

ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИИ И ОТКАЗЫ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМГНИТНОГО ИМПУЛЬСА

Панасюк Н.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научные руководители: Алексеев В.Ф. – канд.техн.наук, доцент, Пискун Г.А. – канд.техн.наук, доцент

Аннотация. Показано, что электронные средства в процессе эксплуатации подвергаются воздействию внешних дестабилизирующих факторов, среди которых наиболее опасными являются электромагнитные помехи. Отмечено, что исследования эффектов воздействия электромагнитных импульсов на полупроводниковые структуры указывают на сложный характер взаимодействия, не поддающегося однозначному описанию. Поскольку мощный ЭМИ несет в себе достаточно большое количество энергии, то, очевидно, что его воздействие вызывает в ПС определенные изменения. Эти изменения могут включать в себя самый широкий спектр эффектов, включая явные и скрытые пробои *p-n*-переходов, выгорание отдельных участков полупроводника, обрыв металлизации, пробой тонких слоев диэлектриков и т.д.

Ключевые слова. Полупроводниковая структура, электронная система, электромагнитный импульс, электромагнитная помеха, электромагнитная обстановка, чувствительность к импульсному воздействию, отказы, работоспособность.

Введение. Электронные средства (ЭС) в процессе эксплуатации подвергаются воздействию внешних дестабилизирующих факторов, среди которых наиболее опасными являются электромагнитные помехи (ЭМП). Полное нарушение работоспособности ЭС может происходить вследствие воздействия ЭМП большой мощности, что, как правило, приводит к выделению энергии на элементах аппаратуры. Мощные ЭМП являются следствием воздействия молнии, космического излучения, ядерного взрыва, искусственно созданного направленного электромагнитного воздействия и т.п. Спектр реальных ЭМП большой мощности можно представить состоящим из одиночных или многократных импульсов. Электромагнитный импульс (ЭМИ) в зависимости от типа помехи имеет различную форму и характеризуется определенной падающей мощностью и продолжительностью [1–12].

Одним из путей защиты ЭС при работе в сложной электромагнитной обстановке (ЭМО) является снижение электромагнитной восприимчивости входящих в аппаратуру полупроводниковых структур (ПС). Исследования эффектов воздействия ЭМИ на полупроводниковые структуры указывают на сложный характер взаимодействия, не поддающегося однозначному описанию [13].

Основная часть. Отказы полупроводниковых приборов при воздействии ЭМП рассматривались Л.У. Рикетсом, Д.К. Ваншом, Л.Н. Кечиевым, Е.Д. Пожидаевым, Т. Уильямсом, Д.М. Таска, В.М. Дьюером, А.Дж. Франклином и другими исследователями. Они достаточно подробно описали изменения электрических параметров ПС при работе в неблагоприятной ЭМО, сбой в работе микропроцессоров, физические изменения в структуре приборов. Однако недостаточное внимание уделено прогнозированию отказов, вызванных локальными перегревами в ПС при воздействии наносекундных импульсных помех. Поэтому актуальным является описание процессов теплового пробоя в ПС с помощью тепловых моделей, которые сохраняют свою адекватность при рассмотрении действия ЭМИ большой мощности и наносекундной длительности, а также учитывают теплофизические свойства ПС. Это позволяет разработать методику прогнозирования работоспособности ПС с учетом особенностей теплопереноса при заданных параметрах ЭМИ.

Работа ЭС требует наличия у них большого количества функциональных связей. Эти связи, как правило, и являются основными путями воздействия ЭМП на ПС. На рисунке 1 приведена обобщенная структурная схема такого взаимодействия, в которой можно выделить два вида взаимодействия – прямое и косвенное. Прямое взаимодействие характеризуется непосредственным влиянием электромагнитных полей источников помех на всю ЭС или ее элементную базу, которое приводит к нарушению или ухудшению качества функционирования этих средств. Результат косвенного воздействия сопровождается теми же последствиями, что и прямое воздействие. Такое воздействие может осуществляться только через составные элементы ЭС, когда они, выступая рецепторами электромагнитной энергии, трансформируют ее и затем уже сами по себе являются для элементов ЭС источниками ЭМП, создавая тем самым внутреннюю неблагоприятную ЭМО.

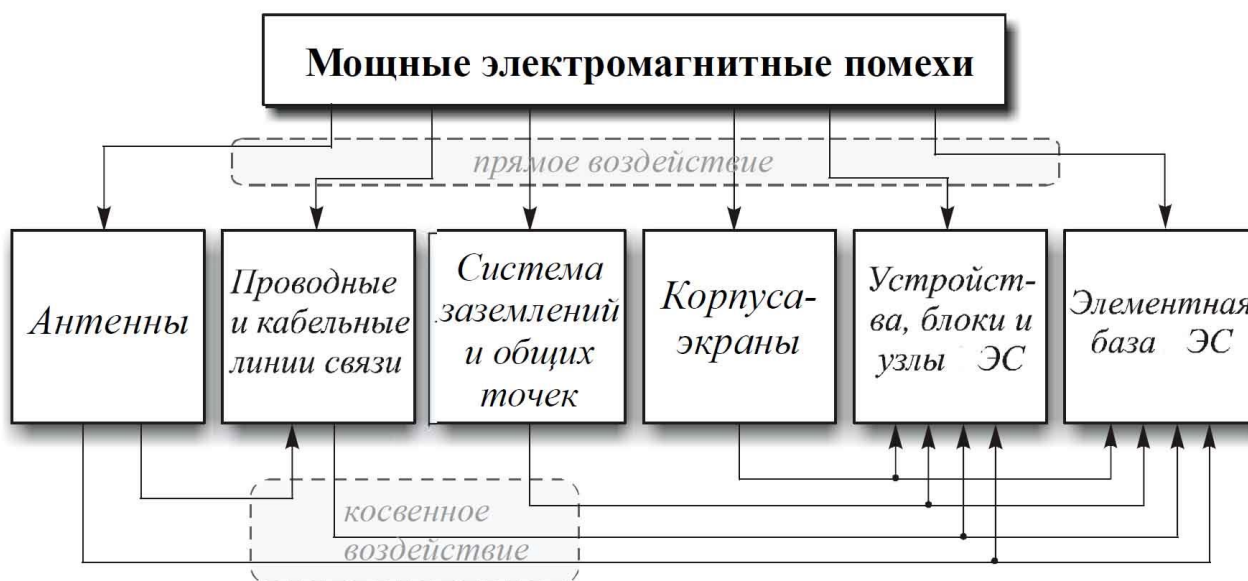


Рисунок 1 – Схема образования металл-цитратного комплекса алюминия [14]

Одним из наиболее очевидных путей воздействия ЭМП на ПС являются проводные, кабельные и межблочные линии связи ЭС, всевозможные проводники, провода сети, а также передающие и приемные антенны. В проводниках, проходящих через области с неблагоприятной ЭМО, индуцируются напряжения и токи (наводки), которые впоследствии передаются ПС. Если не предусмотрены соответствующие защитные цепи или предохранительные устройства, энергия ЭМП выделяется на элементах ПС. Как правило, воздействие ЭМП на ЭС осуществляется комплексно, суммируясь или повторяясь на отдельных элементах.

Отказы в ПС при наличии ЭМП часто являются не только результатом непосредственного действия ЭМИ, но следствием целого ряда известных гальванотермических эффектов. Эти эффекты могут также возникать и как реакция на действие ЭМИ. Повреждения ПС, нестабильность их параметров обуславливаются суммированием эффектов воздействия ЭМИ и режимов работы полупроводниковых структур, а иногда и пространственным положением полупроводникового кристалла относительно направления прихода импульса.

При рассмотрении реакции ПС на воздействие мощного ЭМИ протекающие процессы можно разделить на два взаимодействия:

- влияние изменения напряжения и протекающего через структуру тока из-за наводок на внешних выводах схемы;
- влияние ЭМП от находящихся рядом элементов, чей уровень электромагнитного излучения может увеличиться вследствие действия ЭМИ.

Последнее влияние рассматривается как внешнее воздействие ЭМП. Вместе с тем оно, как правило, менее существенно, чем первое. Таким образом, воздействие ЭМИ на ПС мож-

но рассматривать как действие электрического сигнала некоторой длительности и амплитудой определенной формы.

Поскольку мощный ЭМИ несет в себе достаточно большое количество энергии, то, очевидно, что его воздействие вызывает в ПС определенные изменения. Эти изменения могут включать в себя самый широкий спектр эффектов, включая явные и скрытые пробой $p-n$ -переходов, выгорание отдельных участков полупроводника, обрыв металлизации, пробой тонких слоев диэлектриков и т.д. [1-12]. В выходных характеристиках эти процессы выражаются обычно либо в полной неработоспособности ПС (полный отказ), либо в уходе выходных параметров за установленные пределы (частичный отказ) [13]. При многократном действии импульсов чаще происходит разогрев только поверхностного слоя металлизации, в то время как необратимые отказы происходят редко [1-13].

Взаимодействие внешних ЭМИ с ПС представляет собой сложный процесс, состоящий из нескольких стадий, результатом которого является определенное изменение входных и выходных параметров прибора. Степень этой реакции зависит от многих факторов, но в первую очередь определяется параметрами импульса: энергией и продолжительностью ЭМИ, его кратностью, полярностью и т.д. Нестабильность параметров полупроводниковых структур, вызываемая действием ЭМИ, также зависит от характеристик самого прибора и от условий его эксплуатации. Однозначную корреляцию между указанными факторами установить не удаётся, однако имеются определённые зависимости влияния конкретного параметра на деградацию ПС.

Любое внешнее электромагнитное воздействие на полупроводник вызывает в нём определённые изменения, которые могут оказывать некоторое влияние на его электрофизические характеристики.

Полупроводниковые структуры оказываются наиболее чувствительными к импульсному воздействию и соответствующим переходным процессам уже при наносекундных длительностях ЭМИ [1-2]. Относительно небольшую стойкость ПС можно объяснить малыми размерами активных элементов полупроводникового кристалла по сравнению с сопутствующими структурами прибора. Дальнейшее уменьшение размеров ПС повышает их уязвимость перед ЭМИ.

В зависимости от степени изменения выходных параметров полупроводниковых структур при воздействии наносекундных импульсных помех последствия отказа можно условно разделить на несколько групп:

1. Характеристики ПС не изменены, что указывает на то, что повреждение в структуре не произошло или произошло незначительное повреждение, не оказывающее никакого влияния на выходные характеристики прибора.

2. ВАХ ПС изменены, значения протекающего через структуру тока увеличились, что говорит о возможной деградации структуры.

3. ВАХ ПС изменены, значения протекающего через структуру тока уменьшились, что также говорит о возможной деградации структуры.

4. ВАХ ПС сильно изменились, наблюдаются видимые пробои.

5. ВАХ ПС приблизительно линейны, ясно наблюдаются сильные повреждения на поверхности полупроводникового кристалла.

Заключение. Экспериментальные исследования по выявлению отклика ПС на действие мощных наносекундных импульсных помех дают основание сделать вывод о значительном преобладании тепловой причины отказов ПС. Выделившаяся теплота, в свою очередь, оказывает сильное влияние на выходные параметры структуры.

Список литературы

1. Алексеев, В.Ф. Определение критериев отказов полупроводниковых структур при импульсном нагреве / В.Ф. Алексеев, В.И. Журавлев // Известия Белорусской инженерной академии. – №1(19)/2 – 2005. – С.56-58.
2. Алексеев, В.Ф. Определение температуры $p-n$ -перехода вследствие импульсного нагрева и его программная реализация / В.Ф. Алексеев, В.И. Журавлев // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. – 2006. – вып.17 – С.76-80.

3. The Impact of ESD on Microcontrollers / G.A. Piskun [et al.] ; edited by PhD, Associate professor V.F. Alexeev. – Minsk : Kolorgrad, 2018. – 184 p.
4. Alexeev, V.F. Modeling of nonstationary heating of semiconductor structures under HEMP actions with short pulse duration / V.F. Alexeev, V.I. Zhuravliov // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. – 2006. – Vol. 6, № 3. – P. 429 – 435. – DOI: 10.1109/TDMR.2006.882200.
5. Zhuravliov, V. Thermal conductivity influence on failures of semiconductor ICs under powerful EMP action / Vadim Zhuravliov, Victor Alexeev // The 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC): Symp. Rec. - 2003. – Vol. 2. – P. 1040-1042. – DOI: 10.1109/ICSMC2.2003.1429092.
6. Alexeev, V.F. Adequacy checkout of thermal models for degradation prediction of integrated circuits at HEMP action / V.F. Alexeev, V.I. Zhuravliov // International Symposium on Electromagnetic Compatibility “EMC Europe 2006”. Barcelona, Spain. – 2006. – Pp. 221-223.
7. Алексеев, В.Ф. Методика оценки работоспособности ПС к воздействию электромагнитных помех на основе теплового моделирования / В.Ф. Алексеев, В.И. Журавлев // Инженерный вестник. №1(21)/1 – 2006. – С. 44-48.
8. Модели прогнозирования надежности интегральных схем с учетом воздействия электростатического разряда / В.Ф. Алексеев [и др.] // Slovak international scientific journal. – 2018. – Vol. 1, N 24. – Pp. 47–62.
9. Алексеев, В.Ф. Моделирование и оптимальное проектирование технических систем: пособие к практическим занятиям : пособие / В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун, В.А. Перевошиков. – Минск : БГУИР, 2017. – 116 с.
7. End to end learning for a driving simulator / V.F. Alexeev and others // Доклады БГУИР. – 2018. – № 2 (112). – С. 85–91.
10. Алексеев, В.Ф. Обеспечение безопасности функционирования средств медицинской электроники при воздействии мощных электромагнитных импульсов / В.Ф. Алексеев [и др.] // Медэлектроника – 2014. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сборник научных статей VIII Международная научно-техническая конференция (Минск, 10 – 11 декабря 2014 г.). – Минск : БГУИР, 2014. – С. 169–172.
11. Моделирование джоулева нагрева в среде COMSOL Multiphysics / В.Ф. Алексеев [и др.] // Доклады БГУИР. – 2018. - № 7 (117). – С. 90–91.
12. Журавлев, В.И. Повышение электромагнитной устойчивости полупроводниковых структур оптимизацией их теплового режима / В.И. Журавлев, В.Ф. Алексеев, В.П. Бруцкий-Стемпковский // Известия Белорусской инженерной академии. – 2000. – №1(9)/2. – с.158–160.
13. Урбанович, П.П. Избыточность в полупроводниковых интегральных микросхемах памяти. / П.П. Урбанович, В.Ф. Алексеев, Е.А. Верниковский, // Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 262 с.
14. Кравченко, В.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / В.И. Кравченко, Е.А. Болотов, Н.И. Летунова – М.: Радио и связь. 1987. – 256 с.

UDC 621.396

FEATURES OF REACTIONS AND FAILURES IN SEMICONDUCTOR STRUCTURES CAUSED BY THE ACTION OF AN ELECTROMAGNETIC PULSE

Panasyyuk N.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Alexeev V.F. – PhD of technical sciences, Piskun G.A. – PhD of technical sciences

Annotation. It is shown that electronic devices in the process of operation are exposed to external destabilizing factors, among which the most dangerous are electromagnetic interference. It is noted that studies of the effects of the action of electromagnetic pulses on semiconductor structures indicate a complex nature of the interaction that does not lend itself to an unambiguous description. Since a powerful EMP carries a fairly large amount of energy, it is obvious that its effect causes certain changes in the PS. These changes can include the widest range of effects, including explicit and latent breakdowns of pn junctions, burnout of individual sections of a semiconductor, breakdown of metallization, breakdown of thin layers of dielectrics, etc.

Keywords. Semiconductor structure, electronic system, electromagnetic pulse, electromagnetic interference, electromagnetic environment, pulse sensitivity, failures, performance.