

# СВЧ циркулятор на основе эффекта усиления невзаимности в гетероструктуре искусственный антиферромагнетик/пьезоэлектрик

А.В. Андреев<sup>1</sup>, А.Р. Сафин<sup>1,2</sup>, С.А. Никитов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

<sup>2</sup>Национальный Исследовательский Университет «МЭИ»

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

**Аннотация:** в данной работе представлен проект СВЧ циркулятора, работающего на основе эффекта усиления невязимности в гетероструктуре искусственный антиферромагнетик/пьезоэлектрик. Предложена аналитическая модель циркулятора, базовые расчёты характеристик рассеяния и проводимости, а также анализ свойств используемых материалов. Показана разница в эффективности затухания поверхностных акустических волн, распространяющихся в пьезоэлектрике в противоположных направлениях.

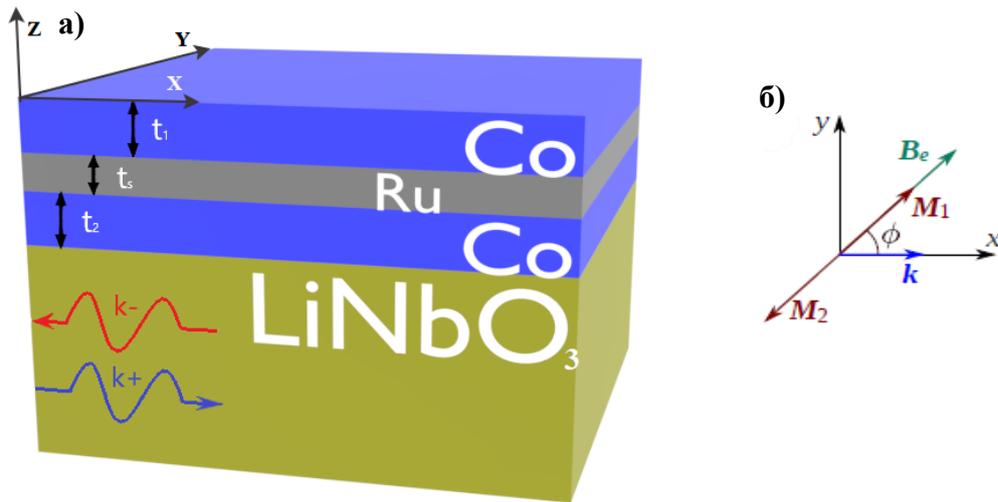
**Ключевые слова:** акустика, магнитострикция, антиферромагнетики, невязимность

## 1. Введение

В настоящее время пассивные циркуляторы и вентили ВЧ- и СВЧ-диапазона используются во многих приемопередающих устройствах, многоканальной радиоаппаратуре, антенно-фидерных трактах для направленной передачи энергии. Чаще всего в СВЧ электронике используются циркуляторы и вентили, основанные на эффекте поперечного магнитного резонанса в ферритах. В данной работе предложен, СВЧ циркулятор на основе гетероструктуры пьезоэлектрик/искусственный антиферромагнетик(ИАФМ) с шириной полосы частот в несколько ГГц и невязимностью потерь при распространении в ~100 раз большей чем в свободном пьезоэлектрике. В основе его функционирования лежит эффект магнитоупругого взаимодействия поверхностных акустических волн (ПАВ) и спиновых волн (СВ)[1].

## 2. Описание циркулятора на основе гетероструктуры ИАФМ

ИАФМ представляет из себя гетероструктуру, состоящую из двух слоев ферромагнетика толщиной ~15 нм с противоположно направленными намагниченностями, которые разделены тонким слоем немагнитного металла, причем слой разделителя должен быть значительно тоньше ферромагнитных слоёв (рис. 1а.) поскольку основную роль в сохранении свойств антиферромагнетика играет межслойное обменное взаимодействие которое значительно ослабляется при увеличении толщины разделителя[2]. В качестве ИАФМ использовалась гетероструктура Co/Ru/Co при этом противоположно направленные намагниченности слоёв Co компенсируют друг друга, создавая эффект скомпенсированного АФМ. Слои ферромагнетика использованные при моделировании незначительно различались по толщине на рис. 1а ( $t_1 \neq t_2$  или  $M_1 \neq M_2$ ) в этом случае компенсации намагниченности не происходит и гетероструктура сохраняет суммарный магнитный момент приближаясь по свойствам к слабым ферромагнетикам[1].



**Рисунок 1.** а) Расположение слоёв гетероструктуры ИАФМ; б)  $\mathbf{k}$  - направление распространения волн,  $\mathbf{B}_e$  - поле смещения и  $\mathbf{M}_{1,2}$  – намагниченности ферромагнетиков в плоскости x-y.

При приложении к структуре на рис 1а. магнитного поля смещения  $\mathbf{B}_e$  как показано на рис. 1б, направление суммарного вектора намагниченности слоёв изменяется согласно направлению поля смещения. При этом, для сохранения антиферромагнитного состояния гетероструктуры величина магнитного поля  $\mathbf{B}_e$  должна удовлетворять условию:

$$|\mathbf{B}_e| \leq J \left| \frac{1}{M_2 t_2} - \frac{1}{M_1 t_1} \right| \quad (1)$$

где  $J$  - константа внутрислойного обмена в АФМ. Кроме того, направление поля смещения должно совпадать с направлением намагниченности слоя ферромагнетика с большим магнитным моментом.

Магнитоупругое взаимодействие обуславливает связь между упругой и магнитной подсистемами среды, что существенно расширяет диапазон возможных применений, так как это позволяет изменять свойства упругой подсистемы воздействуя на магнитную. Магнитоупругая связь между ПАВ и СВ приводит к формированию гибридных магнитоупругих волн, частоты  $\omega_{1,2}$  и затухание  $\Gamma_{1,2}$  которых определяются стандартным соотношением для связанных волн(рис 2а)[1]:

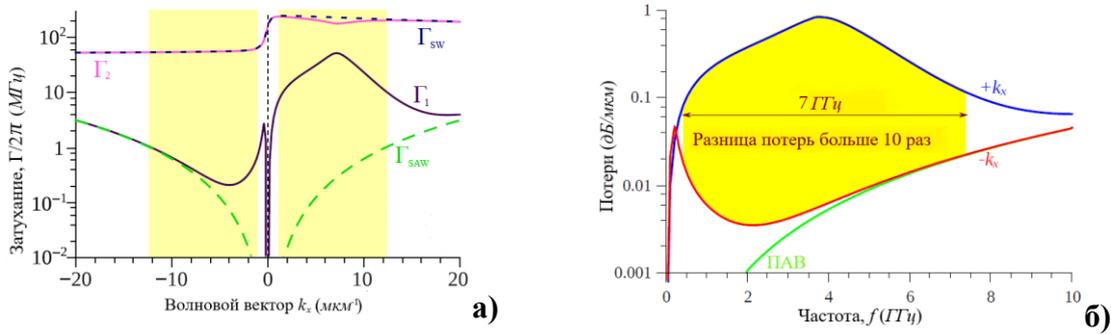
$$\omega_{1,2} - i\Gamma_{1,2} = \frac{\omega_{SW} - i\Gamma_{SW} + \omega_{SAW} - i\Gamma_{SAW}}{2} \pm \sqrt{\left[ \frac{(\omega_{SW} - i\Gamma_{SW}) - (\omega_{SAW} - i\Gamma_{SAW})}{2} \right]^2 + |\kappa_k|^2} \quad (2)$$

где  $\kappa_k$  - коэффициент связи между СВ и ПАВ рассчитанный в [2],  $\omega_{SW}$  и  $\Gamma_{SW}$  - частота и затухание СВ, а  $\omega_{SAW}$  и  $\Gamma_{SAW}$  - частота и затухание ПАВ.

Практические применения устройств, содержащих в своей конструкции подсистему создающую магнитное поле смещение ведет к снижению быстродействия устройств и увеличению их физических габаритов[3]. Для того чтобы избежать этого предлагается следующая структура циркулятора в которой не требуется использование магнитного поля смещения.

Циркулятор будет состоять из монокристаллической подложки пьезоэлектрика в форме квадрата толщиной не менее  $20\lambda$ , для исключения влияния объемных акустических волн, где  $\lambda$  – это длина акустической волны. Пьезоэлектрик будет покрыт материалом, предотвращающим отражение поверхностных акустических

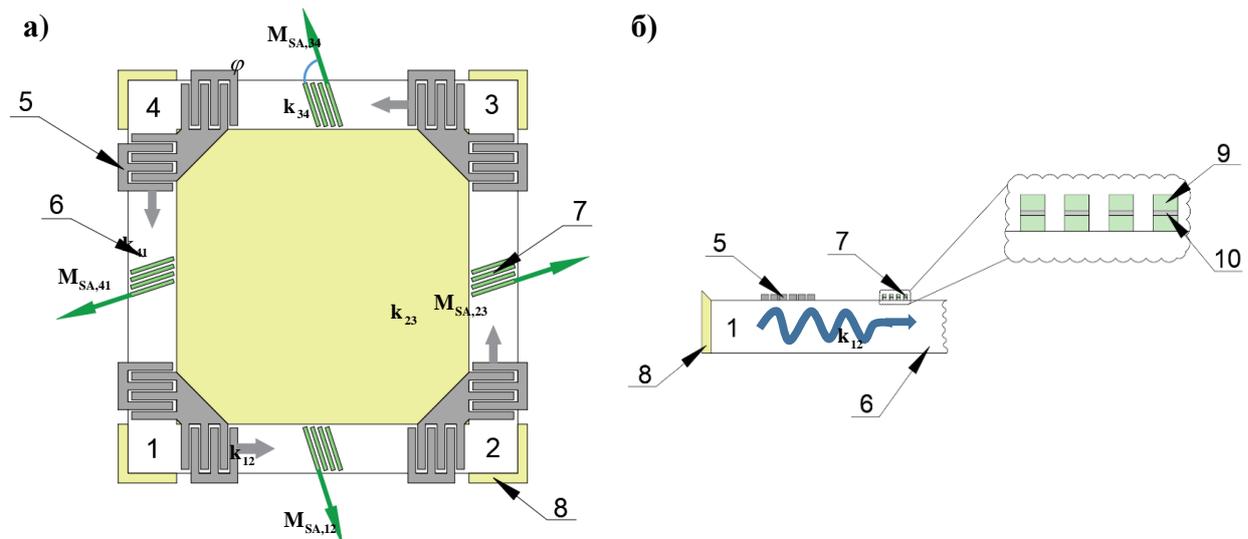
волн, так чтобы по краям монокристалла осталась полоса из свободного пьезоэлектрика шириной не менее  $10\lambda$ . На углах получившегося квадратного кольца



**Рисунок 2** Частотная зависимость а) затухания связанных магнитоупругих волн ( $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ ) и не связанных СВ ( $\Gamma_{SW}$ ) и ПАВ ( $\Gamma_{SAW}$ ) и б) потерь ПАВ, связанных с СВ при распространении в противоположных направлениях. Выделенная желтым область показывает диапазон частот, при которых распространяющиеся в противоположных направлениях ПАВ имеют наибольшую разницу потерь.

будут сформированы сдвоенные встречно-штыревые преобразователи (ВШП). Форма ВШП должна быть выбрана такой чтобы преобразователи были способны генерировать одинаковые по характеристикам ПАВ направленные под углом  $90^\circ$  друг к другу. Учитывая форму подложки и направление распространения ПАВ необходимо выбрать монокристалл обладающий симметрией при повороте на  $90^\circ$  (рис. 3а). Для этих целей подходят  $LiNbO_3$  и  $LiTaO_3$  [5,6].

Таким образом, полоса свободного пьезоэлектрика шириной  $>10\lambda$ , ограниченная поглощающим материалом и краем монокристаллической платины становится акустическим волноводом квадратной формы с приёмо-передающими ВШП, расположенными на углах квадрата. Каждый угол квадрата является портом циркулятора. ПАВ возбуждаемая ВШП распространяется сразу в двух направлениях, например, из порта 1 волна пойдет одновременно в порты 2 и 4. Однако по определению циркулятора волны должны передаваться последовательно из порта 1 в



**Рисунок 3.** Схематичное изображение циркулятора: а) вид сверху, б) вид порта 1 в разрезе: 1, 2, 3, 4 – номера соответствующих портов циркулятора; 5 – сдвоенные встречно-штыревые преобразователи; 6 – пьезоэлектрическая подложка; 7 – гетероструктура искусственного антиферромагнетика; 8 – демпферный слой, поглощающий ПАВ; 9 – слои ферромагнетика в составе ИАФМ гетероструктуры(Co); 10 – слой разделителя в составе ИАФМ(Ru)порт 2 и из порта 2 в порт 3, и т.д.

Для того чтобы исключить прохождение ПАВ в обратном направлении (1-4, 4-3, 3-2 и 2-1), а также обеспечить изоляцию, необходимо нанести на полосу волновода структуру со свойствами нескомпенсированного ИАФМ. Структура будет представлять из себя  $n$  полос из трёхслойной гетероструктуры со свойствами слабого ферромагнетика расположенные таким образом чтобы угол  $\varphi$  между вектором суммарной намагниченности ИАФМ  $-\mathbf{M}_{SA,ij}$  и волновым вектором ПАВ  $-\mathbf{k}_{ij}$ , где  $i$ ,  $j$  – порты генерации и приёма ПАВ, соответственно. был равен углу между вектором магнитного поля смещения  $-\mathbf{V}_e$  и волновым вектором ПАВ  $-\mathbf{k}$  из [1].

### 3. Заключение

Благодаря характеру взаимодействия упругой и магнитной подсистем исследуемой структуры и изменения с помощью поля смещения намагниченностей ИАФМ, возможно создание магнитоупругого циркулятора на ПАВ, не требующих для работы магнитного поля смещения. Потери магнитоупругих волн при распространении могут отличаться больше чем на порядок в зависимости от направления распространения. Подобные приборы могут быть реализованы в микро и наноисполнении

#### Список литературы

1. Verba R. Tiberkevich V. Slavin A. Wide-Band Nonreciprocity of Surface Acoustic Waves Induced by Magnetoelastic Coupling With a Synthetic Antiferromagnet// Phys. Rev. Appl. 2019. V. 12. P. 054061.
2. Duine, R.A., Lee, K.J., Parkin, S.S.P. et al. Synthetic antiferromagnetic spintronics. Nature Phys 14, 217–219 (2018).
3. Shah P., Bas D., Lisenkov, Ivan et al. (2020). Giant nonreciprocity of surface acoustic waves enabled by the magnetoelastic interaction. Science Advances. 6. eabc5648.
4. Verba R., et al., Nonreciprocal Surface Acoustic Waves in Multilayers with Magnetoelastic and Interfacial Dzyaloshinskii-Moriya Interactions// Phys. Rev. Appl. 2018. V. 9, P. 064014..
5. Дмитриев В. Ф. Устройства интегральной электроники: Акустоэлектроника. Основы теории, расчета и проектирования: учеб. пособие/ ГУАП. – СПб., 2006. 169 с.: ил.
6. Зеленка И. Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах: Материалы, технология, конструкция, применение: Пер. с чешск. – М.: Мир, 1990. – 584 с., ил.