

# ФИЗИЧЕСКАЯ И ХИМИЧЕСКАЯ СЕНСОРИКА МИКРОСИСТЕМОТЕХНИКИ

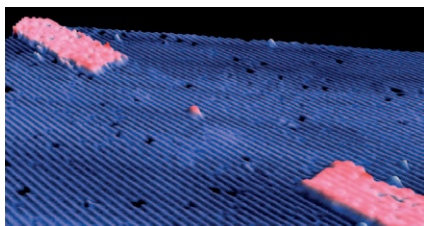
И.Лазер, к.т.н., доц., Н.Иванов, к.т.н., В.Калинин, к.т.н.

Последние достижения фундаментальных исследований в области квантовых волновых эффектов подтверждают реальность построения квантового вычислительного устройства, что будет означать переход на новую спираль диалектического развития электроники. Однако промышленная перспектива этих открытий оценивается периодом в 10–15 лет. Вместе с тем, другое направление развития электроники – микросистемотехника, основанное на более полном использовании пограничных физических эффектов, позволяет уже сегодня получать промышленные изделия электроники на новом технологическом уровне с непревзойденными конкурентными преимуществами. Использование в интеллектуальных микросистемотехнических устройствах полупроводниковых микропроцессоров (или позднее квантовых вычислителей) следует отнести к "электронной рутине", изменяющей конструктивные параметры, но не влияющей на функциональность систем.

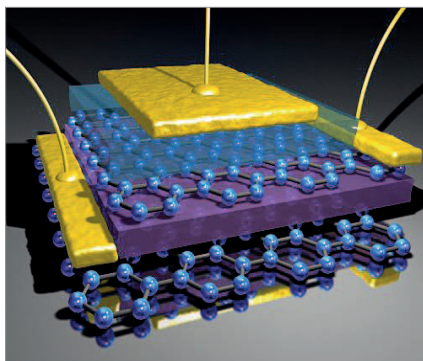
**В**есьма оживленная дискуссия в научно-технических изданиях и Интернете в последнее время посвящена перспективам развития различных направлений радиоэлектронных технологий. Предполагаемое завершение действия эмпирического закона Мура, который, по своей сути, был сформулирован, как прогноз развития микроэлектроники, основанной на полупроводниковой технологии с использованием процессов эпитаксии, диффузии, прецизионной фотолитографии, на какое-то время отодвигается. Основания для такого утверждения – последние технологические достижения корпорации Intel, в которых разработан трехмерный (3D) трехзатворный (Tri-Gate) транзистор. На его основе уже сегодня осуществлен переход к проектной норме 22 нм, а в ноябре 2014 года ожидается дебют процессоров

уже по 14-нм технологии! Такие успехи в технологии позволяют сделать следующий дискретный шаг в границах закона Мура. Прогноз относительно верхней границы физической области определения (по критериям токов утечки и концентрации тепловой энергии) этого закона ориентирован на проектную норму в 5 нм.

Вместе с тем, высказанные ранее предположения о приближении диалектического скачка в развитии электроники [1] становятся реальностью, причем новым физическим принципом функционирования переключающего элемента может быть спин электрона – его внутренний угловой момент импульса. Именно на таком эффекте основана работа одноатомного "транзистора" на кремнии с внедренными атомами фосфора (рис.1), созданного физиками из Университета Нового



**Рис.1.** Изображение одноатомного "транзистора": на поверхности кремния внедренные атомы фосфора. Изображение получено на сканирующем туннельном микроскопе (СТМ)



**Рис.2.** Структура графенового транзистора



**Рис.3.** СТМ-изображение 12 атомов железа, собранных на атомном уровне в антиферромагнетик

Южного Уэльса (Австралия) и Университета Пердью (США) [2]. Термин "транзистор" взят в кавычки не случайно, поскольку в данном случае отсутствует классический для полупроводниковой техники эффект переноса заряда в твердом теле, а имеет место изменение спина единственного несвязанного электрона одного атома (в частности, фосфора).

Очевидно, что в таком переключающем элементе легко решаются проблемы "тирании" степени интеграции, энергии переключения и рассеиваемой мощности, свойственные полупроводниковым транзисторам. Кроме того, определенный оптимизм в отношении активного элемента возникает и в связи с созданием графеновых транзисторов [3], работающих на принципе квантового туннельного эффекта (рис.2).

К важнейшим преимуществам графеновых транзисторов относятся значительно меньшие токи утечки, меньшее энергопотребление и отрицательный термоэлектрический эффект, т.е. наличие в них самоохладения. Отметим, что в разработке графеновых транзисторов приняли участие Нобелевские лауреаты А.Гейм и К.Новоселов, имеющие прямое отношение к российской научной школе\*.

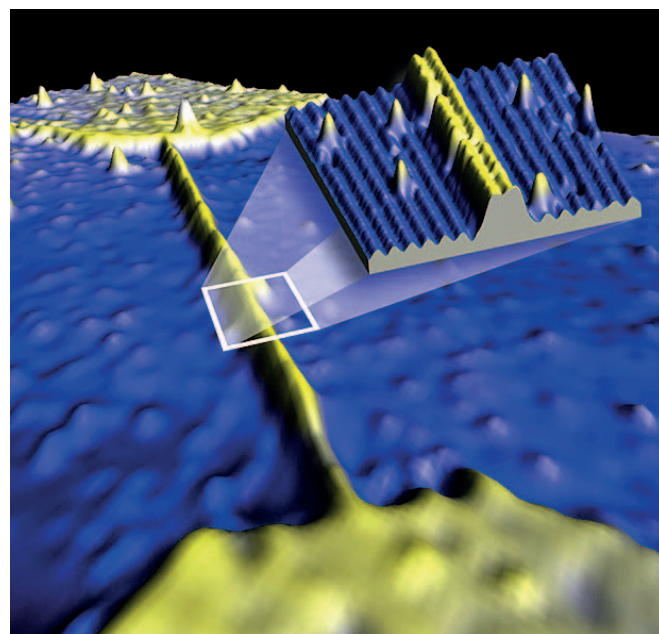
Другой предпосылкой ожидаемого конца диалектического витка эволюции микроэлектроники можно считать создание фирмой IBM элемента памяти одного бита [4] на двенадцати атомах железа с использованием эффекта антиферромагнетизма (рис.3).

Более того, в Институте квантовой оптики им. Макса Планка (Германия) было показано, что

квантовая память одного кубита может быть реализована на одном атоме рубидия 87 [5].

И наконец, еще одно необходимое и достаточное условие для создания квантового вычислителя – это осуществленная возможность формирования кремний-фосфорных проводников высотой в один атом и шириной в четыре атома (рис.4). Причем проводимость таких проводников сравнима с проводимостью медных проводников и отмечается выполнение закона Ома на квантовом уровне [6].

Следует напомнить, что если речь идет о цифровом вычислительном устройстве, то применяемая для его синтеза система элементов должна обладать функциональной полнотой. И в этом смысле полученный одноатомный "транзистор" реализует



**Рис.4.** СТМ-изображение кремний-фосфорного проводника

\* А.Гейм и К.Новоселов – выпускники Московского университета им. С.Ю.Витте в Черноголовке. Они впервые получили лист графена, за что и были удостоены Нобелевской премии.

логическую операцию НЕ (инверсию), для обеспечения же функциональной полноты как минимум необходимо наличие логического элемента И (конъюнкции), либо элемента ИЛИ (дизъюнкции). Такая задача, скорее всего, может быть решена на уровне физических принципов взаимодействия спинов электронов соседних атомов, участвующих в реализации переключательной функции синтезируемого логического элемента.

Все эти предпосылки неизбежного появления диалектического скачка имеют непосредственное отношение к ближайшей перспективе разработки квантового вычислителя. Вместе с тем в последнее время на основе достижений микроэлектроники и создания наноструктурированных материалов прогрессирует новое направление развития электроники – микросистемотехника [7], предполагающее сенсорный анализ состояния различных сред (физических, химических, биологических) и направленное управление этими средами.

Структура микросистемотехнического устройства включает первичные чувствительные элементы (ПЧЭ) – сенсоры, представляющие различные параметры среды в виде аналоговых сигналов, которые затем преобразуются в цифровой вид для обработки в микропроцессоре и формирования сигналов управления. В зарубежной научно-технической литературе аналогом микросистемотехнического устройства по терминологии является интеллектуальная сенсорная система [8]. С точки зрения технологической реализации аналого-цифрового преобразования, микропроцессорной обработки и цифро-аналогового преобразования, для получения сигналов воздействия на среду решающего значения не будет иметь, окажется ли промышленно достижимой квантовая технология, или же реальная полупроводниковая технология достигнет предельно прогнозируемого проектного уровня 5 нм. Для микросистемотехники или сенсорных систем существенным является физический процесс преобразования какого-либо свойства среды в электронный сигнал, ну, а далее, с точки зрения функциональности устройства, следует общеизвестная "электронная рутинка".

Переход от различных свойств среды к их электронному представлению описывается пограничными физическими явлениями, такими, в частности, как оптоэлектронные, магнитоэлектронные, акустоэлектронные, микроэлектромеханические, теплоэлектронные (криоэлектронные), хемотронные, биоэлектронные, которые известны достаточно давно, однако, в последнее время приобрели актуальность именно в силу функциональной

востребованности и технологических возможностей микросистемотехники.

## ФОТОЭЛЕКТРОННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

Наиболее простым и технологичным способом реализации фотоэлектронного преобразования следует признать облучение полупроводника монохроматическим потоком фотонов  $\Phi_\omega(\lambda)$  с длиной волны  $\lambda$ . Вследствие облучения в ограниченном слое между поверхностью ( $x=0$ ) и границей ( $x=d$ ) происходит генерация пар электрон-дырка, образующих фототок:

$$I_\phi(\lambda) = q\eta(\lambda) \int_0^d \alpha(\lambda)\Phi(x)dx = \\ = q\eta(\lambda)\Phi_\omega(\lambda)[1 - \exp(-\alpha(\lambda)d)],$$

где  $q$  – заряд электрона,

$\alpha(\lambda) = 4\pi k_{si}(\lambda)/\lambda$  – коэффициент абсорбции фотонов для кремния,

$k_{si}$  – коэффициент поглощения.

В фотонном детекторе с p-n-переходом на основе решения уравнений непрерывности плотность тока электронов  $J_n(x)$  и дырок  $J_p(x)$  для одномерной модели определяется уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} J_n(x) &= q\mu_n E(x)n(x) + qD_n \frac{\partial n(x)}{\partial x}, \\ J_p(x) &= q\mu_p E(x)p(x) + qD_p \frac{\partial p(x)}{\partial x}, \end{aligned} \right\}$$

где  $\mu_n$  – подвижность электрона,

$n(x)$  – концентрация электронов на глубине  $x$ ,

$D_n$  – коэффициент диффузии электронов,

$\mu_p$  – подвижность дырки,

$p(x)$  – концентрация дырок на глубине  $x$ ,

$D_p$  – коэффициент диффузии дырок (соотношение Эйнштейна:  $D/\mu = k_B T/q$ ).

Значительно большую чувствительность фотоэлектронного преобразования обеспечивают фотодиоды с лавинным умножением, которое определяется высоким уровнем легирования полупроводниковых слоев перехода. Получаемые высокие значения напряженности электрического поля позволяют генерируемым парам электрон-дырка приобрести энергию, вызывающую ударную ионизацию, при которой дырка характеризуется коэффициентом электронной ионизации  $\alpha$ , а электрон – коэффициентом дырочной ионизации  $\beta$ . Тогда для фототоков получаем выражения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial n(x)}{\partial x} &= \alpha I_n(x) + \beta I_p(x) \\ \frac{\partial p(x)}{\partial x} &= -\alpha I_n(x) - \beta I_p(x) \\ I_n(x) + I_p(x) &= M \cdot I_{pn}, \end{aligned} \right\}$$

где  $M$  – коэффициент лавинного умножения,  
 $I_{рп}$  – полученный фототок в р-п-переходе слабого поля без лавинного умножения.

Если допустить, что  $\alpha = \beta$ , то коэффициент лавинного умножения определяется выражением:

$$M = \frac{1}{1 - \int_0^{\omega} \alpha dx},$$

где  $\omega$  – ширина обедненной зоны.

Фотоэлектронные преобразователи с лавинным умножением в силу высокой концентрации легирующих примесей имеют весьма короткое время жизни неосновных носителей, что приводит к сильной спектральной зависимости фототока с максимумом в области 500–600 нм. Такое свойство позволяет использовать эти приборы в медицинской томографии. Одним из наиболее выдающихся достижений оптоэлектронной сенсорики является разработка однокристалльного 16-канального микроспектрометра с использованием оптических микросистем, реализующих интерферометры Фабри-Перро [9].

На основе эффекта оптоэлектронного преобразования в ОАО "Авангард" разработаны и производятся серийно светоизлучающие и фотоприемные волоконно-оптические модули (рис.5а, б).

Комплекты передающих и приемных оптоэлектронных модулей с высокоэффективными неохлаждаемыми лазерными структурами имеют высокий энергетический потенциал, могут применяться в линиях повышенной

протяженности, либо в линиях с большим затуханием, обеспечивая точную передачу цифровых и аналоговых сигналов. На основе этих модулей создан приемо-передающий оптоэлектронный модем (рис.5в), для применения в аппаратуре объектовой и межобъектовой связи, кабельного телевидения, информационных компьютерных сетей, медицинской и военной технике, системах контроля и управления энергетическими установками, а также в автоматизированных системах информационного обмена.

### АКУСТОЭЛЕКТРОННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

Один из наиболее перспективных пограничных физических эффектов связан с существованием в поверхностном слое твердого тела механических колебаний атомов вещества, порождающих наиболее часто встречающиеся поверхностные акустические волны (ПАВ) Рэлея, имеющие вертикальную поляризацию. Смещение  $\vec{u}$ -волн Рэлея, распространяющихся по поверхности изотропного упругого тела, выражается через скалярный  $\varphi$  и векторный  $\vec{\psi}$  потенциалы в виде уравнения:

$$\vec{u} = \text{grad}\varphi + \text{rot}\vec{\psi}.$$

Поскольку волна Рэлея поляризована эллиптически, смещение вдоль распространения волны  $u_x$  и смещение поперек распространения волны  $u_z$  определяются уравнениями:

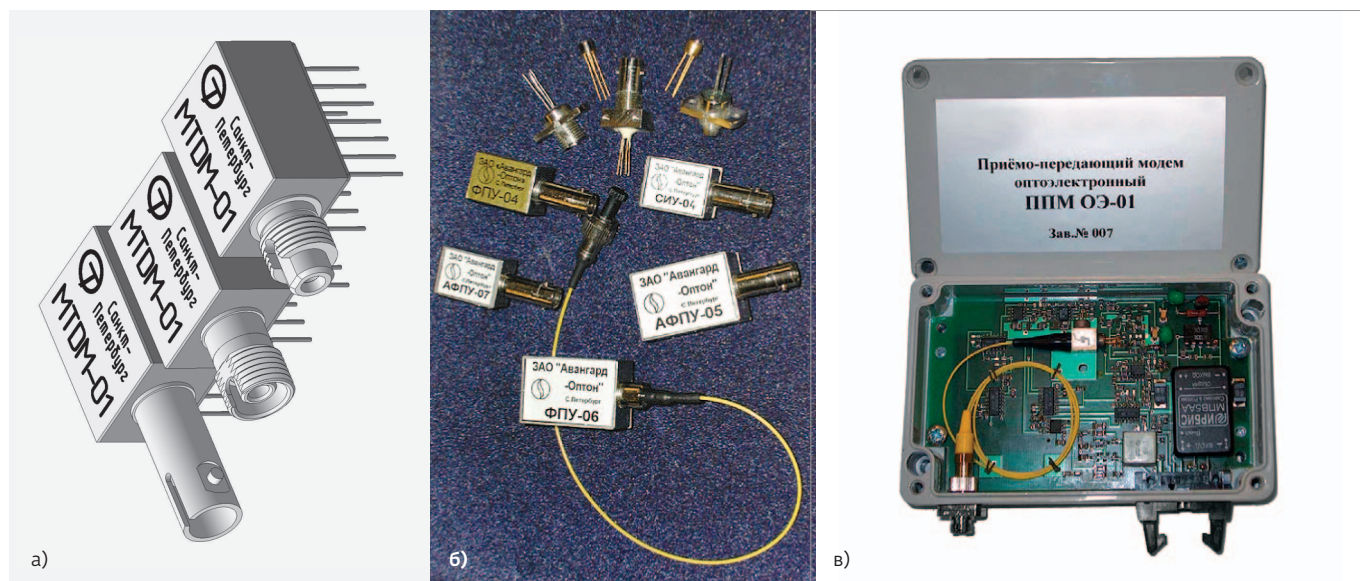


Рис.5. Светоизлучающие (а) и фотоприемные (б) оптоэлектронные модули и приемо-передающий модем (в)

$$\left. \begin{aligned} u_x &= \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial z}, \\ u_z &= \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x}. \end{aligned} \right\}$$

Решение этих уравнений с учетом закона Гука для изотропного тела описывает поверхностную акустическую волну в виде:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \varphi_0 \exp[pr + i(qx - \omega t)], \\ \psi &= \psi_0 \exp[sz + i(qx - \omega t)] \end{aligned} \right\},$$

где:  $\omega$  и  $q$  – частота волны и ее волновое число,  
 $r$  и  $s$  – коэффициенты спада волн сжатия и сдвига в глубину от поверхности.

При условии существования ненулевых решений получается дисперсионное уравнение Рэлея в виде:

$$D(q, \omega) = (q^2 + s^2)^2 - 4q^2 ps = 0.$$

Для поверхностных акустических волн Гуляева-Блюштейна [10, 11], образуемых смещением акустического поля упругих смещений  $u$  в твердом теле с полем приграничных электрических колебаний с SH-поляризацией (горизонтальной), поле упругих смещений описывается уравнением:

$$u = U \exp[i(kx - \omega t)] \exp(qy),$$

где  $k = \omega/v$ , ( $v$  – фазовая скорость волн Гуляева-Блюштейна).

Потенциалы дополнительного электрического поля в кристалле ( $\Phi$ ) и вне кристалла ( $\Phi_0$ ) описываются уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= F \exp[i(kx - \omega t)] \exp(ky), \\ \Phi_0 &= F_0 \exp[i(kx - \omega t)] \exp(-ky) \end{aligned} \right\},$$

где  $F$  и  $F_0$  – амплитуды потенциалов дополнительных электрических полей в кристалле и вне его.

Дисперсионное уравнение для волн Гуляева-Блюштейна принимает вид:

$$D(q, \omega) = \chi - \frac{\eta}{1 + \eta} \cdot \frac{\epsilon_d}{\epsilon + \epsilon_d} q = 0,$$

где:  $\chi$  – константа спадания колебаний вглубь пьезоэлектрика,  
 $\eta$  – константа электромеханической связи,  
 $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрика,  
 $\epsilon_d$  – диэлектрическая проницаемость пограничной среды.

Волны Гуляева-Блюштейна распространяются медленнее волн Рэлея в безграничном кристалле и на их скорость влияет состояние окружающей среды, что позволяет на этой основе проектировать различные микросистемотехнические сенсоры.

Если на поверхности твердого тела периодически расположены системы неоднородностей, то на них возможно рассеяние ПАВ, сопровождаемое интерференцией волн, существенно зависимой от соотношения между периодом структуры и длиной волны. Когда одна из гармоник поверхностных напряжений имеет волновое число, равное или близкое к волновому числу одной из собственных волн системы, происходит интенсивное (резонансное) возбуждение соответствующей волны.

Если на поверхности имеется проводящий элемент, то при распространении ПАВ на его концах возникает электрическое напряжение. В этом и заключается сущность акустоэлектрического эффекта. Он возникает в результате перемещения носителей заряда акустической волной, которая передает часть импульса, переносимого волной, электронам проводимости, в результате чего на них (электроны) действует средняя сила, направленная в сторону распространения волны.

При построении теории акустоэлектрического преобразования в твердом теле классические уравнения Максвелла в дифференциальной форме для аргументов напряженности электрического поля  $\mathbf{E}$ , напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$ , электрической индукции  $\mathbf{D}$  и магнитной индукции  $\mathbf{B}$  представляются в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \text{rot } \mathbf{E} &= -\partial \mathbf{B} / \partial t \approx 0, \\ \text{rot } \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t, \\ \text{div } \mathbf{D} &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Физический смысл первого из этих уравнений означает, что преобразование осуществляется в квазистатическом приближении. В силу чего электрические поля, порождаемые в твердом теле упругой волной, возникают вследствие перераспределения положительных и отрицательных зарядов в объеме среды. Созданный при этом зарядовый "рельеф" переносится упругой волной со скоростью звука. Последняя в  $\approx 10^5$  раз меньше скорости распространения электромагнитных волн. Поэтому эти заряды можно считать неподвижными, а электрические поля, создаваемые ими, – потенциальными, подчиняющимися законам электростатики.

Во втором уравнении принимается условие, согласно которому плотность тока проводимости  $\mathbf{j} = 0$ , и учитывается только плотность тока

смещения  $j_d = \partial \mathbf{D} / \partial t$ . Это объясняется тем, что пьезоэлектрики, используемые в электроакустическом преобразователе, должны быть непроводящими. В противном случае проводимость твердого тела, индуцированная акустической волной, будет шунтироваться собственной проводимостью, которая снизит в твердом теле амплитуду переменного поля. Условие равенства нулю дивергенции электрической индукции  $\mathbf{D}$  в третьем уравнении следует из того, что пьезоэлектрик считается непроводящим и плотность объемного заряда в нем равна нулю. И, наконец, четвертое уравнение Максвелла, которое не включено в систему приведенных выше дифференциальных уравнений,  $-\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$ , отражает (как и для произвольного пространства) постулат отсутствия в природе магнитных зарядов.

Акустоэлектронное преобразование состоит в том, что при передаче импульса от акустической волны электронам на каждый отдельный электрон действует сила:

$$F = \alpha_e I / n_e v_s,$$

где:  $\alpha_e$  – коэффициент электронного поглощения акустической волны,  
 $I$  – интенсивность акустической волны,  
 $n_e$  – концентрация свободных электронов,  
 $v_s$  – скорость акустической волны.

Эта сила и вызывает появление акустоэлектрического тока, плотность которого определяется соотношением Вайнрайха [12]:

$$j_{ae} = \mu \alpha_e I / v_s,$$

где  $\mu$  – подвижность электронов.

В свою очередь, акустоэлектрический ток в пьезоэлементе длиной  $L$  вызывает появление акустоэдс:

$$U_{ae} = \frac{1}{e} \int_0^L F(x) dx = \frac{\alpha_e \mu I_0}{\alpha \sigma v_s} (1 - e^{-\alpha L}),$$



Рис.6. Акустоэлектронный (а) и пьезокерамический (б) гироскопы

где:  $e$  – заряд электрона,

$I_0$  – интенсивность акустической волны на входе,

$\alpha$  – коэффициент поглощения акустической волны с учетом электронного и решетчатого поглощения,

$\sigma$  – проводимость твердого тела с пьезоэффектом.

Характеристики акустической волны могут изменяться под воздействием различных физических свойств окружающей среды, например, температуры, давления, влажности, гравитации и др., а поэтому акустоэлектронное преобразование представляется одним из пограничных эффектов, составляющих основу микросистемотехники.

Технологические достижения в области изготовления акустоэлектронных первичных чувствительных элементов, в частности, новой технологии локализации акустической энергии и поверхностного съема информации позволили отечественной промышленности создать акустоэлектронные (ОАО "Авангард") и пьезокерамические (ОАО "Элпа") датчики угловой скорости (гироскопы) (рис.6) с наилучшими характеристиками в этом классе устройств [13, 14]. Получены диапазоны измерения угловых скоростей  $\pm 300, \pm 1000$  град./с при относительной погрешности 0,1 и 1,0% и порогах чувствительности 0,1 и 1,0 град./с, соответственно. Эти гироскопы используются в системах стабилизации и навигации движущихся объектов и, в частности, учитывая их конструктивно-технологическое исполнение и широкий диапазон рабочих температур (от  $-40$  до  $85^\circ\text{C}$ ), в устройствах стабилизации и управления параметрами движения платформ спутниковых антенн.

Прецизионная технология формирования чувствительной консоли с точностью 0,1 мкм

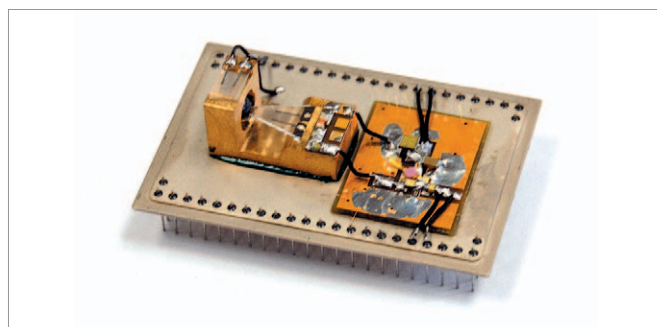


Рис.7. Акустоэлектронный преобразователь линейных ускорений



**Рис.8.** Акустоэлектронные датчики давления: пассивный (а), активный (б)

позволила достичь конкурентных технических характеристик акустоэлектронного преобразователя линейных ускорений (рис.7) – измерения ускорений в диапазонах  $\pm 25g$ ,  $\pm 50g$ ,  $\pm 100g$  с нелинейностью  $< 5\%$ . К конкурентным характеристикам этих датчиков также следует отнести высокое быстродействие и устойчивость к радиационному воздействию, что создает перспективу двойного применения в системах навигации и управления подвижными объектами.

Технология МСТ-изделий на ПАВ позволяет реализовать уникальные акустоэлектронные датчики давления с абсолютной пассивностью (относительно источников питания) при измерении давления жидких и газообразных сред [15, 16] в труднодоступных и радиационно опасных местах с опросом на расстоянии по радиоканалу (рис.8а). Технические возможности такого датчика позволяют измерять давление от 0,5 до 2,5 МПа с относительной приведенной погрешностью  $\pm 5\%$  и чувствительностью от 0,2 до 0,08 Гц/Па.

Введение активного режима работы акустоэлектронного датчика давления [17] позволяет получить



**Рис.10.** Акустоэлектронная силоизмерительная шайба



**Рис.9.** Пассивные акустоэлектронные датчики напряженно-деформированного состояния и считыватель показаний

меньшую относительную погрешность измерений давления, равную 0,02–0,06%, и дополнительно создает возможность измерения температуры с абсолютной погрешностью  $\pm 0,05^\circ\text{C}$  (рис.8б).

Такие датчики применяются в инерциальных системах навигации малой и большой авиации, высотомерах, системах измерения параметров воздушного потока, измерения давления в магистральных газораспределительных системах.

Пассивные акустоэлектронные датчики иного конструктивно-технологического исполнения (рис.9) позволяют получить информацию о напряженно-деформированном состоянии различных строительных конструкций.

Актуальность задачи измерения больших значений осевых сил сжатия-растяжения, действующих на болты, шпильки, анкеры и подобные элементы соединений, определилась известными чрезвычайными обстоятельствами на Саяно-Шушенской ГЭС. Принцип действия датчика-измерителя – силоизмерительной шайбы (СИШ) – основан на преобразовании осевой сжимающей силы в изменение резонансных частот радиосигналов, отраженных от пассивных акустоэлектронных чувствительных элементов [17]. Производимые СИШ (рис.10) позволяют контролировать силу сжатия от 35 до 130 тс с основной приведенной погрешностью 4%.

Технологические особенности изготовления пассивных ПАВ-меток (рис.11), на которые конструктивно заносится кодовая последовательность отражающих элементов, создают основу систем радиочастотной идентификации (РЧИД) с уникальными конкурентными преимуществами относительно других аналогичных систем:

- невозможность изменения (подделки) идентификационного кода;
- долговечность и неизменность характеристик в процессе эксплуатации (более 10 лет);



Рис.11. Образцы ПАВ-меток: для железнодорожного транспорта (а), для автомобильного транспорта (б, в)

- устойчивая работа в сложной электромагнитной обстановке, на металле, в замкнутых пространствах, под землей;
- идентификация движущихся объектов (до 120 км/ч);
- высокая радиационная стойкость;
- высокая стойкость к факторам воздействия внешней среды (грязь, влага, снег, лед, температура).

Другие виды преобразования характеристик (свойств) среды в электронный сигнал (магнитоэлектронное, хемотронное и микроэлектромеханическое) как основа развития приоритетных направлений микросистемотехники будут рассмотрены в следующем номере журнала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Лазер И.** Схемотехника радиоэлектронной аппаратуры. Технологические аспекты. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2008, №8, с.102–107.
2. **Fuechsle M., Miwa J.A., Mahapatra S., Ryu H., Lee S., Warschkow O., Hollenberg L.C.L., Klimeck G., Simmons M.Y.** A single-atom transistor. – Nature Nanotechnology, 2012, v.7, p.242–246.
3. **Britnell L., Gorbachev R.V., Jalil R., Belle B.D., Schedin F., Mishchenko A., Georgiou T., Katsnelson M.I., Eaves L., Morozov S.V., Peres N.M.R., Leist J., Geim A.K., Novoselov K.S., Ponomarenko L.A.** Field-Effect Tunneling Transistor Based on Vertical Graphene Heterostructures. – Science, 24 February 2012, v.335, №6071, p.947–950.
4. **Loth S., Baumann S., Lutz C.P., Eigler D.M., Heinrich A.J.** Bistability in Atomic-Scale Antiferromagnets. – Science, 13 January 2012, v.335, №6065 p. 196–199.
5. **Specht H.P., Nölleke C., Reiserer A., Uphoff M., Figueroa E., S. Ritter, Rempe G.** A single-atom quantum memory. – Nature 473, 12 May 2011, p.190–193.
6. **Weber B., Mahapatra S., Ryu H., Lee S., Fuhrer A., Reusch T.C.G., Thompson D.L., Lee W.C.T., Klimeck G., Hollenberg L.C.L., Simmons M.Y.** Ohm's Law Survives to the Atomic Scale. – Science, 6 January 2012, v.335, №6064, p.64–67
7. **Шубарев В.** Микросистемотехника – инновационное направление развития электроники. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2010, №5, с.98–109.
8. Интеллектуальные сенсорные системы, под ред. Дж.К.М.Мейджера, пер. с англ., под ред. В.А.Шубарева. М: Техносфера, 2011, 464 с.
9. **Correia J.H., Bartek M., Wolffenbuttel R.F.** High-selectivity single-chip spectrometer in silicon for operation in the visible part of the spectrum. – IEEE Transactions on Electron Devices, 2000, v.47, p.553–559.
10. **Гуляев Ю.В.** Поверхностные электрорезонансные волны в твердых телах. – Письма в ЖЭТФ, 1969, т.9, №1, с.63–65.
11. **Bleustein J.L.** A new surface wave in piezoelectric materials. – Appl. Phys. Letters, 1968, v.13, №12, p.412–413.
12. **Weinreich G., White H.G.** Observation of the acoustoelectric effect. – Phys. Rev., 1957, v.106, №5, p.1104.
13. Патент РФ №2390727, 2009. Гироскоп на поверхностных акустических волнах. / Калинин В.А., Лукьянов В.Д., Шубарев В.А., Мельников В.А.
14. Патент РФ №2387951, 2010. Пьезоэлектрический гироскоп. / Калинин В.А., Лукьянов В.Д., Шубарев В.А., Мельников В.А.
15. Патент РФ №2402000, приоритет 09.09.2009 г. Барочувствительный элемент. / Савельев Ю.В., Калинин В.А.
16. Патент РФ № 24527943, приоритет 15.02.2010 г. Пассивный датчик на поверхностных акустических волнах. / Калинин В.А., Плесски В.П., Шубарев В.А., Мельников В.А.
17. Патент РФ №2410655, приоритет 11.01.2010 г. Силовой измерительное устройство. / Дикарев В.И., Шубарев В.А., Мельников В.А., Петрушин В.Н., Калинин В.А.