

УДК 621.318

В.И. КРАВЧЕНКО, А.А. СЕРКОВ, В.С. БРЕСЛАВЕЦ, И.В. ЯКОВЕНКО**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕОБРАТИМЫХ ОТКАЗОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

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, сверхрешетки, безтолкновительное угасание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

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 количественные характеристики данного типа отказов.

Цель работы. 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.

Постановка и решение задачи. Как известно, основным критерием работоспособности полупроводниковых приборов в области необратимых отказов является критическая (пороговая) энергия, выделяемая в приборе в результате действия ЭМИ. Превышение ее величины приводит к необратимым процессам (обычно перегреву носителей тока (электронов) и, как следствие, – тепловому пробую).

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 пробую, 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 (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, таким образом, 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 – диапазон 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 $E \approx 160...200$ кВ/м [8]:

- на первой стадии наблюдаются нестабильность 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 нестабильностью. 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 – $\tau_{пр}$ характеризует необратимые отказы (соответственно при $\tau < \tau_{пр}$ отказы носят обратимый характер).

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

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Плотность обратного тока $I_R, \text{mA/cm}^2$	Обратное напряжение $V_R, \text{В}$
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 $t, ^\circ\text{C}$	Время включения $\tau_{пр}, \text{с}$	Мощность импульса $P, \text{Вт}$
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 [9] в табл. 2 приведена зависимость времени включения $\tau_{пр}$ вторичного пробоя от мощности приложенного напряжения импульса при различной температуре окружающей среды T_0 . Для определенного времени включения $\tau_{пр}$ существует температура включения вторичного пробоя $T_{пр}$, под которой следует понимать температуру «горячих точек» в момент предшествующий вторичному пробую. Величина $T_{пр}$ связана с мощностью импульса P и температурой окружающей среды T_0 следующим соотношением.

$$T_0 - T_{пр} = C_1 P, \quad (2)$$

где C_1 – постоянная.

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

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

где C_2 – постоянная.

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

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

Температура вторичного пробоя $T_{пр}$ зависит от различных параметров и геометрии приборов. Для большинства кремниевых диодов и транзисторов температура $T_{пр}$ соответствует той температуре, при которой концентрация носителей собственного материала равна концентрации примеси в коллекторе. Горячие точки обычно располагаются вблизи центра прибора. Величина $T_{пр}$ 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 течении 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 $\tau_{пр}$ характеризует именно эту область – область необратимых отказов. Для определения степени отклоне-

ния вольт – амперных характеристик с использованием данной методики на каждой из предыдущих стадий разряда необходимо оценивать все четыре составляющие $\tau_{пр}$ 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;

– дано 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;

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

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

– проведено сравнительный анализ 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. *Мырова Л.О.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям / *Л.О.Мырова, А.З.Четкоженко.* – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 2. *Михайлов М.И.* Электромагнитные влияния на сооружения связи / *М.И.Михайлов, Л.Д.Разумов, С.А.Соколов.* – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. *Стил М.* Взаимодействие волн в плазме твердого тела / *М.Стил, Б.Вюраль.* – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с. 4. *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. 5. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов / *С.Зи.* – М.: Мир, 1984. – 456 с. 6. *Кравченко В.И.* Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковых комплектирующих электрорадиоизделий / *В.И.Кравченко, В.И.Яковенко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 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». – 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». – 2012. – № 21. – С. 161–169. 9. *Кравченко В.И.* Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплектирующих электрорадиоизделий / *В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 83–89. 9. *Кравченко В.И.* Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковой сверхрешетки / *В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 89–96. 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». – 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». – 2013. – № 27. – С.103–111.

Bibliography (transliterated): 1. *Myrova L.O., Chepizhenko A.Z.* Obespechenie stojkosti apparatury svyazi k ionizirujushhim jelektromagnitnym izluchenijam. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235. Print. 2. *Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A.* Jelektromagnitnye vlijanja na sooruzhenija svyazi. – Moscow: Radio i svjaz', 1979. 225. Print. 3. *Stil M., Vjural' B.* Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. Moscow: Atomizdat, 1973. 312. Print. 4. *Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M.* Jelektromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyx strukturah. Kyiv: Naukova dumka, 1991. 216. Print. 5. *Zi C.* Fizika poluprovodnikovyx priborov. Moscow: Mir, 1984. 456. Print. 6. *Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Vlijanie storonnego jelektromagnitno izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyx komplektujushhix jelektorradioidzelij. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. 62 – 69. Print. 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". 2012. No 21. 154–161. Print. 8. *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Generacija jelektromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnego jelektromagnitno vozdejstvija. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. 161–169. Print. 9. *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Vlijanie potoka zarjzhenykh chastic. Navedennogo vneshnim jelektromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyx komplektujushhix jelektorradioidzelij. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 83–89. Print. 9. *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Vlijanie storonnego jelektromagnitno izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovoj sverhreshetki. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 89–96. Print. 10. *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyx stuktur jelektorradioidzelij v uslovijah vozdejstvija storonnego jelektromagnitno izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 96–103. Print. 11. *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovyx struktur v uslovijah vozdejstvija storonnego jelektromagnitno izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 103–111. Print.

Поступила (received) 13.10.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 61 33, e-mail: kravchenkomolnia@mail.ru

Kravchenko Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, professor, director of NIPKI "Molnija" NTU "KhPI". tel. (057) 707 61 33, e-mail: kravchenkomolnia@mail.ru

Серков Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Системы информации НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 66 18, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Serkov Aleksandr Anatolievich – Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707- 66 – 18 , e-mail : :saa@ kpi.kharkov.ua

Бреславец Виталий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры Системы информации НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 61 39, e-mail: bres123@ mail.ru

Breslavets Vitaliy Sergeevich – Candidat of Technical Sciences, docent, professor of the Department Information System of NTU "KhPI". tel. (057) 707 61 39, e-mail : bres123@ mail.ru

Яковенко Игорь Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры Системы информации НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 66 18, e-mail: yakovenko60IV @ mail.ru

Yakovenko Igor Vladimirovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, professor of Information NTU "KhPI". Tel. (057) 707 66 18, e-mail: yakovenko60IV @ mail.ru

УДК 544.323.2:544.56.1:621.762

Е. В. ЛИПЯН, О. Н. СИЗОНЕНКО, А. С. ТОРПАКОВ, А. А. ЖДАНОВ

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГЕТЕРОГЕННЫХ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В СИСТЕМЕ «СМЕСЬ ПОРОШКОВ Fe – Ti – УГЛЕВОДОРОДНАЯ ЖИДКОСТЬ» ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

Приведен термодинамический анализ химического равновесия для смеси порошков железа и титана в среде углеводородной жидкости под воздействием высоковольтных электрических разрядов. Теоретически обоснована возможность получения карбидов и интерметаллидов из исходной смеси и определены необходимые для этого уровни температуры и давления. Полученные теоретические результаты подтверждены экспериментально при синтезе TiC, Fe₃C и Fe₂Ti.

Ключевые слова: термодинамика, энергия Гиббса, парциальное давление, высоковольтный электрический разряд, углеводородная жидкость, синтез, карбиды металлов, интерметаллиды, порошки, рентгенофазовый анализ, гетерогенные реакции, дисперсная система.

Введение. Известно, что обработка материалов концентрированными потоками энергии (КПЭ) вызывает интенсификацию физико-химических процессов в зоне их локального воздействия [1–3]. Высокая удельная энергия и быстротечность процессов приводят к формированию термодинамически неравновесных систем, в результате чего создается возможность получения высокодисперсных структур, вплоть до аморфных и наноструктур.

Высокоэнергетический комплекс физических процессов, которые сопровождают высоковольтные электрические разряды (ВЭР) в дисперсной системе «углеводородная жидкость – металлический порошок», используют для синтеза наноуглерода, диспергирования порошков металлов и синтеза их карбидов за счет действия плазменного канала, электромагнитных полей, механического воздействия ударных волн, гидроджетов и объемной микрокавитации [3].

Оптимизация условий для интенсификации гетерогенных химических реакций будет зависеть от процессов, протекающих между газовой, жидкой и твердой фазами [4, 5]. Для выяснения закономерностей указанных процессов необходимы данные о фазовых равновесиях и фундаментальных термодинамических функциях соответствующих систем.

Цель данной работы – выполнить термодинамический анализ поведения дисперсной системы «смесь порошков Fe – Ti – углеводородная жидкость» при воздействии на нее ВЭР.

Методика термодинамического анализа. Извест-

но, что при ВЭР температура плазмы в канале разряда может достигать $\sim 10^4$ K, а давление ~ 1 ГПа [6]. Для оценки процессов с учетом протекания возможных реакций и образования их конечных продуктов использован термодинамический анализ равновесных процессов, который применяется в теории металлургии и сварки для прогнозирования хода реакций. При использовании данного метода допускается, что, несмотря на кратковременность процесса, высокие температуры нагрева металла и большая удельная поверхность его контакта со средой практически обеспечивают достижение термодинамического равновесия [7]. Кроме того, в работе [8] подчеркивается, что при разряде вследствие кратковременности импульсов термодинамические процессы могут рассматриваться как адиабатические.

Термодинамические расчеты основаны на значениях величин энтальпии H , энтропии S , теплоемкости C_p и энергии Гиббса G для химических веществ. Характер изменения энергии Гиббса позволяет судить о принципиальной возможности осуществления процесса [9–11].

Все подсчеты по таблицам стандартных величин основаны на свойствах аддитивности G , H , S и поэтому сводятся к алгебраическому суммированию, аналогичному расчетам по закону Гесса [9–11]. Теплоемкость C_p определялась по уравнению Майера-Келли с помощью табличных данных, после чего рассчитывались значения изменения энтальпии ΔH и энтропии ΔS согласно закона Кирхгофа. Изменение энер-