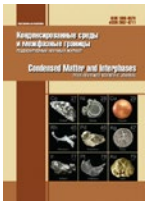

ISSN 1606-867X (Print)
ISSN 2687-0711 (Online)
Конденсированные среды и межфазные границы
https://journals.vsu.ru/kcmf/

Оригинальные статьи

Научная статья
УДК 681.586.773
Научная специальность ВАК – 01.02.04 Механика деформируемого твёрдого тела
https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13969

Упругие напряжения в биморфных пьезокантилеверах на основе эпитаксиальных широкозонных III-нитридов

Е. А. Панютин✉, Ш. Ш. Шарофидинов

ФГБУН «Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе Российской академии наук», Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург 194021, Российская Федерация

Аннотация

Цель статьи: В настоящей работе методом компьютерного моделирования проведено исследование упругих свойств биморфных пьезокантилеверов, сформированных на базе эпитаксиальных AlN/AlN (AlGaN/AlN/AlGaN/AlN/AlGaN) структур, допускающих возможность совместного проявления прямого и обратного пьезоэффектов и возможность возбуждения акустических волн различных типов. Учитывая высокую термостойкость и термостабильность параметров этих материалов, предполагается, что такие кантилеверы могли бы послужить основой для последующего создания различных сенсоров, ориентированных на работу в высокотемпературных условиях и в условиях химически агрессивных сред.

Экспериментальная часть: В статических режимах и в режимах работы в области инфранизких частот основным проявлением обратного пьезоэффекта является появление изгибных деформаций и связанных с ними упругих напряжений. Для предварительной оценки величины этих напряжений, имеющих на гетерограницах слоев разнонаправленный характер, была построена простая математическая модель, позволяющая установить величину этих напряжений и их связь с геометрическими и упругими параметрами консоли. *Выводы:* На основе модели в среде MATLAB был разработан вычислительный алгоритм, который позволяет определить зависимость упругих напряжений, в том числе и от соотношения толщин активных слоев. Такая зависимость имеет вид кривой с максимумом, который достигается при отношении толщин слоев $m = 1.5$, в тоже время от отношений значений упругих констант материалов слоев (для случаев AlGaN/AlN и GaN/AlN) величина этих напряжений практически не зависит. Предполагается, что подобные оценки будут полезными для предварительного проектирования и оптимизации геометрии пьезоэлектрических сенсоров.

Ключевые слова: высокотемпературная функциональная электроника, широкозонные полупроводники; эпитаксиальные технологии; многослойные AlN/AlGaN-структуры; биморфный кантилевер, изгибные деформации, упругие напряжения

Источник финансирования: Исследование было выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 24-22-00392.

Для цитирования: Панютин Е. А., Шарофидинов Ш. Ш. Упругие напряжения в биморфных пьезокантилеверах на основе эпитаксиальных широкозонных III-нитридов. *Конденсированные среды и межфазные границы*. Конденсированные среды и межфазные границы. 2026;28(3): 000-000. 2026;28(3): 408–414. https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13969

✉ Панютин Евгений Анатольевич, e-mail: eugeny.panyutin@mail.ioffe.ru
© Панютин Е. А., Шарофидинов Ш. Ш., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original articles

Research article
https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13969

Elastic stresses in bimorph piezocantilevers based on epitaxial wide-band III-nitrides

E. A. Panyutin✉, Sh. Sh. Sharofidinov

Ioffe Institute,
26, Polytekhnicheskaya st., St. Petersburg 194021, Russian Federation

Abstract

Objectives: In this work, the elastic properties of bimorphous piezocantilevers based on epitaxial AlN/AlN (AlGaN/AlN/AlGaN/AlN/AlGaN) structures were studied using computer modeling. These structures allow for the simultaneous manifestation of direct and inverse piezoelectric effects and the excitation of various types of acoustic waves. Given the high thermal resistance and thermal stability of these materials, it is assumed that such cantilevers could serve as a basis for the subsequent creation of various sensors designed to operate in high-temperature and chemically aggressive environments.

Experimental: In static and infra-low-frequency modes, the reverse piezoelectric effect manifests as bending deformations and associated elastic stresses. To pre-estimate the magnitude of these stresses, which have a multidirectional character at the hetero-interfaces of the layers, a simple mathematical model was constructed, which allows establishing the magnitude of these stresses and their relationship with the geometric and elastic parameters of the console.

Conclusions: Based on the model, a computational algorithm was developed in the MATLAB environment, which allows determining the dependence of elastic stresses, including the ratio of the thicknesses of the active layers. Such a dependence has the form of a curve with a maximum, which is reached at the ratio of the thicknesses of the layers m = 1.5, at the same time, the value of these stresses practically does not depend on the ratios of the values of the elastic constants of the layer materials (for the cases of AlGaN/AlN and GaN/AlN). It is assumed that such estimates will be useful for the preliminary design and optimization of the geometry of piezoelectric sensors.

Keywords: High-temperature functional electronics, Wide-bandgap semiconductors; Epitaxial technologies; Multilayer AlN/AlGaN structures; Bimorph cantilever, Bending deformations, Elastic stresses

Funding: The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation as part of the research project No. 24-22-00392.

For citation: Panyutin E. A., Sharofidinov S. S. Elastic stresses in bimorph piezocantilevers based on epitaxial wide-band III-nitrides. *Condensed Matter and Interphases*. 2026;28(3): 408–414. https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13969

✉ Eugeny A. Panyutin, e-mail: eugeny.panyutin@mail.ioffe.ru
© Panyutin E. A., Sharofidinov S. S., 2026

1. Введение

Разработка и технологическая реализация элементной базы сенсорных элементов, ориентированных на работу в высокотемпературных условиях (в том числе, мониторинг геотермальных зон, диагностика текущего состояния ядерных реакторов), становится все более актуальной, поскольку, как предполагается, будет способствовать повышению достоверности предсказаний наступления разрушительных землетрясений или аварий на геотермальных электростанциях.

Многие характерные признаки, появление которых с необходимостью предшествует глобальным тектоническим катаклизмам (такие, как изменения в составе вулканических газов или изменения концентрации солей в жидкой среде) могут быть выявлены только лишь при контактном диагностировании глубинных (геотермальных) подземных зон, температура в которых может достигать 500 °C.

Вместе с тем, среди сенсоров, чувствительных к воздействиям различной природы и реализованных к настоящему времени, можно выделить класс приборов, в которых присутствует пьезоэлектрический биморфный микрокантилевер (консольный элемент), частотные свойства которого, в зависимости от геометрического исполнения, позволяют реализовать самые разнообразные высокочувствительные сенсорные устройства.

К настоящему времени уже созданы и исследованы сенсоры фиксации перепадов давления [1, 2], измерения вязкости и определения хими-

ческого состава жидкой среды [3–5], сенсоры колебаний уровня радиации, а также газоанализаторы и вибрационные сенсоры [6, 7], [8–10], причем в большинстве разработок в качестве материала чувствительного элемента используется керамики сегнетоэлектрического типа, имеющие температурные ограничения 300 °C.

В то же время такие пьезоматериалы как AlN и AlGaN обладают исключительной химической инертностью и термостабильностью параметров вплоть до 900÷1000 °C, причем технологии их получения, в том числе и в виде многослойных эпитаксиальных структур, которые могли бы послужить основой для получения микрокантилеверов, к настоящему времени уже освоены.

Вместе с тем, принимая во внимание значительные трудозатраты при проведении эпитаксиальных процессов, в то время как работа кантилевера предполагает появление упруго-напряженного состояния, во избежание его возможного разрушения желательна предварительная оценка его максимальных значений, которую можно получить, используя методы компьютерного моделирования.

Целью настоящей работы было вычисление величины упругих напряжений, возникающих в процессе появления изгибной деформации биморфной AlN/AlN и AlN/AlGaN консолей в зависимости от толщины слоев, для чего был разработан вычислительный алгоритм (среда MATLAB), позволяющий получить, кроме того, оптимальные соотношения между толщинами активных слоев.

2. Материалы и структура

Основанием для выбора именно нитрида алюминия в качестве материала, подходящего для создания таких сенсорных элементов, являются следующие соображения. Являясь широкозонным полупроводником (гексагональная решетка типа вюрцита, ширина запрещенной зоны E_g = 5.9 эВ), AlN обладает исключительной химической стойкостью, а также самой высокой из числа известных пьезоэлектриков термостабильностью параметров (электропроводимость, пьезомодули, диэлектрическая постоянная, коэффициент диэлектрических потерь), которые сохраняют свои первоначальные значения при увеличении температуры, по крайней мере, до 1000 °C [11, 12].

Как предполагается, из числа различных эпитаксиальных технологий, разработанных к настоящему времени (MBE, MOS), метод HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) является наиболее приемлемым, так как в отличие от прочих, ориентированных на нано- и субмикронные слои, этот метод характеризуется высокими скоростями роста, позволяет получать слои в широком диапазоне их толщин и обеспечивает экономическую целесообразность получения слоев до 300 мкм и более [13, 14].

Постэпитаксиальное формирование кантилеверного узла с тремя электродами предполагает наличие предварительно полученной эпитаксиальной структуры типа GaAlN/AlN/GaAlN/AlN/GaAlN, в которой активные диэлектрические слои AlN составляют основу биморфной консоли, а тонкие проводящие GaAlN выполняют пассивную роль электродов, обеспечивая эквипотенциальность гетерограниц вдоль длины кантилевера.

Кроме того, для формирования висящей консоли необходимо наличие специального технологического так называемого «жертвенного» слоя (например, легированные слои GaN или InGaN), который изначально формируется непосредственно на подложке, предваряя основную структуру, и который на определенном этапе частично удаляется из подконсольного пространства, за исключением малых областей, обеспечивающих монолитную связь кантилевера с подложкой. Для удаления необходимых областей жертвенного слоя возможно использование различных технологий, в том числе и применение метода ионного фрезерования, однако наиболее простым и достаточно эффективным представляется локальное электрохимическое травление (например, в растворе KOH).

3. Вычисление упругих напряжений

Предполагается, что консольный микроэлемент (кантилевер), сформированный на базе многослойной эпитаксиальной структуры, содержит два активных диэлектрических AlN-слоя, и, кроме того, содержит тонкие проводящие слои AlGaN (нижний, межслойный и верхний), которые исполняют роль электродов и обеспечивают эквипотенциальность вдоль всей длины консоли (рис. 1). Далее предполагается, что толщина электродов меньше толщины активных AlN-слоев, причем рассматриваются два случая: 1) – случай предельно тонких электродов, когда присутствие слоя AlGaN на деформацию активных AlN-слоев практически не влияет и 2) – толщина электрода сопоставима с толщиной AlN и упругие напряжения будут вычисляться для модельных структур типа AlN/AlGaN (AlN/ GaN).

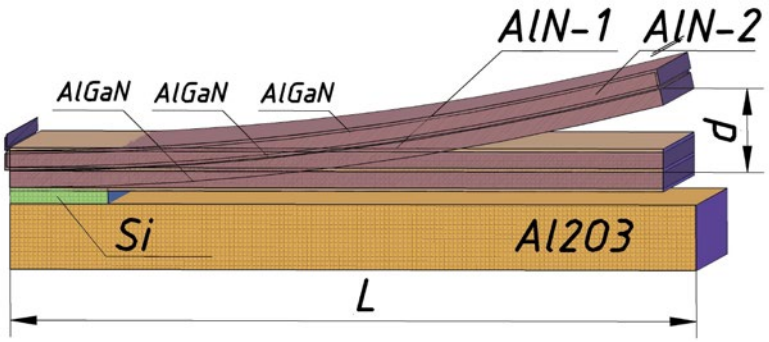

Рис. 1. Схематическое изображении кантилевера, сформированного на базе эпитаксиальной AlGaN/AlN/AlGaN/AlN/AlGaN структуры, полученной на Si-подложке, и с использованием дополнительного Al_2O_3-носителя

Несимметричное подключение пары AlGaN-электродов (например, нижнего и межслойного) к внешнему источнику с напряжением U_1, и возникающее электрическое поле E_1 (или $D_1 = \varepsilon E_1$) приводит к появлению, в том числе, и поперечных по отношению к полю деформаций, определяемых модулем d_{31}, что в случае жесткого соединения слоев вызывает принудительное деформирование также второго AlN-слоя. Поскольку такие деформации для каждого из AlN-слоев при усреднении по толщине будут различными, возникающие дополнительные напряжения приведут к изгибу кантилевера. Дальнейшие вычисления будут ориентироваться на подход, развитый применительно к задачам термоупругости [15].

Основные силы, возникающие в слоях при изменении напряжения U_1, представлены соответствующими изменениями растягивающей силой (F_1) и сжимающей силой (F_2), причем они противоположны по знаку и равны по модулю (сила F), а также характеризуются изгибающими моментами M_1 и M_2, причем:

$$M_1 = (Y_1\ J_1) / R \ \text{ и } \ M_2 = (Y_2\ J_2) / R\,. \qquad (1)$$

Здесь Y_1 и Y_2 – модули упругости, J_1 и J_2 – моменты инерции для двух произвольных сечений и R – радиус кривизны изгиба.

При дальнейших вычислениях будут использоваться следующие численные значения параметров AlN: диэлектрическая постоянная $\varepsilon = 8.5$, поперечный пьезомодуль $d_{31} = -2.0$ пм/В и модуль упругости $Y = 308$ ГПа [14].

Далее, пусть w_1 и w_2 – значения толщины слоев, и с учетом малости толщины GaAlN-электродов будем считать, что общая толщина кантилевера – $w \approx w_1 + w_2$. Для сечений по форме, близкой к квадрату, моменты инерции двух AlN-слоев, соответственно, равны:

$$J_1 = w_1^3 / 12 \ \text{ и } \ J_2 = w_2^3 / 12\,, \qquad (2)$$

тогда соответствующие произведения $Y_1 \cdot J_1$ и $Y_2 \cdot J_2$ будут характеризовать изгибную жесткость слоев.

Поскольку к системе не прикладываются никакие внешние силы, и она находится в равновесии, справедливо следующее уравнение:

$$\frac{Fw}{2} = M_1 + M_2 \ \text{ или } \ \frac{Fw}{2} = \frac{Y_1\ J_1 + Y_2 J_2}{R} \qquad (3)$$

Кроме того, на границе двух пьезослоев (точнее, внутри тонкого проводящего GaAlN-слоя) должна существовать нейтральная поверхность, на которой деформации (относительные изменения размеров, обусловленные приложением внешнего напряжения U_1) этих слоев взаимно равны, что позволяет составить следующее уравнение:

$$\begin{aligned} &d_{31} \cdot \varepsilon \cdot E_1\ + F_1 / (Y_1 w_1) + w_1 / 2R = \\ &= d_{31} \cdot\ \varepsilon \cdot E_1\ + F_2 / (Y_2 w_2) + w_1 / 2R. \end{aligned} \qquad (4)$$

Это уравнение позволяет установить связь, во-первых, между радиусом кривизны кантилевера R и геометрическими и упругими параметрами слоев консоли, и, кроме того, со значениями внешнего напряжения, подаваемого на GaAlN-электроды. Далее целесообразно ввести следующие обозначения для отношений толщин $w_1 / w_2 = m$ и отношений модулей упругости $Y_1 / Y_2 = k$.

Тогда можно получить следующее выражение для значения радиуса кривизны:

$$\frac{1}{R} = \frac{6 \cdot d_{31} \cdot \varepsilon \cdot \left(E_1\right)\left(1+m\right)^2}{w \cdot \left[3\left(1+m\right)^2 + \ \left(1+mk\right)\left(m^2 + (mk)^{-1}\right)\right]} \qquad (5)$$

Очевидно, что максимальное упругое (нормальное) напряжение T, возрастающее при увеличении напряженности электрического поля, будет наблюдаться именно на гетерогранице. В связи с этим необходимо заметить, что даже при отсутствии вынужденной изгибной деформации на границе слоев уже изначально присутствует значительное упругое напряжение, появляющееся вследствие рассогласования параметров решетки AlN и AlGaN, а также неравенства их коэффициентов теплового расширения и которое может достигать десятков и более МПа [16]. Предполагается, что рабочие режимы кантилевера будут такими, что дополнительное напряжение, создаваемое пьезо деформацией, будет существенно меньше и далее будет рассматриваться в качестве аддитивной добавки.

Это добавочное напряжение состоит из двух слагаемых: во-первых, из напряжения обусловленного осевой силой, и, кроме того, из напряжения, вызываемого изгибом. Для слоя AlN_1 это напряжение будет определяться из выражения:

$$T = \frac{F}{w_1} + \frac{w_1 Y_1}{2R}. \quad (6)$$

Или, используя соотношение (4), можно получить:

$$T = \frac{2}{R}\left[\frac{1}{ww_1}\left(Y_1 J_1 + Y_2 J_2\right) + \frac{w_1 Y_1}{4}\right], \quad (7)$$

или

$$T = \frac{1}{R}\frac{1}{6}\left[\frac{1}{w}\left(Y_1 w_1^{\,2} + Y_2\left(\frac{w_2}{m}\right)^2\right) + 3Y_1 w_1\right]. \quad (8)$$

Подставляя в эту формулу выражение для радиуса кривизны (5), для добавочного упругого напряжения на границе слоев может быть получено следующее выражение:

$$T = \frac{d_{31}\cdot\varepsilon\cdot\left(E_1\right)\left(1+m\right)^2}{w\cdot\left[3\left(1+m\right)^2 + \left(1+mk\right)\left(m^2 + (mk)^{-1}\right)\right]}\times \quad (9)$$
$$\times\left[\frac{1}{w}\left(J_1 w_1^{\,2} + \left(\frac{Y_2}{m}\right)w_2^{\,2}\right) + 3Y_1 w_1\right].$$

Соответствующие расчеты, произведенные в среде MATLAB, позволили установить зависимость $T(m)$ при условии w = const(40 мкм), имеющую вид кривых с максимумом, который достигается при m = 1.5 (рис. 2). Эти кривые отвечают различным значениям модулей упругости Y_2, (350 ГПа, 335 ГПа, 320 ГПа) которые, в свою очередь, приближенно соответствуют AlN, AlGaN, и GaN. Кроме того, из выше приведенных соотношений для радиуса кривизны R, и из уравнений, связывающего его с длиной консоли L [17]:

$$d(2R-d) = (L/2)^2 \text{ или } 2dR = L^2/4 \quad (10)$$

может быть получено окончательное уравнение для величины отклонения конца консоли:

$$d = L^2/8R. \quad (11)$$

Так же, как и радиус кривизны R, это отклонение, очевидно, будет зависеть от отношения толщин слоев m. Для случаев различной суммарной толщины w и различных значений модулей упругости Y_2 значения этого отклонения представлены на рис. 3. Очевидно, что максимальное отклонение не должно превышать высоту подкантилеверной области, что накладывает определенные ограничения на w и напряженность поля E. Предполагается, что учет этих ограничений также будет способствовать снижению рисков их механического разрушения и повышению отказоустойчивости сенсоров.

При выполнении этих расчетов были использованы следующие приближения.

Во-первых, предполагается, что толщина GaN-электродов значительно меньше толщины любого из AlN-слоев. Далее, считается, что сум-

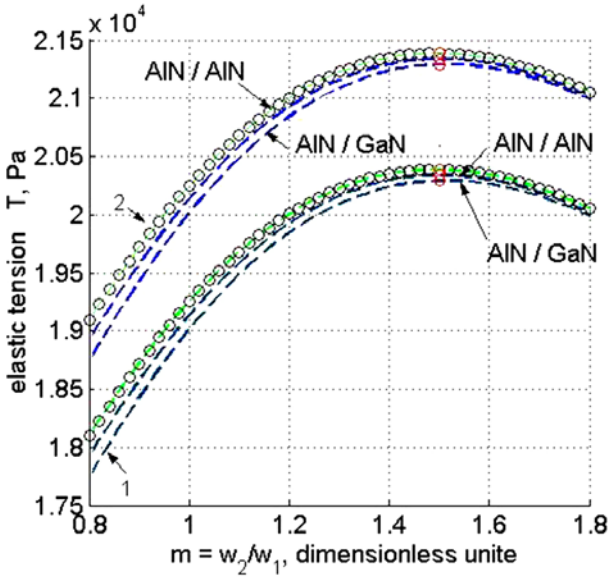

Рис. 2. Зависимость упругих напряжений вблизи гетерограниц от отношения значений толщины слоев w_1/w_2 для суммарной толщины слоев w = 40 мкм и напряженности поля для семейства: 1) $E = 1.1\cdot10^4$ В/см (U = 44 В) и для семейства 2) $E = 1.22\cdot10^4$ В/см (U = 49 В)

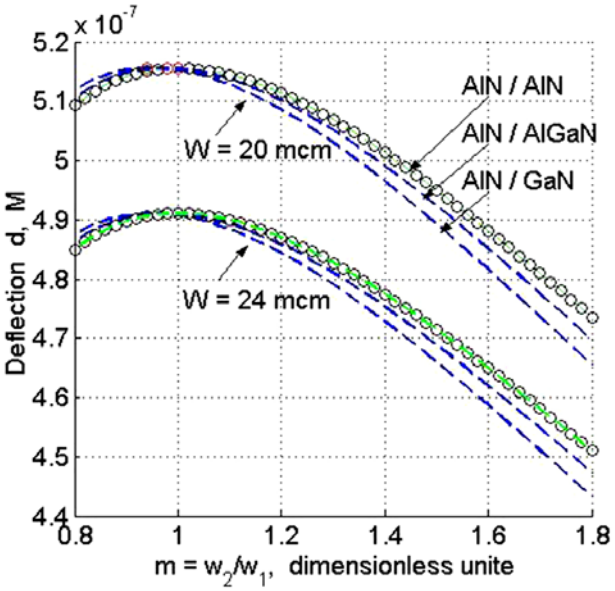

Рис. 3. Зависимости отклонения конца консоли w_1/w_2 для различных значений w и трех значений модулей упругости (для AlN AlGaN и GaN) при напряженности поля $E = 1.1 \cdot 10^4$ В/см

марная толщина кантилевера много меньше его длины. И, наконец: первоначальные механические напряжения и соответствующие им деформации, возникающие в результате технологического остывания и по причине различии в значениях коэффициентов теплового расширения и дополнительно нарушающих симметрию слоев, в данных расчетах никак не учитывались.

Принимая во внимание, что технологический процесс получения базовой эпитаксиальной структуры является весьма трудозатратным и требует расхода дорогостоящих компонентов, прямо пропорционального суммарной толщине получаемых слоев, предполагается, что даже такие оценки, носящие приблизительный характер, будут способствовать более рациональному планированию толщины w_1 и w_2 слоев получаемых структур.

4. Заключение

Решение проблемы создания различных сенсоров, предназначенных для работы в высокотемпературных условиях и в условиях химически агрессивных сред остается крайне актуальной. Одним из перспективных подходов является использование пьезокантилеверов, сформированных с применением эпитаксиальных структур на основе высокотемпературного пьезоматериала AlN. Поскольку ключевым эффектом для работы таких кантилеверов в статическом режиме является изгиб под действием электрического поля (обратный пьезоэффект), была построена математическая модель для расчета величины упругих напряжений. На основе модели в среде MATLAB был разработан вычислительный алгоритм, который позволяет установить взаимосвязь между отношением толщин активных пьезослоев и величиной упругих напряжений, которые появляются на межслойных границах. Предполагается, что разработанный инструмент может быть использован для предварительного проектирования и оптимизации геометрии сенсоров консольного типа, который легко может быть распространен также и на другие технологически реализуемые пьезоэлектрические гетероструктуры, такие как AlN/SiC (см. по этому поводу [18, 19]).

Заявленный вклад авторов

Панютин Е. А. – концепция исследования, разработка необходимых алгоритмов и вычислительных программ (среда MATLAB), написание текста. Шарофидинов Ш. Ш. – обсуждение вопросов, связанных с технологической реализуемостью предложенных вариантов конструкций кантилевера и проведение тестовых эпитаксиальных процессов получения необходимых эпитаксиальных структур

Конфликт интересов

Авторы утверждают, что у них отсутствуют известные финансовые конфликты интересов, а также отсутствуют такие личные отношения, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Zuo J., Zhang H., Chang Y., Liang J., Pang W., Duan X. Highly sensitive AlN contour-mode resonator-based pressure sensor for in-line monitoring of chemical reactions. In: *Proc. 20th Int. Conf. Solid-State Sens. Actuators Microsystems Eurosensors (TRANSDUCERS EUROSENSORS;* 2019; 1373–1376. https://doi.org/10.1109/transducers.2019.8808326

2. Yenuganti S., Gandhi U., Mangalanathan U. Piezoelectric microresonant pressure sensor using aluminum nitride. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS.* 2017;16(2): 025001. https://doi.org/10.1117/1.JMM.16.2.025001

3. Bircher B. A., Duempelmann L., Renggli K., ... Braun T. Real-time viscosity and mass density sensors requiring microliter sample volume based on nanomechanical resonators. *Analytical Chemistry*. 2013;85(18): 8676–8683. https://doi.org/10.1021/ac4014918

4. Kucera M., Wistrela E., Pfusterschmied G., ... Schmid U. Design-dependent performance of self-actuated and self-sensing piezoelectric-AlN cantilevers in liquid media

oscillating in the fundamental in-plane bending mode. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014;200: 235–244. https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.04.048

5. Peng R.-P., Wang X.-J., Xing L.-B., ... Tung C.-H. Highly sensitive and selective fluoride ion sensors based on microcantilevers modified with hydrogels. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2014;14(9): 6632–6637. https://doi.org/10.1166/jnn.2014.9359

6. Choi J.-S., Park W.-T. MEMS particle sensor based on resonant frequency shifting. *Micro and Nano Systems Letters*. 2020;8(1): 17. https://doi.org/10.1186/s40486-020-00118-9

7. Khine L., Tsai J. M., Heidari A., Yong-Jin Y. Piezoelectric MEMS resonant gas sensor for defence applications. In: *2011 Defense science research conference and expo (DSR),* Singapore, Singapore; 2011. 1–3. https://doi.org/10.1109/dsr.2011.6026862

8. Xu C., Song Y., Han M., Zhang H. Portable and wearable self-powered systems based on emerging energy harvesting technology. *Microsystems & Nanoengineering*. 2021;7(1): 1–14. https://doi.org/10.1038/s41378-021-00248-z

9. Frach P., Schmid U., Ferber T., Rzepka S., Müller J. Energy harvesting based on piezoelectric AlN and AlScN thin films deposited by high rate sputtering. In: *Proc. 9th Micro-Nanotechnol. Sensors Syst Appl. 10194*. 2017. 9–13. https://doi.org/10.1117/12.2262460

10. Gablech I., Klempa J., Pekárek J., ... Neužil P. Simple and efficient AlN-based piezoelectric energy harvesters. *Micromachines*. 2020;11(2): 143. https://doi.org/10.3390/mi11020143

11. Fraga M. A., Furlan H., Pessoa R. S., Massi M. Wide bandgap semiconductor thin films for piezoelectric and piezoresistive MEMS sensors applied at high temperatures: an overview. *Microsystem Technologies*. 2014;20: 9–21. https://doi.org/10.1007/s00542-013-2029-z

12. Kim T., Kim J., Dalmau R., Schlesser R., Preble E. High-temperature electromechanical characterization of AlN single crystals. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2015);62(10): 1880–1887. https://doi.org/10.1109/tuffc.2015.007252

13. *Shustova O. A., Sergeeva O. N., Solnyshkin A. V., ... Kukushkin S. A. Dielectric and pyroelectric properties of AlN single-crystal layers grown by chloride-hydride epitaxy*. *Ferroelectrics*. 2022;*591*(*1*): *121–127*. https://doi.org/10.1080/00150193.2022.2041930

14. Кукушкин С. А., Шарофидинов Ш. Ш. Новый метод получения объемных кристаллов AlN, GaN и AlGaN с использованием гибридных подложек SiC/Si. *Физика твердого тела*. 2019;61(12): 2338–2343. https://doi.org/10.21883/FTT.2019.12.48549.51ks

15. Timoshenko S. P. Analysis of bi-metal thermostates. In: *The collected papers*. New York: McGraw-Hill Publishing Company Ltd; 1953. pp. 421–453.

16. Середин П. В., Шарофидинов Ш. Ш., Голощапов Д. Л., ... Кукушкин С. А. Исследования остаточных упругих напряжений в многопериодных сверхрешетках GaN/AlN, выращенных на подложке SiC/Si. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(3): 518–525. https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12227

17. Panyutin E. A., Sharofidinov S. S., Kremleva A. V., Sokura L. A. Epitaxial AlN/AlN bimorph piezocantilevers for geothermal monitoring. *E3S Web of Conferences*. 2024;592(05005): 1–8. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202459205005

18. Панютин Е. А., Шарофидинов Ш. Ш., Орлова Т. А., Снуткина С. А., Лебедев А. А. Бипланарные эпитаксиальные AlN/SiC/(*n*,*p*)SiC-структуры для приборов высокотемпературной функциональной электроники. *Журнал технической физики*. 2020;65(3): 450–455. https://doi.org/10.21883/JTF.2020.03.48930.306-19

19. Panyutin E. A. Elastic stress relaxation in the AlN/SiC heterostructures: modeling by utilizing the molecular dynamics method. In: *Proceedings of the 3rd International Symposium on Water, Ecology and Environment 2022*. Beijing, China, SciTePress; 2023. 268–271. https://doi.org/10.5220/0012008600003536

Информация об авторах

Панютин Евгений Анатольевич, к. ф.-м. н., н. с. лаборатории физики полупроводниковых приборов, Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе Российской академии наук (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

https://orcid.org/0000-0002-6414-2927

eugeny.panyutin@mail.ioffe.ru

Шарофидинов Шукрилло Шамсидинович, к. ф.-м н., с. н. с. лаборатории физики полупроводниковых приборов, Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе Российской академии наук (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

https://orcid.org/0000-0003-0354-5981

shukrillo71@mail.ru

Поступила в редакцию 07.10.2025; одобрена после рецензирования 20.10.2025; принята к публикации 12.11.2025; опубликована онлайн 25.09.2026.