

Эффект от внедрения разрабатываемых виртуальных лабораторных работ будет обусловлен следующим:

1) экономией финансовых средств в виду того, что отпадает необходимость в покупке дорогостоящих компонентов реальных электронных систем безопасности, исследуемых на надёжность, в частности датчиков и исполнительных устройств большой номенклатуры, микропроцессорных приёмно-контрольных устройств и др.;

2) отсутствием необходимости технологической подготовки, предшествующей выполнению лабораторных работ, а также текущего и, как правило, дорогостоящего ремонта лабораторных экземпляров исследуемых технических средств (технические устройства и системы являются виртуальными, кроме самих компьютеров, которые используются для моделирования устройств и систем);

3) глубоким осмыслением основных положений учебной дисциплины, так как компьютерная реализация процесса длительной наработки технических устройств и систем позволяет быстро «проиграть» большое число вариантов структуры устройств и систем и выбрать лучший из них.

Предварительный анализ, проведённый авторами, показал, что наиболее сложным этапом создания виртуального лабораторного практикума по дисциплине «Надёжность технических систем» является написание сценария к виртуальным лабораторным работам. При участии авторов на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем разработаны и апробированы первые варианты программных средств, разработанных на основе предложенных сценариев. Авторы будут благодарны за советы по подготовке новых сценариев к лабораторным работам. Предложения и рекомендации отправлять по e-mail: shneiderov@bsuir.by

Список использованных источников:

4. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учеб. для студентов инж.-техн. спец. вузов / С. М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
5. Литвинский, И. Е. Обеспечение безотказности микроэлектронной аппаратуры на этапе производства / И. Е. Литвинский, В. А. Прохоренко, А. Н. Смирнов. – Минск : Беларусь, 1989. – 191 с.
6. Peck, D. S. The Reliability of Semiconductor Devices in the Bell System / D. S. Peck, C. H. Zierdt // Proc. IEEE. – 1974. – V. 62, № 2. – P. 185–211.
7. Прогнозирование надёжности изделий электронной техники / С. М. Боровиков [и др.]; под ред. С. М. Боровикова; УО «БГУИР». – Минск : МГВРК, 2010. – 308 с.

## АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИЧИН НЕОБРАТИМЫХ ОТКАЗОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭМИ

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

Бужинский А. Д.

Алексеев В. Ф. – канд. техн. наук, доцент

Анализ физических причин необратимых отказов полупроводниковых структур при воздействии ЭМИ позволяет сделать вывод о весьма сложном процессе их деградации, в котором преобладающее влияние оказывает *тепловой механизм* отказов. Для *p-n*-переходов этапы этого процесса можно кратко записать в виде: ЭМИ – наведённые помехи – изменение протекающего тока – электрический (лавинный) пробой – тепловой пробой – выгорание. Тепловому пробую обычно предшествует электрический пробой, но для широких переходов тепловой пробой может наступить, минуя электрический.

Особенно легко стимулируется тепловой пробой обратно смещённых *p-n*-переходов. Замечено, что энергия, необходимая для инициирования теплового пробоя, намного меньше в случае быстро нарастающих импульсов. Если же ток в данной цепи достаточно ограничен, то характеристики ПС восстанавливаются без электрической деградации. В результате наблюдаются дефекты плавления шины металлизации за счёт объёмного теплового пробоя, а также дефекты из-за пробоя диэлектрика, находящегося между токопроводящими дорожками. В данном случае механизм пробоя – лавина и последующий разогрев тонкой области металлизации до температуры плавления. При этом происходит локальная ломка на границе полупроводник-контактная дорожка. Под действием СВЧ-облучения происходит катастрофический скрытый пробой, ведущий к разрыву одной из подокисных шин металлизации, вследствие чего ПС выходит из строя.

Как показывают исследования физическая сущности отказов в ПС при действии ЭМИ, резкий рост входного тока и напряжения вызывает выделение избыточной мощности в локальных объёмах кристалла (рис. 1). Это приводит к возникновению в полупроводниковом кристалле достаточно больших перепадов температур в ограниченной области вследствие нагрева Джоуля, что и приводит к пробоям *p-n*-переходов, среди которых доминирует тепловой. Перепады температур на некоторых участках полупроводникового кристалла иногда могут достигать нескольких сотен градусов.

Наибольшая их величина вероятна в области именно *p-n*-переходов. Экспериментальные исследования показывают, что вначале происходит нестационарный разогрев области перехода вследствие электрического пробоя, в результате чего преимущественно на дефектах зарождаются участки возможного теплового пробоя – мезоплазмы. Сами по себе эти образования не приводят к обширному плавлению перехода, и при

снятии нагрузки переход часто сохраняет свои свойства [1, 2]. Однако время жизни мезоплазм составляет около  $10^{-12} \dots 10^{-6}$  с. Поэтому дальнейшее воздействие ЭМИ вызывает рост числа мезоплазм, которые затем соединяются в более крупное образование – микроплазму. Микроплазменное состояние участка перехода уже непосредственно создаёт предпосылки к его тепловому пробую. Именно поэтому считается, что ЭМИ обуславливает так называемый вторичный пробой ПС (сначала первичный электрический пробой, а затем вторичный тепловой пробой).

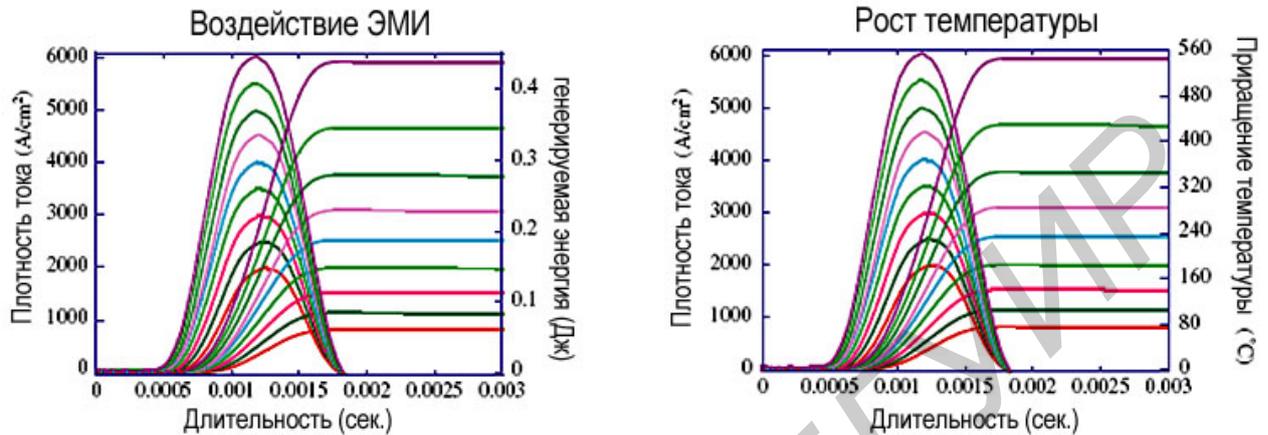


Рис. 1 – Увеличение плотности протекающего через ПС тока при ЭМИ и соответствующий ему резкий рост локальной температуры нагрева

Большие градиенты температуры в небольшом объёме полупроводника обусловлены прежде всего короткой продолжительностью действия ЭМИ и малыми размерами элементов ПС. Опыты указывают на возникновение тепловых градиентов в полупроводнике уже при ЭМИ длительностью менее  $10^{-3}$  с и энергией от 5 мкДж. При импульсах более продолжительного времени действия может восстановиться тепловое равновесие, и, хотя и нарушается обычный режим работы прибора, это, как правило, не приводит к необратимым отказам. При очень кратковременных импульсах ( $< 10^{-12}$  с) ПС обычно не получает достаточного количества энергии для возникновения больших перепадов температур.

Другим возможным проявлением тепловых процессов деградации после воздействия ЭМИ является нагрев металлизации и контактных областей, вследствие чего происходят миграционные процессы и плавление (рис. 2) [1, 2].

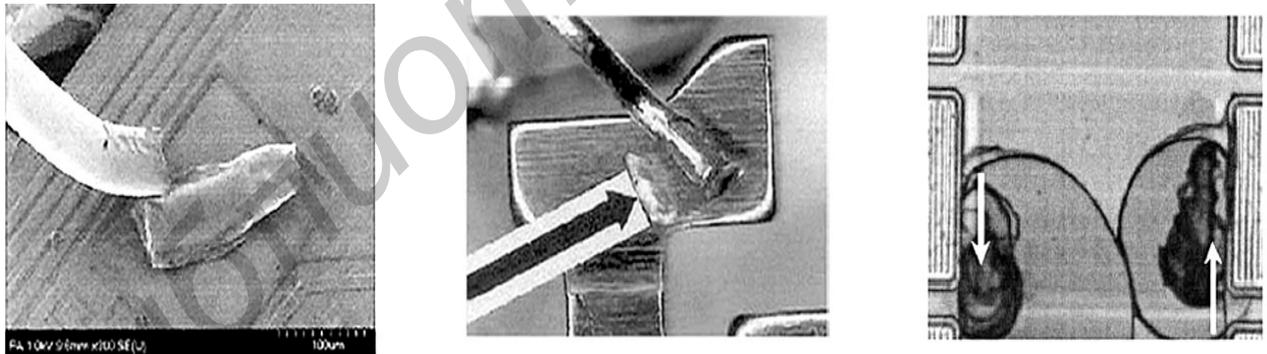


Рис. 2.– Разрушение контактной металлизации ПС при импульсном нагреве вследствие ЭМИ

С точки зрения выходных характеристик эти процессы также относят к тепловому пробую ПС. Деграционные процессы металлизации ПС при ЭМИ обычно являются следствием воздействия многократных импульсов. Даже малые локализованные взаимодействия на контактах приборов вследствие ЭМИ опасны для работоспособности полупроводниковых структур. Поэтому одним из методов обнаружения подобных дефектов на ранней стадии для прогнозирования возможного отказа прибора вследствие выгорания является анализ обратных ВАХ приборов.

В целом, обобщая возможные процессы деградации ПС при воздействии мощных ЭМИ, можно сказать, что проявление различных видов отказов обычно происходит комплексно, часто последовательно друг за другом без видимой границы между механизмами отказов.

Список использованных источников:

1. Алексеев, В.Ф. Тепловые модели отказов полупроводниковых структур при воздействии мощных электромагнитных импульсов / В.Ф. Алексеев, В.И. Журавлёв // Доклады БГУИР. – 2005. – № 3-4. – С. 65–72.

2. Alexeev, V.F. Modeling of non-stationary heating of semiconductor structures under HEMP actions with short pulse duration / V.F. Alexeev and V.I. Zhuravliov // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. – 2006. – Vol. 6, № 3. – P. 595–601.

## ВИДЫ ОТКАЗОВ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

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

Бужинский А. Д.

Алексеев В. Ф. – канд. техн. наук, доцент

Ранние отказы активных элементов (АЭ), имеющие место в первые несколько сотен часов работы, вызваны, как правило, дефектами в окисле (проколами), вследствие которых образовались паразитные диффузионные области или короткое замыкание металлизации с кремнием, загрязнениями окисла, вызывающими повышенные токи утечки  $p$ - $n$ -переходов [1, 2].

Полупроводниковые ИС отличаются повышенной устойчивостью к ударным и вибрационным нагрузкам (безопасно выдерживают ускорения в 1000 g). Полупроводниковые активные элементы весьма чувствительны к перегрузкам по току и напряжению и выходят из строя даже при кратковременных перегрузках измеряемых миллисекундами. Кроме того, их надежность чрезвычайно зависит от температуры  $p$ - $n$ -перехода. В маломощных логических схемах, где разогрев кристалла незначителен, повышение температуры корпуса от 20 до 125°C увеличивает интенсивность отказов транзисторов в 18 раз, а при  $T=200^\circ\text{C}$  – в 50 раз.

Наиболее распространенной причиной отказов АЭ является выход из строя  $p$ - $n$ -перехода. Известны следующие виды отказов  $p$ - $n$  структур:

а) короткое замыкание (к.з.) в диодах и биполярных транзисторах: попадание проводящих частиц между контактными площадками или выводами;

б) пробой  $p$ - $n$ -переходов и проплавление металлизации через диффузионные слои в кремнии при высоких уровнях рассеиваемой мощности.

Короткие замыкания  $p$ - $n$ -переходов из-за нахождения между контактными площадками или выводами посторонних проводящих частиц, например металлических, встречаются редко. Эти частицы появляются вследствие отслаивания осажденного химическим путем металлического покрытия внутренней поверхности корпуса при резких ударах. При работе схемы в условиях вибрации металлические частицы могут попасть на кристалл и замкнуть один из  $p$ - $n$ -переходов.

Наибольшую опасность представляют различные виды пробоев  $p$ - $n$ -переходов, возникающие из-за перегрузок по току и напряжению.

Эти перегрузки обуславливаются неправильным использованием ИС в электронных устройствах и некорректной методикой измерения их параметров. При пробоях имеет место рассеивание больших мощностей, приводящее к нагреву кристалла вплоть до расплавления металлизации и проникновения металла через диффузионные слои в эмиттере и базе. В результате происходит к.з.  $p$ - $n$ -переходов эмиттер-база и база-коллектор. Асимметричные вольт-амперные характеристики  $p$ - $n$ -переходов вырождаются в прямые линии с наклонами, равными величинам малого сопротивления между замкнутыми электродами. Очевидно, что при этом диод или биполярный транзистор имеют катастрофический отказ.

Следует отметить, что пробой  $p$ - $n$ -переходов в кремниевых планарных диодах и транзисторах ИС не происходит одновременно по всей площади переходов.

Вторичный пробой проявляется в виде резкого уменьшения напряжения между выводами транзистора эмиттер-коллектор  $U_{кэ}$  с одновременным ростом коллекторного тока. Если транзистор находится достаточно долго (более 1мс) в состоянии вторичного пробоя, то происходит расплавление эмиттерной и базовой металлизации, проплавление сквозь базу и, следовательно, к.з. в цепях эмиттер-база, эмиттер-коллектор.

Анализ показывает, что вторичный пробой может иметь место при малых коллекторных токах и больших напряжениях  $U_{кэ}=U_{кэ0}$ , когда наблюдается заметная ударная ионизация в коллекторном  $p$ - $n$ -переходе, так и при сравнительно малых напряжениях  $U_{кэ}\ll U_{кэ0}$ , но при больших токах  $I_k$ .

В логических ИС транзисторы работают при очень малых уровнях мощности  $P < 10\text{мВт}$  и при малых  $U_k < 10\text{В}$ . Поэтому в таких схемах выход транзисторов из строя вследствие возникновения вторичного пробоя в нормальных рабочих условиях маловероятен. В микромощных логических схемах к.з. диодов и биполярных транзисторов происходит, как правило, вследствие туннельного пробоя эмиттерного и лавинного пробоя коллекторного  $p$ - $n$ -переходов при случайных значительных превышениях пробивных напряжений переходов  $U_{э60}$  и  $U_{к60}$ .

Исследования показали, что при подаче обратного напряжения длительностью даже несколько микросекунд, превышающего напряжение пробоя  $p$ - $n$ -перехода, в последнем выделяется значительная мощность и вследствие локального теплового удара происходит растрескивание кристалла кремния и окисла над ним. Это явление названо «*эффектом бильярдного шара*». После растрескивания сопротивление  $p$ - $n$ -перехода резко уменьшается, протекающие через деградированный переход токи резко увеличиваются. В результате локальный разогрев достигает температуры образования эвтектики  $Al-Si$  и алюминий проникает в слой кремния, вызывая к.з.  $p$ - $n$ -перехода.