

Микро- и наноэлектроника. Физика конденсированного состояния  
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК: 537.226  
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-28-34>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Локальные пьезоэлектрические свойства перфорированных сегнетоэлектрических пленок титаната бария-стронция

Н.Э. Шерстюк <sup>®</sup>

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

<sup>®</sup> Автор для переписки, e-mail: nesherstuk@mail.ru

### Резюме

**Цели.** Методика травления фокусированным ионным пучком остается одной из наиболее востребованных для изготовления двумерных фотонных кристаллов и структур на основе функциональных материалов. Данная методика достаточно хорошо отработана для полупроводников. Но в то же время изменение свойств сегнетоэлектрических материалов под действием фокусированного ионного пучка, в т.ч. параметров распределения и переключения поляризационного состояния под действием электрического поля, остается слабоизученным. Цель работы – определение локальных пьезоэлектрических параметров в перфорированных сегнетоэлектрических пленках титаната бария-стронция ( $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ ) с упорядоченными вертикальными воздушными каналами, изготовленными методом травления фокусированным ионным пучком.

**Методы.** Экспериментальные исследования проведены методом силовой микроскопии пьезоотклика при приложении электрического поля в планарной геометрии.

**Результаты.** Показано, что перфорация сегнетоэлектрической пленки приводит не только к формированию значительных неоднородностей в распределении пьезоэлектрического отклика в структуре, но и к заметному росту величины как вертикальной, так и латеральной компоненты пьезоотклика вблизи отверстий перфорации. Результаты расчета показали, что наибольшее усиление наблюдается для латеральной компоненты пьезоотклика: от 5 пм/В для неперфорированной пленки до 65 пм/В в области перфорации.

**Выводы.** Наиболее вероятным механизмом подобного изменения свойств является влияние нарушенного слоя, возникающего на границе и внутренней поверхности вертикальных воздушных каналов. Свойства этого слоя обусловлены двумя факторами: аморфизацией структуры в результате травления фокусированным ионным пучком и возникновением вблизи отверстия закрепленных доменных состояний, приводящих к формированию сложного распределения пьезоотклика как на границе отверстий, так и в промежутке между отверстиями перфорации. Полученная информация имеет значение для понимания особенностей формирования локальных пьезо- и сегнетоэлектрических откликов фотонных кристаллов, изготовленных травлением фокусированным ионным пучком, а также для поиска путей управления их состоянием при приложении внешнего электрического поля.

**Ключевые слова:** сегнетоэлектрики, фотонные кристаллы, силовая микроскопия пьезоотклика, травление фокусированным ионным пучком

• Поступила: 04.08.2021 • Доработана: 18.10.2021 • Принята к опубликованию: 02.03.2022

**Для цитирования:** Шерстюк Н.Э. Локальные пьезоэлектрические свойства перфорированных сегнетоэлектрических пленок титаната бария-стронция. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):28–34. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-28-34>

**Прозрачность финансовой деятельности:** Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## RESEARCH ARTICLE

# Local piezoelectric properties of perforated ferroelectric barium–strontium titanate films

Natalia E. Sherstyuk <sup>®</sup>

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

<sup>®</sup> Corresponding author, e-mail: nesherstuk@mail.ru

### Abstract

**Objectives.** Focused ion beam etching remains one of the most common methods for fabricating 2D photonic crystals and structures based on functional materials. This technique is quite well developed for semiconductors. But at the same time, the change in the properties of ferroelectric materials under the action of a focused ion beam, including parameters of distribution and switching of the polarization state under the action of an electric field, remains poorly studied. The purpose of this work is to determine the local piezoelectric parameters in perforated ferroelectric films of barium strontium titanate ( $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ ) with ordered vertical air channels fabricated by focused ion beam etching.

**Methods.** Experimental studies were conducted using piezoresponse force microscopy under applied electric field in planar geometry.

**Results.** It is shown that the perforation of a ferroelectric film leads not only to the formation of significant inhomogeneities in the piezoelectric response distribution in the structure, but also to the noticeable increase in the magnitude of both the vertical and lateral components of the piezoresponse near the perforation holes. The calculation results showed that the greatest enhancement is observed for the lateral component of the piezoresponse: from 5 pm/V for a nonperforated film to 65 pm/V in the perforated area.

**Conclusions.** The most probable mechanism for such a change in properties is the influence of a disturbed layer that occurs at the boundary and the inner surface of vertical air channels. The properties of this layer are due to two factors: amorphization of the structure as a result of the focused ion beam etching and the appearance of pinned domain states near the hole, leading to the formation of the complex piezoresponse distribution both at the hole boundary and in the gap between the perforations. The information obtained is important for understanding the peculiarities of the formation of local piezoelectric and ferroelectric responses in photonic crystals fabricated by focused ion beam etching, as well as for finding ways to control their state when an external electric field is applied.

**Keywords:** ferroelectrics, photonic crystals, piezoresponse force microscopy, focused ion beam etching

• Submitted: 04.08.2021 • Revised: 18.10.2021 • Accepted: 02.03.2022

**For citation:** Sherstyuk N.E. Local piezoelectric properties of perforated ferroelectric barium–strontium titanate films. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):28–34. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-28-34>

**Financial disclosure:** The author has no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

Практическое применение сегнетоэлектрических тонких пленок обусловлено особенностями формирования доменной структуры и ее изменения под действием внешнего электрического поля. При толщинах пленки менее 100 нм средний размер домена становится близким к толщине пленки, а на распределение доменов в единице объема оказывают существенное влияние дефекты различной природы, топология поверхности и свойства границ раздела. Эти факторы приводят не только к заметным искажениям параметров переключения (например, изменяется величина коэрцитивного поля, возникает асимметрия петли гистерезиса и т.д.), но также к изменениям оптических и нелинейно-оптических свойств сегнетоэлектрической пленки, обусловленных ее поляризационным состоянием [1, 2]. Тем не менее, этот подход открывает возможность для создания в рамках одной технологии широкого спектра функциональных элементов интегральной электроники и фотоники с контролируемым изменением параметров за счет формирования на поверхности или в объеме функционального материала упорядоченных структур с определенной геометрией – сверхрешеток и фотонных кристаллов (ФК).

С развитием интегральной фотоники и разработкой новых принципов функционирования ее элементов особую актуальность приобретают системы, основанные на комбинации ФК нескольких типов (например, одномерные – двумерные) или на комбинации ФК одного типа, но с разными геометрическими параметрами, что обеспечивает реализацию в рамках чипа различных процессов. Этот подход уже используется в конструкции гибридных электронно-фотонных чипов, основанных на полупроводниковых материалах. Аналогичные устройства на основе двумерных сегнетоэлектрических фотонных кристаллов (СЭФК), очевидно, не столь распространены, однако принципиальная возможность создания с их помощью перестраиваемых устройств, управляемых при помощи электрического поля, поддерживает постоянный интерес исследователей к этим материалам [3–6].

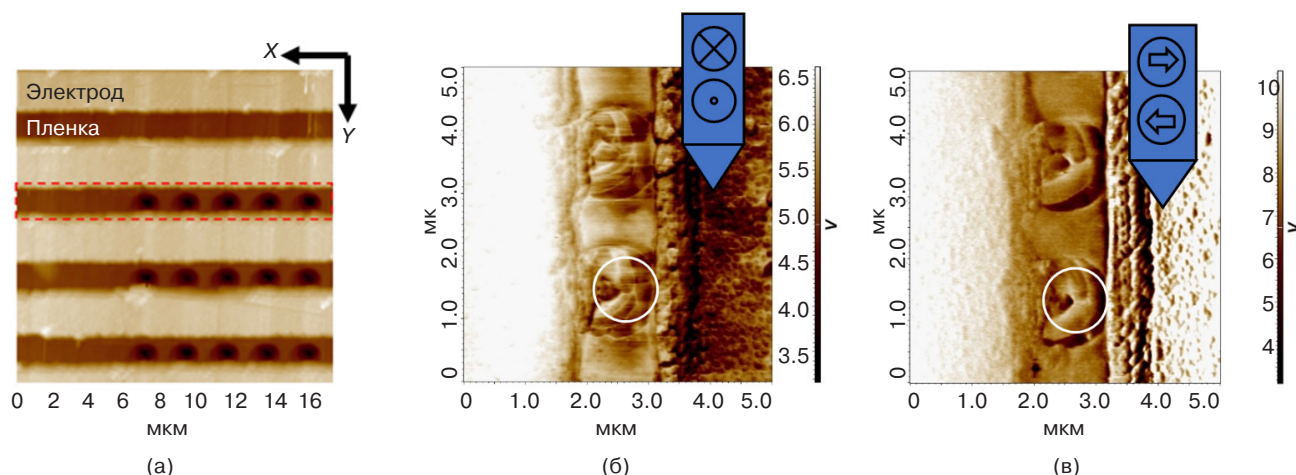
Одной из наиболее распространенных методик изготовления двумерных СЭФК является методика травления фокусированным ионным пучком (focused ion beam, FIB), которая, по сравнению с методиками литографии, обладает рядом преимуществ. Она легче адаптируется к различным материалам и обеспечивает возможность изготовления структур с разной геометрией в рамках одного технологического цикла, обеспечивая при этом сравнительно низкие энергозатраты при достаточно высоком, вплоть до 5 нм, пространственном разрешении [7].

В работе [8] на основании численного моделирования было показано, что доменная структура двумерных СЭФК, представляющих собой упорядоченный массив суб-микроразмерных отверстий, достаточно сложна даже в условиях упрощенной модели, не учитывающей дефекты структуры и приповерхностного слоя. В этом случае распределение поляризации зависит от числа и взаимного расположения каналов, а также от деполяризующего поля, возникающего на внутренней поверхности каналов. В частности, было показано, что периодическая перфорация однородной сегнетоэлектрической пленки цилиндрическими вертикальными воздушными каналами приводит к формированию поляризационных вихрей на краю отверстий, которые, в свою очередь, значительно усиливают электрическое поле в области между отверстиями. Это утверждение было частично подтверждено методом электросиловой микроскопии и генерации второй оптической гармоники (ГВГ) в работах [9–11]. Однако результаты, полученные методом ГВГ, благодаря пространственному разрешению методики, ограниченному длиной волны используемого излучения, позволяют получить только качественное совпадение с результатами работы [8].

Несмотря на значительное число проведенных исследований, вопрос влияния метода изготовления и геометрических параметров элементов СЭФК на распределение поляризации в перфорированной области и, следовательно, на возможность управлять состоянием и свойствами материала при приложении внешнего электрического поля, остается слабоизученным. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования методом силовой микроскопии пьезоотклика (piezoresponse force microscopy, PFM) состояния сегнетоэлектрической поляризации в краевой области отверстий перфорированных сегнетоэлектрических пленок титаната бария-стронция при приложении электрического поля в планарной геометрии. Такая структура позволяет проводить локальные исследования процесса переключения, как в пленке, так и в приэлектродной области, при этом, в отличие от z-геометрии, регистрируемый пьезоотклик не усредняется по всей толщине пленки.

## ИССЛЕДУЕМЫЕ СТРУКТУРЫ И ДЕТАЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Тонкие пленки титаната бария-стронция  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$  (BST) толщиной 1 мкм были эпитаксиально выращены на подложке  $\text{MgO}(001)$  методом высокочастотного распыления керамических мишеней [12]. Внешнее электрическое поле формировалось в плоскости пленки при помощи алюминиевой встречно-штыревой системы электродов (ВШСЭ)



**Рис. 1.** Топография исследуемой структуры в области перфорации, полученная методом атомно-силовой микроскопии (а) и распределения вертикальной (б) и латеральной (в) компонент пьезоотклика, полученных методом PFM для двух соседних отверстий перфорации в области, выделенной пунктиром на позиции (а). Белым кружком отмечена граница вертикального канала

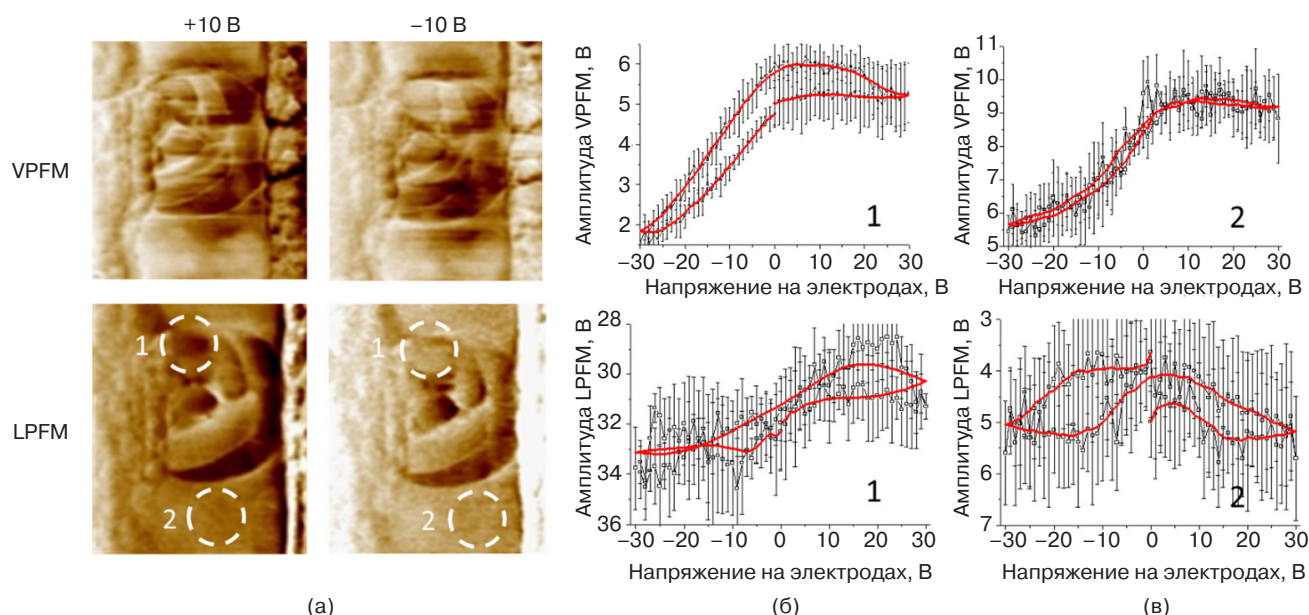
с шириной зазора между электродами 1 мкм и периодом 2 мкм; высота электрода составляла 200 нм. Методом FIB в зазорах между электродами была сформирована система упорядоченных вертикальных воздушных каналов с диаметром отверстия порядка 880 нм. Для травления использовался микроскоп Quanta 3D (FEI Technology, США), травление проводилось ионами галлия, ток травления составлял 0.5–0.7 нА (рис. 1а). Глубина отверстий оценивалась по времени травления и составляла порядка 1 мкм.

Исследование локальных пьезоэлектрических свойств полученной структуры проводилось методом PFM с использованием контактной моды сканирующего зондового микроскопа Ntegra Aura (НТ-МДТ, Москва, Россия) в вертикальной и горизонтальной плоскостях (рис. 1б, 1в), соответственно. Во время сканирования движение кантилевера было сильно ограничено сложной структурой соединительных электродов и значительными колебаниями топографии образца. Поэтому сканирование проводилось только в одном направлении, перпендикулярном электродам (по оси  $Y$  на рис. 1а). Для измерений использовались кантилеверы серии PPP-EFM (резонансная частота 45–115 кГц; силовая константа 0.5–9.5 Н/м, NANOSENSORS, Швейцария). К ВШСЭ прикладывалось напряжение в диапазоне 5–30 В. Измерения методом PFM проводились при приложении переменного напряжения с частотой 50 кГц и амплитудой 5 В.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Примеры PFM-изображений вертикальной (vertical piezoresponse force microscopy, VPFM) и латеральной (lateral piezoresponse force microscopy,

LPFM) компонент пьезоотклика на краю воздушного канала (область 1) и в области, расположенной примерно посередине между двумя каналами (область 2), приведены на рис. 1б и 1в, соответственно. Видно, что распределения пьезоотклика в этих областях отчетливо различаются. В неперфорированной области между электродами распределения обеих составляющих пьезоотклика более или менее однородны. При подаче напряжения на электроды в неперфорированной структуре максимальное значение пьезоотклика локализуется в приэлектродной области. Это согласуется с результатами работы [13], где показано, что на границе электрода происходит резкое возрастание обеих компонент электрического поля. В наших измерениях снижение интенсивности от максимального до среднего значения в зазоре наблюдается на расстоянии примерно 250 нм как для латеральной, так и для вертикальной компоненты. При приложении поля противоположного знака околоэлектродный пик пьезоотклика имеет другое значение: максимум интенсивности пьезоотклика при приложении постоянного напряжения +10 В существенно (в 2.8 раза для латеральной и примерно в 1.7 раза для вертикальной компоненты пьезоотклика) превышает аналогичное значение при воздействии постоянного напряжения –10 В. Одной из причин этого различия может быть неперекрываемая поляризация, обычно возникающая на границе раздела пленка/подложка из-за механического стресса, обусловленного рассогласованием периодов кристаллических решеток. Однако при толщине пленки 1 мкм влияние этой поляризации на боковую составляющую пьезоотклика вблизи поверхности можно считать незначительным. Другим объяснением этой разницы в пьезоотклике может быть вклад в регистрируемый сигнал за счет изменения профиля



**Рис. 2.** Карты распределения пьезоотклика в области одного отверстия перфорированной структуры при приложении внешнего поля к встречно-штыревым электродам (а) и зависимость амплитуды вертикального (верхние панели) и латерального (нижние панели) пьезоотклика от напряжения на электродах встречно-штыревой системы электродов, измеренные в областях 1 (рис. 2б) и 2 (рис. 2в). Красная линия – результат усреднения по 5 измерениям для каждого цикла

всей структуры, вызванного пьезоэффектом в пленке под электродами. Ранее нами было показано [9], что электрическое поле может приводить к изменению профиля структуры в пределах нескольких сотен нанометров. При подаче напряжения +10 В изменение профиля не превышает 50 нм, но этого может быть достаточно для заметного смещения лазерного луча в системе регистрации атомно-силового микроскопа, что в результате проявляется в асимметрии пьезоотклика. Этот вопрос требует уточнения.

Как видно из рис. 2а, на границе отверстия перфорированной структуры можно выделить точки, в которых наблюдается изменение (переключение) поляризации при приложении к электродам противоположной разности потенциалов (например, область 1), и точки, сохраняющие свое состояние при любом значении приложенного поля. Такое распределение объясняется влиянием не только особенностей рельефа, но и нескольких механизмов. Прежде всего, на распределение пьезоотклика влияют структурные дефекты, возникающие на внутренней поверхности и на краю отверстия в результате травления. Воздействие ионов высокой энергии выражается, во-первых, в имплантации высокоэнергетических ионов  $Ga^{+}$  в структуру материала, а во-вторых – в формировании большого числа микроразрушений на поверхности и, как следствие, в аморфизации приповерхностного слоя. Эти факторы создают на поверхности структуры (на краю отверстия и на внутренней поверхности воздушного канала) дефектный слой, свойства которого могут существенно отличаться от свойств основного

материала [14, 15]. В работе [15] было показано, кроме того, что поврежденная область не ограничивается структурой, заданной электронным шаблоном, а распространяется не менее, чем на 1 мкм от ее края вглубь области, не подвергшейся травлению. Эти повреждения и связанные с ними искажения свойств тем более существенны, чем более сложной и более зависимой от локальных поляризационных свойств является структура ФК-элементов. Грубая оценка параметров зерен в области отверстий, выполненная с помощью программного обеспечения сканирующего зондового микроскопа Ntegra Aura компании НТ-МДТ, показала, что большинство зерен в отверстиях имеют средний размер менее 100 нм, что соответствует аморфной структуре.

Еще одним фактором, оказывающим влияние на неоднородность итогового распределения пьезоотклика, является пиннинг доменов к внутренней поверхности воздушного канала, которые взаимодействуют с боковой поверхностью проводящей иглы кантилевера. В результате общий пьезоотклик в области отверстия имеет гораздо большую интенсивность и неоднородность, чем типичный отклик аморфной структуры.

Для исследования влияния дефектного слоя на параметры пьезоотклика были измерены петли пьезоэлектрического гистерезиса в области, содержащей переключаемый домен (область 1 на рис. 2а) и в промежутке между двумя воздушными каналами (область 2 на рис. 2а). Детали методики измерения приведены в работе [9]. Так как структура обладает значительным числом дефектов, проводилось

усреднение по 5 измерениям для каждого цикла. Результаты отдельных измерений, усредненное значение и погрешности для вертикального и латерального пьезоотклика представлены на рис. 2б и 2в, соответственно. При измерениях внешнее напряжение смещения изменялось от начального состояния (0 В) к положительному значению и обратно.

Как видно из рис. 2, петля вертикального пьезоотклика в области 1 не симметрична и имеет сравнительно низкое насыщенное состояние при +10 В и большое, порядка 3 ГВ/м, поле насыщения при отрицательном значении приложенного поля. Петля вертикального пьезоотклика в области 2 (в зазоре между отверстиями) более симметрична и немного смещена в отрицательную часть. Непереключаемая поляризация, вызванная механическими напряжениями на границе с подложкой, не оказывает влияния на формирование пьезоотклика. Следовательно, такой сдвиг можно объяснить влиянием закрепленных доменных состояний вблизи границы отверстия воздушного канала. Возможность образования короткодействующих мезомасштабных доменов в перфорированной сегнетоэлектрической структуре подтверждается в ряде работ (например, в [16]).

Полевые зависимости латерального пьезоотклика, зарегистрированного в области 1, демонстрируют более сложное пьезоэлектрическое поведение по сравнению с тем, которое наблюдается в промежутке между отверстиями (область 2). Такое поведение согласуется с релаксацией механической деформации вблизи отверстий, где материал пленки удаляется ионным травлением [17]. Однако важной особенностью этих результатов является то, что перфорированная структура показала высокий отклик в сигнале LPFM даже при гистерезисном поведении. Увеличение сигнала PFM и различные тенденции завершения петли можно объяснить предположением, что домены LPFM сформировали замкнутую структуру вокруг отверстия с противоположной ориентацией пространственных доменов. В соответствии с этим предположением сигнал LPFM во второй области формируется в условиях взаимовлияния двух 180-градусных доменов от соседних отверстий, в результате чего между отверстиями образуются 90-градусные домены, которые визуализируются посредством измерения VPFM. Этот механизм отчасти согласуется с результатами моделирования, представленными в работе [8], и требует дальнейшего детального исследования.

На основании измеренных пьезоэлектрических гистерезисов были проведены оценки величины пьезокоэффициентов в областях 1 и 2 в соответствии с подходом, изложенным в работах [9, 10], где принимается, что эффективные пьезокоэффициенты вертикального  $d_V$  и латерального  $d_L$  отклика равны:  $d_V \approx d_{33}$ ,  $d_L \approx d_{15} \pm d_{31}$ .

Результаты расчета показали, что перфорация сегнетоэлектрической пленки приводит к увеличению латеральной компоненты пьезоотклика от  $d_L = 5$  пм/В для неперфорированной пленки до 65 пм/В в области перфорации. Тензор VPFM также увеличился, но не так резко – с 11 пм/В до 40 пм/В.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При формировании упорядоченной структуры вертикальных воздушных каналов в эпитаксиальной пленке сегнетоэлектрика  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$  методом травления фокусированным ионным пучком на внутренней поверхности воздушного канала образуется нарушенный слой, свойства которого обусловлены двумя факторами: аморфизацией структуры и возникновением вблизи границы канала закрепленных доменных состояний. Это, в свою очередь приводит к формированию сложного распределения пьезоотклика в области отверстия перфорации. Если в неперфорированной структуре преобладает вертикальная компонента пьезоотклика, то в перфорированной структуре вклад латеральной компоненты возрастает за счет формирования в прилегающей к границе отверстия области сложной структуры с противоположной ориентацией доменов. Перфорация приводит к увеличению по сравнению с неперфорированной пленкой как вертикальной, так и латеральной компонент пьезоотклика. Полученные результаты необходимо принимать во внимание при расчете и моделировании распределения пьезоэлектрических свойств двумерных фотонных кристаллов на основе сегнетоэлектрических пленок.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит М.С. Иванова (Университет Авейро, Португалия) за помощь в проведении исследований методом PFM.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Scott J.F., Paz de Araujo C.A. Ferroelectric memories. *Science*. 1989;246(4936):1400–1405. <https://doi.org/10.1126/science.246.4936.1400>
2. Wang Y.G., Zhong W.L., Zhang P.L. Surface and size effects on ferroelectric films with domain structures. *Phys. Rev. B*. 1995;51(8):5311–5314. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.5311>
3. Lin P.T., Yi F., Ho S.-T., Wessels B.W. Two-dimensional ferroelectric photonic crystal waveguides: simulation, fabrication, and optical characterization. *J. Lightwave Technol.* 2009;27(19):4330–4337. <https://doi.org/10.1109/JLT.2009.2023808>
4. Matveev O., Morozova M., Romanenko D. Concept of using composite multiferroic structure magnonic crystal – ferroelectric slab as memory unit. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;1389(1):012041(1–5). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1389/1/012041>

5. Hu X., Gong Q., Feng S., Cheng B., Zhang D. Tunable multichannel filter in nonlinear ferroelectric photonic crystal. *Opt. Commun.* 2005;253(1–3):138–144. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2005.04.056>
6. Takeda H., Yoshino K. Tunable photonic band gaps in two-dimensional photonic crystals by temporal modulation based on the Pockels effect. *Phys. Rev. E.* 2004;69(1Pt2):016605(1–5). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.016605>
7. Ferri A., Rémiens D., Desfeux R., Da Costa A., Deresmes D., Troadec D. Evaluation of damages induced by Ga<sup>+</sup>-focused ion beam in piezoelectric nanostructures. In: Wang Z. (Ed.). *FIB Nanostructures. Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology*. Cham: Springer; 2013. V. 20. P. 417–434.
8. Леванюк А.П., Misirlioglu I.B., Мишина Е.Д., Сигов А.С. Эффекты деполяризующего поля в перфорированной пленке двухосного сегнетоэлектрика. *Физика твердого тела*. 2012;54(11):2109–2117. [Levanyuk A.P., Misirlioglu I.B., Mishina E.D., Sigov A.S. Effects of the depolarization field in a perforated film of the biaxial ferroelectric. *Phys. Solid State*. 2012;54(11):2243–2252. <https://doi.org/10.1134/S1063783412110170>]
9. Sherstyuk N.E., Ivanov M.S., Ilyin N.A., Grishunin K.A., Mukhortov V.M., Kholkin A.L., Mishina E.D. Local electric field distribution in ferroelectric films and photonic crystals during polarization reversal. *Ferroelectrics*. 2016;503(1):138–148. <https://doi.org/10.1080/00150193.2016.1217143>
10. Ivanov M.S., Sherstyuk N.E., Mishina E.D., Khomchenko V.A., Tselev A., Mukhortov V.M., Paixao J.A., Kholkin A.L. Enhancement of local piezoelectric properties of a perforated ferroelectric thin film visualized via piezoresponse force microscopy. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2017;50(42):425303(1–6). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa8604>
11. Mishina E., Zaitsev A., Ilyin N., Sherstyuk N., Sigov A., Golovko Yu., Muhortov V., Kolesnikov A., Lozovik Yu., Yemtsova M., Rasing Th. Switchable nonlinear metalloferroelectric photonic crystals. *Appl. Phys. Lett.* 2007;91(4):041107(1–6). <https://doi.org/10.1063/1.2762284>
12. Mukhortov V.M., Golovko Y.I., Tolmachev G.N., Klevtsov A.N. The synthesis mechanism of complex oxide films formed in dense RF – plasma by reactive sputtering of stoichiometric targets. *Ferroelectrics*. 2000;247(1):75–83. <https://doi.org/10.1080/00150190008214943>
13. Брехов К.А. Напряженность электрического поля в планарном конденсаторе на основе тонкой сегнетоэлектрической пленки BaSrTiO<sub>3</sub>. *Нано- и микро-системная техника*. 2018;20(9):555–561. <https://doi.org/10.17587/nmst.20.555-561> [Brekhov K.A. Electric field intensity in a planar capacitor based on thin BaSrTiO<sub>3</sub> Ferroelectric Film. *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*. 2018;20(9):555–561 (in Russ.). <https://doi.org/10.17587/nmst.20.555-561>]
14. Volkert C.A., Minor A.M. Focused ion beam microscopy and micromachining. *MRS Bulletin*. 2007;32(05):389–399. <https://doi.org/10.1557/mrs2007.62>
15. Morelli A., Johann F., Schammelt N., Vrejoiu I. Ferroelectric nanostructures fabricated by focused-ion-beam milling in epitaxial BiFeO<sub>3</sub> thin films. *Nanotechnology*. 2011;22(26):265303(1–6). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/26/265303>
16. Kholkin A.L., Kalinin S.V., Roelofs A., Gruverman A. *Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale*. Kalinin S., Gruverman A. (Eds.). New York: Springer; 2006. 988 p.
17. Nagarajan V., Roytburd A., Stanishevsky A., Prasertchoung S., Zhao T., Chen L., Melngailis J., Auciello O., Ramesh R. Dynamics of ferroelastic domains in ferroelectric thin films. *Nat. Mater.* 2003;2(1):43–47. <https://doi.org/10.1038/nmat800>

## Об авторе

**Шерстюк Наталия Эдуардовна**, к.ф.-м.н., доцент кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: nesherstuk@mail.ru. Scopus Author ID 6602267129, ResearcherID A-3460-2014. <https://orcid.org/0000-0002-7068-4028>

## About the author

**Natalia E. Sherstyuk**, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: nesherstuk@mail.ru. Scopus Author ID 6602267129, ResearcherID A-3460-2014. <https://orcid.org/0000-0002-7068-4028>