

УДК 621.382

## ПОРИСТЫЙ КРЕМНИЙ КАК МАТЕРИАЛ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АДГЕЗИЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ К ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ

А.А. КЛЫШКО, В.П. БОНДАРЕНКО, М. БАЛУКАНИ\*

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

\*Sapienza – Università di Roma  
00185 Roma, Italia

Поступила в редакцию 4 июня 2009

Представлены результаты исследования адгезии металлических проводников к поверхности пористого кремния. Показано, что путем изменения пористости пористого кремния можно управлять величиной адгезии проводников в широких пределах. Полученные результаты легли в основу разработанной технологии создания новой контактной системы для проведения электрических измерений параметров СБИС. Метод управления адгезией пленок к кремниевым подложкам может также найти применение для формирования, удержания и последующего отделения от подложки таких элементов МЭМС, как гибкие проводники, металлические пленки, датчики и пр.

*Ключевые слова:* пористый кремний, адгезия, МЭМС, зондовая контактная система.

### Введение

Недавно одним из авторов настоящей работы была предложена и запатентована оригинальная конструкция зондовой системы для измерений электрических параметров СБИС [1]. Схематически конструкция этой системы представлена на рис. 1.

Отличительной особенностью предложенной зондовой системы является встраивание металлических проводников с контактными зондами в полимер, за счет которого фиксируется местоположение зондов и придается требуемая жесткость. Механические свойства зондовой системы в таком случае не зависят от прочности проводников, а практически полностью определяются свойствами полимера. Наш коллектив разработал процесс изготовления конструкции зондовой системы, основанный на технологии МЭМС. Технологический процесс схематически показан на рис. 2 и включает в себя следующие этапы:

1) формирование на несущей подложке матрицы зондов, соединенных с контактными площадками посредством проводников (рис. 2,а). Для этого используются традиционные методы микроэлектронной технологии, такие как фотолитография, плазмохимическое травление, осаждение металлов электрохимическим методом;

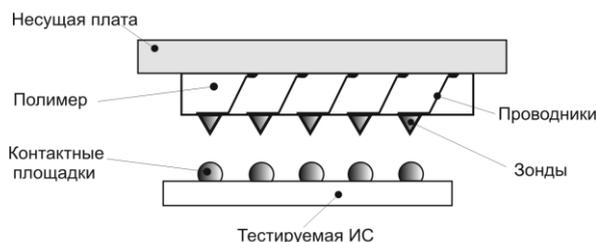


Рис. 1. Конструкция зондовой системы

2) припайка либо приварка контактных площадок проводников к печатной плате (рис. 2,б), предназначенной для разводки электрических сигналов от проводников к блоку измерения параметров;

3) разделение несущей подложки и печатной платы, с одновременным частичным отделением проводников от подложки (рис. 2,в);

4) заполнение пространства между подложкой и платой полимером (рис. 2,г) и удаление несущей подложки методом химического травления (рис. 2,д).

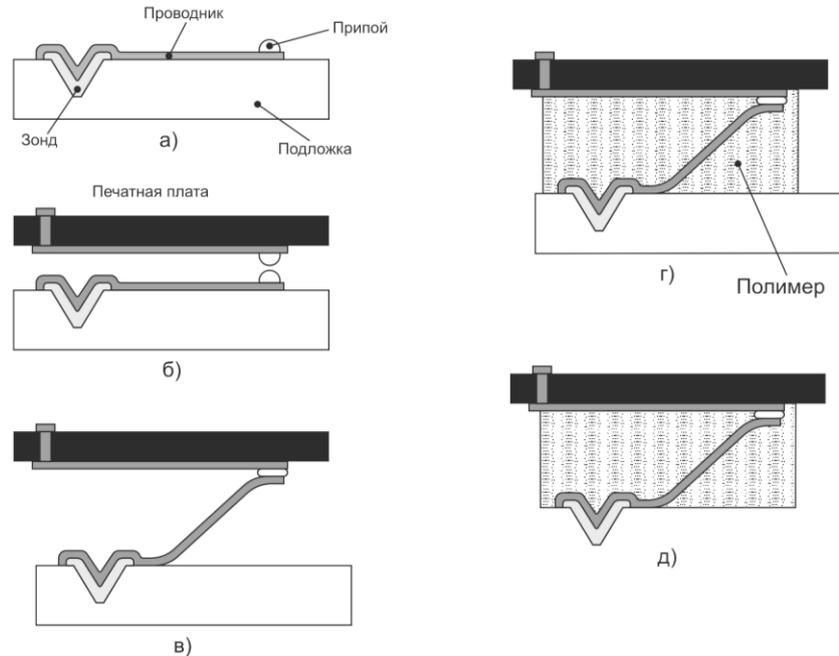


Рис. 2. Технологический процесс изготовления зондового контактного устройства

Для реализации предложенной конструкции зондовой системы необходимо было получить на подложке матрицу металлических проводников, присоединенных к зондам. При этом адгезия зондов и проводников к подложке должна быть различной. Проводники должны оставаться на подложке в течение времени их формирования и при припайке (этапы 1–2), а во время разделения (этап 3) проводники должны быть отделены от подложки, оставаясь при этом в контакте с зондом. Слишком высокая адгезия проводников к подложке может привести к обрыву проводника при его отделении, как показано на рис. 3. Зонд должен иметь очень высокую адгезию к подложке и не отделяться при заполнении полимером, которое производится под высоким давлением. Таким образом, необходимо было решить задачу управления величиной адгезии локальных металлических элементов в пределах их длины на одной подложке.

В качестве подложки для формирования металлических проводников используется кремниевая пластина, имеющую идеально гладкую поверхность и высокую планарность. Для решения задачи управления величиной адгезии металлических элементов к поверхности подложки было предложено формировать на ней локальные области пористого кремния (ПК). В этой связи для практического использования пористого кремния в качестве подслоя, увеличивающего адгезию, необходимо было экспериментально получить зависимости величины адгезии металлических элементов от параметров пористого кремния, а также от свойств самого металлического слоя.

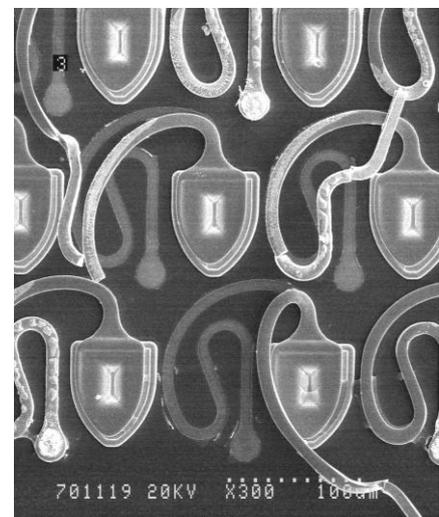


Рис. 3. Фотография подложки с зондами и проводниками после этапа разделения

## Методика приготовления образцов

Экспериментальные образцы были приготовлены следующим образом. На очищенные в перекисно-аммиачном растворе кремниевые пластины марки КЭС-0.01 с ориентацией (100) была нанесена пленка нитрида кремния и проведена фотолитография, определяющая конфигурацию будущих металлических проводников. Конфигурация проводников при фотолитографии задавалась с помощью специально разработанного фотошаблона. Шаблон представляет собой модули, состоящие из полосок длиной 1 см и шириной 100 мкм. Каждая полоска заканчивалась круглой контактной площадкой. Модульная организация полосок позволяла разделять пластину на несколько образцов и обрабатывать каждый образец в своем режиме. На открытых участках подложки через окна в нитридной маске было проведено локальное формирование пористого кремния методом электрохимического анодирования в 9%-м водно-спиртовом растворе фтористоводородной кислоты. Пористость пористого кремния задавалась величиной плотности тока в гальваностатическом режиме. Толщина пористого кремния задавалась длительностью процесса анодирования и во всех случаях составляла 2 мкм. Данное значение было выбрано на основании экспериментальных данных о проникновении никеля при осаждении из используемого раствора в мезопористый кремний (рис. 4) [2]. Из рис. 4 следует, что при выбранных условиях осаждения никель проникает на незначительную глубину при пористости около 60% и размерах пор порядка 30 нм.

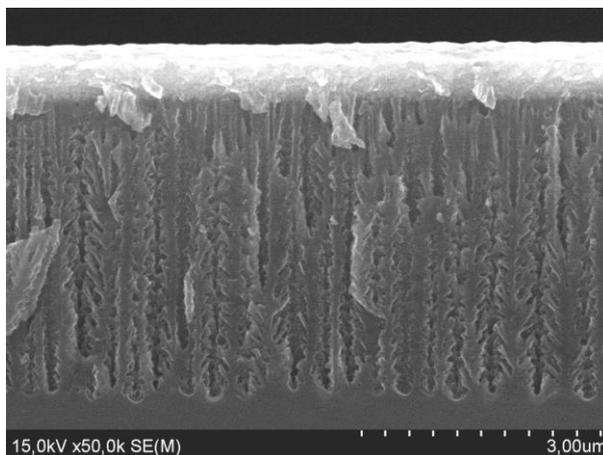


Рис. 4. Микрофотография поперечного скола образца пористого кремния с осажденным никелем

На следующем этапе проводилось электрохимическое осаждение трехслойных металлических проводников, состоящих из слоев никеля-меди-никеля общей толщиной 6 мкм либо 10 мкм. Толщина верхнего и нижнего никелевых слоев была постоянной и составляла 0,25 мкм. Для осаждения были использованы промышленные растворы на основе сульфаминового раствора никеля (Microfab Ni-110) и сернокислой меди (Atotech Cu).

## Методика проведения измерений

В настоящее время существует несколько способов измерения адгезии пленок. С точки зрения конечной цели измерений их можно разделить на две большие группы. Существуют способы, которые позволяют после серии измерений объяснить физику процесса и вычислить энергию поверхности раздела пленка/образец, составить модель и использовать полученные результаты на практике. Однако количество влияющих факторов делает данные эксперименты очень тонкими и сложными в интерпретации. Чаще эксперименты по измерению адгезии имеют смысл только применительно к исследуемой ситуации, а измерения ограничиваются определением зависимости силы адгезии от исследуемого фактора. В нашем случае необходимости в проведении сложных исследований не было, поэтому мы провели однофакторные исследования влияния пористости на силу сцепления элементов с подложкой.

Для измерения силы адгезии металлических проводников к пористому кремнию использовали метод, схема которого представлена

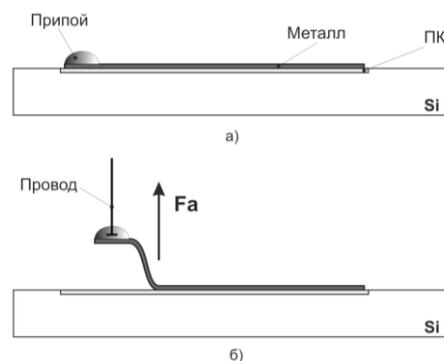


Рис. 5. Образцы для измерения адгезии проводников (а) и способ измерения (б)

на рис. 5. Для измерений использовали установку для тестирования материалов LRX PLUS фирмы Lloyd Instruments, которая позволяла производить медленное вертикальное перемещение припаянного проводника и регистрировать силу сопротивления разделению. Припайку провода к контактной площадке проводили при помощи легкоплавкого припоя. Измерения силы адгезии проводили в нескольких точках, соответствующих различным пористостям от 0% до 80%.

После измерений была рассчитана сила удельной адгезии, которая определяется как отношение силы адгезии к ширине полоски.

### Результаты и их обсуждение

Результаты измерений величины адгезии представлены на рис. 6. Величина адгезии к поверхности монокристаллического кремния (данной точке соответствует нулевая пористость), равная 0,25 МПа, принята за единицу.

Низкие значения пористости практически не влияют на величину адгезии. В работе [3] показано, что для использованных нами режимов приготовления пористого кремния различная величина пористости от 12% до 80% достигается изменением диаметра пор от 10 до 50 нм, в то время как их плотность практически одинакова и составляет  $2 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2$ . Малой пористости соответствует диаметр пор порядка 10–15 нм, что затрудняет проникновение ионов никеля из объема электролита в каналы пор и приводит к рыхлой структуре металла, осаждаемого в поры. Начиная с пористости порядка 20% поры практически полностью заполняются компактным никелем. При этом определяющую роль начинает играть увеличение эффективной поверхности сцепления пленки. Известно, что сила сцепления с поверхностью пропорциональна ее площади. При постоянной толщине пористость вещества будет пропорциональна квадрату диаметра пор. В то же время, площадь поверхности является величиной прямо пропорциональной диаметру пор. Следовательно, зависимость, наблюдаемая между адгезией и пористостью, должна иметь степенной характер (корень), что и наблюдается на графике до пористостей 55%. Спад на кривой при дальнейшем увеличении пористости объясняется тем, что сила адгезии начинает превышать прочность пористого кремния [4]. Действительно, при детальном изучении образцов после отрыва, было установлено, что при пористостях более 55% разрыв металлических проводников происходит преимущественно с разрушением слоя пористого кремния, в то время как при меньших пористостях происходило отделение металла от слоя ПК. Некоторое увеличение максимальной адгезии можно добиться применением режима формирования пористого кремния с градиентом пористости.

Представленная на рис. 6 вторая кривая соответствует толщине проводников 10 мкм и имеет аналогичный характер, однако проходит ниже. Это связано с тем, что на величину адгезии оказывают сильное влияние свойства самого покрытия, в частности, внутренние напряжения в металлической пленке. Сульфаминовый раствор никеля, а также промышленный раствор для осаждения меди, ориентированы на получение максимальной толщины покрытия. Имеющиеся в растворах поверхностно-активные вещества служат для сведения к минимуму внутренних напряжений.

Полученные результаты по определению адгезии металлических пленок к пористому кремнию были использованы для реализации процесса формирования металлических пленок на кремниевой подложке с различной адгезией проводников и зондов, что в итоге позволило изготовить и испытать работоспособную зондовую измерительную систему новой конструкции.

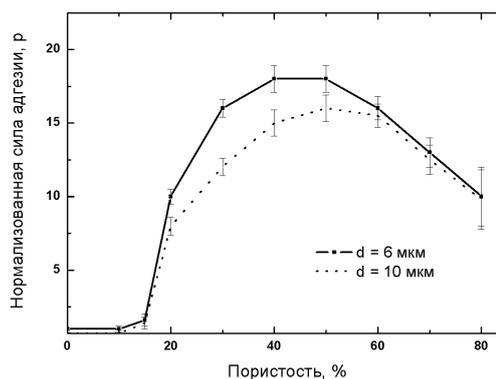


Рис. 6. Измеренная зависимость силы адгезии металлических проводников к поверхности кремниевой подложки в зависимости от пористости буферного слоя (добавить вторую кривую)

### **Заключение**

В результате проведенных экспериментов показано, что, целенаправленно изменяя пористость пористого кремния, можно формировать на его поверхности металлические проводники с величиной адгезии, задаваемой в широких пределах. Минимальное значение адгезии определяется в общем случае энергией связи между материалами с идеально ровными поверхностями и внутренними напряжениями в металле, максимальное значение ограничено механической прочностью пористого кремния.

## **POROUS SILICON AS A MEDIA FOR CONTROL OF METAL ELEMENTS ADHESION TO THE SURFACE OF SILICON**

A.A. KLYSHKO, V.P. BONDARENKO, M. BALUCANI

### **Abstract**

The adhesion of metal wires to the surface of porous silicon has been investigated. The adhesion is shown to be easily controllable over a wide range by varying the porosity of porous silicon. These results made it possible to realize on practice the novel technology of the probe card unit. The method can also be used for the formation and detachment from a substrate of the certain MEMS elements such as flexible wires, metal films, sensors, etc.

### **Литература**

1. *Balucani M.* // U.S. Patent Application № 20080012114. 17.01.2008.
2. *Долгий А.Л., Клышко А.А., Бондаренко В.П.* // Докл. БГУИР. 2009. № 1. С. 65–70.
3. *Холостов К.И., Филатова О.С., Бондаренко В.П.* // Докл. БГУИР. 2008. № 4. С. 72–76.
4. *Klyshko A., Balucani M., Ferrari A.* // Superlattices and Microstructures. 2009. Vol. 44, № 4–5. P. 374.