

## ФОРМИРОВАНИЕ И МЕТАЛЛИЗАЦИЯ СКВОЗНЫХ ПОР В КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ ДЛЯ ТРЕХМЕРНЫХ ТОКОПРОВОДЯЩИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ

Л. И. Степанова<sup>1</sup>, Т. И. Бодрых<sup>1</sup>, С. К. Лазарук<sup>2</sup>,  
А. В. Долбик<sup>2</sup>, В. А. Лабунов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Учреждение Белорусского государственного университета научно-исследовательский институт физико-химических проблем,  
e-mail: [stepanovai@bsu.by](mailto:stepanovai@bsu.by)

<sup>2</sup> Учреждение образования Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
e-mail: [serg@nano.bsuir.edu.by](mailto:serg@nano.bsuir.edu.by)

В микроэлектронике наблюдается тенденция к увеличению степени интеграции и миниатюризации изделий. Появляется спрос на повышение функциональности микросистем (например, интеграция механической, оптической и биологической систем), улучшение их характеристик, повышение производительности и снижение стоимости. На сегодняшний день для обеспечения более высокого уровня функциональности при минимальных размерах и максимальном быстродействии остается единственным путем развития конструкции ИС — 3D-интеграция. Соединение кремниевых кристаллов по принципу трехмерных металлических межсоединений (принципу «этажерки») способно в значительной мере уменьшить конечную стоимость и увеличить надежность готовых изделий. Для реализации вертикальной системной интеграции необходима разработка технологий формирования упорядоченных сквозных отверстий в кремниевых кристаллах и их металлизации.

Метод формирования сквозных отверстий для выполнения вертикальной интеграции имеет ряд преимуществ перед методом монтажа кристаллов на пластину. К ним относятся более высокая плотность монтажа при сопоставимых размерах пластины, большая функциональность, лучшие характеристики (параллельность выводов, минимальная длина соединений, межсоединения не ограничивают скорость распространения сигнала), более низкое энергопотребление и меньшая стоимость конечного изделия. В результате применения данной технологии появляется возможность совмещения в одном корпусе произведенных по различным технологиям цифровых и аналоговых схем, памяти и микроэлектромеханических систем. В 2008 году мировой рынок 3D сборки составил 1,3 млрд. долларов, а к 2012 году ожидается пятикратный рост объема микроэлектронных изделий, изготовленных с применением технологии 3D сборки, после чего эта технология получит массовое использование. Согласно прогнозам в 2015 году его объем составит 42 млрд. долларов.

Для формирования кремниевых кристаллов с упорядоченными сквозными отверстиями авторами доклада предложено использовать электрохимическое анодирование кремния с заданным рисунком пор. В качестве исходных кремниевых подложек использовались пластины n-типа с ориентацией (100), легированные фосфором, с удельным сопротивлением 4,5 – 20 Ом см.

Разработанный технологический маршрут включает следующие блоки операций: формирование маски нитрида кремния на исходных кремниевых подложках; формирование затравочных ямок при помощи травления кремния в 10% растворе КОН;

формирование макропор глубиной 200-300 мкм при помощи электрохимического анодирования кремния; вскрытие пор путем механической шлифовки кремниевых подложек с тыльной стороны; окисление кремниевой поверхности.

Изготовлены экспериментальные кремниевые кристаллы со сквозными отверстиями упорядоченной формы. Показано, что предлагаемая технология может быть использована для кремниевых кристаллов с упорядоченными сквозными отверстиями с расстоянием между их центрами от 4 до 10 мкм, что позволяет использовать такие кристаллы в качестве исходных структур для трехмерных металлических межсоединений.

На рис.1 представлены микрофотографии структур на различных операциях разработанного технологического маршрута. Упорядоченное расположение макропор задается фотолитографической маской и распространяется на всю глубину фронта электрохимического анодирования. Проведенные исследования показали, что глубина пор может достигать 200-300 мкм.

Разработанный ранее технологический процесс нанесения меди в сквозные отверстия керамических подложек положен в основу данного исследования процесса нанесения меди на стенки микроотверстий в кремнии.

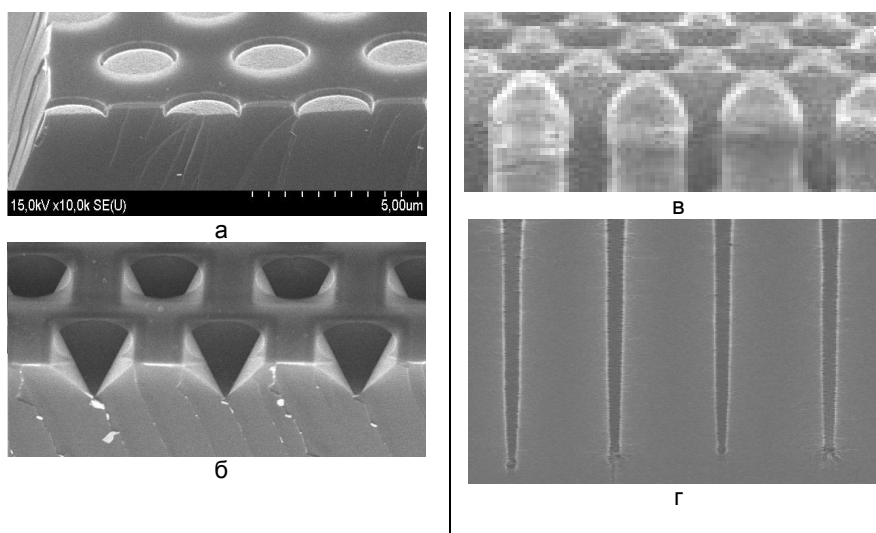


Рис. 1. Микрофотографии поперечного сечения кремниевой подложки на различных этапах технологического маршрута: а- формирование маски, б- формирование затравочных ямок, в, г - формирование макропор

В процессе исследований выяснилось, что закономерности химического осаждения металлов из растворов на кремний имеют свои особенности, связанные со способностью подложки к реакциям контактного обмена с ионами металлов из растворов на разных стадиях процесса осаждения, с одной стороны, и с высокой скоростью диффузии атомов меди в объем полупроводника, что требует нанесения промежуточного барьерного слоя, с другой стороны.

Установлены оптимальные составы растворов, временные и температурные параметры процессов сенсibilизации в растворах хлорида олова и активирования в растворе хлорида палладия, существенно отличающиеся от традиционно рекомендуемых для процессов химического осаждения металлов.

Показано, что в отличие от керамических подложек, где использовался высокотемпературный трилонатный раствор химического осаждения меди, для кремниевых подложек оптимальным является малоconцентрированный тартратный раствор химического осаждения, применяемый при температурах 20-40°C.

Определено, что отверстия покрываются медью на глубину до 10-20 мкм (на большей глубине покрытие фрагментарно), однако с ростом глубины уменьшается толщина пленки меди (рис. 2).

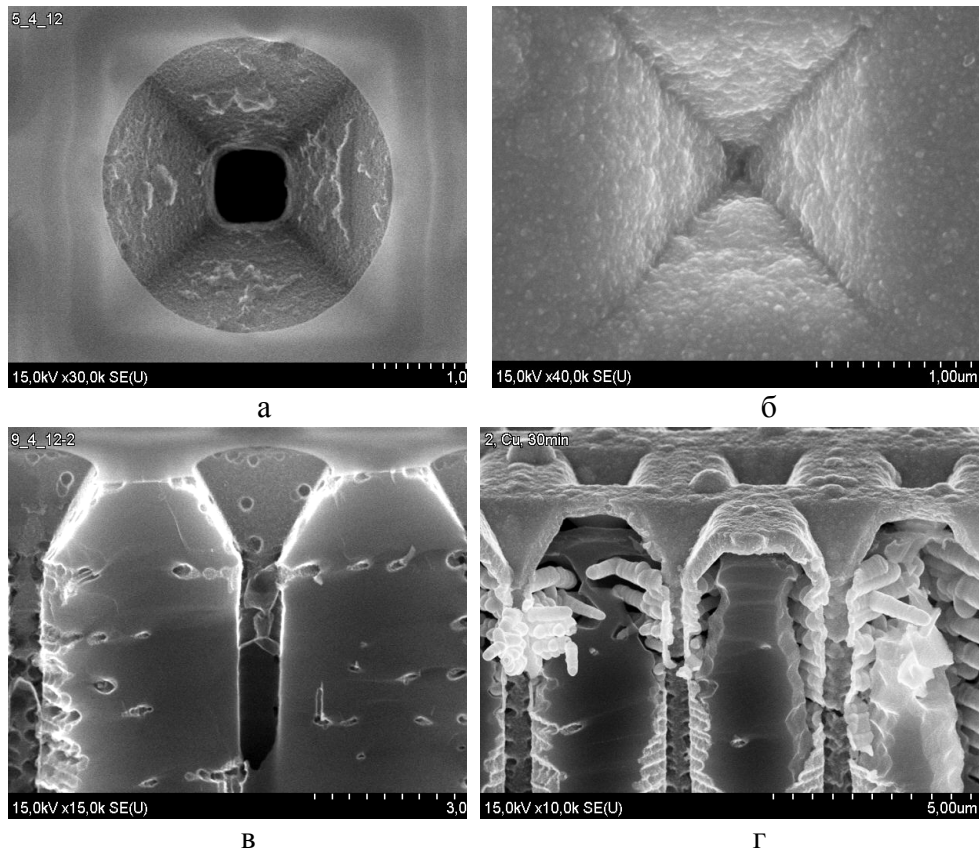


Рис. 2. ЭМ снимки отверстий в кремнии до (а,в) и после (б,г) заполнения медью с поверхности (а,б) и на срезе (в,г)

Показана возможность нанесения на активированные палладиевыми частицами кремниевые пластины тонких пленок сплавов Ni-W-P, Co-W-P, выполняющих одновременно функции адгезионного подслоя и барьерного слоя, препятствующего диффузии меди в объем полупроводника, из растворов химического осаждения. По предложенным методикам на кремниевых подложках получены одно-, двух- и трехслойные покрытия с удовлетворительной адгезией и поверхностным сопротивлением для лучших образцов в пределах от сотых до десятых долей Ом/□.