

# Отказы интегральных схем, вызванные воздействием эффектов электромиграции и антенны

В. В. Шубин

Сибирский гос. унив. телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ)

*Аннотация:* В статье представлены некоторые проблемы отказов работы интегральных схем (ИС) и их предотвращение на ранних этапах проектирования. Рассмотрены, обобщены и систематизированы вопросы, связанные с отказами ИС, вызванными воздействием эффектов электромиграции и антенны. В статье приведены некоторые примеры, которые могут быть использованы в практической деятельности при разработке ИС для повышения их надёжности с учётом современных тенденций развития в области микроэлектроники.

*Ключевые слова:* электромиграция, эффект антенны.

*Для цитирования:* Шубин В. В. Отказы интегральных схем, вызванные воздействием эффектов электромиграции и антенны // Вестник СибГУТИ. 2024. Т. 18, № 3. С. 57–72.  
<https://doi.org/10.55648/1998-6920-2024-18-3-57-72>.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0  
License

© Шубин В. В., 2024

Статья поступила в редакцию 10.07.2023;  
переработанный вариант – 16.02.2024;  
принята к публикации 12.03.2024.

## 1. Введение

Одной из важнейших задач современной микроэлектроники является повышение надёжности интегральных схем (ИС). Поэтому поиск, анализ и устранение непредсказуемых отказов ИС является весьма важным вопросом исследований. Среди выявленных источников отказов ИС особое место занимают отказы, вызванные электромиграцией и эффектом антенны. Под электромиграцией понимают механизм медленного истощения (вымывания) материала проводника. Эффект антенны представляет собой особый тип пробоя диэлектрика, вызванного накоплением заряда на осаждённых проводниках во время плазмохимического травления, ионной имплантации или процесса удаления фоторезиста.

## 2. Электромиграция

Электромиграция (ElectroMigration, EM) представляет собой явление медленного износа материала проводника, вызванного протеканием через него электрического тока чрезмерной плотности. Причиной этого явления является захват и постепенное перемещение стационар-

ных атомов проводника носителями электрического тока. Впервые этот феномен был описан В. Б. Фиксом в 1959 г. [1]. Данная работа послужила причиной многочисленных теоретических, экспериментальных и численных исследований данного явления, интерес к которым растёт по мере масштабирования размеров ИС.

## 2.1. Механизм действия

В чистом алюминии заметный эффект ЭМ наблюдается при плотности тока  $\sim 5 \cdot 10^5$  А/см<sup>2</sup>. Данное значение плотности тока может вызывать ЭМ и легко достигается при протекании тока 2.5 мА в проводнике шириной 1 мкм толщиной 5000 Å [2,3]. Первая модель эффекта ЭМ, предложенная В. Б. Фиксом и Х. В. Хантингтоном [2], получила название «Баллистическая модель электромиграции». Сущность предложенной модели заключается в рассеянии электронов на дефектах примеси и соответствующей передаче импульса этим дефектам. Данный эффект принято называть «электронным ветром». «Электронный ветер» захватывает и переносит дефекты структуры проводника – примесные атомы, собственные ионы, дефекты междоузлий, вакансий, дислокаций и т.д. В этой модели передача импульса определяется плотностью потока электронов  $n_e$ , плотностью дефектов  $n_d$  и временем релаксации  $\tau$  электронов, включая все механизмы рассеяния. Если при столкновении с дефектом электрон передаёт свой импульс  $-e\vec{A}\tau$ , то электроны за единицу времени передают на один дефект момент силы  $n_e e \vec{E} \tau / n_d$ . Таким образом, передача импульса за единицу времени, которая является движущей силой «электронного ветра», равна:

$$\vec{F}_{wind} = -\frac{n_e e \tau}{n_d \tau_i} \vec{E} = -\frac{n_e \rho_d}{n_d \rho} e \vec{E}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – полное удельное сопротивление металлического соединения и  $\rho_d$  – вклад дефектов в полное удельное сопротивление. При комнатной температуре  $(\rho_d / n_d)(n_e / \rho) \approx 50$  [4].

Уравнение (1) построено на квантово-механической теории, которая на практике редко применяется из-за сложности вычислений и анализа результатов [5]. Несмотря на свою гомогенную природу, металл алюминия является поликристаллическим материалом. То есть он состоит из отдельных кристаллов, или зёрен (гранул), соединённых встык друг с другом. К сожалению, образование зёрен в проводниках носит непредсказуемый характер и неопределённый размер, и форма этих зёрен может сильно отличаться. Так как носители, образующие ток в проводнике, протекают в основном по границам этих зёрен, легко объяснить локальное отличие плотности тока на отдельных участках этого проводника (рис. 1).



Рис. 1. Демонстрация локального повышения плотности тока в металлическом проводнике

ЭМ заставляет атомы металла постепенно перемещаться вдоль границ зёрен, образуя пустоты между смежными гранулами (рис. 2). Поэтому площадь сечения проводника уменьшается, а плотность тока на оставшемся проводнике увеличивается. Возникающие пустоты постепенно объединяются до тех пор, пока они не сформируют полный разрыв проводника.

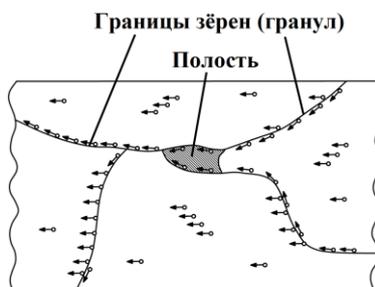


Рис. 2. Возникновение пустот на зауженных фрагментах гранул

Металл, перемещённый из пустот, образует небольшие выпуклости, называемые «бугорками», или вытесняется в заострённые дендриты (пикообразные отростки), которые могут закорачивать соседние проводники между собой. Примеры образования пустот в слое алюминиевой металлизации при передаче сигнала из слоя металл-2 (M2) в слой металл-1 (M1) представлены на рис. 3 [5].

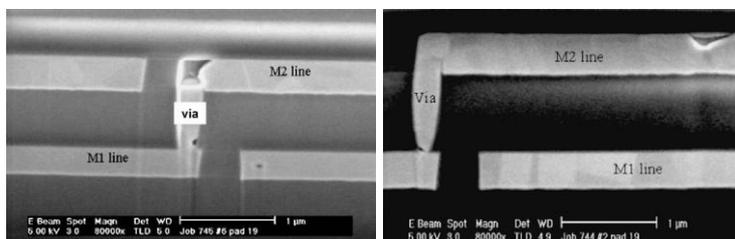


Рис. 3. Примеры образования пустот в слое алюминиевой металлизации

Современные технологические процессы изготовления ИС для защиты от отказов ЭМ предлагают дополнение к алюминиевой металлизации в виде плёнок тугоплавких металлов – W или Ti. Тугоплавкие металлы обладают более высоким удельным сопротивлением, вследствие чего большая часть тока протекает через алюминий. Кроме того, тугоплавкие металлы существенно меньше восприимчивы к эффекту ЭМ. Поэтому, если эффект ЭМ в конце концов вымывает алюминий из проводника, то плёнка тугоплавкого металла продолжает проводить ток и функционально предотвращает фатальный отказ ИС в виде полного обрыва этого проводника (рис. 4).

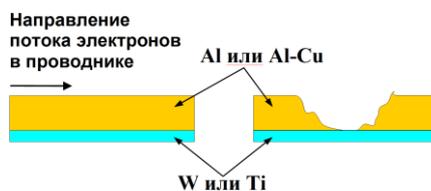


Рис. 4. Сохранение функциональной работоспособности схемы после вымывания Al из алюминиевого проводника, защищённого тугоплавким металлом

Однако формирование пустот в Al служит причиной постепенного и непредсказуемого роста сопротивления проводников узлов, соединяющих компоненты в требуемую схему. При этом следует учитывать, что даже сохранение функциональной работоспособности ИС не означает сохранение полноценной её работы. Изменение сопротивления нарушает динамические характеристики схемы или приводит к рассогласованию сигналов, требующих прецизионного согласования. Поэтому изготовитель ИС для операций металлизации устанавливает ограничения на величину поперечного сечения Al части проводника и величину тока, при котором это сечение может безопасно проводить этот ток, независимо от наличия или отсутствия тугоплавкого защитного металла. Ещё более угрожающе выглядит металлический про-

водник Al, перемещаемый из пустот, который формирует дендриты, закорачивающие соседние проводники между собой. На рис. 5 [5] приведён пример образования дендритов.

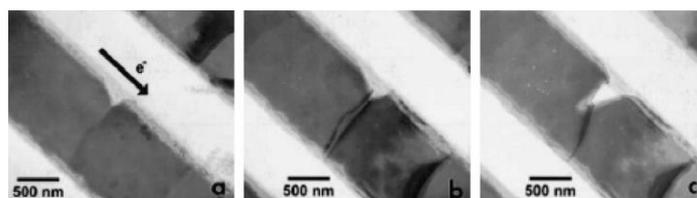


Рис. 5. Развитие дендритов (заострённых пикообразных отростков)

Кроме того, защита тугоплавкими металлами часто используется для предотвращения отказов, вызванных ЭМ между различными уровнями металлизации в контактных окнах (КО) и переходных отверстиях (ПО). Наличие тугоплавких металлов по границам КО и ПО гарантирует сохранность электрического сигнала в узле, даже если алюминиевая металлизация в них становится жертвой пустот, вызванных ЭМ (рис. 6).

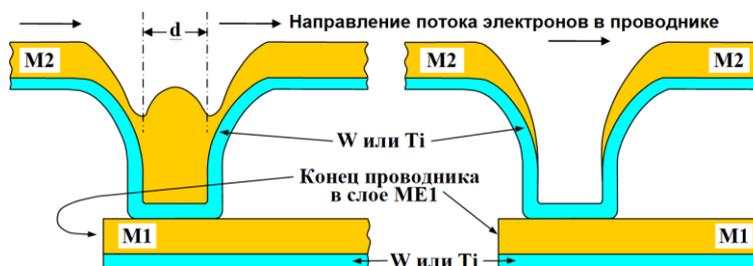


Рис. 6. Схема образования пустот в переходных отверстиях M2–M1 (ПО 2-1)

В случае на рис. 6 сигнал проводника в слое M2 относительно ПО – проходной. Поэтому образование пустот может привести к полному вытеснению Al из КО и ПО на их границу в сторону направления потока носителей. Однако во многих случаях КО и ПО являются концом проводника, переходящего на начало проводника более низкого уровня. В этом случае в КО и ПО вытеснение алюминия не происходит, так как возможность вытеснения закрывается тонкой плёнкой тугоплавкого металла, который полностью покрывает стенки структуры отверстий, как показано на рис. 7 [5].

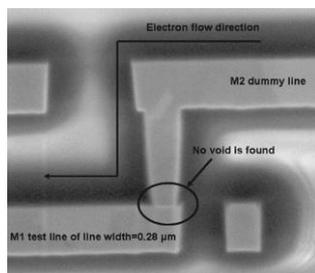


Рис. 7. Пример сохранения переходного отверстия в соединении M2 с M1

Последние исследования подтверждают более ранние, которые установили, что в ПО наиболее уязвимым местом с точки зрения образования пустот вследствие ЭМ является собственно соединение между алюминием и защитным тугоплавким металлом. Установлено, что противодействие ЭМ в такой неоднородной системе, как ПО, действительно зависит от направления потока носителей. При направлении потока носителей, как показано на рис. 8 [5], образование пустот происходит в нижнем слое металлизации – M1. При обратном направлении потока носителей вымывание металла происходит в верхнем слое металли-

зации – М2, на границе ПО в направлении потока носителей [6]. Таким образом, перед разработчиками технологического процесса стоит непростая задача: определение и сертификация реального качества КО и ПО, подтверждённого экспериментальными измерениями и испытаниями [2].

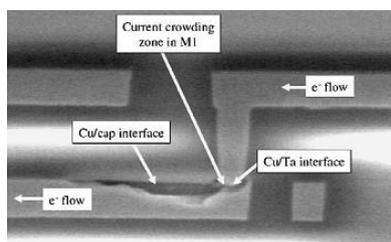


Рис. 8. Образование пустот в нижнем слое металлизации на границе ПО между слоями металлизации М2 и М1 при направлении потока носителей из верхнего слоя металлизации М2 в нижний М1

## 2.2. Методы противодействия отказам ИС, вызванным эффектом ЭМ

Первая линия защиты от воздействия ЭМ заключается в совершенствовании технологического процесса изготовления ИС. Современные технологические процессы для усиления противодействия ЭМ обычно применяют легирование Al-металлизации медью от 0.5 до 4% [7]. Медь скапливается на границах зёрен, где она препятствует возникновению пустот за счёт увеличения энергии активации, необходимой для перемещения атомов из атомной решетки. Алюминий, легированный медью, показывает ~5–10-кратное улучшение способности его обработки по сравнению с чистым алюминием [8]. Противодействие проводников ЭМ также может быть повышено путём использования защитных покрытий, полученных под давлением, за счёт уплотнения металла, в котором формирование пустот существенно затрудняется [9].

Чистая медь более устойчива к воздействию эффекта ЭМ по сравнению с чистым алюминием или даже алюминием, легированным медью. Заметное увеличение времени жизни проводника, подверженного действию эффекта ЭМ, зависит от происхождения межуровневого диэлектрика, механизма пассивации металла проводников и от условий испытаний. Типовым значением продления срока жизни алюминия является его увеличение в 40–100 раз [10]. Система металлизации из образованной толстым слоем меди фактически не подвержена эффекту ЭМ. При этом «дамасский» процесс получения меди и даже двойной «дамасский» повышают устойчивость системы металлизации, но не могут гарантировать полной защиты от эффекта ЭМ.

Приведённые технологические методы позволяют минимизировать эффект ЭМ, но всё равно существует некая предельная плотность тока, превышение которой при соответствующих условиях приводит к возможности отказа ИС вследствие нарушений системы металлизации. Поэтому правила проектирования любого технологического процесса изготовления ИС должны обязательно устанавливать величину удельной предельно допустимой плотности тока на единицу ширины проводника. Типовое значение удельной плотности тока металлического проводника  $J_S$  обычно составляет 1 мА/мкм для проводников, пересекающих ступеньку оксида или поликремния, и 2 мА/мкм для проводников, проходящих по гладкой поверхности полевого оксида. Эти значения зависят от состава слоя металла, его толщины и предельно допустимой величины рабочей температуры. Выражение (2) описывает зависимость плотности тока  $J$  от допустимой ширины проводника  $w$ :

$$J = J_S \cdot w, \quad (2)$$

Рассмотрим пример, в котором проводник должен проводить 50 мА при типовых значениях  $J_S$ . Согласно выражению (2), можно вычислить минимальную ширину проводника, допускаемую антиэлектромиграционными ограничениями правил проектирования:  $w = J / J_S$ . Таким образом, для проводников, проходящих по полемому оксиду, минимальная ширина должна составлять:  $w = 50/2 = 25$  мкм, и для проводников, проходящих по ступеньке оксида и (или) поликремния:  $w = 50/1 = 50$  мкм. Кроме того, правила проектирования технологического процесса должны запрещать резкое расширение проводника на оксидной или поликремниевой ступеньке (рис. 9А) и, так как ток должен втекать из узкого в более широкий проводник постепенно, точно и однозначно представлять требования формирования схемы постепенного расширения проводника. Обычно расширение проводника должно распространяться в обе стороны относительно ступеньки на расстояние по крайней мере удвоенной наибольшей ширины, как показано на рис. 9В–Е.

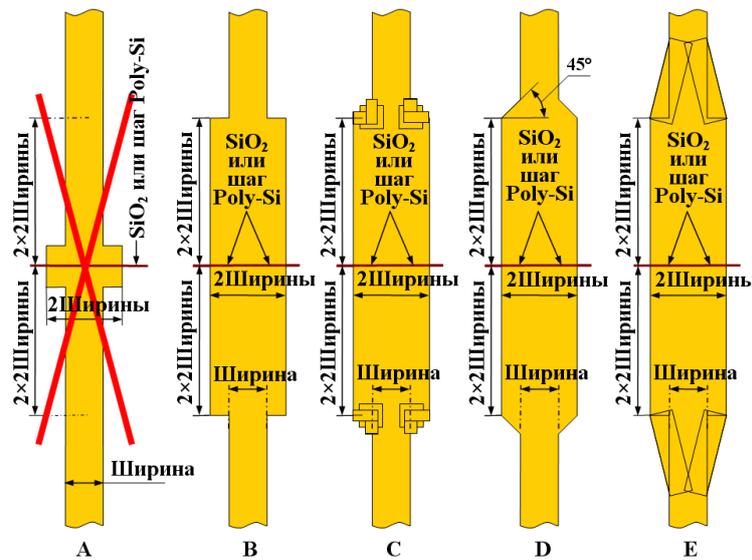


Рис. 9. Пример топологии различных схем расширения проводника на ступеньках оксида или поликремния для подавления эффекта ЭМ: А – недопустимое расширение проводника; В – допустимое расширение проводника; С – улучшенное допустимое расширение проводника; D – наиболее распространенное расширение проводника; Е – идеальное расширение проводника

Большинство правил проектирования определяют максимальный ток, допустимый для протекания через КО и ПО, и устанавливают величину тока, который может протекать через проводник такой же ширины, что и размер КО и ПО. Следуя этому принципу, ПО шириной 1 мкм могут проводить ток такой же силы, что и проводник шириной 1 мкм или, как было указано ранее, 2.5 мкм. Заметим, что значения токов, приведённых в данном примере, являются типовыми и не обязательно должны распространяться на любой технологический процесс.

Чрезмерный ток также может служить причиной перегрева и последующих отказов проволочек, соединяющих контактные площадки кристалла с траверсами (рамкой) корпуса. Если предполагаемый ток превышает пределы, установленные правилами проектирования, то проект требует применения проволочек большего диаметра или параллельного мультиплицирования несколькими проволочками при сварке одного траверса корпуса с одной контактной площадкой кристалла [2]. В общем случае плотность тока  $J$  определяется как частное от деления силы тока  $I$  и площади поперечного сечения проводника  $S$ :

$$J = \frac{I}{S}. \quad (3)$$

Конструкция топологии ИС оказывает существенное влияние на проявление эффекта ЭМ по всему кристаллу. Особое внимание разработчиков топологии ИС заслуживает проблема трассировки сигналов проводниками с изменением направления не только в вертикальном, но и горизонтальном направлении. Очевидно, что в топологии любое изменение направления проводников с поворотом на  $90^\circ$  на коротком участке поворота приводит к локальному увеличению плотности протекающего тока, как показано на рис. 10 [11].

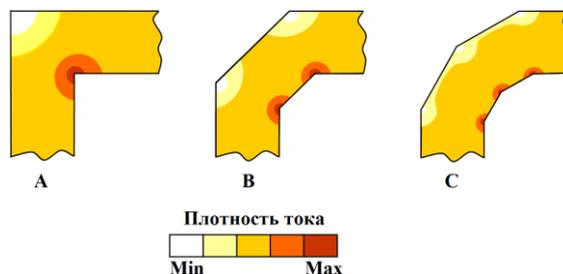


Рис. 10. Визуализация плотности тока при различных изгибах внутренних углов проводников ИС: А – изгиб угла  $90^\circ$ ; В – изгиб угла  $135^\circ$ ; С – изгиб угла  $150^\circ$

Из рис. 10 видно, что самая высокая плотность тока и, следовательно, вероятность разрушения проводника воздействием эффекта ЭМ возникает при использовании топологии с углом поворота  $90^\circ$  (рис. 10А). Поэтому для увеличения срока службы слоя металлизированной разводки разработчик топологии должен более внимательно относиться к выбору стратегии трассировки проводников при изменении направления распространения сигналов.

### 3. Эффект антенны

Одной из важнейших операций современных технологических процессов изготовления ИС в области «глубокого субмикрона» (Deep SubMicron, DSM) является операция сухого травления. Сухое травление, или плазмохимическое травление (ПХТ), представляет собой операцию удаления плёнки материала путем воздействия на материал бомбардировкой ионов, которые вытесняют фрагменты материала с открытой поверхности. Чаще всего ПХТ использует плазму реакционноспособных газов, таких как фторуглерод, кислород, хлор, трихлорид бора, иногда с добавлением азота, аргона и гелия. Процесс ПХТ является анизотропным и мало влияет на изменение геометрии рисунка материала [2].

Установлено, что в процессе планарного ПХТ на поверхности пластины осаждаются заряды. Поэтому любой обнаженный проводник может аккумулировать электрический заряд. Этот заряд при достижении определённого значения может повредить тонкий диэлектрик, расположенный под проводником уже на этапе изготовления. Этот механизм отказа называется механизмом разрушения, вызванного процессом ПХТ (Process plasma-induced damage). В профессиональном сообществе разработчиков ИС этот эффект принято называть эффектом антенны (Antenna Effect, AE). Разрушения, вызванные этим эффектом, могут увеличить утечку через оксид затвора MOS-транзистора в статическом режиме, изменить его пороговое напряжение или сократить срок службы транзистора [12].

#### 3.1. Механизм действия

Точный источник электрических зарядов, отвечающий за возникновение эффекта антенны, окончательно не установлен и остаётся предметом дискуссии. Плазма сама по себе состоит из равного количества положительно и отрицательно заряженных частиц. Однако различные механизмы могут вызывать локальные флуктуации плотности заряда внутри плазмы.

Чаще всего причины этих флуктуаций объясняются:

- отклонениями однородности конструкции реактора;
- АС-активацией плазмы, или эффектом «электронного затемнения» (Electron shading), в котором смежные геометрические фигуры блокируют изотропный поток электронов в большей степени, чем они блокируют анизотропный поток ионов.

Тем не менее, независимо от того, какой именно механизм вовлечён в процесс аккумуляции зарядов на проводники, опыт показывает, что как ПХТ слоёв проводников, так и последующее озоление фоторезиста (ashing – сжигание, удаление фоторезиста в кислородной плазме) могут служить причинами разрушений, вызываемых ПХТ (plasma-induced damages).

Рис. 11 позволяет понять механизм накопления заряда на поверхности проводника.

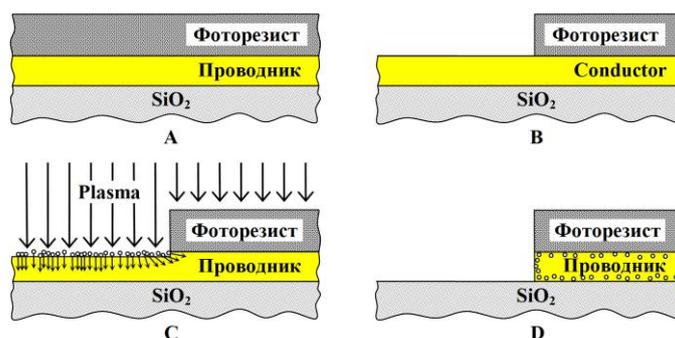


Рис. 11. Механизм накопления заряда на поверхности проводника: А – Нанесение защитного слоя; В – Формирование рисунка в защитном слое; С – Начало ПХТ. Концентрация зарядов на открытой поверхности проводника; D – Перераспределение зарядов на сформированные проводники

Так как в современных технологических процессах изготовления ИС в травление всех проводящих слоёв вовлечена операция ПХТ, то воздействие эффекта антенны должно быть оценено для каждого из этих слоёв и соответствующие ограничения внесены в правила проектирования.

Чаще всего наиболее тонким диэлектриком, разделяющим проводящие слои в современных CMOS-процессах изготовления ИС, является оксид поликремниевого затвора MOS-транзистора (MOS transistor poly gate oxide). Поэтому, как правило, при формировании правил антенны основное внимание уделяется ограничениям создания рисунка топологии первого уровня поликремния. Так как первый уровень поликремния является проводящим слоем, то эффект антенны может служить источником разрушения затворного диэлектрика уже на этапе формирования рисунка топологии затвора и удаления фоторезиста методом озоления.

Во время начальных стадий травления поликремниевого затвора вся поверхность пластины (wafer) закрыта непрерывной плёнкой поликремния. Заряд попадает на эту плёнку через все открытые поверхности в фоторезисте (рис. 11В). Флуктуации заряда, отвечающие за возникновение эффекта антенны, после окончания ПХТ перераспределяются на изолированные участки вдоль направлений поперечных сечений поликремниевого примитива. В процессе ПХТ отдельные участки поликремния частично открываются под воздействием плазмы (рис. 11С). Каждая геометрическая фигура теперь приобретает заряд вокруг своей периферии, где поликремний открывается воздействию плазмы. Этот заряд инжектируется в тонкий затворный окисел (рис. 11D). Следовательно, уязвимость данной геометрической фигуры к эффекту антенны зависит от отношения общего периметра примитива затвора к активной площади на тонком оксиде (площади канала). Это соотношение называется периферическим коэффициентом антенны (Peripheral Antenna Ratio, PAR). Чем больше величина PAR, тем больше риск разрушения, вызванного эффектом антенны. Поэтому большинство технологических процессов обязательно регламентируют значение PAR для поликремния. Стандартное значение PAR для CMOS-процесса для 180 нм обычно составляет  $100 \text{ мкм}^{-1}$ .

Во время завершающей стадии озоления фоторезиста вся поверхность поликремния становится открытой для плазмы. Теперь каждая геометрическая фигура аккумулирует заряд на всю поверхность вскрытых поликремниевых затворов. Этот заряд воздействует на тонкий затворный оксид. Так как заряд распределяется более или менее равномерно по всей поверхности затвора, уязвимость подзатворного оксида к эффекту антенны будет определяться отношением площади каждого поликремниевго примитива, образующего затвор, к площади его тонкого подзатворного оксида, которая формирует область канала. Это соотношение называется коэффициентом антенны площадей (Areal Antenna Ratio, AAR). Чем больше величина AAR, тем больше риск разрушений, вызываемых ПХТ. Большинство технологических процессов для поликремния определяют величину AAR. Обычно фабрики-изготовители для CMOS-процесса для 180 нм устанавливают значение AAR, равное 500 [2].

Так как размеры затворов MOS-транзисторов ограничены другими правилами проектирования и, как правило, невелики, то отказы, вызванные эффектом антенны непосредственно в процессе формирования поликремния, возникают крайне редко. Большую опасность для затворов MOS-транзисторов представляет накопление заряда на проводниках, соединяющих затворы с другими элементами схемы (рис. 12), и его передача на затвор, так как длина этих проводников неизвестна и может превышать линейные размеры кристалла.

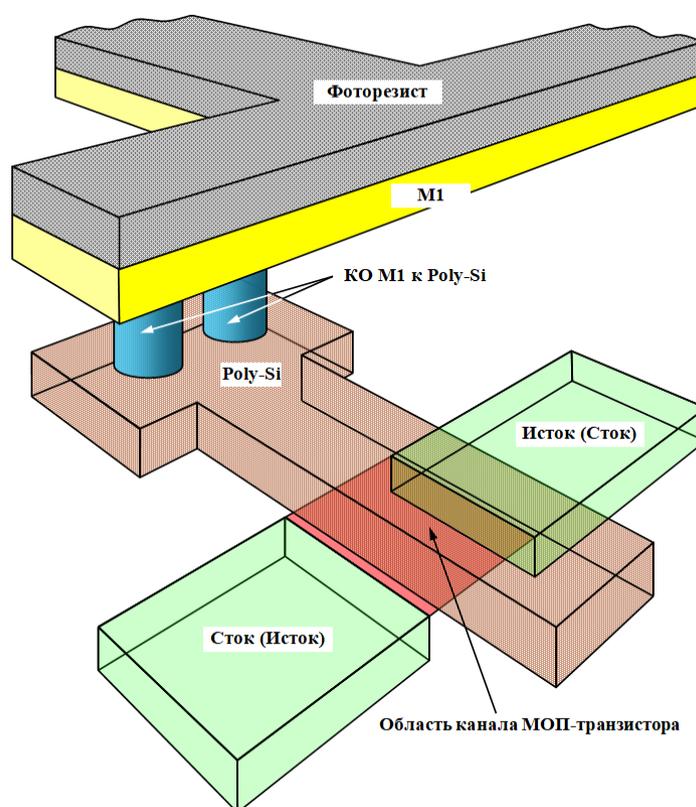


Рис. 12. Схема MOS-транзистора и формирования узла Metal-1/Poli-Si

Любой проводящий слой трассировки ИС подвержен воздействию эффекта антенны во время плазмохимического травления и озоления, так что для каждого из них определяются свои собственные коэффициенты антенны: периферический (PAR) и соотношения площадей (AAR). В качестве примера рассмотрим случай формирования низкоомного слоя второго уровня трассировки M2. В конце процесса травления отдельные геометрические фигуры в слое M2 становятся отделёнными одна от другой. Однако эти геометрические фигуры могут быть соединены вместе через нижние проводящие слои, тем самым образуя единый электрический узел. В этом случае эффект антенны не может оцениваться на основе последовательного контроля одной геометрической фигуры за другой. Вместо этого необходимо контролировать набор электрически соединённых геометрических фигур, образующих отдельные уз-

лы. В процессе травления слоя M2 каждый узел собирает заряд пропорционально периферийной поверхности слоя, открытого для плазмы, и инжектирует этот заряд вплоть до геометрических примитивов активных поликремниевых затворов, формирующих часть узла. Поэтому PAR слоя M2 узла равняется общему периметру узла в слое M2, поделенного на активную площадь геометрического примитива поликремниевого затвора в узле (общая площадь поликремниевых затворов, подсоединённых к узлу). Аналогично эволюция отказов, вызванных процессом озоления, зависит от величины AAR слоя M2 [13, 14].

Все сигналы, поступающие на затворы MOS-транзисторов, передаются по проводникам на разных уровнях металлизации. Поэтому в правилах проектирования устанавливаются ограничения, связанные с поражением затворного оксида, вызванного эффектом антенны для каждого уровня металлизации. В правилах проектирования правила антенны (Antenna Rules) описываются ограничением величины  $AR_n$ . Правило антенны для  $n$ -го слоя металлизации  $AR_n$  показывает, во сколько раз открытая текущим процессом травления площадь поверхности узла проводящего слоя, подсоединённого к затвору, может быть больше площади тонкого оксида затвора. Наличие соединения расчётного узла с P-(N-)-переходом (диодом) снимает ограничение со всех последующих слоёв, соединённых с этим узлом.

$$AR_n = S_A / S_{TG} , \quad (4)$$

где  $S_A$  – площадь антенны (площадь боковой поверхности узла, подсоединённого к затвору),  $S_{TG}$  – топологическая площадь канала.

$$S_A = P_1 \cdot H_1 + P_2 \cdot H_2 + \dots + P_n \cdot H_n , \quad (5)$$

где  $P$  – периметр проводящего слоя антенны,  $H$  – толщина проводящего слоя антенны,  $n$  – номер проводящего слоя.

$$S_{TG} = W_i \cdot L_i , \quad (6)$$

где  $W$  – топологическая ширина канала,  $L$  – топологическая длина канала,  $i$  – порядковый номер узла.

Несмотря на то, что на исследования взаимосвязи между влиянием эффекта антенны на отказы, связанные с разрушением затворного оксида, было затрачено множество усилий, до сих пор полного понимания этой проблемы не существует. Отдельные исследования находят доказательства того, что PMOS затворные оксиды значительно более чувствительны к механизму разрушения, вызванного технологическим процессом ПХТ (Process plasma-induced damage), чем NMOS затворные оксиды. Поэтому некоторые технологические процессы определяют отдельно антенные коэффициенты для каждого типа оксида. Другие исследования показали, в других исследованиях было показано, что вероятность разрушений изолирующего оксида, вызванных процессом ПХТ, может быть существенно уменьшена ограничением тока, протекающего через какую-либо область затворного оксида [15]. Результаты этих исследований открывают дополнительные возможности поиска конструктивно-технологических способов подавления эффекта антенны.

Строго говоря, любой оксид может быть подвержен воздействию эффекта антенны, в том числе полевой, межслойный, LOCOS, STI и т.д. Другое дело, что значения пробивных напряжений этих оксидов многократно превышают величины возможных накоплений зарядов, способных привести к разрушению этих оксидов. Поэтому ограничения, необходимые для защиты этих оксидов от воздействия эффекта антенны, в настоящее время не регламентируются.

В современных технологических процессах изготовления ИС существуют рабочие приборы, которые требуют формирования тонкого оксида не менее уязвимого к воздействию эффекта антенны, чем затворный оксид MOS транзисторов, например, конденсаторы «металл – металл» (Metal-insulator-Metal, MiM). В данном конденсаторе между любыми двумя слоями металлизации может быть внедрен дополнительный слой металла верхней обкладки СТМ (Capacitor Top Metal). Структура такого конденсатора показана на рис. 13.

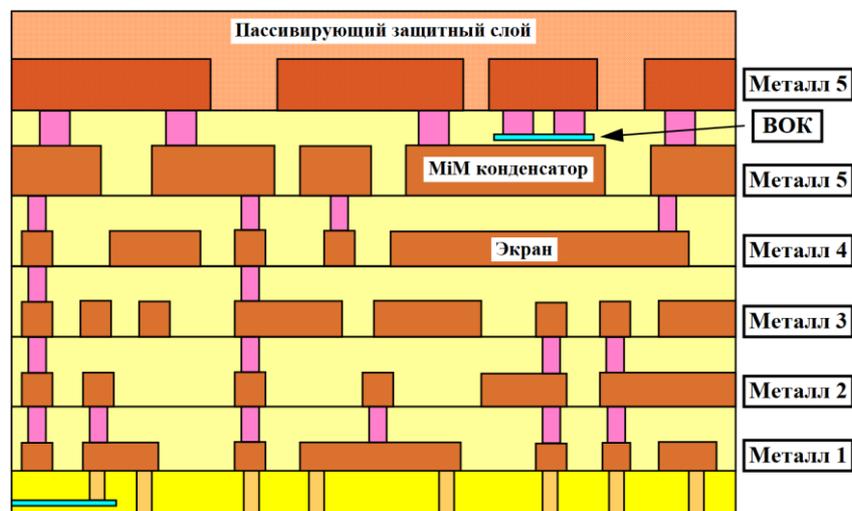


Рис. 13. Эскиз структуры MiM-конденсатора между шестым и пятым уровнями металлизации

### 3.2. Методы противодействия отказам ИС, вызванным воздействием эффекта антенны

Ограничения правил проектирования, установленные для противодействия эффекту антенны, регламентируются правилами антенны. Любая фигура топологии или узел проводящего слоя контролируются и в случае несоответствия требованиям должны быть переработаны. Конкретные схемотопологические методы, которые используются, зависят от конкретного слоя. В настоящее время для уменьшения воздействия эффекта антенны на разрушение подзатворного диэлектрика во время формирования рисунка поликремния используют два способа [16]:

1. Уменьшение величины отношения площади затвора к площади канала MOS-транзистора до значений AAR, разрешённых правилами проектирования, за счёт увеличения длины канала, ширины канала или длины и ширины канала одновременно (рис. 14А). Такие изменения могут привести к уменьшению крутизны MOS-транзисторов и увеличению паразитной ёмкости узла, которые требуют обязательной оценки их влияния на функционирование ИС и точно снижают её надёжность и долговечность.

2. Уменьшение величины отношения площади затвора к площади канала MOS-транзистора до значений AAR, разрешённых правилами проектирования, за счёт уменьшения площади затвора путём введения перехода в слой M1 (рис. 14В). Такое изменение может привести к увеличению паразитного сопротивления узла для поступающего полезного сигнала, поэтому необходима обязательная оценка их влияния на функционирование ИС. Кроме того, разработчик топологии должен учитывать тот факт, что рост количества связей в ИС также снижает её надёжность и долговечность.

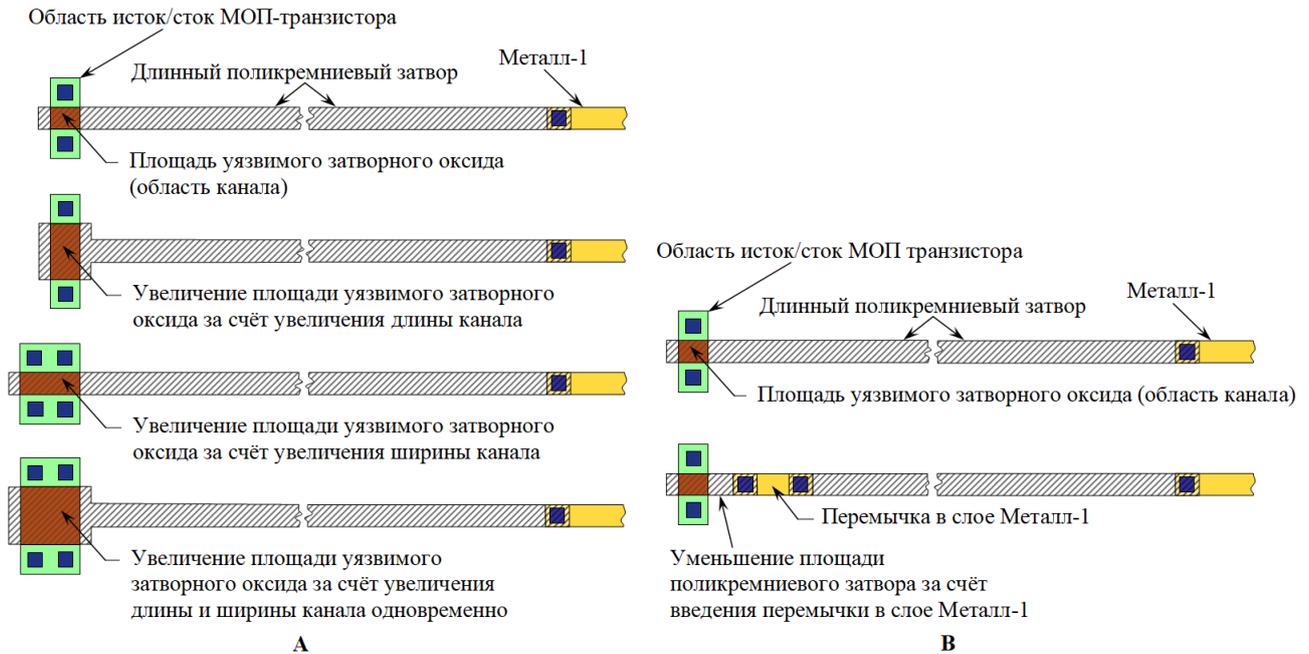


Рис. 14. Механизмы подавления эффекта антенны во время формирования рисунка затворного поликремния: А – Уменьшение величины отношения площади затвора к площади канала MOS-транзистора за счёт увеличения длины канала, ширины канала или длины и ширины канала одновременно; В – Уменьшение величины отношения площади затвора к площади канала MOS-транзистора за счёт уменьшения площади затвора путём введения перехода в слой М1

В любом случае большинство внутренних сигналов ИС формируются на стоках/истоках MOS-транзисторов. Для технологических процессов, в которых применяются затворные оксиды толщиной более 400 Å, исток/стоковые переходы MOS-транзисторов, как правило, переходят в состояние лавинного пробоя раньше, чем могут разрушиться затворные оксиды. В этом случае исток/стоковые области выполняют функцию сточного диода антенны [15]. Такие узлы при вычислении коэффициентов антенны в целом могут быть игнорированы. Однако если узел металла определяется как узел с чрезмерным значением коэффициента антенны и в нем отсутствует соединение с исток/стоковыми областями, то проблема может быть устранена одним из двух способов: размещением перемычки (jumper) на более высокий уровень металлизации или подсоединением структуры, называемой сточный диод антенны (leaker antenna diode). В зависимости от конкретных топологических возможностей сточные диоды могут быть двух типов: NSD/P-epi и PSD/N-well (рис. 15). Вследствие более высокой подвижности электронов по сравнению с дырками для тонкооксидных технологических процессов более предпочтительным является использование сточного диода NSD/P-epi. В сущности, структура представляет собой P-N-переход, образующий диод, чей анод соединён с узлом в первом уровне металлизации, а катод – с подложкой. Если напряжение на узле падает ниже потенциала подложки, то сточный диод антенны NSD/P-epi смещается в прямом направлении и потенциал узла шунтируется на подложку. Если напряжение на узле поднимается выше потенциала подложки, то сточный диод антенны NSD/P-epi переходит в состояние лавинного пробоя раньше, чем наступают разрушения затворного оксида [2].

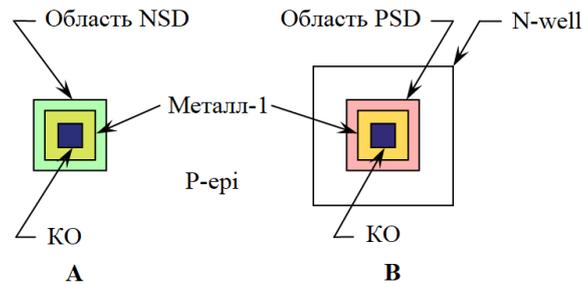


Рис. 15. Сточные диоды антенны: А – сточный диод NSD/P-epi; В – сточный диод PSD/N-well

Более проблематичным представляется использование сточных диодов антенны в технологических процессах, использующих более тонкие оксиды. Лавинный пробой перехода NSD/P-epi не может полноценно защитить затворный оксид тоньше 400 Å. Исследования и последующие испытания показали, что узлы в технологических процессах, использующих более тонкие оксиды, могут быть защищены совместным применением сточных диодов антенны NSD/P-epi и PSD/N-well, как показано на рис. 16 [12]. Такая защита аналогична элементу входной защиты от пробоя ESD (ElectroStatic Discharge) [17]. Переход NSD/P-epi сточного диода смещается в прямом направлении, если потенциал узла падает ниже потенциала подложки P-epi, а переход PSD/N-well сточного диода – если потенциал узла возрастает выше потенциала N-well.

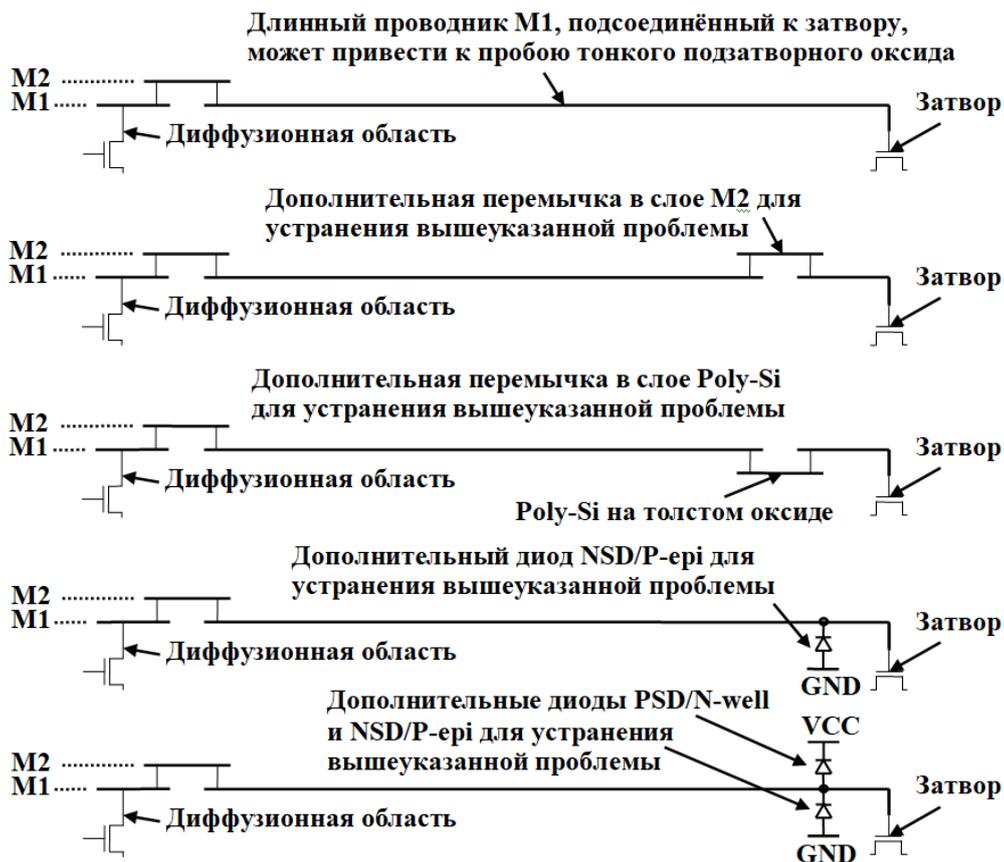


Рис. 16. Схематичное представление нарушения правила антенны и способов его устранения

Переходы сточных диодов антенны NSD/P-epi и PSD/N-well в рабочем режиме ИС смещены в обратном направлении и поэтому не нарушают нормальное функционирование схемы. Однако разработчик должен учитывать, что наличие этих диодов вносит дополнительную паразитную ёмкость P-N-переходов, подсоединённую к узлу, которая изменяет динамические характеристики переходного процесса переключения узла.

Кроме того, во время нормальной работы схемы обратно смещённый переход N-well/P-epi также предотвращает ток утечки через эту структуру. Во время операции ПХТ плазма плазменного процесса освещает поверхность пластины. Это освещение поддерживает фотогенерацию носителей зарядов в области обеднения перехода N-well/P-epi, вызывая его утечку. Данная утечка способствует рассасыванию инжектированного заряда в N-well. Для того чтобы сточный диод N-well/P-epi функционировал должным образом, по крайней мере часть его периферии не должна перекрываться металлом на расстоянии 5–10 мкм от границы рисунка N-well. При каждом введении сточных диодов антенны обязательным требованием является уведомление схемотехника о конструктивном изменении схемы, чтобы он имел возможность оценить влияние этого изменения на функционирование схемы. В большинстве случаев сточные диоды антенны не оказывают влияния на работу схемы, однако данное утверждение, как правило, не распространяется на аналоговые схемы [2].

Для схем, требующих хорошего согласования, таких как аналоговые схемы или схемы, содержащие элементы памяти, для защиты от нарушений затворного оксида, которые могут внести рассогласование, затворы транзисторов должны быть защищены непосредственным соединением к диффузионным областям с коротким сегментом в слое M1.

В заключение заметим, что описанная проблема влияния эффекта антенны на оксид поликремниевого затвора, как и методы противодействия этому влиянию, в равной степени относятся к изолирующему оксиду рабочих MiM-конденсаторов, встроенных в многослойную систему трассировки (рис. 13).

Данная статья является третьей частью продолжения цикла материалов по теме «Отказы ИС». Ранее первая часть задуманного цикла «Отказы интегральных схем, вызванные пробоем диэлектрика» была опубликована в журнале «Вестник СибГУТИ», Том 17, № 2, 2023 г., вторая часть «Отказы интегральных схем, вызванные эффектами распространения зарядов и образования паразитных каналов» – в журнале «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника», выпуск 1 (193).

## Литература

1. *Fiks V. B.* On the mechanism of the mobility of ions in metals // Soviet Physics: Solid State, 1959. V. 1, № 1. P. 14–28.
2. *Hastings Alan.* The Art of ANALOG LAYOUT. New Jersey. Pearson Prentice Hall, 2006. 648 p.
3. *Huntington H. B., Grone A. R.* Current-induced marker motion in gold wires // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 1961. V. 20. P. 76–87.
4. *Verbruggen A. H.* Fundamental questions in the theory of electromigration // IBM Journal of Research and Development. 1988. № 32. P. 93–98.
5. *Tan C. M., Arijit R.* Electromigration in ULSI Interconnection // Materials Science and Engineering. Elsevier. 2007. Is. 58. P. 1–75.
6. *Tao J., Young K. K., Cheung N. W., Hu C.* Comparison of Electromigration Reliability of Tungsten and Aluminum Vias Under DC and Time-Varying Current Stressing // Proc. International Reliability Physics Symposium, 1992. V. 14, № 4. P. 338–343.
7. *Ames I., d'Heurle F. M., Horstmann R. E.* Reduction of Electromigration in Aluminium Film by Copper Doping // IBM Journal of Research and Development. 1970. V.14, № 4. P. 461–463.
8. *Iyer S. S., Ting Ch. Y.* Electromigration Study of Al-Cu/Ti/Al-Cu System // Proc. International Reliability Physics Symposium, 1984. P. 273–278.
9. *Lloyd J. R., Smith P. M.* The Effect of Passivation on the Electromigration Lifetime of Al/Cu Thin Film Conductors // Journal of Vacuum Science Technology A. 1983. V. 1, № 2. P. 455–458.

10. *Chen J. Z., Amerasekera A., Duvvury Ch.* Design Methodology for Optimizing Gate Driven ESD Protection Circuits in Submicron CMOS Processes // Proc. EOS/ESD Symposium, 1997. P. 1–10.
11. *Lienig J, Thiele M.* Fundamentals of Electromigration-Aware Integrated Circuit Design. SpringerLink, 2018. 159 p.
12. *Weste N. H. W., Harris D. M.* CMOS VLSI Design: A Circuits and Systems Perspective. 4nd Ed. Boston: Addison-Wesley, Pearson Education, Inc., 2011. 838 p.
13. *Gabriel C. T.* Gate Oxide Damage: A Brief History and a Look Ahead // Proc. 6<sup>th</sup> International Symposium on Plasma Process-Induced Damage, 2001. P. 20–24.
14. *Watanabe T., Yoshida Y.* Dielectric Break-down of Gate Insulator Due to Reactive Ion Etching // Solid State Technology. 1984. V. 27, № 44. P. 263–266.
15. *Mocuta A. C., Hook T. B., Chou A. I., Wagner T., Stamper A. K., Khare M., Gambino J. P.* Plasma Charging Damage in SOI Technology // Proc. 6<sup>th</sup> International Symposium on Plasma Process-Induced Damage, 2001. P. 104–107.
16. *Simon P., Luchies J.-M., Maly W.* Antenna Ratio Definition for VLSI Circuits // Proc. 4<sup>th</sup> International Symposium on Plasma Process-Induced Damage, 1999. P. 16–20.
17. *Baker R. Jacob.* CMOS: Circuit Design, Layout, and Simulation. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2011. 1208 p.

### **Шубин Владимир Владимирович**

к.т.н., доцент кафедры технической электроники СибГУТИ;  
начальник отдела по разработке аналоговых ИМС АО «НЗПП Восток» (630082, Новосибирск, ул. Дачная, 60), e-mail: shubin@nzpp.ru, ORCID ID: 0000-0002-2974-0497.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

*Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.*

## **Integrated Circuits Failures Caused by Electromigration and Antenna Effects**

Vladimir V. Shubin

Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS)

*Abstract:* The paper describes some problems of operation failures of integrated circuits (ICs) and corresponding preventative measures at the early stages of design process. The issues related to the problems of IC failures caused by electromigration and antenna effect are considered, generalized and systematized. Some examples that can be used in practice when developing ICs to improve their reliability taking into account current trends in the microelectronics fields are presented.

*Keywords:* electromigration, antenna effect.

*For citation:* Shubin V. V. Integrated Circuits Failures Caused by Electromigration and Antenna Effects (in Russian). *Vestnik SibGUTI*, 2024, vol. 18, no. 3, pp. 57-72.  
<https://doi.org/10.55648/1998-6920-2024-18-3-57-72>.



Content is available under the license  
Creative Commons Attribution 4.0  
License

© Shubin V. V., 2024

The article was submitted: 10.07.2023;  
revised version: 16.02.2024;  
accepted for publication 12.03.2024.

## References

1. Fiks V. B. On the mechanism of the mobility of ions in metals. *Soviet Physics: Solid State*, 1959, vol. 1, no. 1, pp. 14-28.
2. Hastings Alan. *The Art of ANALOG LAYOUT*. New Jersey, Pearson Prentice Hall, 2006. 648 p.
3. Huntington H. B., Grone A. R. Current-induced marker motion in gold wires. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1961, vol. 20, pp. 76-87.
4. Verbruggen A. H. Fundamental questions in the theory of electromigration. *IBM Journal of. Research and Development*, 1988, no. 32, pp. 93-98.
5. Tan C. M., Roy Arijit. *Electromigration in ULSI Interconnection*. Materials Science and Engineering. Elsevier, 2007, iss. 58, pp. 1-75.
6. Tao J., Young K. K., Cheung N. W., Hu C. Comparison of Electromigration Reliability of Tungsten and Aluminum Vias Under DC and Time-Varying Current Stressing. *Proc. International Reliability Physics Symposium*, 1992, vol. 14, no. 4, pp. 338-343.
7. Ames I., d'Heurle F. M., Horstmann R. E. Reduction of Electromigration in Aluminium Film by Copper Doping. *IBM Journal of. Research and Development*, 1970, vol.14, no. 4, pp. 461-463.
8. Iyer S. S., Ting Ch. Y. Electromigration Study of Al-Cu/Ti/Al-Cu System. *Proc. International Reliability Physics Symposium*, 1984, pp. 273-278.
9. Lloyd J. R., Smith P. M. The Effect of Passivation on the Electromigration Lifetime of Al/Cu Thin Film Conductors. *Journal of Vacuum Science Technology A*, 1983, vol. 1, no. 2, pp. 455-458.
10. Chen J. Z., Amerasekera A., Duvvury Ch. Design Methodology for Optimizing Gate Driven ESD Protection Circuits in Submicron CMOS Processes. *Proc. EOS/ESD Symposium*, 1997, pp. 1-10.
11. Lienig J, Thiele M. *Fundamentals of Electromigration-Aware Integrated Circuit Design*. 1st Ed. SpringerLink, 2018, 159 p.
12. Weste, N. H. W., Harris D. M. *CMOS VLSI Design: A Circuits and Systems Perspective*. 4nd Ed. Boston. Addison-Wesley, Pearson Education, Inc., 2011, 838 p.
13. Gabriel C. T. Gate Oxide Damage: A Brief History and a Look Ahead. *Proceedings 6<sup>th</sup> International Symposium on Plasma Process-Induced Damage*, 2001, pp. 20-24.
14. Watanabe T., Yoshida Y. Dielectric Break-down of Gate Insulator Due to Reactive Ion Etching *Solid State Technology*, 1984, vol. 27, no. 44, pp. 263-266.
15. Mocuta A. C., Hook T. B., Chou A. I., Wagner T., Stamper A. K., Khare M., Gambino J. P. Plasma Charging Damage in SOI Technology. *Proceedings 6<sup>th</sup> International Symposium on Plasma Process-Induced Damage*, 2001, pp. 104-107.
16. Simon P., Luchies J.-M., Maly W. Antenna Ratio Definition for VLSI Circuits. *Proc. 4<sup>th</sup> International Symposium on Plasma Process-Induced Damage*, 1999, pp. 16-20.
17. Baker R. Jacob. *CMOS: Circuit Design, Layout, and Simulation*. 3nd Ed. New Jersey, John Wiley & Sons Inc., 2011, 1208 p.

### Vladimir V. Shubin

Cand. of Sci. (Engineering), assistant professor of the Department of Technical Electronics of SibSUTIS, Head of the Development of analog ICs of JSC "NZPP Vostok department" (630082, Novosibirsk, Dachnaya str., 60), e-mail: shubin@nzpp.ru, ORCID ID: 0000-0002-2974-0497.