



# ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ И ПОВЫШЕНИЕ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ПРОЦЕССА ПРИ СОЗДАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

## THE FORMATION OF A MULTI-LEVEL SYSTEM OF INTERCONNECTS AND INCREASING THE REPRODUCIBILITY OF THE MULTILAYER SYSTEMS PRODUCTION PROCESS

М.Г.Мустафаев\*, к.т.н., (ORCID: 0000-0002-4250-7972), Д.Г.Мустафаева\*, к.т.н., доцент, (ORCID: 0000-0002-1694-1230), Г.А.Мустафаев\*, д.т.н., проф., (ORCID: 0000-0002-3407-3596) / dzhamilya79@yandex.ru  
 M.G.Mustafaev, Cand. of Sc. (Technical), (ORCID: 0000-0002-4250-7972), D.G.Mustafaeva, Cand. of Sc. (Technical), Docent, (ORCID: 0000-0002-1694-1230), G.A.Mustafaev, Doctor of Sc. (Technical), Prof., (ORCID: 0000-0002-3407-3596)

DOI: 10.22184/1993-8578.2019.12.6.338.341

Получено: 03.09.2019 г.

Рассмотрено формирование многоуровневой системы межсоединений в элементах интегральной электроники, определены влияющие факторы и пути снижения внутренних напряжений и обеспечения адгезии к подложке. Показано, что многоуровневая система межсоединений обеспечивает создание надежных и стабильных элементов и воспроизводимость процесса получения многослойных систем.

Considered are the interconnections of a multi-level system formation based on the elements of integrated electronics, the influencing factors and ways to reduce internal stresses and ensure adhesion to the substrate. It is shown that the multi-level interconnection system provides the production of reliable and stable elements and reproducibility of multilayer systems manufacture.

### ВВЕДЕНИЕ

Достижения современной электроники по созданию многофункциональных устройств и систем на основе интегральных элементов – больших и сверхбольших интегральных схем, и увеличение степени их интеграции были бы невозможны без значительных успехов в системе межсоединений в элементах интегральной электроники [1], без перехода к многоуровневой системе межсоединений. Дальнейшее развитие и совершенствование

потенциальных возможностей высоких степеней интеграции потребовало внедрения в технологию новых материалов, разработки и усовершенствования методов их получения [2]. Переход к многоуровневой системе межсоединений позволяет значительному сокращению площади кристалла и уменьшению влияния различных случайных дефектов, возникающих в процессе изготовления элементов интегральной электроники (ЭИЭ).

\* ФГБОУ ВО "Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)" / North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), NCIMM (STU).



В то же время многоуровневая система межсоединений является источником новых видов отказов: замыкания между уровнями металлизации через дефекты в слое диэлектрика; обрывы металлизации на сложном ступенчатом рельефе поверхности; различие контактного сопротивления между отдельными уровнями вследствие реакций в твердом состоянии; реакции взаимодействия между оксидом и металлизацией при повышенных температурах и т.д. Получение качественного неразрывного металлического и оксидного покрытия на поверхности подложки со сложным ступенчатым рельефом в многоуровневых системах решается выбором материалов системы, методов их получения и обработки, надежностью всей системы межсоединений.

### ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

На надежность многоуровневых межсоединений ЭИЭ влияют механические напряжения металлических и оксидных слоев системы. Анализ ЭИЭ показал, что первый уровень металлизации под слоем диэлектрика находится под действием растягивающих напряжений, значительных по величине. Результирующие силы в напряженных пленках могут приводить к растрескиванию диэлектрика, разрыву металлизации, нарушению адгезии оксидных и металлических пленок, замыканию через дефекты в оксидах между уровнями металлизации и другим видам повреждений межсоединений. Максимум напряжений сосредоточен вокруг контактных окон к нижнему слою металлизации, что создает дополнительные трудности для обеспечения надежности контактов между соседними уровнями. Получение качественной металлизации ЭИЭ является трудно выполнимой задачей технологического характера [3].

Одним из требований к металлизации межсоединений ЭИЭ является обеспечение хорошей адгезии проводящих металлических пленок к подложке, а также ее сохранение при последующих обработках и эксплуатации приборов [4], особенно при высоких температурах. Повышенные требования к адгезии металлизации многоуровневых межсоединений связаны с большим разнообразием используемых материалов, трудностью согласования их свойств, значительным увеличением внутренних напряжений в многослойной системе металл-диэлектрик-металл. Адгезия материалов определяется не только их свойствами, но и степенью взаимодействия этих материалов на границе раздела [5, 6], связь осуществляется либо за счет химической реакции на границе раздела фаз, либо под действием

сил Ван-дер-Ваальса. В каждом случае энергии связи и свойства получаемых соединений будут различны.

Выбор материалов осуществляют с учетом свойств металлических пленок, определяющих качество их адгезии к оксидной подложке – теплоте образования оксидов. Отметим, что хорошую адгезию к оксидной подложке имеют металлы с высокой отрицательной теплотой образования оксидов, в этом случае на границе раздела "пленка – подложка" происходит интенсивное взаимодействие с образованием пограничного слоя. Адгезия тугоплавких металлов выше, чем легкоплавких с одинаковой теплотой образования оксидов. Вероятно, это связано со значительно большей кинетической энергией частиц при конденсации пленок тугоплавких металлов.

Для лучшей адгезии металлических пленок межсоединений, в частности многоуровневых, формируется пограничный слой определенной толщины, обеспечивающий надежное сцепление пленки и подложки. Получение требуемых свойств на границе раздела возможно тщательным выбором контактирующих материалов и условий их получения. Качество обработки поверхности подложки перед металлизацией должно гарантировать отсутствие барьерных слоев на границе раздела фаз. Использование металлов с близким к подложке коэффициентом термического расширения уменьшает собственные внутренние напряжения, что также улучшает адгезию.

Использование кислородно-реактивных материалов на оксидных подложках эффективно для получения качественных промежуточных слоев, в частности металлов с большой теплотой образования оксидов (титан, вольфрам, молибден, tantal, хром и др.). Оптимальный режим получения металлических пленок для межсоединений и совместимость контактирующих материалов обеспечивают надежную адгезию металлизации.

Величина внутренних напряжений в тонких металлических пленках зависит от технологических параметров процесса их осаждения и последующих обработок. Для многоуровневых межсоединений изменение внутренних напряжений в металлических проводящих пленках имеет существенное значение, так как даже в двухуровневой системе межсоединений нижний слой металлизации подвергается трехкратным термообработкам для осаждения последующих диэлектрических и металлических слоев. В системах с большим числом уровней количество таких слоев и необходимых для их осаждения термообработок увеличивается, что повышает вероятность отказов вследствие отрицательного действия высоких внутренних напряжений. Это



определяет достаточно высокие требования к материалам для металлизации, особенно нижнего уровня, который находится в более неблагоприятных с этой точки зрения условиях. Причиной ухудшения адгезии металлизации при последующих термообработках можно считать действие высоких внутренних напряжений в металлических пленках.

Целесообразно использовать разнотипные материалы для металлизации различных уровней межсоединений. Так, для нижнего уровня можно рекомендовать жесткие материалы с высоким модулем упругости и высокой отрицательной теплотой образования оксидов (вольфрам, молибден, tantal и др.). Сочетание этих свойств позволяет получать межсоединения с минимальными значениями внутренних напряжений и хорошей адгезией к подложке. Для металлизации верхнего слоя межсоединений можно использовать алюминий. Многочисленные достоинства делают его наиболее предпочтительным, а величину внутренних напряжений, которую определяет низкий модуль упругости, можно снизить с помощью технологических приемов.

Надежность межсоединений обеспечивается применением высококачественных диэлектриков, которые, помимо высокой диэлектрической прочности, низких механических напряжений, хорошей адгезии, должны быть хорошо совместимы с материалами примыкающих к ним слоев многоуровневых межсоединений, не оказывая на них какого-либо вредного воздействия, быть технологичными при нанесении и последующей обработке. Сохранение поверхностной однородности металлизации тугоплавкими металлами гарантирует высокую надежность многоуровневых межсоединений вследствие отсутствия трещин в межслойном диэлектрике и, таким образом, замыканий между уровнями.

Для обеспечения качества и надежности диэлектрических покрытий необходимо оптимальное сочетание материалов металлизации и диэлектрика, условий их получения и термообработок. Получение качественных многоуровневых межсоединений обеспечивается низкой плотностью микропор в межслойном диэлектрике для исключения возможности замыканий между уровнями металлизации. Термообработка диэлектрических пленок после осаждения влияет на их характеристики, вследствие изменения величины внутренних напряжений, обусловленных термическими и структурными факторами.

Термические напряжения возникают во время осаждения пленки и распределены неравномерно по всей толщине системы "пленка – подложка". Их величина максимальна на границе раздела

"пленка – подложка" и минимальна на внешней поверхности пленки и определяется различием температурных коэффициентов расширения пленки и подложки, и для многих диэлектрических пленок величина термических напряжений прямо пропорциональна толщине пленки. Соотношение температурных коэффициентов расширения пленки и подложки не только влияет на величину, но и на знак термических напряжений.

В многослойных структурах с чередующимися слоями металла и диэлектрика свойства диэлектрических пленок существенным образом зависят не только от условий их получения и свойств нижнего слоя межсоединений, но определяются также материалом и режимами получения верхнего слоя межсоединений. Применение технологических приемов, например медленное охлаждение после процесса осаждения верхнего слоя межсоединений, приводит к значительному снижению величины внутренних напряжений, вызванных разницей в коэффициентах термического расширения металлической и диэлектрической пленки. Медленное охлаждение проводят после любых термообработок алюминиевой металлизации. В этих условиях обеспечивается низкая скорость рекристаллизации и, следовательно, минимальное нарушение однородности поверхности металлизации, снижение внутренних напряжений в диэлектрической пленке.

Высокая активность металла к оксиду обеспечивает хорошую адгезию, и хорошее качество низкого омического контакта из-за отсутствия барьера слоя на границе раздела "металл – полупроводник". Ограничение степени взаимодействия на границе раздела "металл – оксид" создает проблему получения резкой границы раздела между контактирующими фазами, формирования между ними барьерных слоев, сохранения при этом высокой адгезии металла к оксиду. Взаимодействие между компонентами системы межсоединений снижает ее надежность. Использование несовместимых материалов для металлизации первого и второго уровней может привести к их нежелательной взаимной диффузии при повышенной температуре, к образованию интерметаллических соединений, эффекту Киркендалла, то есть к деградации межсоединений. Кроме того, методы получения слоев их дальнейшей обработки не должны влиять на стабильность создаваемой структуры и свойства нижележащих слоев.

Методы получения металлических и диэлектрических пленок выбирают из условия обеспечения коэффициента заполнения сложных профилей, близким к единице, при сохранении низкого омического контакта между уровнями металлизации



при последующих термообработках. Таким образом, многоуровневая система межсоединений, состоящая из чередующихся проводящих и диэлектрических слоев, требует тщательного подбора материалов каждого отдельного слоя и технологии их получения.

Высокие требования к металлизации [7, 8] низких уровней определили разработку и применение новых одно- и многослойных систем. Примером однослойной системы является металлизация тугоплавкими металлами (молибден, вольфрам), а многослойной – хром-золото, молибден-золото, вольфрам-золото, титан-платина-золото и др. Многослойные системы состоят из проводящего слоя (золота, серебра, меди) и слоя, имеющего хорошую адгезию к подложке и препятствующего диффузии проводящего слоя в полупроводник. В случае взаимной диффузии при повышенных температурах между ними вводится дополнительный барьерный слой, например, платина в системе титан-платина-золото.

Для получения минимальных потерь проводимости межсоединений необходимо использовать хорошо проводящие металлы, которые обладают низким сопротивлением омического контакта с кремнием. Многие металлы имеют низкое контактное омическое сопротивление с кремнием n- и p-типов проводимости при условии высокой концентрации примесей.

Подслой из силицида платины значительно снижает величину контактного сопротивления при средних значениях сопротивления кремния, приводит к получению одинакового сопротивления контакта независимо от вида используемого металла. Это указывает на то, что потенциальным барьером при создании контакта является граница раздела "силицид платина – кремний".

Надежность ЭИЭ существенно зависит от надежности системы металлизации на основе алюминиевых межсоединений, технологическими возможностями самого материала, существенными ограничениями минимальных размеров токоведущих дорожек. Поэтому применение новых материалов для межсоединений позволяет улучшить их характеристики.

Использование низкотемпературных систем металлизации значительно ограничивает температурный диапазон процесса получения диэлектрических слоев. С повышением температуры осаждения качество межслойного диэлектрика повышается. Приблизиться по основным параметрам к термическому оксиду возможно с использованием межсоединений из тугоплавких металлов.

Достоинством металлизации тугоплавкими металлами является возможность получить

надежную многоуровневую систему межсоединений. Это обусловлено высокой температурой плавления металлов, что гарантирует отсутствие дополнительных деформаций, возникающих при последующих термообработках межсоединений, вплоть до температур в диапазоне 800–1100 °C.

## ВЫВОДЫ

Качество металлизации тугоплавкими металлами позволяет сохранить однородность ее поверхности в процессе осаждения межслойного диэлектрика и последующих слоев металлизации. Это свойство пленок из тугоплавких металлов сделало возможным их использование для металлизации нижнего и верхнего уровней многоуровневых межсоединений. Системы межсоединений, выполненные на основе тугоплавких металлов, свободны от недостатков, присущих более легкоплавким системам, обеспечивают воспроизводимость параметров, высокие технические характеристики и надежность системы межсоединений элементов интегральной электроники. Формирование многоуровневой системы межсоединений в элементах интегральной электроники обеспечивает хорошую адгезию к подложке, создание надежных и стабильных элементов и воспроизводимость процесса.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Таруи Я. Основы технологии СБИС. – М.: Радио и связь, 1985. 286 с.
2. Мустафаев М.Г., Мустафаева Д.Г., Мустафаев Г.А. Воспроизводимость и стабильность технологии и параметров структур микрэлектронных приборов // НАНОИНДУСТРИЯ. 2019. № 5.
3. Технология тонких пленок / Под ред. Л.Майселя, Р.Гленга. – М.: Советское радио, 1977. 664 с.
4. Мустафаева Д.Г., Мустафаев Г.А., Мустафаев М.Г. Формирование структур чувствительных элементов пленочных преобразователей с заданными электрофизическими параметрами // НАНОИНДУСТРИЯ. 2017. № 8. С. 60–66.
5. Комник Ю.Ф. Физика металлических пленок. Размерные и структурные эффекты. – М.: Атомиздат, 1979. 196 с.
6. Чопра К.Л. Электрические явления в тонких пленках. – М.: Мир, 1972. 260 с.
7. Любимова Л.К. Металлизация в полупроводниковых приборах // Электронная техника. Сер. 2. 1977. Вып. 3. С. 35–38.
8. Лихтман Е.Н., Денисов Б.Г. Многослойные контактные системы на основе молибдена и алюминия // Электронная техника. Сер. 2. 1971. Вып. 4. С. 46–51.