

УДК 621.382.049.077.001.576(06)

## ОСТРИЙНЫЕ ЭМИТТЕРЫ ЭЛЕКТРОНОВ МИКРОПРИБОРОВ И КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Н.Н. Балан, Е.Н. Ивашов\*, П.А. Лучников\*\*,  
А.Б. Невский\*\*\*

ФГУП «ВО «Внештехника», г. Москва

\*Московский государственный институт электроники и  
математики

\*\*Московский государственный технический  
университет радиотехники,  
электроники и автоматики

\*\*\*ОАО «Базовые технологии», г. Москва

E-mail: nikita.balan@gmail.com; ienmiem@mail.ru;  
fisika@mail.ru; albornevsky@gmail.com

Рассмотрены конструкции и особенности технологии изготовления перспективных острижных катодов туннельных и автоэмиссионных микроприборов, выполняемых по кремниевой технологии. Приведены основные характеристики и технологические режимы формирования электродных покрытий на основе силицида платины в качестве основного электродного слоя эмиттера.

### Ключевые слова:

Электронная эмиссия, туннельный ток, катодный узел, туннельный преобразователь, силицид платины, термический отжиг.

### Введение

Одним из перспективных направлений развития современной электроники является так называемая «вакуумная микроэлектроника» [1, 2]. Главным преимуществом этих приборов является их высокая стойкость к воздействию температуры и радиации. Эта устойчивость обусловлена самой природой автоэлектронной эмиссии, лежащей в основе их работы. Кроме этого, для данных устройств ожидается сверхвысокое быстродействие, поскольку баллистический перенос электронов от катода к аноду обеспечивается за очень короткое время полёта – менее одной пикосекунды.

На сегодняшний день создан ряд успешно функционирующих прототипов микроэлектронных приборов, использующих явление автоэлектронной эмиссии.

Спектр подобных приборов достаточно широк – от средств визуального отображения информации [1–3] до миниатюрных СВЧ приборов [4] и генераторов излучения терагерцового диапазона [5]. Существуют также прототипы логических микроэлектронных устройств, использующих явление электронной эмиссии [1], тактильных сенсоров [6] и др.

**Балан Никита Николаевич**, канд. техн. наук, главный специалист отдела Информационных технологий, ФГУП «ВО «Внештехника», г. Москва.

E-mail: nikita.balan@gmail.com  
Область научных интересов: технология микро- и наноэлектроники, МЭМС, НЭМС, физика полупроводников.

**Ивашов Евгений Николаевич**, д-р техн. наук, профессор Московского государственного института электроники и математики (технического университета).

E-mail: ienmiem@mail.ru

Область научных интересов: технология микро- и наноэлектроники, микролитография, МЭМС, материаловедение.

**Лучников Петр Александрович**, зав. лабораторией технологических исследований НИИ «Информатика» Московского государственного технического университета радиотехники, электроники и автоматики.

E-mail: fisika@mail.ru

Область научных интересов: микроэлектроника, материаловедение.

**Невский Александр Борисович**, канд. техн. наук, главный специалист ОАО «Базовые технологии», г. Москва.

E-mail:

albornevsky@gmail.com

Область научных интересов: микроэлектроника, микролитография, материаловедение.

Технология изготовления используемых в таких микроприборах эмиттеров в настоящее время стремится к совместимости со стандартными технологическими процессами, использующимися в производстве интегральных схем, что позволяет интегрировать массивы эмиттеров с управляющей электроникой и, таким образом, получать законченные миниатюрные электронные компоненты, предназначенные для функционирования в составе компактных автоэмиссионных дисплеев или вакуумных СВЧ приборов нового поколения.

При изготовлении чувствительных элементов туннельных преобразователей [7–12] возможно использование очень похожей технологии [11, 12]. В частности, процессы формирования активной зоны в зазоре между острым эмиттером электронов («иглы») и плоским электродом туннельного преобразователя и катодного узла автоэмиссионного микроприбора могут состоять фактически из одного и того же набора технологических операций.

**В настоящей работе** рассмотрены конструктивные особенности острых эмиттеров туннельных и автоэмиссионных микроприборов и определены оптимальные технологические режимы формирования электродных элементов на основе силицида платины.

### Автоэмиссионные острые эмиттеры

Известно, что плотность тока  $J$  автоэлектронной эмиссии с поверхности твердого тела под воздействием электрического поля напряженностью  $E$  подчиняется уравнению Фаулера–Нордгейма [13]:

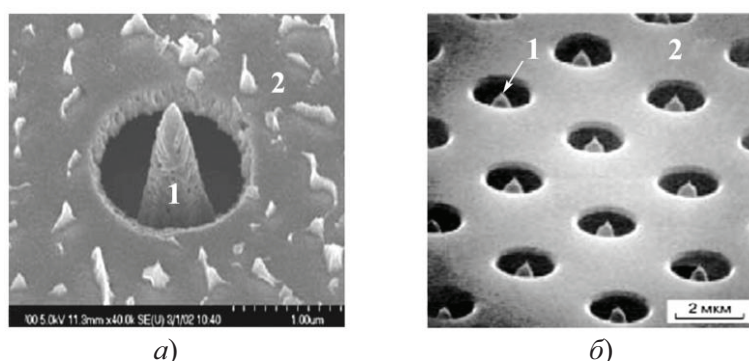
$$J = aE^2 \exp\left(-\frac{b\phi^{3/2}}{E}\right),$$

где  $\phi$  – работа выхода, параметры  $a$  и  $b$  зависят от геометрии и работы выхода.

По причинам возрастания напряженности поля вблизи острых автоэлектронных эмиттеры изготавливаются, как правило, в виде поверхностей с большой кривизной.

**Многоострый катодный матрицы.** Для отбора относительно больших токов используют многоострые системы. В зависимости от размеров эмиттеров и расстояния до анода напряжение, обеспечивающее величину электрического поля, достаточную для возникновения автоэлектронной эмиссии, может составлять от сотен вольт до нескольких десятков киловольт.

В качестве примера многоострой матрицы можно рассмотреть «эмиттер Спиндта» [14] с сотовым управляющим электродом, вид которого приведен на рис. 1.



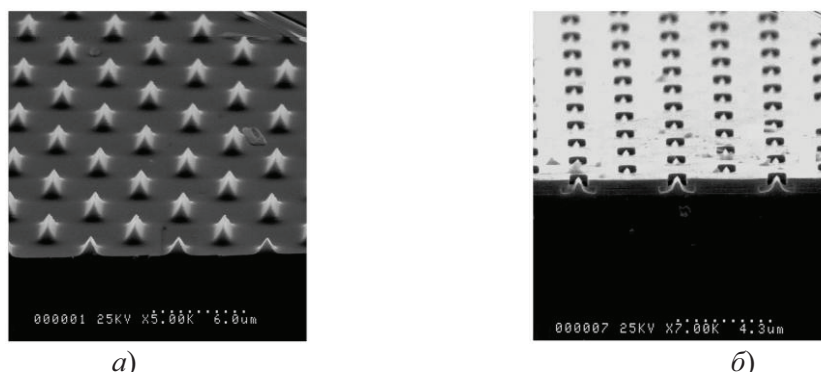
**Рис. 1.** Электронно-микроскопическая фотография одиночного а) автоэлектронного эмиттера Спиндта и б) матрицы эмиттеров – 1 с сотовым управляющим электродом – 2

Такой автоэлектронный эмиттер был создан в 70-х гг. XX в. в Стенфордском университете. Это был один из первых автоэмиссионных приборов, изготавливаемых по групповой технологии. Разработанная технология давала возможность создавать решетки автокатодов с молибденовыми острями, содержавшие до 5000 острий с радиусом скругления  $\sim 500 \text{ \AA}$  и плотностью упаковки  $\sim 6,4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ .

В настоящее время технология изготовления подобных матриц, как правило, (за исключением некоторых специальных процессов) сведена к стандартным операциям технологического маршрута изготовления кремниевых полупроводниковых приборов (КМОП), при этом сами острия исполняются методом локального термического окисления заготовки, созданной в объеме кремнии посредством высокоаспектного реактивно-ионного травления [15]. Отработанный режим травления и локального окисления позволяет получать хорошо воспроизводимую геометрию эмиттера с радиусом скругления 5...10 нм. При формировании управляющих и фокусирующих электродов используются наноструктурированные углеродные пленки, а также тонкие пленки металлов и поликристаллического кремния, разделенные диэлектрическими слоями оксида и нитрида кремния. Вскрытие самосовмещенных эмиттерных отверстий осуществляется методом химико-механической планаризации (в отличие от обычной технологии изготовления «эмиттера Спиндта», где сначала в металлической пленке, нанесенной на слой диэлектрика, вытравливались отверстия, после чего через эти отверстия травилась полость в диэлектрике и, только после этого, путем напыления молибдена через отверстия создавались катоды).

В работах [3, 16] рассматривается автоэмиссионный катодный блок, изготовленный по технологии изготовления основных операций, принятых в стандартном технологическом процессе КМОП, с характерными размерами литографии элементов ~ 1,5...0,8 мкм. Такие технологические операции позволяют проводить «заострение» полевого эмиттера («иглы») до радиуса закругления 5...10 нм путем локального термического окисления кремния.

Массив кремниевых ультраострых эмиттеров с сотовым управляющим электродом, созданный по такой технологии, изображен на рис. 2. Здесь приведены две стадии – формирование кремниевых ультраострых микроострий (рис. 2, а) и формирование поликремниевого управляющего электрода с последующим вскрытием эмиттерных полостей (рис. 2, б).



**Рис. 2.** Формирование матрицы кремниевых ультраострых эмиттеров с сотовым управляющим электродом: а) стадия формирования микроострий; б) стадия формирования поликремниевого сотового управляющего электрода с последующим вскрытием эмиттерных полостей посредством химико-механической планаризации

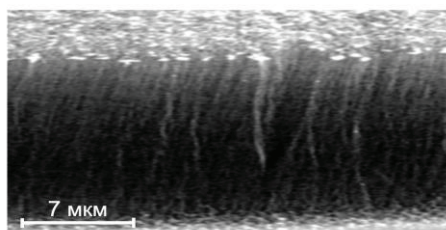
Как правило, острия из традиционных металлов или кремния распыляются под действием ионной бомбардировки и/или химически деградируют, что приводит к снижению их эмиссионных свойств. Повышение стабильности автоэлектронной эмиссии достигается путем улучшения вакуума, очистки эмиттера, использования импульсного напряжения для ослабления миграции атомов в электрическом поле и саморазогрева эмиттера, а также умеренного подогрева эмиттера. Возможен также альтернативный подход – использование тонких пленок на основе углерода, который приводит к снижению требуемой напряженности электрического поля до  $10^5$  В/см.

Результаты исследований в работе [17] показали, что для повышения стабильности электронной эмиссии целесообразно проводить нанесение на поверхность катода наноструктурированных пленок из тугоплавких материалов. Нанесение таких пленок позволяет во многом решить проблему нестабильности эмиссионного процесса, термического и электромиграционного разрушения катода и открывает путь к массовому прикладному использованию эффекта полевой эмиссии в перечисленных выше видах электронных приборов. Это также создает

предпосылки для коммерциализации разработанной технологии с последующим серийным выпуском подобных монокристаллических автоэмиссионных катодных блоков.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования [18–20] показывают, что некоторые виды наноструктурированных углеродных покрытий, являются весьма перспективным эмиссионным материалом по причине высокой электропроводности и теплопроводности, химической и термической устойчивости. Плотность тока эмиссии  $J$  из эмиттеров, покрытых такими материалами, может достигать величин  $\sim 1 \text{ А/см}^2$  при достаточно низком значении управляющего напряжения (менее 10 В), тем более, если эмиттер сам по себе «заострен» до нанометровых радиусов кривизны.

Перспективность использования углеродных материалов в эмиттерах электронов обусловлена устойчивостью углерода к бомбардировке ионами остаточных газов, имеющих место в приборах, работающих в условиях технического вакуума и высоковольтного напряжения, а также возможностью снижения работы выхода электронов при определенных структурных модификациях, характерных для алмазного типа гибридизации связей валентных электронов атомов углерода или углеродных нанотрубок с графитовым типом структуры (рис. 3) [21].



**Рис. 3.** РЭМ-изображение скола слоя высокоориентированных углеродных нанотрубок, сформированных на кремниевой подложке путем осаждения из газовой фазы

Пороговая напряженность электрического поля начала процесса автоэмиссии катодов с нанотрубками составляет  $0,5 \dots 1 \text{ МВ/м}$  при плотности тока  $J \sim 0,5 \text{ А/см}^2$  в постоянном режиме, а в импульсном  $\sim 2 \text{ А/см}^2$  и более. Однако недостаточная адгезия нанотрубок к подложке и подверженность к перенапылению углерода на анод создают ряд проблем для их широкого практического применения.

Наиболее эффективными материалами для получения долговечных высокостабильных автоэмиссионных катодов являются алмазные пленки. Достоинства таких катодов заключаются в сочетании высокой дрейфовой скорости носителей тока и электрической прочности алмазных кристаллов с высокой теплопроводностью пленки ( $\sim 2000 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ , что в 5 раз превышает теплопроводность меди). Практически это выражается в том, что для автоэмиссии можно использовать сильные электрические поля без опасения, что материал катода разрушится под влиянием импульса тока или джоулева тепла. Перспективны также его уникальные электронно-эмиссионные свойства, связанные с отрицательным электронным сродством, которое присуще широкозонным полупроводниковым материалам.

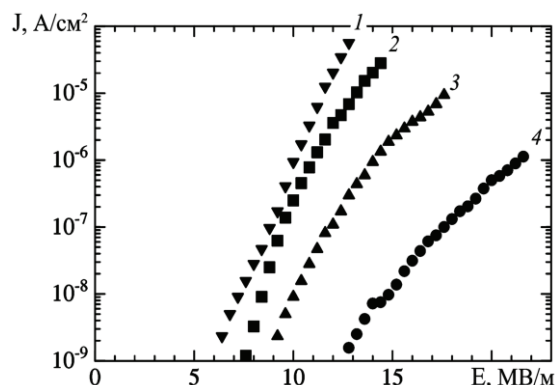
Недостатками автокатодов на основе алмазных материалов являются низкие плотности токов и высокие пороговые напряжения автоэлектронной эмиссии, составляющие  $22 \dots 72 \text{ МВ/м}$  и более.

Особые надежды в устранении этих недостатков возлагаются на получение композитных наноалмазных эмиттеров, в которых, кроме уже названных традиционных свойств алмаза, присущих массивному кристаллическому состоянию, будут присутствовать квантовые эффекты, характерные для низкоразмерных систем. Сущность этих эффектов подробно изложена в работе [22]. Здесь при очень большой степени развитости поверхности, присущей нанокристаллическим материалам, влияние поверхностных уровней на электрические свойства полупроводников усиливается вплоть до изменения типа электропроводности.

С таким заключением хорошо согласуются результаты исследования эмиссионных свойств алмазоподобных пленок, нанесенных на полупроводниковую подложку [23]. В качестве промежуточного слоя используется силицид платины. Этот материал образуется в резуль-

тате твердофазной реакции «вжигания» пленки металлической платины в монокристаллический или поликристаллический кремний [24] и обычно применяется в таких изделиях твердотельной электроники, как силовые диоды Шоттки или ИК-фотоприемники [25].

На рис. 4 приведены характерные зависимости плотности эмиссионного тока  $J$  от напряженности электрического поля  $E$  для образцов композитных эмиттеров, изготовленных при различных температурных режимах формирования промежуточного силицидного слоя [23].



**Рис. 4.** Зависимость плотности эмиссионного тока  $J$  от напряженности электрического поля  $E$  для образцов эмиттеров, изготовленных при различных температурных режимах формирования промежуточного силицидного слоя [23]. Состав слоя композитного эмиттера: 1 –  $a$ -C/Pt/Si после температурного отжига 600 °C; 2 –  $a$ -C/Pt/Si после температурного отжига 400 °C; 3 –  $a$ -C/Pt/Si без отжига; 4 –  $a$ -C/Si

Наблюдаемый эффект увеличения тока эмиссии  $J$  при использовании силицида платины как промежуточного слоя обусловлен высокой развитостью его поверхности.

**Интегральный туннельный преобразователь.** Эффект туннелирования электронов (в данном случае не из проводника в вакуум, а из проводника в проводник через узкий межэлектродный зазор) можно использовать также для построения преобразователей неэлектрических величин. Принцип действия таких приборов основан на изменении величины туннельного тока в зависимости от расстояния острие-противоэлектрод.

Зависимость туннельного тока от расстояния  $x$  между электродами имеет вид:

$$I \sim E \exp(-\alpha \sqrt{\phi_0} x),$$

где  $\alpha = 1,025 \text{ \AA}^{-1} eU^{1/2}$ .

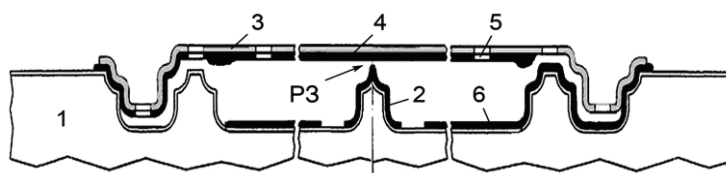
Для типичных значений  $\phi_0$  и  $x$  (1,0 эВ и 1 нм соответственно) можно считать, что электронная схема, способная измерять изменение тока в 1 нА при источнике с внутренним сопротивлением 100 МОм, может зарегистрировать смещение электродов на расстояние в доли  $\text{\AA}$ .

При изготовлении чувствительных элементов туннельных преобразователей возможно использование ряда технологических подходов [7–12].

Конструкция туннельного преобразователя на основе упругого чувствительного элемента (УЧЭ) диафрагменного типа, представлена на рис. 5 [26, 27].

Основными элементами конструкции чувствительного элемента преобразователя (рис. 5) являются пара 2-4 (электрод-«игла»), т. е. острый электрод 2 («игла») и плоский проводящий слой 4 на поликремниевой диафрагме 3.

При механическом воздействии (давления, вибрации и пр.) на диафрагму 3 изменяется величина туннельного рабочего зазора  $PЗ$ , что приводит к изменению величины туннельного тока между «иглой» 2 и диафрагмой 3. По изменению величины туннельного тока можно судить о величине механического давления на диафрагму 3.



**Рис. 5.** УЧЭ туннельного преобразователя диафрагменного типа: 1 – монокристаллическая подложка из кремния (100); 2 – электропроводящий слой эмиттера «иглы»; 3 – основной несущий поликремниевый слой диафрагмы; 4 – электропроводящий слой диафрагмы; 5 – технологические отверстия; 6 – управляющий полевой электрод; PЗ – рабочий зазор протекания туннельного тока

Прибор изготавливается по планарной технологии, применяемой в производстве полупроводниковых КМОП СБИС, что делает возможной однокристалльную интеграцию микромеханического устройства с электронными схемами управления.

На первой стадии изготовления микроприбора в кремниевой подложке путем ряда технологических операций [27] формируется рельеф, состоящий из углубления и ультраострой заготовки для острейного электрода, после чего на структуру наносится изолирующий слой нитрида кремния (рис. 6, а, б).

Далее наносится металлизация острейного электрода и полевого отклоняющего электрода, затем – технологический вспомогательный слой («жертвенный»), который на последующих стадиях удаляется травлением (рис. 6, в, г). При этом верхняя граница жертвенного слоя совпадает с острием «иглы», что достигается либо оплавлением поверхности стекла, или методом химико-механической планаризации.

Такие операции необходимы, в частности, по причине конформного осаждения «жертвенного» слоя на основе стекла типа ФСС или БФСС, когда его рельеф повторяет рельеф покрываемой поверхности. Было бы недопустимо оставлять поверхность «жертвенного» слоя не планаризованной, поскольку её рельеф определяет форму наносимой в последующих операциях поликремниевой диафрагмы.

Операцию планаризации возможно заменить рядом других технологических операций, направленных на минимизацию выступов, образующихся на поверхности жертвенного слоя над сформированными в кремнии «иглами». Например, операция удаления выступающих участков жертвенного слоя методом плазмохимического травления.

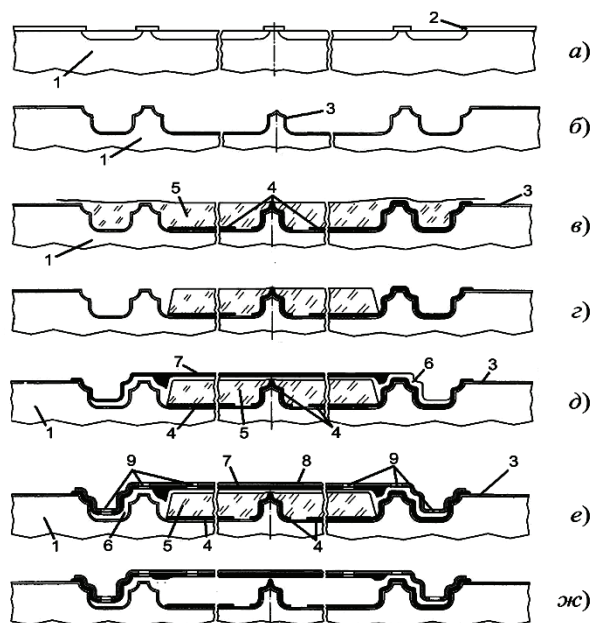
На поверхность планаризованного «жертвенного» слоя может быть нанесен дополнительный слой оксида кремния, задающий начальное расстояние между диафрагмой и острейным электродом, после чего наносится слой металлизации (рис. 6, д), на который (после нанесения изолирующего слоя), в свою очередь, осаждается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

Для травления «жертвенного» слоя можно использовать 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. 6, ж) через специально предусмотренные технологические отверстия осуществляется промывка и высушивание УЧЭ преобразователя.

Металлизация кремниевой «иглы» высотой 1,5 мкм осуществляется магнетронным напылением платины 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.

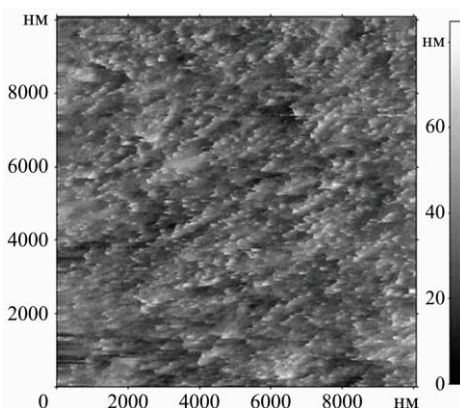


**Рис. 6.** Схема основных технологических этапов изготовления диафрагменного УЧЭ туннельного преобразователя: 1 – монокристалл кремния (100); 2 – нитридная маска для формирования рельефа; 3 – изолирующий слой пиролитического  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; 4 – проводящий слой «кирпичи» и управляющего полевого 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

**Электродный силицид платины.** В ряде работ [23, 27, 28] показана перспективность применения слоев силицида платины в составе композитных эмиттеров, в которых в качестве основного покрытия могут использоваться наноструктурированные углеродные материалы.

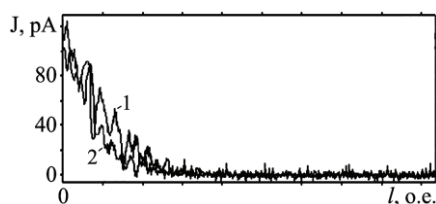
В рамках настоящей работы силицид платины использовался в качестве электродного материала чувствительного элемента туннельного преобразователя. Этот материал обладает высокой электрической проводимостью и существенно облегчает формирование топологического рисунка электродов микроприбора, поскольку используемый в технологии процесс взрывной литографии металлической платины не технологичен из-за создаваемых им загрязнений. В этой связи его можно заменить обычной литографией по поликремнию с последующим вжиганием поликремния в платину и стравливанием непрореагировавшего благородного металла в смеси кислот – «царской водке».

На рис. 7 приведен вид СТМ-изображения поверхности силицида платины до термообработки при  $U = +0,3$  В и  $I_r = 25$  пА.



**Рис. 7.** СТМ-изображение поверхности силицида платины до термообработки

Использовался туннельный зонд из платино-иридиевого сплава, полученного методом механического заострения. Исследования показали наличие характерной ярко выраженной экспоненциальной зависимости для туннельного тока «ток–высота», вид которой представлен на рис. 8.



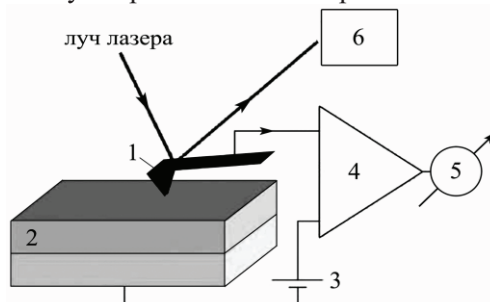
**Рис. 8.** Характерная зависимость туннельного тока  $J$  от расстояния  $l$  до поверхности пленки силицида платины, полученной без термообработки: 1 – прямой и 2 – обратный ход туннельного зонда

Результаты исследования подтверждают приемлемость туннельных характеристик силицида платины для его использования в качестве электродного материала чувствительного элемента преобразователя. Развитая поверхность электрода силицида платины (рис. 7) позволяет её использовать в качестве промежуточного слоя острейного эмиттера в автоэмиссионных микроприборах.

С целью определения структурных и электрофизических свойств силицидных пленок были проведены исследования рельефа и электрофизических характеристик поверхности до и после её температурного отжига при температурах до  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  (температура оплавления ФСС).

Для исследования локального электрического тока через поверхность силицида платины использовалась методика атомно-силовой микроскопии (АСМ) с проводящим кантилевером.

Измерения проводились в контактном режиме (рис. 9). В этой схеме проводящий зонд – 1 находится в контакте с поверхностью исследуемого образца – 2. К зонду – 1 прикладывалось электрическое напряжение смещения  $U_{см} = +3,5\text{ В}$  от источника – 3. Измерение протекающего результирующего тока через образец – 2 осуществлялось с помощью усилителя тока – 4 и регистрирующего прибора – 5. При смещении зонда – 1 одновременно регистрировался прогиб кантилевера с помощью оптического регистратора – 6. Величина измеряемого тока обратно пропорциональна локальному электрическому сопротивлению поверхностного слоя исследуемого образца – 2.

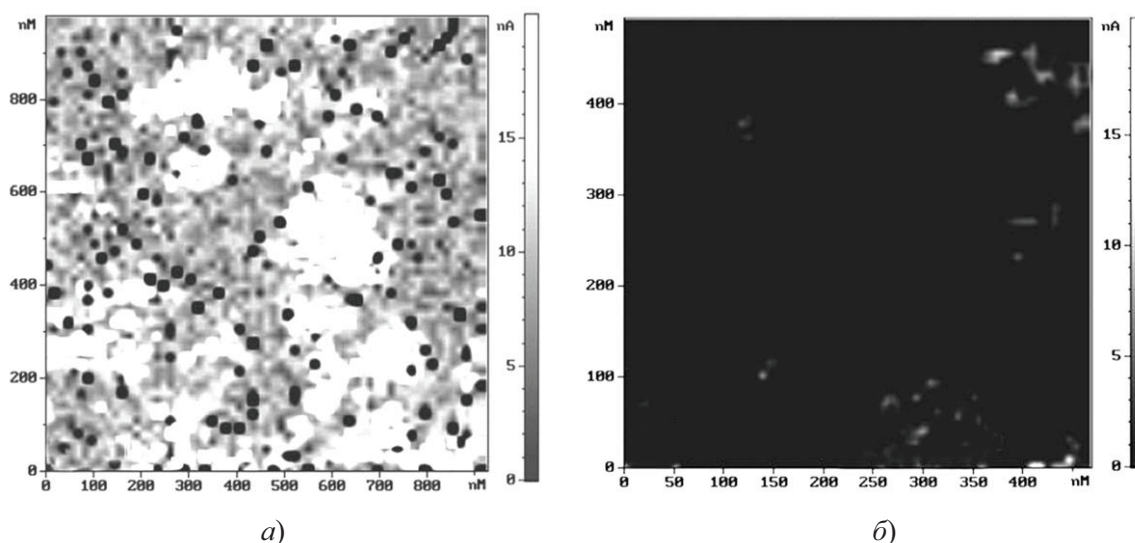


**Рис. 9.** Схема измерения локального электрического тока АСМ с проводящим кантилевером

Исследование рельефа поверхности полученных образцов силицида платины методом АСМ в полуконтактном режиме показало, что технологический термический отжиг полученных слоев силицида платины при температурах до  $820\text{...}830\text{ }^{\circ}\text{C}$  обеспечивает высокую электрическую проводимость слоя. Однако картина протекания локального электрического тока показывает некоторую неоднородность по току из-за наличия мелких диэлектрических островков по поверхности слоя (конгломераты размером  $\sim 10\text{...}20\text{ нм}$ , рис. 10, а). Возможное объяснение их возникновения – выход на поверхность частиц кремния с последующим его окислением. Латеральные поверхностные конгломераты высокой электрической проводимости достигают диаметра  $\sim 200\text{...}300\text{ нм}$  на площади  $1000 \times 1000\text{ нм}^2$ .

Термический отжиг при более высоких технологических температурах выше  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  приводит к перекристаллизации силицидной пленки с резким возрастанием площади непроводящих участков (рис. 10, б).





**Рис. 10.** Картина протекания локального электрического тока через пленку силицида платины после термообработки при температуре: а) 830 °С и б) 850 °С

### Выводы

Показана перспективность использования силицида платины в качестве материала проводящих слоев чувствительного элемента туннельного преобразователя. Температура термообработок в процессе изготовления прибора не должна превышать 820...830 °С, так как при этом происходит резкое увеличение площади плохо проводящих участков поверхности.

Разработанный технологический маршрут изготовления интегрального туннельного нанoeлектромеханического преобразователя полностью совместим со стандартным технологическим маршрутом технологии КМОП, что позволяет делать возможной однокристалльную интеграцию преобразователя с управляющими электронными схемами.

Развитая поверхность силицида платины позволяет использовать данный материал в качестве промежуточного слоя для острейного эмиттера в автоэмиссионных микроэлектронных приборах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhu W. Vacuum Microelectronics. – N.Y.: Wiley-Interscience, 2001. – 396 p.
2. Трубецков Д.И. Вакуумная микроэлектроника. // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 4. – С. 58–64.
3. Дюжев Н.А., Махиборода М.А., Скворцов В.Э. Электроннолучевой микродисплей высокого разрешения на базе кремниевого автоэмиссионного нанокатода // Первый международный Форум по нанотехнологиям. – Москва, 3–5 декабря 2008 г. URL: [http://rusnanotech08.rusnanoforum.ru/sadm\\_files/disk/Docs/2/6/6%20\(11\).pdf](http://rusnanotech08.rusnanoforum.ru/sadm_files/disk/Docs/2/6/6%20(11).pdf) (дата обращения: 13.04.2012).
4. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. – М.: Физматлит, 2003. – 496 с.
5. Srivastava V. THz Vacuum microelectronic devices // Journal of Physics: Conference Series. – 2008. – V. 114. – № 1. – P. 1–11.
6. Zhiyu Wen, Ying Wu, Zhongyuan Zhang, Shilu Xu, Shanglian Huang, Youli Li. Development of an integrated vacuum microelectronic tactile sensor array // Sensors and Actuators A. – 2003. – V. 103. – P. 301–306.
7. Kenny T.W., Kaiser W.J., Waltman S.B., Reynolds J.K. Novel Infrared Detector Based on a Tunneling Displacement Transducer // Applied Physics Letters. – 1991. – V. 59(15) – P. 7.

8. DiLella D., Whitman L.J., Colton R.J., Kenny T.W., Kaiser W.J., Vote E.C., Podosek J.A., Miller L.M. A Micromachined Magnetic-Field Sensor Based on an Electron Tunneling Displacement Transducer // *Sensors and Actuators*. – 2000. – V. 86. – P. 8–20.
9. Liu C.H., Kenny T.A. High-Precision, Wide-Bandwidth Micromachined Tunneling Accelerometer // *Journal of microelectromechanical systems*. – 2001. – V. 10. – № 3. – P. 425–433
10. Шашкин В.И., Востоков Н.В., Вopilкин Н.А., Климов А.Ю., Волгунов Д.Г., Рогов В.В., Лазарев С.Г. О возможных конструкциях датчиков туннельно-эмиссионных акселерометров // *Микросистемная техника*. – 2003. – № 5. – С. 3–6.
11. Alexenko A.G., Ananyan M.A., Dshkhunyan V.L., Kolomeitzev V.F., Luskinovich P.N., Nevsky A.B., Orlov O.A. Tunnel effect nanodetector of mechanical vibrations and method for preparation thereof // *United States Patent*. US 6,829,941 B2. Dec. 14. – 2004. – 7 p.
12. Балан Н.Н. Разработка и оптимизация конструктивных и технологических решений туннельных нанопреобразователей: автореф. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. – М., МИЭМ, 2010. – 26 с.
13. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. – М.: Наука, 1966. – 564с.
14. Spindt C.A. et al. Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones // *Journal of Applied Physics*. – 1976. – V. 47. – № 12. – P. 5248–5263.
15. 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. – V. 4. – № 5. – P. 548–554.
16. Djuzhev N.A., Beliaev S.N., Vlasenko V.A., Gogin A.A., Gontar V.M., Denisikin V.V., Mazaev A.A., Nevsky A.B., Tishin Y.I., Shokin A.N. A Silicon Gated Field Edge Cathode // *The 16<sup>th</sup> International Vacuum Microelectronics Conference*. – Osaka, 2003. – P. 177–178.
17. Дюжев Н.А., Махиборода М.А., Федирко В.Л. Исследование различных режимов автоэлектронной эмиссии кремниевого кантилевера // *Вакуумная наука и техника: Материалы XIV научно-техн. конф. (под ред. В. А. Быкова)*. – М.: МИЭМ, 2007. – С. 248–251.
18. Раков Э.Г. Химия и применение углеродных нанотрубок // *Успехи химии*. – 2001. – Т. 70. – С. 934.
19. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // *Успехи физических наук*. – 2002. – Т. 172. – С. 401.
20. Bonard J.M., Kind H., Stockli T., Nilsson L.O. Field emission from carbon nanotubes: the first five years // *Solid-State Electronics*. – 2001. – V. 45. – P. 893.
21. Образцов А.Н., Павловский И.Ю., Волков А.П. Автоэлектронная эмиссия в графитоподобных пленках // *ЖТФ*. – 2001. – Т. 71. – № 11. – С. 89–95.
22. Покровский Я.Е. Влияние поверхностных уровней на электрические свойства мелкозернистых пленок // *ЖТФ*. – 1954. – Т. 24. – № 7. – С. 1229.
23. Takashi Ikuno, Yuichi Kawano, Yang-Gyu Baek, Jeong-Tak Ryu, Mitsuhiro Katayama, Kenjiro Oura. Influence of Interface Metal on Field Emission from Carbon Film // *Surface science*. – 2000. – V. 21. – P. 502–506.
24. Мьюрарка Ш. Силициды для СБИС. – М.: Мир, 1986. – 200 с.
25. Досталко Л.П., Баранов В.В., Шаталов В.В. Пленочные токопроводящие системы СБИС. – Минск, 1989. – 238 с.
26. Балан Н.Н., Лучников П.А., Ивашов Е.Н. Технологические принципы формирования пленочных элементов туннельного НЭМС преобразователя // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / под ред. чл.-корр. РАН А.С. Сигова*. – М.: МИРЭА-РАН, 2011. – Т. 4. – С. 260–267.
27. Balan N.N., Ivashov E.N., Nevsky A.B. Platinum silicide as electrode material of microfabricated quantum electron tunneling transducers // *11<sup>th</sup> International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM-2010: Book of abstracts*. – Novosibirsk, 30 June–4 July 2010. – Novosibirsk: IEEE, 2010. – P. 159–164.
28. 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.* – М., 23–27 января 2006. – М.: МИФИ, 2006. – Т. 1. – С. 70–71.

Поступила 02.04.2012 г.