

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе С.С. Янкина «Взаимодействие поверхностных акустических волн с неоднородностями, сравнимыми с длиной волны», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Диссертация Янкина С.С. посвящена исследованию процессов взаимодействия поверхностных акустических волн (ПАВ) с неоднородностями различного типа на пути распространения ПАВ и разработке на основе проведенного исследования радиочастотной идентификационной метки (РИМ) в диапазоне частот 5650 – 6425 МГц. В работе проводятся на основе метода граничных элементов и метода конечных элементов теоретический расчет и экспериментальные исследования процессов прохождения, отражения и рассеяния ПАВ в кристалле ниобата лития с расположенными на его поверхности неоднородностями с размерами сопоставимыми с длиной акустической волны. Были рассчитаны и проанализированы двумерные картины полей рассеяния ПАВ на отражательных поверхностных металлических структурах, выполненных из материалов различной плотности, а также на структурах в виде периодических выступов и канавок на поверхности кристалла. Проведен анализ прохождения ПАВ через фононный кристалл с учетом его пьезоэлектрических свойств. В ходе выполнения работы выявлены факторы, влияющие на коэффициенты отражения и рассеяния при прохождении ПАВ поверхностных неоднородностей различного типа. Были также впервые изготовлены и исследованы экспериментальные образцы РИМ для диапазона частот 5650 – 6425 МГц.

Актуальность проблем, рассмотренных в диссертации, обусловлена широким использованием ПАВ в современных акустоэлектронных устройствах и в частности резонаторах, линиях задержки, радиочастотных

идентификационных метках и др. Важную роль при проектировании таких устройств имеет анализ акустических полей, возникающих при возбуждении ПАВ встречно-штыревыми преобразователями и взаимодействии поверхностных волн с периодическими топографическими неоднородностями на поверхности кристалла, образующими отражательные структуры. При разработке акустоэлектронных устройств сантиметрового диапазона длин радиоволн для уменьшения омических потерь необходимо использовать электроды толщиной ≥ 40 нм. При этом длина волны становится соизмеримой с толщиной электродов, что приводит к сложному характеру колебаний ПАВ в таких структурах. Точный анализ распределения акустических полей в подобных структурах позволит значительно улучшить технические характеристики акустоэлектронных устройств на ПАВ. Важной современной задачей является увеличение информационной емкости и уменьшение массогабаритных характеристик РИМ при сохранении дальности идентификации. Применение ПАВ в диапазоне частот 5650 – 6425 МГц существенно упрощает решение этой задачи. Актуальной задачей сегодня является также исследование двумерных фоновых кристаллов и анализ рассеяния ПАВ в них. Особый интерес представляет анализ характеристик прохождения ПАВ через фоновый кристалл с учетом пьезоэлектрических свойств подложки и влияния встречно-штыревого преобразователя.

Автором диссертации получены новые результаты, среди которых наиболее важными представляются следующие:

- На основе теоретических исследований полей акустических колебаний ПАВ в пьезоэлектрическом кристалле с топографическими неоднородностями поверхности, сравнимыми по высоте с длиной волны, определены области геометрических параметров отражательных систем, при которых возникает интенсивное излучение энергии ПАВ в объем.

- Обнаружено, что одни и те же требуемые значения коэффициента отражения при малом уровне рассеяния в объем можно получить при двух сочетаниях размерных параметров (высоты и ширины) элементов отражающей структуры в виде системы выступов из металла, сформированных на поверхности кристалла.
- Показано, что в радиочастотных идентификационных метках на ПАВ для диапазона частот 5650 – 6425 МГц с отражательными структурами на основе металлических полосок можно обеспечить приблизительное равенство амплитуд отраженных импульсов.
- Сопоставительным анализом теоретических и экспериментальных данных показано, что для достоверного расчета характеристик РИМ в диапазоне частот 5650 – 6425 МГц необходимо учитывать отличия упругих свойств тонких металлических пленок от свойств объемных образцов.
- Изготовлены и экспериментально исследованы РИМ в диапазоне частот 5650 – 6425 МГц. Измеренные частотные и временные характеристики РИМ хорошо согласуются с расчетными данными.
- С помощью трехмерного моделирования методом конечных элементов рассчитаны и экспериментально установлены частотные диапазоны запрещенных зон в акустическом спектре двумерного фононного кристалла в виде расположенной на поверхности кристалла ниобата лития решетки никелевых столбиков, сравнимых по высоте с длиной волны,
- 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.

Результаты, полученные в рамках исследования, докладывались автором на конференциях разного уровня, и опубликованы в ведущих научных изданиях из перечня ВАК.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения (основных результатов работы), списка литературы и одного приложения.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, ее новизна и практическая значимость, определена цель работы, представлены основные результаты, полученные в ходе работы и основные положения, выносимые на защиту, указан личный вклад автора.

В первой главе с помощью метода конечных элементов проводится нестационарный анализ процессов возбуждения, распространения, отражения и рассеяния импульсных сигналов ПАВ в отражательной линии задержки на основе кристалла ниобата лития $Y+128^\circ$ -среза с расположенными на его поверхности встречно-штыревыми преобразователями и отражающими структурами, в том числе с элементами, сравнимыми по высоте с длиной волны ПАВ. 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, обусловленные возбуждением и излучением объемных волн в подложку.

Во второй главе приводятся результаты теоретических исследований, расчета и проектирования, а также экспериментального исследования радиочастотной идентификационной метки 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 него сигнальных отражателей. Расчет топологии и электрических характеристик РИМ проводился с использованием метода конечных элементов. При этом учитывались отличие акустических свойств

алюминия в виде тонких пленок от монокристаллического образца и рассеяние энергии ПАВ в объем. Проводится сравнение результатов экспериментального исследования РИМ с теоретическими расчетами, отмечается удовлетворительное согласие характеристик РИМ. Дается объяснение некоторого расхождения результатов.

В третьей главе анализируются характеристики прохождения ПАВ через фононный кристалл с учетом пьезоэлектрических свойств подложки и влияния приемо-передающих встречно-штыревых преобразователей на амплитудно-фазовые характеристики. Численно с помощью метода конечных элементов для трехмерной модели фононного кристалла исследуется образование полос непропускания ПАВ в периодической решетке цилиндрических никелевых столбиков различной толщины на пьезоэлектрической подложке, и сравниваются данные расчета с экспериментальными результатами. Также в данной главе исследованы возможные характеристики периодических решеток оксидных линий, образованных при воздействии зондом сканирующего атомно-силового микроскопа на пленки никеля, и произведена оценка изменения акустических свойств структуры при приложении постоянного магнитного поля.

В заключении кратко сформулированы основные выводы и результаты работы. Отмечается, что цель проведенной работы, указанная в начале работы и определившая направление и методы исследования, достигнута.

В приложении приводится список использованных в диссертации сокращений.

В целом диссертация выполнена на высоком научном уровне, содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

При прочтении диссертационной работы были сделаны перечисленные ниже замечания.

1. Следует отметить некоторые погрешности в оформлении диссертационной работы. В тексте на стр. 6 неверно указана полоса

безлицензионного диапазона радиочастот для аппаратуры общего назначения.

2. На стр. 22 повторяется абзац текста приведенный ранее на стр. 21.

3. Там же на стр. 22 указывается, что определяется конкретный момент времени нахождения импульса ПАВ в пространстве между ВШП и ОС, в то время как из самого текста и рис. 1.5 следует, что импульс находится в этой области пространства в течение некоторого интервала времени.

4. На стр. 33 делается вывод о непропорциональном увеличении коэффициента отражения с ростом количества элементов в отражательной структуре на основе расчетов для двух значений числа элементов. Но, очевидно, что по двум точкам нельзя сделать вывод о линейности или нелинейности зависимости.

5. В тексте на стр. 34, поясняющем рис. 1.14, на котором присутствуют штриховые и пунктирные линии, штриховая линия ошибочно названа пунктирной.

6. Автор в работе неоднократно использует термин «тяжелые металлы» (например, на стр. 29, 40, 49). Однако это определение не является строгим и однозначным. Следовало бы, как ясно из текста работы, использовать термин «материалы с большой плотностью». Справедливости ради отмечу, что эта погрешность исправлена диссертантом при формулировке положений выносимых на защиту.

7. В выводе на стр. 41 утверждается, что электроды из золота малопригодны для использования в устройствах на ПАВ в диапазоне частот свыше 2 ГГц. Однако при этом не указаны критерии, которые определили конкретную верхнюю границу частот в 2 ГГц.

8. В выводе к главе 1 на стр. 49 утверждается об интенсивном рассеянии энергии в объем для отражателей из золота и молибдена. Но в тексте главы 1 ни разу не упоминается молибден и никакие расчетные данные для него не приводятся.

9. На стр. 64 говорится, что диаграмма Смита, приведенная на рис. 2.13б, “демонстрирует хорошее согласование изготовленной метки на 50 Ом с согласующей индуктивностью 2 нГн”. Вероятно, автором имелось в виду, что изготовленная метка с такой дополнительной индуктивностью хорошо согласуется с передающим СВЧ трактом.

10. На стр. 73 есть фраза: “Отметим, что в данной работе исследовались только на поверхностных модах, поэтому в слое на дне ячейки было задано нарастающее по глубине затухание”. Остается только догадываться, что же исследовалось.

11. Там же указывается: “Предложенный в данной главе прием позволяет также подавить возможные отражения от нижней грани подложки”. Какой прием и в чем он состоит, не конкретизируется.

12. На рис. 3.11 (стр. 85), состоящем из четырех фрагментов, не промаркированы буквами, указанными в подрисуночной подписи, эти четыре фрагмента.

13. На рис. 3.15 (стр. 90) имеются две штриховые линии и нет пунктирной линии, в то же время в подрисуночной подписи к рисунку есть ссылки на штриховую линию для толщины оксидной линии 3.5 нм и пунктирную линию для толщины оксидной линии 5.0 нм.

Большинство сделанных замечаний относится к техническим погрешностям оформления. В целом же отмеченные выше замечания носят достаточно частный характер и не снижают общего положительного впечатления о диссертационной работе.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа «Взаимодействие поверхностных акустических волн с неоднородностями, сравнимыми с длиной волны» отвечает требованиям паспорта специальности 01.04.03 – Радиофизика и п.7 Положения о порядке присуждения учёных степеней, а именно является научно-квалифицированной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для радиофизики, а ее автор, С.С. Янкин, заслуживает присуждения ученой

