

УДК 621.315.592

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ КЕРАМИКА: ПРИМЕНЕНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО, ПЕРСПЕКТИВЫ

В. А. Головнин¹, И. А. Каплунов², О. В. Малышкина², Б. Б. Педько²

¹ Научно-исследовательский институт «ЭЛПА», Зеленоград

² Тверской государственный университет
Физико-технический факультет

Рассмотрены наиболее важные области применения и классификация традиционных и новых пьезоэлектрических (акустоэлектрических, механоэлектрических, ультразвуковых, с использованием и без использования промежуточной среды и др.) преобразователей на основе прямого и обратного пьезоэффекта. Отмечается существенное расширение областей применения пьезокерамики, обусловленное как созданием специализированных пьезокерамических материалов, так и совершенствованием технологии их производства и разработкой новых изделий на их основе.

Ключевые слова: *пьезоэлектрическая керамика, преобразователи, актюаторы, датчики*

1. Введение. Керамика (от греческого *keramiké* – гончарное искусство, *keramos* – глина), в первоначальном смысле – изделия и материалы, получаемые спеканием глин и их смесей с минеральными добавками. Определение «керамика» включает не только такие «традиционные» материалы, как терракота, майолика, фаянс, фарфор, посуда, кирпичи, черепица и другие традиционные виды керамических изделий, но и неметаллические магнитные материалы (ферриты), керамические диэлектрики – широкий класс неорганических неметаллических поликристаллических материалов различного состава и назначения. К керамическим диэлектрикам относятся электротехническая установочная керамика (фарфор, стеатит и др.), конструкционная керамика (монооксиды и композиции на их основе), закристаллизованные стекла, другие разновидности поликристаллических диэлектриков.

Пьезоэлектрическая керамика – это керамика, обладающая пьезоэлектрическим эффектом. Основными материалами для производства пьезоэлектрической керамики служат сегнето- и антисегнетоэлектрики со структурой типа перовскита. В современной промышленности используются составы на основе титаната бария (ТБ), цирконата-титаната свинца (ЦТС), магний ниобата свинца – титаната свинца (МНС-ТС), цирконата-титаната свинца-лантана (ЦТСЛ), титаната свинца (ТС), титаната висмута и других висмутсодержащих

сегнетоэлектриков со сложной перовскитоподобной структурой, литий-ниобатов свинца и щелочных металлов [1-22].

Наиболее широко распространенная пьезокерамика на основе ЦТС является многокомпонентной системой, состоящей из нескольких поликристаллических и аморфных фаз, а также газонаполненных пор. Пьезоэлектрические свойства обусловлены частичным упорядочением электрических моментов доменов сегнетоэлектрических кристаллитов основных фаз.

Пьезоэлектрическая керамика лежит в основе керамико-полимерных композитов для конкретных областей применения.

Области реализации пьезоэлектрических эффектов. Классификация пьезокерамических преобразователей по использованию пьезоэлектрических эффектов приведена в таблице 1.

Таблица 1
Классификация пьезоэлектрических преобразователей

Прямой пьезоэффект	
Акустоэлектрические преобразователи (АЭП) Акустические и ультразвуковые приемники звуковых и ультразвуковых волн в воздухе и воде.	Механоэлектрические преобразователи (МЭП) (датчики давления и силы, вибрации, удара, ускорений; клавиатура; гироскопы); генераторы высокого напряжения, электрической энергии из механической энергии)
Обратный пьезоэффект	
Электроакустические преобразователи (ЭАП); акустические и ультразвуковые генераторы звуковых сигналов, передающие гидроакустические антенны, генераторы технологического ультразвука)	Электромеханические преобразователи (ЭМП) (устройства механических перемещений (пьезомоторы, актюаторы, нанопозиционеры, пневматические клапаны, микронасосы, активные гасители вибрации)
Обратный и прямой пьезоэффекты	
Без использования промежуточной среды (пьезокерамические трансформаторы, пьезокерамические резонаторы и фильтры, ультразвуковые линии задержки и др.)	С использованием промежуточной среды (сонары и эхолотаторы в водной и воздушной среде; дефектоскопы; приборы медицинской диагностики; измерители скорости потока, расхода, уровня; адаптивные структуры и др.)

Прямой пьезоэффект (ПЭ) связан с преобразованием механической энергии в электрическую за счет возникновения пьезополяризации или появления заряда (разности потенциалов) на электродах пьезокерамического элемента. Применение пьезокерамики при использовании прямого пьезоэффекта удобно разделить на области, связанные со способом создания механических напряжений: акустическим – акустоэлектрические преобразователи, и механическим (контактным) – механоэлектрические преобразователи, давлением.

Акустоэлектрические преобразователи (АЭП) применяют в качестве приемников акустических (слышимых) и ультразвуковых волн в воздухе, газах, воде и других жидкостях; звуковых и ультразвуковых микрофонов для газовых сред; приемных гидроакустических антенн, гидрофонов и др.; приемников в устройствах акустической спектроскопии, акустической эмиссии; спектроскопии шумов и других устройствах, фиксирующих и преобразующих в электрический сигнал звуковые колебания.

Механоэлектрические преобразователи (МЭП) условно можно разделить на датчики и генераторы.

Датчики на основе пьезокерамики используются практически во всех областях науки и техники – в медицине (тонов Короткова, шумов сердца и легких и др.), в автомобильной индустрии (датчики удара, детонации, неровностей дороги, вибрации, охранной сигнализации), в машиностроении и различных областях техники для измерений давления, силы и удара, вибрации и ускорения.

Генераторы электрического заряда на основе пьезокерамики преобразуют механическую энергию в электрическую. К ним относятся генераторы высокого напряжения (искровые насосы) для устройств поджига газовых смесей, взрывателей и других устройств, кнопки и пускатели; автономные источники электрической энергии, преобразующие механическую энергию транспортных средств; генераторы электрической энергии, использующие диссипированную механическую энергию в окружающей среде.

Обратный пьезоэффект (ОПЭ) связан с преобразованием электрической энергии в механическую, т.е. с возникновением механических напряжений и деформаций при приложении к образцу электрического поля. Применение пьезокерамики при использовании обратного пьезоэффекта также удобно разделить на области, связанные с волновыми процессами и механическими перемещениями.

Электроакустические преобразователи (ЭАП) лежат в основе акустических и ультразвуковых генераторов, т.е. источников звуковых волн в различных упругих средах. К ним относятся всевозможные

сигнализаторы в телефонах, компьютерах, автомобилях, устройствах пожарной сигнализации, ультразвуковые генераторы в передающих гидроакустических антеннах специального и гражданского применения (для локации морского дна, в рыбном промысле, для исследования шельфа), электроакустические преобразователи для технологического ультразвука – для очистки сточных вод, в ультразвуковых мойках, смесителях и интенсификаторах технологических процессов; для ультразвуковой обработки сварочных швов; для производства пластмассовых изделий типа «молния»; для сверления алмазов, обработки природных и искусственных твердых тел и других применений.

Электромеханические преобразователи (ЭМП) используют обратный пьезоэффект в устройствах механических перемещений. Электромеханические преобразователи лежат в основе обширного семейства пьезокерамических актюаторов: многослойных пакетных и трубчатых для линейных перемещений; изгибных биморфных и мультиморфных; сдвиговых; ламинарных полосковых и др. Пьезоактюаторы обеспечивают микро- и нанопозиционирование механических систем, работу устройств активного гашения вибраций, работу клапанов впрыска топлива в двигателях внутреннего сгорания и микродозаторов в биомедицине, перемещение нитей в ткацких станках, работу пневматических клапанов, и многое другое. Электромеханические преобразователи на обратном пьезоэффекте используют в пьезодвигателях, пьезодвижителях и разнообразных пьезокерамических моторах для фотоаппаратов, мобильных телефонов и других применений.

Обратный и прямой пьезоэффекты. Устройства с последовательным использованием обратного и прямого пьезоэффектов, или преобразователи двойного действия (ПДД) при обратном пьезоэффекте преобразуют электрическую энергию в механическую энергию деформации (или колебаний), а затем, с использованием прямого пьезоэффекта, механическую энергию в электрическую. Процессы преобразования энергии могут происходить в одном пьезоэлементе, без использования промежуточной среды, и в разных пьезоэлементах, с использованием промежуточной среды.

Без использования промежуточной среды, в одном пьезоэлементе, происходят процессы преобразования энергии: в пьезокерамических трансформаторах, повышающих или понижающих электрическое напряжение; в пьезоэлементах разнообразных пьезокерамических резонаторов и фильтров частотно-селективных устройств; в ультразвуковых линиях задержки и др.

С использованием промежуточной среды последовательное использование обратного и прямого пьезоэффектов имеет место в распространенных ультразвуковых устройствах: морских ультразвуковых комплексах, установках ультразвуковой медицинской диагностики (УЗИ), установках ультразвуковой дефектоскопии материалов с высоким разрешением, приборах измерения потоков газов и жидкостей, системах для парковки автомобилей, уровнемерах и др.

Традиционные и новые применения пьезокерамических изделий. Приведенные выше примеры включают традиционные и новые области применения пьезокерамики. Это деление условно и определяется использованием пьезокерамики в новых видах продукции и совершенствованием потребительских характеристик выпускавшейся ранее продукции.

Традиционные области применения пьезокерамических устройств – ультразвуковое медицинское оборудование, оборудование неразрушающего контроля, ультразвуковые датчики, акустические устройства, резонаторы и фильтры, установки технологического ультразвука, гидроакустические средства для специального и гражданского использования – дополнились новыми областями применением изделий из пьезокерамики и пьезокомпозитов:

- в мобильных телефонах (акселерометры, звуковая сигнализация, громкоговорители и др.);
- в цифровых фотоаппаратах (акселерометры, ультразвуковые моторы наводки на резкость и др.);
- в портативных компьютерах (акселерометры, микроактюаторы для жёстких дисков, пьезокерамические трансформаторы для дисплеев и др.);
- в двигателях внутреннего сгорания (системы подачи топлива);
- в автомобилях (датчики давления в шинах, детонации, неровности дороги, удара для подушек безопасности, уровня топлива, другие датчики и применения, всего более 30);
- в медицине (ультразвуковые специализированные комплексы формирования изображения высокого разрешения для исследования, установки для терапии и инструменты для хирургии);
- в матрицах датчиков для мониторинга общего состояния различных структур;
- в системах энергоснабжения и энергосбережения;
- в устройствах сбора микроэнергии, которые являются альтернативой батарей в микроваттном диапазоне;
- в системах ультраточного позиционирования для различных областей применения (пьезокерамические актюаторы нано

манипулирования и нанометрологии в биоинженерии, микроэлектронике и др.);

- в системах подавления вибрации и звука в различных структурах (датчики-сенсоры и исполнительные актюаторы).

Расширению областей применения пьезокерамики способствовали:

- успехи в разработке специализированных пьезокерамических материалов и керамико-полимерных композитов для конкретных областей применения;
- совершенствование технологии производства пьезокерамических материалов, пьезоэлементов и керамико-полимерных композитов;
- разработка новых изделий из новых материалов по новым технологиям.

Примером новых изделий из новых материалов по новым технологиям может быть семейство многослойных актюаторов, использующих обратный пьезоэффект при сжатии-растяжении, которые обеспечивают нанодискретное перемещение на десятки микрометров при нагрузке более 1000 Н/см^2 при управляющих напряжениях порядка 100 В. Многослойные монокристаллические пьезоэлементы этих актюаторов изготавливают из специализированных пьезокерамических материалов с низкой температурой спекания, по "новой" технологии формообразования заготовок (шликерное литье и стопирование "сырых" пленок) и их термообработок.

Значительный объем новых применений пьезокерамики занимают разнообразные устройства обеспечения точных линейных и угловых перемещений, для которых еще нет окончательно устоявшейся терминологии: пьезодвигатели, пьезодвижители, пьезомоторы и др. Большая часть устройств основывается на эллиптических колебаниях, создаваемых пьезокерамическими элементами при воздействии на них электрическими напряжениями, запрограммированными соответствующим образом. Амплитуда колебаний рабочей части пьезоэлемента достигает шести микрон при максимальном управляющем напряжении порядка десятков вольт и может быть уменьшена, частота колебаний, как правило, задается резонансной частотой системы и составляет десятки килогерц, что позволяет регулировать в широких пределах скорость и шаг перемещений.

К таким устройствам относятся, например, двухкоординатные платформы для применения в микроскопии, в системах формирования изображения; в полупроводниковой отрасли промышленности, где они обеспечивают совмещение быстрого, со скоростью до 200 мм/с, и тонкого позиционирования с погрешностью $\pm 0,1 \text{ мкм}$, когда изменение

напряжения на входе устройства на 100 мВ обеспечивает перемещения на 0,8 нм.

Этот принцип заложен в конструкции волнового пьезокерамического двигателя, которая содержит две пары параллельных пьезокерамических пластин, размещённых под углом 90° друг к другу вокруг трубки, внутри которой гайка с резьбой и спаренный с гайкой винт. Пьезокерамические пластины касаются поверхности трубки, к ним прилагается синусоидальное электрическое напряжение таким образом, что их попарно синхронные перемещения обуславливают вибрацию трубки на резонансной частоте и ее вращение, в результате которого гайка внутри трубки навинчивается на винт, вызывая его линейное перемещение. Изменение фазы переменного напряжения изменяет направление движения.

Специализированные керамико-полимерные композиты и технология изготовления ультразвуковых приемо-передающих антенн разработаны и используются в ультразвуковых комплексах формирования изображения высокого разрешения для медицинских исследований и гидроакустики.

Таким образом, возникают новые области применения пьезокерамики и пьезокомпозитов: актюаторы, ультразвуковые моторы, матрицы датчиков для мониторинга общего состояния структур, устройства сбора микроэнергии, ультразвуковое медицинское оборудование для формирования изображения высокого разрешения, акселерометры в мобильных телефонах, микроактюаторы для жёстких дисков, пьезокерамические трансформаторы для портативных компьютеров и др.

Объемы и перспективы производства пьезокерамики в мире и РФ. По результатам анализа, проведенного зарубежными исследователями [13], мировой рынок пьезоэлектрических устройств на основе пьезокерамики и пьезокомпозитов оценивался в 2007 г. в 10,6 миллиарда долларов США с перспективой роста до 19,5 миллиардов к 2012 г.

Составляющие рынка по типам продукции оцениваются следующим образом:

- производство резонаторов, акустических устройств, "газозажигалок", ультразвуковых моторов, устройств для автофокусировки в цифровых фотокамерах – 27%;
- производство разнообразных датчиков, акселерометров, пьезотрансформаторов, генераторов "силового" ультразвука, печатных пьезо головок, дизельных форсунок и др. – 26%;
- производство многослойных и биморфных актюаторов, включая пьезокерамические генераторы на их основе – 36%;

- производство пьезокерамики для военных и гражданских гидроакустических комплексов – 11%.

В делении рынка по областям применения наибольшую часть (31,7%) рынка занимают пьезокерамические изделия для применения в секторах информационных и коммуникационных технологий и робототехники. Далее следуют пьезокерамические изделия для секторов точной механики и полупроводников (18,6%), биологии и медицины (11,1%), гидроакустики (11%), экологии и сбора энергии (7,5%). Доля рынка акселерометров и датчиков – 5,8%, устройств неразрушающего контроля – 5,7%, различных устройств (включая "пьезозажигалки", печатные пьезоголовки и устройства телекоммуникации) – 5,5%, акустических устройств и резонаторов – 3,1%.

Темпы ежегодного роста пьезокерамической продукции наиболее значимы у новых устройств, таких как пьезоэлектрические генераторы электрической энергии – 51,5%, и продукции для новых изделий (пьезокерамические резонаторы для мобильных телефонов, цифровых фотоаппаратов и др.) – 27,5%.

Для разнообразных новых областей применения (пьезокерамические двигатели, пьезокерамические элементы настройки зеркал лазера, акустооптические модуляторы и др.) прогнозируется ежегодный прирост в 19,8%; для акселерометров и датчиков 14%, ультразвуковых моторов 13,4%, трансформаторов 13,6%.

Прогнозируется ежегодный прирост выпуска традиционных изделий: акустических устройств на 13,6%; актюаторов для приводов компьютерных дисков на 11,6%; генераторов технологического ультразвука для сварки и чистки на 14,6%; пьезокерамики для военных и гражданских гидроакустических комплексов на 6,75%; дизельных форсунок и пьезотрансформаторов на 19,8%; других пьезокерамических преобразователей на 14%.

В РФ годовой объем производства пьезокерамики, пьезоэлементов и устройств типа резонаторов, фильтров, звонков, акселерометров и датчиков на предприятиях бывшей пьезокерамической отрасли оценивается, по состоянию на 2007 г. в 5 млн. долларов США (0,05% мирового объема).

Параметры пьезокерамических материалов, освоенных в промышленном производстве РФ, находятся, как и параметры серийных материалов зарубежных фирм, на уровне предельных "природных" физических возможностей используемых сегнетоэлектрических систем. Большие статические и динамические упругие напряжения (до $\sim 10^8$ Па), сильные постоянные и переменные электрические поля (до $\sim 10^3$ В/мм), высокие (до 900 °С) и низкие (до ~ 4 К) температуры, длительные сроки эксплуатации (95 % гамма-ресурс до 10^5 ч), большие дозы радиации –

таков неполный перечень возможных условий эксплуатации выпускаемой пьезокерамики.

Материалы девяти марок системы ЦТС могут производиться в г. Волгоград, на ОАО «Аврора-Элма», пьезоэлементы из них предназначены для удовлетворения потребностей в датчиках, звучащих устройствах, изделиях гидроакустики и генераторах технологического ультразвука.

В НКТЬ «Пьезоприбор», г. Ростов-на-Дону, разработаны:

- серия пьезоэлектрических материалов (ЦТВС, ЦТС-83Г, ТВ-2, ТВ-3, НТВ-2, ТНВ-1, ТНВ-2), предназначенных для использования в преобразователях различного назначения, стабильных в диапазоне рабочих давлений до 150 МПа и температур до 900 °С;

- уникальные пористые объемно-чувствительные композиты КМБ-1 и КМБ-4 основе ЦТС и КМБ-3 на основе текстурированного сульфидом сурьмы в полимерной матрице, с диапазоном рабочих температур (4-40) °С;

- электрострикционный материала МНС-7,5 на основе релаксоров системы МНС-ТС;

- совместно с ГУП «Гидрометаллургический завод», г. Лермонтово, разработаны пьезоматериалы: ПКЛ-1, ПКЛ-2 и ПКЛ-3.

НКТЬ «Пьезоприбор» использует разработанные материалы для производства пьезоэлементов, пьезомодулей и, на их основе, пьезоэлектрических датчиков вибрации и удара, акселерометров общего и специального назначения, пьезоэлектрических двигателей, деформируемых зеркал для адаптивных оптических систем, ингаляторов и оборудования для акустического воздействия на пласт.

Активный поиск новых сегнетоэлектрических керамик ведет НИИ Физики ЮФУ.

ОАО «НИИ Элпа», г. Москва, г. Зеленоград, может выпускать более 30 марок пьезокерамических материалов всех функциональных групп:

Марки пьезокерамических материалов	Количество выпускаемых наименований
сегнетомягкие материалы	9
материалы средней сегнето-жесткости и сегнетожесткие	9
высокостабильные материалы	7
материалы с повышенной анизотропией свойств	2
пористые	3
композитные	2

ОАО «НИИ Элпа» производит пьезоэлементы из перечисленных материалов, а также, на их основе, пьезотрансформаторы, актюаторы всех типов (на основе деформаций растяжения-сжатия и изгиба), гидроакустические приборы (фазированные антенные решетки, излучающие и приемные модули и антенны), сейсмодатчики и датчики ускорения, ультразвуковые преобразователи, гироскопы, фильтры и резонаторы для приемной аппаратуры и средств связи.

Перечисленные производители и их продукция частично удовлетворяют потребности гидроакустики, автомобилестроения, машиностроения, авиакосмической и других отраслей. Оборудование, на котором производят пьезокерамические материалы и пьезоэлементы, морально и физически устарело, что снижает конкурентоспособность отечественных производителей. Значительная часть пьезокерамической продукции для звучащих устройств, генераторов технологического ультразвука и других применений закупается за рубежом, в Китае и США. Высокотехнологичная продукция на основе пьезокерамики, например ультразвуковое медицинское оборудование, дизельные форсунки, оборудование полупроводниковой промышленности, приобретается у зарубежных фирм без должного рассмотрения возможностей собственного производства.

Научный потенциал специалистов РФ в области разработки и производства пьезокерамики высок, их знания и опыт востребованы зарубежными разработчиками пьезокерамической продукции. Перспективные потребности в пьезокерамике для развивающихся отраслей модернизируемого производства РФ, (автомобилестроения, биомедицинской техники, гидроакустики и др.) могут быть удовлетворены при административном содействии и стартовом финансировании для переоснащения.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы».

Список литературы

1. Яффе Б., Кук У., Яффе Г. Пьезоэлектрическая керамика. М.: Мир, 1974.
2. Jalili N. Piezoelectric-Based Vibration Control. From Macro to Micro/Nano Scale Systems. Springer, 2010.
3. Pardo L., Ricote J. Multifunctional Polycrystalline Ferroelectric Materials: Processing and Properties. Springer, 2011.
4. Moulson A.J., Herbert J.M. Electroceramics. Materials, Properties, Applications. John Wiley&Sons, 2003.
5. Parinov I.A. Piezoceramic Materials and Devices. Nova Science Pub., 2010.
6. Фесенко Е.Г., Данцигер А.Я., Разумовская О.Н. Пьезокерамические материалы. Ростов-на Дону, 1983.

7. Панич А.Е., Куприянов М.Ф. Физика и технология сегнетокерамики. Ростов-на-Дону, 1989.
8. Гориш А.В., Дудкевич В.П., Куприянов М.Ф., Панич А.Е., Турик А.В. Пьезоэлектрическое приборостроение. Том I, Физика сегнетоэлектрической керамики. М, ИПЖРТ, 1999.
9. Гавриляченко С.В., Резниченко Л.А., Рыбняц А.Н., Гавриляченко В.Г. Пьезокерамика для частотно-селективных фильтров. Ростов-на-Дону. 1999. 233с.
10. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. М.: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.
11. Данов Г.А. Пьезоэлектрические трансформаторы. М. 2003. 319 с.
12. Джагунов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: справочник. С.-П.: Политехника, 1994. 608 с.
13. Abraham T., Gupta B.L. Piezoelectric ceramic, polymer and ceramic/polymer composite devices – types, materials, applications, new developments, industry structure and global markets. Report ET-107, iRAP Innovative Research and Products Inc., 2008.
14. Kimura T. Application of Texture Engineering to Piezoelectric Ceramics-A Review // Journ. Ceramic Soc. Japan. 2006. V. 114. N. 1325. P. 15–25.
15. Sharapov V. Piezoceramic Sensors. Series: Microtechnology and MEMS. 2011. 1st Edition, 570 p.
16. Gusev E., Garfunkel E., Dideikin A. (Eds.). Advanced Materials and Technologies for Micro/Nano-Devices, Sensors and Actuators. Series: NATO Science for Peace and Security. Series B: Physics and Biophysics. 2010. 1st Edition, 313 p.
17. Tong-Yi Zhang, Minghao Zhao, Pin Tong. Fracture of piezoelectric ceramics // Advances in Applied Mechanics. 2002. V. 38. P. 147–289.
18. King T.G., Preston M.E., Murphy B.J.M., Cannell D.S. Piezoelectric ceramic actuators: A review of machinery applications // Precision Engineering. 1990. V. 12, Issue 3. P. 131–136.
19. Viehland D.. Effect of Uniaxial Stress Upon the Electromechanical Properties of Various Piezoelectric Ceramics and Single Crystals // Journ. Amer. Ceramic Society. 2006. V. 89, Issue 3, P. 775–785.
20. Jordan T.L., Ounaies Z. Piezoelectric Ceramics Characterization. Hann over, 2001.
21. Tadashi Takenaka, Hajime Nagata, Yuji Hiruma. Current Developments and Prospective of Lead-Free Piezoelectric Ceramics // Jpn. J. Appl. Phys. 2008. V. 47. P. 3787–3801.
22. S. R. Anton, H. A. Sodano. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006) // Smart Materials and Structures. V. 16. N. 3.

**PIEZOELECTRIC CERAMICS (APPLICATIONS, PRODUCTION,
PERSPECTIVES)**

V. A. Golovnin¹, I. A. Kaplunov², O. V. Malyshkina², B. B. Pedko²

¹Scientific Research Institute "ELPA", Zelenograd

²Tver State University
Physico-technical faculty

Most important areas of application and classification of traditional and new piezoelectric (acoustoelectric, mechanoelectric, ultrasound, with and without intermediate surroundings, etc.) transducers making use of direct and converse piezoelectric effects are considered. A considerable enlargement of the fields of application of piezoceramics due to both development of specialized piezoceramic materials and improvement of their production technology and design of new devices on this basis are pointed out.

Keywords: *piezoelectric ceramics, transducers, actuators, sensors*

Об авторах:

ГОЛОВНИН Владимир Алексеевич – кандидат физ.-мат. наук, начальник лаборатории ОАО НИИ "ЭЛПА", 124460 Москва, Зеленоград, Северная промышленная зона, Панфиловский проспект, д.10, *e-mail*: golovnin41@rambler.ru;

КАПЛУНОВ Иван Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры прикладной физики ТвГУ, 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33, *e-mail*: ivan.kaplunov@tversu.ru;

МАЛЫШКИНА Ольга Витальевна – доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры сегнетоэлектриков и пьезоэлектриков ТвГУ;

ПЕДЬКО Борис Борисович – кандидат физ.-мат. наук, профессор кафедры сегнетоэлектриков и пьезоэлектриков ТвГУ.