

УДК 681.32

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ МЕДНЫХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

В.М. ДУБИН, В.Е. БОРИСЕНКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 5 декабря 2011

Электроосажденная медь заменила вакуумно-осажденный алюминий для межсоединений элементов интегральных микросхем, изготавливаемых с предельными нормами 130 нм и менее. Это позволило уменьшить электрическое сопротивление и повысить токнесущую способность металлизации. Установлено, что заполнение канавок и отверстий в межслойном диэлектрике при создании медной металлизации с помощью электроосаждения меди лимитируется скоростью супер-заполнения наноструктур. Описаны закономерности процесса формирования и свойства электроосажденных медных межсоединений.

*Ключевые слова:* микроэлектроника, нанотехнология, медные межсоединения, СБИС.

### Введение

Миниатюризация элементов интегральных микросхем (ИМС) и поиск новых материалов для многоуровневых межсоединений этих элементов направлены на уменьшение времени задержки (RC) для прохождения электрических сигналов при одновременном увеличении сопротивления материала межсоединений электромиграции. При этом стремятся уменьшить сопротивление и длину межсоединений, а также диэлектрическую проницаемость межуровневого диэлектрика. Многие годы алюминий служил металлом для межсоединений, которые формировали с помощью магнетронного распыления и реактивного ионного травления. Такие слои имеют хорошую адгезию к диоксиду кремния, и не приводят к образованию глубоких рекомбинационных уровней Al в запрещенной зоне кремния. Однако, электрическое сопротивление Al является относительно высоким (2,66 мкОм.см). Кроме того, из-за низкой температуры плавления, он обладает низким сопротивлением к электромиграции.

В 1997 году вакуумно-осажденный Al для межсоединений элементов ИМС был заменен на электроосажденную медь, которая имеет более низкое удельное сопротивление (1,67 мкОм.см), более высокую токнесущую способность, возможность дальнейшего масштабирования (т.е. уменьшения топологических размеров) [1, 2]. При одних и тех же размерах электромиграционное время жизни медных межсоединений приблизительно в сто раз больше, чем алюминиевых. Это позволяет им выдерживать более высокие плотности тока, что актуально при переходе к перспективным более компактным нанометровым межсоединениям. В связи с этим разработка технологии создания таких межсоединений является актуальной задачей. В данной статье обобщены результаты выполненных нами работ [3–9], а также работ других авторов в области электроосажденной медной металлизации сверхбольших ИМС [10–20].

### Технология

Концептуально медные многоуровневые межсоединения элементов ИМС предложено создавать одновременным заполнением канавок и отверстий межуровневого диэлектрика электроосаждением меди с последующей планаризацией образовавшегося рельефа химико-

механической полировкой [8, 10]. Этот процесс получил название «двойной дамасин» (dual damascene). Его основные этапы показаны на рис. 1.

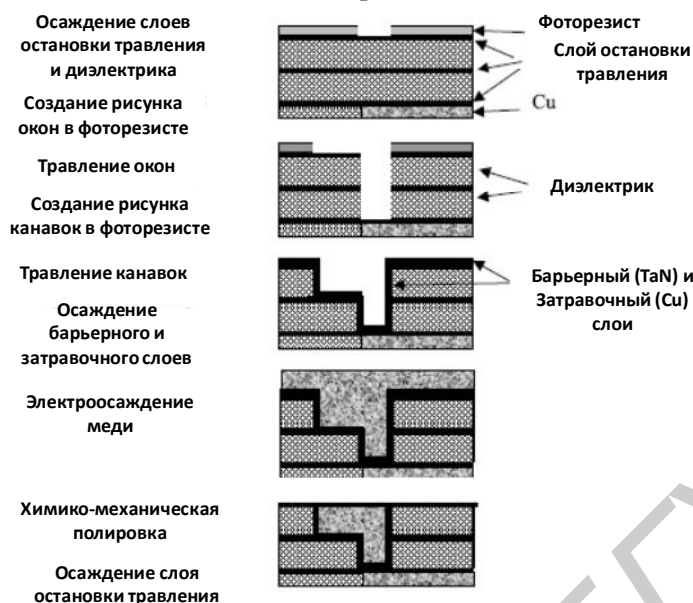


Рис. 1. Создание планарных медных межсоединений элементов ИМС методом двойного дамасина

Одна из основных проблем для двойного дамасина состоит в формировании планарной неотражающей поверхности после первой ступени создания рисунка, для того чтобы позволить использовать высоко разрешающую фотолитографию на второй ступени создания рисунка [11]. Другая проблема – это заполнение отверстий и канавок в диэлектрике (обычно на основе  $\text{SiO}_2$ ), имеющих высокое аспект соотношение [3, 10]. Это достигается использованием процесса электроосаждения меди с супер-заполняющей (снизу вверх) способностью [3–5].

Электроосаждение позволяет осаждать медь в диэлектрические отверстия и в находящиеся над ними канавки в едином процессе, устраняя таким образом границу раздела отверстия/канавка и позволяя значительно сократить время технологического процесса.

Правильный выбор добавок в электролит для электроосаждения меди обеспечивает супер-заполнение, т.е. рост осадка снизу вверх, приводящее к полному заполнению дамасин-структур, включая канавки и отверстия в диэлектрических слоях [3,5,10]. В рамках такого подхода нами предложены и опробованы условия гальваностатического электроосаждения меди в диапазоне плотностей тока  $5 - 50 \text{ mA/cm}^2$  из серно-кислых медных растворов, содержащих органические добавки с функциями ускорения и подавления осаждения меди таким образом, что ускорение осаждения осуществляется на дне структур, а подавление осаждения меди происходит на поверхности и углах дамасин структур, таким образом приводя к росту осадка снизу вверх, как показано на рис. 2.

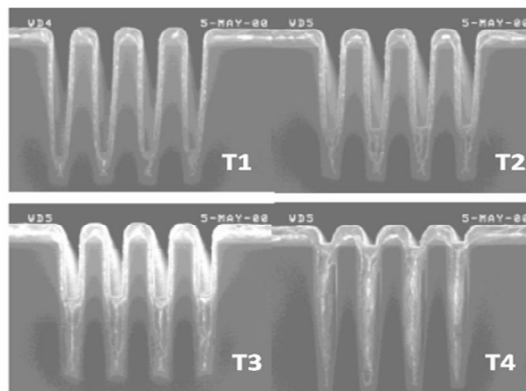


Рис. 2. Динамика процесса осаждения снизу вверх при заполнении <200 нм канавок (аспект соотношение 6:1). Осаждение меди на поверхности не наблюдалось, пока канавки не были заполнены с увеличением времени осаждения  $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$

Супер-заполнение объясняется локальным увеличением концентрации ускоряющей добавки, такой как бис (натрий сульфопропил)ди-сульфид (SPS) и продукта ее разложения – меркаптопропан сульфоновой кислоты (MPS) на дне узких структур за счет уменьшения площади поверхности в процессе заполнения структур [4, 14–17]. Кроме того, формируется диффузионный градиент подавляющих добавок за счет их потребления в процессе осаждения меди [18–19], приводящий к большей концентрации подавляющих добавок, такой как полиэтилен гликоль, на поверхности и верхней части дамасин-структур.

### Экспериментальные результаты

Заполнение канавок в межслойном диэлектрике на основе  $\text{SiO}_2$  шириной менее 100 нм в разработанных нами режимах проиллюстрировано на рис. 3. Осаждение меди на поверхности не происходит, пока канавки не заполняются полностью.

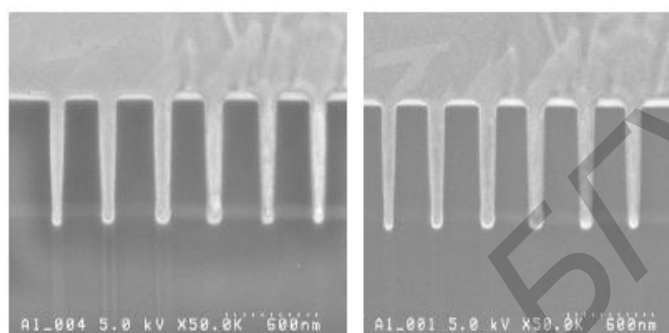


Рис. 3. Заполнение медью канавок в  $\text{SiO}_2$  шириной 70–100 нм с аспектом отношением более 10

По сравнению с вакуумным процессом осаждения, электроосаждение меди обеспечивает суперзаполнение канавок и отверстий, а также рост зерен в металлической пленке после электроосаждения. Эти явления позволяют улучшить надежность межсоединений. При надлежащем выборе органических добавок и условий электроосаждения, бездырочные дамасин-медные структуры могут быть получены с устранением поверхностных диффузионных путей для электромиграции меди.

Большие размеры зерен и бамбуковые типы микроструктур для электроосажденной меди имеют положительный эффект на межзеренную диффузию в явлении электромиграции. Кроме того, электроосажденная медь является более упругой, чем вакуумно-осажденные медные пленки. Более того, электроосажденные медные пленки содержат значительно больше двойниковых зерен по сравнению с магнетронно-распыленными и химически-осажденными из паровой фазы медными пленками. Двойниковые межзеренные границы известны как пути с низким коэффициентом диффузии, которые в меньшей степени подвержены электромиграции [4, 12].

Зерна, заполняющие целиком канавки, были обнаружены с помощью ионно-лучевого исследования медных дамасин структур, полученных при определенных условиях электроосаждения – см. рис. 4 [4, 8]. Средний размер зерна электроосажденной меди составляет примерно 1 микрон с логарифмическим стандартным отклонением 0,4 мкм.

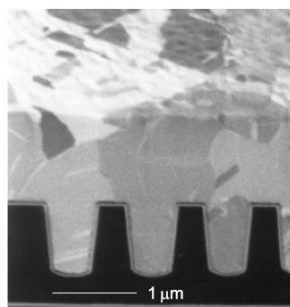


Рис. 4. Ионно-лучевое изображение канавок, заполненных электроосажденной медью

С увеличением размера зерна модуль эластичности достигает  $\sim 150$  ГПа, микротвердость уменьшается от 1,5 ГПа до 1 ГПа [6]. Если размер зерен увеличивается, то больший градиент напряжения образуется в соседних зернах, вызывая таким образом снижение внутреннего напряжения, необходимого для активации движения (течения) в этих зернах.

Установлено, что при отсутствии органических добавок в электролите, размер зерен в медной пленке главным образом контролируется структурой подложки. Использование более текстурированной подложки приводит к более мелким зернам в медных пленках [4]. Увеличение концентрации ускоряющих и подавляющих органических добавок в электролите, и степени текстурирования подложки уменьшает размер зерен в медной пленке с 1 мкм до 0,5 мкм. Адгезия электроосажденных медных пленок к подложкам была измерена с помощью разрывного теста и составила  $200 \text{ Кг/мм}^2$ . Разрыв при этом тесте не проходил по границе электроосажденная медь – затравочный слой [6].

Удельное сопротивление электроосажденной меди находится в диапазоне 1,8 – 2 мкОм.см при толщине пленки, превышающей 0,5 мкм. Удельное сопротивление меди увеличивается с уменьшением толщины пленки, как это показано на рис. 5 [7], однако его можно снизить примерно на 15 %, проведя низкотемпературный отжиг ( $\sim 200^\circ\text{C}$ , 30 мин).

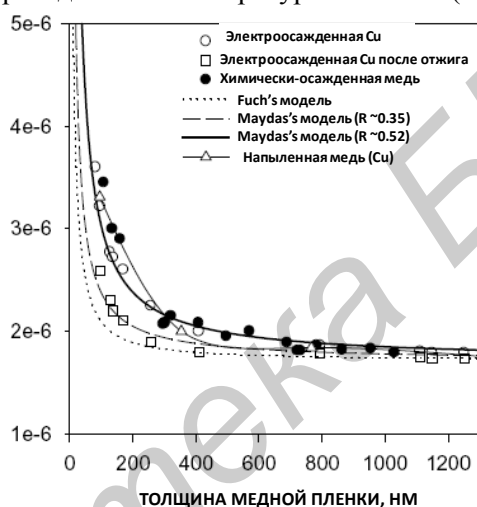


Рис. 5. Зависимость удельного сопротивления электроосажденной медной пленки от ее толщины в сравнении с магнетронно-распыленными и химически – осажденными медными пленками, а также расчетными данными по моделям Fuch и Mayadas (где  $R$  – коэффициент отражения на границе зерен)

Оценка вклада различных составляющих в общее сопротивление медных межсоединений [9] при 20 К для наиболее узких проводников является следующей: 29% от рассеяния на границах раздела (поверхностях), 25% от межзеренных границ, 30% от примесей и 16% от рассеяния на фонах (объемное сопротивление). При 300 К вклад составляющих общего сопротивления является следующим: 17% от рассеяния на границах раздела (поверхностях), 16% от межзеренных границ, 4% от примесей, и 63%-объемное сопротивление.

Было измерено переходное сопротивление для контактов Кельвина и цепочки из 25000 контактов. Отмечено низкое контактное сопротивление – 0,55 Ом и менее, для всех контактных отверстий между металлическими слоями в многоуровневых межсоединениях [6].

## Выводы

Разработанная технология электрохимического осаждения меди в канавки и отверстия межслойного диэлектрика интегральных микросхем обеспечивает создание наноразмерных межсоединений элементов интегральных микросхем с улучшенными по сравнению с традиционным алюминием и вакуумно-осажденной медью электрическими и структурными свойствами. Доминирующая  $\langle 111 \rangle$  текстура, большой размер зерен и низкие внутренние напряжения в медных пленках обеспечивают высокую надежность таких межсоединений, включая высокое сопротивление электромиграции и небольшое количество дефектов (дырок) при стрессовых испытаниях.

# FABRICATION OF NANODIMENSIONAL COPPER INTERCONNECTS IN INTEGRATED CIRCUITS

V.M. DUBIN, V.E. BORISENKO

## Abstract

Copper has replaced aluminum as material of choice for the fabrication of on-chip interconnects in sub-130 nm technology node to reduce the electrical resistivity and increase the electromigration resistance. The copper damascene process has several key steps including litho, etch, clean, barrier/seed deposition, electroplating and chemical-mechanical polishing. Of these steps, copper plating to fill the damascene structures is the most critical. It is limited by superfill rate of high aspect ratio features. This paper covers the scaling limits of copper electrofill as well as describes the improvements to electroplating technology to future technology node.

## Литература

1. *Edelstein D.C.* // IBM Res. Magazine. 1997. Vol. 16. № 4. P. 773.
2. *Rosenberg R., Edelstein D.C., Hu C.-K. et al.* // Annu. Rev. Mater. Sci. 2000. Vol. 30. P. 229.
3. *Dubin V.M., Ting C.H., Cheung R.* // International VLSI Multilevel Interconnect Conference, VMIC Catalog. 1997. №97 IMSIC-107, Santa Clara, CA. P. 69.
4. *Dubin V.M., Thomas C.D., Baxter N. et al.* // International Interconnect Technology Conference, IEEE Catalog Number 01EX461, San Francisco, CA, 2001. P. 271.
5. *Dubin V.M.* // Suppression-based Cu Electroplating Chemistry. Symposium F2: Electronics Packaging 3, PRiME 2008, 214<sup>th</sup> Fall Meeting of ECS. Honolulu, Hawaii. 2008.
6. *Dubin V.M., Cheung R.*, Cu Interconnect Technology. Japan, 1998.
7. *Dubin V.M.* // Microelectronic Engineering. 2003. Vol. 70. P. 461–469.
8. *Dubin V.M. et al.* // New Trends in Electrochemical Technology. CRC Press, 2005.
9. *Plombon J.J., Andideh E., Dubin V. et al.* // Applied Physics Letters. 2006. Vol. 89. P. 113124.
10. *Andricacos P.C., Uzoh C., Dukovic J.O. et al.* // IBM J. Res. Dev. 1998. Vol. 42. P. 567.
11. *Hussein M., Sivakumar S., Brain R. et al.* // International Interconnect Technology Conference 2002, Proceedings of the IEEE 2002 International. 2002. P. 18–20.
12. *Rosenberg R., Edelstein D.C., Hu C.-K. et al.* // Annu. Rev. Mater. Sci. Vol. 30, P. 229.
13. *Cabral C., Andricacos P.C., Cignac L.M. et al.* // Adv. Metallization Conf. Proc., ULSI XIV. 1998. Vol. 81.
14. *Plombon J.J., Andideh E., Dubin V. et al.* // Applied Physics Letters. 2006. Vol. 89. P. 113124.
15. *Reid J., Mayer S.* // Proc. of the Adv. Metallization Conf. MRS, Warrendale, PA. 2000. P. 53.
16. *Moffat T., Bonevich J., Huber W. et al.* // J. Electrochem. Soc. 2000. Vol. 147. P. 4524.
17. *Reid J., Mayer S., Broadbent E. et al.* // Solid State Technology. 2000. Vol. 43. P. 86.
18. *Josell D., Wheeler D., Huber W.H. et al.* // Physical Review Letters. 2001. Vol. 87.
19. *Dukovic J.O.* // IBM J. Res. Dev. 1993. Vol. 37. P. 125.
20. *West A.C.* // J. Electrochemical Society. 2000. Vol. 147. P. 227.