

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиотехники и электродинамики  
наименование кафедры

**Исследование влияния проводимости тонких пленок на характеристики  
волны с поперечно-горизонтальной поляризацией нулевого порядка в  
акустической линии задержки**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 242 группы

направления 03.04.03 «Радиофизика»

код и наименование направления (специальности)

физического факультета

наименование факультета, института, колледжа

Павлова Алексея Сергеевича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

с.н.с. СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,

к.ф.-м. н.

Бородина И.А.

должность, ученая степень, звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Консультант

должность, ученая степень, звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Зав.кафедрой

д.ф.-м. н., проф. Глухова О.Е.

должность, ученая степень, звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Саратов 2018

## **Введение**

В настоящее время акустические волны, распространяющиеся в тонких пьезоэлектрических пластинах, вызывают большой интерес у исследователей. Это связано с возможностью разработки и создания различных датчиков и устройств обработки сигналов, обладающих уникальными возможностями. Наибольшее практическое значение имеют акустические волны нулевого порядка  $A_0$ ,  $S_0$  и  $SH_0$ , распространяющиеся в тонких по сравнению с длиной волны пьезоэлектрических пластинах, поскольку такие волны, обладают более высоким, по сравнению с поверхностными акустическими волнами, коэффициентом электромеханической связи. Как известно, пьезоактивные акустические волны, распространяющиеся в пьезоэлектрических материалах сопровождаются не только механической деформацией, но и электрическим полем. При распространении акустических волн в пьезоэлектрических пластинах электрические поля, сопровождающие такие волны, сильно проникают в вакуум и путем воздействия на эти поля можно менять характеристики волны (фазовую скорость, коэффициент электромеханической связи, затухание).

**Актуальность данной работы** обусловлена перспективностью использования акустических волн, распространяющихся в пьезоэлектрических пластинах, для разработки устройств обработки сигналов и датчиков, работающих в низком частотном диапазоне от  $\sim 1$  до 30 МГц. Поперечно-горизонтальные волны  $SH_0$  имеют существенно больший по сравнению с поверхностными акустическими волнами квадрат коэффициента электромеханической связи  $K^2$ . Поэтому указанные волны являются более чувствительными к изменению электрических граничных условий по сравнению с поверхностными волнами. Использование  $SH_0$  волн вместо поверхностных акустических волн позволило бы значительно улучшить характеристики существующих устройств обработки сигналов и повысить

чувствительность различных акустических датчиков, чувствительных к свету, присутствию химических элементов, концентрации газа и т.д. Однако к настоящему времени влияние электрических граничных условий на характеристики  $SH_0$  волн изучено лишь теоретически.

**Целью работы** являлось экспериментальное исследование влияния проводимости тонкой пленки на характеристики волны с поперечно-горизонтальной поляризацией нулевого порядка ( $SH_0$ ), распространяющейся в акустической линии задержки на основе пьезоэлектрической пластины ниобата лития.

В ходе проведенного исследования было сделано следующее:

1. Сделан литературный обзор по акустическим волнам, распространяющимся в пьезоэлектрических пластинах, и влиянию электрических граничных условий на их свойства.
2. Была освоена методика измерения фазы и полных потерь выходного сигнала линии задержки на основе пластины ниобата лития с распространяющейся волной с поперечно-горизонтальной поляризацией нулевого порядка ( $SH_0$ ) при помощи измерителя S-параметров E5071C.
3. Было проведено экспериментальное исследование влияния проводимости пленки и воздушного зазора между поверхностью линии задержки и пластиной с проводящей пленкой на фазу выходного сигнала линии задержки с распространяющейся акустической волной с поперечно-горизонтальной поляризацией.
4. Были построены экспериментальные зависимости фазы выходного сигнала линии задержки и относительного изменения скорости  $SH_0$  волны в пластине ниобата лития от ширины зазора между поверхностью линии задержки и пластиной с проводящей пленкой при различной проводимости пленки.
5. Были построены экспериментальные зависимости фазы выходного сигнала линии задержки и относительного изменения скорости  $SH_0$  волны в пластине ниобата лития от проводимости пленки при различной ширине

зазора между поверхностью линии задержки и пластиной с проводящей пленкой.

б. Проведено сравнение экспериментальных и теоретических данных. Получено их хорошее соответствие.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемых источников. Во введении обосновывается актуальность работы и формулируется научная новизна. В главе «Литературный обзор» анализируется современное состояние исследований акустических волн, распространяющихся в пьезоэлектрических пластинах, описываются преимущества акустических волн нулевого порядка, распространяющихся в тонких пьезоэлектрических пластинах по сравнению с поверхностными акустическими волнами. Показано, что такие волны, обладающие большим коэффициентом электромеханической связи, являются более чувствительными к изменению электрических граничных условий по сравнению с поверхностными волнами. Во второй главе «Экспериментальная установка и методика измерений» приводится описание общей установки для проведения эксперимента, описывается исследуемая линия задержки, изготовленная из пластины ниобата лития и микрометрическое устройство для перемещения пластины с проводящей пленкой на заданную высоту над линией задержки. Дается также описание процесса приготовления используемых пленок с различной проводимостью. В третьей главе «Полученные результаты и их обсуждение» представлены основные результаты экспериментального исследования влияния проводимости пленки и ширины зазора на фазу выходного сигнала акустической линии задержки и скорость акустической волны, распространяющейся в этой линии задержки. Проведено сравнение полученных экспериментальных результатов с теоретическими данными.

В заключении делаются выводы по основным результатам работы.

### **Основное содержание работы**

Для проведения экспериментального исследования была использована линия задержки на основе пластины Y-X среза ниобата лития ( $Y-X \text{ LiNbO}_3$ ) толщиной 200 мкм, с расположенными на ней двумя встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) с расщепленными электродами (рис.1). Каждый преобразователь содержал 5 пар штырей с апертурой 8 мм и периодом 1.2 мм. Эти преобразователи возбуждали и принимали  $SH_0$  волну, которая распространялась вдоль оси X. Диапазон рабочих частот линии задержки составлял 2.6 – 3.8 МГц. Для предотвращения отражений от краев пластины, ее противоположные края имели волнистую форму с глубиной  $\sim \lambda/2$  (где длина волны  $\lambda = 1.2$  мм). Пластина закреплялась на специальном держателе, что исключало ее деформацию при сохранении сторон механически свободными.

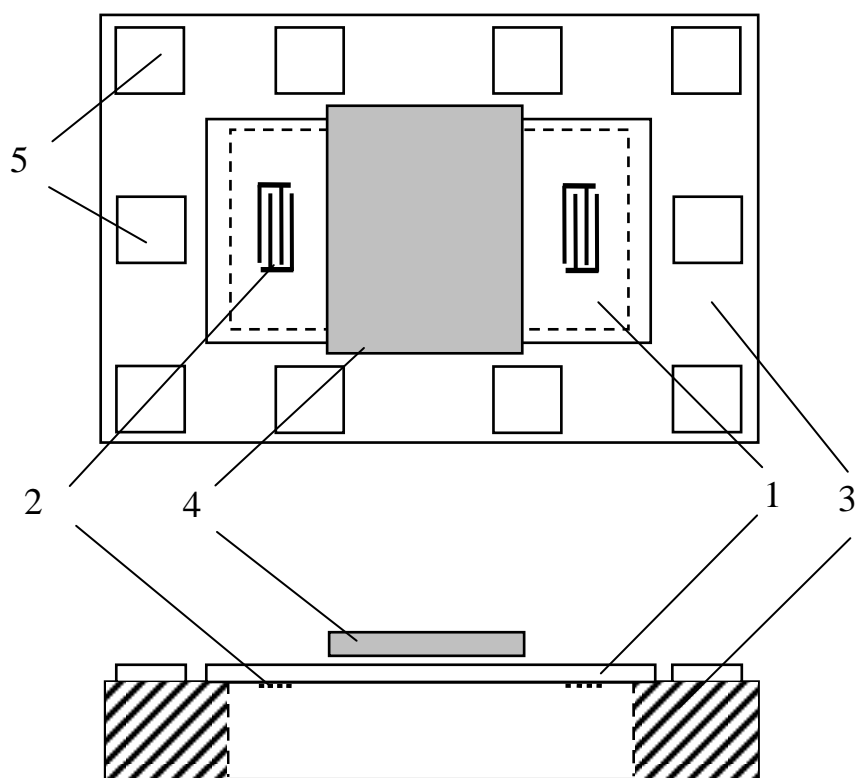


Рис. 1 Схема исследуемой линии задержки: 1 – пьезоэлектрическая пластина ( $Y-X \text{ LiNbO}_3$ ), 2 – ВШП, 3 – держатель из оргстекла, 4 – пластина с проводящей пленкой, 5 – опорные образцы кремния.

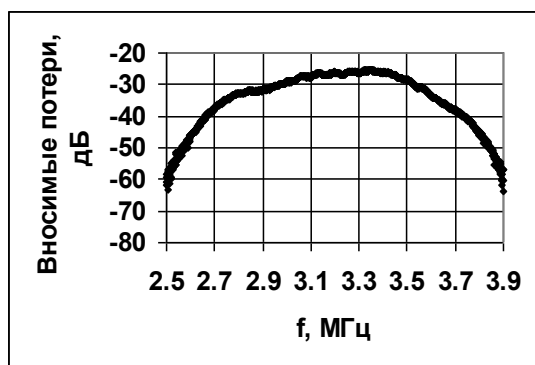
Для проведения экспериментальных исследований влияния проводимости тонкой пленки, расположенной с некоторым зазором над линией задержки, на ее характеристики была использована установка, представленная на рис. 2. Установка состояла из измерителя S-параметров E5071C («Agilent», США), линии задержки на основе пластины ниобата лития, соединительных проводов и подъемного микрометрического устройства с закрепленной стеклянной пластиной с нанесенной проводящей пленкой.



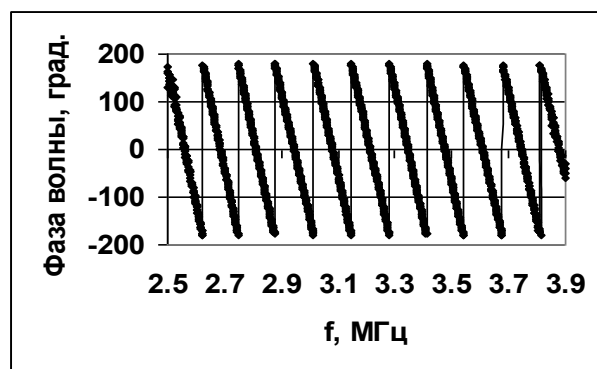
Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки.

Исследуемая линия задержки подключалась к измерителю S-параметров E5071C («Agilent», США) в режиме измерения параметра  $S_{12}$ . Вначале были измерены частотные зависимости полных потерь и фазы для линии задержки в отсутствие проводящей пленки. Данные зависимости представлены на рисунках 3а, и 3б, соответственно. Видно, что полные потери линии задержки не превышают 26 дБ, а фаза является линейной.

Затем над линией задержки с определенным воздушным зазором помещалась стеклянная пластина с нанесенной на нее проводящей пленкой, и проводились измерения частотных зависимостей полных потерь и фазы выходного сигнала линии задержки в присутствии проводящей пленки. Величина воздушного зазора менялась от 0 до 300 мкм с шагом 10 – 20 мкм.



а



б

Рис. 3. Частотные зависимости вносимых потерь (а) и фазы (б) выходного сигнала акустической линии задержки на основе пластины Y-X LiNbO<sub>3</sub>.

Точность зазора обеспечивалась с помощью описанного выше микрометрического устройства. Использовались пленки диоксида олова со следующими значениями поверхностной проводимости: 0.0072; 1.48; 46.1; 550 и 87000 мкСм. Исследовались также стеклянная подложка без проводящей пленки и стеклянная подложка с пленкой алюминия, то есть исследовались пленки с «нулевой» и «бесконечно большой» проводимостью.

В результате были получены частотные зависимости фазы линии задержки от величины зазора между поверхностью линии задержки и стеклянной пластиной с нанесенной пленкой с заданной проводимостью. Данные зависимости имели такой же вид, что и частотная зависимость фазы, представленная на рис. 3б.

На основе полученных частотных зависимостей были построены зависимости изменения фазы выходного сигнала линии задержки на частоте 3.25 МГц (частота минимальных потерь), а также зависимости относительного изменения скорости  $SH_0$  волны в пластине ниобата лития, от величины зазора при различных значениях проводимости пленок. Зависимости относительного изменения скорости ( $\Delta V/V$ ) от ширины зазора, нормированные к нулю при ширине зазора 300 мкм, приведены на рисунке 4.

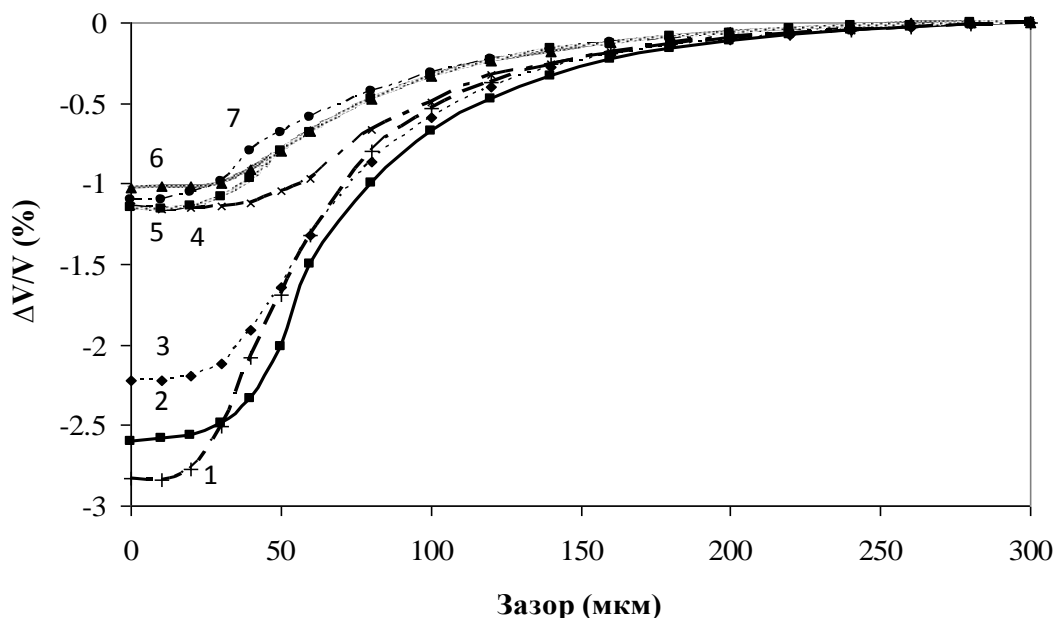


Рис. 3. Зависимости относительного изменения скорости ( $\Delta V/V$ ) от ширины зазора между пленкой и поверхностью линии задержки при следующих значениях проводимости пленок: (1) – 900000, (2) – 550, (3) – 87000, (4) – 46.1, (5) – 0,0001, (6) – 0,072, (7) – 1.48 мкСм.

Из рисунка видно, что относительное изменение скорости ( $\Delta V/V$ ) зависит как от ширины зазора между поверхностью линии задержки и пластины с проводящей пленкой, так и от проводимости пленки. Рисунок показывает, что с ростом ширины зазора скорость увеличивается и достигает насыщения в интервале 250 – 300 мкм для всех исследуемых пленок. Также видно, что изменение скорости с ростом ширины зазора тем сильнее, чем выше проводимость пленки. Наибольшее изменение скорости наблюдается при значениях проводимости пленок 550, 87000 и 900000 мкСм (кривые 1 – 3 на рис. 3) и достигает 2 – 2.7%. Для всех значений проводимости пленок наибольшее изменение скорости акустической волны происходит в диапазоне значений ширины зазора 10 – 100 мкм.

Полученные результаты можно объяснить с физической точки зрения следующим образом. Известно, что пьезоактивная акустическая волна, распространяющаяся в пьезоэлектрической пластине, сопровождается электрическим полем, проникающим в вакуум. Очевидно, что наибольшее влияние на скорость акустической волны будет оказывать проводящая



пленка, находящаяся вблизи линии задержки с нулевым зазором, которая шунтирует электрическое поле в вакууме. Это шунтирование приводит к уменьшению скорости акустической волны. При удалении проводящей пленки степень шунтирования будет уменьшаться и на некотором расстоянии проводимость этой пленки никак перестанет влиять на характеристики акустической волны. Указанное расстояние соответствует глубине проникновения электрического поля волны в вакуум и равно  $\sim 300$  мкм.

Проведенные экспериментальные исследования влияния пленок с различной проводимостью на характеристики линии задержки на основе пластины Y-X ниобата лития позволили также построить зависимости фазы выходного сигнала линии задержки и относительного изменения скорости  $SH_0$  волны в пластине ниобата лития от проводимости пленки при различных зазорах между линией задержки и пластиной с проводящей пленкой. Зависимости относительного изменения скорости  $(\Delta V/V)$   $SH_0$  волны в пластине ниобата лития от проводимости пленки при различной ширине зазора приведены на рисунке 5.

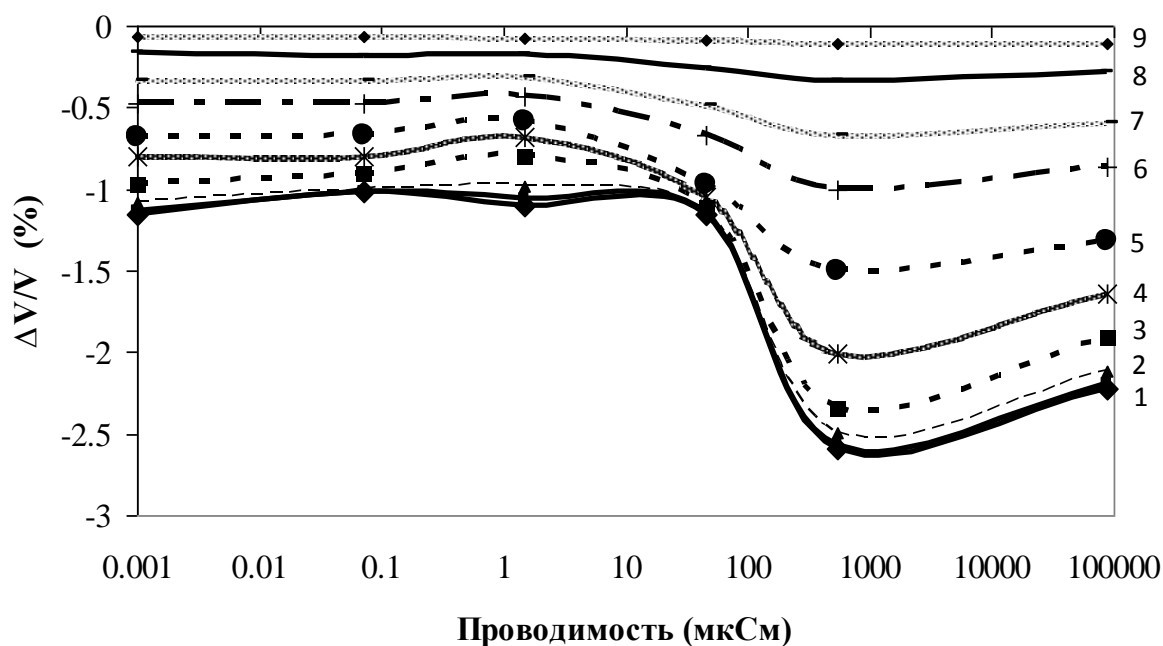


Рис. 3.6. Экспериментальные зависимости относительного изменения скорости  $SH_0$  волны в пластине ниобата лития от проводимости пленки для

следующих значений ширины зазора: (1) - 10 мкм, (2) - 20 мкм, (3) - 30 мкм, (4) - 40 мкм, (5) - 50 мкм, (6) - 60 мкм, (7) - 80 мкм, (8) - 100 мкм, (9) - 200 мкм.

Из рисунка видно, что с ростом проводимости пленки скорость акустической  $SH_0$  волны вначале практически не меняется, затем в интервале 10 – 1000 мкСм резко уменьшается и далее незначительно возрастает. При этом, с уменьшением ширины зазора между линией задержки и проводящей пленкой степень изменения скорости  $SH_0$  волны увеличивается во всем диапазоне проводимости пленки. Наиболее значительные изменения скорости волны наблюдаются для значений ширины зазора в диапазоне 10 - 100 мкм. При удалении проводящей пленки на расстояние, большее, чем 200 мкм скорость акустической волны практически перестает изменяться.

Такую зависимость можно объяснить с физической точки зрения следующим образом. При малых значениях проводимости степень шунтирования электрического поля акустической волны незначительна и скорость волны является максимальной. При больших значениях проводимости электрическое поле акустической волны полностью шунтируется и ее скорость имеет минимальное значение. Очевидно, что при переходе от малых значений проводимости к более высоким, существует некоторый переход, который соответствует частоте максвелловской релаксации  $f_M = \sigma_s / \epsilon_{eff}$ , где  $\sigma_s$  – поверхностная проводимость пленки,  $\epsilon_{eff}$  – диэлектрическая проницаемость. При  $f = f_M$  ( $f$  – частота волны) возникает резонансное взаимодействие между волной и проводящей пленкой.

Проведенное сравнение полученных экспериментальных результатов с данными теоретического анализа показало их хорошее соответствие. Максимальное изменение скорости  $SH_0$  волны в теории и эксперименте составило 4.7% и 2.7%, соответственно. По-видимому, указанные расхождения теории и эксперимента связаны с тем, что в эксперименте не удалось обеспечить плоскопараллельность зазора между линией задержки и

пластиной с проводящей пленкой. Кроме того, исследуемые пленки были неоднородными в поперечных направлениях.

Таким образом, в результате выполнения работы были получены следующие основные результаты:

Сделан литературный обзор по акустическим волнам, распространяющимся в пьезоэлектрических пластинах, и влиянию электрических граничных условий на их свойства.

Была освоена методика измерения фазы и полных потерь выходного сигнала линии задержки на основе пластины ниобата лития с распространяющейся волной с поперечно-горизонтальной поляризацией нулевого порядка ( $SH_0$ ) при помощи измерителя S-параметров E5071C.

Было проведено экспериментальное исследование влияния проводимости пленки и воздушного зазора между поверхностью линии задержки и пластиной с проводящей пленкой на фазу выходного сигнала линии задержки с распространяющейся акустической волной с поперечно-горизонтальной поляризацией

Были получены частотные зависимости фазы выходного сигнала линии задержки от величины зазора между поверхностью линии задержки и стеклянной пластиной с нанесенной пленкой с заданной проводимостью. На основе полученных частотных зависимостей были построены зависимости изменения фазы на частоте 3.25 МГц (частота минимальных потерь) линии задержки от величины зазора при различных значениях проводимости пленок.

Были построены зависимости относительного изменения скорости ( $\Delta V/V$ ) акустической  $SH_0$  волны в пластине ниобата лития от ширины зазора между поверхностью линии задержки и пластиной с проводящей пленкой при различной проводимости пленки.

Показано, что относительное изменение скорости  $SH_0$  волны зависит как от ширины зазора между поверхностью линии задержки и пластиной с проводящей пленкой, так и от проводимости пленки. Показано, что с ростом

ширины зазора скорость увеличивается и достигает насыщения в интервале 250 – 300 мкм для всех исследуемых пленок. Изменение скорости с ростом ширины зазора тем сильнее, чем выше проводимость пленки.

Были получены частотные зависимости фазы выходного сигнала линии задержки от проводимости пленки при различных зазорах между линией задержки и пластиной с проводящей пленкой.

Были построены зависимости относительного изменения скорости  $SH_0$  волны в пластине ниобата лития от проводимости пленки при различной ширине зазора между поверхностью линии задержки и пластиной с проводящей пленкой.

Показано, что с ростом проводимости пленки скорость акустической  $SH_0$  волны вначале практически не меняется, затем резко уменьшается и далее незначительно возрастает. При этом, с уменьшением ширины зазора между линией задержки и проводящей пленкой, степень изменения скорости  $SH_0$  волны увеличивается во всем диапазоне проводимости пленки. Наиболее значительные изменения скорости волны наблюдаются для значений ширины зазора в диапазоне 10 - 100 мкм. При удалении проводящей пленки на расстояние, большее, чем 200 мкм скорость акустической волны практически перестает изменяться.

Проведено сравнение экспериментальных и теоретических данных. Получено их хорошее соответствие.

## Список используемой литературы

1. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966.
- 2 Lamb H. On waves in an elastic plate // Proc. Roy. Soc. London A, 1917, v.93, p.14
3. Joshi S.G., Jin Y. Propagation of ultrasonic Lamb waves in piezoelectric plates // J. Appl. Phys. 1991. V.70. N.8. P.4113-4120.
4. Joshi S.G., Jin Y. Electromechanical coupling of ultrasonic Lamb waves// J. Acoust. Soc. Am., 1993, v.94, no.1, pp. 261-267.
5. Jin Y. and Joshi S.G. Lamb wave propagating in  $128^{\circ}$  - Y-X lithium niobate plates // IEEE Int. Ultrason. Symp., 1993, P.847-851.
6. Jin Y. and Joshi S.G. Characteristics of ultrasonic Lamb waves in  $128^{\circ}$  rotated Y-cut lithium niobate // IEEE Trans. on Ultras., Ferroel. and Freq. Contr., 1994, v. 41, №2, pp.279-283.
7. Jin Y., Joshi S.G. Propagation of quasi- shear- horizontal acoustic wave in Z-X lithium niobate plates // IEEE Trans. on Ultras., Ferroel., and Freq. Contr., 1996, v.43, pp. 491-494.
8. Joshi S.G., Jin Y. Characteristics and application of quasi-shear-horizontal acoustic waves // Ultrasonics, 1996, v.34, pp.507-509.
9. Sun Z., Mao Y., Jiang W., Zhang D. Influence of electrical boundary conditions on Lamb wave propagation in piezoelectric plates // IEEE Int. Ultrason. Symp., 1998, pp. 435-438.
10. Adler E.L. Electromechanical coupling to Lamb and shear- horizontal modes in piezoelectric plates// IEEE Trans. on Ultras., Ferroel., and Freq. Control.1989. V.36. N.2. P.223-231.
11. Teston F., Feuillard G., Certon D., Janin Y., Tessier L., Lethiecq M. Characteristics of Lamb waves in piezoelectric ceramics // IEEE Int. Ultrason. Symp., 1997, pp. 363-366.

12. Motegi K., Toda K. Lamb wave propagation characteristics in piezoelectric ceramic plate with spatially varying thickness // IEEE Int. Ultras. Symp., 1999, pp. 573-576.
13. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М. 1957. гл.1.
14. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. Пер. с англ. М. 1955. Ч.1. гл.3.
15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. 3 изд. М. 1968. гл. 1-3 (Теоретическая физика. Т.7)
16. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Anisimkin V.I., Teplykh A.A., Shikhabudinov A.M., Kolesov V.V., Yakunin V.G. Noncontact Determination of Thin Films Conductance by the  $SH_0$  Plate Acoustic Waves // JAP, 2014, v.115, #4, 044504 DOI:10.1063/1.4862807.]
17. Wagers R.S. Spurious acoustic responses in SAW devices // Proc. of the IEEE, 1976, vol.64, no.5, pp.699-702.
18. Wagers R.S. Plate modes in surface acoustic wave devices. In *Physical Acoustics*, Ed. Mason W.P. and Thurston R.N. New York: Academic Press, 1977. vol. 13.
19. Григорьевский В.И., Козлов А.И., Плесский В.П., Терешков В.П. Расчет дисперсионных кривых мод Лэмба в пластинах ниобата лития YZ-среза // Акуст. журн., 1985, т. 31, №1, с.42-44.
20. Кучеров И.Я., Островский И.В. Нормальные волны в пластинках кристаллов симметрии  $C_{6v}$  // Укр. Физич. Журн., 1970, т.15, №7, с.1155-1163.
21. Кучеров И.Я., Островский И.В. Возбуждение волн Лэмба в монокристаллах CdS // ФТТ, 1968, т.10, №9, с. 2814-2815.
22. Кучеров И.Я., Островский И.В. Возбуждение поперечных волн в пластинках CdS и влияние проводимости на их затухание// Укр. Физич. Журн., 1971, т.16, №.2, с.209-213.
23. Бурлий П.В., Кучеров И.Я., Омеляненко М.Ю., Островский И.В. Исследование влияния проводимости на скорость распространения волн Лэмба в CdS// Укр. Физич. Журн., 1975, т.20, №2, с.327-329.

24. Toda K. Lamb wave delay lines with interdigital electrodes // J. Appl. Phys., 1973, v.44, no.1, pp.56-62.
25. Toda K. Frequency characteristics of an interdigital transducer for Lamb wave excitation // J. Appl. Phys., 1974, v.45, pp. 5136-5140.
26. Toda K. Lamb wave in a thin piezoelectric ceramic plate under the influence of static tensile stress // J. Appl. Phys., 1975, v.46, pp.5114-5115.
27. Toda K., Shinoda Y. Unidirectional transducer for Lamb wave delay line // Electron. Letters, 1977, v.13, no.12, pp.363-364.
28. Toda K., Mizutani K. A Lamb wave voltage sensor // J. Acoust. Soc. Am., 1983, v.74, no.3, pp.677-679.
29. Mizutani K. and Toda K. Analysis of Lamb wave propagation characteristics in rotated Y- cut X- propagation LiNbO<sub>3</sub> plates // Electron. and Communic. in Japan. 1986. pt. 1. V. 69. N.4. P.47-55.
30. Grandia W.A., Fortunko C.M. NDE application of aircoupled ultrasonic transducers // Proceed. of IEEE Ultras. Symp., 1994, pp.697-709.
31. Degeterkin F.L., Atalar A., Khuri-Yakub B.T. Micromachinable leak wave air transducers // Proceed. of IEEE Ultras. Symp., 1997, pp.975-978.
31. Degeterkin F.L., Atalar A., Khuri-Yakub B.T. Micromachinable leak wave air transducers // Proceed. of IEEE Ultras. Symp., 1997, pp.975-978.
32. Joshi S.G., Jin Y. Propagation of ultrasonic Lamb waves in piezoelectric plates // J. Appl. Phys. 1991. V.70. N.8. P.4113-4120.
33. Joshi S.G., Jin Y. Electromechanical coupling of ultrasonic Lamb waves// J. Acoust. Soc. Am., 1993, v.94, no.1, pp. 261-267.
34. Jin Y. and Joshi S.G. Lamb wave propagating in 128<sup>0</sup> - Y-X lithium niobate plates // IEEE Int. Ultrason. Symp., 1993, P.847-851.

35. Jin Y. and Joshi S.G. Characteristics of ultrasonic Lamb waves in  $128^{\circ}$  rotated Y-cut lithium niobate // IEEE Trans. on Ultras., Ferroel. and Freq. Contr., 1994, v. 41, №2, pp.279-283.
36. Jin Y., Joshi S.G. Propagation of quasi- shear- horizontal acoustic wave in Z-X lithium niobate plates // IEEE Trans. on Ultras., Ferroel., and Freq. Contr., 1996, v.43, pp. 491-494.
37. Joshi S.G., Jin Y. Characteristics and application of quasi-shear-horizontal acoustic waves // Ultrasonics, 1996, v.34, pp.507-509.
38. Sun Z., Mao Y., Jiang W., Zhang D. Influence of electrical boundary conditions on Lamb wave propagation in piezoelectric plates // IEEE Int. Ultrason. Symp., 1998, pp. 435-438.
39. Adler E.L. Electromechanical coupling to Lamb and shear- horizontal modes in piezoelectric plates// IEEE Trans. on Ultras., Ferroel., and Freq. Control.1989. V.36. N.2. P.223-231.
40. Teston F., Feuillard G., Certon D., Janin Y., Tessier L., Lethiecq M. Characteristics of Lamb waves in piezoelectric ceramics // IEEE Int. Ultrason. Symp., 1997, pp. 363-366.
41. Motegi K., Toda K. Lamb wave propagation characteristics in piezoelectric ceramic plate with spatially varying thickness // IEEE Int. Ultras. Symp., 1999, pp. 573-576.
42. Zgonik M., Schlessler R., Biaggio I., Tscherry J., Gunter P., Voit E. Materials constants of  $\text{KNbO}_3$  relevant for electro- and acousto-optics // J. Appl. Phys., 1993, v.74, N2, pp.1287-1297.
43. Nakamura K., Oshiki M. Theoretical analysis of horizontal shear mode piezoelectric surface acoustic waves in potassium niobate // Appl. Phys. Lett., 1997, v.71, pp.3203-3205.
44. Odagawa H., Matsumura T., Yamanouchi K. Super high electromechanical coupling and zero-temperature characteristics of  $\text{KNbO}_3$  and its applications for low loss wide band filters // IEEE Int. Ultras. Symp., 1997, pp.235-238.



45. Yamanouchi K., Odagawa H., Kojima T., Matsumura T. Theoretical and experimental study of super high electromechanical coupling surface acoustic wave propagation in  $\text{KNbO}_3$  single crystal // *Electron. Lett.*, 1997, v.33, no.3, pp. 193-194.
46. Nakamura K., Oshiki M., Kitazume H. SH-mode SAW and its acousto-optic interaction in  $\text{KNbO}_3$  // *IEEE Int. Ultras. Symp.*, 1998, pp.1305-1308.
47. Yamanouchi K., Odagawa H. Super high electromechanical coupling and zero temperature coefficient surface acoustic wave substrates in  $\text{KNbO}_3$  single crystal // *IEEE Trans. on Ultras., Ferroel. and Freq. Contr.*, 1999, v.46, no.3, pp.700-705.
48. Yamanouchi K., Odagawa H. Theoretical and experimental study of surface acoustic wave substrates with super high coupling // *IEEE Int. Ultras. Symp.*, 2000, pp.337-340.
49. Slobodnik A.J., Conway J.R. and E.D. Microwave acoustic handbook. V.1A. Surface wave velocities. Air Force Systems Command, USAF. 1973.
50. Бородина И.А., Джоши С.Г., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е. Акустические волны в твердых телах, часть 2 (учеб.пособие). Изд-во СГУ: Саратов, 2000. С.32.
51. Zaitsev B.D., Joshi S.G., Kuznetsova I.E. Investigation of quasi-shear-horizontal acoustic waves in thin plates of lithium niobate // *Smart Material & Structures*, 1997, v.6, pp.739-744.
52. Бородина И.А., Джоши С.Г., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е. Акустические волны в тонких пластинах ниобата лития // *Акуст. Журн.*, 2000, т.46, N1, с.42-46.
53. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D. Joshi S.G. Borodina I.A. Investigation of acoustic waves in thin plates of lithium niobate and lithium tantalite // *IEEE Trans. on Ultras., Ferroel. and Freq. Contr.*, 2001, v.48, no.1, pp.322-328.
54. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D. Joshi S.G. Borodina I.A. Acoustic plate waves in potassium niobate single crystal // *Electronic Letters*, 1998, v.34, no.23, pp.2280-2281.

55. Кузнецова И.Е., Можяев В.Г., Недоспасов И.А. Чисто сдвиговые обратные волны в пьезоэлектрических пластинах ниобата калия X- и Y-срезов // Радиотехника и электроника, 2016, т.61, №11, с.1122-1131.
- 56 188. Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Joshi S.G., Borodina I.A. Superhigh electromechanical coupling for acoustic plate waves in potassium niobate // Proc. of IEEE Int. Ultrasonic Symp., 1999, pp. 291-294.
57. Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Borodina I.A., Joshi S.G. Characteristics of acoustic
58. [Исследование коэффициента электромеханической связи акустических волн в тонких пластинах ниобата калия. С.Д. Джоши, Б. Д. Зайцев, И.Е. Кузнецова, И.А. Бородина, // Письма в ЖТФ 1999 г. том 25, вып.8 26 апреля;
59. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D. Joshi S.G. Borodina I.A. Acoustic plate waves in potassium niobate single crystal // Electronic Letters, 1998, v.34, no.23, pp.2280-2281.
59. С.Д. Джоши, Б. Д. Зайцев, И.Е. Кузнецова SH акустические волны в пластине ниобата лития и влияние электрических граничных условий на их свойства // Акустический журнал, 2001, т. 47, №3, с.336-340.
60. Кузнецова И.Е., Зайцев Б.Д., Бородина И.А., Попов В.В. Влияние тонкого проводящего поверхностного слоя на свойства квазипоперечных сдвиговых волн и волн Лэмба в пластинах арсенида галлия // Письма в ЖТФ. 1999. Т.25. N3. С.38-43
62. Zaitsev B.D., Joshi S.G., Propagation of QSH (quasi shear horizontal) acoustic waves in piezoelectric plates // IEEE Trans. on Ultras., Ferroel. and Freq. Control, 1999, v.46, no. 5. pp. 1298-1302.
63. Гуляев Ю.В., Кузнецова И.Е., Зайцев Б.Д., Джоши С.Г., Бородина И.А. Влияние тонкого слоя с произвольной проводимостью на характеристики акустических волн в ниобате калия // Письма в ЖТФ. 1999. Т.25.В.8.С.21-26.

64. Кузнецова И.Е., Джоши С.Г., Зайцев Б.Д. SH акустические волны в пластинах ниобата лития и влияние электрических граничных условий на их свойства // Акуст. Журн., 2001, т.47, №3, с.336-340.
65. Zaitsev B.D., Joshi S.G., Kuznetsova I.E., Borodina I.A. Influence of conducting layer and conducting electrode on acoustic waves propagating in potassium niobate plates // IEEE Trans. on Ultras., Ferroel. and Freq. Contr., 2001, v.48, no.2. pp.624-626.
66. D. Royer, E. Dieulesaint Elastic waves in solids, Springer-Verlag, Berlin, 2000, P. 374.