

УДК 539.216

АНАЛИЗ МЕТОДОВ УВЕЛИЧЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТОКА ПРОТЕКАЮЩЕГО ЧЕРЕЗ ПЛЕНОЧНЫЙ ПРОВОДНИК

Дмитриев С.В. Архипов А.В.

В настоящее время жизнь современного цивилизованного общества немислима без средств передачи и обработки информации. Для обеспечения их функционирования разработана развитая микроэлектронная элементная база. Освоено производство интегральных микросхем по технологии 0.13 мкм. Однако по некоторым прогнозам апогей развития микроэлектроники ожидается в 2010-2015 годах, в связи с тем, что дальнейшее уменьшение размеров методами электронной и рентгеновской литографии ограничивается, явлениями существенного разупорядочивания материалов за пределами окон в фоторезисте. Дальнейшее развитие электроники связывают либо с функциональной электроникой, либо с наноэлектроникой.

Тем не менее, не стоит сбрасывать со счетов достижения микроэлектроники, самым важным достоинством которой является наличие элементной базы. По этому стоит изыскивать новые пути решения проблем по микроминиатюризации РЭА.

Актуальность проблемы повышения плотности тока в пленочных проводниках связана с микроминиатюризацией электронных приборов при относительно одинаковых коммутируемых токах, при этом плотность тока увеличивается на порядки. В современных приборах плотность тока достигает величины порядка 10^7 А/см².

Цель данной работы заключается в анализе причин, по которым происходит отказ тонкопленочных проводников при протекании токов большой плотности, способов борьбы с этими отказами на основании оценки их достоинств и недостатков и в выборе наиболее оптимального метода противодействия.

В общем случае при увеличении плотности тока можно выделить два типа отказов тонкопленочных проводников: плавление и изменение дефектоструктуры пленки.

В первом приближении плавление проводника обусловлено нагревом пленки протекающим током, и зависит от свойств используемого материала, в частности от его удельного сопротивления.

Однако на практике отказы проводников вследствие расплавления пленки в целом довольно редки. Гораздо больший интерес представляет плавление отдельных участков пленки, что, в свою очередь, является одной из причин возникновения структурных дефектов. Такое «микрорасплавление» объясняется наличием различного рода дефектов, главным образом границ зерен, на которых происходит резкое увеличение удель-

ного сопротивления, и под действием тока высокой плотности на этих участках происходит значительный перегрев и повышение температуры выше температуры плавления.

«Микроплавление» проводника является одной из причин изменения структуры пленки. Сам же процесс изменения структуры носит более сложный характер. В общем случае он состоит из двух этапов: активации атомов кристаллической решетки и непосредственного массопереноса, приводящего к образованию деформаций.

Под активацией атомов, в данном случае, подразумевается образование «свободных» атомов с оборванными (незавершенными) химическими связями; в то время как атомы, расположенные в упорядоченной кристаллической решетке и имеющие завершённые химические связи, оказываются «запертыми» в потенциальной яме.

Активация атомов наиболее вероятна в местах, где нарушается структура кристаллической решетки. Такими областями являются различные дефекты: точечные (вакансии, междоузлия, примесные атомы и ионы), линейные (дислокации), поверхностные (двойникование, поверхность) и объёмные (сколы, включение другой фазы, границы зерен). Основной причиной активации в таких случаях является наличие незавершённых химических связей уже на стадии изготовления проводника.

Переход в возбужденное состояние осуществляется за счет термоактивационного механизма, заключающегося в том, что с ростом температуры экспоненциально возрастает энергия атома, и существует вероятность того, что атом преодолет потенциальный барьер, отделяющий его квазистабильное положение от состояния, в котором он способен к перемещению по объёму пленочного проводника.

Количество активированных атомов в первом приближении можно оценить по формуле (1):

$$N_a = e^{-W_a / kT}, \quad (1)$$

где W_a – энергия активации, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Учитывая, что реальный пленочный проводник содержит дефекты кристаллической решетки уже на стадии изготовления, и что под действием электрического тока на этих участках пленки температура выше, чем в местах упорядоченной кристаллической решетки, можно утверждать, что именно на дефектах наиболее вероятна активация атомов по термическому механизму.

Здесь стоит упомянуть об эффекте Томсона, который заключается в том, что происходит выделение или поглощение теплоты в проводнике с током, вдоль которого имеется градиент температуры (2).

$$Q_S = SIt \cdot \text{grad}T, \quad (2)$$

здесь S – коэффициент Томсона, I – сила тока, t – время.

Выделение теплоты происходит, если направление тока соответствует движению электронов от горячего конца к холодному, так как при переходе из более нагретого участка в более холодный электроны тормозятся и передают избыточную энергию окружающим атомам; при обратном направлении тока электроны, переходя из более холодного участка в более горячий, ускоряются полем термоЭДС и пополняют свою энергию за счет энергии окружающих атомов, при этом теплота поглощается.

Эффект Томсона, наряду с выделением джоулевой теплоты, способствует активации атомов кристаллической решетки.

Активированные атомы способны к миграции под действием следующих причин: электродиффузия, термодиффузия и самодиффузия. Эти диффузионные процессы происходят соответственно под действием электрического поля, градиента температуры и градиента концентрации. Соответственно общий поток массы будет равен сумме потоков от каждого из этих диффузионных процессов (3).

$$J_{\Sigma} = J_{эл} + J_{тер} + J_{сам} \quad (3)$$

Причем можно утверждать, основываясь на экспериментальных данных, что вклад самодиффузии в процесс массопереноса пренебрежимо мал, в то время как потоки массы от действия электро- и термодиффузии соразмеримы. Более того, сама электромиграция является термостимулированным процессом и зависит от градиента температуры в проводящем элементе. Таким образом, эти два вида массопереноса непременно сопутствуют друг другу. Главное же отличие электродиффузии от термодиффузии заключается в направленном переносе вещества, причем направление движения активированных атомов зависит от эффективного заряда $Z_{эф}$ (4).

$$J_{эл} = (DeEZ_{эф}) / kT, \quad (4)$$

где D – коэффициент диффузии, e – заряд электрона, E – напряженность внешнего электрического поля.

Непосредственный перенос вещества может осуществляться несколькими путями. Существуют три основных механизма диффузии. Первый предполагает обмен местами между соседними атомами. Однако этот механизм больше подходит для идеальных кристаллов. Вторым механизмом состоит в перемещении атомов по междоузлиям и характерен для примесей внедрения. И, наконец, третий механизм – вакансионный, суть которого в том, что один из соседних атомов занимает близлежащий незанятый узел кристаллической решетки – вакансию. Данный механизм преобладает над междоузельным механизмом, т.к. имеет меньшую энергию активации. Вакансионный механизм диффузии свойственен металлам с

гранцентрированной решеткой, которые широко применяются в изготовлении тонкопленочных проводников [1].

Таким образом, считаем, что диффузия протекает по вакансионному механизму, а т.к. существуют различные типы дефектов, то соответственно выделяют диффузию по объему, происходящую за счет распределенных в объеме вакансий, диффузию по дислокациям, по поверхности и по границам зерен. Стоит сразу отметить, что последние три вида дефектов являются ускоренными путями диффузии. Объясняется это тем, что для диффузионного переноса по таким структурным неоднородностям не требуется образование новых вакансий вследствие высокой концентрации вакансий на этих дефектах, таким образом, каждый активированный атом находится в соседстве с вакансией, и энергия активации диффузии определяется только энергией переноса вакансии. В объеме же для активации процесса переноса необходима еще и энергия образования вакансий.

По причине массопереноса могут образовываться различные структурные дефекты: холмики роста, нитевидные кристаллы – «усы», трещины и поры [1].

Механизм образования холмиков роста заключается в направленном массопереносе под действием электродиффузии. При этом атомы перемещаются от одного из электродов, образуя около него утончение пленки, к другому, около которого образуется холмик (рисунок 1). Такие изменения опасны: с одной стороны, утончение проводника может привести к его обрыву, в то время как образовавшийся холмик может нарушить электрическую изоляцию при многоуровневой металлизации.

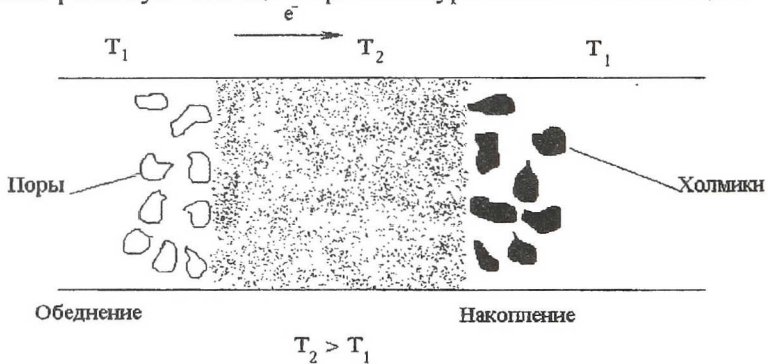


Рисунок 1 - Обрыв тонкопленочного проводника в результате электродиффузии (температура в центре полосы выше, чем на краях).

Зарождение «усов» заключается в том, что под действием механических микронапряжений вещество вытягивается в нитевидные кристаллы из жидкой зоны, наличие которой объясняется плавлением вещества под действием электрического тока высокой плотности в местах сты-

ка трех или более зерен, которые характеризуются большим сопротивлением (рисунок 2).

Причиной порообразования может явиться пересыщение вакансиями в тех местах, где дивергенция их потока отлична от нуля, например в местах большого градиента температуры, на границе двух участков с различными диффузионными свойствами, на границе крупного зерна с системой мелких зерен. Наиболее вероятный механизм разрыва пленки — это образование пор на стыке трех зерен.

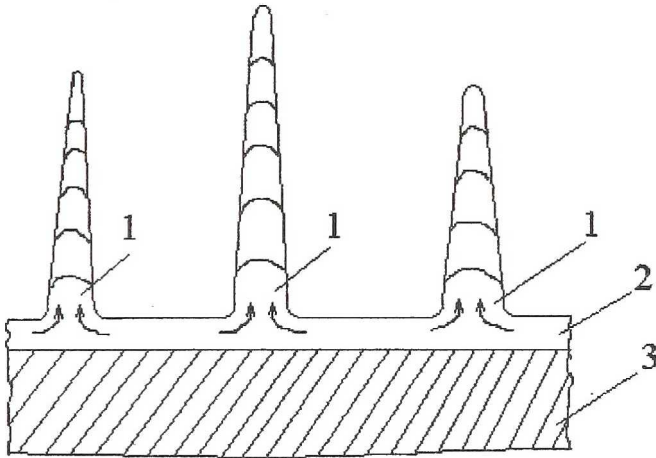


Рисунок 2 - Схематическое изображение роста нитевидных кристаллов: 1 — жидкая зона; 2 — тонкая пленка; 3 — подложка.

Теперь, основываясь на знаниях о причинах, можно проанализировать пути борьбы с электродиффузией, являющейся основным механизмом возникновения отказов сильноточной металлизации микроэлектронных изделий.

Как было показано выше, электроперенос как диффузионный процесс протекает по структурным неоднородностям кристаллической решетки. Отсюда можно предположить, в каком направлении стоит искать способы сдерживания электродиффузии. Все известные методы борьбы с электродиффузией предполагают «заполнение» структурных неоднородностей. Это обосновано сразу с двух позиций: во-первых, при ликвидации дефектов уменьшается количество активированных атомов, и, как следует из вакансионного механизма переноса, увеличивается энергия активации диффузионного процесса; и, во-вторых, отсутствие структурных неоднородностей предполагает и отсутствие ускоренных путей переноса.

Сейчас существует несколько основных способов борьбы с электродиффузией, каждый из которых предполагает ликвидацию какого-нибудь структурного дефекта.

Первое – это увеличение размеров зерна, что позволяет уменьшить количество тройных точек в пленке. Причем наблюдаемое увеличение энергии активации электродиффузии для крупнозернистых пленок связано не столько с размерами зерен, сколько с их ориентацией, так как в пленках с преимущественной ориентацией зерен электродиффузия имеет меньшую скорость, чем в пленках с произвольной ориентацией [1].

Недостаток этого метода состоит в том, что на среднее время жизни тонкопленочных проводников существенное влияние оказывает многоэтапность формирования пленки. Экспериментально доказано, что среднее время жизни для пленки, полученной за один цикл напыления, почти на порядок ниже, чем для пленок, полученных за несколько циклов. Это объясняется, по-видимому, образованием на границе раздела между слоями окисного слоя. Однако дальнейшее увеличение количества циклов напыления хороших результатов не дает. Наряду с этим было предложено формировать на мелкозернистой пленке крупнозернистую. Недостаток этого метода связан с усложнением технологического процесса, а также увеличением отказов пленки по другим причинам.

Второй метод предполагает нанесение диэлектрических пленок на поверхность металла (рисунок 3). Это позволяет существенно снизить энергию активации диффузии по поверхности. Однако, в связи с плохой теплопроводностью таких покрытий, может значительно увеличиться температурный градиент в пленке. Таким образом, применение диэлектрических пленок наиболее эффективно при невысоких температурах эксплуатации, а также при толщинах <math>< 500\text{ нм}</math> [2].

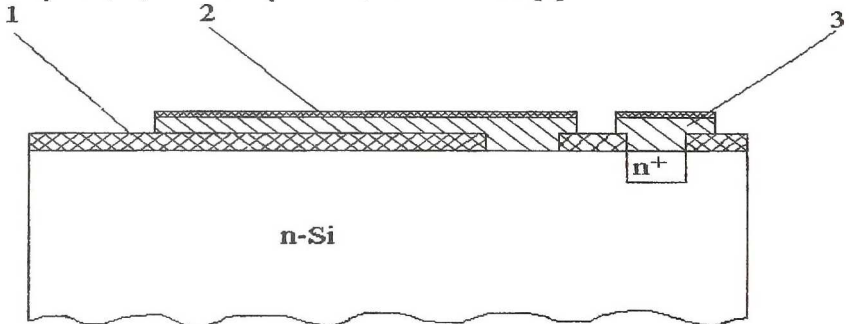


Рисунок 3 - Пример применения пассивирующего покрытия: 1 – слой SiO_2 , 2 – пассивирующий диэлектрический слой, 3 – металлическая пленка.

Третий способ заключается в использовании различного рода сплавов. При этом замедление электродиффузии объясняется тем, что примесные атомы завершают незаконченные химические связи в пленке основного металла (чаще всего это алюминий) [2]. Но у такого метода есть ряд существенных недостатков. Прежде всего, отсутствует какая-либо теоретическая модель, способная предсказывать свойства получа-

мой пленки, – в настоящее время известна масса различных сплавов, в том числе, имеющие ряд полезных качеств, однако все они получены, преимущественно, в ходе экспериментов без каких-либо предварительных расчетов. Кроме того, происходит существенное усложнение процесса напыления, связанное с наличием нескольких испарителей и необходимостью точной дозировки примесей, чтобы добиться необходимой повторяемости.

Хотя наибольший вклад в перенос вещества осуществляет электродиффузия по линейным и поверхностным дефектам, стоит упомянуть и о способах устранения точечных дефектов, которые также влияют на качество пленки. В основном, появление точечных дефектов связано с условиями осаждения. Так, при увеличении скорости осаждения увеличивается концентрация точечных дефектов, которые способствуют увеличению массопереноса, поэтому необходимо выбрать оптимальную скорость испарения, обеспечивающую и быстрый рост пленки, и сводящую к минимуму образование вакансий; при увеличении температуры подложки из-за отжига точечных дефектов происходит упорядочивание структуры пленки и увеличиваются размеры зерен; при высокой степени вакуума уменьшается концентрация примесных атомов, загрязняющих образец.

Таким образом, затраты, связанные с устранением точечных дефектов относительно ничтожны. Главная задача состоит в поиске метода по устранению линейных и поверхностных дефектов. Один из таких возможных путей состоит в создании квазимонокристаллической пленки с одновременным применением диэлектрических покрытий. Однако в данном случае все еще остается актуальной проблема наличия дислокаций, которую, в принципе, можно разрешить, опираясь на тот факт, что дислокации с противоположными векторами Бюргерса, лежащие в одной плоскости скольжения, при сближении уничтожают друг друга (аннигилируют, рисунок 4).

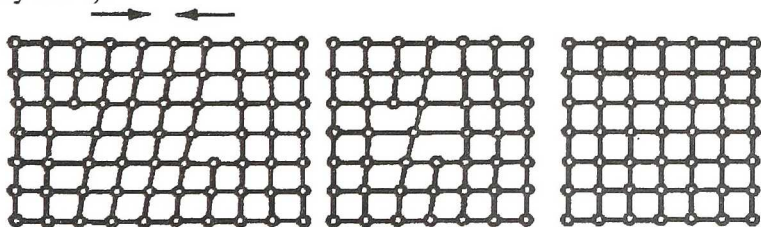


Рисунок 4 - Аннигиляция притягивающихся дислокаций.

Если такие дислокации лежат в разных плоскостях скольжения, то для их аннигиляции требуется переползание, т.е. движение краевых дислокаций по нормали к плоскости скольжения, которое осуществляется путем присоединения или отрыва вакансий от края плоскости (рисунок 5) [2].

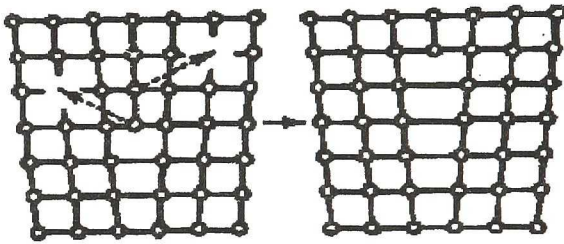


Рисунок 5. Переползание краевой дислокации. Атомы лишней полуплоскости переходят в вакантные узлы решетки.

Переползание связано с диффузионным переносом массы, пластической деформацией и происходит при высоких температурах; поэтому при высокотемпературном отжиге, способствующем переползанию, плотность дислокаций понижается.

Итак, из рассмотренных методов пассивации процесса электродиффузии в тонкопленочных проводниках при больших плотностях тока наиболее перспективным можно считать создание квазимонокристаллической пленки с диэлектрическим покрытием и последующей обработкой с целью удаления линейных дефектов.

Список использованных источников

1. Колешко В.М., Белицкий В.Ф. Массоперенос в тонких пленках – М.: Наука и техника, 1980.
2. Технология тонких пленок. Т.2. Справочник: Под. ред. Л.Майсела, Р.Глена. М.:Советское радио, 1977.

УДК 539.216

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ КВАЗИМОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Осипов А.Н., Архипов А.В.

За последние годы в электронике наблюдается тенденция к возрастанию функциональной плотности микросхем, зачастую в ущерб универсальности, и к уменьшению геометрических размеров кристаллов микросхем, что приводит к резкому увеличению плотности тока, протекающего по пленочной металлизации. Вследствие чего, становится очевидно необходимым применение структурно совершенных металлических плёнок, выполняемых на диэлектрическом основании.

Квазимонокристаллические плёнки можно получить с помощью эпитаксиальных процессов. Эпитаксия (от греческого “эпи” и “такси” – ориентированное наращивание) – это наращивание тонкой плёнки на ори-