

УДК 548:53+534.22

АКУСТОЭЛЕКТРОННЫЙ НАНОБИОСЕНСОР

© 2019 г. А. Е. Мельников^{1, *}, Е. С. Солдатов^{1, 3}, И. Е. Кузнецова², В. В. Колесов²,
В. И. Анисимкин², В. В. Кашин²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение научный Институт радиоэлектроники
имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Москва, Россия

³Центр квантовых технологий МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: alexen96@gmail.com

Разработана технология, реализующая две разномасштабные структуры на монокристаллической пьезоэлектрической подложке ниобата лития. С помощью методов фотолитографии изготовлена система встречно-штыревых электродов для акустической линии задержки, работающей в диапазоне 2–3 МГц, совмещенная с нанострандьюсерами с характерным размером 60–80 нм, изготовленными с использованием негативной электронно-лучевой нанолитографии.

DOI: 10.1134/S0367676519010162

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработка и создание гибридных сенсоров является достаточно актуальной задачей. Как известно, гибридной системой называют систему, содержащую компоненты, выполненные с использованием различных материалов и технологий, соединенных между собой на единой конструктивной основе. В конструкции гибридных сенсоров могут совмещаться различные технологии: электронные, микроволновые, магнитные, акустические, оптические, химические, биологические и др.

Одним из важнейших направлений современных фундаментальных и прикладных исследований в физике твердого тела является формирование и исследование структур, характерные размеры которых составляют единицы или десятки нанометров. Основными функциональными элементами таких объектов (наноструктур), как правило, являются отдельные наночастицы, большие молекулы или атомные кластеры. Сверхмалые размеры наноструктур приводят к пространственному квантованию и необычным физическим свойствам. Изучение этих свойств дает ключ к пониманию фундаментальных пространственных ограничений при разработке электронных и магнитных приборов, с одной стороны, и порождает новые принципы построения электронных устройств, полноценно использующих квантовую природу наноструктур, с другой стороны.

Одной из особенностей некоторых сенсорных устройств является то, что гибридные системы сочетают в себе органические и неорганические

элементы. Обычно это различные функциональные элементы (электроды, биосенсоры, каналы), которые выполнены из различных материалов (металлов, кремния, органических элементов).

Использование методов акустоэлектроники и интеграция нанобиосенсоров с акустическими линиями задержки в рамках планарных технологий дают возможность создания акустобионаноэлектронных датчиков с повышенной чувствительностью и селективностью [1].

Совмещение в гибридных сенсорах акустоэлектронных технологий с нанoeлектронными и молекулярными устройствами позволит реализовать новые качества:

– реализовать акустоэлектронный эффект (увлечение электронов акустическими фоновыми) в низкоразмерных электронных устройствах и разработку сенсоров на их основе;

– обеспечить повышение чувствительности нанoeлектронных сенсоров за счет использования модуляционного режима работы на основе акустического пилот-сигнала и переход от квазистационарного измерения к измерению на частоте модуляции (уменьшение влияния низкочастотных шумов);

– обеспечить “разжижение” двойного электрического слоя (увеличение коэффициентов диффузии отдельных компонентов в приповерхностном слое жидкости) Гельмгольца (ДЭС) при использовании зарядочувствительных нанoeлектронных структур в электрохимических и биохимических

мических сенсорах, например, в одномолекулярных секвенаторах ДНК;

- позволит создать устройства экспресс-анализа биологических жидкостей малого объема, решить вопросы детекции микробных клеток и проводить мониторинг их чувствительности к различным антибиотикам;

- обеспечить эффективную очистку матричной линейки нанoeлектронных сенсоров, работающих в составе комбинированных устройств типа электронный нос и электронный язык.

Следует отметить, что биосенсоры в своем большинстве гораздо более избирательны, чем обычные химические сенсоры. Используя современные достижения биотехнологии и нанoeлектроники, можно разрабатывать новые оригинальные нанoeлектронные приборы для биомедицинских технологий дистанционного контроля.

Биосенсоры – это аналитические устройства, использующие биологические материалы для “узнавания” определенных молекул и выдающие информацию об их присутствии и количестве в виде электрического сигнала. Принцип анализа, реализуемый в биосенсорах, основан на том, что биоматериал, иммобилизованный на физических датчиках, при взаимодействии с анализируемыми соединениями генерирует зависимый от концентрации сигнал, регистрируемый преобразователем. В настоящее время в большинстве конструкций биосенсоров используется кондуктометрический принцип, основанный на измерении электрофизических параметров устройства.

Известно, что все биосенсоры содержат два основных функциональных блока: биоселективный элемент, использующий различные биологические структуры, и физический преобразователь (трансдюсер), трансформирующий концентрационную зависимость в электронный сигнал [2].

В работе разработан акустоэлектрический чип-сенсор на основе монокристаллической пластины ниобата лития толщиной 0.35 мм с системой встречно-штыревых преобразователей (ВШП) для возбуждения соответствующей акустической волны, который вставляется в чип-холдер со стандартным разъемом ножевого типа. Такой акустоэлектронный чип-сенсор может использоваться в двух модификациях:

- в первом варианте исследуемый биообъект располагается между ВШП-структурами.

- во втором варианте реализуется гибридный вариант сенсора, в котором ВШП-структура совмещена с нанoeлектронным датчиком-трансдюсером, расположенным в акустически озвученной области в центральной части чип-сенсора.

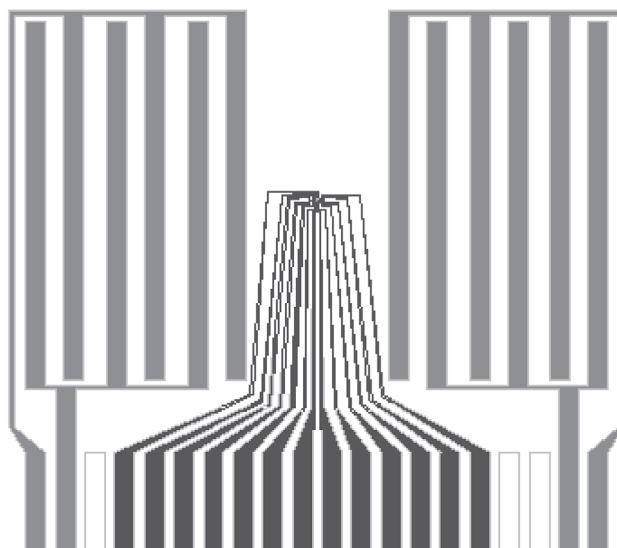


Рис. 1. Топология электродов чип сенсора.

МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ

В данной работе был реализован второй вариант чип-сенсора (рис. 1). Для создания чип-сенсора с планарной наноструктурой нанoeлектронного трансдюсера применялись технологии магнетронного напыления, стандартной фото- и электронной литографии с использованием различных резистов, а также ионного травления.

Для создания структуры использовалась монокристаллическая пластина ниобата лития толщиной 0.35 мм. Геометрические размеры подложки 2×1.5 см. Для создания системы ВШП-структур и подводящих электродов использовался позитивный фоторезист Shepley 1805, который наносили в течение 30 с на центрифуге, вращающейся со скоростью 3000 оборотов в минуту. Далее подложку с нанесенным на нее фоторезистом совмещали с заранее изготовленным фотошаблоном и засвечивали ее в ультрафиолете на установке МА750 в течение 15 с. Удаляли фоторезист в водном растворе щелочи (гидроксидакалия) с концентрацией $0.01 \text{ мг} \cdot \text{мл}^{-1}$ в течение 1 минуты. Затем, образец промывали в деионизированной воде и высушивали.

Далее в полученные “окна” из фоторезиста на установке Leybold L-560 методом термического напыления при давлении не ниже 10^{-6} мбар наносили золотые электроды толщиной 100 нм. Поскольку у золота с ниобатом лития плохая адгезия, сначала наносили подслои хрома толщиной 5–10 нм для ее улучшения. В результате данного технологического процесса получалась готовая система пленочных встречно-штыревых преобразователей на поверхности ниобата лития с системой пленочных проводников для подключения нанoeлектронного трансдюсера, который

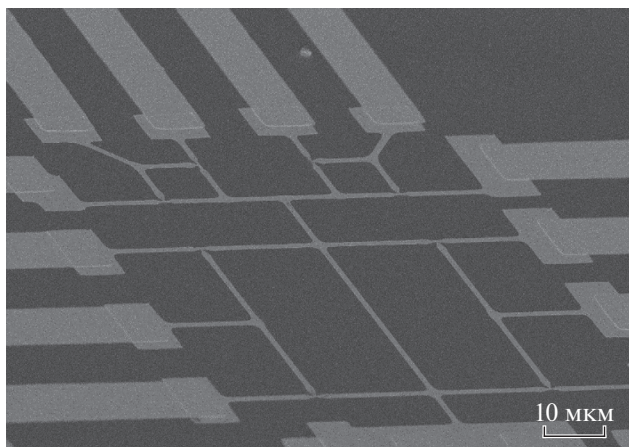


Рис. 2. Вид наноструктуры чип сенсора, полученный с помощью электронного микроскопа.

формировался в акустически озвученной области 80×80 микрон в центре чипа (рис. 1). Для этого в указанной области создавалась наноструктура, являющаяся прообразом трансдюсера и представляющая собой систему узких (60 нм) тонкопленочных нанопроводов. Это выполняли путем электронно-лучевой нанолитографии с помощью микроскопа Supra 40 с литографической приставкой Raith Elphy Quantum.

Поскольку материал подложки — ниобат лития является диэлектриком, отработанная технология позитивной литографии в электронном микроскопе для него неприменима, так как, заряжаясь, подложка будет отклонять электронный луч, что не позволяло получить высокое разрешение, необходимое для получения нанопроводов нужной ширины менее 100 нм. По этой причине была разработана технология негативной нанолитографии, заключающаяся в том, что на подложку с готовыми подводящими проводами и структурой ВШП на установке Z-400 наносится пленка золота толщиной 15 нм путем магнетронного напыления, затем подложка покрывается негативным резистом MA-N. Полученный слой золота обеспечивает сток электрического заряда, приносимого лучом микроскопа, что позволяет проводить в электронном микроскопе нанолитографию с необходимой разрешающей способностью, в результате которой создается маска структуры нано-трансдюсера. Затем, после проявления резиста, золотая пленка стравливается с открывшейся поверхности в плазме аргона в установке Z-400 при давлении $5 \cdot 10^{-3}$ мбар в течение 170 с. Это время было выбрано с таким расчетом, чтобы его хватило для удаления со всех неэкспонированных участков подложки пленки золота толщиной только 15 нм, но при этом лежащие под ней ранее сформированные толстые золотые подводящие к наноструктуре провода не были удале-

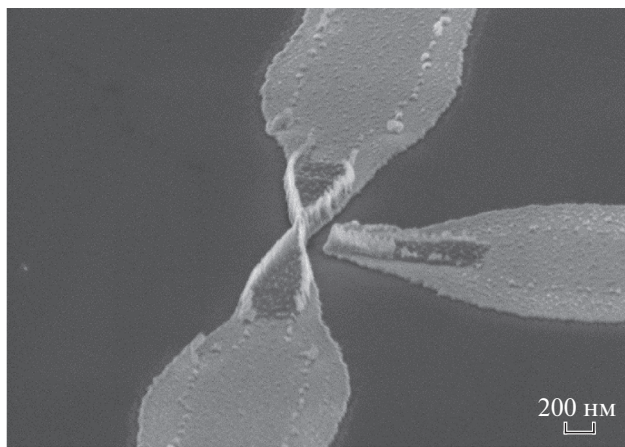


Рис. 3. Типичный вид заготовки электродов трансдюсера.

ны. После этого этапа маска из засвеченного резиста удаляется в кислородной плазме.

В результате была сформирована пленочная система нанопроводов шириной 60–80 нм (рис. 2, 3), соединенных с контактными площадками на периферии подложки, служащая заготовкой для формирования электродов нанодатчика в трансдюсере, конкретный вид и параметры которых определяются типом и свойствами изучаемого биологического объекта.

Таким образом, в работе была разработана технология, реализующая две разномасштабные структуры на монокристаллической пьезоэлектрической подложке ниобата лития. С помощью методов фотолитографии изготовлена система встречно-штыревых электродов для акустической линии задержки, работающей в диапазоне 2–3 МГц, и с использованием негативной электронно-лучевой литографии были изготовлены системы нанопроводов шириной 60–80 нм, служащие основой для формирования наноэлектродов сенсорных нанодатчиков (трансдюсеров) при изготовлении чувствительных элементов целого семейства акустоэлектронных наносенсоров для использования в биологии, медицине, охране окружающей среды и других областях.

Основная цель работы — создание и исследование основы электродной базы гибридных акустаноэлектронных датчиков на различных типах акустических волн (волн в пластинах, объемных волнах и т.д.). Созданные датчики будут апробированы при проведении исследований динамики образования биогенных наночастиц в биологических растворах, динамики взаимодействия микробных клеток с антибиотиками, а также при мониторинге биоспецифических реакций. На основании разработанных терминальных сенсорных устройств могут быть реализованы ин-

формационные системы для определения характера и степени загрязнения окружающей среды.

Таким образом, в данной работе была разработана технология изготовления на диэлектрических подложках ниобата лития тонкопленочных металлических микроструктур встречно-штыревых электродов для акустической линии задержки диапазона 2–3 МГц, совмещенных с изготовленными методами негативной электронно-лучевой литографии наноструктурами тонкопленочных металлических нанопроводов шириной 60–80 нм, служащих основой/заготовками электродов нанотрансдюсеров акустоэлектронных наносенсоров.

Разработка и создание топологии планарной электродной структуры для гибридного акустонаэлектронного сенсора выполнена при поддержке проекта РФФ № 18-49-08005. Разработка создания туннельных наноструктур выполнена при поддержке проекта РФФИ № 16-07-00933.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Polyakov V.V.* Advanced nano- and piezoelectric materials and their applications. New York: Nova Science Publishers, 2014. P. 19.
2. *Scognamiglio V., Pezzotti G., Pezzotti I. et al.* // *Microchim. Acta.* 2010. V. 170. P. 215.