

КРЕМНИЕВЫЕ СТРУКТУРЫ С ГЛУБОКИМИ ОТВЕРСТИЯМИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

С. К. Лазарук¹, А. В. Долбик¹, В. Б. Высоцкий², А. С. Турцевич²,
С. В. Шведов², В. А. Лабунов¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники;

serg@nano.bsuir.edu.by

²ОАО «Интеграл»

При изготовлении современных ИС наиболее значимые технологические проблемы связаны с формированием металлических межсоединений. В частности, большое количество контактных площадок последнего уровня металлической разводки при их подсоединении к контактным площадкам корпусов ИС делает эту операцию дорогостоящей, что значительно увеличивает стоимость готового изделия и, кроме этого, снижается надежность такого устройства. Соединение кремниевых кристаллов по принципу трехмерных металлических межсоединений (по принципу «этажерки») способно в значительной мере уменьшить конечную стоимость и увеличить надежность готовых изделий.

Для реализации трехмерных металлических межсоединений необходимо формирование упорядоченных глубоких отверстий в кремниевых кристаллах.

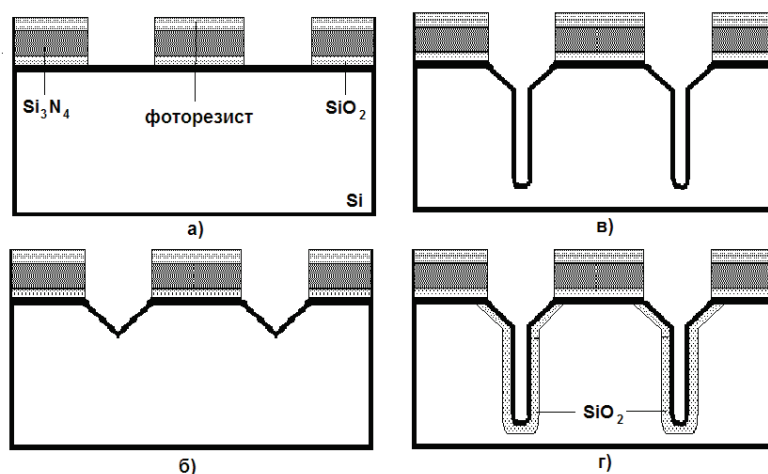


Рис.1. Основные технологические операции последовательного формирования макropористого кремния с заданным расположением пор: а) формирование маски; б) формирование затравочных ямок при помощи химического анизотропного травления; в) формирование макropористого кремния; г) формирование анодного оксида кремния внутри макropор

В данной работе разработан метод формирования упорядоченных макropор внутри кремниевых подложек. Основными этапами этого процесса являются следующие блоки операций: формирование маски нитрида кремния на кремниевой подложке, формирование пирамидальных ямок локальным анизотропным травлением кремния, формирование макropористого кремния электрохимическим анодированием с под-

светкой обратной стороны кремниевой подложки, формирование анодного оксида кремния при помощи электрохимического анодирования с подсветкой лицевой стороны кремниевой подложки (рис. 1).

В качестве исходных кремниевых подложек использовались пластины n-типа с ориентацией (100), легированные фосфором, с удельным сопротивлением 20 Ом см.

Формирование макропористого кремния проводилось в 5% водном растворе HF при постоянной плотности тока 4-12 мА/см², удерживаемой подстройкой освещения обратной стороны кремниевой подложки. Электрохимическое окисление кремния внутри глубоких отверстий выполняли в электролите на основе NH₄NO₃ в этиленгликоле при развертке напряжения формовки до 200 В со скоростью 3 В/мин. Сформированные структуры отжигали в среде аргона при температуре 450°C в течение 30 мин.

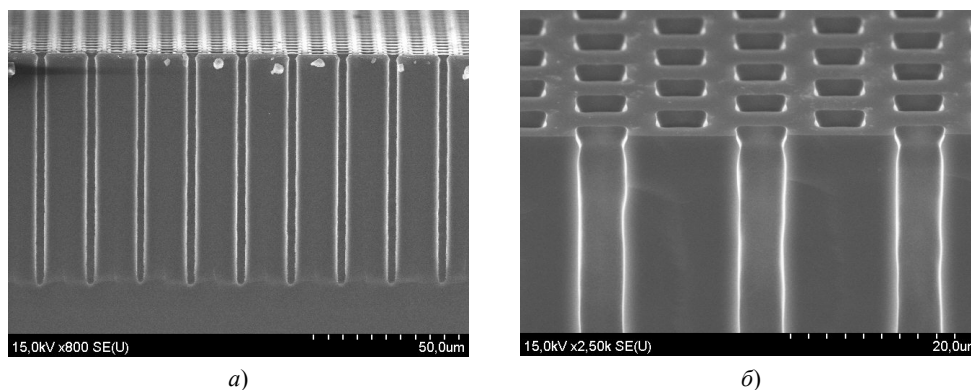


Рис. 2. Микрофотографии поперечного сечения кремниевой структуры:
а) поперечное сечение макропор; б) поперечное сечение верхней части структуры

На рис. 2 представлены микрофотографии поперечного сечения формируемых кремниевых структур. Как видно на фотографиях, структура макропор регулярная, что определяется рисунком фотолитографической маски. Глубина макропор может достигать 100-200 мкм (рис. 2-а), что определяется временем анодного процесса. Распределение диаметра макропор по глубине достаточно однородно. В частности, различие этого параметра на дне и в устье макропор не превышало 10% (рис. 2-б). Для реализации трехмерных металлических межсоединений внутри макропор необходимо обеспечить изоляцию кремниевой подложки от внутрипорового пространства. Для этой цели нами было проведено исследование низкотемпературного процесса анодного окисления. Низкая температура необходима в связи с тем, что при изготовлении металлических межсоединений должны использоваться технологические процессы с температурой обработки не более 500°C, чтобы не разрушить ранее сформированные пленочные структуры на поверхности кремниевого кристалла.

Исследование сформированного оксида внутри глубоких пор показало, что его толщина составила 100 нм, а разброс толщины по глубине пор не превышал 10% (рис. 3). Электрические характеристики исследуемого оксида оценивались измерениями токов утечки в электрохимической ячейке при напряжении формовки 100 В.

После термической обработки при температуре 450°C в течении 30 мин токи утечки уменьшались более чем на порядок и составляли менее 1 мкА/см².

Таким образом, проведенные исследования показали, что кремниевые структуры с глубокими отверстиями и изоляцией на поверхности этих отверстий соответствуют требованиям, предъявляемым к структурам, используемым для реализации на их основе трехмерных металлических межсоединений ИС [1]. Кроме вышеотмеченного применения массивы упорядоченных макропор в кремнии могут быть использованы в электронике при изготовлении конденсаторов повышенной емкости [2], фотонных кристаллов [3], МЭМС, использующих энергию горения пористого кремния [4], а также в качестве микроканальных пластин для электронных умножителей [5].

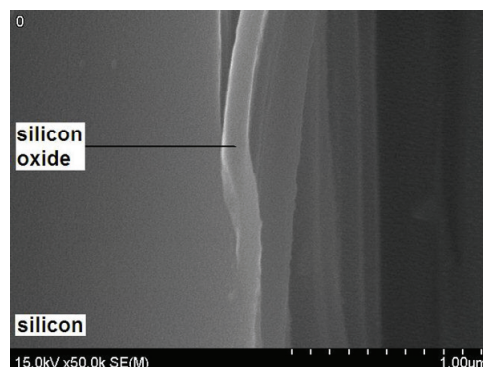


Рис.3. Микрофотографии поперечного сечения кремниевой подложки после низкотемпературного анодного окисления

В заключение следует отметить преимущества данной разработки по сравнению с используемым в электронной промышленности Bosch-методом формирования глубоких отверстий: 1) возможность формирования отверстий с аспектным числом до 100; 2) возможность формирования отверстий на большой площади обрабатываемой кремниевой поверхности, так как массивы макропор могут быть сформированы на всей лицевой поверхности кремниевой подложки; 3) низкая стоимость оборудования, используемого при реализации разработанной технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанова Л.И. Формирование и металлизация сквозных пор в кремниевых подложках для трехмерных токопроводящих межсоединений: материалы V международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники»/ Л.И. Степанова [и др.]. 10-11 октября 2012. Минск. 2012. С. 94.
2. Lehmann V. A novel capacitor technology based on porous silicon / V Lehmann [et al.] // Thin Solid Films. 1996. Vol. 276. P. 138.
3. Астрова Е.В. Формирование полосок двумерного фотонного кристалла путем одновременного фотоэлектрохимического травления щелей и макропор в кремнии / Е.В. Астрова, Г.В. Федулова, Е.В. Гушина // ФТП. 2010. Т. 44. С. 1666.
4. Лазарук С.К. МЭМС на основе энергии горения наноструктурированного кремния: сборник трудов IX Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» / С.К. Лазарук, А.В. Долбик, В.Б. Высоцкий, В.А. Лабунов. 7-10 июля 2014. Санкт-Петербург. 2014. С. 267.
5. Wang Wei. Note: A timing micro-channel plate detector with backside fast preamplifier / Wei Wang [et al.] // Rev. Sci. Instrum. 2014. Vol. 85. P. 036103.