

А.А. Хмыль, проф., д-р техн. наук;

И.И. Кузьмар, канд. техн. наук, Л.К. Кушнер (БГУИР, г. Минск)

Л.И. Степанова, канд. хим. наук (БГУ, г. Минск)

С.К. Лазарук, д-р техн. наук А.В. Долбик (БГУИР, г. Минск)

## **МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ОТВЕРСТИЙ В КРЕМНИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ**

Трехмерная (3D) интеграция является одним из путей развития конструкции ИС, обеспечивающим более высокий уровень функциональности при минимальных размерах и максимальном быстродействии. Переход от планарного расположения элементов к объемному благодаря их вертикальному размещению позволяет повысить плотность монтажа и способствовать многократному сокращению затрат на производство ИС. Наиболее перспективны изделия, интегрированные на уровне полупроводниковых пластин и кристаллов с переходными отверстиями (TSV-технология). Использование TSV-технологии (Through Silicon Via) формирования трехмерных интегральных схем на основе их сборки в стек и заполнения металлом переходных отверстий в кремнии позволило убрать операцию разварки из технологической цепочки, не только обеспечив максимально возможный на сегодняшний день уровень интеграции ИС, но и снижение трудоемкости сборки, повышение быстродействия и снижение энергопотребления систем.

Для формирования межсоединений элементов ИС авторами использованы процессы электрохимического и химического осаждения металлов и сплавов из растворов, которые представляются весьма перспективными вследствие простоты, низкой стоимости оборудования для их реализации, селективности осаждения, возможности управления составом, физико-химическими и функциональными характеристиками осадков за счет введения в электролит специальных добавок и изменения режима электролиза.

Формирование кремниевых кристаллов с упорядоченными глухими отверстиями диаметром 5 мкм и глубиной 20-60 мкм проводили методом анодного травления кремния с последующим электрохимическим окислением поверхности. В отличие от традиционно используемых для нанесения барьерных (Ti, TiN, TaN) и затравочных (Au, TiW/Cu, Cu, W) слоев методов напыления либо физического осаждения из газовой фазы для формирования барьерно-затравочного слоя, препятствующего диффузии меди в объем кремния, и для улучшения адгезии было использовано химическое осаждение сплавов Ni-P [1]. Дополнительное введение в никель-фосфорные сплавы вольфрама при осаждении пленок Ni-W-P приводит к повышению термостойкости,

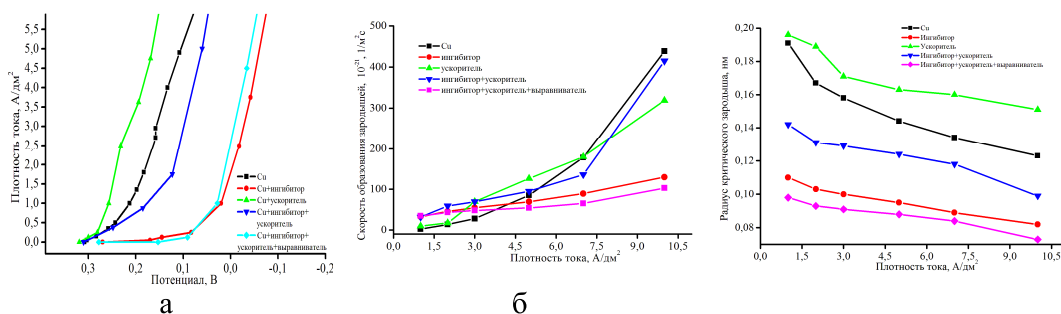
более стабильным резистивным параметрам при термообработке и пониженному коэффициенту термического сопротивления. Авторами экспериментально обоснованы оптимальные условия формирования химически осажденных пленок Ni-W-P толщиной 100-120 нм на поверхности диоксида кремния. Показано, что удовлетворительная прочность сцепления пленки сплава с полупроводником достигается только при ее осаждении на предварительно сформированную из водных растворов и термообработанную пленку Ni-P толщиной ~ 30 нм. Методом Оже-спектроскопии с ионным травлением показано, что двухслойные пленки Ni-P÷Ni-W-P тормозят термостимулируемую диффузию меди в объем полупроводника.

Важнейшей задачей электрохимического осаждения является бездефектное заполнение медью сформированных отверстий в межслойном диэлектрике. Электроосаждение меди проводили в сульфатном электролите, содержащем сернокислую медь, серную кислоту и хлорид-ион, концентрация которых зависела от геометрических размеров отверстий. При осаждении меди в отверстия на постоянном токе неоднородные условия диффузии, обусловленные неоднородным распределением плотности тока, которая во много раз выше на углах, чем в глубине, приводят к тому, что глухие отверстия зарастают, так и не заполняясь изнутри. В результате в отверстиях образуются пустоты, которые могут приводить к выходу из строя систем металлизации в процессе работы схем.

Условием беспустотного заполнения отверстий является превышение скорости осаждения меди внутри отверстия над скоростью меднения на его вершине и внешней поверхности, что обеспечивается электроосаждением с применением специальных добавок. Использование замедляющих и ускоряющих добавок, создающих барьерный слой в местах наибольших градиентов (на поверхности и углах), ингибирует там осаждение и ускоряет рост меди [2]. Скорость осаждения меди зависит от степени покрытия поверхности ингибитором и ускорителем.

Исследование кинетики электродных процессов при электроосаждении меди в присутствии выравнивающих добавок показало, что введение в состав электролита меднения полиэтиленгликоля (ингибитора) приводит к повышению катодной поляризации (рис. 1а). Являясь поверхностно-активным веществом, он облегчает проникновение электролита в узкие отверстия и смачивание стенок электролитом, позволяет повысить равномерность распределения осадка за счет облегчения условий массопереноса. Он адсорбируется на поверхности и формирует пассивирующий слой в присутствии ионов хлора, что и способствует формированию

мелкокристаллических покрытий, замедляя процесс заполнения отверстий.



**Рисунок 1 – Влияние состава электролита меднения на катодную поляризацию процесса осаждения (а) и параметры зародышеобразования (б, в) медных осадков**

Ускоритель (бис(3-сульфопропил)дисульфид)облегчает разряд ионов меди, повышает предельный ток и снижает катодную поляризацию. Он увеличивает скорость осаждения покрытия вследствие каталитического стимулирования процесса адсорбции ионов меди поверхностными промежуточными комплексами, также уменьшая блокировку поверхности ингибитором. В процессе электролиза ускоритель разлагается с образованием продуктов, ускоряющих процесс осаждения еще в большей степени.

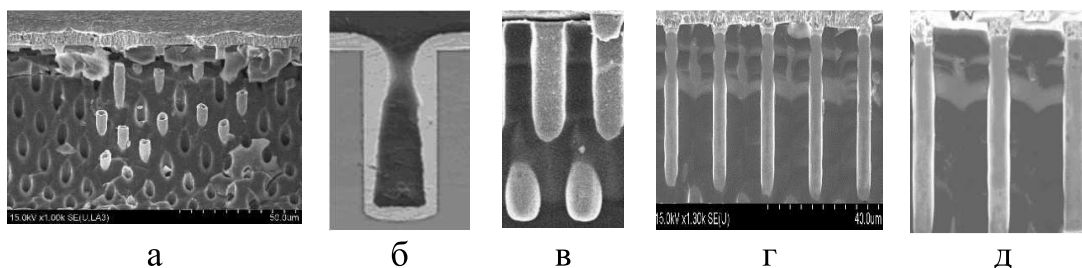
Степень покрытия поверхности катода ускоряющей добавкой благодаря высокому коэффициенту диффузии и медленной абсорбции увеличивается при осаждении меди в отверстия, где происходит уменьшение эффективной поверхности, приводящее к увеличению степени покрытия ингибитором по сравнению с плоской поверхностью. Поверхностная концентрация ингибитора обратно пропорциональна концентрации ускорителя, поэтому ингибиторы преимущественно пассивируют внешнюю часть окон, что приводит к осаждению снизу-вверх. Выравниватель повышает катодную поляризацию процесса осаждения и, накапливаясь преимущественно возле отрицательно заряженных участков с наибольшей напряженностью электрического поля на катоде (в верхних углах и на выступах поверхности), подавляет процесс осаждения меди и деактивирует молекулы ускорителя на поверхности [2].

Для электролита с выравнивающими добавками был обнаружен рост поляризации с перемешиванием электролита, повышающийся с увеличением скорости перемешивания, т. е. ускорение подачи добавок привело к усилению ингибирования процесса, что подтверждает адсорбционно-диффузионный механизм выравнивания поверхности. Расчет относительной выравнивающей способности показал, что в от-

личие от электролита без добавок, обеспечивающего выравнивание только при очень низких плотностях тока, используемый электролит обладает выравнивающей способностью и может быть использован при заполнении глухих отверстий.

Исследование закономерностей процесса зародышеобразования показало, что добавки снижают энергию образования и размер, а также увеличивают скорость образования зародышей и химическое средство с подложкой (рис.1 б, в).

На рис. 2 приведены примеры заполнения отверстий. Для заполнения отверстий с большим аспектным отношением ( $> 5$ ) разработаны программные режимы осаждения меди с постепенным увеличением плотности тока от 0,1 до 0,5-1 А/дм<sup>2</sup>, а также использовано электроосаждение на реверсированном токе.



**Рисунок 2 – Влияние состава электролита меднения на заполнение отверстий: а, б – в отсутствии добавок, в-д – в электролите с добавками, д – на реверсированном токе**

На основании проведенных исследований оптимизирован состав электролита меднения и отработаны программные режимы электрохимического заполнения медью переходных отверстий в кремнии при создании межсоединений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1 Степанова, Л. И. Формирование и металлизация сквозных пор в кремниевых подложках для трехмерных токопроводящих межсоединений / Л. И. Степанова, Т. И. Бодрых, С. К. Лазарук, А. В. Долбик, В. А. Лабунов // Материалы докладов 5-ой МНТК «Материалы и структуры современной электроники», 10–11 октября 2012 г., Минск, Беларусь. – 2012. – С. 94-97.

2 Wiley, M.J. J Electrochemical Society / WileyM.J., WestA.C. // 154(3), 2007.

3 Хмыль, А.А. Металлизация отверстий при создании межсоединений элементов ИМС / А.А. Хмыль, Л.К. Кушнер, И.И. Кузьмар, Л.И. Степанова, С.К. Лазарук, В.К. Василец // Сборник материалов Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума "Новые горизонты 2015", 26-27 ноября 2015 года, г. Минск, Республика Беларусь. – С. – 202-203.