

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТУННЕЛЬНОГО НЭМС ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

© 2011 г. Н.Н. БАЛАН, П.А. ЛУЧНИКОВ, Е.Н. ИВАШОВ

Московский государственный институт электроники и математики  
(технический университет),  
Московский государственный технический университет радиотехники,  
электроники и автоматики

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в микроэлектронных МЭМС создано широкое разнообразие интегральных датчиков совмещающих на одном чипе электронную и механическую части, изготавливаемые в едином технологическом процессе. Перспективными датчиками являются так называемые «нанозлектромеханические системы» (НЭМС). Это микросистемы, функционирование которых основано на физических эффектах, наблюдаемых на наноразмерных расстояниях, как, например, действие атомных сил или туннелирование электронов. Для создания таких датчиков с успехом используется оборудование для производства кремниевых микро- и наноприборов.

**В настоящей работе** рассмотрены принципы создания электродных покрытий основных элементов нанозлектромеханического преобразователя с диафрагменным упругим чувствительным элементом (УЧЭ) с использованием эффекта электронного туннелирования при использовании процессов КМОП технологии.

Разработаны специальные технологические процессы, предназначенные для формирования электродов туннельного преобразователя на основе тугоплавкого материала – силицида платины, обладающего по сравнению с прочими материалами рядом преимуществ, таких как химическая стойкость, необходимые туннельные характеристики, а также удобство литографии. Разработанный технологический маршрут изготовления интегрального туннельного нанозлектромеханического преобразователя полностью совместим со стандартным технологическим маршрутом КМОП, что позволяет делать возможной однокристалльную интеграцию преобразователя с управляющими электронными схемами.

### ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТУННЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Конструкция туннельного преобразователя на основе упругого чувствительного элемента УЧЭ диафрагменного типа, представлена на Рис. 1.

Преобразователь размером кристалла 4x4 мм выполняется на основе монокристаллического кремния 1 методами кремниевой КМОП технологии. При механическом воздействии (давления) на чувствительный элемент – диафрагму изменяется величина рабочего зазора (РЗ), что приводит к изменению величины туннельного тока между электродами 2 «игла» –электрод 4 диафрагмы 3. По изменению величины туннельного тока можно судить о величине механического давления на диафрагму 3.

Основными рабочими элементами конструкции являются острый туннельный электрод 2 «игла» и диафрагма 3 из поликремния с электродом 4.

Прибор изготавливается по планарной технологии применяемой в производстве полупроводниковых КМОП СБИС, что позволяет интеграции микромеханического устройства с электронными схемами управления на одном полупроводниковом кристалле.

Основные стадии технологии изготовления поликремниевого УЧЭ диафрагменного типа туннельного преобразователя представлены на Рис. 2.

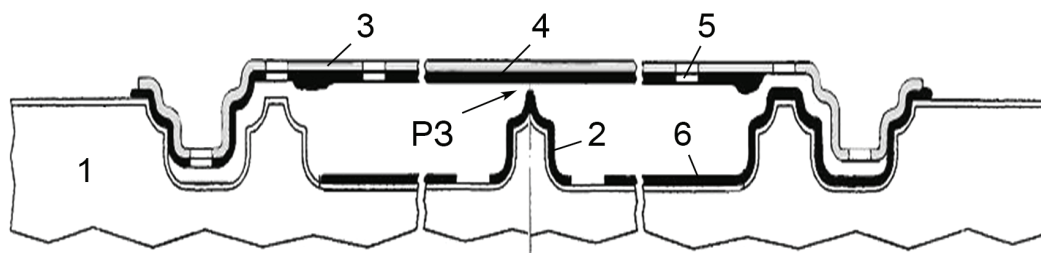


Рис. 1. Схема разреза конструкции микромеханического устройства диафрагменного типа на одном кристалле.

1 – монокристалл кремния (100), подложка; 2 – электропроводящий слой туннельной «иглы»; 3 – управляющий полевой электрод; 4 – основной несущий слой диафрагмы из поликремния; 5 – проводящий слой – электрод диафрагмы; 6 – технологические и акустические отверстия; 7 – изолирующий слой пиролитического  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; P3 – рабочая зона туннельной эмиссии – зазор.

На первой стадии в кремниевой подложке путем ряда технологических операций [1, 2] формируется рельеф, состоящий из углубления и ультраострой заготовки для электрода – «иглы», после чего на структуру наносится изолирующий слой нитрида кремния (Рис. 2, а-б).

Далее наносится металлизация игольчатого электрода «иглы» и отклоняющего электрода на диафрагме, затем – «жертвенный» слой (фосфоросиликатное стекло – ФСС или борофосфоросиликатное стекло – БФСС) (Рис. 2, в-з), верхняя граница которого совпадает с острием «иглы», что достигается либо оплавлением поверхности стекла или методом химико-механической планаризации.

Эти операции необходимы, в частности, по причине конформного осаждения ФСС (или БФСС), когда его рельеф повторяет рельеф покрываемой поверхности. Было бы недопустимо оставлять поверхность «жертвенного» слоя не планаризованной, так как ее рельеф определяет форму наносимой позднее поликремниевой диафрагмы.

Возможна также замена операции планаризации рядом других технологических операций, направленных на минимизацию выступов, образующихся на поверхности жертвенного слоя над сформированными в кремнии «иглами». Смысл этих операций состоит в плазмохимическом удалении выступающих участков жертвенного слоя.

На поверхность планаризованного «жертвенного» слоя может быть нанесен дополнительный слой оксида кремния, задающий начальное расстояние между диафрагмой и электродом «иглой», после чего наносится слой металлизации (Рис. 2, д), на который (после нанесения изолирующего слоя), в свою очередь, осаждается основной слой поликремния толщиной 0,6 мкм, обеспечивающий жесткостные свойства диафрагмы (Рис. 2, е).

Для травления жертвенного слоя могут использоваться как традиционные растворы на основе плавиковой кислоты, так и перекисно-аммиачные растворы, обладающие большей селективностью к травлению  $\text{SiO}_2$  по сравнению с кислотными травителями, но значительно уступающие последним в скорости травления.

После вытравливания «жертвенного» слоя борофосфоросиликатного стекла (Рис. 2, ж) через специально предусмотренные технологические отверстия, осуществляется промывка и высушивание УЧЭ преобразователя.

**Основными рабочими элементами** электрической части УЧЭ монолитного туннельного преобразователя являются электроды рабочего зазора (P3) «игла» –

электрод диафрагмы, в котором наблюдаются процессы протекания туннельного тока и характеризуют измерительные характеристики самого преобразователя. Постоянство электрических характеристик этих электродов в процессе работы (в течение срока службы) преобразователя должны быть обеспечены качеством их материалов.

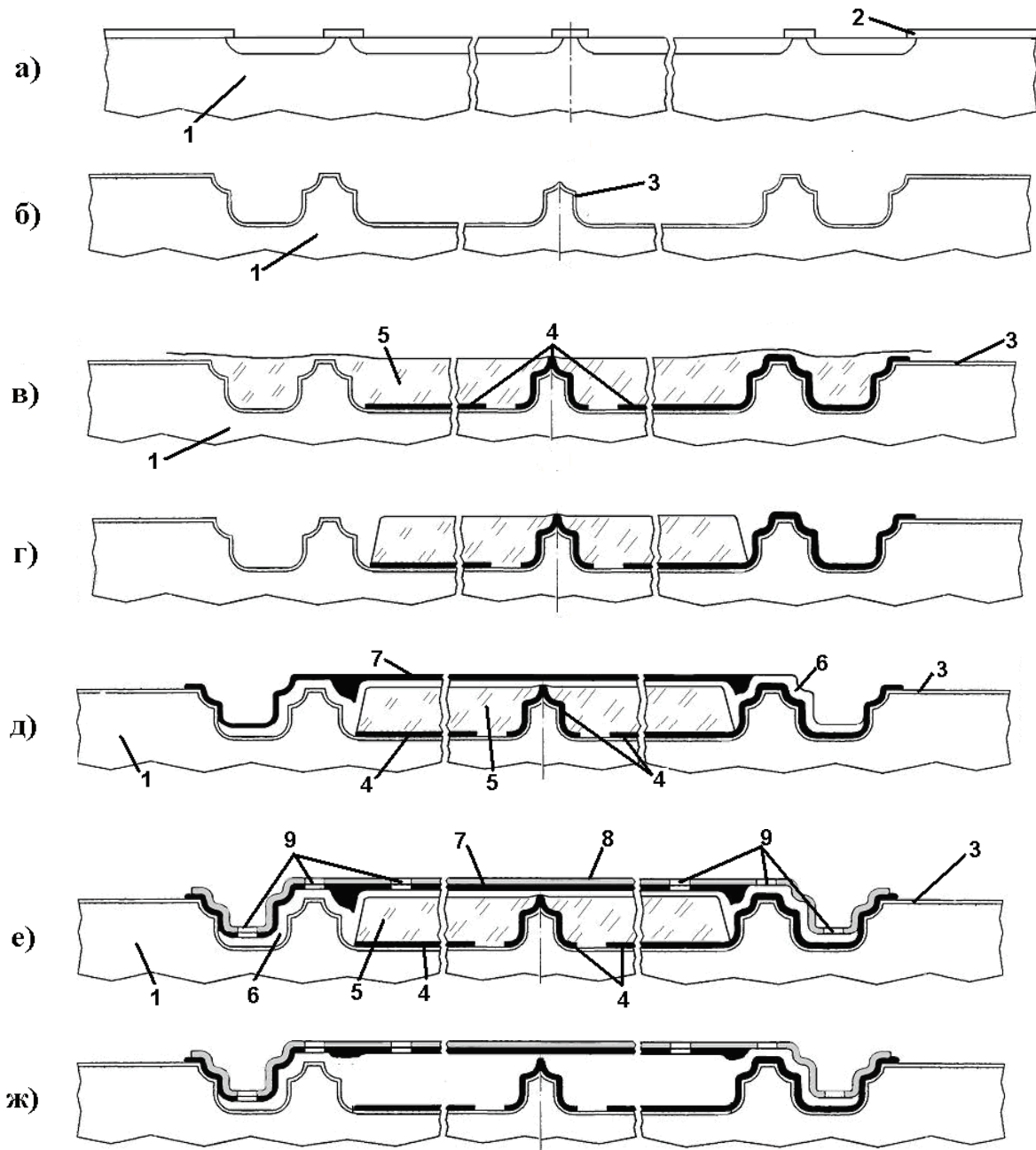


Рис. 2. Вид конструкции диафрагменного УЧЭ туннельного преобразователя на основных технологических стадиях его изготовления: 1 – монокристалл кремния (100); 2 – нитридная маска для формирования рельефа; 3 – изолирующий слой пиролитического  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; 4 – проводящий слой «иглы» и управляющего полевого электрода; 5 – «жертвенный слой» ФСС (или БФСС); 6 – слой пиролитического  $\text{SiO}_2$ ; 7 – проводящий слой диафрагмы; 8 – несущий слой диафрагмы из поликремния; 9 – технологические отверстия для вытравливания «жертвенного слоя».

Металлизация кремниевой «иглы» высотой 1,5 мкм осуществляется нанесением платины магнетронным способом на горячую подложку. Угол при вершине «иглы» составляет  $27^\circ$  при степени её остроты (радиус кривизны острия «иглы») – менее 10 нм.

При этом материалом изоляции между металлизацией «иглы» и подложкой, а также между металлизацией диафрагмы и несущим слоем поликремния является пленка пиролитического нитрида кремния толщиной 125 нм.

### **ФОРМИРОВАНИЕ И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОДА ИЗ СИЛИЦИДА ПЛАТИНЫ**

Для обеспечения работы туннельного преобразователя в атмосфере воздуха оба электрода туннельной пары должны быть изготовлены из максимально инертного благородного металла не окисляющихся на воздухе – золота или платины.

Поскольку конструкция и технологическая схема изготовления УЧЭ преобразователя предусматривают проведение достаточно высокотемпературных (650...950 °С) операций газофазного осаждения и отжига слоев БФСС, нитрида кремния и поликристаллического кремния после формирования слоев металлизации, то необходимо не допускать разрушения (плавления) пленки электрода. Таким материалом может служить только платина. Высокая химическая инертность платины существенно затрудняет технологический процесс формирования электродов на её основе при обработке как в жидких химических растворах, так и при газофазных («сухих») методах плазмохимического или реактивно ионного травления.

В этой связи в планарной технологии рисунок в тонкой пленке платины можно получать методом формирования рисунка платиновой металлизации при «взрывной» литографии с применением неорганической негативной маски, состоящей из комбинации слоев оксида и нитрида кремния. При формировании рисунка негативной маски используются типовые процессы реактивно ионного травления нитрида кремния с последующим изотропным химическим травлением слоя SiO<sub>2</sub>. Проблема адгезии пленки платины решается за счет магнетронного напыления платины на горячую (350 °С) подложку, при котором достаточно высокая энергия атомов платины, выбиваемых ионами аргона из мишени, обеспечивает повышенное сцепление пленки чистой платины с подложкой. Однако при проведении последующей более высокотемпературной операции оплавления БФСС при температуре 850 °С пленка платины может частично отслаиваться.

**Силицид платины.** Для электрода диафрагмы рабочей зоны (РЗ) туннелирования между диафрагмой и туннельной «иглой» преобразователя был выбран материал - силицид платины. Этот материал образуется в результате твердофазной реакции «вжигания» пленки металлической платины в монокристаллический или поликристаллический кремний. Он обладает достаточно высокой для данного прибора электрической проводимостью и устойчивый к технологической термической обработке до 830 °С. Кроме того, применение силицида платины вместо металлической платины оптимально решает проблему формирования топологического рисунка электродов туннельного преобразователя. Для формирования рисунка из силицида платины достаточно обычной фотолитографии с плазменным или реактивно-ионным травлением пленки поликремния с последующим напылением, вжиганием и травлением не прореагировавшей с кремнием части платины в смеси кислот.

Для исследования структурных (размер зерна и микрорельеф поверхности) и электрофизических (удельное сопротивление) характеристик электродов из силицида платины были изготовлены экспериментальные образцы тестовой структуры чувствительных элементов туннельного преобразователя с электродами из силицида платины в соответствии с вновь разработанным (скорректированным) технологическим маршрутом.

С целью определения структурных и электрофизических свойств пленок силицида платины были проведены исследования поверхности до и после температурной обработки образца при 850 °С [3, 4]. Поверхность пленок силицида платины до термообработки имеет неоднородности регулярных выступов высотой до 60...80 нм (Рис. 3, а). Измеренные характеристики «ток-высота» (Рис. 3, б) с использованием зонда из платино-иридиевого сплава, показали наличие ярко выраженного туннельного тока между электродами «игла»-электрод диафрагмы.

АСМ-исследования поверхности пленки до (Рис. 4, а,б) и после (Рис. 4, в,г) её температурной обработки при температуре 850 °С свидетельствует о сильном влиянии дополнительной операции технологического термического отжига на структуру и электрические свойства силицида платины.

Исследование топографии поверхности проводилось в полуконтактном режиме АСМ (Рис. 4, а,в), а измерение электрического сопротивления растекания проводилось при использовании зонда с покрытием из платины при напряжении смещения  $U = +3,5$  В в контактном режиме АСМ (Рис. 4, б,г). В процессе измерений определялось сопротивление между контактными площадками образцов.

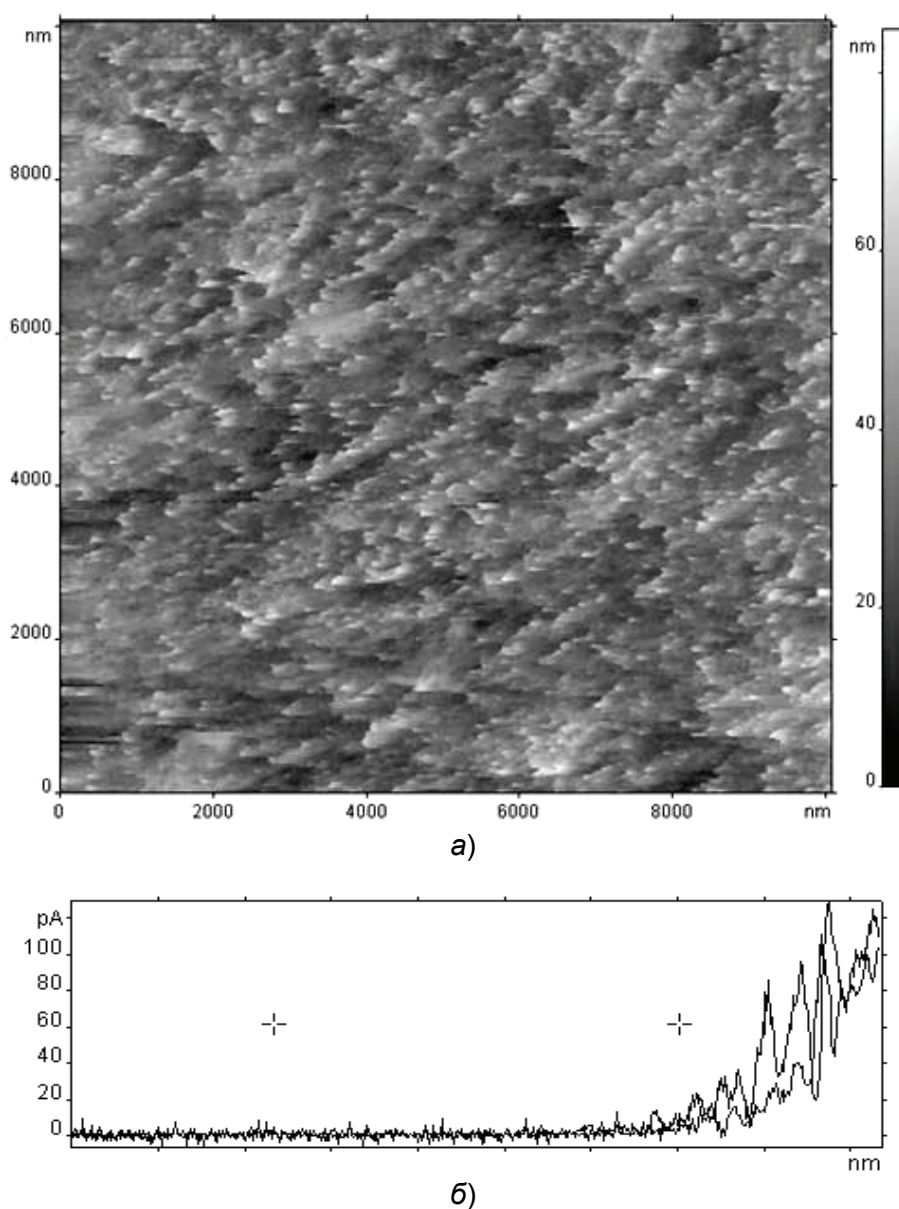


Рис. 3. АСМ-изображение поверхности силицида платины (а) до термообработки и характеристика «ток-высота» рельефа (б).

Из Рис. 4 видно, что морфология поверхности существенно неоднородна с образованием конгломератов размером 60...200 нм. На картине сопротивления растекания до термообработки видны образования величиной 10...80 нм (тёмные включения),

которые можно рассматривать как изолирующие области, сформированные выходом на поверхность кремния с последующим его окислением. Латеральные конгломераты размером 0,1...0,3 мкм на площади 1мкм×1мкм коррелируют с областями более высокой электрической проводимости.

Картина электрического сопротивления растекания после термообработки пленки силицида платины показывает низкую электрическую проводимость поверхности ( $I < 0,2$  нА при  $U = +2,5$  В), однако на ней присутствуют электропроводящие включения размером 10...15 нм.

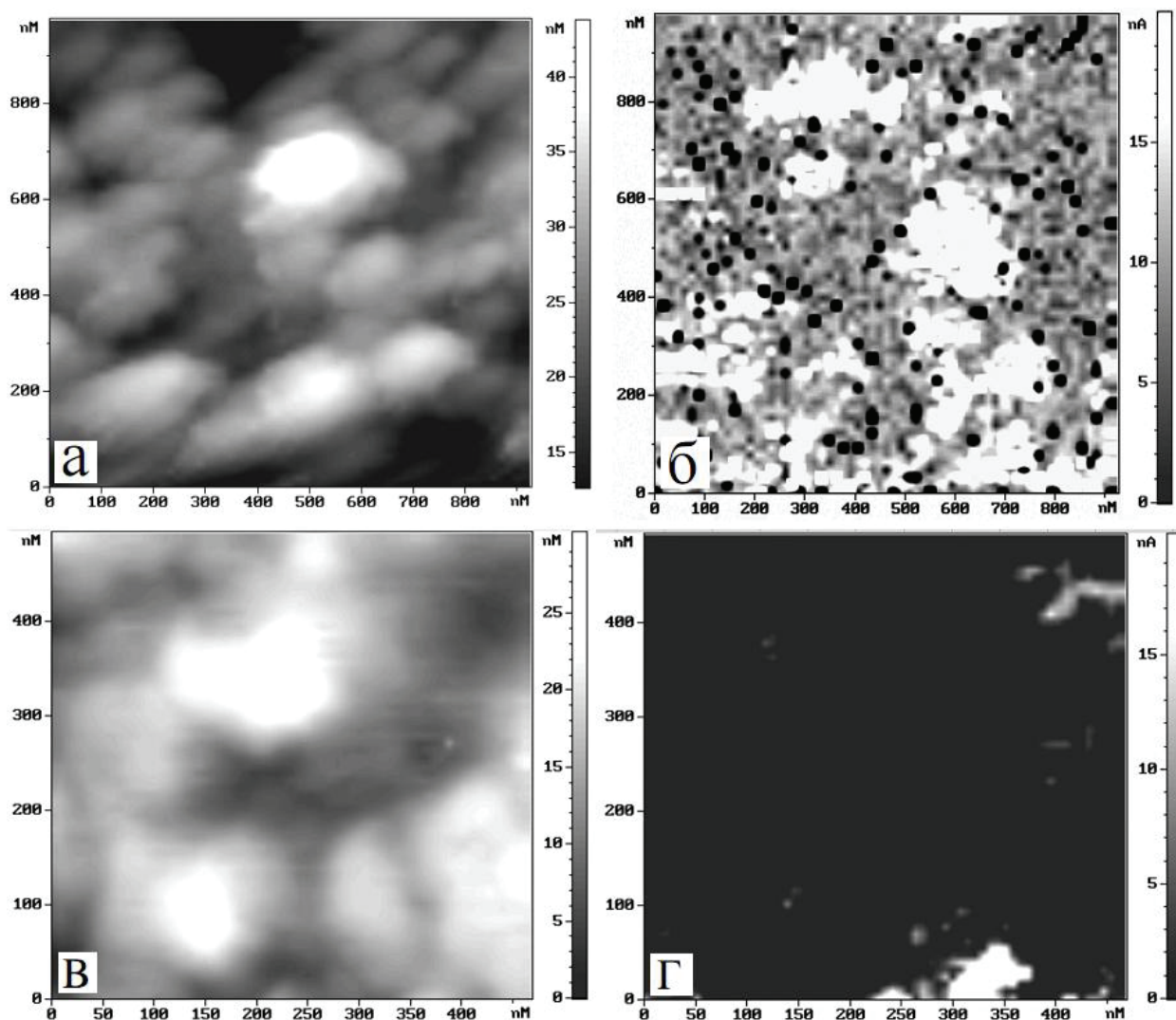


Рис. 4. АСМ-изображение топографии и электрического сопротивления растекания для пленки силицида платины до и после термообработки при температуре 850 °С.

По результатам исследований можно сделать вывод о том, что пленки силицида платины обладают необходимыми электрофизическими характеристиками пригодных в качестве электродов чувствительного элемента туннельного преобразователя. Однако после термической обработки при температуре 850 °С происходит значительная перекристаллизация и рост зерен силицида платины, обладающих необходимой проводимостью, с одновременным увеличением площади плохо проводящих участков поверхности. Здесь наилучшим решением является использование метода химико-механической планаризации, который позволяет существенно выровнять поверхность «жертвенного слоя» и исключает технологическую операцию высокотемпературной обработки.

Проведенные измерения ВАХ на зондовой установке с ручным позиционированием пластины (типа ЦУИП и характериограф Techtronic-577) получены картины топографии величины электросопротивления между контактами образцов при напряжении  $U = 10$  В.

Типичный вид полученных ВАХ представлен на Рис. 5. При достижении напряжения между контактами измерительного зонда и электрода некоторого порогового значения ( $\sim 15$  В) наблюдалось резкое падение электрического сопротивления. Причем, при повторном измерении не наблюдалось восстановления значения электрического сопротивления на первоначальный уровень, что подтверждает факт возможного электростатического схлопывания диафрагмы с отклоняющим электродом и свидетельствует об электрическом сваривании диафрагмы с измерительным электродом вследствие их контакта при разогреве контакта под действием протекающего тока.

В образцах диафрагменного типа при приложении напряжении смещения  $\sim 10$  В наблюдаются токи утечки порядка нескольких микроампер. Причиной этого являются возникновение посттехнологических поликремниевых «закороток», возникающих вследствие недоэкспонирования фоторезиста в областях резкого перепада высоты рельефа подложки, а также «закороток» через подложку, возникающих вследствие повреждения изолирующего слоя нитрида кремния на острых краях углублений.

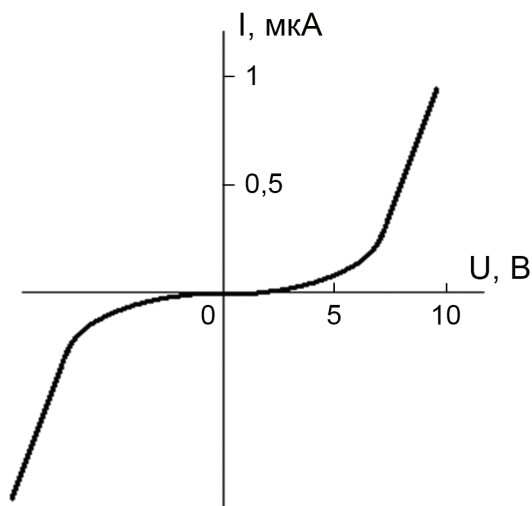


Рис. 5. Типичный вид ВАХ между контактами образцов диафрагменного типа.

**Диафрагма.** Исследования пленки диафрагмы из поликристаллического кремния, осажденной пиролитическим методом при температурах более  $600$  °С показали, что они имеют внутренние напряжения сжатия, что приводит к самопроизвольному прогибу диафрагмы. Однако известно [5], что в пленках нитрида кремния и силициде платины, полученных пиролитическим методом при температуре более  $780$  °С возникают внутренние напряжения растяжения. Поскольку пленка нитрида кремния стремится к сжатию, то это приводит к изгибу свободных мембраны. С увеличением толщины слоя мембраны из поликремния увеличивается её жесткость и она прогибается под действием сжимающейся пленки нитрида кремния на меньшую величину. Для уравновешивания действующих на диафрагму сжимающих усилий в конструкцию диафрагмы вводится еще один слой нитрида кремния, путем осаждения поверх слоя поликремния в тех же технологических режимах и такой же толщины, что и нижний изолирующий слой нитрида кремния. Это позволяет значительно снизить деформацию получаемой диафрагмы под действием внутренних напряжений.

## ВЫВОДЫ

В качестве материала проводящих слоев УЧЭ преобразователя предложено использование тугоплавкого материала – силицида платины. Это позволяет осуществление литографии (в отличие случая использования металлической платины) для формирования электрода с приемлемыми электрическими характеристиками при высокой химической стойкостью.

Установлена приемлемость туннельных характеристик силицида платины для его использования в качестве электродного материала чувствительного элемента преобразователя.

Термообработка пленки силицида кремния при температуре 850 °С приводит к потере её электропроводящих свойств из-за процесса перекристаллизации структуры и выхода на поверхность зерен кремния с последующим их окислением. Для выравнивания поверхности «жертвенного слоя» необходимо использовать операцию химико-механической планаризации, что исключает высокотемпературную обработку.

Для уменьшения возникновения дополнительных внутренних напряжений в поликремниевой диафрагме необходимо исключить операцию нанесения слоя верхней металлизации (и изолирующего напряженного слоя нитрида кремния) по всей площади структуры, а ограничиться лишь небольшой областью электрода непосредственно над «иглой» в области рабочего зазора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Balan N.N., Ivashov E.N., Nevsky A.B.* Platinum silicide as electrode material of micro-fabricated quantum electron tunneling transducers // 11th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM-2010: Book of abstracts, 30jun.-4jul. 2010. – Novosibirsk, Russia: IEEE, 2010. – P. 159-164.
2. *Agache V., Ringot R., Bigotte P., Senez V., Legrand B., Buchailot L., Collard D.* Modeling and experimental validation of sharpening mechanism based on thermal oxidation for fabrication of ultra-sharp silicon nanotips // IEEE Trans. on Nanotechnology. 2005. Vol. 4. №5. P. 548-554.
3. *Балан Н.Н., Ивашов Е.Н., Невский А.Б.* Применение силицидных проводящих слоев в элементах МЭМС и НЭМС // 7-я Международная конференция «Аморфные и микрокристаллические полупроводники»: Сб. науч. тр. конф., СПб., 28 июня-1 июля 2010 г. – Санкт-Петербург: ФТИ им. Иоффе РАН, 2010. – С. 120.
4. *Балан Н.Н., Груздев А.О., Невский А.Б., Гаврин С.С.* Контроль структурных и электрофизических свойств пленок SiPt-металлизации электродов туннельного датчика методами сканирующей зондовой микроскопии // Научная сессия МИФИ-2006: Сб. науч. тр., Москва, 23-27 янв. 2006 г. – М. : МИФИ, 2006. – Т.1. – С. 70-71.
5. Ed. by *Mohamed Gad-el-Hak*, The MEMS Handbook. CRC Press. 2002.