

## Глава 1

# Физические основы функциональной устойчивости

### 1.1. Предпосылки функциональной устойчивости

Рассмотрим базовые аспекты феномена ФУ субмикронных структур СБИС, включая краткий анализ физических основ устойчивости основополагающих элементов СБИС в виде МОП-транзисторов и КМОП-инверторов. Природа дефектов их микроструктуры Si-SiO<sub>2</sub> будет рассмотрена далее. При этом нас интересуют предпосылки устойчивости СБИС, определяющей их надёжность как основного свойства их качества с учётом вероятности возможных сбоев или отказов, имея в виду любой единичный случай нарушения нормального функционирования. Это могут быть и сбой в виде самоустраняющейся кратковременной утраты работоспособности, и возможные необратимые случаи отказов как собственно микросхемы, так и использующей её аппаратуры. Мы покажем, как выявлять в ходе контрольного тестирования предрасположенные к сбоям образцы этих компонентов. Такие выявленные, функционально малоустойчивые образцы вполне работоспособны, поэтому они подлежат отбраковке лишь как потенциально ненадёжные только в случаях их использования в аппаратуре с длительными сроками существования.

Это новое направление исследования проблемы оценки качества и надёжности сложной продукции субмикронной электроники теперь с позиции устойчивости стало возможным при наличии большой статистики данных о выходных сигналах с измерением параметров сигналов на той части интерфейсов, выходных выводах периферии микросхем, которая участвует в нормированном и запрограммированном процессе тестирования микросхем. Для этого используются современные электронные специализированные вычислительные комплексы, каждый из которых предназначен для обслуживания определённой номенклатуры СБИС. Именно указанная высокая технология обеспечивает успешное использование нашей концепции критерия ФУ на практике.

Принимаем, что предпосылкой использования такого рода данных служит выделение в качестве объекта исследования особой структуры интерфейсов СБИС. Эта структура представляет собой объединённую в одну функцию часть выходного пространства периферии структуры микросхемы, которых у одной модели СБИС может быть несколько. Называем её «электронным функционалом», или «эльфом», и исследуем свойства функциональной устойчивости каждого такого эльфа. Наши разработки и исследования качества и надёжности СБИС касаются этой выделенной части их структуры, которая, в отличие от других частей «чёрного ящика» сложной структуры ядра микросхемы, адекватно отражает в экспериментах главное для заказчика свойство – свойство ФУ СБИС, свойство устойчивости во времени характеристик эльфов.

Термин «эльф» определяет открытое для исследователя виртуальное лицо технических возможностей физически абсолютно закрытой структуры СБИС. В силу новизны и сложности этого технического термина дадим его всестороннее определение, включая уточнение, которое необходимо для понимания особенностей экспериментов по оценке ФУ субмикронной цифровой электроники. Надеемся, такой подход поможет в дальнейшем понять предложенную позицию.

Определяем понятие электронного функционала как:

- выходную интерфейс-структуру СБИС, определяющую её функциональные возможности в реальном масштабе времени;
- свойственную СБИС виртуальную память, определяемую соответствующим программным обеспечением и общностью задействованных выходных интерфейсов;
- свойство феномена СБИС иметь своё функциональное поле, аналогичное субъективно-идеальному полю математического функционала;
- наличие обеспеченной, не достижимой для дискретных компонентов статистикой получаемых при тестировании СБИС данных характеристик ФУ (5–10 точек характеристики, не менее 200 замеров на всю характеристику);
- то, что составляет интеллектуальную ценность СБИС в отличие от материальной ценности (например, стоимости золотых выводов и других деталей её конструкции).

Практика новых разработок образцов субмикронной электроники следует известному закону Мура. Последний постулирует постоянный рост функциональной насыщенности вновь разрабатываемых кристаллов СБИС в два раза в два года при уменьшении размеров и увеличении числа транзисторов на кристалле. Но одновременно отмечается соответствующее возрастание вероятности появления ошибок в растущей структуре кристалла, так называемых «багов». Дословный перевод английского термина «bug» – вирус, технический дефект. Фактически баги – это проявления ошибок срабатывания отдельных дефектных элементов из общего большого количества элементов, интегрированных в структуру. Эти дефектные элементы несут ответственность за сбои, ошибки функционирования, частичные и даже полные отказы микросхем. Их главная опасность заключается в том, что сбой может проявляться лишь в определённых условиях функционирования СБИС, а до того дефектный элемент конструкции себя не обнаруживает. Поэтому на стадии отладки продукции вопросы поиска этих скрытых дефектов выходят на первый план.

Например, по данным [1], при отладке на стадии разработки микропроцессоры фирмы «Intel» проходят  $176 \cdot 10^{15}$  циклов проверки. После изготовления образцов микропроцессоров производится их всестороннее тестирование, проверка электрических параметров, испытания на совместимость, охватывающие более двадцати операционных систем, полторы сотни периферийных устройств и 400 приложений. Проверка включает более 250 тысяч отдельных тестов с использованием более 600 программных приложений и длится 6–8 недель круглые сутки. Эталонные платформы новых разработок проходят до 26 тысяч ча-

сов всевозможного тестирования и испытаний, в том числе в условиях расширенного диапазона внешних воздействий. В целом фирма «Intel» тратит на проверку её продукции 300 млн долл. в год, а в структуре её деятельности существует понятие Silicon Debug, что означает интегрированную в технологический процесс систему быстрой отладки, обнаружения и устранения ошибок и подозрительных областей топологии. Понятно, что эти затраты компенсируются повышением процента выхода годных СБИС, которые сами имеют высокую стоимость.

Дальнейший рост степени интеграции с учётом тенденции развития СБИС с проектными нормами 0,13–0,09 мкм до уровня гипербольших структур с использованием нанотехнологии их изготовления неизбежно усугубляет указанный выше недостаток. Он представляется неустранимым до тех пор, пока продукция субмикронной электроники в части оценки её надёжности демонстрирует идеальную безотказность компонентов. В этом варианте, без учёта свойств эльфов, общепринятая методология оценки надёжности СБИС как электронных компонентов попадает в тупик, поскольку она существует в реальности безотказности субмикронной электроники.

К такой продукции ЭКБ относятся (кроме СБИС серийного производства) разработки новых сложно-функциональных блоков. Это могут быть «системы на кристалле» различного аппаратурного назначения, полузаказные микросхемы на основе ПЛИС с использованием технологии стандартных базовых матричных кристаллов и различные модульные конструкции (системы в корпусе). Особенно актуальна разработка вопроса устойчивости эльфов для сложно-функциональных блоков, которые применяются в аппаратуре с длительным сроком эксплуатации.

До того, как рассматривать методологию, экспериментальные данные и теоретические вопросы вероятностной оценки устойчивости эльфов, кратко проанализируем механизм деградации технических характеристик активных элементов эльфов. Выполняется обзор конструкционных, схемотехнических и физических особенностей микроструктуры СБИС и механизмов дефектообразования в ней. Иначе говоря, результатам наших экспериментальных и теоретических исследований функциональной устойчивости СБИС предшествует описание предмета, который мы изучаем. Делается это дифференцированно и исключительно с позиции возможных случаев обратимых и необратимых изменений характеристик ФУ их структур. Весь другой объём такого рода информации, связанной с феноменом ФУ, упоминается нами по мере необходимости.

В связи с организационными и экономическими обстоятельствами, которые подробно рассмотрены в [2], отечественные потребители компонентов вынуждены покупать многие из них (особенно СБИС коммерческого применения и промышленного уровня) на мировом рынке. Этот рынок удовлетворяет потребности заказчиков по функциональным возможностям широкой номенклатуры предлагаемых электронных компонентов, в том числе и СБИС, которые полностью замещаются импортом. Таким образом, вопросы надёжности КМОП-структур рассмотрены с учётом механизмов физической нестабильности имен-

но для информационно закрытых для разработчиков РЭА импортных электронных компонентов.

Хотя юридических гарантий надёжности на рынке микроэлектроники не существует, но поступающие заказчикам зарубежные коммерческие СБИС, если это не контрафактная продукция, соответствуют всем указанным в документации техническим характеристикам и требованию безотказности. Ситуация меняется в том случае, если коммерческие изделия микроэлектроники попадают, например, в комплектацию РЭА объектов с длительными сроками активного существования или хранения. Поскольку изготовители СБИС гарантий надёжности не предоставляют, потребитель имеет при этом только одну возможность определить для себя уровень надёжности поставляемых изделий. Он вынужден выполнять испытания, подтверждающие их стойкость и надёжность. Некоторые результаты такого рода испытаний, касающиеся устойчивости эльфов в составе СБИС, анализируются в настоящей работе. Мы показываем, что кинетика доступных для контроля характеристик ФУ СБИС как эльфов связана с уровнем их качества, а также то, что она может определять степень надёжности СБИС и той аппаратуры, в которой они применяются.

Термин «устойчивость» широко используется в теории моделирования поведения технических систем [3] в качестве характеристики, определяющей способность системы сохранять в процессе работы своё установившееся состояние. По данным математической энциклопедии [4], применительно к движению или к процессу деградации во времени параметров системы этот термин идеально подходит в качестве характеристики надёжного функционирования СБИС. С учётом многообразия функциональных возможностей различных типов СБИС для их безотказной работы все определяющие работоспособность технические  $m_{\phi}$ -характеристики анализируемого объекта должны оставаться в ограниченной разрешённой области их  $m_{\phi}$ -фазового пространства. Но в работе [4] отмечается, и с этим надо считаться, что термин «устойчивость» системы не имеет чётко определённого содержания, хотя границы пространства в нашем случае и определены, как это имеет место в технических условиях (ТУ) на СБИС.

Применительно к проблеме оценки надёжности СБИС, с учётом устойчивости их эльфов, указанная нечёткость состояния технической системы выражается, как будет показано в нашем исследовании, в вероятностном характере критерия возможного функционального сбоя выходных сигналов, сбоя, который всецело определяется состоянием закрытой физической структурой ядра элементов СБИС. А для исследователя любой сбой такого рода проявляется только случайно в сигналах, идущих с периферии, которая является физическим полем, где формируются эльфы. При этом вообще нет возможности оценить величины изменения характеристик закрытой структуры ядра в условиях влияния на них подконтрольных внешних воздействий, приводящих к сбоям, а технические характеристики периферии опосредствованы только параметрами выходных сигналов системы. Последняя особенность отличает показатель ФУ СБИС или (что одно и то же, поскольку ядро микросхемы нам неподконтрольно) устойчивости соответствующих эльфов, с которыми работают.

Впервые, по нашим данным, феномен ФУ систем цифровой техники с учётом технических характеристик релейных элементов автоматики рассматривался отечественным автором в монографии [5]. Выполнялось совместное определение уровней и возможных изменений напряжений и низкого, и высокого уровня управляющих сигналов, поскольку эти уровни совместно определяют зону устойчивой работы каждого выходного элемента релейного цифрового устройства. Но для каждого выходного интерфейса цифровой микросхемы, для каждого вывода выходного сигнала, например с периферийного КМОП-инвертора микропроцессора, запоминающей микросхемы или ПЛИС, указанной зоной является зона между уровнями отдельно, а не совместно, измеряемых сигналов низкого и высокого уровней напряжений. При тестировании микросхемы эти уровни по разным программам последовательно фиксируются на каждом выводе всего множества выводов отдельно для сигналов низкого и отдельно для сигналов высокого уровней, образуя соответствующее стохастическое распределение значений напряжения этих сигналов. Статистическая значимость этих распределений повышается с ростом степени интеграции микросхемы и количества выходных выводов, задействованных при тестировании.

Учитывая все ипостаси понятия «устойчивость», мы вправе уточнить его в нашем частном случае. Принимаем, что ФУ БИС как состояние системы отражается функцией (статической траекторией значений) напряжений выходных сигналов отдельно низкого и высокого уровней, измеренных на интерфейсах данного эльфы СБИС. Устойчивость – это такое поведение указанных траекторий во времени и под влиянием внешних воздействий, когда исходное и текущее состояния этих функций не сильно отличаются друг от друга. Хотя данное определение имеет качественный характер, для нормальных (нормализованных) распределений траекторий значений сигналов обеспечивается и количественная оценка возможного несходства состояний, а значит и численная оценка степени ФУ по параметрам математического ожидания  $\mu$  и среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  функции распределения сигналов.

Следует особо отметить, что сам по себе субъект эльфы применительно к сложной системе электронного компонента становится практически значимым и может приниматься в расчёт, если количество выходных выводов данной отдельно взятой, например, микросхемы обеспечивает при тестировании большую статистику измерений величин сигналов. Этот уровень, как уже было сказано, должен быть не менее двух-трёх сотен зафиксированных тестером выходных сигналов, полученных по одному с каждого вывода микросхемы. Такой нижний предел статистики позволяет считать структуру микросхемы, которую мы испытываем, эльфом, технические характеристики которого способны обеспечить оценку его устойчивости. В противном случае микросхема не имеет эльфы, и её можно отнести к разряду обычных электронных компонентов, поскольку функция распределения выходных сигналов такого компонента, построенная по данным меньшей статистики, становится малодостоверной, а искомая вероятность сбоя – неопределённой.

В ряду причин необходимости исследования функциональной устойчивости высоконадёжных СБИС укажем также, что для этих объектов перестал быть адекватным классический принцип оценки надёжности компонентов, а именно принцип поиска «слабого звена» и оценки вероятности его появления в продукции данных электронных компонентов. Для компонентов микроэлектроники, как отмечалось [6] ещё на ранних стадиях разработок микросхем, перестали выполняться условия стационарности и ординарности потока отказов элементов их структуры, поскольку слабые звенья (элементы микросхем) группируются лишь на доступном операции отбраковки ограниченном числе кристаллов в партии. При этом интенсивность отказов заданного типа элементов во всей генеральной совокупности годной продукции стремится к интенсивности отказов одного элемента, величина которой по причине технологического совершенства его изготовления пренебрежимо мала. Степень такого приближения оценивалась по [6] для ранних разработок конструкций БИС значением коэффициента «реальных корреляционных связей», который в идеале может быть близок к 0,9, что и характеризует высокую физическую идентичность соответствующих элементов микросхем малой степени интеграции.

Данные о высокой безотказности современных СБИС массового производства свидетельствуют, что коэффициент корреляционных связей их элементов практически увеличился до единицы. В результате такого прорыва в технологии производства качественных и надёжных СБИС возможность оценки соответствующих показателей надёжности существенно изменилась. Прежние разработки многокомпонентных моделей микросхем, например [7], для оценки безотказности микроэлектроники малой и средней степени интеграции, которые позволяли выполнить наиболее полный учёт основных механизмов отказов элементов микросхем вследствие технологического брака, влияющего на качество конструктивно-технологических характеристик микросхем, для случая СБИС становятся бесполезными. Исходя из этого, для практического решения проблем оценки надёжности СБИС мы и предлагаем использовать альтернативную концепцию оценки ФУ по новому критерию и без учёта отказов и/или выхода за допустимую норму принятых технических характеристик либо нормированных параметров СБИС. Взамен известных критериев учёта экспериментальных фактов мы принимаем критерий вероятности возможного функционального сбоя.

Учитывая необходимость и возможность предоставления читателю имеющейся информации о проблеме надёжности СБИС с субмикронными элементами их структуры, приходится считаться с обилием опубликованных по данному направлению материалов. В этих материалах надёжность элементов и узлов структуры СБИС рассматривается в их связи с режимами и условиями эксплуатации, а также с учётом всего многообразия технологии изготовления данной структуры. В работе [8] показано, что проблема выхода годных микросхем определяется наличием в продукции физических дефектов, которые сформировались на уровне использованных материалов и, главным образом, в процессе технологических операций изготовления компонентов. Для различных групп

СБИС эта информация определяет и подтверждает высокое качество продукции, она непрерывно пополняется по мере появления новых разработок микросхем, новых технологических режимов их изготовления, что особенно характерно для субмикронных компонентов, степень интеграции которых постоянно возрастает.

И здесь можно заметить следующее. Если в области электровакуумной, плазменной, квантовой и фотоэлектроники, дискретной и слабо интегрированной полупроводниковой техники и других классов электронных компонентов, разработки которых практически достигли своего совершенства, а база данных об отказах и о показателях их надёжности приобрела устоявшийся классический и универсальный характер, то для СБИС это не так. Высоко интегрированные компоненты составляют исключение из сложившейся базы данных о надёжности, поскольку для них предлагаемая информация о надёжности фактически не содержит данных об отказах и только подтверждает высокий уровень их качества.

Наш подход к оценке надёжности путём определения ФУ СБИС также выполняется не по статистике отказов, но при этом он остаётся количественным показателем, поскольку мы учитываем величину вероятности изменения свойств носителей информации, а именно тех изменений напряжений выходных сигналов, которые способны привести к функциональному сбою. Фактически мы оцениваем вероятность возможного перемежающегося отказа СБИС.

Технический аспект формирования уровня надёжности СБИС как твёрдотельной структуры всесторонне рассмотрен в технической литературе. Например физика необратимых процессов деградации, происходящих в структурах СБИС, формирующих функциональную устойчивость микросхем и определяющих количественную сравнительную оценку их надёжности, подробно рассматриваются в монографии [9]. Но отсутствие в источниках методологии испытаний, в том числе ускоренных, для оценки величины ресурса (предельной наработки) микросхем с субмикронными размерами элементов не связано с несовершенством технических средств испытаний СБИС, измерений их параметров или с недоработками существующей системы нормативных документов. Оно, как будет показано далее, имеет принципиальный характер. Поэтому совершенствовать, развивать методологию оценки надёжности применительно к СБИС можно только изменив подход к оценкам показателей их надёжности, когда количественным критерием оценки этого показателя надёжности СБИС станет изменение величины вероятности предполагаемого перемежающегося отказа или сбоя исследуемого эльфы.

Универсальные топологические характеристики сложных микроструктур, которые отличают главные особенности современных сверхсложных субмикронных приборов, имеющих кроме миллионов базовых элементов, включая МОП-транзисторы, до девяти слоёв межсоединений и до 5 млрд контактов, подробно представлены в работе [10].

Большие возможности и широкое использование МОП-транзисторов в качестве активного базового элемента СБИС определяются простотой собственно

конструкции транзистора, обеспечивающей быстрое действие элемента в ключевом режиме его работы и минимальные рабочие токи в статическом ждущем режиме «0» и «1» выходного сигнала. Важно и то, что указанная простота позволила легко осуществлять объединение транзисторов в пары, которые формируют эти два уровня сигнала, и успешное совершенствование конструкции транзисторов. Сделано это путём простого масштабирования (пропорционального уменьшения) размеров их узлов в ходе постепенной микроминиатюризации микросхем, роста степени интеграции и улучшения их электрических характеристик.

В работе [11] показаны те особенности конструкции канала современных МОП-транзисторов, которые достигаются при масштабировании их геометрических размеров. Эти особенности формируют с помощью изолированной технологии с целью борьбы с нежелательными вторичными эффектами и с возможной долговременной деградацией параметров транзисторов. Для нас эти подробности важны в той части, в которой их понимание поможет приблизиться к пониманию природы возможной функциональной нестабильности СБИС. Усложнения конструкции канала обеспечивают снижение величины сверхвысокого поля в граничных областях субмикронного канала и уменьшают энергию возникающих в таких полях горячих электронов. Достигается последнее формированием небольших слаболегированных (до  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) областей в обширных сильнолегированных областях стока и истока, которые удлиняют последние в сторону канала, создавая слаболегированный карман.

Но проникновение области обеднения в канал является основной причиной появления нежелательных эффектов короткого канала. Для ликвидации этой проблемы на границе обеднённой области ионным легированием примеси того же типа проводимости, что и карман, встраивается область ореола (halo) с минимальной толщиной 2–3 нм (на рис. 1.1 показана штриховой линией), которая обеспечивает реализацию так называемого эффекта короткого канала.

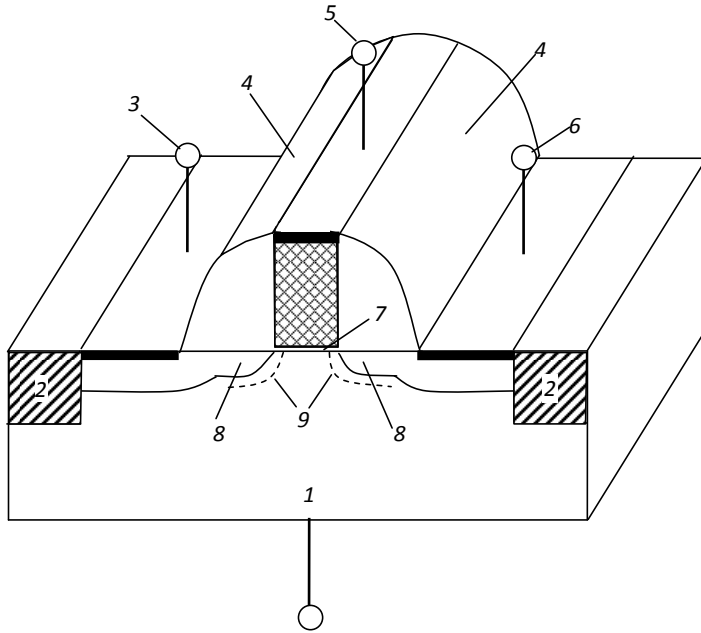
Следует отметить, что проблема ФУ, как и другие возможные проблемы надёжности матриц описанных выше перспективных узлов и структур из множества МОП-транзисторов в источниках, посвящённых этой теме, не рассматриваются, поскольку нет необходимых экспериментальных данных, характеризующих такого рода структуры. Не учитывается эта проблема и при моделировании в работе [12] МОП-транзисторов.

Представленные на рис. 1.1 особенности устройства МОП-транзисторов и электрические характеристики их канала проводимости обеспечивают функционирование собранных на их основе унифицированных комплементарных инверторов в качестве типовых логических элементов СБИС самого различного назначения. Общие свойства объекта исследования СБИС изначально определяются свойствами его элементарных базовых составляющих.

В большой системе в целом, как и в каждом её элементе, существует свой неизбежный риск (вероятность) сбоя и есть общая проблема борьбы с ними, как это рассмотрено, например в работе [13]. Риск сбоя здесь определён по отношению к логическому элементу из-за изменений динамического параметра,



а именно времени задержки передних фронтов входных сигналов образующих его транзисторов. Но называется этот сбой статическим, поскольку происходит в тех случаях, когда задержки сигнала на логических входах не равны, как это необходимо для нормальной работы. Мы также анализируем изменения статического риска ошибки в таблице истинности логического элемента. Но в наших исследованиях этот рост риска ошибки происходит вследствие роста внутреннего сопротивления переходов транзисторов.

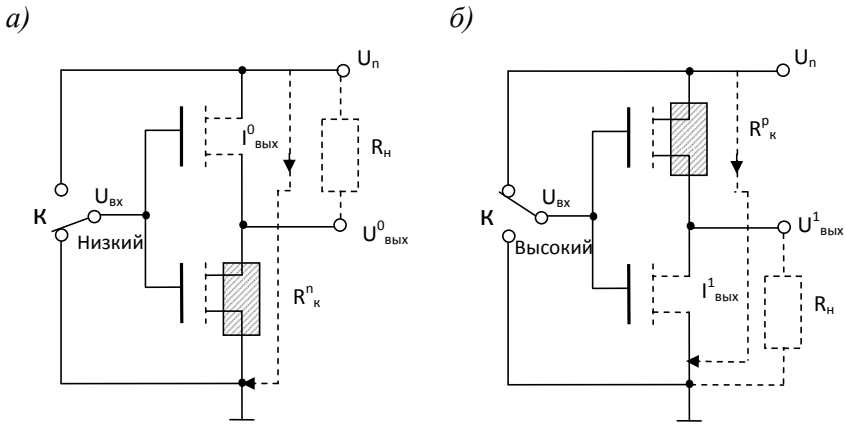


**Рис. 1.1.** Типовая структура и узлы  $n$ МОП-транзистора:

1 – подложка; 2 – изоляция; 3 – исток; 4 – слейсер; 5 – затвор; 6 – сток; 7 – подзатворный окисел; 8 – область обеднения; 9 – ореол

Последнее влияет на передаточную характеристику «вход – выход» у переключающего ключа  $n$ -инвертора, который преобразует логическую «1» или единичный сигнал высокого уровня на входе в логический «0» на выходе, и наоборот. Передаточная характеристика определяет работоспособность ключа как первичного элемента логической системы СБИС, а вся масса этих элементов СБИС и, соответственно, их передаточных характеристик обеспечивает ФУ СБИС в условиях внешних воздействий и во времени. Таким образом, надёжность системы в целом определяется неизменностью каждой такой характеристики в отдельности и устойчивым функционированием всей их массы с учётом возможных вариантов взаимных связей и взаимного влияния. Это обстоятельство служит причиной интереса к тому, как параметры электрической схемы базового элемента СБИС (инвертора) формируют график «вход – выход» и что определяет стабильность общей характеристики комплементарного ключа как

логического элемента, совмещающей две отдельные переходные характеристики двух совмещённых  $n$ - и  $p$ -МОП-транзисторов.



**Рис. 1.2.** Принципиальная электрическая схема  $n$ КМОП-инвертора:  
 а – на выходе логический «0»; б – на выходе логическая «1»

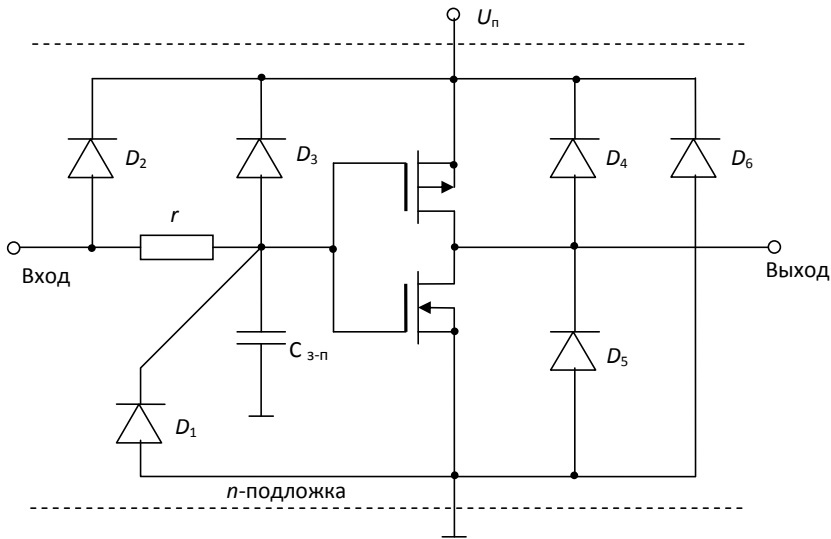
Не останавливаясь на деталях того, как переходные характеристики «вход – выход»  $n$ -канального и  $p$ -канального ключей с ничтожным влиянием на их работу переходных режимов усиления формируют условную передаточную характеристику логического элемента, выполненного на КМОП-инверторе, представим на рис. 1.2 два рабочих варианта реальной принципиальной электрической схемы  $n$ КМОП-инвертора при напряжении питания  $U_p$ .

Обобщая, заметим, что указанная помехоустойчивость на уровне элементов определяет ФУ инверторов, поскольку уход за обозначенные выше нормы, которые приняты за нормы ТУ на СБИС выходных напряжений низкого и высокого уровней, означает повышенную вероятность сбоя в следующем нагрузочном каскаде логической структуры. Однако сам анализируемый инвертор работоспособности не теряет, да и вероятность сбоя ещё не означает неизбежность факта сбоя. Важно отметить, что для инверторов, составляющих периферию СБИС, связь роста риска сбоя и ФУ микросхемы как законченного компонента аппаратуры очевидна, поскольку фиксируется при тестировании. Но для логических элементов ядра СБИС данная связь не поддаётся контролю. Кроме того, хотя такая связь реально существует, возникающие в логических элементах ядра сбои могут успешно устраняться аппаратным резервированием и программными средствами.

В статическом режиме входное сопротивление инвертора, показанного на рис. 1.2 и, соответственно, входное сопротивление следующего каскада, обозначенное на рис. 1.2 как нагрузка инвертора  $R_H$ , имеют величину порядка более  $10^{10}$  Ом. Это сопротивление превышает на несколько порядков внутреннее сопротивление управляющего канала любого МОП-транзистора, которое имеет уровень порядка 5 кОм или несколько больше. Последнее и определяют незна-

чительную величину тока нагрузки и предельно малое потребление энергии КМОП структурами.

На рис. 1.3 показана полная электрическая схема инвертора [14]. К цепи затворов включён защитный стабилитрон  $D_1$ , который защищает от пробоя тонкий слой диэлектрика затвора от избыточных входных потенциалов, а также выводит на землю ток утечки зарядов  $q$ , накапливающихся в статическом состоянии в конденсаторах с обкладками «затвор – канал или подложка»  $C_{з-п}$ . Если заряды  $q$  генерируются вблизи поверхности подложки постоянно (термоэлектрогенерация), то потенциал «затвор – исток»  $U_{з-и} = q / C_{з-п}$  быстро увеличивается до напряжения пробоя тонкого одномикронного слоя  $\text{SiO}_2$ . Обратное сопротивление стабилитрона шунтирует эти конденсаторы и создаёт путь току утечки.



**Рис. 1.3.** Принципиальная электрическая схема КМОП-инвертора

Полную защиту инвертора обеспечивают шесть диодов, включая  $D_1$ , и резистор  $r$ , равный  $200 \div 2000$  Ом, ограничивающий пиковый уровень тока заряда конденсатора  $C_{з-п}$  емкостью  $5\text{--}15$  пФ. Он защищает также выход предыдущего каскада схемы (инвертора) от перегрузки. Ток этой перегрузки может быть очень велик, если число нагруженных выходов инвертора достигает десятков. Диоды  $D_1 - D_3$  защищают затвор от пробоя как по изоляции, так и на  $p$ -карман. Диоды  $D_4$  и  $D_5$  защищают выход от пробоя на подложку и  $p$ -карман. Диод  $D_6$  защищает канал при ошибочной смене полярности напряжения питания микросхемы.

Изложенные данные показывают, что разработчики электрической схемы инвертора создали такую физическую структуру, которая обеспечивает её защиту и надёжное функционирование с заданными параметрами надёжных микрорезлементов и стабильными электрическими режимами схемы. Остается про-

блема возможного нарушения ФУ инвертора, возникающая на уровне субмикронной природы МОП-структуры. Её мы рассмотрим далее.

## 1.2. Природа и формирование дефектов структуры Si–SiO<sub>2</sub>

Проблема образования дефектов различных размеров и плотности в структурах микросхем, как и в прочих классах электронных компонентов, является главной в деле обеспечения заданного уровня качества продукции в сфере её производства. Повышение процента выхода годных компонентов осуществляется отбраковкой: удаляются образцы с явным производственным браком и, частично, со скрытыми дефектами, которые стараются выявить путём дополнительных испытаний и длительной тренировки компонентов. При этом отказ компонента со скрытым дефектом имеет стохастический характер и в общем виде его вероятность  $q_{от}$  оценивается соотношением Больцмана [15]:

$$q_{от} = 1 - e^{-N_d S_a}, \quad (1.1)$$

где  $N_d$  – количество дефектов, имеющих критическую для заданного неизбежного отказа величину;  $S_a$  – площадь структуры компонента, содержащая дефекты критической величины.

По данным [15], где рассмотрено состояние вопросов надёжности микросхем в период производства на начало 1990-х годов, к узлам, в которых с учётом вероятности (1.1) возникают отказы специфических для них типов, следует отнести корпус, внешние и внутренние контактные устройства и собственно кристалл. На долю последнего приходилось около четверти отказов с интенсивностью потока отказов на уровне  $10^{-8}$  1/ч [15].

В современных условиях совершенного производства СБИС ситуация изменилась, поскольку качество изготовления их узлов повысилось настолько, что интенсивность отказов частей структуры СБИС снизилась до величин, которые не поддаются статистически значимому контролю. Однако в этих условиях для областей тонких оксидов подзатворных слоёв возникла новая опасность, но не отказа как такового, а изменения их электрофизической структуры, приводящие к уменьшению ФУ СБИС. Можно заметить, что в соответствии с (1.1) критической для появления достаточно высокой вероятности сбоя в структуре теперь стала наномикронная величина тех дефектов, которые раньше, с учётом данных [15], никакого влияния на надёжность компонентов не оказывали.

Рассмотрим отмечаемые физические особенности влияния дефектов легирования на процессы деградации, которые идут в активных областях МДП-структур и отвечают за формирование выходных сигналов «0» и «1» во всей структуре активных элементов СБИС, включая периферию. Согласно [16], известно, что неопределённость  $\delta_x$  числа заложенных в полупроводниковую структуру легирующих атомов, образующих заданную концентрацию примесей