

# НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 7 (132) ✧ 2011

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий  
и информационных технологий Российской академии наук

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России  
и в систему Российского индекса научного цитирования

Издается с 1999 г.

**Главный редактор**  
Мальцев П. П.

**Зам. гл. редактора**  
Лучинин В. В.

**Редакционный совет:**

Аристов В. В.  
Асеев А. Л.  
Волчихин В. И.  
Гапонов С. В.  
Захаревич В. Г.  
Каляев И. А.  
Квардаков В. В.  
Климов Д. М.  
Ковальчук М. В.  
Нарайкин О. С.  
Никитов С. А.  
Сауров А. Н.  
Серебряников С. В.  
Сигов А. С.  
Стриханов М. Н.  
Чаллыгин Ю. А.  
Шахнов В. А.  
Шевченко В. Я.

**Редакционная коллегия:**

Абрамов И. И.  
Андривский Р. А.  
Антонов Б. И.  
Арсентьева И. П.  
Астахов М. В.  
Быков В. А.  
Горнев Е. С.  
Градецкий В. Г.  
Гурович Б. А.  
Кальнов В. А.  
Карякин А. А.  
Колобов Ю. Р.  
Кузин А. Ю.  
Мокров Е. А.  
Норенков И. П.  
Панич А. Е.  
Панфилов Ю. В.  
Петросьянц К. О.  
Петрунин В. Ф.  
Путилов А. В.  
Пятышев Е. Н.  
Сухопаров А. И.  
Телец В. А.  
Тимошенко С. П.  
Тодуа П. А.  
Шубарев В. А.

**Отв. секретарь**

Лысенко А. В.

**Редакция:**

Григорин-Рябова Е. В.  
Чугунова А. В.

Учредитель:  
Издательство  
"Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Глухова О. Е., Слепченков М. М. Теоретическое исследование распределения  
локальных напряжений графеновой наноленты . . . . . 2

### КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

Михайлов В. П., Степанов Г. В., Базиненков А. М., Зобов И. К., Шаков К. Г.  
Управление активной виброизоляции и позиционированием магнитореологиче-  
ских устройств . . . . . 5

### МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Сякина С. Д., Никитина Л. В., Симаков В. В., Синев И. В., Чичварина О. Г.  
Стабильность электрических свойств широкозонных газочувствительных нано-  
структурированных материалов . . . . . 10

Шомахов З. В., Молоканов О. А., Кармоков А. М. Электропроводность свинцово-  
силикатного стекла в процессах нагрева и изометрического отжига . . . . . 14

### ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Джашитов В. Э., Панкратов В. М. Суперминиатюрный микромеханический  
датчик инерциальной информации в условиях тепловых воздействий . . . . . 18

Лукьянов Д. П., Шевченко С. Ю., Кукаев А. С., Сафронов Д. В. Анализ кон-  
цепций построения твердотельных микрогирископов на поверхностных акусти-  
ческих волнах . . . . . 24

Годовицын И. В., Амеличев В. В., Сауров А. Н., Гаврилов Р. О., Генералов С. С.  
Миниатюрные тензорезистивные преобразователи давления: итоги двадцатипя-  
тилетия . . . . . 29

Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А.  
МЭМС-детекторы инфракрасного диапазона . . . . . 42

**НОВОСТИ ФИАН** . . . . . 49

**Contents** . . . . . 55

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся  
в свободном доступе на сайтах журнала (<http://novtex.ru/nmst/>) и научной электронной  
библиотеки (<http://elibrary.ru>). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на  
сайте журнала: с 1999 г. по 2003 г. в разделе "ПОИСК СТАТЕЙ", а с 2004 г. — в разделе "АРХИВ".

#### ПОДПИСКА:

- по каталогу Роспечати (индекс 79493);
- по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)
- в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

Адрес для переписки:  
e-mail: nmst@novtex.ru

УДК 539.32

**О. Е. Глухова**, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
**М. М. Слепченко**, аспирант,  
e-mail: oeglukova@yandex.ru,  
Саратовский государственный университет  
им. Н. Г. Чернышевского

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ГРАФЕНОВОЙ НАНОЛЕНТЫ

*Поступила в редакцию 24.04.11*

*Предложена методика расчета поля локальных напряжений, основанная на квантовой модели графеновой конечноразмерной наноленты и эмпирическом подходе в расчете энергии одного атома. С помощью данной методики рассчитано поле локальных напряжений сжатой на 6 % графеновой наноленты. Установлено, что распределение максимальных значений напряжения совпадает с распределением максимальных углов пирамидализации атомного каркаса. С помощью разработанной методики возможно прогнозировать появление дефектов при деформации.*

**Ключевые слова:** нанолента, локальное напряжение, угол пирамидализации, объемная плотность энергии

### Введение

Благодаря своим выдающимся упругим и прочностным свойствам графен является перспективным наноматериалом для целей наноэлектроники, а также нано- и космической техники. Для оценки механических свойств графена проводят его испытания на нагрузку различного рода: деформацию растяжения и сжатия, прогиб. Процессы, возникающие в структуре графена при наложении нагрузки, изучаются различными теоретическими и экспериментальными методами. К эффективным экспериментальным методам исследования относятся атомно-силовая микроскопия и рамановская спектроскопия. Среди основных теоретических методов исследования можно выделить методы классической молекулярной динамики, квантово-химические методы, а также методы мультимасштабного моделирования. Методами молекуляр-

ной динамики установлено, что модуль Юнга принимает значение  $Y_b = 1$  ТПа, что подтверждено и экспериментальными данными [1, 2]. С помощью атомно-силовой микроскопии был найден сверхвысокий предел прочности графена на растяжение, который составил 130 ГПа [2].

Зачастую определение таких характеристик графена, как прочность и жесткость, затруднено ввиду неопределенности концентрации локальных напряжений в фиксированных точках деформированной структуры. Известно, что неравномерное распределение напряжения приводит к дефектам, а также к разрушению атомного каркаса структуры. Однако в настоящее время не существует эффективного способа экспериментального и теоретического определения распределения локальных напряжений в атомной сетке наноструктуры. Выявление местоположений максимально напряженных фрагментов атомной структуры позволило бы прогнозировать местоположение искажений и разрушений структуры, что особенно важно при эксплуатации устройств, базирующихся на графене и его модификациях. Как хорошо известно, эксплуатационные нагрузки всегда присутствуют в материале и неизбежно вызывают его деформацию. Это требует для эффективного использования материала предварительного исследования его механических свойств. Поэтому построение поля локальных напряжений атомной структуры графена является весьма актуальным и перспективным для изучения его механических свойств.

В данной статье представлены результаты теоретического исследования процесса сжатия графеновой наноленты. Предложена методика расчета поля локальных напряжений, основанная на квантовой модели графеновой конечноразмерной наноленты и эмпирическом подходе в расчете энергии одного атома. С помощью представленной методики рассчитано поле напряжений деформированной наноленты и установлено, что распределение максимальных значений напряжения совпадает с распределением максимальных углов пирамидализации атомного каркаса. Угол пирамидализации является локальной характеристикой атомного каркаса и вычисляется как разность угла, образованного осями  $\sigma$ - и  $\pi$ -электронных облаков атома, и прямого угла.

## Методика расчета поля локальных напряжений атомной сетки

Для расчета поля локальных напряжений был разработан следующий алгоритм.

1. Оптимизация исходной атомной структуры.
2. Вычисление распределения объемной плотности энергии по атомам.
3. Поиск атомной конфигурации, подвергнутой внешнему воздействию, в результате минимизации энергии по координатам.
4. Вычисление распределения объемной плотности энергии по атомам структуры, подвергнутой внешнему воздействию.
5. Расчет поля локальных напряжений атомного каркаса по разности значений объемных плотностей энергии атомов структуры, подвергнутой внешнему воздействию, и исходной структуры.

С помощью разработанного алгоритма нами исследована деформация сжатия на 6 % графеновой наноленты, состоящей из 550 атомов углерода и имеющей длину 6,62 нм и ширину 1,99 нм. Оптимизация структуры до и после деформации проводилась методом сильной связи [3] путем минимизации полной энергии структуры по координатам всех атомов. Расчет распределения объемной плотности энергии по атомам проводился эмпирическим методом, основывающимся на потенциале Бреннера с внесенными в многочлен энергетической функции энергиями торсионного взаимодействия и Ван-дер-Ваальсового взаимодействия [4]. Объемная плотность  $w_i$  энергии атома  $i$  наноленты вычислялась по формуле

$$w_i = \left( \sum_{j(\neq i)} (V_R(r_{ij}) - B_{ij}V_A(r_{ij})) + \sum_{j \neq i} \left( \sum_{k \neq i, j} \left( \sum_{l \neq i, j, k} V_{tors}(\omega_{ijkl}) \right) \right) + \sum_{j(\neq i)} V_{VdW}(r_{ij}) \right) / V_i,$$

где  $V_R(r_{ij})$  и  $V_A(r_{ij})$  — парные потенциалы отталкивания и притяжения химически связанных атомов, определяемые типом атомов и расстоянием между ними;  $r_{ij}$  — расстояние между атомами  $i$  и  $j$ ;  $i$  и  $j$  — номера взаимодействующих атомов;  $B_{ij}$  — многочастичный терм, корректирующий энергию взаимодействия пары атомов  $i-j$ , учитывая специфику взаимодействия  $\sigma$ - и  $\pi$ -электронных облаков;  $V_{tors}(\omega_{ijkl})$  — потенциал торсионного взаимодействия, являющийся функцией линейного двугранного угла  $\omega_{ijkl}$ , построенного на базе атомов  $i, j, k, l$  с ребром на связи  $i-j$  ( $k, l$  — атомы, образующие химические связи с атомами  $i, j$ );  $V_{VdW}(r_{ij})$  — потенциал взаимодействия Ван-дер-Ваальса между химически несвязанными атомами;  $V_i = \frac{3}{4} \pi r_0^3$  — объем, занимаемый атомом  $i$ ;  $r_0$  — Ван-дер-Ваальсовый радиус атома углерода, равный 0,17 нм.

По результатам расчетов построен график распределения по атомам поля локальных напряжений, нормированных на максимальное значение (рис. 1). Из графика на рис. 1, *a* видно, что напряжение достигает максимума вблизи отдельных атомов, сосредоточенных вблизи края деформированной атомной сетки (рис. 1, *б*).

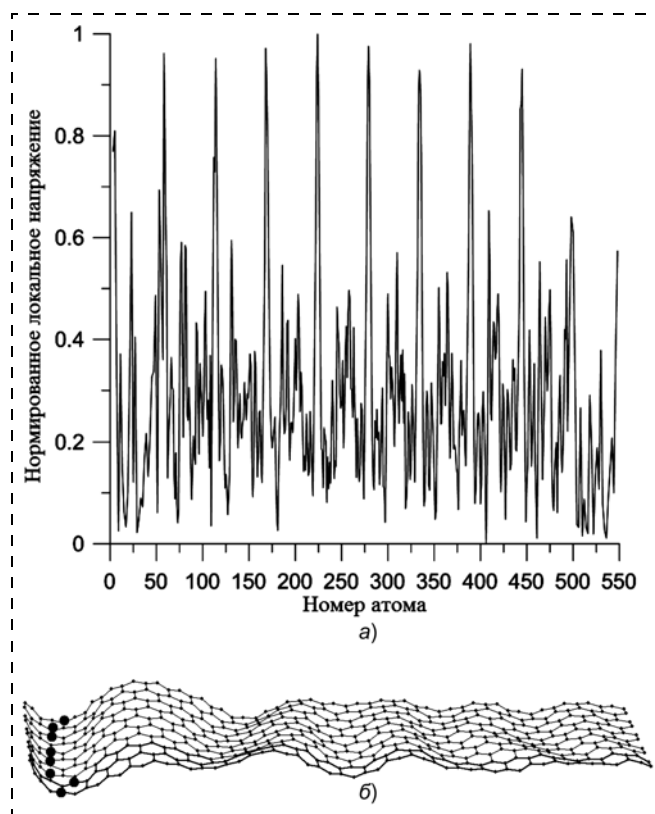


Рис. 1. Распределение локального напряжения по атомам (а); атомная сетка графеновой наноленты (черными кружками обозначены восемь атомов, испытывающие наибольшее напряжение) (б)

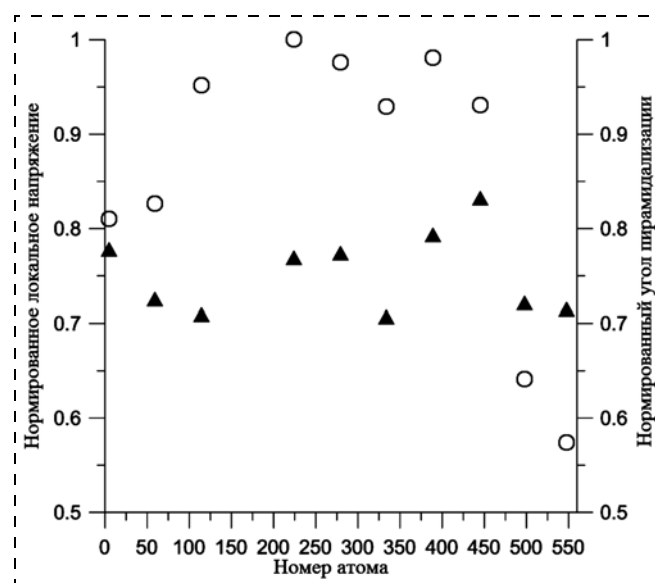


Рис. 2. Распределения максимумов локальных напряжений и углов пирамидализации по атомам

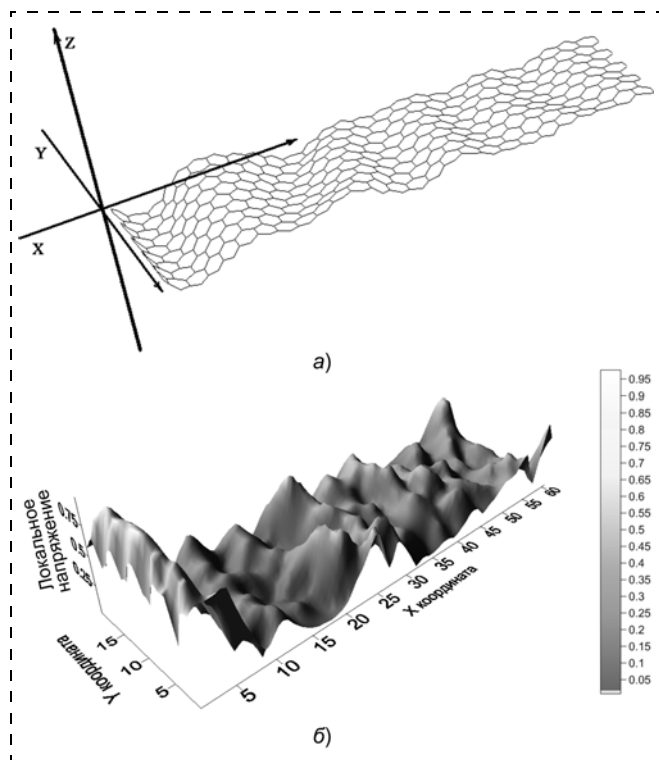


Рис. 3. Атомная структура графеновой наноленты при сжатии на 6 % (а); распределение локального напряжения по координатам атомов наноленты (б)

Для оценки влияния напряжения атомной сетки после 6 % сжатия графеновой наноленты на ее метрические характеристики было вычислено распределение углов пирамидализации по атомам структуры. Угол пирамидализации характеризует изменение типа гибридизации атомов, вызванное внешним воздействием. Данная локальная характеристика атомного каркаса вычисляется как разность между углом, образованным осями  $\sigma$ - и  $\pi$ -электронных облаков атома, и прямым углом. В зависимости от значений, которые принимает угол пирамидализации, можно судить о реактивности поверхности атомного каркаса.

При сравнении распределений локальных напряжений и углов пирамидализации по атомам было обнаружено, что максимумы этих величин совпадают (рис. 2). Это свидетельствует о том, что в

местах наибольшего искривления атомного каркаса графеновой наноленты степень регибридизации электронных орбиталей будет высокой. При регибридизации атомы переходят из  $sp^2$ - в  $sp^{2+\Delta}$ -состояние. Величина  $\Delta$  зависит от степени кривизны поверхности.

Рассчитанная поверхность распределения локальных напряжений по координатам атомов графеновой наноленты показала, что максимумы поля локальных напряжений по атомам соответствуют областям прогиба графеновой наноленты (рис. 3). Таким образом, подтверждена эффективность разработанной методики.

## Выводы

Разработана методика расчета поля локальных напряжений, справедливость которой подтверждена адекватностью соответствия максимумов поля локальных напряжений вогнутостям графеновой наноленты.

Установлено, что максимумы поля локальных напряжений и максимумы углов пирамидализации атомного каркаса графеновой наноленты совпадают. Следовательно, регибридизация электронных орбиталей будет сильнее в местах наибольшего искривления поверхности наноленты, что указывает на связь между локальным напряжением, по сути, механической характеристикой, и электронной плотностью атомного каркаса. Можно предположить, что применение подобной методики позволит прогнозировать появление дефектов в атомной структуре.

## Список литературы

1. Jiang J.-W., Wang J.-S. and Li B. Young's modulus of graphene: A molecular dynamics // *Phys. Rev. B*. 2009. 80 (11). P. 113405-1—113405-4.
2. Lee C., Wei X., Kysar J. W., Hone J. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene // *Science*. 2008. 321 (5887). P. 385—388.
3. Glukhova O. E. Dimerization of miniature  $C_{20}$  and  $C_{28}$  fullerenes in nanoautoclave // *Journal of Molecular Modeling*. 2011. V. 17. I. 3. P. 573—576.
4. Stuart S. J., Tutein A. B., Harrison J. A. A reactive potential for hydrocarbons with intermolecular interactions // *Journal of Chemical Physics*. 2000. V. 112, N 14. P. 6472—6486.

# КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 543.271; 533.5.08

**В. П. Михайлов**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.,

**Г. В. Степанов**<sup>2</sup>, нач. сектора,

**А. М. Базиненков**<sup>1</sup>, ассистент,

**И. К. Зобов**<sup>1</sup>, аспирант,

**К. Г. Шаков**<sup>1</sup>, студент,

<sup>1</sup> МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва,

e-mail: mikhailov@bmstu.ru

<sup>2</sup> ГНИИХТЭОС, г. Москва,

e-mail: gstepanov@mail.ru

## УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНОЙ ВИБРОИЗОЛЯЦИЕЙ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕМ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

*Поступила в редакцию 14.04.11*

*Приведена физическая модель магнитоэологического (МР) эластомера — рабочего материала для виброизолирующих и позиционирующих устройств нанотехнологического оборудования. Описана конструкция нового активного демпфера на основе МР эластомера. Представлены динамическая модель и результаты исследований активного демпфера на основе МР эластомера.*

**Ключевые слова:** виброизолирующие и позиционирующие системы, магнитоэологические эластомеры, автоматическое регулирование, вязкость, упругость

Развитие технологий использования наноразмерных элементов для производства перспективных изделий микро- и нанoeлектроники требует решения задачи разработки и создания прецизионных систем активной виброизоляции и позиционирования для создания прецизионных систем активной виброизоляции и позиционирования для оборудования с чрезвычайно жесткими требованиями по точности, быстродействию и стабильности характеристик [1]. К такому оборудованию относятся сканирующие зондовые микроскопы, широко применяемые в настоящее время как для контроля поверхности изделий, так и для локального воздействия при производстве микро- и наноструктур. Для перемещения зонда относительно изделия в

этих микроскопах используются механизмы сканирования с погрешностью позиционирования на атомарном уровне (менее 0,1 нм) и постоянной времени около 1 мс [2].

В настоящее время создаются модульные технологические платформы для формирования микро- и нанотехнологических комплексов, включающих технологические установки с возможностями групповых микро- и нанолакальных методов обработки (в том числе оптической, ионной, электронной, рентгеновской и др.) подложек диаметром до 100 мм [3].

Одной из составляющих погрешности позиционирования зондов и пучков излучения относительно обрабатываемой подложки является погрешность, возникающая вследствие возмущающих воздействий (вибраций). Существующие механизмы для юстировки и виброзащиты (пьезотрубки, пьезостолбцы) могут обеспечить точностные и динамические требования, но имеют невысокие нагрузочные характеристики и малый диапазон перемещений [2]. Упругие, гидравлические, пневматические, магнитные демпферы работают, как правило, в пассивном режиме и не обеспечивают требуемого качества виброизоляции. Поэтому проблема создания сверхпрецизионных позиционирующих систем реологического типа для активной виброизоляции и юстировки сканирующих зондовых микроскопов, микро- и нанотехнологических комплексов и другого сверхпрецизионного оборудования является чрезвычайно актуальной.

Магнитоэологические (МР) эластомеры являются перспективными материалами для создания систем активной виброизоляции и позиционирования прецизионного оборудования [6]. Для разработки таких устройств, а также для выбора оптимальных режимов автоматического регулирования параметров активного демпфирования и позиционирования необходимо создание более точных физических и динамических моделей поведения МР эластомеров.

### Физическая модель поведения МР эластомера

Активный демпфер на основе МР эластомера, схема которого показана на рис. 1, содержит неподвижную опору 1, корпус 4, сердечник 2 из магнитного материала, электромагнитную катушку 3, мембрану 5 из МР эластомера с жестким центром. Между мембраной и сердечником сформирован

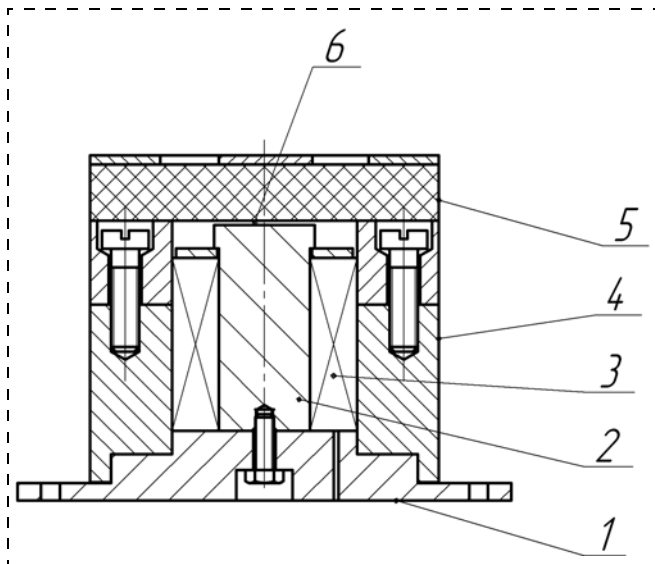


Рис. 1. Схемы активного демпфера на основе МР эластомера

воздушный зазор 6. Устройство работает следующим образом. При подаче управляющего тока в электромагнитную катушку 3 в магнитопроводе возникает замкнутое магнитное поле. В мембране 5 формируется радиальное магнитное поле с индукцией, значение которой имеет максимум вблизи сердечника 2. Под действием этой магнитной индукции мембрана с жестким центром перемещается в осевом направлении в пределах воздушного зазора. Система активной виброизоляции содержит четыре магнитоэластичных (МЭ) демпфера, расположенных по углам платформы, на которой установлено защищаемое оборудование.

Рассмотрим модель поведения МР эластомера при сдвиговой деформации. Предположим, что на МР эластомер действует внешнее магнитное поле с индукцией  $B$  (рис. 2). МР эластомер образует мембрану активного демпфера, схема которого показана на рис. 1. Найдем коэффициент жесткости этой мембраны. Предположим, что под действием

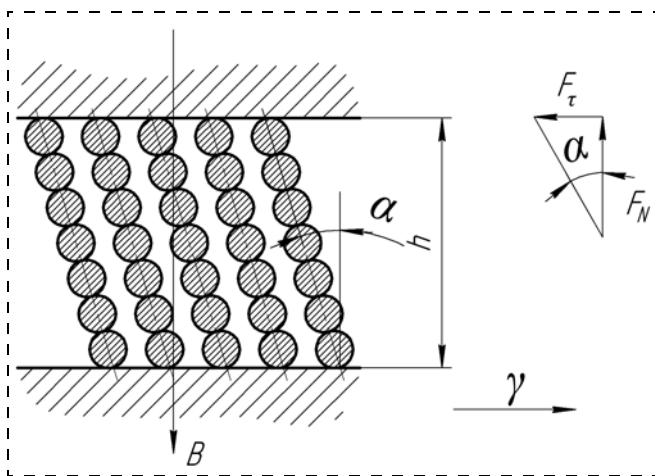


Рис. 2. Схема сдвиговой деформации мембраны из МР эластомера

внешней силы  $F$  нижняя стенка зазора смещается относительно верхней на величину  $X$ , при этом сдвиг равен  $\gamma = X/h$ . Сила магнитного сцепления  $F_N$  между соседними слоями частиц дисперсной фазы определяется по формуле Максвелла как

$$F_N = 9,81 \cdot 10^{12} (B/5000)^2 S_{\text{сл}} \varphi_v$$

или

$$F_N = KB^2 S_{\text{сл}} \varphi_v,$$

где  $\varphi_v$  — коэффициент объемной концентрации частиц;  $S_{\text{сл}}$  — площадь сечения рабочего зазора, перпендикулярная магнитному потоку [2].

При сдвиге слоев МР эластомера возникает касательная сила сопротивления  $F_{\tau 1}$ , обусловленная магнитным сцеплением между соседними слоями и равная

$$F_{\tau 1} = F_N \text{tg} \alpha = KB^2 S_{\text{сл}} \varphi_v X/h.$$

Кроме того, возникает упругая касательная сила

$$F_{\tau 2} = GS_{\text{сл}} X/h,$$

где  $G$  — модуль сдвига МР эластомера. Эта сила характеризует упругие свойства МР эластомера, представляющего собой высокоэластичную полимерную матрицу, в которой распределены частицы карбонильного железа круглой формы.

Таким образом, коэффициент жесткости упругой мембраны МР эластомера определяется выражением

$$k = \frac{S_{\text{сл}}}{h} (KB^2 \varphi_v + G) = \frac{S_{\text{сл}}}{h} (9,81 \cdot 10^{12} (B/5000)^2 \varphi_v + G). \quad (1)$$

Использование магнитореологического эффекта позволяет регулировать коэффициент жесткости  $k$  упругой мембраны за счет изменения магнитной индукции  $B$  и, соответственно, частотные и точностные характеристики устройств активной демпфирования и микропозиционирования.

### Разработка системы виброизоляции

Для прецизионного оборудования все более широко применяются опоры, имеющие кроме вязкоупругих элементов систему автоматического регулирования, способную обеспечить заданное положение объекта с высокой точностью [8]. Анализ существующих устройств сверхточного перемещения показал, что для нанотехнологического и исследовательского оборудования целесообразно использование устройств на основе пьезокерамики, магнито- и электрореологической жидкостей, а также МР эластомеров. Они в основном применя-

ются для защиты от низкочастотных колебаний. Комплекс проведенных исследовательских и конструкторских работ позволил разработать варианты активных виброизолирующих и позиционирующих систем на основе как однокоординатных, так и трехкоординатных МР устройств [2, 4, 5, 7, 9]. Эти системы позволяют регулировать собственную частоту колебаний, обладают малой массой и габаритными размерами, а также малым временем переходных процессов в МР элементах. Целесообразным представляется разработка виброизолирующей системы на основе активных МР демпферов, работающих совместно с пассивными виброизоляторами. В этом случае происходит низкочастотная компенсация стационарных возмущений защищаемого объекта с помощью активных МР демпферов и обеспечивается пассивная виброзащита в области более высоких частот.

Основным показателем, характеризующим эффективность виброизоляции, является коэффициент передачи амплитуды колебаний  $\mu$ . В обычном оборудовании малый уровень  $\mu$  обеспечивается за счет применения пружинных, резиновых виброизоляторов, а также массивных элементов (фундаментов, оснований), служащих "поглотителями" вибрации.

Обычно однокаскадные системы с применением массивных элементов обеспечивают коэффициент передачи  $\mu = 0,01...0,05$ . Для прецизионного оборудования необходимо обеспечить коэффициент передачи  $\mu = 0,001...0,003$  при уровне колебаний опорной поверхности 5...7 мкм [6].

### Разработка динамической модели функционирования МЭ демпфера

Проведем поэтапную разработку динамической модели демпфера на основе МР эластомера, схема которого приведена на рис. 1. Структурная схема системы автоматического регулирования (САР) демпфера приведена на рис. 3.

Найдем передаточные функции элементов. Передаточная функция электромагнитной катушки

$$W_1(S) = \frac{I(S)}{U(S)} = \frac{k_R}{T_M S + 1}, \quad (2)$$

где  $I$  — ток в обмотке электромагнитной катушки;  $U$  — напряжение, подающееся на электромагнитную катушку;  $k_R$  — коэффициент передачи напряжения;  $T_M$  — постоянная времени электромагнитной системы демпфера;  $S$  — оператор Лапласа.

Магнитопровод имеет передаточную функцию

$$W_2(S) = \frac{B(S)}{I(S)} = \frac{\mu\mu_0 N}{L} = k_B, \quad (3)$$

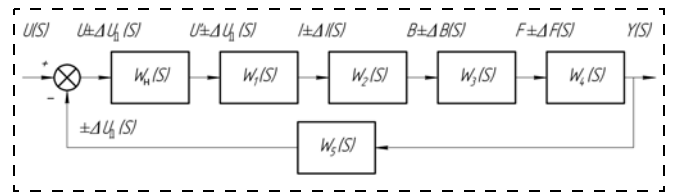


Рис. 3. Структурная схема САР демпфера на основе МР эластомера:

$U_d$  — напряжение датчика перемещений

где  $B$  — магнитная индукция;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость МР эластомера;  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $N$  — число витков катушки;  $L$  — длина магнитопровода;  $k_B$  — коэффициент передачи магнитной индукции.

Передаточная функция мембраны

$$W_3(S) = \frac{F_{\text{mag}}(S)}{B(S)} = \frac{s}{2\mu_0} = k_F, \quad (4)$$

где  $F_{\text{mag}}$  — осевое усилие, действующее на мембрану со стороны магнитного поля;  $s$  — площадь поперечного сечения магнитоэластика, через которую проходит магнитный поток;  $k_F$  — коэффициент передачи осевого усилия.

Передаточная функция подвижного корпуса (жесткого центра мембраны) имеет вид

$$W_4(S) = \frac{Y(S)}{F_{\text{mag}}(S)} = \frac{1}{m_{\text{пр}} S^2 + HS + k} = \frac{1/k}{\frac{m_{\text{пр}}}{k} S^2 + \frac{H}{k} S + 1} = \frac{1/k}{T_{\text{кор}}^2 S^2 + T_B S + 1}, \quad (5)$$

где  $Y$  — перемещение направляющей вдоль продольной оси  $Y$ ;  $m_{\text{пр}}$  — приведенная масса подвижного корпуса;  $H$  — коэффициент вязкостного трения в МР эластомере;  $k$  — коэффициент жесткости демпфера;  $T_{\text{кор}}$  — постоянная времени подвижного корпуса при действии инерционных и упругих сил ( $T_{\text{кор}} = (m_{\text{пр}}/k)^{1/2}$ );  $T_B$  — постоянная времени подвижного корпуса при действии вязкоупругих сил ( $T_B = H/k$ ).

Передаточная функция системы измерения положения

$$W_5(S) = k_{\text{п}}, \quad (6)$$

где  $k_{\text{п}}$  — коэффициент передачи системы измерения положения.

В динамической модели САР МЭ демпфера также учтена нелинейность зависимости перемещения подвижного корпуса от управляющего на-

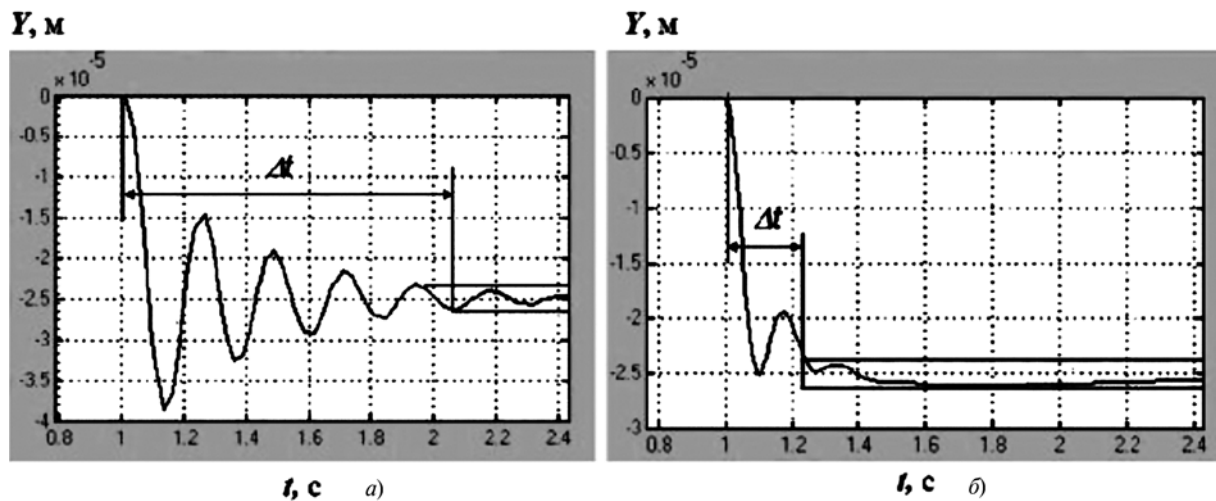


Рис. 4. Графики переходных процессов САР демпфера на основе МР эластомера:  
 а — без регулятора; б — с использованием ПИД-регулятора

пряжения, которая определяется зоной нечувствительности демпфера. Эта нелинейность описывается передаточной функцией  $W_H(S)$  и определяется интервалом напряжений  $(-U; +U)$ , при котором демпфер остается неподвижным.

Для моделирования работы демпфера были определены числовые значения коэффициентов передачи и постоянных времени. Коэффициент передачи системы измерения положения равен  $k_{\Pi} = 1,2 \cdot 10^6 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ , коэффициент передачи напряжения  $k_R = 0,1 \text{ Ом}^{-1}$ . Коэффициент передачи магнитной индукции  $k_B = 0,052 \text{ Тл/А}$ . Коэффициент передачи осевого усилия  $k_F = 1,19 \cdot 10^3 \text{ Н/Тл}$ . Коэффициент жесткости демпфера  $k = 10^4 \text{ Н/м}$ , вес объекта 22 Н. Постоянные времени элементов демпфера имеют следующие значения:  $T_M = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ ;  $T_{\text{кор}} = 3,2 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ ;  $T_B = 4 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ . Границы зоны нечувствительности  $(-0,1 \text{ В}; 0,1 \text{ В})$ .

Моделирование позволило провести анализ и синтез системы автоматического регулирования (САР) демпфера и определить параметры качества и точности. В процессе моделирования САР демпфера (рис. 4) с помощью программы Simulink была проанализирована реакция системы на воздействие входного ступенчатого сигнала  $U = -25 \text{ В}$ . На рис. 4, а показан переходный процесс перемещения демпфера  $Y = f(t)$  из нулевого положения в точку с координатой  $-25 \text{ мкм}$ . Из графика видно, что САР демпфера не обеспечивает заданных динамических требований. Постоянная времени переходного процесса равна 1,05 с, величина перерегулирования — 52 %, что не удовлетворяет требованиям качества системы.

Для обеспечения параметров качества был использован пропорционально-интегриродифференци-

рующий (ПИД) регулятор, имеющий передаточную функцию

$$W_p = \frac{k_p(T_2S + 1)(T_3S + 1)}{(T_1S + 1)(T_4S + 1)}, \quad (7)$$

где  $k_p$  — коэффициент передачи регулятора;  $T_1, T_2, T_3, T_4$  — постоянные времени регулятора.

ПИД-регулятор был встроен последовательно со звеньями САР демпфера после сумматора сигналов. Коэффициент передачи регулятора равен  $k_p = 5$ , постоянные времени регулятора имеют следующие значения  $T_1 = 12 \text{ с}$ ,  $T_2 = 1 \text{ с}$ ,  $T_3 = 0,1 \text{ с}$ ,  $T_4 = 0,01 \text{ с}$ . Амплитудно-частотный анализ системы с ПИД-регулятором показал (рис. 4, б), что

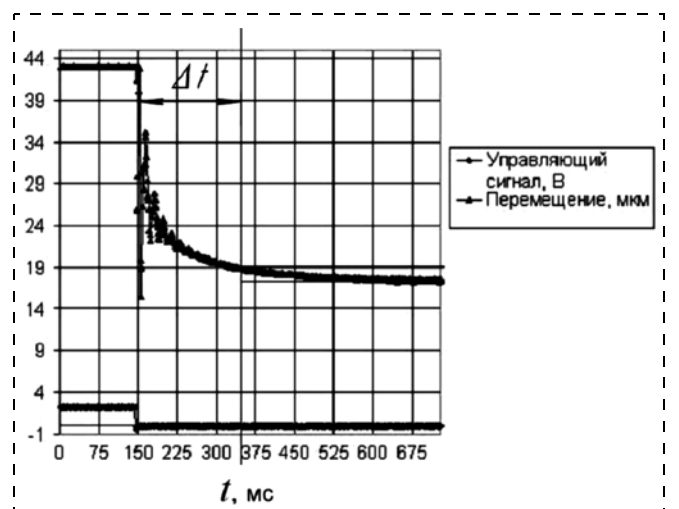


Рис. 5. График переходного процесса при нагрузке 22 Н:  
 $\Delta t$  — время переходного процесса 200 мс; диапазон перемещения 25 мкм



система является устойчивой и обеспечивает требуемую погрешность позиционирования не более 2 мкм и постоянную времени не более  $T_{\Pi} = 0,22$  с.

### Экспериментальные исследования МЭ демпфера

При проведении исследований получен график переходного процесса при перемещении МЭ демпфера для нагрузки 22 Н и для входного ступенчатого управляющего сигнала 2 А (рис. 5). Время переходного процесса при перемещении демпфера из одного положения в другое составляет 200 мс. По вертикали на графике показано перемещение демпфера в микрометрах. Как видно на графике, позиционирование демпфера носит классический вид колебательного переходного процесса [8]. Также были проведены исследования перемещений демпфера без нагрузки и для нагрузки 11 Н. Характер позиционирования в этих случаях был аналогичен показанному на рис. 5 переходному процессу. Постоянная времени демпфера увеличивалась от 1 мс до 200 мс по мере роста нагрузки от нулевого значения до 22 Н.

Быстродействие демпфера определяется временем переходных процессов в МР эластомере. Время структурирования реологической среды  $t_{\text{стр}}$  и релаксации  $t_{\text{р}}$  сдвиговых напряжений определяется отношением  $\mu_{\text{ЭКВ}}(H)/G(H)$ , где  $\mu_{\text{ЭКВ}}(H)$  — динамическая эквивалентная вязкость МР эластомера;  $G(H)$  модуль сдвига МР эластомера. Эти параметры, а также значения времени переходных процессов могут регулироваться за счет изменения уровня напряженности магнитного поля путем изменения силы тока в катушке [6].

### Выводы

- ♦ Анализ устройств прецизионного позиционирования и активной виброизоляции показал, что для нанотехнологического и исследовательского оборудования целесообразно использовать активные демпферы на основе МР эластомеров.
- ♦ Целесообразным представляется разработка виброизолирующей системы на основе МР демпферов совместно с пассивными виброизоляторами. В этом случае низкочастотная (до 200 Гц) компенсация возмущений защищаемого объекта происходит с помощью активных МЭ демпферов, а пассивная виброзащита в области более высоких частот обеспечивается традиционными вязкоупругими демпферами.

- ♦ Показано, что коэффициент жесткости упругой мембраны из МР эластомера может регулироваться за счет изменения магнитной индукции, обеспечивая тем самым регулировку частотных и точностных характеристик МР устройств активного демпфирования и микропозиционирования.
- Позиционирование МЭ демпфера из одной точки в другую при подаче прямоугольного управляющего сигнала носит классический вид переходного колебательного процесса. Постоянная времени демпфера увеличивается от 1 мс до 200 мс по мере роста нагрузки от нулевого значения до 22 Н.
- ♦ Быстродействие МР демпфера определяется временем переходных процессов в реологической среде. Время структурирования среды и релаксации сдвиговых напряжений определяется отношением  $\mu_{\text{ЭКВ}}(H)/G(H)$ , где  $\mu_{\text{ЭКВ}}(H)$  — динамическая эквивалентная вязкость среды;  $G(H)$  — модуль сдвига МР эластомера. Эти параметры могут регулироваться за счет изменения уровня напряженности магнитного поля.

*Работа выполнена при проведении НИР в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы.*

### Список литературы

1. **Борисенко В. Е., Воробьева А. И., Уткина Е. А.** Наноэлектроника. Лаборатория знаний. М.: БИНОМ, 2009. 223 с.
2. **Александрова А. Т., Вагин Н. С., Василенко Н. В.** и др. Механика и физика точных вакуумных механизмов. В 2 т. / Под ред. Е. А. Деулина. М.: НПК "Интелвак"; Вакууммаш, 2002. Т. 2. 152 с.
3. **Быков В. А.** Инструменты нанотехнологий сегодня и завтра // Наноиндустрия. Спецвыпуск. 2010. С. 10—14.
4. **Камышный Н. И., Курчанова М. В., Логинов П. В.** // Система виброизоляции прецизионного технологического оборудования // Известия вузов. Машиностроение. 1988. № 10. С. 150—155.
5. **Шульман З. П., Кордонский В. И.** Магнитореологический эффект. Минск: Наука и техника, 1982. 184 с.
6. **Горбунов А. И., Михайлов В. П., Степанов Г. В., Борин Д. Ю., Андриянов А. А., Темнов Д. В., Семеренко Д. А.** Исследование свойств и новое применение магнитных силиконовых композитов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. 2008. № 1 (70). С. 90—107.
7. **Михайлов В. П., Борин Д. Ю., Базиненков А. М.** Моделирование магнитореологического дросселя прецизионного привода линейных перемещений // Конверсия в машиностроении. 2007. № 3. С. 37—44.
8. **Юревич Е. И.** Теория автоматического управления. 3-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 560 с.
9. **Mikhailov V., Borin D., Bazinenkov A., Akimov I.** Positioning magnetorheological actuator // Journal of Physics: Conference Series 149. 2009.

УДК 544.72.02

**С. Д. Сякина**, аспирант,  
**Л. В. Никитина**, канд. техн. наук, доц.,  
e-mail: lnihitina08@gmail.com,  
**В. В. Симаков**, д-р техн. наук доц., проф.,  
e-mail: viatcheslav.simakov@gmail.com,  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Саратовский государственный технический  
университет",  
**И. В. Синев**, аспирант,  
**О. Г. Чичварина**, студентка,  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Саратовский государственный университет  
им. Н. Г. Чернышевского"

## СТАБИЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ШИРОКОЗОННЫХ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Поступила в редакцию 16.03.2011

*Влияние сорбции на сопротивление тонких пленок оксидов металлов широко применяется в сенсорах газа. Адсорбция на поверхности широкозонных полупроводников, например, диоксида олова, частиц газа-окислителя приводит к захвату носителей заряда из объема зерен и вызывает изменение электрофизических свойств материала. В качестве регистрируемого параметра у газочувствительных слоев обычно используют значение проводимости пленки в газовой пробе. В работе предлагается использовать для детектирования газов различной природы поликристаллические слои  $\text{SnO}_2$  с зернами цилиндрической формы (наностержни), вследствие большей термической стабильности их электрофизических свойств по сравнению со слоями, состоящими из зерен сферической формы. Такая особенность наностержней обусловлена слабой зависимостью проводимости отдельных зерен слоев от геометрических размеров межзеренных перешейков, которые образуются при повышенных температурах, вследствие сращивания отдельных зерен.*

**Ключевые слова:** нанокристаллические материалы, наностержни, широкозонные полупроводники, газочувствительность, термическая стабильность

Поликристаллические слои с характерным размером зерна порядка нескольких нанометров обычно относят к нанокристаллическим. Такие

слои обладают свойствами, которые существенно отличаются от свойств поликристаллических материалов, состоящих из зерен микрометровых размеров. В нанокристаллических материалах поверхностные эффекты играют определяющую роль, вследствие высокой удельной поверхности, что обуславливает повышение их адсорбционных и/или каталитических свойств и открывает перспективы применения таких материалов в качестве активных слоев твердотельных газовых сенсоров.

Нанокристаллические материалы могут быть классифицированы на различные категории в зависимости от их размерности [1]: слоистые (1D), нитевидные (2D) и равноосные (3D) материалы. В настоящее время методы формирования и исследования одно- и трехмерных наноструктур достаточно хорошо изучены, однако двухмерные структуры исследовались мало [2]. Использование 3D-наноструктур в качестве активных слоев газовых сенсоров имеет ряд ограничений, так как при повышенных температурах у этих материалов наблюдается деградация электрических свойств, связанная с процессами сращивания зерен и образованием межзеренных перешейков. Проблема стабилизации свойств может быть решена управляемым введением легирующих добавок [3] или формированием многофазовых материалов [4]. Однако повышенные рабочие температуры приводят к увеличению скорости диффузионных процессов, что, в свою очередь, может привести к изменению состава материалов и деградации их свойств.

В данной работе проведены исследования процессов деградации электрических свойств 2D-наноматериалов и показано, что такие материалы могут быть использованы в качестве активных слоев газовых сенсоров, отличающихся большей термической стабильностью по сравнению с 3D-наноматериалами.

Заполнение центров адсорбции частицами из газовой фазы при условии установившегося адсорбционного и электронного равновесия описывается уравнением баланса поступающих на поверхность и закрепляющихся на центрах адсорбции и десорбирующихся с центров адсорбции частиц в газовую фазу. Адсорбция частиц происходит только на незаполненных центрах адсорбции с поверхностной плотностью  $N_s$ , не взаимодействующих друг с другом.

Адсорбционное равновесие на поверхности зерен поликристаллических слоев, находящихся в атмосфере, содержащей газ-окислитель, например кислород, при повышенных температурах поддерживается за счет слабой, незаряженной формы адсорбции:

$$\alpha P_g(N_S - N) = \nu N(1 - f) \exp\left(-\frac{W}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $\alpha$  — кинетический коэффициент изотермы Лэнгмюра,

$$\alpha = \frac{\kappa s_0}{\sqrt{2\pi m_g k T_g}}, \quad (2)$$

$k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура слоя;  $\kappa$  — коэффициенты прилипания;  $s_0$  — эффективная площадь центра адсорбции;  $m_g$  — масса частицы газа с парциальным давлением концентрации  $P_g$ ;  $T_g$  — температура газа;  $N$  — число адсорбированных частиц газа на единицу поверхности;  $\nu$ ,  $f$ ,  $W$  — характерная частота фона, вероятность ионизации примесного уровня и энергия десорбции частицы газа, соответственно.

Локализованные поверхностные состояния, связанные с адсорбированными частицами газа, заполняются электронами из объема зерна, что приводит к возникновению заряда на поверхности зерна  $Q_S$ :

$$Q_S = -qNf, \quad (3)$$

где  $q > 0$  — элементарный заряд.

Появление поверхностного заряда на поверхности полупроводникового материала  $n$ -типа проводимости ведет к обеднению основными носителями заряда (электронами) приповерхностной области зерна. Вблизи поверхности зерна образуется заряженный слой, ширина его зависит от уровня легирования материала, наличие которого приводит к появлению электрического поля, а, следовательно, и градиента электростатического потенциала  $\varphi(r)$  [5]. В цилиндрическом или сферическом зерне в широкозонном невырожденном материале  $n$ -типа с одним типом мелких, полностью ионизованных объемных доноров с концентрацией  $N_D$  распределение потенциала определяется решением уравнения Пуассона

$$\frac{\partial^2 \varphi(r)}{\partial r^2} + \frac{(d-1)}{r} \frac{\partial \varphi(r)}{\partial r} = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} [N_D - n(r)], \quad (4)$$

где  $d$  — фактор размерности, равный 2 или 3 для зерен цилиндрической или сферической формы соответственно;  $r$  — координата от центра зерна вдоль его радиуса  $R$ ;  $\epsilon$  и  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная материала зерна и диэлектрическая проницаемость вакуума соответственно.

Концентрация электронов в зоне проводимости  $n(r)$  при температуре полной ионизации доноров определяется только их концентрацией:

$$n(r) = N_D \exp\left(-\frac{q\varphi(r)}{kT}\right). \quad (5)$$

В атмосфере газа-окислителя электроны проводимости локализуются на поверхностных энергетических уровнях, которые индуцируются адсорбированными частицами, при этом концентрация носителей заряда в объеме зерна уменьшается, а изгиб зон  $\varphi_S$  на поверхности материала  $n$ -типа увеличивается. Для мелкодисперсных слоев (с малым радиусом зерна  $R_0$ ), находящихся в атмосфере газа-окислителя, большая часть электронов из объема локализована на акцепторных уровнях адсорбированных частиц и объемный заряд определяется концентрацией ионизированных доноров в объеме  $N_D \gg n(r)$  — зерно полностью обеднено свободными носителями заряда:

$$\frac{\partial^2 \varphi(r)}{\partial r^2} + \frac{(d-1)}{r} \frac{\partial \varphi(r)}{\partial r} = \frac{qN_D}{\epsilon \epsilon_0}. \quad (6)$$

Для случая полного обеднения уравнение Пуассона с граничными условиями  $\partial \varphi / \partial r(0) = 0$  и  $\varphi(R_0) = \varphi_S$  решается аналитическими методами [6]:

$$\varphi_S - \varphi(r) = \frac{kT}{q} \frac{R_0^2 - r^2}{2dL_D^2}, \quad (7)$$

где  $L_D$  — длина экранирования Дебая,

$$L_D = \frac{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 k T}}{\sqrt{q^2 N_D}}. \quad (8)$$

При увеличении степени дисперсности слоя (уменьшение размера зерна) искривление зон на поверхности  $\varphi_S$  по отношению к объему зерна  $\varphi(0) = \varphi_V$  уменьшается:

$$\varphi_S - \varphi_V = \frac{kT}{q} \frac{1}{2d} \left(\frac{R_0}{L_D}\right)^2. \quad (9)$$

Поэтому для поликристаллических слоев с малыми размерами зерен ( $R_0 < L_D$ ), искривлением зон на поверхности по сравнению с объемом можно пренебречь ( $\varphi_S - \varphi_V < kT/q$ ) и для определения концентрации носителей заряда в зерне  $n$  можно использовать условие электронейтральности:

$$qN_D V + Q_S S = 0, \quad (10)$$

где  $V$ ,  $S$  — объем и площадь поверхности зерна, соответственно.

Число адсорбированных частиц газа на единице поверхности, а значит и число акцепторных уровней на поверхности зерна, определяется решением уравнения (1):

$$N = N_S \frac{p}{p + (1-f)}, \quad (11)$$

где  $p$  — нормированное на скорость десорбции парциальное давление газа,

$$p = \frac{\alpha P_g}{v \exp\left(-\frac{W}{kT}\right)}. \quad (12)$$

Локализованные на поверхности зерна уровни акцепторного типа, индуцированные адсорбированными частицами газа-окислителя, заполняются электронами из объема зерна с вероятностью  $f$ , зависящей от положения уровня Ферми  $F$  и температуры слоя:

$$f = \frac{1}{1 + 2N_c \exp\left(\frac{F - E_c + E_a}{kT}\right)} = \frac{n}{n_a + n}, \quad (13)$$

где  $N_c$  — плотность состояний вблизи дна зоны проводимости  $E_c$ ;  $(E_c - E_a)$  — энергетический зазор между поверхностным акцепторным уровнем и дном зоны проводимости;  $n_a$  — параметр локального акцепторного уровня, характеризующий концентрацию свободных электронов в объеме зерна, когда уровень Ферми приближается к его положению,

$$n_a = 2N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_a}{kT}\right). \quad (14)$$

Таким образом, плотность адсорбированных на поверхности материала частиц газа  $N$  зависит от свойств материала ( $n_a$ ,  $N_c$ ), поверхности ( $N_S$ ), характеристик адсорбирующихся частиц ( $E_a$ ,  $\alpha$ ,  $W$ ) и концентрации (давления) газов в смеси. Кроме того, адсорбционная способность поверхности полупроводника (число адсорбированных частиц на единице поверхности) зависит от концентрации свободных носителей заряда в объеме материала, что согласуется с основным следствием электронной теории адсорбции [7]:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{n}{n + n_a \left(1 + \frac{1}{p}\right)}, \quad (15)$$

где  $\delta = (N_S S)/(N_D V)$  — характеризует дисперсность полупроводникового слоя.

При высоком давлении газа-окислителя ( $p \gg 1$ ) концентрация носителей заряда в зерне не зависит

от его давления, а определяется только параметрами материала и рабочей температурой:

$$n = \frac{n_a}{\delta - 1}. \quad (16)$$

Проводимость отдельного зерна  $G_0$  поликристаллического образца при протекании через образец тока  $J$  определяется его геометрией и распределением потенциала в объеме:

$$G_0 = \left( \int_{-(R_0-r_0)}^{+(R_0-r_0)} \frac{dr}{\int_{S(r)} q \mu_n n dS} \right)^{-1}, \quad (17)$$

где  $\mu_n$  — подвижность электронов;  $r_0$  — радиус перешейка между соседними зёрнами;  $S(r)$  — площадь сечения зерна, перпендикулярная направлению протекания тока  $J$ .

Допуская, что поликристаллические слои состоят из симметричных зерен с одинаковым характерным размером (зерна имеют одинаковый радиус), проводимость полупроводникового слоя можно определить, интегрируя по объему слоя электропроводность зерна  $G_0$ , которая в рамках принятых предположений пропорциональна концентрации свободных носителей заряда. Если считать подвижность основных носителей заряда (электронов)  $\mu_n$ , не зависящей от координаты, то выражение для проводимости слоя принимает вид

$$G = G_0 \frac{L_W L_T}{L R_0}, \quad (18)$$

где  $L_W$  — ширина контактов структуры;  $L_T$  — толщина поликристаллического слоя;  $L$  — расстояние между контактами;  $R_0$  — характерный радиус зерна.

Проводимость сферических зерен мелкодисперсных слоев

$$G_v = \frac{1}{\frac{1}{\sigma_v} \int_{R_0-r_0}^{R_0+r_0} \frac{dx}{\pi(R_0^2 - x^2)}} = \sigma_v \frac{\pi R_0}{\ln\left(2 \frac{R_0}{r_0} - 1\right)}, \quad (19)$$

где  $\sigma_v = q n_v \mu_n$  — удельная проводимость зерна;  $n_v$  — концентрация электронов в объеме зерна;  $r_0$  — радиус перешейков между зёрнами.

Проводимость цилиндрических перешейков между зёрнами сферической формы

$$G_c = \sigma_c \frac{\pi r_0^2}{2\left(R_0 - \sqrt{R_0^2 - r_0^2}\right)}, \quad (20)$$

где  $\sigma_c = q n_c \mu_n$  — удельная проводимость перешейка;  $n_c$  — концентрация электронов в объеме перешейка.

Проводимость поликристаллических слоев с хорошо сформированными зёрнами ( $r_0 \ll R_0$ ) сфери-

ческой формы зависит от радиуса перешейков между зернами  $r_0$  и характерного радиуса зерна:

$$G_{\text{sphere}} = \left( \frac{1}{G_v} + \frac{1}{G_c} \right)^{-1} = \left( \frac{\ln\left(\frac{2R_0}{r_0} - 1\right)}{\sigma_v \pi R_0} + \frac{1}{\sigma_c} \frac{2\left(R_0 - \sqrt{R_0^2 - r_0^2}\right)}{\pi r_0^2} \right)^{-1} \approx \left( \frac{\ln\frac{2R_0}{r_0}}{\sigma_v \pi R_0} + \frac{1}{\sigma_c} \frac{1}{\pi R_0} \right)^{-1} \approx \sigma_v \frac{\pi R_0}{\ln\left(\frac{2R_0}{r_0}\right)}. \quad (21)$$

В поликристаллических слоях с зернами сферической формы достаточно часто наблюдается тенденция к деградации электрофизических свойств, вследствие срачивания зерен (увеличения радиуса перешейков  $r_0$ ), изменение пористости и поверхности зерен. Проблема деградации свойств еще более усложняется, так как рабочая температура газочувствительных слоев составляет  $\sim 150...400$  °С. Как указано в работе [8], двумерная структура типа нанотрубок (наностержней) удовлетворяет требованиям термической стабильности и может быть использована для создания высоконадежных газочувствительных слоев.

Проводимость слоев с зерном цилиндрической формы

$$G_v = \frac{\sigma_v}{\int_{-(R_0-r_0)}^{+(R_0-r_0)} \frac{dx}{2L_T \sqrt{R_0^2 - x^2}}} = \frac{\sigma_v 2L_T}{\arctg\left(\frac{R_0-r_0}{\sqrt{2R_0r_0-r_0^2}}\right)}. \quad (22)$$

Проводимость перешейков между цилиндрическими зернами (перешейки имеют прямоугольную симметрию):

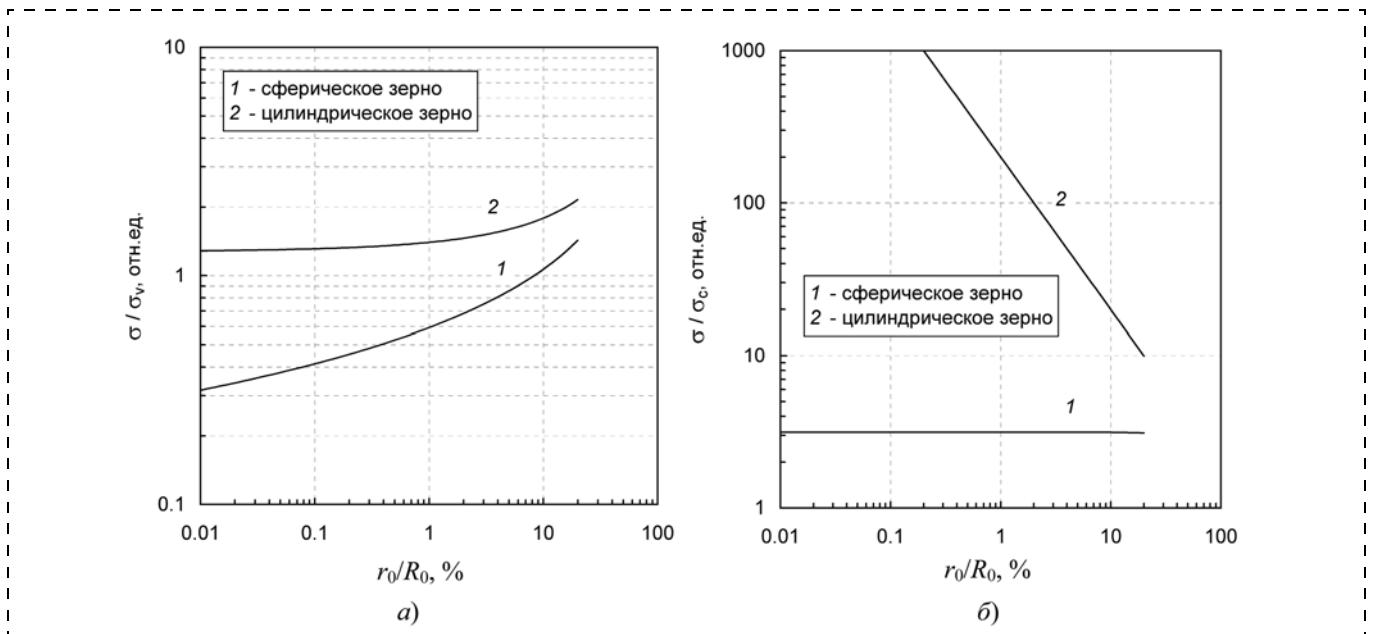
$$G_c = \sigma_c \frac{L_T r_0}{R_0 - \sqrt{R_0^2 - r_0^2}}. \quad (23)$$

В случае хорошо сформированных поликристаллических слоев ( $r_0 \ll R_0$ ), состоящих из зерен цилиндрической формы, проводимость образца не зависит от геометрических размеров перешейков, а определяется только проводимостью зерна и его характерным размером ( $L_T$ ):

$$G_{\text{cyl}} = \left( \frac{1}{G_v} + \frac{1}{G_c} \right)^{-1} = \left( \frac{\arctg\left(\frac{R_0-r_0}{\sqrt{2R_0r_0-r_0^2}}\right)}{\sigma_v 2L_T} + \frac{R_0 - \sqrt{R_0^2 - r_0^2}}{\sigma_c L_T r_0} \right)^{-1} \approx \left( \frac{1}{2\sigma_v L_T} \left( \pi - \sqrt{\frac{r_0}{2R_0}} \right) + \frac{1}{\sigma_c L_T} \cdot \frac{r_0}{2R_0} \right)^{-1} \approx \sigma_v L_T \frac{2}{\pi}. \quad (24)$$

Определить концентрацию электронов в объеме зерна и в области перешейков возможно из соотношения (16).

На рисунке представлены результаты расчетов зависимостей проводимости зерен и перешейков между ними от радиуса перекрытия зерен (степени "срастания" зерен). При малой степени перекрытия  $r_0/R_0$  проводимость зерен цилиндрической формы перестает зависеть от радиуса перекрытия,



Зависимость проводимости зерен (а) и перешейков (б) поликристаллических материалов от радиуса перекрытия зерен

а проводимость зерен сферической формы монотонно уменьшается. Проводимость перешейков (см. рисунок) с увеличением степени перекрытия цилиндрических зерен монотонно увеличивается, а у зерен сферической формы не изменяется.

Таким образом, образование перешейков в области контактов между зернами цилиндрической формы не приводит к существенному изменению проводимости образцов с зернами цилиндрической формы, поэтому для практического применения наиболее перспективными являются газочувствительные слои, состоящие из наностержней, которые имеют более высокую стабильность по сравнению со слоями, состоящими из зерен сферической формы. Особенностью слоев, состоящих из "тонких" зерен ( $R_0 \ll L_T$ ) цилиндрической формы, является независимость удельной проводимости от толщины слоя  $L_T$ . С технологической точки зрения это обстоятельство может положительно влиять на стабильность характеристик получаемых слоев (например, с помощью ВЧ-магнетронного распыления), так как не всегда возможно обеспечить на большой площади равномерность толщины получаемых слоев.

1. **Suryanarayana C., Koch C. C.** Nanocrystalline materials — Current research and future directions // *Hyperfine Interactions*. 2000. Vol. 130. N 1—4. P. 5—44.
2. **Gleiter H.** Nanostructured materials: state of the art and perspectives // *Nanostructured Materials*. 1995. Vol. 6, Iss. 1—4. P. 3—14.
3. **Bonini N., Carotta M. C., Guidi V., Malagu C., Martinelli G., Paglialonga L., Sacerdoti M.** Doping of a nanostructured titania thick film: structural and electrical investigations // *Sensors and Actuators B*. 2000. Vol. 68, Iss. 1—3. P. 274—280.
4. **Comini E., Faglia G., Sberveglieri G., Pan Z., Wang Z. L.** Stable and highly sensitive gas sensors based on semiconducting oxide nanobelts // *Applied Physics Letters*. 2002. Vol. 81. P. 1869—1871.
5. **Пека Г. П.** Физика поверхности полупроводников. Киев: Изд-во Киевского ун-та, 1967. 192 с.
6. **Comini E., Guidi V., Malagu C. et al.** Electrical properties of tin dioxide two-dimensional nanostructures // *Journal of Physical Chemistry B*. 2004. Vol. 108. P. 1882—1887.
7. **Волькенштейн Ф. Ф.** Физико-химия поверхности полупроводников. М.: Наука, 1973. 400 с.
8. **Comini E., Fagli G., Sberveglieri G. et al.** Stable and highly sensitive gas sensors based on semiconducting oxide nanobelts // *Applied Physics Letters*. 2002. Vol. 81. P. 1869—1871.

УДК 621.383.8

**З. В. Шомахов**, ассистент,  
**О. А. Молоканов**, канд. техн. наук, доц.,  
**А. М. Кармоков**, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф.,  
Кабардино-Балкарский государственный  
университет, г. Нальчик,  
e-mail: shozamir@yandex.ru

## ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ СВИНЦОВО-СИЛИКАТНОГО СТЕКЛА В ПРОЦЕССАХ НАГРЕВА И ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА

Поступила в редакцию 15.03.11

*Экспериментально исследованы температурная зависимость и кинетика электропроводности свинцово-силикатного стекла С87-2. Получены значения энергии активации электропроводности в разных температурных диапазонах, соответствующих разным механизмам проводимости. Установлено влияние массопереноса под действием электрического поля на электропроводность. Проведены оценки времени установления фазового равновесия в структуре стекла в зависимости от температуры отжига.*

**Ключевые слова:** изотермический отжиг, кинетика электропроводности, свинцово-силикатное стекло, структурные превращения, удельная электропроводность, фазообразование, энергия активации проводимости

### Введение

Свинцово-силикатные стекла широко используются в вакуумной электронной технике, в частности, в качестве вторично-электронных эмиттеров [1]. Фор-

мирование качественного вторично-эмиссионного слоя существенно зависит от термодинамических параметров и характеристик технологических процессов формирования эмиссионного слоя. При обработке стекла в различных термодинамических условиях (температура, время, среда и др.) было обнаружено формирование наноразмерных кристаллических фаз в объеме и на поверхности образца [2—5]. Физико-химические процессы, происходящие в стекле, оказывают существенное влияние на электрофизические свойства и определяют важные для эксплуатации приборов применения характеристики (стабильность параметров, надежность, долговечность и др.). В связи с этим исследования влияния процессов фазообразования и кинетики роста новых фаз в стеклах, а также влияния пропускания электрического тока на проводимость стекла С87-2, применяемого в производстве некоторых изделий вакуумной электроники, могут представлять практический интерес.

### Методика эксперимента

Все исследованные образцы были изготовлены во Владикавказском технологическом центре "Баспик". Образцы представляли собой полированные диски диаметром 24,8 мм и толщиной 0,42 мм. На торцовую поверхность дисков нанесены хромовые электроды. На одной стороне диска находится общий сплошной электрод по всей площади диска, а на второй стороне — центральный измерительный электрод, который окружен охранным электродом

кольцевой формы, исключая вклад поверхностных токов в измеряемые проводимости.

Измерение электропроводности проводилось в процессе нагрева, изотермического отжига при определенной температуре и охлаждения образца. Эксперименты проводились при двух условиях. В первом случае — в течение всего времени эксперимента через образец пропускать электрический ток, во втором случае — для исключения влияния электропереноса пропускали знакопеременный электрический ток за короткий промежуток времени (~2 мин на одно измерение).

В ходе изучения электропроводности образцы стекол подвергались высокотемпературному изотермическому отжигу. Каждый образец отжигался при одной из температур: 350, 400, 450 и 500 °С. Время отжига образцов во всех случаях составляло 5 ч.

### Экспериментальные результаты

По результатам измерения электропроводности (удельной проводимости) в процессе нагрева и охлаждения построены температурные зависимости электропроводности материала исследованных образцов, а по данным, полученным в ходе изотермической выдержки, получены кинетические зависимости электропроводности.

Электропроводность стекол имеет активационный характер и можно ожидать, что зависимость логарифма обратного сопротивления от обратной температуры будет линейной [6]. На рис. 1 представлены в координатах Аррениуса температурные зависимости удельной проводимости стекла С87-2, полученные при трех последовательных нагревах образца.

Для каждого цикла нагрева на графике выделяются две линейные области, соответствующие низким и высоким температурам. При повторных нагревах по сравнению с первым наблюдается увеличение электропроводности на низкотемпературном участке за

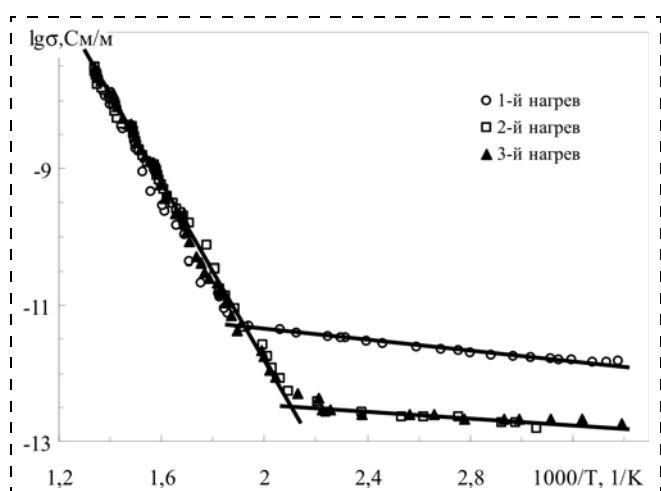


Рис. 1. Температурная зависимость удельной проводимости стекла С87-2 в процессе трех последовательных нагревов от комнатной температуры до 450 °С

висимости, причем наклон аппроксимирующей линии, который характеризует энергию активации проводимости, при втором и третьем нагреве меньше, чем при первом. На высокотемпературном участке изменения значений электропроводности во втором и третьем циклах не наблюдается.

При первом нагреве в низкотемпературной области энергия активации проводимости составляет 0,047 эВ, а при повторных нагревах — уменьшается до 0,036 эВ. В высокотемпературной области для всех трех циклов энергия активации проводимости составляет 1,49 эВ.

Различие значений электропроводности и энергии ее активации между первым и последующими нагревами легко может быть объяснено процессами образования и роста новых фаз при первом отжиге [7, 8]. Эти фазы характеризуются разнообразием их состава, а также нано- и даже субнанометровыми размерами. В целях выявления особенностей процесса фазообразования был проведен анализ фазового состава исследованных стекол после отжига в различных термодинамических условиях. Исследования выполнялись на рентгеновском дифрактометре ДРОН-6. Для всех образцов дифрактограммы снимались в диапазоне углов рассеяния  $2\theta$  от 6 до 75° (соответствующие межплоскостные расстояния в кристаллических структурах от 1,47 до 0,127 нм) [9, 10].

На рис. 2 представлены кинетические кривые электропроводности стекла С87-2, полученные при изотермическом отжиге в вакууме при температурах 400, 450 и 500 °С. Как видно из рисунка, при постоянном пропускании электрического тока проводимость стекла при всех температурах отжига со временем уменьшается.

Полученные экспериментальные зависимости  $\sigma(t)$  для указанных температур изотермической выдержки стекла с хорошей достоверностью аппроксимируются квадратичной зависимостью вида  $at^2 + bt + c$ :

$$\sigma = 7,0 \cdot 10^{-9}t^2 - 5,0 \cdot 10^{-8}t + 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ для } 500 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (1)$$

$$\sigma = 6,6 \cdot 10^{-9}t^2 - 5,3 \cdot 10^{-8}t + 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ для } 450 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (2)$$

$$\sigma = 4,0 \cdot 10^{-9}t^2 - 5,0 \cdot 10^{-8}t + 2,0 \cdot 10^{-7} \text{ для } 400 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (3)$$

$$\sigma = 6,0 \cdot 10^{-13}t^2 - 7,0 \cdot 10^{-12}t + 7,0 \cdot 10^{-11} \text{ для } 350 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (4)$$

$$\sigma = -2,0 \cdot 10^{-9}t^2 + 1,0 \cdot 10^{-8}t + 4,0 \cdot 10^{-8} \text{ для } 450 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (5)$$

где  $\sigma$  в сименсах на метр, а  $t$  в часах. Уравнение (5), в отличие от предыдущих, относится к случаю знакопеременного тока.

Для всех случаев непрерывного пропускания тока коэффициенты  $a > 0$ ,  $b < 0$ , и рассматриваемые зависимости имеют монотонно убывающий характер. При знакопеременном пропускании тока через стекло — наоборот:  $a < 0$ ,  $b > 0$ , и проводимость от времени отжига монотонно возрастает.

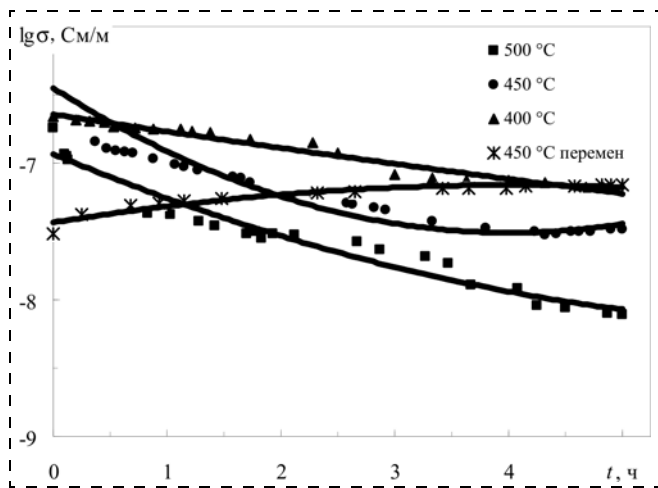


Рис. 2. Зависимость удельной проводимости от времени изотермического отжига в вакууме для образцов невосстановленного стекла С87-2 при различных температурах и непрерывном пропускании тока, а также при температуре 450 °С и знакопеременном токе

Сравнение двух кривых, полученных при температуре 450 °С для постоянного и знакопеременного тока, показывает, что в процессе нагрева до температуры отжига с непрерывным пропусканием тока проводимость стекла возрастает, причем на один порядок величины больше, чем соответствующее возрастание для случая знакопеременного тока. В процессе отжига при постоянном пропускании тока проводимость уменьшается на ~1,5 порядка величины, а при знакопеременном пропускании тока, наоборот, увеличивается на ~0,5 порядка. При постоянном пропускании тока количество электричества, прошедшего через образец, составляло  $5,6 \cdot 10^{-2}$  Кл. Этот факт указывает на то, что при постоянном пропускании электрического тока электромассоперенос оказывает существенное влияние на проводимость и на структуру стекла [11]. Рентгеноструктурные исследования также подтверждают этот факт.

В процессе изотермического отжига удельная проводимость стекла увеличивается тем интенсивнее, чем выше температура отжига. Уровень удельной проводимости стекла при высокой температуре (500 °С) стремится к  $\sim 10^{-8}$  См/м. Обращает на себя внимание тот факт, что удельная проводимость кристаллического кварца при 400 °С составляет  $\sim 10^{-8}$  См/м. Возможно, что именно растущие наноразмерные кристаллы диоксида кремния, зафиксированные на рентгенограммах, определяют конечный уровень проводимости.

Используя уравнения аппроксимации (1)–(5) определены времена отжига, при которых удельная проводимость со временем больше не изменяется. Это означает, что структура стекла приходит в равновесное состояние. Для этого, дифференцируя уравнения (1)–(4) по времени и минимизируя, получим соотношение в виде

$$d\sigma/dt = 2at - b = 0,$$

откуда

$$t = b/2a. \quad (6)$$

Таким образом, подставляя в последнюю формулу значения коэффициентов  $a$  и  $b$  из уравнений (1)–(4), получим время установления равновесия в структуре стекла С87-2 в зависимости от температуры отжига (рис. 3).

Как видно из рисунка, время установления равновесия в структуре стекла сильно зависит от температуры отжига, и эта зависимость для стекла С87-2 аппроксимируется уравнением

$$t = 51 \exp(-0,0054T). \quad (7)$$

Подставляя в это уравнение значение температуры изотермического отжига, можно найти оптимальное время, необходимое для полной релаксации стекла при данной температуре при постоянном пропускании тока через образец. На рис. 4 представлена зависимость  $d\sigma/dt$  от времени отжига при различных температурах.

Как видно из рисунка, при непрерывном пропускании тока с повышением температуры отжига скорость изменения проводимости возрастает, и, как и следовало ожидать,  $d\sigma/dt$  имеет максимальное значение при температуре 500 °С. При знако-

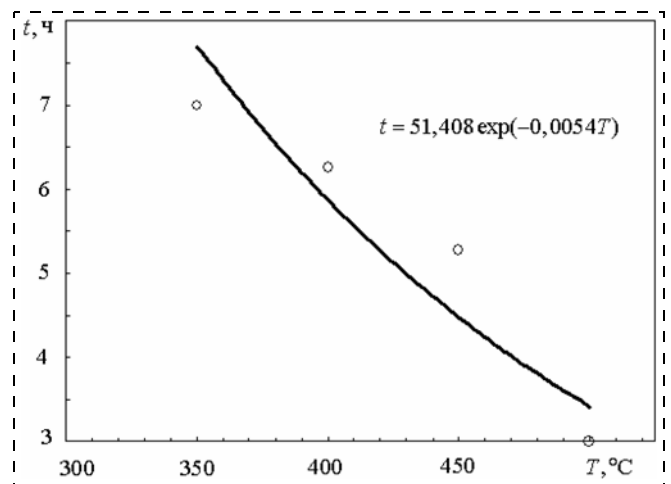


Рис. 3. Зависимость времени достижения фазового равновесия (релаксации) в стекле С87-2 от температуры отжига

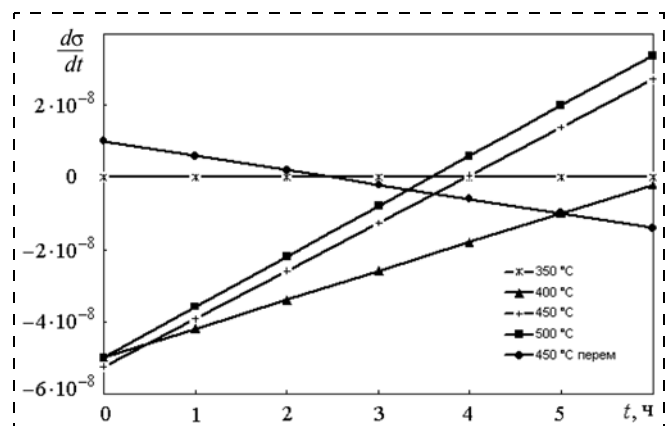


Рис. 4. Скорость изменения проводимости стекла С87-2 в процессе изотермического отжига при различных температурах и непрерывном пропускании тока, а также при температуре 450 °С и знакопеременном токе



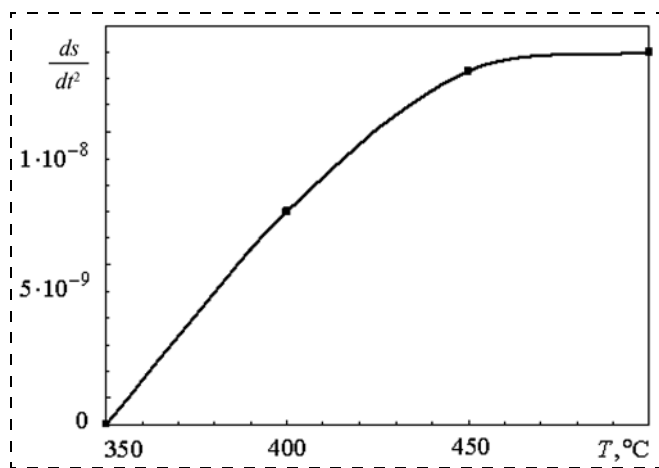


Рис. 5. Изменение интенсивности увеличения проводимости с повышением температуры отжига стекла С87-2

переменном пропускании тока, наоборот, скорость изменения проводимости уменьшается.

Наклон полученных линий показывает интенсивность увеличения проводимости (рис. 5). Как видно из рисунка, при температурах 450 и 500 °С интенсивность изменения скорости выравнивается, т. е. в интервале этих температур изменения проводимости имеют максимальное значение и мало различаются.

Сравнивая изменение энергии активации проводимости стекол со временем релаксации при различных температурах отжига, можно предположить, что энергия активации проводимости будет изменяться со временем по такому же закону.

#### Выводы

- ♦ В работе реализована методика исследования кинетики электропроводности в свинцово-силикатном стекле С87-2 при изотермическом отжиге.

- ♦ При низких температурах отжига (350–400 °С) скорости изменения проводимости близки к нулю. С течением времени изотермического отжига удельная проводимость этого стекла уменьшается тем интенсивнее, чем выше температура отжига.
- ♦ Получена зависимость времени установления равновесия в структуре стекла от температуры отжига.

#### Список литературы

1. Кулов С. К. Микроканальные пластины. Владикавказ: Северо-Кавказский технологический университет, 2001. 86 с.
2. Андреев Н. С., Мазурин О. В., Порай-Кошиц Е. А. Явление ликвации в стеклах / Под ред. М. М. Шульца. Л.: Наука. 1974, 220 с.
3. McMillan P. W. Glass-ceramics. London. UK, Academic Press, 1979.
4. Слезов В. В., Сагалович В. В. Диффузионный распад твердых растворов // УФН. 1987. Т. 151, № 1 С. 67–104.
5. Алексеева И. П., Атонен О. В., Голубков В. В., Онущенко А. А., Раабен Э. Л. Кинетические закономерности выделения нанокристаллов PbS в натриевоцинковосиликатном стекле // Физика и химия стекла. 2007. Т. 33. № 1. С. 3–11.
6. Anderson O. L. and Stuart D. A. Calculation of Activation Energy of Ionic Conductivity in Silica Glasses by Classical Methods. Journal of The American Ceramic Society. Anderson and Stuart. December 1954. Vol. 37, N 12. P. 573–580.
7. Кармоков А. М., Кулов С. К., Молоканов О. А., Шоматов З. В. Электропроводность стекол для микроканальных пластин в процессе образования и роста нанокристаллов // IX Междунар. науч. конф. "Химия твердого тела: монокристаллы, наноматериалы, нанотехнологии". Кисловодск — Ставрополь: СевКавГТУ, 2009. С. 202–203.
8. Кулов С. К., Кармоков А. М., Молоканов О. А. Наноразмерные неоднородности на поверхности свинцово-силикатного стекла для МКП // Известия Российской академии наук. Сер. физическая. 2009. Т. 73. № 11. С. 1649–1651.
9. Свергун Д. И., Фейгин Л. А. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяния. М.: Наука, 1986. 279 с.
10. Филиппович В. Н. К теории рассеяния рентгеновских лучей под малыми углами // ЖТФ. 1956. Т. 26. № 2. С. 398–416.
11. Шелби Дж. Структура, свойства и технология стекла. М.: Мир, 2006. 288 с.

## Вниманию подписчиков!

Продолжается подписка на журнал

## “НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА”

на II полугодие 2011 г.

Оформить подписку можно через подписные агентства или непосредственно в редакции.

#### Подписные индексы по каталогам:

Роспечать — **79493**;  
Пресса России — **27849**

Информация о журнале размещена на сайте <http://novtex.ru/nmst>  
107076, Москва, Стромьинский пер., д. 4

Тел/факс (499) 269-55-10  
E-mail: [nmst@novtex.ru](mailto:nmst@novtex.ru)

УДК 629.7.054

**В. Э. Джашигов**, д-р техн. наук, проф., зав. лаб.,  
**В. М. Панкратов**, д-р техн. наук, проф.,  
зам. директора по науке,  
Институт проблем точной механики и управления  
РАН, г. Саратов  
e-mail: iptmuran@san.ru

## СУПЕРМИНИАТЮРНЫЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ИНЕРЦИАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

*Поступила в редакцию 24.03.11*

*Построены и исследованы математические модели тепловых процессов суперминиатюрного (объем  $< 0,2 \text{ мм}^3$ ) микромеханического датчика инерциальной информации. Разработано поддерживающее программное обеспечение, позволяющее решать задачи расчета, анализа и визуализации нестационарных температурных полей датчика. Проведен качественный и количественный анализ влияния внешних и внутренних тепловых воздействий на температурные поля датчика, показана возможность управления этими полями. Полученные данные позволяют создать суперминиатюрный микромеханический гироскоп с заданными свойствами и инвариантный к тепловым воздействиям.*

**Ключевые слова:** суперминиатюрный микромеханический датчик инерциальной информации, тепловые воздействия и процессы, математические модели

### Введение

В статье [1] рассмотрены теоретические основы разработки суперминиатюрного (объем  $< 0,2 \text{ мм}^3$ ) микромеханического датчика инерциальной информации. Выведены уравнения движения датчика на произвольно движущемся основании, предложены возможные конструктивные варианты его упругого подвеса, получены первичные оценки эффективности работы датчика с учетом среды его функционирования.

Кинематическая схема и возможные конструктивные схемы суперминиатюрного "простого" микромеханического гироскопа без дополнительных рамок с поступательными малыми движениями чувствительного элемента (ЧЭ) представлена на рис. 1.

Конструкция осциллятора содержит ЧЭ 1, который крепится к корпусу 2 с помощью двух упругих элементов 5, 6 (двухсторонний симметричный

подвес) или одного упругого элемента (консольный подвес). Наиболее простые формы упругих элементов подвеса — прямолинейные стержни квадратного поперечного сечения, но могут быть и криволинейные формы элементов. Наиболее простая форма ЧЭ — это куб.

*Принцип действия* такого "простого" датчика инерциальной информации следующий. На противоположных гранях ЧЭ и корпусе располагаются микроэлектромеханические (МЭМС) структуры для возбуждения первичных колебаний по оси  $x$  заданной амплитуды и частоты и для съема выходной информации — вторичных колебаний по оси  $y$ , обусловленных кориолисовыми силами инерции при наличии измеряемой угловой скорости  $\Omega$ .

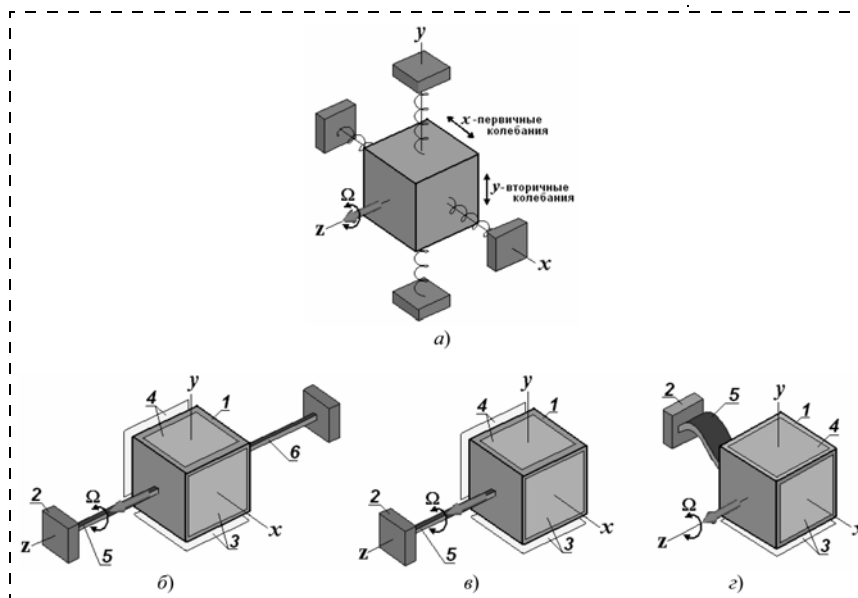
Настоящая работа продолжает начатые исследования. В реальных условиях на функционирование датчика оказывают влияние постоянные и переменные, внешние и внутренние тепловые воздействия [2–4].

Например, температуры окружающей среды могут изменяться в широком диапазоне ( $-50 \div +80$ ) °С, причем эти изменения могут быть нестационарными. В микроэлектромеханических структурах систем возбуждения колебаний и съема информации датчика присутствуют внутренние источники теплоты малой мощности, что, например, в экстремальных условиях вакуума и невесомости может привести к значительным перегревам. Такие тепловые воздействия могут привести также к сложному изменению термоупругого напряженно-деформированного состояния датчика, недопустимым внутренним температурам и, в конечном итоге, к его погрешностям и функциональным откатам.

*Цель настоящей работы* — обеспечение эффективного функционирования суперминиатюрного микромеханического датчика инерциальной информации (одноосного микромеханического гироскопа, сокращенно СММГ) на основе анализа его нестационарных неоднородных температурных полей.

Для достижения цели ставятся и решаются следующие задачи:

- построение и реализация в программном комплексе математической модели тепловых процессов, протекающих в датчике;
- анализ влияния внешних и внутренних тепловых воздействий на температурное состояние СММГ и оценка возможности управления температурными полями и тепловыми процессами.



**Рис. 1.** Обобщенная кинематическая схема (а) и конструктивные схемы СММГ с двумя прямолинейными упругими элементами (б), с консольным прямолинейным упругим элементом (в), с консольным криволинейным упругим элементом (г): 1 — ЧЭ; 2 — корпус; 3, 4 — МЭМС-структуры для возбуждения первичных колебаний и съема выходной информации; 5, 6 — упругие элементы

### Математическая модель тепловых процессов

Задача построения математической модели тепловых процессов, расчета и визуализации температурных полей СММГ решалась модифицированным методом [4] элементарных тепловых балансов (МЭТБ).

Алгоритмы этого метода хорошо апробированы [4] для решения задач расчета, анализа и визуализации нестационарных температурных полей различных датчиков авиакосмического приборостроения, и авторы накопили большой опыт применения этого метода.

Тепловая модель рассматриваемого датчика состоит в том, что его конструкция разбивается на конечные твердотельные элементарные объемы. Эти элементарные объемы имеют теплофизические и геометрические характеристики и тепловые связи, соответствующие реальной конструкции.

Основной алгоритм расчета температурного поля, полученный на основе метода тепловых балансов и принятых допущений для рассматриваемого типа датчика, состоящего из твердотельных элементарных объемов, имеет следующий вид [4]:

$$T_i(t + \Delta t) = \left[ 1 - \frac{\Delta t}{c_i} \left( \sum_{j=1}^M q_{ij} + q_{ic} \right) \right] T_i + \frac{\Delta t}{c_i} \left( \sum_{j=1}^M q_{ij} T_j + q_{ic} T_c + Q_i \right), \quad (1)$$

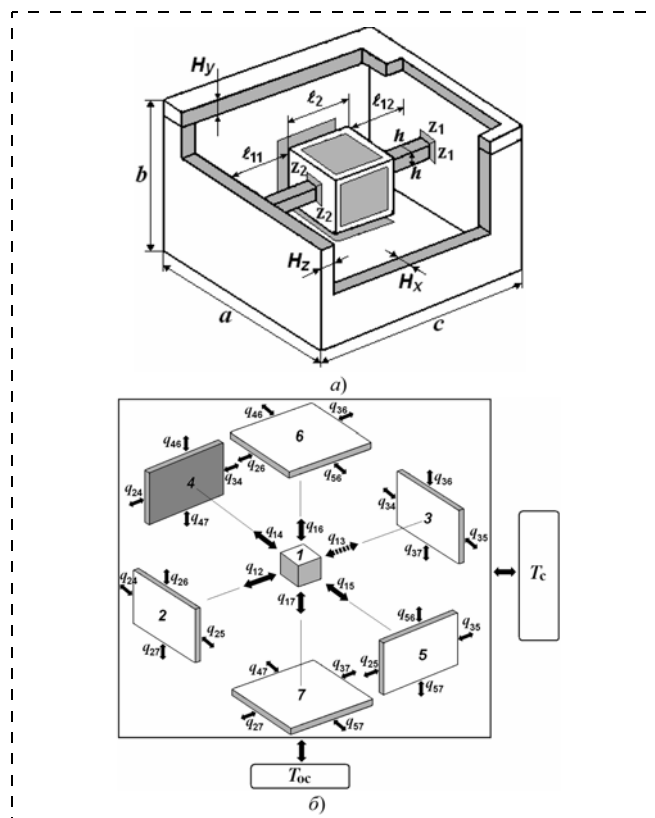
где  $T_i(t)$ ,  $T_i(t + \Delta t)$  — температуры  $i$ -го объема в настоящий и последующий моменты времени;  $c_i$  — теплоемкости;  $q_{ij}$  — теплопроводности между

объемами  $i, j$ ;  $q_{ic}$  — теплопроводности между  $i$ -м объемом и окружающей средой;  $Q_i$  — мощности источников или стоков тепла;  $\Delta t$  — шаг расчета;  $M$  — число объемов, имеющих тепловой контакт с  $i$ -м объемом;  $N$  — число объемов;  $i = 1, \dots, N$ ;  $T_c$  — температура окружающей среды.

Суммарная тепловая проводимость, характеризующаяся входящими в (1) коэффициентами теплопроводности  $q_{ij}$ , представляется в виде  $q_{ij} = q_T + q_K + q_H$ , где  $q_T$ ,  $q_K$ ,  $q_H$  — теплопроводности, учитывающие теплообмен теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Общий вид, конструктивные элементы датчика, существенные для исследования в нем тепловых процессов, геометрические параметры и тепловая модель прибора представлены на рис. 2.

Расположение в элементарных объемах основных источников тепловыделения определяется положением в датчике тепловыделяющих микроэлектромеханических структур (актуаторов, преобразователей и др. на корпусе и ЧЭ).



**Рис. 2.** Общий вид, геометрические параметры (а) и тепловая модель (б) суперминиатюрного датчика инерциальной информации: 1 — ЧЭ; 2, 3, 4, 5 — боковые стенки корпуса; 6, 7 — крышка и дно корпуса;  $T_c$  — температура окружающей среды;  $T_{ос}$  — температура основания;  $\leftrightarrow$ ,  $\leftrightarrow$  — тепловые связи для двухстороннего и консольного подвесов

Суммарная мощность тепловыделения источников тепла в датчике принята  $Q \leq 0,1$  мВт. Теплоотвод датчика — пассивного типа через крышку, корпус и узлы крепления к основанию. Окружающая среда — воздух. Среда, заполняющая внутренние полости прибора, — газ (воздух, аргон и др.) при заданном давлении. Нижней частью датчик жестко прикреплен к массивному основанию, температура которого задана. Датчик может быть как полностью теплоизолирован от основания, так и находиться с ним в хорошем тепловом контакте.

### Исходные данные для расчета параметров тепловой модели

Удельная теплоемкость материала (кремний)  $c_y = 0,7$  мДж/(мг · °С). Теплопроводности материала (кремний)  $\lambda = 1,36$  мВт/(мм · °С) и окружающей среды (воздух)  $\lambda_c = 0,025$  мВт/(мм · °С). Плотность материала  $\rho = 2,238$  мг/мм<sup>3</sup>.

Осредненные значения коэффициентов теплоотдачи излучением и свободной конвекцией  $\alpha_{из} = 0,003$  мВт/(мм<sup>2</sup> · °С);  $\alpha_k = 0,006$  мВт/(мм<sup>2</sup> · °С).

Геометрические параметры (рис. 2): габаритные размеры датчика  $a = b = 0,44$  мм;  $c = 0,64$  мм. Толщины стенок корпуса  $H_x = H_y = H_z = 0,02$  мм. Длины упругих элементов  $l_{11} = l_{12} = 0,165$  мм. Габаритный размер кубического ЧЭ  $l_2 = 0,165$  мм. Размер поперечного сечения упругого элемента  $h = 0,00365$  мм. Размеры пятна контакта упругого элемента с корпусом и с ЧЭ  $z_1 = z_2 = h$ . Объем датчика  $< 0,2$  мм<sup>3</sup> (без учета сервисной электроники).

### Варьируемые параметры

Отношение давления снаружи датчика к нормальному атмосферному давлению  $D_{нар} = 0 \div 1$ . Отношение давления внутри датчика к нормальному атмосферному давлению  $D_b = 0 \div 1$ . Степень теплоизоляции нижней части корпуса от основания, к которому прикреплен датчик,  $S_T = 0 \div 1$  (0 — полная теплоизоляция). Законы изменения температуры окружающей среды и основания  $T_c$ ,  $T_{ос}$  и начальная температура  $T_0$  [°С].

### Расчет параметров модели

Элементарные объемы:

$$\begin{aligned} W_1 &= l_2^3, \quad W_2 = W_3 = a(b - 2H_y)H_z, \\ W_4 &= W_5 = H_x(c - 2H_z)(b - 2H_y), \\ W_6 &= W_7 = acH_y. \end{aligned}$$

Массы и теплоемкости элементарных объемов:

$$M_i = \rho W_i, \quad c_i = c_y \rho W_i. \quad (2)$$

Суммарная масса ЧЭ и корпуса:

$$M = M_1 + \sum_{i=2}^7 M_i. \quad (3)$$

При расчете теплопроводимостей тепловой модели датчика используются формулы кондуктивного, свободно-конвективного и лучистого теплообмена, представленные в работе [4].

Формулы для определения теплопроводимостей между "соседними" элементарными объемами имеют следующий вид (рис. 2):

$$q_{12} = \lambda \frac{(h^2 + z_1^2 + z_2^2)/3}{l_{11} + H_z/2 + l_2/2} + \lambda_c \frac{l_2^2 - z_2^2}{l_{11}} \sqrt{D_b} + \alpha_{из} (l_2^2 - z_2^2); \quad (4)$$

для двухстороннего или консольного подвеса

$$q_{13} = \begin{cases} \lambda \frac{(h^2 + z_1^2 + z_2^2)/3}{l_{12} + H_z/2 + l_2/2} + \\ + \lambda_c \frac{l_2^2 - z_2^2}{l_{12}} \sqrt{D_b} + \alpha_{из} (l_2^2 - z_2^2), ; \\ \lambda_c \frac{l_2^2}{l_{12}} \sqrt{D_b} + \alpha_{из} l_2^2; \end{cases} \quad (5)$$

$$q_{14} = q_{15} = \lambda_c \frac{l_2^2}{a/2 - l_2/2 - H_x} \sqrt{D_b} + \alpha_{из} l_2^2; \quad (6)$$

$$q_{16} = q_{17} = \lambda_c \frac{l_2^2}{b/2 - l_2/2 - H_y} \sqrt{D_b} + \alpha_{из} l_2^2; \quad (7)$$

$$q_{24} = q_{25} = q_{34} = q_{35} = \lambda \frac{H_x(b - 2H_y)}{(a + c - H_x H_z)/2}; \quad (8)$$

$$q_{26} = q_{27} = q_{36} = q_{37} = \lambda \frac{H_z a}{(b + c - H_y - H_z)/2}; \quad (9)$$

$$q_{46} = q_{47} = q_{56} = q_{57} = \lambda \frac{H_x(c - 2H_z)}{(a + b - H_x - H_y)/2}. \quad (10)$$

Формулы для расчета теплопроводимостей между элементарными объемами и внешней средой:

$$q_{1c} = 0; \quad q_{2c} = q_{3c} = (\alpha_k \sqrt{D_{нар}} + \alpha_{из}) ab; \quad (11)$$

$$q_{4c} = q_{5c} = (\alpha_k \sqrt{D_{нар}} + \alpha_{из}) bc;$$

$$q_{6c} = (\alpha_k \sqrt{D_{нар}} + \alpha_{из}) ac;$$

$$q_{7c} = \lambda \frac{ac}{H_y} S_T.$$

Реализованные в программных комплексах на компьютере алгоритм (1) и формулы (2)—(11) составляют основу математической модели тепловых процессов в рассматриваемом датчике и позволяют рассчитывать и визуализировать нестационарные температурные поля по объему датчика в заданном числе расчетных точек.

## Компьютерные эксперименты и анализ полученных результатов

### 1-й тепловой режим

В качестве температурного воздействия рассматривается ступенчатое изменение температуры окружающей среды и основания при отсутствии внутренних источников тепла. Датчик прикреплен нижней частью корпуса к массивному основанию и теплоизолирован от него ( $S_T = 0$ ). Во внутренних полостях датчика полный вакуум ( $D_B = 0$ ).

Начальная температура элементов датчика  $T_0 = 20$  °С. Температура окружающей среды и основания  $T_c = T_{oc} = 30$  °С.

Этот режим моделируется для выявления тепловой постоянной времени переходных процессов и динамических температурных перепадов.

Результаты моделирования 1-го теплового режима представлены на рис. 3.

Тепловые процессы в чувствительном элементе менее динамичные, чем на корпусе. Постоянная времени переходных процессов в датчике составляет в рассмотренных условиях  $\approx 20 \div 60$  с при максимальном динамическом температурном перепаде  $\sim 6$  °С на 8-й секунде.

### 2-й тепловой режим

Рассматривается влияние на тепловые процессы внутренних источников теплоты от тепловыделяющих микроэлектромеханических структур.

Принято, что источник теплоты расположен в боковой стенке корпуса (объем 4, см. рис. 1), его постоянная мощность  $Q_4 = 0,1$  мВт. Начальная температура элементов датчика, температура окружающей среды и основания остаются постоянными и равными  $T_0 = T_c = T_{oc} = 20$  °С. Остальные характеристики 2-го теплового режима такие же, как в 1-м режиме.

2-й режим моделируется для выявления установившихся температурных перегревов в элементах датчика как функций мощности внутренних ис-

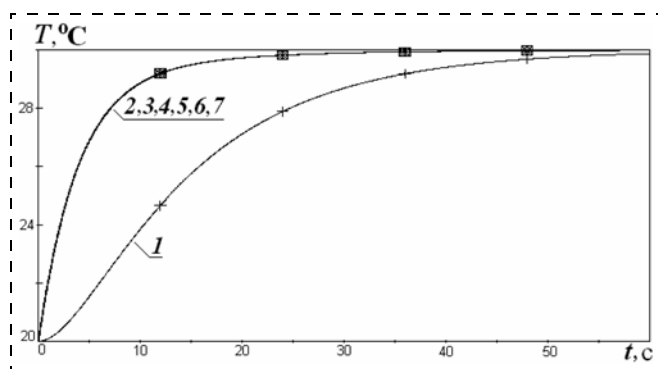


Рис. 3. Тепловые процессы в СММГ при ступенчатом изменении температуры окружающей среды и основания:

1 — ЧЭ; 2, 3, 4, 5, 6, 7 — корпус

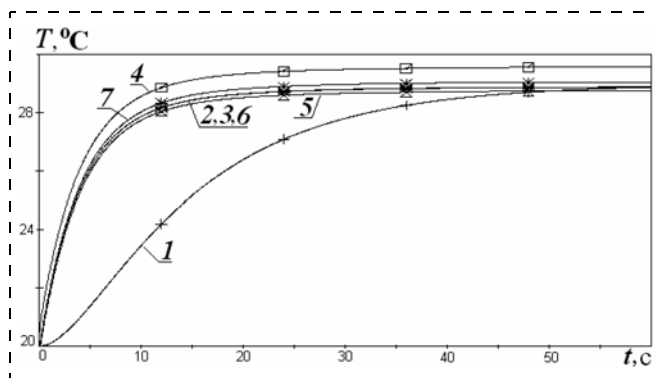


Рис. 4. Тепловые процессы в СММГ при наличии внутренних источников теплоты:

1 — ЧЭ; 4 — корпус с источником тепла; 2, 3, 5, 6, 7 — корпус

точников тепловыделения, условий теплообмена датчика с основанием и с окружающей средой.

Результаты моделирования 2-го теплового режима представлены на рис. 4.

Установившиеся температурные перегревы в элементах датчика как функции мощности внутренних источников тепловыделения, условий теплообмена датчика с основанием и с окружающей средой составили  $\sim 9$  °С на 0,1 мВт мощности внутренних источников тепла.

### 3-й тепловой режим

В качестве температурного воздействия рассматривается гармоническое изменение температуры окружающей среды и основания:  $T_c = T_{oc} = T_{10} + T_{11} \sin \gamma t$ ,  $T_{10} = 25$  °С,  $T_{11} = 5$  °С,  $\gamma = 0,1$  с $^{-1}$ .

Имеется источник теплоты постоянной мощности  $Q_4 = 0,1$  мВт.

Остальные характеристики 3-го теплового режима такие же, как в 1-м режиме.

3-й режим моделируется для изучения влияния нестационарных температурных воздействий на тепловые процессы в датчике при наличии дополнительных возмущений от внутренних источников тепловыделения.

Результаты моделирования 3-го теплового режима представлены на рис. 5.

Влияние гармонического изменения температуры окружающей среды на тепловые процессы в датчике при наличии дополнительных возмущений от внутренних источников тепловыделения проявляется в появлении постоянной составляющей  $\sim 14$  °С у гармонически изменяющегося перегрева.

Также имеет место постоянное запаздывание  $\approx 10 \div 20$  с тепловых процессов в датчике по сравнению с гармонически изменяющейся температурой окружающей среды.

С уменьшением периода  $\tau = 2\pi/\gamma$  колебаний неоднородной температуры окружающей среды происходит осреднение и симметрирование температур по объему суперминиатюрного микромехани-

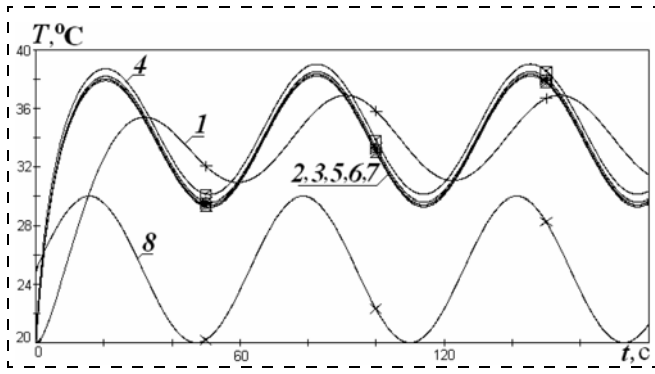


Рис. 5. Тепловые процессы в СММГ при гармоническом изменении температуры окружающей среды и основания и при наличии внутренних источников теплоты: 1 — ЧЭ; 4 — корпус с источником тепла; 2, 3, 5, 6, 7 — корпус; 8 — температура среды  $T_c$

ческого гироскопа, как это было для волнового твердотельного гироскопа [5].

Полученные результаты показывают *принципиальную возможность управления* температурным полем датчика путем создания вокруг него внешнего температурного поля заданной пространственной конфигурации и изменяющегося с течением времени по заданному закону.

Экстремальные условия вакуума и невесомости в сочетании с теплоизоляцией корпуса СММГ от основания при наличии внутренних источников теплоты даже малой мощности могут привести к *недопустимым* внутренним градиентам температур и перегревам датчика над окружающей средой в десятки градусов и значительному увеличению времени переходных процессов.

В целом полученные результаты показывают, что внешние и внутренние тепловые воздействия оказывают существенное влияние на тепловые процессы в СММГ, если не предпринимать специальных мер обеспечения его термоинвариантности.

Для понимания важности влияния температуры на суперминиатюрный микромеханический гироскоп рассмотрим важную задачу возможной потери устойчивости упругого подвеса в условиях тепловых воздействий.

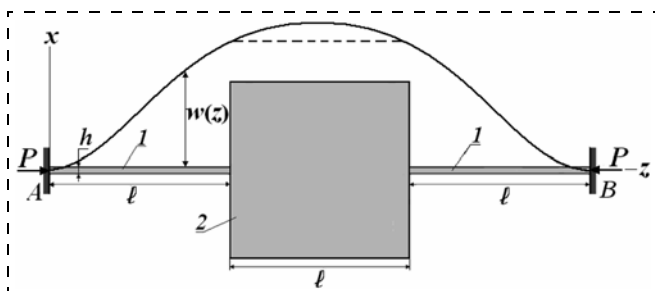


Рис. 6. К оценке критической температуры при нагреве двухстороннего упругого подвеса СММГ: 1 — упругие элементы; 2 — чувствительный элемент

Пусть имеем равномерно нагретый, жестко заделанный обоими концами двухсторонний упругий подвес (см. рис. 1, б и рис. 6), состоящий из чувствительного элемента и двух прямолинейных упругих элементов — стержней квадратного поперечного сечения со стороной  $h$ . Полагаем длины упругих элементов и ЧЭ равными  $l$ .

Если считать, что расстояние между опорами стержня в процессе нагрева не изменится (предельный случай), то при достаточно большой температуре возможно боковое выпучивание упругого подвеса (температурная потеря устойчивости).

Поставим задачу оценки критической температуры  $T_{кр}$ , при которой упругий подвес потеряет устойчивость.

Согласно [6] предположим, что при некотором критическом значении температурного удлинения  $\Delta_{кр} = \alpha T_{кр}(3l)$  упругий подвес принимает изогнутую форму равновесия, приближенно показанную на рис. 6 сплошной линией. На самом деле ЧЭ играет роль "ребра жесткости" и в центральной области форма изогнутой формы ближе к показанной штриховой линией.

В дальнейшем для упрощения аналитических выкладок и получения предельных оценок критической температуры (хуже быть не может) будем полагать, что имеется упругий стержень длиной  $3l$  и его изогнутая форма, показанная сплошной линией, описывается функцией

$$w(z) = w_0 \frac{16z^2(z-3l)^2}{81l^4},$$

где  $w_0$  — максимальный прогиб в центре стержня при  $z = 1,5l$ .

Такой выбор функций прогиба и ее производных позволяет точно удовлетворить граничным условиям жесткой заделки стержня  $w(0) = w'(0) = w(3l) = w'(3l) = 0$ .

Уравнение для прогибов может быть записано в виде

$$EJw''(z) + Pw(z) = 0,$$

где  $P$  — величина опорных реакций;  $J = h^4/12$  — момент инерции сечения;  $E$  — модуль Юнга.

Поскольку расстояние между концами стержня не меняется, то справедливо соотношение [6]

$$\Delta_{кр} - \frac{3lP}{Eh^2} - \frac{1}{2} \int_0^{3l} (w')^2 dz = 0.$$

Отсюда после вычисления интеграла с учетом выражения для  $w'(z)$  получим

$$P = \frac{Eh^2}{3l} \left( \Delta_{кр} - \frac{1}{2} \int_0^{3l} (w')^2 dz \right) = \frac{Eh^2}{3l} \left( \Delta_{кр} - \frac{256w_0^2}{315l} \right).$$

Подставляя выражение для  $P$  и выражения  $w(z)$ ,  $w''(z)$  в уравнение для прогибов, получим

$$w_0 = \frac{\sqrt{315}l}{16} \sqrt{\frac{\Delta_{кр}}{l} - \frac{1,5h^2(6lz - 2z^2 - 3l^2)}{z^2(z-3l)^2}}.$$

Изогнутая форма равновесия существует, если  $w_0$  имеет действительное значение, т. е.

$$\frac{\Delta_{кр}}{l} - \frac{1,5h^2(6lz - 2z^2 - 3l^2)}{z^2(z-3l)^2} > 0.$$

В момент начала потери устойчивости

$$\Delta_{кр} = \frac{1,5lh^2(6lz - 2z^2 - 3l^2)}{z^2(z-3l)^2}.$$

Наименьшее значение  $\Delta_{кр}$  получается при  $z = 1,5l$ , поскольку числитель имеет минимум в этой точке. Поэтому  $\Delta_{кр}^{\min} = \frac{h^2}{2,25l}$ .

С учетом того, что  $\Delta_{кр} = \alpha T_{кр}(3l)$ , получим формулу для оценки критической температуры при нагреве рассматриваемого упругого подвеса:

$$T_{кр} \approx \frac{h^2}{6,75\alpha l^2}.$$

При выбранных характеристиках упругого подвеса  $l = 165$  мкм;  $h = 3,65$  мкм и значении коэффициента линейного температурного расширения кремния  $\alpha = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  получим критические температуры на уровне  $T_{кр} = +32 \text{ } ^\circ\text{C}$ , что попадает в интервал  $(-50 \div +80) \text{ } ^\circ\text{C}$  заданного температурного диапазона.

Таким образом, при использовании относительно тонких прямолинейных упругих элементов ( $l/h \geq 45$ ) температурные воздействия могут быть весьма значимыми и их необходимо учитывать при разработке и создании суперминиатюрного микромеханического гироскопа.

*Примечание.* В реальности все не так критично, поскольку "жесткая" заделка упругих элементов в корпус на самом деле не является абсолютно жесткой. Корпус сделан из того же материала, что и подвес и тоже деформируется (например, при нагревании расширяется) и внутренние усилия в местах крепления существенно меньше, чем рассчитанные в предельных случаях. Кроме того, упругие элементы могут быть переменного сечения, плавно меняющие свою форму, или это могут быть криволинейные элементы (см. рис. 1, в).

Можно применять консольные упругие подвесы, использовать методы поддержания заданной температуры (хотя бы с точностью до единиц градусов), другие способы и методы обеспечения термоинвариантности датчиков. В любом случае для выяснения точной картины упругого и термоупругого напряженно-деформированного состояния датчика необходимы исследования близких к ре-

альным конструкций "упругий подвес ЧЭ — корпус" с помощью методов конечных элементов, методов расчета и анализа тепловых процессов и других.

## Заключение

- Проведен анализ влияния внешних и внутренних, стационарных и нестационарных тепловых воздействий на температурное состояние СММГ и показана возможность управления его температурными полями и тепловыми процессами.
- Показано, что наличие внутренних источников теплоты даже незначительной мощности в экстремальных условиях эксплуатации (вакуум и невесомость в сочетании с теплоизоляцией корпуса СММГ от основания) может привести к *недопустимым* внутренним градиентам температур и перегревам прибора над окружающей средой в десятки градусов и в конечном итоге — к неработоспособности прибора.
- Необходимо предусмотреть меры по обеспечению термоинвариантности СММГ. Эти меры могут касаться условий теплообмена с окружающей средой и быть как *пассивного* (модернизация конструкции в целях оптимизации температурной ситуации внутри прибора), так и *активного* характера (создание систем терморегулирования, например, реверсивного типа на модулях Пельтье, алгоритмическая компенсация температурных погрешностей с установкой термодатчиков и оптимизацией их расположения в приборе и др.).

Применение этих и ряда других мер позволит, на взгляд авторов, создать суперминиатюрный (объем  $< 0,2 \text{ мм}^3$ ) микромеханический гироскоп с заданными свойствами.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) по проекту 10-08-00119а.*

## Список литературы

1. Джашитов В. Э., Панкратов В. М., Барулина М. А. Теоретические основы разработки и создания суперминиатюрного микромеханического многофункционального датчика инерциальной информации // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 5 (118). С. 46—54.
2. Распопов В. Я. Микромеханические приборы: учебное пос. 2-е изд., пер. и доп. Тула: Гриф и К, 2004. 476 с.
3. Пешехонов В. Г., Несенюк Л. П., Грязин Д. Г., Некрасов Я. А., Евстифеев М. И., Блажнов Б. А., Аксененко В. Д. Инерциальные модули на микромеханических датчиках. Разработка и результаты испытаний // Юбилейная XV С.-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. С.-Петербург, ЦНИИ "Электроприбор" 2008. С. 9—15.
4. Джашитов В. Э., Панкратов В. М. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий / Под общей ред. акад. РАН В. Г. Пешехонова. С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2005. 404 с.
5. Джашитов В. Э., Панкратов В. М., Голиков А. В. Анализ и управление температурными полями волнового твердотельного датчика инерциальной информации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 4 (109). С. 62—68.
6. Бажанов В. А., Гольденблат И. И., Николаенко Н. А., Синоков А. М. Расчет конструкций на тепловые воздействия. М.: Машиностроение, 1969. 600 с.

Д. П. Лукьянов, д-р техн. наук, проф.,  
С. Ю. Шевченко, канд. техн. наук, ассистент,  
А. С. Кукаев, студент,  
Д. В. Сафронов, студент,  
СПбГЭТУ "ЛЭТИ",  
e-mail: syshevchenko@mail.ru

## АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИЙ ПОСТРОЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МИКРОГИРОСКОПОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Поступила в редакцию 03.03.11

Рассматриваются концепции построения твердотельных микромеханических гироскопов (ТМГ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Приводится сопоставительный анализ схемно-технических решений, результатов экспериментальных исследований и достигнутых точностных характеристик. Даются оценки времени готовности ТМГ и анализируются направления дальнейшего развития виброустойчивых и ударопрочных твердотельных сенсоров на ПАВ.

**Ключевые слова:** МЭМС, поверхностная акустическая волна, линия задержки, твердотельный микромеханический гироскоп, инерционная масса

### Введение

Современные микромеханические гироскопы (ММГ) нашли широкое применение в автомобилестроении, навигационных системах военного и гражданского применения, нефтяной и газовой промышленности, спорте, медицине и т. д. Большинство производимых на сегодняшний день ММГ (например, продукция фирм Honeywell, Analog Devices, STMicroelectronics, ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электрон", ЗАО "Гирооптика") относятся к классу вибрационных, использующих подвижные инерционные массы и систему гибких торсионов. Последние резко снижают предельную виброустойчивость и ударную прочность микрогироскопов и ограничивают их применение в высокочастотных объектах.

В связи с этим большой интерес представляют твердотельные чувствительные элементы, использующие молекулярную кинетику твердого тела в инерциальных системах отсчета. Среди них стоит отметить ММГ на объемных и поверхностных акустических волнах (ОАВ и ПАВ соответственно). В этих моделях роль инерционных масс, подвешиваемых на торсионах, выполняют частицы звукопровода, которые совершают колебательные движения в поле акустических волн. Достоинствами микрогироскопов на ОАВ являются высокие вибро- и ударопрочность, однако они отличаются значительными габаритными размерами и необходимостью

использования 3D-технологий. В этом смысле преимуществом конструкций на ПАВ является возможность планарного исполнения (2D-технологий), что приобретает решающее значение при массовом производстве твердотельных сенсоров. Рассмотрим теоретические основы работы таких датчиков.

### Основы теории гироскопического эффекта на ПАВ

Приведем, следуя работам [1–5], уравнение движения ПАВ во вращающейся системе координат для случая изотропной подложки:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} + 2\rho \epsilon_{ijk} \Omega_j \frac{\partial u_k}{\partial t} + \\ + \rho(\Omega_i \Omega_j u_j - \Omega_j^2 u_i) = 0; \\ T_{i3} = C_{i3kl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} = 0, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где  $i, j, k, l = 1, 2, 3$ ;  $x_3 = 0$ ;  $\rho$  — плотность материала звукопровода;  $u_i, u_j, u_k, u_l$  — векторы упругих смещений;  $C_{ijkl}$  — тензор упругих постоянных;  $\epsilon_{ijk}$  — символ Леви—Чевита;  $\Omega_i, \Omega_j, \Omega_k$  — компоненты вектора угловой скорости;  $T_{ik}$  — механическое напряжение.

Первые два члена в уравнении (1) описывают инерционные и упругие свойства звукопровода соответственно. Третий член описывает силы Кориолиса, а четвертый — центробежные силы. Обычно угловая скорость  $\Omega$  много меньше частоты поверхностной волны  $\omega$ . Поэтому третий член уравнения (1), характеризующий силы Кориолиса, пропорционален  $\delta = (\Omega/\omega) \ll 1$ , а четвертый член, пропорциональный  $(\Omega/\omega)^2$ , оказывается величиной второго порядка малости и им можно пренебречь.

Решая уравнение (1), находят выражение для относительного приращения фазовой скорости ПАВ при вращении звукопровода в виде

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \beta \frac{\Omega}{\omega}, \quad (2)$$

где  $v_0$  и  $\Delta v$  — невозмущенное значение фазовой скорости и ее приращение соответственно;

$$\beta = \frac{\xi^2}{2(1-\xi^2)} \times \\ \times \frac{(1-\eta^2\xi^2)^{1/2}(n^2\xi^2-4)-(1-\eta^2)(\eta^2-4)}{(\eta^2-2)+\left(1+\xi^2-2\xi^2\eta^2\right)\left(1-\xi^2n^2\right)^{1/2}\left(1-\eta^2\right)^{1/2}}; \\ \xi = \frac{v_T}{v_L}, \eta = \frac{v_0}{v_T};$$

$v_L = \sqrt{C_{11}/\rho}$ ,  $v_T = \sqrt{C_{44}/\rho}$  — фазовые скорости продольной и поперечной волн соответственно.



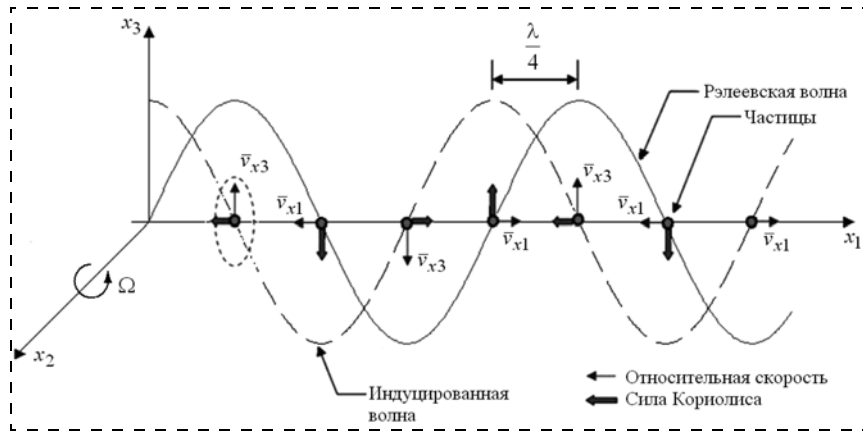


Рис. 1. Гироскопический эффект на ПАВ

Для изотропной подложки максимальная величина  $\xi_{\max} = 0,5$ , что, в свою очередь, определяет область возможных значений  $\eta$  [2]:

$$0,87 < \eta < 0,96.$$

Это позволяет оценить максимальное значение  $\beta_{\max} = 0,48$ .

Как известно из теории [1, 3, 4], в бегущей ПАВ частицы приповерхностного слоя в декартовой системе координат  $x_1x_2x_3$  имеют две компоненты скорости ( $\bar{v}_{x1}$  и  $\bar{v}_{x3}$ ), которые носят названия тангенциальной и нормальной (сагиттальной) составляющих соответственно. На рис. 1 они показаны в виде тонких векторов, направленных параллельно осям  $x_1$  и  $x_3$  соответственно. Легко заметить, что максимальные значения вектор  $\bar{v}_{x1}$  приобретает в экстремальных точках, а вектор  $\bar{v}_{x3}$  — в нулевых.

Векторы  $\bar{v}_{x1}$  и  $\bar{v}_{x3}$  находятся в квадратуре (имеют пространственную ортогональность и временной сдвиг на  $90^\circ$ ), что приводит к эллиптическому движению частиц в приповерхностном слое. Это движение быстро затухает при распространении в глубь подложки ( $x_3 < 0$ ). Такая ПАВ может быть названа первичной.

Действие угловой скорости  $\Omega$  вокруг оси  $x_2$  приводит к появлению вторичной ПАВ, смещенной относительно первичной на  $90^\circ$  по фазе, но совпадающей по направлению. Их интерференция изменяет фазовую скорость результирующей волны. Следовательно, измеряя ее значение, можно получить информацию о действующей угловой скорости. Представленная выше теория была описана для бегущих ПАВ. Однако гироскопический эффект наблюдается и в стоячих волнах, которые могут быть получены суперпозицией двух встречно бегущих. Ниже приводятся концепции построения твердотельных микрогироскопов (ТМГ) на ПАВ.

### Частотный ТМГ с кольцевым ПАВ-резонатором

Одна из первых работ, посвященных исследованию гироскопического эффекта на ПАВ, была опубликована В. У. Лао в 1980 г. [1]. В ней приводятся основы теории бегущих ПАВ во вращающейся системе

координат и предложена концепция построения твердотельного гироскопа с кольцевым резонатором (рис. 2).

Рассмотрим более подробно принцип действия такого гироскопа. На образующую цилиндра 1, выполненного из плавящего кварца, нанесено пьезоэлектрическое покрытие, которое используется для генерации двух встречно бегущих ПАВ 2 и 3 с одинаковой длиной волны  $\lambda$  (при  $\Omega = 0$ ). Их возбуждение на двух уровнях (верхнем и нижнем) осуществляется с помощью излучающего 4 и принимающего 5 встречно-штыревых преобразователей (ВШП), которые образуют

две линии задержки длиной  $L = 2\pi R$ , где  $R$  — радиус цилиндра. Они включены в цепь положительной обратной связи усилителя 8 и образуют автоколебательные системы, возбуждающие волны 2 и 3. Фазовращатели 6 и полосовые фильтры 7 служат для согласования линий задержки с усилителем.

Встречное движение бегущих ПАВ вызывает дифференциальное изменение их фазовых скоростей, что, в свою очередь, приводит к противоположному сдвигу частот. Их разность, пропорциональная угловой скорости, выделяется на выходе смесителя 9.

Возможность практической реализации подобного ТМГ даже в лабораторных условиях вызывала большие сомнения. Так, оценки, проведенные в работе [1], показали, что для измерения угловой скорости на уровне  $1,5^\circ/\text{ч}$  требуется достижение кратковременной стабильности частоты генерации порядка  $10^{-13}$ ! Такой уровень реализуется в квантовых генераторах и недостижим для ПАВ. Поэтому результатов экспериментальных исследований автор в работе не приводит.

Однако несомненным остается интерес к построению ТМГ частотного типа, для которых чувствительность преобразования угловой скорости к приращению частоты автогенератора выражается соотношением  $\Delta f = \frac{\beta}{2\pi} \Omega$ , которое зависит только от упругих постоянных звукопровода [4].

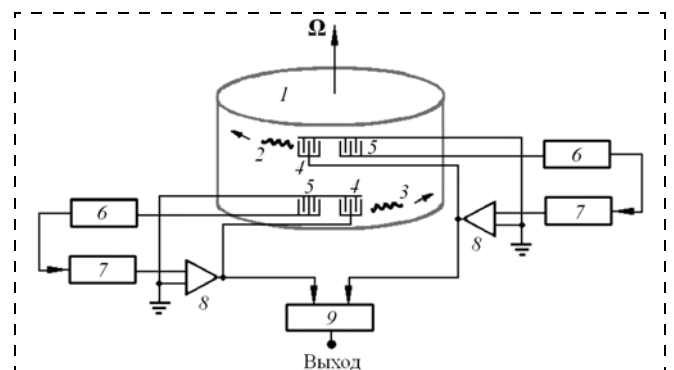


Рис. 2. ТМГ на ПАВ с кольцевым резонатором:

1 — цилиндр с пьезоэлектрическим покрытием; 2, 3 — встречно бегущие ПАВ; 4, 5 — однонаправленные ВШП; 6 — фазовращатели; 7 — полосовые фильтры; 8 — усилители; 9 — смеситель

## ТМГ на стоячих ПАВ

Оригинальная концепция построения ТМГ на ПАВ, предложенная в 1998 г. М. А. Курасовой и др. [6], представлена на рис. 3. Здесь с помощью возбуждающих ВШП 1 и отражателей 2 генерируется первичная стоячая волна 3, в пучностях которой навешиваются миниатюрные массы ( $66 \times 61$  мкм,  $1,5 \times 10^{-11}$  г), образующие матрицу 4. Вместе с частицами звукопровода они совершают колебания вдоль оси  $z$ . Получаемая в результате сетка из дополнительных масс имеет вид прямоугольной центрированной матрицы с периодами  $\lambda_{\text{П}}$  (длина первичной стоячей ПАВ) и  $\lambda_{\text{В}}$  (длина генерируемой вторичной ПАВ) (рис. 4).

Как видно на рис. 4, в область расположения навесных масс излучаются две бегущие навстречу исходные ПАВ. Их суперпозиция образует стоячую волну с пучностями в местах расположения масс. Возникающие от сил Кориолиса колебания масс в поперечном направлении являются источником вторичных (генерируемых) волн. Расположение масс та-

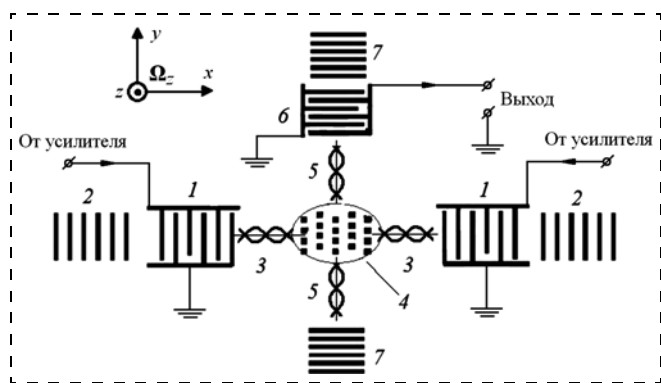


Рис. 3. ТМГ на ПАВ с распределенными навесными массами: 1 — возбуждающие ВШП; 2 — отражатели первичного (возбуждающего) резонатора; 3 — первичная стоячая волна; 4 — матрица навесных масс; 5 — вторичная стоячая волна; 6 — приемный ВШП; 7 — отражатели вторичного (приемного) резонатора

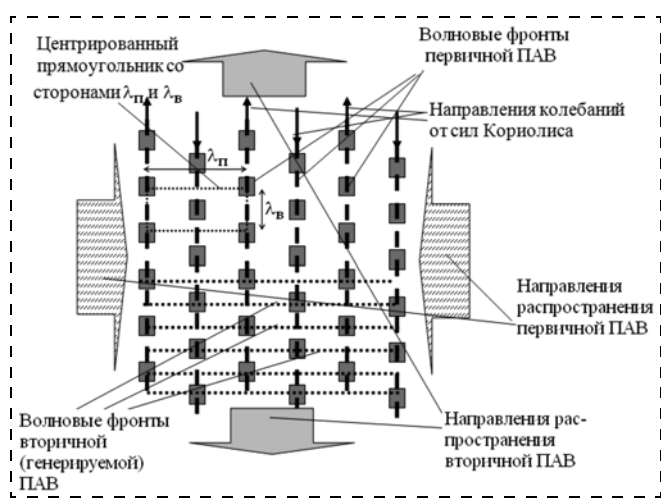


Рис. 4. Матрица навесных элементов

ково, что в результате суммирования колебаний будут образовываться две бегущие в разные стороны ПАВ.

Таким образом, при наличии угловой скорости  $\Omega_z$  (см. рис. 3) возникает ускорение Кориолиса и соответствующие ему силы, ортогональные направлению первичной волны 3. Под их действием частицы звукопровода вместе с навесными массами совершают колебательные движения вдоль направления  $Oy$ , возбуждая вторичную ПАВ 5, которая фиксируется ВШП 6.

В работе [7] описаны результаты испытаний ТМГ, изготовленного по приведенной схеме. При использовании подложки из  $128^\circ$  YX-среза  $\text{LiNbO}_3$  авторами на частоте ПАВ 74,2 МГц был получен очень слабый выходной сигнал на уровне сотых долей микровольта. В связи с этим описанная концепция была подвергнута серьезной критике [8]. Отметим, что это обстоятельство не привело к прекращению попыток использования подобного принципа построения ТМГ, о чем свидетельствуют работы [9 и 10].

## ТМГ на стоячих ПАВ с двойным преобразованием

Интересное развитие концепция ТМГ с распределенными массами получила в работе [10]. Авторами был предложен вариант детектирования вторичной волны с помощью двух линий задержки — преобразующей и реперной (рис. 5, см. третью сторону обложки).

Здесь, как и ранее в работе [6], в резонаторе 1 возбуждается стоячая волна, в пучностях которой размещается матрица навесных элементов 2. При наличии угловой скорости возбуждается вторичная волна 3, амплитуда которой пропорциональна вектору угловой скорости  $\Omega_x$ . Таким образом, осуществляется первичное преобразование измеряемой угловой скорости в информативный параметр — амплитуду вторичной ПАВ. Далее вторичная волна проходит через преобразующую линию задержки 4, которая вместе с усилителем 5 формирует автогенератор на частоте, близкой к частоте резонатора 1.

В области пересечения вторичной волны 3 с волной 6, бегущей в линии задержки 4, происходит их интерференция, что инициирует изменение фазовой скорости бегущей волны 6 и, как следствие, вызывает сдвиг частоты соответствующего автогенератора. Следовательно, вторичным преобразованием является трансформация амплитуды индуцированной волны 3 в вариации частоты автономного осциллятора. Сигнал с его выхода поступает на вход смесителя 7, на второй вход которого подается сигнал автогенератора, образованного реперной линией задержки 8 и усилителем 9. На выходе смесителя с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ) 10 выделяется сигнал разностной частоты  $\Delta f$  двух автогенераторов, значение которой пропорционально действующей угловой скорости.

Основные характеристики разработанного макета ТМГ на ПАВ представлены ниже:

Рабочая частота линий задержки, МГц . . . . .	.80
Длина волны $\lambda$ , мкм . . . . .	48,646
Скорость ПАВ для $\text{LiNbO}_3$ , м/с . . . . .	.3961
Масштабный коэффициент, Гц/°/с . . . . .	.119
Коэффициент электромеханической связи, % . . . . .	.5,56
Нелинейность характеристики, % . . . . .	.7,6
Диапазон измеряемых угловых скоростей, °/с . . . . .	.0—1000
Габаритные размеры навесных элементов, мкм . . . . .	.12,16 × 12,16
Габаритные размеры ТМГ, мм . . . . .	.12 × 7,5

Масштабный коэффициент описанного макета составляет 119 Гц/°/с, что является сегодня наилучшим результатом для твердотельных микрогироскопов на ПАВ. Выходная характеристика датчика отличается малым значением коэффициента перекрестной чувствительности и нелинейностью 7,6 %. Вместе с тем, авторы не используют энергию вторичной волны, распространяющейся вдоль оси  $y$  в отрицательном направлении, учет которой мог бы способствовать дальнейшему повышению чувствительности и точности такого ТМГ.

Следует отметить, что испытания проводились в вакуумной камере при постоянных температуре и влажности, что снижало воздействие внешних факторов. В отсутствие термостабилизации точностные характеристики ТМГ, вероятно, могут оказаться несколько хуже.

В приведенной концепции линии задержки используются в качестве промежуточного звена для преобразования сигнала. Вместе с тем, теория, изложенная выше, позволяет построить ТМГ, в котором угловая скорость будет непосредственно приводить к изменению частоты автогенератора с линией задержки в цепи обратной связи. Рассмотрим работы, в которых предлагается реализовать эту возможность.

### Частотная дифференциальная схема ТМГ на ПАВ

Несомненный интерес представляют результаты, опубликованные в работе [5]. Авторами предложена дифференциальная схема построения ТМГ на двух линиях задержки со встречно бегущими ПАВ. Структурная схема такого сенсора приведена на рис. 6 (см. третью сторону обложки).

Она состоит из двух независимых генераторов, каждый из которых образован линиями задержки 1 и 2 в цепи положительной обратной связи усилителей 3 соответственно. При отсутствии угловой скорости генераторы работают на собственных частотах  $f_{10}$  и  $f_{20}$ , возбуждая пару встречно бегущих ПАВ. Если основание вращается вокруг оси  $y$  ( $\Omega_y \neq 0$ ), то фазовые скорости ПАВ в линиях задержки приобретают противоположные по знаку приращения  $\pm \Delta v$ , как было показано ранее. Это, в свою очередь, вызы-

вает смещение собственных частот автогенераторов на величину  $\mp \Delta f$ . Колебания с частотами, получившими дифференциальное приращение, поступают на смеситель 4, где формируются два гармонических колебания на суммарной и разностной частотах. Установленный на выходе смесителя полосовой фильтр 5 выделяет сигнал разностной частоты, которая пропорциональна угловой скорости  $\Omega_y$ . Таким образом, реализуется дифференциальная схема частотного типа на встречно бегущих ПАВ. При этом направление вращения может быть определено по знаку приращения частоты в одном из генераторов:

при вращении против часовой стрелки:

$$f_1 = f_{01} + \Delta f;$$

при вращении по часовой стрелке:

$$f_1 = f_{01} - \Delta f.$$

В результате проведения экспериментальных исследований лабораторного макета ТМГ авторами были получены технические характеристики, которые приведены ниже:

Собственные частоты генераторов, МГц . . . . .	$f_{01} = 98,0315$ $f_{02} = 98,5247$
Первоначальный разнос частот $\Delta f_0$ , кГц . . . . .	493,3
Скорость ПАВ для кварца ST-среза, м/с . . . . .	3158
Собственные потери в линии задержки, дБ . . . . .	15,2
Коэффициент температурной чувствительности, ppm · °C <sup>-1</sup> . . . . .	0,4
Коэффициент электромеханической связи, % . . . . .	0,11
Коэффициент $\beta$ . . . . .	-0,85
Масштабный коэффициент, Гц/°/с . . . . .	0,431
Время выхода на рабочий режим, с . . . . .	100
Диапазон измерений, °/с . . . . .	> 2000
Габаритные размеры ТМГ, мм . . . . .	17,2 × 17,2 × 3,5

Обращает на себя внимание большое значение начального разноса частот (493,3 кГц), которое вызвано технологическими ограничениями, неизбежно возникающими при изготовлении однотипных линий задержки [11, 12]. Это, в свою очередь, приводит к увеличению времени выхода датчика на рабочий режим, которое определяется температурной зависимостью частоты выходного сигнала. Одним из возможных решений может быть подстройка собственных частот  $f_{01}$  и  $f_{02}$  к близким значениям, однако при этом возникают проблемы взаимной синхронизации автогенераторов.

Следует особо отметить, что проблема уменьшения времени выхода современных микрогироскопов на рабочий режим является одной из наиболее актуальных, которая частично решается методами приборной и аналитической термокомпенсации. Поэтому неудивительно, что полученное авторами работы [5] время выхода около 100 с справедливо оценено ими как существенный недостаток.

Еще одна реализация данной концепции была предложена в работе [13]. Здесь авторы используют ПАВ горизонтальной поляризации (волны Лява), представленные на рис. 7 (см. третью сторону обложки).

Схема построения ТМГ во многом повторяет разработку авторов статьи [5], показанную на рис. 6. Здесь линии задержки выполнены из кварца ST-90° X-среза, что позволило достичь повышенной температурной стабильности датчика. При изменении температуры от 25 до 85 °С отклонения выходной характеристики не превышали 2,2 %. Такой результат является весьма неожиданным, поскольку кварц ST-среза обладает температурной стабильностью лишь в небольшом диапазоне температур. Остальные характеристики макета ТМГ приведены ниже:

Рабочая частота линий задержки,	
МГц . . . . .	80
Скорость ПАВ для кварца ST-среза,	
м/с . . . . .	4920
Собственные потери в линии задержки, дБ . . . . .	9,5
Масштабный коэффициент, Гц/°С . . . . .	1,268
Время выхода на рабочий режим, с . . . . .	1200
Диапазон измерений, °/с . . . . .	37—2000
Нелинейность, % . . . . .	0,22
Кратковременная стабильность (80 мин), ppm . . . . .	-0,2
Долговременная стабильность (24 ч), ppm . . . . .	-0,8
Температурная нестабильность, % . . . . .	-2,2
Габаритные размеры ТМГ, мм . . . . .	17,2 × 17,2 × 3,5

Как видно из приведенных данных, масштабный коэффициент оказался в 3 раза выше, чем в аналогичной конструкции, использующей волны Рэлея. Однако заметен и основной недостаток — чрезвычайно большое время готовности ТМГ. Характер его выхода на рабочий режим представлен на рис. 8 [13]. Нетрудно заметить, что в течение первых 15 мин после подачи питания разностная частота меняется на 800 Гц. Авторы объясняют такое поведение датчика нагревом активных элементов его электрической схемы. При этом необходимо отметить, что исследования проводились в термокамере при постоянной температуре и давлении.

## Заключение

Из приведенного обзора можно сделать вывод о несомненном прогрессе в области построения твердотельных микрогироскопов на ПАВ. Разрабатываемые макеты обладают характеристиками, позволяющими уже сегодня найти им применение во многих областях науки и техники. Таким датчикам присущи малые габаритные размеры, высокие показатели вибро- и ударопрочности при использовании только 2D-технологий, что определяет их конкурентную способность на современном рынке. Однако на сегодняшний день публикуются только результаты лабораторных исследований, серийный же выпуск ТМГ видится перспективой ближайшего будущего.

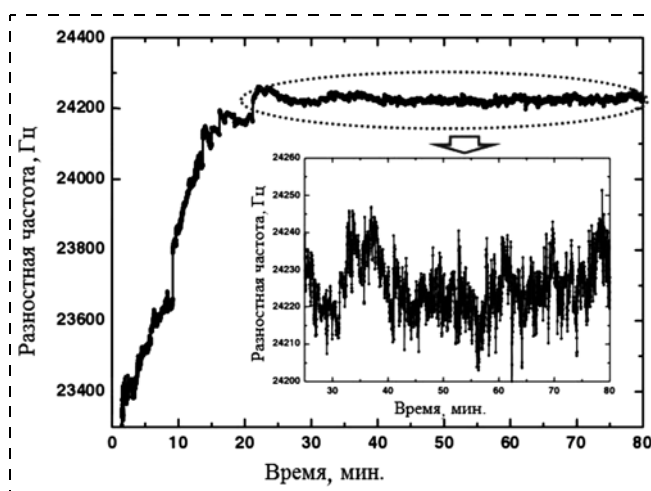


Рис. 8. Характер выхода на рабочий режим ТМГ на ПАВ с горизонтальной поляризацией

Анализ последних публикаций позволяет говорить о несомненных тенденциях повышения точностных характеристик ТМГ из года в год. Вместе с тем, остается ряд нерешенных проблем, одной из которых является снижение температурной чувствительности таких сенсоров как одного из средств уменьшения времени их выхода на рабочий режим. Важность этих параметров вызвана потенциальным применением разрабатываемых датчиков для высокочастотных объектов в экстремальных условиях эксплуатации.

## Список литературы

1. Lao B. Y. Gyroscopic effect in surface acoustic waves // Proc IEEE Ultrasonics Symp. 1980. P. 687—691.
2. Farwell G. W. Topics in Applied Physics. Ed. By Oliver A. A. N. Y.: Springer — Verlag. 1978. V. 24. P. 13—60.
3. Сарапулов С. А., Улитко И. А. Влияние вращения на объемные волны в упругой среде и их использование в твердотельной гироскопии // Гироскопия и навигация. 2001. № 4 (35). С. 64—72.
4. Сарапулов С. А., Кисиленко С. П. Гироскопический эффект в поверхностных акустических волнах // Механика гироскопических систем. 1989. Вып. 8. С. 62—65.
5. Lee S. W., Rhim J. W., Park S. W., Yang S. S. A micro rate gyroscope based on the SAW gyroscopic effect // J. Micromech. Microeng. 2007. N 17. P. 2272—2279.
6. Kurosawa M. A surface acoustic-wave gyro sensor // Sensors and Actuators. 1998. P. 33—39.
7. Varadan V. K., Varadan V. V., Suh W. D. et al. Design and development of a MEMS-IDT gyroscope // Smart Mater. Struct. 2000. N 9. P. 898—905.
8. Woods R. C., Kalami H., Johnson B. Evaluation of a Novel Surface Acoustic Wave Gyroscope // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 2002. Vol. 49. N 1.
9. Калинин В., Лавров Ю., Лукьянов В., Мельников В., Шубарев В. Математическое моделирование гироскопа на ПАВ // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2008. Спецвыпуск. С. 47—51.
10. Wang W., Oh H., Lee K., Yoon S., Yang S. Enhanced Sensitivity of Novel Surface Acoustic Wave Microelectromechanical System-Interdigital Transducer Gyroscope // JJAP. 2009. N 8.
11. Лукьянов Д. П., Тихонов А. А., Филатов Ю. В. и др. Разработка и оптимизация схемы построения микроакселерометра на поверхностных акустических волнах. Ч. 2. // Гироскопия и навигация. СПб: 2008. № 3 (58). С. 62—76.
12. Lukianov D. P., Filatov Yu. V., Shevchenko S. Yu. and other. The development and investigation of the SAW-microaccelerometer // Proceedings 11<sup>th</sup> Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems. 24—26 May 2004, Saint-Petersburg. 2004. P. 300—306.
13. Wang W., Xu F., He S., Li S., Lee K. A New Micro-rate Sensor Based on Shear Horizontal Surface Acoustic Wave Gyroscopic Effect. // JJAP. 2010. N 49.

**И. В. Годовицын**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,  
**В. В. Амеличев**, канд. техн. наук, нач. лаб.,  
**А. Н. Сауров**, чл.-кор. РАН, директор,  
**Р. О. Гаврилов**, мл. науч. сотр.,  
**С. С. Генералов**, тех. 1-й кат.,  
 НПК "Технологический центр МИЭТ",  
 e-mail: iog@tcen.ru

## МИНИАТЮРНЫЕ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАВЛЕНИЯ: ИТОГИ ДВАДЦАТИПЯТИЛЕТИЯ

*Поступила в редакцию 30.03.2011*

*Проведен анализ разработок в области миниатюрных тензорезистивных преобразователей давления с 1985 года по настоящее время. Показано основное отличие миниатюрных преобразователей давления от традиционных — формирование мембраны с помощью осаждения — и вытекающие из этого конструктивно-технологические особенности миниатюрных преобразователей. Проанализированы достоинства и недостатки миниатюрных преобразователей давления. Даны характерные примеры применений миниатюрных преобразователей давления. Показана необходимость увеличения чувствительности миниатюрных преобразователей давления для повышения их привлекательности как средства измерения.*

**Ключевые слова:** миниатюрные преобразователи давления, технология поверхностной микрообработки

### Введение

Интерес к миниатюрным тензорезистивным преобразователям давления возник в середине 1980-х годов и был обусловлен появлением ряда применений, предъявляющих жесткие требования к габаритным размерам преобразователей. Эти применения по своим характерным особенностям делятся на три основные группы.

#### 1. Имплантируемые датчики давления.

Одна из ключевых тенденций современной медицины заключается в уменьшении расходов на содержание медицинской инфраструктуры и повышение качества жизни пациента за счет снижения времени, проводимого пациентом на стационарном лечении. При этом контроль за состоянием здоровья пациента и проведение амбулаторного лечения возлагается не только на лечащего врача, но и на самого пациента. Для получения информации об основных и дополнительных показателях состояния организма используются различные технические средства, среди которых важное место занимают имплантируемые датчики кровяного и внутричерепного давления. Основное требование к таким датчикам — небольшие габаритные размеры, обеспечивающие возможность длительного нахождения в теле человека [1—3].

#### 2. Системы распределенного измерения давления.

Среди систем распределенного измерения давления наибольший интерес представляют тактильные датчики. Тактильные датчики предназначены для получения информации о форме, размере и рельефе поверхности предмета путем механического контакта. Конструктивно тактильные датчики реализуются в виде матрицы преобразователей давления, снабженной интегрированной схемой обработки сигнала. Ключевым параметром тактильного датчика является пространственное разрешение — минимальное детектируемое расстояние между выступами рельефа — этот параметр непосредственно зависит от размера преобразователя. Основное применение тактильных датчиков — перспективная робототехника [4, 5]; в качестве интересного примера "бытового" использования можно привести сканер отпечатка пальца [6, 7].

#### 3. Измерительные зонды.

В некоторых применениях, в основном, связанных с измерением давления в труднодоступных местах, например, тонких трубках или небольших полостях, расположенных на значительном расстоянии от индикатора давления, использование стационарной схемы измерения давления — с подключением через штуцер манометром — не обеспечивает необходимой точности и оперативности измерений. В таких случаях для измерения давления используют измерительные зонды — миниатюрный преобразователь давления в нестандартном корпусе, закрепленный на тонком стержне. В качестве примеров измерительных зондов на основе миниатюрных преобразователей давления можно привести катетеры для измерения давления крови в аорте [8] и системы распределенного измерения давления, применяемые при разработке изделий авиационной техники [9].

Для достижения высоких параметров конечного прибора, предназначенного для указанных применений, габаритные размеры кристалла преобразователя должны быть минимально возможными. В общем случае габаритные размеры кристалла преобразователя давления складываются из размеров мембраны и рамки, на которой мембрана закреплена. Уменьшение размеров мембраны возможно за счет уменьшения ее толщины. В традиционных преобразователях давления мембрана формируется с помощью жидкостного глубокого травления кремния. Этот процесс прост и дешев, однако имеет низкую воспроизводимость, когда толщина мембраны приближается к 1—2 мкм. Кроме того, кристалл традиционного преобразователя давления должен иметь достаточно широкую рамку, которая компенсировала бы своей жесткостью углубление, появившееся в результате глубокого травления. Эти ограничения традиционной технологии делают затруднительным изготовление кристаллов с размерами менее 1 мм.

Формирование мембран толщиной менее 1 мкм и, соответственно, преобразователей с небольшими габаритными размерами, может быть реализовано с помощью технологии поверхностной обработки [10]. Основной прием этой технологии состоит в последовательном осаждении жертвенного и структурного слоев и последующем селективном удалении жертвенного слоя, в результате которого структурный слой становится механически свободным. В силу того, что структурный слой формируется с помощью осаждения, толщина и разброс толщины изготавливаемой таким способом мембраны определяется только параметрами процесса осаждения: для современных установок осаждения их значения составляют 0,01...2,5 мкм и <3...5 % соответственно. Небольшая толщина мембраны позволяет уменьшить ее размеры и, соответственно, уменьшить площадь и габаритные размеры кристалла преобразователя. Использование технологии поверхностной обработки позволяет формировать мембраны площадью менее 100 мкм<sup>2</sup>, т. е. довести площадь мембраны до площади контактной площадки. Как следствие, появляется возможность изготавливать преобразователи с размерами кристалла в доли миллиметра.

За прошедшие 25 лет разработано большое число конструкций миниатюрных тензорезистивных преобразователей давления [6, 7, 11–24], однако большинство разработок осталось на лабораторной стадии. В данной статье приводится обзор достижений в области миниатюрных преобразователей давления и устройств на их основе и анализируются причины, по которым данные преобразователи не пошли в массовое производство.

### Обзор конструкций миниатюрных тензорезистивных преобразователей давления

Конструкция первого миниатюрного тензорезистивного преобразователя давления была предложена в середине 80-х годов прошлого века [11]. Технология изготовления преобразователя основана на технологии поверхностной микрообработки, позволяющей создавать подвижные структуры из осажденных слоев. В работе описана последовательность технологических операций, с помощью которой на кремниевой подложке можно сформировать запечатанные полости, тензорезисторы и металлическую разводку. В результате создается прибор, имеющий вакуумированную анероидную коробку с тензочувствительными элементами на ней, т. е. преобразователь абсолютного давления.

Структура преобразователя приведена на рис. 1. Мембрана преобразователя формируется из поликремния, получаемого с помощью пиролитического осаждения. Для снижения встроенных механических напряжений проводится высокотемпературный отжиг поликремния. В качестве жертвенного слоя используется термический SiO<sub>2</sub>, формируемый с

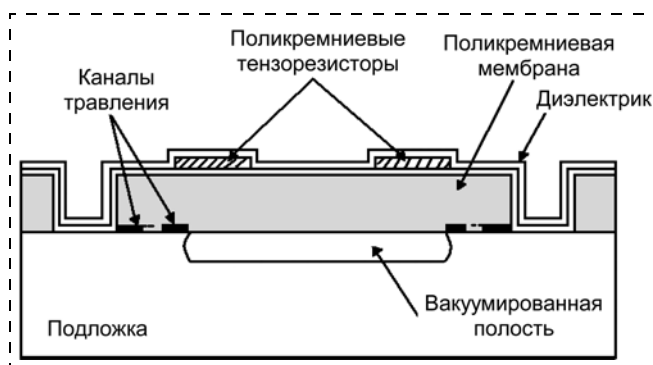


Рис. 1. Структура первого миниатюрного преобразователя давления

помощью локального термического окисления. Удаление жертвенного слоя выполняется в растворе концентрированной плавиковой кислоты (HF) через отдельные каналы травления, которые затем запечатываются путем осаждения слоев SiO<sub>2</sub> и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Запечатывание проводится при давлении 10...30 Па, в результате чего после окончания процесса в анероидной коробке сохраняется давление, близкое к вакууму. Тензорезисторы формируются на краях мембраны путем осаждения поликремния и ионной имплантации бора. Изоляция тензорезисторов от мембраны и алюминиевой металлизации проводится путем осаждения тонкого слоя Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Разработанный преобразователь имеет все отличительные черты, ставшие типичными для миниатюрных тензорезистивных преобразователей давления, — поликремниевая мембрана с контролируемым уровнем встроенных напряжений, легированные бором поликремниевые тензорезисторы, изолирующие слои из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Кроме того, важным достоинством разработанного преобразователя является использование технологических процессов КМОП-технологии. Это позволяет разрабатывать и изготавливать преобразователи на технологических линейках со стандартным набором оборудования, а также дает возможность интегрировать на одном кристалле чувствительные элементы и схему обработки сигналов в целях создания высокофункциональных измерительных приборов.

Характеристики разработанного преобразователя были исследованы в работах [12, 13]. Изготовленные преобразователи имели следующие параметры: толщина поликремниевой мембраны 2,0 мкм, высота вакуумной полости 0,75 мкм, толщина поликремниевых тензорезисторов 0,44 мкм, доза легирования бором  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ; области контактов легировались двойной дозой. Площадь мембран составила 78 × 400 мкм, 53 × 400 мкм, 45 × 400 мкм для преобразователей абсолютного давления и 305 × 305 мкм, 205 × 205 мкм, 130 × 130 мкм для преобразователей избыточного давления [13]. Рабочий диапазон составил 0–6,9, 0–34,5 и 0–137,9 атм для преобразователей абсолютного давления и 0–0,07, 0–0,35 и 0–2,09 атм для преобразователей избы-

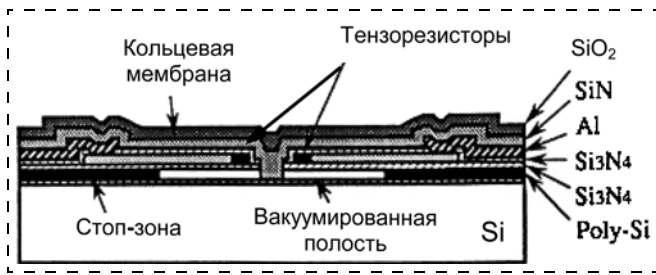


Рис. 2. Структура преобразователя давления компании Тойота [14]

точного давления. В указанных рабочих диапазонах измерялось изменение сопротивления тензорезистора номиналом 9 кОм, расположенного на краю мембраны преобразователя.

В пересчете на мостовую схему с двумя активными плечами была продемонстрирована чувствительность  $19,5...31 \text{ мВ} \cdot \text{В}^{-1}$  и  $2,5...8,5 \text{ мВ} \cdot \text{В}^{-1}$  для преобразователей абсолютного и избыточного давления соответственно. Нелинейность преобразователей составила  $0,3...2,2 \%$ , гистерезис менее  $0,1 \%$ . Температурный коэффициент нуля и чувствительности составил  $0,6 \%/10^\circ\text{C}$  и  $-0,98 \%/10^\circ\text{C}$  соответственно. Перегрузочная способность преобразователей обоих типов благодаря конструктивной защите оказалась очень высока, разрушающее давление составило более 413 атм [13]. Полученные данные показали, что за счет высокой перегрузочной способности разработанные преобразователи имеют хорошие перспективы для создания интегрированных многодиапазонных датчиков давления.

Компанией Тойота также в середине 1980-х годов была разработана другая конструкция миниатюрного тензорезистивного преобразователя абсолютного давления (рис. 2) [7]. Отличительной особенностью преобразователя является многослойная кольцевая мембрана. Мембрана из нескольких слоев диэлектрика общей толщиной 1,6 мкм имеет кольцевую форму и жестко закреплена по внешнему и внутреннему радиусам. Внешний радиус мембраны — 50 мкм. Вакуумная полость сформирова-

на путем селективного удаления жертвенного слоя поликремния толщиной 0,2 мкм через отверстие в центре мембраны; отверстие запечатано путем осаждения слоев  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с низким уровнем встроенных напряжений.

Четыре поликремниевых тензорезистора, легированные бором с концентрацией  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , расположены вокруг центральной опоры мембраны. Чувствительность преобразователя составила  $2 \text{ мВ} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ , температурный коэффициент чувствительности составил  $-2,6 \%/10^\circ\text{C}$  в диапазоне температур от  $-30$  до  $+85^\circ\text{C}$ . Кристалл преобразователя имеет площадь  $0,5 \times 0,5 \text{ мм}$ .

Миниатюрный преобразователь абсолютного давления для медицинских применений представлен в работе [14]. Габаритные размеры кристалла преобразователя составили  $0,4 \times 2,3 \times 0,5 \text{ мм}$ . Отличительной особенностью конструкции является размещение тензорезисторов на нижней стороне мембраны в целях защиты от воздействия внешней среды. Для формирования мембраны, тензорезисторов и жертвенного слоя используется поликремний, получаемый путем пиролитического осаждения, слои поликремния изолируются друг от друга тонкими слоями термического  $\text{SiO}_2$ . Жертвенный слой удаляется с помощью раствора тетраметиламмония.

Поперечное сечение преобразователя и геометрия мембран преобразователей показана на рис. 3. Мембрана преобразователя имеет толщину 1,0 мкм. Толщина тензорезисторов составила 0,3 мкм, доза легирования — от  $2 \cdot 10^{13}$  до  $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . В работе было проведено исследование мембран разной геометрии и размера: круглые мембраны диаметром от 80 до 150 мкм и прямоугольные мембраны размерами  $80 \times 250 \text{ мкм}$  до  $110 \times 250 \text{ мкм}$ . Для преобразователей с шириной мембраны 80 мкм были получены следующие значения чувствительности: тип "А" —  $11,6 \text{ мВ} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ , тип "В" —  $2,7 \text{ мВ} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ , тип "С" —  $1,4 \text{ мВ} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ . Нелинейность выходной характеристики состави-

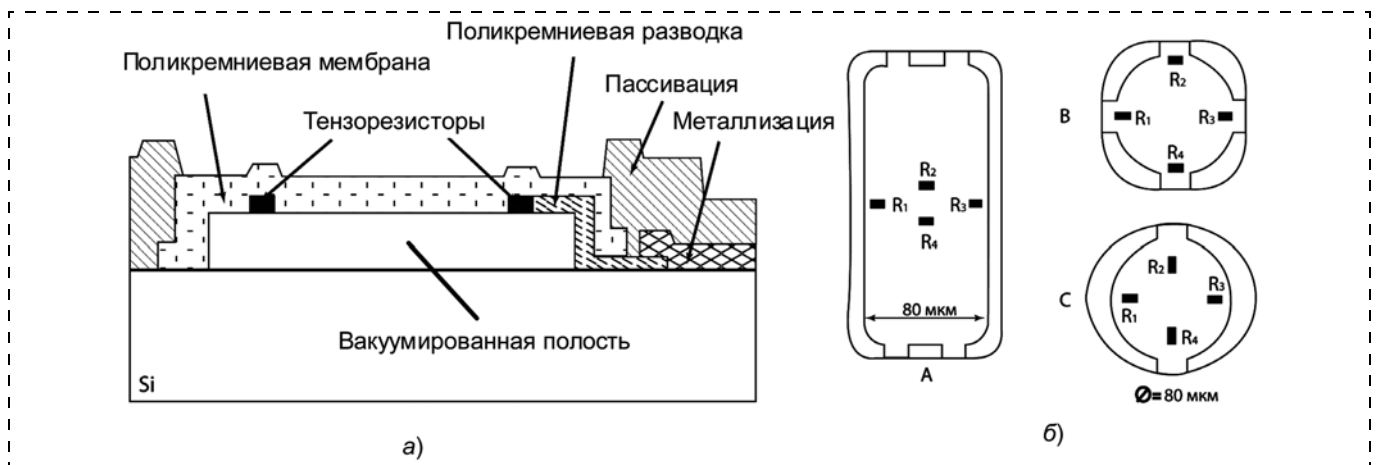


Рис. 3. Преобразователь давления для медицинских применений [14]

ла 0,7...1,0 %. Также был обнаружен значительный разброс начального выходного сигнала преобразователей.

Измеренная чувствительность преобразователей оказалась существенно ниже расчетной. В качестве возможной причины в работе указываются условия закрепления мембраны, которые не обеспечивают идеального жесткого закрепления края, в результате чего максимальное значение напряжений в центре мембраны выше, чем по краям. Распределение напряжений в мембране также зависит от положения, размера и числа каналов травления. Кроме того, чувствительность зависит от параметров процесса осаждения поликремния и процесса формирования тензорезистора (доза имплантации, термическая обработка) [14].

В работе [15] предлагается использование миниатюрного тензорезистивного преобразователя давления в качестве микрофона для измерений микротурбулентности в потоке газа.

Преобразователь сочетает в себе акустические свойства микрофона и миниатюрность тензорезистивного преобразователя давления. Мембрана размерами  $100 \times 100 \times 0,4$  мкм дает возможность обнаружения и измерения колебаний давления турбулентного потока газа. Для достижения достаточно высокой акустической чувствительности микрофона под мембраной путем удаления жертвенного слоя формируется полость глубиной 3 мкм. Отдельно формируется вентиляционный канал для выравнивания статического давления воздуха между полостью и окружающей средой (рис. 4). Особенностью данной конструкции является планаризация жертвенного слоя для достижения плоского закрепления края мембраны.

Преобразователь имеет плоские кривые частотной характеристики в пределах  $\pm 2$  дБ при частоте от 10 Гц до 10 кГц и акустическую чувствительность 0,9 мкВ/Па при напряжении питания 10 В. Моделирование на базе эквивалентной акустической схемы показывает широкую теоретическую полосу пропускания микрофона.

Описанная выше технология была применена к разработке миниатюрного преобразователя для измерения кровяного давления [16]. По сравнению с крем-

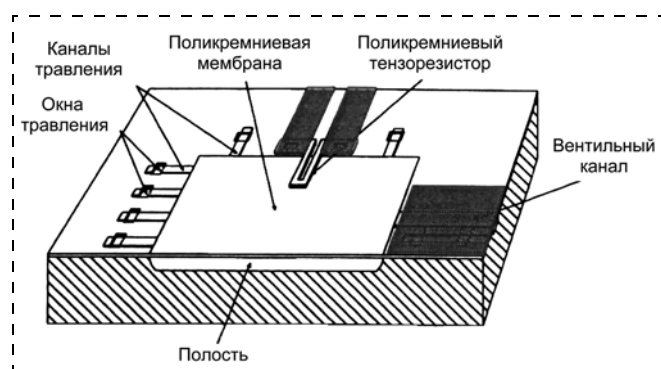


Рис. 4. Структура микрофона с полукремниевой мембраной [15]

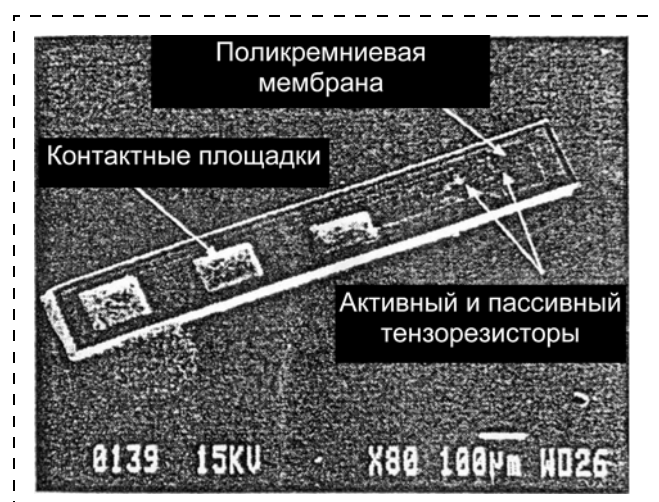


Рис. 5. Кристалл миниатюрного преобразователя давления [16]

ниевым микрофоном размеры кристалла преобразователя были уменьшены до  $100 \times 1300 \times 150$  мкм. Преобразователь давления имеет один активный тензорезистор, расположенный на мембране, и один пассивный тензорезистор, расположенный вне мембраны для температурной компенсации. Для достижения высокой чувствительности с мембраны были удалены пассивирующие слои. Микрофотография кристалла преобразователя приведена на рис. 5.

Чувствительность преобразователя составила  $1,52 \text{ мВ} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ , что достаточно для достижения требуемой точности измерения давления 0,0026 атм (2 мм рт. ст.). Рабочее давление преобразователя лежит в диапазоне  $-0,04 \dots 0,4$  атм.

В работах [17–19] разработаны и изготовлены схожие конструкции миниатюрных тензорезистивных преобразователей давления с круглыми мембранами из поликремния и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

В приведенных выше конструкциях тензорезисторы размещали на верхней или нижней поверхности мембраны. Для электрической изоляции тензорезисторов от мембраны использовали тонкий слой диэлектрика — термический  $\text{SiO}_2$  или осажденный  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Толщину изолирующего слоя выбирали на основе компромисса между чувствительностью и надежностью изоляции. Более толстые слои снижают чувствительность преобразователя и повышают его температурную зависимость вследствие повышения жесткости и несоответствия коэффициентов термического расширения слоев структуры. Тонкие слои увеличивают риск возникновения утечки.

В работе [20] представлена принципиально другая конструкция преобразователя давления, в которой полукремниевый тензорезистор расположен внутри вакуумной полости на балке (рис. 6). В основе действия преобразователя лежит эффект рычага. Балка прикреплена одним концом к мембране, другим к подложке. Деформация мембраны



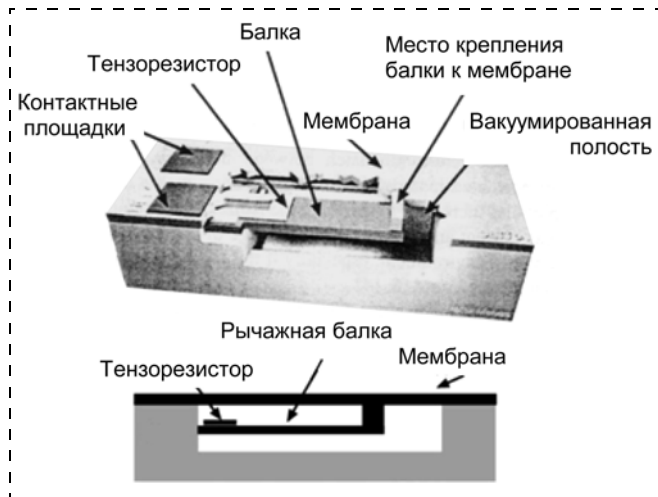


Рис. 6. Конструкция преобразователя давления с рычажной балкой [20]

приводит к возникновению механических напряжений в балке и изменению сопротивления тензорезистора.

Преобразователь был изготовлен с использованием методов поверхностной микрообработки. Мембрана имеет размеры  $100 \times 100 \times 2$  мкм, толщина балки 1 мкм. Оптимизация геометрических параметров структуры для достижения максимальной чувствительности была проведена с помощью конечно-элементного моделирования. Для мостовой схемы с одним активным плечом измеренная чувствительность составила  $0,68 \text{ мВ} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ , что на 50 % выше, чем чувствительность  $0,46 \text{ мВ} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$  для ранее изготовленных миниатюрных преобразователей давления при масштабировании относительно толщины мембраны. Измеренная чувствительность находится в хорошем согласии с расчетной чувствительностью  $0,76 \text{ мВ} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ .

В работе [21] конструкция преобразователя с рычажной балкой дополнена элементом пассивной температурной компенсации (рис. 7). В вакуумной полости параллельно активной балке сформирована

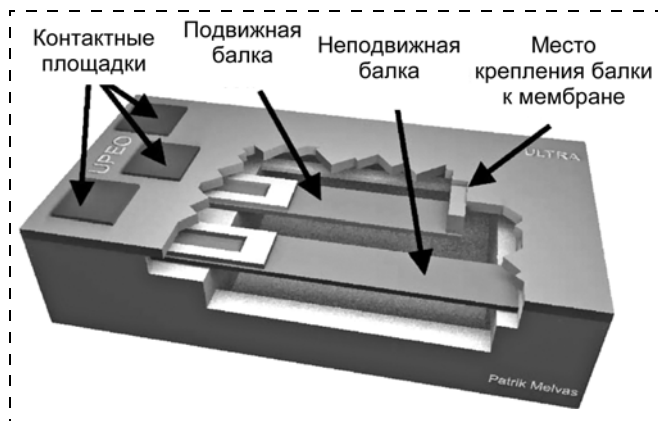


Рис. 7. Преобразователь давления с рычажной балкой и температурной компенсацией [21]

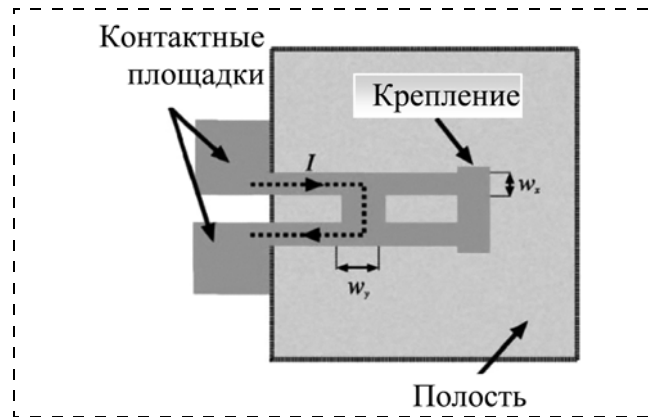


Рис. 8. Схема тензорезистора, интегрированного в балку [22]

неподвижная балка, жестко закрепленная обоими концами. На неподвижной балке размещен резистор такой же топологии, что и активный. За счет одинаковой конструкции достигаются одинаковые условия рассеяния теплоты. Чувствительность преобразователя осталась на прежнем уровне —  $0,61 \text{ мВ} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ . Температурные коэффициенты сопротивления активного и пассивного тензорезисторов составили 960 и 930 ppm/°C соответственно. Разница между температурными коэффициентами сопротивления активного и пассивного тензорезисторов ( $30 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ) в 2 раза ниже, чем у преобразователей традиционной конструкции, в которой пассивный тензорезистор расположен на подложке [16].

В работе [22] предлагается интегрировать тензорезистор в саму балку путем ее легирования и использования диэлектрической прослойки в месте приклепления балки к мембране (рис. 8). Таким образом, балка сама становится тензорезистором. Путем выбора соотношения ширины продольных и поперечных частей балки можно использовать в качестве чувствительного элемента участок, испытывающий максимальное механическое напряжение. Мембрана преобразователя имеет размеры  $100 \times 100 \times 2$  мкм, балка-тензорезистор —  $80 \times 40 \times 0,4$  мкм (рис. 9). Измерение характеристик преобразователя проводилось в составе мостовой схемы с одним активным плечом, чувствительность преобразователя составила около  $3,8 \text{ мВ} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ , что в 5–8 раз превышает чувствительность рассмотренных выше конструкций.

В России миниатюрный тензорезистивный преобразователь давления был впервые разработан в НПК "Технологический центр" МИЭТ в 1999 г. [23, 24] (рис. 10). Преобразователь имеет квадратную поликремниевую мембрану толщиной 1 мкм и с размерами от  $50 \times 50$  до  $100 \times 100$  мкм с двумя расположенными на ней поликремниевыми тензорезисторами. Тензорезисторы соединены по мостовой схеме с двумя поликремниевыми резисторами, расположенными на подложке. Анероидная коробка преобразователя имеет высоту 2 мкм. Чувствитель-

ность преобразователя с размером мембраны  $100 \times 100$  мкм составила  $4,0 \text{ мВ} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ , нелинейность 5 % в диапазоне давления 0...2 атм. На рис. 11 приведена микрофотография изготовленного преобразователя.

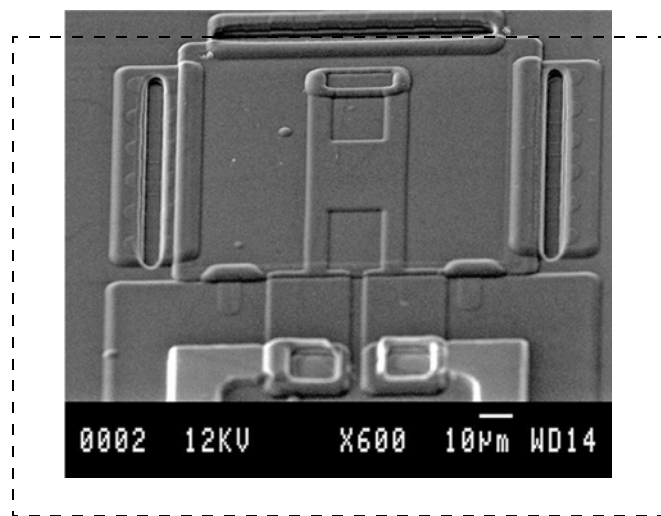


Рис. 9. Преобразователь с балкой-тензорезистором [22]

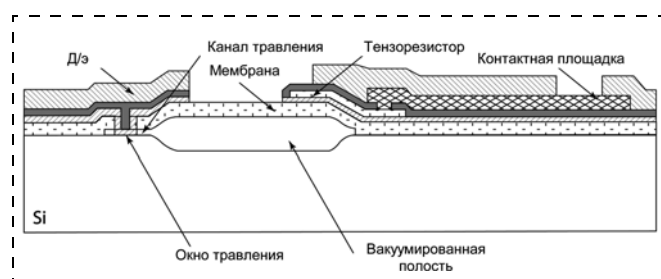


Рис. 10. Структура миниатюрного преобразователя, изготовленного в НПК "Технологический центр" МИЭТ [23, 24]

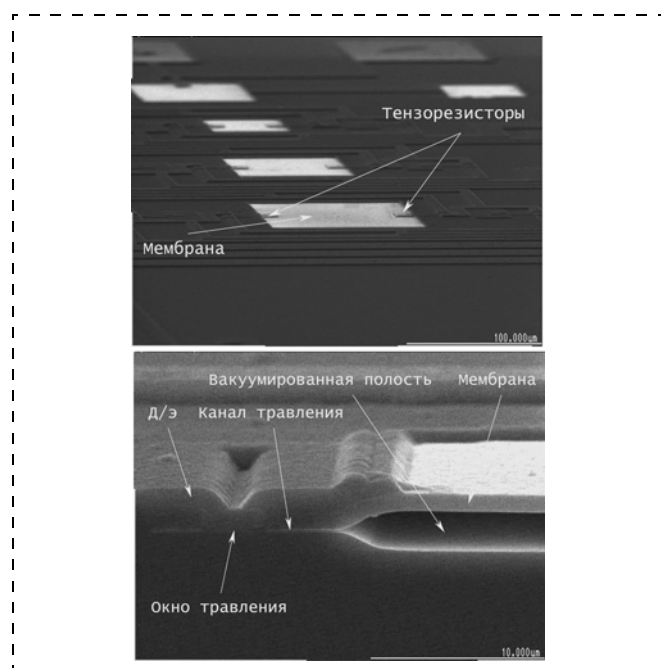


Рис. 11. Преобразователь с квадратной мембраной и фрагмент скола

Технология изготовления преобразователя использует процессы стандартной КМОП-технологии. Жертвенный слой формируется с помощью LOCOS-процесса для уменьшения рельефа структуры преобразователя. Удаление жертвенного слоя проводится с помощью жидкостного травления, окна травления "запечатываются" с помощью осаждения слоя  $\text{SiO}_2$ . После осаждения изолирующего слоя нитрида кремния формируются контактные окна к резисторам и металлизация. В целях увеличения чувствительности преобразователя слой фосфоросиликатного стекла, осажденный для защиты металлизации, селективно удаляют с мембраны.

В 2000 г. в НПК "Технологический центр" МИЭТ был изготовлен 2-й вариант преобразователя — с круглой мембраной. Мембрана имела диаметр 50, 75 и 100 мкм и толщину 1 мкм. Особенностью преобразователя было расположение пассивных тензорезисторов не на подложке, а на такой же мембране, но с незапечатанной анероидной коробкой, т. е. не обладающей чувствительностью к давлению. Тем самым достигались одинаковые температурные условия активных и пассивных тензорезисторов. Измерения образцов преобразователя проводили при температуре  $-40$  °С,  $+20$  °С и  $+80$  °С. Диапазон давления составлял 0...100 кПа.

Параметры описанных выше миниатюрных преобразователей давления сведены в таблицу. Параметры даны в сравнении с параметрами преобразователя ИПД-4, выпускавшегося в НПК "Технологический центр" МИЭТ в 1990—1995 гг. Преобразователь ИПД-4 изготовлен по объемной технологии микрообработки кремния и имеет четыре активных тензорезистора, объединенных в полную мостовую схему [25]. Преобразователь не имеет температурной компенсации.

### Конструктивно-технологические особенности миниатюрных преобразователей давления

Проведенный выше обзор позволяет выделить ряд особенностей миниатюрных преобразователей давления, обусловленных их конструкцией и технологией изготовления.

#### А. Небольшие размеры преобразователей.

Как уже указывалось выше, использование процесса осаждения, а не травления для формирования мембраны позволяет с высокой воспроизводимостью получать мембраны толщиной 1 мкм и менее. Уменьшение толщины мембраны дает возможность уменьшить ее планарные размеры. В качестве фактора масштабирования берутся значения механических напряжений в выбранной точке мембраны. Например, значение механических напряжений на

Сводная таблица характеристик миниатюрных преобразователей давления

№ п/п	Параметр	[13]	[7]	[14]	[16]	[17, 18]	[21]	[22]	[23, 24] (НПК ТЦ)	[25] (ИПД-4 НПК ТЦ)
1	Разброс начального выходного сигнала при +20 °С, мВ	<10 мВ/В	—	0...55	—	−400...+100	—	—	−50...+50	−5...+5
2	Температурный коэффициент нулевого выходного сигнала, %/10 °С	0,6	—	—	1,2	—	—	—	0,4...2,3	<0,1
3	Чувствительность при +20 °С, мВ · В <sup>−1</sup> · атм <sup>−1</sup>	0,46...5,5	2,0	11,6	1,5	0,76...6,8	0,61	3,8	2,8...2,9	11,9...16,6
4	Температурный коэффициент чувствительности, %/10 °С	−0,98	−2,6	—	—	—	—	—	−1,7...−2,4	−1,8...−2,5
5	Коэффициент нелинейности, %	0,3...2,2	<1,0	0,7...1,0	—	0,5...1,0	—	—	0,9...1,1	<0,15

краю круглой мембраны имеет следующую зависимость от ее геометрических параметров:

$$\sigma \approx \left(\frac{a}{h}\right)^2,$$

где  $a$  — радиус мембраны;  $h$  — толщина мембраны.

Таким образом, чтобы сохранить механическую чувствительность при уменьшении толщины мембраны в  $k$  раз, необходимо также уменьшить ее радиус в  $k$  раз. Как результат, характерный планарный размер мембраны миниатюрного преобразователя составляет 80...120 мкм, что позволяет достигать очень маленькой площади кристалла преобразователя [14, 16]. Фактически, площадь кристалла миниатюрного преобразователя давления определяется не площадью мембраны, как у традиционных преобразователей, а площадью контактных площадок.

#### Б. Конструктивная гибкость.

Разнообразие конструкций миниатюрных преобразователей давления является следствием использования процессов осаждения для формирования основных элементов структуры. Такой подход позволяет формировать активные и пассивные элементы структуры независимо друг от друга. В рассмотренных конструкциях тензорезисторы формируются на верхней поверхности мембраны [16, 23], на нижней поверхности мембраны [7, 14], на балке внутри анероидной коробки [21] и в объеме балки внутри анероидной коробки [22]. При этом используются одни и те же стандартные процессы КМОП-технологии уровня 3 мкм. Конструктивная гибкость миниатюрных преобразователей давления дает разработчику больше возможностей для создания прибора, удовлетворяющего требованиям конкретного применения. Например, преобразователь для медицинских применений должен иметь хорошую защиту чувствительных элементов от воздействия внешней среды, т. е. в таком преобразователе предпочтительно иметь тензорези-

сторы, размещенные на нижней поверхности мембраны или внутри анероидной коробки [21, 22].

#### В. Встроенная защита от перегрузки.

Наличие встроенной защиты от перегрузки является несомненным достоинством миниатюрных преобразователей. Конструкция преобразователя позволяет легко задавать значение избыточного давления, при котором мембрана касается дна анероидной коробки, путем изменения толщины жертвенного слоя. Мембрана, имеющая дополнительную опору в центральной части, способна выдерживать существенно большие перегрузки, чем мембрана, закрепленная только по краям [13].

#### Г. Расширенный температурный диапазон.

Конструкция миниатюрного преобразователя давления не имеет  $p$ – $n$ -переходов и других элементов, свойства которых нелинейно зависят от температуры, что расширяет температурный диапазон преобразователя. По аналогии с преобразователями давления на КНИ-пластине можно оценить верхнюю границу рабочего температурного диапазона миниатюрных преобразователей давления в 300...350 °С [26].

#### Д. Продолжительный технологический процесс.

Оценка продолжительности изготовления любого из приведенных выше миниатюрных преобразователей показывает, что технологический маршрут должен включать следующие этапы:

- формирование жертвенного слоя;
- формирование каналов травления;
- формирование окон травления;
- формирование тензорезисторов;
- формирование контактных окон к тензорезисторам;
- формирование металлизации;
- формирование защитного слоя.

Каждый из этапов включает по меньшей мере один процесс осаждения, одну операцию фотолитографии и один процесс травления. Формирование тензорезисторов требует две операции фотолитографии — для легирования активной части тензорезистора и травления поликремния. Кроме того,

обычно требуются дополнительные операции фотолитографии и травления для удаления слоев осажденного диэлектрика с мембраны и в некоторых случаях для формирования выступов на нижней поверхности мембраны. Оценка числа фотолитографий, необходимых для формирования структуры миниатюрного преобразователя давления, дает 10—11. Это на 4—5 фотолитографий больше, чем у традиционного преобразователя типа ИПД-4. Таким образом, технологический процесс изготовления миниатюрных преобразователей приблизительно в 1,5 раза длиннее, чем традиционного. Хотя небольшие размеры миниатюрных преобразователей давления должны обеспечить более низкую стоимость изготовления одного кристалла, этот фактор также необходимо принимать во внимание при разработке изделия на основе миниатюрных преобразователей.

### **Метрологические характеристики миниатюрных преобразователей давления**

Имеющиеся данные по метрологическим характеристикам миниатюрных преобразователей давления отражены в таблице. Как можно видеть из таблицы, основные параметры миниатюрных преобразователей существенно хуже, чем у традиционных преобразователей. Будет обоснованным предположить, что более низкие параметры непосредственно связаны с меньшими размерами преобразователей и вытекающими из этого конструктивными и технологическими ограничениями. Интерес представляет связь параметров преобразователя с конкретными элементами структуры или процессами формирования. Ниже кратко рассмотрены параметры миниатюрных преобразователей давления и факторы, оказывающие влияние на их значение.

#### *1. Начальный выходной сигнал.*

Начальный выходной сигнал у преобразователей с мостовой схемой определяется разностью сопротивления тензорезисторов. На значение сопротивления основное влияние оказывают флуктуации технологических процессов, используемых для их формирования — фотолитографии, травления, легирования и др. В традиционных преобразователях характерное соотношение длины и ширины тензорезисторов составляет 100 : 10. Для миниатюрных преобразователей данное соотношение составляет 30 : 3. При одинаковом номинале тензорезисторов отклонение любого технологического процесса, используемого для их формирования, в 3 раза сильнее влияет на сопротивление тензорезистора с меньшей шириной. В результате разброс начального выходного сигнала преобразователя с мостовой схемой возрастает. Это подтверждается данными таблицы, из которой видно, что разброс начального выходного сигнала у миниатюрных

преобразователей на порядок хуже, чем у традиционных.

#### *2. Температурный коэффициент начального выходного сигнала.*

Данный параметр определяется изменением сопротивления тензорезисторов от температуры, и у миниатюрных преобразователей он также на порядок хуже, чем у традиционных (см. таблицу) Коэффициент температурной чувствительности начального выходного сигнала в общем случае зависит от разницы в конструкции активных и пассивных тензорезисторов, в частности, от условий температурного расширения [27].

В большинстве рассмотренных конструкций на мембране размещены только активные тензорезисторы, пассивные тензорезисторы расположены на других элементах структуры. Разница в температурных условиях приводит к тому, что при изменении температуры активные и пассивные тензорезисторы испытывают разные механические напряжения, что приводит к разным значениям изменения сопротивления и, соответственно, к дрейфу начального выходного сигнала при отсутствии нагрузки. На данный параметр также могут оказывать влияние рассовмещение тензорезисторов относительно мембраны и соотношение размера тензорезисторов и мембраны.

#### *3. Чувствительность преобразователя.*

Более низкая чувствительность миниатюрных преобразователей объясняется использованием в качестве материала тензорезисторов легированного бором поликремния, получаемого с помощью высокотемпературного осаждения, а также отсутствием у поликремния анизотропии тензорезистивного эффекта. Вследствие мелкокристаллического строения коэффициент тензочувствительности пленок поликремния в 2—3 раза ниже, чем у монокристаллического кремния и составляет 30—45 [28].

При использовании аналогичной конфигурации мостовой схемы и одинаковом напряжении питания миниатюрный преобразователь давления имеет чувствительность в 2—2,5 раза ниже, чем традиционный. Кроме того, мостовая схема, используемая в большинстве конструкций миниатюрных преобразователей, имеет только один или два активных тензорезистора, что дополнительно уменьшает выходной сигнал преобразователя в 1,5—2 раза. Как результат, разница в чувствительности миниатюрного и традиционного преобразователей давления может достигать 10 раз (см. таблицу).

#### *4. Температурный коэффициент чувствительности.*

Как можно видеть из таблицы, значения температурного коэффициента чувствительности миниатюрных и традиционных преобразователей близки друг к другу. Температурный коэффициент чувствительности преобразователя определяется зависимостью коэффициента тензочувствительности от температуры и зависит от типа и concentra-

ции примеси. В преобразователях обоих типов для получения максимальной тензочувствительности используется бор, концентрация которого находится в диапазоне  $(5...8)10^{18} \text{ см}^{-3}$  [23, 24]. Использование одного типа примеси приводит к близким значениям температурного коэффициента чувствительности преобразователей.

#### 5. Нелинейность преобразователя.

Нелинейность выходной характеристики преобразователя давления в общем случае определяется значением максимальной деформации мембраны в заданном диапазоне давления. В соответствии с критерием Кирхгофа, если максимальное смещение мембраны не превышает 0,2 от ее толщины, то можно считать, что мембрана находится в области малых смещений, и значение смещения и механических напряжений в каждой точке мембраны линейно зависит от приложенного давления [29]. Таким образом, преобразователь давления будет иметь низкую нелинейность, если максимальное смещение мембраны в заданном диапазоне давления не превышает 0,2 от ее толщины и размеры тензорезисторов настолько меньше размеров мембраны, что их можно рассматривать как точечные. Первое требование легко выполнить как для традиционных, так и для миниатюрных преобразователей давления путем подбора толщины мембраны. Второе требование вступает в противоречие с конструктивными ограничениями миниатюрных преобразователей. Для удовлетворения этого требования уменьшение размеров мембраны должно сопровождаться пропорциональным уменьшением размеров тензорезисторов, однако это трудно выполнимо ввиду необходимости достижения заданного номинала тензорезисторов и обеспечения его воспроизводимости. Как результат, соотношение длины тензорезистора и стороны мембраны в миниатюрных преобразователях давления составляет  $1 : 4 - 1 : 6$ . В традиционных преобразователях давления данное соотношение составляет  $1 : 15 - 1 : 20$ . Таким образом, тензорезисторы в миниатюрных преобразователях давления необходимо рассматривать как распределенные, а не точечные чувствительные элементы. Кроме того, толщина тензорезисторов в миниатюрных преобразователях давления сравнима с толщиной мембраны. Совокупность этих факторов приводит к тому, что тензорезисторы существенно изменяют геометрию мембраны и влияют на ее деформацию, что вносит нелинейность в зависимость сопротивления тензорезисторов от давления.

В рассмотренных выше работах [14, 17, 18] также отмечается, что одной из причин высокой нелинейности миниатюрных преобразователей могут выступать условия закрепления мембраны. На рис. 12 приведена схема закрепления мембраны в традиционном и миниатюрном преобразователях. Как можно видеть, вследствие особенностей технологии изготовления миниатюрных преобразователей

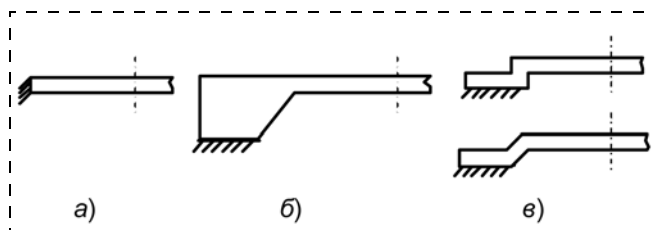


Рис. 12. Схемы закрепления мембраны в преобразователях давления

на краю мембраны формируется "ступенька", которая приводит к разнесению по высоте мембраны и места ее жесткого закрепления. Деформация мембраны со ступенчатым краем имеет более сложный характер, что отражается на нелинейности миниатюрного преобразователя. Из таблицы видно, что нелинейность миниатюрных преобразователей в несколько раз выше нелинейности традиционных преобразователей.

#### Применение миниатюрных преобразователей давления

Примеры законченных функциональных устройств, реализованных на основе миниатюрных преобразователей давления, немногочисленны. В основном, эти устройства имеют исследовательское назначение. В качестве наиболее яркого примера использования достоинств миниатюрного преобразователя давления и создания на его основе коммерческого продукта можно привести прибор для измерения кровяного давления в кровеносных сосудах в процессе ангиопластики [8].

Прибор разработан на основе миниатюрного преобразователя, описанного в работе [16]. Схема прибора приведена на рис. 13. Прибор состоит из катетера с миниатюрным преобразователем давления и блока электроники, осуществляющего обработку сигнала с преобразователя и отображение значения давления. Кристалл миниатюрного преобразователя вмонтирован в головку катетера на расстоянии 3 см от платинового наконечника и покрыт защитным биосовместимым слоем. Катетер соединен с обрабатывающим блоком кабелем длиной 1,8 м и диаметром 0,5 мм. Блок электроники осуществляет температурную компенсацию и усиление сигнала.

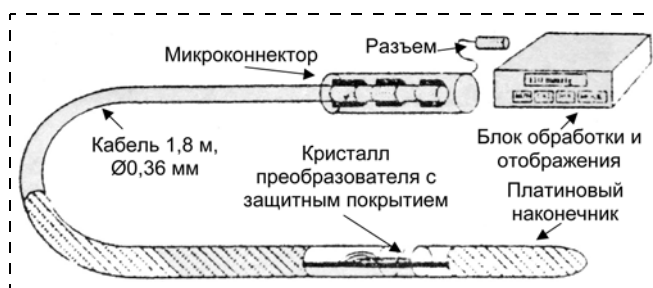


Рис. 13. Схема прибора для измерения давления крови [16]



Рис. 14. Прибор Radi Pressure Wire™ и миниатюрный преобразователь давления в полости катетера [8]

Как указывалось выше, чувствительность преобразователя, составила  $1,5 \text{ мВ} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ , что достаточно для достижения требуемой точности в 0,0026 атм (2 мм рт. ст.). После калибровки преобразователя с помощью электронной схемы дрейф нулевого значения выходного сигнала не превысил 0,00066 атм (0,5 мм рт. ст.) в час. На рис. 14 приведена фотография катетера.

В настоящее время компания Radi Medical Systems (Швеция) выпускает третью модификацию прибора Radi PressureWire™ на основе миниатюрного преобразователя давления [8]. На рис. 14 приведена фотография прибора и преобразователя в полости катетера. Выпускается также модификация прибора PressureWire™ Aeris, в котором используется беспроводная передача информации.

Компанией Тойота на основе разработанного миниатюрного преобразователя давления [7] был изготовлен тактильный датчик, включающий матрицу преобразователей размером  $32 \times 32$  элемента и интегрированную КМОП-схему обработки [6, 7]. Фотография кристалла датчика приведена на рис. 15. Площадь ячейки датчика составила  $250 \times 250 \text{ мкм}$ . В каждой ячейке находится преобразователь дав-

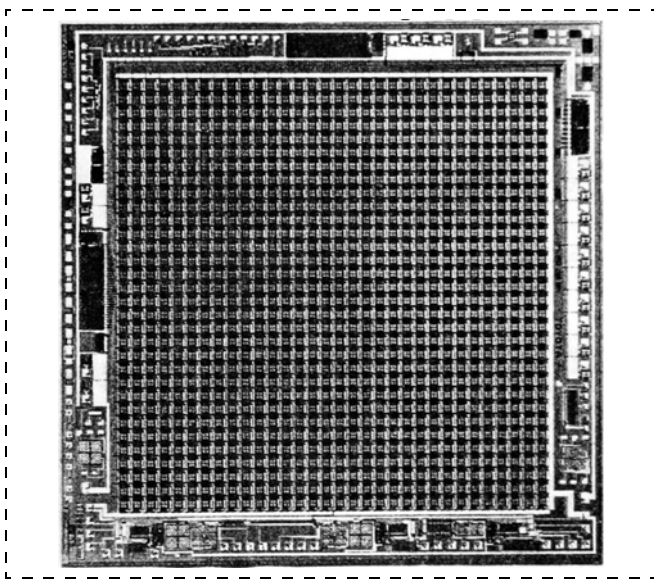


Рис. 15. Кристалл тактильного датчика компании Тойота [6, 7]

ления с площадью мембраны  $100 \times 100 \text{ мкм}$  и триггер для подключения питания мостовой схемы. Кристалл датчика имеет площадь  $10 \times 10 \text{ мм}$ . Интегрированная схема обработки изготавливается по 3-микрометровой КМОП-технологии и содержит около 16 000 транзисторов. Потребляемая мощность датчика при напряжении питания 5 В достигает 50 мВт.

В работе [9] преобразователь, разработанный в Университете Калифорнии, США [19], используется для

измерения касательных напряжений на передней кромке крыла беспилотного летающего аппарата (БПЛА) дельта-формы. Структура отдельного миниатюрного преобразователя приведена на рис. 16, а. Преобразователь имеет мембрану из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с низким уровнем встроенных напряжений толщиной 1,8 мкм, на которой расположен тензорезистор, сформированный из поликремния толщиной 0,4 мкм с концентрацией бора  $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Технология изготовления матрицы преобразователей (рис. 16, б) включает следующие основные этапы:

- формирование полной структуры матрицы на кремниевой пластине;
- нанесение полиимидной пленки на лицевую поверхность пластины, вскрытие преобразователей и утонение пластины с обратной стороны;
- разделение пластины на островки путем анизотропного плазмохимического травления (АПХТ) кремния с обратной стороны пластины с полиимидной пленкой в качестве держателя;
- нанесение полиимидной пленки с обратной стороны пластины и формирование контактных окон;
- вскрытие контактных площадок и формирование шариковых выводов.

Одномерная матрица из 36 преобразователей изготавливается на гибкой печатной плате с использованием технологии сборки на шариковые выводы (рис. 16, б). Матрицу преобразователей крепят на отрезок трубы с радиусом закругления 12,5 мм (рис. 17, а). Закрепленная на цилиндрической поверхности матрица охватывает угол  $180^\circ$  с разрешением  $5^\circ$ . Для проверки работоспособности матрицы на первом этапе были проведены измерения в аэродинамической трубе. Для сбора данных в реальных условиях полета отрезок трубы с матрицей преобразователей был смонтирован на передней кромке крыла дельта-формы с размахом 182 см БПЛА "Грифон" (см. рис. 17, б). Также на БПЛА были смонтированы печатные платы питания матрицы и сбора данных. С помощью матрицы преобразователей были проведены различные полетные эксперименты, в частности, исследовалась зависимость смещения точки срыва воздушного потока от скорости и угла атаки БПЛА. На рис. 18 приведен выходной сигнал и среднее квадратич-

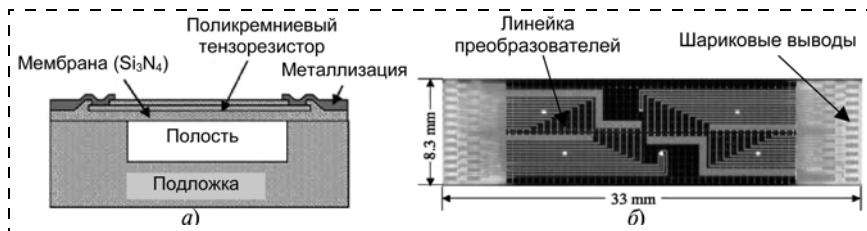


Рис. 16. Структура отдельного преобразователя (а) и матрица преобразователей на гибкой печатной плате (б) [9]

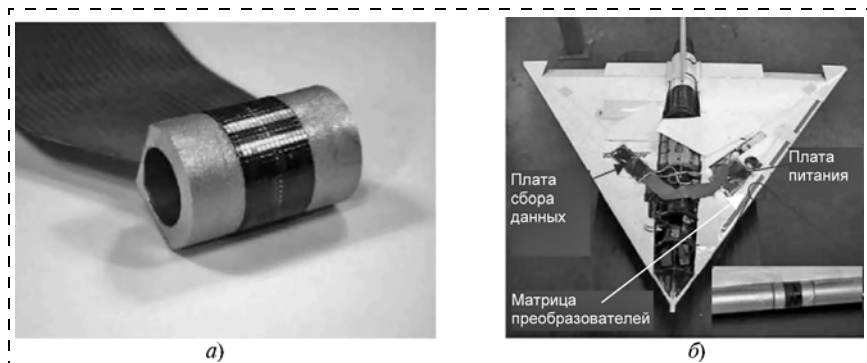


Рис. 17. Матрица преобразователей на носителе (а) и после установки на БПЛА "Грифон" (б) [9]

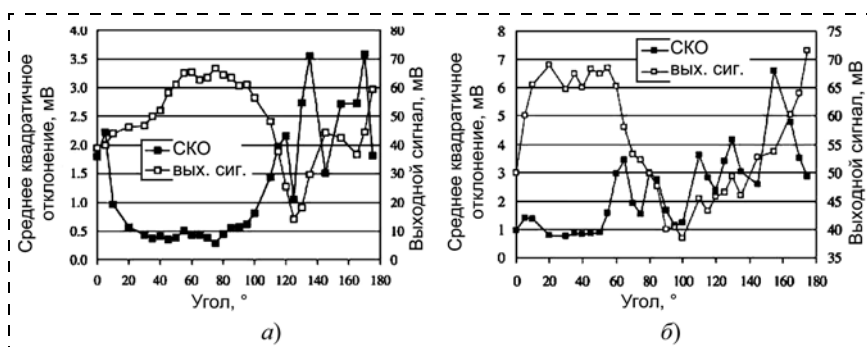


Рис. 18. Смещение точки срыва воздушного потока в зависимости от условий полета БПЛА "Грифон" [9]

ное отклонение сигнала матрицы сенсоров для различных условий полета БПЛА, показывающее смещение точки срыва воздушного потока. Как можно видеть, при изменении режима полета точка срыва воздушного потока смещается со 125 до 100°.

### Перспективы миниатюрных преобразователей давления

Приведенные выше примеры показывают, что миниатюрные преобразователи давления позволяют создавать приборы с уникальными характеристиками и возможностями. Миниатюрность и возможность объединения в матрицы расширяют пределы применения измерительных систем и дают возможность получения данных о протекании сложных процессов в реальном времени. Тем не менее эти достоинства перевешиваются недостатками миниатюрных преобразователей. Среди них — низкая чувствительность, высокие нелинейность и температурные

коэффициенты, продолжительный технологический маршрут.

В поисках преобразователей давления для применений с высокими требованиями к габаритным размерам разработчики возвращаются к традиционным преобразователям. Для удовлетворения требований к габаритным размерам проводится миниатюризация преобразователей путем уменьшения толщины и размеров мембраны. Толщина мембраны в таких преобразователях составляет 1,0...2,5 мкм, мембраны формируют с помощью прецизионного травления кремния. При этом используют усовершенствованные технологические процессы и вновь разработанные технологии.

В работе [30] представлен преобразователь давления для использования в катетерах диаметром 0,33 мм и менее. Исходным материалом для изготовления преобразователя служит КНИ-пластина. Мембрана преобразователя формируется путем глубокого АПХТ кремния с обратной стороны пластины и удаления жертвенного слоя. Тензорезисторы сформированы с помощью ионной имплантации и объединены в полумостовую схему. Кристалл преобразователя имеет габаритные размеры 650 × 230 × 150 мкм, толщина мембраны определяется толщиной рабочего слоя КНИ-пластины и составляет 2,5 мкм. Контактные площадки сформированы из набора слоев Al/Ti/Pt и подготовлены к облужива-

нию. Чувствительность преобразователя составляет 20,5...23,6 мВ · В<sup>-1</sup> · атм<sup>-1</sup>, температурный коэффициент нулевого выходного сигнала 1,1 мВ/10°С, нелинейность 1,5 %, дрейф выходного сигнала не более 0,0013 атм (1 мм рт. ст.) в день. Разделение пластины на кристаллы, число которых на пластине диаметром 100 мм составляет около 20 000 шт., также осуществляется с помощью глубокого АПХТ кремния.

Для создания интегрального преобразователя абсолютного давления компания STmicroelectronics (США) разработала собственную технологию формирования тонкой мембраны из монокристаллического кремния на поверхности стандартной пластины [31]. Технологический процесс называется Vensens. Детали процесса не разглашаются, однако указывается, что процесс позволяет формировать мембрану в стандартной кремниевой подложке над полостью заданной толщины. Давление в полости определяется параметрами технологического процесса. Также на кристалле формируется схема

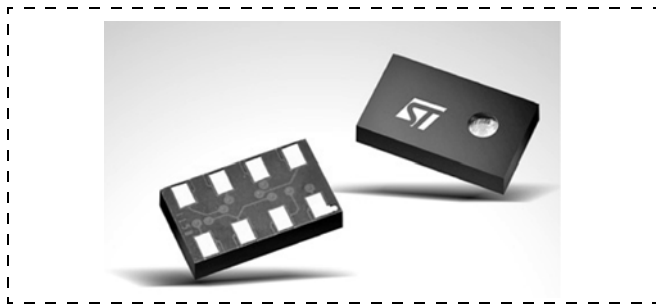


Рис. 19. Датчик LPS001WP компании STmicroelectronics [31]

обработки, осуществляющая подстройку и оцифровку сигнала преобразователя, а также формирование протокола передачи данных. Кристалл смонтирован в низкопрофильный корпус (рис. 19). Диапазон измерения датчика LPS001WP составляет 225...825 мм рт. ст., температурный диапазон —  $-10...+85$  °С. Разрешение датчика составляет 0,05 мм рт. ст., т. е. датчик позволяет измерять разницу давления при перепаде высот 80 см. Датчик предназначен для использования в портативной технике: барометрах, высотомерах, смартфонах и т. д. Цена датчика составляет 2,8 долл. США в партиях от 1000 шт.

Как можно видеть, усовершенствованные технологические процессы позволяют приблизить размеры традиционных преобразователей к размерам миниатюрных. Однако это также приводит к тому, что значения основных параметров становятся близкими к значениям таковых у миниатюрных преобразователей, за исключением высокой чувствительности, обусловленной наличием мембраны из монокристаллического кремния и диффузионных тензорезисторов [30]. Выбор разработчиков в пользу миниатюризации традиционных преобразователей показывает, что в применениях, предъявляющих жесткие требования к габаритным размерам преобразователей, ключевую роль после размеров играет чувствительность. Сочетание небольших размеров и высокой чувствительности обеспечивает создание высокофункциональных измерительных устройств для выполнения сложных задач.

Приведенный выше анализ конструктивно-технологических особенностей миниатюрных преобразователей давления показывает, что эти преобразователи также имеют возможности для достижения высокой чувствительности. Для этого тензорезисторы должны быть сформированы из материала с высоким коэффициентом тензочувствительности. В качестве такого материала может выступать монокристаллический кремний или материал, получаемый с помощью нанотехнологии. С использованием этих материалов можно сформировать тензорезисторы на начальной стадии технологического маршрута, после чего продолжить формирование мембраны и других элементов структуры. Таким способом могут быть изготовле-

ны миниатюрные преобразователи давления с высокой чувствительностью.

В связи со сказанным выше представляется, что перспективные разработки в области миниатюрных преобразователей давления должны быть связаны с применением монокристаллического кремния в качестве материала тензорезисторов. Преобразователь, обладающий не только конструктивной и технологической гибкостью, возможностью легкого масштабирования, расширенным температурным диапазоном, но и высокой чувствительностью, характерной для традиционных преобразователей, несомненно будет привлекательным средством измерения и в перспективе может стать неотъемлемым компонентом для создания измерительных систем с жесткими требованиями к габаритным размерам.

### Заключение

Миниатюрные преобразователи давления появились в середине 1980-х годов как альтернатива традиционным преобразователям давления. Ключевое отличие миниатюрных преобразователей давления от традиционных — формирование мембраны с помощью осаждения, что позволяет с высокой воспроизводимостью формировать мембраны толщиной 1,0 мкм и менее и изготавливать кристаллы преобразователя с характерными габаритными размерами менее 1 мм. Миниатюрные преобразователи давления имеют высокую конструктивную и технологическую гибкость, расширенный температурный диапазон. К недостаткам миниатюрных преобразователей давления относят недостаточно высокие метрологические характеристики — чувствительность, нелинейность и температурный коэффициент начального сигнала у них примерно на порядок хуже, чем у традиционных (см. таблицу). Также технологический маршрут изготовления миниатюрных преобразователей давления в 1,5 раза более продолжителен, чем традиционных.

На основе миниатюрных преобразователей давления создан ряд интересных измерительных систем, использующих преимущество малых габаритных размеров [6—9]. В качестве примера успешного коммерческого продукта можно привести прибор для измерения кровяного давления в кровеносных сосудах в процессе ангиопластики, выпускаемый компанией *Radi Medical Systems* (Швеция) [8]. Прибор состоит из катетера с миниатюрным преобразователем давления и блока электроники, осуществляющего обработку и отображение информации.

Миниатюрные преобразователи давления позволяют создавать приборы с уникальными характеристиками и возможностями. Достоинства преобразователей во многом перевешиваются их недостатками, главный из которых — низкая чувст-



вительность, обусловленная использованием в качестве материала тензорезисторов поликристаллического кремния, который имеет невысокий коэффициент тензочувствительности и не обладает анизотропией тензоэффекта. Перспективы миниатюрных преобразователей давления во многом связаны с увеличением чувствительности до значений чувствительности традиционных преобразователей давления — около  $15 \text{ мВ} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ .

#### Список литературы

1. Cote G. L., Lee R. M., Pishko M. V. Emerging Biomedical Sensing Technologies and Their Applications // IEEE Sensors Journal. June 2003. Vol. 3. P. 251–266.
2. Lekkala J. Wireless biomedical sensing: challenges and opportunities // Biomedical sensors. Foresight Workshop IV. June 2006, Tampere, Finland.
3. Saliterman S. Fundamentals of BioMEMS and Medical Microdevices. Bellingham, WA: SPT Press, 2006.
4. Годовицын И. В., Парменов Ю. А. Матричные тактильные датчики: применение и технологии // Зарубежная электронная техника. 1996. № 3. С. 109–126.
5. Такао Н., Sawada K., Ishida M. Multifunctional Smart Tactile-Image Sensor with Integrated Arrays of Strain and Temperature Sensors on Single Air-Pressurized Silicon Diaphragm // Dig. Tech. Papers of Transducers'05. P. 45–48.
6. Sugiyama S., Kawahata K., Abe M., Funabashi H., Igarashi I. High-resolution silicon pressure imager with CMOS processing circuits // Proc. of Transducer'87. 1987. P. 444–447.
7. Esashi M., Sugiyama S., Ikeda K., Wang Y., Miyashita H. Vacuum-Sealed Silicon Micromachined Pressure Sensors // Proc. of the IEEE. 1998. 86. P. 1627–1639.
8. <http://www.mate.tue.nl/mate/showabstract.php/10613>
9. Xn Y., Jiang F., Newbern S., Huang A., Ho C.-M., Tai Y.-C. Flexible shear-stress sensor skin and its application to unmanned aerial vehicles // Sensors and Actuators A105 (2003). P. 321–329.
10. French P. J., Sarro P. M. Surface versus bulk micromachining: the contest for suitable applications // J. Micromech. Icroeng. 1998. 8. P. 45–53.
11. Guckel H., Burns D. W., Rutigliano C. R., Showers P. K., Uglow J. Fine grained polysilicon and its applications to planar pressure transducers // Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '87), Tokyo. P. 277–282.
12. Chau K. H.-L., Fung C. D., Harris P. R., Panagou J. G. Over-range behavior of sealed-cavity polysilicon pressure sensors // Sensors and Actuators. 1991. A28. P. 147–152.
13. Chau K. H.-L., Fung C. D., Harris P. R., Dahrooge G. A. A versatile polysilicon diaphragm pressure sensor chip // Proc. IEDM. 1991. P. 761–764.
14. Lisek T., Stauch H., Wagner B. Surface-Micromachined piezoresistive pressure sensors // Sensors Kongress-Band. 1995. P. 21–25.
15. Kalvesten E., Lennart L., Stemme G. A small-size silicon microphone for measurements in turbulent gas flows // Sensors and Actuators. 1994. A45. P. 103–108.
16. Kalvesten E., Smith L., Tenerz L., Stemme G. The first surface micromachined pressure sensors for cardiovascular pressure measurements // IEEE. 1998. P. 574–579.
17. Eaton W. P., Smith J. H. Characterization of a surface micromachined pressure sensor array // Proc. Of SPIE Micromachining and Microfabrication Symposium. Austin, TX. 1995. Vol. 2642. P. 256–264.
18. Eaton W. P., Smith J. H. Planar surface-micromachined pressure sensor with a sub-surface, embedded reference pressure cavity // Proc. Of SPIE Micromachined Devices and Components, Austin. 1996. TX. Vol. 2882.
19. Xu Y., Jiang F., Tai Y.-C., Donzier E., Loomis W., Liberman A. A Surface Micromachined Nitride-Diaphragm High-Pressure Sensor for Oil Well Application // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, Florida. 2000. P. 425–429.
20. Melvas P., Kalvesten E., Stemme G. Media protected surface micromachined leverage beam pressure sensor // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2001. September. P. 617–622.
21. Melvas P., Kalvesten E., Stemme G. A miniaturized leverage beam pressure sensors with passive temperature compensation // MME. September 2001. P. 163–166.
22. Melvas P., Kalvesten E., Enoksson P., Stemme G. Miniaturized pressure sensor using a free hanging strain-gauge with leverage effect for increased sensitivity // Proc. Transducers. 2001. June. P. 494–497.
23. Годовицын И. В., Зимин В. Н. Сверхминиатюрный интегральный преобразователь давления пьезорезистивного типа // Сенсоры и микросистемы. 2000. 59 с.
24. Годовицын И. В., Зимин В. Н., Петров А. Ю., Шелепин Н. А. Сверхминиатюрный преобразователь давления для специальных применений // Микросистемная техника. 2001. № 7. С. 3–5.
25. Зимин В. Н., Данилова Н. Л., Панков В. В., Шабра-тов Д. В. Базовые конструкции интегральных тензопреобразователей на ряд давлений от 0,01 до 40 МПа // Датчики и системы. 1999. № 2. С. 52–55.
26. Von Berg J., Sonderegger C., Bollhalder S., Cavalloni C. Piezoresistive SOI-Pressure Sensor for High Pressure and High Temperature Applications // Sensor. 2005. Vol. I. P. 33–38.
27. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.
28. French P. J. Polysilicon: a versatile material for Microsystems // Sensors and Actuators. 2002. A99. P. 3–12.
29. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Теория пластин и оболочек. М.: Наука, 1966.
30. Gowrishetty U., Walsh K., Aebersold J., Roussel T., Millar H., Jackson D. Development of Ultra-Miniature Pressure Sensors for 1-French Biomedical Applications and Beyond // Sensor Letters. June 2008. Vol. 6, N 3. P. 433–440.
31. <http://www.st.com/internet/analog/product/251247.jsp>

**А. В. Войцеховский**<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
**С. Н. Несмелов**<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,  
**Н. А. Кульчицкий**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.,  
**А. А. Мельников**<sup>2</sup>, физ.-мат. наук, проф.,

<sup>1</sup> Томский государственный университет,  
 г. Томск, e-mail vav@elefot.tsu.ru,

<sup>2</sup> Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), г. Москва, e-mail n.kulchitsky@gmail.com, a.melnikov@mirea.ru

## МЭМС-ДЕТЕКТОРЫ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

*Поступила в редакцию 19.01.2011*

*Рассмотрены особенности технологии создания микроэлектромеханических систем на основе неохлаждаемых тепловых детекторов инфракрасного диапазона, а также параметры дискретных и матричных детекторов данного типа. Особое внимание уделяется новому типу тепловых детекторов — микроантислеверам с электрическим и оптическим считыванием.*

**Ключевые слова:** микроэлектромеханические системы, инфракрасные детекторы, микроболометры, микроантислеверы

### Введение

В настоящее время рынок микроэлектромеханических систем (МЭМС) является наиболее быстро развивающейся частью полупроводниковой отрасли. Движимый МЭМС-технологиями сектор оптоэлектроники, сенсоров и дискретных компонентов по темпам роста опережает сектор интегральных схем. Среднегодовой рост сектора в течение ближайших 5 лет составит 15 %. По прогнозам к 2012 г. рынок сектора оптоэлектроники, сенсоров и дискретных компонентов достигнет отметки 66,3 млрд долл. США, что составит 15 % от всего рынка полупроводников. Рынок МЭМС-приборов начал формироваться в 70-е годы прошлого века с освоением массового производства первых интегральных электромеханических приборов — датчиков давления. Эти приборы проложили дорогу технологии формирования тонкопленочных мембранных структур с высоким выходом годных и низкой стоимостью, которая также с успехом применялась в производстве различных преобразователей для автомобильных систем. В начале 1980-х годов появились МЭМС-расходомеры и акселерометры. В конце десятилетия была предложена технология поверхностной микромеханической обработки. Первые изделия, изготовленные по этой технологии, также были предназначены для автомобильных устройств (акселерометры для подушек безопасности и адаптивные системы подвески). Тогда же началась разработка микроактуа-

торов. В 1990-е годы появились микроэлектромеханические гироскопы, микронзонды, микровентиляторы, головки струйных принтеров, элементы проекционных дисплеев, газовые хроматографические системы, устройства считывания накопителей большой емкости.

По определению микроэлектромеханические системы должны иметь дело с механическими откликами на электрические воздействия или, напротив, с электрическими откликами на механическую деформацию, однако в действительности их возможности гораздо шире [1]. Современные МЭМС представляют собой сформированные на единой подложке датчики, актуаторы (исполнительные устройства), схемы управления с размерами элементов от нескольких сотен до нескольких единиц микрометров. Важно отметить, что при таком масштабе законы классической механики не всегда применимы. Поскольку отношение поверхности к объему для МЭМС на порядки больше, чем для макроскопических механических устройств, особое значение приобретают поверхностные эффекты, связанные с трением, электростатическими взаимодействиями и смачиваемостью. В отличие от интегральных микросхем МЭМС, как правило, имеют трехмерную структуру. Для их изготовления используют технологические операции, полностью или частично позаимствованные у микроэлектроники: окисление, фотолитографию, травление, легирование, металлизацию, создание контактов, резку. Разработаны и специальные технологические операции, например химическое анизотропное травление (как правило, сухое), позволяющее формировать структуры в гальванически выращенных толстых металлических слоях. Освоены процессы селективного травления в зависимости от концентрации примеси, метод анодной сварки или плавления для соединения пластин кремния. Важнейшими технологическими операциями в процессе создания как интегральных схем, так и МЭМС являются литография и травление. Но при изготовлении интегральных схем основная задача — смещение разрешения процесса литографии все дальше в субмикрометровую область, тогда как при создании МЭМС внимание акцентируется на достижении большей глубины трехмерного рельефа топографического рисунка. Основным материалом для микромеханических приборов служит кремний. Это объясняется наличием на рынке кремниевых пластин высокой степени чистоты и кристаллографического совершенства, а также легким совмещением выполненных на кремнии МЭМС с электронными устройствами управления и обработки данных. Кроме того, монокристаллический кремний известен своими превосходными механическими характеристиками.

В данной работе рассмотрены некоторые достижения последних лет, связанные с разработкой МЭМС-детекторов инфракрасного диапазона.

## МЭМС-микроболометры

В настоящее время технология неохлаждаемых инфракрасных болометров стала доминирующей технологией в большинстве коммерческих и военных систем формирования инфракрасного изображения [2]. К наиболее распространенным применениям болометров можно отнести термографию, ночное видение (военное, коммерческое и автомобильное [3]), разведку, наблюдение, противопожарные системы, медицину, контроль технологических процессов. На рис. 1 показан типичный единичный элемент (пиксель) инфракрасного болометра и двумерная болометрическая матрица фокальной плоскости (FPA). В болометрах поглощается падающее излучение, что вызывает увеличение температуры термически изолированной болометрической мембраны. Для болометров увеличение температуры объекта на 1 К обычно приводит к увеличению температуры мембраны болометра примерно на 4 мК. Резистивные болометры являются тепловыми детекторами, в которых для регистрации инфракрасного излучения используется изменение сопротивления вследствие изменения температуры.

Некоторые наиболее важные особенности разработки болометра заключаются в малой теплопроводности между болометром и подложкой, хорошем поглощении инфракрасного излучения, включая большую площадь поглощающего слоя, использовании чувствительного к температуре материала с высоким температурным коэффициентом сопротивления, низких значениях шумов типа  $1/f$  и достаточно малой тепловой постоянной времени. С точки зрения коммерческих применений размеры единичных элементов матрицы должны быть малы (сообщалось о размерах  $17 \times 17$  мкм [2]), что позволяет создавать FPA с высоким разрешением при относительно низкой стоимости.

Для обеспечения малой теплопроводности между болометром и подложкой создаются длинные опоры болометра, которые имеют малую площадь поперечного сечения и состоят из материалов с низкой теплопроводностью. Опоры, как правило, содержат

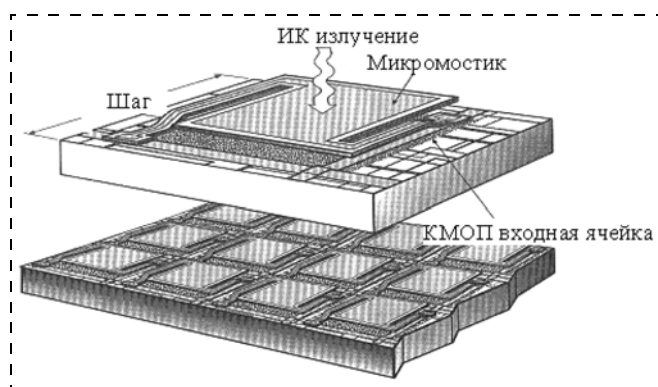


Рис. 1. Схематическое изображение монолитно интегрированной инфракрасной матрицы фокальной плоскости на основе болометров [4]

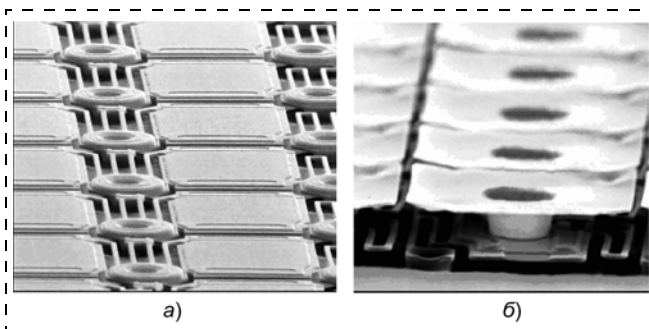
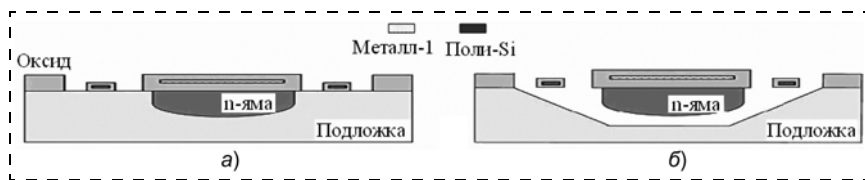


Рис. 2. Коммерческая болометрическая матрица на основе  $VO_x$  с площадью единичного элемента  $28 \times 28$  мкм фирмы BAE [4] (а) и опытный образец (R & D) болометрической матрицы с "зонтичной" структурой на основе  $VO_x$  и с площадью единичного элемента  $17 \times 17$  мкм фирмы DRS (б)

тонкий слой металла для обеспечения электрического контакта между материалом болометра и считывающей электроникой. Теплопроводность через опоры болометра может составлять  $3,5 \cdot 10^{-8}$  Вт/К. Кроме того, традиционные болометры эксплуатируются в условиях вакуума, чтобы свести к минимуму теплопроводность через окружающий газ.

Традиционные одноуровневые инфракрасные болометрические матрицы (рис. 2, а) обычно имеют коэффициент заполнения между 60 и 70 % [4, 5]. Для увеличения коэффициента заполнения была предложена (рис. 2, б) двухслойная конструкция единичного элемента матрицы болометра ("зонтичная" конструкция — *umbrella design*), для которой коэффициент заполнения превышает 90 % [6]. Для обеспечения высокого уровня поглощения в мембране болометра традиционные болометры содержат оптический резонатор (Фабри—Перо), который оптимизирован для поглощения излучения с определенной длиной волны.

Наиболее часто используемый производственный подход для неохлаждаемых инфракрасных FPA на основе болометров называется монолитной интеграцией [8, 9]. При монолитной интеграции интегральную схему считывания (ROIC) создают заранее, и материал болометра последовательно наносят на пластину ROIC. Обычно стабильный при высоких температурах полиимид используется как жертвенный слой. В финальной стадии слой полиимида удаляется в плазме кислорода для получения свободнолежащих, термически изолированных болометрических мембран. Все коммерчески доступные болометрические FPA на основе оксидов ванадия или аморфного кремния монолитно интегрированы сверху пластины ROIC. Один из потенциальных недостатков монолитной интеграции заключается в том, что температура процессов нанесения чувствительного к температуре материала болометра ограничена значением  $450^\circ\text{C}$  и поэтому такие процессы не позволяют наносить монокристаллический материал. При температуре процессов, превышающих  $450^\circ\text{C}$ , появляется риск поврежде-



**Рис. 3. Объемная микрообработка для неохлаждаемых инфракрасных матриц болометров:**

*a* — формирование болометра и электронных схем считывания сигнала; *б* — селективное травление объемного материала под мембраной болометра [10]

ния ROIC, что делает сложным оптимизацию чувствительного материала болометра.

Объемная микрообработка является второй альтернативой для производства неохлаждаемых инфракрасных болометров [10]. При объемной микрообработке болометры формируются в поверхностном слое пластины подложки. Впоследствии проводится селективное травление подложки под болометрами для обеспечения термического отделения от оставшейся части подложки (рис. 3).

Процессы объемной микрообработки могут использоваться до или после операций обработки подложки. На коммерческой основе созданы с помощью объемной микрообработки FPA на основе болометрических диодов. Преимуществом объемной микрообработки является то, что электронные схемы и болометры можно создавать с помощью обычной КМОП-технологии. Недостатком объемной микрообработки является то, что считывающие электронные схемы не могут быть расположены под мембраной болометра, это обычно снижает коэффициент заполнения.

В таблице приведены данные о разработках матриц фокальной плоскости на основе микроболометров ведущими фирмами-производителями. Аббревиатура R & D означает, что матрицы сконструированы в результате научных исследований, а

также выпуска опытных и мелкосерийных образцов матриц фокальной плоскости, который предшествует запуску нового продукта в промышленное производство. Типичные значения температурного коэффициента сопротивления (ТКС) тонких пленок оксидов ванадия, который определяет чувствительность болометра, составляют 2...3 %/К при комнатной температуре. При использовании специальных технологий создания пленок  $VO_x$  можно получить значения ТКС, достигающие 4,4 и 5,12 %/К [2].

Преимуществами микроболометров на основе аморфного кремния являются достаточно высокий ТКС (превышающий 3 %/К), относительно высокий коэффициент поглощения и совместимость процессов изготовления матриц со стандартной кремниевой технологией. Температурный коэффициент сопротивления кремниевых диодов (*p-n*-переходов или барьеров Шоттки) составляет около 0,2 %/К. Преимущество использования кремниевых диодов при создании матриц заключается в возможности создания пикселей малого размера в рамках стандартной КМОП-технологии.

Использование в качестве активных элементов тонкопленочных транзисторов на основе аморфного кремния обеспечивает достаточно высокие значения температурного коэффициента тока стока, которые находятся в диапазоне от 1,5 до 6,5 %/К [2]. Тонкие пленки металлов легко интегрируются с КМОП ROIC и имеют низкий уровень шума типа  $1/f$ , но слишком малые значения ТКС (например, для пленок титана ТКС составляет около 0,35 %/К). Аморфные пленки  $Ge_xSi_{1-x}O_y$  имеют высокие значения ТКС (5,1 %/К) и низкую теплопроводность, но относительно высокий уровень шума ти-

**Коммерческие и исследовательские неохлаждаемые матрицы инфракрасных болометров [2]**

Компания-изготовитель	Тип болометра	Формат матрицы, пиксели	Шаг матрицы, мкм	NEDT детектора, мК ( $F = 1, 20...60$ Гц)
FLIR, США	$VO_x$ болометр	$160 \times 120, 640 \times 480$	25	35
L-3, США	$VO_x$ болометр $\alpha$ -Si болометр	$320 \times 240$ $160 \times 120, 320 \times 240$	37,5 30	50 50
BAE, США	$VO_x$ болометр $VO_x$ болометр	$320 \times 240, 640 \times 480$ $160 \times 120, 640 \times 480$	28 17 (R & D)	30...50 50
DRS, США	$VO_x$ болометр (umbrella) $VO_x$ болометр (umbrella)	$320 \times 240$ $320 \times 240$	25 17 (R & D)	35 50
Raytheon, США	$VO_x$ болометр $VO_x$ болометр (umbrella)	$320 \times 240, 640 \times 480$ $640 \times 512$	25 17 (R & D)	30...40 50
ULIS, Франция	$\alpha$ -Si болометр	$160 \times 120, 640 \times 480$	25...50	35...100
Mitsubishi, Япония	Болометры на Si диодах	$320 \times 240$	25	50
NEC, Япония	$VO_x$ болометр	$320 \times 240$	23,5	75
SCD, Израиль	$VO_x$ болометр	$384 \times 288$	25	50

па  $1/f$ . Поликристаллические пленки  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  могут быть созданы в рамках стандартных КМОП-процессов, но имеют высокий уровень шума типа  $1/f$ , что приводит к худшим характеристикам детекторов по сравнению с детекторами на основе  $\text{VO}_x$ .

Преимущества системы квантовых ям  $\text{Si}/\text{SiGe}$  является достаточно высокий ТКС ( $3,3 \text{ \%}/\text{K}$ ), а также очень низкие значения шума типа  $1/f$  в высококачественном кристаллическом материале и стабильность свойств при стандартной металлизации. ТКС для пленок аморфного и кристаллического  $\text{SiC}$  находится в диапазоне от  $0,7$  до  $2,3 \text{ \%}/\text{K}$  и зависит от условий формирования пленок. Шум типа  $1/f$  для пленок карбида кремния увеличивается с ростом ТКС. Еще одним типом термочувствительного материала является полупроводниковый  $\text{YBaCuO}$ , который при низкотемпературном осаждении с помощью магнетронного распыления имеет значения ТКС в диапазоне от  $2,8$  до  $4 \text{ \%}/\text{K}$ .

### МЭМС-микрокантилеверы

Недавние успехи в области МЭМС привели к разработке неохлаждаемых ИК детекторов, действующих как микромеханические тепловые детекторы [11], а также как микромеханические фотонные детекторы [12]. Среди них наиболее важны микрокантилеверы из биматериалов, которые механически откликаются на поглощение излучения [13]. Эти чувствительные структуры были первоначально предложены в *Oak National Laboratory* в середине 1990-х годов [14, 15] и впоследствии развивались в результате работ *Oak National Laboratory* [16, 17], *Sarnoff Corporation* [18, 19], *Sarcon Microsystems* [20, 21] и других научных групп [22–26] для тепловизионных и спектроскопических применений.

Принцип термомеханических детекторов впервые был предложен *Barnes* и соавторами [27], когда они покрыли микрокантилевер металлом в качестве активного чувствительного слоя для формирования биматериала. Микрокантилевер соединен механически и электрически с подложкой в конце с помощью "якоря", а второй конец подложки свободен для изгиба под действием любых изменений напряжения вдоль плеча. Поглощенное инфракрасное излучение преобразуется в тепло в структуре микрокантилевера, которая термически изолирована от подложки посредством тепловой изоляции плеч, подобной изоляции в болометрах. Структура кантилевера содержит область биматериалов, которая создается из двух слоев со значительным рассогласованием коэффициентов теплового расширения, например, слоя  $\text{SiO}_2$  с малым коэффициентом теплового расширения ( $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) и расположенного сверху слоя  $\text{Al}$  с коэффициентом теплового расширения  $\alpha = 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (рис. 4). Когда

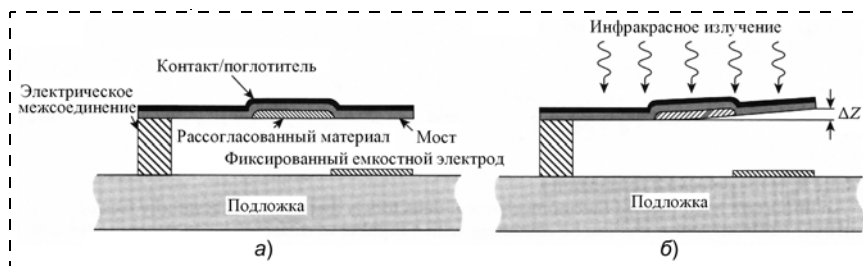


Рис. 4. Схематическая диаграмма, иллюстрирующая принцип работы ИК детектора на основе микрокантилевера с биматериалом:

а — номинальное положение; б — при увеличении падающего излучения [13]

падающее излучение нагреет структуру, область биматериалов кантилевера изогнется вследствие различия коэффициентов теплового расширения биматериалов (примерно на  $0,1 \text{ мкм}$  для изменения температуры на  $1 \text{ K}$ ). В работе [13] приведены данные об используемых комбинациях биматериалов. Обычно для поглощения инфракрасного излучения используют  $\text{SiN}_x$  или  $\text{SiO}_2$ , в то время как для создания контактов и отражателей используют  $\text{Au}$  или  $\text{Al}$ .

Основные фундаментальные ограничения характеристик микрокантилеверов связаны со свойствами самих тепловых детекторов (ограничение флуктуациями фона и ограничение флуктуациями температуры). В случае термомеханических ИК детекторов существует дополнительное фундаментальное ограничение, которое связано со спонтанным микроскопическим механическим движением (осцилляциями) любых подвешенных микроструктур вследствие их тепловой энергии. Для большинства считывающих средств эти осцилляции неразличимы от изгиба, индуцированного температурой, и поэтому они прямо вносят вклад в шум детектора. Закономерности формирования термомеханического шума рассмотрены, например, в работе [28]. Теоретический предел для обнаружительной способности, обусловленный термомеханическим шумом, определяется выражением

$$D^* = \frac{1}{R_z} \left( \frac{4kT}{AQk_s\omega_0} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где  $R_z$  — чувствительность детектора;  $A$  — площадь детектора;  $T$  — температура;  $k$  — постоянная Больцмана;  $Q$  — коэффициент качества, который является отношением резонансной частоты ( $\omega_0$ ) к ширине резонансного пика ( $\Delta\omega$ );  $k_s$  — постоянная упругости, определяемая как отношение силы, приложенной к микрокантилеверу, к смещению его конца. Важным преимуществом термомеханических детекторов является то, что они свободны от собственных электронных шумов и могут комбинироваться с различными высокочувствительными считывающими устройствами. В зависимости от метода считывания новые неохлаждаемые детекторы могут быть подразделены на емкостные [18–21], оптические [16, 17, 22, 24–26], пьезорезистивные [29, 30], с электронным туннелированием [31].

В термомеханических детекторах с электрической связью изгиб кантилевера вызывает изменение его емкости. Это изменение емкости преобразуется в электрический сигнал, который пропорционален интенсивности поглощенного ИК излучения. Все нежелательные внешние вибрации затухают при использовании активно перестраиваемой резонансной РС-цепи. Детектор с емкостной связью формирует одно плечо в мостовой схеме [20]. Симметричные и противофазные импульсы напряжения прикладываются к микрокантилеверу и образцовой емкости в мосте, соответственно. Если емкости близки, то значение напряжения в общем узле между емкостями равно нулю. Когда ИК излучение падает на микрокантилевер, пластины движутся (рис. 4), увеличивая зазор в конденсаторе, поэтому уменьшается емкость детектора и генерируется компенсирующее напряжение на входе схем усиления и интегрирования. Для кантилеверов с электрической связью параметр, называемый температурным коэффициентом емкости (ТКЕ), определяется аналогично температурному коэффициенту сопротивления для болометров:

$$\text{ТКЕ} = \frac{1}{C_s} \frac{\Delta C}{\Delta T} = \frac{1}{Z_{\text{gap}}} \frac{\Delta Z}{\Delta T},$$

где  $Z_{\text{gap}}$  — эффективный вакуумный зазор в сенсоре;  $C_s$  — емкость кантилевера;  $\Delta C$ ,  $\Delta Z$  и  $\Delta T$  — изменение емкости кантилевера, отклонение конца кантилевера и изменение температуры, соответственно. Для емкостных сенсоров были измерены значения  $\text{ТКЕ} > 30 \text{ \%}/\text{К}$  [21]. Рассчитанные по моделям значения ТКЕ могут достигать  $100 \text{ \%}/\text{К}$  в зависимости от требуемого динамического диапазона. Термомеханический шум сравним по значению или ниже, чем шум фоновой теплопроводности. Основной вклад в суммарный шум для существующих приборов определяется считывающей интегральной схемой ( $kT/C$  — шум, шум предусилителя и переключателей). В работе [13] приведены значения NEDT, смоделированные для различных источников шума при различной структуре пикселей, которые изменяются для детекторов данного типа от 13,1 до 19,8 мК.

Типичное различие в коэффициентах теплового расширения разработки на основе комбинации металла с керамическим биматериалом по существу ограничено значением  $\Delta\alpha < 20 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ . Недавно было установлено, что кантилеверы на основе комбинации полимера с керамическим биматериалом значительно увеличивают термически индуцированный изгиб вследствие намного более эффективного действия легкого расширяемых полимерных нанослоев с  $\Delta\alpha < 200 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  [32]. Эта новая разработка кантилевера позволяет достичь почти четырехкратного увеличения тепловой чувствительности по сравнению с покрытыми металлом альтернативами. Серьезным недостатком полимер-керамических кантилеверов в существующей ста-

дии развития является их несовместимость с традиционной микротехнологией.

ИК детекторы на основе микрокантилеверов могут иметь значения NEDT менее 5 мК для квадратного пикселя размером 50 мкм при использовании нитрида кремния для тепловой изоляции [18]. Однако несколько важных вопросов должны быть решены для того, чтобы можно было реализовать потенциал этих приборов в полной мере. Среди них можно выделить: 1) механический шум, присущий микромеханическим системам; 2) неоднородность микрокантилеверов большой площади; 3) высокую чувствительность тепловых ИК детекторов к изменениям температуры окружающей среды.

Моделирование термомеханического отклика пикселя кантилевера дает время теплового отклика в диапазоне 5...10 мс, что согласуется с экспериментальными данными [33]. Термомеханические тепловые детекторы имеют большое время отклика по сравнению с фотонными детекторами. Однако микромеханическая структура может также использоваться как фотонный детектор с малым временем отклика и более высокими характеристиками, чем у микромеханических тепловых детекторов [34, 35].

Поглощение фотонов вызывает изменение температуры и тепловое расширение, что приводит к появлению акустических волн на частотах, соответствующих амплитудной модуляции падающего потока фотонов. Генерация электронов и дырок при поглощении фотонов в полупроводнике приводит к возникновению локальных механических деформаций. Поверхностные напряжения, сбалансированные в равновесии, становятся неравными при экспозиции фотонами, что вызывает появление изгибающей силы, которая отклоняет конец микрокантилевера пропорционально интенсивности излучения. Результаты, опубликованные в работах [34, 35], демонстрируют, что развитие МЭМС-технологии фотонных детекторов может обеспечить основу для будущих достижений.

Детектирование инфракрасного излучения и последующая реконструкция изображения могут быть также основаны на отклонении индивидуальных пикселей микрокантилевера при использовании оптической техники (рис. 5), которая была позаимствована у стандартных систем построения изображения с помощью атомно-силовой микроскопии [36]. При таком подходе матрицы не требуют металлизации к каждому пикселю. По сравнению с кантилеверами с электрической связью оптическое считывание имеет ряд важных преимуществ [24]: матрицы проще изготовить, что позволяет снизить их стоимость; исключается необходимость в интегральной схеме считывания; не требуется сложных систем адресации к матрице; исключается паразитный нагрев от интегральной схемы считывания; отсутствие электрических контактов между пикселями и подложкой исключает этот путь тепловой утечки.

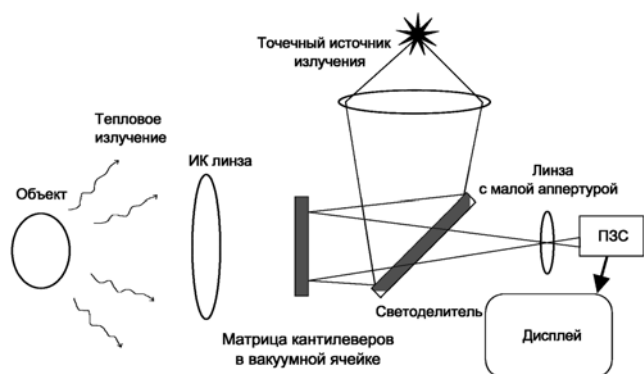


Рис. 5. Схематическая диаграмма неохлаждаемой системы формирования ИК изображения с оптическим считыванием

Оптомеханическая ИК система формирования изображения состоит из ИК линз, матрицы фокальной плоскости микрокантилеверов и устройства оптического считывания [37]. Видимый свет от светодиода становится параллельным с помощью коллиматорной линзы. Потом параллельный свет отражается пикселями матрицы фокальной плоскости и проходит через трансформирующую линзу. При поглощении падающего ИК потока пикселями их температура повышается, что вызывает малое отклонение кантилеверов. Следовательно, изменяется распределение отраженного видимого света и проводится его анализ с помощью традиционных ПЗС или КМОП-камер. Малая апертура линз, применяемых в регистрирующих камерах, позволяет преобразовать изменения угла отражения излучения в изменение интенсивности излучения. Простое оптическое считывание, использующее световой пучок мощностью 1 мВт, позволяет реализовать падающую оптическую мощность значением несколько нановатт на каждый пиксель фокальной плоскости. Динамический диапазон, собственный шум и разрешение камеры во многом определяют характеристики системы. Чувствительность индивидуальных пикселей для конкретной матрицы микрокантилеверов может слегка отличаться и, кроме того, часть пикселей может быть слегка напряжена. В результате, деформации некоторых из них не будут обнаруживаться при считывании. Недавно разработаны численные алгоритмы восстановления изображения, содержащего потерянную или деградировавшую информацию от пикселей [17]. Для уменьшения сложности изготовления Р. Datskos и соавторы [17, 37] разработали потоковый процесс для изготовления матриц фокальной плоскости, который включает только три шага фотолитографии и полагается на хорошо разработанные методы микрообработки.

Приборы формирования инфракрасного изображения на основе кантилеверов демонстрируют меньшую чувствительность, чем теоретические прогнозы. Существует много путей улучшения чувствительности, включая совершенствование топологии, улучшение технологических процессов и совершен-

ствование считывающих схем. Теоретический прогноз показывает, что чувствительность микрокантилеверов обратно пропорциональна расстоянию зазора между кантилеверами и подложкой. Кроме того, инфракрасный поток должен проходить через кремниевую подложку и только 54 % падающего излучения может достигнуть кантилеверов.

Одна из новых разработок — свободные от подложек неохлаждаемые ИК детекторы — основаны на оптическом методе считывания [38]. Детекторы состоят из матрицы кантилеверов на основе биматериалов без кремниевой подложки, которая исключается в процессе изготовления. Кантилевер со слоем основной структуры  $\text{SiN}_x$  толщиной 1 мкм включает ИК поглотитель/отражатель, два биматериальных плеча и два термоизолированных плеча. Для удаления кремниевой подложки и формирования рамки каждого пикселя матрицы фокальной плоскости разработаны процессы глубокого реактивного ионного травления. По сравнению с обычно используемыми кантилеверами с жертвенным слоем потери падающей энергии инфракрасного излучения, вызванные отражением и/или поглощением в кремниевой подложке, полностью исключаются в структурах, свободных от подложек. Была измерена термомеханическая чувствительность пикселя кантилевера, которая составила 0,11 мкм/К.

Другой модификацией свободных от подложек ФРА с оптическим считыванием является введение кантилеверного пикселя с двойным биматериальным слоем [39]. Верхний слой кантилеверного пикселя состоит из двух материалов с большим рассогласованием температурных коэффициентов расширения:  $\text{SiN}_x$  и Au, с помощью которых инфракрасное излучение преобразуется в механическое отклонение. Нижний слой является также  $\text{SiN}_x$  кантилевером, который частично служит как опора с тепловой изоляцией. Такая геометрия формирует резонатор, который значительно улучшает поглощение падающего ИК излучения. Теоретический анализ показывает, что температурное разрешение таких систем формирования изображений может достигать 7 мК.

## Заключение

Таким образом, инфракрасные детекторы, созданные по технологии МЭМС, активно разрабатывают и применяют в последние годы. В настоящее время созданы тепловые и фотонные МЭМС инфракрасные детекторы, а также матрицы фокальной плоскости на их основе. Ведущие мировые производители освоили производство матричных микроболометров с использованием процессов монолитного интегрирования (микроболометры разрабатывают чаще всего на основе оксидов ванадия и аморфного кремния), а также объемной микрообработки (микроболометры на основе кремниевых диодов). Достоинства матричных микроболометров (неохлаждаемый режим работы, достаточно высокая чувствительность,

возможность выбора рабочей длины волны, совместимость со стандартной кремниевой технологией) определили их широкое использование при создании формирователей инфракрасного изображения для коммерческих и военных систем. Важными задачами разработчиков микроболометрических матриц являются поиск новых материалов для термочувствительных слоев, которые должны иметь высокие значения температурного коэффициента сопротивления и температуры изготовления, не превышающие 450 °С, а также разработка оптимизированного дизайна приборов (например, использование двухслойной "зонтиковой" структуры позволяет повысить коэффициент заполнения матриц). Механическая перестройка резонатора перспективна при создании многоспектральных матриц третьего поколения на основе тепловых или фотонных детекторов.

Относительно новым направлением развития МЭМС является создание неохлаждаемых инфракрасных детекторов на основе микрокантиллеров с электрическим или оптическим считыванием. Неохлаждаемые детекторы на основе микрокантиллеров потенциально более чувствительны, чем альтернативные тепловые детекторы (болометры, пирометры), и могут обеспечить NEDT на уровне 3...7 мК при времени отклика 5...10 мс (у болометров время отклика составляет 15...20 мс). Также микрокантиллеры превосходят болометры по динамическому диапазону и потенциально имеют меньшую стоимость [13]. Важным преимуществом детекторов на основе микрокантиллеров является то, что они свободны от собственных электронных шумов и могут быть скомбинированы с высокочувствительными считывающими системами, основанными на разных принципах. Например, оптическое считывание обеспечивает меньшую стоимость матриц, исключается необходимость в интегральной схеме считывания, а также отсутствуют паразитный нагрев от интегральной схемы считывания. Отсутствие электрических контактов между пикселями и подложкой также способствует уменьшению тепловой утечки. Основные задачи, которые стоят сегодня перед разработчиками микрокантиллеров следующие: снижение механического шума, присущего микромеханическим системам; повышение однородности свойств микрокантиллеров большой площади; снижение чувствительности детекторов к изменениям температуры окружающей среды. В настоящее время активно разрабатывают новые варианты неохлаждаемых детекторов на основе микрокантиллеров. Микрокантиллеры на основе фотонных процессов позволяют создать быстродействующие детекторы. Перспективны микрокантиллеры на основе комбинации полимера с керамическим биматериалом, обеспечивающие повышенную чувствительность вследствие большого различия в коэффициентах теплового расширения, а также микрокантиллеры с удаленной частью подложки, что снижает потери

инфракрасного излучения на поглощение и отражение.

Таким образом, неохлаждаемые инфракрасные МЭМС-детекторы активно разрабатывают в последние годы. При использовании значительных потенциальных преимуществ термомеханических детекторов они смогут составить достойную конкуренцию широко применяемым в настоящее время матрицам фокальной плоскости на основе микроболометров.

*Работа выполнялась в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы (ГК П281, П234, П1662, 02.740.11.0444, 02.740.11.0562), поддерживалась проектом в рамках АВЦП "Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2011 годы)" (рег. № 2.1.2/12459), а также по гранту НШ-4297.2010.2.*

#### Список литературы

1. Пул Ч. — мл., Оуэнс Ф. Нанотехнологии / Пер. под ред. Ю. И. Головина. М.: Техносфера, 2010. 336 с.
2. Niklaus F., Vieder C., Jakobsen H. MEMS-based uncooled bolometers arrays — a review // Proc. SPIE. 2007. Vol. 6836. P. 6836D-(1—15).
3. Yon J. J., Biancardini L., Mottin E., Tissot J. L., Letellier L. Infrared microbolometer sensors and their application in automotive safety // AMAA. 2003. N 11. P. 1—15.
4. Kohin M., Buttler N. Performance limits of uncooled VO<sub>x</sub> microbolometer focal plane arrays // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5406. P. 447—453.
5. Mottin E., Bain A., Martin J. L., Ouvrier-Bufferet J. L., Bisotto S., Yon J. J., Tissot J. L. Uncooled amorphous silicon technology enhancement for 25 μm pixel pitch achievement // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4820. P. 200—207.
6. Tohyama S., Miyoshi M., Kurashina S., Ito N., Sasaki T., Aisawa A., Oda N. New thermally isolated pixel structure for high-resolution uncooled infrared FPAs // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5406. P. 428—436.
7. Li C., Skidmore G. D., Howard C., Han C. J., Wood L., Peysa D., Williams E., Trujillo C., Emmett J., Robas G., Jardine D., Wan C.-F., Clarke E. Recent development of ultra small pixel uncooled focal plane array at DRS // Proc. SPIE. 2007. Vol. 6542. P. 1Y.1—1Y.12.
8. Backer B., Kohin M., Leary A., Blackwell R., Rumbaugh R. Advances in uncooled technology at BAE systems // Proc. SPIE. 2003. Vol. 5074. P. 548—556.
9. Murphy D., Ray M., Wyles J., Asbrock J., Hewitt C., Wyles R., Gordon E., Sessler T., Kennedy A., Baur S., Van Lue D. Performance improvements for VO<sub>x</sub> microbolometer FPAs // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5406. P. 531—540.
10. Eminoglu S., Sabuncuoglu T. D., Tanrikulu M. Y., Akin T. Low-cost uncooled infrared detectors in CMOS process // Sensors & Actuators A. 2003. Vol. 109. P. 102—113.
11. Фегисов Е. А., Федирко В. А., Хафизов Р. З., Золотарев В. И., Зенюк Д. А., Рудаков Г. А. Исследование термомеханических приемников теплового излучения // Тезисы докладов 21-й Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. 25—28 мая 2010. Москва, Россия. С. 98.
12. Faraone L. Optical MEMS for adaptive multi-spectral infrared sensors and arrays // Тезисы докладов 21-й Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. 25—28 мая 2010. Москва, Россия. С. 22.
13. Rogalsky A. Infrared detectors / 2<sup>nd</sup> ed., New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. 876 p.
14. Oden P. I., Wachter E. A., Datskos P. G., Thundat T., Warmack R. J. Optical and infrared detection using microcantilevers // Proc. SPIE. 1996. Vol. 2774. P. 345—354.
15. Datskos P. G., Rajic S., Datskou I. Photoinduced and thermal stress in silicon microcantilevers // Applied Physics Letters. 1998. Vol. 73. P. 2319—2321.
16. Senesac L. R., Corbeil J. L., Rajis S., Lavrik N. V., Datskos P. G. IR imaging using uncooled microcantilever detectors // Ultramicroscopy. 2003. Vol. 97. P. 451—458.
17. Lavrik N., Archibald R., Grbovic D., Rajic S., Datskos P. Uncooled MEMS IR imagers with optical readout and image processing // Proc. SPIE. 2007. Vol. 6542. P. 65421E.



18. Amantea R., Knoedler C. M., Pantuso F. P., Patel V. K., Sauer D. J., Tower J. R. An uncooled IR imager with 5 mK NEDT // Proc. SPIE. 1997. Vol. 3061. P. 210–222.
19. Amantea R., Goodman R. A., Pantuso F. P., Sauer D. J., Varghese M., Villiant T. S., White L. K. Progress towards an uncooled IR imager with 5 mK NEDT // Proc. SPIE. 1998. Vol. 3436. P. 647–659.
20. Hunter S. R., Maurer G., Jiang L., Simelgor G. High sensitivity uncooled microcantilever infrared imaging arrays // Proc. SPIE. 2006. Vol. 6206. P. 62061J.
21. Hunter S. R., Maurer G., Simelgor G., Radhakrishnan S., Gray J., Bachir K., Pennell T., Bauer M., Jagadish U. Development and optimization of microcantilever based IR imaging arrays // Proc. SPIE. 2008. Vol. 6940. P. 694013.
22. Perazzo T., Mao M., Kwon O., Majumdar A., Varesi J. B., Norton P. Infrared vision using uncooled micro-optomechanical camera // Applied Physics Letters. 1999. Vol. 74. P. 3567–3569.
23. Choi J. E. Design and control of a thermal stabilizing system for a MEMS optomechanical uncooled infrared imaging camera // Sensor & Actuators. 2003. Vol. A104. P. 132–142.
24. Zhao J. High sensitivity photomechanical MW-LWIR imaging using an uncooled MEMS microcantilevers array and optical readout // Proc. SPIE. 2005. Vol. 5783. P. 506–513.
25. Jiao B., Li C., Chen D., Ye T., Shi S., Qu Y., Dong L. A novel opto-mechanical uncooled infrared detector // Infrared Physics & Technology. 2007. Vol. 51. P. 66–72.
26. Dong F., Zhang Q., Chen D., Miao Z., Xiong Z., Guo Z., Li C., Jiao B., Wu X. Uncooled infrared imaging device based on optimized optomechanical microcantilever array // Ultramicroscopy. 2008. Vol. 108. P. 579–588.
27. Barnes J. R., Stephenson R. J., Woodburn C. N., O'Shea S. J., Welland M. E., Rayment T., Gimzewski J. K. A Femtojoule calorimeter using micromechanical sensors // Review of Scientific Instruments. 1994. Vol. 65. P. 3793–3798.
28. Majorana E., Ogawa Y. Mechanical noise in coupled oscillators // Physics Letters. 1997. Vol. A233. P. 162–168.
29. Olden P. I., Datskos P. G., Thundat T., Warmack R. J. Uncooled thermal imaging using a piezoresistive microcantilevers // Applied Physics Letters. 1996. Vol. 69. P. 3277–3279.
30. Datskos P. G., Oden P. I., Thundat T., Wachter E. A., Warmack R. J., Hunter S. R. Remote infrared detection using piezoresistive microcantilevers // Applied Physics Letters. 1996. Vol. 69. P. 2986–2988.
31. Kenny T. W., Reynolds J. K., Rodosek J. A., Vote E. C., Miller L. M., Rockstad H. K., Kaiser W. J. Micromachined infrared sensors using tunneling displacement transducers // Review of Scientific Instruments. 1996. Vol. 67. P. 112–128.
32. Lin Y. H., McConney M. E., LeMieux M. C., Peleshanko S., Jiang C., Singamaneni S., Tsukurk V. V. Trialayered ceramic-metal-polymer microcantilevers with dramatically enhanced thermal sensitivity // Advanced Materials. 2006. Vol. 18. P. 1157–1161.
33. Hunter S. R., Muarer G. S., Simelgor G., Radhakrishnan S., Gray J. High sensitivity 25  $\mu\text{m}$  and 50  $\mu\text{m}$  pitch microcantilever IR imaging arrays // Proc. SPIE. 2007. Vol. 6542. P. 65421F.
34. Datskos P. G., Rajic S., Datskos I., Eger C. M. Novel photon detection based electronically-induced stress in silicon // Proc. SPIE. 1998. Vol. 3379. P. 173–181.
35. Datskos P. G., Rajic S., Senesac L. R., Datskos I. Fabrication of quantum well microcantilever photon detectors // Ultramicroscopy. 2001. Vol. 82. P. 49–56.
36. Wachter E. A., Thundat T., Oden P. I., Warmack R. J., Datskos P. D., Sharp S. L. Remote optical detection using microcantilevers // Review of Scientific Instruments. 1996. Vol. 67. P. 3434–3439.
37. Datskos P. G., Lavrik N. Simple thermal imagers use scalable micromechanical arrays // SPIE Newsroom. 2006. 10.1117/2.1200608.036.
38. Yu X., Yi Y., Ma S., Liu M., Liu X., Dong L., Zhao Y. Design and fabrication of a high sensitivity focal plane array for uncooled IR imaging // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2008. Vol. 18. P. 057001.
39. Shi S., Chen P., Jiao B., Li C., Qu Y., Jing Y., Ye T. Design of a novel substrate-free double-layer-cantilever FPA applied for uncooled optical-readable infrared imaging system // IEEE Sensor Journal. 2007. Vol. 7. P. 1703–1710.

## Новости ФИАН

### Создан наномеханический резонатор

*Ученые из Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) в сотрудничестве с японскими и китайскими коллегами создали сверхчувствительный преобразователь механических колебаний в электрические. В качестве детектора малых амплитуд наномеханических резонаторов ученые использовали одноэлектронный транзистор. Созданное на его основе и уже работающее устройство — квантовая система, имеющая механическую степень свободы, — представляет собой принципиально новый класс приборов.*

Сконструировано работающее устройство, преобразующее механические колебания наноразмерной системы в электрические. Над созданием прибора вместе с российскими специалистами работали сотрудники лаборатории наноэлектроники корпорации NEC (Япония), Института передовых технологий РИКЕН (Япония), Института микроэлектроники Университета Цинхуа (Китай).

Преобразователем колебаний в электрический сигнал послужил одноэлектронный транзистор. Этот прибор способен чувствовать самые малые изменения электрического заряда на нем — вплоть до

элементарного заряда электрона. Одноэлектронный транзистор состоит из островка, на который попадает электрон, и соединенных с островком туннельными переходами двух контактов. Один из них — исток, с которого на островок может переходить единственный электрон, другой — сток, через него электрон уходит. Устройство снабжено так называемым боковым затвором — источником напряжения, запирающим или открывающим электрону переходы исток—остров—сток. Вся конструкция выполнена на подложке из полупроводника, чаще всего кремния. При низких температурах его можно считать изолятором. Для регистрации отдельного электрона необходимо сделать островок достаточно маленьким (с малой емкостью), чтобы энергия, необходимая для перехода электрона на островок, была больше температуры системы.

В обычном одноэлектронном транзисторе эта конструкция лежит на полупроводниковой подложке и механической степенью свободы не обладает. Исследователи модифицировали способ изготовления устройства и смогли подвесить остров, буквально превратив его в мостик, опирающийся только на контакты (исток и сток), лежащие на полупровод-

никовой подложке. Типичная длина мостика составляет 500 нм, ширина и толщина — от 30 до 40 нм.

Для создания подобных конструкций применяется технология трехмерной литографии. Разработано несколько способов, позволяющих варьировать размеры и конфигурацию устройства, а, следовательно, и его свойства. Например, изменяя площадь контактов можно изменять туннельные характеристики перехода. Методом вакуумного напыления алюминия формируется мостик (или же островок, материал под которым затем "выбирается"). В результате окисления кислородом он покрывается тончайшей оксидной пленкой. Исток и сток напыляют на эту пленку. Такой контакт обеспечивает слабую связь и создает условия туннельного перехода. Но "подвешиванием" мостика изменение в конструкции одноэлектронного транзистора не ограничивается.

Говорит один из разработчиков устройства, научный сотрудник ФИАН канд. физ.-мат. наук Дмитрий Князев: "Мы модифицировали метод изготовления прибора, сделав существенное дополнение: кроме обычного бокового затвора, расположенного в одном слое с транзистором, используется еще один, нижний затвор, помещенный под мостик и отделенный от него вакуумным зазором. Такая конфигурация в несколько раз увеличивает емкость связи, повышая чувствительность транзистора к механическим смещениям". Теперь это устройство можно использовать в качестве детектора механических колебаний.

Оригинальность идеи состоит в том, что наномеханическим резонатором, колебания которого детектирует одноэлектронный транзистор, стал служить структурный элемент самого транзистора.

Подвешенный островок одноэлектронного транзистора, ставший мостиком, обладает механической степенью свободы, имеет собственную частоту колебаний и служит "струной" или "камертоном" резонатора. То есть прибор этот — одновременно и резонатор, и преобразователь механических колебаний в электрические.

Нижний затвор и мостик фактически представляют собой две обкладки конденсатора. Если приложить напряжение, возникнет притяжение или отталкивание, мостик будет прогнут или выгнут. За счет изменения геометрии и расстояний между обкладками меняется и емкость системы. Приложенное к нижнему затвору переменное напряжение заставит систему колебаться и вызовет изменение наведенного электрического заряда на мостике, а это полезный сигнал, связанный с механическими колебаниями. Таким образом, подача переменного напряжения на нижний затвор дает возможность определять резонансную частоту.

Так как заряд на мостике меняется, изменяется и ток, текущий через одноэлектронный транзистор. Резонанс определяется по характеру зависимости измеряемого тока от частоты переменного сигнала. "Мы измеряем ток в зависимости от напряжения на боковом затворе и параллельно прикладываем переменное напряжение к нижнему. И медленно изме-

няем частоту. Система всегда колеблется, но колеблется на разной частоте. Вдали от резонанса мы видим просто отклик системы на вынуждающую колебательную силу. А когда частота вынужденных колебаний подходит к резонансу, на зависимости тока от частоты возникает характерная особенность", — говорит Дмитрий Князев. В этом случае даже самое слабое воздействие на систему будет заметно. Если масса мостика изменится, например при попадании на него одной молекулы, резонансная частота тоже резко изменится.

Разработка открывает абсолютно новый класс приборов, возможности которых могут быть использованы как в фундаментальных исследованиях, так и в области нанотехнологий. Устройство применимо в экспериментах, связанных с квантовыми измерениями, в электрометрии, метрологии. Сверхчувствительный масс-детектор, детектор отдельных молекул — уже работающий прибор.

Комментирует заведующий отделом Высокотемпературной сверхпроводимости и наноструктур ФИАН доктор физ.-мат. наук Владимир Пудалов: "Есть так называемые нулевые колебания. Они присущи каждой квантовой частице. При нулевой температуре у нее есть ненулевая энергия, это известный эффект. Обычно нулевые колебания наблюдают на ансамбле из огромного числа частиц — макрообъект, мезообъект. Интересно увидеть их на одной частице. Возможно, шаг к этому сделан. Ведь прибор, сам камертон, представляет собой квантовую систему, в которой существуют нулевые колебания. Конечно, это новый класс устройств, обладающих совершенно специфическими свойствами. Это начало целой большой области в технике сверхмалых измерений и изучении квантовых эффектов".

## Разработан экситон-плазмонный наноизлучатель

*В Отделе люминесценции Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) были созданы трехкомпонентные гибридные наночастицы, которые могут послужить основой для нанолазеров.*

С момента своего изобретения лазеры нашли очень широкий спектр применений. В силу уникальных свойств излучения лазеров, они широко применяются во многих отраслях науки и техники, а также в быту (проигрыватели компакт-дисков, лазерные принтеры, считыватели штрих-кодов, лазерные указки и пр.). Но уменьшение их размеров в тысячи раз способно расширить сферу их применения. Нанолазер может лечь в основу нового класса устройств — от оптических микроскопов высокого разрешения до фотонных персональных компьютеров, что, в свою очередь, позволит сделать все эти устройства намного более экономичными и эффективными. Без создания нанолазеров обществу будет трудно добиться дальнейшего прогресса как в различных областях науки, так и в технике.

В настоящее время уже был создан первый прототип нанолазера, который получил название

"Spaser". Он представляет собой двухкомпонентную гибридную наночастицу золота, покрытую стеклоподобной оболочкой, заполненной красителем. Как и обычному лазеру для достижения необходимой энергии спазеру требовалась специальная накачка внешним источником электромагнитного излучения, и эта задача была решена с помощью освещения гибридных наночастиц лазерными импульсами. В Отделе люминесценции Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) также занимаются проблемой создания нанолазеров.

О проделанной работе в данном направлении рассказывает молодой сотрудник ФИАН кандидат физ.-мат. наук Дмитрий Чубич: "Мы также рассматривали гибридные наночастицы золота, покрытые красителем, т. е. аналогичную систему. Но мы пошли другим путем: наше основное внимание было направлено на спонтанное излучение (люминесценция), а не на вынужденное, как учеными США".

Ученые ФИАНа вплотную занимаются разработкой схем изготовления таких конструкций, а также исследованием их спектральных свойств.

"Сначала мы повторили результаты японских ученых, но они работали только с одним красителем, а мы использовали различные виды красителей. Оказалось, что варьируя красителем, можно изменять спектральные свойства таких систем, — делится Дмитрий Чубич. — В ходе дальнейших экспериментов было обнаружено, что если на поверхность металла поместить хорошо светящуюся молекулу красителя, то ее люминесценция будет полностью потушена, а по мере отодвижения этой молекулы от металлического ядра, она начинает лучше светить. Но нам необходимо было сохранить плазмон-экситонное взаимодействие ядра и молекул красителя, поэтому мы решили посмотреть, как поведут себя трехкомпонентные наночастицы".

В результате учеными ФИАН были созданы трехкомпонентные наночастицы, состоящие из металлического ядра (Au, Ag диаметром 6 нм), покрытого двумя концентрическими оболочками органического вещества: монослоем диэлектрика (ГМА), поверх которого располагалась оболочка красителя. Таким образом, была реализована идея металлоорганической наночастицы, в которой краситель "отстоит" от ядра на расстоянии 1,2 нм (приблизительно равном длине молекулы диэлектрика). При такой конструкции наночастиц можно существенно ослабить тушение люминесценции, сохранив при этом взаимодействие ядра и оболочки. "В данный момент нами уже подана заявка на патент прибора, который будет иметь название "экситон-плазмонный наноизлучатель", — рассказывает Дмитрий Чубич. — После перехода к трехкомпонентным наночастицам и успешного решения вопроса с люминесценцией таких систем теперь мы переходим к изучению вынужденного излучения на наших объектах".

Работы в данном направлении будут продолжаться, ведь остается еще ряд нерешенных вопросов, например, расходящиеся волны наночастиц излучают свет по всем направлениям, тогда как "нормальный"

лазер должен производить узконаправленный луч света. Более того, ученые полагают, что способности спазера могут оказаться полезными в практическом плане — для разработки нового поколения сверхбыстрой наноэлектроники.

## Лазерное охлаждение атомов — задачи такого класса всегда решаются на границе чувствительности

*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) — один из мировых лидеров в области лазерного охлаждения атомов. Сотрудники ФИАН, работающие в этом направлении, активно сотрудничают со специалистами Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (ФГУП ВНИИФТРИ) — главного метрологического центра страны. Полученные результаты исследований позволили приступить к решению немислимой ранее задачи — созданию уникального лазера с шириной спектра менее одного герца.*

Процесс лазерного охлаждения связан с замедлением атомов в лазерном поле. Находящиеся в постоянном движении атомы рассеивают фотоны (кванты света). Именно поэтому свет (поток фотонов) воздействует на атомы. А если частота его излучения правильно настроена относительно перехода в атоме, частица, попавшая в такой специально подготовленный свет, замедляется. Частица "вязнет" в световом потоке, тормозится и, соответственно, охлаждается до очень низких температур. Существенно ниже тех, что удается получить любым другим способом, например в криостатах.

Установка лазерного охлаждения — это вакуумная камера, в которую с шести сторон направлены лазерные пучки. Ведь для охлаждения атом надо затормозить по всем трем координатам (возможным направлениям движения). Горячие атомы запускаются в камеру либо в виде пара, либо как пучок. После охлаждения облачко из холодных и пойманных атомов, парящих в вакууме ("левитирующих"), выглядит как светящаяся точка. Можно менять число атомов в облачке от единиц до нескольких миллионов. При отключении излучения лазеров облачко начинает падать под действием силы тяжести.

Говорит доктор физ.-мат. наук Николай Колачевский: "Если охлаждать (с помощью холодильника) газ, он превратится сначала в жидкость, а затем в твердое тело. А у него совершенно другие характеристики по сравнению с отдельными атомами — вследствие сильных взаимодействий в решетке вместо тонких уровней возникают зоны, и свойства меняются радикальным образом. Поэтому для решения задачи глубокого охлаждения отдельных частиц криостаты не подходят. Кроме того, предельно достижимые температуры, которые обеспечивают современные криостаты, — порядка 50 мК, т. е. 0,05 К. А в задачах лазерного охлаждения речь идет о микрорельвинах, что на три порядка величины ниже. Охлажденные атомы представляют собой разрежен-

ный газ в управляемом режиме, что дает возможность наблюдать ряд специфических эффектов, например переход в Бозе-конденсированное состояние, изучать квантовую природу этих атомов, а также использовать их в ряде прикладных задач".

Охлаждение нового элемента (а из таблицы Менделеева охлаждена лишь небольшая часть) — отдельная исследовательская работа, ведь у каждого элемента свои специфические уровни энергии, что требует использования лазеров с определенными характеристиками. Такая работа всегда отмечается в профессиональном сообществе. В ФИАН был впервые охлажден лантаноид тулий (Tm). Результаты работы будут использованы в исследованиях квантовых взаимодействий при сверхнизких температурах и в прецизионной метрологии.

Для этих исследований есть прикладные задачи, например, связанные с развитием программ ГЛОНАСС и прецизионным позиционированием. Но основное — метрология. Самые точные эталоны частот, самые точные в мире часы, которые снабжают частотой международные лаборатории, базируются сегодня на холодных атомах. Совместные работы в этой области ведут ФИАН и ФГУП ВНИИФТРИ — национальный метрологический институт России.

Наибольший исследовательский интерес в этой области, по словам Николая Колачевского, представляют оптические стандарты. Например, цезиевый фонтан — установка для стандартов частоты, в которой облако холодных атомов цезия подбрасывается вверх и проходит через радиочастотный резонатор лазерного охлаждения, — работает в радиочастотном диапазоне, на лазерном переходе. Если же добиться повышения несущей частоты, можно повысить стабильность и точность, что и достигается в оптических стандартах, базирующихся на лазерных переходах в холодных атомах.

В ФИАН начинаются опытно-конструкторские работы для стандартов частоты по созданию лазера с шириной спектра менее одного герца. Частота его составит 500 ТГц ( $5 \cdot 10^{14}$  колебаний в секунду), а электронная стабилизация по специальному резонатору позволит добиться стабильности менее одного "неправильного" колебания в секунду. Луч такого лазера можно было бы послать на Луну и получить обратно, он сохранил бы свою когерентность и позволил бы наблюдать интерференцию. В прикладном аспекте такие характеристики будут использованы прежде всего при работе со стандартами частоты. Кроме того, возникают совершенно новые возможности при передаче частот. Это может быть сверхстабильная синхронизация приемника-передатчика, особенно при больших потоках информации, без применения синхронизирующих импульсов, или, например, настройки для считывания сигналов ускорителя частиц с очень высоким синхронным временным разрешением.

## Разработана технология переноса вещества с помощью видимого света

*Сотрудники Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) разработали новую технологию прямого лазерного переноса вещества — с помощью видимого света. Работой устройства, способного воспроизводить масляную живопись, осуществлять литографию и даже строить микросхемы, можно будет управлять так же, как и любым принтером — с помощью компьютера.*

Взаимодействие лазерного излучения с веществом используют во многих технологических процессах — лазером режут, спаивают, плавят, зондируют различные среды и т. п. В самом начале XXI века к набору возможных действий, осуществляемых с помощью лазера, добавился перенос вещества давлением, возникающим в микрообъеме под действием импульса света. Технология, согласно которой этот перенос осуществляется, получила название "прямого лазерного письма". Первым инструментом лазерного письма были ультрафиолетовые лазеры, с их помощью можно создавать дисплеи экранов, осуществлять литографию, изготавливать миниатюрные электронные компоненты и источники питания. Однако помимо таких достоинств, как низкая пороговая энергия, малая глубина проникновения и возможность увеличения разрешения до нескольких тысяч точек на дюйм, лазеры ультрафиолетового диапазона имеют и существенные недостатки: высокая стоимость, необходимость использования специальной УФ оптики и стойких к УФ излучению материалов, невозможность переноса с помощью одного импульса большого числа элементов. Небольшая группа ученых из ФИАН под руководством д-ра техн. наук Александра Насибова, первоначально занимающая в данной области лидирующие позиции, предложила новый способ осуществления лазерного письма — с помощью видимого излучения.

"Мы разработали технологию переноса вещества, в частности, масляных красок с помощью лазера на парах меди, работающего в режиме усилителя яркости изображения. С помощью такой технологии можно переносить не только отдельные элементы, но и целые фрагменты изображения. Усилитель яркости необходим для того, чтобы усилить яркость изображения до пороговой величины, при которой состоится выброс необходимого вещества, например, масляной краски", — рассказывает Александр Насилов.

Как выяснили исследователи, наиболее низкий энергетический порог переноса красок для лазера на парах меди можно получить, используя зеленое (510 нм) и желтое (578 нм) излучения. Было разработано несколько схем устройств для переноса вещества, одно из них — с лазером на парах меди в составе. Для демонстрации возможности "письма" масляными красками с помощью такого устройства ученые перенесли изображение суперобложки книги Поля Элюара "Письма к Гала" на пластиковые карты (фото — <http://www.fian-inform.ru/?mode=mnews&id=602&page=1>).

"Существенным преимуществом метода прямого письма, — уточняет Александр Насибов, — является возможность переноса на заданный объект различных веществ, в том числе и твердых, что невозможно при использовании обычных принтеров. Это основное и оно же принципиальное отличие. Для художников, например, открывается возможность писать картину масляными красками без кисти — сначала на экране компьютера, а затем с помощью техники перенести ее на холст".

Цвет перенесенного агрегата (фрагмента изображения) зависит от числа в нем пикселей, а также диаметра и цвета этих пикселей. Иными словами, путь к управлению или заданию цвета в каждой отдельной "точке" картины лежит через управление этими параметрами. "Капля (пиксел) может быть, скажем, диаметром 200 мкм, а в ней отдельные субпиксели 20 мкм, это позволяет воспроизводить изображение с очень высоким разрешением, и восприятие цвета будет практически таким же, как и при смешивании красок. Размер одного субпиксела определится разрешением оптической системы — при наличии специальной оптики лазерное излучение можно сфокусировать до длины волны и даже меньше", — поясняет профессор Насибов.

Тем временем исполнение и копирование масляных картин — не единственное применение разработанной технологии. На месте масляных красок могут быть тонкие пленки, органические соединения, полупроводниковые структуры и т. п., поэтому технология может быть с равным успехом использована и в электронной промышленности — для изготовления пассивных элементов микросхем (резисторов, емкостей, индуктивностей и т. п.) и органических светодиодов (а значит, и органических дисплеев), а также для выполнения литографии, нанесения маркировок (в том числе и на металл) и т. п.

Максимальная скорость печати вязкими красками с помощью лазера на парах меди может достигать  $80 \text{ см}^2/\text{с}$ , максимальная площадь переносимого за импульс массива (при средней мощности 10 Вт)  $\sim 10^{-2} \text{ см}^2$ .

## Построена теория сверхпроводимости графена

*Уникальные свойства графена открывают множество перспектив как практического применения, так и фундаментальных исследований на абсолютно новом уровне. Одно из возможных "амплуа" графена — это использование его в качестве сверхпроводника, а также в качестве основы сверхпроводящего транзистора. Заведующий лабораторией спектроскопии наноструктур Института спектроскопии РАН профессор Юрий Лозовик комментирует свой доклад на одном из семинаров ФИАН.*

Графен (он же, кстати говоря, представитель двумерных кристаллов, существование которых в течение долгого времени считалось невозможным) был впервые получен в 2004 г. Андреем Геймом и Константином Новоселовым. После присуждения им в 2010 г. Нобелевской премии об этом знают многие.

Однако импульс, приведший к появлению графена, был запущен еще задолго до этого — в далеком 1947 г., когда в фирме Bell Уильямом Шокли, Джоном Бардиным и Уолтером Браттейном был изобретен транзистор.

"Выдающийся теоретик Бардин сообразил, что в случае контакта "металл" — полупроводник" можно управлять проводимостью полупроводника, обогащая его электронами с помощью внешнего напряжения, которое прикладывается к металлу. Таким образом, основой действия транзистора является управление проводимостью базы — полупроводника. Использовать вместо полупроводника металл нельзя, у него слишком велика концентрация носителей, и изменения при приложении напряжения будут незначительные. Но можно использовать полуметалл. И именно эта мысль, по-видимому, лежала в основе импульса, который привел к перспективе использования графита в качестве базы вместо полупроводника", — рассказывает Юрий Лозовик.

До появления транзисторов вся электроника базировалась на вакуумных лампах, не поддающихся масштабированию, т. е. постоянно уменьшать их размер нельзя, так как при этом изменяются и их свойства. Открытие транзистора изменило ситуацию кардинальным образом. В настоящее время закону Мура, согласно которому число транзисторов в микросхемах каждые 1,5—2 года удваивается, уже больше 40 лет. В этом году характерный размер транзисторов составляет 32 нм. Предполагается, что в 2014 г. он составит 22 нм, после чего ожидается очередной скачок — до 12 нм. Есть ли жизнь за пределами 12 нм с использованием широко используемого сейчас кремния — большой вопрос. Дело в том, что физические свойства полупроводника при значительном уменьшении размера могут изменяться, так как период решетки микрокластеров несколько иной, чем у объемного полупроводника. Также, если кластер очень маленький, то в нем может не оказаться примесей, а именно они определяют свойство полупроводника (какой он — *n*- или *p*-типа). Большое значение имеет и то, где находится примесь — в центре кластера или на его границе вблизи управляющего электрода. Интересен также вопрос — осуществим ли процесс масштабированной нанолитографии? Потому как в соответствии с критерием Рэлея при работе на длине волны порядка 40 нм, сделать с помощью обычной фотолитографии 12-нанометровую точку невозможно. И это только часть принципиальных трудностей.

Графен, с точки зрения закона Мура, — его абсолютный предел, по крайней мере, в одном из измерений, ведь это пленка толщиной в один атом. К тому же свойства графена совместимы с традиционной плоской технологией полупроводникового транзистора; при этом его прочность в 200 раз выше стали, теплопроводность существенно выше меди (так как одной из главных проблем транзисторов является их нагрев, то это крайне важно), крайне высокая подвижность электронов (т. е. маленькое удельное сопротивление).

Не менее, а может, и более интересными являются необычные электронные свойства графена. Они

хорошо описываются моделью, в которой зона проводимости и валентная зона отделены друг от друга нулевой щелью. Это два конуса, соприкасающиеся в своих вершинах, т. е. графен — это полупроводник с нулевой энергетической щелью и нулевыми эффективными массами электронов и дырок. Так что в результате симметрии системы электроны и дырки по поведению становятся похожи на ультрарелятивистские частицы. За счет определенных механизмов (например, за счет обмена такими квазичастицами, как фононы или плазмоны) ультрарелятивистские электроны графена имеют способность спариваться, т. е. графен может быть сверхпроводником. Юрий Лозовик и его коллеги смогли описать процесс спаривания электронов в графене за счет обмена фононами (см., например, ЖЭТФ, 2010, том 137, вып. 1 — Ю. Е. Лозовик, С. Л. Огарков, А. А. Соколик, Теория сверхпроводимости дираковских электронов в графене). С этой целью они рассмотрели два противоположных случая — чистый графен и сильно допированный примесями.

"Когда мы рассматриваем чистый графен, то речь идет о многозонном спаривании, т. е. спаривании, в котором участвуют частицы из разных зон — и из зоны проводимости, и из валентной зоны. Допирование графена подразумевает гораздо более эффективное спаривание, в котором участвуют частицы, принадлежащие только одной зоне. При сильном химическом допировании графена константа связи электронов, за счет большой плотности электронных состояний может достигать гораздо более существенных значений, чем в чистом графене. В этом случае особенно интересна концентрация допирования свыше  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Что касается критической температуры сверхпроводящего перехода, то в допированном графене, в отличие от чистого, она также выше", — делится профессор Лозовик.

Кстати, помимо собственной сверхпроводимости, упомянутый многозонный характер спаривания электронов в графене может проявляться и в случае близости сверхпроводника. Именно этот факт лежит в основе идеи сверхпроводящих бездиссипативных транзисторов — если поднести к сверхпроводнику слой графена, то он также станет сверхпроводящим.

## Создан новый прибор для измерения слабых квантовых эффектов

*В лаборатории оптики активных сред Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) завершена серия экспериментов по исследованию взаимодействия фемтосекундного излучения с ансамблем холодных атомов рубидия с применением магнитооптической ловушки. Получена возможность использовать такую ловушку как чувствительный инструмент для изучения процессов с маленьким сечением (низкой вероятностью), а также возможность отслеживать и измерять слабые квантовые эффекты. О работе рассказывает старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук Алексей Акимов.*

Магнитооптическая ловушка — это закрытый вакуумный объем, в котором есть источник рубидия и лазерное излучение, которое его охлаждает. В этом

объеме находятся открытые металлические емкости, "лодочки", содержащие соль рубидия с восстановителем. При нагреве лодочек до нескольких сотен градусов по Цельсию (электрическим током) рубидий высвобождается. Летящие атомы охлаждаются — замедляются световым полем шести лазерных пучков. Абсолютно охладить рубидий в ловушке нельзя, есть некоторый предел, который определяется балансом сил, действующих на атом со стороны светового поля. Типичная температура в магнитооптической ловушке для рубидия — 300 мкК. Это означает, что скорость атома, которая при комнатной температуре составляет около 300 м/с, уменьшается до десятков сантиметров в секунду. В результате примерно 10 млн атомов, имеющих такую скорость, удерживаются в ловушке размером порядка сотен микрометров. Это довольно большая оптическая плотность. Свечение такого густого атомного облака хорошо видно невооруженным глазом — это светящаяся точка.

В эксперименте исследовалось взаимодействие уже холодных атомов с фемтосекундным излучением. Это дополнительное (помимо охлаждающего) излучение. Использовались два пробных лазера: фемтосекундный и еще один непрерывный лазер, светящийся сбоку.

Фемтосекундный импульсно-периодический лазер характеризуется широким линейчатым спектром излучения. Этот спектр состоит из большого числа мод, каждую из которых можно рассматривать как отдельный лазер. А значит, посветив на ловушку системой многих лазеров, можно получить отклик сразу на все длины волн. Это может быть использовано в спектроскопии молекул. Известно, что некоторые химические реакции (фоточувствительные) можно контролировать с помощью света. "Засветив" определенную фазу реакции, можно повлиять на ее продукт. Зачастую для такого процесса требуется довольно много лазеров, а специально модифицированное излучение фемтосекундного лазера позволяет сделать это с помощью одного источника.

При настройке фемтосекундного лазера близко к одному из переходов атома рубидия наблюдалось взаимодействие одной лазерной моды с атомом. Взаимодействие это оказывается очень слабым, потому что мощность одной моды (монохроматической частоты) составляет всего  $10^{-5}$  от мощности всего излучения. Но тем не менее это слабое взаимодействие можно увидеть, так как его сопровождает процесс ионизации всей мощностью фемтосекундного излучения. Оказалось, что процесс можно разворачивать в любую сторону: можно измерить ионизацию таким способом, а можно — слабое возбуждение через ионизацию. Фемтосекундное излучение одновременно взаимодействует с ансамблем как непрерывный лазер и как мощный ионизирующий лазер. Магнитооптическая ловушка оказалась инструментом, чувствительным к очень тонким и слабым эффектам за счет длительного (секунды) времени жизни холодных атомов в ней.

*По материалам АНИ "ФИАН-информ"*  
(<http://www.fian-inform.ru/>)

**Glukhova O. E., Slepchenkov M. M.** *Theoretical Investigation of the Local Stresses Distribution of the Graphene* . . . . . 2

A new method of calculation of the local stresses field based on the quantum model of the graphene finite-dimensional nanoribbon and the empirical method in the energy calculation of one atom are proposed. The field of the local stresses of the graphene nanoribbons compressed by 6 % is calculated. It is established that the distribution of the maximum value of stresses coincides with the distribution of the maximum pyramidalization angle of the atomic skeleton.

**Keywords:** nanoribbons, local stress, angle of pyramidalization, volume density of energy

**Mikhailov V. P., Stepanov G. V., Basinenkov A. M., Sobov I. K., Shakov K. G.** *Control of Active Vibration Isolation and Positioning of Magnetorheological Devices* . . . . . 5

Physical model of magnetorheological (MR) elastomer — working environment for vibration isolation and positioning devices of nanotechnology equipment is given. The design of new active damper on the basis of MR-elastomer is described. The dynamic model and results of studies of active damper on the basis of MR-elastomer are presented.

**Keywords:** vibration isolation and positioning systems, magnetorheological elastomers, viscosity, elasticity

**Syakina S. D., Nikitina L. V., Simakov V. V., Sinev I. V., Chichvarina O. G.** *Stability of the Electrical Properties of the Wide-Gap Gas-Sensitive Nanostructures Materials* . . . . . 10

The influence of sorption on the resistance of thin films of metal oxides are widely applied in gas sensors. The adsorption of the gas-oxidizer particles on the surface of wide-gap semiconductors (for instance, tin dioxide) leads to the capture of charge carriers from the grains volume and causes change of the electrophysical properties of material. The value of conductivity of the film in the gas sample is usually used as registrable parameter of gas-sensitive layers. The paper proposes using of SnO<sub>2</sub> polycrystalline layers with cylindrical grains (nanorods) to detect gases of different nature due to the greater thermal stability of their electrical properties in comparison with the layers consisting of grains with spherical shape. This feature of nanorods is conditioned by the weak dependence of individual grains conductivity on the geometry of intergranular isthmuses which are formed at the elevated temperatures as a result of individual grains bonding.

**Keywords:** nanocrystalline materials, filamentary structures, wide-band semiconductors, gas-sensitivity, thermal stability

**Shomakhov Z. V., Molokanov O. A., Karmokov A. M.** *Lead-Silicate Glass Conductivity at Heating and Isothermic Annealing* . . . . . 14

The Experimental explored kinetics to conduction in leaden-silicate glass C87-2 at isothermal and polythermal annealing. The Experiments have shown that conduction depends on values missed electric charge and from the temperature annealing. The maked estimations of time of the determination of the balance in structure flow depending on the temperature annealing.

**Keywords:** isothermal annealing, an electrical conductivity kinetics, lead-silicate glass, structural transmutations, a specific conductivity, phaseformation, conductivity activation energy

**Dzhashitov V. E., Pankratov V. M.** *The Superminiature Micromechanical Sensor of the Inertial Information in Conditions of Thermal Effects* . . . . . 18

Mathematical models of thermal processes superminiature (a volume < 0,2 mm<sup>3</sup>) the micromechanical sensor of the inertial information are constructed and researched. Supporting algorithms and the software allowing to calculate, to analyze and to visualize inhomogeneous non-stationary three-dimensional temperature fields of the sensor are developed. The qualitative and quantitative analysis of influence of exterior and interior non-stationary temperature actions on temperature fields of a sensor is lead, the possibility of control by these fields is shown. Obtained data will allow to create the superminiature micromechanical gyro with the set properties and invariant to thermal effects.

**Keywords:** superminiature the micromechanical sensor of the inertial information, thermal effects and processes, mathematical models

**Lukyanov D. P., Shevchenko S. Yu., Kukaev A. S., Safronov D. V.** *Analysis of Surface Acoustic Wave-Based Solid-State Gyroscopes Design Concepts* . . . . . 24  
Design concepts of surface acoustic wave (SAW)-based solid-state gyroscopes (SSG) are being observed. Schematic configuration, experimental results and achieved characteristics are being analytically compared. Sensors readiness time is being estimated and development trends of shock robust and vibration resistant SAW-based SSGs are being discussed.

**Keywords:** MEMS, surface acoustic wave, delay line, solid-state gyroscope, inertial mass

**Godovitsyn I. V., Amelichev V. V., Saurov A. N., Gavrilov R. O., Generalov S. S.** *Miniature Tenzoresistive Pressure Sensors: 25 Years of Evolution* . . . . . 29  
This paper gives a review of state-of-the-art of miniature (surface micromachined) tenzoresistive pressure sensors from 1985 to present day. The key difference of miniature pressure sensors from traditional ones — deposited membrane instead of etched membrane — and resulting design and technology features are emphasized and discussed. Advantages and disadvantages of miniature pressure sensors are discussed. A number of examples of miniature pressure sensors based devices is presented. Increase of sensitivity as a condition for making miniature pressure sensors an attractive choice for integrated devices is proposed.

**Keywords:** miniature pressure sensors, surface micromachining technology

**Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Kulchitsky N. A., Melnikov A. A.** *MEMS-Detectors for Infrared Spectral Range* . . . . . 42  
The features of the technology of MEMS-based uncooled thermal infrared detectors, and the parameters of single detectors and array of detectors of this type were considered. Much attention is paid to a new type of thermal detectors — microcantilevers with electrical and optical readout.

**Keywords:** MEMS, microbolometer, microcantilever, detectors infrared

**For foreign subscribers:**

*Journal of "NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE" (Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, ISSN 1813-8586)*

*The journal bought since november 1999.  
Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev  
ISSN 1813-8586.*

**Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(499) 269-5510.  
E-mail: nmst@novtex.ru; <http://www.microsystems.ru>**

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru  
Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства  
в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т. Н. Погорелова. Технический редактор Е. М. Патрушева. Корректор

Сдано в набор 16.05.2011. Подписано в печать 22.06.2011. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,41. Заказ 467. Цена договорная

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15