



ФИЗИЧЕСКАЯ И ХИМИЧЕСКАЯ СЕНСОРИКА МИКРОСИСТЕМОТЕХНИКИ.

ЧАСТЬ II

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

Пограничные оптоэлектронное и акустоэлектронное преобразования, рассмотренные в первой части этой статьи*, достаточно широко используются в практике микросистемотехники, позволяют в серийных изделиях реализовать непревзойденные конкурентные преимущества по массогабаритным и функциональным характеристикам. Предлагаемый в этом номере журнала материал относится к магнитоэлектронному, микроэлектромеханическому и хемотронному преобразованиям. Особое внимание уделяется перспективам сенсорного рынка, который по оптимистическим оценкам к 2022 году может достигнуть 1 трлн.долл.

МАГНИТОЭЛЕКТРОННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

Магнитоэлектронное преобразование основано на использовании эффекта Холла, сущность которого состоит в том что, на движущиеся в твердом теле под действием электрического поля E носители заряда – электроны или дырки (обладающие зарядом q или $-q$ соответственно) при наличии поперечного магнитного поля с индукцией B действует сила Лоренца F , определяемая уравнением:

$$F = (q \oplus -q)E + (q \oplus -q)[v \times B],$$

где \oplus – символ, обозначающий логическую операцию "исключенное ИЛИ", v – скорость дрейфа основных носителей.

В случае электронной проводимости твердого тела скорость дрейфа v_n зависит от подвижности электронов μ_n и вычисляется по формуле:

$$v_n = \mu_n E.$$

Тогда поток электронов с концентрацией n создает ток плотностью J_n , определяемой уравнением:

$$J_n = q \mu_n n E.$$

На носители тока, движущиеся в магнитном поле с индукцией B , действует сила Лоренца F_n , определяемая выражением:

$$F_n = q \mu_n [E \times B].$$

Причем эта сила будет коллинеарна как к направлению электрического поля дрейфа носителей, так и к направлению внешнего магнитного поля B . Возникший градиент концентрации носителей увеличивается до тех пор, пока определяемое им (градиентом) поперечное электрическое поле E_x и соответствующее ему магнитное поле не будут уравновешены с внешним магнитным полем согласно уравнению:

$$q[v \times B] + qE_x = 0.$$

Созданное таким образом поперечное электрическое поле E_x называется полем Холла и для носителей-электронов представляется как:

$$E_x = -\mu_n [E \times B].$$

Поле Холла может быть выражено как функция плотности тока носителей заряда уравнением:

$$E_x = -\frac{1}{qn} [J \times B] = -R_x [J \times B].$$

R_x – это коэффициент Холла и в общем случае вне зависимости от типа носителей заряда для сильно легированного примесного полупроводника определяется в виде:

$$R_x = (q \oplus -q) D_r / q^2 n.$$

Здесь D_r – коэффициент квантового рассеивания носителей за счет теплового колебания кристаллической решетки и ионизированных примесей, он равен 1,18-1,93.

Если ввести конструктивный параметр ширины элемента Холла – d и интегрировать

* Фотоника, 2014, № 4, с. 88-98.

поле Холла по поперечной оси y относительно направления движения носителей заряда, то можно получить уравнение напряжения Холла U_x в виде:

$$U_x = \int_0^d \mathbf{E}_x dy = \mu_n \mathbf{E}_x B d.$$

Другой конструктивный параметр δ – толщина элемента Холла – позволяет определить напряжение Холла через ток основных носителей:

$$U_x = R_x / \delta (J d \delta B) = R_x J d B.$$

Магнитоэлектронное преобразование характеризуется чувствительностью $S_{\text{хн}}$, которая определяется формулой:

$$S_{\text{хн}} = R_x \mu D_i d / l,$$

где l – длина элемента Холла.

Для собственных полупроводников, когда выполняется условие равенства концентраций электронов и дырок ($n=p$), коэффициент Холла имеет вид:

$$R_x = \frac{D_r (\mu_n - \mu_p)}{q n (\mu_n + \mu_p)}.$$

Чувствительность по току смещения преобразования Холла определяется формулой:

$$S_{\text{хн}} = \frac{D_r |R_x|}{\delta}.$$

Таким образом, значение магнитной характеристики среды можно преобразовать в электронный сигнал для последующего управления параметрами среды.

Значительных успехов в области магнитной микроскопии достигла фирма SENIS GmbH, разработавшая трехмерный зонд Холла (рис.12), в котором первичный чувствительный элемент имеет размер 150×150 мкм [18].

Дальнейшее развитие эти работы получили в создании интегрального микрозонда Холла с размерами чувствительной зоны $2,4 \times 2,4$ мкм (рис.13), что позволило реализовать сканирующий магнитный микроскоп с шагом сканирования $5-10$ мкм [19].

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

Успехи микроэлектронных технологий в области электронно-лучевой эпитаксии и прецизионной фотолитографии для создания электронных структур привели к идее использования этих технологий и для изготовления микромеханических устройств, технологически однородных с электронными элементами, реагирующими на электрические воздействия электронной системы, либо на некоторые, например, термические свойства среды. В связи с такой интегральной композицией микроэлектроники и микромеханики возник термин микроэлектромеханические системы (МЭМС). Основной целью в МЭМС-технике является создание актюаторов – устройств, преобразующих различные виды энергии в механические перемещения. Однако, при переходе от макро-механики (классической механики) к микромеханике возникает парадокс изменения отношений различных физических категорий, с помощью которых описывается поведение механических систем. Такие свойства микромеханических устройств были названы законами пропорциональной миниатюризации [20, 21], поскольку они существенно зависят от масштаба длины, определяемого размерами микромеханических объектов L . Соотношение некоторых важнейших физических категорий механики описывается безразмерными числами Коши, Вебера, Фруда, Фурье и Рейнольдса.

Число Коши (Ca) отражает соотношение инерционных сил и сил упругости или, в более общем виде, отношение кинетической энергии к энергии



Рис.12. Трехмерный зонд Холла с чувствительным элементом 150×150 мкм



Рис.13. Трехмерный зонд Холла с чувствительной зоной 2,4×2,4 мкм

сжатия среды и в макромеханике определяется формулой:

$$Ca = \frac{\rho\omega^2}{E},$$

где: ρ – плотность среды,
 ω – характеристическая частота колебаний,
 E – модуль упругости Юнга.

Для микромеханических систем число Коши Ca_M приобретает вид:

$$Ca_M = \frac{\rho\omega^2}{E} L^2.$$

Поскольку Ca_M зависит от квадратов частоты и длины, МЭМС обладают очень высокими собственными частотами и улучшенными динамическими характеристиками, но более низким временем реакции на возмущение.

Число Вебера (We) отражает соотношение инерциальных сил и сил поверхностного натяжения в соответствии с формулой:

$$We = \frac{\rho v^2}{\sigma_s} L,$$

где v – скорость, σ_s – поверхностное натяжение.

В соответствии с законом пропорциональной миниатюризации число Вебера We_M приобретает вид:

$$We_M = \frac{\rho v^2}{\sigma_s} L^2.$$

Следовательно, в микросистемах силы поверхностного натяжения преобладают над силами инерции.

Число Фруда (Fr) отражает соотношение силы инерции и силы гравитации согласно формуле:

$$Fr = \frac{v^2}{gL},$$

где g – ускорение силы тяжести.

В связи с тем, что число Фруда обратно пропорционально характеристической длине механического объекта, то в микросистемах эффектом гравитации можно пренебречь.

Число Фурье (Fo) определяет соотношение между скоростью изменения тепловых условий в окружающей среде и скоростью изменения поля температуры внутри рассматриваемого микромеханического элемента, что описывается выражением:

$$Fo = \frac{\lambda t}{c_p \rho L^2}.$$

Здесь t – время, λ – коэффициент теплопроводности, c_p – удельная теплоемкость, ρ – плотность. Причем последние параметры относятся к микромеханическому элементу. Поскольку число Фурье обратно пропорционально квадрату характеристического размера, тепловые процессы в микромеханических элементах имеют настолько большую скорость, что их возможно использовать в качестве быстродействующих актуаторов, управляемых параметром температуры среды.

Число Рейнольдса (Re) характеризует соотношение между инерционными силами и силами трения микромеханического элемента относительно окружающей среды или вязкостью среды, что определяется формулой:

$$Re = \frac{vL}{\nu},$$

где ν – кинематическая вязкость среды.

В связи с прямо пропорциональной зависимостью значения числа Рейнольдса от характеристического размера в микромеханических структурах возможен только ламинарный поток, а поэтому в уравнениях Навье-Стокса, описывающих движение вязкой жидкости, допустимо исключение нелинейной части, что приводит к упрощению их решения.

В соответствии с программой Союзного государства "Микросистемотехника" (включала разработку групповой технологии изготовления МЭМС-устройств) был создан микромеханический акселерометр (рис.14), имеющий диапазон измерения линейных ускорений 2g в полосе пропускания 100 Гц по одной оси измерения.

Такой датчик ускорения может применяться в системах навигации и управления подвижными объектами, например, автотранспортом, а также в устройствах обеспечения безопасности зданий и сооружений.



ХЕМОТРОННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

Этот тип пограничного физического явления, как правило, используется для определения газовых характеристик окружающей среды на основе хемосорбционного взаимодействия газов среды с поверхностью (или объемом) полупроводникового материала, приводящего к увеличению (в случае газов восстановительного типа) или уменьшению (в случае газов окислительного типа) концентрации электронов в его зоне проводимости. Основным полупроводником с наиболее ярко выраженным хемосорбционным эффектом является двуокись олова SnO_2 (проводимость n-типа). При изменении концентрации компонента газов в воздухе основным активизирующим элементом для работы пленки металлооксида SnO_2 выступает кислород. Наличие сенсibiliзирующего поверхность пленки газа O_2 – обязательное условие устойчивой работы сенсора. Сенсор на основе SnO_2 реагирует на изменение концентрации O_2 в воздушной среде в диапазоне концентрации кислорода 0–20%.

Исследования электронного спинового резонанса на поверхности SnO_2 [22] показали, что форма хемосорбции изменяется в последовательности

$\text{O}_2^- \rightarrow \text{O}^- \rightarrow \text{O}_2^-$ с увеличением температуры, причем эти переходы имеют резкий характер.

Пленка SnO_x – полупроводник n-типа, что объясняется многовалентностью катиона олова (Sn) и нестехиометричностью ее состава. А это означает, что пленка SnO_x содержит 85% SnO_2 и 15% SnO . Ион Sn^{2+} с двумя избыточными электронами действует в решетке Sn^{4+} как донор: $\text{Sn}^{2+} \rightarrow \text{Sn}^{4+} \rightarrow 2\bar{e}$.

Когда электроотрицательные молекулы, такие как кислород или NO_x (NO или NO_2), достигают поверхности полупроводника, а энергия, выделяющаяся при образовании отрицательного иона из нейтрального атома и электрона, больше работы выхода, они стремятся получить электроны из зоны проводимости полупроводника и, таким образом, хемосорбируются на поверхности. При дальнейшей адсорбции поверхность заряжается все в большей степени отрицательно, а в объеме полупроводника образуется положительно заряженный слой. В результате адсорбции акцепторных молекул O_2 и NO_x энергетические уровни смещаются.

Если запрещенная зона материала подложки значительно шире, чем у газочувствительного слоя, то подложка остается электрически инертной. Толщина области пространственного заряда L

связана с концентрацией доноров N и высотой потенциального барьера U_s выражением:

$$L = \frac{2\epsilon\epsilon_0\sqrt{U_s}}{qN},$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость полупроводника, q – заряд электрона.

Так как газочувствительная пленка SnO_x обладает значительным сопротивлением (10 кОм–10 МОм) и малой (150–200 нм) толщиной, область пространственного заряда ионизированных доноров (газовых компонентов) распространяется на всю толщину пленки. Относительно полное обеднение тонкого высокоомного полупроводника ведет к увеличению сопротивления, происходит более полное смещение цепи $\text{Sn} \rightarrow \text{SnO} \rightarrow \text{SnO}_2$.

Кроме описанного выше механизма проводимости существует и другая усредненная проводимость, создаваемая более глубокими частично ионизированными донорами и обусловленная термической ионизацией хемосорбированных ионов целевого газа A . Практически нет необходимости в полном обеднении пленок SnO_x , как предполагается зонной диаграммой. Газочувствительный слой сенсора полностью обеднен при обеднении границы между зернами, диаметр которых (в зависимости от технологии формирования) 30–80 нм. Сопротивление поликристаллических пленок, к которым относится и SnO_x , определяется формулой [23]:

$$R = \frac{g}{n_{\text{eff}}q\mu_{\text{eff}}},$$

где n_{eff} – эффективная концентрация носителей заряда в отдельном зерне;

μ_{eff} – эффективная подвижность в межзонной

области;

g – геометрический фактор.

Хемосорбционный перенос заряда критически зависит от размера зерна (геометрический фактор g) и от числа свободных носителей, участвующих в проводимости и поверхностных реакциях. Для кристаллов малого размера объемная концентрация поверхностных акцепторов может быть сравнима и даже больше, чем объемная плотность свободных носителей внутри слоя. В этом случае подвижность μ_{eff} в таких пленках не зависит от температуры и парциального давления, т.е. чем меньше размер зерна SnO_x , тем это обстоятельство сильнее проявляется. Однако, компонент n_{eff} зависит от температуры.

Согласно описанию, представленному в последней работе, хемосорбция O_2 на поверхности SnO_x происходит в два этапа:

- физическая сорбция: $S_A(A) + A_{(\text{газ})} \rightarrow S_A(A) + \Delta H_1$;
- хемосорбция, сопровождающаяся захватом электрона: $S_A(A) + e \rightarrow S_A(A^-) = \Delta H_2$.

Здесь ΔH_1 – экзотермическая энергия образования физически сорбированной, но электрически нейтральной частицы газа; ΔH_2 – экзотермическая энергия образования хемосорбированных ионов газа A . При этом должно соблюдаться условие $|\Delta H_1| \geq kT_x$, где T_x – температура рабочей зоны термосорбционнокаталитического датчика на основе SnO_x .

По условию Вейца на поверхности пленки предполагается 10^{13} хемосорбированных поверхностных ионов [24]. Так как на 1 см^2 поверхности приходится 10^{15} – 10^{16} поверхностных состояний, то на первых этапах реакции можно пренебречь взаимодействием между хемосорбированными ионами O_2^- . В этом случае можно воспользоваться уравнением Еловича [22]:

$$\frac{d[\text{O}_2]}{dt} = \alpha e^\beta [\text{O}_2],$$

где $[\text{O}_2]$ – количество адсорбированного кислорода за время t ; α , β , – константы.

Решение последнего уравнения может быть представлено в виде:

$$[\text{O}_2] = \frac{1}{\beta} \ln \alpha \beta \left(t + \frac{1}{\alpha \beta} e^{\beta[\text{O}_2]_0} \right) = \frac{1}{\beta} \ln \alpha \beta (t + t_0) + \gamma,$$

где t_0 – константа, учитывающая начальные условия.

Так как каждая молекула кислорода (O_2), сорбированная полупроводником, получает из объема полупроводника (SnO_x) один электрон, то $[e] = [\text{O}_2]$, где $[e]$ – концентрация электронов.



Рис.14. Микромеханический акселерометр



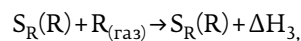
Удельное сопротивление материала SnO_x при фиксированной температуре пропорционально $[\text{O}_2]$. Тогда сопротивление $R(t)$ металлооксидного полупроводника SnO_x определяется уравнением:

$$R(t)|_{T=\text{const}} = A \log(t + t_0) + B,$$

где A, B – константы, зависящие от температуры.

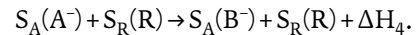
Как уже отмечалось выше, отсутствие кислорода в газовой смеси приводит к потере чувствительности вплоть до полной нечувствительности к повышенным концентрациям других компонентов воздуха. Следовательно, кислород играет определяющую роль в процессе термосорбционно-каталитической чувствительности SnO_x .

Процесс взаимодействия сорбированного на SnO_x кислорода $[\text{O}_2^-]$ с газовыми компонентами воздушной смеси можно представить следующим образом. При взаимодействии условного газа B с кислородом $[\text{O}_2^-]$ на первом этапе происходит реакция физической сорбции:



где S_R – вакантный уровень, ΔH_3 – экзотермическая энергия физической сорбции. Необходимое

условие физической сорбции – $|\Delta H_3| \geq kT_x$. Затем следует взаимодействие физически сорбированной частицы R с $S_A(A)$:



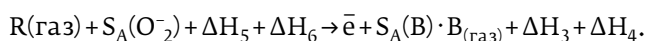
Здесь ΔH_4 – экзотермическая энергия реакции; B^- – хемосорбированные продукты реакции между A^- и R , $A^- = \text{O}_2^-$.

Далее происходит эмиссия электрона в зону проводимости, причем эмиссия будет термической, если уровень хемосорбированной частицы B лежит в запрещенной зоне: $S_A(B^-) + \Delta H_5 \rightarrow S_A(B) + e^-$. При этом необходимо выполнение условия $|\Delta H_5| < H_4$. Именно этот этап является ответственным за модуляцию проводимости " $\text{SnO}_x\text{-O}_2^-$ " и одновременно локальной температуры рабочей зоны.

Последним четвертым этапом является термическая десорбция продукта реакции B : $S_A(B) + \Delta H_6 \rightarrow S_A(B) + B_{(\text{газ})}$. Для прохождения последнего процесса необходимо выполнение условия $|\Delta H_6| \leq kT_x$, иначе реакционные состояния будут "отравлены" физически сорбированными продуктами реакции. Таким образом, суммарная реакция детектирования на SnO_x представляется в виде:



Рис.15. Термокатализический сенсор ТКС-2-А (а), газоанализатор АВУС-КОМБИ (б)



Из этого выражения следует, что в результате взаимодействия с молекулой активного газа генерируется один электрон на каждом реакционном состоянии.

Скорость генерации электронов на единицу площади определяется соотношением:

$$\frac{dn}{dt} = g - r,$$

где: g - скорость генерации, пропорциональная плотности потока анализируемого компонента газа $g = \alpha \cdot p_R$;

α_s - коэффициент "прилипания";

p_R - парциальное давление анализируемого компонента газа R .

Скорость r образования хемосорбированных частиц O_2 определяется выражением:

$$r = \beta \cdot n \cdot S_A(O_2^-),$$

где: $S_A(O_2^-)$ - концентрация физически сорбированных (нейтральных) сенсбилизирующих частиц;
 β_s - коэффициент поверхностной реакции.

При равновесии $\frac{dn}{dt} = 0$; $g = r$ и, полагая $n = S_A(O_2^-)$, получим:

$$n = \sqrt{\frac{\alpha_s}{\beta_s}} P_R.$$

Полная проводимость G термосорбционно-катализического сенсора на основе SnO_x - это комбинация фоновой проводимости, обусловленной концентрацией электронов, и проводимости электронов, освобожденных в результате реакции:

$$G = n_0 e_0 \mu t + n_0 e_0 \mu t \sqrt{\frac{\alpha_s}{\beta_s}} P_R = n_0 e_0 \mu t \left(1 + \sqrt{\frac{\alpha_s}{\beta_s}} P_R \right).$$

Динамические характеристики металлооксидных термосорбционно-катализических сенсоров зависят от величины поверхностного барьера Шотки U_s . Чем она больше, тем меньше скорость электронного переноса и, следовательно, скорость реакции металлооксида. Аналогично поведение SnO_x с такими газовыми компонентами, как галогениды (F_2, Cl_2, Br_2, I_2).

Взаимодействие термосорбционно-катализического сенсора на основе SnO_x с газом-восстановителем, например, с водородом (H_2) имеет ряд специфических особенностей. Возможны два типа реакции H_2 на поверхности SnO_x :

- диссоциация водорода после сорбции на поверхности и передача электронов в зону проводимости $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2\bar{e}$;
- взаимодействие водорода с адсорбированным кислородом $2H_2 + O_2^- \rightarrow 2H_2O + 2\bar{e}$.

Для первой реакции концентрация электронов $[e]$ определяется формулой:

$$[e] \sim \sqrt[3]{[H_2]},$$

где $[H_2]$ - концентрация водорода.

Для второй реакции $[e] \sim \sqrt[3]{[H_2]^2}$, при этом концентрация (O_2^-) должна быть достаточно велика и постоянна. Выделяющийся в результате поверхностных реакций водород может поглощаться в материалах в следующем количестве:

Sn - 5-12%;

Ni - 80-660%;

Zn - 80-2000%;

Pd - 860-23000%;

Cr - до 26000%.



Надо отметить, что при этом в SnO_x концентрируется и кислород, причем, если в структуре пленки SnO_x присутствует Pt или Pd, то они способны удерживать на каждой молекуле до 70–100 молекул кислорода.

Взаимодействие CO с термосорбционно-каталитическими пленками SnO_x происходит аналогично взаимодействию с H_2 : $\text{CO} \rightarrow \text{CO}^+ + \bar{e}$, и тогда $[e] \sim \sqrt[3]{[\text{CO}]}$. А в случае реакции $2\text{CO} + \text{O}^-_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + \bar{e}$

имеем $[e] \sim \sqrt[3]{[\text{CO}]^2}$.

Исследования чувствительности SnO_x -детекторов в чистом азоте (N_2), когда нет адсорбируемых ионов O^-_2 , показали, что основным механизмом реакции SnO_x с H_2 и CO является диссоциация.

Особое значение и особый отпечаток на работу SnO_x оказывает влага. Помимо сорбционных процессов, влажность за счет конденсации на поверхности сенсора характеризуется дополнительно через параметры поверхностного натяжения конденсированной пленки H_2O . Свободная энергия поверхности сенсора описывается, как приращение проводимости ΔG_s через поверхностное натяжение σ_s и суммарную площадь локальных островков ΔS конденсации H_2O , следующим образом:

$$\Delta G_s = \sigma_s \times \Delta S.$$

При повышении температуры происходит ослабление сил взаимного притяжения, что приводит к тому, что поверхностное натяжение уменьшается с увеличением температуры материала. Эта зависимость поверхностного натяжения от температуры в большинстве случаев не линейна:

$$\sigma_s(T) = \sigma_s(0) - (\delta\sigma_s/\delta T)T.$$

Температура $T_{кр}$, при которой выполняется условие $\sigma_s(0) = (\delta\sigma_s/\delta T) \cdot T_{кр}$, называется критической, когда $\sigma_s(T_{кр}) = 0$. При таких условиях поверхности раздела фаз не существует. В конденсированном состоянии H_2O не сможет находиться при $T_{кр} = 374^\circ\text{C}$. За счет же микрорельефа поверхности $T_{кр}$ для H_2O поднимается до 475°C .

В присутствии влаги изменяется система поверхностных состояний, описанная выше. Кроме того с повышением температуры происходит парение воды от поверхности и разложение воды за счет катализа пленки SnO_x .

Таким образом, хемотронное преобразование позволяет получить однозначную характеристику химического состояния



газовой среды в электронном представлении. Термокаталитические сенсоры, разработанные ОАО "Авангард" [25], реализуют чувствительность, например по метану не менее 20 мВ/1% об. при изменении чувствительности не более чем на $\pm 25\%$ в диапазоне температур от -40 до 60°C . Серийный образец термокаталитического сенсора ТКС-2-А показан на рис.15а. На основе этих сенсоров разработаны [26] и производятся серийно газоанализаторы АВУС-КОМБИ (рис.15б), позволяющие осуществлять измерения концентрации горючих и опасных газов (метана – CH_4 , пропана – C_3H_8 , угарного газа – CO) в диапазоне измерений 0–50% НКПР (CH_4 , C_3H_8), 0–300 мг/м³ (CO) с пределами основной абсолютной погрешности $\pm 2,5\%$ НКПР и ± 20 мг/м³ в широком диапазоне температур и разной степени влажности окружающей среды.

ПЕРСПЕКТИВЫ РЫНКА МСТ-ИЗДЕЛИЙ

Очевидная перспективность микросистемотехнического направления развития электроники определила тему 10-го ежегодного Симпозиума по МЭМС-технологиям "Сенсоры: основа ускоренного развития рынка МЭМС до 1 триллиона долларов". Следует заметить, что, исходя из этимологического значения термина МЭМС, в сенсорах такого типа должен присутствовать механический эффект: линейное перемещение, изгиб (кантилеверы), вращение. Однако существуют микросистемотехнические сенсоры, реализующие фотоэлектронное, акустоэлектронное, магнитоэлектронное, термоэлектронное, хемотронное преобразования, не связанные с механическими эффектами. Такие сенсоры следует рассматривать как чувствительные элементы, преобразующие некоторое состояние среды в электронный сигнал, тогда как МЭМС-элементы представляются в качестве исполнительных частей (актюаторов) микросистемы, хотя и могут создавать сигнал о какой-то характеристике контролируемой среды. Например, с помощью микрокантилевера получают сигнал о молекулярном рельефе поверхности твердого тела [27]. Однако, как правило, чувствительный микроэлемент интегрирован в микросистему и поэтому, зачастую, физически неразделим с общей конструкцией микросистемотехнического устройства [28]. В общем случае следует различать просто сенсоры (физические, химические, биологические) и микроэлектромеханические сенсоры, которые, по существу, представляют собой физические сенсоры.

Теперь о самом существенном критерии перспективности любого нового продукта – о его рыночной конъюнктуре. Различные фирмы просматривают возможные пути достижения рынка сенсоров и актюаторов объемом в 1 трлн долл., исходя из сформулированных ими целевых установок [29]. Так, фирма Hewlett Packard связывает это событие с созданием так называемой "Центральной нервной системы Земли" (Central Nervous System for the Earth – CeNSE). Эта система включает следующие элементы:

- мониторинг климата;
- поисково-разведывательные работы и добыча нефти;
- активы и прослеживание системы поставок;
- интеллектуальная инфраструктура транспортных магистралей;
- предупреждения о цунами и землетрясениях;
- интеллектуальные дома и энергосистемы;
- структуральный мониторинг здоровья;
- увеличение в 1000 раз процессорно-сенсорной информации Интернета в течение 2013 года.

Специалисты фирмы Bosch перспективы 1 трлн. рынка МСТ-изделий связывают с 7 млрд. приборов, содержащих множество сенсоров и подключенных к Интернету, пользователями которого к 2017 году будут 7 млрд. людей. Кроме того уже в 2010 году сети мобильной связи обслуживали 7 млрд. абонентов, значительная часть которых также являлась пользователями Интернета. Исходя из таких предпосылок, были введены понятия "Интернет людей" (социальные человеческие сети) и "Интернет вещей" ("социальные" машинные сети), и в таком сценарии рынка на каждую персону должно, в среднем, приходиться 1000 сенсоров. Среди крупных потребителей сенсоров также выделены:

- современные автомобили – до 100 сенсоров на каждый;
- интеллектуальные дома – от десятков до сотен сенсоров на каждый;
- медицинская диагностика – десятки различных сенсоров, которые должны будут мигрировать в каждом пациенте.

В результате, чтобы достигнуть триллионного рынка в 2022 году, ежегодный прирост должен составлять 56%. Естественно, возникает вопрос о достоверности таких прогнозов, но, в любом случае, можно сделать вывод о технической обоснованности, объективной востребованности и исключительной перспективности микросистемотехнического направления развития электроники.



ЛИТЕРАТУРА

18. **Kejik P., Schurig E., Bergsma F., Popovic R.S.** First fully SMOS-integrated 3D Hall probe. – Proceedings of the 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 5–9 June, Seoul, South Korea, 2005.
19. **Drljaca P., Kejik P., Vincent F., Piguet D., Gueissaz F., Popovic R.S.** Single core fully integrated. CMOS micro-fluxgate magnetometer. – Sensors and Actuators A: Physical, 2004, 110, 236–241.
20. **Морисон С.** Химическая физика поверхности твердого тела. – М.: Мир, 1980, 488 с.
21. **Chang Liu, Bar-Cohen Y.** Scaling Laws of Microactuators and Potential Applications of Electroactive Polymers in MEMS. – Proceedings of SPIE's 6th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 1999.
22. **Lewis D.H., Janson S.W., Cohen R.B., Antonsson E.K.** Digital micropropulsion. – Proc. Int. Conf. on MEMS, 1999, p.517.
23. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача / изд. 4-е перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981, 415 с.
24. **Шилова О.А. Чепик Л.Ф., Бубнов Ю.З.** Свойства пленок, получаемых из растворов на основе тетраэтоксисиана, в зависимости от технологических аспектов их формирования. – ЖПХ, 1995, т. 68, вып. 10, с. 1608–1612.
25. Патент РФ №2189043. Устройство для измерения концентрации окислительно-восстановительных компонентов в газовой смеси / Ю.З.Бубнов, В.Б.Васильев, В.А. Шубарев. Опубл. 19.04.2000 г.
26. Патент РФ № 3411511. Устройство для контроля концентрации опасных газов / В.И.Дикарев, В.А.Шубарев, В.А.Мельников, В.Н.Петрушин, А.Н.Михайлов. Опубл. 15.02.2010 г.
27. **Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Плотников Ю.И., Раков А.В., Тодуа П.А.** Нанометрология линейных измерений в атомно-силовой микроскопии. – РАН, Труды института общей физики им. А.М. Прохорова, т. 6, 2006, с. 212–144.
28. **Зенюк Д.А., Федирко В.А.** Моделирование микроэлектромеханического термосенсора. Вестник МГТУ "СТАНКИН", 2011, т. 2, № 4, с. 64–68.
29. **Bryzek Janusz.** Emergence of a \$Trillion MEMS Sensor Market. www.sensorscon.org/English/Archives/201203/Presentations/Janusz_Bryzek_Sensors_Con2012.pdf