

## Разработка, моделирование и исследование субволновых структур для управления излучением в ультразвуковых сенсорах физических параметров

В.С. Бут<sup>1</sup>, С.В. Карпеев<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> ООО «Кроне-Автоматика», 443004, Россия, Самарская область, п. Верхняя подстёповка, д. 2;

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34;

<sup>3</sup> Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт», 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151

### Аннотация

В работе предложены 3D-модели субволновых структур для пьезоэлектрических сенсоров, состоящие из периодических микроструктур определённой геометрии. Модели ориентированы на печать на 3D-принтере. Экспериментально получены прототипы с использованием технологии SLA. Эти прототипы были исследованы на наличие дефектов полученных элементов (отклонений от необходимой структуры микроячеек). Разработана технология изготовления элементов данного типа на 3D-принтере. Они могут быть использованы на практике как пьезоэлектрические или пьезоакустические элементы, например, в ультразвуковых расходомерах. Было проведено компьютерное моделирование и сравнение свойств излучения в акустическом диапазоне стандартных пьезоакустических элементов с элементами, состоящими из предложенных субволновых структур. Также было проведено аналогичное сравнительное исследование излучаемых и принимаемых сигналов в ультразвуковом канале расходомера.

**Ключевые слова:** субволновая структура, ультразвуковой сенсор, пьезоматериал, микроячейка, фотополимер, послойное наращивание, лазерное воздействие.

**Цитирование:** Бут, В.С. Разработка, моделирование и исследование субволновых структур для управления излучением в ультразвуковых сенсорах физических параметров / В.С. Бут, С.В. Карпеев // Компьютерная оптика. – 2025. – Т. 49, № 6. – С. 924-932. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1397.

**Citation:** But VS, Karpeev SV. Developing piezoelectric sensors from microstructures obtained by 3D printing. Computer Optics 2025; 49(6): 924-932. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1397.

### Введение

Метаматериалы на основе субволновых структур широко используются при разработке новых типов устройств для измерений и управления оптическим излучением [1–6]. По аналогии, в акустическом диапазоне пьезоакустические и пьезоэлектрические материалы используются при разработке сенсоров различных физических величин – дефектоскопов, сейсмодатчиков, при ультразвуковых измерениях в потоке жидкости [7, 8] и в других детекторах. Свойства, характеристики и константы различных объёмных пьезокерамических материалов обусловлены их кристаллографической структурой и химическим составом, что вынужденно приводит к использованию одинаковых пьезоэлементов в разных задачах науки и техники, не позволяя подстроить их характеристики под конкретные условия, в которых данный пьезоэлемент будет наиболее эффективен. Внутренняя микроструктура пьезокерамических материалов тесно связана с другими их физическими свойствами. Можно изменить стандартные пьезоконстанты для каждого из материалов, изменив их кристаллографическую структуру легированием, но выбор воз-

можных легирующих материалов весьма ограничен. Также поляризация электрического поля, подаваемого на пьезоэлемент, может влиять на способ возбуждения колебаний в материале и, следовательно, на характер излучения. Например, изменение поляризации электрического поля может привести к изменению частоты колебаний или амплитуды излучения пьезоэлемента.

В этой ситуации возникает вопрос о конструировании пьезоэлементов с искусственной геометрией, не основанной на природных кристаллах, с размером одной структурной ячейки 100–300 мкм. Такие размеры являются субволновыми для акустических волн, что, по сути, означает создание метаматериала для ультразвука. Это существенно повышает возможности варьирования режимов работы излучателей и приёмников акустических волн и их использования в различных устройствах. Эти элементы с заданной геометрией могут быть напечатаны на 3D-принтере. В настоящее время активно развиваются технологии объёмной печати, растёт количество моделей 3D-принтеров, которые работают со всеми видами материалов, как оптическими, так и конструкционными. Это развитие вскоре приведёт к изменению техноло-

гических процессов во многих отраслях, таких как строительство, электроника, медицина и др. В частности, технологию послойного наращивания [9–10] для изготовления оптических элементов можно будет использовать в производственном процессе и для элементов других диапазонов длин волн, исключая многие трудоёмкие технологические операции.

Ближайшим аналогом по механизму действия для таких периодических 3D-микроструктур являются фотоннокристаллические элементы для оптического диапазона длин волн. Но для их реализации используются другие методы [11–15], а не 3D-печать.

На рис. 1 показаны примеры возможных геометрий ячеек с приложенным напряжением по осям. Их использование для построения необходимых структур позволяет преодолеть геометрические ограничения существующих пьезоэлектрических элементов, улучшить их характеристики и повысить КПД [16–18]. Объединив данные ячейки в упорядоченную структуру, можно получить метаматериал с уникальными характеристиками за счёт изменения таких свойств, как диэлектрическая проницаемость, коэффициент преобразования, коэффициент диэлектрических потерь, добротности системы, частотной постоянной, коэффициент электромеханической связи, коэффициент пьезоэлектрического напряжения, коэффициент упругой податливости, скорости старения и точки Кюри.

В случае использования этих конструкций появляется возможность увеличения коэффициента пьезоэлектрического заряда и коэффициента преобразования, а также становится возможным управление и изменение характеристик получаемых элементов за счёт проектирования их конкретной геометрии, что невозможно в системах, где используются стандартные пьезоэлектрические и субволновые оптические элементы [19–28].

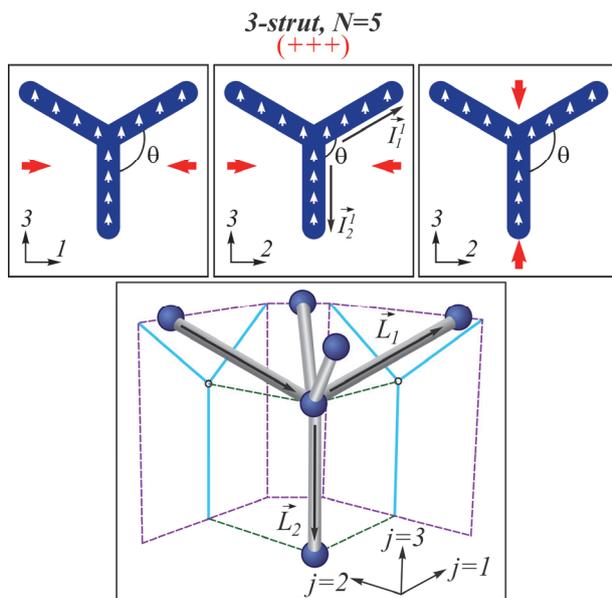


Рис. 1. Приложенные напряжения для 1-3

### 1. Аналитическая модель

Для установления связи между тензором константы пьезоэлектрического заряда и параметрами проекций рисунка, эффективная постоянная пьезоэлектрического заряда  $d_{nKL}$  определяется для корреляции индуцированного эффективного электрического смещения  $D_n$  трёхмерной элементарной ячейки (рис. 1) с приложенным напряжением  $\sigma_{KL}$  по формуле (1) следующим образом [29]:

$$D_n = d_{nKL} \sigma_{KL}, \tag{1}$$

где  $D_n$ ,  $d_{nKL}$  и  $\sigma_{KL}$  представляют собой эффективное поле электрического смещения, тензор константы эффективного пьезоэлектрического заряда и поле приложенных извне напряжений, определённые в глобальной системе 1–2–3 соответственно. Мы вычисляем  $d_{nKL}$  узла под действием приложенного напряжения путём сбора и усреднения по объёму вкладов электрического смещения  $D_n^{(i)}$  и напряжения в равновесии с  $\sigma_{KL}$  от всех элементов распорки  $L_i$  [29]:

$$\begin{cases} D_n = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \int_{V_i} D_n^{(i)} dV_i, \\ \sigma_{KL} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \int_{V_i} \delta_{Kk} \delta_{Ll} \sigma_{kl}^{(i)} dV_i, \end{cases} \tag{2}$$

где  $V_i$  – объём  $i$ -й стойки;  $V$  – полезный объём элементарной ячейки узла;  $\sigma_{kl}^{(i)}$  – напряжённое состояние  $i$ -й стойки в глобальной системе 1–2–3 соответственно,  $k, l = 1–3$ ;  $\delta_{Kk}$  и  $\delta_{Ll}$  представляют собой дельту Кронекера для определения компонентов напряжения, которые находятся в равновесии с приложенной извне нагрузкой. Вводится локальная система координат балки  $x$ – $y$ – $z$  для стоек и связывается с напряжением в глобальной системе 1–2–3  $\sigma_{kl}^{(i)}$  и локальная система  $x$ – $y$ – $z$   $\sigma_{pq}^{(i)}$  оператором линейного преобразования, содержащим информацию об ориентации стойки:

$$\sigma_{kl}^{(i)} = N_{kp}^{(i)} \sigma_{pq}^{(i)} (N_{lq}^{(i)})^T, \tag{3}$$

где  $p, q = x, y, z$  и  $N^{(i)}$  представляет собой матрицу преобразования системы координат, содержащую компоненты относительно угла наклона проекции  $(\theta_j, j = 1–3)$ , и имеет вид [29]:

$$N^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & -\cos \theta_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ 0 & \sin \theta_1 & -\cos \theta_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & \sin \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_3 & -\cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{4}$$

Подстановка уравнения (3) в уравнения (1) и (2) даёт выражение для эффективных зарядовых констант  $d_{nKL}$  [29]:

$$\begin{aligned}
 d_{nkl} &= \frac{D_n}{\sigma_{KL}} = \\
 &= \frac{\sum_{i=1}^N A_i |L_i| d_{nkl} N_{kp}^{(i)} \sigma_{pq}^{(i)} (N_{lq}^{(i)})^T}{\sum_{i=1}^N A_i |L_i| \delta_{KK} \delta_{LL} N_{kp}^{(i)} \sigma_{pq}^{(i)} (N_{lq}^{(i)})^T} = \\
 &= \frac{\sum_{i=1}^N d_{nkl} N_{kp}^{(i)} \sigma_{pq}^{(i)} (N_{lq}^{(i)})^T}{\sum_{i=1}^N \delta_{KK} \delta_{LL} N_{kp}^{(i)} \sigma_{pq}^{(i)} (N_{lq}^{(i)})^T},
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где  $A_i$  и  $|L_i|$  – площадь поперечного сечения и длина  $i$ -й стойки соответственно. Предполагается, что эти две переменные одинаковы для всех распорок узла. Это позволяет спроектировать  $d_{nKL}$  – что эквивалентно в нотации Фойгта,  $d_{nM}$  – в соответствии с конфигурациями шаблона проекции ( $KL \rightarrow M$ : 11→1; 22→2; 33→3; 12→4; 13→5; 23→6). Проектирование происходит в соответствии с относительной ориентацией  $\theta$  между выступающими стойками. Чтобы преобразовать обозначение тензора ( $KL \rightarrow M$ ), матрица преобразования системы координат  $N^{(i)}$  (размеры 3×3) расширяется и перестраивается для формирования матрицы преобразования напряжения  $T^{(i)}$  (размеры 6×6).

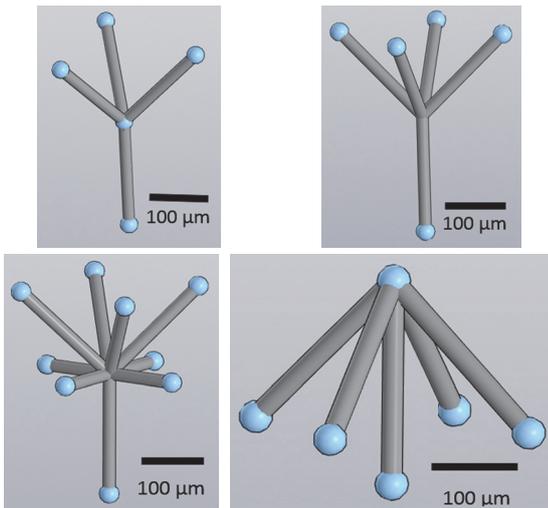


Рис. 2. Модели структурных микроячеек

## 2. Разработка технологии

В настоящее время существует несколько технологий печати на 3D-принтере, позволяющих реализовать эти конструкции. Основные из них:

1. Stereo Lithography Apparatus, SLA [30].
2. Selective Laser Sintering, SLS [31].
3. Multi Jet Modeling, MJM [32].
4. Fusing Deposition Modeling, FDM [33].

В технологии SLA исходным продуктом является жидкий фотополимер. В этот полимер добавляется специальный отвердитель. Эта смесь напоминает эпоксидную смолу, когда в норме она остается жидкой, но под воздействием ультрафиолетового лазера полимеризуется и становится твёрдой [30].

Лазер не может сразу создать всю модель в толще полимера, и речь может идти только о последова-

тельном построении в тонких слоях. Поэтому используется подвижная платформа, которая погружается в фотополимер на толщину одного слоя. Затем лазерный луч освещает области, которые необходимо заполимеризовать [30].

Но есть и значительные трудности. Во-первых, требования к фотополимеру довольно противоречивы: если он густой, то его легче полимеризовать, но сложнее обеспечить гладкую поверхность после каждого шага погружения. Необходимо использовать специальную линейку, которая на каждом шагу проходит по поверхности жидкости и выравнивает её. Большое количество отвердителя при фиксированной мощности лазера сократит необходимое время воздействия, однако неизбежная фоновая засветка портит окружающий объём полимера и снижает его возможный срок службы. Во-вторых, полная полимеризация каждого слоя занимает длительное время, поэтому засветку проводят до уровня, при котором слой приобретает лишь минимально необходимую прочность. Уже готовую модель необходимо облучить мощным источником в специальной камере для 100% полимеризации, предварительно отмыв её от остатков жидкого полимера.

SLS-метод появился примерно в то же время, что и SLA, и имеет с ним много общего. Но вместо жидкости используется порошок с диаметром частиц 50–100 мкм. Этот порошок распределяется тонкими равномерными слоями в горизонтальной плоскости, а затем лазерный луч спекает на этом слое модели подлежащие отверждению участки [31].

Сырьё может быть самым разным: металл, пластик или керамика. Порошок наносится и разравнивается по поверхности рабочего стола специальным валиком, удаляющим излишки порошка при обратном проходе. Затем работает мощный лазер, который спекает частицы друг с другом и с предыдущим слоем. После этого стол опускается на величину, равную высоте одного слоя. Для снижения мощности лазера, необходимой для спекания, порошок в рабочей камере предварительно нагревают почти до температуры плавления, а лазер работает в импульсном режиме, поскольку для спекания важнее пиковая мощность, чем длительность воздействия [31].

Частицы могут расплавляться полностью или частично (по поверхности). Необожжённый порошок, остающийся вокруг затвердевших слоёв, служит опорой для создания нависающих элементов модели, поэтому нет необходимости формировать специальные опорные конструкции. Но по окончании процесса этот порошок необходимо удалить как из камеры, особенно если следующая модель будет создаваться из другого материала, так и из полостей уже изготовленной модели, что можно сделать только после того, как она полностью остыла [31].

После завершения процесса требуется финишная обработка, такая как полировка, так как поверхность

может выглядеть шероховатой или с видимым ламинарованием. Кроме того, материал можно использовать не только в чистом виде, но и в смеси с полимером или в виде покрытых полимером частиц, остатки которых необходимо удалить путём обжига в специальной печи. Для металлов образовавшиеся пустоты одновременно заполняются бронзой. Поскольку речь идёт о высоких температурах, необходимых для спекания, процесс происходит в атмосфере азота с низким содержанием кислорода, так как излишний кислород приводит к окислению [31].

MJM-процесс похож на обычную струйную печать. Материал подаётся через сопла малого диаметра, расположенные рядами на печатающей головке. Количество насадок может быть от нескольких штук до нескольких сотен. Используемый материал не является жидким при комнатной температуре. Сначала его нужно нагреть до точки плавления. После этого материал подаётся в головку, наносится слоями и затвердевает. Слои формируются перемещением головки в горизонтальной плоскости, а вертикальное смещение при переходе на следующий слой, как и в предыдущих случаях, обеспечивается опусканием рабочего стола [32].

В качестве материала для MJM-принтеров используются пластмассы, фотополимеры, специальный воск. Возможна и комбинация разных материалов, например, использование для опорных стоек материала с более низкой температурой плавления, чем у самой модели, а затем удаление его путём переплавки в специальной печи. Другой вариант – использовать для опор материал, удаляемый растворением в специализированном растворе или просто в воде.

Как и в обычной струйной печати, использование материалов разных цветов позволяет создавать многоцветные модели за один цикл. Кроме того, в одной модели можно комбинировать материалы с разными свойствами, например, твёрдые и эластичные [32].

Как и во всех других рассмотренных нами технологиях, во время FDM-печати модель создаётся слой за слоем. Для получения следующего слоя термопластический материал нагревают в печатающей головке до полужидкого состояния и выдавливают в виде ни-

ти через сопло с отверстием малого диаметра, которая, оседая на поверхность рабочего стола или на предыдущем слое, соединяется с ним. Головка движется в горизонтальной плоскости и постепенно прорисовывает нужный слой. После этого происходит вертикальное перемещение на толщину слоя и процесс повторяется до полного построения модели [33].

В качестве расходных материалов чаще всего используются различные пластики, хотя есть и модели, позволяющие работать с другими материалами – оловом, металлическими сплавами с низкой температурой плавления.

В табл. 1 представлены некоторые сравнительные характеристики каждой из технологий.

Ключевой характеристикой при выборе технологии изготовления структур из микрочаёек для пьезо- и оптических материалов было разрешение, с которым принтер мог печатать. Для реализации ячеек минимально допустимое разрешение составляет около 100 микрон. Исходя из этого, технология FDM оказалась неприменимой, несмотря на простоту использования принтера и простоту его обслуживания, без использования специфических материалов и сложных операций. Заявленное производителем максимальное разрешение даёт технология MJM, но из-за высокой стоимости таких 3D-принтеров и различных патентных прав на использование этой технологии выбор был сделан между технологиями SLA и SLS. Порошки используются в технологии SLS; поэтому к работе с этими материалами предъявляются повышенные требования, связанные с возможностью причинения вреда здоровью человека. Исходя из этого и из того, что для этой технологии требуется азотная атмосфера с малым содержанием кислорода, выбор был сделан в пользу технологии SLA, где требования к работе не такие жёсткие и нет необходимости создавать специфические условия.

### 3. Процесс 3D-печати

Процесс печати элементов из микроструктур состоит из трёх этапов. Печать необходимых деталей, последующая промывка в изопропиловом спирте и окончательная полимеризация.

Табл. 1. Сравнительные характеристики технологий

Технология	Разрешение (микроны)	Исходное состояние материала	Материалы	Специальные условия	Стоимость (\$)
SLA	25 – 300	Жидкость	Фотополимеры	Нет	5500 – 7000
SLS	50 – 200	Порошок	Металл, пластик, керамика	Мелкодисперсные материалы, высокая температура, атмосфера азота с низким содержанием кислорода	7000 – 15000
MJM	16 – 200	Твёрдый	Пластик, фотополимеры, воск	Высокая температура	200000
FDM	150 – 400	Твёрдый	Пластик, металл	Нет	300 – 1000

Последние два этапа различаются по времени в зависимости от материала и требуемых свойств элемента. Например, могут быть материалы с повышенной гигроскопичностью, и если их передержать в мочной камере, то они впитают в себя спирт и растрескаются и лопнут при последующей полимеризации. Также конечное время полимеризации влияет на гибкость, жёсткость и другие характеристики деталей, и, если материал твердеет длительное время, элементы становятся хрупкими. Это имеет решающее значение для получения микроструктур.

Все материалы для 3D-печати похожи на различные пластики. Для изготовления пьезоэлектрических и оптических структур были выбраны материалы,

представленные в табл. 2. Результаты были получены с использованием HighTemp и DentalModal. При использовании остальных возникали дефекты печати, о которых будет сказано далее, либо отрыв элементов от платформы из-за малых размеров.

Для достижения оптимальных механических свойств, точности и прецизионности детали подвергались постотверждению под воздействием света и тепла. Детали полимеризовали в течение 60 минут при температуре 60 °С. На рис. 3 представлена зависимость модуля от времени постотверждения. Постепенное увеличение модуля от 30 до 60 минут. Деталь полностью затвердевает через 60 минут, после чего модуль больше не увеличивается.

Табл. 2. Материалы

Название	Предел прочности на растяжение (МПа)	Модуль Юнга (Па)	Удлинение при растяжении (%)	Модуль упругости (ГПа)
CastableWax	11,6	220×106	13	–
HighTemp	33	1500	9	11
GreyPro	35	–	33	1,4
Rigid	40	–	13,3	1,37
DentalModal	33	1600	25	0,95

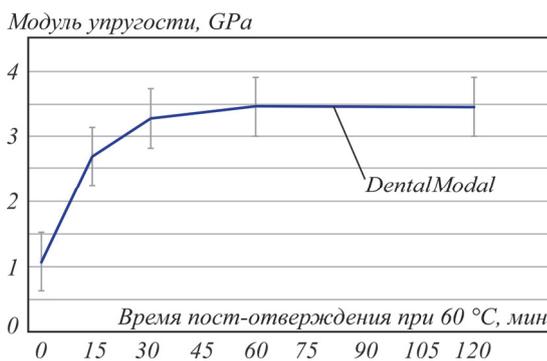


Рис. 3. Зависимость модуля упругости от времени постотверждения

Готовые детали промывали изопропиловым спиртом (IPA, 90 % или выше; рекомендуется 99 %) до тех пор, пока незатвердевшая смола не была полностью удалена с деталей. Промывку в специальном устройстве проводили в течение 15 минут, а затем помещали в ёмкость с чистым изопропиловым спиртом на 2 минуты. Затем детали были полностью высушены на воздухе или с помощью шланга со сжатым воздухом сдули IPA с деталей.

#### 4. Исследование полученных структур

После получения готовых деталей их исследовали на наличие дефектов, а качество изделий оценивали с помощью микроскопа. На рис. 4 представлены микрорядочки с  $N=4$ , готовая модель элемента со структурой из этих микрорядочек (рис. 4б) и изображение под микроскопом полученных структур (рис. 4в, 4г). Аналогичная информация представлена на рис. 5.

Имеются микрорядочки с  $N=5$  (рис. 5а), вид структур сбоку (рис. 5б, 5г), вид сверху модели (рис. 5д) и вид сверху реальных элементов (рис. 5е).

При изготовлении деталей возникает масса сложностей, что сказывается на качестве печати. Также в некоторых случаях детали полностью отрывались от платформы и падали в ванну с полимером. Отслоение элемента связано с малым размером печатных площадей, когда сила тяжести слоёв, напечатанных сверху, ломает всю конструкцию. На рис. 6а, 6б показан дефект, когда во время печати начался частичный разрыв слоя, но структура не разорвалась. На рис. 6б также наблюдался сдвиг слоя. На рис. 7а показана подложка, от которой деталь была полностью оторвана. На подложке есть слои, которые принтер продолжал печатать после падения детали. Из-за высокой концентрации отвердителя в некоторых местах произошла полимеризация фотополимера в тех местах, где он должен оставаться жидким. Это связано с тем, что в них поступает лазерное излучение, хотя и меньшей мощности (рис. 7б).

#### 5. Моделирование

На рис. 8 представлены результаты моделирования распространения ультразвуковых волн от стандартного пьезоэлемента круглой формы диаметром 15 мм. Его характеристики представлены в табл. 3. На рис. 9 представлено распространение волны от пьезоэлемента из микроструктур точно такой же формы и размера в водной среде в трубе диаметром 30 мм. Здесь видно, что структуры изменяют направление распространения ультразвукового луча, а соответственно, и его диаграмму направленности.

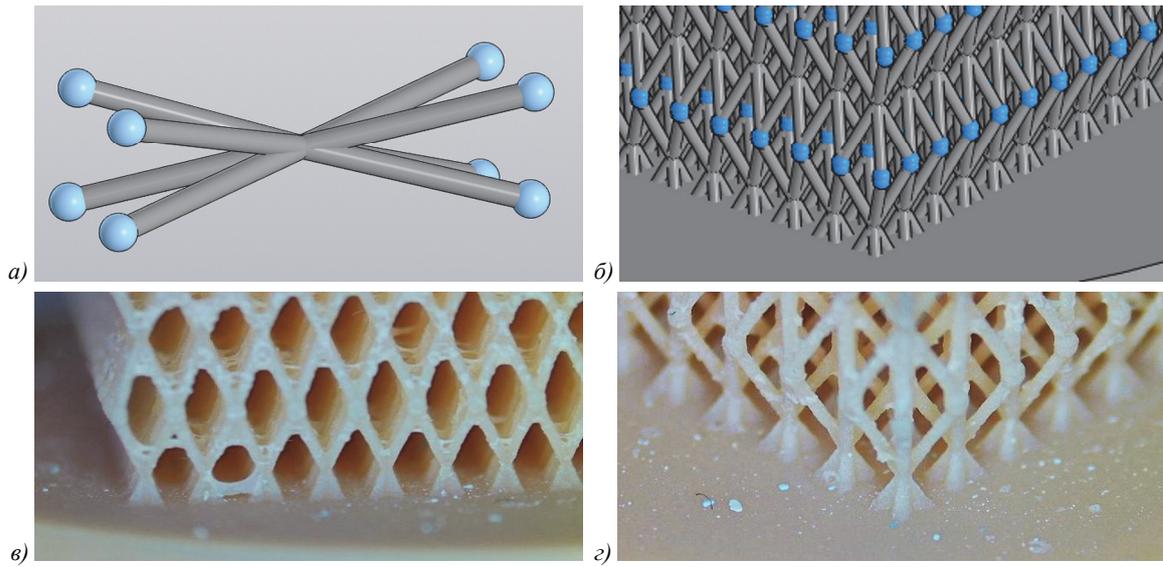


Рис. 4. Микроструктуры с  $N=4$

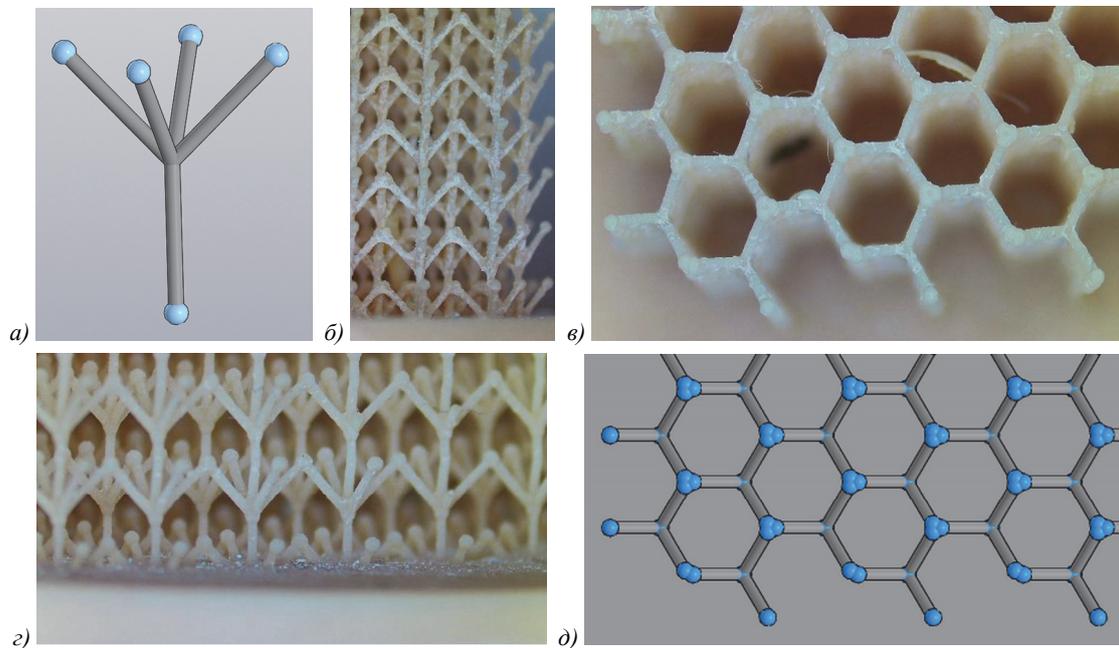


Рис. 5. Микроструктуры с  $N=5$

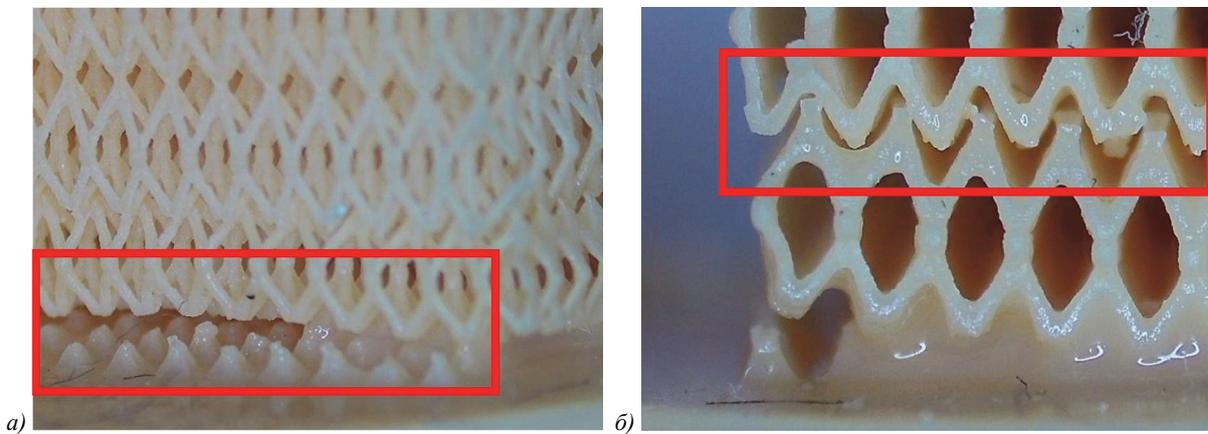


Рис. 6. Частичный разрыв слоя

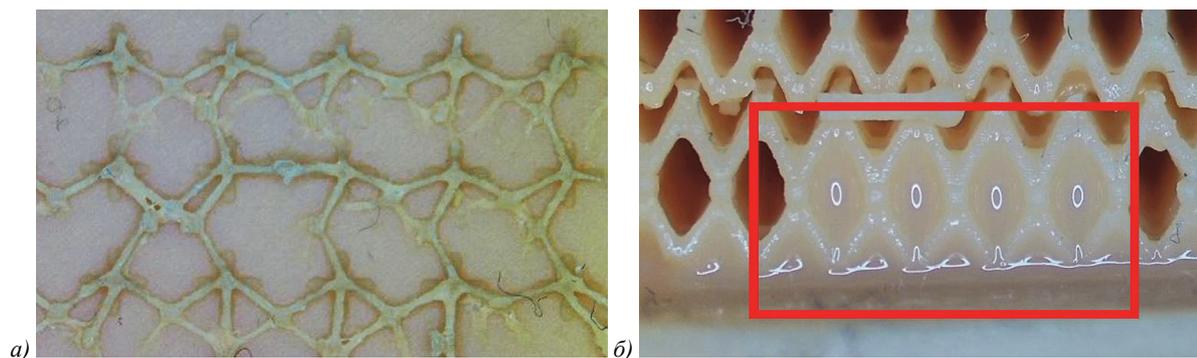


Рис. 7. Другие дефекты

Это уменьшает количество переотражений в канале сенсора, что увеличивает точность измерения расходомера.

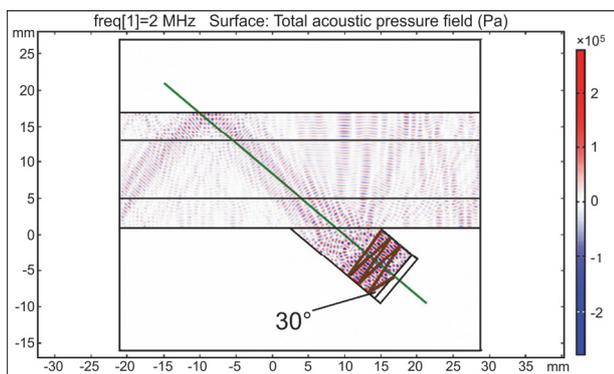


Рис. 8. Стандартный пьезоэлемент

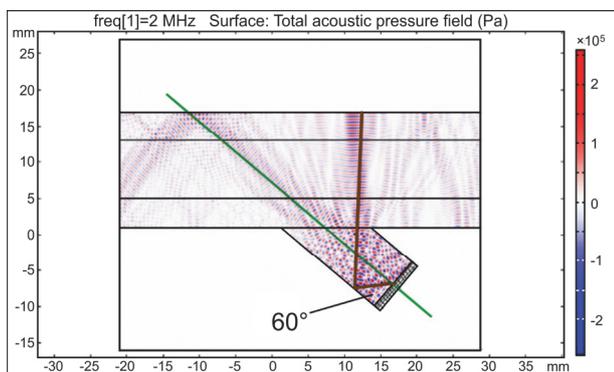


Рис. 9. Пьезоэлемент из микроструктур

При моделировании использовалась комбинация следующих математических моделей:

- 1) уравнения пьезоэлектричества: эти уравнения описывают связь между электрическим полем и механическим напряжением в пьезоэлементе (использовались уравнения Ламе и уравнения электростатики для описания этой связи);
- 2) уравнение движения: для описания механического движения пьезоэлемента используются уравнения Навье–Стокса и уравнения колебаний;
- 3) уравнение распространения звуковых волн для моделирования излучения звуковых волн от пьезоэлемента (использовалось уравнение колебаний в упругой среде);

- 4) уравнение теплопроводности: для учёта тепловых процессов в пьезоэлементе;
- 5) уравнения для граничных условий: учитываются граничные условия для электрических, механических и тепловых параметров на поверхностях пьезоэлемента.

Табл. 3. Характеристики пьезоэлемента

Свойства	Значения
Relative dielectric permittivity at 1 kHz	1000
Dielectric dissipation factor at 1 kHz	4 tan δ
Curie temperature	330 °C
Max. recommended working range	230 °C
Piezoelectric charge coefficient	320 pC/N
Mechanical Quality Factor	>1000
Density	7,70 г/см <sup>3</sup>

Также на рис. 10 представлены входные и выходные сигналы стандартного пьезоэлемента и пьезоэлемента из микроструктур. Пьезоэлементы располагаются друг напротив друга в пьезоакустическом канале, заполненном водой. Один из них во время передачи сигнала является излучателем, а другой – приёмником. Данный эксперимент повторялся для стандартных пьезоэлементов и для пьезоэлементов из микроструктур. Входное напряжение, подаваемое на излучатель, – 5 вольт. Здесь видно, что при подаче входного напряжения на стандартный пьезоэлемент, он излучает сигнал амплитудой 3 вольт, а при подаче напряжения на пьезоэлемент из микроструктур излучаемый сигнал достигает амплитуды только в 1 вольт. Но входной сигнал на элементе-приёмнике из микроструктур в ультразвуковом канале расходомера составляет 0,6 вольт, а на стандартном элементе-приёмнике только около 0,4 вольт, что на 50% меньше. При меньшем генерируемом сигнале элемента из микроструктур получаемый сигнал в полтора раза больше, чем при использовании стандартного пьезоэлемента. Это достигается за счёт изменения диаграммы направленности элемента стандартной формы, которое обеспечивает более эффективное распространение ультразвуковых волн с меньшим переотражением. В итоге получается пьезоэлемент,

который подходит под конкретную задачу, а именно измерение расхода воды расходомером. При формировании необходимого излучения учитывались все характеристики задачи, а именно угол установки пьезоэлементов в канале, параметры жидкости, диаметр трубы и так далее. Потому что в других условиях, например, в трубе с большим диаметром, где угол расположения пьезоэлементов уменьшается, получе-

ние большего по амплитуде по сравнению со стандартным элементом может и не быть, и нужно подбирать другие конфигурации микрорешетчатых структурных пьезоэлементов. Для данной задачи также существует возможность для комбинации стандартных пьезоэлементов и пьезоэлементов из микроструктур в паре, например, один – для излучателя, а другой – для приёмника.

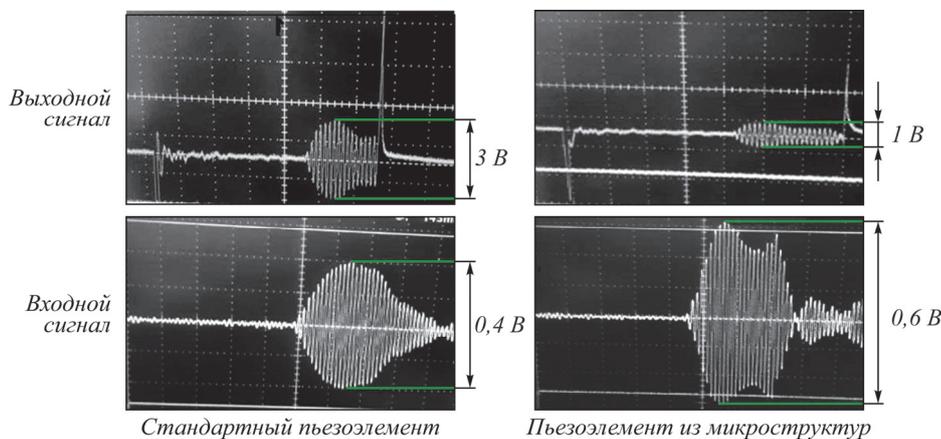


Рис. 10. Входные и выходные сигналы пьезоэлементов

### Заключение

Были предложены 3D-модели субволновых структур определённой геометрии, позволяющие провести аналитический расчёт для реализации пьезоакустических и пьезоэлектрических элементов с требуемыми свойствами. Проведено моделирование излучения акустических сигналов стандартными пьезоэлементами и элементами из предложенных структур.

Разработана технология, позволяющая создавать полученные микроструктуры методом 3D-печати. По данной технологии реализованы реальные пьезоакустические элементы из микроструктур. Показано, что качество исполнения данных структур с применением 3D-печати с минимальным размером ячеек 25 микрон позволяет создавать пьезоэлементы с необходимыми параметрами.

Разработан и изготовлен специальный стенд для исследования созданных элементов. Проведённые измерения показали улучшение энергетических характеристик пьезоэлементов на 30%.

Другим возможным применением разработки является создание датчиков, встроенных в систему ультразвукового расходомера без дополнительного вспомогательного оборудования и компонентов. Это позволит упростить всю систему и удешевить изготовление конструкции. Разработанную технологию планируется совершенствовать, чтобы получать конструкции с требуемой геометрией.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» (численное ис-

следование и экспериментальная реализация примера микроструктуры).

### References

- [1] Andrianova AV, Vinogradova IL, Sultanov AKh, Meshkov IK, Abdrakhmanova GI, Grakhova EP, Ishmiyarov AA, Yantilina LZ. An approach to synthesizing a 3D nanostructured glass-ceramic material based on intensive high-pressure torsion. *Computer Optics* 2016; 40(4): 489-500. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-489-500.
- [2] Skidanov RV, Doskolovich LL, Ganchevskaya SV, Blank VA, Podlipnov VV, Kazanskiy NL. Experiment with a diffractive lens with a fixed focus position at several given wavelengths. *Computer Optics* 2020; 44(1): 22-28. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-646.
- [3] Tripathi N, Pavelyev VS, But VS, Lebedev SA, Kumar S, Sharma P, Mishra P, Sovetkina MA, Fomchenkov SA, Podlipnov VV, Platonov V. Analysis and optimization of photonics devices manufacturing technologies based on Carbon Nanotubes. *J Phys: Conf Ser* 2019; 1368(2): 022038. DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022034.
- [4] Gluschenko AG, Glushchenko EP. The use of metamaterials to control the speed of light propagation in optical structures. *Computer Optics* 2017; 41(2): 202-207. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-202-207.
- [5] Borminsky SA, Solntseva AV, Skvortsov BV. A method for optoelectronic control of liquid volume in a tank. *Computer Optics* 2016; 40(4): 552-559. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-552-559.
- [6] Storozhenko DV, Dzyuba VP, Kulchin YN, Amosov AV. Excitonic optical nonlinearity of dielectric nanocomposites in weak optical fields. *Computer Optics* 2016; 40(6): 855-862. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-855-862.
- [7] But VS, Kobelev AA, Karlin ES, Karpeev SV. Design of metamaterial structures for manufacturing piezoelements and optical structures with the necessary characteristics. *Proc SPIE* 2021; 11793: 117930G. DOI: 10.1117/12.2593034.

- [8] But VS, Kobelev AA, Karlin ES, Karpeev SV. Development of an ultrasonic fourteen channel flowmeter for visualization of the flow profile. Proc SPIE 2021; 11793: 117930L. DOI: 10.1117/12.2593035.
- [9] Volkov AV, Kazanskiy NL, Moiseyev OYu, Soifer VA. A method for the diffractive microrelief formation using the layered photoresist growth. Opt Lasers Eng 1998; 29(4-5): 281-288. DOI: 10.1016/S0143-8166(97)00116-4.
- [10] Skidanov RV, Moiseev OYu, Ganchevskaya SV. Additive process for fabrication of phased optical diffraction elements. J Opt Technol 2016; 83(1): 23-25. DOI: 10.1364/JOT.83.000023.
- [11] Miklyaev YV, Karpeev SV, Dyachenko PN, Pavelyev VS. Fabrication of three-dimensional photonics crystals by interference lithography with low light absorption. J Mod Opt 2009; 56(9): 1133-1136. DOI: 10.1080/09500340902919469.
- [12] Dyachenko PN, Karpeev SV, Pavelyev VS. Fabrication and investigation of three-dimensional metallodielectric photonic crystals for infrared range. Computer Optics 2010; 34(4): 501-505.
- [13] Dyachenko PN, Karpeev SV, Fesik EV, Miklyaev YV, Pavelyev VS, Malchikov GD. Fabrication of three-dimensional metallodielectric photonics crystals by interference lithography. Proc SPIE 2010; 7713: 77131J. DOI: 10.1117/12.853791.
- [14] Dyachenko PN, Karpeev SV, Fesik EV, Miklyaev YV, Pavelyev VS, Malchikov GD. The three-dimensional photonic crystals coated by gold nanoparticles. Opt Commun 2011; 284(3): 885-888. DOI: 10.1016/j.optcom.2010.10.006.
- [15] Dyachenko PN, Karpeev SV, Pavelyev VS. Fabrication and characterization of three-dimensional metallodielectric photonic crystals for infrared spectral region. Opt Commun 2011; 284(22): 5381-5383. DOI: 10.1016/j.optcom.2011.07.062.
- [16] Protsenko VI, Kazanskiy NL, Serafimovich PG. Real-time analysis of parameters of multiple object detection systems. Computer Optics 2015; 39(4): 582-591. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-582-591.
- [17] Nikitin VS, Semyonov EI, Solostin AV, Sharov VG, Chayka SV. Design of an optical divider for 'smartlink connection' with use of SLA and FDM 3D printing technology. Computer Optics 2016; 40(1): 57-63. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-57-63.
- [18] Karpeev SV, Ustinov AV, Khonina SN. Design and analysis of a three-wave diffraction focusing doublet. Computer Optics 2016; 40(2): 173-178. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-173-178.
- [19] Makarev DI, Rybyanets AN, Mayak GM. The possibility of creating digital piezomaterials based on piezoceramic-polymer mixed composites. Tech Phys Lett 2015; 41(4): 317-319. DOI: 10.1134/S1063785015040124.
- [20] Miyazawa Y, Charalampidis E, Chong C, Kevrekidis P, Yang J. Origami-based impact mitigation via rarefaction solitary wave creation. Sci Adv 2019; 5(5): eaau2835. DOI: 10.1126/sciadv.aau2835.
- [21] Pavelyev VS, Borodin SA, Kazanskiy NL, Kostyuk GF, Volkov AV. Formation of diffractive microrelief on diamond film surface. Opt Laser Technol 2007; 39(6): 1234-1238. DOI: 10.1016/j.optlastec.2006.08.004.
- [22] Kazanskiy NL, Kolpakov VA. Optical materials: Microstructuring surfaces with off-electrode plasma. Boca Raton: CRC Press; 2017. ISBN: 978-131527992-3.
- [23] Abul'khanov SR, Kazanskiy NL, Doskolovich LL, Kazakova OY. Manufacture of diffractive optical elements by cutting on numerically controlled machine tools. Russ Eng Res 2011; 31(12): 1268-1272. DOI: 10.3103/S1068798X11120033.
- [24] Bezus EA, Doskolovich LL, Kazanskiy NL. Evanescent-wave interferometric nanoscale photolithography using guided-mode resonant gratings. Microelectron Eng 2011; 88(2): 170-174. DOI: 10.1016/j.mee.2010.10.006.
- [25] Bezus EA, Doskolovich LL, Kazanskiy NL. Interference pattern formation in evanescent electromagnetic waves using waveguide diffraction gratings. Quantum Electron 2011; 41(8): 759-764. DOI: 10.1070/QE2011v041n08ABEH014500.
- [26] Kazanskiy NL, Moiseev OYu, Poletayev SD. Microprofile formation by thermal oxidation of molybdenum films. Tech Phys Lett 2016; 42(2): 164-166. DOI: 10.1134/s1063785016020085.
- [27] Kazanskiy NL, Stepanenko IS, Khaimovich AI, Kravchenko SV, Byzov EV, Moiseev MA. Injectional multilens molding parameters optimization. Computer Optics 2016; 40(2): 203-214. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-203-214.
- [28] Kazanskiy NL, Skidanov RV. Technological line for creation and research of diffractive optical elements. Proc SPIE 2019; 11146: 111460W. DOI: 10.1117/12.2527274.
- [29] Cui H, Hensleigh R, Yao D, Maurya D, Kumar P, Kang MG. Three-dimensional printing of piezoelectric materials with designed anisotropy and directional response. Nat Mater 2019; 18: 234-241. DOI: 10.1038/s41563-018-0268-1.
- [30] Renap K, Kruth JP. Recoating issues in stereolithography. Rapid Prototyp J 1995; 1(3): 4-16. DOI: 10.1108/13552549510094223.
- [31] Rietzel D, et al. Polymer powders for selective laser sintering – production and characterization. Proc 44th CIRP Conf on Manufacturing Systems 2011: 1-6.
- [32] Yao WL, Leu MC. Analysis and design of internal web structure of laser stereolithography patterns for investment casting. Mater Des 2000; 21(2): 101-109. DOI: 10.1016/S0261-3069(99)00061-8.
- [33] Junk S, Kuen C. Review of open source and freeware CAD systems for use with 3D-printing. Procedia CIRP 2016; 50: 430-435. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.174.

#### Сведения об авторах

**Бут Валентин Сергеевич**, 1995 года рождения, в 2019 году окончил магистратуру Самарского университета кафедры нанотехнологий по направлению «Microoptics systems and nanotechnologies», в 2024 году окончил программу аспирантуры направления «Приборы и методы экспериментальной физики». Работает в ООО «Кроне-Автоматика». Область научных интересов: программирование, 3D-проектирование, 3D-печать. E-mail: [mister\\_byt@mail.ru](mailto:mister_byt@mail.ru)

**Карпеев Сергей Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва; ведущий научный сотрудник Института систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт». Область научных интересов: дифракционная оптика, мовые и поляризационные преобразования, волоконная оптика, оптическая обработка изображений. E-mail: [karp@ipsiras.ru](mailto:karp@ipsiras.ru)

ГРНТИ: 50.09.37

Поступила в редакцию 17 июля 2023 г. Окончательный вариант – 10 апреля 2025 г.

---

# Developing piezoelectric sensors from microstructures obtained by 3D printing

V.S. But<sup>1</sup>, S.V. Karpeev<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Krone-Avtomatika LLC, 443004, Russia, Samarskaya oblast, p. Verhnya podtepovka, 2;

<sup>2</sup> Samara National Research University, 443086, Moskovskoye Shosse 34, Samara, Russia;

<sup>3</sup> Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute",  
Molodogvardeyskaya Str. 151, Samara, 443001, Russia

## Abstract

In this work, 3D models of piezoacoustic elements constructed from microstructures of specific geometry were developed. These models were prepared by 3D printing, taking into account peculiarities of their geometry and a small size of constituent cells. Prototypes were obtained using stereolithography (SLA) technology after several printing attempts. These prototypes were examined for defects and the quality of the obtained elements (preservation of the necessary microcell structures). A technology for manufacturing elements of this type on a 3D printer was obtained. These designs can be used in practice as piezoelectric or piezo-acoustic elements by adding a piezoelectric powder to a polymer, for example, in ultrasonic flow meters, or used to create optical structures, for example, diffractive optical elements. Computer modeling and comparison of the acoustic signal emission of standard piezoacoustic elements, as well as elements from the proposed microstructures, were carried out. Also, a study was conducted of the emitted and received signals of piezoacoustic and piezoelectric elements.

**Keywords:** piezoelectric, piezoelement, nanostructure, piezoacoustic, ultrasonic measurement, optic structures, piezomaterial, micro cell.

**Citation:** But VS, Karpeev SV. Developing piezoelectric sensors from microstructures obtained by 3D printing. *Computer Optics* 2025; 49(6): 924-932. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1397.

**Acknowledgements:** The work was financially supported within a government project of the NRC "Kurchatov Institute" (numerical study and experimental implementation of a prototype microstructure).

---

## Author's information

**Valentin Sergeevich But** (b. 1995) in 2017 he graduated from Samara University with a bachelor's degree in nanoengineering in the direction of "Electronics and Nanoelectronics". In 2019, he graduated from the Samara University's Master's program in the department of nanoengineering in the direction "Microoptics systems and nanotechnologies", in 2023 he is studying under the postgraduate program in the direction "Instruments and methods of experimental physics". Research interests: programming, 3D design, 3D printing. E-mail: [mister\\_byt@mail.ru](mailto:mister_byt@mail.ru)

**Sergei Vladimirovich Karpeev**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. Leading researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: [karp@ipsiras.ru](mailto:karp@ipsiras.ru)

---

Received July 17, 2023. The final version – April 10, 2025.

---