

УДК 532.536.24:533

## ГЕНЕРАЦИЯ И РЕГИСТРАЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПОТОКЕ ГАЗА 2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МАССИВАМИ МИКРОТРУБЧАТЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ И СЕНСОРОВ

А. Н. Шиплюк, В. М. Анискин, В. А. Селезнев\*, В. Я. Принц\*,  
А. А. Маслов, Р. С. Матвиенко

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

\* Институт физики полупроводников СО РАН, 630090 Новосибирск  
E-mails: shilyuk@itam.nsc.ru, aniskin@itam.nsc.ru, maslov@itam.nsc.ru,  
seleznev@isp.nsc.ru, prinz@isp.nsc.ru

Проведены аэродинамические эксперименты с использованием массивов электропроводящих микротрубок, определены их электрические свойства. Выявлена чувствительность микротрубок, расположенных на поверхности модели, к возмущениям потока газа. Показано, что такие микротрубки могут быть использованы как для регистрации вводимых возмущений, так и в качестве генераторов возмущений.

**Ключевые слова:** пограничный слой, массивы микротрубок, управление течениями, методы введения и регистрации возмущений, микротехнологии.

Эксперименты по использованию отдельной микротрубки в качестве трубчатого датчика термоанемометра для регистрации возмущений впервые описаны в работе [1]. Микротрубка располагалась на переднем крае тонкой подложки. Проводились измерения пульсаций скорости потока в дозвуковом пограничном слое на плоской пластине. Показано быстроедействие трубчатого датчика за счет его малой тепловой инерции. Низкоинерционные к нагреву и охлаждению трубчатые элементы можно использовать в качестве не только датчиков, но и нагревателей, генерирующих возмущения в потоке газа. При использовании быстродействующей системы управления упорядоченные массивы трубок могут служить саморегулирующейся поверхностью, препятствующей возникновению неустойчивости в пограничном слое. Такие управляемые поверхности не имеют движущихся частей, что является большим преимуществом перед механическими системами воздействия на поток [2].

В [3] разработана технология и созданы макеты чипов с распределенными массивами трубчатых микросенсоров и микронагревателей.

Цель данной работы, являющейся продолжением работы [3], — тестирование созданных трубчатых сенсоров и нагревателей в качестве генераторов и регистраторов возмущений в дозвуковом потоке газа на модели плоской пластины.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 05-08-50116-а, 06-01-04001-ННИО\_а), а также в рамках Интеграционного проекта СО РАН № 61 и государственного контракта № 02.513.11.3003.

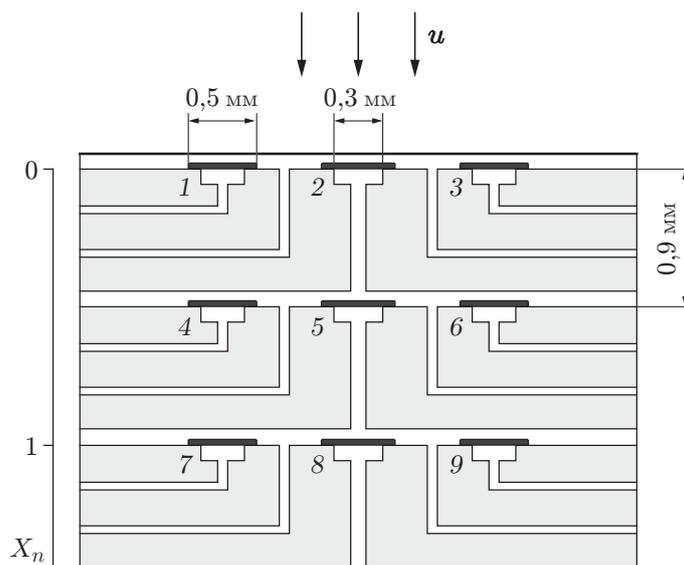


Рис. 1. Схема микрочипа с массивом распределенных микротрубок

**Экспериментальное оборудование и методы измерений.** Схема микрочипа с массивом распределенных микротрубок приведена на рис. 1.

Для проведения корректных измерений перед экспериментом определялись следующие важные характеристики трубчатых элементов: 1) временная стабильность сопротивления при подведенной мощности; 2) разброс значений сопротивления и температурного коэффициента между трубками; 3) рабочий диапазон подводимой мощности.

Температурные коэффициенты сопротивления микротрубок определялись с использованием термостатированного шкафа, в который помещался чип с массивом распределенных трубок. Микротрубки нагревались до температуры  $T = 163\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Изменение сопротивления подводющих проводников учитывалось с помощью показаний дополнительного чипа, у которого место, где должна располагаться трубка, было запаяно оловянным припоем.

Аэродинамические эксперименты с использованием массивов электропроводящих микротрубок выполнены в малой дозвуковой трубе Т-324 М Института теоретической и прикладной механики СО РАН на плоской пластине при скорости набегающего воздушного потока  $u = 10\text{ м/с}$ . Труба имеет закрытую рабочую часть размером  $200 \times 200 \times 400\text{ мм}$ . Схема эксперимента показана на рис. 2. В пластине имелась щель размером  $0,5 \times 50,0\text{ мм}$ , через которую осуществлялся периодический вдув-отсос, создаваемый динамиком, находящимся вне рабочей камеры. Чип с девятью микротрубками располагался заподлицо с поверхностью модели, причем электропроводящие дорожки к чипу также встраивались в поверхность модели для минимизации возмущений, генерируемых шероховатостями. Схематично крепление чипа показано на рис. 3.

На первом этапе проводились эксперименты, в которых определялась возможность регистрации возмущений микротрубками. Для этого периодическим вдувом-отсосом на частоте  $267\text{ Гц}$  через щель в поток вводились возмущения. Расстояние от щели до расположенного ниже по потоку микрочипа составляло  $123\text{ мм}$ . Генерируемые динамиком возмущения регистрировались стандартным проволочным датчиком с помощью термоанемометра постоянного сопротивления АН-1003. Сигналы с трубчатых датчиков измерялись с помощью изготовленного термоанемометра постоянного напряжения.

Для удобства в качестве начала координат  $X$  выбран первый ряд трубок на чипе. Координата  $X$  нормировалась следующим образом:  $X_n = X/X_{1,3}$ , где  $X_{1,3}$  — расстояние между первым и последним рядами микротрубок, равное  $1,8\text{ мм}$ .

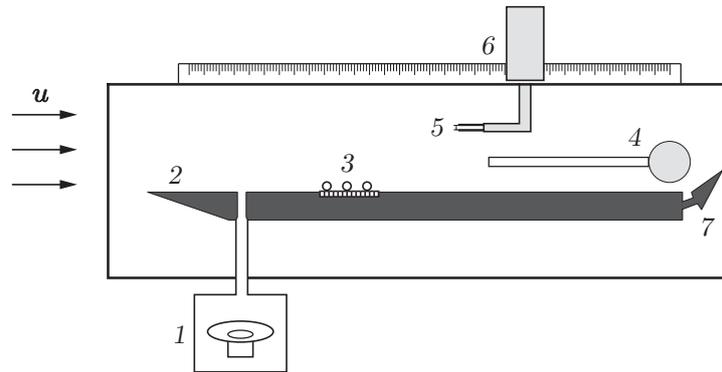


Рис. 2. Схема эксперимента:

1 — динамик, с помощью которого вносились возмущения в поток; 2 — плоская пластина; 3 — массив распределенных микротрубок; 4 — трубка Пито; 5 — проволочный датчик; 6 — координатник; 7 — закрывок

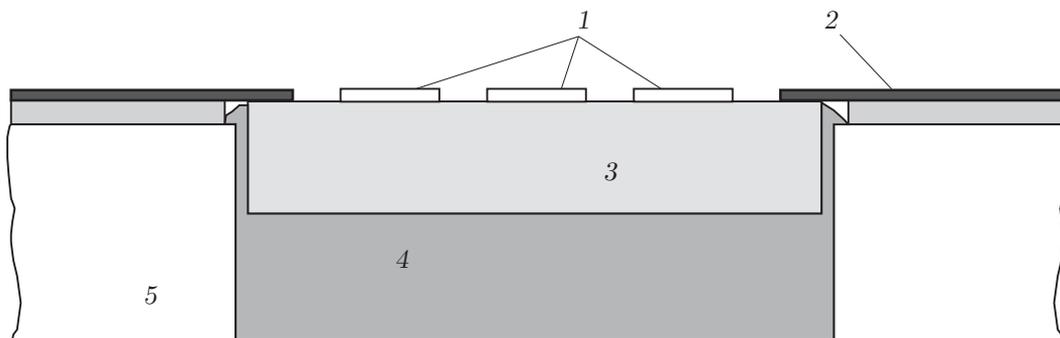


Рис. 3. Схема крепления чипа в модели:

1 — микротрубки; 2 — токоведущие контакты; 3 — кремниевая подложка; 4 — эпоксидная смола; 5 — оргстекло

Проволочный датчик располагался над поверхностью на высоте 0,5 мм. Измерения проводились вниз по потоку за массивом распределенных трубчатых датчиков при  $X_n = 1,5 \div 4,5$ .

На втором этапе проводились эксперименты, в которых определялась возможность введения в поток периодических возмущений посредством импульсно-периодического нагрева микротрубки. Для этого в потоке на трубку 1 (см. рис. 1) с генератора подавался периодический прямоугольный импульс с амплитудой 0,45 В и частотой 267 Гц. Трубки 4 и 7 регистрировали вводимые возмущения.

**Результаты экспериментов.** Установлено, что при мощности подводимого к микротрубке сигнала 5 мВт ее сопротивление в течение суток уменьшается на 30 %. Данное явление обусловлено релаксацией напряжений в металлической пленке (медленным отжигом) [4]. Стабилизации сопротивления микротрубок удалось достичь после их отжига в термостатированном шкафу при температуре 240 °С в течение 2 ч. На рис. 4 приведена типичная вольт-амперная характеристика микротрубки. Нормирование сопротивления каждой нагретой током микротрубки на ее исходное сопротивление в отсутствие тока  $R_n$  позволило построить обобщающую зависимость величины перегрева  $R_n$  от силы тока (рис. 5). После отжига исходное сопротивление микротрубок оставалось стабильным вплоть до значения перегрева  $R_n = 1,3$ .

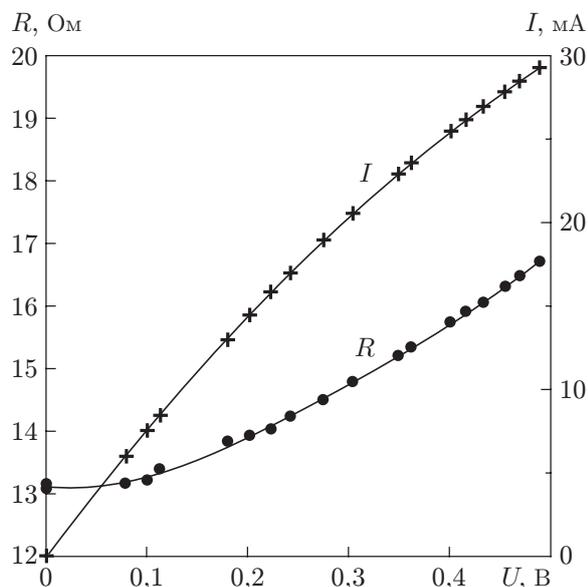


Рис. 4

Рис. 4. Вольт-амперная характеристика микротрубки

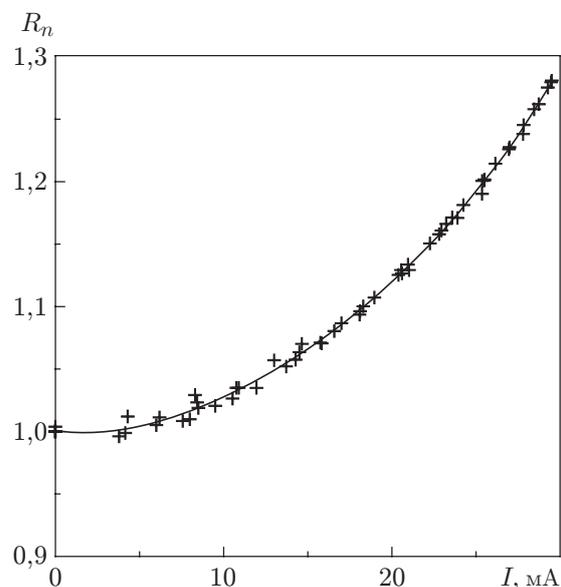


Рис. 5

Рис. 5. Обобщающая зависимость величины перегрева микротрубки от силы тока

Результаты измерений температурного коэффициента сопротивления микротрубок представлены на рис. 6. Видно, что трубки имеют разные температурные коэффициенты сопротивления, значения которых лежат в интервале от  $1,1 \cdot 10^{-3}$  до  $1,3 \cdot 10^{-3}$  град $^{-1}$ .

Установлено, что разрушение микротрубок происходит при мощности подводимого сигнала, равной 20 мВт. Разрушение микротрубок обусловлено влиянием термонапряжений, возникающих в результате неоднородного нагрева трубки током. Электрический ток, пропускаемый через трубку, вызывает значительный нагрев ее центральной части, в то время как зоны крепления трубки к металлическим дорожкам остаются холодными [1].

Ниже представлены результаты измерений характеристик вводимых динамиком возмущений, зарегистрированных стандартным проволочным датчиком термоанемометра и трубчатыми датчиками.

На рис. 7 показаны продольные распределения фазы  $\varphi$  и амплитуды  $\hat{u}$  генерируемых периодических возмущений.

Из анализа полученных результатов следует, что распределения фазы возмущений по  $X$  близки к линейному. В данном случае фазовая скорость распространения возмущений составила 4,6 м/с. На рис. 7 видно, что результаты измерений, полученные с помощью проволочного и трубчатого датчиков, соответствуют одной и той же функциональной зависимости. Таким образом, распределенные массивы трубчатых датчиков можно применять для измерения возмущений потока и их фазовых скоростей.

При подаче электрического прямоугольного импульса с генератора на трубку 1 (см. рис. 1) происходил ее периодический нагрев с задаваемой генератором частотой 267 Гц. При этом в поток вводились периодические возмущения, и микротрубка работала в режиме генератора возмущений. На рис. 8 показаны зависимости коэффициентов корреляции между сигналом, подаваемым на трубку 1 (см. рис. 1), и сигналами, регистрируемыми трубками 4 (кривая 1) и 7 (кривая 2), от времени. Следует отметить, что корреляции между подаваемым сигналом и сигналами, регистрируемыми трубками, находящимися в других рядах, не наблюдалось.

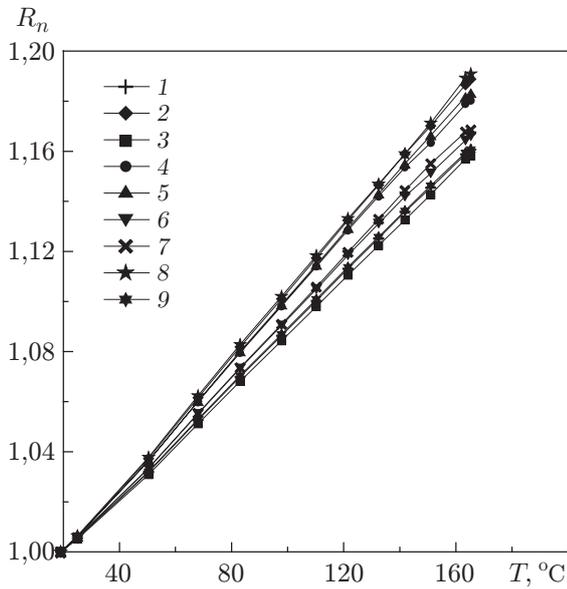


Рис. 6

Рис. 6. Зависимость нормированного сопротивления от температуры:

1–9 — номера датчиков (см. рис. 1)

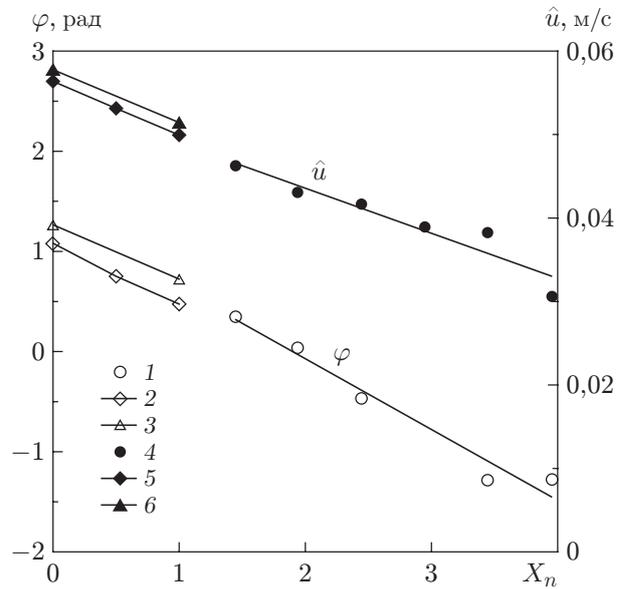


Рис. 7

Рис. 7. Продольное распределение фазы (1–3) и амплитуды (4–6) возмущений:

1, 4 — результаты, полученные с помощью проволочного датчика; 2, 5 — результаты, полученные с помощью ряда трубчатых датчиков 1, 4, 7; 3, 6 — результаты, полученные с помощью ряда трубчатых датчиков 2, 8 (см. рис. 1)

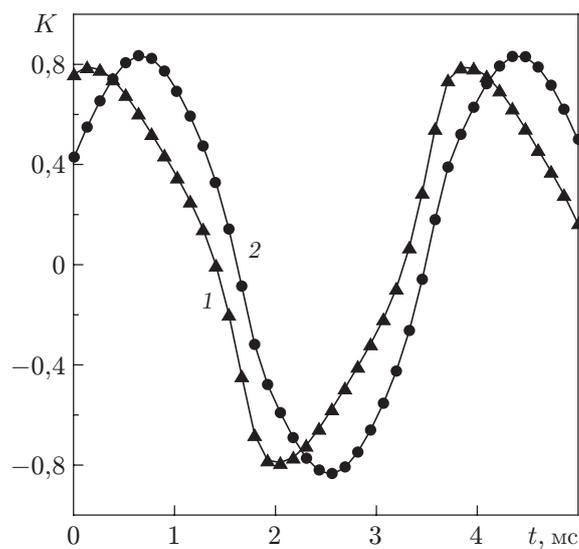


Рис. 8. Зависимость коэффициента корреляции от времени:

1 — сигнал, регистрируемый трубкой 4 (см. рис. 1); 2 — сигнал, регистрируемый трубкой 7

Из рис. 8 следует, что период корреляционных функций равен периоду вносимых в поток возмущений и составляет 3,75 мс. Интервал между максимумами кривых 1 и 2 соответствует времени прохождения возмущений от одной трубки-датчика до другой. Результаты эксперимента показывают, что сигнал, генерирующий возмущения, вводимые в поток, и сигнал, полученный в результате измерений, хорошо согласуются. Это подтверждает возможность использования полупроводниковых микротрубок в качестве источника возмущений в потоке.

Таким образом, показано, что микротрубки, расположенные на поверхности, могут быть использованы как для регистрации вводимых возмущений, так и в качестве генераторов возмущений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Фомин В. М., Шиплюк А. Н., Анискин В. М. и др.** Трубчатые датчики термоанемометров с высоким пространственным и временным разрешением // Докл. РАН. 2006. Т. 407, № 1. С. 1–4.
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. **Селезнев В. А., Принц В. Я., Анискин В. М., Маслов А. А.** Генерация и регистрация возмущений в потоке газа. 1. Формирование массивов микротрубчатых нагревателей и сенсоров // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 2. С. 145–151.
4. **Технология тонких пленок:** Справ. / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. М.: Сов. радио, 1977.

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

---