

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ НАРУШАЮЩИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ МИКРОСХЕМ

Даниленко А.В.

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

Научный руководитель: Шнейдеров Е.Н. – канд. техн. наук, начальник ЦРДО

Аннотация. Надежность интегральных микросхем определяется надежностью, входящих в него элементов. Для обеспечения качественного функционирования устройства необходимо убедиться, что элементы, входящие в ее состав, обладают значениями надежности достаточными для безотказной работы всей системы. В статье рассмотрены несколько возможных причин отказов интегральных микросхем.

Ключевые слова: отказ микросхем, микроэлектроника, надежность электроники

Введение. В условиях роста сложности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем изучения физических процессов механизмов отказов имеет, по крайней мере, две цели. Первая из них с помощью анализа приборов, отказавших по какой-либо причине, улучшать на этой основе технологии изготовления приборов и осуществлять мероприятия по совершенствованию правильности их применения. Вторая цель - через раскрытие и познание физических явлений, приводящих к отказам, совершенствовать существующие и создавать новые модели надежности приборов, используемые для контроля надежности разрабатываемых приборов и для прогнозирования надежности приборов, находящихся в серийном производстве.

Существенно важным аспектом является определение возможности распространения результатов обработки полученной информации о количественных показателях надежности на приборы, за период эксплуатации предыдущих неизбежно претерпели значительные конструкционные изменения. В настоящее время в силу исключительно высокого динамизма в области полупроводниковой электроники все большее предпочтение отдается пути, связанным с совершенствованием приборов, повышением их надежности. Знание, почему тот или иной прибор надежный или ненадежный, своевременная разработка и принятие необходимых мер по увеличению его надежности куда важнее, чем знание действительного уровня его надежных характеристик. Это обстоятельство вызвало к жизни такие направления в надежности, как физическая надежность, физика механизмов отказов, направленные на изучение механизмов отказов, на разработку методов внесения коррекции в приборы и методов контроля действенности внесенных изменений и совершенств.

Важно подчеркнуть различия между видами и механизмами отказов. Вид отказа - это очевидное событие, через которое оказывается неисправность прибора. Этим событием может быть, например, потеря усилительных свойств, короткое или замыкания обрыв. В ряде случаев вид отказа без исследования внутренней структуры прибора невозможно установить. В данном случае мы имеем дело с так называемым функциональным отказом. Механизм отказа - это физико-химический процесс, ведущий к отказу. С точки зрения надежности недостаточно или знать установить, с каким видом отказа мы имеем дело. Куда существеннее узнать причины, приведших к отказу. Это главная цель анализа отказов.

В полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах с идеальной структурой физико-химические процессы при нормальной эксплуатации должны протекать с очень малыми скоростями, вследствие того, что активные области находятся в нейтральной среде, изолированной герметичным корпусом от внешних агрессивных воздействий, а режимы применения обеспечивают незначительный перегрев структуры.

Изложенные выше обстоятельства в свое время послужили основой для предположения исключительно высокой долговечности полупроводниковых приборов, вычислительной сотнями лет. Высказано предположение в определенной степени находит свое подтверждение в том, что усталости явления и износу отказов в полупроводниковых приборах до сих пор не наблюдалось. Однако наличие в структуре приборов различных дефектов и несовершенств, что существенно ускоряет физико-химические процессы в них при воздействии электромагнитных и тепловых полей и механических нагрузок, дают основание, как это было показано выше, рассматривать реальные полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы как термодинамически неустойчивые системы, содержащих дефекты и несовершенства. Рассмотрим некоторые механизмы отказов, характерные для наиболее распространенных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Как одна из причин выхода приборов из строя рассмотрим коррозию и окисление металлизации. Проникновение влаги в герметизированный корпус, адсорбция ее на поверхности металлизации, через поры и трещины в защитные покрытия, а также наличие ионных загрязнений на поверхности кристалла способствуют возникновению коррозии металлизации, что носит, как правило, электрохимический характер. При достижении относительной влажности внутри корпуса около 60% создаются благоприятные условия для адсорбирования на поверхности кристалла достаточного количества влаги, обеспечивает высокую электролитическую проводимость. При производстве приборов имеется большое количество источников загрязнения поверхности кристалла ионами примеси. В первую очередь это загрязнения, попадают в результате обработки пластин. Далее, это атмосфера, в которой проводится герметизация, конструкционные детали корпуса, клеевые составы, применяемые для посадки кристалла и пластмасса, используемая для герметизации приборов.

Наиболее опасными для алюминия являются ионы натрия, калия и хлора. Через амфотерности алюминий может корродировать как в кислой, так и в щелочной среде. Как правило, в большей степени подвержены коррозии металлические электроды, находящиеся под отрицательным потенциалом (катодная коррозия). Они разрушаются под действием положительно заряженных ионов. Такому же воздействию подвергаются положительно заряженные электроды, взаимодействуя с отрицательными ионами. Однако скорость коррозии положительно заряженных участков ниже, так как на них одновременно с коррозией идет активный процесс образования слоя окиси алюминия, препятствующий дальнейшему его разрушению. При наличии на поверхности кристалла ионов хлора коррозия положительных участков металлизации значительно ускоряется вследствие большой проникающей способности ионов хлора через толстую пленку окиси алюминия.

Скорость коррозии существенно зависит от напряжения, подаваемого на схему. Разность потенциалов 5В и более достаточное для того, чтобы возникла интенсивная коррозия. Скорость коррозии зависит от расстояния между электродами, температуры окружающей среды и концентрации ионов примеси на поверхности кристалла. Анализ отказов, возникших в результате коррозии, показывает, что последняя возникает и развивается в первую очередь на границах зерен с образованием сплошных микротрещин, приводящих к обрыву металлизации. Применение фосфорсиликатного стекла с повышенным содержанием фосфора значительно увеличивает коррозию, так как избыточный фосфор, взаимодействуя с водой, образует фосфорную кислоту, усиливает коррозию металлизации. Снижение весовой концентрации фосфора в фосфорсиликатном стекле, контактирует с алюминиевой металлизацией до 5%, увеличивает среднюю наработку до отказа из-за коррозии более чем на три порядка.

Параллельно с механизмами электродиффузии и электрохимической коррозии действует механизм деградации металлических пленок, связанный с окислением алюминия, что ведет к увеличению омического сопротивления токоведущих дорожек. Механизм отказа в этом случае состоит во взаимодействии кислорода с поверхностью зерен в объеме материала. В результате роста окисной пленки на поверхности проводящих дорожек и образования окисных межзернового слоев уменьшается объем и эффективное поперечное сечение проводника

и, как следствие, увеличивается удельное сопротивление материала, ухудшение условия прохождения электрического тока по токоведущим дорожкам нарушает температурный режим устройства, приводя к локальным перегревам, усилению электродиффузии и роста вероятности отказа за счет обрыва металлизации.

Кроме того, локальный перегрев токоведущих дорожек способствует укрупнению зерен поликристаллической структуры материала за счет слияния соседних зерен и разрастания их к поперечному размеру дорожки. В этих условиях происходит или разрыв отслаивание металлизации из-за большого растягивающего усилия, возникающие в местах разрастания зерен. Действие данного механизма отказов может быть существенно ослаблено за счет снижения плотности тока, протекающего по токоведущим дорожкам, а также добавлением в металлизацию специальных добавок, например иттрия до 1%, повышающие температуру рекристаллизации.

Так же рассмотрим такие причины как механизм пробоя в тонком окисле и эффект горячих носителей. В современных МДП-структурах толщина подзатворного окисла достигла 20 нм и менее. При дальнейшем масштабировании приборов с длиной канала до 0,25 мкм толщина подзатворного окисла, очевидно, достигнет 5 нм, что приведет к резкому росту электрического поля в диэлектрике до уровня, при котором наступит внутренний пробой. Для окисных тонких пленок толщиной около 10 нм предельное напряжение пробоя составляет 8 ... 10 мВ. Наиболее распространенной моделью внутреннего пробоя является модель ударной ионизации - рекомбинации. Суть ее заключается в следующем.

Под действием электрического поля свободный электрон при движении в окиси достаточной толщины на длине свободного пробега успевает получить энергию для ударной ионизации атомов матрицы и создание электронно-дырочных пар. Вследствие большей подвижности электронов опережают в движении дыры, оставляя позади облако положительных заряженных носителей заряда, создает дополнительное поле, ускоряет на пути следующей порции электронов. Таким образом, в системе ударной ионизации появляется положительная обратная связь, способствует лавинному размножению носителей и наступлению состояния пробоя. Большая вероятность возникновения такой же ситуации в системах многослойной металлизации. Толщина слоев изоляции в этих системах существенно больше, чем толщина подзатворного диэлектрика. Однако качество этих слоев много ниже главным образом из-за неровности поверхности металлических и поликремниевых дорожек. Поэтому в местах сужений диэлектрических слоев и на остриях выступлений могут возникать повышенные напряженности электрического поля, приводящие к пробоям.

Следующим физическим механизмом, вызываемым ростом электрического поля в тонких диэлектрических слоях и приборах при масштабировании, механизм инжекции горячих электронов из кремния в надкостничный слой. Горячие электроны - это высокоэнергетичные носители, образующихся при лавинного пробоя р-п или перехода в области повышенного электрического поля вблизи стока МДП-транзистора с коротким каналом.

Инжекция и захват горячих носителей ответственных за деградацию коэффициента усиления биполярных транзисторов. Для МДП-транзисторов при масштабировании их геометрических размеров до 1 мкм и менее захват горячих носителей является определяющим фактором, имеет фундаментальное значение в деле обеспечения стабильности работы приборов.

Инжекция горячих носителей может идти несколькими путями, в том числе за счет возникновения горячих электронов в канале и в объеме полупроводника. Горячие электроны в канале - это электроны, идущие от истока к стоку. В режиме насыщения в n-канальном МДП-транзисторе создается большое электрическое поле вблизи стока. Под его влиянием электроны при прохождении от истока к стоку получают значительную энергию. В результате рассеяния на атомах решетки создается поток электронов со случайным распределением скоростей, содержит определенную долю электронов, способных преодолеть потенциальный барьер на границе раздела системы кремний - двуокись кремния и проникнуть в подзатвор-

ный окись. Установлено, что ток горячих носителей имеет экспоненциальную зависимость от напряжения на затворе.

Электрическое поле в окиси противодействует инжекции горячих электронов, поэтому горячие электроны сосредотачиваются в непосредственной близости от точки перекрытия канала, расположенного в стока. При низких температурах эффект инжекции горячих электронов значительно выше, так как рассеяние на колебаниях решетки снижается.

Другим источником горячих электронов является термогенерация носителей в объеме полупроводника. Электроны подложки р-типа ускоряются положительным напряжением на затворе, перемещая в пределах обедненной области, преодолевают потенциальный барьер на границе раздела системы кремний двуокись кремния.

Третьим источником горячих электронов может быть ударная ионизация и генерация электронно-дырочных пар. Если ударная ионизация происходит в результате действия электронов в канале, то в этом случае наиболее вероятная инжекция в окись дыр, движущихся по направлению электрического поля. С другой стороны, электронно-дырочные пары генерируются дырочным током подложки и ускоренные электроны могут инжектироваться в окись так же, как и электроны, возникающие при термогенерации.

При инжекции горячих электронов в подзатворного окись в среднем один из 105 инжектированных электронов захватывается на ловушках. Другой поток горячих электронов достигает затвора и собирается на нем. В связи с тем, что в основном горячие электроны возникают у стока, наиболее чувствительной характеристикой к этому механизму отказа является обратная отауслась вольтамперной характеристики транзистора за счет увеличения предельного напряжения. В частности, в n-канальных МДП-приборах это проявляется в виде значительного положительного сдвига обратной ветви ВАХ.

Одновременно с изменением предельного напряжения под действием горячих электронов происходит деградация проводимости канала, вызывается неоднородным распределением ловушек в окиси, захвативший электроны, или образованием новых заряженных состояний на поверхности раздела системы кремний - двуокись кремния.

Заклучение. Выполнен анализ негативного воздействия на электронные микросхемы которые могут привести к их выходу из строя. Анализ и понимание причин негативно влияющих на электронные микросхемы помогут в их предотвращении.

Список литературы

1. *Физические основы надежности интегральных схем/ Ю.Г. Миллер/ Радянское радио, 2016 г., Киев, Украина. – с.320.*
2. *Прогнозирование отказов полупроводниковых приборов/ В.С. Пряников/ Энергия, 1978 г., Москва, Россия. – с.112.*
3. *Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных схем/ А.А. Чернышев/ Радио и связь, 2005 г., Москва, Россия. – с.256.*

UDC 621.3.049.77–048.24:537.2

ANALYSIS OF MECHANISMS DISTURING THE FUNCTIONING OF MICROCIRCUITS

Danilenka A.V.

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

Shneiderov E.N. – PhD, head of CDDE

Annotation. The reliability of integrated circuits is determined by the reliability of the elements included in it. To ensure the high-quality functioning of the device, it is necessary to make sure that the elements that make up it have reliability values sufficient for the failure-free operation of the entire system. The article discusses several possible causes of failures of integrated circuits.

Keywords. microcircuit failure, microelectronics, electronics reliability