10

Влияние S_0-волны на электронный транспорт в наноразмерных структурах

© В.В. Кашин, В.В. Колесов, И.Е. Кузнецова, А.Е. Мельников

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009 Москва, Россия
e-mail: vadim_kashin@mail.ru

Поступило в Редакцию 19 мая 2026 г.
В окончательной редакции 19 мая 2026 г.
Принято к публикации 19 мая 2026 г.

Исследовался акустоэлектрический эффект при воздействии электрического поля симметричной S_0-волны Лэмба в пластине Y, $X + 50^\circ$ ниобата лития толщиной 0.35 mm на наноструктуры, расположенные на поверхности пластины. Целью исследования является регистрация и использование акустоэлектрического эффекта на пластинчатых акустических волнах для наносенсорики.

Ключевые слова: акустоэлектрический эффект, наноструктура, акустоэлектронный датчик, пьезоэлектрическая пластина.

DOI: 10.61011/JTF.2026.09.63509.151-26

Введение

Как известно, акустоэлектрический эффект (АЭЭ) заключается в появлении постоянного электрического тока в среде под действием проходящей акустической волны без приложения какой-либо внешней разности потенциалов. При этом наиболее эффективно он реализуется за счет увлечения носителей заряда электрическим полем, сопровождающем акустическую волну в пьезоэлектрике. Эффект был теоретически предсказан [1] и открыт [2] в 50-е годы прошлого века. Акустическая волна взаимодействует с кристаллической решеткой, вызывая ее деформацию, и обменивается энергией и импульсом с электронами проводимости. Данный эффект используется в фильтрах, усилителях, линиях задержки на объемных и поверхностных акустических волнах (ПАВ) [3–5].

АЭЭ может применяется в различных сенсорах, таких как фотодетекторы [6], датчики влажности [7], датчики сероводорода [8], датчики определения проводимости гетероструктур [9]. Как известно, общую схему современного датчика можно описать следующим образом. Специфическое воздействие оказывает влияние на селективный элемент, изменение свойств этого элемента фиксируется физическим преобразователем, который генерирует соответствующий электрический сигнал, регистрируемый соответствующим прибором [10]. Например, в биосенсорах, в качестве селективного элемента стоит биохимический преобразователь. Использование таких биоселективных элементов, как белки-ферменты, клетки, ДНК, антитела позволяет достичь предельных рубежей чувствительности и селективности для биологических датчиков.

Одним из современных трендов в сенсорике является разработка гибридных датчиков, которые используют несколько физических принципов одновременно для регистрации соответствующего аналита. Например, можно объединить в одном устройстве нано- и акустоэлектронные технологии. Акустоэлектрический эффект в таком устройстве может служить для прямого физического преобразования входного сигнала датчика в изменение фазы и затухания акустической волны. Взаимодействие с проводящим объектом позволяет использовать АЭЭ в обратной связи от акустоэлектронной части датчика назад к селективному элементу [11]. Другое применение ААЭ заключается в возможности генерации тока малой мощности в качестве источника питания [12]. При переходе к наномасштабу и квантовым эффектам ААЭ рассматривают как возможный метод управления движением массивных объектов в квантовом режиме [13].

Для возбуждения акустических волн в пьезоэлектрической пластине традиционно используется линия задержки (ЛЗ) [14]. Данное устройство представляет собой два встречно-штыревых преобразователя (ВШП), расположенных на расстоянии друг от друга. В пространстве между ВШП располагается объект, чьи свойства меняются из-за внешнего воздействия. Изменение свойств объекта приводит к изменению свойств акустической волны, распространяющейся между ВШП [15]. Эти электродные структуры обычно формируются при помощи фотолитографии. Следует отметить, что размеры селективной части датчика могут, в случае одиночных биомолекул-белков, достигать десятков нанометров. Для наноразмерных покрытий массовой нагрузкой можно пренебречь и считать, что селективный элемент влияет на акустическую волну лишь через электрофизические свойства. Для увеличения эффективности взаимодействия акустической волны с подобным селективным элементом необходимо, чтобы она обладала большой интенсивностью электрического поля, которое ее сопровождает. Данное поле будет проникать за пределы звукопровода, в котором распространяется волна. В таком случае

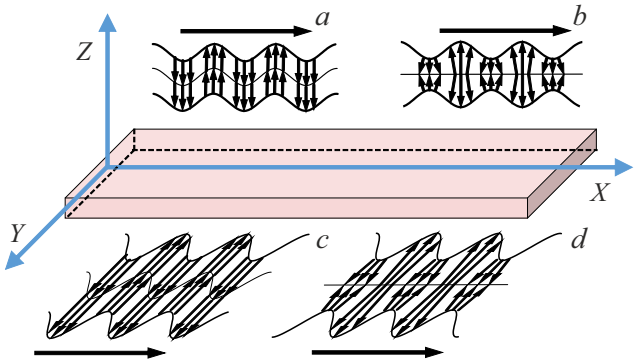

Рис. 1. Три семейства акустических волн в пластине: a — антисимметричная волна Лэмба A_0, b — симметричная волна Лэмба S_0, c, d — волны с поперечно-горизонтальной поляризацией SH_0.

в качестве звукопровода желательно выбрать сильный пьезоэлектрик и соответствующее кристаллографическое направление распространения. Для эффективного энергетического обмена волна должна быть достаточно низкочастотной (1–5 MHz), чтобы увеличить локализацию поля в районе размещения селективной части. В данном частотном диапазоне эффективно использовать волны Лэмба и волны с поперечно-горизонтальной поляризацией нулевого порядка, распространяющиеся в пьезоэлектрических пластинах, толщина которых меньше длины волны. Электрическое поле, сопровождающее такие волны, взаимодействует с проводящим объектом на расстоянии в сотни микрон [16]. Подобное взаимодействие с объектами вне пьезоэлектрика известно для ПАВ [17], однако волны нулевого порядка в пластинах характеризуются гораздо более высоким коэффициентом электромеханической связи в одном и том же материале, что позволяет электрическому полю проникать на большее расстояние за пределы пластины [18].

Современная акустика выделяет три семейства акустических волн в пластинах: антисимметричные волны Лэмба A_n, симметричные волны Лэмба S_n и волны с поперечно-горизонтальной поляризацией SH_n (рис. 1). Индекс n означает количество полуволн, укладывающихся по толщине пластины [19].

Из рис. 1 видно, что вышеуказанные типы волн характеризуются различной поляризацией, т. е. они обладают различным соотношением смещения частиц материала по направлениям X, Y и Z при распространении волны.

Ранее теоретически и экспериментально было показано, что в ниобате лития при толщине пластины $h/\lambda = 0.1$ коэффициент электромеханической связи k^2 для симметричной волны S_0 в направлении $Y{-}X + 50^\circ$ и для волны SH_0 в направлении $Y{-}X$ равен 13.5 % и 34.3 % соответственно [19]. Как уже говорилось выше, эти значения гораздо выше, чем для ПАВ в $128Y{-}X$ ниобате лития (5.6 %). Очевидно, что интенсивность электрического поля и, следовательно, величина акустоэлектрического тока, возникающего при распространении SH_0- или S_0-волны, будет тем больше, чем выше коэффициент электромеханической связи k^2. В работе [20] было исследовано взаимодействие SH_0-волны с наноструктурами на поверхности $Y{-}X$ ниобата лития. Однако при распространении этих волн смещение частиц материала направлено перпендикулярно фронту волны и лежит в плоскости пластины. В случае S_0-волны смещение частиц происходит перпендикулярно поверхности пластины и вдоль направления распространения волны. Это приводит к дополнительному механическому воздействию со стороны пластины на наноразмерные объекты, находящиеся на поверхности пластины.

В связи с этим в настоящей работе теоретически и экспериментально исследуется влияние электрического поля, сопровождающего пьезоактивную S_0-волну Лэмба в пластине $Y{-}X + 50^\circ$ ниобата лития, на вольт–амперные характеристики наноструктур, находящихся на поверхности пластины.

1. Расчет проводимости структуры для регистрации АЭЭ

Решение краевой задачи о распространении волн в пьезопластине позволяет оценить требуемую проводимость структуры на поверхности пьезоэлектрика для регистрации АЭЭ. Покроем поверхность пьезоэлектрического звукопровода бесконечно тонкой проводящей пленкой с известной проводимостью. Проводимость пленки влияет на значение скорости акустической волны в звукопроводе и ее затухание.

Теоретический анализ распространения S_0-волны Лэмба в структуре „вакуум–пьезоэлектрическая пластина–проводящая пленка–вакуум“ был проведен для пластины $Y{-}X + 50^\circ$ ниобата лития (рис. 2).

Для решения задачи были записаны уравнение движения (1), уравнение Лапласа (2), уравнения состояния (3) и (4) для пьезопластины и уравнение Лапласа (5) с уравнением состояния (6) для вакуума.

$$\rho^{pl}\partial^2\mathbf{U}_i^{pl}/\partial t^2 = \partial\mathbf{T}_{ij}^{pl}/\partial x_j, \tag{1}$$

$$\partial\mathbf{D}_j^{pl}/\partial x_j = 0, \tag{2}$$

$$\mathbf{T}_{ij}^{pl} = C_{ijkl}^{pl}\partial\mathbf{U}_l^{pl}/\partial x_k + e_{kij}^{pl}\partial\Phi^{pl}/\partial x_k, \tag{3}$$

$$\mathbf{D}_j^{pl} = -\varepsilon_{jk}^{pl}\partial\Phi^{pl}/\partial x_k + e_{jlk}^{pl}\partial\mathbf{U}_l^{pl}/\partial x_k, \tag{4}$$

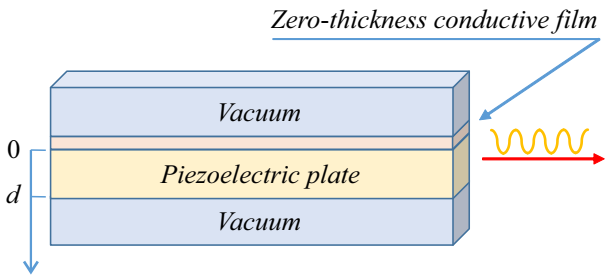

Рис. 2. Геометрия задачи.

Материальные постоянные $LiNbO_3$ [21]

Упругие модули, C^E_{ij} (10^{10} N/m^2)						
C^E_{11}	C^E_{12}	C^E_{13}	C^E_{14}	C^E_{33}	C^E_{44}	C^E_{66}
19.839	5.472	6.513	0.788	22.79	5.965	7.1835
Пьезоконстанты, e_{ij} (C/m^2)				Диэлектрическая проницаемость, $\varepsilon^S_{ij}/\varepsilon_0$		Плотность, kg/m^3
e_{15}	e_{22}	e_{31}	e_{33}	ε^S_{11}	ε^S_{33}	ρ
3.69	2.42	0.3	1.77	45.6	26.3	4628

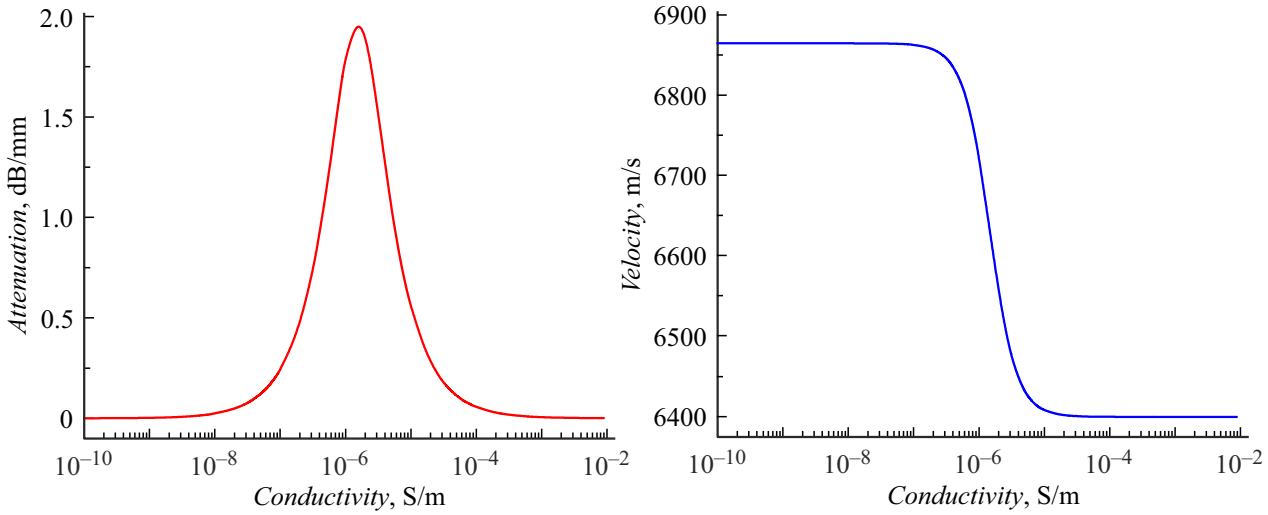

Рис. 3. Теоретические зависимости изменения затухания (слева) и скорости (справа) акустических волн нулевого порядка S_0 в структуре „вакуум– пластина ниобата лития $Y-X+50°$–проводящая пленка–вакуум“ при $h/\lambda = 0.1$.

$$\partial \mathbf{D}^{vac}_j / \partial x_j = 0, \tag{5}$$

$$\mathbf{D}^{vac}_j = -\varepsilon_0 \partial \Phi^{vac} / \partial x_j, \tag{6}$$

где $\mathbf{U}_i$ — компонент механического перемещения частиц, t — время, $\mathbf{T}_{ij}$ — компонент механического напряжения, x_j — координата, $\mathbf{D}_j$ — компонент электрического смещения, Φ — электрический потенциал, ρ — плотность, C_{ijkl}, e_{jlk} и ε_{jk} — упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические постоянные соответственно, ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Индексы pl и vac означали, что соответствующая переменная относится к пьезоэлектрической пластине или вакууму соответственно.

В качестве граничных условий использовалось равенство нулю механических напряжений на поверхности пьезоэлектрической пластины и непрерывность электрического потенциала и электрического смещения на всех границах раздела.

$$x_3 = d: \quad \mathbf{T}^{pl}_{i3} = 0, \ \Phi^{pl} = \Phi^{vac}, \ \mathbf{D}^{pl}_3 = \mathbf{D}^{vac}_3, \ i = 1, 2, 3. \tag{7}$$

В плоскости $x_3 = 0$ размещался тонкий проводящий слой, чье присутствие учитывалось при помощи соответствующих электрических граничных условий:

$$x_3 = 0: \quad \mathbf{T}^{pl}_{i3} = 0, \ \Phi^{pl} = \Phi^{vac}, \mathbf{D}^{pl}_3 - \mathbf{D}^{vac}_3 = -\delta, \ i = 1, 2, 3, \tag{8}$$

где $\delta = -i\sigma_s \Phi \omega / V^2$ — плотность поверхностного заряда, σ_s, ω и V — поверхностная проводимость пленки, круговая частота и скорость волны соответственно.

Использовались материальные постоянные ниобата лития из [21], приведенные в таблице.

Механические свойства проводящей пленки не учитывались, поскольку толщина наноструктур пренебрежимо мала по сравнению с толщиной пластины.

Решение искалось в виде плоской неоднородной волны, которое подставлялось в уравнения (1)–(6). Задача решалась методом матрицы передачи, используя граничные условия (7), (8). Метод и алгоритм решения подробно описан в [18].

На рис. 3 приведены зависимости затухания и фазовой скорости акустической волны S_0 в пластине $Y-X+50°$ ниобата лития при $h/\lambda = 0.1$ от проводимости пленки (рис. 3). По расчетам фазовая скорость волны S_0 в пластине $Y-X+50°$ ниобата лития для открытой и электрически закороченной пластин оказалась равна 6864.8 и 6399.7 m/s соответственно. Нормированные механические компоненты смещения были равны $\mathbf{U}_x/\mathbf{U}_x = 1$,

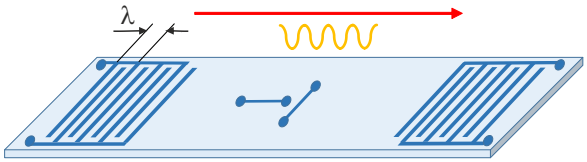

Рис. 4. Линия задержки на пластине из пьезоэлектрика. Стрелкой показано направление распространения акустической волны.

$\mathbf{U}_y/\mathbf{U}_x = 0.04$, $\mathbf{U}_z/\mathbf{U}_x = 0.09$, что подтверждает тип этой волны как симметричной волны Лэмба.

Как и следовало ожидать, на рис. 3 видно, что при увеличении проводимости затухание волны увеличивается, достигает максимума, а затем уменьшается [18]. Это объясняется тем, что при отсутствии механического воздействия и низкой проводимости пленка является диэлектриком и не вносит потерь в распространение волны, а в случае высоких проводимостей пленка является металлом, что также не приводит к появлению затухания. Таким образом, для эффективного взаимодействия с электрическим полем акустической волны наноструктура должна обладать достаточно высоким электрическим сопротивлением. В этом случае удобным элементом для исследования является нанопровод с контролируемым сопротивлением. Фазовая скорость волны при этом уменьшается и достигает минимума при высоких значениях проводимости пленки. Это объясняется закорачиванием тангенциальных компонент электрического поля волны, что приводит к выключению пьезоэффекта и уменьшению эффективного модуля упругости [22].

2. Оборудование и технология изготовления образца

Для проведения экспериментов использовалась пластина ($h = 350\,\mu$m) Y среза монокристалла ниобата лития, выращенного по методу Чохральского (АО „Фомос–Материалы“, г. Москва). Как указано выше, расчетная величина фазовой скорости S_0-волны в открытой пластине $Y{-}X + 50^\circ$ ниобата лития при $h/\lambda = 0.1$ оказалась равна 6864 m/s. Исходя из размеров имеющейся пластины и ожидаемого k^2, была выбрана длина волны $\lambda = 1.6$ mm, что соответствовало периоду ВШП 1.6 mm. Для возбуждения и приема акустической волны использовались входной и выходной ВШП (рис. 4). Каждый ВШП содержал по 3 пары штырей, апертура ВШП и ширина штыря были равны 7.5 и 0.4 mm соответственно, расстояние между ВШП составляло 3 mm.

3. Изготовление акустической линии задержки

Акустическая линия задержки формировалась на полированной поверхности монокристаллической пластины из ниобата лития методами проекционной УФ-литографии и магнетронного напыления электродной ВШП-структуры. Для улучшения адгезионных свойств поверхность пластины тщательно промывалась непосредственно на центрифуге на скорости вращения 3000 rpm в течение 10 s попеременно изопропиловым спиртом и ацетоном. На финишной стадии пластина протиралась диметилформамидом. Затем на пластину ниобата лития с помощью центрифуги на скорости 3000 rpm наносился позитивный фоторезист Shipley S1813, после чего нанесенный слой фоторезиста сушился в течение 5 min при температуре 115 °C. После дубления через маску фотошаблона фоторезист засвечивался ультрафиолетовым излучением с длиной волны 400 nm в течение 75 s и интенсивностью 50 mW/cm^2 на фотолитографической установке MA-750. Проявление фоторезиста проводилось в течение 1 min в проявителе на основе KOH с концентрацией 0.01 mg/ml. Далее через сформированную фоторезистивную маску на установке термического напыления Leybold L560 проводилось напыление металлического слоя титана толщиной 100 nm с подслоем золота толщиной 30 nm. На финишном этапе методом lift-off удалялись остатки непроявленного фоторезиста, и в результате на пластине ниобата лития формировалась структура акустической линии задержки, содержащая два ВШП (рис. 5).

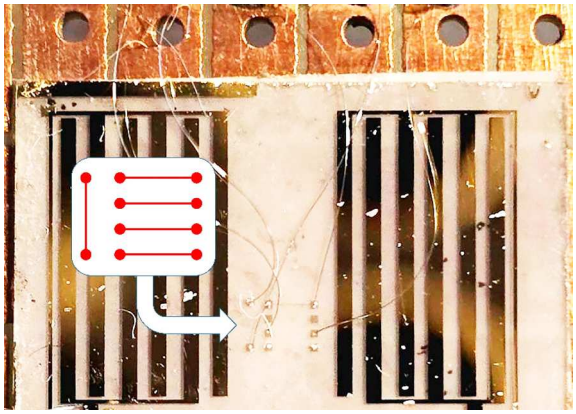

Рис. 5. Образец пластины Y среза ниобата лития с нанесенными на него двумя ВШП, образующими линию задержки, и системой нанопроводов (длина 1 mm, ширина 1, 2 и 10 μm, толщина 70 nm). Контакты нанопроводов разварены алюминиевой проволокой диаметром 25 μm.

4. Изготовление центральной наноструктуры

Для исследования АЭЭ была сформирована система нанопроводов вдоль и поперек распространения акустической волны. Для изготовления нанопроводов использовалась методы электронной литографии на основе сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Carl Zeiss SUPRA 40 с литографической системой Raith

ElphyQuantum. На пластину ниобата лития с готовыми ВШП-электродами линии задержки с помощью центрифуги наносился слой позитивного электронного резиста (на основе PMMA), который сушился в течение 10 min при температуре 180 °C. Затем на непроводящий слой PMMA с помощью центрифуги наносился специальный водорастворимый проводящий полимер для электронной литографии (Electra 92 от Allresist GmbH на основе полианилина), который обеспечивал стекание электростатического заряда при дальнейшем электронном экспонировании.

Центральная область между ВШП засвечивалась электронным пучком в СЭМ при $\sim 400\,\mu$C/cm^2 с ускоряющим потенциалом 20 kV и апертурой 30 μm. После этого слой полимера смывался дистиллированной водой. После экспонирования электронный резист PMMA проявлялся в смеси изопропилового спирта и воды в соотношении 93:7, а образец тщательно промывался в изопропиловом спирте и сушился. Таким образом, в центральной части образца на поверхности ниобата лития была создана маска для последующего нанесения металлических нанопроводов.

Через полученную маску с помощью термического вакуумного напыления формировались металлические нанопровода между ВШП линии задержки. Напыление выполнялось в установке для высоковакуумного напыления Leybold L560 при давлении $3 \cdot 10^{-7}$ mbar. Сначала для лучшей адгезии пылился подслой титана толщиной 20 nm, затем слой золота толщиной 50 nm. После этого образец помещался в ацетон, где слой резиста смывался. На открытых участках между контактными площадками, не покрытых маской, формировались готовые нанопровода.

Измерительная электродная структура состояла из четырех нанопроводов, расположенных вдоль направления распространения акустической волны. Длина каждого нанопровода составляла 1 mm, ширина — 1, 2, 2 и 10 μm, а толщина слоя — около 70 nm. Пятый нанопровод шириной 2 μm был расположен перпендикулярно волне и параллельно электродам ВШП (рис. 5).

С помощью векторного анализатора цепей были исследованы амплитудно-частотные характеристики созданной ЛЗ (S-параметры) и определена рабочая частота, на которой возбуждалась симметричная S_0-волна (рис. 6). На рис. 6 зеленая и синяя кривые представляют собой частотные зависимости коэффициентов отражения S_{11} и S_{22} соответственно. Можно видеть, что коэффициенты отражения от разных концов ЛЗ (S_{11} и S_{22}) имеют некоторые отличия, связанные с неидентичностью ВШП. Максимальный коэффициент передачи соответствует частоте симметричной S_0-волны, равной 3.99 MHz.

5. Описание установки

Для выполнения комплекса измерений по исследованию АЭЭ был разработан измерительный стенд, состоящий из зондовой станции M-150 CASCADE Microtech

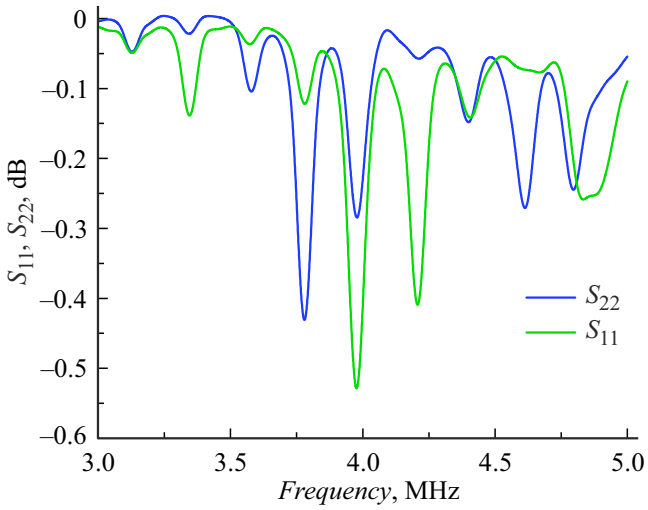

Рис. 6. Частотная зависимость коэффициентов отражения S_{11} и S_{22} линии задержки, измеренных на разных портах векторного анализатора цепей.

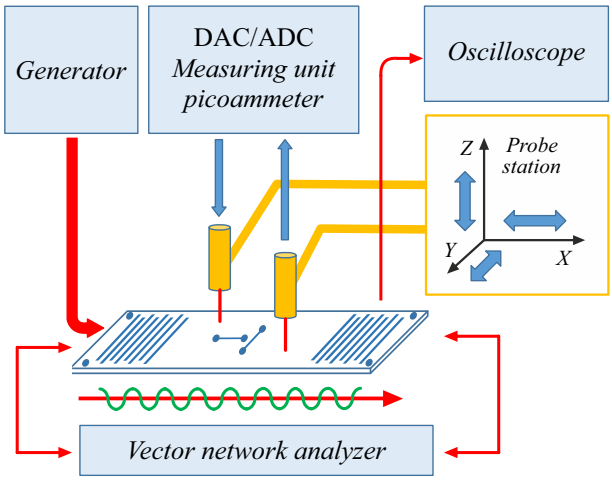

Рис. 7. Блок-схема измерительного стенда для исследования электрофизических характеристик низкоразмерных структур под воздействием акустической волны.

(США), генератора RIGOL DG4162 (Китай), векторного анализатора цепей Обзор Компакт 804 (Россия), осциллографа ROHDE&SCHWARZ HMO1002 (Германия), пикоамперметра Keithley 6487 (США) и автономного измерительного блока с предусилителем (рис. 7). Измерительный блок представлял собой систему ЦАП/АЦП и электронных ключей для коммутации 2 входов АЦП и 6 выходов ЦАП под управлением микропроцессора ATMEGA64A. Минимальный шаг ЦАП был равен 0.15 μV. Микропроцессор программировался через интерфейс USB и сохранял данные на компьютер. В целях уменьшения сетевых наводок измерительный блок имел автономное питание от встроенных аккумуляторов и находился в едином металлическом корпусе. Предусилитель сигнала помещался в отдельном металлическом

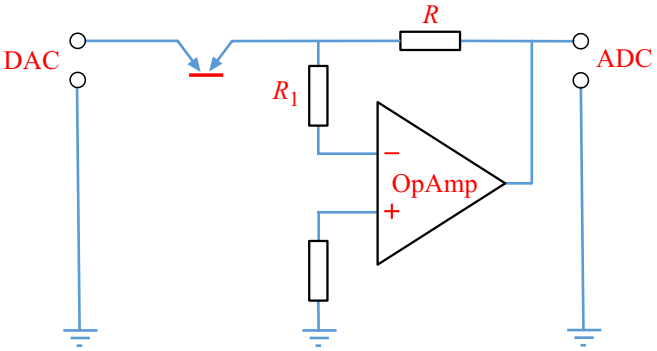

Рис. 8. Схема измерения ВАХ образца. $R = 100\,\text{k}\Omega$, $R_1 = 1\,\text{k}\Omega$.

блоке с возможностью помещения ЛЗ с наноструктурой как внутри блока, так и с помощью зондовой станции.

6. Эксперимент

Акустическая волна в акустической линии задержки возбуждалась на частоте 3.99 MHz с помощью входного ВШП, к которому был подключен генератор RIGOL DG4162. Генератор был способен формировать на нагрузке $50\,\Omega$ переменное напряжение амплитудой до $V_{pp} = 20\,\text{V}$ в рабочей полосе частот. Второй ВШП использовался для приема и контроля параметров прошедшей акустической волны. В этом случае оба ВШП подключались к соответствующим портам векторного анализатора цепей Обзор Компакт 804. Схема измерения представлена на рис. 8.

Для измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) нанопроводов использовались пикоамперметр и источник прецизионного напряжения на основе ЦАП. Подключение к контактным площадкам нанопроводов осуществлялось с помощью вольфрамовых проволочных коаксиально экранированных ВЧ-зондов на зондовой станции. Общее сопротивление между измеряемым образцом и входом ОУ составило $1.17\,\text{k}\Omega$.

Сформированные нанопроводники обладали разной проводимостью, которая напрямую определялась технологией изготовления нанопроводов. Так, например, самый тонкий нанопровод шириной $1\,\mu$m оказался разорван. Нанопровода шириной $2\,\mu$m имели линейную омическую ВАХ и показали хорошо воспроизводимые результаты. Собственное сопротивление нанопроводов ($\sim 1.5\,\text{k}\Omega$) составило вместе с входным резистором операционного усилителя сопротивление порядка $\sim 2.6\,\text{k}\Omega$, что достаточно хорошо соответствует ВАХ (наклон кривых ВАХ). При этом сопротивление нанопроводов шириной $10\,\mu$m составило $130\,\Omega$ (рис. 9).

7. Результаты и обсуждение

Из полученных ВАХ (рис. 9) для нанопроводов шириной $2\,\mu$m (красные кривые) видно, что при акустическом воздействии на нанопровод возникает смещение кривой ВАХ в сторону уменьшения тока на $\sim 0.06\,\mu$A (АЭЭ). Равномерное смещение ВАХ в нанопроводах характерно для металлической проводимости. Верхняя (красные квадраты) кривая на рисунке соответствует ВАХ нанопровода при отсутствии акустической волны в пластине.

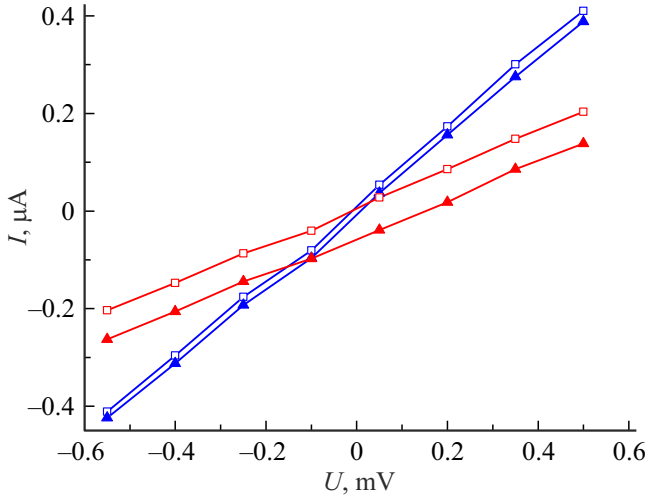

Рис. 9. ВАХ нанопроводов толщиной 70 nm, шириной $2\,\mu$m (красные кривые) и $10\,\mu$m (синие кривые) при отсутствии (квадраты) и наличии (треугольники) акустической волны S_0 при амплитуде переменного напряжения на ВШП $V_{pp} = 20\,\text{V}$.

ВАХ нанопровода смещается вниз при появлении акустической волны в подложке (красные треугольники) из-за появления дополнительной ЭДС, которая генерирует ток противоположного направления. Электрическое поле акустической волны, распространяющейся вдоль нанопровода в пьезоэлектрической подложке, движется вместе с волной и увлекает электроны проводимости в нанопроводе. Из-за отрицательного знака зарядов внутри нанопровода направление акустоэлектрического тока противоположно направлению распространения акустической волны.

Акустическое воздействие на нанопровод шириной $10\,\mu$m было выражено слабее. На графике приведены ВАХ этого нанопровода (синие кривые) сопротивлением $130\,\Omega$ без воздействия (синие квадраты) и под воздействием акустической волны (синие треугольники) (рис. 9).

В свою очередь ВАХ нанопровода, расположенного перпендикулярно направлению распространения акустической волны, не смещалась при воздействии акустической волны, т. е. акустоэлектрический эффект в данной геометрии отсутствовал.

На нанопроводе шириной $10\,\mu$m была измерена зависимость акустоэлектрического эффекта от амплитуды переменного напряжения, подаваемого на ВШП (рис. 10). Амплитуда переменного напряжения, поданного на ВШП, линейно связана с амплитудой возбуждаемой акустической волны. Следовательно, график

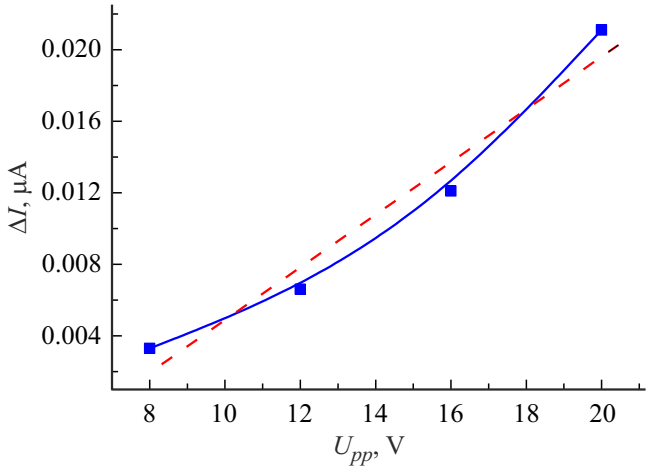

Рис. 10. Изменение смещения тока в нанопроводе при изменении амплитуды переменного напряжения, подаваемого на ВШП. Красным штрихом показана линейная аппроксимация данных.

показывает зависимость акустоэлектрического тока от амплитуды акустической волны. Таким образом, в работе зарегистрирован АЭЭ в наноразмерных проводящих структурах, расположенных на тонкой пьезоэлектрической пластине под воздействием симметричной S_0-волны нулевого порядка. Данный метод управления электронным транспортом в наноструктурах на основе АЭЭ является достаточно перспективным и может применяться в наносенсорах различного назначения, где необходимо использовать мониторинг в нанометровом масштабе. Это могут быть нанобиосенсоры для регистрации отдельных микроорганизмов (бактерии, вирусы), а также хемосенсоры для регистрации отдельных крупных молекул, электронная структура которых влияет на поводимость нанопроводов.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-29-00876.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] R.H. Parmenter. Phys. Rev., **89**, 990 (1953). DOI: 10.1103/PhysRev.89.990
[2] G. Weinreich, H.G. White. Phys. Rev., 106, 1104 (1957). DOI: 10.1103/PhysRev.106.1104
[3] W. Yang, S. Zhang, L. Guo, Y. Hu. Intern. J. Mechan. Sci., **291**, 110180 (2025). DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2025.110180
[4] T. Burman, S. Shankhdhar, J. Singh, D. Kaur. Sensors Actuators A: Physical, 117787 (2026). DOI: 10.1016/j.sna.2026.117787
[5] A. Christy, Y. Xiong, R. Sun, Y. Li, K.O. Chua, A.H. Comstock, J. Wu, S. Lei, F. Tsui, M.N. Jackson, D. Sun, V. Novosad, J.F. Cahoon, W. Zhang. APL Materials, **14** (3), (2026). DOI: 10.1063/5.0302514
[6] P. Darman, A. Yaghoobi, S. Behzad, B. Barahimi, R. Sharaf, S. Darbari, K. Forooraghi, A. Nabavi, N. Talebi. Adv. Mater. Technol., e01181 (2026). DOI: 10.1002/admt.202501181
[7] B. Cui, X. Gao, Z. Zhao, X. Xue, Q. Yang, J. Jin, W. Wang, Y. Liang, D. Guo. Sensors Ac-tuators A: Phys., **393**, 116827 (2025). DOI: 10.1016/j.sna.2025.116827
[8] B. Cui, X. Lang, Z. Ren, L. Cheng, D. Yang, W. Wang. Sensors and Actuators B: Chemical, **423**, 136817 (2025). DOI: 10.1016/j.snb.2024.136817
[9] I.L. Drichko, I.Y. Smirnov, Y.M. Galperin, A.V. Suslov. Physica B: Condensed Matter, 418004 (2025). DOI: 10.1016/j.physb.2025.418004
[10] Б. Эггинс. *Химические и биологические сенсоры* (Техносфера, М., 2005)
[11] I.L. Drichko, A.M. Diakonov, V.A. Malysh, I.Y. Smirnov, Y.M. Galperin, N.D. Ilyinskaya, A.A. Usikova, M. Kummer, H. Von Känel. J. Appl. Phys., **116** (15), (2014). DOI: 10.1063/1.4898737
[12] X. Dai, F. Zhu, Z. Qian, J. Yang. Nano Energy, **43**, 22 (2018). DOI: 10.1016/j.nanoen.2017.11.002
[13] Y. Chu, P. Kharel, W. Renninger, L. Burkhart, L. Frunzio, P. Rakich, R. Schoelkopf. Science, **358**, 199 (2017). DOI: 10.1126/science.aao1511
[14] S.G. Joshi, Y. Jin. J. Appl. Phys., **69** (12), 8018 (1991). DOI: 10.1063/1.347498
[15] D.S. Ballantine, R.M. White, S.I. Martin, A.J. Ricco, E.T. Zellers, G.C. Frye, H. Wohltjen. *Acoustic Wave Sensors: Theory, Design, and Physico-Chemical Application* (Academic Press, San-Diego, 1997)
[16] I.E. Kuznetsova, B.D. Zaitsev, V.I. Anisimkin, A.A. Teplykh, A.M. Shikhabudinov, V.V. Kolesov, V.G. Yakunin. J. Appl. Phys., **115**, 044504 (2014). DOI: 10.1063/1.4862807
[17] I.L. Drichko, I.Y. Smirnov. Semiconductors, **31** (9), 933 (1997). DOI: 10.1134/1.1187156
[18] Б.Д. Зайцев, И.Е. Кузнецова. *Акустические волны в тонких пьезоэлектрических пластинах* (Радиотехника, М., 2018), ISBN 978-5-93108-166-3
[19] И.А. Викторов. *Звуковые поверхностные волны в твердых телах* (Наука, М., 1981), 287 с.
[20] V. Kolesov, I. Kuznetsova, E. Soldatov, S. Dagesyan, A. Melnikov. Nanotechnology, **31**, 145205 (2020). DOI: 10.1088/1361-6528/ab6684
[21] G. Kovacs, M. Anhorn, H.E. Engan, G. Visiniti, C.C.W. Ruppel. Proc. IEEE Int. Ultras. Symp., **1**, 435 (1990).
[22] Э. Дьелесан, Д. Руайе. *Упругие волны в твердых телах* (Наука, М., 1982), 424 с.