

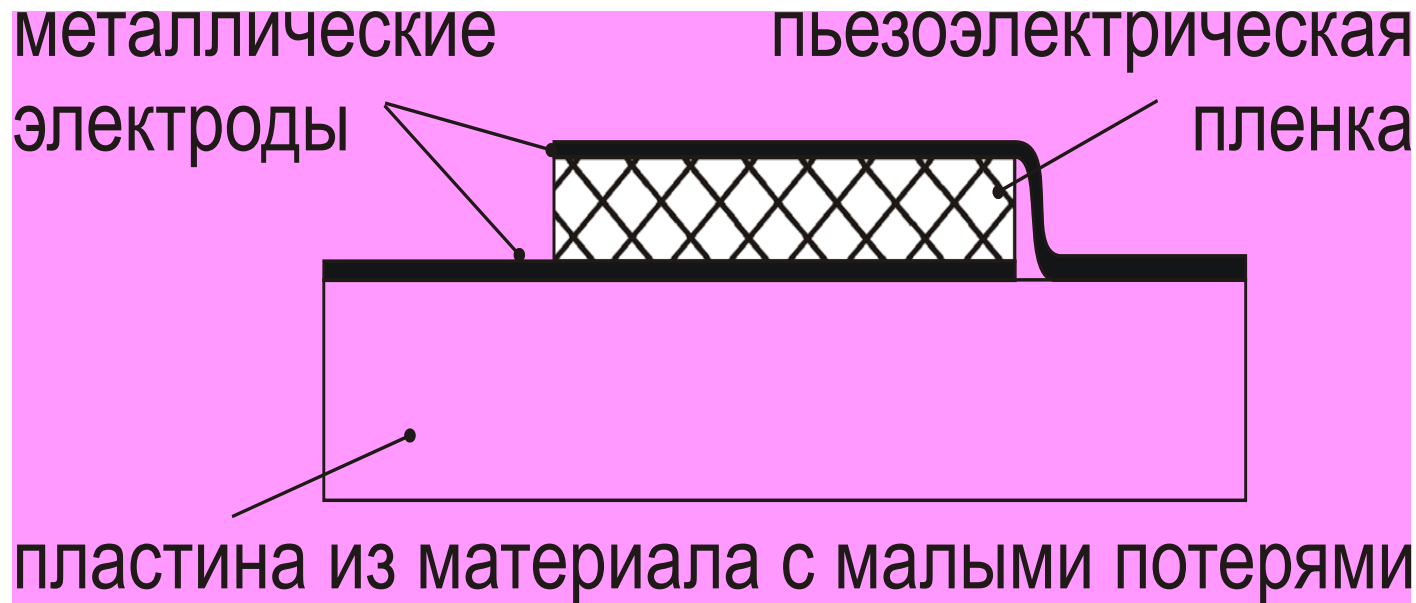
**Разработка метода акустической резонансной СВЧ
спектроскопии для исследования физических
механизмов вязкоупругих и диэлектрических потерь
в тонких слоях и пленках пьезоэлектриков,
диэлектриков и металлов**

Руководитель проекта – заведующий кафедрой
твердотельной электроники и радиофизики,
академик Ю.В.Гуляев

Ответственный исполнитель – профессор кафедры,
д.ф.- м.н. Г.Д. Мансфельд

Тонкопленочные акустические резонаторы СВЧ

Акустический аналог резонатора Фабри -Перо



$$\alpha_d d \ll \alpha_t t$$

Поглощение в пластине кристалла много меньше поглощения в слое пьезоэлектрика

Для пленки ZnO и частоты 3ГГц $d = 1$ МКМ

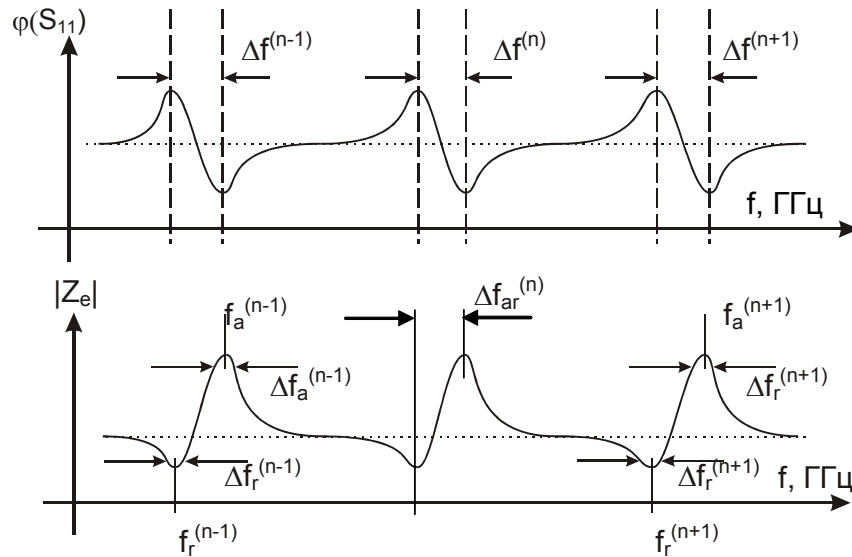
План экспериментальных и теоретических работ по проекту в 2007 году

1-2 кв. Развитие экспериментальных методик измерения акустических параметров тонких слоев и пленок. Измерение поглощения в основных кристаллографических направлениях в новом перспективном пьезоэлектрическом материале – в монокристаллах лангата, в пленках металлов и пьезоэлектриков. Выявление и объяснение основные физические механизмов вязкоупругих и диэлектрических потерь. (две публикации, доклад на конференции) ;

2-4 кв. Нахождение оптимальные конфигурации образцов для изучения частотных зависимостей коэффициентов поглощения в тонких слоях и пленках, позволяющие избежать ошибок при СВЧ измерениях. Формулирование окончательных выводов и предложений относительно возможностей и преимуществ разработанного метода акустической спектроскопии тонких слоев и пленок. Предложения о возможности создания резонаторов для систем навигации и телекоммуникаций (две публикации, два доклада на конференции) ;

Упрощенный метод резонансной СВЧ спектроскопии

Идея метода – коэффициент поглощения находится из измеренных частот особенностей на частотных зависимостях модуля импеданса и фазы коэффициента отражения ЭМВ от резонатора или разности между частотами резонанса и антирезонанса



$$\frac{\Delta f^{(n)}}{f_n} = \sqrt{\frac{K_{\text{эфф}}^4(n) \omega_n^2 C_0^2 R_{50}^2}{(1 + \omega_n^2 C_0^2 R_{50}^2)^2} + \frac{1}{Q_n^2}}$$

$$\frac{\Delta f_{ar}^{(n)}}{f_n} = \sqrt{\frac{K_{\text{эфф}}^4(n)}{4} + \frac{1}{Q_n^2}}$$

$$\Delta f(n) = Q_n / f_n$$

$$\alpha_n(1/\text{мкс}) = \pi \cdot f(n)(\text{МГц})$$

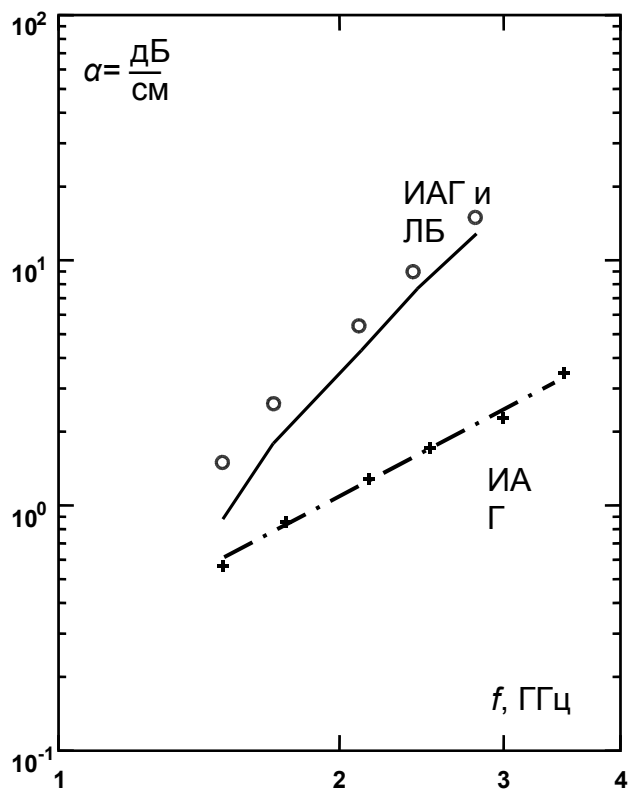
Схема резонаторной структуры для измерения акустических параметров тонких пленок



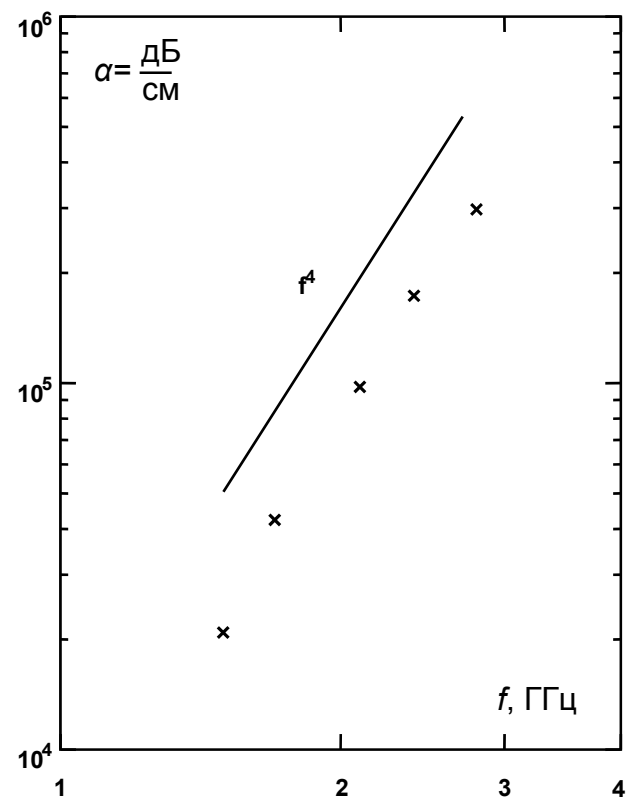
Результаты эксперимента

Материал	Скорость звука (км/с)	Коэффициент погашения на 1 ГГц (дБ/мкм)	Акустический импеданс, 10^6 кг/м ² с
Алюминий			17.33
1. Магнетронное распыление	$v_L = 6.40 \pm 0.01$	$\alpha_L = (6.0 \pm 1.0) 10^{-2}$	
2. Термическое испарение	$v_T = 3.05 \pm 0.01$	$\alpha_T = (5.2 \pm 1.0) 10^{-2}$	
Вольфрам	5.23 ± 0.01	$(1.0 \pm 0.2) 10^{-3}$ экстраполяция с 2.5–4 ГГц	101
Молибден	$v_L = 6.43 \pm 0.01$ $v_T = 3.42 \pm 0.01$	$\alpha_L = (1.4 \pm 0.3) 10^{-3}$ $\alpha_T = (2.2 \pm 0.3) 10^{-2}$	63
Титан	$v_L = 6.30 \pm 0.01$	$(7.1 \pm 2.0) 10^{-3}$	27

Результаты эксперимента



Измеренные частотные зависимости поглощения в пластине ИАГ (штрих-пунктир) и в той же пластине с нанесенной на ее поверхность пленкой Ленгмюра – Блоджетт



Частотная зависимость поглощения в пленке Ленгмюра – Блоджетт.

СПИСОК
исполнителей по проекту «Разработка метода акустической резонансной СВЧ спектроскопии
для тонких слоях и пленках пьезоэлектриков, диэлектриков и металлов»

№ п/п	ФИО	Должность	Ученая степень, ученое звание, почетное звание	Дата рождения
1.	Гуляев Юрий Васильевич	Заведующий кафедрой.	Д.ф.-м.н., профессор, академик РАН	18.09.1935
2.	Бугаев Александр Степанович	Заведующий кафедрой.	Д.ф.-м.н., профессор, академик РАН	25.08.1947
3.	Мансфельд Георгий Дмитриевич	Заместитель заведующего кафедрой	Д.ф.-м.н., профессор, засл. деятель науки и техники РФ	11.09.1940
4.	Котелянский Иосиф Моисеевич	Заведующий лабораторией	Д.т.н.	11.10.1940
5.	Алексеев Сергей Георгиевич	Старший научный сотрудник	К.ф.-м.н.	16.09.1976
6.	Ползикова Наталья Ивановна	Старший научный сотрудник	К.ф.-м.н.	10.01.1954
7.	Балабанов Дмитрий Евгеньевич	Доцент	К.т.н.	15.07.1961
8.	Шарапова Татьяна Ивановна	инженер	-	09.11.1955
9.	Кучерявая Елена Спартаковна	инженер	-	09.09.1956
10	Пятайкин Иван Иванович	Научный сотрудник	-	02.01.1972
11	Сергеев Федор Олегович	студент	-	23.02.1986
12	Любовин Николай Юрьевич	студент	-	20.06.1984
13	Нагирный Вячеслав Павлович	студент	-	10.07.1986

№	Название индикатора	Выполнено 2006 г.	Выполнено 2007 г.	Всего
И 1	Количество публикаций в ведущих научных журналах, содержащих результаты исследований научного коллектива по проекту (в единицах)	4	4	8
	Количество публикаций, изданных в 2005 году, в ведущих научных журналах, содержащих результаты исследований, полученных этим коллективом до выполнения проекта (в единицах)	3		
	Отношение количества публикаций в ведущих научных журналах, содержащих результаты исследований научного коллектива по проекту, к количеству публикаций, изданных в 2005 году, в ведущих научных журналах, содержащих результаты исследований, полученных этим коллективом до выполнения проекта (в процентах)	133	133	266
И 2	Число модернизированных и разработанных новых учебных программ высшего и послевузовского профессионального образования (в единицах)	2	1	3
И 3	Количество диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, защищенных в рамках выполнения проекта (е единицах)		1	1
	Количество диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, защищенных в рамках выполнения проекта (е единицах)			
Д 1	Количество подготовленных (изданных) монографий (в единицах)			
Д 2	Количество подготовленных (изданных) учебников, учебных пособий и других учебно-методических изданий (в единицах)	1		1
Д 3	Количество планов учебников, учебных пособий и других учебно-методических изданий (в единицах)	1	1	2

И1. Публикации (статьи, монографии), участие в конференциях, семинарах, выставках

Статьи, направленные в печать в 2007 г. . по результатам исследований 2007 г

1. Г.Д.Мансфельд, С.Г.Алексеев, Н.И.Ползикова Эквивалентная электрическая схема составного акустического резонатора СВЧ диапазона. Акустический журнал, т.54, №2, принято к печати.
2. С.Г. Алексеев, Г.Д. Мансфельд, И.М.Котелянский, Механизмы потерь в составных акустических СВЧ резонаторах на основе монокристаллического сапфира, Радиотехника и Электроника, 2007, т.53, принято к печати.
3. С.Г. Алексеев, Г.Д. Мансфельд, Простой способ измерения добротности и затухания в акустических резонаторах Радиотехника и Электроника, 2007, т.53, принято к печати.
4. С.Г. Алексеев, Г.Д. Мансфельд, Н.И.Ползикова Простые способы измерения константы электромеханической связи тонких пьезоэлектрических пленок. Радиотехника и Электроника, 2007, т.53, принято к печати.

И2. Число модернизированных и разработанных новых учебных программ высшего и послевузовского профессионального образования - 3
Программы курса «Физика твердого тела» - 2007г.,
курса «Твердотельная волновая электроника» - 2006г.,
курса «Акустические методы исследования твердых тел»
- 2006г.

Д3. Количество **планов** учебников, учебных пособий и других учебно-методических изданий - 2
Методическое пособие Дополнение к Лабораторной работе №1, «Затухание акустических волн в кристаллах»
Методическое пособие к курсу Твердотельная волновая электроника, «Принципы и приборы СВЧ акустоэлектроники»

Ведомость соответствия научно технических результатов работ
по проекту №2.1.1.4675 требованиям Задания

№ этапа	Запланированные научно-технические результаты	Полученные научно-технические результаты	Соответствие результатов требованиям Задания
1 этап	<p>Развитие теории резонансной спектроскопии применительно к изучению акустических свойств новых акустических материалов, тонких слоев и пленок. Подготовка к публикации двух печатных работ и доклада на конференцию</p>	<p>Развита теория резонансной спектроскопии применительно к изучению акустических свойств новых акустических материалов, тонких слоев и пленок. Подготовлены к публикации две печатные работы и доклад на конференцию</p>	Соответствует
2 этап	<p>Будут обоснованы основные процедуры, облегчающие измерения ширины спектральной линии и получены формулы удобные для нахождения значения коэффициентов поглощения звука в тонких слоях и пленках. Начато создание компьютерной автоматизированной системы сбора и обработки данных на основе новых измерительных процедур. Подготовка к публикации не менее 4-х печатных работ и трех докладов на конференции Включение в программу курса лекций «Твердотельная волновая электроника тела» и в описание лабораторной работы «Поглощение акустических волн в твердых телах» нового метода измерений</p>	<p>Обоснованы основные процедуры, облегчающие измерения ширины спектральной линии и получены формулы удобные для нахождения значения коэффициентов поглощения звука в тонких слоях и пленках. Начато создание компьютерной автоматизированной системы сбора и обработки данных на основе новых измерительных процедур. Подготовлены к публикации 4 печатные работы и три доклада на конференции. Включен в программу курса лекций «Твердотельная волновая электроника тела» и в описание лабораторной работы «Поглощение акустических волн в твердых телах» новый метод измерений</p>	Соответствует

Ведомость соответствия научно технических результатов работ по проекту №2.1.1.4675 , требованиям
Задания

№ этапа	Запланированные научно-технические результаты	Полученные научно-технические результаты	Соответствие результатов требованиям Задания
3 этап	<p>Развитие экспериментальных методик измерения акустических параметров тонких слоев и пленок. Измерение поглощения в основных кристаллографических направлениях в новом перспективном пьезоэлектрическом материале – в монокристаллах лангатата, в пленках металлов и пьезоэлектриков. Будут выявлены и объяснены основные физические механизмы вязкоупругих и диэлектрических потерь.</p>	<p>Развиты экспериментальные методики измерения акустических параметров тонких слоев и пленок. Измерено поглощение в основных кристаллографических направлениях в новом перспективном пьезоэлектрическом материале – в монокристаллах лангатата, в пленках металлов и пьезоэлектриков. Выявлены и объяснены основные физические механизмы вязкоупругих и диэлектрических потерь.</p>	Соответствует
4 этап	<p>Будут найдены оптимальные конфигурации образцов для изучения частотных зависимостей коэффициентов поглощения в тонких слоях и пленках, позволяющие избежать ошибок при СВЧ измерениях. Будут сформулированы окончательные выводы и предложения относительно возможностей и преимуществ разработанного метода акустической спектроскопии тонких слоев и пленок.</p>	<p>Найдены оптимальные конфигурации образцов для изучения частотных зависимостей коэффициентов поглощения в тонких слоях и пленках, позволяющие избежать ошибок при СВЧ измерениях. Сформулированы окончательные выводы и предложения относительно возможностей и преимуществ разработанного метода акустической спектроскопии тонких слоев и пленок.</p>	Соответствует

В результате проведенной работы в целом (Информационная карта):

-Развита общая **методология** использования акустической резонансной СВЧ спектроскопии для исследования физических механизмов вязкоупругих и диэлектрических потерь в тонких слоях и пленках пьезоэлектриков, диэлектриков и металлов, включающая использование совокупности теоретических методов анализа и широкого набора экспериментальных методик, применимым к решению конкретных задач.

-Созданы **теоретические подходы** к анализу работы составных резонаторных структур: 1. Получено общее выражение, описывающее базовую резонаторную структуру и позволяющее по результатам экспериментов находить коэффициент поглощения в материале относительно толстой подложки; 2. Развита двухслойная модель позволяющая по результатам экспериментов находить коэффициент поглощения в тонких слоях и пленках. 3. Развита теория, описывающая потери энергии в резонаторной структуре за счет возбуждения пластинчатых мод.

-Предложены **три метода** определения ширины полосы пропускания резонансных акустических структур. Величины коэффициентов затухания, полученные при использовании этих методов совпадают друг с другом.

-Установлены **две ранее неизвестных закономерности**: 1. Разница между частотами резонанса и антирезонанса в акустическом резонаторе зависит не только от константы электромеханической связи, но и от коэффициента затухания энергии акустических волн в структуре; 2. Разница между частотами экстремумов на частотной зависимости фазы коэффициента отражения электромагнитной волны от резонатора зависит от константы электромеханической связи, коэффициента затухания энергии акустических волн в структуре и известного импеданса радиочастотного тракта. Уравнения, описывающие эти закономерности, позволяют найти из данных эксперимента величину коэффициента поглощения и константу электромеханической связи пьезоэлектрической пленки.

-В работе созданы, теоретически описаны и использованы при измерениях **две модели** составного резонатора – преобразователь - толстая подложка и структура – преобразователь+ толстая подложка как один слой и тонкий слой исследуемого материала.

-Развиты: **методика** обработки массива экспериментальных данных, позволяющая свести процедуру измерений к нахождению полосы пропускания простого эквивалентного электрического колебательного контура; экспериментальная **методика** нахождения поглощения в тонких слоях и пленках.

-Получены: **полный набор компонент тензора вязкости монокристаллов лангата; набор данных о коэффициентах поглощения в пленках металлов и пьезоэлектриков, используемых в электронике.**

-**Выработаны рекомендации** по: выбору частоты для устранения ошибок, обусловленных возбуждением пластинчатых мод и дифракционных потерь; по выбору частоты, при которой возможно одновременное измерение коэффициента затухания и константы электромеханической связи.

-Подана заявка на **патент РФ**

Информационная карта о научно-технических результатах работ по
проекту № 2.1.1.4675

№	п п Полученные научные результаты	Количество, шт.				
		1 этап	2 этап	3 этап	4 этап	Всего
1	Концепция					
2	Методология				1	1
3	Теория (теоретические основы, положения)	1	1		1	3
4	Метод, способ		2		1	3
5	Закономерность, зависимость				2	2
6	Модель	1			1	1
7	Принцип (правило, гипотеза)					
8	Научно-методический подход					
9	Методика			1		1
10	Базы данных, программы, алгоритмы					
11	Анализ, обобщение (сбор данных)			1	1	2
12	Рекомендации, предложения		1		1	2

Актуальность исследований

Основные современные задачи – это повышение рабочей частоты высокочастотных резонаторов до 10 ГГц и расширение полосы пропускания фильтров с десятков до сотен МГц при малых размерах устройств (сотни мкм)

Области использования резонаторов и фильтров на ОАВ

При создании и совершенствовании:

- малогабаритных генераторов и фильтров для техники связи, глобальных систем сотовой связи;
- СВЧ РЕЗОНАТОРОВ, СОВМЕСТИМЫХ С МАЛОГАБАРИТНЫМИ АТОМНЫМИ ЧАСАМИ;
- малогабаритных систем и приборов навигации, глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС (GPS);
- международной космической поисково-спасательной системы КОСПАС-SARSAT и ее дальнейшее развитие;
- устройств и систем для ракетно-космических программ;
- устройств для вооружений высокой точности.