

# Лекция 6. Виды и механизмы отказов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем

## Понятие механизмов отказов

В практике надежности используются два традиционных пути, в направлении которых сосредотачиваются усилия производителей и потребителей полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Один из них направлен на измерение фактической надежности приборов с целью получения достоверных данных, необходимых для расчета надежностных характеристик аппаратуры. Однако этот путь требует существенных экономических затрат, которые значительно возрастают с увеличением надежности приборов, не давая возможности полностью удовлетворить разработчиков аппаратуры исчерпывающими сведениями о надежности приборов из-за бесконечного разнообразия условий применения и необходимости сбора и обработки огромного объема информации по результатам эксплуатации аппаратуры и длительных испытаний приборов. Существенно важным аспектом является определение возможности распространения результатов обработки полученной информации о количественных показателях надежности на приборы, которые за период эксплуатации их предшественников неизбежно претерпели значительные конструкционные изменения.

В настоящее время в силу исключительно высокого динамизма в области полупроводниковой электроники все большее предпочтение отдается второму пути, связанному с совершенствованием приборов, повышением их надежности. Знание, почему тот или иной прибор надежен или ненадежен, своевременная разработка и принятие необходимых мер по увеличению его надежности куда важнее, чем знание действительного уровня его надежностных характеристик. Это обстоятельство вызвало к жизни такие направления в надежности, как физическая надежность, физика механизмов отказов, которые направлены на изучение механизмов отказов, на разработку методов внесения коррекции в приборы и методов контроля действенности вносимых изменений и совершенств.

В условиях роста сложности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем изучение физических процессов механизмов отказов имеет, по крайней мере, две цели. Первая из них - посредством анализа отказавших приборов познавать вызывающие их причины, улучшать на этой основе технологию 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.

Важно подчеркнуть различие между видами и механизмами отказов. Вид отказа — это очевидное событие, через которое проявляется неисправная работа прибора. Этим событием может быть, например, потеря усилительных свойств, короткое замыкание или 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 знать или установить, с каким видом отказа мы имеем дело. Куда существеннее познать причины, приведшие 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, исчисляемой сотнями лет. Высказанное предположение в определенной степени находит свое подтверждение в том, что усталостные явления и износные отказы в полупроводниковых приборах до настоящего времени не наблюдались.

Однако наличие в структуре приборов различных дефектов и несовершенств, существенно ускоряющих 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, содержащие дефекты и несовершенства.

Многочисленные исследования отказов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в результате деградации их электрофизических параметров под действием температуры показали справедливость применения так называемого активационного комплекса для описания деградационных процессов. Это понятие впервые было введено шведским ученым С. А. Аррениусом в теории скоростей химических реакций в растворах, согласно которой зависимость константы скорости химической реакции от абсолютной температуры описывается следующим выражением:

$$k_p = A \cdot \exp(-E_a/kT)$$

где  $k$  - постоянная Больцмана;  $A$  - коэффициент, характеризующий общее количество столкновений взаимодействующих реагентов;  $E_a$  - энергия активации процесса.

Помимо химических реакций широкий круг физико-химических процессов, связанных с изменением концентрации вещества в результате перемещения частиц и их взаимодействия (например, диффузия примесей в объеме и на поверхности полупроводника, перемещение точечных, линейных и объемных дефектов) удовлетворяет основным законам этой теории. Аналогия деградационных процессов химическим реакциям позволяет моделировать температурную зависимость надежных характеристик приборов в экспоненциальной функции:

$$X(T) = K_x \cdot \exp(-E_a/kT)$$

где  $X(T)$  - один из показателей надежности, например интенсивность отказов, наработка до отказа, гамма-процентный ресурс;  $K_x$  - коэффициент, характеризующий конструкцию прибора, технологический процесс изготовления прибора.

Данное выражение не может быть непосредственно использовано для вычислений показателей надежности, так как коэффициенты  $K_x$ , как правило, не известны. Однако построив в полулогарифмическом масштабе зависимость:

$$\ln(X) = f(T^{-1})$$

По её характеру можно судить о механизмах, вызывающих возникновение отказов приборов, а по её наклону определить энергию активации деградационного процесса и его идентификацию.

Трудности применения модели Аррениуса заключается в том, что диапазон энергий активации большинства деградационных процессов, присущих полупроводниковым приборам и интегральным микросхемам, лежит в узкой области (менее 4 эВ), поэтому точность экспериментальных методов, применяемых при определении параметров уравнения Аррениуса, должна быть достаточно высокой.

## Механизмы отказов металлизации в результате электромиграции

Внутренние межэлементные соединения активных структур современных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем выполняются путем нанесения алюминиевой пленки толщиной около 1 мкм на поверхность кристалла с последующей фотолитографией и в соответствии с топологией разводки. С ростом сложности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем возрастает как протяженность разводки, так и площадь поверхности кристалла, занимаемая ею. В настоящее время в среднем она достигает 50% и по мере возрастания степени интеграции увеличивается, приводя к тому, что разработчики больших и сверхбольших интегральных микросхем вынуждены переходить на многоуровневую разводку, для того чтобы реализовать принятую

топологию активных областей кристалла. Металлическая пленка, нанесенная на поверхность готовой микросхемы, находится в неодинаковых условиях. В контактных окнах она взаимодействует с монокристаллическим кремнием р- или п-типов с различной степенью легирования, на остальной поверхности она контактирует с двуокисью кремния как в плоскости поверхности схемы, так и на ступеньках окисла. Неизбежна деформация металлической пленки на неровностях поверхности схемы и в Местах приварки проволочных контактов. В процессе эксплуатации полупроводниковых приборов и интегральных микросхем металлическая разводка в меньшей степени, чем активные области полупроводниковой структуры, подвергается токовым и тепловым нагрузкам. Все это создает благоприятные условия для протекания различных процессов деградации металлической разводки, приводящих к изменению ее первоначальных свойств, и в ряде случаев к внезапным отказам.

Явление электромиграции или электромиграции заключается в том, что в металлических проводниках в определенных условиях при прохождении постоянного тока большой плотности (около  $10^6 \text{ А/см}^2$ ) наблюдается перенос материала проводника из района отрицательного контакта к положительному. Модель этого явления представлена на рис.1. Суть его заключается в следующем. При приложении электрического поля  $E$  к проводнику в нем возникает поток электронов  $I_e$ , направленный навстречу электрическому полю.

Положительно заряженные ионы металла в этих условиях испытывают воздействие двух сил. Одна из них  $F_z$ , возникает под действием электрического поля, стремясь переместить ионы по направлению поля. Происхождение второй силы  $F_e$  связано с взаимодействием потока электронов с ионами металла, она направлена навстречу электрическому полю. При достаточно большой плотности тока возникают условия, когда  $F_e > F_z$  и ионы металла начинают перемещаться из области контакта находящегося под отрицательным потенциалом, в область положительного контакта  $M_2$  рис.1.. В результате этого в области отрицательного контакта создаются обедненные участки и пустоты, а в районе положительного контакта происходит накопление металла, в отдельных местах образуются бугорки, вырастают металлические «усы» и «метелки». Неоднородный нагрев проводника ( $T_1 > T_2$ ) ускоряет процесс переноса.

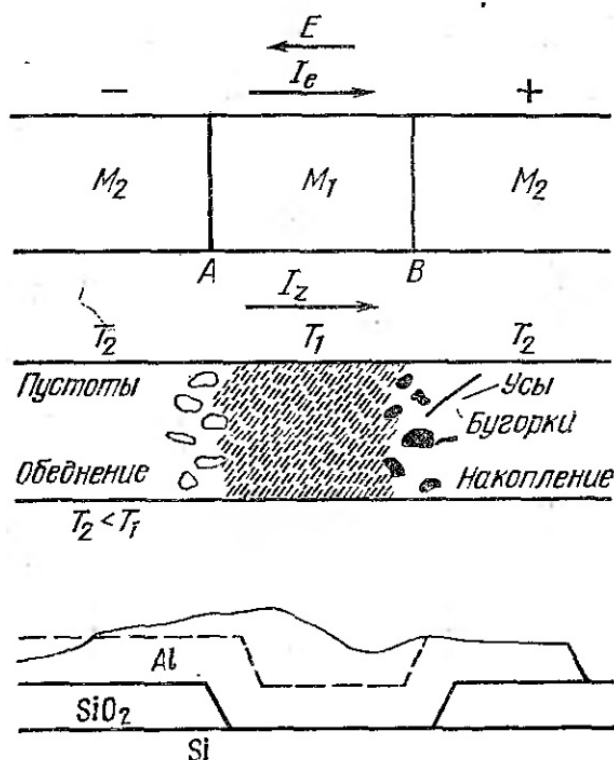


Рис. 1. Модель электромиграции ионов алюминия в пленочном проводнике

Среднюю наработку до отказа из-за обрыва металлизации, вызванной электродиффузией, определяют из следующего выражения:

$$\bar{t} = K J^{-n} \exp(-E_a/kT)$$

где  $K$ —константа, зависящая от материала пленки, ее структуры и геометрии;  $J$ —плотность тока,  $\text{А}\cdot\text{см}^{-2}$ ;  $n$ —показатель степени, равный 1, когда отказы преимущественно определяются структурой пленки. В случае, когда в формировании отказа доминирующее значение приобретает градиент температуры  $n=3$ ;  $E_a$ —энергия активации процесса электродиффузии, равная 0,5...0,7 эВ. При повышенных плотностях тока верхнее значение для энергии активации предпочтительнее.

В заключение сформулируем некоторые рекомендации по снижению электродиффузии в металлизации. Прежде всего необходимы меры по снижению плотности тока, проходящего по металлическим дорожкам. Это может быть достигнуто как за счет выбора режима, так и за счет увеличения поперечного сечения проводника, которое предпочтительнее осуществлять, увеличивая ширину дорожек. Положительный эффект оказывают защитные покрытия на проводящих дорожках в виде различных стекол. Препятствуя образованию бугорков и усов, диэлектрические покрытия способствуют снижению вероятности отказа за счет электродиффузии. Существенное внимание должно быть уделено качеству самой металлизации. Предпочтительны крупнозернистые пленки с ориентацией зерен, способствующей снижению эффекта электродиффузии.

Идеальным решением проблемы исключения электродиффузии было бы создание монокристаллических или аморфных проводящих пленок. Возможность создания металлизации с аморфной структурой более реальна. Например, сплавы никеля с ниобием, молибденом, вольфрамом при определенных условиях образуют аморфные структуры. Основным препятствием к использованию этих сплавов в качестве исходных материалов для металлизации является относительно высокое удельное сопротивление пленок. Однако очень низкие коэффициенты диффузии примесей в таких сплавах уже сейчас делают перспективным их применение в качестве барьерного слоя, препятствующего проникновению кремния в межэлементные соединения при многослойной металлизации.

## Механизмы коррозии и окисления металлизации

Проникновение влаги в герметизированный корпус, адсорбция ее на поверхности металлизации через поры и трещины в защитных покрытиях, а также наличие ионных загрязнений на поверхности кристалла способствуют возникновению коррозии металлизации, носящей, как правило, электрохимический характер. При достижении относительной влажности внутри корпуса около 60% создаются благоприятные условия для адсорбирования на поверхности кристалла достаточного количества влаги, обеспечивающего высокую электролитическую проводимость.

Выше было показано, что при производстве приборов имеется большое количество источников загрязнения поверхности кристалла ионами примеси. В первую очередь это загрязнения, попадающие 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. Из-за амфотерности алюминий может корродировать как в кислой, так и в щелочной среде. Как правило, в большей степени подвергаются 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 сквозь толстую пленку окиси алюминия.

Скорость коррозии существенно зависит от напряжения, подаваемого на схему. Разность потенциалов 5 В и более достаточна для того, чтобы возникла интенсивная коррозия. Скорость коррозии зависит также 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 фторфосфористого стекла с повышенным содержанием фосфора значительно увеличивает коррозию, так как избыточный фосфор, взаимодействуя с водой, образует фосфорную кислоту, которая усиливает коррозию металлизации. Снижение весовой концентрации фосфора в фторфосфористом стекле, контактирующем 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. Механизм отказа в этом случае состоит во взаимодействии кислорода с поверхностью зерен в объеме кристалла. В результате роста окисной пленки на поверхности проводящих дорожек и образования окисных межзеренных прослоек уменьшается объем и эффективное поперечное сечение проводника и, как следствие, увеличивается удельное сопротивление материала.

Ухудшение условий прохождения электрического тока по токоведущим дорожкам нарушает температурный режим прибора, приводя к локальным перегревам, усилению электродиффузии и росту вероятности отказа за счет обрыва металлизации. Кроме того, локальный перегрев токоведущих дорожек способствует укрупнению зерен поликристаллической структуры материала за счет влияния соседних зерен и разрастания их до поперечного размера дорожки. В этих условиях происходит разрыв или отслаивание металлизации из-за больших растягивающих усилий, возникающих в местах разрастания зерен. Действие данного механизма отказов может быть существенно ослаблено за счет снижения плотности тока, протекающего по дорожкам, а также добавлением в металлизацию специальных примесей, например иттрия до 1%, повышающих температуру рекристаллизации.

### **Механизмы отказа контактов**

Выше указывалось, что в конструкции полупроводниковых приборов и интегральных микросхем широко применяется алюминиевая разводка для создания межэлементных соединений на кристалле и золотая и алюминиевая проволока для создания внутренних соединений между контактными площадками на кристалле и корпусе прибора.

Присоединение внутренних выводов из золотой проволоки к контактными площадкам на кристалле осуществляется термокомпрессионной сваркой при температуре подложки порядка 300° С. В процессе термокомпрессии происходит взаимная диффузия свариваемых металлов, в результате чего и создается прочное соединение в месте контакта. Однако одновременно с диффузией в месте контакта алюминий и золото вступают в химическую реакцию с образованием интерметаллических соединений или интерметаллидов. В зависимости от температуры, давления, концентрации золота и алюминия в месте их контакта могут образоваться следующие соединения:  $AuAl_2$ ,  $AuAl$ ,  $Au_2Al$ ,  $Au_5Al_3$ ,  $Au_4Al$  отличающиеся существенно по удельному сопротивлению, коэффициенту термического расширения и твердости. При температурах выше 300° С образуется чрезвычайно пористое соединение  $AuAl_2$ , называемое пурпурной чумой. Эта разновидность интерметаллида наиболее опасна при формировании термокомпрессионного соединения. На рис. 2 представлена структура контакта золотой проволоки с алюминиевой контактной площадкой. Из рисунка следует, что весь контактный объем состоит из различных модификаций интерметаллидов, распространяющихся на всю глубину алюминиевой пленки. По периметру контакта из-за различия в коэффициентах термического расширения интерметаллических фаз образуются микротрещины.

Таким образом процессы образования слоя интерметаллидов, пустот и трещин по периметру контакта снижают его прочность, повышают контактное сопротивление, что в конечном счете при-

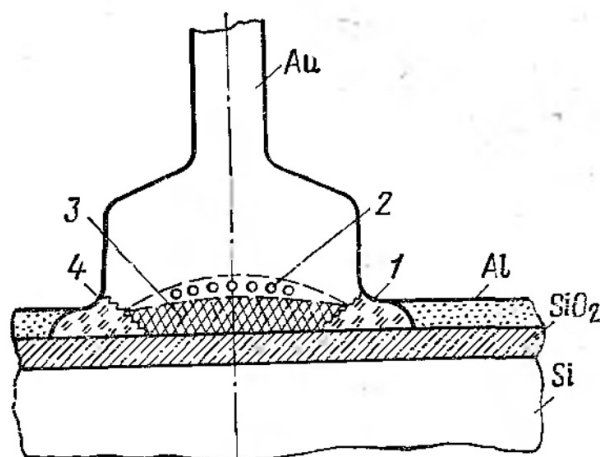


Рис. 2. Структура термокомпрессионного контакта Au-Al: 1- $Au_2Al$ , 2- $Au_4Al$ , 3- $Au_5Al$ , 4-микротрещины

водит к постепенному или внезапному отказу контакта, т. е. к его обрыву. Постепенные отказы, связанные с рассмотренным выше механизмом, выражаются в следующем: из-за роста контактного сопротивления снижается быстродействие интегральных микросхем, растет напряжение насыщения транзисторов в импульсном режиме, растет общее полное сопротивление интегральных микросхем.

Внезапные отказы происходят из-за обрыва контакта при механических нагрузках вследствие повышенной хрупкости контактного соединения. Кроме того, из-за сильного разогрева контакта в местах скопления пустот трещин возможно перегорание контакта при повышенных плотностях тока.

## Механизмы отказов в межэлементных соединениях на основе поликремния

В настоящее время широкое применение в конструировании интегральных микросхем с многоуровневой разводкой получили межэлементные соединения на основе поликремния. Наибольшее распространение разводка из поликристаллического кремния получила в МДП-структурах, где замена металлического затвора на поликремниевый позволила существенно повысить качество и быстродействие микросхем за счет так называемого эффекта самосовмещения затвора с областями стока и истока. Суть самосовмещения заключается в том, что сформированный на островке подзатворного окисла поликремниевый затвор является маской при выполнении процесса диффузии в области стока и истока через окна в окисле. Вследствие эффекта самосовмещения обеспечивается точное расположение затвора относительно краев областей стока и истока с незначительным перекрытием за счет продольной диффузии легирующей примеси при создании диффузионных областей стока и истока. Однако при создании одноуровневой и, в особенности, многоуровневой разводки с использованием поли возникает ряд специфических эффектов, приводящих к отказам полупроводниковых структур. Механизмы формирования отказов в многослойных структурах из поликремния заключаются в следующем.

Как уже было сказано, исходной структурой, на основе которой создается интегральная микросхема с многоуровневой разводкой, является кремниевая подложка с нанесенными слоями подзатворного и полевого окисла и сформированными затворами и межэлементными соединениями из поликремния (рис.3). В результате неоднородности процессов травления боковые стенки поликремниевых затворов имеют определенный наклон, а подзатворный диэлектрик из-за подтравки утоплен под слоем поликремния. Следующей операцией при создании многослойной разводки является процесс выращивания окисного слоя, разделяющего проводящие слои. При окислении происходит углубление окисного слоя в объем поликремниевых затворов и разводки, а также наращивание внешнего

слоя окисла. Одновременно окисление поликремния происходит и на оголенном участке подтравы с углублением окисла в объем кремниевой подложки.

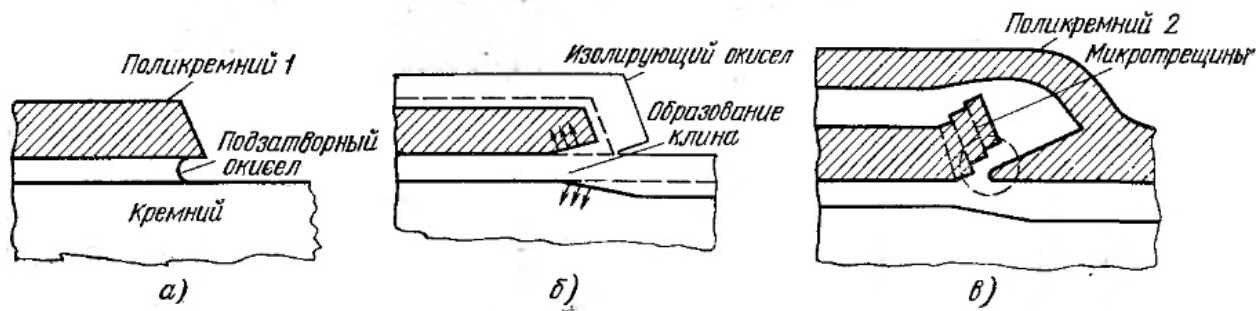


Рис. 3. Механизмы отказа многоуровневой поликремневой разводки: а-исходная структура, б-промежуточный этап наращивания изолирующего окисла, в-двухуровневая поликремниевая разводка.

В результате этого процесса на вертикальной стенке поликремния создается нависающий слой двуокиси кремния, а в районе подтравы подзатворного окисла образуется внедренный под поликремний окисный клин, в месте залегания которого возникают значительные растягивающие напряжения, приводящие к поднятию нижнего края поликремния с одновременным горизонтальным сдвигом за счет сдвига отдельных микроблоков. Последующий слой поликремния расположится на поверхности изолирующей двуокиси кремния с заполнением полости под нависшим краем. В полученной структуре образуется слабое место, обозначенное на рисунке пунктирной окружностью. В этом месте возможно образование трещин, а соседние проводящие дорожки изполикремния разделены очень тонким слоем окисла, что чревато возникновением пробоя, который приведет к закорачиванию токопроводящих дорожек и к выходу из строя всей полупроводниковой структуры.

Рассмотренный механизм полностью определяется конструктивными параметрами и технологическими характеристиками прибора. Посредством оптимального выбора толщины подзатворного окисла, степени легирования поликремния и режима нанесения промежуточного окисного слоя можно добиться результата, при котором до минимума уменьшаются подтравы, образование нависающего окисла на краю поликремниевой дорожки и связанные с этим деформация, образование трещин и слабых мест в районе соприкосновения проводящих слоев.

## Механизмы отказов планарных структур

Специфичной особенностью планарных приборов является то, что их активные и пассивные компоненты формируются в виде многослойных структур с различными электрофизическими свойствами. Наиболее существенное свойство таких структур локализация неконтролируемого заряда в объемах слоев структур и на поверхности их раздела. Величина этих зарядов и их стабильность во многом определяют надежность полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, изготавливаемых по планарной технологии. Схема распределения локализованных зарядов в структуре монокристаллический кремний-двуокись кремния приведена на рис. 4. Здесь представлены:

- заряды на поверхности раздела системы кремний-двуокись кремния А;
- заряды в приповерхностной области двуокиси кремния Б;
- заряды в объеме двуокиси кремния В;
- заряды на поверхности пленки двуокиси Г.

Рассмотренные выше структурные дефекты в окисной пленке могут быть местами локализации и одновременно источниками неконтролируемых зарядов в ней. Основные источники таких зарядов:

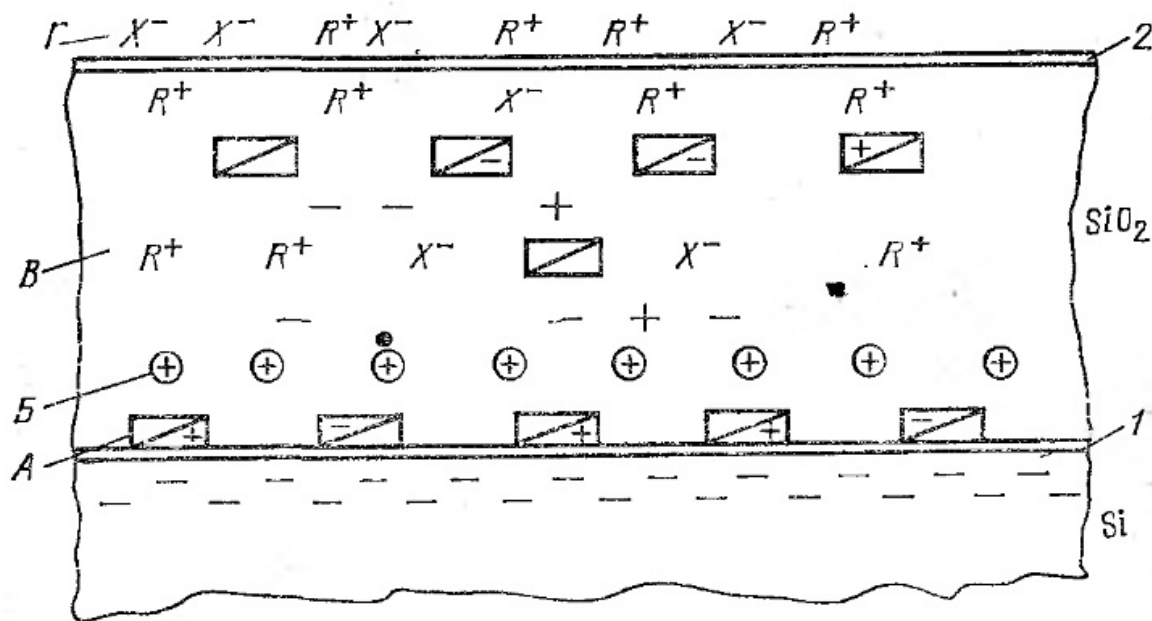


Рис. 4. Структура зарядовых состояний в слое окисла на кремнии: 1-граница раздела кремний-двуокись кремния; 2-поверхность окисла;  $\pm$ -электроны и дырки;  $-$ -ловушки электронов и дырок;  $R^+ X^-$  - положительные и отрицательные ионы примесей, загрязнений;  $\oplus$  - ионизированные атомы избыточного кремния в окисле

кислородные вакансии в структуре  $SiO_2$ , ионы водорода, ионы металлов и в особенности высокоподвижные ионы натрия (которые создают преимущественно положительный заряд в слое двуокиси кремния). Все эти заряды под действием электрических полей могут перемещаться в слое двуокиси кремния по направлению к границе раздела с кремнием и обратно. Концентрация зарядов может существенно меняться в зависимости от обработки структур в различных средах при изготовлении.

Значительные изменения в местоположении зарядов и их концентрации происходят при эксплуатации приборов (в том числе, в условиях радиационных воздействий). Образование поверхностных зарядов связано с различными загрязнениями, адсорбированными на поверхности слоя двуокиси кремния. Их особенностью является высокая подвижность, позволяющая зарядам перемещаться на большие расстояния по поверхности окисла под действием приложенного напряжения. При повышении температуры активных областей прибора и окружающей среды в результате десорбции загрязнений концентрация поверхностных зарядов может изменяться в значительных пределах.

Все рассмотренные выше заряды, взаимодействуя с зарядами активных областей полупроводниковых структур, искажают конфигурацию р-п переходов, вызывают образование инверсионных слоев, что в конечном счете приводит к нестабильности электрических параметров приборов, к постепенным и внезапным отказам.

Рассмотрим структуру с р-п переходом, защищенную окисной пленкой (рис. 5). Предположим, что заряды (в данном случае положительные) в основном сосредоточены на поверхности окисла у одного из внешних выводов. Избыточный положительный заряд на поверхности способствует обогащению носителями слоя полупроводника под окисной пленкой.

Локальное увеличение концентрации электронов приводит к уменьшению ширины р-п перехода в месте с повышенной концентрацией носителей. В структуре с обогащенной носителями приповерхностной областью при приложении обратного напряжения возрастает напряженность электрического поля в месте сужения р-п перехода, что приводит к росту обратного тока через р-п переход и поверхностному пробое.

В случае накопления отрицательных зарядов на поверхности окисла приповерхностная область полупроводника обогащается дырками. В зависимости от величины заряда в окисле и ряда других

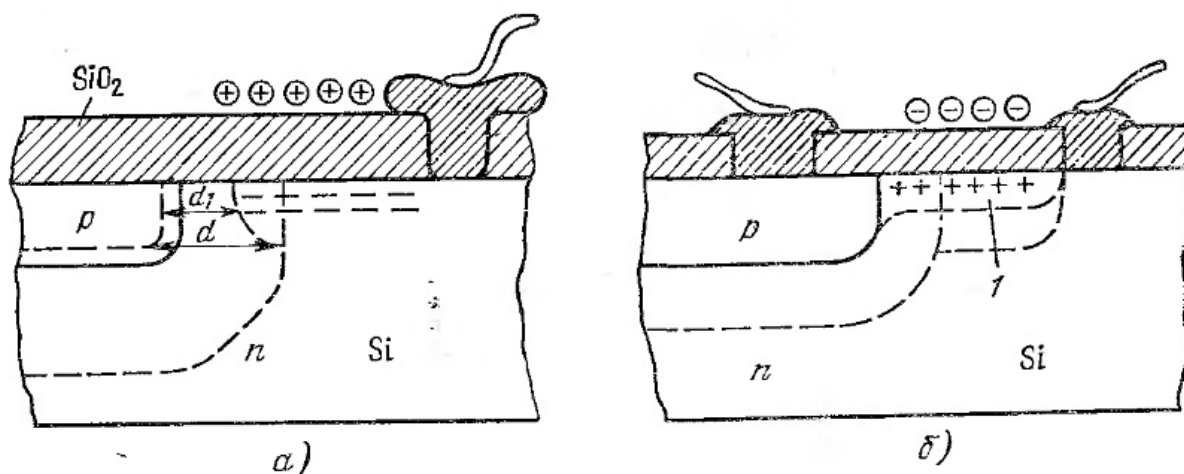


Рис. 5. Взаимодействие зарядов на поверхности окисла с зарядами в активных областях полупроводниковой структуры:  $d$  - ширина р-п перехода;  $\oplus$  - положительный заряд в окисле;  $-$  - электроны у поверхности кремния;  $\ominus$  - отрицательный заряд в окисле;  $+$  - дырки у поверхности кремния; 1 - инверсный р-слой.

факторов обогащение приповерхностной области полупроводника дырками может быть столь значительным, что наступит инверсия проводимости полупроводника. Область, непосредственно примыкающая к р-п переходу, приобретает дырочную проводимость. В связи с этим площадь р-п перехода существенно увеличится, что в режиме обратного смещения приводит к значительному росту обратного тока и снижению пробивного напряжения. В случае распространения инверсионного слоя до места расположения омического контакта происходит закорачивание р-п перехода через инверсионный канал.

## Механизмы 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, что приведет к резкому возрастанию 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 окисле достаточной толщины на длине свободного пробега успевает получить энергию для ударной ионизации атомов матрицы и создания электронно-дырочных пар. Вследствие большей подвижности электроны опережают в движении дырки, оставляя позади себя облако положительно заряженных носителей заряда, которое создает дополнительное ускоряющее поле на пути следующей порции электронов. Таким образом, в системе ударной ионизации появляется положительная обратная связь, способствующая 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 окисла.

Однако качество этих слоев много ниже главным образом из-за неровностей поверхности металлических и поликремниевых дорожек. Поэтому в местах сужений диэлектрических слоев и на остриях выступов могут возникать повышенные напряженности электрического поля, приводящие к пробоям.

Следующим физическим механизмом, вызываемым ростом электрического поля в тонких диэлектрических слоях и приборах при масштабировании, является механизм инжекции горячих электронов из кремния в окисный слой. Горячие электроны: это высокоэнергетические носители, образующиеся при лавинном пробое р-п перехода или в области повышенного электрического поля вблизи стока МДП-транзистора с коротким каналом.

Инжекция и захват горячих носителей ответственны 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, имеющим 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 воздействием электроны при прохождении от истока к стоку приобретают значительную энергию. В результате рассеяния на атомах решетки создается поток электронов со случайным распределением скоростей, содержащий определенную долю электронов, способных преодолеть потенциальный барьер на границе раздела системы кремний-диоксид кремния и проникнуть в подзатворный окисел. Установлено, что ток горячих носителей имеет экспоненциальную зависимость от напряжения на затворе.

Электрическое поле в окисле противодействует инжекции горячих электронов, поэтому горячие электроны сосредотачиваются в непосредственной близости к точке перекрытия канала, расположенного у 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, перемещаясь в пределах обедненной области, преодолевают потенциальный барьер на границе раздела системы кремний-диоксид 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 вероятна инжекция в окисел дырок, движущихся по направлению электрического поля.

С другой стороны, электронно-дырочные пары генерируются дырочным током подложки и ускоренные электроны могут инжектироваться в окисел так же, как и электроны, возникающие при термогенерации.

## **Механизмы отказов в результате действия ударных и вибрационных нагрузок**

Выше было показано, что реакция приборов на механические нагрузки определяется прочностными и резонансными параметрами их конструктивных элементов, характеризуемыми собственной резонансной частотой колебаний  $\omega_0$ , максимальной амплитудой колебаний в условиях резонанса  $X_m = f(F_0, Q, K)$ , технической прочностью материала конструкции  $\sigma_P$ , определяющей максимальное напряжение, при котором наступает его разрушение.

Повреждение конструктивных элементов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем при механических воздействиях может произойти при нагрузках, вызывающих напряжения, превышающие техническую прочность материалов. Такое повреждение может произойти при воздействии вибрации и удара, особенно в условиях резонанса.

Однако повреждение конструктивных элементов может наступить при циклических нагружениях, когда напряжения в элементах не превышают технической прочности материалов конструкции. Например, поломка внешних выводов корпусов приборов при многократных изгибах происходит в результате накопления повреждений, так как при одиночном изгибе предел технической прочности материала вывода не превышает.

Для случая статической нагрузки до недавнего времени общепринятые классические представления о процессах разрушения материалов при механических нагрузках исходили из положения о том, что при напряжениях, меньших предела упругости, пластическая деформация не развивается и разрушение тела, подвергающегося механической нагрузке, происходит мгновенно при напряжениях достигающих предела прочности.

В последнее время широкое распространение получил другой подход, согласно которому разрушение материала рассматривается как постепенный кинетический термоактивационный процесс, возникающий в материале с момента приложения к нему нагрузки меньше критической и развивающийся в нем во времени с накоплением дефектов вплоть до разрушения. Время  $t_p$ , необходимое для развития процесса разрушения от момента нагружения тела до наступления разрыва, называется временой прочностью или долговечностью материала. Многочисленными экспериментальными исследованиями для многих твердых тел подтверждена следующая математическая зависимость среднего времени до разрушения  $a$ , от приложенного напряжения  $\sigma$  и температуры  $T$ :

$$t_p(\sigma, T) = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right)$$

где  $\tau_0$ ,  $U_0$ ,  $\gamma$  - постоянные величины, зависящие от природы и структуры материала.

## Механизмы отказов в результате радиационных воздействий

В 1978 г. в интегральных микросхемах памяти большой емкости (более 4 Кбит) было обнаружено явление, названное "мягкой ошибкой" или сбоем, которое заключается в изменении состояния элементов памяти без образования устойчивых дефектов в структуре прибора. При этом состояние элемента памяти (1 или 0) восстанавливается в динамическом ЗУ при очередном цикле регенерации и в статическом ЗУ при перезаписи информации.

Было показано, что вероятность возникновения сбоя в данной ячейке не зависит от предыдущего состояния ячейки, т. е. от того, возникал или нет сбой в данной ячейке ранее, что говорит о том, что в элементе, в котором возник сбой, остаточные дефекты после восстановления информации отсутствуют. В настоящее время установлено что более 90% сбоев, типа "мягкая ошибка" в "устройствах памяти относительно большой емкости вызываются ( $\alpha$ -частицами (ядрами гелия). Оказалось, что в керамических деталях корпусов, пластмассе, стекле, золоте может содержаться определенное количество радиоактивных элементов, таких как:  $U_{238}$ ,  $U_{235}$ ,  $Th_{232}$ ,  $Zr_{91}$  способных в результате  $\alpha$ -распада излучать  $\alpha$ -частицы с интенсивностью от 0,004 до 45 см<sup>-2</sup>ч с энергией около 8...9 МэВ.

При такой энергии  $\alpha$ -частицы, взаимодействуя с кремнием, входят в материал со скоростью  $v_a \geq 0.05c$  ( $c$  - скорость света). Имея достаточно большую длину свободного пробега, они проникают на всю глубину активных областей полупроводниковой структуры.

Предложена следующая физическая модель механизма возникновения сбоев в интегральных микросхемах памяти большой емкости на МДП-структурах (рис. 6).

Согласно этой модели ячейки памяти МДП ЗУ могут быть представлены потенциальными ямами, находящимися под шинами записи И считывания, которые в состоянии логического 0 заполнены электронами, а в состоянии логической 1 - пусты.

При попадании в элемент памяти  $\alpha$ -частицы в нем генерируются электронно-дырочные пары. При этом электроны захватываются потенциальной ямой, а дырки диффундируют вглубь кристалла и рекомбинируют в объеме и на тыловом контакте. При этом в элементе памяти в состоянии 0 ничего не произойдет, так как он уже был заполнен электронами. В элементе памяти в состоянии 1 электроны отсутствовали. При определенной энергии  $\alpha$ -частицы в элементе генерируется достаточное количество электронов для переключения его в состояние логического нуля. Таким образом, сформировалась мягкая ошибка, которая может быть воспринята при выборке информации из этой ячейки в промежутках между регенерациями.

Исследования показали, что частота появления сбоев и чувствительность элементов памяти к воздействию  $\alpha$ -частиц зависят от величины заряда, накапливаемого в элементах памяти.

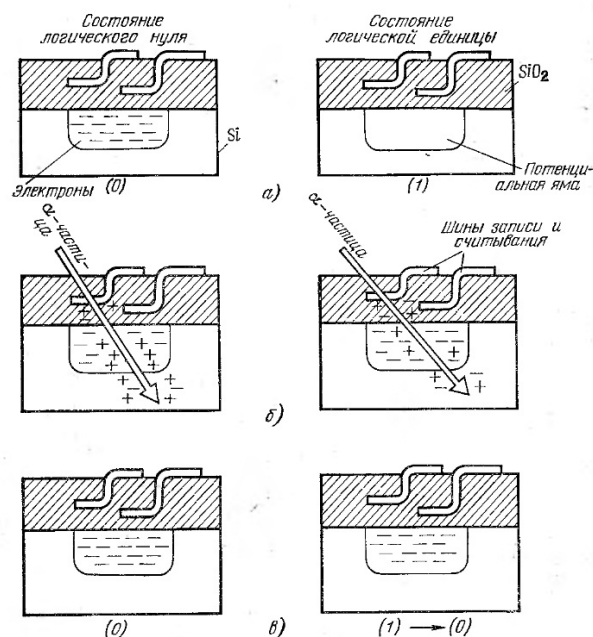


Рис. 6. Механизм возникновения "мягкой ошибки" в элементах памяти

В зависимости от размеров элементов и режимов работы в них для обеспечения переключения в состояние 0 или 1 должны накапливаться заряды, содержащие от 300 000 до 3000 000 электронов или от 50 до 500 фКл. Величина такого заряда называется критической и обозначается  $Q_{кр}$ .

В биполярных транзисторах и интегральных микросхемах воздействие  $\alpha$ -частиц приводит к возникновению в  $p$ - $n$  переходах высоких уровней ионизационных токов, связанных с тем, что концентрация неравновесных электронно-дырочных пар, создаваемых вдоль трека  $\alpha$ -частицы, лежит в пределах  $10^{18} \dots 10^{19} \text{ см}^{-3}$  что намного превышает типичные значения концентрации основных носителей в эпитаксиальных слоях и подложке. Неравновесное распределение зарядов при ионизации способствует образованию нестационарных электрических полей, влияющих на процесс собирания неравновесных носителей заряда  $p$ - $n$  перехода. Этот механизм получил название эффекта образования воронки заряда (рис. 7). Суть этого механизма заключается в следующем.

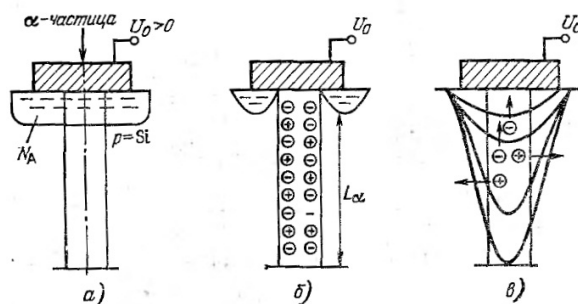


Рис. 7. Эффект образования воронки заряда: а-образование трека, б-компенсация пространственного заряда, в-движение неравновесных носителей под действием нестационарного электрического поля

При пересечении треком  $\alpha$ -частицы  $p$ - $n$  перехода заряд, генерируемый в области трека компенсирует пространственный заряд  $p$ - $n$  перехода на участке, пересекаемом треком (рис. 7,а,б). приложенное к  $p$ - $n$  переходу напряжение попадает на эффективной длине трека  $L_\alpha$  с соответствующим искажением эквипотенциальных линий в виде воронки (рис. 7,в). Под действием электрического поля в воронке начинают протекать процессы пространственного разделения электронов и дырок. За счет выталкивающего электрического поля основные носители заряда выбра-

сываются в подложку в радиальном направлении. Неосновные носители под действием продольной составляющей электрического поля  $E_c = \frac{U_0}{L_\alpha}$  устремляются к поверхности  $p$ - $n$  перехода. Особенно биполярных интегральных микросхем и комплементарных МДП-структур является наличие в них паразитных  $n$ - $p$ - $n$ -тиристорных структур. Ионизационные токи, возникающие в  $p$ - $n$  переходах, под действием высокоэнергетических частиц в определенных условиях приводят к эффекту защелкивания, при котором паразитный тиристор, имеющийся в схеме, переключается в проводящее состояние, в результате действия эффекта защелкивания схема прекращает функционировать по прямому назначению.

Для восстановления работоспособности схемы необходимо отключать питание, чтобы привести паразитную тиристорную структуру в первоначальное состояние. В худшем случае тиристорная структура шунтирует источник питания, в результате чего возникает значительная перегрузка по току, что чревато тепловым пробоем и отказом схемы.

Комплементарные схемы на основе МДП-технологии наиболее чувствительны к эффекту защелкивания, так как в логической МДП-ячейке с предохранительными диодами потенциально имеется две  $p$ - $n$ - $p$ -структуры, способные под действием избыточного ионизационного тока переключаться в проводящее состояние (рис. 8). Одна из них формируется  $p^+$  - областью охранного диода, подложкой, областью  $p$ -кармана и истоком  $n$ -канального транзистора. Другая тиристорная структура образуется истоком  $p$ -канального транзистора,  $n$ -подложкой,  $p$ -карманом и истоком  $n$ -канального транзистора.

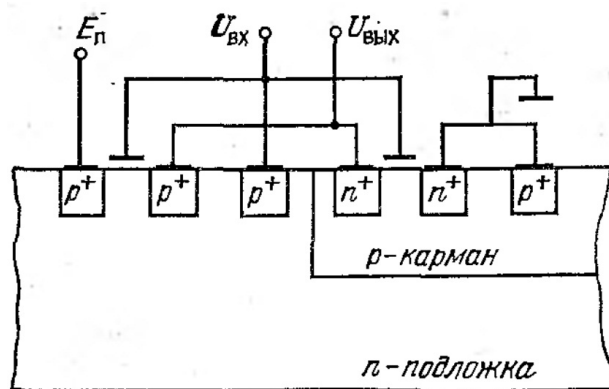


Рис. 8. Базовая ячейка комплементарной логической схемы

Наиболее эффективными методами борьбы с возникновением мягких ошибок и эффектом защелкивания тиристорных структур являются конструктивно-технологические. Так, применение окисной изоляции, сапфировых и других диэлектрических подложек для создания интегральных микросхем с гальванически развязанными активными структурами препятствует образованию паразитных тириستоров и исключению эффекта защелкивания при воздействии  $\alpha$ -частиц и других ионизирующих излучений. Технологические методы, уменьшающие величину ионизационных токов, основаны на применении мер, способствующих уменьшению объемов, в которых генерируются и собираются избыточные носители. Это достигается применением встроенного электрического поля, препятствующего движению электронов к накопительному конденсатору в ячейке памяти. Встроенное поле образуется при создании в глубине структуры скрытого слоя с повышенной концентрацией примеси. Этой же цели служат сетки скрытых слоев, создаваемых имплантацией в кремниевой подложке. При наличии контакта к скрытым слоям собирающиеся на них электроны отводятся на землю или в источник питания. В случае плавающей сетки собираемые на них избыточные электроны рассредоточиваются на большой площади, поэтому заряд, локализуемый в том или ином узле запоминания, не достигает критической величины. Положительный результат дает применение исходных пластин с использованием эффекта внутреннего геттерирования, при котором у поверхности пластины образуется зона, свободная от несовершенств. В этой зоне формируются активные области

полупроводниковой структуры. Посредством потенциальной обработки все дефекты перемещаются в глубь пластины, в результате чего резко снижается объемное время жизни неравновесных носителей. Подобная структура пластины способствует быстрому рассасыванию ионизационных токов, тем самым резкому снижению вероятности возникновения мягкой ошибки.