

УДК 621.396.677

А.В. Ченькаев

Харьковский зональный отдел Военной службы правопорядка, Харьков

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

В статье рассмотрены основные механизмы функционального поражения элементной базы радиоэлектронных систем: тепловой и электрической пробой, эффект «защелкивания», метод накопления повреждений. Дано качественное объяснение эффектов деградации при использовании последовательности коротких сигналов при большой скважности.

Ключевые слова: функциональное поражение, тепловой пробой, электрический пробой, деградация радиоэлементов.

Обзор литературы

Одним из новых технических путей радиоэлектронного противодействия радиоэлектронным средствам (РЭС), включая и радиоуправляемые взрывные устройства, используемые при террористических акциях, является воздействие на них мощного электромагнитного импульса (ЭМИ) ультракороткой длительности.

Эффект такого функционального подавления и поражения слабо зависит от назначения, а при внеполосном воздействии и от рабочей частоты РЭС, приводя к следующим последствиям:

- невозстановливаемым (катастрофическим, необратимым) отказам;
- восстанавливаемым (временным) отказам;
- функциональным нарушениям работоспособности, характерным для традиционных видов помех (ложным срабатываниям исполнительных схем, искажениям выходных сигналов и т.д.).

Первые два случая в литературе относят к функциональному подавлению, а третий – функциональному поражению, вызывающему деградацию полупроводниковых элементов приемных устройств входных трактов РЭС [1].

Результатом воздействия электромагнитного импульса на РЭС с целью функционального подавления и поражения (ФПП) могут быть выход из строя наиболее чувствительных к энергетическим перегрузкам или к полемому пробую радиоэлектронных элементов, что приводит к полной или частичной потере работоспособности основных

функциональных устройств РЭС [2, 3]. Как правило, преимущество отдается ЭМИ малой длительности (от долей до десяти наносекунд) и большой пиковой мощности (от сотен мегаватт до единиц гигаватт). **Целью статьи** является обзор механизмов деградации радиоэлементов при функциональном поражении.

Основная часть

Возможны два варианта воздействия таких ЭМИ на РЭС при решении задач ФПП: внутриполосное или внеполосное поражение [4]. Внутриполосные способы ФПП являются энергетически более выгодными, но требуют начальных данных о технических характеристиках поражаемых РЭС: о рабочей частоте и полосе пропускания приемных устройств, тактовой частоте управляющих спецвычислителей и т.д.

Потери энергии воздействующего ЭМИ при прохождении через входные цепи приемника РЭС в данном случае зависят от соотношения между полосой пропускания приемного тракта и шириной спектра воздействующего сигнала. В большинстве случаев эти потери не превышают – (10...15) дБ [4].

Внеполосные способы ФПП не требуют начальных данных о рабочем диапазоне частот и ряде других технических характеристик поражаемых РЭС. Действие на приемные устройства РЭС осуществляются на любых частотах вне их полос пропускания, если в них используются коаксиальные линии передачи. Если в приемных устройствах на входах используются волноводные фидерные тракты,

то частота воздействующего ЭМИ f_b должна выбираться выше критической частоты волноводных трактов $f_{кр}$. Для оценок необходимой мощности ЭМИ в данном случае целесообразно использовать результаты специальных экспериментальных исследований по устойчивости конкретного типа устройств к действию ЭМИ малой длительности и большой мощности. Потери энергии воздействующего ЭМИ при внеполосном воздействии могут достигать – (30...40) дБ [4].

В настоящее время известны три основных принципиально отличающихся направления реализации средств ФПП с малой длительностью мощных импульсов: на основе искровых и плазменных генераторов видеоимпульсов и СВЧ радиоимпульсов; на основе релятивистских генераторов СВЧ радиоимпульсов; на основе СВЧ передающих фазированных антенных решеток с фокусировкой электромагнитного излучения [3, 4].

Средства ФПП, относящиеся к первому и второму направлениям их создания, обеспечивают наибольшую мощность на один образец, но не обладают свойствами электромагнитной совместимости (ЭМС) с другими РЭС, а также могут подавлять все РЭС, которые подлежат ФПП, например, средства связи, но находятся ближе чем поражаемая РЭС. Кроме этого, они требуют для их реализации создания принципиально новых генераторных и антенно-фидерных устройств.

Средства ФПП, относящиеся к третьему направлению, обладают условной скрытностью, свойствами ЭМС и могут быть реализованы с использованием существующей элементной базы для генераторных и антенно-фидерных устройств. Для повышения мощности и достижения необходимых значений пиковой плотности потока мощности в области пространства, где находится подвижная или неподвижная РЭС, при недостаточной мощности отдельного образца средства ФПП можно осуществлять фокусировку ЭМИ при помощи антенных систем разнесенных РТС.

Обзор литературы относительно физических процессов в РЭС при воздействии на них мощных коротких импульсов позволяет выделить следующие основные механизмы деградации элементов РЭС.

Первый из них связан с наведением на радиокомпонентах (отводы полупроводниковых элементов, дорожки печатных плат и т.д.) СВЧ-мощности, которая в свою очередь приводит к электрическим перегрузкам («антенный эффект»). В этом случае значения амплитуд электрических сигналов, наводимых в контурах схем, в основном определяются следующими показателями [7]:

– параметрами сигнала (мощностью, частотой заполнения, длительностью импульса);

– геометрическими размерами и конструктивными особенностями элементов, их взаимной ориентацией;

– электрическим режимом работы схем;
– конструктивным расположением монтажа схем относительно корпуса аппаратуры и т.д.

В этом случае критические значения напряженности электрического поля лежат в пределах $E_{кр} = 10^5 \div 10^6$ В/см.

Другой механизм связан с непосредственным взаимодействием импульса со структурой полупроводникового элемента: тепловой вторичной пробой, токовый вторичный пробой и эффект «защелкивания». Отметим, что наименее изученным является последний эффект.

При электрическом защелкивании (эффект dU/dt) формирование активных элементов в объеме проводящей подложки приводит в ряде случаев к возникновению паразитных 4-слойных структур, которые могут включаться по примеру тиристора при воздействии электрических импульсных сигналов. Типовым проявлением является резкое увеличение тока в цепи питания, входных или выходных цепях. Резкое увеличение напряжения (со скоростью 0,1 – 10 В/нс) способно вызвать «замыкание», даже если максимальное напряжение не превышает допустимое по паспорту.

Такое воздействие может быть не только следствием помех, создаваемых внешними воздействиями, но и наведенными сигналами от соседних элементов по цепи питания.

Работоспособность радиоэлемента при возникновении эффекта нарушается и не восстанавливается по окончании воздействия. Отключение питания иногда позволяет ликвидировать замыкание. Из-за протекания больших токов может произойти выгорание металлизации или тепловой пробой внутренних полупроводниковых структур.

Для анализа устойчивости интегральных микросхем (ИМС) к эффекту dU/dt обычно используют те же параметры, что и при анализе замыкания тиристоров, которые определяют характерные точки S-подобной вольт-амперной характеристики (ВАХ): $I_{ак}, U_{ак}$ – ток и напряжение активизации; $I_{уд}, U_{уд}$ – ток и напряжение удержания; $I_{ост}, U_{ост}$ – остаточные ток и напряжение после замыкания; $E_{кр} = dU/dt$ – критическая скорость нарастания фронта или спада воздействующего импульса.

У [5] проанализированы доминирующие механизмы отказов в полупроводниковых устройствах при действии короткоимпульсного ЭМИ, рассмотрено влияние характеристик сигналов на деградацию диодных структур, биполярных транзисторов, полевых транзисторов с затвором Шоттки, интегральных аналоговых и цифровых микросхем. Из-за быстрого

развития цифровой вычислительной техники, используемой в образцах вооружения, отдельный интерес представляют цифровые микросхемы (ЦМС).

На основе анализа представленных экспериментальных данных показано, что данный тип более чувствителен к радиочастотным сигналам, поступающим на вход, чем ИМС. Поэтому воздействие может быть смоделировано при помощи эквивалентного генератора напряжения Тевенина с соответствующим импедансом. В работе [6] проведен анализ влияния RFI (Radio Frequency Interference) эффектов на характеристики элементов I-НІ серии 7400, где показано, что логические ошибки на выходе для всех типов схем в разных конструктивных схемах возникают при мощности воздействующего сигнала 6...16 дБ, наихудший случай наблюдается для выходного сопротивления эквивалентного генератора, равного 50 Ом.

В результате микроскопического анализа поврежденных структур [7] было установлено, что в биполярных ЦМС доминирующим результатом тепловой нестабильности в структуре является закорочение переходов эмиттер-база входных транзисторов, защитных диодов, а также пробой коллектор-эмиттер выходных транзисторов, что в результате приводит к проплавлению структуры. Повреждение металлизации менее вероятно и наступает, как правило, по следующим причинам:

- рассеяние энергии в узких областях металлизации при коротких, достаточно мощных импульсах;
- рассеяние энергии в больших по площади сечения диффузионных резисторах или закороченных переходах, что вызывает плавление металлизации при длинных воздействующих импульсах.

Формирование активных элементов микросхемы в объеме полупроводниковой подложки приводит к возникновению паразитных 4-х слойных структур, которые могут переходить в низкоимпедансное состояние при воздействии электрических импульсных сигналов.

Четырехслойная структура имеет S-образную ВАХ, присущую тиристорам. Три основных участка ВАХ описывают поведение структуры: высокоомный, низкоомный, с отрицательным сопротивлением.

Критерий устойчивости ИМС ко эффекту dU/dt на электрическом уровне следует из анализа S-образной динамической ВАХ:

$$\begin{cases} U_n > U_{ак} \\ \frac{U_n - U_{ак}}{R_n} \geq I_{ак} \\ \frac{\Delta U}{\Delta t} > E_{кр} \end{cases}$$

где U_n – амплитуда импульса помехи; R_n – эквивалентное сопротивление генератора помехи.

При $(U_n - U_{уд})/R_n \geq I_{уд}$ эффект имеет остаточный характер.

Анализ большого числа экспериментов также показывает [8 – 10], что значительную роль при оценке уровней повреждения полупроводниковых элементов играет режим воздействия (моноимпульсный или пачечный). При этом повреждения носят, как правило, вероятностный характер. Эксперименты также показывают, что повреждение полупроводниковых элементов в режиме одиночного импульса будет происходить при энергии (мощности) импульса существенно больших, чем мощность и энергия одного импульса при использовании последовательности сигналов наносекундной длительности.

При высокой частоте повторения этот эффект обычно объясняют накоплением тепла от импульса к импульсу. При этом необходимо, чтобы период последовательности был соизмерим со временем релаксации выпрямляющего контакта. Однако, как показывает эксперимент, эффект деградации наблюдается и в том случае, когда период пачки значительно больше тепловых постоянных, например, при частотах в десятки и сотни Гц [11].

Качественное объяснение эффектов деградации при использовании последовательности коротких сигналов при большой скважности может быть дано с помощью модели накопления повреждений [11]. В этой модели предполагается, что под действием одного импульса происходит незначительное локальное изменение структуры, например, образование дефекта. Выход прибора из строя будет происходить при достижении некоторого критического числа дефектов.

Предположим, что под действием радиоимпульса достаточно большой интенсивности происходит образование дефектов структуры выпрямляющего контакта полупроводникового элемента, например, диода, что приводит к изменению его характеристик. Такой характеристикой может быть дифференциальная проводимость $p(t)$ выпрямляющего контакта. Под действием одного сигнала последовательности параметр $p(t)$ изменяется на некоторую величину δp . Изменение характеристик входных трактов приемных устройств будет связано с отклонением величины $p(t)$ от номинального значения p_0 , характеризующего нормальный режим работы. При достижении некоторого критического значения $p(t)=p_{кр}$, будет происходить деградация приемного устройства. Очевидно, что размеры дефекта зависят от энергии импульса, а их число определяется структурой полупроводника, его однородностью. Количество импульсов, приводящих к повреждению полупроводникового элемента, может изменяться от образца к образцу. Наблюдаемое уменьшение мощности импульсов, вызывающих повреждение диода, с увеличением частоты повто-

рення обусловлено тем, что повреждение полупроводникового элемента может происходить путем создания большого числа дефектов. Энергия образования каждого из них сравнительно невелика. Для повреждения элемента одним импульсом требуется создание одного большого дефекта, при этом для его создания требуется значительная энергия.

Изменение параметра δp под действием одного мощного ПВС длительностью τ будет пропорционально скорости процесса повреждения:

$$\delta p = \int_0^{\infty} V(t) dt.$$

Процесс увеличения деградации будет происходить в результате воздействия последовательно коротких сигналов.

Выводы

Рассмотрены основные механизмы ФПП при использовании мощного ЭМИ.

Из обзора литературы следует, что причиной катастрофических необратимых отказов в большинстве случаев является тепловой вторичный пробой, а также шнурование тока, что приводит к проплавлению структуры и разрушению металлизации в локальных областях. Эффекты, связанные с тепловым вторичным пробоем, в первом приближении могут быть оценены с помощью модели Вунша-Белла-Таска.

Наименее изученным механизмом ФПП является эффект «защелкивания», при котором формируются активные элементы в объеме проводящей подложки, что приводит в ряде случаев к возникновению паразитных 4-слойных структур, которые могут включаться по примеру тиристора при воздействии электрических импульсных сигналов.

Качественное объяснение эффектов деградации при использовании последовательности коротких сигналов при большой скважности может быть дано с помощью модели накопления повреждений. В этой модели предполагается, что под действием одного импульса происходит незначительное локаль-

ное изменение структуры, например, образование дефекта. Выход прибора из строя будет происходить при достижении некоторого критического числа дефектов.

Список литературы

1. Кравченко В.И. *Электромагнитное оружие* / В.И. Кравченко. – Х.: Изд-во НТУ «ХПИ», 2008. – 185 с.
2. Панов В.В., Саркисян А.П. *Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ средств функционального поражения*. // *Зарубежная радиоэлектроника*, № 10-12, 1993.
3. *Воздействие на различные объекты СВЧ излучения большой мощности*. // *Радиотехника и связь, экспресс информация*, ВИНТИ, №9, 1995.
4. Гомозов А.В., Гомозов В.И., Ермаков Г.В., Титов С.В. *Фокусировка электромагнитного излучения и ее применение в радиоэлектронных средствах СВЧ* / Под ред. В.И. Гомозова. – Х.: "Городская типография", 2011. – 330 с.
5. Антипин В. В., Годовицын В. А., Громов Д. В. *Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы* // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1995. – № 1. – С. 37-53.
6. Whalen J. J., Tront J. G., Larson C. E. *Computer-aided analysis of RFI effects in digital integrated circuits* // *IEEE Trans.* – 1979. – Vol. EMC-21, № 4. – P. 291-297.
7. Jenkins C. R., Durgin D. L. *EMP susceptibility of integrated circuits* // *IEEE Trans.* – 1975. – Vol. NS-22. – P. 2494-2499.
8. Garver R. V., Fazi C., Druns H. *Dynamic diode mixer damage measurements* // 1985 *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest*. – P. 535-536.
9. Glan Chance V. *Trandsin mixer damage* // *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest*, 1989. – P. 475-477.
10. Christon A. *GaAs mixer burnout mechanisms at 36-94 GHz* // *Annual Proc. Reliab. Physics*, 1980. – P. 140-144.
11. Васильев К.Б., Ключник А.В., Солодов А.В. *Статистика отказов цифровых ИМС, вызванных импульсным радиоизлучением* // 9-я *Междунар. Крымская конфер. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»*. Севастополь, 1999. – С. 329-330.

Поступила в редколлегию 14.11.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.И. Обод, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО УРАЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

О.В. Ченикаєв

В статті розглянуті основні механізми функціонального ураження елементної бази радіоелектронних систем: тепловий та електричний пробой, ефект «зацілювання», метод накопичення ушкоджень. Дано якісне пояснення ефектів деградації при використанні послідовності коротких сигналів при великій скважності.

Ключові слова: функціональне ураження, тепловий пробой, електричний пробой, деградація радіоелементів.

ANALYSIS OF FUNCTIONAL DEFEAT POSSIBILITIES OF RADIOELECTRONIC SYSTEMS ELEMENT BASE

A.V. Chenykayev

In the article the basic mechanisms of element base functional defeat of the radioelectronic systems are considered: thermal and electric hasp, effect of "palling", method of damages accumulation. The quality explaining to of effects degradation at the use of sequence of short signals is given.

Keywords: functional defeat, thermal hasp, electric hasp, degradation of radioelements.