

УДК 533

ГЕНЕРАЦИЯ И РЕГИСТРАЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПОТОКЕ ГАЗА 1. ФОРМИРОВАНИЕ МАССИВОВ МИКРОТРУБЧАТЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ И СЕНСОРОВ

В. А. Селезнев, В. Я. Принц, В. М. Анискин*, А. А. Маслов*

Институт физики полупроводников СО РАН, 630090 Новосибирск

* Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск

E-mails: seleznev@isp.nsc.ru, prinz@isp.nsc.ru, aniskin@itam.nsc.ru, maslov@itam.nsc.ru

Предложен новый способ создания саморегулирующейся поверхности для подавления турбулентности и сохранения ламинарного режима сверхзвукового обтекания. Разработаны методы формирования сверхбыстродействующих измерительных и исполнительных элементов такой поверхности. Предложены конструкции указанных элементов (сенсоров и актюаторов), представляющие собой изготовленные из $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Au}$ и $\text{InGaAs}/\text{GaAs}/\text{Au}$ и подвешенные над подложкой микротрубки, стенки которых имеют нанометровую толщину и к которым подсоединены электрические контакты. Макеты распределенных массивов трубчатых микросенсоров и микроактюаторов изготовлены в едином технологическом процессе с использованием хорошо развитой планарной технологии и технологии сворачивания напряженных гетеропленок.

Ключевые слова: трубчатые сенсоры и актюаторы, массивы микротрубок, управление течениями.

Решение проблемы подавления турбулентности и сохранения ламинарного режима обтекания поверхности новых летательных аппаратов позволит существенно уменьшить силы сопротивления движению, повысить экономичность, улучшить их маневренность и аэродинамические характеристики. Если в случае дозвукового обтекания эта проблема может быть решена с помощью микроэлектромеханических систем [1, 2], то в случае сверхзвукового обтекания необходимо использование быстродействующих измерительных и исполнительных микроустройств, работающих на частотах свыше 1 МГц, которые невозможно обеспечить с помощью механических устройств.

В настоящей работе описаны технологии формирования быстродействующих измерительных устройств (микросенсоров) и исполнительных устройств (микронагревателей-актюаторов), а также предложены их конструкции. Основа таких устройств — электропроводящие микротрубки со стенками нанометровых толщин. Преимуществом тонкостенных трубчатых элементов является малое время тепловой релаксации $\tau \approx 1$ мкс [3, 4], существенно меньшее времени тепловой релаксации стандартных проволочных ($\tau \approx 1$ мс) или пленочных элементов. Малоинерционные локальные микротрубчатые нагреватели и сенсоры, объединенные в регулярные управляемые массивы на обтекаемой поверхности летательных аппаратов, предназначены для формирования саморегулирующейся поверх-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 05-08-50116-а) и в рамках Интеграционного проекта СО РАН № 61 и государственного контракта № 02.513.11.3003.

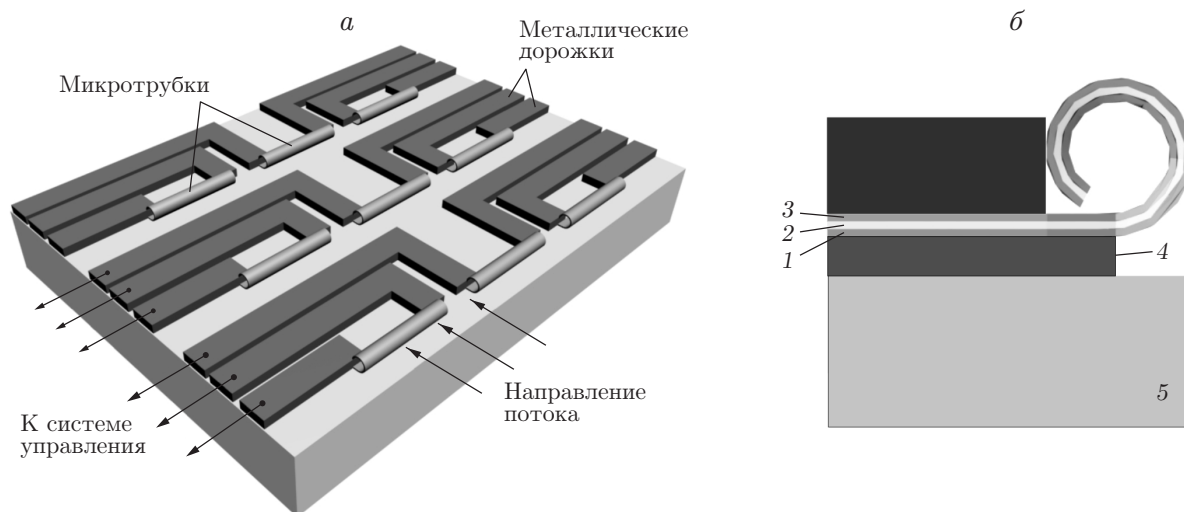


Рис. 1. Система электропроводящих тонкостенных микротрубок с электрическими контактами:

a — конструкция чипа с массивом микротрубок; *б* — поперечный разрез в области микротрубки (1 — сжатый слой; 2 — растянутый слой; 3 — проводящий слой; 4 — жертвенный слой; 5 — подложка)

ности, улучшающей аэродинамические характеристики летательных аппаратов, прежде всего малогабаритных.

Ниже описаны разработанные методы формирования микротрубчатых сенсоров, нагревателей-актюаторов и их массивов (систем). Такие методы широко используются и перспективны для изготовления саморегулирующихся поверхностей достаточно большой площади.

В предложенной системе трубчатые элементы, используемые в качестве микроактюаторов, идентичны элементам микросенсоров (рис. 1), причем с помощью дополнительно интегрированного процессора возможно быстрое переключение необходимой трубки в режим сенсора или актюатора и тем самым изменение конфигурации системы. Трубчатые элементы соединены с устройствами управления и считывания данных с помощью проводящих дорожек, расположенных на подложке.

Рассмотрим подробнее метод изготовления массива трубчатых элементов, в основе которого лежит метод формирования тонкостенных микро- и нанотрубок с использованием процессов самосворачивания в трубки-свитки тонких напряженных гетеропленок при освобождении их от связи с подложкой [5, 6]. Показано, что диаметр полупроводниковых и гибридных трубок задается с прецизионной точностью от 100 мкм до 2 нм [5, 6]. Микро- и нанотрубки могут быть сформированы из широкого набора материалов [5–11] и с помощью литографии размещены в любом заданном месте подложки. На рис. 1, б представлена схема формирования трубки-свитка из напряженной многослойной пленки. Трубка состоит из сжатого, растянутого и проводящего слоев. Сжатый и растянутый слой являются формообразующими и обеспечивают сворачивание нанесенного на них проводящего слоя при селективном удалении подложки или дополнительного жертвенного слоя. Сжатый, растянутый и проводящий слой могут быть изготовлены из различных комбинаций аморфных, поликристаллических или монокристаллических металлов, диэлектриков или полупроводников [6–11].

На основе планарной технологии в едином цикле изготовлены макеты массивов трубчатых микросенсоров и микроактюаторов из гибридных (металл — полупроводник и металл — диэлектрик) пленок.

Наименее затратной является технология формирования микротрубок из металлических слоев, напыленных на кремниевую подложку. Однако пластичность и недостаточная прочность аморфных металлических слоев, например бислоев Ti/Au, не позволили ограничиться только этим вариантом. В других опробованных вариантах использовались жесткие формообразующие слои, на которые напылялись дополнительные проводящие металлические слои Ti/Au.

Следует отметить, что возможность массового изготовления конструкции из того или иного материала определяется рядом требований, прежде всего совместимостью технологических процессов со стандартными процессами и возможностью изготовления свободных, выступающих за подложку сенсоров и нагревателей. Второе требование выполняется, если найден селективный травитель, с помощью которого можно удалить подложку под сенсором или нагревателем, освободив его для беспрепятственного взаимодействия с потоком газа.

В качестве полупроводниковой структуры выбрана эпитаксиальная гетеропленка InGaAs/GaAs. Проведенные эксперименты показали, что степень адгезии напыляемых пленок Ti/Au достаточна для формирования микротрубок и удаления жертвенных слоев в водных растворах плавиковой кислоты.

Использование кремниевых подложек для изготовления трубок очень перспективно, что обусловлено их низкой стоимостью и наличием развитых для них технологий изготовления интегральных схем. При изготовлении интегральных схем стандартными технологическими операциями являются термическое окисление кремния и осаждение низкотемпературного плазмохимического нитрида кремния. Для данных веществ модуль Юнга в десятки раз больше, чем для напыляемых металлов, кроме того, окисел кремния, полученный термическим окислением, находится в сжатом состоянии, а низкотемпературный плазмохимический нитрид кремния, наоборот, получается растянутым [12]. Очевидно, что если на подложке кремния сформировать напряженную двухслойную пленку SiO₂/Si₃N₄, то при селективном удалении подложки она свернется в трубку. Установлено, что для данной системы в качестве селективного травителя можно использовать травитель на основе водных растворов аммиака [8]. Например, двухвитковые трубки-свитки диаметром 5 мкм были сформированы из гетеропленки SiO₂/Si₃N₄ толщиной 40 нм в результате травления подложки в течение 12 ч.

Эксперименты с напылением Ti/Au на гетероструктуры Si/SiO₂/Si₃N₄ показали, что механические напряжения, возникающие в освобождаемой от подложки пленке SiO₂/Si₃N₄, достаточны для формирования трубок с дополнительным слоем металла толщиной 50 ÷ 100 нм.

Таким образом, при изготовлении массивов микротрубок в качестве формообразующих слоев были выбраны гетеропленки InGaAs/GaAs и SiO₂/Si₃N₄. В качестве проводящего слоя использовалась пленка Ti/Au, которая дополнительно напылялась с помощью электронно-лучевого испарения (до процесса сворачивания).

На рис. 2 представлена схема изготовления массивов трубчатых элементов из гетероструктуры GaAs/AlAs/InGaAs/GaAs, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Типичная гетероструктура содержала следующие слои: жертвенный слой AlAs толщиной 10 нм, сжатый слой In_{0,2}Ga_{0,8}As толщиной 16 нм и растянутый слой GaAs толщиной 16 нм (рис. 2,а). На поверхности выращенной гетероструктуры методом взрывной литографии формируется проводящий слой необходимой планарной геометрии путем напыления слоя Ti/Au толщиной 50 нм (рис. 2,б). Затем с помощью дополнительного напыления слоя золота толщиной 300 нм формируются низкоомные проводящие дорожки к областям-заготовкам микротрубок (рис. 2,в). После этого задаются локальные области, в которых будут формироваться трубки и которые являются окнами в маскирующем слое

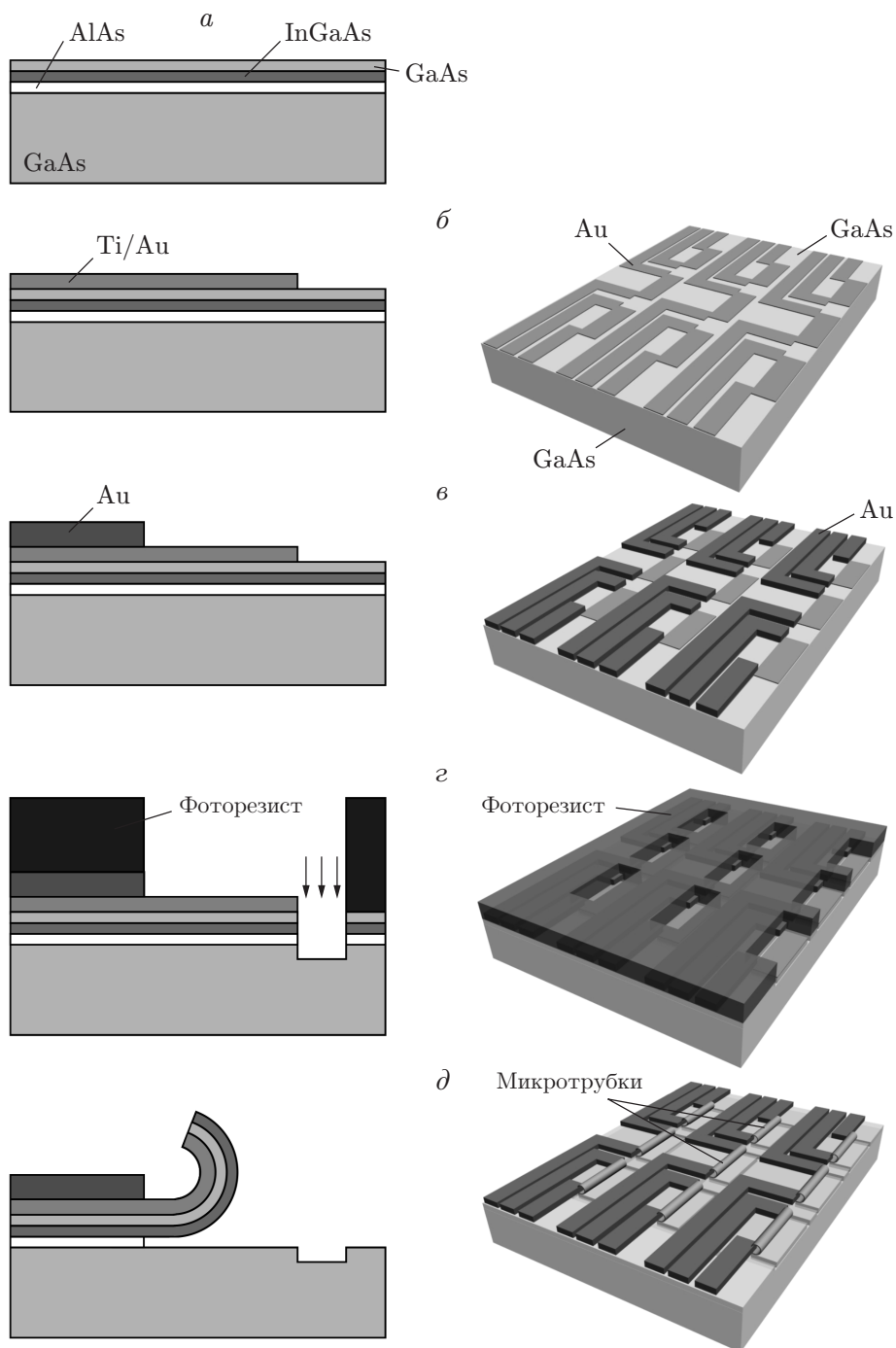


Рис. 2. Схема изготовления чипов с массивами электропроводящих микротрубок на гетероструктуре GaAs/AlAs/InGaAs/GaAs:

слева — поперечный разрез, *справа* — общий вид; *a* — формирование гетеропленки AlAs/InGaAs/GaAs на подложке GaAs; *б* — напыление слоя Ti/Au толщиной 50 нм; *в* — напыление слоя Au толщиной 300 нм и формирование низкоомных дорожек; *г* — травление окон в гетеропленке InGaAs/GaAs; *д* — селективное травление жертвенного слоя AlAs в водном растворе плавиковой кислоты и сворачивание трубки

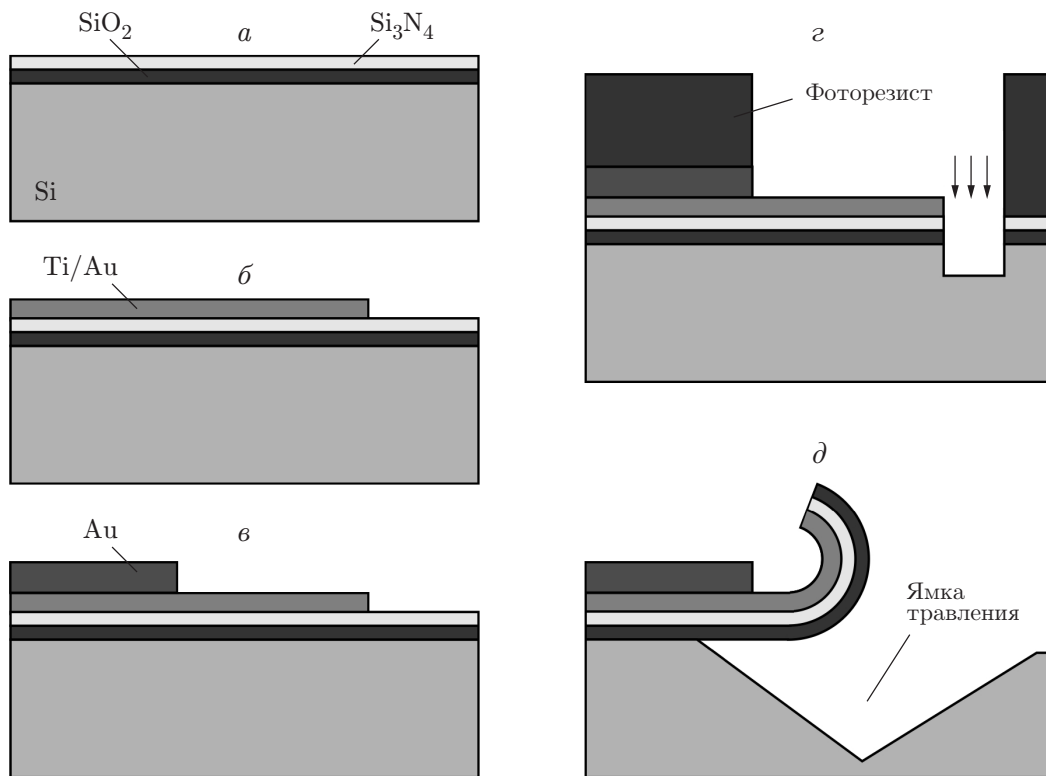


Рис. 3. Схема изготовления чипов с массивами электропроводящих микротрубок на гетероструктуре Si/SiO₂/Si₃N₄:

а — формирование гетеропленки SiO₂/Si₃N₄ толщиной 40 нм; *б* — напыление слоя Ti/Au толщиной 50 нм; *в* — напыление слоя Au толщиной 300 нм и формирование низкоомных дорожек; *г* — травление окон в гетеропленке SiO₂/Si₃N₄; *д* — селективное травление подложки в водном растворе аммиака и сворачивание трубки

фоторезиста (рис. 2, *г*). Через данные окна проводится плазмохимическое или жидкостное травление гетеропленки и частично подложки и формируются окна в самой гетеропленке (рис. 2, *г*). На заключительном этапе с помощью ацетона удаляется фоторезист и через вскрытые в гетеропленке окна проводится селективное травление жертвенного слоя AlAs в селективном травителе на основе раствора плавиковой кислоты [7], что приводит к формированию из InGaAs/GaAs/Ti/Au гибридных микротрубок (рис. 2, *д*). Затем чипы тщательно промываются в деионизированной воде и высушиваются.

Процесс изготовления чипов из гетероструктур Si/SiO₂/Si₃N₄ (рис. 3) аналогичен описанному выше.

С помощью разработанных технологических схем изготовлены чипы с массивами гибридных микротрубок, свернутых из гетеропленок SiO₂/Si₃N₄/Au, InGaAs/GaAs/Au (рис. 4). Общая толщина стенок SiO₂/Si₃N₄/Au-микротрубок составляла 90 нм, InGaAs/GaAs/Au-микротрубок — 82 нм. Диаметр изготовленных микротрубок приближенно равен 10 мкм. На рис. 4, *а* видно, что SiO₂/Si₃N₄/Au-микротрубки висят над ямкой, вытравленной в подложке. В случае использования гетероструктуры GaAs/AlAs/InGaAs/GaAs/Au трубки оказываются подвешенными над подложкой GaAs на высоте, равной толщине жертвенного слоя AlAs (см. рис. 2, *д*). Толщину жертвенного слоя можно задавать прецизионно (от нескольких десятков нанометров до нескольких микрометров). Чипы, изготовленные на подложках GaAs, имеют более гладкую поверхность, что, по-видимому, более предпочтительно при проведении аэродинамических экспериментов.

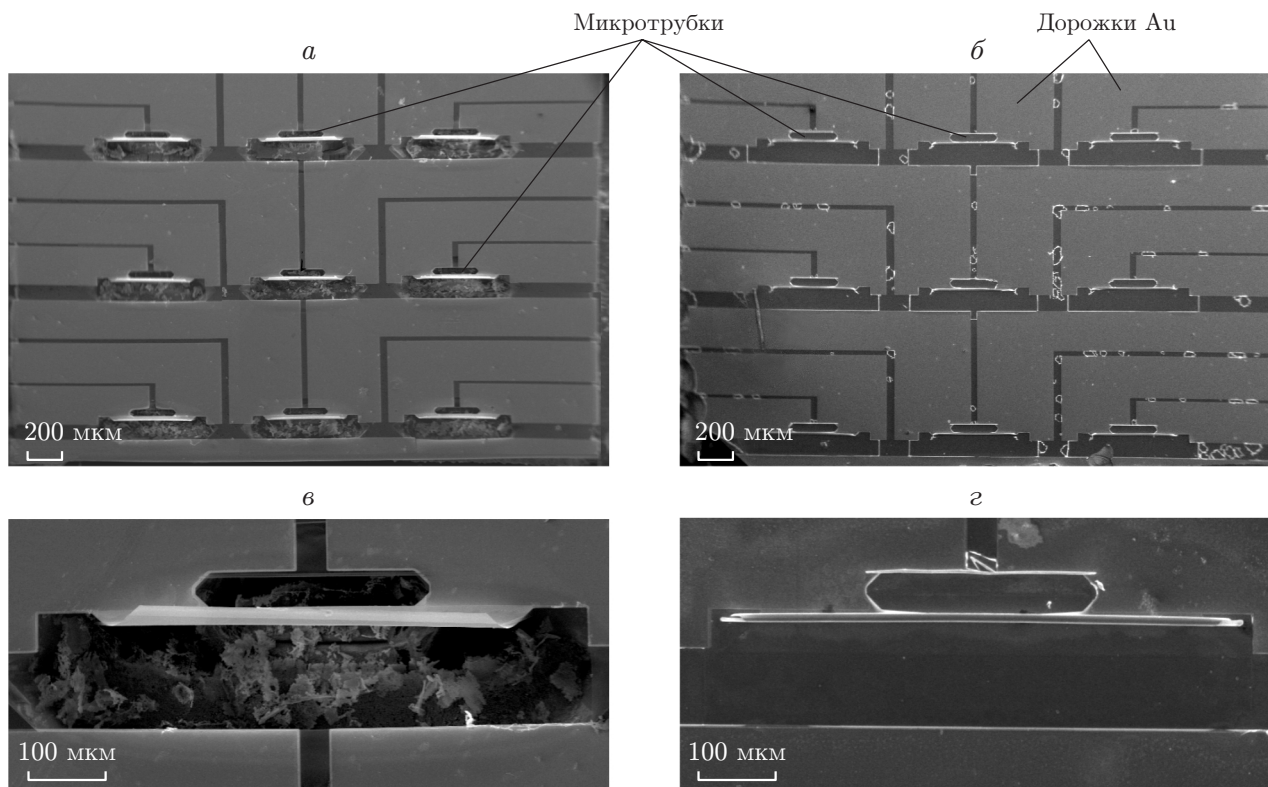


Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения чипов с массивами электропроводящих микротрубок:

a — массивы микротрубок, изготовленных из гетеропленки $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Au}$ (трубки подвешены над ямками, вытравленными в подложке Si); *б* — массивы микротрубок, свернутые из гетеропленки $\text{InGaAs}/\text{GaAs}/\text{Au}$ (ямки травления отсутствуют); *в*, *г* — увеличенные изображения микротрубок, соответствующие рис. 4, *a*, *б*

Разработанные методы позволяют за один технологический цикл изготовить более 400 чипов. Количество чипов ограничивается диаметром имеющихся подложек (для Si диаметр равен 76 мм, для GaAs — 50 мм).

Отметим, что у сформировавшейся трубки полупроводниковые или диэлектрические слои находятся на внешней поверхности, а нагрев происходит при пропускании по пленке золота электрического тока. Последнее очень важно для стабильности характеристик при эксплуатации (загрязнение поверхности частицами, имеющимися в потоке, приводит к изменению характеристик датчиков). В рассматриваемом случае защитное покрытие металлической поверхности полупроводниковым или диэлектрическим слоем образуется автоматически.

Существенным преимуществом разрабатываемой технологии изготовления чипов с распределенными массивами гибридных микротрубок, свернутых из гетеропленок $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Au}$, $\text{InGaAs}/\text{GaAs}/\text{Au}$, является возможность их массового производства в едином технологическом процессе, что снижает их себестоимость в десятки и сотни раз.

Таким образом, в работе предложен новый подход к созданию саморегулирующейся поверхности для подавления турбулентности и сохранения ламинарного режима сверхзвукового обтекания. Измерительными и исполнительными элементами такой поверхности являются гибридные тонкостенные микротрубки с электрическими контактами, которые могут представлять собой как сенсор, так и актюатор. Разработана технология изготов-

ления чипов с распределенными массивами микротрубок, основанная на методах самосворачивания в трубки тонких напряженных гетеропленок и методах, используемых в технологии изготовления интегральных схем. Изготовлены чипы с массивами микротрубок, свернутых из гетеропленок $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Au}$ и $\text{InGaAs}/\text{GaAs}/\text{Au}$.

Авторы выражают благодарность Е. Б. Горохову и Т. А. Гавриловой за помощь в проведении экспериментов и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ho C.-M., Tai Y.-C.** Review: MEMS and its applications for flow control // J. Fluid Engng. 1996. V. 118, N 9. P. 437–447.
2. **Tsao T., Liu C., Tai Y.-C., Ho C. M.** Micromachined magnetic actuator for active fluid control // Application of micromachined to fluid mechanics / Ed. by P. R. Bandyopadhyay, K. S. Breuer, C. J. Biechinger. Los Angeles: ASME, 1994. P. 31–38.
3. **Пат. 2207576 РФ, G 01 P 5/12.** Датчик термоанемометра / А. Н. Шиплюк, В. А. Селезнев, В. М. Анискин. Опубл. 27.06.2003.
4. **Заявка 2007129547 РФ, 8 G 01 P 5/10.** Способ изготовления датчика скорости потока газа и жидкости / В. А. Селезнев, В. Я. Принц. Опубл. 1.08.2007.
5. **Prinz V. Ya., Seleznev V. A., Gutakovsky A. K.** Self-formed InGaAs/GaAs nanotubes: concept, fabrication, properties // 24th Intern. conf. on the physics of semiconductors. S. l.: World Scientific, 1999. ISBN: 981-02-4030-9 (CD).
6. **Prinz V. Ya., Seleznev V. A., Gutakovsky A. K., et al.** Free-standing and overgrown InGaAs/GaAs nanotubes, nanohelices and their arrays // Physica E. 2000. V. 6, N 1/4. P. 828–831.
7. **Golod S. V., Prinz V. Ya., Mashanov V. I., Gutakovsky A. K.** Fabrication of conducting GeSi/Si micro and nanotubes and helical microcoils // Semicond. Sci. Technol. 2001. V. 16, N 3. P. 181–185.
8. **Nastaushev Yu. V., Prinz V. Ya., Svitashcheva S. N.** A technique for fabricating Au/Ti micro and nanotubes // Nanotechnology. 2005. V. 16, N 6. P. 908–912.
9. **Принц В. Я., Голод С. В.** Упругие нанооболочки на основе кремниевых пленок: формирование, свойства и практическое применение // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 6. С. 114–128.
10. **Golod S. V., Grützmacher D., David C., et al.** Fabrication of SiGe/Si/Cr bent cantilevers based on self-rolling of epitaxial films // Microelectron. Engng. 2003. V. 67/68. P. 595–601.
11. **Golod S. V., Prinz V. Ya., Wägli P., et al.** Freestanding SiGe/Si/Cr and SiGe/Si/Si_xN_y/Cr microtubes // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84, N 17. P. 3391–3393.
12. **Семенова О. И., Горохов Е. Б., Носков А. Г. и др.** Состав, свойства и механические напряжения пленок SiN_x:H, полученных в плазме ВЧ-разряда // Поверхность: Физика, химия, механика. 1992. № 10/11. С. 102–110.

*Поступила в редакцию 25/X 2007 г.,
в окончательном варианте — 24/XII 2007 г.*