

О. В. Чуйко, мл. науч. сотр., Е. В. Кузнецов, нач. лаб., М. И. Савельев, мл. науч. сотр.,  
Н. В. Комарова, канд. хим. наук, ст. науч. сотр., М. С. Сироткина, канд. хим. наук, науч. сотр.,  
НПК "Технологический центр", г. Москва  
e-mail: O.Chuyko@tcen.ru

## ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОФЛЮИДНОЙ КМОП-СИСТЕМЫ С НАНОПРОВОЛОЧНЫМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

*Представлен технологический маршрут изготовления микросистемы, объединяющей в себе интегральное изготовление нанопроволочного ISFET-биосенсора, совмещенного с КМОП-технологией, и микрофлюидной системы на этапе корпусирования и герметизации ИС.*

**Ключевые слова:** ионно-чувствительный полевой транзистор, кремниевые наноструктуры, микрофлюидная система, система "lab on chip", корпусирование, герметизация

Современные тенденции в развитии аналитических систем направлены на улучшение методов химического анализа за счет автоматизации процессов и миниатюризации приборов. Широким направлением являются разработки в области создания микросистем, получивших название "лаборатория на чипе". Данное понятие включает в себя исследования по интеграции стандартных химических протоколов анализа в рамках единой компактной микросистемы, позволяющей после ввода пробы получить результат анализа [1]. "Лаборатория на чипе" в современном представлении состоит из микрофлюидной системы, отвечающей за пробоподготовку образца, и интегрированного сенсорного элемента, отвечающего за детекцию целевых соединений [2]. Использование в качестве чувствительных элементов микро- и наносенсоров, разработанных на основе КМОП-технологий, позволяет в перспективе, с одной стороны, интегрировать системы обработки сигнала и чувствительные элементы в едином кристалле, с другой стороны — проводить параллельный анализ многих веществ за счет создания высокоплотных массивов детектирующих на разные вещества элементов.

В данной работе представлен технологический маршрут изготовления микросистемы, объединяющей в себе интегральное изготовление нанопроволочного ионно-чувствительного полевого транзистора (ISFET) биосенсора [3], совмещенного с КМОП-технологией по проектным нормам 1,2 мкм, и микрофлюидной системы на этапе корпусирования и герметизации интегральной схемы (ИС).

Формирование наноструктур осуществлялось методом "top-down" ("сверху-вниз"). Технология изготовления сенсорных элементов на основе кремниевых наноструктур включает в себя комбинацию двух основных этапов: формирование кремниевых структур с наноразмерами и последовательность операций КМОП-процесса.

Нанопроволочные транзисторные структуры формировались на структурах кремний-на-изоляторе (КНИ) способом утонения полосок рабочего слоя кремния, сформированных методами фотолитографии и селективного травления с вариацией по длине и ширине проволок. Диаметр нанопроволок составил от 20...100 нм (рис. 1).

Параллельно блоку утонения последовательно стандартных технологических операций формируются *p*-

и *n*-канальные транзисторы с длиной канала от 0,5 до 10 мкм, ширина канала соответствует диаметру проволок. Отдельным блоком технологических операций формировалась область вскрытия проволоки с помощью последовательности операций травления межслойного диэлектрика и скрытого SiO<sub>2</sub>, в результате чего проволочная структура становится "подвешенной" относительно слоя скрытого оксида кремния. Образовавшийся воздушный зазор обеспечивает непосредственное взаимодействие чувствительного элемента с аналитическим раствором (рис. 2).

Технологический маршрут формирования наноструктур вписывается в стандартный КМОП-процесс и позволяет упростить технологический маршрут, увеличивая тем самым воспроизводимость и выход годных структур.

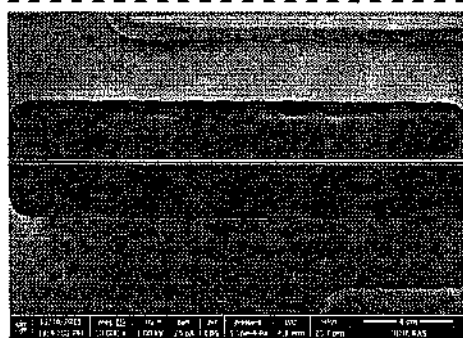


Рис. 1. РЭМ-изображение нанопроволоки

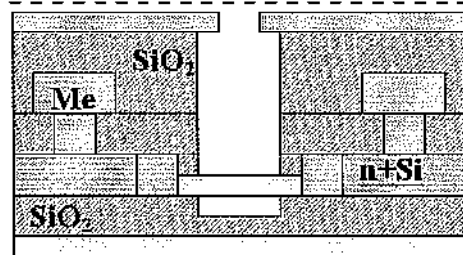


Рис. 2. Условное изображение нанопроволочной структуры

В результате были получены полностью обедненные КНИ-транзисторы. Анализ различных кремниевых ISFET-транзисторов показал, что наибольшей зарядовой чувствительностью обладают полностью обедненные структуры, выполненные на основе КНИ-технологии. Методами численного моделирования показано, что наибольшей чувствительностью обладают нанопроволочные структуры собственного типа проводимости с минимальным возможным диаметром и минимальной толщиной затворного оксида [4]. Затворный диэлектрик был получен методом химического окисления в растворе  $H_2O_2$ .

После функционального контроля выходных параметров чувствительных КМОП-элементов на основе наноструктур кремния следует этап корпусирования.

Технологический маршрут сборки подразумевает, что после интегрального изготовления ISFET-транзисторов выполняется резка на отдельные кристаллы, что является отдельной технологической задачей из-за хрупкости наноструктур, находящихся в составе пластины. Для реализации маршрута была предложена механическая сквозная резка пластины алмазным диском с использованием антистатической ленты для защиты наноструктур. Защитная лента позволяет изолировать кристаллы от потока воды и избежать дополнительных загрязнений, а также снизить влияние электростатического заряда. Так как в процессе механической резки накапливается электростатический заряд, для его устранения на заключительной стадии необходимо провести отжиг отдельных кристаллов.

На рис. 3 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) структур — зависимость тока стока транзистора  $I_{DS}$  от напряжения на электроде сравнения  $V_G$  при подаче постоянного напряжения на сток-исток транзистора  $V_{DS}$  на различных этапах сборки: до резки, после резки, после заключительного отжига структур.

На рис. 3 видно, что операция отжига отдельных кристаллов позволяет практически нивелировать влияние электростатического заряда.

Корпусирование ИС с наноструктурами включает в себя ряд технологических операций:

- обработка корпусов;
- приклейка кристаллов;
- разварка алюминиевой проволоки;
- интеграция золотого электрода сравнения в процессе сборки;
- обрубка выводной рамки корпуса.

Перечисленные технологические операции отрабатывались в целях совмещения технологии стандартной сборки ИС с формированием микрофлюидной микросистемы с помощью 3D-печати. После корпусирования осуществляется контроль контактов, измерение ВАХ ИС по схеме разварки с помощью устройства контактирования.

Для интеграции процесса формирования микрофлюидной системы в маршрут сборки нанопроволочного ISFET была разработана технология "прямой печати", являющаяся подвидом струйной 3D-печати. Суть технологии заключается в нанесении на поверхность ИС жертвенного слоя, являющегося трехмерным рисунком из вязкоэластичных органических чернил. Структура жертвенного слоя совпадает с геометрией будущей микрофлюидной системы. После формирования трехмерной структуры из жертвенного слоя проводят операцию герметизации ИС с использованием эпоксидной смолы.

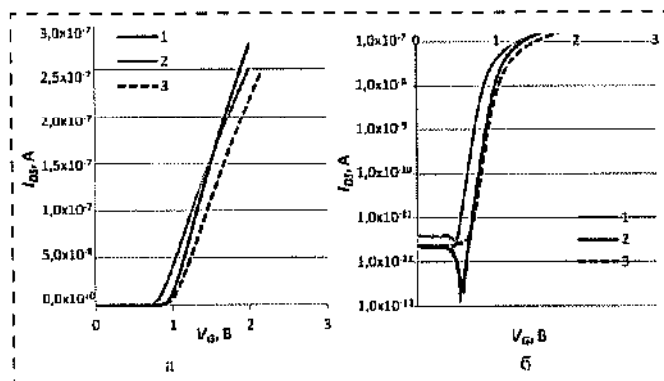


Рис. 3. ВАХ  $n$ -канального ISFET  $I_{DS} = f(V_G)$  при  $V_{DS} = 0,1$  В: а — линейный; б — логарифмический масштабы; 1 — до резки, 2 — после резки, 3 — после отжига. Длина канала 10 мкм, ширина канала 100 нм

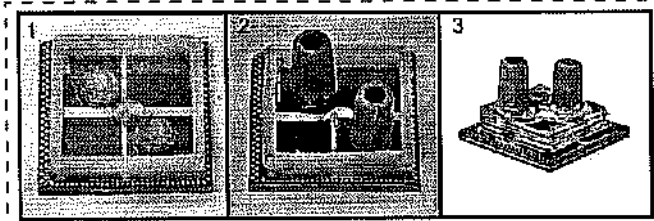


Рис. 4. Этапы формирования МФС на поверхности кристалла: 1 — нанесение жертвенного слоя до монтажа интерфейсов; 2 — монтаж интерфейсов; 3 — герметизация эпоксидной смолой и вытравливание жертвенного слоя

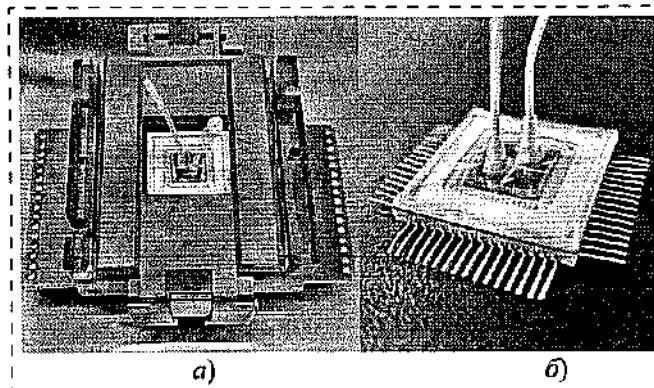


Рис. 5. Микросистема в составе контактирующего устройства (а); изображение кристалла в корпусе после герметизации и формирования микрофлюидной системы (б)

После отверждения эпоксидного материала жертвенный слой удаляют с помощью химического травления. В результате в теле полимера образуется микрофлюидная система с микроканалами, соединенная двумя выходами для доставки пробы в место локализации чувствительного элемента. Минимальная ширина канала микрофлюидной системы составляет 120 мкм.

Этапы формирования МФС представлены на рис. 4.

Для визуального контроля герметичности и функциональности микрофлюидной системы в целом экспериментальные образцы подключались к прокачивающей помпе и подавался модельный окрашенный раствор. Система считается рабочей, если жидкость свободно прохо-

дит через микрофлюидную систему без утечек, а ИС сохраняет свою функциональность. Контроль выходных параметров микросистемы осуществляется с помощью устройства контактирования, позволяющего контролировать ВАХ ИС и реализовывать различные схемотехнические решения (рис. 5).

Разработанная технология поддерживает модульный принцип конструирования, что позволяет создавать нужную конфигурацию микросистемы в зависимости от ее назначения.

В результате проведенных исследований была разработана технология создания микросистем широкого класса для решения самых различных исследовательских задач аналитической химии, биохимии, молекулярной биологии и медицины.

На базе разработанной технологии нами был создан сенсор для обнаружения следовых количеств фосфорорганических токсичных веществ в окружающей среде.

При проведении экспериментальных исследований использовалось оборудование ЦКП "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" на базе НПК "Технологический Центр".

#### Список литературы

1. Prakash S. Nanofluidics: systems and applications // *Sensors Journal*, IEEE. 2008. V. 8, N 5. P. 441–450.
2. Abgrall P., Gue A. M. Lab-on-chip technologies: making a microfluidic network and coupling it into a complete microsystem—a review // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2007. V. 17, N 5. P. 15–25.
3. Кузнецов А. Е., Чуйко О. В. Исследование кремниевых наноструктур в качестве pH-чувствительных элементов // *Нано- и микросистемная техника*. 2011. № 12. С. 40–42.
4. Кузнецов Е. В., Чуйко О. В. Исследование чувствительности pH-сенсоров на основе кремниевых МДП-нанотранзисторов // *Изв. вузов. Сер. "Электроника"*. 2013. № 3 (101). С. 53–59.

O. V. Chuyko, Junior Researcher, E. V. Kuznetsov, Head of Lab., M. I. Saveliev, Junior Researcher, N. V. Komarova, Senior Researcher, M. S. Sirotkina, Researcher associate, Scientific-Manufacturing Complex "Technological Center", MIET

## TECHNOLOGY INTEGRATED CMOS MICROFLUIDIC SYSTEMS WITH NANOWIRE SENSING ELEMENTS

*In this article the technological process fabrication microsystem that combines integral manufacturing nanowire ISFET biosensor combined with CMOS technology and microfluidic system in step assembly and sealing IC is presented.*

**Keywords:** ISFET, pH, silicon nanowire, microfluidic system, system "lab on chip", assembly, sealing

УДК 621.394.618

В. А. Ваньков, инженер-конструктор, Н. С. Земляничков, мл. науч. сотр., В. С. Суханов, нач. лаб., НПК "Технологический центр" МИЭТ  
e-mail: V. Vankov@tcen.ru

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОДХОДЫ СОЗДАНИЯ МИНИАТЮРНЫХ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ

*Рассмотрен подход к созданию приемопередающих модулей, построенных по современной 2,5D-технологии сборки с использованием кремниевой подложки. Технология "система-в-корпусе" создания микросистемных устройств показывает широкие перспективы как альтернатива технологии "система-на-кристалле". Одной из разновидностей технологии является 2,5D-технология сборки, где в качестве несущей применяется кремниевая подложка со сквозными каналами коммутации.*

**Ключевые слова:** приемопередающие модули, система-на-кристалле, 2,5D-технология сборки, целостность сигналов, надежность

Постоянное увеличение потребности в новых и современных устройствах с все меньшими размерами, расширенной функциональностью, улучшенной производительностью и низкой стоимостью заставляет полупроводниковую промышленность разрабатывать и совершенствовать инновационные технологии создания таких микросистемных устройств.

Двумя основными технологиями, удовлетворяющими заявленным требованиям, являются "система-на-кристалле" (SoC) и "система-в-корпусе" (SiP). В данной работе рассматривается подход к созданию приемопередающих модулей, построенных по современной 2,5D-технологии сборки с использованием кремниевой подложки. Объединение на одной подложке нескольких микро-