

Анализ причин неработоспособности кристаллов Ethernet контроллера 1990ВГ3Т

В.Ю. Троицкий*, М.В. Орешков**, А.А. Захарченко*, А.П. Трепалин,
Т.В. Петлицкая**, В.А. Филипеня

* к.ф.-м.н., ** к.т.н.

Аннотация. Разработана и успешно опробована методика поэтапного исследования физико-технологических причин неработоспособности кристаллов интегральной микросхемы (ИМС) Ethernet контроллера 1990ВГ3Т с применением неразрушающих и разрушающих методов:

- локализации дефектов по результатам функционального тестирования и регистрации фотоэмиссии,
 - послойного удаления слоёв металлизации,
 - нанозондирования электрофизических характеристик транзисторных структур,
 - исследования локализованной области на ионно-электронном микроскопе.
- Получены важные результаты, раскрывающие технологическую причину неработоспособности ИМС.

Ключевые слова: анализ брака, локализация дефектов

Введение

Анализ причин неработоспособности кристаллов ИМС является важным направлением исследований не только на этапе отладки проекта топологии в конкретном технологическом процессе, но и в случае появления брака в кристалльном производстве. По мере уменьшения размеров элементов ИМС такой анализ существенно усложняется и требует применения разнообразных методов исследования.

Существуют как разрушающие, так и неразрушающие методы, позволяющие локализовать и установить причину неработоспособности кристалла ИМС, такие как:

- обратное проектирование по результатам функционального тестирования ИМС,
- метод регистрации фотоэмиссии,
- послойное удаление диэлектрических и металлических слоёв с визуальным контролем на каждом этапе,
- электронная растровая (SEM) и просвечивающая (ТЕМ) микроскопия и ионно-электронная микроскопия.

Применение каждого метода сопряжено с определёнными ограничениями и требованиями к исследуемой ИМС, что будет рассмотрено более подробно. Кроме того, организация на мини-фабрике участка, содержащего полный комплект оборудования, позволяющего реализовать все перечисленные методы, нецелесообразна, ввиду малых объемов производства, высокой стоимости оборудования и инфраструктурных ограничений.

Тем не менее, возможность сочетания в процессе анализа различных методов позволяет снять многие ограничения, провести комплексный, законченный анализ и дать конкретные рекомендации технологам или разработчикам. Именно такой комплексный подход, сочетающий использование оборудования различных организаций и тесное взаимодействие со специалистами этих организаций был применён в

данной работе, что определяет её новизну и актуальность.

1. Описание образцов

В работе исследовались кристаллы микросхем 1990ВГ3Т, изготовленные по КМОП технологии с минимальным топологическим размером 0.35 мкм на объёмной кремниевой подложке с эпитаксиальным слоем. Функционально ИМС представляет собой Ethernet-контроллер 10/100 Мбит. Топология схемы содержит четыре блока двухпортовой кэш-памяти размерами: 512x35, 512x32, 512x25 и 32x35. По результатам расширенного функционального тестирования кристаллов неработоспособных микросхем, проведённого сектором электрических измерений отделения микротехнологии (ОМТ) совместно с отделением разработки вычислительных систем (ОРВС) НИИСИ РАН, на различных кристаллах зафиксирована неработоспособность одного или нескольких блоков кэш-памяти со следующими проявлениями:

– присутствуют дефектные ячейки, как с постоянной, так и с «плавающей» неработоспособностью;

– работоспособность дефектных ячеек памяти в ряде случаев зависит от напряжения питания, при повышении напряжения происходит «залипание» ячейки в одном из логических состояний.

Также на данном этапе была установлена возможность выхода на конкретную дефектную ячейку по топологии микросхемы для её дальнейшего исследования разрушающими методами. Следующим этапом исследования стала локализация дефектных ячеек.

2. Локализация дефектов

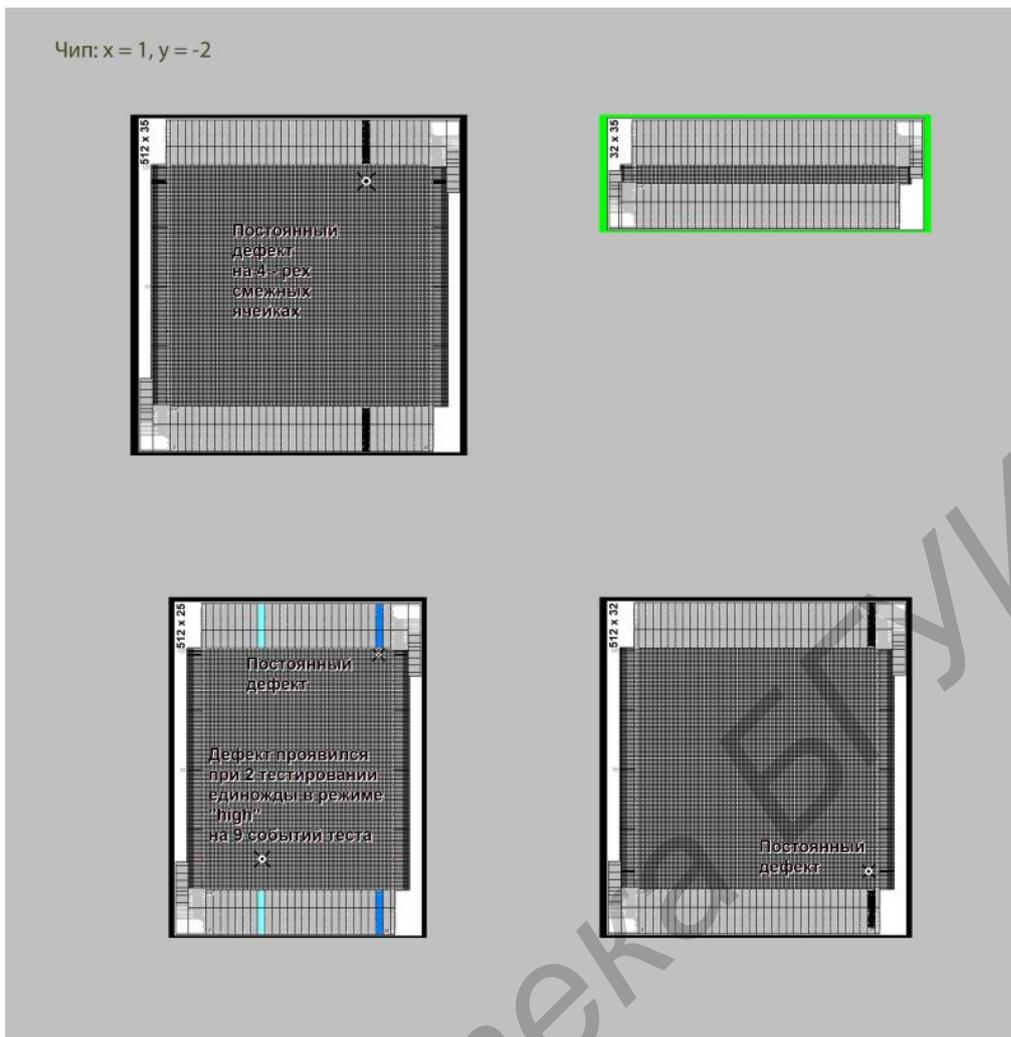


Рис. 1. Локализованное расположение дефектных ячеек памяти в исследованном кристалле

Среди методик, позволяющих локализовать дефекты, сопоставимые с размерами транзисторов в исследуемой ИМС, можно выделить следующие: фотонно-эмиссионная микроскопия [1], обратное тополого-электрическое моделирование функционирования ИМС и послойное удаление диэлектрических и металлических слоёв с последовательным визуальным контролем всей площади кристалла.

Первые два метода являются неразрушающими, последний – разрушающий, однако каждый метод имеет свои особенности и ограничения. Первый требует наличия специального оборудования для получения фотоэмиссионных изображений кристалла с высоким разрешением и специальной подготовки образца. Кроме того, данный метод годится зачастую только для анализа блоков статической памяти, таких как кэш-память или SRAM, поскольку в КМОП технологии транзисторы в ячейках таких типов памяти не должны испускать фотоны в достаточном для детектирования количестве.

Обратное тополого-электрическое моделирование не требует специального оборудования, кроме функционального тестера, но требует составления специальных алгоритмов и трудоёмкого анализа полученных результатов, а также может не позволять достаточно точно выходить на неработоспособный

транзистор или логическую ячейку, указывая только на конкретный функциональный блок. В случае сбоев в функционировании памяти у ИМС, таким методом, как правило, можно выйти на неработоспособную ячейку памяти, даже в отсутствие непосредственной адресации к ней (как в случае с анализируемой ИМС).

Третий метод локализации может использоваться и самостоятельно, и в сочетании с другими методами. Ограничениями метода являются его разрушающий характер, необходимость проведения операций травления в жидкой химии и высокие требования к прецизионности оборудования механической обработки поверхности кристаллов.

Трудоёмкость метода определяется сложностью и площадью кристалла ИМС, а его информативность – типом дефекта, то есть возможностью обнаружения этого дефекта в оптическом или электронном микроскопе и его сохраняемостью при проведении химических и механических обработок.

Результаты анализа функционирования.

По результатам функционального тестирования кристаллов ИМС дефектные ячейки встречались в любом из блоков памяти абсолютно случайно. Для физического анализа был выбран неработоспособный кристалл из центральной области пластины. Расположение локализованных разработчиком дефектных ячеек в блоках памяти по результатам

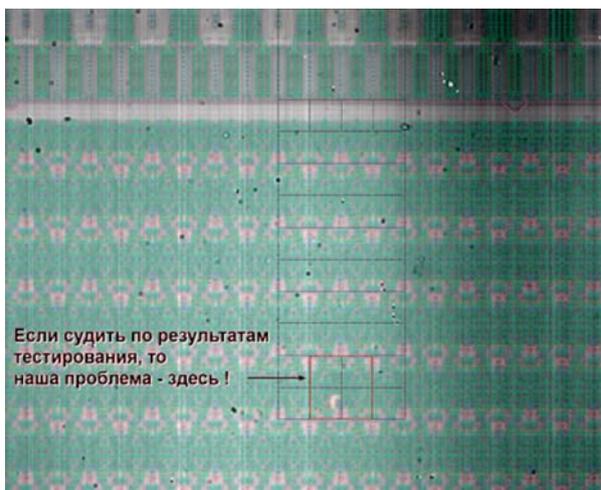


Рис. 2. Совмещённое изображение фотоэмиссии и топологии для кристалла с комментарием разработчика

тестирования данного кристалла представлено на рис. 1.

В этом кристалле разработчиком локализованы сбойные ячейки в блоках памяти 512x35, 512x32 и 512x25.

Следует обратить внимание, что в блоке 512x35 стабильно не работает группа из 4-х смежных ячеек, имеющих общий карман (ACTIVE) для *n*-канальных транзисторов (см. рис. 6).

Результаты фотонно-эмиссионной микроскопии.

Для проведения фотонно-эмиссионных исследований с использованием экспериментального программно-аппаратного комплекса на базе установки Visteo INM 100IR кристалл был разварен на специализированной плате. Фотоэмиссия из кристалла снималась при напряжении питания 3.6 В, поданного на выводы питания, остальные выводы не подключались.

На рис. 2 приведен результат наложения фрагмента чертежа топологии блока памяти, в котором обнаружена фотоэмиссия, на его фотоэмиссионное изображение. По данному изображению при большом увеличении видно, что эмиссия предположительно исходит от *n*-канального транзистора одного из инверторов триггера ячейки памяти (см. рис. 3).

По итогам анализа результатов функционального тестирования микросхемы разработчиком были локализованы 4 соседние неработоспособные ячейки в блоке памяти. В одной из этих ячеек и была зафиксирована описанная выше фотоэмиссия. Таким образом, результаты экспериментальной локализации дефектных ячеек и локализации по результатам анализа функционального тестирования микросхемы совпали.

Результаты исследований после удаления слоев металлизации.

Для проведения дальнейшего физического анализа кристалл был передан в ГЦ «Белмикрoанализ» ОАО «Интеграл», г. Минск. На кристаллах было проведено прецизионное удаление слоев пассивации, металлизации и межслойных диэлектриков вплоть до контактных окон к транзисторным структурам. При визуальном контроле открывшейся структуры транзисторных слоев неработоспособных блоков кэш-памяти были обнаружены локальные цветовые

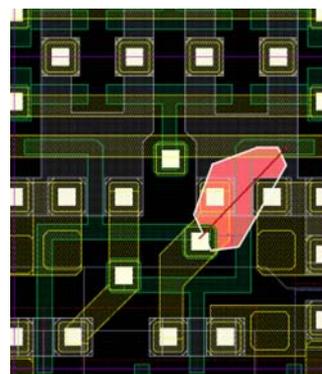


Рис. 3. Область свечения в одной из ячеек памяти

вариации топологического рисунка (рис. 4), причем эти цветовые вариации расположены именно в области четырех неработоспособных ячеек памяти, локализованных разработчиком, и совпадают с областью зафиксированной фотоэмиссии.

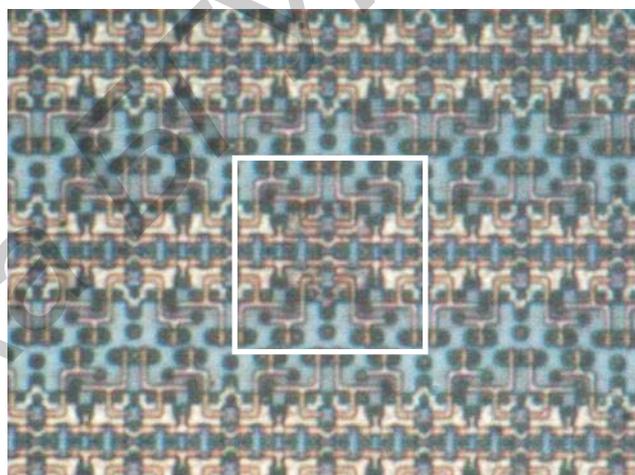


Рис. 4. Оптическое изображение дефектных ячеек в блоке 512x35 кристалла. Увеличение 3000х.

Все обнаруженные дефекты объединяет изменение цвета области ACTIVE, однако характер изменения отличается, что должно быть обусловлено разной природой дефектов. Так, в случае, показанном на рис. 4, вероятно имело место некачественное образование силицида титана по всему островку области ACTIVE.

3. Анализ обнаруженных дефектов

В качестве объекта для последующего разрушающего и электрофизического анализа были выбраны четыре смежные ячейки в блоке кэш-памяти 512x35 кристалла, локализованные всеми использованными методиками и представляющие собой информативный объект для проведения исследования на ионно-электронном микроскопе.

Нанозондирование электрофизических характеристик.

Для выявления возможного влияния обнаруженных дефектов на работоспособность транзисторов в локализованных неработоспособных ячейках кэш-памяти было проведено электрофизическое тестирование этих транзисторов с

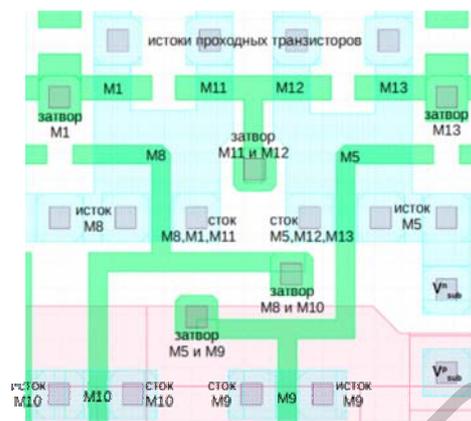
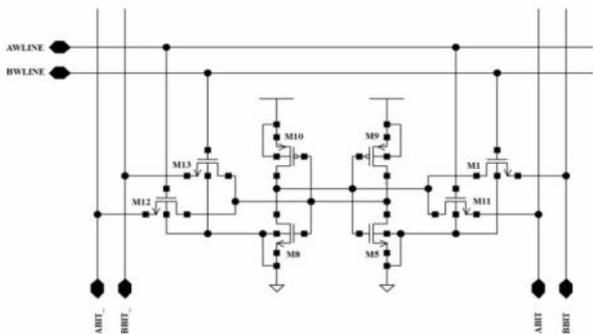


Рис.5 Электрическая (а) и топологическая (б) схемы двухпортовой ячейки памяти (DPRAM).

помощью нанозондов в электронном микроскопе [2,3]. Контакт зондов с электродами транзисторов на кристалле осуществлялся через вольфрамовые столбики в контактных окнах к активным областям транзисторной структуры после удаления всех слоёв металлизации.

На рис. 5 представлены электрическая схема анализируемой двухпортовой ячейки памяти и ее топология – слои карманов транзисторов, поликремния и контактов к транзисторным структурам.

На топологическом чертеже (рис. 6) четырех смежных неработоспособных ячеек в центре выделена область «Active», являющаяся общей для транзисторов M5, M12, M13, M1, M11, M8, находящихся в этих четырех ячейках. Именно в этой области наблюдались цветовые вариации, описанные при проведении визуального контроля после удаления слоёв металлизации. Также выделен затвор транзистора M5 в нижней левой ячейке, в области которого наблюдалась фотоэмиссия.

Прецизионное электрофизическое тестирование транзисторов в области неработоспособных ячеек проводилось в ГЦ «Белмикроанализ» ОАО «Интеграл», г. Минск. Кристалл был помещен в растровый электронный микроскоп Hitachi S-4800,

оснащенный зондовыми головками с электромеханическими манипуляторами производства фирмы Kleindiek Nanotechnik.

Электронно-микроскопическое изображение области вскрытых контактов к транзисторному слою, где проводилось зондирование, представлено на рис. 7. Местоположение контактов к электродам транзисторов исследуемых ячеек определялось по топологическому чертежу соответствующего слоя контактов.

Первоначально была поставлена задача провести измерения ВАХ всех транзисторов ячейки, в которой наблюдалась фотоэмиссия, однако из-за высокой трудоемкости и большой длительности процесса зондирования программа измерений была сокращена. Были проведены измерения семейства выходных ВАХ транзисторов M5 из соседней работоспособной ячейки и того же транзистора M5 из левой нижней неработоспособной ячейки (рис. 6), на котором наблюдалась фотоэмиссия. Потенциал кармана на соответствующем контакте V_{sub}^n (см. рис. 5) устанавливался равным истоковому потенциалу транзистора. Напряжение на затворе изменялось в диапазоне от -0,5 до +3 В.

Измерения в камере электронного микроскопа при разных ускоряющих напряжениях электронного луча на работоспособном *n*-канальном транзисторе M5 показали, что целесообразно проводить измерения при м б) альном ускоряющем напряжении электронного

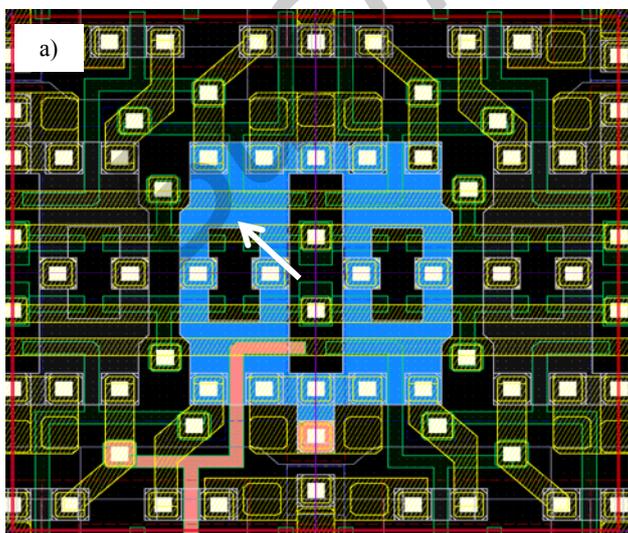


Рис. 6. Топологический чертеж четырех смежных неработоспособных ячеек. Стрелка указывает на затвор транзистора, в области которого наблюдалась фотоэмиссия.

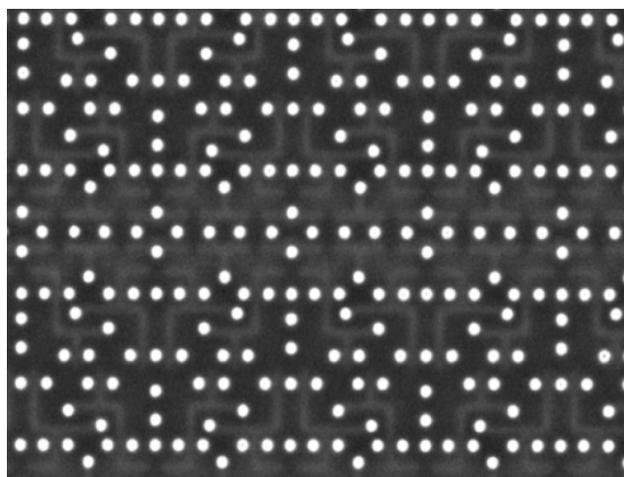


Рис. 7. Электронно-микроскопическое изображение области нанозондирования.

пучка для уменьшения его влияния на измеряемые ВАХ. В дальнейшем измерения проводились при ускоряющем напряжении 1 кВ.

Провести измерение ВАХ неработоспособного транзистора М5 не удалось. В измерительной цепи наблюдался обрыв – отсутствие контакта к одному или нескольким электродам транзистора. Аналогичная ситуация сложилась с *p*-канальным транзистором М9,

имеющим общий с М5 затвор, но не имеющим признаков дефектности. На рис. 8 представлены результаты измерения передаточных ВАХ этих транзисторов из нижней левой ячейки, в которой наблюдалась фотоэмиссия. Определить отсутствие конкретного контакта к стокам, истокам или к затвору не удалось из-за одиночных контактов к этим областям.

Библиотека БГУИР

Следующим шагом стала проверка транзисторов, имеющий общий с излучающим транзистором М5 из нижней левой ячейки p -карман (выделенная область вокруг центра на рис. 6). В нижней правой ячейке проверялись транзисторы М5, М12, в верхних ячейках – М8. Так как предшествующие измерения выявили проблемы с качеством контактов к электродам транзисторов, а также в связи с тем, что основные временные затраты при проведении измерений связаны с осуществлением контактирования нанозондов к электродам транзисторов (в общем случае используются 4 контакта), было принято решение провести ускоренное тестирование состояния транзисторов путем проверки качества контактов к стоковым и истоковым p - n -переходам этих транзисторов.

С этой целью один зонд был постоянно установлен на контакте к p -карману V_{sub}^n , расположенном между ячейками, а второй зонд устанавливался на стоковые и истоковые контакты тестируемых транзисторов.

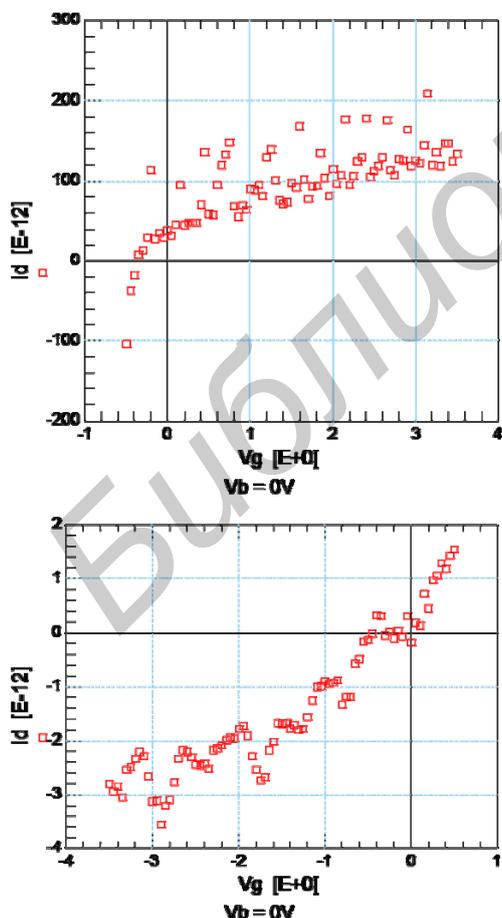


Рис. 8 Результаты измерения передаточных ВАХ транзисторов М5 (а) и М9 (б).

На рис. 9 представлены результаты тестирования контактов к стокам у транзисторов М5 в неработоспособной и годной ячейках (для сравнения). Аналогичные рис. 9(а) результаты были получены для транзистора М12 из нижних ячеек, в том числе и для контактов к истоку.

Из рис. 9(а) видно, что имеется только нелинейный ток утечки порядка 10^{-9} А, а контакт к самому диоду отсутствует. Однако нельзя утверждать, что контакты отсутствуют для всех стоков и истоков, поскольку все измерения проводились с использованием единственного общего контакта к карману этих транзисторов, который мог также отсутствовать.

Следует отметить, что хороший контакт к вольфрамовым столбикам, при котором получается ВАХ на рис. 9(б), с первого раза получить довольно сложно. На это влияет как форма и загрязненность нанозондов, так и рельеф самих столбиков, получившийся в результате удаления слоев. При возникновении омического контакта появляется типичная ВАХ диода, ограниченная последовательным сопротивлением контактов.

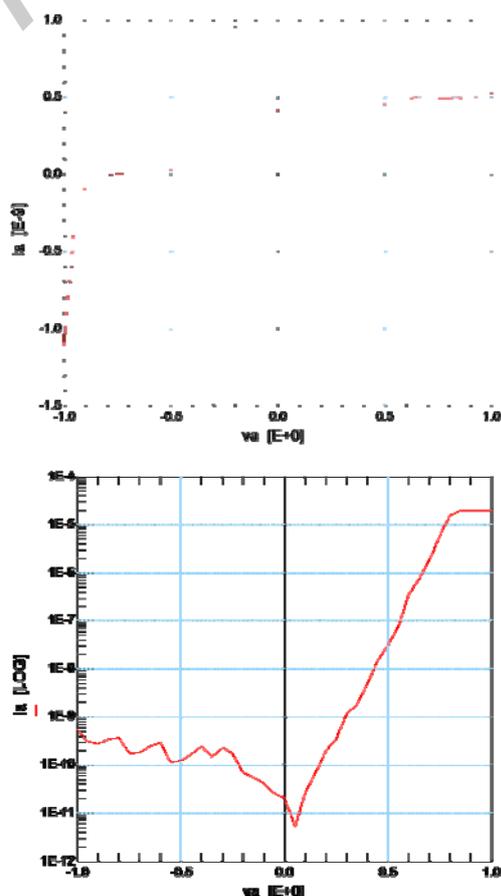


Рис. 9. ВАХ стоковых диодов транзисторов: а) транзистор М5 с фотоэмиссией; б) транзистор М5 из годной ячейки.

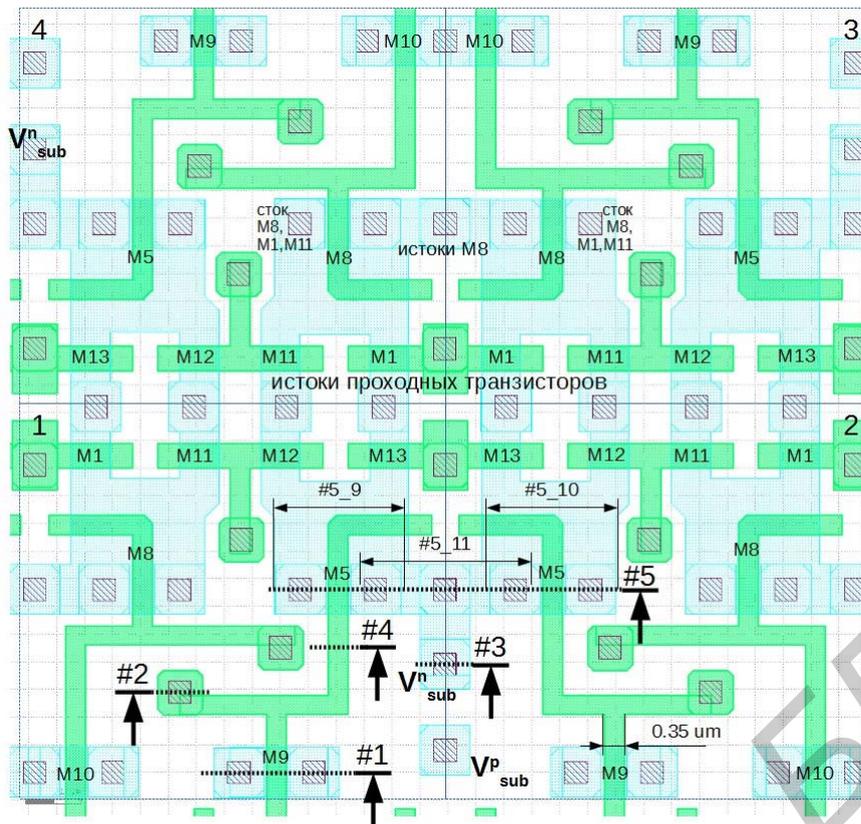


Рис. 10. Топология четырёх смежных сбойных ячеек кристалла с указанием изготовленных на установке FIB/SEM поперечных сечений.

Исследования методами FIB и электронной микроскопии.

Для локальных электронно-микроскопических исследований с использованием фокусированного ионного пучка (FIB) был выбран характерный дефект на кристалле, который подтвердился всеми задействованными ранее методами исследования – четыре неработоспособные смежные ячейки памяти, имеющие в своём составе общую область «ACTIVE», которая даже визуально отличается от аналогичных областей в работоспособных ячейках. Исследование проводилось в центре коллективного пользования «Диагностика и модификация микроструктур и нанообъектов» НИУ «МИЭТ».

По результатам нанозондирования транзисторов в дефектных ячейках были определены области формирования поперечных сечений для последующих электронно-микроскопических исследований.

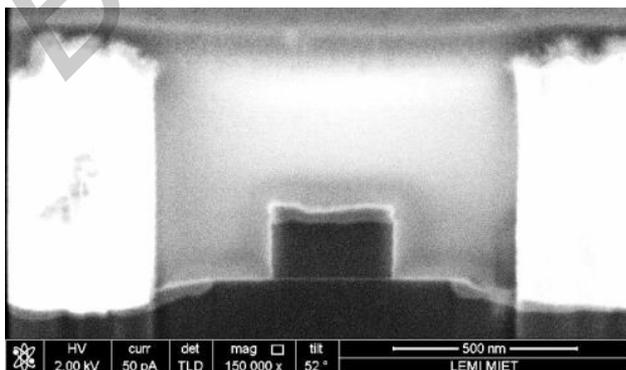


Рис. 11. Сечение №1, p-канальный транзистор M9, увеличение 150000х.

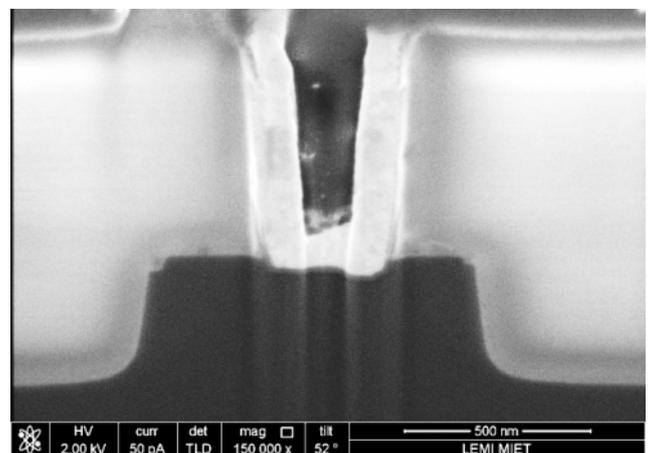


Рис. 12. Сечение №3, контакт к карману p-канальных транзисторов M1, M5, M11-13.

На рис. 10 обозначены расположение и границы выполненных поперечных сечений структуры с помощью FIB.

Существенных отклонений в структуре p-канального транзистора M9 в ячейке №1 не обнаружено (рис. 11), в том числе и с контактом к общей для M5 и M9 затворной шине (сечение №2, не приводится). Вероятно, отсутствовал контакт нанозонда(ов) с вольфрамовыми столбиком(ами). Силицид на поликремниевой шине был обнаружен на обоих сечениях (№2 и №4).

Из рис. 12 и 13 видно, что силицид титана практически везде отсутствует, за исключением небольших островков, что объясняет «пятнистую» текстуру данной области при визуальном контроле. Под контактом к карману силицида титана нет даже по периметру столбика, что может весьма негативно (привести к кинк-подобному эффекту) сказаться на характеристиках даже тех транзисторов, контакты к которым сохранились.

Причина отсутствия силицида титана заключается в наличии остатков вспомогательного слоя поликремния, используемого при формировании STI-изоляции. При дальнейших обработках слой поликремния должен быть полностью удален. Электронно-микроскопические исследования показали, что в данном кристалле присутствуют локальные тонкие слои неудаленного поликремния, а под ним остаётся слой screen-оксида порядка 150Å, который и препятствует формированию силицида титана, даже если остатки поликремния были удалены на последующих операциях. Более того, на рис. 14 и 15 показаны обнаруженные остатки слоя поликремния и screen-оксида непосредственно в подзатворной структуре транзисторов, замаскированные поликремниевой шиной и спейсером от удаления.

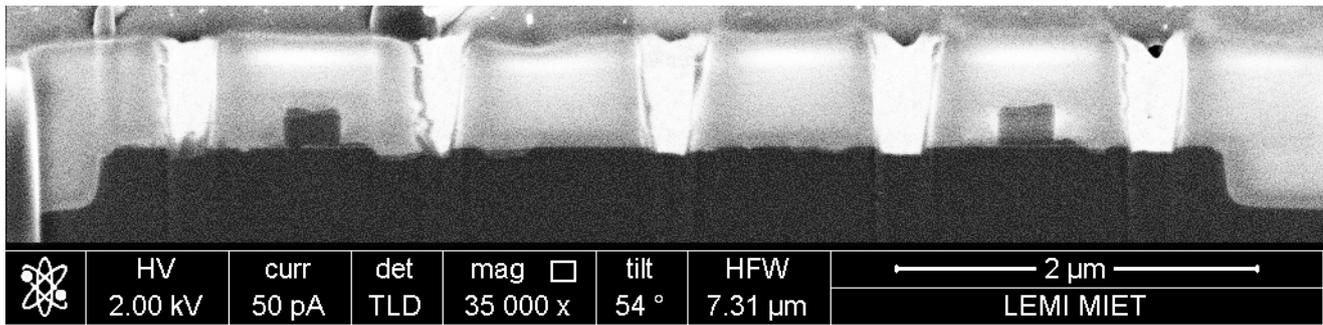


Рис.13. Сечение №5. Общий план контактов к стокам и истокам транзисторов M5 двух смежных ячеек.

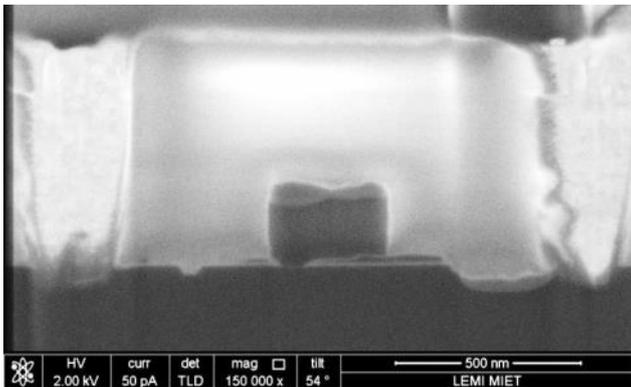


Рис.14. Сечение №5_9. Крупный план транзистора M5 в левой ячейке, у которого была обнаружена фотоэмиссия.

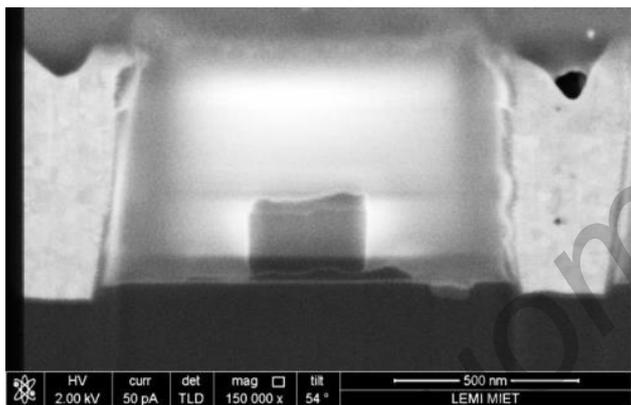


Рис.15. Сечение №5_10. Крупный план транзистора M5 в правой ячейке.

Обнаруженные структурные дефекты могут приводить к совершенно непредсказуемому поведению ячейки кэш-памяти в зависимости от площади, занимаемой неудалёнными слоями под затвором, от сопротивления и линейности контактов к стокам, истокам и карману. Это может приводить к «залипанию» триггера ячейки, невозможности его переключения проходными транзисторами, зависимости от напряжения питания, нестабильной (невоспроизводимой) работе, а также к полному отказу ячейки памяти.

В таблице 1 представлены все обнаруженные конструктивные несоответствия, зафиксированные по результатам проведенного анализа в области четырех неработоспособных ячеек.

Таблица 1.

Перечень выявленных конструктивных несоответствий в различных поперечных сечениях в области неработоспособных ячеек.

№ п/п	Несоответствие	№ сечения (рис.10)
1	Полное отсутствие слоя TiSi	3
2	Островковое образование TiSi из-за оставшегося степен-оксида под неудалённым поликремнием, который был удалён в результате последующих операций	5, 5_9, 5_10, 5_11
3	Наличие неудалённого слоя поликремния в транзисторах под затвором и спейсерами, которые сыграли роль маски и защитили поликремний от удаления	5_9, 5_10
4	Ямка анизотропного подтравливания кремния (область ACTIVE) между затвором и контактом к стоку	5_9

Заключение

В процессе проведения работы по выявлению причин неработоспособности кристаллов микросхем Ethernet-контроллера 1990ВГ3Т была разработана и успешно опробована методика комплексного прецизионного локального анализа дефектов в рабочей области кристалла.

Методика включает в себя четыре основных этапа:

1. Локализация дефекта. Для этой цели могут использоваться методы:

- регистрация фотоэмиссии в статическом режиме работы кристалла микросхемы;
- обратное моделирование результатов функционального тестирования;
- послойное удаление конструктивных слоев в сочетании с визуальным, в том числе электронно-микроскопическим контролем.

2. Совмещение физического расположения (изображения) локализованного дефекта с топологическим чертежом слоя, в котором он обнаружен.

3. Локальное электрофизическое тестирование элементов в области локализованного дефекта в электронном микроскопе с использованием нанозондов. По результатам тестирования – разработка плана эксперимента по электронно-микроскопическому исследованию локальных

поперечных сечений элементов с использованием FIB, SEM, TEM.

4. Проведение электронно-микроскопических исследований сформированных с использованием FIB поперечных сечений выбранных элементов и, при необходимости, энергодисперсионного элементного анализа. В случае недостаточности полученных результатов для выявления причины неработоспособности выявленных элементов – проведение электронно-микроскопических исследований «на просвет» путем изготовления ламели выбранного поперечного сечения с помощью FIB и ее исследования в просвечивающем электронном микроскопе.

В процессе анализа кристалла ИМС проведена локализация дефектной области кристалла тремя независимыми способами: фотоэмиссионным, обратным моделированием результатов функционального тестирования и разрушающим методом с последующим визуальным контролем. Все методы указали на одно и то же проблемное место в кэш-памяти кристалла микросхемы.

Обнаружено неустойчивое образование или полное отсутствие силицида титана на карманах в областях ACTIVE. В транзисторной структуре на данных карманах присутствуют дополнительные слои поликремния и SiO₂ под затвором, имеющие разную остаточную толщину и площадь под затвором.

Источником обнаруженных дефектов является не полностью удаленный поликремний, осаждаемый на исходную пластину при подготовке к формированию STI (мелкощелевой изоляции).

Данный технологический дефект, в зависимости от конечного проявления после формирования транзисторной структуры, способен приводить к любому из обнаруженных типов сбоев при функциональном тестировании микросхем данного типа.

Для своевременной отбраковки обнаруженных типов технологических дефектов в рамках операционного контроля необходимо проведение дополнительной операции автоматизированного поиска дефектов топологического рисунка ввиду возможности их оптического обнаружения.

Malfunction investigation of Ethernet controller dies 1990VG3T

V.Y. Troitskiy*, M.V. Oreshkov*, A.A. Zakharchenko*, A.P. Trepalin, T.V. Petlitskaya*, V.A. Filipenya

* Ph.D.

Abstract. Thorough multistage malfunction investigation of integrated circuit (IC) is carried out in this work. The IC is Ethernet controller 1990VG3T. Several consecutive non-destructive and destructive methods are used during investigation:

- defect localization by functional testing and by static photoemission detection;
- consecutive removal of metallization and dielectric layers;
- electro physical measurements by nano-probes;
- focused ion beam SEM research of selected areas.

Important results are obtained which reveal technological cause of IC malfunction.

Keywords: failure analysis, defect localization

Литература

1. А.А. Захарченко, М.В. Орешков, В.Ю. Троицкий Анализ дефектов интегральных микросхем с помощью фотонно-эмиссионной микроскопии. Труды НИИСИ РАН. Том 3, №1, 2013. С. 67-71
2. А.Н. Петлицкий, Д.В. Жигулин, А.К. Панфиленко и др. Анализ электрофизических параметров элементной базы субмикронных ИМС с использованием четырехзондового наноманипулятора. Труды II российско-белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение» им. О.В. Лосева, под ред. А. Э. Рассадина. – Н.Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2015. С. 230-232
3. В.А. Филипенко, В.А. Солoduха, А.Н. Петлицкий и др. Использование четырехзондового наноманипулятора для измерения вольтамперной характеристики биполярного п-р-п-транзистора. Труды XVII международной научно-практической конференции "Современные электронные и информационные технологии". Украина, Одесса, 23-27 мая 2016 г. – Одесса: Изд-во Политехпериодика, 2016. С.148-149

Авторы

Троицкий Вячеслав Юрьевич, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, раб. тел.: 495 7370606, доб. 230, мобильный тел.: +7 985 7644525, Viacheslav_Troitskiy@srisa.ru

Орешков Максим Викторович, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, раб. тел.: 495 7370606, доб. 355, мобильный тел.: +7 905 7823872, Maxim_Oreshkov@srisa.ru

Захарченко Алексей Александрович, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, раб. тел.: 495 7370606, доб. 358, Alexey_Zakharchenko@srisa.ru

Трепалин Анатолий Петрович, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, раб. тел.: 495 2560022, доб. 1238, ar@cs.niisi.ras.ru

Петлицкая Татьяна Владимировна, НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ», раб. тел.: 8 10 375 17 2121814, office@bms.by

Филипеня Виктор Анатольевич, НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ», раб. тел.: 8 10 375 17 2121814, office@bms.by

Библиотека БГУИР