

*На правах рукописи*

**Янкин Сергей Сергеевич**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ  
АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН С НЕОДНОРОДНОСТЯМИ,  
СРАВНИМЫМИ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ**

01.04.03 — Радиофизика

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Саратов — 2015**

Работа выполнена на кафедре физики твердого тела факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского».

**Научный руководитель**

**Сучков Сергей Германович**

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, руководитель НТЦ «Микро- и нанoeлектроника» ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского»

**Официальные оппоненты**

**Анисимкин Владимир Иванович**

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова

**Никишин Евгений Леонардович**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Общая физика» ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.»

**Ведущая организация**

Открытое акционерное общество «Авангард», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «17» сентября 2015 года в 15:30 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 при Саратовском государственном университете им. Н. Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В. А. Артисевич Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского и на сайте [www.sgu.ru](http://www.sgu.ru).

Автореферат разослан «31» мая 2015 года.

Ученый секретарь  
Диссертационного Совета

Аникин Валерий Михайлович

# Общая характеристика работы

## Актуальность исследуемой проблемы

Поверхностные акустические волны (ПАВ) являются предметом исследований значительного числа научных групп и лабораторий, отраженных в известных монографиях (И. А. Викторов, Ю. В. Гуляев, В. А. Auld, W. P. Mason, Л. Д. Ландау, D. Morgan). Устройства на ПАВ находят широкое применение во всех областях радиоэлектроники, в том числе в мобильной связи, радиочастотной идентификации, навигации, радиолокации, сейсмологии.

Наиболее распространенным способом возбуждения и управления распространением ПАВ в акустоэлектронных устройствах является использование структур из металлических полосок, а также канавок, расположенных на кристаллических подложках (Ю. В. Гуляев, К. Hashimoto, H.-S. Tuan, J. P. Parekh, С. В. Бирюков).

Периодические структуры, представляющие собой системы металлических электродов или других неоднородностей на поверхности пьезоэлектрических кристаллов, широко используются для отражения ПАВ с целью локализации энергии в резонаторах или в различных конфигурациях отражательных линий задержки (P. V. Wright, D. Morgan). Также для этих целей используются решетки из множества канавок (В. Ф. Дмитриев). Одиночные неоднородности и небольшие группы отражателей находят применение в радиочастотных идентификационных метках (D. Morgan, С. Hartmann, Ю. А. Гуляев, В. П. Плесский, Th. Ostertag).

Важную роль при проектировании акустоэлектронных устройств имеет анализ акустических полей, возникающих при возбуждении ПАВ встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) и взаимодействии ПАВ с периодическими топографическими неоднородностями на поверхности кристалла, образующими отражательные структуры (ОС). Практический интерес представляет исследование взаимодействия импульсов ПАВ с отражателями акустических радиоимпульсов (S. Ballandras, A. H. Даринский, В. Graczykowski, D. Peng). Для этой цели предпочтительно использовать комбинацию метода граничных элементов (МГЭ) с методом конечных элементов (МКЭ) (В. П. Плесский, P. Ventura, M. Hofer, S. Lehtonen). Данные численные методы позволяют учитывать реальную геометрию электродов и отражателей, что не удается сделать в рамках аналитических расчетов (А. В. Осетров).

При переходе в диапазон частот свыше 5 ГГц вследствие ограничений на минимальную толщину ( $\geq 40$  нм) металлических электродов ВШП и отражателей ОС (для предотвращения слишком больших омических потерь) длина волны ПАВ становится сравнимой с высотой этих элементов, что приводит к сложному характеру колебаний ПАВ в таких структурах (V. Laude), поэтому рассеяние ПАВ в этом диапазоне на топографических

неоднородностях поверхности кристалла требует подробного численного анализа полей рассеяния для учета при разработках устройств на ПАВ.

Результаты этих исследований могут быть использованы для определения геометрических размеров поверхностных неоднородностей, при которых минимизируются потери на рассеяние ПАВ в объемные акустические волны (ОАВ), а также для управления коэффициентом отражения от ОС не только изменением высоты отражателей, но и изменением их ширины, что имеет важное значение для создания устройств в СВЧ диапазоне, в частности для проектирования радиочастотных идентификационных меток (РИМ) на ПАВ (D. Morgan, C. Turcu, Ю. В. Гуляев).

Системы радиочастотной идентификации СВЧ на основе пассивных радиочастотных идентификационных меток, использующих поверхностные акустические волны, получили широкое распространение во всем мире для автоматического учета и контроля перемещаемых и хранимых промышленных товаров, оборудования, транспортных контейнеров и многого другого. Особую роль в этой области техники играют радиочастотные идентификационные метки СВЧ на ПАВ в связи с их устойчивостью к радиации и малыми размерами (С. Hartman, В. П. Плесский, D. Malocha). В настоящее время в мире проводятся интенсивные исследования и разработки таких меток в диапазоне 0.9 ГГц и 2.45 ГГц (В. П. Плесский, С. Hartmann, Th. Ostertag). Еще более высокие технические и потребительские параметры будут иметь РИМ в диапазоне частот свыше 5 ГГц. В данной работе впервые проводятся теоретические и экспериментальные исследования РИМ в новом разрешенном в Российской Федерации диапазоне частот 5650–6425 МГц, дающем возможность использовать в девять раз большую полосу частот, чем в ISM диапазоне (2.4–2.83 ГГц), что позволит увеличить информационную емкость, уменьшить размеры РИМ при сохранении дальности идентификации, а также снизить влияние промышленных и бытовых помех. Проектирование таких РИМ в первую очередь требует высокой точности расчета коэффициентов отражения, рассеяния и прохождения ПАВ в системах топографических неоднородностей поверхности кристалла (В. П. Плесский, С. Г. Сучков, Б. В. Свешников).

Все вышеупомянутые отражательные структуры могут быть классифицированы как простейшие одномерные фононные кристаллы (ФК) (M. M. Sigalas, E. N. Economou). Но представляет также интерес исследование ПАВ в двумерных ФК.

В течение последних двух десятилетий значительное число публикаций было посвящено теоретическому и экспериментальному исследованию различных конфигураций ФК, состоящих из твердых, жидких или газовых включений в твердотельную матрицу, например вертикальные столбики (В. И. Григорьевский, С. А. Никитов) или углубления круглого сечения на поверхности подложки (Y. Pennec) или пластины (T.-T. Wu).

Важным аспектом теоретических исследований двумерных ФК является расчет рассеяния ПАВ с использованием как аналитических методов (В. И. Григорьевский, С. А. Никитов), так и метода конечных элементов (А. Khelif), что позволяет получить количественные (амплитудные и фазовые) характеристики рассеяния ПАВ. Особый интерес представляет подробный анализ характеристик прохождения ПАВ через ФК с учетом пьезоэлектрических свойств подложки и влияния ВШП.

Сказанное выше позволяет считать тему диссертации актуальной и соответствующей специальности 01.04.03 – радиофизика.

**Цель диссертационной работы** состоит в анализе полей рассеяния при прохождении ПАВ через систему топографических неоднородностей, сравнимых с длиной волны, проектировании на основе полученных результатов радиочастотной идентификационной метки на ПАВ в диапазоне частот 5650–6425 МГц, её создании и экспериментальном исследовании, а также исследовании характеристик рассеяния ПАВ в поверхностных фоновых кристаллах и возможности их создания.

**Основными задачами диссертационной работы** являются:

1. Построение математических моделей для расчёта двумерных акустических полей в пьезокристаллических структурах с топографическими неоднородностями поверхности.
2. Теоретическое исследование отражения, прохождения и рассеяния ПАВ в зависимости от размеров топографических неоднородностей различного вида, сравнимых по высоте с длиной волны ПАВ  $\lambda$ , для нескольких видов неоднородностей прямоугольного сечения.
3. Расчет, проектирование и экспериментальное исследование радиочастотной идентификационной метки на ПАВ в виде отражательной линии задержки в диапазоне частот 5650–6425 МГц с алюминиевыми и молибденовыми отражателями. Измерение частотных и временных характеристик РИМ и сравнение их с результатами расчетов с учетом и без учета отличия плотности и модулей упругости плёнок от объёмного материала.
4. Теоретический и экспериментальный анализ характеристик рассеяния ПАВ при прохождении через 2D фоновый кристалл с учетом пьезоэлектрических свойств подложки и влияния ВШП.
5. Исследование возможности создания фоновых кристаллов для поверхностных акустических волн с помощью зондового окисления.

**Научная новизна** полученных в диссертации результатов:

1. На основе теоретических исследований полей акустических колебаний ПАВ в пьезокристалле с топографическими неоднородностями поверхности, сравнимыми по высоте с длиной волны, впервые опре-

- делены области геометрических параметров отражательных систем, при которых возникает интенсивное излучение энергии ПАВ в объём.
2. Обнаружено, что одних и тех же требуемых значений коэффициента отражения при малом уровне рассеяния в объём можно достичь при двух сочетаниях размерных параметров (высоты и ширины) отражающей структуры в виде системы выступов из металла, сформированных на поверхности пьезокристалла.
  3. Впервые для диапазона частот 5650–6425 МГц показано, что в радиочастотных идентификационных метках на ПАВ с отражающими структурами на основе металлических отражателей можно обеспечить приблизительное равенство амплитуд отраженных импульсов.
  4. Сравнением теоретических и экспериментальных данных показано, что для достоверного расчета характеристик РИМ необходимо учитывать отличия упругих свойств тонких пленок алюминия от свойств объёмных образцов, в частности, в диапазоне частот 5650–6425 МГц погрешность расчета потерь сигнала сокращается с 5-6 дБ до 1-1.5 дБ.
  5. Впервые изготовлены и экспериментально исследованы РИМ в диапазоне частот 5650–6425 МГц. Измеренные частотные и временные характеристики РИМ находятся в хорошем согласии с расчетными.
  6. Рассчитаны с помощью трехмерного моделирования методом конечных элементов и экспериментально установлены частотные диапазоны запрещенных зон в акустическом спектре двумерного фононного кристалла в виде решетки никелевых столбиков, сравнимых по высоте с длиной волны, на поверхности ниобата лития.
  7. Продемонстрировано изменение угла наклона разности фазочастотных характеристик прошедшего через фононный кристалл в виде решетки никелевых столбиков на поверхности ниобата лития и референсного (без фононного кристалла) сигналов для первой полосы непропускания данного фононного кристалла, при этом внутри полосы непропускания эта разность практически постоянна.
  8. Теоретически обосновано образование запрещенной зоны в спектре ПАВ для одномерной поверхностной структуры фононного кристалла в виде оксидных линий на пленках никеля и продемонстрирована возможность смещения центральной частоты запрещенной зоны, образуемой в рассматриваемом фононном кристалле, при приложении постоянного магнитного поля.

**Достоверность полученных в диссертации результатов** основана на строгой постановке и решении граничных задач пьезоакустики методом конечных элементов, она подтверждается хорошим соответствием результатов расчетов с экспериментальными и теоретическими результатами, как других авторов, так и с экспериментальными результатами, полученными

самим автором.

### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Коэффициенты отражения и рассеяния ПАВ от топографических неоднородностей поверхности пьезокристалла в виде сформированных на ней выступов из металла или самого кристалла с высотой, сравнимой с длиной поверхностной акустической волны, зависят от высоты неоднородностей квазипериодически, что связано с взаимодействием ПАВ с собственными акустическими модами в неоднородностях.
2. При увеличении плотности материала отражателей ПАВ в виде выступов из металла, расположенных на поверхности пьезокристалла, уменьшается максимально достижимое значение коэффициента отражения и период его изменения от высоты неоднородностей, при этом минимальные потери на рассеяние в объём увеличиваются.
3. Для отражающих элементов в виде глубоких канавок ( $0.17 < h_r/\lambda < 1$ ), сформированных на поверхности пьезокристалла, коэффициент отражения ПАВ с увеличением глубины убывает, а коэффициент рассеяния в объём энергии ПАВ возрастает.
4. Для качественного и количественного соответствия результатов расчета и измерений импульсного кодового сигнала радиочастотной идентификационной метки на ПАВ для СВЧ диапазона необходим корректный расчет полей рассеяния металлическими отражателями энергии ПАВ, в том числе и в объём, с учётом параметров используемых в эксперименте тонких ( $h_r < 200$  нм) металлических пленок (плотность, модули упругости).

### **Практическая ценность работы.**

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы при проектировании акустоэлектронных устройств СВЧ на ПАВ. Они уже были применены для конструирования радиочастотных идентификационных меток в новом частотном диапазоне 5650–6425 МГц, впервые изготовленных в Научно-технологическом центре «Микро- и наноэлектроника» Саратовского Государственного Университета им. Н.Г.Чернышевского.

Результаты расчетов прохождения ПАВ через двумерные фононные кристаллы могут быть использованы для разработки новых функциональных устройств, в том числе с управлением магнитным полем.

### **Личный вклад.**

Основные результаты, представленные в диссертации, получены лично автором. Постановка задач, выбор методов решения и обсуждение полученных результатов были проведены автором совместно с научным руководителем, а также с профессорами В.Л. Преображенским, Ф. Перно (Цен-

тральная школа г.Лилль, Франция) и профессором В.П. Плесским (GVR Trade SA, г. Горжье, Швейцария). Автору принадлежит разработка математических моделей и программ для расчета характеристик прохождения поверхностных акустических волн через различные типы топографических неоднородностей, а также обработка и анализ экспериментальных данных. Создание лабораторных образцов и получение экспериментальных результатов проведено совместно с доцентом Д.С.Сучковым (НТЦ «Микро- и наноэлектроника», Саратов), А. Талби и А.Ю. Павловой (Центральная школа г.Лилль, Франция).

### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертационной работы докладывались: на Международном конгрессе по ультразвуку (International Congress on Ultrasonics), проходившем в Сингапуре 2–5 мая 2013 г.; на конференциях аспирантов в области микроэлектроники (16<sup>èmes</sup> and 17<sup>èmes</sup> Journées Nationales du Réseau Doctoral en Microélectronique), проходивших в Гренобле, Франция, 10–12 июня 2013 г. и в Лилле, Франция, 26–28 мая 2014 г.; на Международном симпозиуме по ультразвуку (IEEE International Ultrasonics Simposium), проходившем в Праге, Республика Чехия, 21–25 июля 2013 г.; на VIII и IX Всероссийских конференциях молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», проходивших в Саратове 3–5 сентября 2013 г. и 2–4 сентября 2014 г.; на VIII Саратовском салоне изобретений, инноваций и инвестиций, проходившем в Саратове 19–20 сентября 2013 г. (проект награжден золотой медалью); на конференции пользователей COMSOL Multiphysics (COMSOL Conference Rotterdam), проходившей в Роттердаме, Нидерланды, 23–25 октября 2013 г.; на научной конференции «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXVII сессия Российского акустического общества», проходившей в Санкт-Петербурге 16–18 апреля 2014 г.; на Международной научной конференции «Наука Будущего», проходившей в Санкт-Петербурге 17–20 сентября 2014 г. (проект получил награду за лучший постерный доклад); на Международной научно-технической конференции «Актуальные Проблемы Электронного Приборостроения», проходившей в Саратове 25–26 сентября 2014 г.; на Международном симпозиуме по сенсорам на основе ПАВ (SAW Sensor Symposium 2014), проходившем в Вене, Австрия, 30–31 октября 2014 г.

Материалы работы использовались при выполнении следующих проектов: гранта Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах № 11.G34.31.0030 («Метаматериалы на основе фотонных, фононных, плазмонных и магنونных кристаллов и их применение в СВЧ радиоэлектронике и фотонике»), грантов Министерства образования и науки РФ № 14.В37.21.1988 («Разработка конструкций пассивных радиочастотных идентификационных меток на поверхност-

ных акустических волнах в новом диапазоне частот 5650-6425 МГц») и 14.574.21.0061 («Исследования и разработка методов и компонентов антиколлизийной защиты информационно-телекоммуникационных систем радиочастотной идентификации, использующих радиочастотные идентификационные метки на поверхностных акустических волнах»). Работа была поддержана студенческой стипендией Американского акустического общества и стипендией Правительства Франции для проведения совместной российско-французской аспирантуры.

### Публикации.

По результатам исследований, выполненных при работе над диссертацией, опубликовано 14 работ, в том числе 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 5 статей – в трудах российских и международных конференций, 4 работы – в тезисах докладов конференций, и получены патенты Российской Федерации на изобретение и полезную модель.

## Основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 117 страниц с 61-м рисунком и 3-мя таблицами. Список литературы содержит 147 наименований.

Во **Введении** обоснована актуальность проведенных исследований, сформулирована их основная цель, описаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Введение содержит основные положения и результаты, выносимые на защиту, сведения о достоверности и апробации результатов.

**Глава 1** посвящена нестационарному анализу с помощью метода конечных элементов процессов возбуждения, распространения, отражения и рассеяния импульсных сигналов ПАВ в отражательной линии задержки (рис. 1а), представляющей собой в данной работе подложку кристалла ниобата лития ( $LiNbO_3$ )  $Y + 128^\circ$ -среза с расположенными на его поверхности ВПП и отражающими структурами, в том числе с элементами, сравнимыми по высоте с длиной волны ПАВ  $\lambda$ .

Точка 'А' использовалась в качестве детектора возбужденного и отраженного сигналов, точка 'В' – прошедшего сигнала (рис. 1). Типичные зависимости электрического потенциала ПАВ от времени в этих точках приведены на рис. 1б, в. С использованием полученной информации в поперечных сечениях, проходящих через точки А и В, рассчитывалась зависимость потоков энергии ПАВ от времени для падающего  $P_{SAW}$ , отраженного  $P_r$  и прошедшего  $P_t$  импульсов, а также поток мощности ОАВ в объём кристалла  $P_b$ . Энергетический баланс, выражаемый формулой  $P_{SAW} = P_r + P_t + P_b$ , выполнялся с высокой степенью точности. Коэффициенты отражения ( $C_r$ ), прохождения ( $C_t$ ) и рассеяния в объём ( $C_b$ ) без учёта вязкостных потерь

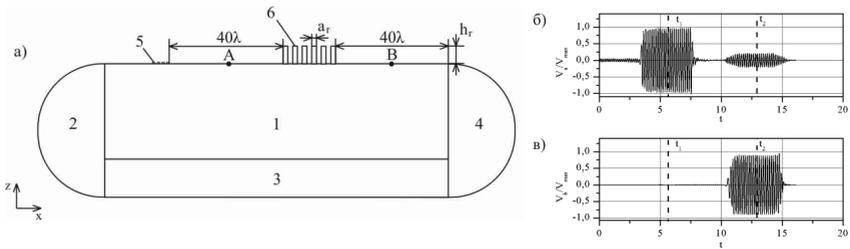


Рис. 1: Модель рассматриваемой отражательной линии задержки (а). Цифрами обозначены: 1– кристаллическая подложка (2– области с критическим затуханием для подавления отражений), 5 – электроды ВПП, 6 – элементы ОС. Зависимость нормированного электрического потенциала от времени в точках “А” (б) и “В” (в).

ПАВ определялись по формулам:

$$C_r = \frac{P_r(t_1)}{P_{SAW}(t_1)}; \quad C_t = \frac{P_t(t_2)}{P_{SAW}(t_2)}; \quad C_b = 1 - C_r - C_t.$$

Используемая схема моделирования была верифицирована путем сравнения расчета коэффициента отражения от одиночного бесконечно тонкого прямоугольного алюминиевого отражателя при изменении его ширины с известными из литературы данными, полученными аналитически. Результаты практически совпали. Этот метод в дальнейшем применен для расчета двумерной картины полей рассеяния ПАВ на более сложных отражательных структурах, высота которых сравнима с длиной волны.

В работе изложены результаты численных исследований отражения радиоимпульсов ПАВ от различных поверхностных неоднородностей (последовательности металлических отражателей, выступов на поверхности кристалла и канавок) с целью определения их геометрических параметров, минимизирующих потери энергии ПАВ, связанные с возбуждением и излучением объемных волн в подложку.

Результаты расчетов зависимости коэффициентов отражения  $C_r$ , прохождения  $C_t$  и рассеяния  $C_b$  от нормированной высоты  $h_r/\lambda$  для отражателей из алюминия и золота представлены на рис. 2а, б. Локальные максимумы коэффициентов прохождения и рассеяния имеют резонансную природу и объясняются возбуждением различных акустических мод в отражателях.

Так, на дисперсионной характеристике (рис. 2в, г) данные моды соответствуют точкам пересечения дисперсионных кривых и пунктирной линии, обозначающей центральную частоту начального импульса.

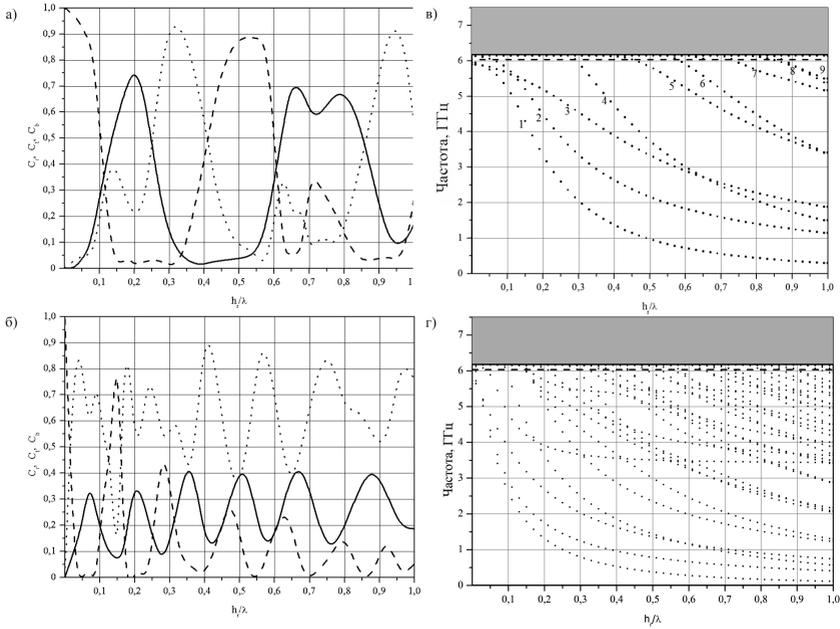


Рис. 2: Зависимости коэффициентов отражения  $C_r$  (сплошная линия), прохождения  $C_t$  (штриховая линия) и рассеяния  $C_b$  (пунктирная линия) от нормированной высоты  $h_r/\lambda$  системы отражателей (а) из алюминия и (б) из золота. Зависимость частоты возбуждения акустических мод в решетке алюминиевых (в) и золотых (г) электродов от их высоты.

са  $f_0 = 6.032$  ГГц.

Таким образом, для повышения добротности и сокращения размеров резонаторов на ПАВ можно использовать электроды с большей, чем в известных устройствах, высотой, например,  $h_r/\lambda = 0.2; 0.65; 0.79$ , которые соответствуют максимуму отражения при малом излучении в объём. Показано, что для отражателей из тяжелых металлов (золото, молибден) интенсивное рассеяние энергии в объём наблюдается уже при малых высотах  $h_r/\lambda = 0.01..0.05$  и при дальнейшем увеличении геометрических размеров не опускается ниже 40%.

По аналогичной схеме были также определены зоны пропускания ( $h_r/\lambda = 0.01, 0.52, 0.93$ ) и непропускания ( $h_r/\lambda = 0.18, 0.75$ ) для фоновонного кристалла в виде последовательности выступов на поверхности кристалла (рис. 3а). Кроме того, расчеты показали, что в отличие от выступов отражающие элементы в виде канавок с относительной глубиной ( $h_r/\lambda > 0.1$ ) эффективно рассеивают энергию ПАВ в объём (рис. 4б).

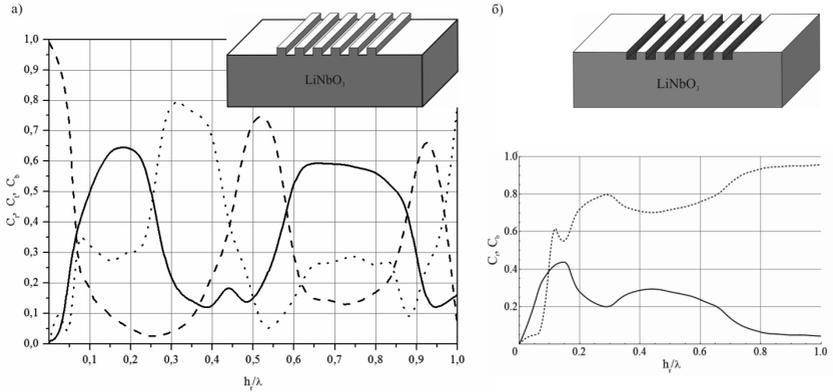


Рис. 3: Зависимости коэффициентов отражения  $C_r$  (сплошная линия), прохождения  $C_t$  (штриховая линия) и рассеяния  $C_b$  (пунктирная линия) от нормированной высоты  $h_r/\lambda$  системы отражателей из (а) выступов ниобата лития и (б) канавок в подложке.

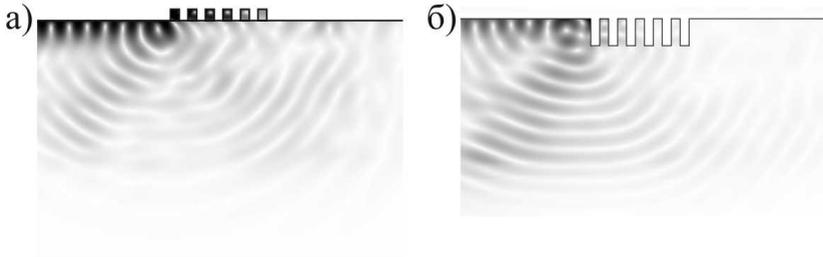


Рис. 4: Распределение упругих деформаций при рассеянии ПАВ на ОС (а) в виде алюминиевых электродов при высоте отражателя  $h_r/\lambda = 0.3$ , соответствующей максимуму коэффициента рассеяния и (б) в виде канавок для  $h_r/\lambda = 0.74$ . Белый цвет соответствует отсутствию деформаций, черный – максимальным деформациям.

Таким образом, расчеты двумерной картины рассеянных полей (рис. 4) позволяют анализировать эффективность ОС в отражательной линии задержки и наглядно показывают области параметров, где возникает интенсивное излучение энергии ПАВ в объем. Полученная информация об отражении и рассеянии ПАВ может быть использована для проектирования ОС различной конфигурации, например, в радиочастотных идентификационных метках на ПАВ для СВЧ диапазона, в частности для 5650-6425 ГГц.

Результаты данной главы опубликованы в работах [1, 6, 11].

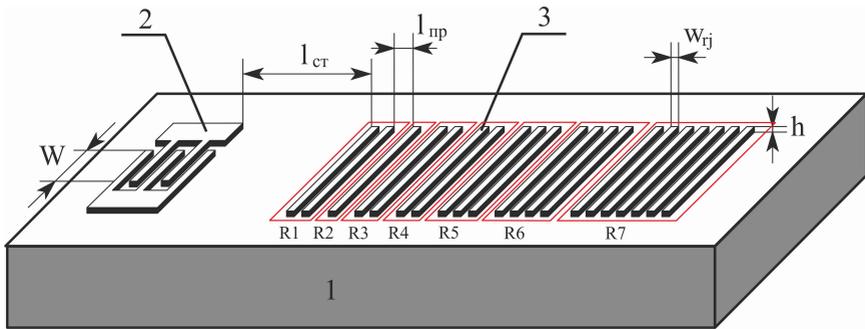


Рис. 5: Общий вид электродной структуры РИМ на ПАВ: 1 – кристаллическая подложка, 2 – электроды ВШП, 3 – группы отражателей.

**Во второй главе** приведены результаты теоретических исследований, расчета и проектирования, а также экспериментального исследования радиочастотной идентификационной метки (РИМ) на ПАВ в диапазоне частот 5650–6425 МГц. Рассмотрена наиболее распространенная структура РИМ в виде двунаправленного встречно-штыревого преобразователя и расположенных с одной стороны от ВШП сигнальных отражателей рис. 5.

Для расчета топологии и электрических характеристик был использован метод конечных элементов, изложенный в главе 1. При расчетах и оптимизации (по критерию равенства амплитуд кодовых импульсов) учитывалось отличие акустических свойств тонкопленочного алюминия от объемного и рассеяние энергии ПАВ в объем. Толщина электродов ВШП и отражающих полосок на основе численных исследований была выбрана минимально возможной  $h = 40$  нм ( $h \approx 0.064\lambda$ ), что связано с минимизацией потерь на рассеяние энергии ПАВ в объём. Акустическая апертура ВШП  $W = 70$  мкм обеспечивает сопротивление излучения ВШП, близкое к 50 Ом. Расстояние между ВШП и стартовым рефлектором определяет начальную задержку отражённых сигналов и составляет  $l_{cm} = 1$  мм, что соответствует задержке около 500 нс.

Для тестовой (эквидистантной) топологии с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics рассчитывалась частотная зависимость элемента матрицы рассеяния отражателей  $S_{11}$ . Затем для получения временного отклика РИМ вычислялось обратное Фурье-преобразование свертки функции  $S_{11}$  со спектром радиоимпульса опроса длительностью  $\delta t = 1.3$  нс с центральной частотой  $f_0 = 6037.5$  МГц и относительной полосой частот  $\delta f_{-3}/f_0 \approx 0.13$ .

Целью оптимизации структуры РИМ являлось получение приблизительно одинаковых амплитуд кодовых импульсов (со второго по шестой) на уровне не менее -50 дБ, а амплитуд стартового и конечного импульсов –

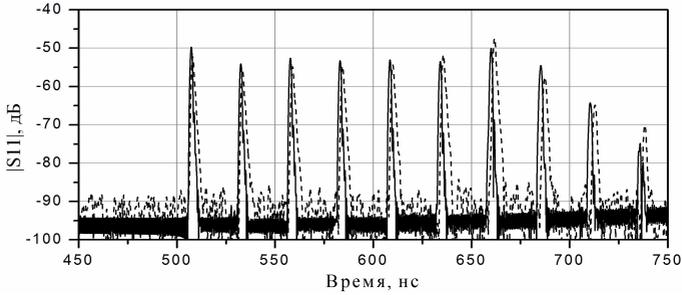


Рис. 6: Временная характеристика тестовой РИМ в диапазоне частот 5650–6425 МГц. Сплошная линия – расчет, штриховая линия – эксперимент.

на 3 дБ больше.

В результате оптимизации последовательным подбором конфигурации каждой группы отражателей было определено следующее количество элементов в каждой группе отражателей, начиная с первой:

$$N_j = (2, 1, 2, 2, 3, 4, 7)$$

и соответствующие коэффициенты металлизации:

$$M_{rj} = (0.45, 0.6, 0.45, 0.5, 0.45, 0.45, 0.55).$$

Временной отклик, соответствующий оптимальной структуре отражателей из алюминия, представлен на рис. 6. Видно, что 1 и 7 отклики имеют относительную амплитуду около -50 дБ, а кодирующие отклики со второго по шестой имеют амплитуды около -53 дБ с перепадом не более 1,5 дБ. Отметим, что потери на 1-2 дБ больше, чем в эксперименте.

Экспериментальные образцы РИМ для диапазона частот 5650–6425 МГц были изготовлены при участии В.П. Плесского (GVR Trade SA, г. Горжье, Швейцария) и З. Дэвиса (Датский технологический институт) с использованием системы электроннолучевой литографии высокого разрешения САВL-9000С (Crestec, Япония) в Научно-технологическом центре «Микро- и нанoeлектроника» Саратовского Государственного университета имени Н.Г.Чернышевского. Геометрия изготовленных структур хорошо соответствовала расчетным данным. Электроды и полосковые отражатели имели ширину от 150 нм до 225 нм и толщину  $40 \pm 1$  нм. На рис. 7 приведена электронография встречно-штыревого преобразователя (ВШП) изготовленных РИМ.

По измеренным частотным характеристикам были рассчитаны временные отклики меток на импульс опроса аналогично тому, как это сдела-

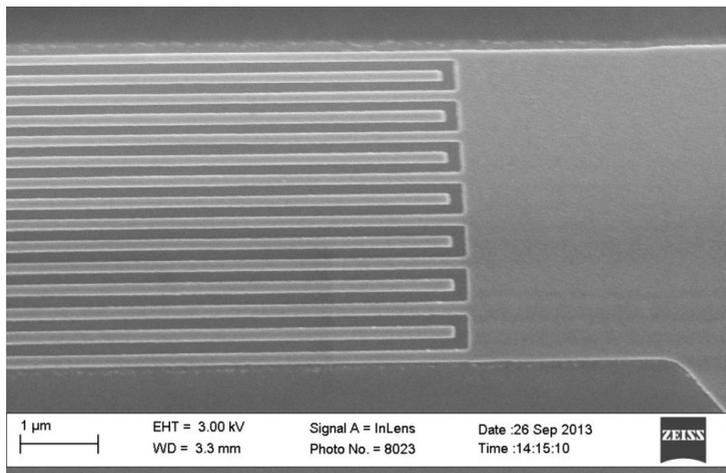


Рис. 7: Снимок встречно-штыревого преобразователя РИМ в диапазоне частот 5650–6425 МГц, сделанный с помощью сканирующего электронного микроскопа.

но для расчетных характеристик. Полученная временная характеристика с кодовыми сигналами, сформированными системой отражателей РИМ, также приведена на рис. 6. Видно, что кодовые импульсы в эксперименте немного (на 1-2 дБ) меньше расчетных значений, полученных с параметрами тонкопленочного алюминия. Это расхождение может быть связано с тем, что в использованных кристаллических подложках декремент затухания ПАВ немного выше, чем взятый для расчетов из справочника, а также с тем, что не учитывались потери ПАВ в металлических электродах ВШП и омические потери.

Таким образом, изготовленные в соответствии с расчетом РИМ были исследованы экспериментально и получено удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных временных характеристик. Уровень амплитуд кодовых импульсов в эксперименте (минимум -55 дБ) позволяет перейти к технической реализации системы радиочастотной идентификации в диапазоне частот 5650–6425 МГц.

Результаты данной главы опубликованы в работах [5, 7, 9, 10, 14-16].

**Третья глава** посвящена анализу характеристик прохождения ПАВ через фононный кристалл с учетом пьезоэлектрических свойств подложки и влияния приемно-передающих встречно-штыревых преобразователей на амплитудно-фазовые характеристики. В данной главе численно с помощью трехмерной МКЭ модели (рис. 8а) исследуются образование полос непропускания для ПАВ в периодической решетке цилиндрических никелевых столбиков различной толщины на пьезоэлектрической подложке  $LiNbO_3$

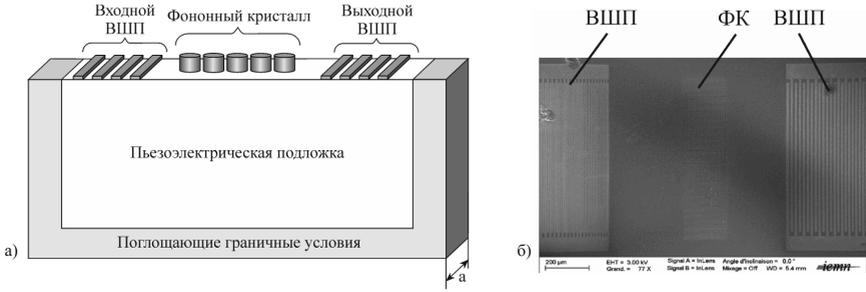


Рис. 8: (а) Модель устройства для расчета прохождения ПАВ через фононный кристалл. Буквами обозначены:  $h$  – высота столбика,  $r$  – его радиус,  $a$  – период решетки; (б) Изображение изготовленного фононного кристалла, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа с  $a = 10$  мкм,  $r = 3.8$  мкм и  $h = 3.4$  мкм.

и приводится сравнение и анализ данных расчета с экспериментальными результатами для изготовленных тестовых устройств (рис. 8б).

Обработанные результаты в виде:

$$\Delta S_{21} = |S_{21ref}| - |S_{21}|; \quad \Delta\phi = Arg(S_{21}) - Arg(S_{21ref}),$$

где  $S_{21ref}$ - функция передачи референсной линии задержки без ФК, представлены на рис. 9.

Полученные результаты показали, что увеличение высоты столбиков приводит к снижению центральной частоты первой полосы непропускания, вызванной резонансом Фано, формированию второй Брэгговской запрещенной полосы и области пропускания между ними. Кроме того, наклон на графике частотной зависимости разности фаз определяет начало первого, так называемого “локального” резонанса столбиков, а постоянная разность фаз соответствует запрещенной зоне для ПАВ. Аналогичный наклон существует и для второй запрещенной зоны. Расчетные данные для первой полосы непропускания с высокой степенью точности по частоте совпадают с экспериментальными данными. Однако вторая запрещенная зона смещена приблизительно на 10 МГц для обеих конфигураций, что можно объяснить различием между упругими свойствами материала столбиков (никеля), используемыми в расчетах, и реальными значениями плотности и упругих констант никеля в изготовленной структуре.

Кроме того, в данной главе исследованы возможные характеристики периодических решеток оксидных линий при воздействии зондом сканирующего атомно-силового микроскопа на пленки никеля. Теоретически показано образование запрещенных зон для поверхностных акустических волн

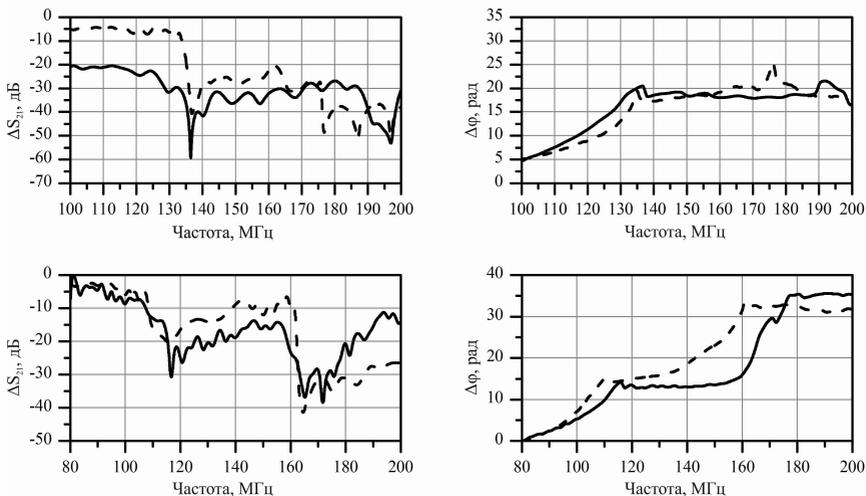


Рис. 9: Частотная зависимость функции передачи  $\Delta S_{21}$  в эксперименте (сплошная линия) и полученная численно (штриховая линия) для  $h = 2.3$  мкм (а) и  $h = 3.4$  мкм (в); накопленная разность фаз  $\Delta\phi$  в эксперименте (сплошная линия) и полученная численно (пунктирная линия) для  $h = 2.3$  мкм (б) и  $h = 3.4$  мкм (г).

высоких частот ( $>4$  ГГц) в фоновом кристалле на основе таких пленочных структур и произведена оценка изменения акустических свойств структуры при приложении постоянного магнитного поля. На рис. 10 приведены результаты расчетов прохождения ПАВ через решетку ФК, при приложении постоянного магнитного поля  $H = 300$  Э (достаточного для полного намагничивания пленки) в направлении распространения ПАВ. При этом модуль Юнга возрастает приблизительно на 7%, следовательно, пленка никеля в намагниченном состоянии становится жестче, поглощая меньше энергии от ПАВ и ослабляя её меньше, чем в размагниченном состоянии. Кроме того, так как скорость ПАВ приблизительно пропорциональна корню квадратному из модуля Юнга, приложение указанного магнитного поля приводит к смещению центральной частоты брэгговской запрещенной зоны вверх.

Результаты данной главы опубликованы в работах [2-4, 8, 12, 13].

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

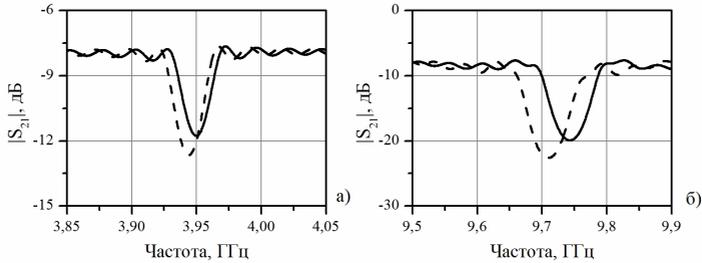


Рис. 10: Частотные зависимости модуля функции передачи а) для структуры оксидных линий с периодом  $a = 500$  нм,  $h = 3.5$  нм и числом линий  $N = 150$  в магнитном поле (сплошная линия) и при его отсутствии (пунктирная линия); б) аналогичные зависимости для  $a = 200$  нм.

## Основные результаты и выводы

1. Предложен и верифицирован метод моделирования с использованием метода конечных элементов для расчета коэффициентов отражения, прохождения и рассеяния энергии ПАВ в объём отражателями различного типа, с помощью которого проведен анализ двумерной картины полей рассеяния ПАВ в отражательной линии задержки на ниобате лития ( $LiNbO_3$ )  $Y + 128^\circ$ -среза с расположенными на его поверхности ВШП и отражающими структурами различных типов. Было показано, что зависимости коэффициента отражения ПАВ от высоты ОС, в том числе сравнимой с длиной волны ПАВ, носят квазипериодический характер для топографических неоднородностей в виде выступов на поверхности кристалла и убывающий характер для ОС из канавок.
2. Предсказаны новые интервалы геометрических размеров электродов, в которых при сохранении отражательных свойств снижаются омические потери в отражателях и упрощается технология их изготовления, в частности для одиночного отражателя из алюминия с относительной высотой  $h_r/\lambda = 0.06$  целесообразно использовать относительную ширину  $a_r/\lambda = 0.8$  вместо  $a_r/\lambda = 0.4$ .
3. Показано, что для повышения добротности и сокращения размеров резонаторов на ПАВ можно использовать последовательности электродов с большей, чем в известных устройствах, высотой, например,  $h_r/\lambda = 0.2; 0.65; 0.79$ , которые соответствуют максимуму отражения при малом излучении в объём.
4. Показано, что для отражателей из тяжелых металлов (золото, мо-

- либден) интенсивное рассеяние энергии в объеме наблюдается уже при малых высотах  $h_r/\lambda = 0.01..0.05$  и при дальнейшем увеличении геометрических размеров не опускается ниже 40%.
5. Определены зоны пропускания ( $h_r/\lambda = 0.01, 0.52, 0.93$ ) и непропускания ( $h_r/\lambda = 0.18, 0.75$ ) для фононного кристалла в виде последовательности выступов на поверхности кристалла.
  6. Показано, что отражающие элементы в виде канавок с относительной глубиной ( $h_r/\lambda > 0.1$ ) эффективно рассеивают энергию ПАВ в объем при уменьшении коэффициента отражения.
  7. На основе моделирования методом конечных элементов найдена оптимальная (с точки зрения равенства амплитуд кодовых сигналов) структура отражательной линии задержки на ПАВ для использования в РИМ в диапазоне частот 5650–6425 МГц с алюминиевыми электродами. Уровень амплитуд кодовых импульсов в расчете: минимум -50 дБ для начальной задержки 500 нс и длительности импульса 1.3 нс.
  8. Впервые в мире по результатам проведенных расчетов была изготовлена и исследована РИМ на ПАВ в диапазоне 6 ГГц. Получено удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных временных характеристик. Уровень амплитуд кодовых импульсов в эксперименте (минимум -55 дБ) позволяет перейти к технической реализации системы радиочастотной идентификации в диапазоне частот 5650–6425 МГц.
  9. На основе моделирования методом конечных элементов найдена оптимальная структура отражательной линии задержки на ПАВ с двусторонней конфигурацией для использования в РИМ в диапазоне частот 5650–6425 МГц с молибденовыми электродами. Уровень амплитуд кодовых импульсов в расчете: минимум -48.5 дБ для начальной задержки 500 нс и длительности импульса 1.3 нс.
  10. С помощью численных расчетов методом конечных элементов показано образование запрещенной зоны в спектре ПАВ для фононного кристалла, представляющего собой решетку оксидных линий в пленке никеля на кристалле ниобата лития. Показано также, что при приложении постоянного магнитного поля благодаря магнитострикции в никелевых пленках происходит смещение центральной частоты запрещенной зоны, образуемой в рассматриваемом ФК. Данный эффект может быть использован для бесконтактного изменения добротности в микромеханических резонаторах и сдвига или переключения полос пропускания и заграждения в определенном частотном диапазоне в фильтрах на ПАВ.
  11. Теоретически методом конечных элементов и экспериментально ис-

следовано взаимодействие ПАВ с ФК, представляющим собой периодическую решетку цилиндрических никелевых столбиков, расположенных на пьезоэлектрической подложке  $LiNbO_3$   $Y+128^\circ$ -среза. Анализ были проведены для двух различных значений высоты столбиков. Экспериментальная проверка построенного метода расчета показала хорошее соответствие измеренной функции передачи ФК и расчетных значений для первой зоны непропускания.

## Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Рассеяние поверхностных акустических волн на системе топографических неоднородностей, сравнимых с длиной волны / С.Г. Сучков, **С.С. Янкин**, С.А. Никитов [и др.] // Радиотехника и Электроника. — 2014. — Т. 59, № 4. — С. 405.
2. Поверхностные акустические волны в одномерном фононном кристалле, полученном с помощью сканирующей зондовой литографии. / **С.С. Янкин**, А.Ю. Павлова, Н. Тьерселан [и др.] // Вестник Саратовского Государственного Технического Университета. — 2014. — Т. 74, № 1. — С. 28.
3. Finite element analysis and experimental study of surface acoustic wave propagation through two-dimensional pillar-based surface phononic crystal / **S. Yankin**, A. Talbi, Y. Du [et al] // Journal of Applied Physics. — 2014. — Vol. 115. — P. 244508.
4. Распространение поверхностной акустической волны в двумерном фононном кристалле на пьезоэлектрической подложке. / **С.С. Янкин**, А. Талби, Ж.-К. Гербедеон [и др.] // Известия Саратовского Университета. Новая Серия. Серия Физика — 2014. — Т. 14, № 2. — С. 5.
5. Радиочастотная идентификационная метка на поверхностных акустических волнах в диапазоне 6 ГГц / Ю.В. Гуляев, С.Г. Сучков, **С.С. Янкин** [и др.] // Радиотехника и Электроника. — 2015. — Т. 60, № 4. — С. 429.
6. Propagation and reflection of surface acoustic waves in the system of topographic irregularities comparable with the wavelength / S. Suchkov, **S. Yankin**, S. Nikitov [et al] // Proceedings of the 2013 International Congress on Ultrasonics. — Singapore: Research Publishing, 2013. — P. 876–881.
7. Feasibility of SAW tags in the 6 GHz frequency band / B.V. Sveshnikov, S.G. Suchkov, **S.S. Yankin** [et al] // Proceedings of the 2013 IEEE International Ultrasonics Symposium. — Prague, Czech Republic: IEEE,

2013. — P. 1408–1411.
8. Experimental investigation of surface acoustic wave interaction with 2D array PnC with various lattice symmetries / A. Talbi, Y. Du, **S. Yankin** [et al] // Proceedings of the 2013 IEEE International Ultrasonics Symposium. — Prague, Czech Republic: IEEE, 2013. — P. 2130–2131.
  9. Малогабаритные радиочастотные идентификационные метки СВЧ диапазона / С.Г. Сучков, В.П. Плесский, **С.С. Янкин** [и др.] // Сборник Восьмого Саратовского Салона изобретений, инноваций и инвестиций. — Саратов: Буква, 2013. — С. 183–184.
  10. Система радиочастотной идентификации на основе поверхностных акустических волн для нового частотного диапазона 6 ГГц / С.Г. Сучков, **С.С. Янкин**, В.А. Николаевцев [и др.] // Сборник докладов Международной научно-технической конференции “Актуальные Проблемы Электронного Приборостроения”. — Саратов: СГТУ, 2014. — С. 307–312.
  11. Янкин С.С. Моделирование радиочастотных идентификационных меток на поверхностных акустических волнах в диапазоне 6 ГГц / **С.С. Янкин**, Ю.А. Шатрова // Сборник тезисов докладов VIII Всероссийской конференции молодых ученых “Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика”. — Саратов: Издательство Саратовского университета, 2013. — С. 290–291.
  12. Исследование возможности создания фоновых кристаллов для поверхностных акустических волн высоких частот с помощью сканирующей зондовой литографии / А.Ю. Павлова, **С.С. Янкин**, Ю.В. Хивинцев [и др.] // Сборник тезисов докладов VIII Всероссийской конференции молодых ученых “Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика”. — Саратов: Издательство Саратовского университета, 2013. — С. 184–185.
  13. Проектирование магнитоупругих брэгговских отражателей для устройств на поверхностных акустических волнах. / А.Ю. Павлова, **С.С. Янкин**, А. Талби [и др.] // Сборник тезисов докладов IX Всероссийской конференции молодых ученых “Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика”. — Саратов: Издательство Саратовского университета, 2014. — С. 135–136.
  14. Проектирование системы радиочастотной идентификации в новом частотном диапазоне 5650–6425 МГц / **С.С. Янкин**, В.А. Николаевцев, Ю.А. Шатрова [и др.] // Сборник тезисов докладов IX Всероссийской конференции молодых ученых “Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика”. — Саратов: Издательство Саратовского университета, 2014. — С. 233–234.
  15. Патент 2534733 РФ, МПК H01L41/08. Пассивная радиочастот-

ная идентификационная метка на поверхностных акустических волнах /С.Г. Сучков, В.А. Николаевцев, Д.С. Сучков, С.С. Янкин, В.В. Ермишин; заявитель и патентообладатель – Саратовский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского. – заявл. 24.06.13; опубл. 10.12.14 Бюл. №34.

16. Патент 135451 РФ, МПК H01L41/08. Пассивная радиочастотная идентификационная метка на поверхностных акустических волнах /С.Г. Сучков, В.А. Николаевцев, Д.С. Сучков, С.С. Янкин, В.В. Ермишин; заявитель и патентообладатель – Саратовский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского. – заявл. 24.06.13; опубл. 10.12.13 Бюл. №34.