



# ФОРМИРОВАНИЕ КОНТАКТНО-МЕТАЛЛИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ С УЛУЧШЕННЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

## FORMATION OF THE CONTACT-METALLIZATION SYSTEMS WITH IMPROVED TECHNOLOGICAL PARAMETERS

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: 10.22184/1993-8578.2020.13.2.122.125

Получено: 15.11.2019 г.

Рассмотрены технологические подходы, обеспечивающие улучшение адгезии металлизации, уменьшение структурных напряжений в пленке в процессе осаждения и снижения электромиграции при формировании контактно-металлизационных систем при создании элементов интегральной электроники.

Considered are the technological approaches that provide improved metallization adhesion, reduced structural stresses in the film during deposition and reduced electrical migration at the formation of contact-metallization systems when producing integrated electronics elements.

**Ф**ормирование контактно-металлизационных систем при создании элементов интегральной электроники является сложной технологической задачей, обусловленной тем, что рельеф поверхности образуется ступенями на границах контактных окон, а также значительным возрастанием сложности профиля в многоуровневых межсоединениях из-за увеличения числа контактных окон.

### ФОРМИРОВАНИЕ КОНТАКТНО-МЕТАЛЛИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ

При формировании многоуровневых межсоединений имеются ступени на пересечениях дорожек металлизации различных уровней [1]. Профиль ступени, образованной нижним уровнем межсоединений, определяется профилем травления нижнего слоя металлизации и степенью воспроизведения его межслойным диэлектриком. В области верхней пленки металлизации толщина межслойного диэлектрика минимальна, а внутренние напряжения

максимальны, из-за чего происходит растрескивание диэлектрика, которое может вызвать закороток уровней металлизации или обрывов металлизации верхнего уровня. Причиной разрывов может быть эффект "самозатенения" при формировании пленки, возникающий из-за различия скорости ее роста на гладких и шероховатых поверхностях [2]. Равномерности по толщине межслойного диэлектрика и отсутствие закороток и обрывов на ступенях можно добиться сглаживанием ступенчатого рельефа поверхности подложки.

Обрывы металлизации на ступенях и эффект "самозатенения" устраняют, используя различные технологические приемы, при нанесении металлизации:

- повышение температуры подложки и скорости нанесения пленки для увеличения подвижности адсорбированных атомов пленки;
- применение различных приспособлений для нанесения металла под углом к поверхности подложки, обеспечивающих получение

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



коэффициента заполнения сложных профилей, близкого к единице и др.

Межповерхностные связи в области контакта "пленка - подложка" имеют существенное значение, так как шероховатость поверхности подложки создает сильную межповерхностную макроскопическую связь даже при слабой межатомной связи. Так при напылении в вакууме шероховатость поверхности подложки может привести к появлению различных структурных дефектов типа пустот и вакансий, которые и являются причиной ухудшения адгезии [3].

Низкая адгезия металлизации может быть обусловлена несогласованностью свойств

контактирующих материалов, неправильным выбором методов или технологических режимов получения пленок, некачественным проведением процесса металлизации или подготовки поверхности подложки, что приводит к образованию барьерных слоев на границе раздела и ограниченному взаимодействию контактирующих материалов, которые можно устранить при межоперационном контроле.

Ухудшение адгезии металлизации при термообработках может быть обусловлено действием высоких внутренних напряжений в металлических пленках, так как при этом в пленках возникают напряжения сжатия,

**F**ormation of contact-metallization systems when fabricating integrated electronic elements presents a complicated process task as the surface relief is formed by steps in the boundaries of contact windows and by a significant growth of profile non-uniformity in the multilevel interconnections due to the increasing number of contact windows.

#### FORMATION OF THE CONTACT-METALLIZATION SYSTEMS

In forming multilevel interconnections [1] there are steps situated at the metallization track intersections of different levels. The step profile formed by a bottom level of interconnections depends on the etching profile of lower metallization level and on how the interlayer dielectric repeats the steps shape. Thickness of the interlayer dielectric is the lowest in the top area of a metalized film but the inner stresses here are the highest - it leads to cracking of the dielectric and electrical shorting of the metalized levels or interruption of the top-level metalized films. These cracks can be caused by the "self-shadowing" effect occurring when the film is being formed because of the differences in its grow rates on smooth and rough surfaces [2]. The uniformity in the

interlayer dielectric thickness and the absence of shorts and interruptions on steps may be obtained by smoothing of the substrate surface staircase relief.

Interruptions of the metallization on steps and the "self-shadowing" effect should be eliminated by using different technological methods in the metallization process:

- increasing of the substrate surface temperature and higher film application rate in order to enhance the adsorbed atoms mobility in a film;
- use of various accessories to apply metal at an angle to the substrate surface thereby providing for a fill coefficient of the complicated profiles that is close to unity, etc.

Interfacial connections in the "film-substrate" contact area are essential because the substrate surface roughness produces a strong interfacial macroscopic connection even at weak interatomic binding. Roughness of the substrate surface at vacuum deposition can lead to emergence of various structural defects like hollows and vacancies that cause adhesion weakness [3].

Low level of metallization adhesion can be explained by a non-conformity of the contacting material properties or improper choice of the

methods or processes during preparation of films, or poor metallization process regimes and insufficient quality of the substrate surface which leads to the formation of barrier layers at the boundaries and limited interaction of the contact materials which can be eliminated at the interoperational inspection stage.

Deterioration of the metallization adhesion at thermal treatment may be caused by high internal stresses in metal films due to the arising compressing stresses caused by increasing of grain sizes. Thus, the total mechanical stresses may be increased or decreased depending on the sign of the intrinsic stresses in the films. When the critical value which is dependent on the boundary phase contact properties is exceeded, detachment of the film from a substrate can be observed. High inner stresses result in the detachment of the metal films and disruptions of the film in the areas with the maximal stress values. Diagnostics of these types of failures is usually complicated because of the long destruction period and the increasing static fatigue of the materials. Semiconductor substrates are fragile and commonly destruct by detachment without being preliminary deformed.



вызванные увеличением размера их зерна. Таким образом, в зависимости от знака собственных внутренних напряжений в пленке происходит увеличение или уменьшение суммарных механических напряжений. При превышении критической величины, определяемой свойствами границы раздела контактирующих фаз, наблюдается отслаивание пленки от подложки.

Высокие внутренние напряжения приводят к отслаиванию металлизации или разрывам ее в областях с максимальными значениями внутренних напряжений. Тяжесть этого вида отказов заключается в том, что процесс разрушения сильно растянут во времени и вызван возрастанием статической усталости материалов. Используемые в качестве подложек полупроводниковые материалы хрупкие, для них характерно разрушение отрывом без предварительной деформации.

Механические напряжения, возникающие вследствие различия свойств материалов пленки, границы раздела "пленка - подложка" и самой подложки могут быть значительно уменьшены при определенной толщине пленки. При этом на границе раздела должны отсутствовать микропоры и другие дефекты, которые могут стать концентраторами внутренних напряжений. Величина внутренних напряжений в тонких металлических пленках зависит от технологических параметров процесса их осаждения и последующих обработок.

Структурные напряжения в пленке диэлектрика возникают в процессе осаждения пленки и определяются условиями его проведения (температура подложки, скорость осаждения и т.д.). Для уменьшения структурных напряжений проводят термообработку, что обеспечивает снижение плотности точечных дефектов и увеличение плотности пленок. Действие этого эффекта усиливается по мере увеличения температуры обработки до определенного предела в зависимости от природы материала диэлектрической пленки.

Механизм возникновения структурных напряжений в диэлектрических пленках определяется действием факторов:

- эффектом поверхностного натяжения в пленках;
- природой кристаллических дефектов;
- равномерностью кристаллической структуры по толщине пленки и др.

Для качества формирования контактно-металлизационных систем немаловажно явление электромиграции. Явление электромиграции, связанное с переносом массы материала межсоединений под действием внешнего электрического поля и вызванного этим полем тока, играет существенную роль в многоуровневых системах межсоединений [4].

Для повышения сопротивления электромиграции используют метод легирования металлов различными примесями (бериллий, медь, магний), являющимися эффективными барьерами массопереноса материала. Эти примеси

Mechanical stresses arising due to different film properties, and "film-substrate" boundaries and the substrate itself may be significantly reduced at a certain film thickness. In addition, micropores and other defects on the boundaries which may concentrate inner stresses must be absent. The inner stress value in the thin metal films depends on technological parameters of its deposition and followed treatments.

The structural stresses in a dielectric film arise at film deposition and are dependent on the conditions of fabrication (substrate temperature, deposition rate, etc.). Thermal treatment is necessary to decrease

structural stresses for increasing film density and decrease of the point defects density. This effect becomes more pronounced as the treatment temperatures grows up to the definite point depending on the nature of the dielectric film material.

Structural stresses arise in the dielectric films due to the following factors:

- surface-tension in the films;
- nature of crystalline defects;
- uniformity of the crystalline structure across the film thickness and others.

The important role to ensure good quality of contact-metallization

systems is played by electrical migration. The electrical migration phenomena connected with a transfer of the mass of the interconnection materials under the influence of the external electrical field has an important role in the multilayer interconnections systems together with a current which is produced by this field [4].

In order to raise the electrical migration resistance, metals are doped with different impurities (beryllium, copper, magnesium) which present effective barriers for mass transfer. These impurities have a relatively high bound energy of the vacancies. Use of



имеют относительно высокую энергию связи вакансий.

Другим методом снижения явления электромиграции является использование защитных диэлектрических покрытий, играющих роль механического барьера. При этом рост толщины диэлектрического покрытия увеличивает вероятность образования мелких холмиков на всей поверхности металлизации, а не отдельных высоких пиков. Использование пленки оксида алюминия  $Al_2O_3$ , полученной анодированием поверхности алюминиевого проводника, обеспечивает надежную защиту от электромиграции и улучшает однородность слоя диэлектрика.

Для снижения электромиграции используют тугоплавкие металлы: молибден, вольфрам, хром, титан и др., которые, помимо высокой температуры плавления в перекристаллизации по сравнению с алюминием и другими более легкоплавкими системами, имеют меньшее значение коэффициента диффузии и более высокое значение энергии активации самодиффузии, что свидетельствует об отсутствии подверженности электромиграции.

## ВЫВОДЫ

Действие высоких внутренних напряжений в металлических пленках зависит от технологических параметров процесса их осаждения и последующих обработок и обуславливает ухудшение адгезии при термообработке, что

приводит к отслаиванию металлизации или ее разрывам. Для улучшения адгезии металлизации обеспечивают согласованность свойств контактирующих материалов, правильно выбирают технологический режим получения пленок и подготовки поверхности подложки. Уменьшение структурных напряжений в пленке диэлектрика в процессе осаждения достигается термообработкой, что обеспечивает снижение точечных дефектов и увеличение плотности пленки. Для снижения электромиграции используют тугоплавкие металлы.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Мустафаева Д.Г., Мустафаев Г.А., Мустафаев М.Г. Формирование многоуровневой системы межсоединений и повышение воспроизводимости процесса при создании элементов интегральной электроники // НАНОИНДУСТРИЯ. 2019. № 6.
2. Технология тонких пленок / Под ред. Л. Майссела, Р. Гленга. – М.: Советское радио, 1977. 663 с.
3. Мустафаева Д.Г., Мустафаев Г.А., Мустафаев М.Г. Воспроизводимость и стабильность технологии и параметров структур микроэлектронных приборов // НАНОИНДУСТРИЯ. 2019. № 5. С. 56–59.
4. Лихтман Е.Н., Донишев Б.Г. Многослойные контактные системы на основе молибдена и алюминия // Электронная техника. Сер. 2. 1971. Вып. 4. С. 46–51.

the protective dielectric coatings as a mechanical barrier is another method to decrease electrical migration.

At that, a greater thickness of the dielectric coating increases a probability of little hills formation across the entire surface to be metallized, not of the individual high peaks only. Usually, uniformity of the dielectric layer is improved by the use of an aluminum oxide film  $Al_2O_3$  obtained by anodizing of the aluminum conductor surface and ensures reliable protection against electrical migration. To reduce electrical migration, high-melting metals are used: molybdenum,

tungsten, chromium, titanium, and others, which, in addition to a high melting point in recrystallization as compared to aluminum and other more fusible systems, have a lower diffusion coefficient and a higher value of the self-diffusion activation energy, which indicates lack of exposure to electrical migration.

## CONCLUSIONS

The action of high internal stresses in metal films depends on the technological parameters of the process of their deposition and subsequent processing and causes deterioration of adhesion

during thermal treatment, which leads to detachment of metallization or its rupture. To improve adhesion of metallization, consistency of the contacting materials properties is to be ensured, the technological mode of producing films and preparation of the surface of the substrate are to be correctly selected. Reduction of the structural stresses in the dielectric film during the deposition process is achieved by thermal treatment, which reduces point defects and increases the film density. High-melting metals are used to reduce electrical migration. ■