4}	7,2
	$6 \cdot 10^{-4}$	5,5
	$8 \cdot 10^{-4}$	4,1
20	10^{-4}	8,3
	10^{-4}	7,1
	10^{-4}	5,2

В табл. 2 [9] приведена зависимость времени включения τ_{np} вторичного пробоя от мощности приложенного напряжения импульса при различной температуре окружающей среды T_0 . Для определенного времени включения τ_{np} существует температура включения вторичного пробоя T_{np} , под которой следует понимать температуру «горячих точек» в момент предшествующий вторичному пробоя. Величина T_{np} связана с мощностью импульса P и температурой окружающей среды T_0 следующим соотношением:

$$T_0 - T_{np} = C_1 P, \quad (2)$$

где C_1 – постоянная.

При фиксированной температуре соотношение между мощностью импульса и временем включения приблизительно равно :

$$\tau_{np} \approx \exp(-C_2 P), \quad (3)$$

где C_2 – постоянная.

Из выражений (2) и (3) следует равенство для времени включения вторичного пробоя

$$\tau \approx \exp\left(-\frac{C_2}{C_1}(T_0 - T_{np})\right). \quad (4)$$

Температура вторичного пробоя T_{np} зависит от различных параметров и геометрии приборов. Для большинства кремниевых диодов и транзисторов температура T_{np} соответствует той температуре, при которой концентрация носителей собственного материала равна концентрации примеси в коллекторе. Горячие точки обычно располагаются вблизи центра прибора. Величина T_{np} изменяется в зависимости от концентрации примесей в коллекторе, а отношение постоянных C_1/C_2 определяется геометрией прибора. Поэтому время включения вторичного пробоя сильно колеблется в зависимости от типа и режима работы транзистора (диода).

За пределами области нестабильных токов напряжение на приборе резко падает и в течение второй стадии сопротивление горячих точек резко уменьшается. На третьей стадии (стадии низкого напряжения) полупроводник находится при высокой температуре, а вблизи точек пробоя становится собственным полупроводником.

При дальнейшем возрастании тока точки пробоя начинают плавиться и наступает четвертая стадия – разрушение прибора. Время включения τ_{np} характеризует именно эту область – область необ-

ратимых отказов. Для определения степени отклонения вольт – амперных характеристик с использованием данной методики на каждой из предыдущих стадий разряда необходимо оценивать все четыре составляющие τ_{np} в зависимости от амплитуды и длительности воздействующего ЭМИ.

Выводы:

– проведен сравнительный анализ существующих экспериментальных и расчетных методик, определяющих критерии возникновения и количественные характеристики необратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях воздействия импульсного электромагнитного излучения, определение областей параметров внешнего воздействия, где реализуется данный тип отказов;

– обоснование физических моделей возникновения необратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях воздействия импульсного электромагнитного поля, возникающих вследствие трансформации энергии наведенных токов в энергию излучения полупроводниковой структуры;

– выбор диапазона параметров экспериментальных исследований, моделирующих воздействие импульсного электромагнитного поля на работоспособность полупроводниковых диодов в области необратимых отказов;

– получение экспериментальных данных влияния импульсного электромагнитного излучения с параметрами необратимых отказов на рабочие (вольт-амперные, температурные) характеристики полупроводниковых диодов (диод Д 312 А, структуры Si – Au – Ge);

– проведение сравнительного анализа экспериментальных данных и количественных характеристик необратимых отказов для данных приборов, полученных расчетным путем, для обоснования достоверности предложенных в работе физических моделей возникновения необратимых отказов и методов их количественных оценок.

Список литературы

1. Белецкий Н.Н. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах / Н.Н. Белецкий, В.М. Светличный, Д.Д. Халамейда, В.М. Яковенко. – К.: Наукова думка, 1991. – 216 с.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
3. Михайлов М.И. Электромагнитные влияния на сооружения связи / М.И. Михайлов, Л.Д. Разумов, С.А. Соколов. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с.
4. Стил М. Взаимодействие волн в плазме твердого тела / М. Стил, Б. Вюраль. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с.
5. Мырова Л.О. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям / Л.О. Мырова, А.З. Чепиженко. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с.
6. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковых комплектующих электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, В.И. Яковенко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2009. – №

11. – С. 62-69.

7. Кравченко В.И. Возбуждение электромагнитных колебаний в 2-D электронных структурах токами, наведенными внешним излучением / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2012. – № 21. – С. 154-161.

8. Кравченко В.И. Генерация электромагнитных колебаний полупроводниковой структуры в условиях стороннего электромагнитного воздействия / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2012. – № 21. – С. 161-169.

9. Кравченко В.И. Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплектов электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2013. – № 27. – С. 83-89.

10. Кравченко В.И. Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2013. – № 27. – С. 96-103.

11. Кравченко В.И. Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 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 vlijanija 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 izlu-

chenijam [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 storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodnye karakteristiki 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 storonnogo jelektromagnitnogo vozdejstvija [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 karakteristiki 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 struktur jelektroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnogo 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 vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovyh struktur v uslovijah vozdejstvija storonnogo 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) 27.10.2018.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Володимир Іванович (Кравченко Владимир Иванович, Kravchenko Vladimir Ivanovich) – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ»; тел. (057) 707-60-79; e-mail: nii90@email.ua

Яковенко Ігор Володимирович (Яковенко Игорь Владимирович, Yakovenko Igor Vladimirovich) – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри «Системи інформації» НТУ «ХПІ»; тел. (057) 707 66 18; e-mail: yakovenko60IV@ukr.net

Ваврив Людмила Владиславівна (Ваврив Людмила Владиславовна, Vavriv Ljudmila Vladislavovna) – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-63-09; e-mail: l.v.vavriv@gmail.com.