

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Янкина Сергея Сергеевича

«Взаимодействие поверхностных акустических волн с неоднородностями, сравнимыми с длиной волны», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «радиофизика».

Распространение поверхностных акустических волн (ПАВ) вдоль поверхности пьезоэлектрических кристаллов, содержащих неоднородности - предмет многочисленных исследований как у нас в стране, так и за рубежом. Научное значение этих исследований состоит в получении информации об акустических свойствах новых твердотельных структур сложной формы и неоднородного состава, которые могут быть изготовлены только с привлечением самых современных технологий. Практический интерес таких исследований заключается в поиске новых возможностей улучшения рабочих характеристик акустоэлектронных устройств различного назначения.

В связи с этим тема и цель диссертации С.С.Янкина представляются **актуальными**, как с научной, так и с практической точек зрения.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемых сокращений и списка литературы. Теоретическая часть всех глав работы базируется на известном методе конечных элементов, экспериментальная – на современных технологических и измерительных методиках. В качестве базового пьезоэлектрического кристалла при расчетах и измерениях выбран наиболее распространенный, промышленно выпускаемый  $\text{LiNbO}_3$  повернутого  $128^\circ\text{YX}$ -среза.

*В первой главе диссертации* в предположении наличия поглощающих слоев по краям и дну кристалла проведен теоретический анализ возбуждения, распространения, отражения и рассеяния импульсов ПАВ от единичных металлических отражателей, периодических металлических отражателей и периодических прямоугольных канавок и выступов с учетом

различия как их упругих свойств, так и закоротки пьезоэлектрических полей на поверхности ниобата лития. Для отражателей всех типов определены двумерные картины полей ПАВ и зависимости коэффициентов отражения, прохождения и объемного рассеяния от геометрических размеров отражателей, сравнимых по высоте с длиной волны. На примере единичного металлического бесконечно тонкого отражателя проведена успешная проверка результатов расчета с известными данными других авторов, полученными иным (аналитическим) методом.

**К новым и наиболее ценным результатам первой главы, на мой взгляд, относятся:**

- 1) зависимости коэффициентов отражения ПАВ от высоты выступов и канавок, позволяющие управлять значением коэффициента в широких пределах;
- 2) достижимость высокого коэффициента отражения ПАВ не только для узких, но и для более широких, а значит более технологичных, электродов, что особенно важно для ПАВ-устройств ГГц-диапазона;
- 3) эффективное рассеяние ПАВ в объем на мелких (по сравнению с длиной волны) канавках, которое может быть использовано для взаимной трансформации поверхностных и объемных акустических волн в акустоэлектронных устройствах, использующих волны обоих типов.

*К недостаткам первой главы следует отнести:*

- 1) ошибку на стр.29 при ссылке на рис.1.9,б, где перепутан коэффициент отражения с коэффициентами рассеяния и прохождения;
- 2) отсутствие информации о материале отражающих электродов на рис.1.11;
- 3) ошибка в формуле (1.11), где в знаменателе вместо  $t_2$  должно стоять  $t_1$ .

*Вторая глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию радиочастотных идентификационных меток (РИМ) на ПАВ с максимально близкими амплитудами на частотах порядка 6 ГГц, когда толщина отражателей (алюминиевые электроды)*

составляет более 6 процентов от длины волны и когда необходимо одновременно минимизировать рассеяние ПАВ в объем, обеспечить малые омические потери в сверхтонких электродах, сохранить амплитуды кодовых импульсов на уровне порядка -50 дБ и амплитуды стартового и конечного импульсов – на 3 дБ более. Теоретическое исследование этой главы проведено с помощью комбинации известных методов конечных и граничных элементов.

**Новыми и наиболее ценными научными результатам второй главы являются:**

1) Расчетные характеристики отражательной структуры (ширина и толщина электродов, количество элементов в группах отражателей), обеспечивающих требуемые амплитуды кодовых импульсов и их различие;

2) Первая в мире экспериментальная реализация реального устройства РИМ на ПАВ в диапазоне частот 5.65- 6.425 ГГц и уровнем кодовых импульсов на уровне  $-55 \text{ дБ} \pm 1 \text{ дБ}$ ;

3) Количественные данные об изменениях характеристик устройства при изменении материальных констант отражающих элементов.

*К недостаткам главы следует отнести:*

1) Отсутствие данных об используемых материальных константах пленок золота.

2) Отсутствие в тексте «разработанного и оптимизированного технологического маршрута» (с.62).

3) Ошибку в размерности частоты в названии второй главы.

*Третья глава* диссертации посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию акустических характеристик фоновых кристаллов в виде двумерной периодической решетки цилиндрических никелевых столбиков и одномерной решетки в виде периодических полос.

**Новыми научными результатами третьей главы считаю:**

1) Расчетные и измеренные зависимости характеристик пропускания фоновых кристаллов от высоты и количества отражающих элементов;

2) Изготовление отражательных структур с помощью локального анодного окисления, позволившего получить элементы размерами до десятков нанометров;

3) Данные о влиянии постоянного магнитного поля на форму и положение запрещенных зон пропускания фононного кристалла в виде одномерной решетки из оксидных полос никеля.

*К недостаткам главы относятся*

1) Неверное утверждение о поляризации ПАВ в  $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$  «строго в сагиттальной плоскости» (стр.77). Действительно, на поверхности кристалла соотношение продольной, сдвигово-горизонтальной и вертикальной компонент смещения волны составляет 1 : 0.067 и 1.1, но уже на глубине 0.2 длины волны оно равно 0.007, 0.16 и 1.0 – то есть, вообще говоря, волна является трехпарциальной;

2) Отсутствие обозначений «а, б, в, г» на рис.3.11;

3) Отсутствие информации об учете отражения ПАВ от границы свободная поверхность-пленка никеля, которая закорачивает поверхность пьезокристалла и меняет скорость распространения волны (рис.3.14);

4) Отсутствие ссылки или данных о материальных константах оксида никеля, используемых в расчетах (с.89).

Недостатком работы является отсутствие ссылок на некоторые известные работы отечественных ученых. Так, в диссертации не упоминается одна из первых в мире и первая в СССР монография А.И.Морозова, В.В.Проклова, Б.А.Станковского, А.Д.Гингиса «Пьезополупроводниковые преобразователи и их применение», М., Энергия, выпущенная в 1973 году.

Однако отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы. Она вносит существенный вклад в ту область акустоэлектроники, которая связана с распространением поверхностных акустических волн в средах с периодическими, одномерными

и двумерными отражательными структурами, размер которых сравним с длиной акустической волны. Автором получен ряд новых важных научных результатов, имеющих практическую направленность, что позволяет высоко оценить квалификацию С.С. Янкина как физика. Положения, выносимые на защиту, хорошо обоснованы, новы и достоверны. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК, доложены на многочисленных всероссийских и международных конференциях. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание.

Считаю, что диссертационная работа Янкина С.С. «Взаимодействие поверхностных акустических волн с неоднородностями, сравнимыми с длиной волны» соответствует паспорту специальности 01.04.03 – Радиоп физика, отвечает требованиям пп. 9-14 действующего «Положения о присуждении учёных степеней» (утверждено Постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г.), предъявляемым к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор С.С. Янкин заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиоп физика.

Главный научный сотрудник  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Института радиотехники и электроники  
им. В.А.Котельникова РАН,  
доктор физико-математических наук



Анисимкин  
Владимир Иванович

Адрес: 125009, г. Москва, ул. Моховая, д.11, корп.7  
Телефон: 8(495) 629-72-83  
E-mail: [anis@cplire.ru](mailto:anis@cplire.ru)

Подпись г.н.с., д.ф.-м.н. В.И.Анисимкина заверяю.  
Ученый секретарь ИРЭ ИМС.В.А.Котельникова РАН,  
к.ф.-м-н.



Чусов  
Игорь Иванович