

МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЁНКАХ

© 2010 К. Н. Тукмаков, А. В. Архипов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Проанализированы причины отказов коммутационной структуры электронных приборов на основе тонких металлических плёнок. Электродиффузионные процессы выявлены как основополагающий фактор, приводящий к отказу тонкоплёночной алюминиевой металлизации. Проанализирован механизм электродиффузионной деградации металлизации на основе алюминиевой плёнки. Проведён анализ методов повышения электродиффузионной надёжности металлизации. Разработана модель электродиффузионных процессов на основе клеточного автомата, позволяющая моделировать процесс развития дефектов в тонкой плёнке под действием тока высокой плотности и на основании этого оценить время наработки на отказ тонкоплёночных проводников.

Интегральная микросхема, металлизация, надёжность, электродиффузия, границы зёрен, клеточный автомат, модель.

Анализ причин отказов сильноточных ИМС

В связи с широким применением технологий субмикронного уровня становятся всё более актуальными вопросы электродиффузионной надёжности элементов коммутационных структур интегральных микросхем (ИМС). С уменьшением площади сечения тонкоплёночных проводников увеличивается доля отказов ИМС, вызванных локальным разрушением сильноточных коммутационных структур. Для современных ИМС элементы коммутационной структуры вносят свой вклад в общую надёжность ИМС как равноправные пассивные элементы.

Если проанализировать отказы плёночных структур в интегральных микросхемах [1], то видно, что значительная часть отказов связана непосредственно с самой технологией изготовления плёнок. Совершенствование технологии на каждой стадии изготовления схемы может исключить часть отказов, связанных, например, с плохой адгезией или загрязнением подложки, но существуют отказы, обусловленные проявлением в процессе эксплуатации микросхем ряда физических явлений. Это различные виды диффузии и другого проявления переноса

массы, стимулированного внешними воздействиями (электродиффузия, термодиффузия), и самодиффузия. Эти причины отказов принципиально не могут быть полностью устранены совершенствованием технологии получения плёнок. Хотя всё же некоторыми технологическими приёмами можно уменьшить скорость деградации. Это возможно лишь в результате глубокого анализа физических явлений, лежащих в основе процессов деградации и выбора или разработки специальных тонкоплёночных проводников и контактных площадок.

Электродиффузия – одна из основных причин отказа сильноточной металлизации

Интенсивность отказов сильноточной металлизации определяется не только термическим перегревом и плавлением металла вследствие протекания тока высокой плотности, но и рядом других факторов. К таковым в наибольшей степени относится электродиффузионный перенос массы (ЭПМ) – процесс миграции ионов кристаллической решётки под действием тока большой плотности, приводящий к уносу массы и образованию обширных дефектов в виде трещин, усов, раковин и так далее [2] (рис. 1). Интенсивность ЭПМ резко

возрастает с увеличением плотности тока и при $j > 5 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ (что характерно для многих современных цифровых ИМС и тем более для мощных аналоговых ИМС) начинает проявляться уже при комнатной температуре. Ситуация усугубляется самоусиливающимся характером данного процесса: унос массы приводит в некоторых случаях к локальному увеличению плотности тока, что увеличивает интенсивность электродиффузии.

Плотность тока – не единственный фактор, определяющий интенсивность ЭПМ [1]. На скорость этого процесса влияют и многие другие факторы: локальные перегревы проводников (вследствие наличия дефектов, близкого расположения элементов с большой рассеиваемой мощностью), структура плёнки проводника, рельеф и топология проводника, типы и плотность дефектов. Все эти факторы можно регулировать в некоторых пределах путём вариации параметров технологического процесса изготовления металлизации.

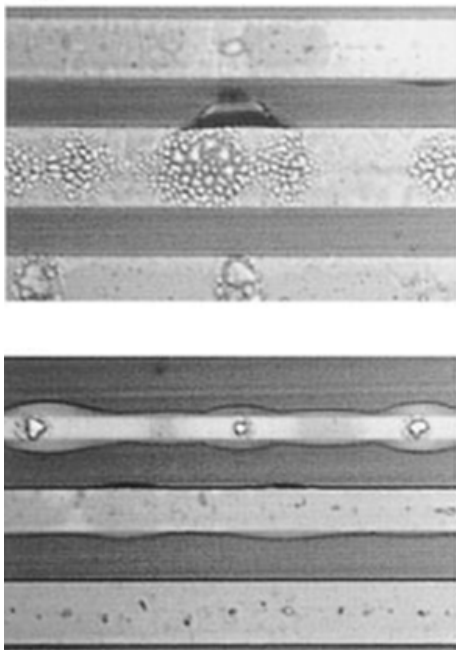


Рис. 1. Примеры повреждения металлизации вследствие протекания диффузионных процессов

Методы борьбы с негативным проявлением электродиффузии

Существует несколько возможных направлений увеличения надёжности ИМС по электродиффузионному механизму отказов:

- 1) схмотехническое – использование схмотехнических решений, уменьшающих нагрузку на проводящие структуры ИМС, уменьшение мощности, рассеиваемой элементами схемы. Для этого необходимо совершенствовать базу активных элементов ИМС, использовать элементы функциональной электроники, реализовывать современные эффективные приёмы обработки сигналов и т. д.;
- 2) конструкторское – при разработке топологии ИМС следует проводить анализ наиболее вероятных распределений температуры по подложке и выявлять участки резких изменений температур, локальных перегревов элементов и проводить анализ распределения плотности токов в системе коммутации. Для этого необходимо по возможности увеличивать площадь сечения коммутационных структур (использовать многослойную металлизацию), обособливать некоторые наиболее тепловыделяющие элементы и т. д.;
- 3) технологическое – создание такой структуры металлизации, которая при прочих равных условия обеспечивает меньшую интенсивность ЭПМ. Для этого необходимо уменьшать погонное сопротивление проводников, использовать альтернативные материалы и способы создания металлизации.

Приведённые направления – это активные методы, которые увеличивают надёжность коммутационной структуры. Их комплексное использование ведёт к дополнительным затратам и увеличивает сложность технологического процесса создания ИМС. Кроме того, их применение ограничено различными факторами, а именно: площадь сечения проводников ограничена размерами подложки, толщина проводников имеет технологические ограничения, не всегда возможна пассивация проводников оксидом, не всегда возможно применять многослойную металлизацию и

т. д. Наряду с этим возможно выявление потенциально опасных участков высокой интенсивности ЭПМ ещё на этапе разработки конструкции ИМС, что даёт возможность создания более надёжной по электродиффузионным отказам металлизации. Данный подход можно применить, если на основе теории электродиффузионных процессов создать модель ЭПМ в тонких пленках, учитывающую условия эксплуатации металлизации и методы её создания, которая позволит прогнозировать интенсивность ЭПМ и, таким образом, оценивать надёжность металлизации.

Разработка модели

Для оптимизации конструкторских параметров коммутационной системы ИМС с целью обеспечения электродиффузионной надёжности предлагается модель ЭПМ в тонких плёнках, которая позволит оценить время наработки на отказ тонкоплёночных проводников с учётом параметров технологического процесса изготовления металлизации и условий её эксплуатации. Применение этой модели для конкретной топологической конфигурации проводников и источников тепловыделения на подложке позволит выявить потенциально опасные участки проводников, где время наработки на отказ ниже заданного. Эта информация поможет устранить такие участки путём изменения конструкции электронного прибора или топологии коммутационной структуры ещё на этапе конструкторских работ и, таким образом, сократить время и стоимость разработки нового электронного прибора. Данный подход отличается от остальных рассмотренных выше путей повышения надёжности легкостью своей реализации в условиях промышленного производства микросхем. Например, решением может быть увеличение площади сечения металлизации для уменьшения плотности тока. Для большинства цепей ИМС это приемлемо: при габаритах сечения проводника $2 \times 0,2$ мкм значение протекающего тока не должно превышать 40 мА. Но для мощных аналоговых ИМС или микропроцессорных устройств увеличение сечения проводников цепей питания, как

правило, неприемлемо, так как коммутируемые ими токи достигают нескольких ампер [3]. Отсюда следует, что необходимо оценивать влияние на скорость разрушения таких макроскопических параметров, как ширина плёнки и градиент температур по длине проводника. Разрабатываемая модель должна быть универсальной с возможностью задания пространственной структуры проводника, т.е. должна носить алгоритмический характер.

Результатом моделирования должно стать время наработки на отказ для участка проводника. Для большинства реальных схем электродиффузионному разрушению наиболее подвержены цепи питания. Появление последовательного с общей нагрузкой ИМС дополнительного сопротивления вызовет снижение напряжения питания всей ИМС в целом и её отказ. Таким образом, за критерий отказа проводника можно принять достижение его сопротивлением некоторого критического для данной цепи уровня, который определяется схемотехническим анализом проектируемого электронного прибора.

Теоретические исследования позволяют говорить о том, что процессы электродиффузии протекают при любой температуре [2], а плотность тока является основным фактором движущей силы ЭПМ. Как показывают экспериментальные исследования, для подавляющего большинства современных ИМС, которые используют в качестве коммутационных структур, в основном, тонкие плёнки алюминия, негативный эффект ЭПМ в металлизации проявляется при плотностях тока более 5×10^6 А/см².

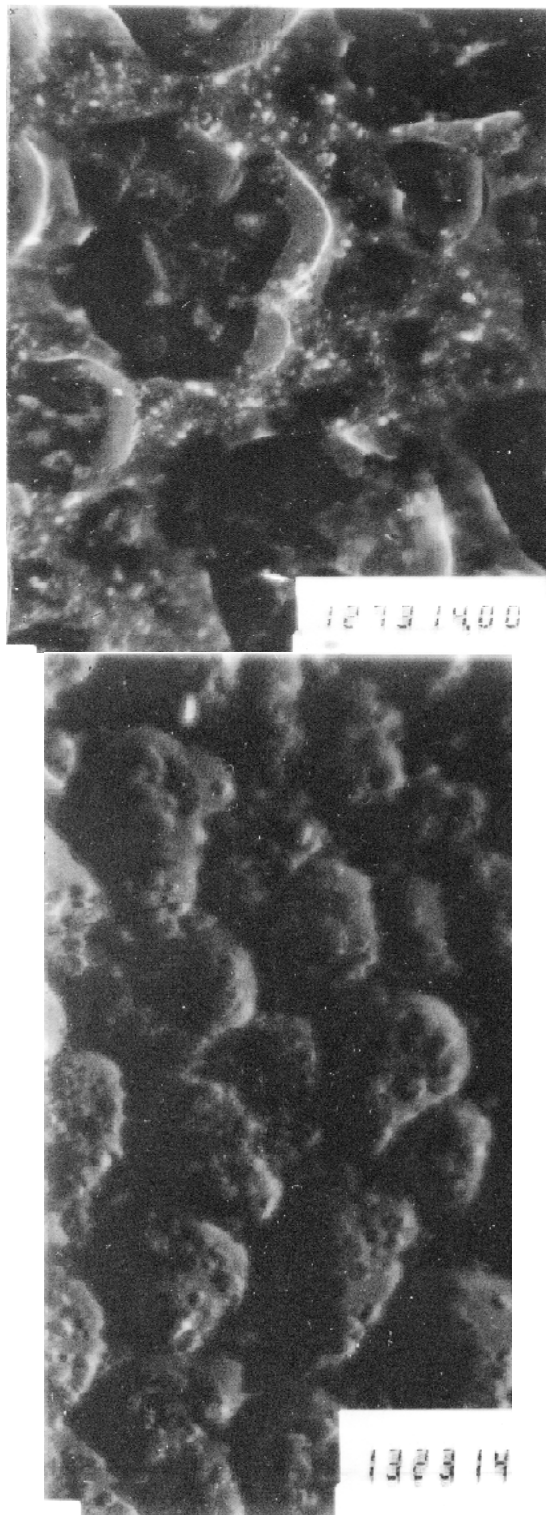
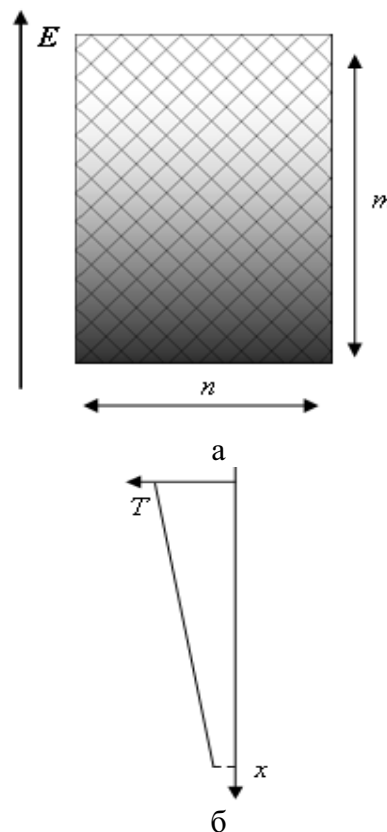


Рис. 2. Изображение границ зёрен тонкой плёнки алюминия

Особенностью ЭПМ в тонких поликристаллических плёнках является то, что основной поток массы проходит по границам зёрен (рис. 2) материала проводника [2]. Переносом массы внутри кристаллитов при эксплуатационных температурах можно пренебречь. Для

алюминиевой металлизации характерно наличие слоя оксида на поверхности плёнки, который пассивирует поверхностный перенос массы. Перенос массы по границе раздела подложка – плёнка в данной реализации модели не рассматривается ввиду невозможности учёта состава и структуры фазы границы раздела. Но, по литературным данным [1], этот вид переноса можно не рассматривать по причине малости вклада по сравнению с зернограничным переносом.

Поскольку моделируются процессы, протекающие в объектах с различной геометрической структурой, которая определяется топологией проводника, необходимо развивать подход, который в перспективе позволит учитывать влияние топологии проводника, типа границ зёрен, распределение крупных дефектов на протекание электродиффузионных процессов и, в конечном счёте, на надёжность такого проводника. В этом случае логично рассматривать тонкоплёночный проводник как совокупность элементарных ячеек, в каждой из которых рассматриваемые процессы протекают по некоторым правилам, относительно независимо друг от друга.



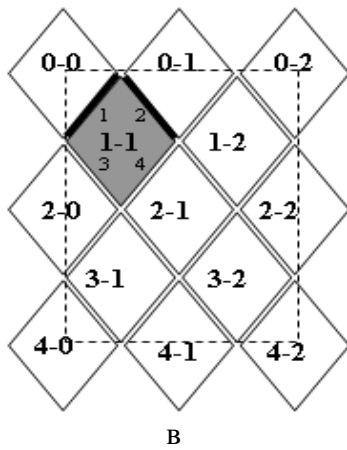


Рис. 3. Представление поля моделирования:
 а – градиентное представление
 распределения температуры;
 б – соответствующий профиль температур;
 в – представление кристаллитов

Таким образом, модель представляет собой систему ячеек (клеточный автомат, КА), отражающих реальную геометрическую конфигурацию проводника (рис. 3), каждая из которых связана с некоторой геометрической областью проводника, в пределах которой микроскопические параметры проводника считаются постоянными. Удобно рассматривать систему ячеек в двумерной плоскости (вид сверху на проводник), так как для наиболее распространённой в микроэлектронике алюминиевой металлизации объём ячейки всегда включает всю толщину плёнки (высота кристаллита в идеале равна толщине плёнки). Это обстоятельство справедливо для тонких плёнок алюминия толщиной 15 – 75 нм [5], и при этом угол разориентации кристаллитов не превышает 15° [5].

Для наиболее полного и точного описания процессов на границе зёрен необходимо уменьшать размеры элементарных ячеек модели. Для задания такой структуры в клеточном автомате, необходимо разбить исходный проводник на ячейки с помощью прямоугольной сетки подобно тому, как графическое изображение разбивается на пиксели. Причём размеры ячеек должны быть соизмеримы с шириной границ зёрен, что в некоторых случаях должно означать, что размеры ячеек составляют несколько межатомарных расстояний. Но размеры моделируемой системы должны обеспечивать рассмотрение процессов на макроуровне и оценивать

влияние таких макроскопических параметров как топология проводника и температурное поле подложки на интенсивность процессов. Поэтому оптимальным подходом будет представление ячейкой КА каждого кристаллита рассматриваемого участка плёнки. Но в этом случае картина границ зёрен должна быть регулярна на рассматриваемом участке проводника, что не соответствует действительности. Применяя данный подход мы пренебрегаем реальной геометрической структурой границ зёрен, но вместе с этим появляется возможность лучшего рассмотрения определяющего фактора – условия миграции ионов по границам зёрен. Этот подход и будем использовать в дальнейшем.

Каждая ячейка КА представляет собой ромб (рис. 4) с заданными длинами диагоналей. Совокупность ромбов образует «сетку» границ зёрен, которые и будут рассматриваться в процессе моделирования. Каждая ячейка КА должна обладать набором параметров, которые характеризуют состояние процессов в ней на некоторый момент времени (шаг моделирования). Процесс моделирования носит алгоритмический характер, то есть состояние моделируемой системы изменяется по некоторым правилам скачкообразно через некоторый шаг времени (в общем случае переменный). Таким образом, процесс моделирования представляет собой последовательную серию шагов, в которых происходит постепенное изменение параметров всех ячеек, то есть, время развития системы определяется номером шага. Отслеживание изменения некоторого параметра по шагам означает получение временной зависимости данного параметра. За информативный параметр модели принято совокупное электрическое сопротивление границ зёрен, изменение которого в процессе моделирования и даст прогноз времени наработки на отказ участка проводника.

Модель оперирует следующими параметрами.

- Внешние параметры системы:
 $U_{\text{полн}}$ – ЭДС на рассматриваемом участке цепи;

$R_{\text{полн}}$ – полное сопротивление участка цепи;

$n \times m$ – размеры поля моделирования (n задает ширину плёнки);

h – толщина плёнки;

$R_{\text{к}}$ – критическое сопротивление плёнки.

- Параметры ячейки (рис. 4):

$L_1 \times L_2$ – длина и ширина ячейки;

T – абсолютная температура подложки в области ячейки;

α – угол, образованный линиями E и кристаллографическим направлением $[100]$ данной ячейки.

- Параметры граней ячейки (рис. 4):

C_{a0} – концентрация вещества аморфной фазы на границе;

$C_{\text{ак}}$ – критическая концентрация вещества аморфной фазы;

E_{a0} – энергия активации ионов аморфной фазы;

E_{Γ} – энергия активации ионов на поверхности зерна;

δ – ширина грани;

Z_{eff} – эффективный заряд активированного иона.

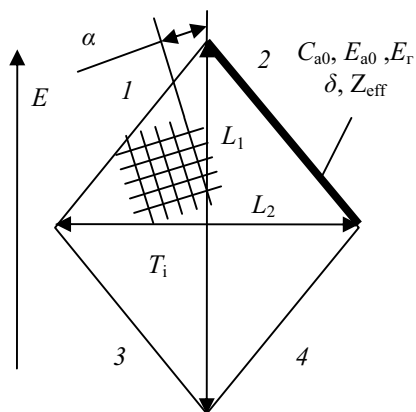


Рис. 4. Схематическое представление ячейки КА. Цифрами обозначены номера граней

Основной динамический фактор модели – поток свободных носителей зарядов (электронный ветер), который осуществляет теплоперенос по проводнику, активирование ионов кристаллической решетки и их миграцию в направлении своего движения (это справедливо для тонких пленок алюминия во всем эксплуатационном диапазоне температур кремниевых электронных приборов – $60 \div$

$+125 \text{ }^\circ\text{C}$ [2]). Параметры ячеек пересчитываются для каждого шага моделирования с учетом электронного ветра и параметров соседних ячеек. Временной шаг определяется параметрами электронного ветра и изменяется в процессе моделирования.

Плёночный проводник имеет поликристаллическую структуру с определённой картиной границ зёрен. Для отработанных технологических процессов получения тонких плёнок характерна повторяемость такого параметра, как средний размер зерна, форма границ зёрен и разброс угла разориентации кристаллитов (зернограничные дислокации кручения вокруг кристаллографической оси $[001]$) [5]. Логично предположить, что конкретная структура границ зёрен (ширина, углы разориентации, размеры зёрен, угол между границей кристаллита и направлением напряжённости электрического поля) является геометрической конфигурацией путей электродиффузионных потоков, и, в конечном счёте, оказывает влияние, по крайней мере, на скорость массопереноса.

Теория электродиффузии выделяет три основополагающих фактора, определяющих интенсивность ЭПМ.

1) Температура – каждая из ячеек может характеризоваться своей температурой. Электрический ток, протекающий по кристаллиту, вызывает выделение мощности, но из-за малого сопротивления кристаллита и высокой теплопроводности в подложку (в случае отсутствия дефектов отслоения) изменениями температуры вследствие нагрева электрическим током можно пренебречь. Таким образом, можно считать, что температура кристаллита определяется температурой подложки под ним, то есть задаётся исходным температурным профилем подложки.

2) Энергия активации для образования активированного, способного к перемещению иона. При этом рассматриваются только атомы, расположенные на границе зерна и неустойчивые атомы зернограничного объема, так как их энергия активации минимальна [1, 2].

3) Сила «электронного ветра», определяемая следующим выражением [1]:

$$F_i = Z_i E, \quad (1)$$

$$Z_i = (Z_0 - |e|nl\sigma_i) = Z_0 - |e| \frac{n}{N_0} \frac{\sigma_i}{\sigma}, \quad (2)$$

где Z_i – эффективный заряд активированного иона; Z_0 – заряд активированного иона решётки; e – заряд электрона; E – напряжённость электрического поля; n – концентрация электронов проводимости; l – длина свободного пробега электронов проводимости (для электронов вблизи поверхности Ферми); σ_i – транспортное сечение рассеяния иона для электронов; N_0 – концентрация атомов основного металла; $\bar{\sigma} = 1/N_0$ – среднее сечение рассеяния решетки.

Значение величины эффективного заряда иона для большинства металлов отрицательно. Таким образом, ионы подобно отрицательно заряженным частицам движутся против поля (причём для собственных ионов металла, переходящих в активированное состояние, эффективный заряд всегда отрицателен). В энергетическом отношении статическое поле сил электронного ветра совершает работу по активации ионов и изменяет вероятность W прыжка иона в направлении поля E :

$$W = W_0 \exp\left(\frac{d}{2kT} \cos\alpha E \left[Z_0 - |e|nl \frac{2}{d} \int_0^{d/2} \sigma_i(z) dz \right]\right). \quad (3)$$

где W_0 – исходная вероятность прыжка иона в данном направлении при отсутствии электронного ветра; kT – произведение константы Больцмана на абсолютную температуру; α – угол между вектором E и направлением прыжка; d – расстояние прыжка; $\sigma_i(z)$ – функция изменения транспортного сечения рассеяния активированного иона в направлении перемещения z .

Таким образом, задаваясь указанными выше параметрами грани ячейки, формально возможно оценить количество активированных ионов, покидающих некоторый объём проводника (т. е.

проходящих через некоторую плоскость, перпендикулярную направлению E), и оценить интенсивность ЭПМ. Такой подход хорошо согласуется с экспериментальными данными в случае, когда рассматриваемый объём имеет регулярную структуру, т. е. для объёма кристаллита или квазимонокристаллической плёнки [1, 7]. Граница зёрен не имеет чёткой регулярной структуры, поэтому многие из параметров для выражения (3) так или иначе зависят от текущей структуры границы зёрен, которая в общем случае изменяется в процессе ЭПМ и деградации пленки.

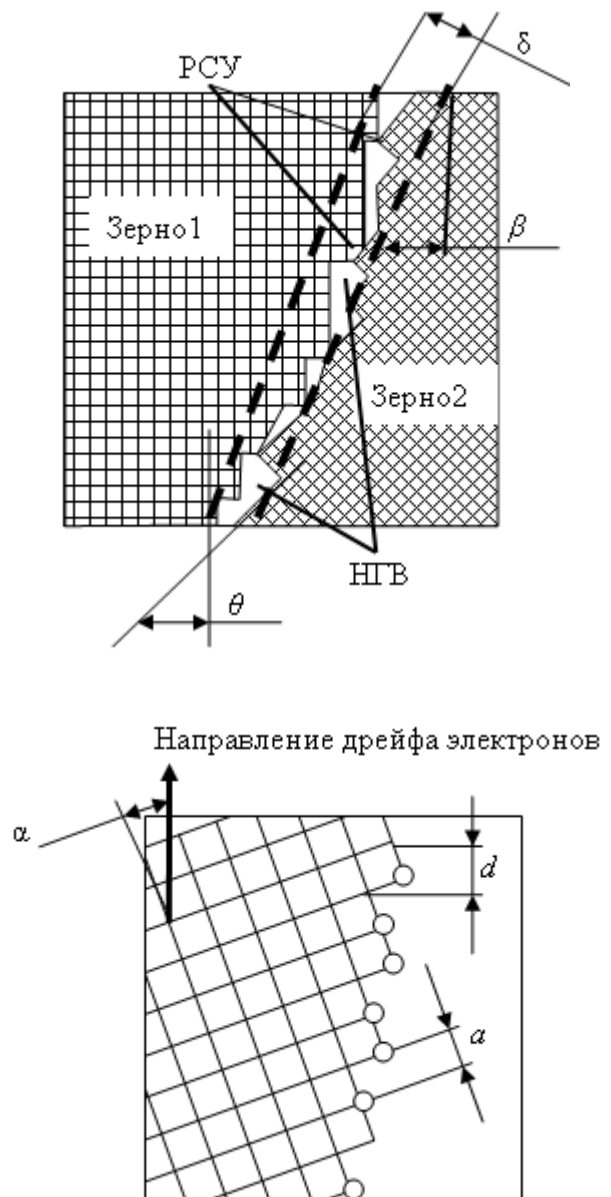


Рис. 5. Схематичное представление границы зёрен
PCY – решетка совпадающих узлов; НГВ – неструктурированное граничное вещество;

δ – ширина границы зерна; β – угол текущей фasetки границы зерна от направления E ; a – параметр кристаллической решетки; d – базисное расстояние прыжка активированного иона

Выделим параметры, которые необходимы для оценки степени деградации отдельной границы зёрен (рис. 5).

1) Угол кручения кристаллитов α (для каждого кристаллита) вокруг кристаллографической оси $[001]$ относительно направления E . Этот параметр необходимо учитывать, так как в общем случае преимущественное направление прыжка активированного иона не совпадает с направлением силы электронного ветра. Строго говоря, направление и модуль вектора электрического поля (и силы электронного ветра) не постоянен для всего объёма проводника [4]. Более того, вектор E изменяется в процессе ЭПМ для всех кристаллитов в соответствии с картиной распределения микротоков проводника. Для упрощения примем, что E неизменен для всего рассматриваемого участка проводника.

2) Угол разориентации кристаллитов θ для данной границы зёрен. Этот параметр определяет параметры решётки совпадающих узлов [3, 10] и энергию связи атомов решётки, т. е. энергию активации ионов. Параметр изменяется в процессе уноса массы.

3) Концентрация вещества границы – отношение текущего количества узлов РСУ к полному количеству её узлов. Этот параметр может определять степень деградации границы зёрен, так как в процессе ЭПМ происходит унос или приток «неравновесных» для данного состояния решётки совпадающих узлов атомов. При некотором уровне концентрации вещества границы один кристаллит полностью «отделяется» от другого – появляется микроскопическая трещина, и механизм ЭПМ по границам зёрен несколько изменяется [8].

4) Электрическое сопротивление границы зёрен. Этот параметр определяет полное сопротивление проводника и зависит от указанных выше параметров. Оценка изменения этого параметра в процессе ЭПМ по шагам в процессе моделирования и есть главная задача моделирования.

На основе разработанной модели была создана программа расчёта, которая проводит моделирование электродиффузионных процессов в тонких плёнках и представляет результаты моделирования на каждом шаге в графическом виде. Изменение указанных выше параметров в процессе ЭПМ было оценено для поликристаллических плёнок алюминия с помощью разработанной программы. На данном этапе проводится экспериментальное подтверждение полученной модели.

Библиографический список

1. Фикс, В. Б. Ионная проводимость в металлах и полупроводниках. Электроперенос [Текст] / В. Б. Фикс. – М.: Наука, 1969. – 296 с.
2. Колешко, В. М. Массоперенос в тонких пленках [Текст] / В. М. Колешко, В. Ф. Белицкий. – М.: Наука и техника, 1980. – 370 с.
3. Проблемы межсоединений в современной микроэлектронике А. А. Суханов [Текст]. Т.13. Вып. 3. Микроэлектроника, 1984. – С. 179-195.
4. Влияние технологии металлизации СБИС на её стойкость к электромиграции В. М. Борзов [и др.] [Текст]. Т.2. Вакуумная техника и технология, 1992. – С. 27-30.
5. Палатник, Л. С. Материаловедение в микроэлектронике [Текст] / Л. С. Палатник, В. К. Сорокин. – М.: Энергия, 1972. – 280 с.
6. Гроссе, П. Свободные электроны в твёрдых телах [Текст]: [пер. с нем.] / П. Гроссе. – М.: Мир, 1982. – 270 с.
7. Электродиффузионная надёжность тонкоплёночных проводников на основе эпитаксиальной плёнки алюминия [Текст] / А. В. Архипов; СПбГЭТУ. – СПб., 1994. – Деп. в ВИНТИ № 830 – В94.
8. Микромеханизмы деформационно-стимулированной зернограничной самодиффузии. Часть I-III В. Н. Чувильдеев [Текст]. Т.81. Вып. 5. ФММ, 1996. – С. 5-13.
9. Микромеханизмы зернограничной самодиффузии в металлах. Часть I-II В. Н. Чувильдеев [Текст]. Т.81. Вып. 2. ФММ, 1996. – С. 5-14.
10. Теория роста кристалла и движение границы раздела фаз в кристаллических материалах Дж. Кан. [Текст]. Т.91. Вып. 4. УФН, 1967. – С. 677-690.
11. Примесные состояния и диффузия в границах зерен металлов С. М. Клоцман [Текст]. Т.160. Вып. 1. УФН, 1990. – С. 99-139.
12. Комник, Ю. Ф. Физика металлических плёнок [Текст] / Ю. Ф. Комник. – М.: Атомиздат, 1979. – 263 с.

References

1. Phix, V. B. Ion conductivity in metals and semiconductors. Electromigration / V. B. Phix. – M.: Nauka, 1969. – 296 p.
2. Coleshko, V. M. Electromigration in thin films / V. M. Coleshko, V. F. Belitsky. – M.: Nauka i tehnika, 1980. – 370 p.
3. Commutation problem in modern microelectronics A. A. Sukhanov. Vol.13. Is. 3. Microelectronic, 1984. – PP. 179-195.
4. Technology of metallization and its influence on electromigration reliability of VLIC V. M. Borzov [et al]. Vol.2. Vacuum devices and technology, 1992. – PP. 27-30.
5. Palatnik, L. S. Materials engineering in microelectronics / L. S. Palatnik, V. K. Sorokin. – M.: Energiya, 1972. – 280 p.
6. Grosse, P. Unconfirmed electrons in solid state devices: [trans. from german.] / P. Grosse. – M.: Mir, 1982. – 270 p.
7. Electromigration reliability of thin film conductors based on epitaxial aluminum films / A. V. Archipov; LETI university. – S.P., 1994.
8. Micromechanisms of deformation-stimulated grainboundary selfdiffusion V. N. Chuvildeev. Vol.81. Is. 5. FMM, 1996. – PP. 5-13.
9. Micromechanisms of deformation-stimulated grainboundary selfdiffusion V. N. Chuvildeev. Vol.81. Is. 2. FMM, 1996. – PP. 5-14.
10. Crystal growth and phase boundary migration in crystal materials theory J. Khan. Vol.91. Is. 4. UPhN, 1967. – PP. 677-690.
11. Contribution states and diffusion in metal grain boundaries S. M. Clotsman. Vol.160. Is. 1. UPhN, 1990. – PP. 99-139.
12. Khomnik, U. F. Physics of metal films / U. F. Khomnik. – M.: Atomizdat, 1979. – 263 p.

MODEL OF ELECTROMIGRATION IN THIN METAL FILMS

© 2010 K. N. Tukmakov, A. V. Arkchipov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

Causes of failure of the commutation structure of electronic devices based on thin metal films have been analysed. Electromigration processes are shown to be the basic factor leading to the failure of thin-film aluminium metallization. The mechanism of electromigration degradation of this kind of metallization is analysed. Methods of improving electromigration reliability of metallization are also analysed. A model of electromigration processes based on a cellular machine has been developed, which makes it possible to model the process of flaw development in a thin film when subjected to high-density current and to measure the mean time to failure of thin-film conductors.

Integrated microcircuit, metallization, reliability, electromigration, grain boundaries, cellular machine, model.

Информация об авторах

Тукмаков Константин Николаевич, аспирант и инженер кафедры «Наноинженерия», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), nickonsoft@mail.ru. Область научных интересов: технология микроэлектроники, плазмохимическое травление в микротехнологиях, надёжность электронной техники, электродиффузия.

Архипов Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Наноинженерия», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), rtf@ssau.ru. Область научных интересов: технология микроэлектроники, процессы эпитаксии, надёжность электронной техники, электродиффузия, материаловедение.

Tukmakov Konstantin Nikolayevich, postgraduate student of department “Nanoengineering”, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), nickonsoft@mail.ru. Area of research: technology of microelectronics, ion-reactive etching in microtechnology, reliability of electronic devices, electromigration.

Archipov Aleksey Vladimirovich, associate professor of department “Nanoengineering”, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), rtf@ssau.ru. Area of research: technology of microelectronics, epitaxy, reliability of electronic devices, electromigration, materials engineering.