

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

Кафедра физики твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

По специальности 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»

Студента(ки) 4 курса факультета нано- и биомедицинских технологий

Горбунова Алёна Вячеславовна

«Адаптация технологии создания печатных электродных структур для  
формирования акустоэлектронных приборов»

Научный руководитель

Ассистент

должность, уч. степень, уч. звание

А.В. Смирнов

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

Заслуженный деятель науки РФ,  
профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

Д.А. Усанов

инициалы, фамилия

Саратов 2018

## **Введение**

Общемировой тенденцией с 2014 года является переход к печатной электронике и попыткам использования для создания электронных устройств гибких подложек с целью улучшения их эксплуатационных характеристик и расширения функциональных возможностей [1]. Это связано с многообразием возможных применений таких технологий, например, в гибких дисплеях, солнечных ячейках, при создании электронной бумаги и листовых датчиков [2-4]. Технология струйной печати дает возможность создания высокопроизводительных и простых тонкопленочных солнечных батарей, а также применяется для печати радиочастотных идентификационных меток, компонентов сенсоров, антенн и аккумуляторов [5-7]. Если рассматривать применение технологии струйной печати в области акустических приборов, то обзор литературы показал, что в настоящее время основной упор делается на создание электродов для акустоэлектронных устройств резонаторного типа. Что касается возможности создания встречно-штыревых преобразователей (ВШП) для реализации акустоэлектронных устройств на волнах в пластинах, то подобные работы отсутствуют, что говорит о новизне и практической значимости данного направления исследований. Следует отметить, что поскольку пластинчатые волны имеют низкую рабочую частоту – до 10 МГц, то ширина штырей и зазоры между ними в ВШП будет составлять величину десятые доли миллиметра. В этом случае возможно использование гибких пьезоэлектриков типа PVDF, что приведет к созданию акустоэлектронных устройств с расширенной функциональностью, повышенной прочностью и более высокой производительностью. Очевидно, что переход к разработке технологии создания вышеуказанных акустоэлектронных устройств на основе гибких пьезоэлектриков необходимо предварить исследованиями по созданию этих устройств на традиционных пьезоэлектриках (ниобат лития). В связи с вышесказанным, актуальной задачей является исследование возможности

адаптации технологии струйной печати для формирования акустоэлектронных приборов.

Целью работы является исследование возможности адаптации технологии струйной печати для создания акустоэлектронных устройств на пластинчатых волнах.

Объект исследования: Технология формирования электродных структур методом струйной печати.

Предмет исследования: Печатные электродные структуры.

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ литературных данных по исследуемой проблеме;
2. Изучить технологию получения серебряных проводящих чернил;
3. Изучить технологию струйной печати;
4. Исследовать смачиваемость различных типов подложек проводящими чернилами на основе серебра;
5. Изучить влияние температуры спекания образцов на морфологию печатных структур - методами растровой электронной и атомно-силовой микроскопии;
6. Изучить влияние температуры спекания на электрофизические свойства полученных структур;
7. Методом струйной печати сформировать на поверхности пьезоэлектрической подложки акустическую линию задержки и проверить возможность возбуждения объёмных акустических волн;
8. С помощью метода конечных элементов провести моделирование линии задержки и сравнить полученные данные с экспериментальными результатами.

Бакалаврская работа содержит 3 главы:

1. Печатные электродные структур
2. Методика эксперимента и образцы
3. Результаты эксперимента и обсуждение

## **1. Печатные электродные структуры.**

Процесс печати может проводиться при комнатной температуре, при этом потенциально пригоден для производства электронных компонент большой площади [8]. Можно рассматривать InkPrint технологию как замену литографическим методам, широко используемых в кремниевой электронике, которые в процессе производства требуют проведения большого количества технологических процессов и является весьма дорогостоящей технологией.

Если сравнивать струйную печать с традиционной полупроводниковой технологией вакуумного осаждения из газовой фазы, то можно выделить несколько преимуществ. Во-первых, внедрение таких технологий позволит существенно сократить затраты на технологическое оборудование, так как струйная печать не требует использования высоковакуумного оборудования и предоставляет возможность формирования многослойных полупроводниковых элементов в одном технологическом цикле, причём без необходимости использования масок и специальных условий. Во-вторых, в связи с широким распространением методов струйной печати технология может легко масштабироваться на промышленное производство. В-третьих, струйная печать - аддитивная технология, что позволяет более эффективно использовать дорогостоящие материалы, применяемые в производстве электронных устройств. В-четвёртых процесс нанесения печатных структур не требует использования масок, что существенно сокращает время формирования печатных структур в сравнении с литографическими методами. Также струйная печать менее ограничена с точки зрения сочетания морфологии подложки и осаждаемого вещества и может сочетать большее количество слоев и типов материалов, в сравнении с литографией. В-четвертых, стоит отметить, что струйная печать приносит существенно меньший в сравнении с традиционными технологиями вред окружающей среде.

**2. Методика эксперимента и образцы.** В ходе работы над выпускной квалификационной работой создавались чернила на основе наночастиц

серебра. Наночастицы металла получали путем восстановления серебра из нитрата и ацетата серебра борогидридом натрия, стабилизация наночастиц обеспечивалась избытком цитрата натрия.

Электродные структуры формировались методом струйной печати, с использованием принтера Dimatix DMP-2831 (Fujifilm USA). Для изучения возможности возбуждения объёмных акустических волн на поверхности подложек ниобата лития формировались линии задержки(ЛЗ) с параметрами встречно штыревых преобразователей, рассчитанных для кристаллов ориентации рисунок 1 YX(a) и  $40^\circ+YX$  (б).

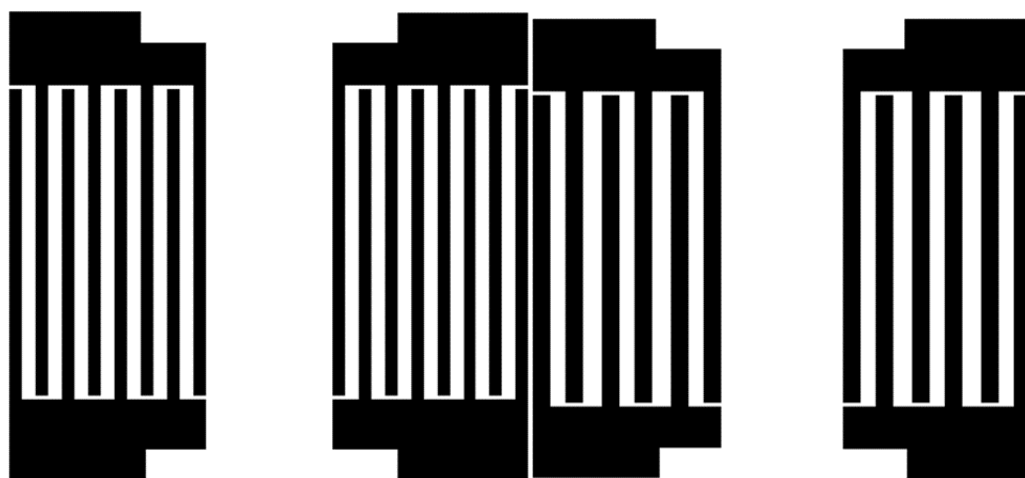


Рисунок 1 Шаблоны линий задержек для кристалла ниобата лития ориентации YX(слева) и  $40^\circ+YX$  (справа)

В случае кристалла  $LiNbO_3$  YX ориентации (базовый срез), ВШП был ориентирован в направлении оси X и под углом в  $40^\circ$  к X в плоскости XZ в случае кристалла  $LiNbO_3$   $40^\circ+YX$  ориентации. Во втором случае формировались ВШП с переменным периодом, расстояние между электродами чередовались а-б-а-б-а(см. таблицу). Апертура электродов, в обоих случаях составляла 7.5 мм.

Морфология образцов печатных электродных структур, полученных при различных температурах спекания, изучалась при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ) Mira II (Tescan, Czech Republic). Исследование морфологии поверхности образцов также осуществлялось с

помощью зондовой нанолaborатории Ntegra Spectra (NT-MDT, Россия) методом атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Контактный угол смачивания поверхности различных типов подложек измерялся методом сидящей капли с использованием оптического тензиометра ThetaLite (BiolinScientific, Финляндия) путем записи боковых профилей капли серебряных чернил.

Измерение электрофизических свойств печатных электродных структур проводилось при помощи прибора Agilent B1500A в комплексе с зондовой станцией РМ-5 (CascadeMicrotech).

После печати и отжига линий задержек к контактными площадкам приклеивались золотые проволочки диаметром 25 мкм и длиной 30 мм с помощью проводящего клея «SilverPrint». Указанная пластина фиксировалась и подключалась к анализатору четырёхполюсников E 5061 B (Keysight). После чего на ВШП подавалось переменное напряжение 300 мВ.

Одним из наиболее эффективных методов численного моделирования сложных физических задач является метод конечных элементов. Поэтому для математического моделирования экспериментальной ситуации использовался программный пакет Comsol Multiphysics 5.2 (*Автор выражает благодарность Сучкову С.Г. (СГУ им. Н.Г. Чернышевского) и Янкину С.С. (российский офис Comsol). За консультации и помощь в проведении эксперимента по моделированию в программном пакете Comsol Multiphysics ®.*

### **3. Результаты эксперимента и обсуждение.**

После формирования печатных электродных структур методом струйной печати они подвергались термической обработке – отжигу, при температурах 100-500°C с шагом 50°C. Как известно, температура плавления материала наночастиц существенно зависит от их размера, что связано с уменьшением энергии образования вакансий и соответственно увеличением их концентрации при уменьшении размера наночастиц [9]. В случае серебра температура плавления объемного материала составляет 961,8°C, и

уменьшается до  $\sim 500^{\circ}\text{C}$  при уменьшении размеров частиц до значений  $\sim 50$  нм и меньше [10]. Поэтому, для частиц со средним размером 10 нм, можно прогнозировать ещё большее уменьшение температуры плавления. На рисунке 2 представлено РЭМ изображения поверхности печатных электродных структур, полученных при разных температурах спекания  $100$ - $500^{\circ}\text{C}$  с шагом в  $100^{\circ}\text{C}$ .

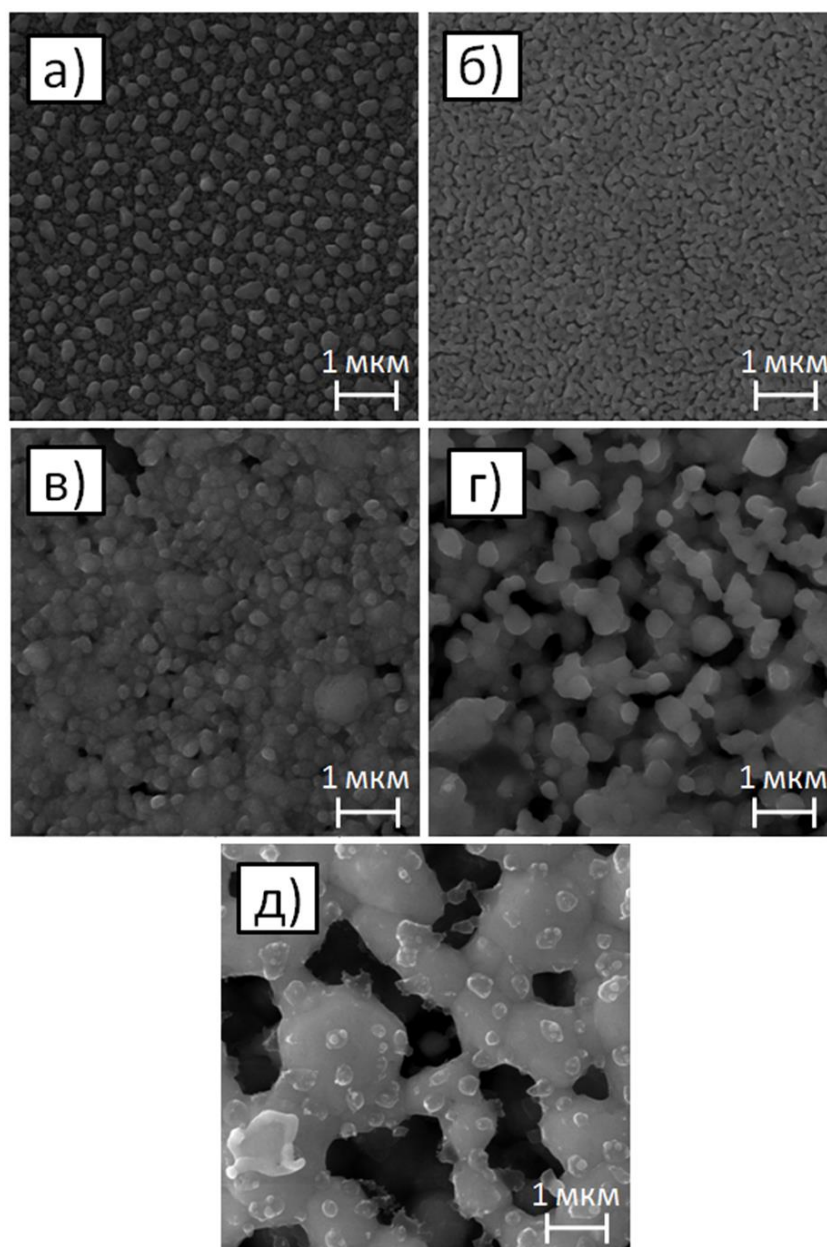


Рисунок 2 РЭМ изображение поверхности печатных электродных структур полученных при различных температурах спекания:  $100$ -(а),  $200$ -(б),  $300$ -(в),  $400$ -(г),  $500^{\circ}\text{C}$ -(д)

Из микрофотографий видно, что увеличение температуры спекания со 100 до 200°C позволяет удалить из печатной структуры остатки органического растворителя, о чём можно сделать вывод по увеличению контраста изображения на РЭМ изображении. При дальнейшем увеличении температуры спекания до 300 °С наблюдалось спекание наночастиц в укрупнённые кластеры и дальнейшее увеличение их размеров при 400°C с последующим образованием сплошной структуры при 500°C. Толщину печатных структур и исследование структуры объёма электродной структуры изучали микрофотографиям сколов образцов. Толщина составляла в среднем 4 мкм для всех образцов.

При измерении вольтамперных характеристик зонды позиционировались по центру печатных дорожек, расстояние между зондами 10 мм. Полученные ВАХи представлены на рисунке 3. Из графиков видно, что ВАХи имеют линейный характер, что соответствует самому простому примеру двухполюсника - резистору. Также можно видеть, что при увеличении температуры спекания угол наклона линейной части ограниченной током отсечки, увеличивается и, следовательно, сопротивление уменьшается.

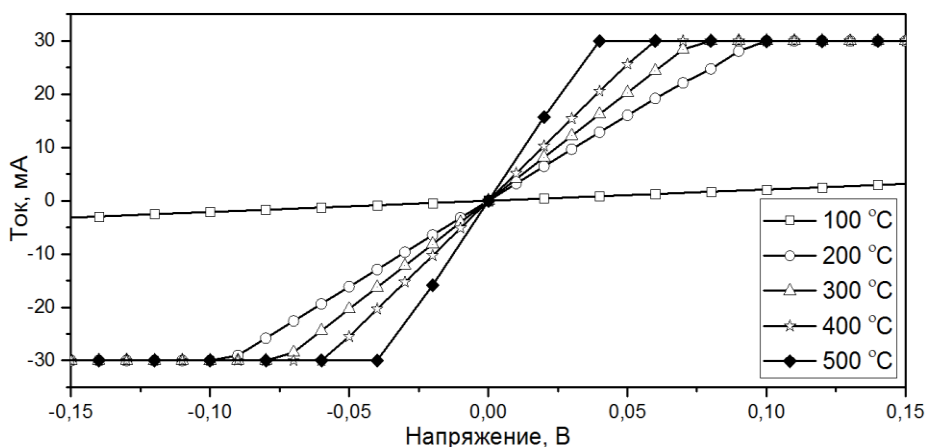


Рисунок 3 Вольтамперные характеристики печатных структур полученных при различных температурах спекания

Возбуждение объёмных акустических волн с помощью печатной линии задержки. На рисунке 4 и 5 представлен график частотной зависимости S



параметров. Из графика видно, что после подачи напряжения на ВШП в пьезоэлектрике возбуждаются пластинчатые волны. Большое количество резонансных пиков, вероятно, связано с переотражением от границ пластины.

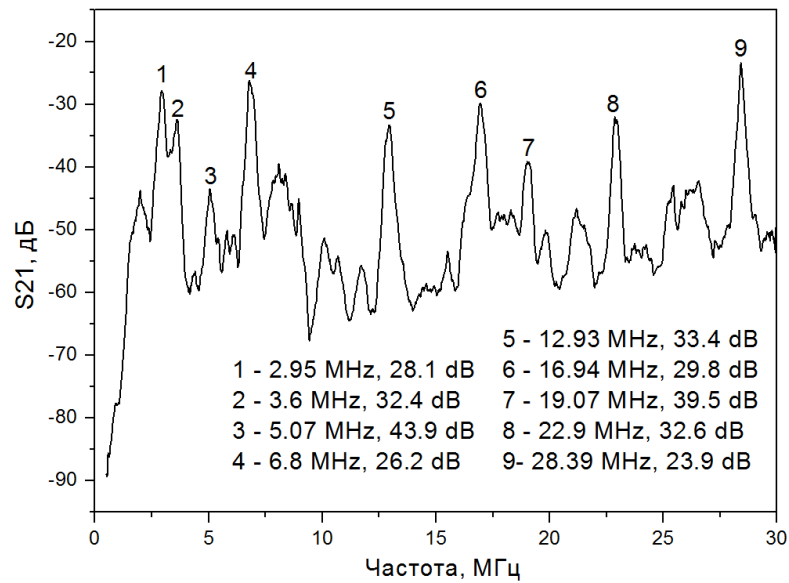


Рисунок 4 Частотная зависимость S параметров ВШП для ЛЗ, сформированной на пластине ниобата лития YX

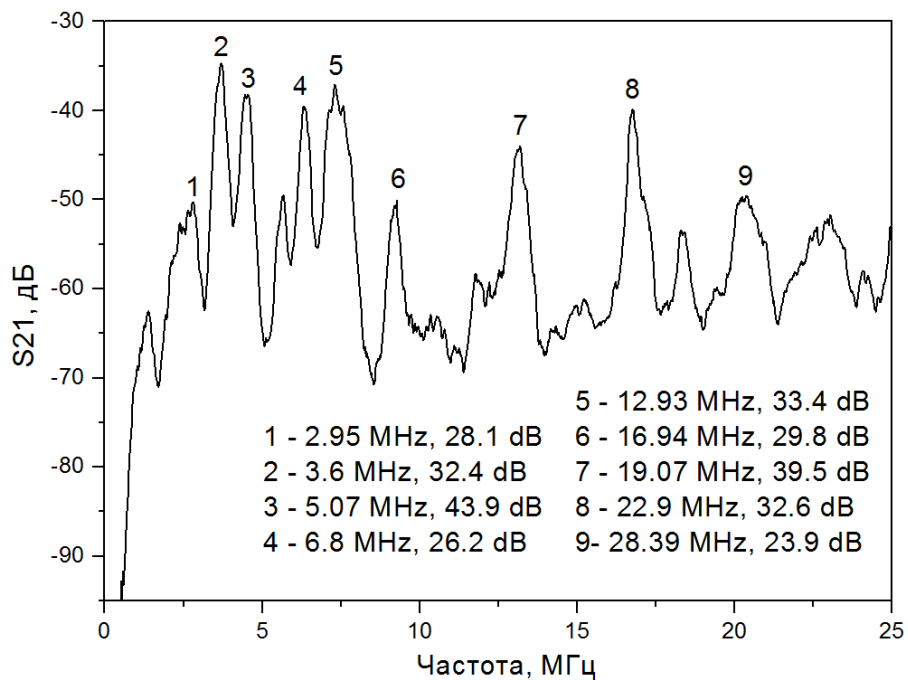


Рисунок 5 Частотная зависимость S параметров ВШП для ЛЗ сформированной на пластине ниобата лития 40+YX

Численное моделирование и сравнение с экспериментальными результатами Геометрия исследуемой линии задержки и использованная при моделировании сетка приведены на рисунке 6. В области пластины, свободной

от ВШП, используются механические граничные условия, соответствующие свободным границам, т.е. механические напряжения равны 0. В области контакта штырей ВШП с пластиной в качестве механических граничных условий используется непрерывность смещений и механических напряжений между штырем и пластиной. Возбуждение акустической волны моделируется путем использования периодического изменения электрического потенциала в области штырей ВШП. На один штырь подается напряжение, а следующий – закорачивается- Рисунок 6(а). При составлении модели была сгенерирована ручная сетка в виде прямоугольников, а область под электродами была разбита на более мелкие элементы. При моделировании использовалась сетка с линейным размером элемента равным  $\lambda/50$  -Рисунок 6(б).

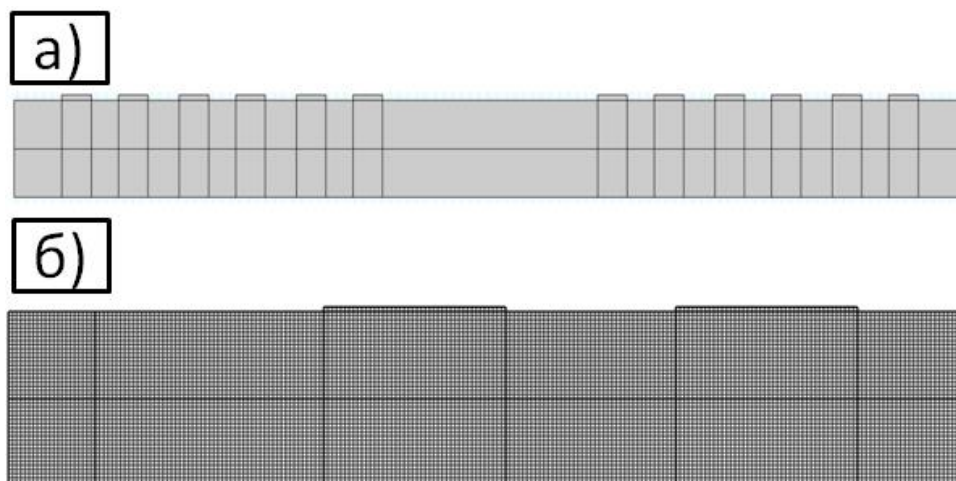


Рисунок 6 Изображение модели линии задержки (а) и увеличенного фрагмента сетки (б)

Сравнение теоретических значений резонансных частот с экспериментальными данными представлено на рисунке 7. Из рисунка 7(слева) видно, что для ЛЗ сформированной на пластине ниобата лития YX ориентации в диапазоне 0,5-15 МГц наблюдается совпадение положения резонансных пиков экспериментальной и смоделированной линий задержки. Для линии задержки сформированной на пластине ниобата лития 40+YX наблюдается совпадение в диапазоне 0-5 МГц (рис. 7 справа).

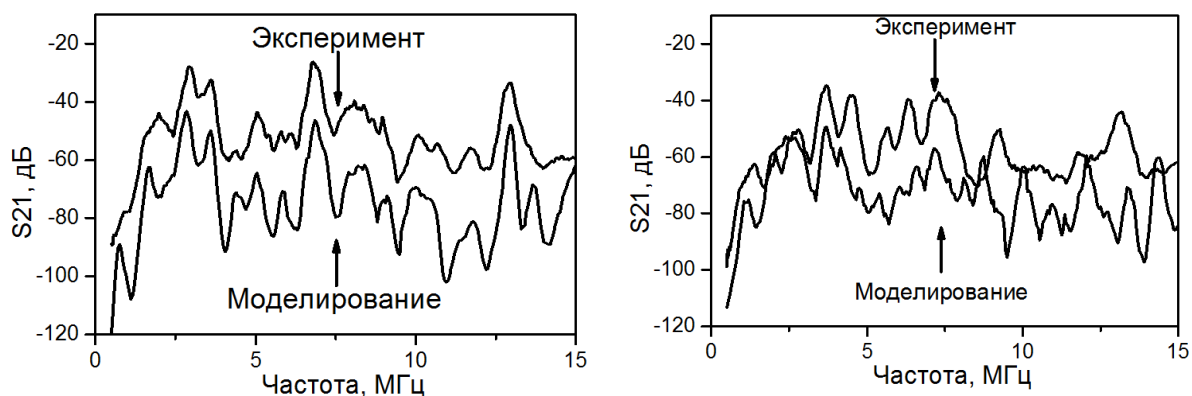


Рисунок 7 Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными, для ЛЗ сформированной на пластине ниобата лития YX ориентации(слева) и 40+YX справа.

### Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы изучена и отработана технология получения проводящих чернил на основе наночастиц серебра и проведена их характеристика. Проведено исследование морфологических и электрофизических характеристик электродных структур полученных методом струйной печати, изучена зависимость их параметров от температуры спекания образцов. Отработана технология нанесения проводящих структур методом струйной печати.

Были созданы шаблоны для электродных структур акустических линий задержки для объёмных акустических волн в пьезоэлектрических пластинах. С их помощью и отработанной технологией методом струйной печати соответствующие электродные структуры были нанесены на пьезоэлектрические подложки. Создан измерительный стенд и проведено исследование процессов возбуждения акустических волн путем использования напечатанных электродов. Получены частотные зависимости S-параметров полученных линий задержки. Проведено численное моделирование методом конечных элементов.

Таким образом, в ходе выполнения выпускной квалификационной работы была экспериментально показана возможность использования технологии струйной печати для формирования акустоэлектронных устройств, в частности, акустической линии задержки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

---

1. Kirchmeyer S. The OE-A roadmap for organic and printed electronics: creating a guidepost to complex interlinked technologies, applications and markets // *Translational Materials Research*. – 2016. – Т. 3. – №. 1. – С. 010301.
2. Eggenhuisen T. M. et al. High efficiency, fully inkjet printed organic solar cells with freedom of design // *Journal of Materials Chemistry A*. – 2015. – Т. 3. – №. 14. – С. 7255-7262.
- 3 Yasumatsu T. Flexible display panel with touch sensor function :пат. 9030427 США. – 2015.
- 4 Kobashi Y., Konno K. Electronic paper and method for manufacturing the same :пат. 9256112 США. – 2016.
- 5 Wünsch S. et al. Progress of alternative sintering approaches of inkjet-printed metal inks and their application for manufacturing of flexible electronic devices // *Journal of Materials Chemistry C*. – 2014. – Т. 2. – №. 48. – С. 10232-10261.
- 6 Salim A., Lim S. Review of recent inkjet-printed capacitive tactile sensors // *Sensors*. – 2017. – Т. 17. – №. 11. – С. 2593.
- 7 Lesch A. et al. Analytical sensing platforms with inkjet printed electrodes // *Biotech, Biomaterials and Biomedical: TechConnect Briefs*. – 2016. – С. 121-124.
- 8 Wünsch S. et al. Progress of alternative sintering approaches of inkjet-printed metal inks and their application for manufacturing of flexible electronic devices // *Journal of Materials Chemistry C*. – 2014. – Т. 2. – №. 48. – С. 10232-10261.
9. Гладких Н. Т., Крышталь А. П., Богатыренко С. И. Температура плавления наночастиц и энергия образования вакансий в них // *Журнал технической физики*. – 2010. – Т. 80. – №. 11. – С. 111-114
10. Степанов А. Л. и др. Плавление наночастиц серебра в матрице стекла при лазерном отжиге // *Письма в Журнал технической физики*. – 2008. – Т. 34. – №. 23. – С. 39-46.