

УДК 621.382.049.077.001.576(06)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КАТОДНЫХ УЗЛОВ АВТОЭМИССИОННЫХ И ТУННЕЛЬНЫХ НАНО- И МИКРОПРИБОРОВ

© Авторы, 2012

Н.Н. Балан

к.т.н., гл. специалист, ФГУП «ВО «Внештехника», г. Москва
E-mail: nikita.balan@gmail.com

Е.Н. Ивашов

д.т.н., профессор, Московский государственный институт электроники и математики (технический университет)
E-mail: ienmiem@mail.ru

П.А. Лучников

зав. лабораторией, «НИИ «Информатика»
Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики
E-mail: fisika@mail.ru

А.Б. Невский

к.т.н., гл. специалист, ОАО «Базовые технологии», г. Москва
E-mail: albornevsky@gmail.com

Рассмотрены конструкции и особенности технологии изготовления перспективных острыйных катодов туннельных и автоэмиссионных микроприборов, выполняемых по кремниевой технологии, а также эмиттеров на основе наноструктурированных углеродных материалов. Приведены основные характеристики и технологические режимы формирования электродных покрытий с использованием силицида платины в качестве основного электродного слоя эмиттера.

Ключевые слова: электронная эмиссия, туннельный ток, катодный узел, туннельный преобразователь, силицид платины, термический отжиг.

We consider the design and manufacturing of advanced field-emission cathodes (so-called emitters based on nanostructured carbon materials) and tunneling transducers. Considered microdevices are performed on conventional silicon planar technology except for some special operations. The process flow of device fabrication is presented and reasons to use platinum silicide as metallisation material are described.

Keywords: field emission, tunnel current, cathode, tunnel transducer, platinum silicide, thermal processing.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день создан ряд успешно функционирующих прототипов микроэлектронных приборов, использующих явление автоэлектронной эмиссии. Спектр подобных приборов достаточно широк – от средств визуального отображения информации [1–2] до миниатюрных СВЧ приборов [3] и генераторов излучения терагерцового диапазона [4]. Существуют также прототипы логических микроэлектронных устройств, использующих явление электронной эмиссии [1], тактильных сенсоров [5] и др.

Основным преимуществом автоэлектронных микроприборов является их высокая стойкость к воздействию температуры и радиации. Эта устойчивость обусловлена самой природой автоэлектронной эмиссии, лежащей в основе работы данных приборов. Кроме этого, для этих устройств ожидается сверхвысокое быстродействие, поскольку баллистический перенос электронов от катода к аноду обеспечивается за очень короткое время пролёта – менее одной пикосекунды.

В микроакселерометрах, действие которых основано на туннельном эффекте [6], экспоненциальная зависимость туннельного тока от расстояния между электродами используется для измерений малых взаимных перемещений контактов. Туннелирование носителей заряда – электронов – возможно при величине зазора между туннельными электродами, составляющей единицы или десятки ангстрем. Туннельные микроакселерометры обладают высокой чувствительностью и, безусловно, являются интересным и актуальным объектом разработки.

Технология изготовления используемых в таких микроприборах эмиттеров в настоящее время стремится к совместимости со стандартным технологическим процессом КМОП, что позволяет интегрировать массивы эмиттеров с управляющими электронными схемами 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 КМОП технологии [11–12]. В частности, процессы формирования электрода и «иглы» туннельного преобразователя и катодного узла автоэмиссионного микроприбора могут состоять фактически из одного и того же набора технологических операций.

Целью настоящей работы явилось определение оптимальных технологических режимов формирования электродных элементов для острийных эмиттеров туннельных и автоэмиссионных микроприборов с учетом технологических особенностей формирования электродного слоя силицида платины туннельной пары.

АВТОЭМИССИОННЫЕ ОСТРИЙНЫЕ ЭМИТТЕРЫ

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

$$J = aE^2 \exp\left(-\frac{b\phi^{3/2}}{E}\right), \quad (1)$$

где ϕ – работа выхода, параметры a и b зависят от геометрии и работы выхода.

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

Многоострийные катодные матрицы. На практике в качестве туннельных электродов выбираются острийные электроды из кремния покрытого платиной, наночастицы диоксида кремния, углеродные наноструктуры (нанотрубки, фуллерены, нановолокна) и полимерные структуры [14]. Современные технологические методы нано- и микроэлектроники позволяют создавать острийные элементы и структуры с приемлемыми для туннельных датчиков характерными размерами: высота 2...3 мкм при ширине основания 0,5...2 мкм с радиусом кривизны острия до 10 нм. Наиболее эффективными являются туннельные электроды на основе кремния.

Для отбора относительно больших токов используют многоострийные 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.

Примером многоострийной матрицы является «эмиттер Спиндта» [15] с сотовым управляемым электродом (рис. 1). Такая матрица эмиттеров была впервые изготовлена по групповой технологии, что дало возможность создавать решетки автокатодов с молибденовыми остриями, содержащие до 5000 острийных элементов с радиусом скругления ~ 500 Å и плотностью упаковки ~ 6,4·10⁵ см⁻².

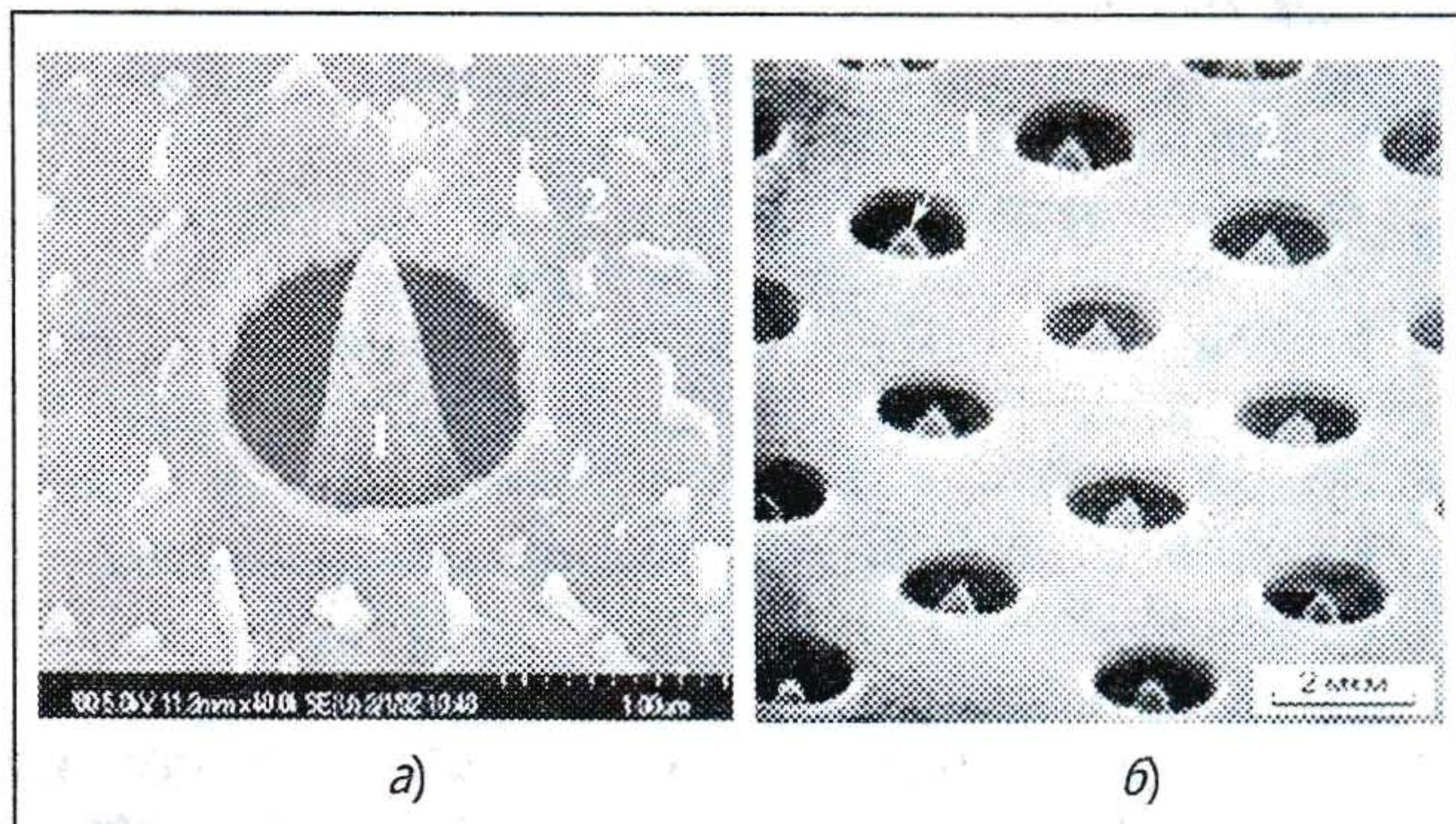


Рис. 1. Электронно-микроскопическая фотография одиночного (а) автоэлектронного эмиттера Спиндта 1 и матрицы (б) эмиттеров 1 с сотовым управляемым электродом 2

В настоящее время технология изготовления многоострийных матриц, как правило, сведена к стандартным операциям технологического маршрута КМОП, при этом сами острийные элементы исполняются из кремния на начальной стадии технологического процесса методом локального термического окисления заготовки, созданной в объемном кремнии посредством реактивно-ионного травления с высоким аспектным отношением [16]. 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 «классической» технологии изготовления «эмиттера Спиндта», где сначала в металлической пленке, нанесенной на слой диэлектрика вытравливались отверстия, после чего через эти отверстия травились полости в диэлектрике и, только после этого создавались катоды путем напыления молибдена через отверстия, частично «зарощенные» алюминием).

В [2] рассматривается автоэмиссионный катодный блок, изготовленный по «наномеханотронной» технологии. Работа над подобными устройствами этой группы в России ведется в последние годы в НИИФП им. Лукина [17]. Технология изготовления такого микроприбора содержит большей частью операции, принятые в стандартном КМОП процессе, с характерными размерами литографии 1,5...0,8 мкм или даже больше. Упомянутая выше «наномеханотронная» технологическая операция позволяет проводить «заострение» полевого эмиттера-иглы до радиуса закругления 5...10 нм путем локально-го термического окисления кремния.

Массив кремниевых ультраострых эмиттеров с сотовым управляемым электродом, созданный по такой технологии, изображен на рис. 2. Здесь приведены две стадии: 1) формирование кремниевых ультраострых микроострий (рис. 2, а); 2) формирование поликремниевого управляемого электрода с последующим вскрытием эмиттерных полостей (рис. 2, б).

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 улучшением вакуума, очисткой эмиттера, использованием импульсного напряжения (для ослабления миграции атомов в электрическом поле и саморазогрева эмиттера), умеренным подогревом эмиттера (для защиты от адсорбции и для «заглаживания» дефектов в местах удара ионов). Альтернативный подход – использование тонких пленок на основе углерода – уже привел к снижению требуемой напряженности электрического поля до 10^5 В/см (10 В/мкм).

Результаты исследований показали [18], что для повышения стабильности электронной эмиссии целесообразно 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 серийном выпуском подобных монолитных автоэмиссионных катодных блоков.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования [19–21] показывают, что некоторые виды наноструктурированных углеродных покрытий, являются весьма перспективным эмиссионным материалом по причине высокой электро- и теплопроводности, химической и термической устойчивости. Плотность тока эмиссии J из эмиттеров, покрытых такими материалами, может достигать больших величин ~ 1 А/см² при достаточно низком значении управляющего напряжения (менее 10 В), тем более, если эмиттер сам по себе «заострен» до нанометровых радиусов кривизны.

На рис. 3 показано РЭМ-изображение скола слоя высокоориентированных углеродных нанот-

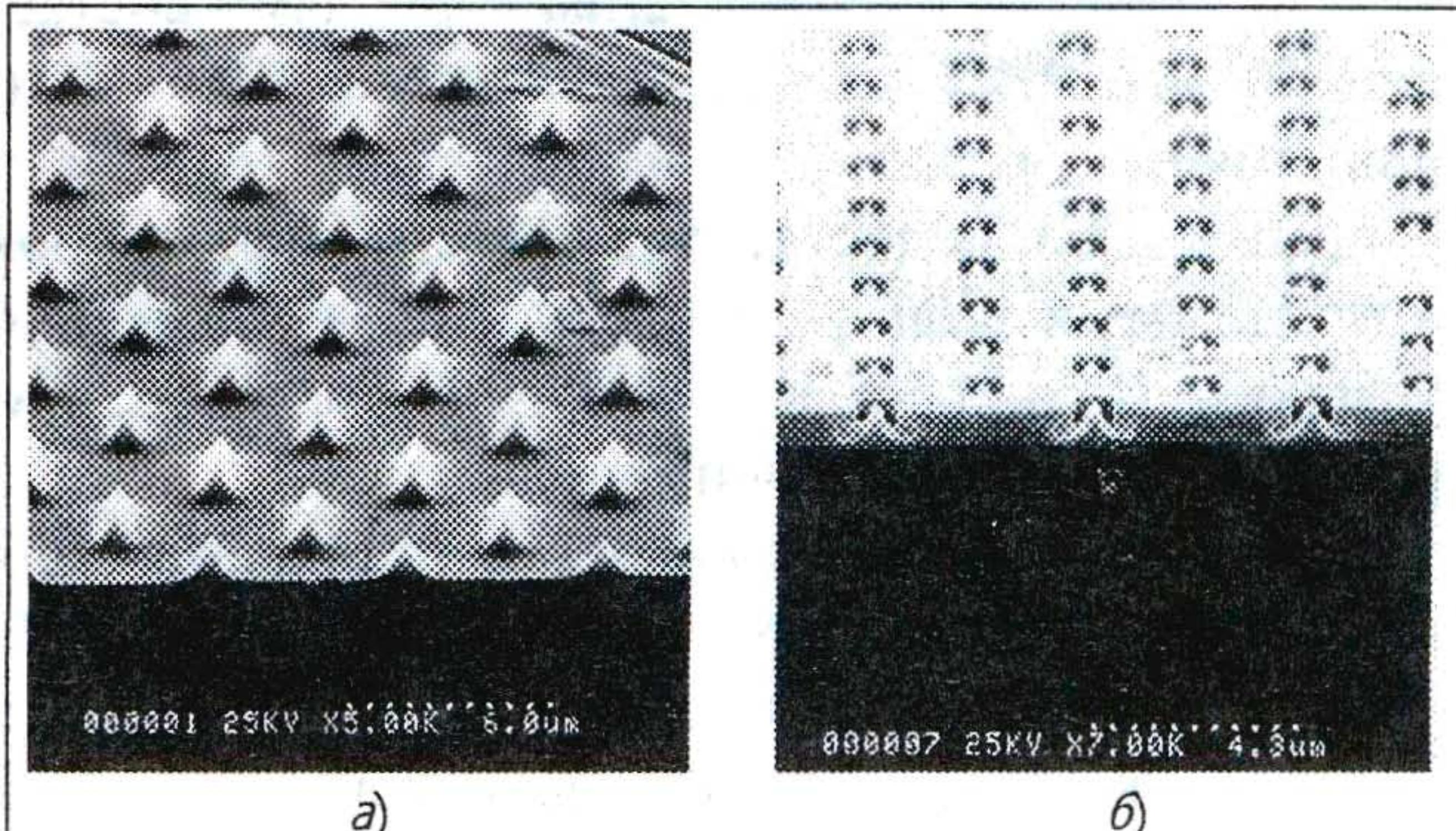


Рис. 2. Формирование матрицы кремниевых ультраострых эмиттеров с сотовым управляемым электродом: а – стадия формирования микроострий; б – стадия формирования поликремниевого сотового управляемого электрода с последующим вскрытием эмиттерных полостей посредством химико-механической планаризации

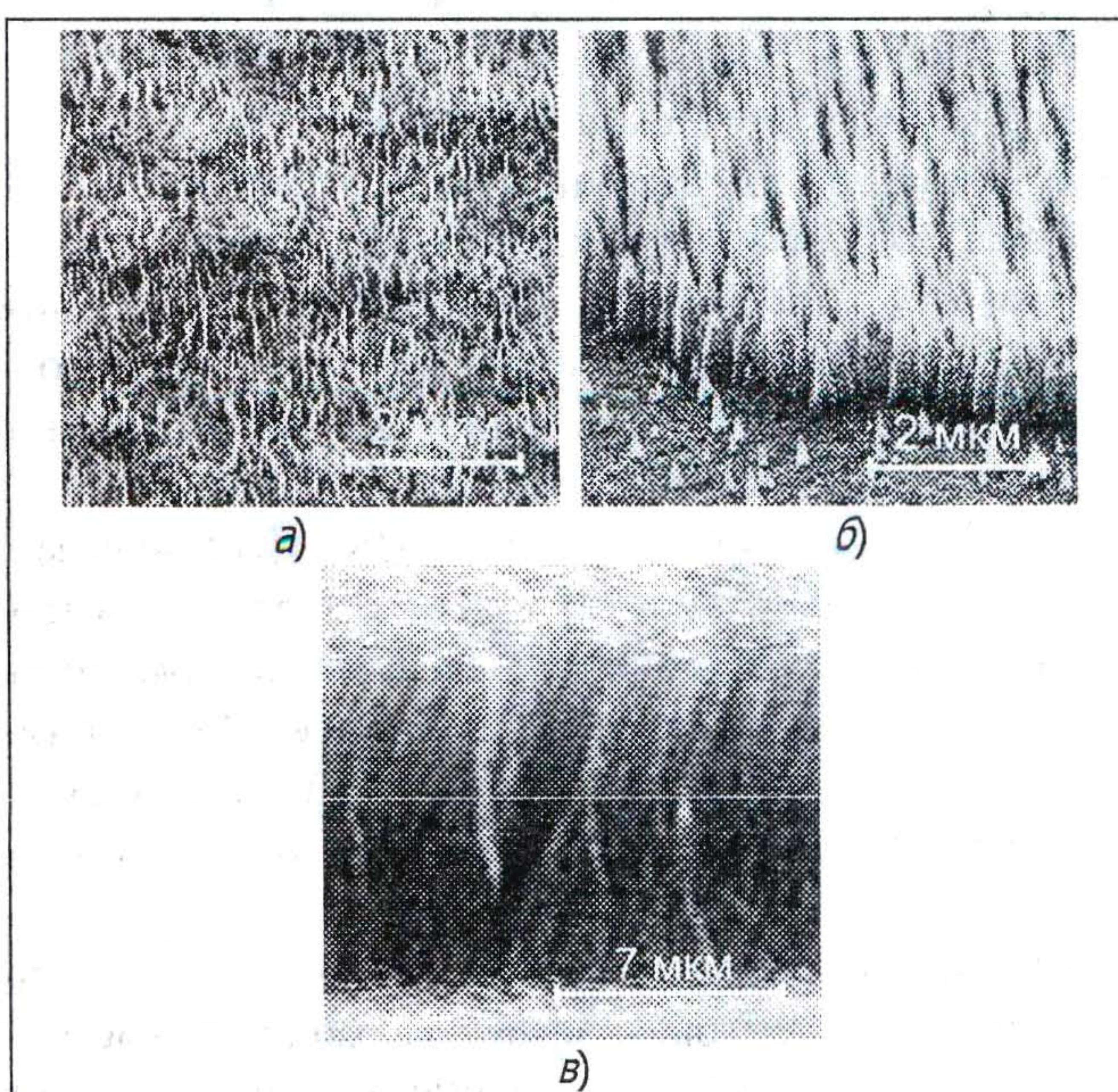


Рис. 3. Картина РЭМ-изображения скола слоя высокоориентированных первьевых (а), конусных (б) и цилиндрических (в) углеродных нанотрубок на кремниевой подложке, осажденных из газовой фазы

рубок на кремниевой подложке, осажденных из газовой фазы, которые могут принимать форму в виде перьевых (а), конусных (б) или цилиндрических (в) острийных элементов эмиттеров электронов.

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 высоких напряжений. Также наблюдается снижение работы выхода электронов при определенных структурных модификациях углеродных материалов алмазного типа или углеродных нанотрубок с графитовым типом структуры [22].

Обычно пороговая напряженность поля начала автоэмиссии катодов с нанотрубками составляет $0,5\ldots1$ МВ/м при плотности тока $\sim 0,5$ А/см² в постоянном режиме, а в импульсном ~ 2 А/см² 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 (~ 2000 Вт/м·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 средством, которое присуще широкозонным полупроводниковым материалам.

Однако автокатоды на основе алмазных материалов имеют низкую плотность тока и высокий порог напряжения автоэлектронной эмиссии, составляющий $22\ldots72$ МВ/м и более. Устранение этих недостатков возможно их заменой на композитные наноалмазные эмиттеры, в которых, кроме традиционных свойств алмаза, присущих массивному кристаллическому состоянию, будут присутствовать квантовые эффекты, характерные для низкоразмерных систем. Сущность этих эффектов изложена в [23]. Здесь при очень большой степени развитости поверхности, присущей нанокристаллическим материалам, влияние поверхности

ных 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 [24]. В качестве промежуточного слоя использовался силицид платины, полученный при различных температурных режимах. Этот материал образуется в результате твердофазной реакции «вживания» пленки металлической платины в монокристаллический или поликристаллический кремний [25] и обычно применяется в таких изделиях твердотельной электроники, как силовые диоды Шоттки или ИК-фотоприемники [26].

На рис. 4 приведены характерные зависимости плотности эмиссионного тока J от напряженности электрического поля E для образцов эмиттеров, сформированных при различных температурных режимах промежуточного силицидного слоя состава [24]: 1 – a -C/Pt/Si_(600 °C); 2 – a -C/Pt/Si_(400 °C); 3 – a -C/Pt/Si_(RT); 4 – a -C/Si. Наблюдаемый эффект увеличения тока эмиссии J при использовании силицида платины, как промежуточного слоя, обусловлен высокой развитостью его поверхности.

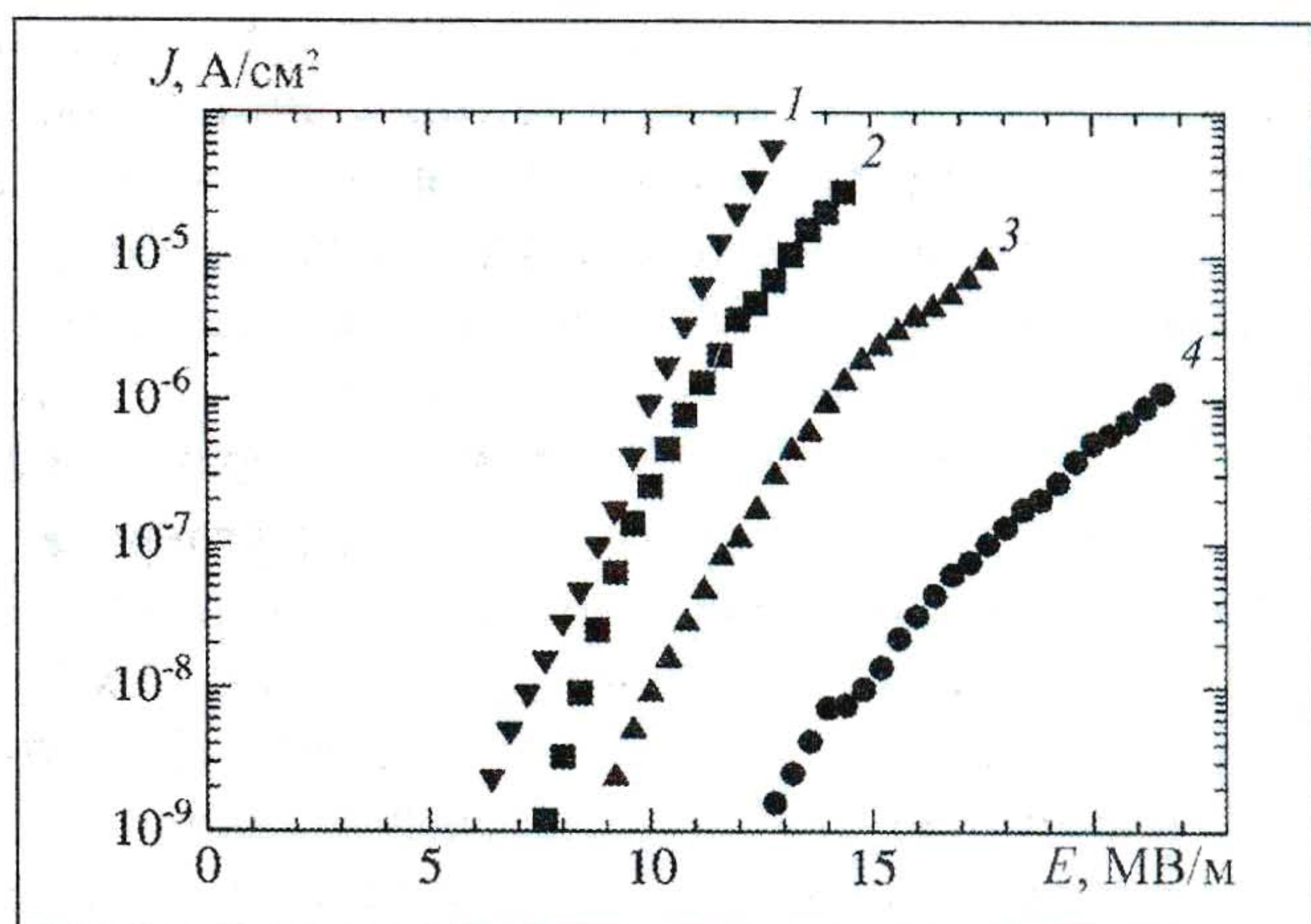


Рис. 4. Зависимость плотности эмиссионного тока J от напряженности электрического поля E для образцов эмиттеров, сформированных при различных температурных режимах промежуточного силицидного слоя состава [24]: 1 – a -C/Pt/Si_(600 °C); 2 – a -C/Pt/Si_(400 °C); 3 – a -C/Pt/Si_(RT); 4 – a -C/Si.

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 значения туннельного тока в зависимости от расстояния острье-противоэлектрод.

Зависимость туннельного тока от расстояния x между электродами имеет вид:

$$I \sim E \exp(-\alpha \sqrt{\phi_0} x), \quad (2)$$

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

Для типичных значений ϕ_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 Å.

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

Конструкция такого туннельного преобразователя на основе упругого чувствительного элемента (УЧЭ) диафрагменного типа, представлена на рис. 5 [27, 28].

Основным критерием, определяющим применимость материала или системы материалов для формирования исполнительного элемента для микроакселерометра является достижение минимальных величин остаточных напряжений. Остаточные напряжения формируются в функциональных слоях подвижных элементов при их формировании и высокотемпературных технологических обработках, что выражается в неконтролируемых деформациях исполнительных элементов устройств [29, 30].

Прибор изготавливается по планарной технологии применяемой в производстве полупроводниковых КМОП интегральных микросхем, что позволяет интеграции микромеханического устройства с электронными схемами управления на одном полупроводниковом кристалле. Разработан технологический маршрут изготовления интегрального туннельного наноэлектромеханического преобразователя, который хорошо совмещается с стандартным технологическим маршрутом КМОП. Это позволяет делать возможной однокристальную интеграцию преобразователя с управляющими электронными схемами.

Основными элементами конструкции чувствительного элемента преобразователя (рис. 5) являются туннельная пара электрод–«игла» 2 и электропроводящий слой электрода 4 на поликремниевой диафрагме 3.

При механическом воздействии (давления, вибрации и пр.) на диафрагму 3 изменяется вели-

чина рабочего РЗ, что приводит к изменению величины туннельного тока между электродами 2–4 «игла»–электрод. По изменению величины туннельного тока в РЗ можно судить о величине механического давления на диафрагму 3.

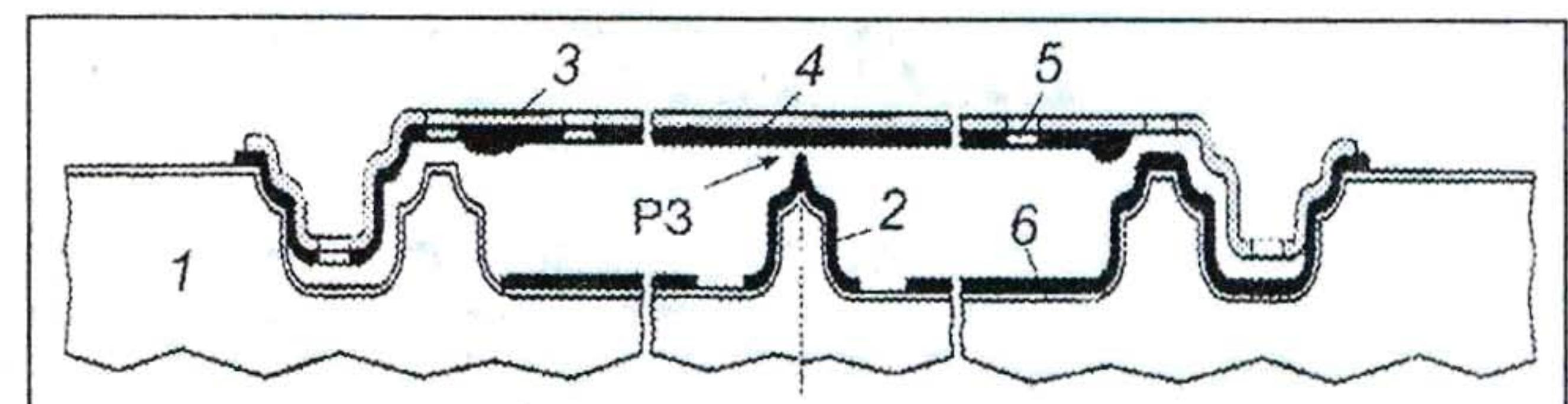


Рис. 5. УЧЭ туннельного преобразователя диафрагменного типа: 1 – монокристаллическая подложка из кремния (100); 2 – электропроводящий слой электрод–«игла»; 3 – основной несущий слой диафрагмы из поликремния; 4 – электропроводящий слой электрода диафрагмы; 5 – технологические отверстия; 6 – управляющий полевой электрод; РЗ – рабочая зона протекания туннельного тока пары электрод–«игла»

Основные рабочие элементы электрической части УЧЭ монолитного туннельного преобразователя. Ими являются электроды: «игла» и электрод диафрагмы, между которыми наблюдается протекание туннельного тока. Свойства этих электродов во многом характеризуют измерительные характеристики самого преобразователя. Постоянство электрических характеристик этих электродов в процессе работы (в течение срока службы) преобразователя должны быть обеспечены качеством их материалов.

На первой стадии изготовления микроприбора в кремниевой подложке путем ряда технологических операций [16, 31] формируется рельеф, состоящий из углубления и ультраострой заготовки для электрода – «иглы», после чего на структуру наносится изолирующий слой нитрида кремния (рис. 6, а–б).

Далее наносится металлизация игольчатого электрода «иглы» и отклоняющего электрода на диафрагме, затем – «жертвенный» слой (фосфоросиликатное стекло – ФСС или борофосфоросиликатное стекло – БФСС) (рис. 6, в–г), верхняя граница которого совпадает с острием «иглы», что достигается либо оплавлением поверхности стекла или методом химико-механической пластинации.

Такие 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 планированной, поскольку ее рельеф определяет форму наносимой в последующих операциях поликремниевой диафрагмы.

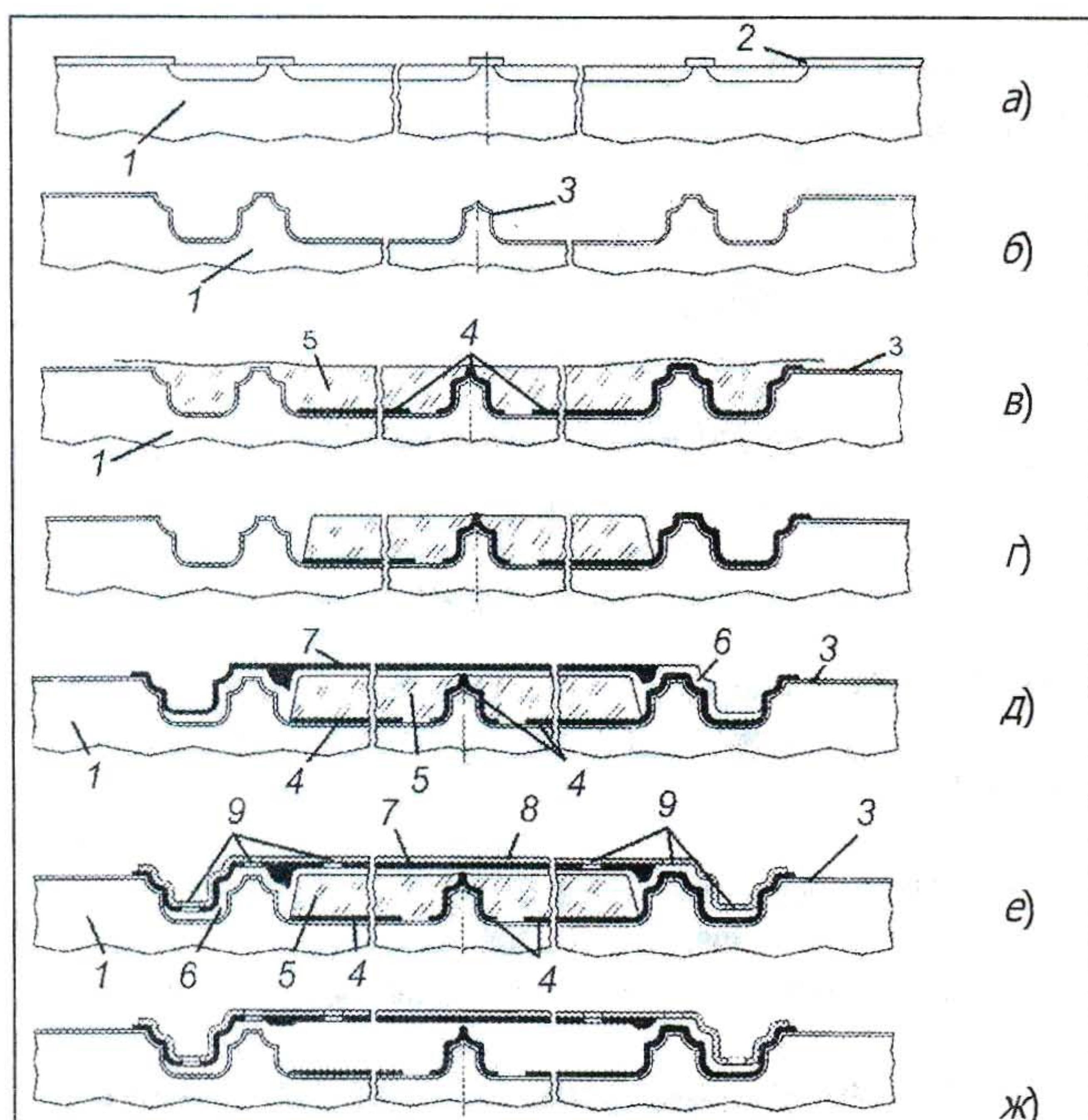


Рис. 6. Схема основных технологических этапов изготовления конструкции диафрагменного УЧЭ туннельного преобразователя: 1 – монокристалл кремния (100); 2 – нитридная маска для формирования рельефа; 3 – изолирующий слой пиролитического Si_3N_4 ; 4 – проводящий слой «иглы» и управляющего полевого электрода; 5 – «жертвенный слой» ФСС (или БФСС); 6 – слой пиролитического SiO_2 ; 7 – проводящий слой диафрагмы; 8 – несущий слой диафрагмы из поликремния; 9 – технологические отверстия для вытравливания «жертвенного слоя»

Возможна также замена операции планаризации рядом других технологических операций, направленных на минимизацию выступов, образующихся на поверхности жертвенного слоя над сформированными в кремнии «иглами». Возможно плазмохимическое удаление 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. 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 могут использоваться как традиционные растворы на основе плавиковой кислоты, так и перекисно-аммиачные растворы, обладающие большей селективностью к травлению 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 нанесением платины магнетронным способом на горячую подложку. Угол при вершине «иглы» составляет 27° 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.

Электродный силицид платины. В ряде работ [24, 27, 28] показана перспективность применения слоев силицида платины в составе так называемых «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 непрореагированного благородного металла в смеси кислот – «царской водке».

Проведенные исследования поверхности свежеприготовленной пленки силицида платины методом сканирующей туннельной микроскопии с использованием зонда из платино-иридиевого сплава, показали наличие характерной ярко выраженный экспоненциальный зависимости для туннельного тока «ток-высота». Это подтверждает приемлемость туннельных характеристик силицида платины для его использования в качестве электродного материала чувствительного элемента преобразователя ($U = +0,3$ В, $I_m = 25$ пА). Развитая поверхность электрода силицида платины рис. 7, а позволяет её использовать в качестве промежуточного слоя острийных эмиттеров в автотэмиссионных микроэлектронных приборах.

С целью определения структурных и электрофизических свойств силицидных пленок были проведены исследования рельефа и электрофизическими характеристик поверхности до и после ее температурного отжига в области $\sim 800\ldots850^{\circ}\text{C}$.

Для исследования локального электрического тока через поверхность силицида платины использовалась схема ACM с проводящим контактным кантileвером скользящим по рельефу поверхности исследуемого образца при напряжении смещения $U_{\text{см}} = +3,5\text{ В}$. При этом измеряемое значение туннельного тока в точке контакта зонда обратно пропорциональна локальному электрическому сопротивлению поверхностного слоя исследуемого образца.

Исследование рельефа поверхности полученных образцов силицида платины методом ACM в полуконтактном режиме, показало, что технологический термический отжиг полученных слоев силицида платины при температурах до $820\ldots830^{\circ}\text{C}$ обеспечивает высокую электрическую проводимость слоя (рис. 8, б). Однако картина топографии протекания локального электрического тока (сопротивления) растекания показывает некоторую неоднородность по току из-за наличия мелких диэлектрических островков по поверхности слоя (конгломераты размером $\sim 10\ldots20\text{ нм}$, рис. 8, а). Возможное объяснение их возникновения – выход на поверхность частиц кремния с последующим его окислением. Латеральные поверхностные конгломераты высокой электрической проводимости достигают диаметра $\sim 200\ldots300\text{ нм}$ на площади $1000\times1000\text{ нм}^2$.

Термический отжиг при более высоких технологических температурах выше 850°C приводит к перекристаллизации силицидной пленки с резким возрастанием площади непроводящих участков (рис. 8, б).

ВЫВОДЫ

Показана перспективность использования силицида платины в качестве материала проводящих слоев чувствительного элемента туннельного преобразователя. При этом температура термообработок в процессе изготовления прибора не должна превышать $820\ldots830^{\circ}\text{C}$, так как при этом происходит резкое увеличение площади плохо проводящих участков поверхности.

Разработанный технологический маршрут изготовления интегрального туннельного наноэлектромеханического преобразователя полностью совместим со стандартным технологическим

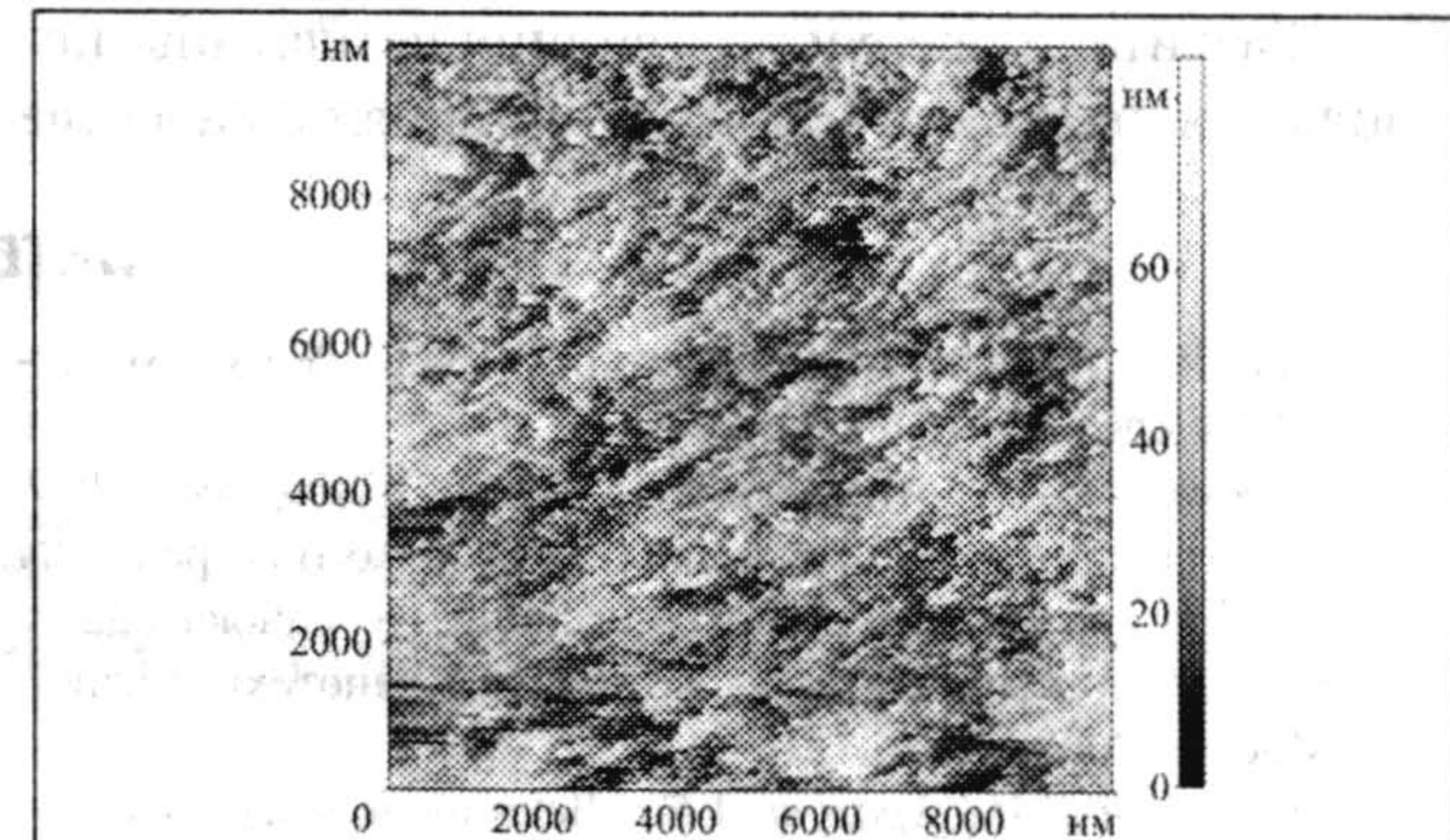


Рис. 7. СТМ-изображение поверхности силицида платины до термообработки ($U = +0,3\text{ В}$, $I_r = 25\text{ пА}$)

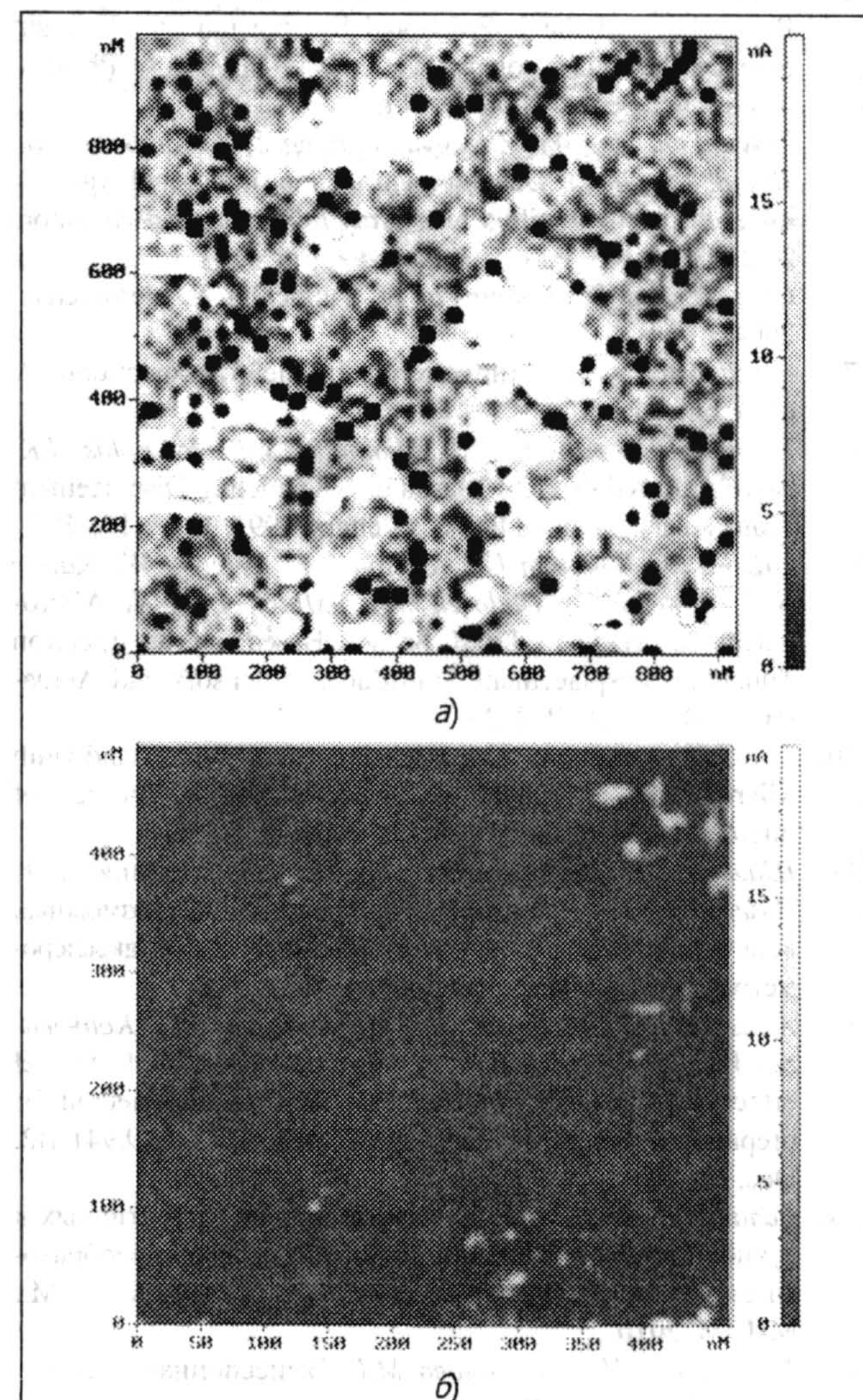


Рис. 10. Картина топографии протекания локального электрического тока через пленку силицида платины после термообработки при температуре: а – 830°C ; б – 850°C

маршрутом КМОП, что позволяет делать возможной однокристальную интеграцию преобразователя с управляющими электронными схемами.

Развитая поверхность силицида платины позволяет использовать данный материал в качестве

промежуточного слоя для острого эмиттера в автоэмиссионных микроэлектронных приборах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhu W. Vacuum Microelectronics. New York: Wiley-Interscience. 2001.
2. Дюжев Н.А., Махиборода М.А., Скворцов В.Э. Электронно-лучевой микродисплей высокого разрешения на базе кремниевого автоэмиссионного нанокатода // Первый международный форум по нанотехнологиям. Москва. 2008.
3. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. М.: Физматлит. 2003.
4. Srivastava V. THz Vacuum microelectronic devices // Proceedings of the International Symposium on «Vacuum Science and Technology» (IVS 2007) // Journal of Physics: Conference Series. 2008. P. 114.
5. Zhiyu Wen, Ying Wu, Zhcngyuan 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.
6. Cruz S., Lee K., Ponnayolu D. Tunneling accelerometers. 2004.
7. <http://clifton.mech.northwestern.edu/~me381/project/done/Accelerometer.pdf>
8. 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.
9. DiLella D., Whitman L.J., Colton R.J., Kenny T.W., Kaiser W.J., Vote E.C., Podosek J.A., Miller L.M. A Micro-machined Magnetic-Field Sensor Based on an Electron Tunneling Displacement Transducer // Sensors and Actuators. 2000. V. 86. P. 8–20.
10. Liu C.H. and Kenny T.A. High-Precision, Wide-Bandwidth Micromachined Tunneling Accelerometer // Journal of microelectromechanical systems. 2001. V. 10. № 3.
11. Шашкин В.И., Востоков Н.В., Вопилкин Н.А., Клинов А.Ю., Волгунов Д.Г., Рогов В.В., Лазарев С.Г. О возможных конструкциях датчиков туннельно-эмиссионных акселерометров // Микросистемная техника. 2003. № 5.
12. 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.
13. Балан Н.Н. Разработка и оптимизация конструктивных и технологических решений туннельных нанопреобразователей // Автореферат на соиск. уч. степени к.т.н. М.: МИЭМ. 2010.
14. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. М.: Наука. 1966.
15. Жукова С.А., Обижсаев Д.Ю., Гринькин Е.А. Микроэлектромеханические компоненты туннельных акселерометров // Материалы Междунар. школы-конф. «МОЛОДЫЕ УЧЕНЫЕ-2008». 10–13 ноября 2008 г. Москва. М.: Энергоатомиздат. 2008. Ч. 1. С. 173–176.
16. 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.
17. 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.
18. Djuzhev N.A., Beliaev S.N., Vlasenko V.A., Gogin A.A., Gontar V.M., Deniskin V.V., Mazaev A.A., Nevsky A.B., Tishin Y.I., Shokin A.N. A Silicon Gated Field Edge Cathode // The 16th International Vacuum Microelectronics Conference. 2003. Senri Life Science Center. Osaka. Japan. 2003. P. 177–178.
19. Дюжев Н.А., Махиборода М.А., Федирко В.Л. Исследование различных режимов автоэлектронной эмиссии кремниевого кантилевера // Материалы 14-й науч.-технич. конф. «Вакуумная наука и техника» (под ред. В. А. Быкова). М.: МИЭМ. 2007. С. 248–251.
20. Раков Э.Г. Химия и применение углеродных нанотрубок // Успехи химии. 2001. Т. 70. С. 934.
21. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // Успехи физических наук. 2002. Т. 172. С. 401.
22. 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.
23. Образцов А.Н., Павловский И. Ю., Волков А.П. Автоэлектронная эмиссия в графитоподобных пленках // ЖТФ. 2001. Т. 71. № В 11. С. 89–95.
24. Покровский Я.Е. Влияние поверхностных уровней на электрические свойства мелкозернистых пленок. ЖТФ. 1954. Т. 24. № В.7. С. 1229.
25. Takashi Ikuno, Yuichi Kawano, Yang-Gyu Baek, Jeong-Tak Ryu, Mitsuhiro Katayama, Kenjiro Oura 炭素系薄膜の電界電子放出における界面金属の影響 (Influence of Interface Metal on Field Emission from Carbon Film) // 表面科学. 2000. V. 21. P. 502–506.
26. Мьюарка Ш. Силициды для СБИС. М.: Мир. 1986.
27. Досталко Л.П., Баранов В.В., Шаталов В.В. Пленочные токопроводящие системы СБИС. Минск. 1989.
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. Москва. 23–27 янв. 2006 г. М.: МИФИ. 2006. Т. 1. С. 70–71.
29. 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.
30. Huang S., Li B., Zhang X. Elimination of stress-induced curvature in microcantilever infrared focal plane arrays // Sensors and actuators A. 2006. V. 130–131. P. 331–339.
31. Жукова С.А., Обижсаев Д.Ю., Жуков А.А., Бабаевский П.Г. Закономерности плазмохимического травления полимерных «жертвенных» слоев вnano- и микроразмерных зазорах // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 9. С. 20–25.

32. Balan N.N., Ivashov E.N., Nevsky A.B. Platinum silicide as electrode material of microfabricated 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.

Поступила 13 декабря 2011 г.

FABRICATION OF FIELD-EMISSION AND TUNNELING NANO-MICRODEVICES CATHODES, SOME FEATURES OF TECHNOLOGY

© Authors, 2012

N.N. BALAN, E.N. IVASHOV, P.A. LUCHNIKOV, A.V. NEVSKY

This paper describes the advanced cathode structure for field-emission and tunnel microdevices and its basic properties. The main technological approaches currently used in vacuum microelectronics and tunneling transducers fabrication are presented. The platinum silicide is proposed as electrode material for nanoelectromechanical sensors based on quantum electron tunneling. The process flow of device fabrication is presented and reasons to use platinum silicide as metallisation material are described. The fabrication process has the general features of a conventional surface micromachining CMOS process flow except for some special operations. In this paper we also demonstrate the use of conductive atomic force microscopy (AFM) in spreading resistance imaging mode for inspection of topography and electrical properties of platinum silicide surface. The goal of these studies is to define the platinum silicide films structural and electrical properties variation after thermal processing (820–850°C) and to correct the process flow parameters as may be required. Both AFM-inspection operations of pre- and post-thermal processed test structures are performed. The experimental results are presented.