



Получено: 12.09.2022 г. | Принято: 19.09.2022 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.6.360.366>

Научная статья

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АКТУАТОРОВ НА ОСНОВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛАСТОМЕРОВ

В.С.Щербакова<sup>1</sup>, студент, ORCID: 0000-0002-5826-4709  
А.П.Ротарь<sup>1</sup>, студент, ORCID: 0000-0002-2251-4550  
А.М.Базиненков<sup>1</sup>, к.т.н., доц., ORCID: 0000-0003-0845-2290  
Д.А.Иванова<sup>1</sup>, аспирант, ORCID: 0000-0002-8733-207X  
В.П.Михайлов<sup>1</sup>, д.т.н., ORCID: 0000-0003-3638-7932 / [mikhailov@bmstu.ru](mailto:mikhailov@bmstu.ru)

**Аннотация.** Даны результаты экспериментальных исследований характеристик, влияющих на перемещение актуаторов на основе диэлектрических эластомеров под действием внешнего электрического поля. Выявлено влияние концентрации наполнителей: титаната бария, обожженного и необожженного кварца на модуль упругости и деформацию диэлектрического эластомера при высоком управляющем напряжении.

**Ключевые слова:** актуатор, диэлектрический эластомер, деформация, модуль упругости, электрическое поле

**Для цитирования:** В.С. Щербакова, А.П. Ротарь, А.М. Базиненков, Д.А. Иванова, В.П. Михайлов. Исследование характеристик актуаторов на основе диэлектрических эластомеров. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 6. С. 360–366. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.6.360.366>

Received: 12.09.2022 | Accepted: 19.09.2022 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.6.360.366>

Original paper

## RESEARCH OF THE ACTUATORS CHARACTERISTICS BASED ON DIELECTRIC ELASTOMERS

V.S.Shcherbakova<sup>1</sup>, student, ORCID: 0000-0002-5826-4709  
A.P.Rotar'<sup>1</sup>, student, ORCID: 0000-0002-2251-4550  
A.M.Bazinenkov<sup>1</sup>, Cand. of Sci. (Tech), Associate Professor, ORCID: 0000-0003-0845-2290  
D.A.Ivanova<sup>1</sup>, Postgraduate, ORCID: 0000-0002-8733-207X  
V.P.Mikhailov<sup>1</sup>, Doct. of Sci. (Tech), Prof., ORCID: 0000-0003-3638-7932 / [mikhailov@bmstu.ru](mailto:mikhailov@bmstu.ru)

**Abstract.** The results of experimental studies of the characteristics affecting the movement of actuators based on dielectric elastomers under the action of an external electric field are given. The influence of the concentration of fillers: barium titanate, burnt and unburned quartz on the modulus of elasticity and deformation of the dielectric elastomer at high control voltage was revealed.

**Keywords:** actuator, dielectric elastomer, deformation, modulus of elasticity, electric field

**For citation:** V.S. Shcherbakova, A.P. Rotar', A.M. Bazinenkov, D.A. Ivanova, V.P. Mikhailov. Research of the actuators characteristics based on dielectric elastomers. NANOINDUSTRY. 2022. V. 15, no. 6. PP. 360–366. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.6.360.366>

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия / Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia



## ВВЕДЕНИЕ

Актуаторы на основе "интеллектуальных" или "умных" материалов используются для точного перемещения объектов (обрабатываемых изделий, инструментов) в микро- и нанотехнологическом оборудовании (литографических установках, сканирующих зондовых и электронных микроскопах и др.). К ним относятся, в числе прочих, различные гидравлические устройства на основе управляемых жидкостей, которые обладают свойством быстрого и управляемого перехода от жидкого состояния до пластичного и твердого под действием внешних полей [1], актуаторы на основе магнетострикционных материалов, которые отличаются компактностью и высокой мощностью [2], приводы с применением магнеторелогических эластомеров [3] и пьезоэлектрических материалов [4]. Последние получили наибольшее распространение в качестве механизмов микро- и наноперемещений. По своему принципу действия пьезоэлектрики схожи с диэлектрическими эластомерами (ДЭ), которые являются подгруппой электроактивных полимеров. Актуаторы на основе диэлектрических эластомеров – это электромеханические преобразователи, которые работают за счет деформации ДЭ, когда к ним прикладывается внешнее электрическое поле. За счет таких характеристик, как низкий модуль упругости, широкий диапазон создаваемых перемещений и быстродействие, применение ДЭ позволяет создавать принципиально новые устройства перемещения с улучшенными характеристиками.

Основным показателем, характеризующим эффективность применения ДЭ является диапазон создаваемых деформаций под действием внешнего электрического поля. Установлено, что одной из ключевых характеристик, влияющих на деформацию, является диэлектрическая проницаемость, которую можно контролировать с помощью количества диэлектрического наполнителя в составе ДЭ. Так, например, в работе [5] выявлено что добавление нанопластин графена в ДЭ значительно улучшило электрические и механические характеристики образца по сравнению с образцом из чистого каучука, увеличив деформацию с 1,3% до 2,4%. Концентрация наполнителя составляла 23%, однако технология смешивания и изготовления компонентов достаточно сложно реализуется, требует специального оборудования и занимает длительное время [6, 7].

В качестве матрицы часто используют полимеры на основе акрила, поскольку они

## INTRODUCTION

Actuators based on "intelligent" or "smart" materials are used for precise movement of objects (machined items, tools) in micro- and nanotechnology equipment (lithography facilities, scanning probe and electron microscopes, etc.). These include, among others, various hydraulic devices based on controlled fluids capable of rapid and controlled transformation from liquid to plastic and solid states in external fields [1], actuators based on magnetostrictive materials, which are compact and powerful [2], actuators using magnetorheological elastomers [3] and piezoelectric materials [4]. The latter ones are most commonly used as micro- and nano-movement mechanisms. In their operating principle, piezoelectrics are similar to dielectric elastomers (DE), a subgroup of electroactive polymers. Dielectric elastomer actuators are electromechanical transducers that function by deforming DE when an external electric field is applied to them. Due to such characteristics as low modulus of elasticity, wide range of created displacements and fast response time, the use of DE makes it possible to develop fundamentally new motion devices with improved characteristics.

The main indicator that characterises effectiveness of DE application is the range of deformations created under the influence of an external electric field. It was found that one of the key characteristics influencing the deformation is the dielectric permittivity which can be controlled by the amount of dielectric filler in the DE composition. For example, in [5] it was found that addition of graphene nanoplates to DE significantly improved the electrical and mechanical characteristics of the sample, compared to a pure rubber sample, by increasing deformation from 1.3% to 2.4%. The concentration of the filler was 23%, but the technology of mixing and manufacturing the components is rather difficult to implement, requires special equipment and takes a long time [6, 7].

Acrylic-based polymers are often used as a matrix because they exhibit large deformations of up to 380% and have a relatively high dielectric constant ( $\approx 4.7$ ). However, due to the high viscosity, acrylic exhibits a slow response and a long recovery time. To circumvent these problems, low-viscosity materials such as silicone rubber are often used instead of acrylic. The dielectric constant of such materials is lower ( $\approx 2.8$ ), so it is necessary to select a filler with the highest dielectric constant [8]. One of the highly effective fillers are carbon nanotubes, whose modification is capable of increasing dielectric permittivity and reducing the elastic modulus, but the manufacturing technology for such DE is extremely expensive [9]. Barium titanate is considered to be well compatible with the elastic matrix due to its piezoelectric properties, high dielectric constant and low dielectric loss [10, 11].

демонстрируют большие деформации до 380% и обладают относительно высокой диэлектрической проницаемостью ( $\approx 4,7$ ). Однако из-за высокой вязкости акрил демонстрирует медленный отклик и продолжительное время восстановления. Чтобы обойти эти проблемы, вместо акрила часто используются материалы с низкой вязкостью, такие как силиконовый каучук. Диэлектрическая проницаемость таких материалов ниже ( $\approx 2,8$ ), поэтому необходимо подобрать наполнитель с наиболее высоким показателем диэлектрической проницаемости [8]. Одним из высокоэффективных наполнителей являются углеродные нанотрубки, модифицирование которыми способно обеспечить увеличение диэлектрической проницаемости и снижение модуля упругости, однако технология изготовления такого ДЭ чрезвычайно дорога [9]. За счет пьезоэлектрических свойств, высокой диэлектрической проницаемости и низких диэлектрических потерь, хорошо совместимым с упругой матрицей считается титанат бария [10, 11].

### ЭКСПЕРИМЕНТ

В работе в качестве базового наполнителя для выявления влияния состава на создаваемые под действием внешнего электрического поля перемещения ДЭ использован титанат бария. Также схожим по пьезоэлектрическим свойствам и механическим характеристикам, но при этом более доступным, наполнителем является кварц, который использовался в качестве альтернативы выбранному наполнителю. Таким образом, изготовлено 10 партий образцов с разной массовой концентрацией наполнителя, в качестве которого выступали обожженный и необожженный кварц и титанат бария. Исследуемые образцы имели состав, представленный в табл.1. Партия № 10 наполнителя не имеет. В качестве матрицы использовался силикон марки СИЭЛ 159-322А.

Модуль упругости оказывает значимое влияние на характеристики ДЭ. Повышение жесткости способствует уменьшению деформации под действием электрического поля. Для выявления влияния упругости образцов на создаваемые перемещения необходимо знать модуль упругости каждого из них. Для исследования модуля упругости ДЭ в каждой партии изготовлено по два идентичных образца. Испытания проводили на гидравлическом прессе Instron DX600. Перед растяжением образец устанавливался в специальные тиски, где находился в свободном состоянии.

Таблица 1. Состав образцов

Table 1. Composition of the samples

Номер партии Batch number	Наполнитель Fulfiller	Массовая концентрация, % Mass concentration
1	Кварц необожженный Unburnt quartz	33
2		50
3		66
4	Кварц обожженный Burnt quartz	33
5		50
6		66
7	Титанат бария Barium titanate	33
8		50
9		66
10	Без наполнителя Barium titanate	–

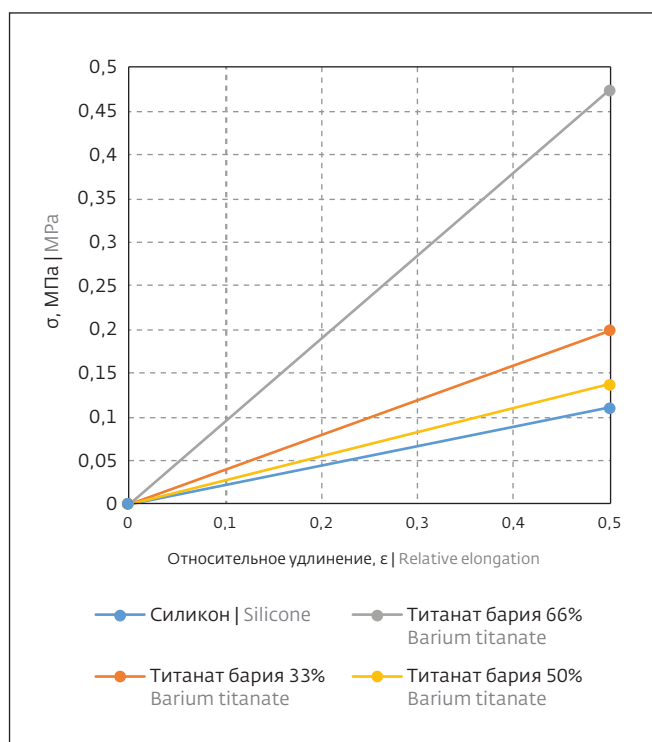


Рис.1. Графики зависимости создаваемых напряжений  $\sigma$  от относительного удлинения  $\epsilon$  при растяжении образцов  
Fig.1. Plots of the created stress  $\sigma$  versus the relative elongation  $\epsilon$  in tensile specimens



Рис.2. Изготовленные актуаторы  
Fig.2. Manufactured actuators

С фиксированной нагрузкой растяжение происходило со скоростью 10 мм/мин.

В результате измерений получены графики зависимости создаваемых напряжений  $\sigma$  от относительного удлинения  $\epsilon$ . На рис.1 представлены полученные зависимости растяжения для образцов с титанатом бария, который при повышении концентрации показал наибольший рост модуля упругости.

Так как в каждой партии было изготовлено по 2 образца на сжатие, и по 2 на растяжение, то более достоверным считался их средний модуль упругости. Результаты со значениями модуля упругости для растяжения и сжатия представлены в табл.2.

Очевидно, что с увеличением концентрации наполнителя увеличивается жесткость эластомеров. При исследовании образцов на растяжение и при повышении концентрации наполнителя с 33% до 66% у модифицированных кварцем модуль упругости увеличился в 5,75 раз, у модифицированных обожженным кварцем в 4,2 раза, у модифицированных титанатом бария в 1,7 раз.

Таблица 2. Модуль упругости при растяжении и сжатии  
Table 2. Tensile and compressive modulus of elasticity

Номер партии Batch number	Среднее значение модуля упругости для растяжения, МПа Average value of elastic modulus for tension, MPa	Среднее значение модуля упругости для сжатия, МПа Average value of elastic modulus for compression, MPa
1	0,39109	1,8769
2	0,92519	2,85675
3	2,33795	6,52195
4	0,5141	1,5622
5	0,99757	2,68895
6	2,16215	6,17635
7	0,55529	1,0721
8	0,397385	1,19845
9	0,949325	2,1246
10	0,27577	0,79285

## EXPERIMENT

In this work, barium titanate was used as a base filler to reveal the effect of the composition on the DE movements created under the action of an external electric field. Quartz is also similar in piezoelectric properties and mechanical characteristics but is more accessible filler which was used as an alternative to the selected filler. Thus, 10 batches of samples with different mass concentrations of the filler - burnt and unburnt quartz and barium titanate - were made. These samples had the composition shown in Table 1. Set No. 10 had no filler. Silicone of SIEL 159-322A grade was used as a matrix.

The elasticity modulus has a significant influence on the characteristics of the DE. Increase of the stiffness contributes to reduction of deformation under the influence of electric field. In order to find out the influence of elasticity of the samples on the displacements created, it is necessary to know the modulus of elasticity of each of them. In order to study the elasticity modulus of DE, two identical samples were made in each batch. Tests were performed on an Instron DX600 hydraulic press. Before stretching, the sample was placed in a special vice where it was held in

Для образцов на сжатие с кварцем при увеличении концентрации с 33% до 66% модуль упругости увеличился в 3,5 раза, с обожженным кварцем – в 4 раза, с титанатом бария – в 2 раза. Таким образом, модификация кварцем повышает модуль упругости в среднем в 2 раза эффективнее титаната бария.

Из упомянутых ранее образцов для каждой партии изготовлено с помощью склеивания эластомеров с электродами по 4 актуатора с разным количеством слоев: однослойный, двухслойный, четырехслойный и восьмислойный. Данные образцы представлены на рис.2.

С помощью разработанного лабораторного стенда в МГТУ им. Н.Э.Баумана были проведены измерения перемещения изготовленных актуаторов на основе ДЭ с разной концентрацией и разным количеством слоев. На образцы подавалось напряжение до 3000 В с высоковольтного блока питания.

Схема стенда изображена на рис.3. Напряжение подавалось с помощью высоковольтного блока питания (ВВБП) на делитель напряжений (ДН), который подключался к электродам испытуемого образца. Сам образец находился на изолированной поверхности, над которой устанавливался емкостной датчик положения, подключенный к блоку управления датчиком положения (БУДП). Датчик фиксировал положение исследуемого объекта, пока подаваемое с блока питания напряжение ступенчато увеличивалось от 0 до 3000 В с шагом в 170 В.

На рис.4 представлены зависимости перемещения актуаторов с наполнителем из кварца от подаваемого напряжения при концентрации 50%. При увеличении концентрации кварца от 33% до 66% максимально возможное перемещение увеличилось в 2 раза – с 5 до 10 мкм.

При повышении концентрации обожженного кварца в ДЭ с 33% до 66% перемещение увеличивается в 2 раза с 3,5 до 7 мкм, что говорит о положительном влиянии на деформацию концентрации наполнителя. У зависимостей для образцов с титанатом бария в качестве наполнителя аналогичной тенденции не прослеживается. Перемещения однослойного актуатора меняются незначительно в зависимости от концентрации. Вероятнее всего, причина в неизбежных воздушных зазорах между электродами и дисками ДЭ, искажающими экспериментальные данные и вносящие неопределенность. Однако прослеживается тенденция увеличения

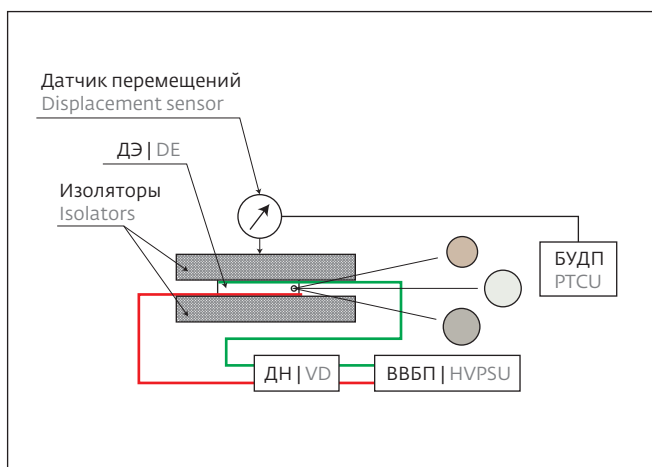


Рис.3. Схема установки для исследования однослойного образца

Fig.3. Schematic diagram of a single-layer sample unit

a free state. Tensioning was carried out at a speed of 10 mm/min under a fixed load.

The measurements resulted in the plots illustrated dependence of the generated stress  $\sigma$  on the relative elongation  $\epsilon$ . Fig.1 shows the obtained tensile stress dependences for samples with barium titanate, which showed the greatest increase in elastic modulus when the concentration was increased.

Since 2 compression and 2 tension samples were produced in each batch, their average modulus of elasticity was considered to be more reliable. The results with tensile and compression modulus values are presented in Table 2.

It is evident that the stiffness of elastomers increases with increasing filler concentration. When studying the samples subject to tension at the filler concentration increasing from 33% to 66%, it was recorded that the quartz-modified samples exhibited elasticity modulus by 5.75 times, the samples modified with burntquartz exhibited 4.2 times and the barium titanate-modified samples exhibited 1.7 times higher elasticity modulus.

For compression samples with quartz, an increase in concentration from 33% to 66% increased the modulus of elasticity by a factor of 3.5, with burnt quartz by a factor of 4, with barium titanate by a factor of 2. Thus, modification with quartz increases the modulus of elasticity by on average of 2 times more effectively than barium titanate.

From the previously mentioned samples for each batch, 4 actuators with different number of layers were made by bonding elastomers with electrodes: one-layer, two-layer, four-layer and eight-layer. These samples are shown in Fig.2.



перемещения с увеличением количества слоев ДЭ в актуаторе.

Деформация ДЭ во внешнем электрическом поле происходит в результате действия различных эффектов: электростатического притяжения электродов, ориентации и смещения дипольных частиц наполнителя при действии внешнего поля. Изучение влияния этих факторов на характеристики актуаторов является задачей дальнейших исследований.

## ВЫВОДЫ

Характеристики диэлектрических эластомеров зависят в первую очередь от состава композита, характеристик упругой среды – матрицы и наполнителя. К ключевому фактору относится концентрация наполнителя, влияющая на деформацию и модуль упругости диэлектрических эластомеров.

Установлено, что у образцов с кварцем при повышении концентрации наполнителя (здесь и далее концентрация массовая) от 33% до 66% создаваемая деформация увеличивалась в 2 раза. Для образцов с титанатом бария в качестве наполнителя аналогичной тенденции не прослеживается. При исследовании образцов на растяжение и сжатие и при повышении концентрации наполнителя с 33% до 66% у модифицированных кварцем модуль упругости увеличился соответственно в 5,75 и 3,5 раза, у модифицированных обожженным кварцем – в 4,2 и 4 раза, у модифицированных титанатом бария – в 1,7 и 2 раза.

Массовая концентрация 66% для исследуемых наполнителей является наиболее эффективной с точки зрения максимальной деформации диэлектрического эластомера во внешнем электрическом поле.

## ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

**Декларация о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Anderson E.H., Bales G.L., White E.V. (2003). Application of smart material-hydraulic actuators. Smart Structures and Materials

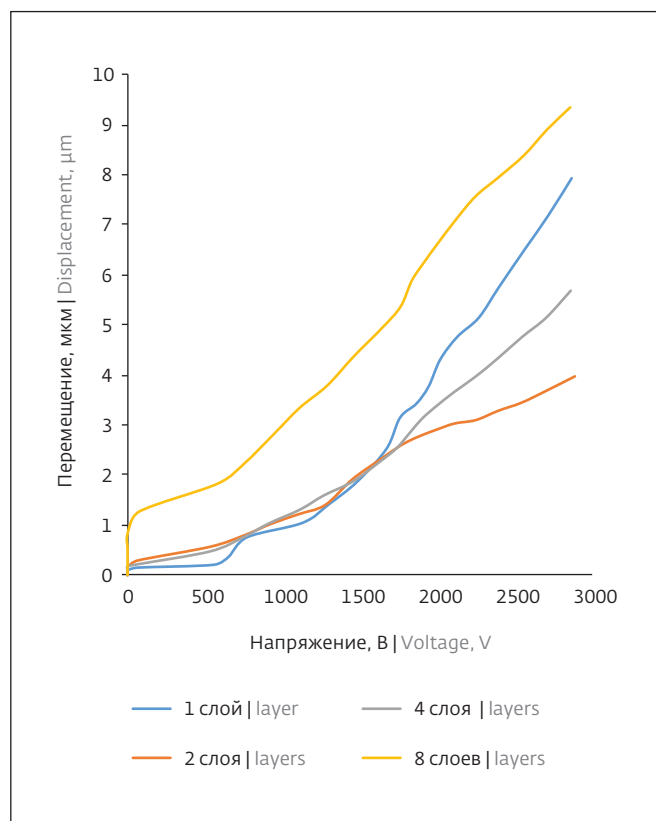


Рис.4. График зависимости деформации от подаваемого напряжения для ДЭ с массовой концентрацией кварца 50%  
Fig.4. Strain vs. applied voltage graph for DE with quartz mass concentration of 50%

With the help of the developed laboratory bench at the Bauman Moscow State Technical University, displacement measurements of manufactured actuators based on DE with different concentrations and different number of layers were carried out. A voltage of up to 3,000 V from a high voltage power supply was applied to the samples.

The diagram of the test bench is shown in Fig.3. Voltage was applied by means of a high voltage power supply (HVPSU) to a voltage divider (VD) which was connected to the electrodes of the test sample. The sample itself was placed on an insulated surface over which a capacitive position sensor connected to the position transmitter control unit (PTCU) was installed. The sensor recorded the position of the test object while the voltage supplied from the unit was increased in steps from 0 to 3,000 V in 170 V increments.

Fig.4 shows the movement of the quartz-filled actuators as a function of the applied voltage at a 50% concentration. When the quartz concentration was increased from 33% to 66%, the maximum possible displacement doubled from 5 μm to 10 μm.



- 2003: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures.
2. **Apicella V., Clemente C.S., Davino D., Leone D., Visone C.** (2019). Review of Modeling and Control of Magnetostrictive Actuators. *Actuators*, 8(2), 45. <https://doi.org/10.3390/act8020045>
  3. **Mikhailov V.P., Bazinenkov A.M., Kazakov A.V.** Active vibration isolation of nanotechnology equipment // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 (2020) 044046 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044046>
  4. **Gao X., Yang J., Wu J., Xin X., Li Z., Yuan X., Dong S.** Piezoelectric Actuators and Motors: Materials, Designs, and Applications. *Advanced Materials Technologies*, 2019.
  5. **Yang D., Kong X., Ni Y., Ruan M., Huang S., Shao P., Zhang L.** (2019). Improved Mechanical and Electrochemical Properties of XNBR Dielectric Elastomer Actuator by Poly(dopamine) Functionalized Graphene Nano-Sheets. *Polymers*, 11(2), 218.
  6. **Qiang J., Chen H., Li B.** (2012). Experimental study on the dielectric properties of polyacrylate dielectric elastomer. *Smart Materials and Structures*, 21(2), 025006.
  7. **Sheng J., Chen H., Qiang J., Li B., Wang Y.** (2012). Thermal, Mechanical, and Dielectric Properties of a Dielectric Elastomer for Actuator Applications. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 51(10), 2093–2104.
  8. **Tan M.W.M., Thangavel G., Lee P.S.** Enhancing dynamic actuation performance of dielectric elastomer actuators by tuning viscoelastic effects with polar crosslinking. *NPG Asia Materials*, 2019.
  9. **Galantini F., Bianchi S., Castelvetro V., Gallone G.** (2013). Functionalized carbon nanotubes as a filler for dielectric elastomer composites with improved actuation performance. *Smart Materials and Structures*, 22(5), 055025.
  10. **Yang D., Ge F., Tian M., Ning N., Zhang L., Zhao C., Luan Y.** (2015). Dielectric elastomer actuator with excellent electromechanical performance using slide-ring materials/barium titanate composites. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(18), 9468–9479.
  11. **Yang D., Huang S., Ruan M., Li S., Wu Y., Guo W., Zhang L.** (2018). Improved electromechanical properties of silicone dielectric elastomer composites by tuning molecular flexibility. *Composites Science and Technology*, 155, 160–168.

Increasing the burnt quartz concentration in DE from 33% to 66% increases the displacement twofold from 3.5  $\mu\text{m}$  to 7  $\mu\text{m}$ , indicating a positive effect of filler concentration on strain. The dependencies for samples with barium titanate as a filler do not show a similar trend. The displacements of the single-layer actuator vary only slightly with concentration. Most likely, the reason is inevitable air gaps between electrodes and DE disks which distort the experimental data and introduce uncertainty. However, there is a tendency for the displacement to increase as the number of DE layers in the actuator increases.

Deformation of DE in an external electric field is the result of various effects: electrostatic attraction of electrodes, orientation and displacement of dipole filler particles in an external field. The study of the influence of these factors on the characteristics of actuators is the task of further research.

## CONCLUSIONS

The characteristics of dielectric elastomers depend primarily on the composite composition, the characteristics of the elastic medium – matrix and filler. A key factor is the concentration of the filler, which affects deformation and modulus of elasticity of dielectric elastomers.

It was found that for samples with quartz, when the concentration of the filler was increased (hereafter mass concentration) from 33% to 66%, the created strain increased by a factor of two. For samples with barium titanate as a filler, a similar trend was not observed. In tensile and compression tests and at increasing the filler concentration from 33% to 66%, the elasticity modulus of the quartz modified samples increased by a factor of 5.75 and 3.5, accordingly, with the burnt quartz modified samples the increase equaled 4.2 and 4 times and with the barium titanate modified samples it was 1.7 and 2 times accordingly.

The 66% mass concentration for the tested fillers is the most effective in terms of maximum deformation of the dielectric elastomer in an external electric field.

## PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

*Declaration of Competing Interest.* The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



**24-я Международная  
выставка оборудования,  
сырья и технологий  
для фармацевтического  
производства**

**22–25  
ноября  
2022**

Москва,  
Крокус Экспо

**Получите  
бесплатный билет  
на сайте по промо-коду:  
pha22print**

[pharmtech-expo.ru](http://pharmtech-expo.ru)

+7 (495) 799-55-85  
[pharmtech@ite.group](mailto:pharmtech@ite.group)

