

УДК 621.318

В.И. КРАВЧЕНКО, А.А СЕРКОВ, В.С. БРЕСЛАВЕЦ, И.В ЯКОВЕНКО**ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБРАТИМЫХ ОТКАЗОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Предложены физические модели появления обратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях воздействия электромагнитного излучения. Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. 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. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения. Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетки, бесстолкновительное угасание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

Введение. Расширение областей применения и возрастание быстродействия радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) приводит к необходимости все большего использования элементной базы, содержащей изделия полупроводниковой электроники [1]. Это увеличивает степень влияния внешнего электромагнитного излучения (ЭМИ) на работоспособность РЭА, к воздействию которого полупроводниковые комплектующие обладают повышенной чувствительностью.

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 функциональное 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 остаются открытыми.

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

Постановка и решение проблемы.

К настоящему времени область необратимых отказов полупроводниковых комплектующих технических средств (ТС) исследована довольно детально как экспериментально так и теоретически [1]. Большинство используемых на настоящее время методик оценки критериев стойкости полупроводниковых приборов в этой области отказов в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения (ЭМИ) [2–3] использует в этом качестве величину критической энергии $W_{кр}$, превышение которой приводит к

полной утрате работоспособности.

Для расчетов токов и напряжений, наведенных ЭМИ, определяющих $W_{кр}$ и возникающих непосредственно в полупроводниковых комплектующих внутри ТС обычно используют модель линий передачи (обобщенные телеграфные уравнения). При этом комплектующие электрорадиоизделия (ЭРИ) рассматриваются как линейные схемы, содержащие R, L, C – элементы и включают независимые источники токов и напряжений, обусловленные внешним электромагнитным воздействием. Уравнения схемы решаются в частотной области, для перехода во временную область используется обратное преобразование Фурье [1].

Данный подход позволяет достоверно оценивать критерии электромагнитной стойкости в области необратимых отказов [2], но обладает рядом существенных ограничений и не учитывает ряд эффектов, способных повлиять на работоспособность полупроводниковых приборов в области обратимых отказов.

Эти ограничения связаны с тем, что при анализе обратимых (кратковременных) нарушений работоспособности полупроводниковых приборов необходимо учитывать следующие факторы стороннего электромагнитного воздействия [8] :

- длительность фронта и спада импульса ЭМИ;
- геометрические размеры полупроводниковых комплектующих ЭРИ
- взаимную ориентацию комплектующих ППП и векторов полей ЭМИ;
- конструктивным расположением монтажа схем относительно корпуса аппаратуры.

При определении критериев электромагнитной стойкости полупроводниковых приборов, данные факторы не могут быть учтены в полной мере в рамках теории линии передачи.

В частности, [1] теория длинных линий ограничена диапазоном низких частот, то есть размеры системы меньше длин волн, что делает невозможным описание механизмов взаимодействия наведенных ЭМИ токов с физическими процессами, протекающими непосредственно в полупроводниковых комплектующих и определяющих их работоспособность в условиях, когда размеры структур сравнимы с длинами

волн.

Кроме того, в рамках теории линии передачи обычно предполагается, что нагрузка согласована с линией, а вся подведенная энергия ЭМИ выделяется в критическом элементе схемы. Однако нагрузка согласована не во всем диапазоне частот и маломощный критический элемент стоит не непосредственно на входе, а после нескольких пассивных элементов, способных принять на себя часть энергии ЭМИ. Поэтому, для определения критериев возникновения обратимых отказов (временной утраты работоспособности) в рамках линии передачи необходимо рассчитывать переходной процесс для каждой конкретной схемы ЭРИ.

Наконец, используемый подход (одномерное приближение) не учитывает эффекты связанные с пространственной ограниченностью полупроводниковых изделий и их расположением к направлению воздействующего ЭМИ (конфигурацией электромагнитного поля и направлением векторов рабочих токов и напряженностей в самих комплектующих ТС).

Для описания физических механизмов возникновения обратимых отказов полупроводниковых комплектующих ЭРИ предлагается более строгая методика, основанная на использовании полной системы уравнений электродинамики (Максвелла), дополненных материальными уравнениями для сред, комплектующих полупроводниковые приборы, и граничными условиями, позволяющими определять взаимосвязь между величинами наведенных ЭМИ токов с собственными электромагнитными полями полупроводниковых приборов. Данный подход дает возможность исследовать процессы взаимодействия электромагнитных колебаний и наведенных ЭМИ токов непосредственно в полупроводниковых комплектующих ЭРИ, описать которые в рамках теории линий передач не представляется возможным.

Таким образом, в качестве объекта исследований в настоящей работе рассматривались не схемы с сосредоточенными параметрами, а ограниченные проводящие (полупроводящие) среды из которых и состоят комплектующие электрорадиоизделий.

Результаты данной работы в определенной степени компенсируют существующие пробелы в исследованиях одного из видов обратимых отказов – искажения вольт – амперных характеристик полупроводниковых приборов в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения.

Причиной возникновения подобных искажений рабочих характеристик приборов является, на наш взгляд, возможность трансформации энергии наведенных внешним ЭМИ токов в энергию собственных электромагнитных колебаний комплектующих ЭРИ.

В качестве канала передачи энергии наведенных внешним излучением токов полупроводниковым комплектующим рассматривались поверхностные волны, существующие на границах проводящих твердых тел.

Выбор поверхностных колебаний в качестве канала передачи энергии внешнего излучения не случаен – этот тип волн локализован вблизи границ раздела сред, комплектующих полупроводниковые приборы,

поэтому они более эффективно, чем объемные колебания, переносят энергию внешних электромагнитных полей [9].

В настоящей работе исследовались два возможных механизма преобразования энергии движущихся зарядов (наведенных ЭМИ токов) в энергию поверхностных плазмонов полупроводниковых комплектующих ТС – эффекты переходного и черенковского излучения (соответствующая взаимная конфигурация векторов напряженностей воздействующего электрического поля и прямого тока полупроводникового прибора показаны на рис. 1)

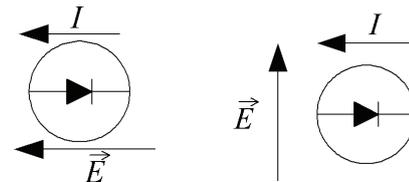


Рисунок 1 – Взаимное расположение напряженности воздействующего электрического поля \vec{E} и прямого тока \vec{I} полупроводникового прибора (диода)

Механизм реализуется, когда наведенный ток (направление вектора напряженности электрического поля воздействующего внешнего ЭМИ) перпендикулярен границам раздела сред твердотельной структуры (полупроводникового прибора) (рис 1, б) и состоит в следующем [10].

При движении заряда в материальной среде, создаваемое им электромагнитное поле определяется не только величиной заряда и его скорости, но и диэлектрическими свойствами среды. 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 переходного. В результате, при прохождении потока частиц, наведенных ЭМИ, через полупроводниковую структуру происходит непрерывный процесс преобразования энергии зарядов в энергию собственных колебаний поля. то есть в структуре устанавливается режим генерации колебаний.

Следует отметить, что последние экспериментальные исследования переходного излучения служат основой разработок новых методов диагностики потоков заряженных частиц, обладающих высокой энергией и, кроме того, при решении задач генерации и усиления электромагнитных колебаний [9]. Эффект переходного излучения определяет механизмы возбуждения самых различных мод полупроводниковых структур, поэтому появляется возможность переносить энергию поверхностных колебаний через границу полупроводниковых приборов через границу, для которой она, в отсутствие наведенных токов (то есть воздействия стороннего ЭМИ), является непрозрачной.

Второй механизм трансформации энергии движущихся зарядов в энергию колебаний рассмотренный в работе – эффект излучения Вавилова – Черенкова (черенковское излучение) [5].

Он реализуется, когда наведенные токи движутся вдоль границы полупроводниковой структуры, а фазовая скорость поверхностной волны равна скорости заряженных частиц (рис 2, а). В условиях такого резонанса энергия наведенных токов (потока заряженных частиц) трансформируется в энергию собственных колебаний комплектующих ЭРИ и в полупроводниковом приборе также устанавливается режим генерации колебаний.

Режим генерации колебаний в полупроводниковых приборах обычно проявляет себя на участке его вольт – амперной характеристики (ВАХ), обладающей отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) ($R = \Delta U / \Delta I < 0$). В этом случае наведенный ток (электронный поток наведенный ЭМИ в полупроводниковом приборе) теряет часть своей энергии ($W_{эл} < 0$); при этом рост тока ΔI сопровождается падением напряжения ΔU . Появление такого рода отклонений вольт – амперных характеристик характеризует один из возможных механизмов обратимых отказов.

Поэтому, в качестве энергетического критерия оценки электромагнитной стойкости полупроводниковых приборов в этой области обратимых отказов рассматривалась величина энергии излучения собственных поверхностных колебаний полупроводниковых приборов, обусловленная их взаимодействием с наведенными внешним ЭМИ токами $W_{изл} = W_{эл}$

$$W_{изл} = I_n U_n \Delta t_{\text{вз}} \quad (1)$$

Таким образом величина $W_{изл}$ определяющая степень отклонения ВАХ, является количественной характеристикой данного типа обратимых отказов, где I_n , U_n – соответственно наведенные ток и напряжение, $\Delta t_{\text{вз}}$ – время эффективного действия.

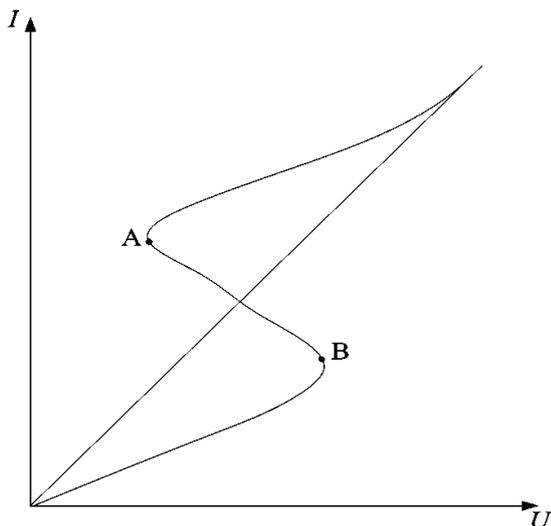


Рисунок 2 – Вольт-амперные характеристики полупроводникового диода: ВАХ в отсутствие внешнего ЭМИ; ВАХ при наличии внешнего ЭМИ (обратимый отказ) (участок АВ)

Данный механизм обратимых отказов (появление S-образной вольт – амперной характеристики прямого тока прибора – рис. 2) реализуется в условиях, когда напряженности амплитуд напряженностей электрического E и магнитного H полей, воздействующего на

полупроводниковую структуру излучения, лежат в диапазоне $E < 100$ кВ/м; $H < 600$ А/м [2].

В случае, когда амплитуды напряженностей воздействующих полей напряженности превышают указанные пределы наблюдается развитие необратимых отказов прибора (тепловой пробой с последующим плавлением и выгоранием металлизации и контактных дорожек [9].

Авторами [7–11] был решен ряд задач взаимодействия волн и наведенных ЭМИ токов в полупроводниковых структурах, позволяющий количественно оценить наведенные токи и напряжения, а также время эффективного взаимодействия наведенных токов с собственными полями полупроводниковых структур.

Эти величины, характеризующие энергию излучения $W_{изл}$, (степень отклонения ВАХ от нормы) определялись в рамках теории пучковых неустойчивостей, поскольку режим генерации колебаний характеризуется экспоненциальным ростом амплитуды E электромагнитных полей излучения полупроводниковых приборов:

$$E \approx \exp(+\gamma t); \quad \gamma = \frac{1}{\Delta t_{\text{вз}}}$$

Здесь γ – инкремент неустойчивости, его величина определяется параметрами наведенных токов и полупроводникового прибора (концентрацией носителей тока и их скоростью).

Таким образом, решение задач возникновения и развития пучковых неустойчивостей в полупроводниковых структурах (определение инкремента неустойчивостей γ) позволяет построить физическую модель возникновения одного из типов обратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения.

Используя данную модель в [6–11] были получены количественные характеристики электромагнитной стойкости ТС (величина энергии излучения $W_{изл}$) в области обратимых отказов.

Выводы

1. Приведены результаты исследований, характеризующие нарушения функционирования электрорадиоизделий (ЭРИ) в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения, а также основные параметры, характеризующие электромагнитную стойкость ЭРИ к воздействию импульсных токов и напряжений.

2. Приведены основные электромагнитные эффекты, влияющие на работоспособность ЭРИ в условиях внешнего воздействия, а также указаны характерные изменения параметров ЭРИ, определяющих их функциональное назначение, которые являются следствием возникновения данных эффектов.

3. Приведены основные типы нарушений ЭРИ в условиях воздействия электромагнитного излучения (обратимые и необратимые отказы).

4. Приведены характерные типы нарушений функционирования полупроводниковых приборов (ППП), комплектующих ЭРИ, в областях необратимых и обратимых отказов, а также уровни напряженностей воздействующих на ППП электрических и

магнитных полей ($E < 100$ кВ/м; $H < 600$ А/м), разделяющих области обратимых и необратимых отказов.

5. На основе энергетического подхода обоснована физическая модель возникновения одного из видов обратимых отказов полупроводниковой элементной базы ТС (появление S-образных участков вольт-амперных характеристик). В основе появления этого типа обратимых отказов лежит процесс преобразования энергии наведенных ЭМИ токов в энергию собственных колебаний полупроводниковой структуры (установление режима генерации собственных колебаний). Данная физическая модель позволяет определять критерии электромагнитной стойкости ряда полупроводниковых приборов к воздействию внешнего импульсного излучения, а также получать расчетные соотношения для оценок степени отклонения рабочих характеристик ППП от нормы.

Список литературы: 1. Михайлов М.И. Электромагнитные влияния на сооружения связи / М.И.Михайлов, Л.Д.Разумов, С.А.Соколов. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 2. Мырова Л.О. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям / Л.О.Мырова, А.З.Чепижченко. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 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 комплектов 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 внешнего электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплектов 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. and Sokolov S.A. Jelektromagnitnye vlijanija 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 poluprovodnikovyh strukturah. Kyiv: Naukova dumka, 1991. 216. Print. 5. Zi C. Fizika poluprovodnikovyh priborov. Moscow: Mir, 1984. 456. Print. 6. Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jelektroradioizdelij. 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 vnesnim 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 jelektromagnitnogo vozdejstvija. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. 161–169. Print. 9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhennyh chastic. Navedennogo vnesnim jelektromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 83–89. Print. 9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jelektromagnitnogo 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 poluprovodnikovyh stuktur jelektroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnego jelektromagnitnogo 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 poluprovodnikovyh stuktur v uslovijah vozdejstvija storonnego jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 103–111. Print.

Поступила (received) 14.09.2015

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 "Molniya" 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