

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ BRIEF REPORTS

УДК 621.382 (075.8)

Влияние состояния поверхности затравочного слоя меди на однородность электрохимического заполнения медью канавок с субмикронными размерами

А.Н. Белов, В.Г. Плаксин, В.И. Шевяков

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Influence of State of Seed Copper Layer Surface on Uniformity of Electrochemical Copper Fill of Grooves with Submicron Dimensions

A.N. Belov, V.G. Paksin, V.I. Shevyakov

National Research University of Electronic Technology, Moscow

Приведены результаты исследования влияния состояния поверхности затравочного слоя меди на однородность электрохимического заполнения медью канавок с субмикронными размерами. Отмечено, что качество заполнения связано с отсутствием или наличием на поверхности затравочного слоя меди пленки оксида, характеризующейся гидрофобными свойствами. Показано, что для однородного заполнения канавок медью в переходных окнах в межуровневых слоях диэлектриков при создании медной многоуровневой металлизации кремниевых ИС время межоперационного хранения пластин после осаждения затравочного слоя меди до заполнения канавок медью не должно превышать максимально допустимого (~6 ч).

Ключевые слова: медная металлизация; угол смачивания; затравочный слой меди; электрохимическое осаждение.

The results of the study on the influence of the seed copper layer surface state on the uniformity of the electrochemical copper fill of the grooves with submicron dimensions have been presented. It has been noted that the quality of the filling is connected with the absence or presence on the surface of the seed layer of the copper oxide film, characterized by the hydrophobic properties. It has been shown that for a uniform filling of the grooves with copper in the transition windows in the interlevel dielectric layers while creating the copper multilevel metallization of silicon ICs the time of the plates interoperational storage after deposition of the copper seed layer to fill the grooves with copper should not exceed the maximum allowable time ~ 6 hours.

Keywords: copper metallization; contact angle; seed copper layer; electrodeposition.

С повышением степени интеграции ИС роль металлизации резко возрастает. Она занимает все большую площадь и влияет на основные параметры схем: площадь кристалла, быстродействие, показатель качества, помехоустойчивость, надежность и др.

С уменьшением размеров быстродействие логических элементов возрастает, а быстродействие межсоединений системы металлизации снижается из-за уменьшения поперечного сечения проводников межсоединений и соответствующего увеличения погонного сопротивления. Из-за уменьшения расстояния между соседними проводниками, заполненного диэлектриком, также увеличивается электрическая емкость. В результате, начиная с некоторого уровня интеграции ИС, задержки сигналов в межсоединениях могут превышать задержки в самих логических элементах. С уменьшением поперечного сечения проводников межсоединений возникают и другие проблемы: снижается электромиграционная стойкость проводников, значительно усложняются технологические приемы травления при создании рисунка проводников с воспроизводимыми размерами и др. [1].

В большинстве современных ИС для эффективной разводки требуется большое количество слоев межсоединений, что приводит к образованию многоуровневой системы металлизации [1–3]. Необходимость в улучшении системы межсоединений обусловлена увеличением быстродействия устройств. При этом система не должна стать лимитирующим фактором производительности ИС. Это, как правило, достигается за счет снижения сопротивления и емкости межсоединений. Потребность в снижении сопротивления проводниковых межсоединений и повышении их электромиграционной стойкости привела к замене линий межсоединений алюминия медью: это, прежде всего, технологии «damascene» и «dual-damascene». По данным технологиям после формирования в межслойном диэлектрике канавок (в переходных окнах) одним из вакуумных способов последовательно осаждают тонкий затравочный слой меди и электрохимически заполняют канавки медью [3].

В России в настоящее время на ряде предприятий осваиваются технологии формирования УБИС с субмикронными и нанометровыми топологическими нормами. Однако отечественного опыта по практической реализации многоуровневой металлизации с медными межсоединениями в ИС такого уровня явно недостаточно. Актуальными становятся исследования в области создания медной металлизации полупроводниковых устройств с субмикронными и нанометровыми топологическими нормами.

В настоящей работе исследовано влияние состояния поверхности затравочного слоя меди на однородность электрохимического заполнения медью канавок с субмикронными латеральными размерами.

В качестве исходных выбраны кремниевые пластины с нанесенным на них слоем двуокиси кремния толщиной 0,3 мкм. Проводили фотолитографию и вытравливали в слое диэлектрика канавки с латеральным размером 0,15 мкм. Магнетронным способом на пластины осаждали затравочный слой меди толщиной 20 нм. Затем на отдельных пластинах непосредственно после формирования затравочного слоя меди, а также через определенные промежутки времени выдержки пластин на воздухе (с интервалом 1 ч в течение 10 ч и через 1 месяц) канавки на пластинах электрохимически заполняли медью. Медь осаждали в наиболее распространенном для этой цели электролите, представляющем собой водный раствор, содержащий сульфат меди 0,2 М, этилендиаминтетрауксусную кислоту 0,4 М, этиловый спирт 20 мл/л и добавку аммиака, обеспечивающую значение рН раствора, равное 10 [4].

В каждом случае перед электрохимическим осаждением меди исследовали гидрофильность и гидрофобность поверхности затравочного слоя меди, поскольку степень гидрофильности значительно влияет на однородность заполнения канавок медью. Степень гидрофильности определяли с использованием гониометра ЛК-1. Прибор предназначен для измерения краевого угла смачивания методом лежащей капли. Он позволяет получать изображение лежащей на подложке капли с помощью цифровой видеокамеры, экспортировать изображение в компьютер, определять краевой угол смачивания методом касательной и на основе описания формы контура капли уравнением Лапласа. Процедура определения краевого угла смачивания состояла в том, что на поверхность медного затравочного слоя наносили на различных участках под-

ложки дозированно 5 капель воды по 30 мкл, после чего в этих местах снимали показания краевого угла смачивания и усредняли их.

После заполнения канавок медью на каждой серии пластин делали боковой скол и с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ) исследовали однородность заполнения канавок.

В процессе исследования выявлена зависимость краевого угла смачивания капли воды, а по сути, степени гидрофильности поверхности затравочного слоя меди от времени выдержки пластин на воздухе. На рис.1, а–в приведены типичные изображения капель воды, нанесенных на поверхность слоя меди через 1 ч, 5 ч и через месяц соответственно.

На рис.2 представлена зависимость угла смачивания на затравочном слое меди от времени выдержки его на воздухе. Из полученных данных следует, что краевой угол смачивания капель воды с увеличением времени выдержки пластин на воздухе непрерывно растет, что свидетельствует о снижении степени гидрофильности поверхности затравочного слоя меди.

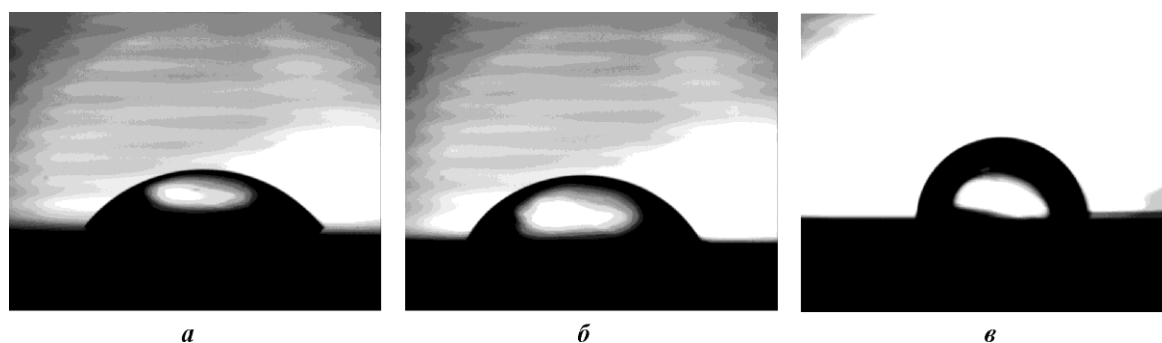


Рис.1. Внешний вид капель, нанесенных на поверхность затравочного слоя меди через 1 ч (а), 5 ч (б) и 1 месяц (в) выдержки слоя меди на воздухе

Равновесный макроскопический краевой угол φ определяется соотношением [5]

$$\cos\varphi = \frac{\sigma_{SV} - \sigma_{SL}}{\sigma_{LV}},$$

где σ_{SV} и σ_{SL} – поверхностные энергии на границах твердое тело/пар и твердое тело/жидкость; σ_{LV} – поверхностное натяжение жидкости. Анализ соотношения показывает, что гидрофобность наблюдается лишь на твердых поверхностях с низкими значениями σ_{SV} . С понижением σ_{SV} возрастает краевой угол. Наблюдается линейная зависимость краевого угла смачивания от времени выдержки затравочного слоя меди на воздухе (см. рис.2). Это связано с образованием на поверхности меди при длительной ее выдержке на воздухе сплошной сверхтонкой пленки оксида меди, характеризующейся гидрофобными свойствами. С повышением толщины пленки оксида меди величина σ_{SV} снижается и, следовательно, возрастает краевой угол смачивания [5]. В определенной степени это согласуется с данными, изложенными в [6]: при выдержке в атмосферных условиях увеличивающаяся со временем толщина оксидной пленки на слое меди удовлетворительно описывается в рамках линейного закона.

Проведенный РЭМ-анализ сколов структур, заполненных электрохимически медью, показал, что целесообразно оптимально выдерживать на воздухе структуры с затравочным слоем меди для обеспечения однородного (беспустотного) заполнения канавок медью. В качестве критерия для определения времени выдержки на воздухе структуры с затравочным слоем меди выбрана степень однородности (на качественном уровне) электрохимического заполнения медью субмикронных канавок. Анализ сколов структур, выдержанных на воздухе в течение 1–6 ч,



Рис.2. График зависимости угла краевого смачивания капли воды на поверхности слоя меди от времени выдержки пластин на воздухе

не показал наличия пустотных участков в субмикронных канавках (рис.3,а). У структур, выдержанных на воздухе более указанного времени, наблюдали нарушение однородности заполнения канавок медью. В канавках появляются одиночные пустотные наноразмерные области, сосредоточенные в основном у боковых поверхностей. В дальнейшем наблюдаются микроразмерные пустотные участки. На рис.3,б приведено РЭМ-изображение канавки, заполненной медью через 10 ч. Указанные дефекты обусловлены наличием на поверхности затравочного слоя меди пленки оксида, характеризующегося высокой гидрофобностью и препятствующего электрохимическому процессу однородного осаждения меди у боковых стенок канавок.

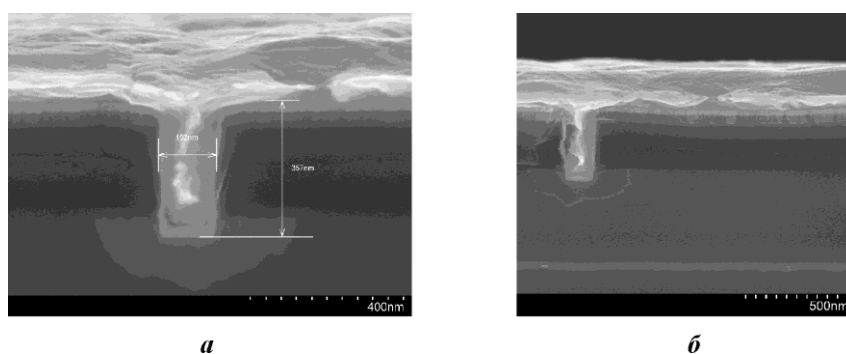


Рис.3. РЭМ-изображения канавки с субмикронными латеральными размерами, заполненной медью непосредственно после осаждения затравочного слоя меди (а), через 10 ч (б)

Таким образом, для однородного заполнения канавок медью в переходных окнах в межуровневых слоях диэлектриков при создании медной многоуровневой металлизации кремниевых ИС время межоперационного хранения пластин после осаждения затравочного слоя меди до заполнения канавок медью не должно превышать 6 ч.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.581.21.0007 от 03.10.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI58114X0007).

Литература

1. Громов Д.Г., Мочалов А.И., Сулимин А.Д., Шевяков В.И. Металлизация ультрабольших интегральных схем. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 277 с.
2. Doering R., Nishi Y. Handbook of semiconductor manufacturing technology // CRC Press Taylor & Francis Group. – 2007. – 1720 p.
3. Tsukimoto S., Ito K., Murakami M. Materials for ULSI metallization: Overview of electrical properties // Advanced Nanoscale ULSI Interconnects: Fundamentals and Applications, Springer Science; Business Media. – 2009. – P. 131–143.
4. Электроосаждение тонких слоев меди из комплексного электролита на компоненты микроэлектронных структур / Д.Ю. Тураев, В.А. Гвоздев, В.А. Бундина и др. // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2013. – №3. – С. 50–53.
5. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение // Успехи химии. – 2008. – №7. – С. 619–638.
6. Борисова Н.В., Суровой Э.П., Титов И.В. Закономерности изменения свойств пленок меди в процессе термообработки // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т.309. – №1. – С.86–90.

Поступило 4 августа 2015 г.

Белов Алексей Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и функциональной электроники МИЭТ. *Область научных интересов:* электрохимические процессы в нанoeлектронике, нанотехнологии.

Плаксин Валерий Геннадиевич – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем (ИЭМС) МИЭТ. *Область научных интересов:* микро- и нанoeлектроника.

Шевяков Василий Иванович – доктор технических наук, главный научный сотрудник кафедры ИЭМС МИЭТ. *Область научных интересов:* микро- и нанoeлектроника, сканирующая зондовая микроскопия.