

## Магнитоэлектрический гиратор на основе трехслойных симметричных структур: теория и эксперимент

© Д.А. Филиппов,<sup>1</sup> Т.А. Галкина,<sup>1</sup> И.Н. Маничева,<sup>1</sup> Jitao Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, 173003 Великий Новгород, Россия

<sup>2</sup>College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, 450002 Zhengzhou, China  
e-mail: dmitry.filippov@novsu.ru

Поступило в Редакцию 23 марта 2023 г.

В окончательной редакции 7 июля 2023 г.

Принято к публикации 9 июля 2023 г.

Представлены теоретические и экспериментальные исследования магнитоэлектрического гиратора, состоящего из катушки индуктивности, внутри которой находится магнитоэлектрическая гетероструктура, представляющая собой механически связанные слой пьезоэлектрика и два слоя магнетика. Используя систему уравнений эласто- и электродинамики для пьезоэлектрической и магнитоэлектрических фаз, получены выражения, позволяющие рассчитывать коэффициент преобразования ток/напряжение гиратора через параметры фаз и геометрические размеры гетероструктуры. Изготовлен экспериментальный образец гиратора на основе гетероструктуры метглас/ЦТС/метглас. Теоретически рассчитаны и экспериментально исследованы частотные и нагрузочные характеристики гиратора. Показано, что частотная характеристика коэффициента  $I/V$  преобразования имеет резонансный характер, а в низкочастотной области спектра при малых сопротивлениях нагрузки его величина линейно зависит от частоты и линейно возрастает с ростом нагрузочного сопротивления, стремясь к насыщению при больших сопротивлениях нагрузки. Представлены рекомендации для создания гираторов с наибольшей эффективностью преобразования ток/напряжение.

**Ключевые слова:** гиратор, магнитоэлектричество, пьезоэлектричество, магнитоэлектрические гетероструктуры, магнитоэлектрический эффект.

DOI: 10.21883/JTF.2023.09.56222.50-23

### Введение

Впервые прототип гиратора в качестве пятого основного пассивного элемента электронных схем был предложен Теллегеном в 1948 г. [1]. Гиратор может быть реализован с помощью схемотехнического решения на основе операционного усилителя [2]. Идеальный гиратор, выполняющий функции преобразования конденсатора в катушку индуктивности, оказался весьма полезным при проектировании фильтров на основе катушек индуктивности; взаимные преобразователи ток-напряжение ( $I - V$ ) широко используются в радарных системах с функциями одновременного приема-передачи, мощных беспроводных передатчиках и т.д. [3–5]. Предложенные схемотехнические решения делают схемы довольно громоздкими, требующими дополнительных источников питания. Однако гиратор может быть реализован на основе магнитоэлектрического (МЭ) эффекта, предсказанного в [6,7] и впервые экспериментально обнаруженного в [8,9]. При этом для реализации МЭ гиратора целесообразно использовать магнитоэлектрично-пьезоэлектрические гетероструктуры, поскольку величина МЭ эффекта в них на несколько порядков больше, чем в монокристаллах, вследствие чего открываются широкие перспективы для их использования в электронике [10–12].

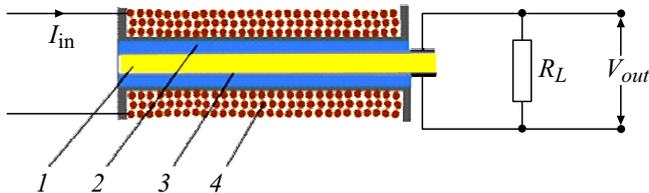
Классический МЭ гиратор состоит из катушки индуктивности, внутри которой находится образец из МЭ материала. Преобразование ток-напряжение осуществляется следующим образом: на катушку индуктивности подается переменный ток  $I_{in}$ , который создает в ее внутренней области переменное магнитное поле  $H$ , в котором находится МЭ образец. Вследствие магнитоэлектрики это переменное магнитное поле  $H$  вызывает в магнитной компоненте МЭ гетероструктуры деформации, которые через границу раздела передаются в пьезоэлектрическую компоненту, что приводит к возникновению электрического напряжения  $V_{out}$ . Коэффициент  $(I - V)$ -преобразования  $K_{IV}$ , равный отношению выходного напряжения  $V_{out}$  к величине входного тока  $I_{in}$ , т.е.  $K_{IV} = V_{out}/I_{in}$ , зависит как от частоты переменного входного сигнала, так и от геометрических параметров катушки индуктивности, параметров МЭ образца и сопротивления нагрузки. Ранее при исследовании МЭ гираторов наиболее часто использовался метод эквивалентной электрической схемы [13–16]. При таком подходе гиратор, как правило, представлялся в виде трех связанных между собой доменов: электрический домен (индуктивный порт)-механический домен (емкостной порт). Взаимодействие между доменами осуществлялось посредством коэффициентов электромеханической и магнитомеханической

связи. Недостатком этого метода является то, что сложно учесть особенности МЭ гетероструктуры, например, симметричная она (трехслойная) или асимметричная (двухслойная), влияние геометрических размеров, параметров материала. Целью настоящей работы являлось построение теории МЭ гиратора, исходя из общих уравнений эластодинамики и электродинамики.

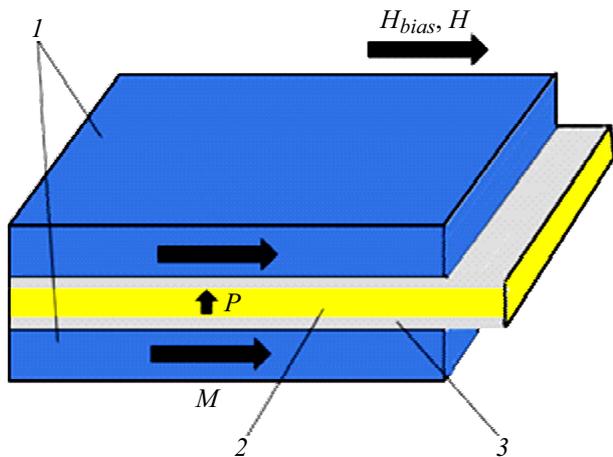
### 1. Теоретическая модель

В качестве модели рассмотрим „классический“ МЭ гиратор, состоящий из катушки, внутри которой находится симметричная МЭ структура, состоящая из пьезоэлектрической пластинки, к обеим сторонам которой прикреплены пластинки из магнитоотрицательного материала. Схематичное изображение гиратора и МЭ структуры представлено на рис. 1 и 2 соответственно.

Выбор симметричной МЭ структуры обусловлен тем, что при помещении асимметричной магнитоотрицательной-пьезоэлектрической структуры в магнитное поле могут возникать продольные и изгибные колебания, ослабляющие друг друга [17]. В симметричной структуре возникают только продольные колебания, что приводит к более эффективному МЭ взаимодействию.



**Рис. 1.** Схематичное изображение гиратора: 1 — пьезоэлектрический слой, 2 — магнитоотрицательные слои, 3 — тонкий слой серебра, 4 — катушка индуктивности. Входной ток  $I_{in}$ , выходное напряжение  $V_{out}$ , сопротивление нагрузки  $R_L$ .



**Рис. 2.** Схематичное изображение МЭ структуры: 1 — магнитоотрицательный слой, 2 — пьезоэлектрический слой, 3 — тонкий слой проводника (Ag). Стрелки показывают направления намагниченности  $M$ , поляризации  $P$ , поля подмагничивания  $H_{bias}$ , и переменного магнитного поля  $H$ .

Исходными уравнениями, положенными в основу модели, являлись уравнения, представляющие обобщенный закон Гука, а также уравнения эластодинамики и электродинамики, записанные в следующем виде:

$$S_1^p = \frac{1}{Y^p} T_1^p + d_{31}^p E_3^p, \tag{1}$$

$$S_1^m = \frac{1}{Y^m} T_1^m + q_{11}^m H_1^m, \tag{2}$$

$$D_3^p = \epsilon_{33}^p E_3^p + d_{31}^p T_1^p. \tag{3}$$

Здесь  $S_1^p, S_1^m, T_1^p$  и  $T_1^m$  — компоненты тензоров деформаций и напряжений для пьезоэлектрической и магнитоотрицательной фазы,  $D_3^p$  — компонента вектора электрической индукции,  $E_3^p, H_1^m$  — компоненты вектора напряженности электрического и магнитного полей в пьезоэлектрике и магнетике соответственно,  $d_{31}^p, q_{11}^m$  — пьезоэлектрический и пьезомагнитный модули,  $\epsilon_{33} = \epsilon_{33}^p \epsilon_0, \epsilon_{33}^p$  — относительная диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрика,  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  F/m — диэлектрическая постоянная,  $Y^p$  и  $Y^m$  — модули Юнга пьезоэлектрической и магнитоотрицательной фазы. Под пьезомагнитным эффектом здесь подразумевается эффект возникновения деформаций, линейных по величине переменного магнитного поля  $H$  при наличии поля подмагничивания  $H_{bias}$ , а пьезомагнитный модуль  $q$  определяется как  $q = \frac{\partial \lambda(H)}{\partial H} |_{H=H_{bias}}$ , где  $\lambda(H)$  — магнитоотрицательность магнетика.

Уравнение эластодинамики среды запишем в предположении, что смещения пьезоэлектрической и магнитоотрицательной сред одинаковы. Тогда уравнение движения среды запишется в виде

$$\bar{\rho} \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = \frac{\partial \bar{T}_1}{\partial x}. \tag{4}$$

Здесь  $\bar{\rho} = \frac{\rho^m t^m + \rho^p t^p}{t^m + t^p}$  — среднее значение плотности образца,  $\bar{T} = \frac{T^m t^m + T^p t^p}{t^m + t^p}$  — среднее значение тензора напряжений,  $t^m = 2t^{m1}$  — толщина двух магнитоотрицательных слоев,  $t^{m1}$  — толщина одного магнитоотрицательного слоя,  $t^p$  — толщина слоя пьезоэлектрика.

Выражая из уравнений (1) и (2) компоненты тензора напряжений через компоненты тензора деформаций и подставляя их в уравнение (4), получим уравнение для смещения среды в виде

$$\bar{\rho} \frac{\partial^2 u_1(x, t)}{\partial t^2} = \bar{Y} \frac{\partial^2 u_1(x, t)}{\partial x^2}, \tag{5}$$

где введено обозначение  $\bar{Y} = \frac{Y^m t^m + Y^p t^p}{t}$  — среднее значение модуля Юнга,  $t = t^m + t^p$  — полная толщина образца.

Решение для смещения представим в виде

$$u_1(x, t) = u_1(x) \exp(i\omega t), \tag{6}$$

Подставляя это решение в уравнение (5) для координатной части, получим уравнение

$$\frac{\partial^2 u_1(x)}{\partial x^2} + k^2 u_1(x) = 0, \quad (7)$$

где введено обозначение  $k^2 = \frac{\rho}{Y} \omega^2$ .

Решение уравнения (7) запишем в виде

$$u_1(x) = A \cos(kx) + B \sin(kx). \quad (8)$$

Постоянные интегрирования  $A$  и  $B$  определяются из условия равенства нулю силы на левой и правой поверхностях образца, т. е.

$$t^m T^m(x = \pm L/2) + t^p T^p(x = \pm L/2) = 0. \quad (9)$$

Используя эти граничные условия, для постоянных интегрирования получим следующие выражения

$$A = 0, \quad B = \frac{t^m Y^m q_{11}^m H_1^m + t^p Y^p d_{31}^p E_3^p}{k \cos(\kappa)}, \quad (10)$$

где введен безразмерный параметр  $\kappa = \frac{kL}{2}$ .

Электрический ток  $I_{out}$ , протекающий в выходной цепи, найдем из уравнения

$$I_{out} = \int_0^W dy \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\partial D_3^p}{\partial t} dx. \quad (11)$$

Подставляя решение (8) с учетом (10) в уравнение (3), а затем получившееся выражение в уравнение (11), и выполняя интегрирование, получим

$$I_{out} = i \omega C t^p \left( \Delta_a E_3^p + \frac{Y^p d_{31}^p q_{11}^m \tan(\kappa)}{\varepsilon_{33}} H_1^m \right). \quad (12)$$

Здесь введены обозначения  $C = \frac{\varepsilon_{33} W L}{t^p}$  — емкость пьезоэлектрической пластины,  $W$  — ширина пластины,  $\Delta_a = 1 - k_p^2 + k_p^2 \frac{Y^p t^p \tan(\kappa)}{Y_t \kappa}$  — зависящий от частоты параметр,  $k_p^2 = \frac{Y^p (d_{31}^p)^2}{\varepsilon_{33}}$  — квадрат коэффициента электромеханической связи.

С учетом того что, как следует из рис. 1, выходное напряжение  $V_{out} = I_{out} R_L$ , где  $R_L$  — сопротивление нагрузки, а напряженность электрического поля  $E_3^p = \frac{V_{out}}{t^p}$ , после несложных преобразований получим следующее выражение:

$$\frac{V_{out}}{\Delta_a} = i \omega \tau \left( V_{out} + \frac{Y^p d_{31}^p q_{11}^m t^p \tan(\kappa)}{\varepsilon_{33} \Delta_a} H_1^m \right), \quad (13)$$

где  $\tau = R_L C$  — время перезарядки  $RC$  цепочки.

Напряженность магнитного поля  $H_1^m$ , создаваемого катушкой, имеющей  $n = \frac{N}{L}$  витков на единицу длины, определяется соотношением  $H_1^m = I_{in} n$ .

Вводя коэффициент  $(I - V)$ -преобразования  $K_{IV} = \frac{V_{out}}{I_{in}}$ , для его модуля получим выражение в следующем виде:

$$|K_{IV}| = \frac{Y^p d_{31}^p q_{11}^m \tan(\kappa)}{\varepsilon_{33} \Delta_a} \left| \frac{\tan(\kappa)}{\kappa} \right| t^p n \frac{\omega \tau \Delta_a}{\sqrt{1 + (\omega \tau \Delta_a)^2}}. \quad (14)$$

Введем емкостное сопротивление  $X_C = 1/\omega C$ . Тогда уравнение (14) можно переписать в виде

$$|K_{IV}| = \frac{Y^p d_{31}^p q_{11}^m \tan(\kappa)}{\varepsilon_{33} \Delta_a} \left| \frac{\tan(\kappa)}{\kappa} \right| t^p n \frac{(R_L/X_C) \Delta_a}{\sqrt{1 + ((R_L/X_C) \Delta_a)^2}}. \quad (15)$$

Уравнения (14) и (15) позволяют рассчитать модуль коэффициента  $(I - V)$ -преобразования в зависимости от частоты и сопротивления нагрузки с использованием параметров материалов и геометрических размеров МЭ структуры, а также характеристик катушки индуктивности.

## 2. Эксперимент

Для экспериментальных исследований был изготовлен гиратор, состоящий из катушки, намотанной на каркас размером  $20 \times 10 \times 5$  mm. Внутри каркаса было сквозное прямоугольное отверстие размером  $5.5 \times 1.5$  mm для помещения в него МЭ гетероструктуры. Каркас был изготовлен с помощью печати на 3D-принтере. На каркас была намотана катушка из медной проволоки диаметром  $d = 0.35$  mm, состоящая из 152 витков. МЭ гетероструктура состояла из пластинки пьезокерамики ЦТС-19 с электродами, полученными вжиганием серебряной пасты („Пьезоприбор“, Ростов-на-Дону), и двух слоев аморфного нанокристаллического сплава марки АМАГ 212N производства ПАО „Мстатор“ (Боровичи, Россия).

Размеры пьезоэлектрической пластинки составляли  $20 \times 5 \times 0.3$  mm, размеры одного слоя аморфного сплава —  $18 \times 5 \times 0.06$  mm. Вся система помещалась в соленоид диаметром  $D = 20$  mm и длиной  $L = 180$  mm и содержащий  $N = 500$  витков из медной проволоки диаметром 0.7 mm. Для создания поля подмагничивания на соленоид подавалось постоянное напряжение от источника питания УТ 3010Е. На катушку гиратора подавалось переменное напряжение от генератора сигналов АКИП-3410/4. Сопротивление нагрузки создавалось с помощью магазина сопротивлений, а напряжение на нем измерялось с помощью вольтметра АКИП-2101 и одновременно контролировалось с помощью осциллографа АКИП-4115/6А. При проведении измерений частотных и нагрузочных характеристик переменный ток через катушку гиратора находился в диапазоне 10–15 mA, что соответствовало значению напряженности переменного магнитного поля порядка 1 Oe. Нерезонансное значение напряжения на нагрузочном сопротивлении составляло при этом несколько десятков mV. Модуль коэффициента  $(I - V)$ -преобразования рассчитывался как отношение напряжения на нагрузочном сопротивлении к входному току на катушке гиратора.

## 3. Результаты и обсуждения

На рис. 3 приведена частотная зависимость модуля коэффициента  $(I - V)$ -преобразования, рассчитанная

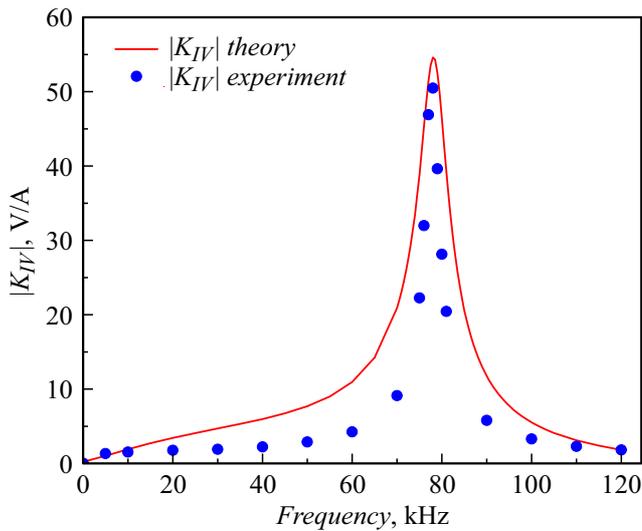


Рис. 3. Частотная зависимость модуля коэффициента (I – V)-преобразования. Сплошная линия — теория, точки — эксперимент.

Значения параметров материалов

Параметр	Материал	
	Пьезоэлектрик ЦТС-19	Магнетик АМАГ 212N
Длина пластинки, mm	20	18
Ширина пластинки, mm	5	5
Толщина слоя, mm	0.3	0.12
Плотность, kg/m <sup>3</sup>	7000	7700
Модуль Юнга, GPa	67	110
Относительная диэлектрическая проницаемость, ε <sub>33</sub> <sup>p</sup>	1750	—
Пьезомодули: d <sub>31</sub> <sup>p</sup> , pC/N q <sub>11</sub> <sup>m</sup> , ppm/Oe	-175 —	— 0.3

теоретически с использованием уравнения (14) и полученная экспериментально. При расчетах использовались параметры структуры, представленные в таблице.

Как видно из рис. 3, частотная зависимость модуля коэффициента (I – V)-преобразования имеет резонансный характер. Основная резонансная частота соответствует условию, когда безразмерный параметр κ примерно равен π/2. Отсюда для резонансной частоты получаем соотношение  $f_{res} \cong \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$ .

Как следует из уравнений (14) и (15), величина коэффициента зависит как от эффективности МЭ преобразования, так и от конструкции катушки (источника магнитного поля), а также и от сопротивления нагрузки.

Вне резонансной области при малых сопротивлениях нагрузки, когда отношение  $\frac{R_L}{X_C} \ll 1$ , уравнения (14)

и (15) упрощаются и принимают вид

$$|K_{IV}| = \frac{Y^p d_{31}^p q_{11}^m}{\epsilon_{33}} \left| \frac{\tan(\kappa)}{\kappa} \right| t^p n \omega \tau, \quad (16)$$

$$|K_{IV}| = \frac{Y^p d_{31}^p q_{11}^m}{\epsilon_{33}} \left| \frac{\tan(\kappa)}{\kappa} \right| t^p n (R_L/X_C). \quad (17)$$

Из этих уравнений следует, что в низкочастотной области спектра, когда безразмерный параметр  $\kappa \ll 1$ , величина |K<sub>IV</sub>| линейно зависит от частоты и линейно возрастает с ростом нагрузочного сопротивления. При больших сопротивлениях нагрузки, когда  $\omega \tau \gg 1$ , или, что то же самое,  $(R_L/X_C) \gg 1$ , величина |K<sub>IV</sub>| достигает насыщения, модуль величины которого равен

$$\lim_{(R_L/X_C) \rightarrow \infty} |K_{IV}| = |\alpha_E| t^p n, \quad (18)$$

где α<sub>E</sub> — МЭ коэффициент по напряжению, равный

$$\alpha_E = \frac{Y^p d_{31}^p q_{11}^m \tan(\kappa)}{\epsilon_{33} \Delta_a \kappa}. \quad (19)$$

На рис. 4 представлена нагрузочная характеристика модуля коэффициента (I – V)-преобразования. В полном соответствии с теорией, при малых сопротивлениях нагрузки величина |K<sub>IV</sub>| линейно возрастает с увеличением сопротивления нагрузки и достигает насыщения при больших сопротивлениях, причем чем больше частота, тем раньше наступает насыщение.

Следует также отметить, что при насыщении величина |K<sub>IV</sub>|, так же, как и величина МЭ коэффициента по напряжению α<sub>E</sub>, пропорциональна отношению  $\frac{d_{31}^p}{\epsilon_{33}}$ , в то время как в области, где  $\frac{R_L}{X_C} \ll 1$ , его величина пропорциональна просто d<sub>31</sub><sup>p</sup>. Отсюда следует, что такие материалы, как арсенид галлия и кварц, имеющие отношение  $\frac{d}{\epsilon}$ , равные соответственно 0.024 и 0.05 м<sup>2</sup>/С

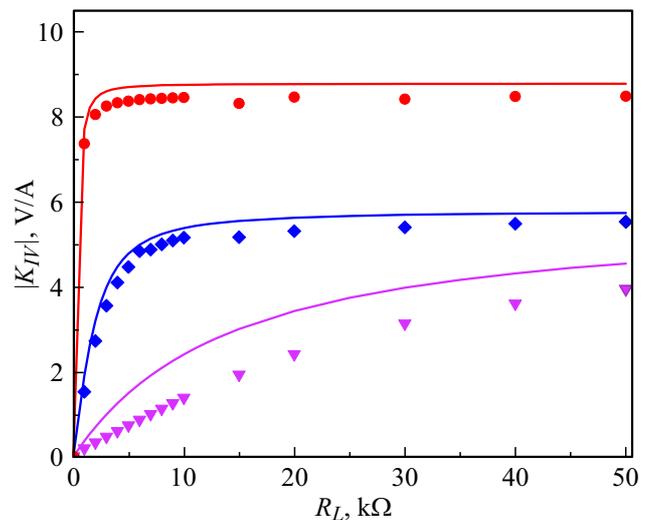


Рис. 4. Нагрузочная характеристика МЭ гиратора. Сплошные линии — теория, точки — эксперимент. —, ▼ — частота f = 1 kHz; —, ◆ — f = 10 kHz; —, ● — f = 50 kHz.

против  $0.011 \text{ m}^2/\text{C}$  у цирконата-титаната-свинца (ЦТС) (PZT) и демонстрирующие хорошие МЭ характеристики [18–21], для создания гираторов в низкочастотной области использовать нецелесообразно, поскольку насыщение  $K_{IV}$  достигается только при больших сопротивлениях нагрузки, однако в высокочастотной области они показывают лучшие, чем гираторы на основе ЦТС, характеристики. В качестве примера на рис. 5 приведены рассчитанные нагрузочные характеристики для гираторов на частоте 50 kHz, изготовленных на основе трехслойных симметричных гетероструктур, где в качестве магнитоэлектрической фазы выбран аморфный сплав АМАГ 212N, а в качестве пьезоэлектрика — ЦТС арсенид галлия GaAs и кварц Q.

Как следует из рис. 5, для гиратора на основе ЦТС величина коэффициента (I-V)-преобразования для данной конструкции гиратора на частоте 50 kHz наступает при значении нагрузочного сопротивления в несколько  $\text{k}\Omega$ , в то время как для гиратора на основе GaAs значение  $|K_{IV}|$  начинает стремиться к насыщению при сопротивлении нагрузки больше  $100 \text{ k}\Omega$ . При малых сопротивлениях нагрузки значение  $|K_{IV}|$  для гиратора на основе ЦТС превышает значение для гираторов на основе GaAs и Q, однако при сопротивлениях нагрузки, больших  $40 \text{ k}\Omega$ , гираторы, где в качестве пьезоэлектрика использованы GaAs и Q, показывают лучшие характеристики.

Следует также отметить, что, как следует из уравнений (18) и (19), величина коэффициента (I-V)-преобразования вне резонансной области уменьшается с увеличением частоты вследствие увеличения безразмерного параметра  $\kappa$ , стоящего в знаменателе уравнения (19). На рис. 6 представлены рассчитанные передаточные нагрузочные характеристики для тех же гираторов на частоте 250 kHz.

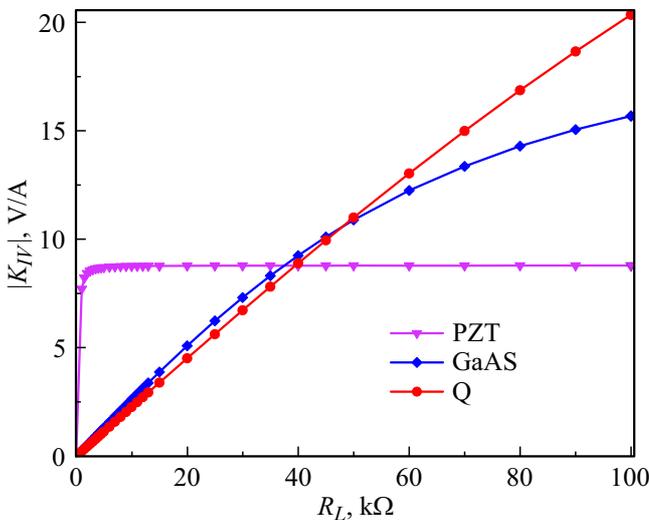


Рис. 5. Нагрузочные кривые для симметричных гетерогенных структур с различным типом пьезоэлектрика на частоте 50 kHz.

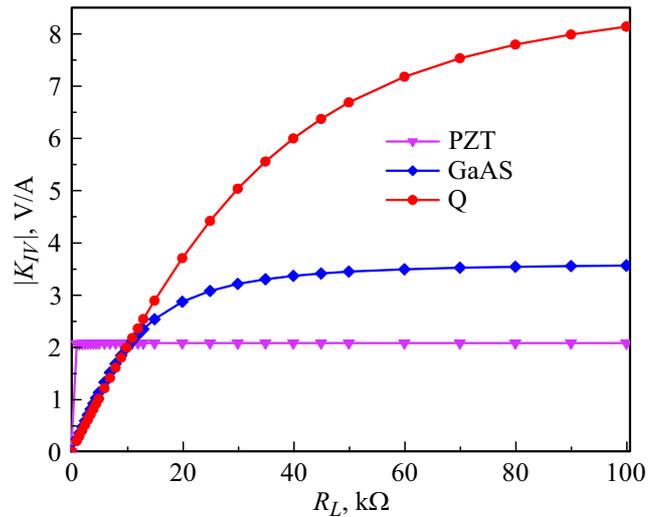


Рис. 6. Нагрузочные кривые для симметричных гетерогенных структур с различным типом пьезоэлектрика на частоте 250 kHz.

Из сравнения рис. 5 и 6 следует, что в низкочастотной области спектра при малых сопротивлениях нагрузки гиратор на основе ЦТС обладает лучшими передаточными характеристиками, чем гираторы на основе арсенида галлия и кварца, в то время как в высокочастотной области спектра гираторы на основе арсенида галлия и кварца демонстрируют лучшие характеристики по сравнению с ЦТС.

### Заключение

Коэффициент (I-V)-преобразования  $K_{IV}$  зависит как от частоты переменного входного сигнала, так и от геометрических параметров катушки индуктивности, параметров МЭ образца и сопротивления нагрузки. При малых сопротивлениях нагрузки величина  $|K_{IV}|$  линейно возрастает с увеличением сопротивления нагрузки и достигает насыщения при больших сопротивлениях, причем чем больше частота, тем раньше наступает насыщение. При насыщении величина коэффициента (I-V)-преобразования, так же как и величина МЭ коэффициента по напряжению, пропорциональна отношению пьезоэлектрического модуля к диэлектрической проницаемости, в то время как в низкочастотной области при малых сопротивлениях нагрузки его значение пропорционально просто величине пьезоэлектрического модуля. Отсюда следует, что такие материалы, как арсенид галлия и кварц, имеющие значение отношения пьезоэлектрического модуля к диэлектрической проницаемости больше, чем у ЦТС, и демонстрирующие хорошие МЭ характеристики, для создания гираторов в низкочастотной области использовать нецелесообразно, поскольку насыщение коэффициента (I-V)-преобразования у них достигается только при больших сопротивлениях нагрузки.

ки, однако в высокочастотной области они показывают лучшие, чем гираторы на основе ЦТС, характеристики.

### Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00763, <https://rscf.ru/project/22-19-00763/>

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] B.D.H. Tellegen. Philips Res., **3**, 81 (1948).
- [2] I. Tatai, I. Zaharie. Rev. Sci. Instrum., **83** (11), 114702 (2012). DOI: 10.1063/1.4766332
- [3] S. Bosco, F. Haupt, D.P. DiVincenzo. Phys. Rev. Appl., **7**, 2 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.7.024030
- [4] S. Singer. IEEE Trans. Ind. Electron., **34** (3), 313 (1984). DOI: 10.1109/TIE.1987.350962
- [5] A. Cervera, M. Evzelman, M.M. Peretz, S. Ben-Yaakov. IEEE Trans. Power. Electron., **30** (3), 1373 (2015). DOI: 10.1109/TPEL.2014.2317758
- [6] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Электродинамика сплошных сред* (ГИФМЛ, М., 1959) [L.D. Landau, E.M. Lifshitz *Electrodynamics of Continuous Media* (Pergamon Press, 1960)]
- [7] И.Е. Дзялошинский. ЖЭТФ, **37** (3), 881 (1959). [I.E. Dzyaloshinskii. Sov.Phys. JETP, **10** (3), 628 (1960).]
- [8] Д.Н. Астров. ЖЭТФ, **40**, 1035 (1961). [D.N. Astrov. Sov. Phys JETP, **13** (4), 729 (1961).]
- [9] V.J. Folen, G.T. Rado, E.W. Stalder. Phys. Rev. Lett., **6**, 607 (1961). DOI: 10.1103/PhysRevLett.6.607
- [10] C.-W. Nan, M.I. Bichurin, Sh. Dong, D. Viehland, G. Srinivasan. J. Appl. Phys., **103**, 031101 (2008). DOI: 10.1063/1.2836410
- [11] А.П. Пятаков, А.К. Звездин. УФН, **182**(6), 593 (2012). DOI: 10.3367/UFNr.0182.201206b.0593 [A.P. Pyatakov, A.K. Zvezdin. Phys.Usp., **55** (6), 557 (2012). DOI: 10.3367/UFNr.0182.201206b.0593]
- [12] А.А. Бухараев, А.К. Звездин, А.П. Пятаков, Ю.К. Фетисов. УФН, **188** (12), 1288 (2018). DOI: 10.3367/UFNr.2018.01.038279 [A.A. Bukharaev, A.K. Zvezdin, A.P. Pyatakov, Y.K. Fetisov. Phys. Usp., **61** (12), 1175 (2018). DOI: 10.3367/UFNe.2018.01.038279]
- [13] C. Tu, Z. Chu, B. Spetzler, P. Hayes, C.-Z. Dong, X.-F. Liang, H.-H. Chen, Y.-F. He, Y.-Y. Wei, I. Lisenkov, H. Lin, Y.-H. Lin, J. McCord, F. Faupel, E. Quandt, N.-X. Sun. Materials, **12**, 2259 (2019). DOI: 10.3390/ma12142259
- [14] C.M. Leung, X. Zhuang, D. Friedrichs, J. Li, R.W. Erickson, V. Laletin, M. Popov, G. Srinivasan, D. Viehland. Appl. Phys. Lett., **111**, 122904 (2017). DOI: 10.1063/1.4996242
- [15] C.M. Leung, X. Zhuang, J. Xu, J. Li, G. Srinivasan, D. Viehland. Appl. Phys. Lett., **110**, 112904 (2017). DOI: 10.1063/1.4978751
- [16] J. Zhai, J. Gao, C. De Vreugd, J. Li, D. Viehland, A.V. Filippov, M.I. Bichurin, D.V. Drozdov, G.A. Semenov, S.X. Dong. Eur. Phys. J. B, **71**, 383 (2009). DOI: 10.1140/epjb/e2009-00318-9
- [17] D. Filippov, Y. Liu, P. Zhou, B. Ge, J. Liu, J. Zhang, T. Zhang, G. Srinivasan. J. Compos. Sci., **5** (11), 287 (2021). DOI: 10.3390/jcs5110287
- [18] Д.А. Филиппов, Т.О. Фирсова, В.М. Лалетин, Н.Н. Поддубная. Письма в ЖТФ, **43** (6), 72 (2017). DOI: 10.21883/PJTF.2017.06.44406.16488 [D.A. Filippov, T.O. Firsova, V.M. Laletin, N.N. Poddubnaya. Tech. Phys. Lett., **43**(3), 313 (2017). DOI: 10.1134/S106378501703018X].
- [19] В.М. Лалетин, А.И. Стогний, Н.Н. Новицкий, Н.Н. Поддубная. Письма в ЖТФ, **40** (21), 71 (2014). [V.M. Laletin, A.I. Stognii, N.N. Novitskii, N.N. Poddubnaya. Tech. Phys. Lett., **40** (11), 969 (2014). DOI: 10.1134/S1063785014110078]
- [20] V.M. Sreenivasulu, V.M. Petrov, L.Y. Fetisov, Y.K. Fetisov, G. Srinivasan. Phys. Rev. B, **86**, 214405 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevB.86.214405
- [21] В.М. Лалетин, Д.А. Филиппов, С.Е. Мозжаров, И.Н. Маничева. Письма в ЖТФ, **44** (7), 16 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.07.45880.17103 [V.M. Laletin, D.A. Filippov, S.E. Mozzharov, I.N. Manicheva. Tech. Phys. Lett., **44** (4), 281 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018040065]