

На правах рукописи



Свечников Илья Геннадиевич

**Влияние анизотропной дифракции гиперзвуковых пучков
на частотные характеристики
акустической линии задержки СВЧ**

01.04.03. – радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» на кафедре физики твердого тела факультета нано- и биомедицинских технологий

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **Сучков Сергей Германович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор **Зайцев Борис Давыдович**, ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Саратовский филиал)», заведующий лабораторией физической акустики

кандидат физико-математических наук, доцент **Никишин Евгений Леонардович**, ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.», доцент кафедры «Физика»

Ведущая организация: Закрытое акционерное общество "Научно-производственный центр "Алмаз-Фазотрон" (г. Саратов)

Защита диссертации состоится 27 декабря 2013 г. в 18-00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 на базе Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, Саратов, ул. Астраханская 83, корпус 3, Большая физическая аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени В.А. Артисевич Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского.

Автореферат разослан «26» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аникин Валерий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Современные тенденции увеличения разрешающей способности и дальности действия бортовых и стационарных радиолокационных систем с активной фазированной антенной решеткой (АФАР) и систем радиопротиводействия (РПД) отражаются на тенденциях развития элементной базы. В современных радиотехнических системах связи, радиомониторинга, радиолокации и навигации предъявляются все более высокие требования к расширению полосы частот (сверхширокополосность) и снижению массогабаритных параметров. В последнее время возникла необходимость создания систем, обеспечивающих одновременную работу на нескольких частотах при широкоугольном электрическом сканировании АФАР. В связи с этим, в настоящее время для построения таких систем требуются акустические линии задержки (АЛЗ) на объёмных акустических волнах (ОАВ) с рабочей полосой частот в несколько октав ($\Delta f/f_0 > 100\%$) в сантиметровом диапазоне длин волн. Такие АЛЗ позволяют обрабатывать СВЧ сигналы с точностью и быстродействием, недостижимым в обозримом будущем для цифровых систем.

Современные направления развития АЛЗ СВЧ на ОАВ, обусловленные требованиями к системе в целом, заключаются в увеличении центральной рабочей частоты и полосы рабочих частот. Рост рабочей частоты неизбежно приводит к увеличению вносимых потерь АЛЗ.

В настоящее время исследованиями и разработками АЛЗ СВЧ на ОАВ занимаются в США (фирмы TELEDYNE, AnarenMicrowave), в России (предприятия ОАО "Радар ММС" (Санкт-Петербург), ОАО "НПП "Контакт" (Саратов)). Существуют каталоги выпускаемых АЛЗ СВЧ [1-4] с относительными рабочими полосами частот не более 70 %.

Поэтому, для создания новых АЛЗ, удовлетворяющих современным требованиям, необходимо было провести на основе точных методов расчета и измерений исследования физических процессов, протекающих в сверхширокополосных АЛЗ, и провести поиск возможных путей минимизации потерь задержанного сигнала и снижения уровня паразитных сигналов.

В связи с этим, в диссертационной работе проводятся теоретические и экспериментальные исследования в указанном направлении для получения конкретных результатов по повышению эффективности преобразования электромагнитной волны в акустическую в многоэлементных пьезопреобразователях (МЭПП), по увеличению дифракционных потерь паразитных сигналов многократного прохождения без увеличения потерь основного задержанного сигнала, по выработке научно обоснованных пределов для отклонения физических и геометрических параметров элементов АЛЗ и созданию средств их контроля.

Целью данной диссертационной работы является разработка новых и уточнение известных теоретических методов анализа физических процессов в элементах АЛЗ СВЧ, проведение их экспериментальной проверки, а также выработка новых конструктивных и технологических решений для снижения потерь задержан-

ного сигнала и уровня паразитных сигналов в СВЧ АЛЗ в сверхширокой полосе частот (более 100%).

Научная новизна:

- Впервые предложена математическая модель, описывающая влияние непьезоактивного слоя диэлектрика, внесенного между электродом и пьезоэлектриком, на эффективность преобразования МЭПП;
- Впервые построен метод расчета анизотропной дифракции акустической волны, возбужденной МЭПП в кристаллическом звукопроводе АЛЗ, позволяющий с высокой точностью рассчитать дифракционные потери в звукопроводе, а также научно обосновать требования к допускам в позиционировании многоэлементных пьезопреобразователей на противоположных гранях звукопровода;
- Впервые проведен анализ влияния на АЧХ АЛЗ отклонения кристаллографической оси от геометрической оси звукопровода, который позволил научно обосновать требования к допускам на это отклонение;
- Обнаружена возможность подавления паразитных сигналов многократного прохождения в МЭПП при уменьшении расстояния между элементарными преобразователями до величины, сравнимой с длиной гиперзвуковой волны;
- Впервые с учетом анизотропии звукопровода и дифракции гиперзвуковых пучков построен метод расчета потерь в АЛЗ с МЭПП с непараллельными торцами звукопровода;
- Впервые получены результаты по учету влияния смещения приемного преобразователя относительно передающего на АЧХ АЛЗ;
- Разработан способ и устройство для лазерного зондирования торцевых поверхностей звукопроводов, вращающихся в процессе зондирования, которые позволяют по картине рассеяния определить непараллельность и неплоскостность торцов, а также обосновать требования к геометрическим параметрам звукопровода.

Достоверность полученных в диссертации результатов основана на строгой постановке и решении задач пьезоакустики и подтверждается хорошим соответствием в предельных случаях (отсутствие анизотропии) результатов расчетов с теоретическими результатами других авторов, а также с экспериментальными результатами, полученными автором.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Введение непьезоактивного диэлектрического слоя в МЭПП сантиметрового диапазона между слоем полупроводникового пьезоэлектрика и металлическим электродом позволяет повысить коэффициент преобразования СВЧ электромагнитной волны в гиперзвуковую волну.
- Уровень паразитных сигналов многократного прохождения в АЛЗ снижается при уменьшении расстояний между элементарными преобразователями в МЭПП до величины, сравнимой с длиной волны ОАВ.
- Когерентность частотных составляющих сигнала с широким спектром при операции задержки его во времени в сверхширокополосной АЛЗ можно обеспечить интегральной структурой пьезопреобразователя в виде 2D фононного кристалла.

– Лазерное зондирование торцевых поверхностей звукопроводов АЛЗ, вращающихся в процессе зондирования, позволяет по картине рассеяния лазерного пучка одновременно определить непараллельность и неплоскостность торцов.

Практическая ценность работы. Результаты, полученные в диссертационной работе, уже используются при разработке АЛЗ на ОАВ СВЧ диапазона для улучшения их радиотехнических характеристик и при их производстве для увеличения процента выхода годных изделий.

На рисунке 1 представлены АЛЗ СВЧ на ОАВ, использующие результаты данной диссертационной работы, включающие новые конструктивные элементы и новые технологические решения, которые были разработаны и выпускаются в ОАО "НПП "Контакт" (г. Саратов).

Полученные автором результаты также могут быть использованы для миниатюризации перспективных АЛЗ СВЧ сигналов в системах радиолокации и РПД, для обработки сигналов в системах связи с широким спектром в миллиметровом диапазоне длин волн. Лабораторная установка контроля качества кристаллических звукопроводов постоянно эксплуатируется на предприятии ОАО «НПП «Контакт» для входного контроля качества кристаллических звукопроводов из лейкосапфира, что позволило повысить процент выхода годных изделий с 3% до 30%.

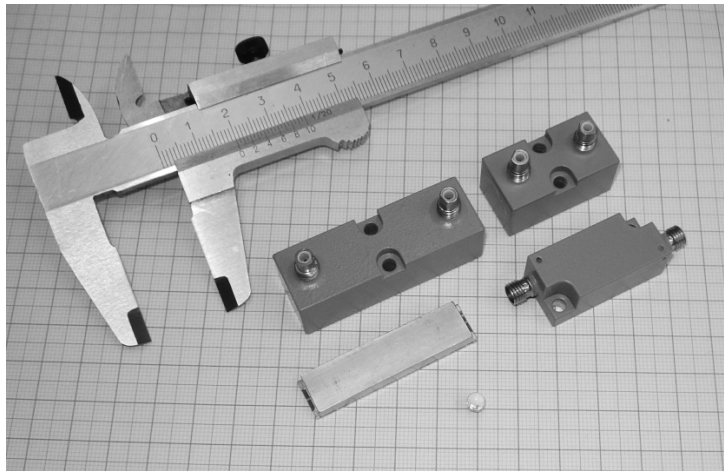


Рисунок 1 – Акустические линии задержки СВЧ, разработанные при участии автора в ОАО «НПП «Контакт»

Личный вклад автора. Автор участвовал в разработке алгоритмов и программ для расчета многоэлементного пьезоэлектрического преобразователя, расчете дифракционных характеристик МЭПП, а также им проводилось изготовление и измерение параметров СВЧ АЛЗ, сопоставление полученных экспериментальных и расчетных данных и анализ причин их расхождения. Постановка задач, выбор методов решения и обсуждение полученных результатов были проведены автором совместно с научным руководителем. Создание лабораторной установки и получение экспериментальных результатов проведено под руководством научного руководителя на материальной базе ОАО «НПП «Контакт». Разработка методик измерения принадлежит автору.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались:

- на V Саратовском салоне инноваций, изобретений и инвестиций, прошедшем с 8 по 10 февраля 2010 г. (проект награжден бронзовой медалью);
- на международной конференции Days on Diffraction, прошедшей с 28 мая по 1 июня 2012 г. в Санкт-Петербурге;
- на заседании XXV сессии Российского акустического общества в рамках Сессии Научного совета по акустике РАН, прошедшем 17-20 сентября 2012 г. в г. Таганроге (доклад был награжден дипломом за лучший доклад молодого специалиста в секции «Акустоэлектроника»);
- на юбилейной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 70-летию ФГУП «НПП «Исток», прошедшей 17-18 апреля 2013 г. в г. Фрязино.

Публикации. Результаты исследований представлены в 9 публикациях [1–9], в том числе в двух изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки РФ для публикации результатов докторских и кандидатских диссертаций, в семи трудах российских и международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 114 страниц. Текст основной части диссертации занимает 86 страниц, включая 60 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 92 наименования и изложен на 10 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы, тенденции развития объекта исследований АЛЗ, необходимость работ каждой из глав диссертации. Сформулирована цель работы, отмечена научная новизна, приведены основные положения, выносимые на защиту, практическая ценность работы и личный вклад автора.

В **первой главе** описываются особенности моделирования многоэлементного пьезопреобразователя (МЭПП), обсуждаются достоинства и недостатки различных методов моделирования [5-7]. Приведены результаты влияния проводимости [8] пьезоэлектрической пленки в МЭПП на эффективность преобразования в нем. Омическое сопротивление тонкой пленки пьезоэлектрика R_p шунтирует пьезопреобразователь и уменьшает эффективность преобразования электромагнитного сигнала в акустический.

Для многоэлементного преобразователя с диапазоном рабочих частот 12 – 20 ГГц толщина пленки пьезоэлектрика уменьшается до 200 нм, а сопротивление пленки пьезоэлектрика составляет в этом случае $R_p \approx 1$ мОм. Тогда уменьшение эффективности преобразования составляет около 30 дБ. В работе предложен способ повышения эффективности преобразования путем введения слоя диэлектрика между электродом и пленкой пьезоэлектрика в МЭПП. Введение этого слоя уменьшает напряженность электрического поля в пьезоэлектрике и снижает эффективность преобразования, так как коэффициент электромеханической связи получает дополнительный множитель

$$\delta = \frac{\left(1 + \frac{d_d}{d_p}\right)}{\left(1 + \frac{\varepsilon_p d_d}{\varepsilon_d d_p}\right)}, \quad (1)$$

где d_p – толщина пьезоэлектрика; d_d – толщина непьезоактивного слоя; ε_p – диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрика; ε_d – диэлектрическая проницаемость непьезоактивного слоя.

Однако, устранение проводимости пьезоэлектрической плёнки повышает эффективность преобразования значительно больше, чем её снижение вследствие указанного эффекта. Это продемонстрировано расчетами сверхширокополосной АЧХ АЛЗ в диапазоне частот 2 – 12 ГГц с МЭПП, содержащим слой SiO_2 толщиной 40 нм и слой пьезоэлектрика с удельным сопротивлением $\rho=10^{-2}$ Ом·м, приведенными на рисунке 2, которые показали хорошее соответствие расчетной и измеренной АЧХ.

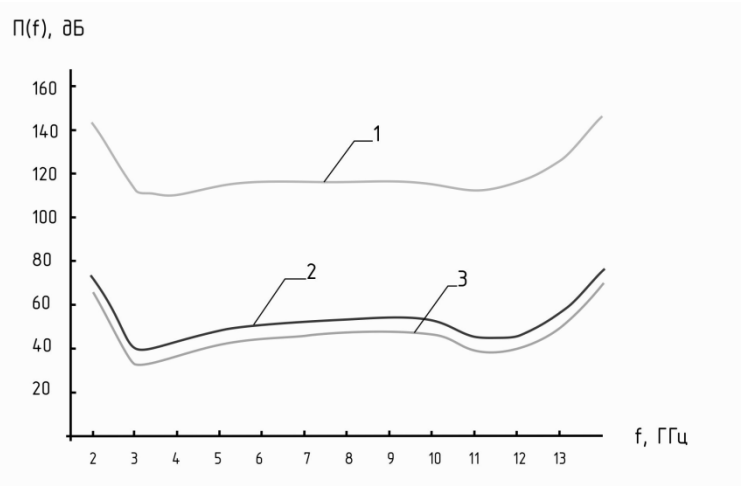


Рисунок 2 – Влияние введения слоя диэлектрика в МЭПП на АЧХ сверхширокополосной АЛЗ: 1 – экспериментальная АЧХ без SiO_2 ; 2 - экспериментальная АЧХ с пленкой SiO_2 ; 3 – расчетная АЧХ со справочными данными для объемных материалов

Для расширения полосы частот СВЧ АЛЗ впервые предложено в МЭПП использовать переменную толщину пьезоэлектрика. Такой МЭПП представляет собой фактически 2D фоннный кристалл (смотри рисунок 3), так как его частотные характеристики (области пропускания и подавления сигнала), как показано в главе 2, зависят от размеров в плоскости преобразователя.

Впервые предложено моделирование возбуждения гиперзвука таким фоннным кристаллом путем анализа эквивалентных схем, представленных на рисунках 4 и 5.

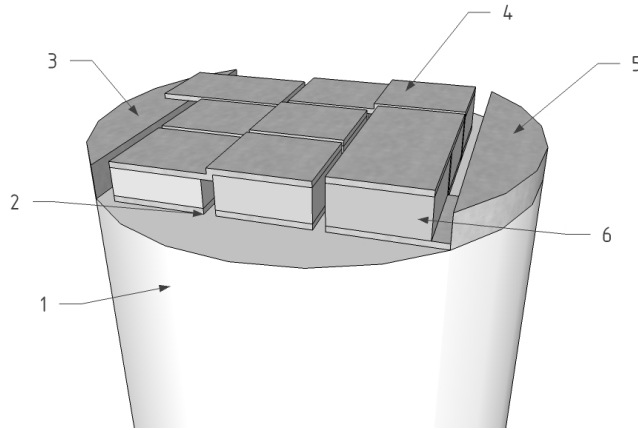


Рисунок 3 – МЭПП в виде 2D фонованного кристалла: 1 – звукопровод; 2 – нижние электроды; 3, 5 – контактные площадки; 4 – верхние электроды; 6 – слой пьезоэлектрика

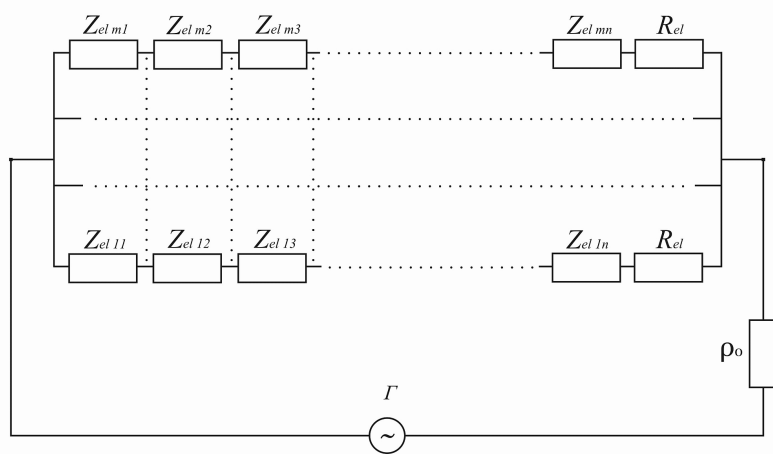


Рисунок 4 – Электрическая схема МЭПП с t параллельно соединенными ветвями по n элементов в каждой (Z_{elmn} – комплексный импеданс (m,n) -элемента преобразователя, R_{el} – импеданс подводящих электродов)

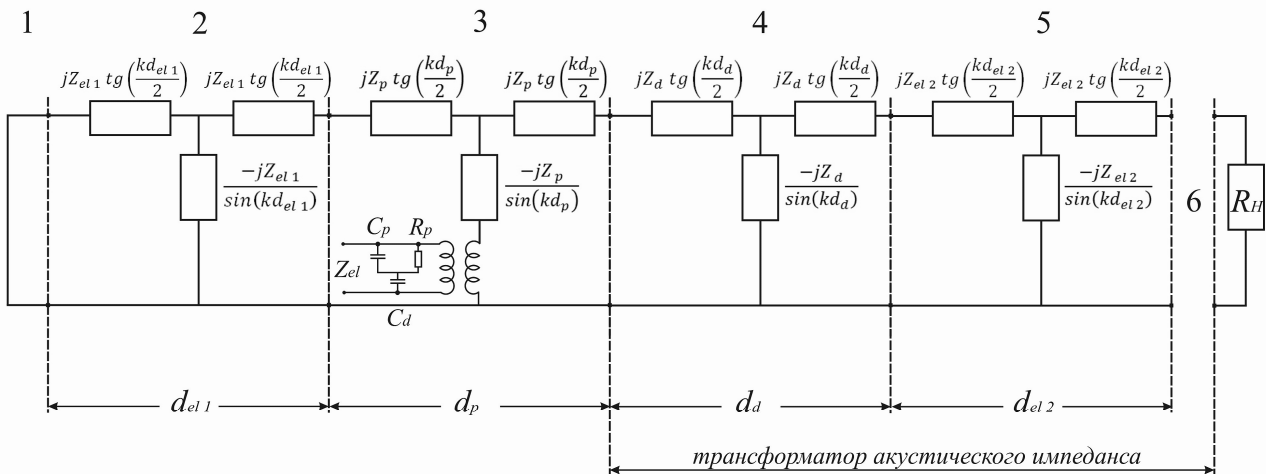


Рисунок 5 – Эквивалентная схема элемента МЭПП с акустическим согласованием: 1 – граница с вакуумом, 2 – электрод, 3 – пьезоэлектрик, 4 – диэлектрик, 5 – электрод, 6 – дополнительные слои трансформатора акустического импеданса, $R_n = \rho v_a$ – акустический импеданс звукопровода

Описана конструкция сверхширокополосной АЛЗ с временем задержки $\tau=0.5\text{мкс}$, схематически изображенной на рисунке 6. В этой АЛЗ используется 14-ти элементный МЭПП в виде 2D фононного кристалла. Она позволяет осуществить задержку СВЧ сигналов с шириной спектра $\Delta f/f \leq 160\%$ без существенных амплитудных и фазовых искажений.

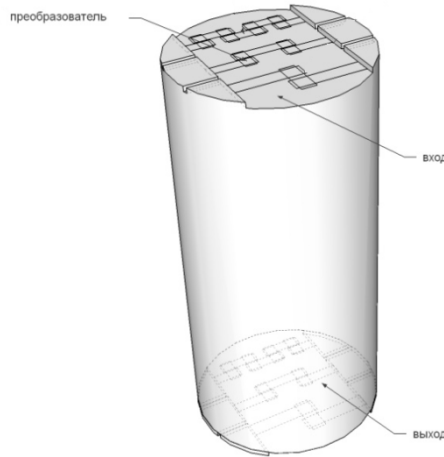


Рисунок 6 – Схематическое изображение сверхширокополосной АЛЗ

На рисунке 7 приведена АЧХ этой АЛЗ. Для сравнения, наиболее широкополосные приборы американской фирмы TELEDYNE MBH-1011, обладают шириной полосы в 70%, а потери основного задержанного сигнала превышают потери в разработанной линии на 15 дБ при идентичных временах задержки [9].

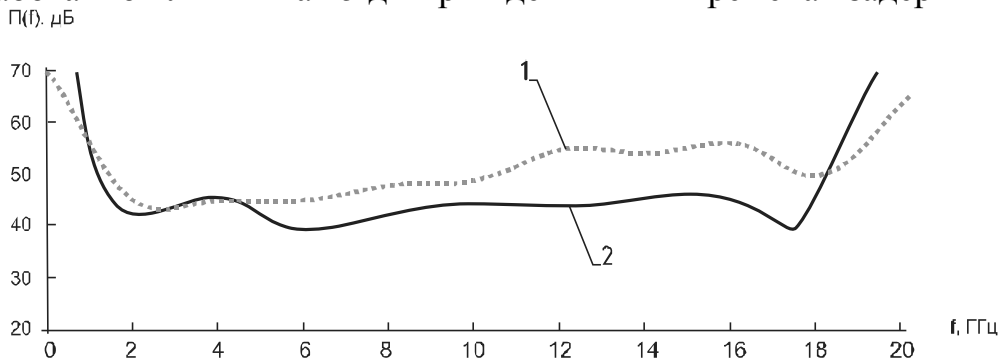


Рисунок 7 – Экспериментальная (1) и расчетная (2) АЧХ основного задержанного сигнала в сверхширокополосной АЛЗ

Во **второй главе** построен экономичный метод расчета дифракционных акустических полей, создаваемых МЭПП в анизотропном кристалле, применительно к АЛЗ с кристаллическим звукопроводом, обладающим анизотропией.

Методы расчета дифракционных акустических полей конечного по апертуре источника излучения известны давно [10,11]. Их численная реализация всегда представляла значительные трудности даже в изотропном случае и при современном уровне развития вычислительной техники. Это объясняется тем, что, в соответствии с принципом Гюйгенса, амплитуда дифрагированного акустического поля $U^{(1)}$ в точках (x_1, y_1) области приема D_1 , вычисляется как двойной интеграл по области источников D_0 :

$$U^{(1)}(x_1, y_1) = \iint_{D_0} A_0(x_0, y_0) G(x_1 - x_0, y_1 - y_0) dx_0 dy_0 \quad (2)$$

где $A_0(x_0, y_0)$ – функция распределения источников в области D_0 ,

$$G(x_1 - x_0, y_1 - y_0) = \frac{ikR - 1}{R^2} \cdot e^{ikR} \quad (3)$$

– функция Грина для акустического смещения продольной волны,

$$R = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + L_a^2}, \quad (4)$$

где L_a – длина звукопровода; $k = \omega/v_a$ – волновое число для ОАВ в направлении от точки (x_0, y_0) к точке (x_1, y_1) ; v_a – скорость продольной ОАВ, которая меняется ввиду анизотропии среды с изменением направления.

Предложенный алгоритм расчета акустического поля входного МЭПП в плоскости выходного МЭПП основан на суммировании, в соответствии с принципом Гюйгенса, в одной точке области приема D_l волн от элементарных источников, на которые разбивается область излучения D_0 :

$$U^{(1)}(i_1, j_1) = \sum_{i_0=1}^{N_0} \sum_{j_0=1}^{N_0} A_0(i_0, j_0) G(i_1 \Delta x_1 - i_0 \Delta x_0, j_1 \Delta y_1 - j_0 \Delta y_0) \quad (5)$$

Функция распределения источников A_0 , при расчете дифрагированного поля от одного преобразователя, берется равной единице для каждого элементарного источника. Если рассчитывается поле от многоэлементного преобразователя, то при задании A_0 учитываются фазовые сдвиги между преобразователями, например, в последовательно соединенных преобразователях фазовый сдвиг близок к 180° и амплитуды элементарных источников отличаются знаком.

Экономичность данного алгоритма, по сравнению с использованием стандартных программ интегрирования, заключается в ограничении снизу шагов интегрирования по координатам источников физически оправданной величиной порядка $1/10$ длины ОАВ.

Потери сигнала в АЛЗ с многоэлементными входным и выходным преобразователями, возникающие за счет дифракции (расхождения) и интерференции акустических пучков, определяются в зависимости от частоты f по формуле:

$$A_d(f) = -10 \cdot \lg \left(\frac{P_1}{P_0} \right) = -20 \cdot \lg \left(\frac{\langle U^{(1)} \rangle}{U^{(0)}} \right) \quad (6)$$

где P_0 – поток энергии акустических волн, возбужденный входным преобразователем; P_1 – поток энергии акустических волн, достигший выходного преобразователя; $U^{(0)}$ – амплитуда смещения акустической волны в плоскости излучения; $\langle U^{(1)} \rangle$ – средняя по поверхности преобразователя амплитуда смещения акустической волны в плоскости приема, определяемая по формуле:

$$\langle U^{(1)} \rangle = \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{1}{S_{tr}^{(n)}} \sum_{k=1}^{N_0} \sum_{m=1}^{N_0} U_{n,km}^{(1)} \Delta S_{km} \right\} \quad (7)$$

где N – количество преобразователей в области приема D_1 ; $S_{tr}^{(n)}$ – площадь n -го элементарного преобразователя; ΔS_{km} – площадь малого элемента преобразователя с центром в точке (x_k, y_m) , соответствующая элементарному источнику; N_0 – число разбиений области входного преобразователя D_0 ; $U_{n,km}^{(1)}$ – амплитуда дифракционного поля в точке (x_k, y_m) n -го преобразователя, определяемая по формуле (5).

На рисунке 8 представлена функция распределения амплитуды дифракционного поля для частот 3, 8 и 12 ГГц на 14 элементарных преобразователях выходного преобразователя АЛЗ, созданного таким же входным преобразователем.

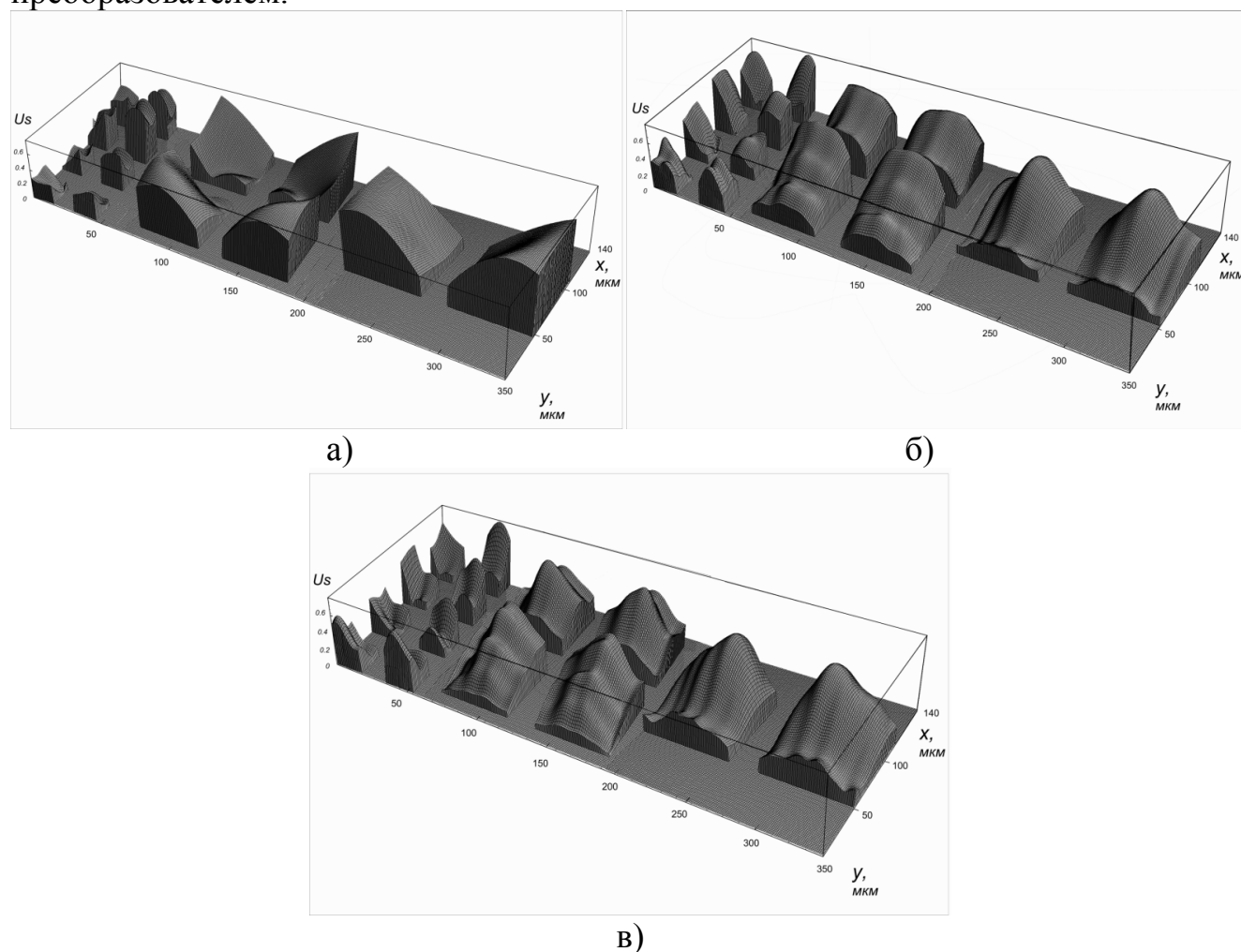


Рисунок 8 – Распределение дифракционного поля на выходном МЭПП:
а) 3 ГГц; б) 8 ГГц; в) 12 ГГц

Описанный выше алгоритм, благодаря учету анизотропии фазовой скорости продольных акустических волн в кристаллах, позволяет с достаточной точностью рассчитать также изменения вносимых потерь $A_d(f)$ (6) при отклонении кристаллографической оси от геометрической оси звукопровода, а также при смещении топологии входного и выходного преобразователей относительно друг друга на торцах звукопровода.

Далее во второй главе описывается предложенный впервые способ подавления паразитных сигналов многократного прохождения в АЛЗ.

На рисунках 9, 10 приведены зависимости полных потерь сигнала в АЛЗ,

рассчитанные, как сумма дифракционных потерь и потерь преобразования МЭПП. Как видно из этих рисунков, результаты расчетов находятся в хорошем соответствии с измерениями полных потерь в приборе. В случае уменьшения зазора между элементами пьезопреобразователя до величины порядка длины волны, ослабление паразитных сигналов трех- и пятикратного прохождения увеличивается до 15 дБ.

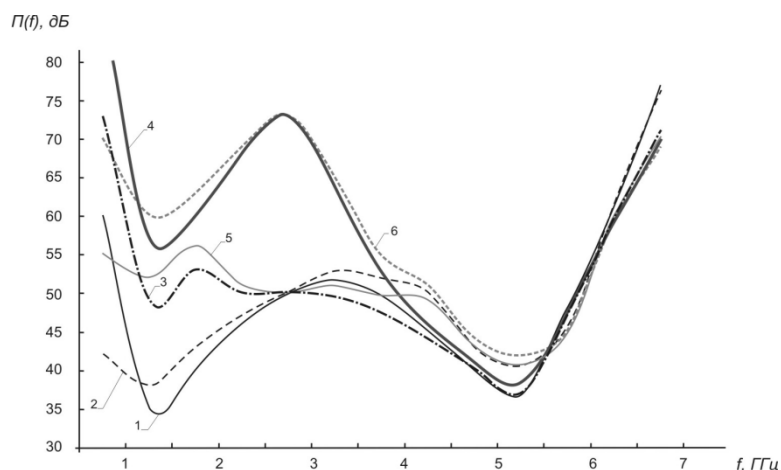


Рисунок 9 – Зависимости полных потерь сигнала в АЛЗ при зазоре $g=50$ мкм: 1, 2 – расчет и эксперимент для основного задержанного сигнала; 3, 5 – расчет и эксперимент для сигнала трехкратного прохождения; 4, 6 – расчет и эксперимент для сигнала пятикратного прохождения

Из приведенных результатов следует, что уменьшение расстояния между элементарными преобразователями МЭПП до расстояния, сравнимого с длиной акустической волны в среде распространения (звукопроводе), приводит к тому, что в результате интерференции дифрагированных гиперзвуковых пучков амплитуда акустических колебаний сигналов многократного прохождения на приемном МЭПП существенно снижается.

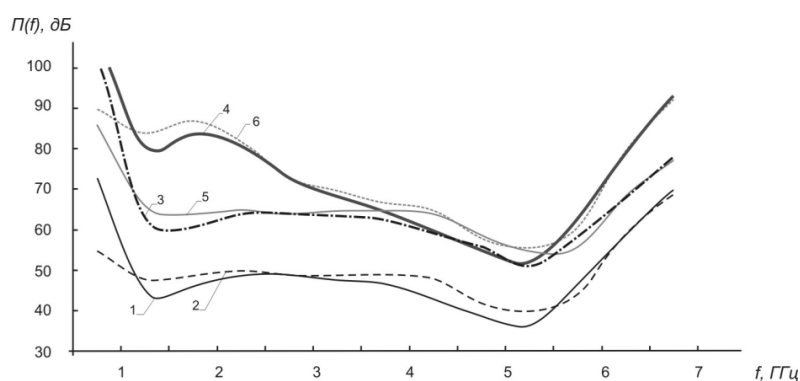


Рисунок 10 – Зависимости полных потерь сигнала в АЛЗ при зазоре $g=5$ мкм: 1, 2 – расчет и эксперимент для основного задержанного сигнала; 3, 5 – расчет и эксперимент для сигнала трехкратного прохождения; 4, 6 – расчет и эксперимент для сигнала пятикратного прохождения

Это объясняется тем, что с увеличением расстояния от источника ОАВ (элементарного преобразователя) до плоскости приёма, фронт волны на приёмном МЭПП всё более приближается к плоскому фронту. Учитывая, что элементарные

преобразователи МЭПП включены противофазно, очевидно, что при бесконечной длине звукопровода сигнал с выходного преобразователя будет равен нулю. Сигналы тройного, пятикратного и более прохождений проходят расстояние от источника в соответствующее число раз больше, то есть в 3, 5 и более раз, чем основной задержанный сигнал. Поэтому, фронт волны у сигнала троекратного прохождения (СТП) ближе к плоскому фронту, чем фронт основного сигнала, а у сигнала пятикратного прохождения (СПП) фронт "более плоский", чем у основного сигнала и СТП. Вследствие этого, чем меньше расстояние между элементарными преобразователями, тем меньше сдвиг фазы волны, пришедшей на соседние элементарные преобразователи, и, следовательно, сдвиг фаз электрического сигнала от них ближе к 180° , что означает уменьшение выходного сигнала МЭПП.

Кроме этого, во второй главе исследована зависимость АЧХ от угла отклонения θ кристаллографической оси Z (оси симметрии C_3 кристалла сапфира) от геометрической оси звукопровода. Показано, что при $\theta > 1^\circ$ параметры АЛЗ значительно ухудшаются.

Определена допустимая точность позиционирования преобразователей на противоположных торцах звукопровода друг напротив друга при производстве линий задержки «на проход». Величина рассовмещения входного и выходного преобразователей не может превышать 10% от размера элементарного преобразователя. При этом АЧХ прибора изменяется в допустимых пределах.

В **третьей** главе алгоритм, описанный во второй главе, дополнен для учета непараллельности граней звукопровода. При нахождении амплитуды смещения акустической волны в плоскости приема в выражение (5) подставляется функция Грина, построенная таким образом, что значение радиус-вектора имеет добавку, соответствующую величине непараллельности плоскостей излучения и приема, и имеет вид:

$$R' = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + \left(L + tg\alpha \cdot \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \right)^2} \quad (8)$$

В результате впервые было установлено, что в широкой полосе частот непараллельность граней звукопровода в АЛЗ с МЭПП приводит к существенному увеличению изрезанности АЧХ АЛЗ. В соответствии с полученными данными определена величина допустимой непараллельности граней звукопровода для применения в современных АЛЗ СВЧ, которая не должна превышать $1'$.

Для получения достоверных расчетных данных о характере влияния непараллельности торцов на форму АЧХ, непараллельность торцов каждого кристалла необходимо измерять с точностью не хуже чем $10''$. С этой целью разработан способ и устройство для лазерного зондирования торцевых поверхностей звукопроводов, вращающихся в процессе зондирования, которые позволяют по картине рассеяния лазерного пучка определить непараллельность и неплоскостность торцов, а также обосновать требования к геометрическим параметрам звукопровода.

В **заключении** отмечено, что цель проведенной работы, сформулированная в начале работы и определившая направление и методы исследования, достигнута.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Впервые установлено, что введение непьезоактивного слоя в МЭПП между слоем пьезоэлектрика и металлическим электродом позволяет повысить коэффициент преобразования СВЧ электромагнитной волны в гиперзвуковую волну.

Разработана математическая модель для расчета электрических характеристик МЭПП в виде 2D фононного кристалла любой сложности, позволяющая с достаточной для практических применений точностью рассчитывать электрические параметры перспективных приборов на ОАВ в СВЧ диапазоне.

Предложена конструкция сверхширокополосной АЛЗ, в которой используется 14-ти элементный МЭПП в виде 2D фононного кристалла, позволяющая осуществить задержку сверхширокополосных СВЧ сигналов с шириной спектра $\Delta f/f \leq 160\%$ без существенных амплитудных и фазовых искажений. Для сравнения, наиболее широкополосные приборы американской фирмы TELEDYNE MBH-1011, обладают шириной полосы в 70%, а потери основного задержанного сигнала превышают потери в разработанной линии на 15 дБ при идентичных временах задержки [13].

Предложен новый экономичный метод расчета дифракционных акустических полей применительно к АЛЗ с кристаллическим звукопроводом, обладающим анизотропией.

Впервые предложен способ подавления паразитных сигналов многократного прохождения в АЛЗ, суть которого заключается в том, что уменьшение расстояния между элементарными преобразователями МЭПП до расстояния, сравнимого с длиной акустической волны в среде распространения (звукопроводе), приводит к тому, что в результате интерференции дифрагированных гиперзвуковых пучков, амплитуда акустических колебаний сигналов многократного прохождения на приемном МЭПП существенно снижается.

Определена допустимая величина угла θ отклонения от кристаллографической оси Z (оси симметрии C_3 кристалла сапфира) от геометрической оси звукопровода $\theta = 1^\circ$.

Определена допустимая точность позиционирования преобразователей на противоположных торцах звукопровода друг напротив друга при производстве линий задержки «на проход». Величина рассовмещения входного и выходного преобразователей может достигать 10% от размера МЭПП без существенного влияния на АЧХ прибора.

Впервые было установлено, что непараллельность граней звукопровода в АЛЗ с МЭПП приводит к увеличению изрезанности АЧХ АЛЗ. В соответствии с полученными данными, определена величина допустимой непараллельности граней звукопровода для применения в современных АЛЗ СВЧ диапазона.

Разработан способ и устройство для лазерного зондирования торцевых поверхностей звукопроводов, вращающихся в процессе зондирования, которые позволяют по картине рассеяния определить непараллельность и неплоскостность торцов, а также обосновать требования к геометрическим параметрам звукопровода.

Определены пути дальнейшего развития данной работы в направлении исследований процессов совместного возбуждения и распространения сдвиговой и продольной мод ОАВ, что позволит оптимизировать конструкцию преобразователя для эффективного использования аномально низкого затухания сдвиговой моды ОАВ в кристаллических звукопроводах из алюмоитриевого граната, легированного эрбием, уменьшить потери полезного сигнала и повысить до 40 ГГц рабочий диапазон АЛЗ.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Microwave BAWs. BAW Delay Lines // Teledyne Microwave Solutions [Электронный ресурс]: сайт. URL: <http://www.teledynemicrowave.com/index.php/resourcesdownloads/brochures/teledyne-microwave?view=category.html> (дата обращения: 12.06.2011). – Загл. с экрана.
2. Продукты и решения // Открытое акционерное общество "Научно-производственное предприятие "Радар ММС". [Электронный ресурс]: сайт. URL: <http://www.radar-mms.com/catalog/micro> (дата обращения: 12.06.2012). – Загл. с экрана.
3. Suchkov, S. G. Optimization of Mosaic Transducer of Longitudinal Acoustic Wave Considering the Anisotropic Diffraction // IEEE International Ultrasonics Symposium. - Munich, Germany; 8 – 11 October, 2002. – P. 110-116.
4. Камишкерцев, В.П. Сверхширокополосные акустические линии задержки СВЧ-сигнала для систем борьбы с терроризмом / В.П. Камишкерцев, А.А. Сергеев, В.К. Семёнов, С.Г. Сучков, Д.А. Усанов // Электроника и вакуумная техника: приборы и устройства. Технология. Материалы: материалы науч.-техн. конф. - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2007.
5. Морозов, А.И. Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств / А.И. Морозов, В.В. Проклов, Б.А. Станковский. - Москва: Радио и связь, 1981-1982. - 184 с., [21] ил.
6. Физическая акустика. Т. 1. Ч. А / под. ред. У. Мэсона // Пер. с англ. – Москва: Мир, 1966. – 542 с.: ил.
7. Kagawa, R. Finite Element Simulation of a Composite Piezoelectric Ultrasonic Transducer / R. Kagawa, D. Yukio, T. Yamabuchi // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, [Vol.26], no.2. – March, 1979. - P. 81-87.
8. Залесский, В.Б. Получение тонких пленок оксида цинка методом реактивного магнетронного распыления и исследование их электрических и оптических характеристик / В.Б. Залесский, Т.Р. Леонова, О.В. Гончарова, И.А. Викторов, В.Ф. Гременок, Е.П. Зарецкая // Физика и химия твердого тела [том 6], № 1, 2005. - С. 44-49. ISSN 1729-4428.

9. Microwave BAWs. BAW Delay Lines // Teledyne Microwave Solutions [Электронный ресурс]: сайт. URL: <http://www.teledynemicrowave.com/index.php/resourcesdownloads/brochures/teledyne-microwave?view=category.html> (дата обращения: 12.06.2011). – Загл. с экрана.
10. Ваганов, Р.Б. Основы теории дифракции : Современные физико-технические проблемы / Р.Б. Ваганов, Б.З. Каценеленбаум. - Москва: Наука, 1982. – 272 с.
11. Войтович, Н. Н. Обобщенный метод собственных колебаний в теории дифракции / Н. Н. Войтович, Б.З. Каценеленбаум, А. Н. Сивов. - Москва: Наука, 1971. – 416 с.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендуемых ВАК

1. Никитов, С.А. Дифракционные потери сигнала в СВЧ акустических линиях задержки с многоэлементными пьезопреобразователями / С. А. Никитов, С.Г. Сучков, В.П. Камишкерцев, И. Г. Свечников // Радиотехника и электроника. Том 57. №8. 2012. С. 925–929.
2. Nikitov, S. A. Diffraction Loss of the Signal in Microwave Acoustic Delay Lines / S. A. Nikitov, S.G. Suchkov, V. P. Kamishkertsev, I.G. Svechnikov // Journal of Communications Technology and Electronics. Vol. 57. No. 8. 2012. P. 848–852. ISSN 1064–2269.

Материалы конференций

3. **Свечников, И. Г.** Акустоэлектронная линия задержки с улучшенными параметрами / И. Г. Свечников, А. О. Степанов, М. О. Степанова // Электроника и вакуумная техника: приборы и устройства. Технология. Материалы : материалы науч.-техн. конф. – Саратов: Изд-во Сарат. Ун-та, 2009. Вып. 3.
4. Сучков, С.Г. Устройство контроля плоскостности и параллельности граней кристаллических звукопроводов СВЧ-акустических линий задержки / С.Г. Сучков, В.П. Камишкерцев, А.А. Сергеев, В.К.Семенов, Д.С. Сучков, **И. Г. Свечников** // 5-ый саратовский салон изобретений, инноваций и инвестиций : Науч. Изд. Саратов. 2010. Изд-во СГТУ. Ч. 2. С. 20 – 21. ISBN 978-5-7433-2238-1.
5. Сучков, С.Г. Модуль СВЧ М34938. Акустическая линия задержки с улучшенными параметрами / С.Г. Сучков, В.В. Муллин, В.К.Семенов, А.А.Сергеев, **И. Г. Свечников** // VI Саратовский салон изобретений, инноваций и инвестиций : Науч. Изд. Саратов, 2011. Ч. 1. С. 117 – 118.
6. **Svechnikov, I.G.** Anisotropic diffraction in acoustic delay lines with mosaic transducers / S.G. Suchkov, V. P. Kamishkertsev, I.G. Svechnikov // Days on Diffraction (DD). Conf. Public. SPb. 2012. P. 225 – 228. ISBN 978-1-4673-4418-0.

7. Сучков, С.Г. Подавление сигналов трехкратного и пятикратного прохождения в акустических линиях задержки / С.Г. Сучков, В.П. Камишкерцев, **И. Г. Свечников** // Физическая акустика. Нелинейная акустика. Распространение и дифракция волн. Акустоэлектроника. Геоакустика : сб. тр. науч. конф. / Сессия научного совета РАН по акустике и XXV сессия РАО [том 1], 17-20 сентября, Таганрог. – Москва: ГЕОС, 2012. - 370 с. - С. 278 – 281. - ISBN 978-5-89118-582-1.
8. Сверхширокополосные акустические линии задержки / С.Г. Сучков, В.П. Камишкерцев, **И. Г. Свечников** // Физическая акустика. Нелинейная акустика. Распространение и дифракция волн. Акустоэлектроника. Геоакустика : сб. тр. науч. конф. / Сессия научного совета РАН по акустике и XXV сессия РАО [том 1], 17-20 сентября, Таганрог. – Москва: ГЕОС, 2012. - 370 с. - С. 281 – 284. - ISBN 978-5-89118-582-1.
9. Сучков, С.Г. Особенности проектирования сверхширокополосных акустических линий задержки / С.Г. Сучков, В.П. Камишкерцев, А.А. Сергеев, В.К. Семенов, **И.Г. Свечников**, Е.И. Куликова, М.А. Чуриков // Тезисы докладов юбилейной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 70-летию ФГУП «НПП «Исток», 17-18 апреля, Фрязино, 2013. - С. 25-26.

Подписано к печати 22.11.2013 года. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,25 Тираж 100 экз. Заказ № 283-Т

Отпечатано в типографии СГУ
Саратов, Большая Казачья 112-а
Тел. (8452) 27-33-85