
ФИЗИКА

УДК 538.975

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН С ЭЛЕКТРИЧЕСКИ РЕГУЛИРУЕМОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ

© 2016 г. С.В. Бирюков¹, Ю.И. Головкин¹, С.И. Масычев¹, В.М. Мухортов¹

Аннотация. Экспериментально показана возможность создания на основе тонких гетероэпитаксиальных пленок (Ba,Sr)TiO₃ пьезоэлектрических преобразователей на поверхностных акустических волнах. Обосновано, что применение в качестве активных элементов подобных приборов тонких сегнетоэлектрических пленок с электрически переключаемым направлением поляризации способно вдвое повысить рабочую частоту устройств. Показано, что эффективность работы пленочных преобразователей существенно зависит от качества гетероэпитаксии (блочная или слоистая). Обнаружено, что чувствительность подобных устройств может изменяться в широком диапазоне при приложении к электродам встречно-штыревого преобразователя внешнего смещающего напряжения. Установлено, что вместе с четными гармониками пленочные преобразователи способны генерировать и нечетные, включая первую. Подобное нетрадиционное поведение пленочных гетероэпитаксиальных структур объясняется с точки зрения существования тангенциальной в плоскости подложки составляющей спонтанной (остаточной) поляризации. Изменение амплитуды сигнала практически линейно зависит от амплитуды смещения. Показано, что преобразователи на основе пленок титаната бария-стронция способны генерировать и регистрировать поверхностные волны и без внешнего поля. Подобная униполярность, в свою очередь, может быть обусловлена присутствием в сегнетоэлектрической пленке *aa*-фазы.

Впервые измерен важнейший параметр преобразователей на поверхностных акустических волнах – коэффициент электромеханической связи, характеризующий эффективность преобразования электрической энергии в энергию поверхностной волны и обратно. Измерения скорости поверхностных акустических волн и коэффициента электромеханической связи *K* были выполнены с использованием особенности частотной зависимости проводимости встречно-штыревого преобразователя, расположенного на поверхности пленки. Показано, что скорость акустической волны в структуре пленка – подложка слабо зависит от приложенного напряжения, а коэффициент электромеханической связи сравним (и даже превышает) аналогичный параметр пьезоэлектрических подложек типа LiNbO₃. Таким образом, показано, что гетероэпитаксиальные пленки (Ba,Sr)TiO₃ могут быть перспективной основой для создания высокочастотных ПАВ с электрически регулируемой чувствительностью.

Ключевые слова: сегнетоэлектричество, тонкая пленка, гетероэпитаксия, поверхностная акустическая волна.

SURFACE ACOUSTIC WAVE CONVERTERS WITH ELECTRICALLY ADJUSTABLE SENSITIVITY

S.V. Biryukov¹, Yu.I. Golovko¹, S.I. Masyshev¹, V.M. Mukhortov¹

Abstract. The possibility of development of (Ba,Sr)TiO₃ piezoelectric transducers on surface acoustic wave (saw) on the basis of thin heteroepitaxial films has been experimentally indicated. It is proved that the use of ferroelectric thin films with electrically switchable polarization direction as the active elements of the devices provides the possibility of increase of devices' frequency by two times. It is indicated that the efficiency of film transducers is strongly affected by the quality of heteroepitaxy (block or layers). It has been registered that the sensitivity of such devices may vary over a wide range when applying to the electrodes of an interdigital

¹Южный научный центр Российской академии наук (Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: mukhortov1944@mail.ru.

transducer of the external bias voltage. Changing the amplitude of the signal practically linearly depends on the displacement amplitude. It is shown that the converters based on films of barium strontium titanate can generate and record surface waves even without external field. Such unipolarity, in turn, may be conditioned by the presence of *aa*-phase in the ferroelectric film.

The most important parameter of the SAW transducer (electromechanical coupling coefficient, which characterizes the efficiency of conversion of electrical energy into energy of surface wave and vice versa) has been measured for the first time. Measurements of SAW velocity and electromechanical coupling coefficient K were performed using a particular frequency dependence of conductivity of interdigital transducer disposed on the surface of the film. It is shown that the acoustic wave velocity in the structure of the film-substrate is weakly dependent on the applied voltage, while the coefficient of the electro-mechanical coupling is comparable to (or even exceeds) the same parameter of piezoelectric substrates of LiNbO_3 type. Thus it has been indicated that heteroepitaxial films (Ba , Sr) TiO_3 may be a promising basis for the development of high-frequency SAW with electrically adjustable sensitivity.

Keywords: ferroelectricity, thin film, heteroepitaxy, surface acoustic wave.

Поверхностные акустические волны (ПАВ) широко применяются в современной акустоэлектронике для создания линий задержки, фильтров, резонаторов и т.д. Очевидно, что с развитием систем связи постоянно требуется повышение рабочих частот устройств. В традиционных элементах, использующих ПАВ, повышение центральной частоты рабочей полосы частот достигается двумя способами – использованием звукопроводящей подложки с более высоким значением скорости звука и уменьшением геометрических размеров (ширины зазора и электрода) излучающего и приемного встречно-штыревого преобразователей (ВШП). Однако эти способы имеют свои естественные ограничения (фиксированная скорость звука в подложке и большие технологические трудности получения литографическим методом зазоров шириной менее 0,5 мкм).

В нашей работе показано, что при использовании в устройстве на ПАВ в качестве активного элемента тонкой сегнетоэлектрической пленки можно вдвое повысить рабочую частоту преобразователя путем формирования в пленке периодической доменной структуры с периодом, равным расстоянию между центрами соседних электродов и составляющему половину геометрического периода ВШП. При приложении напряжения к ВШП под электродами, расположенными на тонкой сегнетоэлектрической пленке, за счет индуцированного пьезоэффекта образуются пьезоактивные области. Существуют эти области в межэлектродном пространстве, где напряженность поля максимальна, в то же время индуцированный пьезоэффект под электродами практически отсутствует. Таким образом, мы имеем структуру с периодически изменяющимися диэлектрическими, пьезоэлектрическими и упругими свойствами. При распространении упругой волны в такой структуре изменение напряжения на электродах приводит к изменению поляризации в активных областях и, как следствие, к изменению их пьезочувствительности,

что фактически означает изменение затухания в системе фильтров на ПАВ.

В случае, когда на геометрическом периоде системы ВШП укладывается четное число полуволн излучаемой ПАВ, наблюдается резкий пик на АЧХ излучения. Наблюдаются также изменения на частотной зависимости величины полного входного сопротивления преобразователя. Величина и форма (острота) пика зависит от геометрии электродов ВШП (число штырей, их форма и т.д.), от добротности активного материала преобразователя, от типа волны и т.д.

При использовании в качестве активного материала тонкой СЭ-пленки направление поляризации в соседних зазорах будет встречно-параллельным. Это означает, что фаза волн, генерируемых соседними зазорами, будет смещена на 180° . Следовательно, для усиления амплитуды генерируемой ПАВ вследствие интерференции необходимо, чтобы четное число полуволн укладывалось на длине «ширина зазора + ширина электрода», а не на геометрическом периоде ВШП. Это полностью эквивалентно двойному уменьшению геометрического периода и двойному повышению частот, генерируемых ПАВ.

Тонкие гетероэпитаксиальные пленки ($\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}$) TiO_3 толщиной 40–400 нм осаждались на поверхность монокристаллов MgO методом высокочастотного распыления мишеней стехиометрического состава. В зависимости от условий осаждения пленки реализовывались два типа эпитаксии – гладкая и блочная. Более подробно технические особенности изготовления образцов описаны в [1; 2]. На поверхности образцов методами обратной (взрывной) фотолитографии формировались пары (излучающий и приемный) ВШП из алюминия толщиной 0,2 мкм (с подслоем ванадия для обеспечения адгезии). Ширина штыря и зазора преобразователя составляла 1,2–2 мкм, количество штырей 39–76, перекрытие электродов (апертура) могло меняться от 318 до 80 мкм, расстояние между ВШП

(центрами) составляло 1,81, 3,84 и 6,6 мм. Измерения основных характеристик полученных структур проводились на анализаторе цепей Anritsu MS 4623 B с использованием зондовой станции Micro Тес РМ-5. Для создания в междуэлектродных зазорах пленки поляризованного состояния, необходимого для возникновения пьезоактивности, через специальные развязывающие цепи, исключая влияние источника, подавали постоянное поляризующее напряжение 40 В, а на приемном ВШП поляризующее напряжение изменялось от 0 В до 50 В. На рис. 1 изображена блок-схема излучающего ВШП и показано предполагаемое направление поляризации в зазорах.

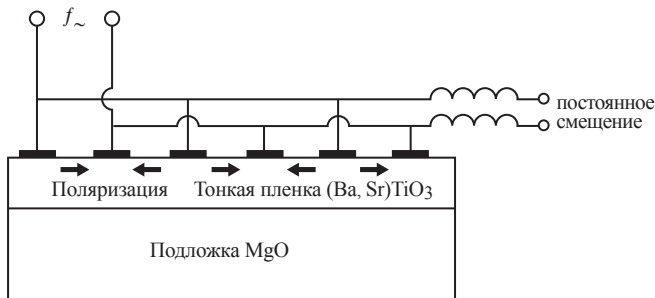


Рис. 1. Блок-схема излучающего встречно-штыревого преобразователя

Fig. 1. Block diagram of the radiating interdigital transducer

На рис. 2 показан спектр сигнала преобразователей, сформированных на разных типах пленок, выращенных по различным механизмам (слоевому и блочному), при различных расстояниях между излучающим и приемным ВШП и постоянном напряжении на преобразователях, равном 30 В. Геометрический период ВШП в этих измерениях составлял 8 мкм. Из представленных зависимостей хорошо видно, что затухание поверхностной волны в структуре пленка – подложка существенно зависит от качества осажденной пленки. Не совсем понятным, подобно данным работы [3], явилось существование максимума, соответствующего первой гармонике ВШП в области 600 МГц. Максимум в области 1,54 ГГц, вероятнее всего, соответствует приповерхностной акустической волне.

При фиксированном напряжении на излучающем преобразователе и изменении смещающего напряжения на приемном ВШП величина сигнала практически линейно зависела от величины смещения, повторяя ход основной кривой поляризации. Вместе с тем, как показано на рис. 3, приемный ВШП регистрирует небольшой сигнал и в отсутствие внешнего напряжения. Следует особо подчеркнуть, что в традиционных приборах, использующих ПАВ в объемных пьезоэлектриках, электрическая регулировка чувствительности на уровне первичного преобразователя не представляется возможной.

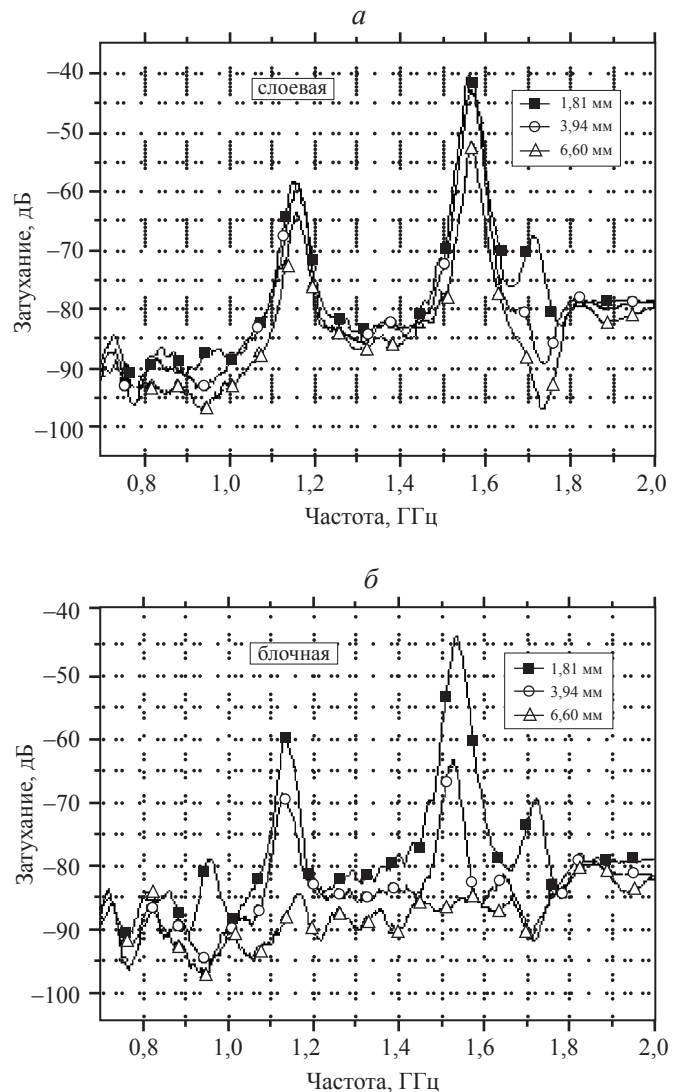


Рис. 2. Спектр сигнала преобразователей, сформированных на пленках, выращенных по различным механизмам

Fig. 2. The signal spectrum of the transducers formed on the films grown by different mechanisms

Существование пьезосигнала на приемном ВШП при отсутствии смещающего поля в тангенциальном к подложке направлении можно объяснить только наличием тангенциальной составляющей спонтанной (остаточной) поляризации. При распределении поляризации по направлениям, показанным на рис. 1, в спектре излучения должны присутствовать только четные (с точки зрения геометрического периода) гармоники. Наличие в спектре первой и других нечетных гармоник свидетельствует, что реальное направление поляризации отличается от указанной простой модели. Наиболее вероятным нами рассматривается существование естественной униполярности в плоскости подложки за счет присутствия aa -фазы [4].

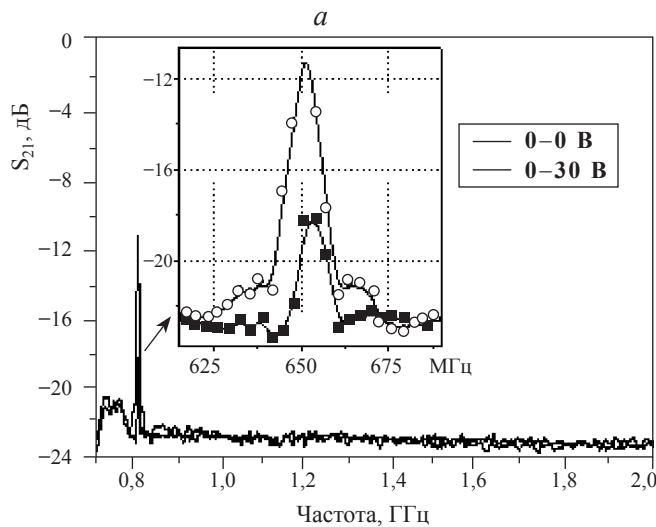
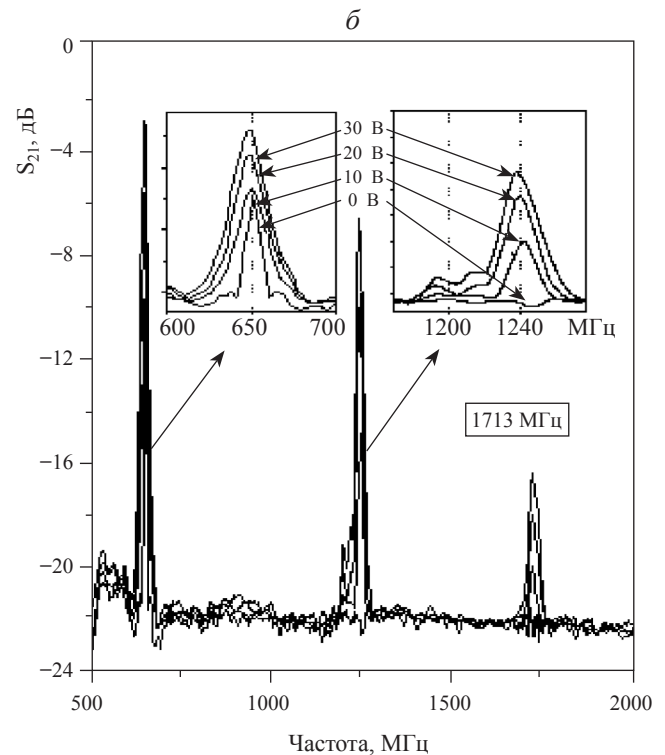


Рис. 3. Пьезоотклик приемного преобразователя: в случае отсутствия напряжения на передающем встречно-штыревом преобразователе и напряжении 0 В и 30 В на приемном (а) и при одновременном изменении смещения на обоих преобразователях (б)
Fig. 3. Piezosignal of the receiving transducer: in the absence of voltage on a transmitting IDT and the voltage of 0 V and 30 V output (a); piezosignal of the receiving transducer while changing the offset on both converters (b)



Для оценки эффективности работы преобразователя на ПАВ необходимо определение так называемого коэффициента электромеханической связи. С этой целью для измерения скорости ПАВ и коэффициента электромеханической связи K были использованы особенности частотной зависимости проводимости ВШП, расположенного на поверхности пленки. В этих измерениях ВШП включался параллельно между генератором и нагрузкой, при этом его геометрия подбиралась таким образом, чтобы емкостное сопротивление преобразователя было близко к сопротивлению нагрузки, что легко достигается соответствующим подбором апертуры [5]. В частности, в подобных измерениях использовались пленки толщиной 250–300 нм и ВШП с геометрическим периодом 5,6 мкм, шириной электродов и зазоров 1,4 мкм и апертурой в 20 периодов. Изменяя частоту генератора, можно было фиксировать так называемые частоты резонанса f_0 и антирезонанса f_a тестируемого ВШП. Скорость ПАВ рассчитывалась по известной формуле:

$$v = f_0 \times \frac{L}{2},$$

где $\frac{L}{2}$ – половина геометрического периода ВШП,

а коэффициент электромеханической связи определяли из выражения

$$K^2 = \frac{\pi^2}{4} \times \frac{\Delta f}{f_0},$$

где Δf определяется выражением $\Delta f = f_a - f_0$ [3].

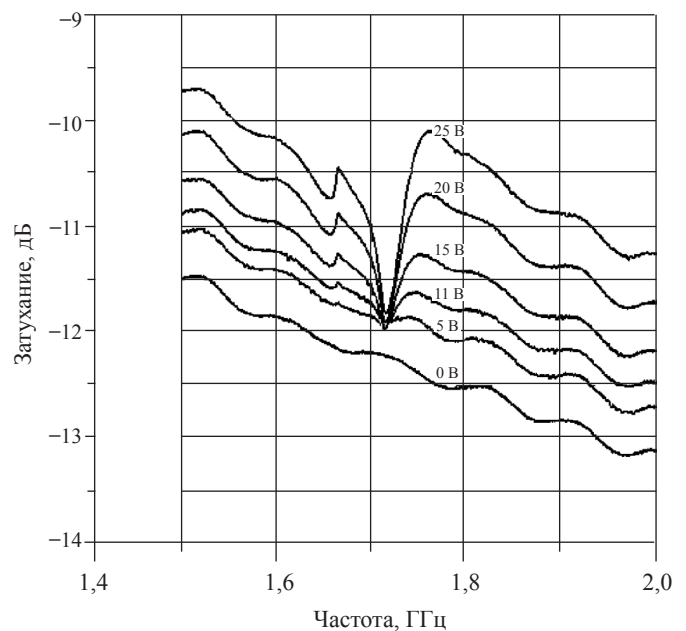


Рис. 4. Частотные зависимости вносимого затухания при включении встречно-штыревого преобразователя параллельно между генератором и нагрузкой при различных значениях постоянного смещающего напряжения

Fig. 4. The frequency dependences of the insertion attenuation with the inclusion of IDT in parallel between the generator and the load at different values of DC bias voltage

На рисунке 4 показаны экспериментально измеренные частотные зависимости вносимого затухания в случае, когда ВШП включены параллельно между

генератором и нагрузкой, при различных значениях постоянного смещающего напряжения между электродами. Из представленного рисунка видно, что частотная зависимость вносимого затухания сильно зависит от прилагаемого постоянного напряжения. С ростом величины напряжения смещения минимум и максимум затухания проявляются четче, что свидетельствует о росте K^2 . В табл. 1 приведены скорости ПАВ под ВШП и K^2 в зависимости от величины постоянного смещающего напряжения.

Видно, что, в отличие от K^2 , скорость ПАВ слабо зависит от степени наполяризованности объема сегнетоэлектрической пленки. В то же время

при напряжениях смещения, превышающих 20 В, значение K^2 сравнимо (и даже превышает) аналогичный параметр пьезоэлектрических подложек типа LiNbO₃.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что в тонкой сегнетоэлектрической пленке (Ba,Sr)TiO₃ при стандартной структуре встречно-штыревых электродов эффективно возбуждается вторая гармоника ПАВ. Путем изменения внешнего поляризующего напряжения на электродах пленки можно создавать эффективные преобразователи поверхностной волны с электрически регулируемой чувствительностью.

Таблица 1. Влияние постоянного смещающего поля, приложенного к встречно-штыревому преобразователю, на основные характеристики поверхностно-акустических волн

Table 1. Influence of a constant displacing field enclosed to IDT on the basic characteristics of SAW

Постоянное напряжение, В	0	5	11	15	20	25
Скорость ПАВ, м/с		4796,736	4798,5	4797,632	4798,5	4802
K^2	0	0,0207	0,0494	0,0535	0,0584	0,070

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Мухортов В.М., Юзюк Ю.И. 2008. *Гетероструктуры на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок: получение, свойства и применение*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 224 с.
2. Мухортов В.М., Головки Ю.И., Колесников В.В., Бирюков С.В. 2005. Формирование доменной структуры под действием деформационных полей в наноразмерных пленках титаната бария-стронция. *Письма в ЖТФ*. 31(23): 75–80.
3. Omori T., Hashimoto K. and Yamaguchi M. 2001. PZT Thin Films for SAW and BAW Devices. In: *Wave devices for future mobile communication systems. Proceedings of the Intern. symp. on acoustic*. P. 245–250.
4. Мухортов В.М., Головки Ю.И., Бирюков С.В., Анохин А.С., Юзюк Ю.И. 2016. Влияние механизмов роста на деформацию элементарной ячейки и переключение поляризации в гетероструктурах бария-стронция на оксиде магния. *ЖТФ*. 86(1): 93–98.
5. Мухортов В.М., Бирюков С.В., Головки Ю.И., Карапетян Г.Я., Масычев С.И., Мухортов Вас.М. 2011. Поверхностные акустические волны в тонких пленках титаната бария-стронция на подложках из оксида магния. *Письма в ЖТФ*. 37(5): 31–37.
1. Mukhortov V.M., Yuzyuk Yu.I. 2008. *Geterostruktury na osnove nanorazmernykh segnetoelektricheskikh plenok*. [Heterostructures based on nanoscale ferroelectric films]. Rostov-on-Don, SSC RAS Publishers: 224 p. (In Russian).
2. Mukhortov V.M., Golovko Yu.I., Kolesnikov V.V., Biryukov S.V. 2005. [The formation of the domain structure under the influence of strain fields in nanoscale films of titanate of barium-strontium]. *Pis'ma v ZhTF. (Technical Physics Letters)*. 31(23): 75–80. (In Russian).
3. Omori T., Hashimoto K. and Yamaguchi M. 2001. PZT Thin Films for SAW and BAW Devices. In: *Wave devices for future mobile communication systems. Proceedings of the Intern. symp. on acoustic*. P. 245–250.
4. Mukhortov V.M., Golovko Yu.I., Biryukov S.V., Anokhin A.S., Yuzyuk Yu.I. 2016. [The influence of growth mechanisms on the deformation of the unit cell and the switching of the polarization in the heterostructure of barium-strontium oxide magnesium]. *ZhTF. (Technical Physics)*. 86(1): 93–98. (In Russian).
5. Mukhortov V.M., Biryukov S.V., Golovko Yu.I., Karapetyan G.Ya., Masychev S.I., Mukhortov Vas.M. 2011. [Surface acoustic waves in thin films of titanate of barium-strontium on substrates of magnesium oxide]. *Pis'ma v ZhTF. (Technical Physics Letters)*. 37(5): 31–37. (In Russian).

Поступила 21.10.2015